

分类号: X171.5

单位代码: 10363

秘 级: 公开

学号: 2220630104

给水处理系统中轮虫的存活动态及其  
氧化灭活实验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE ACTIVITY DYNAMICS OF  
ROTIFERS AND THEIR OXIDATIVE INACTIVATION IN  
WATER TREATMENT SYSTEMS

学生姓名: 秦璇

指导教师: 徐晓平 (教授)

专 业: 环境科学与工程

研究方向: 城市水资源与水环境

论文答辩日期: 2025.5.10

## 安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：秦璇

日期：2025 年 5 月 16 日

## 安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密□，在 \_\_\_\_ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密☑。

学位论文作者签名：

秦璇

日期：2025 年 5 月 16 日

指导教师签名：

徐晓平

日期：2025 年 5 月 16 日

# 给水处理系统中轮虫的存活动态及其氧化灭活实验研究

## 摘 要

给水处理系统中，无脊椎动物的存在会带来一系列潜在风险，可能对水质安全和处理工艺的稳定性产生不利影响。水厂中无脊椎动物丰度过高可能会增加水处理工艺的负担，影响混凝和过滤等单元的处理效果。此外，无脊椎动物及其代谢产物可能成为消毒副产物的前体物质，增加消毒过程中三卤甲烷等有害物质的生成概率，进而影响出水水质的化学安全性。轮虫是给水处理系统中种类最多、数量最大的无脊椎动物种类。了解轮虫存活动态规律和有效控制去除轮虫是确保水质安全的重要环节。为探明给水处理系统中轮虫的滋生规律及其氧化灭活效果，本文以我国华东地区某水厂为研究对象，在水厂进水和砂滤池进出水处设置采样点，开展了为期一年的水质监测和轮虫丰度调查及种类鉴定工作，并对轮虫丰度和环境因子的关系进行分析。同时，选择淡水湖泊中常见的角突臂尾轮虫为受试生物，研究了不同浓度、pH、藻密度、浊度和温度以及与混凝联用条件下，氯胺对轮虫的氧化灭活和去除效果，分析了轮虫应对氧化损伤的抗氧化应激机制，旨在为给水处理系统中轮虫滋生的有效控制提供理论依据和实践参考。主要研究结果如下：

(1) 一年中，水厂中轮虫丰度总体呈现春夏季高、秋冬季低的特点。在水厂进水中，轮虫丰度的全年平均值为  $54.83 \times 10^3 \text{ ind./m}^3$ ，全年共检出 34 种轮虫，其中优势种主要为龟甲轮虫 (*Keratella*) 和臂

尾轮虫 (*Brachionus*), 占比达到 45% 以上; 经过混凝沉淀单元后, 轮虫丰度降低至  $7.72 \times 10^3 \text{ ind./m}^3$ , 优势种为单趾轮虫 (*Monostyla*) 和腔轮虫 (*Lecane*); 在砂滤池出水中, 轮虫丰度进一步减少为  $1.85 \times 10^3 \text{ ind./m}^3$ , 优势种为单趾轮虫, 与水厂进水相比轮虫平均丰度降低约 97%。常规工艺显著降低了轮虫在给水处理系统中的丰度, 但仍有潜在的安全隐患。

(2) 水厂中温度、溶解氧、高锰酸盐指数、叶绿素 a 和细菌总数等指标在不同采样点全年变化幅度明显。其中, 采样点温度与轮虫丰度呈现极显著正相关 ( $p < 0.01$ ); 溶解氧与轮虫丰度为显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 砂滤出水中细菌总数与轮虫丰度呈显著正相关 ( $p < 0.05$ )。冗余分析 (RDA) 结果表明在砂滤池出水处的各种水质参数中, 细菌总数、总氮是影响轮虫丰度变化的主要因素。

(3) CT 值能较好地反映氯胺对角突臂尾轮虫的灭活效果。氯胺对轮虫的灭活动力学特征与消毒剂浓度密切相关; 随着浓度的增大, 氯胺灭活轮虫动力学中的迟滞现象消失。碱性条件有助于提高氯胺对轮虫的灭活效果; 适当降低藻密度, 降低浊度有助于提高氯胺对轮虫的灭活效果; 高温 ( $30^\circ\text{C}$ ) 有利于提高氯胺对轮虫的灭活效果。

(4) 氯胺氧化对角突臂尾轮虫的灭活作用与其体内抗氧化系统及氧化损伤水平密切相关。当轮虫暴露于  $0.15 \text{ mg/L}$  氯胺时, 轮虫体内丙二醛含量和超氧化物歧化酶活性均随着氧化时间增加而升高。表明轮虫通过增强抗氧化能力以应对氧化胁迫。进一步实验研究表明, 氯胺预氧化与混凝联用工艺可显著提升轮虫去除效率, 与单独混凝时

16%~51%的轮虫去除率相比，联用工艺对轮虫的去除率可提高至43%~70%。但沉淀时间的延长不利于对轮虫的去除。

**关键词：**给水处理系统，轮虫，水质参数，氯胺，氧化灭活

# **EXPERIMENTAL STUDY ON THE ACTIVITY DYNAMICS OF ROTIFERS AND THEIR OXIDATIVE INACTIVATION IN WATER TREATMENT SYSTEMS**

## **ABSTRACT**

In water treatment systems, the presence of rotifers and other invertebrates may pose a series of potential risks, which could adversely affect water quality safety and the stability of the treatment processes. Excessively high abundance of invertebrates in water treatment plants may increase the operational burden on water treatment processes, impairing the efficiency of key units such as coagulation and filtration. Furthermore, invertebrates and their metabolic byproducts may act as precursors for disinfection byproducts, elevating the risk of harmful substances like trihalomethanes (THMs) formation during disinfection, thereby compromising the chemical safety of treated water. Among invertebrates, rotifers are the most diverse and abundant group in water treatment systems. Consequently, understanding the survival dynamics of rotifers and implementing effective control measures are critical to ensuring water quality safety in drinking water treatment systems. To investigate the proliferation patterns of rotifers and their oxidative inactivation efficiency

in water treatment systems, this study focused on a water treatment plant in East China. Sampling points were set at the water intake of the plant and the influent and effluent of the sand filter. A one-year water quality monitoring and rotifer abundance survey were conducted, along with species identification. The relationship between rotifer abundance and environmental factors was analyzed. Additionally, *Brachionus angularis*, a common rotifer species in freshwater lakes, was selected as the test organism to evaluate the inactivation efficacy of chloramine on rotifers and its influencing factors. Experiments investigated the oxidative inactivation and removal efficiency of chloramine under varying conditions (concentration, pH, algal density, turbidity, temperature) and in combination with coagulation. The antioxidant stress response mechanisms of rotifers against oxidative damage were also analyzed, aiming to provide theoretical and practical insights for effective rotifer control in drinking water systems. The main findings are as follows:

(1) Throughout the year, rotifer abundance in the water treatment plant demonstrated seasonal variation with higher levels in spring/summer and lower levels in autumn/winter. The annual average rotifer density in plant influent reached  $54.83 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>, with 34 rotifer species identified. Dominant species *Keratella* and *Brachionus* collectively accounted for over 45% of total abundance. Following coagulation-sedimentation, rotifer density decreased to  $7.72 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>, with *Monostyla* and *Lecane*



becoming predominant. In sand filter effluent, density further reduced to  $1.85 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>, dominated by *Monostyla*. Compared with influent, conventional treatment achieved approximately 97% reduction in average rotifer abundance, though residual risks remained.

(2) Environmental parameters including temperature, dissolved oxygen (DO), permanganate index, chlorophyll-a, and total bacterial count exhibited significant seasonal variations across sampling points. Temperature showed a highly significant positive correlation with rotifer abundance ( $p < 0.01$ ), while DO demonstrated a significant negative correlation ( $p < 0.05$ ). Total bacterial count in sand filter effluent displayed significant positive correlation with rotifer abundance ( $p < 0.05$ ). Redundancy Analysis (RDA) results demonstrated that among various water quality parameters in the sand filter effluent, total bacterial count and total nitrogen were the key factors affecting rotifer abundance variation.

(3) The *CT* value effectively reflected the chloramines-induced inactivation efficacy on *B. angularis*. The disinfection kinetics of chloramines against rotifers exhibited a strong correlation with disinfectant concentration: the lag phase in inactivation kinetics disappeared with increasing concentration. Alkaline conditions enhanced chloramines-mediated *B. angularis* inactivation, while reducing algae density and turbidity further contributed to improved inactivation efficiency. Elevated temperature (30°C) also significantly promoted the inactivation efficacy of

chloramines on *B. angularis*.

(4) Chloramine-induced inactivation correlated closely with rotifers' antioxidant system and oxidative damage levels. Exposure to 0.15 mg/L chloramine triggered time-dependent increases in malondialdehyde (MDA) content and superoxide dismutase (SOD) activity, indicating enhanced antioxidant responses to oxidative stress. Pre-oxidation with chloramine coupled with coagulation improved rotifer removal efficiency from 16-51% (coagulation alone) to 43-70%. However, extended sedimentation time negatively affected removal efficiency.

**KEY WORDS:** water supply treatment system, rotifer, water quality parameters, chloramine, oxidative inactivation

## 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 摘 要.....                    | I  |
| ABSTRACT.....               | IV |
| 第 1 章 绪 论.....              | 1  |
| 1.1 研究背景.....               | 1  |
| 1.2 国内外研究现状.....            | 3  |
| 1.2.1 无脊椎动物在给水处理系统中的分布..... | 3  |
| 1.2.2 给水处理系统中无脊椎动物的控制.....  | 5  |
| 1.2.3 氯消毒剂对无脊椎动物的灭活.....    | 6  |
| 1.3 轮虫的生物学特征及应用研究.....      | 7  |
| 1.4 研究内容和意义.....            | 9  |
| 1.4.1 研究意义.....             | 9  |
| 1.4.2 研究内容.....             | 10 |
| 1.4.3 技术路线.....             | 11 |
| 第 2 章 实验材料与方法.....          | 12 |
| 2.1 实验材料与仪器.....            | 12 |
| 2.2 实验方法.....               | 14 |
| 2.2.1 给水处理系统中轮虫的存活动态.....   | 14 |
| 2.2.2 氧化灭活试验.....           | 15 |
| 2.2.3 氧化应激试验.....           | 17 |
| 2.2.4 预氧化与混凝联用去除轮虫试验.....   | 17 |
| 2.3 数据处理.....               | 18 |
| 第 3 章 给水处理系统中轮虫的存活动态.....   | 20 |
| 3.1 给水处理系统中水质参数的变化.....     | 20 |
| 3.1.1 理化指标分析.....           | 20 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 3.1.2 生物指标分析.....              | 22 |
| 3.2 给水处理系统中轮虫种类的组成.....        | 22 |
| 3.2.1 水厂进水处轮虫种类的组成.....        | 23 |
| 3.2.2 给水处理系统构筑物中轮虫种类组成.....    | 25 |
| 3.2.3 给水处理系统中轮虫相似性分析.....      | 26 |
| 3.3 给水处理系统中轮虫丰度变化与环境因子的关系..... | 27 |
| 3.3.1 轮虫丰度在时间空间上的变化.....       | 27 |
| 3.3.2 给水处理系统中轮虫丰度与环境因子关系.....  | 30 |
| 3.4 讨论.....                    | 35 |
| 3.5 小结.....                    | 36 |
| 第 4 章 氯胺对角突臂尾轮虫的氧化灭活实验研究.....  | 38 |
| 4.1 氯胺对角突臂尾轮虫灭活效果及反应动力学.....   | 38 |
| 4.1.1 CT 值对氯胺灭活轮虫效果的影响.....    | 38 |
| 4.1.2 pH 对氯胺灭活轮虫效果的影响.....     | 41 |
| 4.1.3 藻密度对氯胺灭活轮虫效果的影响.....     | 42 |
| 4.1.4 浊度对氯胺灭活轮虫效果的影响.....      | 44 |
| 4.1.5 温度对氯胺灭活轮虫效果的影响.....      | 46 |
| 4.2 氯胺灭活对角突臂尾轮虫氧化应激效应的影响.....  | 47 |
| 4.2.1 氯胺灭活对轮虫氧化应激的影响.....      | 48 |
| 4.3 氯胺预氧化和混凝联用对轮虫去除效果研究.....   | 49 |
| 4.3.1 预氧化和混凝联用轮虫去除效果研究.....    | 49 |
| 4.3.2 轮虫去除率与混凝有关参数的相关关系.....   | 50 |
| 4.4 讨论.....                    | 51 |
| 4.5 小结.....                    | 54 |
| 第 5 章 结论与展望.....               | 55 |
| 5.1 研究结论.....                  | 55 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| 5.2 研究展望.....        | 56 |
| 参考文献.....            | 57 |
| 攻读学位期间发表的学术论文目录..... | 64 |
| 致谢.....              | 65 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景

饮用水安全直接关系到公共健康和社会稳定。根据世界卫生组织（WHO）的统计，全球近三成的人口无法获取符合安全标准的饮用水，这一现状不仅严重影响其基本生活质量，更会引发水源性疾病的持续蔓延，加剧贫困地区的健康不平：全球约 80%的疾病都是由饮用水污染造成的，未达标的饮用水可能导致 50 多种疾病，其中每年全球约有 50.2 万人因污染的饮用水感染痢疾而死亡<sup>[1]</sup>。据国家环保部门统计，我国城镇生活饮用水水源中，超过一半存在较重污染问题。数据显示，约 57%的城市饮用水源水质不达标。因此，保障饮用水安全已经成为全球共同面临的重要任务<sup>[2]</sup>。

目前饮用水污染带来的健康问题主要包括化学中毒和微生物污染<sup>[3, 4]</sup>。引起饮用水污染的化学物质主要为重金属离子和有机污染物。重金属具有不可生物降解的特性，饮用水中重金属污染已经成为威胁人类健康的全球性风险<sup>[5, 6]</sup>。人体内必需金属（Zn、Cu 和 Fe 等）含量过高时可能产生毒性，非必需金属（As、Hg、Pb、Cd 和 Cr 等）低浓度也可能产生毒性<sup>[7-10]</sup>，目前 Cr 由于具有持久性和不可逆毒性的特征，已经被美国环境署（USEPA）列为优先控制污染物<sup>[11]</sup>。饮用水中有机物污染来源包括自然源和人为源，其中家庭、农业和工业排放物都会导致有机污染<sup>[12, 13]</sup>。这些排放物及其代谢产物通常具有持久性、高毒性的特点，可以在水体中长时间存在。不仅能降低水中的溶解氧，威胁水生生物生长和生存，还能通过其生物积累和生物放大对水生和陆地生态系统产生级联效应。近年来，新型有机污染物也成为十分严峻的问题，它们广泛存在于地表水源与沉积物中，长时间暴露时会对水生生物的健康和生态环境产生不利影响<sup>[14, 15]</sup>。饮用水中微生物污染的主要来源来自人类和动物的粪便，包括病原菌、病毒、原生动物和蠕虫等<sup>[16]</sup>。然而，这些病原体也可以通过各种其他途径和来源进入饮用水，包括可能携带粪便（人类和动物）来源病原体的其他水体、污水处理厂产生的污水（例如，上游工厂的排放物）、城市和农业地区的地表径流以及下水道系统的污水溢流<sup>[17]</sup>。根据美国疾病控制预防中心监控的报告数据发现，从 1970-2010 年间因致

病微生物引起的水源性疾病爆发事件占比达到 44%，而由化学污染引起的水源性疾病事件占总比例的 12%，其余为无法确定具体原因的事件。因此，微生物污染带来的饮用水安全问题亟待解决。

目前我国水资源供需矛盾问题日益严重，水资源污染形势不容乐观<sup>[18,19]</sup>。随着城市发展的加快，除了水源性缺水，许多地区出现了水质型缺水的问题。氮磷含量较高的工业废水和生活废水直接排放，以及农业施肥带来的地表水径流污染，这些问题导致氮磷等营养物质过量进入水体，使得河湖水质逐渐恶化，对城市饮用水处理厂的净化带来了极大的难度<sup>[20]</sup>。当有机物含量过高的水体进入水厂时，净水工艺对有机物的去除率不到 20%<sup>[21]</sup>。针对这种情况，有学者通过改善混凝工艺来提高水厂有机物的去除效；另外臭氧-生物活性炭处理工艺的快速发展，不仅加强了对有机物的去除效果，还提高了对部分重金属如铅、锰的去除率<sup>[22]</sup>。虽然不同的给水处理系统对重金属和有机物的去除都有一定提升，但对微生物的去除却不显著，尤其是无脊椎动物<sup>[23,24]</sup>。

无脊椎动物及其代谢物是水中内源性有机碳的主要来源，也是消毒副产物的重要前体物质<sup>[25]</sup>。有研究表明，无脊椎动物可以在颗粒活性炭（GAC）过滤器中大量繁殖，从而影响给水处理系统的效率<sup>[26]</sup>。因此，无脊椎动物在饮用水网络中的存在与季节变化有关，其过度繁殖会导致潜在的污染问题<sup>[27]</sup>。饮用水中的无脊椎动物除了影响人类健康外，还可能为病原微生物提供庇护所，进一步影响饮用水水质安全<sup>[28]</sup>。例如，线虫（蛔虫、钩虫等）能通过捕食携带沙门氏菌、志贺氏菌以及柯萨奇病毒，引起传染疾病<sup>[8]</sup>；给水处理系统中数量众多的轮虫和枝角虫也有可能携带霍乱弧菌<sup>[28,29]</sup>。此外，有数据显示水中的无脊椎动物还会影响出水的味道、气味和外观：一些体型较大的无脊椎动物（甲壳类动物、颤虫、红虫等）有时可以用肉眼直接看到，一旦在住宅水中发现，将引起居民对水质安全的怀疑和恐慌。

我国大部分的自来水厂都是以河流、湖泊或水库等地表水源作为水源地，其中存在大量的无脊椎动物，包括线虫、枝角类、桡足类以及轮虫<sup>[30,31]</sup>。在给水处理系统中，大量的无脊椎动物随原水进入公共供水系统并在构筑物中大量繁殖造成严重的出水水质安全问题<sup>[32]</sup>。根据统计，我国某南方城市从 2003 年到 2012 年，每年都会因为城市管网中出现“红虫”而接到大量市民投诉<sup>[33]</sup>。在北方的哈尔滨市

和舒兰市都曾出现过由于剑水蚤在给水处理系统中爆发,影响居民用水体验,甚至水厂不得不暂停供水的事件<sup>[34]</sup>。总的来说,无脊椎动物在供水系统中滋生繁殖的问题是水质管理的重大挑战,需要进一步的研究和监测来应对潜在的风险<sup>[35]</sup>。

之前,人们对给水处理系统中无脊椎动物滋生规律和控制机理的研究,主要集中于水蚤类<sup>[36]</sup>(如剑水蚤、猛水蚤等)和蠕虫类<sup>[37]</sup>(如仙女虫、颤蚓等),较少涉及轮虫,而实际上轮虫是给水处理系统中发现的种类最多、数量最大的一类无脊椎动物<sup>[38]</sup>。轮虫未能引起关注,一是由于轮虫体型相对较小,很多种类难以用肉眼直接观察到,不易引起人们的注意;二是轮虫通常被认为是水质良好的指示生物,对其携带病原微生物的情况还不甚了解。然而,陆续有文献报道了轮虫携带“两虫”等致病微生物的情况<sup>[39]</sup>, Fayer<sup>[40]</sup>等将轮虫投放到含有隐孢子虫(*Cryptosporidium parvum*)卵囊的溶液中,结果在不同种类的轮虫体内均发现了隐孢子虫卵囊; Stott<sup>[41]</sup>等也证实了轮虫能不同程度的摄食隐孢子虫卵囊和贾第鞭毛虫(*Giardia*)卵囊且无法排出。Bichai<sup>[39]</sup>等认为,“两虫”卵囊被轮虫等摄食后,容易被捕食者携带穿透滤池,并可以借助捕食者的保护躲避消毒和灭活工艺,增加了饮用水的生物安全风险。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 无脊椎动物在给水系统中的分布

公共供水系统中包含大量不同种类的无脊椎动物,其中轮虫是种类最多数量最大的无脊椎动物,占总量的 90%以上<sup>[38]</sup>。无脊椎动物在世界各国的水处理系统中都很丰富,已有研究显示给水处理系统中无脊椎动物的密度达到  $38000 \text{ ind./m}^3$  以上,且随温度升高而增加<sup>[27]</sup>。在给水处理系统中,无脊椎动物的迁移和繁殖主要有两种方式,一是在无脊椎动物在水源中产卵繁殖,大量的幼虫和卵进入给水处理系统,二是无脊椎动物在水厂构筑物中产卵繁殖。相关数据显示水源中的甲壳类浮游动物不仅能在配水井中大量繁殖,甚至在反冲洗滤池中也有繁殖<sup>[42]</sup>。值得补充的是砂滤池也能为无脊椎动物的繁殖和生长提供适宜的条件。Adma<sup>[43]</sup>等人曾分别对三个不同水厂中的无脊椎动物进行监测分析,结果发现砂滤池出水中有大量无脊椎动物,其中摇蚊的密度最大达到了  $9 \text{ ind./m}^3$ ,其他的无脊椎动物密度最大达到了  $250 \text{ ind./m}^3$ ,这表明无脊椎动物不仅存在于饮用水系统砂滤池中,



还能穿透砂滤层。更深入的研究表明,由于摇蚊是水陆两栖昆虫,能够让自己的卵或幼体进入给水处理系统的构筑物中,在给水处理系统中,摇蚊的繁殖与发育主要集中于沉淀池,当环境条件适合时,它能够在砂滤池中快速增殖,若种群密度过大就可能突破砂滤层进入清水池中,造成饮用水出水的污染问题<sup>[44]</sup>。同时,在生物活性炭滤池中,由于活性炭具有表面积大且质地粗糙的特点,能够为无脊椎动物繁殖提供良好的条件<sup>[45]</sup>。针对长江下游区域三座饮用水处理系统的监测研究表明,臭氧-生物活性炭工艺存在无脊椎动物的迁移与穿透效应<sup>[46]</sup>。除此之外,由于一些体径较小的无脊椎动物(例如,新孵化的红虫,体长只有 0.1~0.15 mm)能够轻易穿透活性炭层,一些 0.2~0.3 mm 的无脊椎动物由于具有很强的柔韧性也能穿过滤层<sup>[47]</sup>,因此,在清水池中也有可能存在无脊椎动物。目前已有研究发现清水池中的无脊椎动物的总丰度最大能达到 103~104 ind./m<sup>3</sup>,其中轮虫和线虫是优势种,占到无脊椎动物总数的 85.9~100%<sup>[48]</sup>。

除了构筑物中,管网系统中的无脊椎动物问题很早就引起了人们的关注。几乎在所有的管网系统中都有无脊椎动物的检出<sup>[38]</sup>。管网中无脊椎动物来源主要包括四个方面<sup>[49]</sup>:

(1) 配水管网内部自然形成:1928 年荷兰科学家就对供水管网内的生态系统的形成进行了研究和具体描述:首先是细菌繁殖,其次是原生动物产生,最后是小型动物的产生<sup>[38]</sup>。另外,通过对荷兰的 36 家水厂的配水管网内的无脊椎动物的调查的发现,所有管网内都有无脊椎动物检出,此次调查共鉴定出了 15 种无脊椎动物,此后虽然采取了措施来控制管网内的微生物繁殖,但是在调查中依然检出了 12 种无脊椎动物<sup>[50,51]</sup>。

(2) 来自水厂出水的带入:当水厂出水中含有无脊椎动物时,会随之进入管网系统,大部分无脊椎动物为了寻找食物会向管壁和生物膜靠近,其中体积较大的则主要存活在管道底部,而已经死亡的无脊椎动物分布会受到水流流速影响。这些无脊椎动物进入市政管网将会携带大量细菌病毒,有数据显示利用线虫培养可得到 0~27 cfu/ind.大肠杆菌<sup>[52]</sup>。

(3) 来自土壤中的无脊椎动物:在缺氧和避光的情况下,管网会被腐蚀和生锈,水管易发生爆裂和漏水,此时土壤中的无脊椎动物有可能随外界水流进入管网<sup>[53]</sup>。

(4) 二次供水的污染：水箱内的死水区域易发生微生物和虫类的滋生。当二次供水设施维护不当，高位水箱密封性变差将导致无脊椎动物进入水箱。探究无脊椎动物在二次供水网络中的栖息环境以及与水质参数之间的相互作用对于维护二次供水系统的健康和可持续性至关重要<sup>[28]</sup>。

### 1.2.2 给水处理系统中无脊椎动物的控制

现阶段常见的给水处理工艺为：混凝、沉淀、过滤、消毒四个单元，不同单元都能有效改善水质，但在去除无脊椎动物上都有一定局限性，各工艺对无脊椎动物的去除效果受到生物体型大小、运动能力及环境耐受性等多因素影响。混凝沉淀单元是水处理过程中的关键步骤之一，主要通过物理化学作用去除水中的部分无脊椎动物。相关研究表明，混凝沉淀单元对已经失活的无脊椎动物去除效果更好，因为已经死亡的无脊椎动物在矾花上的附着率更高，90%的甲壳类浮游动物死体都能附着在矾花上，能够有效提高沉降速度；清洗沉淀池或者缩短排泥周期也能有效避免无脊椎动物进入后续处理环节<sup>[54]</sup>。

虽然混凝沉淀单元能去除部分无脊椎动物，但是还有一部分能进入后续砂滤单元。目前，针对砂滤工艺的颗粒截留效能，国内外学者开展了大量的研究工作，现在一般认为，提升该工艺效率可通过两种关键途径实现：其一是优选粒径分布合理且均匀性良好的滤料；其二是根据水厂情况调试反冲洗参数。有学者通过研究砂滤环节对颗粒物质的去除效果发现，当滤砂粒径从 0.82 mm 减小为 0.59 mm 时，砂滤对颗粒物质的去除率从 95% 升高到 99%；在滤砂粒径不变的条件下，均匀度为 1.48 时，颗粒物去除率达到 97%，远高于均匀度为 1.42 时的去除率<sup>[55]</sup>。将水厂 V 型滤池反冲洗周期由 48 h 缩短为 24 h，同时将滤池反冲洗时间由 4 min 改为 6 min，结果发现都能有效提高水蚤的去除率，由此可见缩短滤池反冲洗周期和延长滤池反冲洗时间均能提高无脊椎动物的去除效果，不过也增大了水处理的成本<sup>[42]</sup>。深入研究显示，优化活性炭滤池的反冲洗可以减少无脊椎动物，或者是降低活性炭的尺寸，但是经过长期的实验分析后发现当活性炭滤池中无脊椎动物丰度较高时，这些方法还是无法对无脊椎动物的密度产生控制<sup>[56]</sup>。李小伟<sup>[57]</sup>对深圳某水厂调查发现，当臭氧活性炭池连续运行超过 150 d 后，在炭滤池出水中发现大量颤蚓，密度最高时达到 200 ind./m<sup>3</sup>，而经调研哈尔滨市水处理各工艺段发现，活性炭过滤单元内无脊椎动物的优势种群中，桡足类占据主导地位。这可

能是因为水源中的优势种不同或者食物丰度影响了桡足类浮游动物的增长<sup>[54]</sup>。

消毒是给水处理系统中的最后一个单元,不仅能够灭活水中的微生物,还能改善饮用水水质,是保障饮用水生物和化学安全的最终防线。通过进行不同氧化剂对剑水蚤和圆水蚤的灭活实验后发现,二氧化氯灭活的最佳投加量和接触时间分别为 1.5 mg/L、40 min;次氯酸钠灭活的最佳投加量和接触时间分别为 2 mg/L、90 min;而高锰酸钾的灭活效果最差,最佳投加量和接触时间分别为 2 mg/L、50 min<sup>[58]</sup>。有研究发现,接触 1.5 mg/L 次氯酸钠 30 分钟可以完全灭活蓴花臂尾轮虫,温度的升高能提高次氯酸钠对轮虫的灭活效果<sup>[59]</sup>。此外,联合消毒技术可利用各氧化剂间优势互补的关系,把不同类型消毒剂组合使用,达成更安全、高效且快速的消毒效果,进而提升给水处理系统的净水效率。在研究不同消毒剂联合体系对线虫的灭活情况后发现,先加入化学氧化剂再进行紫外线照射,能发挥协同效应,大大提高了线虫的灭活效果,且臭氧、二氧化氯、次氯酸钠与紫外线联合作用时,仅在低剂量下就能达到对线虫的完全灭活效果<sup>[60]</sup>。

### 1.2.3 氯消毒剂对无脊椎动物的灭活

氧化消毒剂由于具有去除效果好、成本低廉、能与其他净水工艺结合等优势,多用于去除给水处理系统中的无脊椎动物。当前,氯化消毒作为全球范围内应用最为广泛且历史最为悠久的工艺手段,在饮用水处理领域,液氯、氯胺及二氧化氯是主流消毒剂选项。从具体使用场景来看,氯消毒剂的使用可以分为两类:第一种方法是预处理阶段投加消毒药剂,通过前置化学氧化作用强化对水生无脊椎动物及其卵体的抑制效果;第二种工艺则是在核心消毒环节采用氧化灭活手段,重点针对无脊椎动物本体及附着的病原微生物进行彻底消杀。在预氧化环节,氯消毒剂能有效提高混凝单元对无脊椎动物的去除效果。张敏<sup>[61]</sup>通过研究不同氧化剂预氧化与混凝单元对剑水蚤的去除效果,发现氧化剂灭活效果由高到低依次为:液氯>氯胺>臭氧>高锰酸钾,而氧化剂对剑水蚤降活能力强弱顺序由高到低为:氯胺>高锰酸钾>液氯>臭氧;预氧化和混凝单元联用可以协同去除剑水蚤,最高能达到 100%的去除率。相较于其他消毒剂在消毒单元的灭活效果,氯消毒剂在消除水源中无脊椎动物方面更有效。例如,氯灭活可以针对饮用水中的特定无脊椎动物,防止其在清水池中存活和繁殖<sup>[27]</sup>。紫外线辐照与氯的联合使用已被证明能有效灭活多种水生病原体,包括无脊椎动物、细菌、病毒和真菌孢子<sup>[62]</sup>。

值得注意的是虽然耐氯无脊椎动物的出现和滋生一直是水处理过程中的一个关注点,但是氯消毒仍然可以有效灭活这些无脊椎动物,从而减少氯消毒副产物的生成并提高对线虫的灭活效<sup>[63]</sup>。

氯胺、液氯、次氯酸钠等氯化消毒过程中会与水中有机物反应产生三氯甲烷、三卤甲烷、四氯化碳、卤乙酸及卤代酚、卤乙腈类等含碳、含氮有机消毒副产物。不同消毒工艺生成的副产物种类及浓度存在显著差异。相较于液氯及次氯酸钠消毒,氯胺消毒工艺出水中三氯甲烷浓度可降低约 50%。其机理在于:液氯与次氯酸钠的主要活性成分为次氯酸( $\text{HOCl}$ ),能够快速与前体物反应生成三卤甲烷;而氯胺需通过水解逐步释放次氯酸,其反应动力学显著减缓,从而有效抑制了三氯甲烷的生成速率与总量<sup>[64]</sup>。有研究者发现,氯胺在灭活桡足类浮游动物的过程中展现出多重优势:氯胺能够减少消毒过程产生的消毒副产物;氯胺可维持管网余氯持久性;同时能有效抑制其携带的病原菌在管网系统中的增殖风险;另外氯胺在水中臭味小,不与酚类物质反应,不会产生氯酚臭味<sup>[65]</sup>。因此,相较于单一液氯消毒工艺,氯胺在安全性和灭活效率上均展现出显著优势<sup>[66]</sup>。相关资料显示,当投加量超过 1.0 mg/L 时,氯胺预氧化对沉淀池出水中无脊椎动物的去除率能达到 90%以上<sup>[67]</sup>,2.0 mg/L 氯胺预氧化联合混凝比单独混凝的除蚤效率提高了 40%<sup>[68]</sup>。进一步研究发现,作用浓度和接触时间是影响氯胺灭活效果的主要因素,如在有效氯浓度为 4 mg/L,  $CT$  值达到 150  $\text{mg}\cdot\text{min}/\text{L}$  时,氯胺对剑水蚤的消毒效率能达到 90%以上,且相同  $CT$  值条件下,较高浓度的有效氯具有更好的灭活效果;随着接触时间的增加,氯胺的灭活效果逐渐提高,持续消毒能力得以体现<sup>[69]</sup>。

### 1.3 轮虫的生物学特征及应用研究

轮虫(Rotifera)是广泛分布于淡水、半咸水及潮湿土壤中的一类滤食性小(微)型动物,一般体长在 100~500  $\mu\text{m}$  之间,种类最小的个体大约在 40  $\mu\text{m}$ ,最大的超过 4000  $\mu\text{m}$ <sup>[70]</sup>。绝大多数轮虫种类的个体都是单独活动或独立固着在沉水植物和其他物体上。轮虫体形一般由头部、躯干和尾三部分组成:轮虫的头部较宽阔通常不与躯干部明显分开,具有头冠和纤毛;躯干是最大的部分,横切面接近圆形,一般腹部面扁平或凹入,背面隆起;足部有的种类自躯干逐渐向后细削,有的则形成较细的圆筒。轮虫内部结构高度特化,具有消化系统、肌肉系统、

神经系统、排泄系统和生殖系统。除此之外，轮虫区别于其他无脊椎动物的三个主要特征为：（1）身体前端存在具有纤毛的头冠区域，有助于轮虫滤食水中的颗粒物质。（2）在口腔或口管下部存在咀嚼囊。（3）排泄系统为一对原肾管，位于假体腔的两侧。这些特征使其成为研究微观生物结构与功能的理想模型。

轮虫是兼行孤雌生殖与有性生殖的典型类群：在环境稳定时，雌体通过非减数分裂孤雌生殖快速增殖，直接产下二倍体卵（不需精卵），这些卵 24 小时内即可孵化出新个体，使得种群能在 7 天内增长千倍；当面临不利外界环境或环境将要发生巨变时部分轮虫将通过减数分裂产生需精卵，未受精的需精卵直接发育为单倍体雄体，雄体不具备消化系统，通常无法进食，游动迅速，生活周期较短一般为 2~3 天；受精的需精卵为休眠卵，体积较大，有较厚的卵壳，壳上有花纹和刺，能够抵御外界不利环境条件，等条件适宜时，休眠卵将再次发育为非混交雌体，进行无性生殖。影响轮虫有性生殖的因素很多，除了轮虫自身的遗传特性，环境温度的变化和食物种类密度被认为是最重要的外界因子<sup>[71]</sup>。有性生殖在一定程度上能抑制轮虫种群繁殖，从而使轮虫能够度过不良环境，有性生殖还能增加轮虫种群遗传多样性，实现基因重组，对维持轮虫种类延续、提高适应能力具有重要意义<sup>[72]</sup>。

轮虫毒理学研究是水环境毒理学中的一个重要领域，在了解各种污染物对水生生物的影响及对水生生态系统的潜在威胁中发挥着重要的作用<sup>[73]</sup>。上世纪 70 年代，轮虫就作为污染物毒性的研究对象进行水环境毒理学研究<sup>[74]</sup>。例如，水环境中的重金属能通过食物链生物累积和放大，从而危害人类健康，有学者观察甲基汞在轮虫体内的代谢后发现，轮虫体内积累的甲基汞很难代谢出体外，同时轮虫肠道中的甲基汞还有可能引起轮虫代谢途径的变化，随后又研究了轮虫在甲基汞胁迫下转录组调控的变化，强调了轮虫对环境污染物的分子响应<sup>[75]</sup>。此外，Li<sup>[76]</sup>等人研究了纳米二氧化钛在水生食物链中的生物累积和生物放大效应，证明了纳米颗粒从藻类到消费者（包括轮虫）的传递过程；Zhao<sup>[77]</sup>探讨了轮虫如何通过微塑料的生物破碎作用加剧全球纳米塑料污染。已有研究证实轮虫群动态与水体环境变化高度耦合，在环境监测、生态评估及污染修复等领域具有独特研究价值，例如有研究发现河流中轮虫的种类和丰度分布受到水中溶解性有机质的影响，揭示了轮虫等浮游动物与其周围环境之间复杂的相互作用<sup>[78]</sup>。

角突臂尾轮虫（*Brachionus angularis*）是臂尾轮虫属的典型代表种，广泛分布于亚热带至温带淡水生态系统，尤其富营养化水体中，是研究轮虫生态适应与功能的重要模式物种<sup>[79,80]</sup>。角突臂尾轮虫背甲前端具有突出的棘刺，足部较长且不分节，具有较密的环形沟纹，能进行伸缩和摆动。角突臂尾轮虫背甲宽阔，具有菱形背甲和双齿型背甲两种不同的类<sup>[81]</sup>。此外，由于角突臂尾轮虫具有体积小，繁殖能力强，对污染物的敏感度较高，易在实验室培养等特点，目前已经是生态毒理学研究的潜在模式生物。例如，角突臂尾轮虫不仅耐受高浓度的重金属，与 Al、Fe、Mn、Zn、Ni 呈正相关<sup>[82]</sup>，还能在体内累积摄入的微塑料，并通过食物链累积，最终威胁人类<sup>[83,84]</sup>。

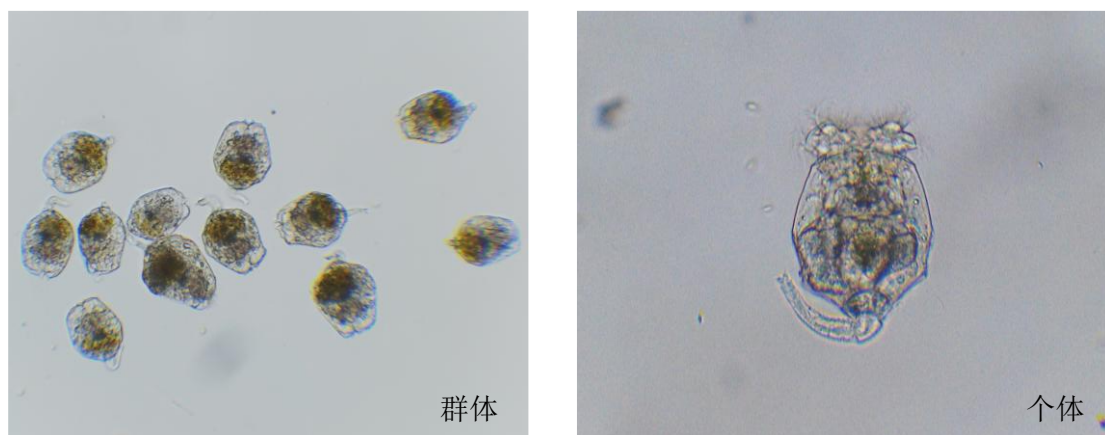


图 1-1 角突臂尾轮虫

Figure 1-1 *Brachionus angularis*

## 1.4 研究内容和意义

### 1.4.1 研究意义

给水处理系统构筑物 and 管网中无脊椎动物滋生引发的水质安全问题受到高度关注<sup>[27,85]</sup>。给水系统中无脊椎动物的存在不仅会带来不良的感官影响，而且作为中间宿主，它们可以帮助致病微生物躲避消毒灭活环节，对用水安全构成潜在的威胁<sup>[86]</sup>。氧化灭活是降低给水处理系统中无脊椎动物的密度有效方法<sup>[38]</sup>。研究证实，氯胺具有较好的氧化能力和较强的持续灭活效果。此外，氯胺预氧化联合混凝能有效提高无脊椎动物去除效果<sup>[68]</sup>，且与液氯相比，氯胺可降低 80% 的三卤甲烷的形成，是一种理想的氧化剂<sup>[87]</sup>。轮虫作为水源地取水口及水处理系统砂滤、

炭滤出水中的优势生物类群，具有显著的生物多样性优势特征，其种群数量占据水处理系统无脊椎动物的主导地位。而目前针对饮用水系统轮虫滋生而开展氧化灭活的研究报道还较少。因此，对轮虫进行氧化灭活研究，包括灭活效果和灭活反应动力学、预氧化混凝联用去除轮虫效果以及轮虫应对氧化损伤的抗氧化应激机制，可以为给水系统中轮虫的有效控制提供理论依据，并在此基础上提供行之有效的实践参考。

#### 1.4.2 研究内容

(1) 以华东地区某给水处理厂为对象，针对水厂进水、砂滤工艺进水及出水中的轮虫群落组成与密度分布，从 2023 年 5 月至 2024 年 4 月开展为期 12 个月的监测，并基于优势种判定及群落相似性分析探究给水处理系统中轮虫的存活动态。

(2) 同时，对水厂进水、砂滤工艺进水及出水的水质参数进行为期 12 个月的检测，包括：水温、pH 值、溶解氧、电导率、高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮、叶绿素 a 和细菌总数，并通过相关性分析和冗余分析 (RDA) 探究水厂不同净水工艺中轮虫丰度和水质参数的关系。

(3) 选用氯胺对角突臂尾轮虫进行氧化灭活试验，研究氯胺灭活角突臂尾轮虫的反应动力学过程，探究 CT 值、pH 值、食物密度、浊度、温度对轮虫的氧化灭活和去除效果。

(4) 进行氧化应激试验，研究氯胺对角突臂尾轮虫氧化过程中体内蛋白质含量、超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 活性和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量的变化情况，分析轮虫应对氧化损伤的抗氧化应激机制。同时，研究单独混凝环节以及氯胺预氧化混凝联用对角突臂尾轮虫的去除效果，分别探究氧化剂浓度、搅拌条件、混凝剂投加量和沉淀时间对轮虫去除效果的影响。

## 1.4.3 技术路线

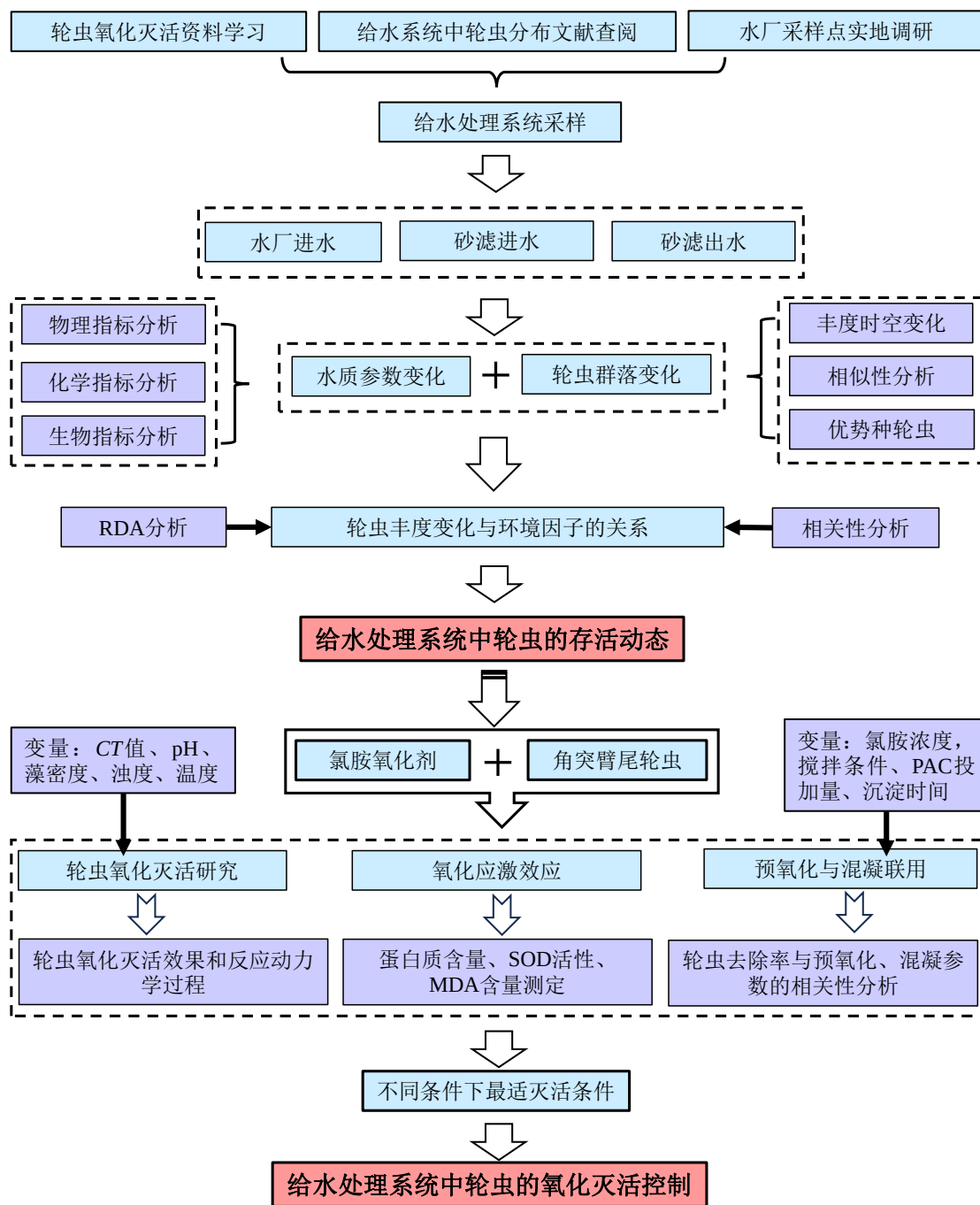


图 1-2 研究技术路线图

Figure 1-2 Technology roadmap for research



## 第 2 章 实验材料与方法

### 2.1 实验材料与仪器

本研究中所用化学试剂均为分析纯。本研究采用的化学药剂及生物制品明细详见表 2-1，实验装置与精密仪器配置清单参见表 2-2。

表 2-1 实验主要药剂

Table 2-1 The main reagents used in the experiment

| 药品名称               | 纯度/规格             | 生产厂商          |
|--------------------|-------------------|---------------|
| 纳式试剂               | AR/100g           | 天津久木科技有限公司    |
| 酒石酸钾钠              | AR/100g           | 阿拉丁试剂有限公司     |
| 碳酸氢钠               | AR/100g           | 国药集团化学试剂制药厂   |
| 蛋白胨                | AR/100g           | 国药集团化学试剂制药厂   |
| 丙酮                 | AR/100g           | 国药集团化学试剂制药厂   |
| 过硫酸钾               | AR/100g           | 国药集团化学试剂制药厂   |
| 抗坏血酸               | AR/100g           | 国药集团化学试剂制药厂   |
| 钼酸铵                | AR/100g           | 国药集团化学试剂制药厂   |
| 酒石酸锑氢钾             | AR/100g           | 国药集团化学试剂制药厂   |
| 磷酸二氢钾              | AR/100g           | 成都市科龙化工试剂厂    |
| 碘化钾                | AR/100g           | 天津科密欧化学试剂有限公司 |
| 次氯酸钠               | AR/100g(有效氯浓度>5%) | 阿拉丁试剂有限公司     |
| 碘酸钾                | AR/100g           | 阿拉丁试剂有限公司     |
| 无水磷酸氢二钠            | AR/100g           | 天津市大茂化学试剂厂    |
| EDTA 二钠            | AR/100g           | 国药集团化学试剂有限公司  |
| N,N-二乙基-1,4-苯二胺硫酸盐 | AR/100g           | 阿拉丁试剂有限公司     |
| 聚合氯化铝              | AR/100g           | 阿拉丁试剂有限公司     |

表 2-2 实验主要仪器

Table 2-2 The main experimental instruments

| 仪器名称          | 型号        | 厂商               |
|---------------|-----------|------------------|
| 蔡康光学显微装置      | XSP-8CC   | 上海蔡康光学仪器有限公司     |
| 手提式压力蒸汽灭菌器    | DSX-280B  | 上海申安医疗器械厂        |
| 哈希便携式水质分析仪    | HQ30      | 哈希水质分析仪器（上海）有限公司 |
| 电子天平          | BL610     | 德国赛多利斯集团         |
| 数显恒温水浴锅       | HH-6      | 江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司 |
| 双光束紫外可见光分光光度计 | TU-1901   | 北京普析通用仪器有限责任公司   |
| 台式离心机         | TDZ5-WS   | 江苏金坛城西晓阳电子仪器厂    |
| 冷冻离心机         | H1-16KR   | 湖南可成仪器设备有限公司     |
| 不锈钢电热蒸馏水器     | TT-98-III | 天津市泰斯仪器有限公司      |
| 超净工作台         | SW-CJ-1F  | 苏州安泰公司           |
| 智能光照培养箱       | PGX-350C  | 上海谷宁仪器有限公司       |
| 体式显微镜         | SMZ168    | 麦克奥迪实业集团有限公司     |

实验中所用斜生四链藻（*Tetradesmus obliquus*）采用序批式培养，由水生 4 号（HB-4）培养基（表 2-3）在  $25\pm 1^\circ\text{C}$  恒温，光照比为 14 h: 10 h 的条件下，在光照培养箱中培养，待其处于指数增长期（5~7 d）时在 4000 r/min 下进行离心浓缩，计数并于  $4^\circ\text{C}$  条件保存备用。

表 2-3 水生四号培养液配方

Table 2-3 HB-4 Formula

| 试剂             | 分子式                                       | 浓度/(mg/L) |
|----------------|-------------------------------------------|-----------|
| 碳酸氢钠           | $\text{NaHCO}_3$                          | 100       |
| 七水硫酸镁          | $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 80        |
| 氯化钾            | KCl                                       | 25        |
| 硫酸铵            | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$              | 200       |
| 磷酸氢二钾          | $\text{K}_2\text{HPO}_4$                  | 15        |
| 无水氯化钙          | $\text{CaCl}_2$                           | 15        |
| 土壤培养液          | /                                         | 2.5mL     |
| A <sub>5</sub> | /                                         | 2.5mL     |
| 六水三氯化铁 (1.5%)  | $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 0.75mL    |

实验所用角突臂尾轮虫在采集、鉴定后，以美国环境保护局（US EPA）配方（表 2-4）为培养基，斜生四链藻为唯一饵料，在  $25\pm 1^{\circ}\text{C}$  恒温下进行单克隆多代培养至种群建立。实验开始前，将角突臂尾轮虫分别放置于四个温度（15、20、25、 $30^{\circ}\text{C}$ ）、四个食物密度（0.5、1.0、2.0、 $3.0\times 10^6\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ）下进行预培养。此过程中，每 12 h 悬浮一次试管底部的斜生四链藻，每 24 h 更换培养液并投喂新的食物，同时去除一部分底部个体使种群处于指数增长期，预培养时间至少为 7 d。

表 2-4 EPA 配方

Table 2-4 EPA formula

| 试剂     | 分子式                                      | 浓度/(mg/L) |
|--------|------------------------------------------|-----------|
| 碳酸氢钠   | $\text{NaHCO}_3$                         | 96        |
| 二水合硫酸钙 | $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 60        |
| 七水硫酸镁  | $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 60        |
| 氯化钾    | KCl                                      | 4         |

## 2.2 实验方法

### 2.2.1 给水处理系统中轮虫的存活动态

选择我国华东地区某水厂作为水样采集和轮虫鉴定的调查对象。该水厂于 2007 年建成运行，水源地为某大型湖泊，处理工艺为目前自来水厂最常见的常规处理系统（图 2-1），设计处理规模达 30 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

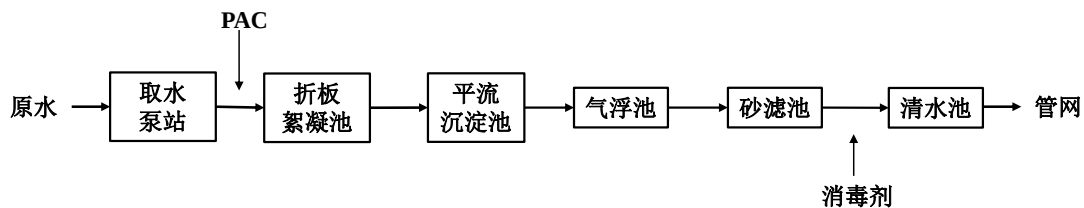


图 2-1 给水处理系统

Figure 2-1 Conventional water treatment system

从 2023 年 5 月至 2024 年 4 月，按照水厂的处理系统流程在水厂进水、砂滤进水和砂滤出水位置分别设置采样点进行轮虫月度采样和分析。现场测定水温、pH 值、溶解氧和电导率，同时在每个采样点采集一定的水样到实验室后检测高

锰酸盐指数、总氮、总磷、氨氮、叶绿素 a 和细菌总数等水质参数。

在水厂进水采样过程中,使用流速仪测定塑料管连接水厂进水水龙头的出水流速之后,将 150 L 水样通过 20  $\mu\text{m}$  的浮游生物滤网,过滤后的水样收集于 200 mL 聚乙烯瓶中,并加入 3% 的甲醛固定样品,带回实验室后进行轮虫样品计数和鉴定。在砂滤池进水和砂滤池出水的不同深度使用 5 L 采水器和 20  $\mu\text{m}$  浮游生物滤网过滤 50 L 水样,将过滤后的水样收集于 200 mL 聚乙烯瓶中,并加入 3% 的甲醛固定样品,带回实验室后进行轮虫样品计数和鉴定。每个采样点在采集轮虫样品的同时,用 5 L 采水器采集水样于 5 L 聚乙烯瓶中用于实验室水质检测。

轮虫样品带回实验室静置 48 h,待轮虫样品完全沉底后,去除上清液,保留 100 mL 样品混匀,随机选取 1 mL 于浮游生物计数板中,在显微镜下进行鉴定和计数,每个样品瓶鉴定计数三次以上取平均值。轮虫的鉴定主要参考《中国动物志》、《淡水微型生物图谱》、《淡水浮游生物研究方法》和《中国淡水轮虫志》等书籍。

水样采集后温度、pH 值、溶解氧和电导率使用便携式水质分析仪采样现场直接测定。其他水质参数带回实验室后在 12 h 内完成分析,对于无法及时检测水样应当保存于冰箱中尽快检测(保存时间不超过 48 h)。水质参数检测按照《水和废水监测分析方法(第四版)》所述方法进行测定,其中高锰酸盐指数选择酸性高锰酸钾氧化法测定;总磷选择过硫酸钾消解法和钼酸铵分光光度法测定;总氮选择过硫酸钾氧紫外分光光度法测定;氨氮选择纳氏试剂光度法测定;叶绿素 a 采用萃取分光光度法(使用 90% 丙酮萃取)测定;细菌总数选择平皿计数法测定。

### 2.2.2 氧化灭活试验

通过进行角突臂尾轮虫灭活试验,探究氯胺浓度、pH 值、藻密度、浊度和温度对氯胺氧化灭活轮虫效果的影响。具体试验设计为:

(1) 氯胺浓度: 设置氯胺 ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ) 溶液的浓度为 0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35 mg/L, 设置 pH 值为 7, 藻密度为  $2.0 \times 10^6 \text{ cells/mL}$ , 浊度为 0 NTU, 分别在 15、20、25 和 30 $^\circ\text{C}$  四个温度下进行试验。试验开始时, 从完成 7 d 预培养的试管中随机选取 100 只角突臂尾轮虫, 将其转移至 5 mL 玻璃器皿中, 分别注入按试验条件配制的  $\text{NH}_2\text{Cl}$  溶液 3 mL, 同步开始计时。自试验开始每隔 10 min 通

过体式显微镜观察轮虫存活情况并记录轮虫死亡数量及死亡状态,直至轮虫灭活率为 100%。轮虫死亡鉴定标准为:解剖镜下观察到轮虫纤毛停止摆动且内脏停止活动<sup>[88]</sup>。每个试验条件设置 3 个重复。

(2) pH 值: 设置三组 pH 值: 酸性 pH 为 5, 中性 pH 为 7, 碱性 pH 为 9, 设置  $\text{NH}_2\text{Cl}$  溶液的浓度为 0.25 mg/L, 藻密度、浊度及温度试验条件和 (1) 中相同。

(3) 藻密度: 设置  $0.5 \times 10^6$ 、 $1.0 \times 10^6$ 、 $2.0 \times 10^6$  和  $3.0 \times 10^6$  cells/mL 四个藻密度梯度,  $\text{NH}_2\text{Cl}$  溶液的浓度为 0.25 mg/L, 其他试验条件和 (1) 中相同。

(4) 浊度: 设置 0、5、10 和 15 NTU 四个浊度梯度, 15、20、25 和 30℃ 四个温度梯度,  $\text{NH}_2\text{Cl}$  溶液的浓度为 0.25 mg/L, 其他试验条件和 (1) 中相同。

(5) 温度: 设置 15、20、25 和 30℃ 四个温度,  $\text{NH}_2\text{Cl}$  溶液的浓度为 0.25 mg/L, 其他试验条件和 (1) 中相同。

表 2-5 不同因素试验条件

Table 2-5 Test conditions of each factor

| 影响因素           | 试验条件      |         |      |          |                          |
|----------------|-----------|---------|------|----------|--------------------------|
|                | 浓度/(mg/L) | 温度/(°C) | pH 值 | 浊度/(NTU) | 藻密度/(cells/mL)           |
| 浓度/(mg/L)      | 0.15~0.35 | 15~30   | 7    | 0        | $2 \times 10^6$          |
| 温度/(°C)        | 0.25      | 15~30   | 7    | 0        | $2 \times 10^6$          |
| pH 值           | 0.25      | 15~30   | 5~9  | 0        | $2 \times 10^6$          |
| 浊度/(NTU)       | 0.25      | 15~30   | 7    | 0~15     | $2 \times 10^6$          |
| 藻密度/(cells/mL) | 0.25      | 15~30   | 7    | 0        | $0.5 \sim 3 \times 10^6$ |

试验所用氯胺溶液的配制及有效氯浓度的测定: 试验所用氯胺 ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ , 灭活的主要成分) 由硫酸铵和次氯酸钠按照  $\text{Cl}_2$ : N 质量比 4: 1 在 pH 为 8 的冰浴 (1℃) 中进行配制。试验前采用 N,N-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法<sup>[89]</sup>测定氯胺浓度, 投加量按照有效氯计算。灭活试验过程中使用 HCl 和 NaOH 溶液调节 pH; 使用高岭土 [ $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_8$ ] 调节浊度, 配置方法为: 准确称量 10.0 g 高岭土粉末, 转移至烧杯后注入 500 mL 高纯水, 置于磁力搅拌仪中以恒定转速 1500 r/min 持续混合 3 小时。随后补加 1000 mL 去离子水进行稀释定容, 静置沉降 12 h 后收集上清液作为浊度母液, 试验所需浊度溶液通过梯度稀释上述母液制得。

### 2.2.3 氧化应激试验

从完成预培养的轮虫中随机选取约 30000 只，置于 1 L 烧杯中，加入 0.15 mg/L 氯胺溶液，暴露 20、40 和 60 min 后用 25  $\mu\text{m}$  的滤网和 EPA 培养基清洗并收集轮虫。将收集好的轮虫转移至玻璃匀浆器内，加入预冷的磷酸缓冲液，在冰浴（0℃）下匀浆 5 min 后，立即转移至 1.5 mL 离心管中，于 10000 g、4℃下离心 10 min。收集离心后的上清液，按照试剂盒说明测定蛋白浓度、SOD 活性 MDA 含量，测试所用试剂盒均购于北京索莱宝科技有限公司。每个处理组设置 3 个重复，另设一组未加氯胺的对照组。试验原理如下：

#### （1）蛋白质含量的测定

考马斯亮蓝 G-250 染料法（Bradford 法），该染料在酸性环境下呈棕红色，最大吸收波长位于 465 nm。当染料与蛋白质结合后，染料的最大吸收峰迁移至 595 nm，溶液颜色转变为蓝色。这种颜色变化的程度与蛋白质浓度成正比，因此，通过测量 595 nm 处的吸光值即可实现蛋白质定量分析。

#### （2）SOD 的测定

氮蓝四唑（NBT）光还原法，在光照条件下，核黄素被还原生成超氧化物自由基（ $\text{O}_2^-$ ）， $\text{O}_2^-$ 将无色的氮蓝四唑还原为蓝色的甲臃（formazan）。SOD 能够清除  $\text{O}_2^-$ ，从而抑制 NBT 的还原反应。通过测定甲臃的生成量，可以间接反映 SOD 的活性。

#### （3）MDA 的测定

硫代巴比妥酸（TBA）法，MDA 与硫代巴比妥酸（TBA, Thiobarbituric Acid）在酸性条件下加热，生成粉红色的 TBA-MDA 加合物，该加合物在 532 nm 处有最大吸收峰。通过测定吸光度，可以定量 MDA 的含量。

### 2.2.4 预氧化与混凝联用去除轮虫试验

混凝相关试验在六联搅拌器上进行。选择 PAC 为混凝剂，分别在不同的氯胺浓度、搅拌条件、混凝剂投加量和沉淀时间因素下得出试验结果，进而分析各个因素对角突臂尾轮虫的去除效果。具体条件如下：

设置氯胺浓度为 0、0.10、0.15、0.20、0.25 mg/L，预氧化时间为 30 min；搅拌条件 1（100 r/min 1 min、50 r/min 5 min、25 r/min 5 min）、2（200 r/min 1 min、

100 r/min 5 min、50 r/min 5 min)、3 (300 r/min 1 min、150 r/min 5 min、75 r/min 5 min)、4 (400 r/min 1 min、200 r/min 5 min、100 r/min 5 min); 混凝剂 (聚合氯化铝, PAC) 投加量为 5、10、15、20 mg/L; 沉淀时间为 30、60、90、120 min。

观察单独预氧化对轮虫的灭活效果。选择搅拌条件 4、20 mg/L PAC、沉淀 30 min, 观察不同浓度氯胺氧化前后轮虫的去除效果。选择 0.20 mg/L 氯胺、20 mg/L PAC、沉淀 30 min, 观察氯胺预氧化前后不同搅拌条件下轮虫的去除效果。选择 0.20 mg/L 氯胺, 搅拌条件 4、沉淀 30 min, 观察氯胺预氧化前后不同 PAC 投加量下轮虫的去除效果。选择 0.20 mg/L 氯胺、搅拌条件 4、20 mg/L PAC, 观察氯胺预氧化前后不同沉淀时间下轮虫的去除效果。

试验中角突臂尾轮虫的投加量为 100 个, 不分大小, 随机挑选, 溶液体积均为 1000 mL。根据不同试验条件选择程序, 进行混凝沉淀试验, 观察并记录混凝沉淀过程中角突臂尾轮虫与絮体混凝沉淀状态, 待反应和沉时间结束后, 计数水体下层 100 mL 中轮虫的全部数量并计算轮虫去除率。每个处理组设置 3 个重复。

## 2.3 数据处理

在对给水处理系统中轮虫的存活动态的研究中:

(1) 不同采样点中轮虫丰度由公式 (2-1) 计算,

$$N = V_s \cdot n \cdot 1000 / (V \cdot V_a) \quad (2-1)$$

其中:  $N$  为  $1 \text{ m}^3$  水中轮虫的个体数(ind./ $\text{m}^3$ );  $V$  为采样体积(L);  $V_s$  为沉淀体积(mL);  $V_a$  为计数体积(mL);  $n$  为计数所获得的轮虫个体数。

(2) 不同采样点轮虫优势度计算公式 (2-2) 为:

$$Y = (n_i / N) \cdot f_i \quad (2-2)$$

其中:  $Y$  为优势度;  $n_i$  为第  $i$  种的轮虫数;  $f_i$  为第  $i$  种的出现频率;  $N$  为总个体数;  $Y \geq 0.02$  则该轮虫为优势种。

(3) 采用相似性指数的方法来评价每个采样点之间生物种类的相似性, 计算公式如下:

$$Ic = c / (a + b - c) \quad (2-3)$$

其中:  $a$ 、 $b$  为两种样本分别出现的种类数;  $c$  为这两种样本中相同的种类数。

在对角突臂尾轮虫氧化灭活反应动力学研究中:

轮虫灭活动力学过程采用式(2-4)进行拟合,

$$\frac{N}{N_0} = \begin{cases} \left(\frac{N}{N_0}\right)_c & \text{当 } CT \leq CT_{lag} = \frac{1}{k_1} \left\{ \ln\left(\frac{N_1}{N_0}\right) + \ln\left(\frac{N_0}{N}\right)_c \right\} \\ \frac{N_1}{N_0} \exp(-k_1 CT) & \text{当 } CT_{lag} \leq CT \leq CT_{l2} \\ \frac{N_2}{N_0} \exp(-k_2 CT) & \text{当 } CT > CT_{l2} = \frac{1}{k_2 - k_1} \ln\left(\frac{N_2}{N_0}\right) \end{cases} \quad (2-4)$$

其中:  $N$  表示存活个数;  $N_0$  为初始存活个数;  $C$  为氧化剂浓度;  $T$  为接触时间;  $k_1$ 、 $k_2$  分别为准一级动力学过程第 1、第 2 阶段直线的斜率;  $\ln(N_1/N_0)$ 、 $\ln(N_2/N_0)$  分别为第 1、第 2 阶段的直线在纵轴上的截距;  $CT_{lag}$  为迟滞期对应的  $CT$  值;  $CT_{l2}$  为第 1 和第 2 阶段分界处对应的  $CT$  值;  $(N/N_0)_c$  为初始存活率。

采用 Excel 和 SPSS 26.0 对数据进行处理与分析, 计算不同处理组的平均值和标准差 ( $\text{Mean} \pm \text{SD}$ ), 对水厂轮虫丰度与水质参数相关性进行分析。采用 Origin 2021 进行绘图, 并对灭活反应动力学数据进行线性拟合分析。对符合正态分布和方差齐性检验的数据 (氯胺对角突臂尾轮虫的氧化灭活实验研究), 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和多重比较 (LSD 检验) 法, 比较处理组与对照组间的差异显著性, 设定  $p < 0.05$  为显著性水平。运用 Canoco 5 软件进行采样点不同轮虫种类的丰度与水质参数间的冗余分析。



### 第3章 给水处理系统中轮虫的存活动态

在给水处理系统中，轮虫等无脊椎动物的存在会带来一系列潜在风险，可能对水质安全和处理工艺的稳定性产生不利影响。水厂中无脊椎动物丰度过高可能会增加水处理工艺的负担，影响混凝和过滤等单元的效率。且无脊椎动物及其代谢产物可能成为消毒副产物的前体物质，增加消毒过程中三卤甲烷等有害物质的生成风险，进而影响出水水质的化学安全性。轮虫是水厂中种类最多、数量最大的无脊椎动物种类。不同种类轮虫的生存适应性存在差异，因此，水厂中不同处理单元中可能存在不同种类的轮虫。目前关于给水处理系统中轮虫群落动态演变规律及其驱动机制的研究仍较为匮乏。

本章以我国华东地区某水厂为研究对象，对水厂进水、砂滤进水和砂滤出水处的水质状况和轮虫存活动态规律进行监测分析，以探究给水处理系统中轮虫存活动态规律和影响因素。

#### 3.1 给水处理系统中水质参数的变化

##### 3.1.1 理化指标分析

图 3-1 为水厂进水、砂滤进水和砂滤出水水质理化性质年度变化。从整体上看温度、溶解氧、高锰酸盐指数等指标在不同采样点全年变化幅度明显，而 pH 和电导率等变化幅度不大。与水厂进水的年度均值相比，砂滤进水和出水中的溶解氧有所上升，高锰酸盐指数明显下降，温度、pH 和电导率基本稳定。水厂水温季节变化明显，且不同净水单元之间的水温无明显差异。8 月份水温达到最高为 31.8℃，12 月份水温最低为 4.4℃。水厂不同采样点之间 pH 和电导率全年变化较稳定，分别维持在 6.27~8.09、373~451  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。根据对水厂不同采样点的溶解氧检测分析发现，该水厂的溶解氧变化与季节变化相关，呈现出春冬季高，夏秋季低的特点，12 月溶解氧最高，达到 13.07 mg/L，8 月水厂进水的溶解氧最低为 4.87 mg/L，这可能是因为该水厂水源湖泊在温度较高时富营养水平较高。同一个采样点中高锰酸盐指数全年变化不明显，但随着给水处理工艺的深入高锰酸盐指数逐渐下降，在水厂进水中，5 月份高锰酸盐指数达到全年最高值 9.97 mg/L，

11 月份最低为 3.75 mg/L，经过常规处理后，水体高锰酸盐指数有明显下降，砂滤池出水中高锰酸盐指数范围为 1.63~5.54 mg/L。总磷在全年中夏季较高，冬季较低，全年最高值在 7 月，为 0.500mg/L，最低值在 2 月，为 0.009mg/L。经过混凝砂滤处理之后水体中总磷含量明显下降，砂滤出水中总磷含量不超过 0.071 mg/L。水厂总氮全年无明显变化，经过混凝砂滤处理之后水体中总氮含量有所下降。水厂进水的氨氮含量 7 月份最高达到 0.040 mg/L，经过常规处理之后水体中氨氮含量明显下降，砂滤出水中总磷含量不超过 0.051 mg/L。

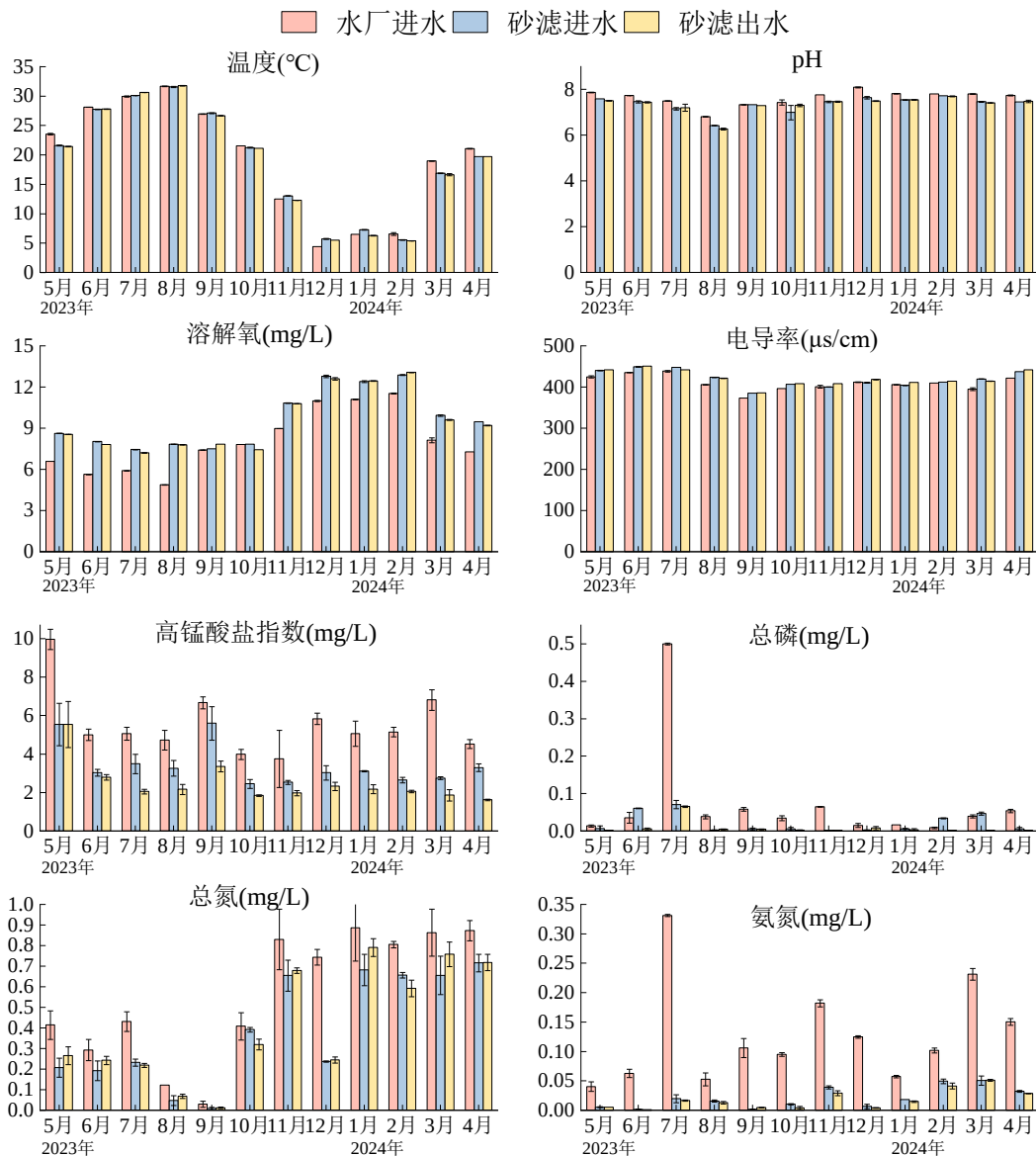


图 3-1 不同采样点水质理化指标年度变化

Figure 3-1 Annual variation of physical and chemical indicators of water quality at various sampling points

### 3.1.2 生物指标分析

叶绿素 a 是浮游植物的主要光合色素,其浓度高低能直接反映水体中浮游植物的生物量。从图 3-2 能够看出,水中叶绿素 a 含量和细菌总数在不同采样点全年变化幅度明显,与水厂进水的年度均值相比,砂滤进水和出水中的叶绿素 a 含量和细菌总数明显下降。水厂不同净水单元水体中叶绿素 a 变化呈现为春夏季高,秋冬季低的特点。水厂进水中叶绿素 a 的全年最高值出现在 3 月,为  $0.91 \text{ mg/m}^3$ ,最低值出现在 10 月,为  $0.12 \text{ mg/m}^3$ ,而砂滤出水中的叶绿素 a 含量明显降低甚至达到  $0 \text{ mg/m}^3$ ,这说明给水处理系统能有效去除水中的浮游植物。水厂进水中细菌总数变化为夏季高冬季低,经过混凝砂滤环节之后细菌总数明显下降,但是没有完全去除,由于轮虫主要以藻类、有机物碎屑和细菌为食,水中的细菌能够为轮虫提供一定的食物。

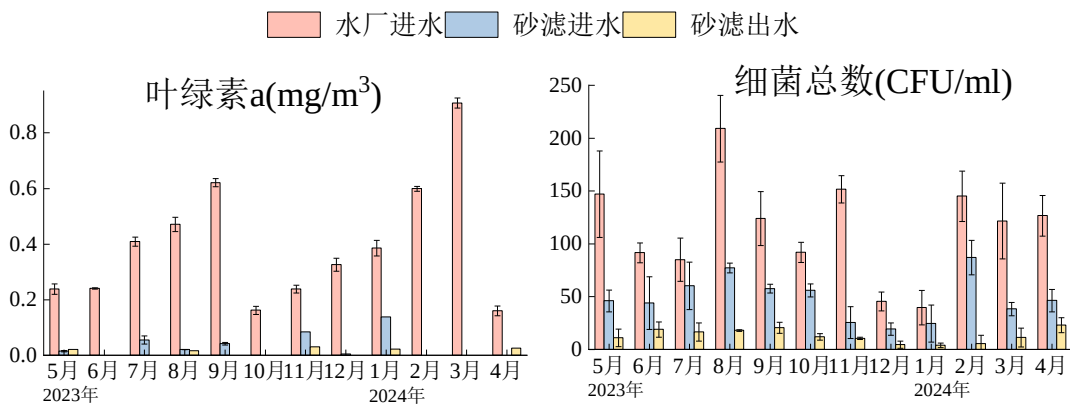


图 3-2 不同采样点水质生物指标年度变化

Figure 3-2 Annual variation of biological indicators of water quality at various sampling points

### 3.2 给水处理系统中轮虫种类的组成

不同轮虫种类对水质条件和环境变化的响应各异,种类组成可以作为一种生物指标,用于评估水体的营养状态、污染程度以及生态健康状况。通过鉴定水厂中不同工艺单元的轮虫种类,能够识别水体中潜在的富营养化或有机污染问题,并为优化水处理工艺(如过滤和消毒)提供科学依据。某些轮虫种类可能携带病原微生物或对消毒剂表现出耐受性,鉴定这些种类有助于评估生物安全风险并制

定针对性的控制策略。因此，轮虫种类鉴定不仅是水质监测和生态系统健康评估的重要工具，也是保障饮用水安全和提升水处理效率的关键环节。本节内容对2023年5月至2024年4月期间水厂进水、砂滤进水、砂滤出水中的轮虫种类进行鉴定、优势种分析以及相似性分析。常见的轮虫种类见图3-3。

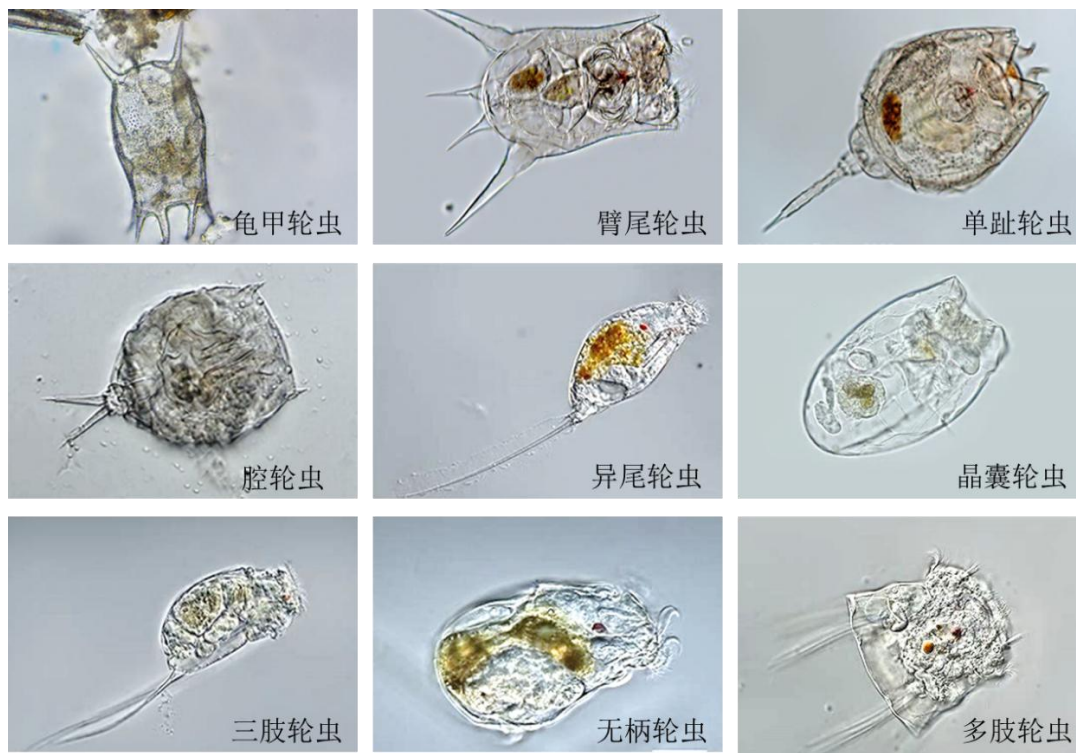


图 3-3 常见的轮虫种类  
Figure 3-3 Common rotifers

### 3.2.1 水厂进水处轮虫种类的组成

通过对水厂进水中轮虫数量和种类的全年检测分析发现，该水厂进水中轮虫群落组成呈现较高多样性，全年共鉴定出 14 属 34 种轮虫（表 3-1），包括 6 种腔轮虫属轮虫（*Lecane*），5 种单趾轮虫属轮虫（*Monostyla*），6 种臂尾轮虫属轮虫（*Brachionus*），三种龟甲轮虫属轮虫（*Keratella*），3 种异尾轮虫属轮虫（*Trichocerca*），2 种晶囊轮虫属轮虫（*Asplanchna*），2 种泡轮虫属轮虫（*Pompholyx*），以及三肢轮虫属（*Filinia*）、无柄轮虫属（*Ascomorpha*）、同尾轮虫属（*Diurella*）、多肢轮虫属（*Polyarthra*）、平甲轮虫属（*Platyias*）、狭甲轮虫属（*Colurella*）和聚花轮虫属（*Conochilus*）轮虫各 1 种。

表 3-1 水厂进水轮虫种类组成

Table 3-1 Rotifer species composition in the raw water of water treatment plants

| 属     | 种类中文名  | 拉丁名                              | 优势度   |
|-------|--------|----------------------------------|-------|
| 龟甲轮虫属 | 螺形龟甲轮虫 | <i>Keratella cochlearis</i>      | 0.028 |
|       | 矩形龟甲轮虫 | <i>Keratella quadrata</i>        | 0.069 |
|       | 曲腿龟甲轮虫 | <i>Keratella valga</i>           | 0.043 |
| 臂尾轮虫属 | 角突臂尾轮虫 | <i>Brachionus angularis</i>      | +     |
|       | 萼花臂尾轮虫 | <i>Brachionus calyciflorus</i>   | 0.021 |
|       | 蒲达臂尾轮虫 | <i>Brachionus budapestiensis</i> | +     |
|       | 矩形臂尾轮虫 | <i>Brachionus leydigi</i>        | +     |
|       | 剪形臂尾轮虫 | <i>Brachionus forficula</i>      | +     |
|       | 镰状臂尾轮虫 | <i>Brachionus falcatus</i>       | 0.032 |
| 单趾轮虫属 | 钝齿单趾轮虫 | <i>Monostyla closterocerca</i>   | +     |
|       | 爪趾单趾轮虫 | <i>Monostyla unguitata</i>       | +     |
|       | 月形单趾轮虫 | <i>Monostyla lunaris</i>         | +     |
|       | 梨形单趾轮虫 | <i>Monostyla pyritormis</i>      | +     |
|       | 精致单趾轮虫 | <i>Monostyla elachis</i>         | +     |
|       | 长圆腔轮虫  | <i>Lecane ploenensis</i>         | +     |
| 腔轮虫属  | 蹄形腔轮虫  | <i>Lecane unguolata</i>          | +     |
|       | 月形腔轮虫  | <i>Lecane luna</i>               | 0.027 |
|       | 真胫腔轮虫  | <i>Lecane eutarsa</i>            | +     |
|       | 短趾腔轮虫  | <i>Lecane glypta</i>             | +     |
|       | 无甲腔轮虫  | <i>Lecane inermis</i>            | +     |
|       | 圆筒异尾轮虫 | <i>Trichocerca cylindrica</i>    | +     |
| 异尾轮虫属 | 冠饰异尾轮虫 | <i>Trichocerca lophocssa</i>     | +     |
|       | 暗小异尾轮虫 | <i>Trichocerca pusilla</i>       | 0.045 |
|       | 盖氏晶囊轮虫 | <i>Asplanchna girodi</i>         | +     |
| 晶囊轮虫属 | 卜式晶囊轮虫 | <i>Asplanchna brightwelli</i>    | 0.022 |
| 三肢轮虫属 | 长三肢轮虫  | <i>Filinia longiseta</i>         | 0.030 |
| 无柄轮虫属 | 无尾无柄轮虫 | <i>Gastropus hyptopus</i>        | +     |
| 同尾轮虫属 | 田奈同尾轮虫 | <i>Diuzella dixon-nuttalli</i>   | +     |
| 多肢轮虫属 | 针簇多肢轮虫 | <i>Polyarthra trigla</i>         | +     |
| 泡轮虫属  | 扁平泡轮虫  | <i>Pompholyx complanata</i>      | +     |
|       | 沟痕泡轮虫  | <i>Pompholyx sulcata</i>         | +     |
| 平甲轮虫属 | 十指平甲轮虫 | <i>Platylas militaris</i>        | +     |
| 狭甲轮虫属 | 钩状狭甲轮虫 | <i>Colurella uncinata</i>        | +     |
| 聚花轮虫属 | 独角聚花轮虫 | <i>Conochilus unicornis</i>      | +     |

注：“+”表示该物种的优势度&lt;0.02.

图 3-4 为水厂进水轮虫种类分布状况，龟甲轮虫占轮虫总量的 27.2%，且全年均有检出，当冬季温度较低时水厂进水中依然能检测到大量龟甲轮虫，这说明龟甲轮虫在低温情况下相较于其他种类的轮虫更具有竞争力。所检测出的 3 种龟甲轮虫均是水体中的优势种，其中矩形龟甲轮虫的优势度最高达到 0.069。臂尾轮虫除了在 2024 年 1 月没有检出，其他月份均有检出，其中萼花臂尾轮虫和镰状臂尾轮虫为水厂进水中的优势种。单趾轮虫和腔轮虫虽然整体丰度较高，但出现频率不高。其他轮虫中除了三肢轮虫外分布整体表现为丰度和频率不高，当温度较低时很少检出。

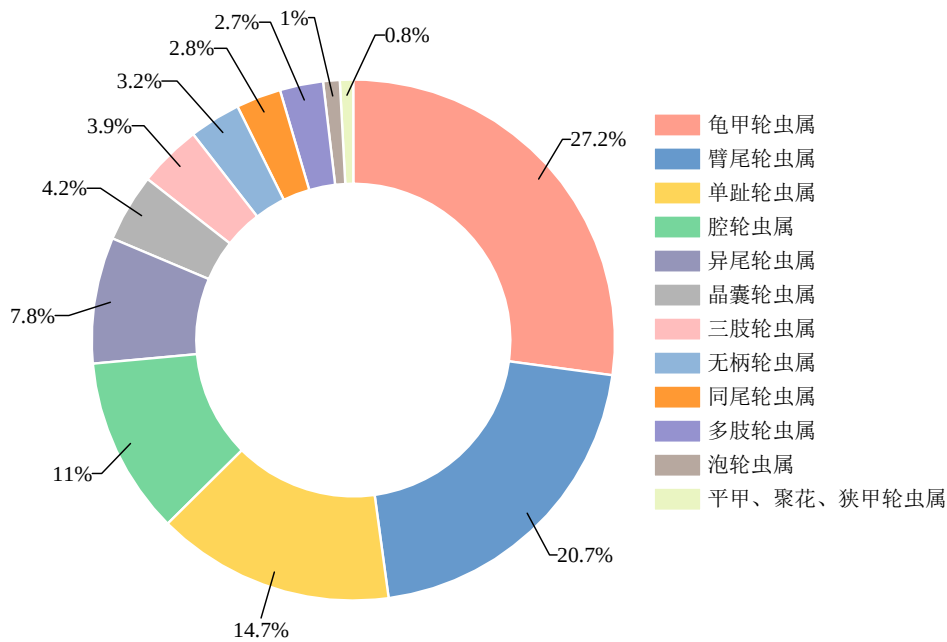


图 3-4 水厂进水轮虫种类分布状况

Figure 3-4 Distribution patterns of rotifer species in raw water intake of water treatment plants

### 3.2.2 给水处理系统构筑物中轮虫种类组成

表 3-2 为砂滤池进出水中检出的轮虫种类。与水厂进水相比，经过处理后的水体中，轮虫种类有明显下降，组成也发生了一定变化，经过混凝单元后在砂滤进水出共检测出 24 种轮虫，优势种主要为异尾轮虫、单趾轮虫和龟甲轮虫；经过 V 型滤池过滤后，在砂滤出水位置共检出 16 种轮虫，同时水中的优势种从体型较大的龟甲轮虫变为体型较小的腔轮虫和单趾轮虫。

表 3-2 砂滤池进出水中轮虫种类

Table 3-2 Rotifer community structure in influent and effluent of sand filters

| 属     | 种类中文名  | 拉丁名                              | 进水    | 出水    |
|-------|--------|----------------------------------|-------|-------|
| 单趾轮虫属 | 钝齿单趾轮虫 | <i>Monostyla clostercerca</i>    | +     | +     |
|       | 爪趾单趾轮虫 | <i>Monostyla unguitata</i>       | +     | +     |
|       | 月形单趾轮虫 | <i>Monostyla lunaris</i>         | +     | 0.020 |
|       | 梨形单趾轮虫 | <i>Monostyla pyritormis</i>      | +     | +     |
|       | 精致单趾轮虫 | <i>Monostyla elachis</i>         | 0.042 | 0.030 |
| 腔轮虫属  | 长圆腔轮虫  | <i>Lecane ploenensis</i>         | 0.030 | +     |
|       | 月形腔轮虫  | <i>Lecane luna</i>               | 0.026 | 0.064 |
|       | 真胫腔轮虫  | <i>Lecane eutarsa</i>            | -     | +     |
|       | 矛趾腔轮虫  | <i>Lecane hastata</i>            | +     | -     |
|       | 短趾腔轮虫  | <i>Lecane glypta</i>             | +     | -     |
|       | 瘤甲腔轮虫  | <i>Lecane nodosa</i>             | +     | +     |
|       | 无甲腔轮虫  | <i>Lecane inermis</i>            | +     | +     |
|       | 螺形龟甲轮虫 | <i>Keratella cochlearis</i>      | 0.029 | +     |
|       | 矩形龟甲轮虫 | <i>Keratella quadrata</i>        | +     | +     |
|       | 曲腿龟甲轮虫 | <i>Keratella valga</i>           | +     | +     |
| 异尾轮虫属 | 暗小异尾轮虫 | <i>Trichocerca pusilla</i>       | 0.062 | +     |
| 臂尾轮虫属 | 角突臂尾轮虫 | <i>Brachionus angularis</i>      | +     | -     |
|       | 萼花臂尾轮虫 | <i>Brachionus calyciflorus</i>   | +     | -     |
|       | 蒲达臂尾轮虫 | <i>Brachionus budapestiensis</i> | +     | -     |
|       | 矩形臂尾轮虫 | <i>Brachionus leydigi</i>        | +     | -     |
| 同尾轮虫属 | 田奈同尾轮虫 | <i>Diuzella dixon-nuttalli</i>   | +     | +     |
| 无柄轮虫属 | 无尾无柄轮虫 | <i>Gastropus hyptopus</i>        | +     | -     |
| 狭甲轮虫属 | 钩状狭甲轮虫 | <i>Colurella uncinata</i>        | +     | -     |
| 泡轮虫属  | 沟痕泡轮虫  | <i>Pompholyx sulcata</i>         | +     | -     |
| 猪吻轮虫属 | 前突猪吻轮虫 | <i>Dicranophorus prionacis</i>   | +     | -     |
| 轮虫属   | 长足轮虫   | <i>Rotaria neptunia</i>          | +     | -     |

注：“+”表示优势度<0.02，“-”表示未检出。

### 3.2.3 给水处理系统中轮虫相似性分析

为探究供水系统中的轮虫起源,本研究运用多态性指数法对不同监测点轮虫类群的种间相似度进行量化分析,相关数据详见表 3-3。通过对水厂中不同采样点之间轮虫种类的相似性分析,水厂进水和砂滤进出水之间的轮虫种类相似性指数分别为 0.53、0.40,表明水厂混凝和砂滤环节能有效降低轮虫种类。砂滤单元

前后轮虫种类的相似性达到 0.53，表明砂滤前后轮虫的生存环境类似。

表 3-3 水厂不同采样点之间轮虫种类相似性指数

Table 3-3 species similarity index of rotifers in waterworks

| 采样点  | 水厂进水 | 砂滤进水 | 砂滤出水 |
|------|------|------|------|
| 水厂进水 | 1    | /    | /    |
| 砂滤进水 | 0.53 | 1    | /    |
| 砂滤出水 | 0.40 | 0.53 | 1    |

### 3.3 给水处理系统中轮虫丰度变化与环境因子的关系

#### 3.3.1 轮虫丰度在时间空间上的变化

图 3-5 为 2023 年 5 月至 2024 年 4 月水厂进水中轮虫丰度和种数随时间变化的情况。由图可知，水厂进水处的轮虫丰度变化季节性明显，呈现出夏秋季轮虫丰度高，春冬季轮虫丰度低的特点。水厂进水的轮虫丰度最大值出现在 2023 年 6 月，最小值出现在 2024 年 1 月，轮虫丰度分别为  $87.33 \times 10^3$ 、 $10.67 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>，轮虫丰度的全年平均值为  $54.833 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>。另外，进水中轮虫种类数量的变化也表现为夏秋季高于春冬季的特点，其中 2023 年 7 月轮虫种数最多，达到 20 种。

水厂砂滤进水位置的轮虫丰度和种数随时间变化如图 3-6，砂滤进水中轮虫丰度的均值为  $7.722 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>，经过混凝沉淀单元后轮虫丰度下降约 86%。与水厂进水位置类似，砂滤进水位置轮虫丰度在 2023 年 6 月最高为  $24.667 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>，在 2024 年 1 月最低为  $0.667 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>。

根据图 3-7 可以看出，砂滤工艺出水中的轮虫生物量呈现显著的季节性分布特征，表现为夏秋季较高，春冬季较低。在 2023 年 8 月砂滤出水中的轮虫丰度达到最大值  $5.111 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>，2024 年 2 月轮虫丰度最低  $0.222 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>，砂滤出水轮虫平均丰度为  $1.851 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>，经过砂滤单元后轮虫的丰度降低约 76%，虽然轮虫丰度有大幅下降，但是在某些月份砂滤池出水中轮虫总丰度处于较严峻的水平。



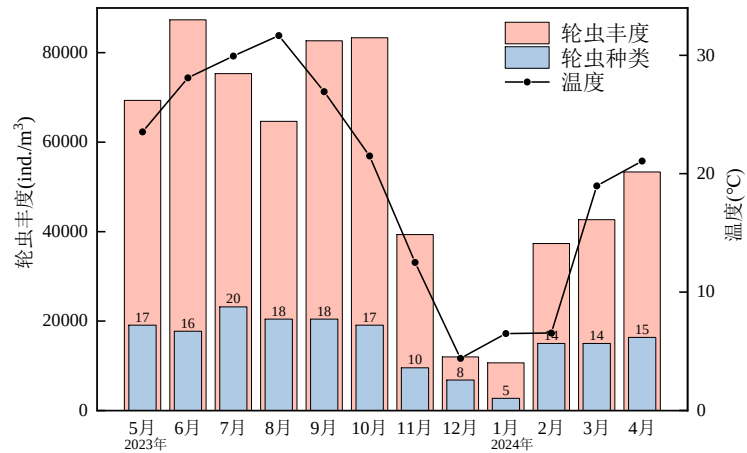


图 3-5 水厂进水轮虫总体丰度和种数的时间变化

Figure 3-5 Temporal variation in the total abundance and species composition of rotifers at the water intake of the treatment plant

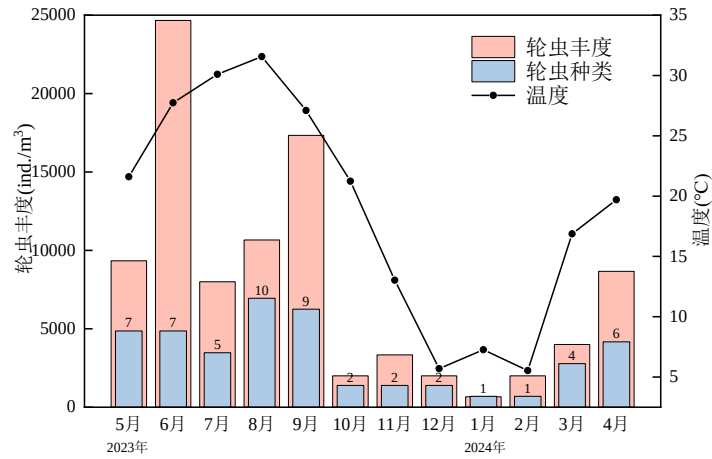


图 3-6 砂滤进水轮虫丰度和种数的时间变化

Figure 3-6 Temporal dynamics of total rotifer abundance and species richness in the influent of the sand filtration process

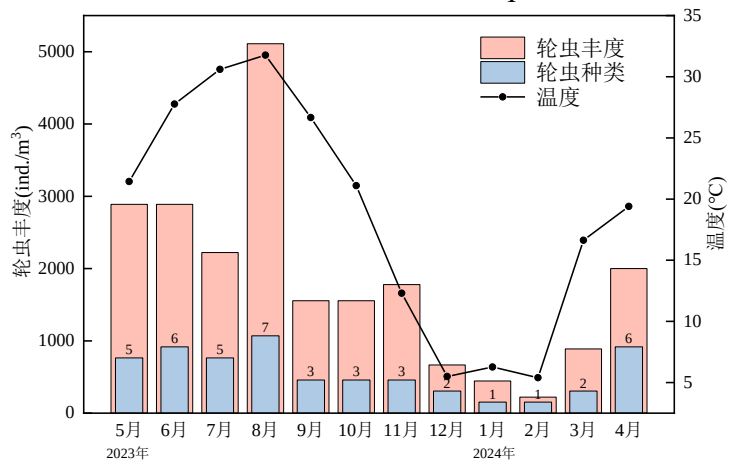


图 3-7 砂滤出水轮虫丰度和种数的时间变化

Figure 3-7 Temporal variations in total rotifer abundance and species diversity in the effluent of sand filtration process

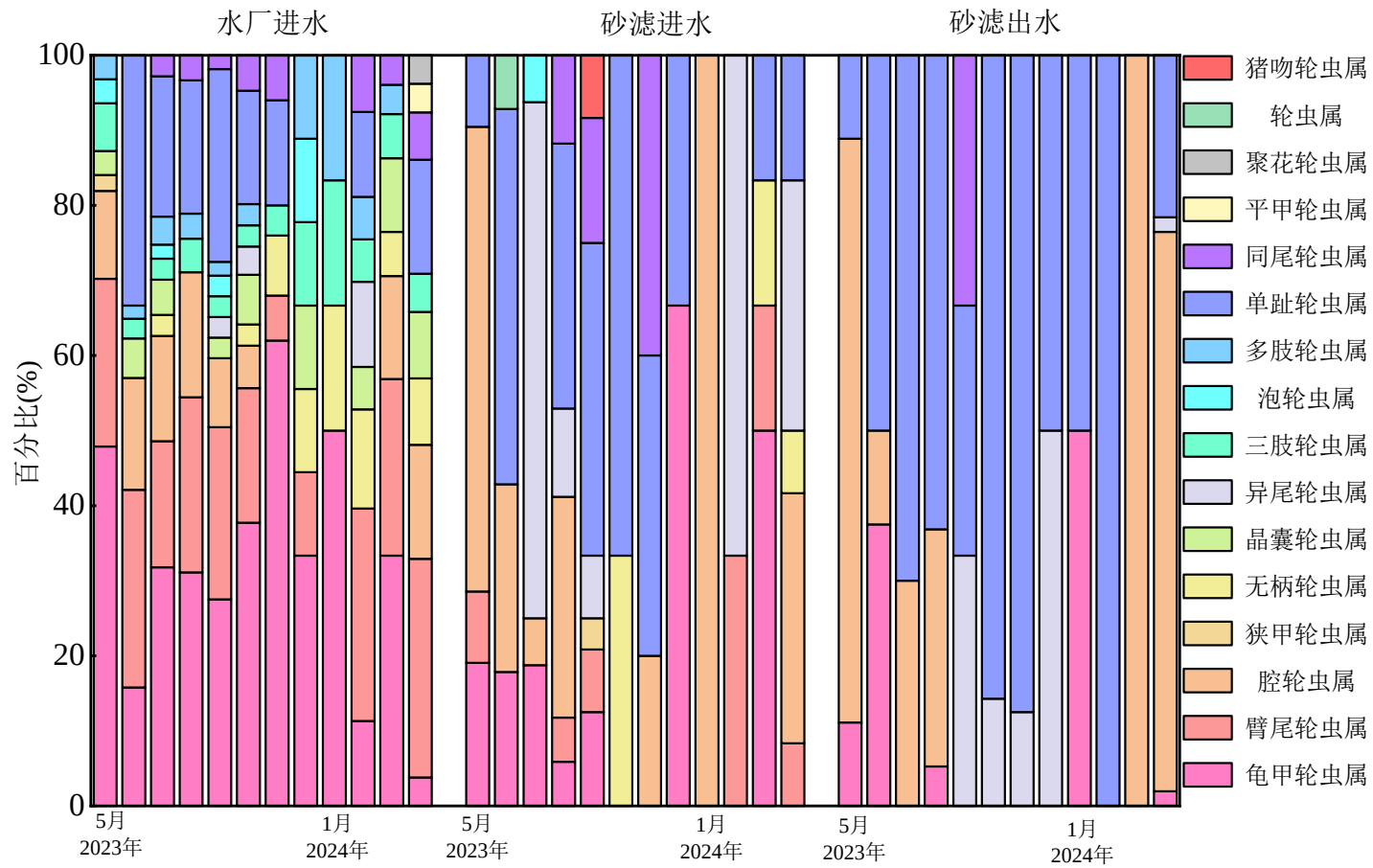


图 3-8 不同采样点不同轮虫丰度的时间变化

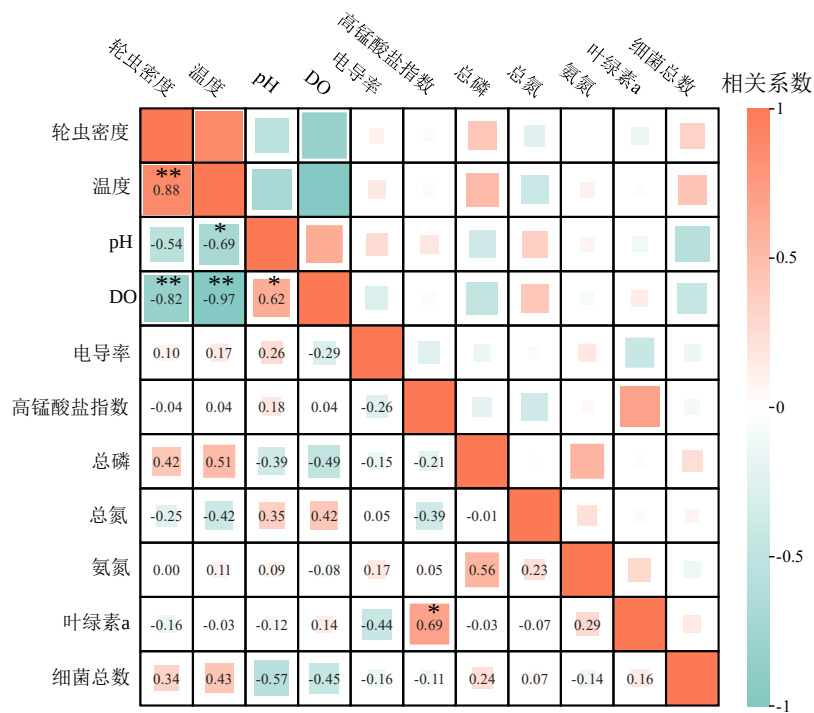
Figure 3-8 Temporal variation in abundance of different rotifer species at various sampling points

水厂进水中的轮虫种类较多，检测出的丰度较高的轮虫主要有龟甲轮虫、臂尾轮虫、腔轮虫等。经过混凝沉淀单元之后轮虫整体丰度有所下降，在砂滤进水处检测到的轮虫主要为龟甲轮虫、腔轮虫和单趾轮虫，这表明混凝沉淀能有效去除轮虫。然而，腔轮虫与单趾轮虫作为个体微小的底栖性轮虫类群，可能借助趾部吸附于基质表面，从而穿透混凝工艺环节。经过砂滤池过滤之后水体中的轮虫丰度和种类明显降低，整体上主要为单趾轮虫，说明在给水处理系统中单趾轮虫等小型底栖轮虫能更好的生存下来，同时这类轮虫还有可能附着在滤砂上，在滤池中滋生繁殖，造成水厂轮虫爆发增长。

### 3.3.2 给水处理系统中轮虫丰度与环境因子关系

相关性分析能够快速识别与轮虫总体丰度显著相关的单一环境因子，但无法反映多个环境因子的综合作用以及它们之间的交互关系。通过分析轮虫密度与水质参数（水温、pH、溶解氧、电导率、高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮、叶绿素 a 和细菌总数）之间的相关性，可以揭示轮虫在水处理过程中的生态作用及其对水质变化的响应机制。这种分析不仅有助于评估水处理工艺的效果，还能为优化水厂运行、预测水质风险以及制定生物控制策略提供科学依据，从而提升水厂的管理水平和出水水质安全性。

相比之下，冗余分析（RDA, Redundancy analysis）是一种多元统计方法，能够同时分析多个环境因子对不同种类轮虫丰度的综合影响。它不仅可以量化每个环境因子的贡献，还能通过排序图直观展示轮虫丰度与环境因子之间的关系，识别影响轮虫密度的关键水质因子，评估水处理工艺对轮虫群落的影响，进而优化水厂运行策略。因此，本节内容结合相关性分析以及冗余分析对水厂进水、砂滤进水和砂滤出水三个采样点中轮虫丰度变化与环境因子之间的关系进行研究，探究影响轮虫丰度变化的环境因子，为给水处理系统中轮虫的有效控制提供理论依据和实践参考。



注：\*表示显著相关， $p<0.05$ ；\*\*表示极显著相关， $p<0.01$ 。

图 3-9 水厂进水中水质参数与轮虫总体丰度的相关分析

Figure 3-9 Correlation Analysis between water quality parameters and total rotifer abundance in raw water intake of water treatment plants

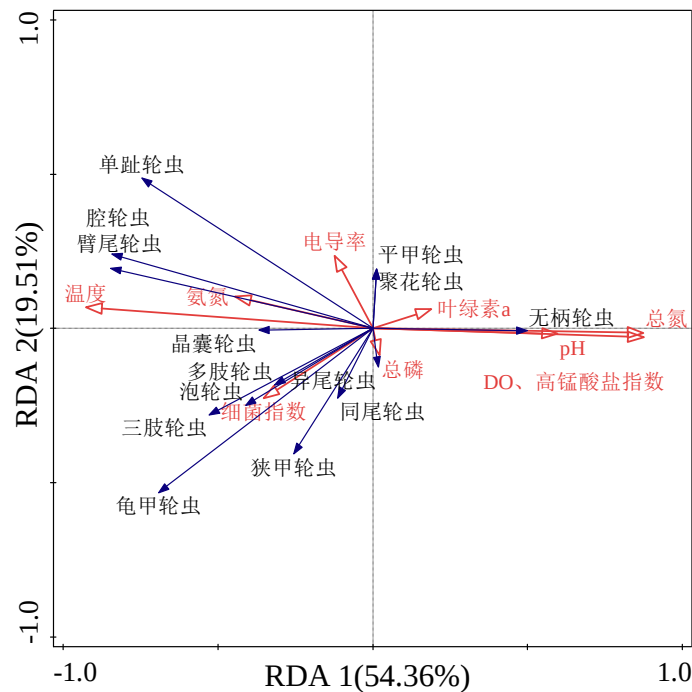
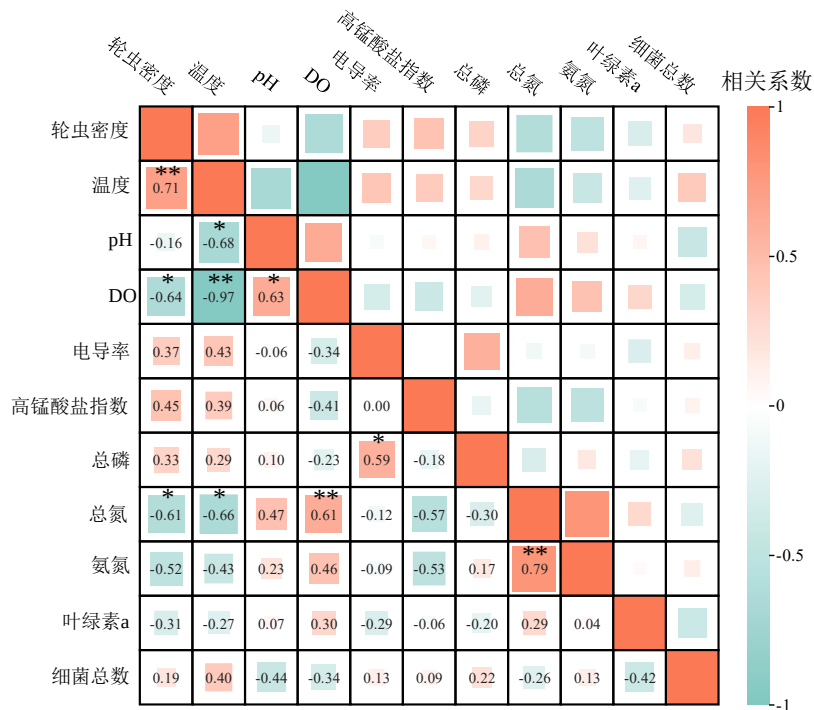


图 3-10 水厂进水中不同轮虫丰度与各水质参数的冗余分析

Figure 3-10 Redundancy Analysis (RDA) of rotifer taxa abundance and water quality parameters in raw water intake of water treatment plants

图 3-9 所示为 2023 年 5 月至 2024 年 4 月水厂进水中轮虫总丰度与水质参数之间的相关性分析。其中，轮虫总体丰度变化与温度呈现极显著正相关( $p<0.01$ )，与溶解氧呈现极显著负相关( $p<0.01$ )。

利用 RDA 分析对水厂进水处的轮虫丰度和水质参数的相关性进行分析（图 3-10），两轴共解释了 73.87%的相关性，其中第一轴解释了 54.36%，第二轴解释了 19.51%。与相关性分析类似，在水厂进水中的各种水质参数中，温度（贡献率为 56.3%， $p=0.002$ ）是影响不同轮虫丰度变化的主要因素。除此之外，该水厂进水处，龟甲轮虫、臂尾轮虫和晶囊轮虫等多数优势种轮虫的丰度与温度、细菌总数、和氨氮呈现正相关，与总氮、溶解氧等水质参数呈负相关。



注：\*表示显著相关， $p<0.05$ ；\*\*表示极显著相关， $p<0.01$ 。

图 3-11 砂滤进水中水质参数与轮虫总体丰度的相关分析

Figure 3-11 Correlation Analysis between water quality parameters in sand filter inflow water and the total abundance of rotifers

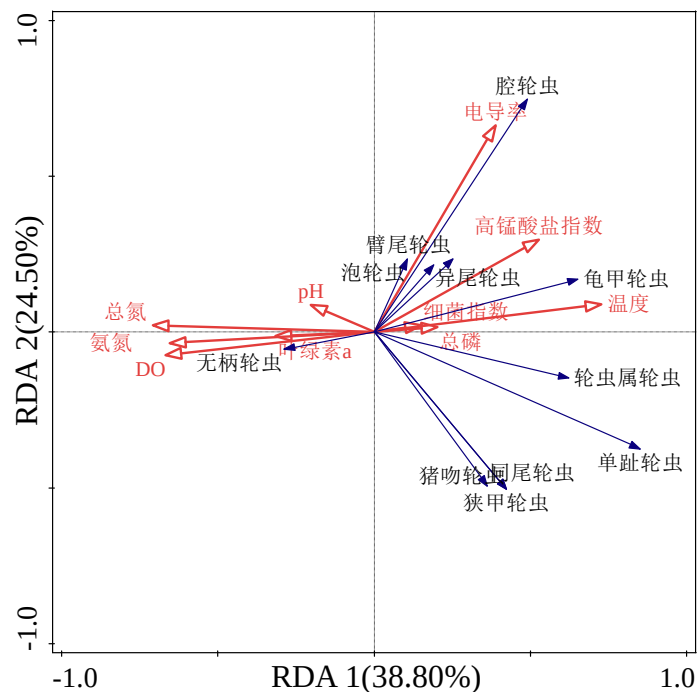
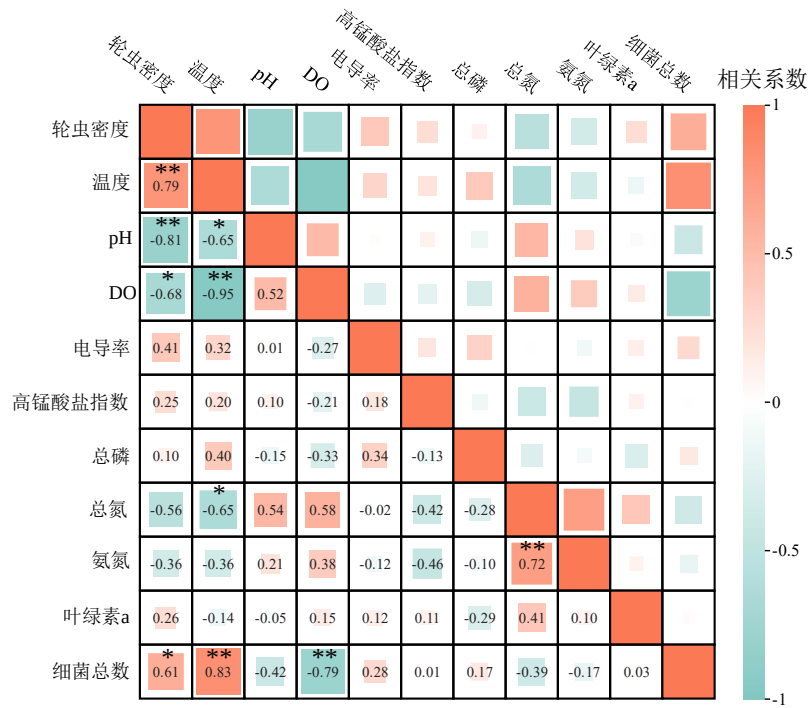


图 3-12 砂滤进水中不同轮虫丰度与各水质参数的冗余分析

Figure 3-12 Redundancy Analysis of various rotifer abundances in sand filter inflow water versus multiple water quality parameters

图 3-11 为砂滤进水水质参数与轮虫丰度的相关分析热图，砂滤进水轮虫总体丰度与温度呈现极显著正相关( $p < 0.01$ )，与溶解氧和总氮呈现为显著负相关( $p < 0.05$ )。

进一步通过对砂滤进水处不同种类轮虫丰度与各水质参数的冗余分析(图 3-12)发现，两轴共解释了 63.30%的相关性，其中第一轴解释了 38.80%，第二轴解释了 24.50%。在该水厂砂滤池进水处的各种水质参数中，温度(贡献率为 28.20%， $p = 0.026$ )是影响轮虫丰度变化的主要因素。除此之外，腔轮虫、单趾轮虫和异尾轮虫等多数优势种轮虫的丰度与温度、细菌总数和总磷呈现正相关，与总氮、溶解氧等水质参数呈负相关。



注：\*表示显著相关， $p < 0.05$ ；\*\*表示极显著相关， $p < 0.01$ 。

图 3-13 砂滤出水中水质参数与轮虫总体丰度的相关分析

Figure 3-13 Correlation Analysis between water quality parameters in sand filter outflow water and total abundance of rotifers

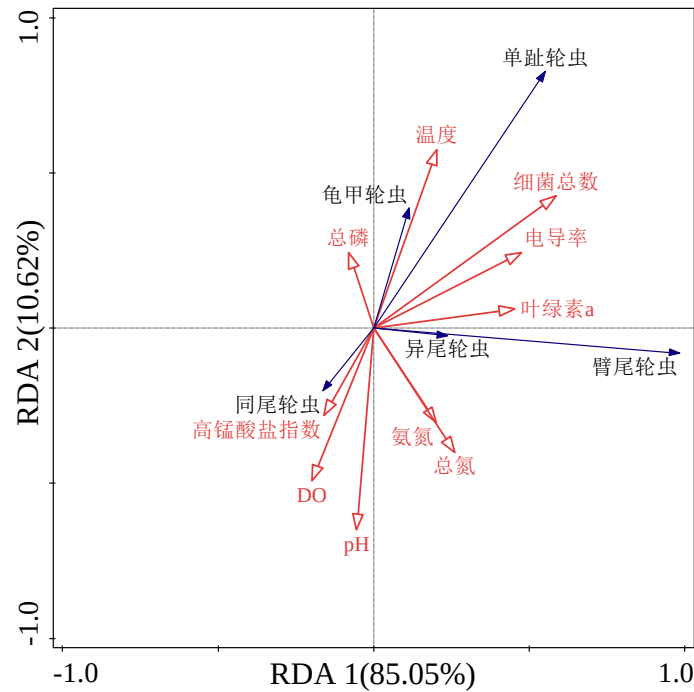


图 3-14 砂滤出水中不同轮虫丰度与各水质参数的冗余分析

Figure 3-14 Redundancy Analysis of various rotifer abundances in sand filter effluent water versus multiple water quality parameters

图 3-13 为砂滤单元后水体中的水质参数和轮虫丰度的相关性分析。砂滤出水轮虫丰度与温度极显著正相关( $p<0.01$ ), 与 pH 为极显著负相关( $p<0.01$ ), 与溶解氧显著负相关( $p<0.05$ ), 与细菌总数显著正相关( $p<0.05$ )。

通过对砂滤池出水不同种类轮虫丰度变化与各水质参数的冗余分析(图 3-14)发现, 两轴共解释了 95.67%的相关性, 其中第一轴解释了 85.05%, 第二轴解释了 10.62%, 说明 RDA 分析结果可靠。在该水厂砂滤池出水处的各种水质参数中, 细菌总数(贡献率为 31.90%,  $p=0.010$ )、总氮(贡献率为 24.90%,  $p=0.040$ )是影响轮虫丰度变化的主要因素。除此之外, 砂滤池出水中的单趾轮虫(优势种轮虫)丰度与细菌总数、温度、叶绿素 a 和电导率等水质参数呈现正相关, 与高锰酸盐指数、溶解氧等水质参数呈负相关。

### 3.4 讨论

在我国华东地区, 多数水厂以地表水为水源, 易受水体富营养化的影响, 且水体本身无脊椎动物种类丰富。本研究涉及水厂以大型淡水湖泊作为水源地, 因受季节性因素影响, 水质可能存在不稳定性。通过对水质参数的监测发现, 溶解氧、高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮、叶绿素 a 和细菌总数等指标全年变化较明显, 且经过处理后明显下降, 说明常规处理能有效改善进水水质。轮虫作为水生生态系统中的次级消费者, 是物质循环与能量传递的关键功能类群。根据水域营养盐梯度差异, 其优势种可划分为寡营养型(如狭甲轮虫)和富营养型(如臂尾轮虫)两大生态类群。本研究中发现水厂进水的轮虫种类较多, 共鉴定出 14 属 34 种轮虫, 其中发现多种富营养水体优势轮虫, 主要包括臂尾轮虫、异尾轮虫、螺形龟甲轮虫等; 寡营养水体优势轮虫为独角聚花轮虫和狭甲轮虫, 结合水质监测结果推测该水厂水源湖泊夏季的富营养化水平较高。

有学者经过 17 个月的调查后发现, 轮虫是活性炭滤池中滋生的主要无脊椎动物种类, 其数量占比高达 97%<sup>[90]</sup>。在本研究中, 经过混凝单元处理后检出的轮虫由 34 种降低为 24 种, 说明混凝单元能有效拦截水中的轮虫。但是一些轮虫种类在水厂进水处并未发现, 而在砂滤进水处有检出(前突猪吻轮虫和长足轮虫等)。分析这一现象出现的原因, 可能是该水厂水源中的部分轮虫虫卵随源水进入混凝单元, 当外部条件适合生存时, 虫卵在沉淀池中萌发、繁殖, 并进入后续净水单



元。砂滤池前后检出的轮虫分别为 24、16 种，且砂滤出水中的优势种主要为腔轮虫和单趾轮虫，这说明砂滤单元能有效去除水体中体型较大的轮虫，但是仍有部分体型较小的轮虫能够穿透滤层进入后续环节。同时由于真径腔轮虫只在砂滤出水中检出，因此，推测在砂滤滤层中也存在轮虫滋生繁殖的情况。

水源中的无脊椎动物随源水进入水处理系统，经过混凝沉淀和过滤后，大部分能够被去除，但还有一部分能够穿透水处理设施；如果不采取有效的预防与控制措施，无脊椎动物泄漏问题将更加严重，直接威胁供水安全<sup>[9]</sup>。本研究中，经过混凝和砂滤作用，轮虫丰度显著下降，表明常规处理工艺能够较好地控制轮虫密度。总体来看，5~10 月间轮虫的总体丰度较高，其中，水厂进水和砂滤进水轮虫丰度最大值出现在 6 月，说明在给水处理系统中的多数轮虫只有在水温较温暖时才会出现。值得注意的是，虽然砂滤进水 6 月轮虫总体丰度最大，但轮虫种类数没有明显增长，研究中发现其中腔轮虫数量明显增加，因此，推测是由于水体中的腔轮虫大量繁殖，导致 6 月轮虫总体丰度激增。除此之外，经过水厂深度处理后，水体中轮虫的总体平均丰度由  $54.833 \times 10^3 \text{ ind./m}^3$  变为  $1.851 \times 10^3 \text{ ind./m}^3$ ，下降约 97%，但是在夏季水厂中的轮虫丰度依然处于较高的水平，从 7 月到 8 月轮虫总体丰度大幅提升，但种类数却相差不大，推测这是由于单趾轮虫的大量爆发导致轮虫整体丰度的提升。

RDA 分析适合用于揭示复杂的环境-生物相互作用，并识别主要驱动因子。本研究经过相关性和 RDA 分析后发现，虽然不同种类的轮虫与温度之间的相关性有所不同，但是轮虫总体丰度与温度呈现显著的相关性，且不同采样点的优势种都随水温的升高而增加。因此，在水厂中可以通过调节温度来高效率的控制水体中轮虫丰度。除此之外，砂滤出水中的细菌总数是影响轮虫丰度变化的主要因素之一。这可能是由于食物密度直接调控轮虫的生长与繁殖<sup>[7]</sup>，而轮虫在砂滤池出水中主要依赖滤食细菌维持生存。若在后续消毒单元不能有效灭活轮虫和微生物，则有可能导致轮虫在清水池中滋生繁殖。

### 3.5 小结

(1) 对我国华东地区某水厂的水厂进水、砂滤进水、砂滤出水位置进行为期一年的水质参数监测分析，其中理化性质包括温度、pH、溶解氧、电导率、高

锰酸盐指数、总磷、总氮和氨氮，生物指标包括叶绿素 a 含量和细菌总数。本研究中除了 pH 和电导率，其他水质参数全年变化明显，常规处理能有效改善水质条件。

(2) 水厂进水中的轮虫种类较丰富，经过给水处理系统之后，轮虫种数明显下降。在水厂进水处共检测到 34 种轮虫，主要优势种为龟甲轮虫、臂尾轮虫和单趾轮虫等；砂滤进水处共检测出 24 种轮虫，经过砂滤处理后，共检测出 16 种轮虫，其中优势种变化为底栖类的腔轮虫和单趾轮虫。

(3) 水厂进水处的轮虫种类与砂滤前后的种类具有一定相似性，水源中的一部分轮虫可能从混凝环节逃逸，穿透砂滤层，进入后续净水工艺；在水厂构筑物中检测出水厂进水中未发现的轮虫种类，该水厂净水工艺中可能存在轮虫卵，当外界条件适宜时虫卵萌发并在其中繁殖。

(4) 混凝和砂滤单元能有效去除水中的轮虫，但是仍存在潜在隐患。水厂进水和砂滤出水中的轮虫丰度呈现夏秋季高，春冬季低的特点。经过混凝和砂滤环节，水体中的轮虫相较于水厂进水处下降了 92~99%。2023 年 8 月砂滤出水中轮虫丰度最高，分析是腔轮虫在砂滤环节大规模爆发并穿透砂滤层导致。

(5) 水厂中的轮虫丰度与水质参数有一定显著关系，三个采样点的轮虫总体丰度均随着水温的升高而提高。在砂滤池出水中还发现轮虫总体丰度和优势种轮虫的丰度都随细菌总数的升高而增加。因此，在实际水厂运行过程中，可以通过调节水质环境来降低水中的轮虫丰度。

## 第4章 氯胺对角突臂尾轮虫的氧化灭活实验研究

对臂尾轮虫这一轮虫属的研究一直是多个研究领域的重要课题,其在生态学、遗传学及水产养殖等方面具有显著意义<sup>[92-94]</sup>,其中角突臂尾轮虫由于对污染物的敏感度较高,目前已经是生态毒理学研究的潜在模式生物。本研究第三章内容中所涉及的水厂水源为大型潜水湖泊,轮虫种类比较多样。该水厂进水中发现臂尾轮虫属6种,总体丰度达到10000 ind./m<sup>3</sup>,角突臂尾轮虫丰度为2042 ind./m<sup>3</sup>且体型最小(一般200 μm 穿透、滋生可能性较大)。同时,虽然一般水厂多采用氯(液氯、次氯酸钠等)作为消毒剂,但通过对其他无脊椎动物的灭活试验发现,氯胺在持久性、减少副产物、改善水质等方面具有显著优势,适合多种水处理场景<sup>[66]</sup>。

因此,为进一步探究氧化剂对轮虫的氧化灭活效果,本章综合考虑水厂中轮虫的检出情况、体型、生活史特征以及轮虫毒性实验模式生物等情况,以及不同氧化剂灭活效果研究,选择角突臂尾轮虫作为受试生物,氯胺作为氧化剂进行氧化灭活试验。

### 4.1 氯胺对角突臂尾轮虫灭活效果及反应动力学

轮虫灭活动力学研究能够揭示消毒剂(如氯、氯胺、臭氧等)对轮虫的灭活机制、速率及其影响因素,为优化消毒工艺提供理论依据。目前常见的灭活动力学模型包括一级动力学模型、Chick-Watson 模型和 Hom 模型等。轮虫灭活动力学受多种因素影响,主要包括:消毒剂类型与浓度、接触时间、水质条件和轮虫种类与生命周期等。

#### 4.1.1 CT 值对氯胺灭活轮虫效果的影响

图4-1所示为角突臂尾轮虫被0.2 mg/L 氯胺灭活前后的体态图,可以看出,灭活后轮虫体形皱缩,体内器官松解,头冠缩入体内,但躯干背甲皱缩不明显,部分轮虫灭活后足部向内弯曲折叠。

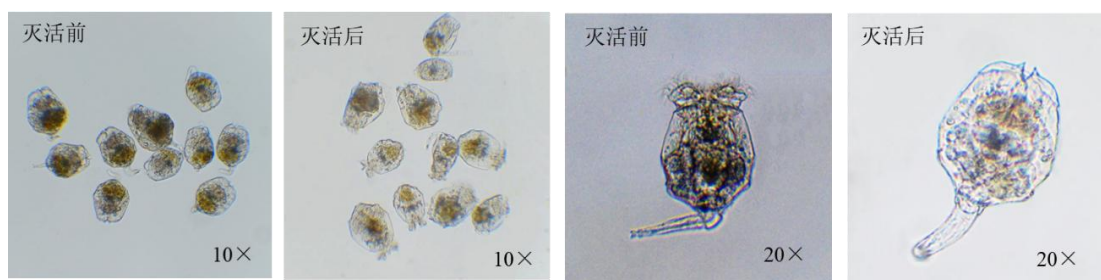
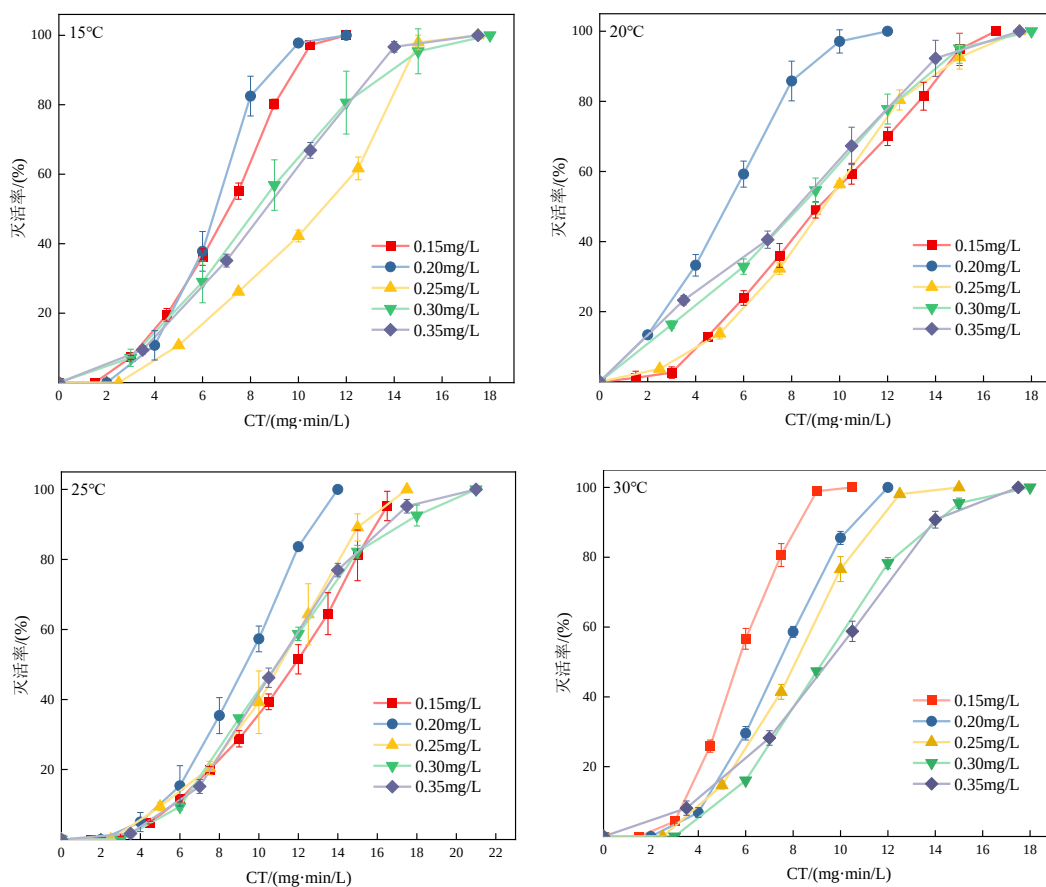


图 4-1 0.20 mg/L 氯胺灭活后角突臂尾轮虫体态

Figure 4-1 The body morphology of *Brachionus angularis* after inactivation with 0.20 mg/L chloramine

注：C 为氧化剂浓度；T 为接触时间。

图 4-2 不同温度下不同氯胺浓度对角突臂尾轮虫的灭活率

Figure 4-2 The inactivation rate of chloramine on *Brachionus angularis* at different temperatures

图 4-2 所示为 15、20、25、30°C 下不同浓度氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率。由图可知，随着  $CT$  值的增大，各温度下氯胺对轮虫的灭活率均逐渐上升。相同  $CT$  值，15、20 和 25°C 下，0.20 mg/L 氯胺对轮虫的灭活率普遍高于其他浓度组；30°C 下，0.15 mg/L 氯胺对轮虫的灭活率普遍高于其他浓度组，0.20 mg/L 氯胺次

之。相同  $CT$  值,  $15^{\circ}\text{C}$  下,  $0.25\text{ mg/L}$  氯胺对轮虫的灭活率普遍低于其他浓度组;  $20$ 、 $25^{\circ}\text{C}$  下, 各浓度组 (除  $0.20\text{ mg/L}$  以外) 灭活率较为接近;  $30^{\circ}\text{C}$  下,  $0.30$ 、 $0.35\text{ mg/L}$  氯胺对轮虫的灭活率普遍低于其他浓度组。  $15$ 、 $20$ 、 $25$ 、 $30^{\circ}\text{C}$  下, 灭活率达到  $100\%$  所需最低  $CT$  值分别为  $12$ 、 $12$ 、 $14$  和  $10\text{ mg}\cdot\text{min/L}$ , 对应的浓度分别是  $0.20$ 、 $0.20$ 、 $0.20$  和  $0.15\text{ mg/L}$ 。

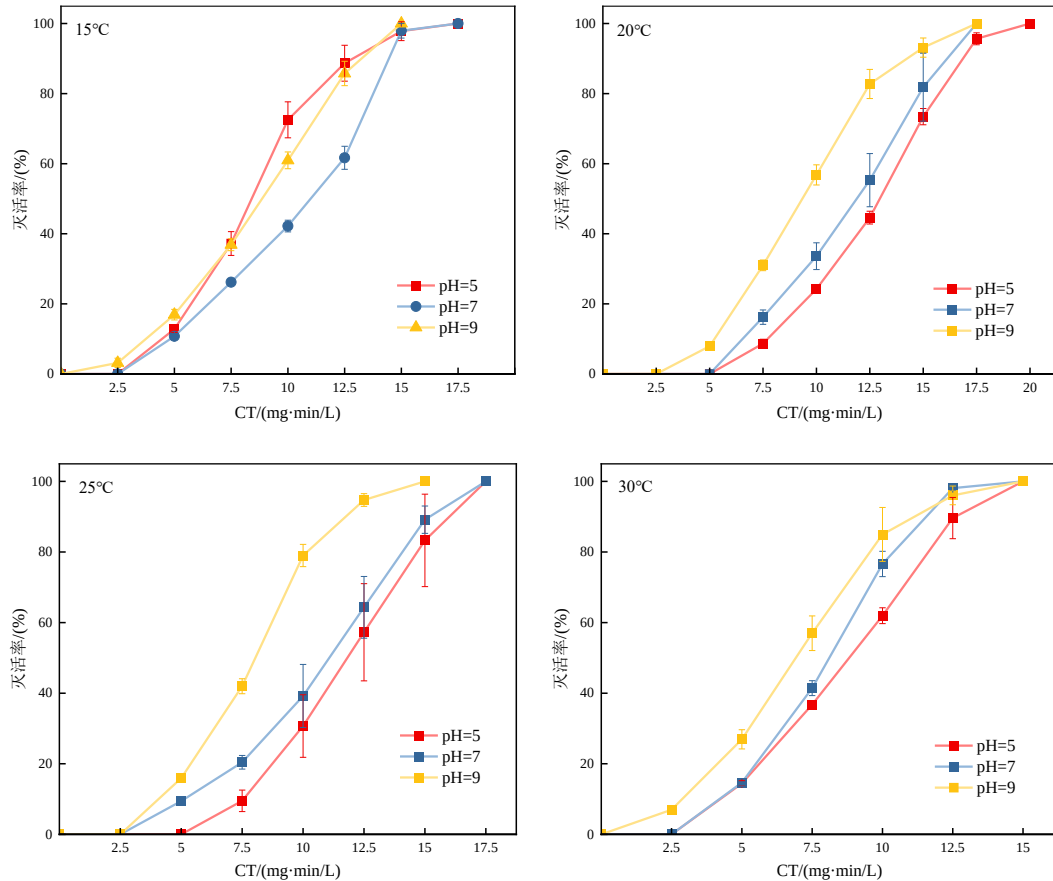
表 4-1 所列为不同温度条件下氯胺对角突臂尾轮虫的灭活动力学拟合结果。  $15^{\circ}\text{C}$  下, 灭活过程符合两阶段准一级动力学模型, 且未观察到迟滞效应 ( $CT_{\text{lag}}=0\text{ mg}\cdot\text{min/L}$ )。  $20$ 、 $25^{\circ}\text{C}$  下,  $0.15$ 、 $0.20\text{ mg/L}$  氯胺对轮虫的灭活过程符合迟滞型两阶段准一级动力学模型, 迟滞期分别为  $3.0$ 、 $4.0\text{ mg}\cdot\text{min/L}$  和  $4.5$ 、 $4.0\text{ mg}\cdot\text{min/L}$ ;  $0.25$ 、 $0.30$  和  $0.35\text{ mg/L}$  氯胺对轮虫的灭活符合两阶段准一级动力学模型。  $30^{\circ}\text{C}$  下,  $0.15\text{ mg/L}$  氯胺对轮虫的灭活符合迟滞型两阶段准一级动力学模型。

表 4-1 不同温度下不同浓度氯胺对角突臂尾轮虫的灭活动力学  
Table 4-1 Inactivation kinetics of *Brachionus angularis* exposed to different concentrations of chloramine at various temperatures

| 温度<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | 浓度/ $(\text{mg/L})$ | 迟滞期<br>/ $(\text{mg}\cdot\text{min/L})$ | 第 1 阶段方程           | $R_1^2$ | 第 2 阶段方程            | $R_2^2$ |
|----------------------------|---------------------|-----------------------------------------|--------------------|---------|---------------------|---------|
| 15                         | 0.15                | /                                       | $y = 0.20 - 0.11x$ | 0.90    | $y = 10.22 - 1.31x$ | 0.99    |
|                            | 0.20                | /                                       | $y = 0.11 - 0.06x$ | 0.99    | $y = 4.19 - 0.78x$  | 0.98    |
|                            | 0.25                | /                                       | $y = 0.29 - 0.08x$ | 0.99    | $y = 11.98 - 1.04x$ | 0.99    |
|                            | 0.30                | /                                       | $y = 0.26 - 0.11x$ | 0.99    | $y = 3.67 - 0.45x$  | 0.99    |
|                            | 0.35                | /                                       | $y = 0.32 - 0.12x$ | 0.95    | $y = 5.97 - 0.67x$  | 0.99    |
| 20                         | 0.15                | 3.0                                     | $y = 0.28 - 0.07x$ | 0.86    | $y = 3.07 - 0.33x$  | 0.93    |
|                            | 0.20                | 4.0                                     | $y = 0.21 - 0.06x$ | 0.99    | $y = 1.71 - 0.25x$  | 0.99    |
|                            | 0.25                | /                                       | $y = 0.18 - 0.04x$ | 0.99    | $y = 1.47 - 0.19x$  | 0.97    |
|                            | 0.30                | /                                       | $y = 0.13 - 0.05x$ | 0.98    | $y = 2.88 - 0.31x$  | 0.99    |
|                            | 0.35                | /                                       | $y = 0.15 - 0.06x$ | 0.99    | $y = 5.70 - 0.49x$  | 0.99    |
| 25                         | 0.15                | 4.5                                     | $y = 0.23 - 0.06x$ | 0.98    | $y = 2.56 - 0.30x$  | 0.91    |
|                            | 0.20                | 4.0                                     | $y = 0.18 - 0.06x$ | 0.99    | $y = 2.48 - 0.35x$  | 0.97    |
|                            | 0.25                | /                                       | $y = 0.16 - 0.05x$ | 0.99    | $y = 2.74 - 0.32x$  | 0.95    |
|                            | 0.30                | /                                       | $y = 0.55 - 0.11x$ | 0.99    | $y = 2.52 - 0.28x$  | 0.99    |
|                            | 0.35                | /                                       | $y = 0.21 - 0.06x$ | 0.88    | $y = 5.06 - 0.47x$  | 0.99    |
| 30                         | 0.15                | 3.0                                     | $y = 0.47 - 0.17x$ | 0.99    | $y = 4.55 - 0.89x$  | 0.99    |
|                            | 0.20                | /                                       | $y = 0.07 - 0.04x$ | 0.99    | $y = 1.50 - 0.31x$  | 0.95    |
|                            | 0.25                | /                                       | $y = 0.16 - 0.06x$ | 0.99    | $y = 3.72 - 0.57x$  | 0.92    |
|                            | 0.30                | /                                       | $y = 0.18 - 0.06x$ | 0.99    | $y = 2.19 - 0.31x$  | 0.98    |
|                            | 0.35                | /                                       | $y = 0.16 - 0.07x$ | 0.99    | $y = 3.66 - 0.43x$  | 0.99    |

#### 4.1.2 pH 对氯胺灭活轮虫效果的影响

图 4-3 为 15、20、25 和 30℃ 下，pH 值为 5、7 和 9 时 0.25 mg/L 氯胺对角突臂尾轮虫的灭活过程。由图可知，20、25、30℃ 下，氯胺对轮虫的灭活效果随 pH 的增大而逐渐提高。25℃ 下，当 CT 值大于 5 mg·min/L 时，pH 为 9 时氯胺对轮虫灭活效果显著优于其他条件 ( $p < 0.01$ )。



注：C 为氧化剂浓度；T 为接触时间。

图 4-3 不同 pH 值下氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率

Figure 4-3 Inactivation rate of chloramines on *Brachionus angularis* at different pH

表 4-2 展示了 0.25 mg/L 氯胺在不同温度梯度 (15~30℃) 及 pH 范围 (5~9) 下对轮虫的灭活动力学特征。由表可知，低温条件 (15℃) 下，不同 pH 值条件下氯胺对轮虫的灭活过程符合两阶段准一级动力学模型。在中高温条件 (20~30℃) 下，当 pH 为 7 和 5 时氯胺对轮虫的灭活过程符合两阶段准一级动力学模型；当 pH 为 9 时，灭活过程符合准一级动力学模型，且在 25℃ 下 k 值最大。

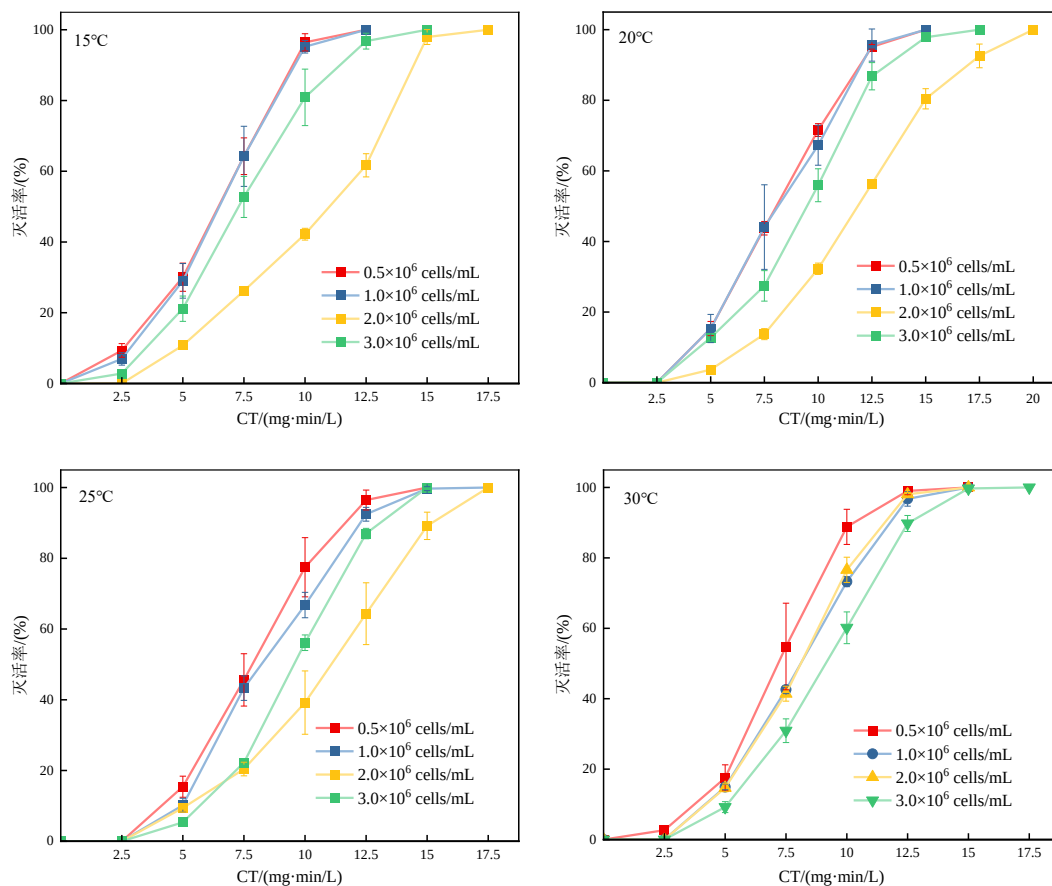
表 4-2 不同 pH 值下氯胺灭活角突臂尾轮虫的动力学拟合结果

Table 4-2 Kinetic fitting results of *Brachionus angularis* inactivation by chloramines at different pH

| 温度<br>/(°C) | pH | 迟滞期<br>/(mg·min/L) | 第 1 阶段方程         | $R_1^2$ | 第 2 阶段方程         | $R_2^2$ |
|-------------|----|--------------------|------------------|---------|------------------|---------|
| 15          | 9  | /                  | $y = 0.18-0.08x$ | 0.95    | $y = 1.15-0.36x$ | 0.96    |
|             | 7  | 2.5                | $y = 0.29-0.08x$ | 0.99    | $y = 1.51-0.21x$ | 0.72    |
|             | 5  | 2.5                | $y = 0.64-0.16x$ | 0.92    | $y = 3.05-0.43x$ | 0.99    |
| 20          | 9  | /                  | $y = 0.25-0.14x$ | 0.93    | /                | /       |
|             | 7  | 2.5                | $y = 0.29-0.09x$ | 0.99    | $y = 1.01-0.19x$ | 0.92    |
|             | 5  | 2.5                | $y = 0.36-0.08x$ | 0.96    | $y = 2.78-0.34x$ | 0.93    |
| 25          | 9  | 2.5                | $y = 0.70-0.18x$ | 0.91    | /                | /       |
|             | 7  | 2.5                | $y = 0.18-0.05x$ | 0.97    | $y = 2.74-0.32x$ | 0.95    |
|             | 5  | 2.5                | $y = 0.66-0.10x$ | 0.95    | $y = 3.12-0.35x$ | 0.97    |
| 30          | 9  | 2.5                | $y = 0.24-0.12x$ | 0.87    | /                | /       |
|             | 7  | 2.5                | $y = 0.59-0.15x$ | 0.99    | $y = 3.72-0.57x$ | 0.93    |
|             | 5  | 2.5                | $y = 0.45-0.12x$ | 0.99    | $y = 1.10-0.21x$ | 0.98    |

#### 4.1.3 藻密度对氯胺灭活轮虫效果的影响

图 4-4 为 15、20、25 和 30°C 下，藻密度为 0.5、1.0、2.0 和  $3.0 \times 10^6$  cells/mL 时 0.25mg/L 氯胺对角突臂尾轮虫的灭活过程。通过试验发现，15、20、25°C 下，藻密度为  $2.0 \times 10^6$  cells/mL 时，氯胺对轮虫的灭活率低于其他藻密度条件。25°C 下，当  $CT$  值为 17.5 mg·min/L 时，轮虫已完全灭活；当  $CT$  值大于 7.5 mg·min/L 时， $0.5 \times 10^6$  cells/mL、 $1.0 \times 10^6$  cells/mL 藻密度下氯胺对轮虫的灭活效果显著优于  $2.0 \times 10^6$  cells/mL 藻密度下的灭活效果 ( $p < 0.05$ )。



注：C 为氧化剂浓度；T 为接触时间。

图 4-4 不同藻密度下氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率

Figure 4-4 Inactivation rate of chloramines on *Brachionus angularis* at different algal densities

表 4-3 展示了不同温度(15~30°C)和不同藻密度梯度(0.5、1.0、2.0 和  $3.0 \times 10^6$  cells/mL)时 0.25mg/L 氯胺对轮虫的灭活动力学过程, 由表可知, 在低温条件(15 和 20°C)下,  $0.5 \times 10^6$  cells/mL 藻密度条件下氯胺对轮虫的灭活过程符合准一级动力学模型; 1.0、2.0 和  $3.0 \times 10^6$  cells/mL 藻密度条件下氯胺对轮虫的灭活过程符合两阶段准一级动力学模型。中高温(25 和 30°C)下, 不同藻密度条件下氯胺对轮虫的灭活过程符合两阶段准一级动力学模型。



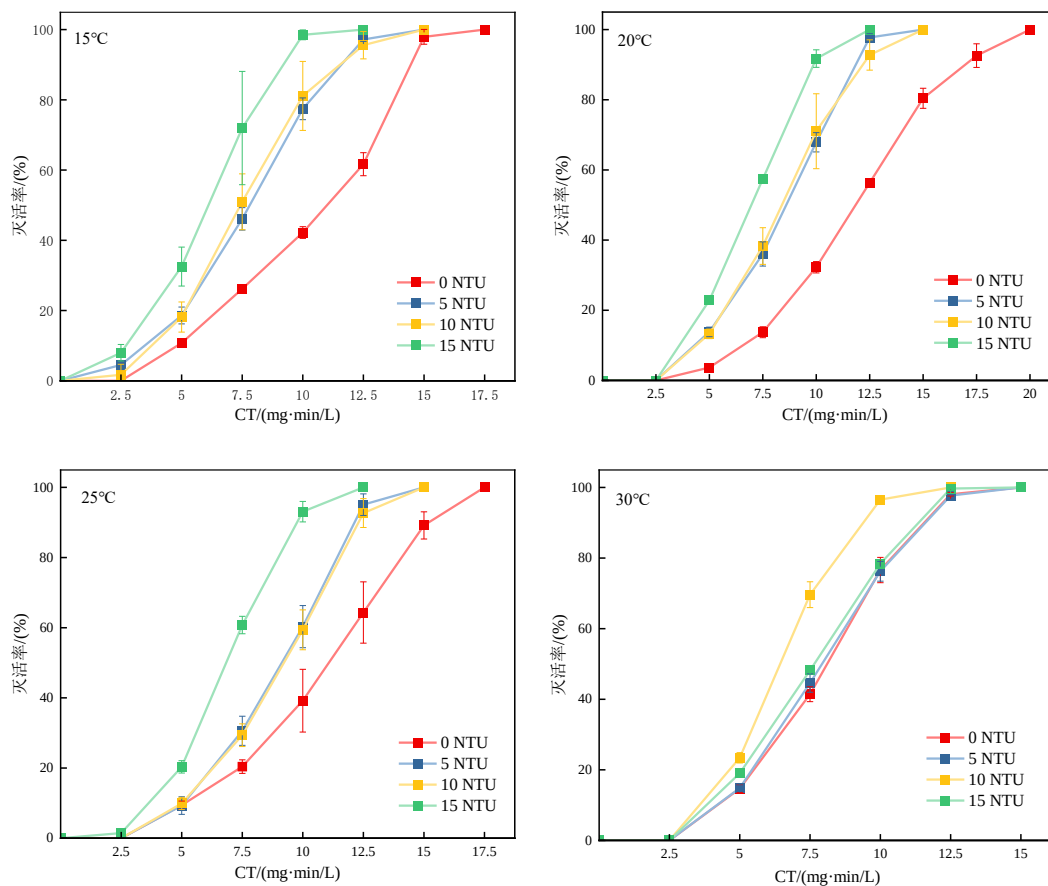
表 4-3 不同藻密度下氯胺灭活角突臂尾轮虫的动力学拟合结果

Table 4-3 Kinetic fitting results of *Brachionus angularis* inactivation by chloramines at various algal densities

| 温度<br>/(°C) | 藻密度<br>/(cells/mL) | 迟滞期<br>/(mg·min/L) | 第 1 阶段方程           | $R_1^2$ | 第 2 阶段方程           | $R_2^2$ |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| 15          | $0.5 \times 10^6$  | /                  | $y = 0.27 - 0.15x$ | 0.82    | /                  | /       |
|             | $1.0 \times 10^6$  | /                  | $y = 0.19 - 0.12x$ | 0.99    | $y = 1.19 - 0.44x$ | 0.91    |
|             | $2.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.29 - 0.08x$ | 0.99    | $y = 1.51 - 0.21x$ | 0.72    |
|             | $3.0 \times 10^6$  | /                  | $y = 0.23 - 0.10x$ | 0.93    | $y = 3.01 - 0.50x$ | 0.96    |
| 20          | $0.5 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 1.11 - 0.25x$ | 0.87    | /                  | /       |
|             | $1.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.66 - 0.17x$ | 0.98    | $y = 1.87 - 0.31x$ | 0.81    |
|             | $2.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.28 - 0.06x$ | 0.96    | $y = 1.52 - 0.19x$ | 0.96    |
|             | $3.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.41 - 0.11x$ | 0.92    | $y = 4.83 - 0.56x$ | 0.98    |
| 25          | $0.5 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.71 - 0.18x$ | 0.99    | $y = 2.67 - 0.48x$ | 0.94    |
|             | $1.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.81 - 0.18x$ | 0.99    | $y = 1.66 - 0.30x$ | 0.89    |
|             | $2.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.18 - 0.05x$ | 0.97    | $y = 2.74 - 0.32x$ | 0.95    |
|             | $3.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.34 - 0.08x$ | 0.99    | $y = 1.90 - 0.29x$ | 0.95    |
| 30          | $0.5 \times 10^6$  | /                  | $y = 0.14 - 0.07x$ | 0.99    | $y = 1.94 - 0.43x$ | 0.92    |
|             | $1.0 \times 10^6$  | /                  | $y = 0.03 - 0.04x$ | 0.90    | $y = 0.78 - 0.19x$ | 0.95    |
|             | $2.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.59 - 0.15x$ | 0.99    | $y = 3.72 - 0.57x$ | 0.93    |
|             | $3.0 \times 10^6$  | 2.5                | $y = 0.45 - 0.11x$ | 0.99    | $y = 2.09 - 0.32x$ | 0.89    |

## 4.1.4 浊度对氯胺灭活轮虫效果的影响

图 4-5 为 15、20、25 和 30°C 下，浊度为 0、5、10 和 15 NTU 时 0.25 mg/L 氯胺对角突臂尾轮虫的灭活过程。由图可知，15、20、25°C 下，轮虫灭活效果随浊度的增大逐渐降低。25°C 下，当  $CT$  值大于 7.5 mg·min/L 时，浊度为 15 NTU 条件下，轮虫灭活效果显著低于其他浊度条件下的灭活效果 ( $p < 0.05$ )。



注：C 为氧化剂浓度；T 为接触时间。

图 4-5 不同浊度下氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率

Figure 4-5 Inactivation rate of chloramines on *Brachionus angularis* at different turbidity levels

表 4-4 展示了 0.25 mg/L 氯胺在不同温度（15、20、25 和 30°C）和不同浊度梯度（0、5、10 和 15 NTU）下，对轮虫的灭活动力学过程。试验结果表明，低温条件（15°C）下，当浊度为 0 NTU 时氯胺对轮虫的灭活过程符合准一级动力学模型，当浊度大于 5 NTU 时氯胺对轮虫的灭活过程符合两阶段准一级动力学模型；20°C 下，当浊度为 0、5 和 10 NTU 时氯胺对轮虫的灭活过程两阶段准一级动力学模型，当浊度为 15 NTU 时氯胺对轮虫的灭活过程符合准一级动力学模型；25°C 下，全浊度范围内，氯胺对轮虫的灭活过程两阶段准一级动力学模型；30°C 下，当浊度为 0 和 5 NTU 时氯胺对轮虫的灭活过程两阶段准一级动力学模型，当浊度为 10 和 15 NTU 时氯胺对轮虫的灭活过程符合准一级动力学模型。

表 4-4 不同浊度下氯胺灭活角突臂尾轮虫轮虫的动力学拟合结果

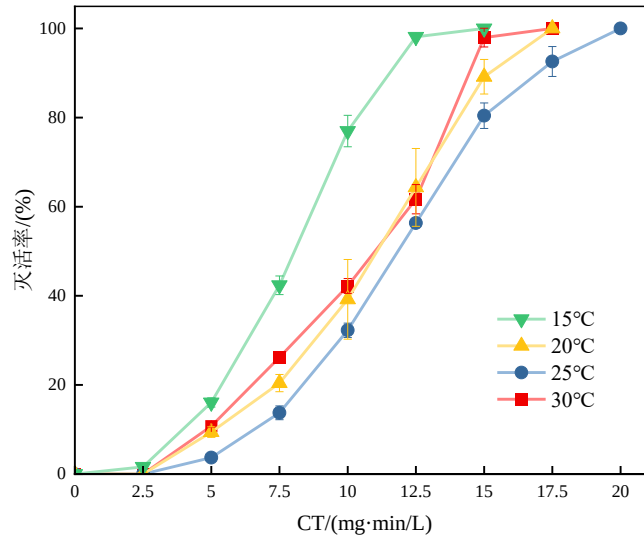
Table 4-4 Kinetic fitting results of *Brachionus angularis* inactivation by chloramines at different turbidity

| 温度<br>/(°C) | 浊度/(NTU) | 迟滞期<br>/(mg·min/L) | 第 1 阶段方程         | $R_1^2$ | 第 2 阶段方程         | $R_2^2$ |
|-------------|----------|--------------------|------------------|---------|------------------|---------|
| 15          | 0        | /                  | $y = 0.31-0.08x$ | 0.95    | /                | /       |
|             | 5        | 2.5                | $y = 0.19-0.09x$ | 0.92    | $y = 3.31-0.52x$ | 0.94    |
|             | 10       | 2.5                | $y = 0.23-0.10x$ | 0.88    | $y = 2.27-1.40x$ | 0.99    |
|             | 15       | /                  | $y = 0.23-0.12x$ | 0.99    | $y = 3.0-0.68x$  | 0.99    |
| 20          | 0        | 2.5                | $y = 0.28-0.06x$ | 0.96    | $y = 1.52-0.19x$ | 0.96    |
|             | 5        | 2.5                | $y = 0.45-0.12x$ | 0.99    | $y = 1.90-0.31x$ | 0.86    |
|             | 10       | 2.5                | $y = 0.54-0.14x$ | 0.99    | $y = 2.57-0.41x$ | 0.98    |
|             | 15       | 2.5                | $y = 0.95-0.24x$ | 0.98    | /                | /       |
| 25          | 0        | /                  | $y = 0.18-0.05x$ | 0.97    | $y = 2.74-0.32x$ | 0.95    |
|             | 5        | 2.5                | $y = 0.44-0.11x$ | 0.99    | $y = 1.93-0.30x$ | 0.81    |
|             | 10       | 2.5                | $y = 0.38-0.10x$ | 0.99    | $y = 1.64-0.26x$ | 0.88    |
|             | 15       | /                  | $y = 0.20-0.09x$ | 0.99    | $y = 1.30-0.30x$ | 0.96    |
| 30          | 0        | 2.5                | $y = 0.59-0.15x$ | 0.99    | $y = 3.72-0.57x$ | 0.93    |
|             | 5        | 2.5                | $y = 0.70-0.17x$ | 0.99    | $y = 2.32-0.39x$ | 0.92    |
|             | 10       | 2.5                | $y = 2.02-0.46x$ | 0.93    | /                | /       |
|             | 15       | 2.5                | $y = 0.82-0.20x$ | 0.94    | /                | /       |

#### 4.1.5 温度对氯胺灭活轮虫效果的影响

图 4-6 为 15、20、25 和 30°C 下，0.25 mg/L 氯胺对角突臂尾轮虫的灭活过程。在 15~30°C 条件下，适当升高和降低温度都能提高轮虫灭活率。当  $CT$  值大于 5 mg·min/L 时，20°C 条件下轮虫灭活率显著低于其他温度下的灭活率( $p < 0.01$ )。

表 4-5 展示了 0.25 mg/L 氯胺在不同温度（15、20、25 和 30°C）下，对轮虫的灭活动力学过程，试验数据表明，在全温度范围内，氯胺对轮虫的灭活过程符合两阶段准一级动力学模型，且第 2 阶段的反应速率常数  $k_2$  均大于第 1 阶段的反应速率常数  $k_1$ 。当温度为 30°C 时  $k_1$ 、 $k_2$  最大。



注：C 为氧化剂浓度；T 为接触时间。

图 4-6 不同温度下氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率

Figure 4-6 Inactivation rate of chloramines on *Brachionus angularis* at different temperatures

表 4-5 不同温度下氯胺灭活轮虫的动力学拟合结果

Table 4-5 Kinetic fitting results of *Brachionus angularis* inactivation by chloramines at different temperatures

| 温度<br>/(°C) | 迟滞期<br>/(mg·min/L) | 第 1 阶段方程           | $R_1^2$ | 第 2 阶段方程           | $R_2^2$ |
|-------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| 15          | /                  | $y = 0.29 - 0.08x$ | 0.99    | $y = 1.51 - 0.21x$ | 0.71    |
| 20          | 3.0                | $y = 0.28 - 0.07x$ | 0.96    | $y = 1.47 - 0.19x$ | 0.97    |
| 25          | 4.5                | $y = 0.18 - 0.05x$ | 0.97    | $y = 2.74 - 0.32x$ | 0.95    |
| 30          | 3.0                | $y = 0.59 - 0.15x$ | 0.99    | $y = 3.72 - 0.57x$ | 0.93    |

## 4.2 氯胺灭活对角突臂尾轮虫氧化应激效应的影响

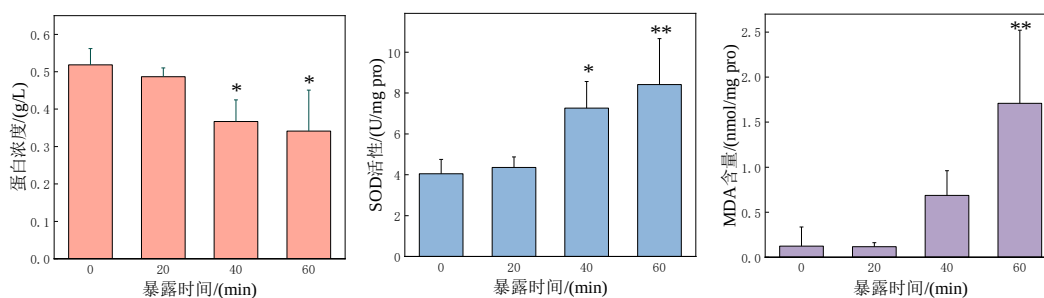
氧化应激是指当机体内的活性氧（Reactive Oxygen Species, ROS）生成与抗氧化防御系统的动态平衡被打破时，会触发一系列复杂的应激反应。在外界环境压力作用下，细胞内的氧化还原稳态被扰乱，促使 ROS 及其衍生物（如自由基）大量生成。当 ROS 积累超过机体的清除能力时，会引发蛋白质氧化损伤、脂质过氧化反应以及 DNA 结构破坏，甚至造成线粒体功能障碍和溶酶体膜稳定性下降。抗氧化防御系统由两大类别构成：一类是酶系保护机制，如超氧化物歧化酶、

过氧化氢酶（CAT）等催化 ROS 分解的关键酶；另一类是小分子抗氧化物质，包括维生素 C/E、类黄酮化合物及谷胱甘肽等自由基清除剂。这些组分通过协同作用维持细胞内氧化还原平衡，抵御外源性氧化损伤。

#### 4.2.1 氯胺灭活对轮虫氧化应激的影响

已经有众多研究证实<sup>[95-97]</sup>，环境污染物对生物机体的危害机制常涉及氧化应激效应。同样的，在轮虫氧化灭活过程中，蛋白质变化、SOD 和 MDA 是反映氧化应激对轮虫细胞影响的关键指标。氧化剂会导致蛋白质氧化和降解，破坏其结构和功能，同时可能诱导应激蛋白表达以抵抗损伤；SOD 活性的变化反映了轮虫抗氧化能力的变化，活性升高表明抗氧化防御增强，而活性降低则加速氧化损伤；MDA 作为脂质过氧化的终产物，其含量升高表明细胞膜受到严重氧化损伤，进而加速轮虫灭活。通过研究这些指标的变化，可以深入理解氧化灭活机制，并为优化灭活工艺提供科学依据。

图 4-7 所示为暴露于 0.15 mg/L 氯胺中角突臂尾轮虫体内蛋白浓度、SOD 活性和 MDA 含量的变化情况。由图可知，与对照组相比，暴露 40、60 min 时，轮虫体内蛋白浓度显著降低( $p<0.05$ )；暴露 60 min 时，轮虫体内 MDA 含量极显著上升( $p<0.01$ )；暴露 40、60 min 时，轮虫体内 SOD 活性分别显著( $p<0.05$ )和极显著上升( $p<0.01$ )。



注：\*表示与对照组有显著差异( $P<0.05$ )，\*\*表示与对照组有极显著差异( $P<0.01$ )。

图 4-7 暴露于 0.15 mg/L 氯胺中角突臂尾轮虫蛋白浓度、丙二醛含量和超氧化物歧化酶活性

Figure 4-7 The protein concentration, malondialdehyde content, and superoxide dismutase activity of *Brachionus angularis* exposed to 0.15 mg/L chloramine

### 4.3 氯胺预氧化和混凝联用对轮虫去除效果研究

混凝沉淀通过吸附、絮凝和沉降作用有效去除水中的轮虫，但其效果受搅拌条件、混凝剂投加量、沉淀时间和轮虫特性等因素影响。通过优化混凝条件、改进搅拌条件以及联合其他工艺，可以进一步提高轮虫的去除效果，保障水质安全。

#### 4.3.1 预氧化和混凝联用轮虫去除效果研究

根据氯胺对轮虫的灭活效果，选择不同浓度的氯胺预氧化与混凝联用，观察角突臂尾轮虫的去除效果。结果如图 4-8 所示。

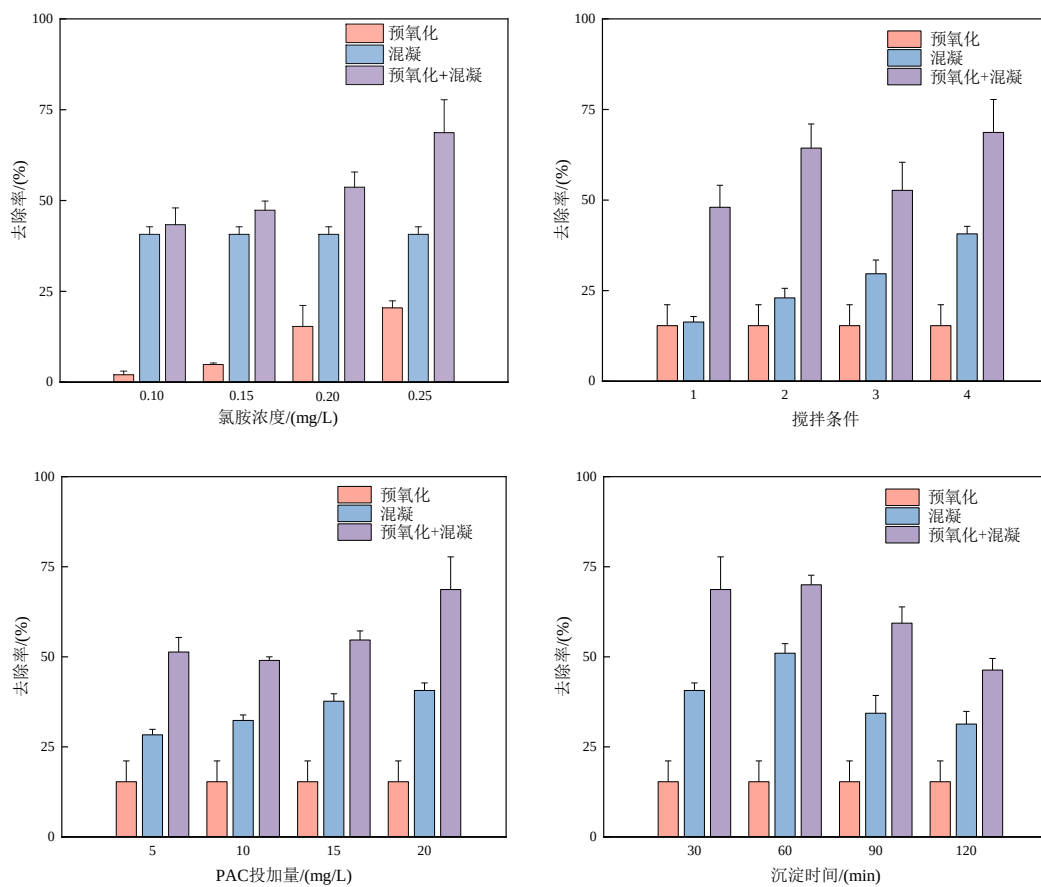


图 4-8 氯胺预氧化与混凝联用对角突臂尾轮虫去除率

Figure 4-8 Removal efficiency of *Brachionus angularis* by combined pre-oxidation with chloramines

由试验结果可知，预氧化和混凝联用对轮虫的去除效果要好于单独预氧化、单独混凝。随着氯胺预氧化浓度的增加，预氧化和混凝联用对角突臂尾轮虫的去除率逐渐上升。与 0.10、0.15、0.20 和 0.25 mg/L 氯胺单独氧化相比，预氧化和

混凝联用对角突臂尾轮虫的去除率分别提高了 41.33%、42.50%、38.35%和 48.25%；与单独混凝相比，0.10、0.15、0.20 和 0.25 mg/L 氯胺预氧化和混凝联用后，对轮虫的去除率分别提高了 2.67%、6.67%、13.00%和 28.00%。与单独混凝相比，0.20 mg/L 氯胺预氧化后，1、2、3 和 4 搅拌条件下，对轮虫的去除率分别提高了 31.67%、41.33%、23.00%和 28.00%；5、10、15 和 20 mg/LPAC 条件下，对轮虫的去除率分别提高了 23.00%、16.67%、17.00%和 28.00%；30、60、90 和 120 分钟沉淀时间下，对轮虫的去除率分别降低了 28.00%、19.00%、25.00%和 15.00%。

#### 4.3.2 轮虫去除率与混凝有关参数的相关关系

表 4-6 和表 4-7 为单独混凝和预氧化混凝联用时轮虫去除率与不同条件参数的相关关系。

表 4-6 轮虫去除率与混凝参数的相关关系

Table 4-6 Correlation between *Brachionus angularis* removal efficiency and coagulation parameters

|         | 去除率   | 搅拌条件  | PAC 投加量 | 沉淀时间 |
|---------|-------|-------|---------|------|
| 去除率     | 1     | 0.78* | 0.16    | 0.11 |
| 搅拌条件    | 0.78* | 1     | -0.27   | 0.27 |
| PAC 投加量 | 0.16  | -0.27 | 1       | 0.27 |
| 沉淀时间    | 0.11  | 0.27  | 0.27    | 1    |

注：\*表示显著相关， $p<0.05$ 。

表 4-7 轮虫去除率与预氧化混凝联用参数的相关关系

Table 4-7 Correlation between *Brachionus angularis* removal efficiency and parameters of combined pre-oxidation and coagulation

|         | 去除率   | 氯胺浓度  | 搅拌条件   | PAC 投加量 | 沉淀时间  |
|---------|-------|-------|--------|---------|-------|
| 去除率     | 1     | 0.55* | 0.14   | 0.29    | -0.12 |
| 氯胺浓度    | 0.55* | 1     | -0.091 | -0.20   | 0.20  |
| 搅拌条件    | 0.14  | -0.20 | 1      | -0.20   | 0.20  |
| PAC 投加量 | 0.29  | -0.20 | -0.20  | 1       | 0.20  |
| 沉淀时间    | -0.12 | 0.20  | 0.20   | 0.20    | 1     |

注：\*表示显著相关， $p<0.05$ 。

根据相关性分析发现，在试验范围内，单独混凝时轮虫去除率为 16%~51%，同时去除率与搅拌强度成正比（ $p<0.05$ ）；而加入预氧化环节之后，轮虫去除率大

大提升（43%~70%），此时轮虫去除率随氯胺浓度增大而升高（ $p<0.05$ ）。

#### 4.4 讨论

氧化灭活过程中， $CT$  值是评价氧化剂对微生物氧化灭活效果的重要指标<sup>[98]</sup>。为确保饮用水安全，通常会设定氧化剂作用的最小  $CT$  值。研究表明， $CT$  值为  $120\text{ mg}\cdot\text{min/L}$  时，次氯酸钠对枯草芽孢杆菌的灭活率达到 99.9%，灭活动力学过程符合 HOM 模型<sup>[99]</sup>； $CT$  值大于  $90\text{ mg}\cdot\text{min/L}$  时，二氧化氯对颤蚓的灭活率可达到 100%<sup>[36]</sup>；在  $25\sim120\text{ mg}\cdot\text{min/L}$  范围内， $CT$  值与次氯酸钠和二氧化氯对蠕虫的灭活率存在近似线性关系<sup>[100]</sup>。在本研究中， $CT$  值增大，氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率也随之增大，且在 20 和 25℃下，不同浓度的氯胺对轮虫的灭活率在相同  $CT$  值下十分相近，灭活过程符合两阶段准一级动力学模型，这表明  $CT$  值大小能较好地反映氧化剂对角突臂尾轮虫的灭活效果，适合用于评价氧化剂对轮虫的灭活能力；不同温度下氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率均随着  $CT$  值的增大而上升，其中，25℃下灭活率达到 100%的需要的最小  $CT$  值为  $14\text{ mg}\cdot\text{min/L}$ ，高于其他温度下的该值，表明 25℃是最适合角突臂尾轮虫存活温度。此外，相同  $CT$  值下，低浓度氯胺（0.15、0.20 mg/L）在不同温度下均表现出对轮虫较好的灭活效果，究其原因，氯胺氧化是一个渐进的过程，作用时间越长效果越好，低浓度的氯胺在相同  $CT$  值下接触时间长，氧化效果得以充分体现。

研究发现，氧化剂灭活颤蚓、蠕虫和贾地鞭毛虫时均出现了迟滞期现象<sup>[37, 100, 101]</sup>，但灭活细菌病毒时没有出现<sup>[102, 103]</sup>；次氯酸钠灭活剑水蚤迟滞期现象的出现与其体表甲壳的保护，阻止次氯酸钠的渗透有关， $CT$  值升高至一定值才会产生灭活效果<sup>[104]</sup>；相比之下，细胞壁对细菌的保护则要弱很多，无灭活迟滞期现象。该研究中，在 20 和 25℃下，氯胺在低浓度（0.15、0.20 mg/L）时灭活角突臂尾轮虫存在迟滞期，但随着氧化剂浓度的升高，迟滞期逐渐消失。通过观察灭活过程中角突臂尾轮虫蛋白质浓度的变化，灭活 20 min 时的蛋白质浓度与对照组相似，而灭活 40 min 和 60 min 时的蛋白质浓度显著降低，推测在氯胺氧化初期，角突臂尾轮虫宽阔且高度硬化的背甲<sup>[81]</sup>对机体起到一定的保护作用，延缓了氯胺的渗透，阻止了蛋白质外泄，表现出灭活迟滞现象；随着氧化的深入，轮虫体表被破坏，更多氯胺进入轮虫体内，细胞结构破坏，蛋白质外泄增多，导致蛋白



浓度显著降低（图 4-7），与谭万春<sup>[37]</sup>研究结论一致。

pH 值是影响氧化剂灭活效果的重要因素之一。有研究表明，当 pH 为 6~8 时，氯胺对蓝伯贾第虫、隐孢子虫胞囊灭活率为 99% 的 CT 值分别为 592 mg·min/L、1000 mg·min/L<sup>[105]</sup>。在本研究中，pH 值为 5 和 7 时，氯胺对轮虫的灭活效果明显比 pH 值为 9 时的差。推测原因，氯胺消毒的主要成分是一氯胺，当 pH 为 7.5~9.0 时，一氯胺稳定存在，pH 下降时一氯胺发生水解和酸催化反应氧化能力降低，氯胺向二氯胺和三氯胺转化，因此，在碱性条件下氯胺最为稳定且消毒效果最好，pH 值的降低导致氧化灭活能力降低<sup>[106]</sup>。

灭活试验中，藻类和轮虫均是氯胺氧化的作用对象。轮虫灭活效果同时受到氯胺氧化和藻类食物的影响。研究表明，氧化剂能通过抑制藻类物质的活性来进而控制藻类的生长繁殖<sup>[107]</sup>，氯的氧化作用使藻细胞轻微破坏，且随氧化程度加深，藻细胞破损，胞内的有机物质溶出<sup>[108]</sup>。CHEN<sup>[109]</sup>等发现，充足的藻摄入降低了溴酸盐对萼花臂尾轮虫存活和繁殖的毒性作用。本研究中，相比较投喂低密度藻来说，投喂高密度藻（ $2.0 \times 10^6$ 、 $3.0 \times 10^6$  cells/mL）时，普遍减弱了氯胺对角突臂尾轮虫的氧化灭活效果。究其原因，一是藻类本身也是氯胺氧化的对象，藻密度的增加必然降低了作用轮虫的氯胺的量；二是轮虫在获得了更多的食物后，对氯胺的抵抗力有所增强，导致灭活效果的减弱。

相关研究表明，浊度物质的存在会抑制氧化剂对微生物的灭活效果，这是因为一部分微生物可能会与颗粒物相结合，从而得到颗粒物质的庇护，导致灭活效果降低<sup>[110]</sup>。何盼盼<sup>[104]</sup>等人发现浊度物质的存在降低了次氯酸钠对剑水蚤的灭活效率，相同 CT 值下，浊度越高，灭活率越低，可能是浊度物质的颗粒粒径较小且吸附在剑水蚤体表，阻碍了次氯酸钠向剑水蚤体内的渗透过程，同时，液相中的浊度物质也会迟滞次氯酸钠向剑水蚤体表的传质过程。本研究中，氯胺灭活角突臂尾轮虫受浊度的影响与上述研究结果一致，即浊度物质的存在显著提高了轮虫对氯胺的耐受能力。推测原因可能是浊度物质吸附在角突臂尾轮虫体表，延缓了氯胺的渗透。

温度是影响消毒剂消毒效果的重要因素。有研究表明次氯酸钠对颤蚓的灭活效果随温度的升高而提高，还使颤蚓的迟滞期明显缩短<sup>[100]</sup>。此外，温度升高使氧化剂灭活摇蚊幼虫的速率提高，主要原因是升温使摇蚊幼虫生长代谢加快，氧

化剂进入摇蚊幼虫体内的速率变快,导致与外界交换物质的速率也变快,因此加强了氧化剂的毒性;除此之外,温度的升高导致了摇蚊幼虫体内物质与氧化剂的反应速率加快,加强了氧化剂对摇蚊幼虫的毒杀作用<sup>[111]</sup>。温度也是影响轮虫等无脊椎动物生长、发育和群落组成的极为重要的环境因子<sup>[112]</sup>,能直接影响氧化剂的氧化灭活效果<sup>[36]</sup>。研究表明,随着温度的升高,次氯酸钠对颤蚓的灭活效果逐渐提高,而灭活迟滞期明显缩短<sup>[100]</sup>。15~30℃范围内,二氧化氯对摇蚊幼虫的灭活速率随着温度的升高而提高,半数致死浓度从0.67 mg/L下降到0.31 mg/L<sup>[111]</sup>。该研究中,30℃下灭活率达到100%的需要的CT值最低(10 mg·min/L),表明高温(30℃)有利于提高氯胺对角突臂尾轮虫的灭活效果。究其原因,可能是高温导致氧化剂与轮虫体内物质反应速率加快,提高了氧化剂的氧化效能,其次,高温加速了氧化剂释放次氯酸的进程,从而提高了其氧化能力。

SOD 酶在生物细胞内较为常见,是抗氧化系统的关键酶之一,它可通过催化过氧化氢或者氧来缓解机体的氧化压力,因此 SOD 的活性可用于反应生物体应对胁迫应激的表现<sup>[113,114]</sup>。另外当产生氧化应激时,生物体会在细胞膜中产生过量 MDA,从而对生物体产生氧化毒性,因此 MDA 的浓度可以直接反映出生物体由于自由基引起的脂质过氧化伤害程度<sup>[113]</sup>。该研究中,MDA 含量和 SOD 活性均随着氧化时间增加而升高,表明在氯胺作用轮虫的过程中,轮虫脂质过氧化程度不断加深,与此同时,轮虫体内抗氧化应激系统被适时激活,以 SOD 为代表的抗氧化酶表达量增加,及时清除细胞内自由基以缓解机体的氧化损伤,但这种保护在多大范围内有效,其内在的分子机制如何,还有待进一步研究证实。

混凝对无脊椎动物的去除主要是通过矾花卷扫网捕并包裹无脊椎动物一起沉淀。该研究中,单独混凝时,搅拌强度的增加和混凝剂投加量的增大有助于提高轮虫去除效率,推测是由于混凝剂的进一步扩散形成了良好水解和聚合条件所致;而增大混凝剂投加量,有利于形成更大更密实的絮体,轮虫更加容易附着在矾花表面并随之沉降。预氧化能有效杀灭水体中的微生物<sup>[115,116]</sup>,降低无脊椎动物活性,与混凝联用能有效去除源水中的无脊椎动物,是水厂常见的前端环节<sup>[36]</sup>。研究表明,氧化剂预氧化能大大降低剑水蚤活性,使混凝沉淀单元的除蚤率大幅提升<sup>[61]</sup>。该研究中,与不加预氧化相比,0.20、0.25 mg/L 氯胺预氧化与混凝联用对轮虫的去除率分别提高了 13.00%和 28.00%,推测原因,很可能也是氯胺预氧

化降低了轮虫的游动活力，使混凝剂对轮虫的絮凝效果显著提升所致。25℃下， $CT$  值为  $18 \text{ mg} \cdot \text{min/L}$  时（即  $0.25 \text{ mg/L}$  氯胺作用  $72 \text{ min}$ ）氯胺对角突臂尾轮虫的灭活率可达到 100%（图 4-2），图 4-8 显示，沉淀 30、60 min（实际氧化作用时间为 71、101 min）轮虫的去除率达到 68.67% 和 70%，表明多数轮虫灭活后沉到了底部，但随着沉淀时间的进一步延长，这些灭活的轮虫可能再次漂浮起来，导致混凝对轮虫的去除率反而在不断下降，这与张敏<sup>[61]</sup>的研究结论一致，提示实践中沉淀时间需控制在合理范围。

## 4.5 小结

（1）氯胺对角突臂尾轮虫的灭活效果随氧化剂浓度的升高和灭活接触时间的延长而增加。氧化剂浓度较低时，轮虫的灭活动力学过程符合迟滞型两阶段准一级动力学模型，浓度较高时，轮虫的灭活动力学过程符合两阶段准一级动力学模型。

（2） $CT$  值可用于评价氯胺的灭活效果，相同  $CT$  值下轮虫的灭活效果接近；随着浓度由低到高，氯胺灭活轮虫的动力学过程中的迟滞现象消失。

（3）在试验范围内，pH 值与氯胺灭活轮虫效果呈正相关；适当降低藻密度，降低浊度有助于轮虫氧化灭活。升高温度有助于增强灭活效果，30℃条件下，氯胺灭活轮虫效果最好。

（4）MDA 含量和 SOD 活性均随着氧化时间增加而升高，表明面对氯胺的氧化损伤，角突臂尾轮虫适时启动了抗氧化应激保护机制。

（5）氯胺预氧化与混凝联用能显著提高混凝对轮虫的去除率，但沉淀时间应控制在一定范围，时间的延长不利于轮虫的去除。

## 第 5 章 结论与展望

### 5.1 研究结论

地表水源中的轮虫分布广泛,进入水厂之后常规的处理系统难以对其进行完全去除,带来潜在的安全风险。本研究对给水处理系统中水厂进水以及净水单元构筑物中的水质状况和轮虫存活动态进行了为期一年的监测分析,并对角突臂尾轮虫进行氯胺氧化灭活试验,探究灭活轮虫的动力学过程。在此基础上,分析了轮虫应对氧化损伤的抗氧化应激机制,并对氯胺氧化与混凝联用条件下轮虫的去除效果进行研究。主要结论如下:

(1) 通过对给水处理系统中水厂进水、砂滤进水和砂滤出水的水质检测和轮虫鉴定发现,除了 pH 和电导率,其他水质参数随季节变化明显。在水厂进水处共检测到 14 属 34 种轮虫,主要优势种为龟甲轮虫;砂滤进水处共检测出 24 种轮虫,优势种为腔轮虫、单趾轮虫和异尾轮虫;经过砂滤处理后,共检测出 16 种轮虫其中腔轮虫和单趾轮虫为优势种。

(2) 一年中,轮虫丰度总体呈现春夏季高、秋冬季低的特点。水厂进水和砂滤进水的轮虫丰度最大值出现在 6 月,最小值出现在 1 月,砂滤出水的轮虫丰度最大值出现在 8 月,最小值出现在 2 月。水厂进水、砂滤进水和砂滤出水轮虫丰度的全年平均值依次分别为  $54.833 \times 10^3$ 、 $7.722 \times 10^3$  和  $1.851 \times 10^3$  ind./m<sup>3</sup>。

(3) 给水处理系统能有效降低轮虫丰度,但是仍存在潜在风险;水厂进水中的轮虫种类与砂滤前后的种类具有一定相似性;水厂中的轮虫存活动态与温度、溶解氧、细菌总数等水质参数有一定显著关系,可以通过改变净水单元的水质参数降低轮虫丰度,提高水厂净水效率。

(4) CT 值可用于评价氯胺的灭活效果,相同 CT 值下轮虫的灭活效果接近。氯胺浓度较低时,角突臂尾轮虫的灭活动力学过程符合迟滞型两阶段准一级动力学模型,浓度较高时,轮虫的灭活动力学过程符合两阶段准一级动力学模型。碱性条件下氯胺灭活效果更好;藻密度、浊度对氯胺灭活效果的影响不显著;升高温度有助于增强灭活效果,30℃条件下,氯胺灭活轮虫效果最好。

(5) 低浓度氯胺灭活轮虫过程中存在迟滞期现象,通过观察灭活过程中轮

虫体内蛋白质的变化,推测是由于轮虫高度硬化的背甲为机体提供了一定的保护作用,延缓了氧化剂的渗透。此外,在灭活过程中轮虫体内抗氧化应激系统被激活同时轮虫脂质过氧化程度不断加深,MDA 含量和 SOD 活性随着氧化深入而升高。

(6) 适当改变混凝搅拌条件、混凝剂投加量和沉淀时间能够提高轮虫在混凝单元的去除效果,但这种改善是有限的;氯胺预氧化与混凝联用能有效提高轮虫的去除效率。

## 5.2 研究展望

文本对给水处理系统中的水质参数和轮虫种类丰度进行了为期一年的监测分析,在此基础上进行了氯胺氧化灭活角突臂尾轮虫的相关试验并对轮虫灭活动力学过程进行了拟合分析,获得了一定的试验结果。然而,本文依然有一定局限性和一些未深入研究的部分:

(1) 本文只对水厂进水、砂滤池进出水三个采样点的水质参数和轮虫情况进行了分析,后续可以对其他净水单元中的水质和轮虫进行采样分析。由于砂滤出水中轮虫丰度和细菌总数之间存在显著相关性,未来可以深入研究轮虫丰度与致病细菌等微生物之间的关系。

(2) 消毒氧化剂众多,同时给水系统中轮虫种类繁多,不同种类的轮虫对氧化剂的耐受程度可能不同,后续应选取不同种类的轮虫进行灭活试验,研究轮虫氧化灭活的过程。同时,未来可结合氧化应激相关基因的研究,重点关注轮虫灭活的机理研究。

## 参考文献

- [1] WHO. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. [M]. Geneva: World Health Organization. 2017.
- [2] Palansooriya K N, Yang Y, Tsang Y F, et al. Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 50(6): 549-611.
- [3] Jurczyński Y, Passos R, Campos L C. A review of the most concerning chemical contaminants in drinking water for human health [J]. *Sustainability*, 2024, 16(16): 7107.
- [4] Some S, Mondal R, Mitra D, et al. Microbial pollution of water with special reference to coliform bacteria and their nexus with environment[J]. *Energy Nexus*, 2021, 1: 100008.
- [5] Fernandez-Luqueno F, Lopez-Valdez F, Gamero-Melo P, et al. Heavy metal pollution in drinking water-a global risk for human health: A review [J]. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 7(7): 567-584.
- [6] Abbasi H, Shah H, Mohiuddin M, et al. Quantification of heavy metals and health risk assessment in processed fruits' products [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13 (12): 8965–8978.
- [7] Tchounwou P B, Yedjou C G, Patlolla A K, et al. Heavy metal toxicity and the environment [J]. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology: Volume 3: Environmental Toxicology*, 2012, 133-164.
- [8] Jomova K, Valko M. Advances in metal-induced oxidative stress and human disease [J]. *Toxicology*, 2011, 283(2-3): 65-87.
- [9] Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals [J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2014, 7(2): 60-72.
- [10] Kim J J, Kim Y S, Kumar V. Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2019, 54: 226-231.
- [11] Tkaczyk A, Mitrowska K, Posyniak A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 717: 137222.
- [12] Xiong Y, Zhou J, Xing Z, et al. Optimization of a volatile organic compound control strategy in an oil industry center in Canada by evaluating ozone and secondary organic aerosol formation potential [J]. *Environmental Research*, 2020, 191:110217.
- [13] Xiong Y, Zhou J, Xing Z, et al. Component characteristics and source apportionment of volatile organic compounds during summer and winter in downtown Chengdu, southwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 258:118485.
- [14] Ebele A J, Abdallah M A-E, Harrad S. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment [J]. *Emerging Contaminants*, 2017, 3(1): 1-16.
- [15] Sangamnere R, Misra T, Bherwani H, et al. A critical review of conventional and emerging wastewater treatment technologies [J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2023, 9(2): 58.
- [16] Sharma S, Bhattacharya A. Drinking water contamination and treatment techniques [J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(3): 1043-1067.

- [17] Kundu D, Dutta D, Joseph A, et al. Safeguarding drinking water: A brief insight on characteristics, treatments and risk assessment of contamination [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196(2): 180.
- [18] Zhao J, Wang Z. Future trends of water resources and influences on agriculture in China [J]. *Public Library of Science ONE*, 2020, 15(4): e0231671.
- [19] Zhang T, Huang J, Xu Y. Evaluation of the utilization efficiency of water resources in China based on ZSG-DEA: A perspective of water–energy–food nexus [J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2022, 15(1): 56.
- [20] Kim J Y, Atique U, Mamun M, et al. Long-term interannual and seasonal links between the nutrient regime, sestonic chlorophyll and dominant bluegreen algae under the varying intensity of monsoon precipitation in a drinking water reservoir [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(6): 2871.
- [21] Ikhlaiq A, Qazi U Y, Akram A, et al. Potable water treatment in a batch reactor benefited by combined filtration and catalytic ozonation [J]. *Water*, 2022, 14(15): 2357.
- [22] Hasan H A, Muhammad M H. A review of biological drinking water treatment technologies for contaminants removal from polluted water resources [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 33:101035.
- [23] 闫学亚, 翟学东. 饮用水处理技术的探讨 [J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(10): 25-27.
- [24] Zhang X, He Y, Zhang B, et al. Factors affecting microbiological quality of household drinking water supplied by small-scale ultrafiltration systems: A field study [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 689:725-733.
- [25] Bond T, Goslan E, Parsons S, et al. Treatment of disinfection by-product precursors [J]. *Environmental technology*, 2011, 32(1): 1-25.
- [26] Zhao C, Xu X, Wei X, et al. Optimizing backwash control using data on seasonal changes in the invertebrate community of granular activated carbon filters [J]. *Environmental Research*, 2024, 245:117797.
- [27] Wu Z, Tang X, Chen H. Seasonal and treatment-process variations in invertebrates in drinking water treatment plants [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2020, 15(4): 1-10.
- [28] Ren X, Li J, Zhou Z, et al. Impact of invertebrates on water quality safety and their sheltering effect on bacteria in water supply systems [J]. *Environ Pollut*, 2023, 330:121750.
- [29] Mieczan T, Niedźwiecki M, Tarkowska-Kukuryk M. Effects of rotifers, copepods and chironomid larvae on microbial communities in peatlands [J]. *European Journal of Protistology*, 2015, 51(5): 386-400.
- [30] 杨桂军, 潘宏凯, 刘正文, 等. 太湖不同湖区浮游甲壳动物季节变化的比较 [J]. *中国环境科学*, 2008(01): 27-32.
- [31] Dunkle M R, Bellmore J R, Fellman J B, et al. Glaciers, snow, and rain: Water source influences invertebrate community structure and secondary production across a hydrologically diverse subarctic landscape [J]. *Limnology and Oceanography*, 2024, 69(2): 232-245.
- [32] Oded U, Pantai S, Brooks A, et al. Microbiological examination and physicochemical analysis of estuary water used as a point of source drinking water [J]. *International Journal of Pathogen Research*, 2018, 1(1): 1-13.
- [33] 张伟杰, 李庆云, 张圆. 关于自来水中红虫问题的分析 [J]. *供水技术*, 2014, 8(03): 38-41.

- [34] 崔福义,林涛,马放,等.水源中水蚤类浮游动物的孳生与生态控制研究[J].哈尔滨工业大学学报,2002,(03):399-403.
- [35] Inkinen J, Jayaprakash B, Siponen S, et al. Active eukaryotes in drinking water distribution systems of ground and surface waterworks [J]. Microbiome, 2019, 7:1-17.
- [36] 佟鑫. 北方水库水浮游生物预氧化灭活试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
- [37] 谭万春, 李志宏, 聂小保, 等. 二氧化氯对颤蚓的灭活效果及机理初步探讨[J].环境科学学报,2017(3709):3434-3440.
- [38] Van Lieverloo J H, Hoogenboezem W, Veenendaal G, et al. Variability of invertebrate abundance in drinking water distribution systems in the Netherlands in relation to biostability and sediment volumes [J]. Water Research, 2012, 46(16): 4918-4932.
- [39] Bichai F, Dullemont Y, Hijnen W, et al. Predation and transport of persistent pathogens in GAC and slow sand filters: a threat to drinking water safety? [J]. Water Research, 2014, 64:296-308.
- [40] Fayer R, Trout J M, Walsh E, et al. Rotifers ingest oocysts of *Cryptosporidium parvum* [J]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 2000, 47(2): 161-163.
- [41] Stott R, May E, Ramirez E, et al. Predation of *Cryptosporidium* oocysts by protozoa and rotifers: implications for water quality and public health [J]. Water Science and Technology, 2003, 47(3): 77-83.
- [42] 邢宏,陈艳萍,张清,等.水处理工艺中浮游甲壳动物的控制[J].中国给水排水,2005,(03):77-79.
- [43] Adam K, Heath R, Steynberg M. Invertebrates as biomonitors of sand-filter efficiency [J]. Water SA, 1998, 24:43-48.
- [44] Strandberg U, Ilo T, Akkanen J, et al. Warming decreases bioconversion of polyunsaturated fatty acids in chironomid larvae maintained on cyanobacterium microcystis [J]. Biomolecules, 2021, 11(9): 1326.
- [45] Locas A, Barbeau B, Gauthier V. Nematodes as a source of total coliforms in a distribution system [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2007, 53(5): 580-585.
- [46] Zhu J, Chen H, Chen C, et al. Study on the migration and inactivation of invertebrates in the advanced treatment process in waterworks [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2014, 23: 1314-1321.
- [47] Wu Z, Zhu J, Tang X, et al. Synergistic effect of chlorination and sand filtration for efficient elimination of invertebrate leakage in BAC filter [J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 79:235-242.
- [48] Zhu J, Tang X, Wu Z, et al. Migration and Control of Invertebrates in waterworks with advanced treatment [J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, 144(7): 04018043.
- [49] 吴志玲, 陈洪斌. 供水系统中无脊椎动物的孳生及调控技术进展 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 20-24.
- [50] Van Lieverloo J, Hoogenboezem W, Veenendaal G, et al. Invertebrates in drinking water distribution systems [M]. London: Microbial Growth in Drinking Water Supplies, 2013, 239.
- [51] Van Lieverloo J H M, Bosboom D W, Bakker G L, et al. Sampling and quantifying invertebrates from drinking water distribution mains [J]. Water Research, 2004, 38(5): 1101-1112.
- [52] 陈丽珠, 巢猛, 何孙胃. 净水厂水蚤类浮游动物的生物风险及影响因素研究 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(01): 60-63.
- [53] 王净.原水长距离输送过程中浮游动物群落演变特征及影响因素研究[D]. 辽宁:辽宁大学,2023.



- [54] 丁立君.净水工艺中猛水蚤风险控制技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [55] 刘丽君, 张金松, 安娜, 等. 生物活性炭滤池中无脊椎动物孳生问题与对策 [J]. 给水排水, 2009, 45(03): 14-18.
- [56] Schreiber H, Schoenen D, Traunspurger W. Invertebrate colonization of granular activated carbon filters [J]. *Water Research*, 1997, 31(4): 743-748.
- [57] 李小伟.生物活性炭滤池无脊椎动物群落分析及控制技术[D].广州:暨南大学,2008.
- [58] 唐煜坤.给水处理中剑水蚤和圆水蚤的分布及灭活试验研究[D].大庆:东北石油大学,2023.
- [59] Wu Z, Cheng Y, Chen T, et al.. Inactivation efficiency of sodium hypochlorite on rotifers and rotifer eggs [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 115:145-152.
- [60] 郭璐雪, 陈洪斌. 城镇供水系统耐氯无脊椎动物的产生与调控技术进展 [J]. 净水技术, 2019, 38(01): 19-24.
- [61] 张敏. 基于预氧化组合工艺去除水中剑水蚤的效能研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- [62] Wan Q, Cao R, Wen G, et al. Sequential use of UV-LEDs irradiation and chlorine to disinfect waterborne fungal spores: Efficiency, mechanism and photoreactivation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423:127102.
- [63] Matsumoto N, Aizawa T, Ohgaki S, et al. Removal methods of nematoda contained in the effluent of activated carbon [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2002, 2(3): 183-190.
- [64] 庞雪菲, 刘强, 许红睿, 等. 2018—2022 年苏州市生活饮用水中三氯甲烷浓度分析及健康风险评估 [J]. 环境卫生学杂志, 2024, 14(05): 438-442.
- [65] Ding S, Chu W, Bond T, et al. Formation and estimated toxicity of trihalomethanes, haloacetanitriles, and haloacetamides from the chlor (am) ination of acetaminophen [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 341:112-119.
- [66] 王宝贞,王欣泽,李冰,等.优质饮用水的消毒方法[J].哈尔滨工业大学学报,2002,(04):478-482.
- [67] 陈卓华, 陈丽珠. 南方水处理系统中无脊椎动物的控制 [J]. 给水排水, 2018, 54(10): 15-18.
- [68] 张敏, 崔福义, 刘冬梅, 等. 饮用水中预氧化剂对剑水蚤活性影响试验研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2015(3104):453-457+64.
- [69] Foster A R, Haas C N, Gerba C P, et al. Effectiveness of monochloramine for inactivation of coronavirus in reclaimed water [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 906:167634.
- [70] Fisher C L, Lane P D, Russell M, et al. Low molecular weight volatile organic compounds indicate grazing by the marine rotifer brachionus plicatilis on the microalgae microchloropsis salina [J]. *Metabolites*, 2020, 10(9): 361.
- [71] Wu B, Dai S, Wen X, et al. Chlorophyll-nutrient relationship changes with lake type, season and small-bodied zooplankton in a set of subtropical shallow lakes [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135:108571.
- [72] 陈婕, 张波. 温度、盐度、pH 值对褶皱臂尾轮虫休眠卵孵化率的影响 [J]. 水产科学, 2009, 28(02): 100-102.
- [73] Wang X, Li F, Chen J, et al. Critical features identification for chemical chronic toxicity based on mechanistic forecast models [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 307:119584.
- [74] Schaefer E D, Pipes W O. Temperature and the toxicity of chromate and arsenate to the rotifer,

- Philodina roseola [J]. Water Research, 1973, 7(12): 1781-1790.
- [75] Lin H, Mao X, Wei Y, et al. Metabolic pathways of methylmercury in rotifer *Brachionus plicatilis* [J]. Science of The Total Environment, 2023, 905:167063.
- [76] Li M, Zhang Y, Feng S, et al. Bioaccumulation and biomagnification effects of nano-TiO<sub>2</sub> in the aquatic food chain [J]. Ecotoxicology, 2022, 31(6): 1023-1034.
- [77] Zhao J, Lan R, Wang Z, et al. Microplastic fragmentation by rotifers in aquatic ecosystems contributes to global nanoplastic pollution [J]. Nature Nanotechnology, 2024, 19(3): 406-414.
- [78] Luan L, Gao L, Chen X, et al. Rotifer distribution patterns in relation to dissolved organic matter in the middle reaches of Huai River Basin during the dry season [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(45): 101133-101150.
- [79] Tasevska O, Guseska D, Kostoski G. Comparison of pelagic rotifer communities in three natural Macedonian lakes [J]. Acta Zoologica Bulgarica Supplementum, 2012, 4:159-165.
- [80] Umi W, Yusoff F, Aris A, et al. Rotifer community structure in tropical lakes with different environmental characteristics related to ecosystem health [J]. Journal of Environmental Biology, 2018, 39(5): 795-807.
- [81] 中国科学院水生生物研究所. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [82] Younis M L, Rizk E-S T, Elewa S E, et al. Seasonal evaluation of heavy metals and zooplankton distribution and their co-relationship in the Rosetta branch area of the Nile Delta in Egypt [J]. Applied Water Science, 2024, 14(4): 73.
- [83] Sánchez-Zamora C, Nandini S, Sarma S. Synergistic effects of microplastics and cyanotoxins on the demography of the rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas [J]. Chemosphere, 2024, 365:143355.
- [84] Li X, Zheng Y, Lu L, et al. Trophic transfer of micro-and nanoplastics and toxicity induced by long-term exposure of nanoplastics along the rotifer (*Brachionus plicatilis*)-marine medaka (*Oryzias melastigma*) food chain [J]. Environmental Pollution, 2024, 346:123599.
- [85] Dong S, Liu L, Zhang Y, et al. Occurrence and succession of bacterial community in O<sub>3</sub>/BAC process of drinking water treatment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(17): 3112.
- [86] Perera I U, Fujiyoshi S, Nishiyuchi Y, et al. Zooplankton act as cruise ships promoting the survival and pathogenicity of pathogenic bacteria [J]. Microbiology and Immunology, 2022, 66(12): 564-578.
- [87] Shi Y, Xia W, Liu H, et al. Trihalomethanes in global drinking water: Distributions, risk assessments, and attributable disease burden of bladder cancer [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 469:133760.
- [88] 刘剑锋, 耿红, 贺萌. 杀虫剂西维因对萼花臂尾轮虫急性毒性和生活史参数的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2315-2320.
- [89] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [90] 刘丽君. 饮用水处理系统中无脊椎动物群落演替与控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [91] Wu Z, Chen H. Comparison of invertebrate removal by traditional-BAC and pre-BAC treatment processes: verification in a full-scale drinking water treatment plant [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2018, 18(4): 1261-1269.
- [92] Tashlykova N A, Afonina E Y. Diversity of plankton communities of chloride lakes of

- Southeastern Transbaikalia[C].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2022, 1112(1): 012108.
- [93] Gao Y, Lai Z, Wang C, et al. Population characteristics of *Brachionus calyciflorus* and their potential application for evaluating river health in the Pearl River Delta, China [J]. Water, 2021, 13(6): 749.
- [94]Zhang Y, Feng S, Gao F, et al. The relationship between *Brachionus calyciflorus*-associated bacterial and bacterioplankton communities in a subtropical freshwater lake [J]. Animals, 2022, 12(22): 3201.
- [95] Jiao J, Li Y, Song Q, et al.. Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) by free radicals in advanced oxidation processes [J]. Materials, 2022, 15(22): 8152.
- [96] Mokrzyński K, Krzysztowska-Kuleta O, Zawrotniak M, et al. Fine particulate matter-induced oxidative stress mediated by UVA-visible light leads to keratinocyte damage [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(19): 10645.
- [97] Liu S, Liu G, Yang L, et al. Critical influences of metal compounds on the formation and stabilization of environmentally persistent free radicals [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427:131666.
- [98]吴雪, 肖磊, 刘书明. 基于余氯的龙头水水质保障思考与实践 [J]. 给水排水, 2022, 58(09): 25-30.
- [99]王锐敏, 贾瑞宝, 逯南南, 等.氯和紫外线对供水管网中枯草芽孢杆菌的灭活效果及消毒动力学研究[J].安全与环境工程,2023(3002):180-186.
- [100]李志宏. 饮用水中蠕虫氧化灭活效果及机理研究 [D]. 长沙:长沙理工大学, 2018.
- [101]Fernando W. Theoretical considerations and modeling of chemical inactivation of microorganisms: inactivation of Giardia Cysts by free chlorine [J]. Journal of Theoretical Biology, 2009, 259(2): 297-303.
- [102]Zhang B, Luo Y, Zhou B, et al. A novel microfluidic mixer-based approach for determining inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157: H7 in chlorine solutions [J]. Food Microbiology, 2015, 49:152-160.
- [103]Wang G, Wu W, Zhu J-J, et al. The promise of low-intensity ultrasound: A review on sonosensitizers and sonocatalysts by ultrasonic activation for bacterial killing [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 79:105781.
- [104]何盼盼, 聂小保, 蒋昌波, 等.次氯酸钠对剑水蚤灭活动力学及紫外强化灭活[J].中国环境科学,2018,3802:588-595.
- [105]张金松, 卢小艳. 饮用水消毒工艺及副产物控制技术发展 [J]. 给水排水, 2016, 52(09): 1-3.
- [106]Heeb M B, Kristiana I, Troglö D, et al. Formation and reactivity of inorganic and organic chloramines and bromamines during oxidative water treatment [J]. Water research, 2017, 110:91-101.
- [107]徐丽梅. 水中病原微生物的紫外线和氯消毒灭活作用机制研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.
- [108]孙汉良. 基于细胞完整性分析优化预氧化-混凝处理含藻水的效能 [D]. 广州:广州大学, 2023.
- [109]Chen T, Xu X P, Li J C, et al. Adequate nutrient intake mitigate the toxic effects of bromate on the rotifer *Brachionus calyciflorus* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(8): 11727-11734.

- [110]蔡璇. 臭氧/游离氯及其组合工艺对饮用水中病毒灭活影响因素研究 [D]. 上海:复旦大学, 2012.
- [111]孙兴滨. 摇蚊幼虫生态学特征及其在水处理过程中去除技术研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
- [112]Bendary R E, Ibrahim S M, Goher M E, et al. Taxonomic and functional structure of macrobenthic invertebrate communities and their response to environmental variables along the subbranches of the Nile River (rayahs), Egypt [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(11): 28803-28817.
- [113]Kong X H, Wang G Z, Li S J, et al. Antioxidant effects and ATPase activity changes in hepatopancreas of mud crab *Scylla serrata* under low temperature acclimation[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(6): 708-713.
- [114]Su D, Li P, Wang X, et al. Observing malondialdehyde-mediated signaling pathway in cerebral ischemia reperfusion injury with a specific nanolight [J]. Analytical chemistry, 2020, 92(3): 2748-2755.
- [115]Zhao B, Liu R, Li Y, et al. Changes of putative pathogenic species within the water bacterial community in large-scale drinking water treatment and distribution systems [J]. Water Research, 2024, 249:120947.
- [116]Wei Y, Wu H, Zhang X, et al. Comparative analysis of chlorine-resistant bacteria after chlorination and chloramination in drinking water treatment plants [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024: 134075.

## 攻读学位期间发表的学术论文目录

[1] **秦璇**, 徐晓平, 赵昌爽, 李锦程, 赵志毅. 饮用水系统中轮虫丰度及氯胺对角突臂尾轮虫氧化灭活效果. 给水排水 (终审)

[2] 李锦程, 徐晓平, 陈涛, **秦璇**. 典型卤乙酰胺类消毒副产物对萼花臂尾轮虫的毒性效应. 环境科学研究, 2024,37(04):919-928. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.12.18.

## 致谢

时光荏苒，恍然惊觉求学时光已悄然流转至终章。这一路行来，风雨兼程，幸有师长提灯引路、亲人筑巢为盾、同窗并肩而行、故友遥寄清风，方使这段旅程虽有坎坷却终见月明。谨以浅薄文字，聊表心中深谢。

“新竹高于旧竹枝，全凭老干为扶持。”首先，感谢我的导师徐晓平教授的悉心指导。先生治学严谨，常以“厚积薄发”劝诫我夯实基础；面对复杂的实验设计，我常感迷茫与焦虑。是您以渊博的学识与严谨的治学态度，为我梳理研究框架，逐字逐句指导论文修改。这份师恩，我将永远铭记于心。感谢徐大勇老师、张明老师、朱美庆老师、杨晓凡老师、张庆云老师和赵昌爽老师，课堂授业解惑，课下关怀勉励，让我领悟“学贵得师，亦贵得友”的深意。

“蓼蓼者莪，匪莪伊蒿。哀哀父母，生我劬劳。”感谢我的父母和家人，你们以最朴素的爱，为我筑起避风的港湾。你们鼓励我出发，支持我历经风雨而到达，点点滴滴我都铭记在心，祝愿你们身体健康，万事顺意。

感谢同学们和课题组的伙伴们，你们是我求学路上最美的风景。在图书馆并肩奋战的日夜，在实验室相互鼓劲的瞬间，在操场畅谈理想的黄昏，这些点滴汇聚成青春的乐章。

最后，感谢我的朋友于泽莲和康羽珂。你们虽不在和我不在同一个校园，却始终是我精神世界的同行者，让我从未感到孤单。

时光如此荏苒，岁月真是如梭，白驹过隙呀，我们的生活。站在人生新起点，回首过去，学术之路从不是独行者的朝圣，而是无数双手共同铺就的阶梯。谨以《离骚》中“路漫漫其修远兮”自勉，愿怀此间温暖，继续奔赴下一程山海。