

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

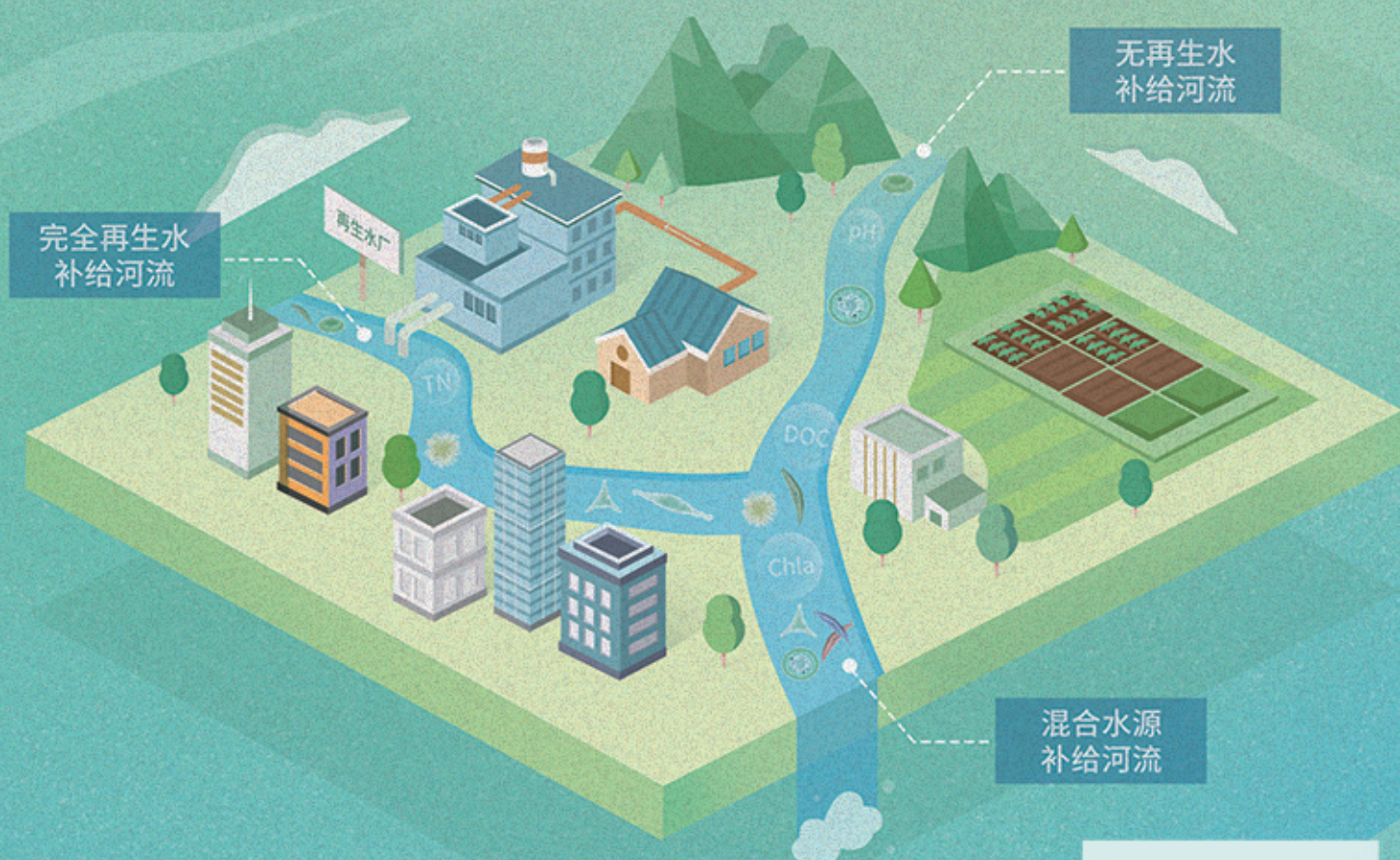
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖¹, 李信², 白灵¹, 白乙娟¹, 张淑荣^{3,4,*}, 王圣瑞¹, 郑蕾¹, 丁爱中¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 北京师范大学地理科学学部, 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875; 4. 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 为探究不同水源补给河流浮游植物群落结构的差异, 于2019年5~11月对北京市北运河水系和永定河水系7条河流进行逐月采样调查, 分析不同水源补给河流浮游植物群落结构特征, 并采用相关性分析和冗余分析(RDA)探究浮游植物群落与环境因子之间的关系。结果表明, 7条河流共监测到9门127种浮游植物, 硅藻、绿藻和蓝藻为优势种群, 分别占种类总数的40.94%、34.65%和10.24%。浮游植物密度介于 $(0.24 \sim 169.14) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $38.20 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物量介于 $0.21 \sim 78.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $16.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游植物种类、密度和生物量均表现为: 混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组。浮游植物生物多样性指数 H' 均值介于1.56~2.18之间, 均匀度指数 J 均值介于0.47~0.67之间, H' 和 J 均表现为: 无再生水补给组 > 混合水源补给组 > 完全再生水补给组。RDA排序结果表明, 影响混合水源补给组浮游植物优势种的主要环境因子为DOC、pH、Chla、DO和TP, 影响无再生水补给组和完全再生水补给组优势种的主要环境因子为TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、N/P和ORP。

关键词: 再生水; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 冗余分析(RDA)

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5616-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202202218

Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources

HOU Ying¹, LI Xin², BAI Ling¹, BAI Yi-juan¹, ZHANG Shu-rong^{3,4,*}, WANG Sheng-rui¹, ZHENG Lei¹, DING Ai-zhong¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To understand differences in phytoplankton community structure in rivers supplied with different water sources, monthly sampling investigations were carried out for seven rivers of the Beiyun River system and Yongding River system during the period from May to November of 2019. We analyzed phytoplankton community structure characteristics of rivers supplied with different water sources and explored the relationship between phytoplankton community and environmental factors using correlation analysis and redundancy analysis (RDA). A total of nine phyla and 127 species of phytoplankton were identified in the seven rivers; Bacillariophyta, Chlorophyta, and Cyanophyta were the dominant species, accounting for 40.94%, 34.65%, and 10.24% of the total species, respectively. The phytoplankton species composition of three groups of rivers, namely the no-reclaimed water supply group (NR), fully reclaimed water supply group (RW), and mixed-reclaimed water supply group (MW), was mainly Bacillariophyta or Chlorophyta. The phytoplankton density ranged from $(0.24 \sim 169.14) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of $38.20 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, and the biomass ranged from $0.21 \sim 78.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of $16.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Variations in the species numbers, density, and biomass of phytoplankton among groups were all shown as $\text{MW} > \text{RW} > \text{NR}$. The mean phytoplankton biodiversity index H' ranged from 1.56~2.18, and the mean uniformity index J ranged from 0.47~0.67, overall in the moderate to heavy pollution range. The biodiversity index and evenness index were all shown as $\text{NR} > \text{MW} > \text{RW}$. RDA sequencing results indicated that the dominant phytoplankton species in the MW group were mainly related to DOC, pH, Chla, DO, and TP, whereas the dominant phytoplankton species in the NR group and the RW group were mainly related to TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, N/P, and ORP.

Key words: reclaimed water; phytoplankton; community structure; environmental factors; redundancy analysis (RDA)

由于人口增长和城市化、工业化的加速,水资源短缺和水质恶化成为威胁人类经济和社会发展的全球性问题。我国是世界上水资源可利用量最低的13个国家之一,人均可利用水资源量仅为世界平均水平的1/4。其中北方地区水资源匮乏,水资源短缺问题更为严重^[1~3]。再生水经过一系列工艺处理达到指定的标准,已经成为许多领域的替代水资源。作为水资源战略的重要组成部分,再生水已被证明是缓解水资源危机的有效途径^[4]。北京是特大型资源

性缺水城市,再生水已经成为北京的第二大稳定水源。2012~2019年北京市再生水利用量增加了3.99亿 m^3 ,其中河湖生态补水占比由2012年51.92%提升至2019年90.97%,在维持河湖景观、恢复河湖生态等方面发挥了重要作用。

收稿日期: 2022-02-28; 修订日期: 2022-04-11

基金项目: 北京市科技计划课题项目(Z181100005518012)

作者简介: 侯颖(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为河流浮游植物生态学, E-mail: houying1827@163.com

* 通信作者, E-mail: srzhang@bnu.edu.cn

虽然经过深度处理后的再生水水质可以达到我国相关的水质标准^[5],但使用再生水代替传统地表水用于补充河湖水体可能会带来一系列问题.再生水与天然水的区别在于其复杂的构成和较高的污染物浓度.由于处理工艺的限制,再生水的总氮浓度较高,总磷浓度较低^[5,6],而营养物负荷是河流水华的重要驱动因素,直接影响藻类的生长、细胞组成和养分吸收能力^[7].与天然水中的磷相比,再生水厂排出的磷不易沉降,更容易被藻类吸收,导致水华频繁发生,对水质、景观和生态功能产生显著的负面影响^[7-10].此外,再生水补补水体中 pH、有机物和水化学离子等环境因子也与天然水体有明显差别^[11],这些环境因子直接或间接对浮游植物群落产生一定影响,且不同水体中环境因子对浮游植物群落的影响不同^[12].张淑珍等^[13]通过相关性分析和冗余分析(RDA)发现,以再生水为补补水源的景观水体中氮、磷营养盐是影响浮游植物群落结构变化的最主要因子.许洪斌等^[14]的研究发现,水温、盐度、N/P、TN、TP 和磷酸盐是影响浮游植物群落结构最重要的因子.然而以上研究主要侧重于完全再生水补给景观湖泊的研究,关于再生水补给和天然水源补给河流的对比研究较少.

本研究对不同水源补给的城市河流水质和浮游植物群落特征的差异性进行了表征,通过相关性分析和 RDA 冗余分析探究浮游植物群落结构与环境因子的关系,并阐明不同水源补给河流浮游植物群落差异的原因,以期对再生水补给河流生态环境保护治理提供科学支撑与参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概括

本研究选择北京市北运河和永定河水系的 7 条河流,根据补补水水源的差异将其分为 3 组,分别为无再生水补补水组 NR(京密引水渠)、完全再生水补补水组 RW(坝河、凉水河和清河)和混合水源补补水组 MW(沙河、温榆河和永定河).北运河水系是唯一发源于市内的水系,是北京市内平原面积最大且支流最多的水系,上游沙河和温榆河主要补补水水源为再生水和天然地表径流,主要支流为清河、坝河、通惠河和凉水河,支流主要补补水水源为小红门、清河和酒仙桥等再生水厂出水^[15],各河流再生水日均补补水量见表 1.永定河绿色生态走廊工程 2010 年正式启动,以清河、卢沟桥和小红门等再生水厂出水作为补补水水源,向永定河提供生态用水,同时官厅水库也为其补补水,2019 年春季和秋季分别向永定河补补水 1.66 亿 m³ 和 1.63 亿 m³.京密引水渠是北京最

长的一条人工渠道,2014 年南水北调工程通水后利用京密引水渠输送南水至密云水库,是北京市重要的供水大动脉^[16].

表 1 各河流再生水日均补补水量
Table 1 Daily supply of reclaimed water supply of rivers

河流	再生水来源	日均补补水量 / 万 m ³
坝河	北小河再生水厂、酒仙桥再生水厂和高安屯再生水厂	40
清河	肖家河再生水厂、清河再生水厂、清河第二再生水厂和北苑再生水厂	59
凉水河	吴家村再生水厂、小红门再生水厂和卢沟桥再生水厂	68
沙河	沙河再生水厂	9
永定河	小红门再生水厂、门头沟第二再生水厂和清河再生水厂	24

1.2 样品采集

参照文献^[17]共设置 17 个采样点(图 1),其中京密引水渠 1 个(C1),坝河 2 个(B1 和 B2),凉水河 3 个(L1、L2 和 L3),清河 3 个(Q1、Q2 和 Q3),沙河 2 个(S1 和 S2),温榆河 3 个(W1、W2 和 W3),永定河 3 个(Y1、Y2 和 Y3).于 2019 年 5 月至 2019 年 11 月,每月 1 次采样分析,测定水质参数及浮游植物相关指标.

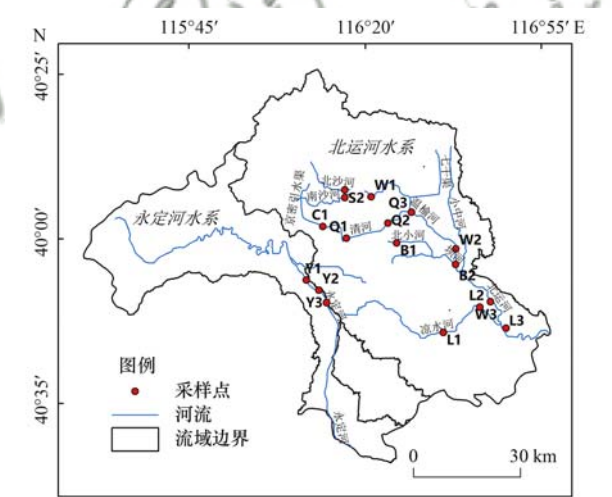


图 1 采样点分布示意
Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 分析方法

1.3.1 水质参数

pH、DO 和 ORP 采用哈希 HQ40d 便携式多参数分析仪现场测定,其他指标在实验室分析测定.其中,总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法和紫外分光光度法测定,总磷(TP)和溶解性正磷酸盐(SRP)采用钼锑抗分光光度法测定,溶解性有机碳(DOC)采用总有机碳分析仪(Elementar vario TOC)测定,化学需氧量(COD)采

用莲花永兴公司 5B-6C 多参数水质测定仪测定,叶绿素 a(Chla)采用分光光度法测定。

1.3.2 浮游植物

野外采集的浮游植物样品现场用鲁哥氏液固定,定性样品使用 25 号浮游生物网采集,定量样品使用 2.5 L 有机玻璃定容采样器采集,带回实验室后定容至 1 L,沉淀 24 ~ 48 h,浓缩至 30 mL,利用光学显微镜进行定性和定量分析。浮游植物鉴定参照文献[18],定量样品计数和生物量计算方法参照文献[19],功能群划分方法参考文献[20,21]。

1.4 数据处理

利用 SPSS 24.0 对环境因子之间进行 Pearson 相关性分析,运用 Canoco 5.0 对浮游植物优势种与环境因子进行多元统计分析,先对除 pH 值以外的所有环境因子进行 $\lg(x+1)$ 转化,再进行 RDA 分析。

采用优势度指数(Y)、Shannon-Wiener 生物多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)描述浮游植物群落特征并评估河流状态,计算公式为:

$$Y = (n_i/N) \times f_i$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

$$J = \frac{H'}{\ln S}$$

式中, n_i 为 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, f_i 为该种浮游植物在样品中的出现频率, $p_i = n_i/N$, S 为物种数。 $Y \geq 0.02$ 认为该种为优势种。 $0 < H' \leq 1$ 为重污型, $1 < H' \leq 2$ 为 α -中污型, $2 < H' \leq 3$ 为 β -中污型。 $0 < J \leq 0.3$ 为重污染, $0.3 < J \leq 0.5$ 为中污染, $0.5 < J \leq 0.8$ 为轻污染。

2 结果与分析

2.1 水质参数

如图 2 所示,5 ~ 11 月各河流 pH 介于 6.77 ~ 9.78 之间,随时间变化整体呈先降低后升高趋势。8 月 pH 有明显升高可能与该月浮游植物密度升高有关,浮游植物光合作用将水中的 CO_2 转化为有机物,从而引起水体 pH 值升高^[22]。ORP 无明显时间变化特征,介于 56.3 ~ 323.6 mV 之间,水体处于较好的氧化状态。DO 介于 3.0 ~ 21.5 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,5、6、10 和 11 月 DO 较高,而温度较高的 7 ~ 9 月 DO 较低,主要表现为受温度影响。

$\rho(\text{TN})$ 平均值为 9.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 介于 1.32 ~ 22.68 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 TN 中占比为 4.40% ~ 44.77%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在 TN 中占比相对较高,占 8.65% ~ 65.75%。各形态浓度随时间变化趋势相似,最高

值出现在夏季 8 月,可能与该月多次暴雨导致的冲刷有关,且北京市再生水补水河流水深较浅,在雨季底泥更易受到扰动,更利于沉积物中氮元素向水体释放。 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{SRP})$ 分别为 0.01 ~ 1.52 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.001 ~ 0.47 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SRP 占 TP 的 13.78% ~ 39.66%。 N/P 为 3.37 ~ 112.45,随时间变化呈先增后减趋势。TP 浓度随月份变化波动较大,5、8 和 11 月浓度较高,SRP 浓度 8 月出现最高值。

5 ~ 10 月 $\rho(\text{DOC})$ 随月份变化呈降低趋势,11 月略有增加,介于 1.54 ~ 14.38 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。DOC 浓度与生物活动密切相关,DO、pH 和 ORP 等化学因子会导致水体化学环境的变化,进而对水体碳迁移转化产生影响,高 DO 和高 ORP 的水体环境更利于有机碳向无机碳转化^[23]。11 月 DOC 浓度升高可能是由于生物活动减弱,DOC 分解减慢。 $\rho(\text{COD})$ 介于 9.03 ~ 73.85 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,与 DOC 变化趋势相似。 $\rho(\text{Chla})$ 变化与浮游植物密度密切相关,介于 1.71 ~ 76.28 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间。时间上,Chla 浓度先升高后降低,6 月达到最大值,这与 6 月浮游植物密度显著升高有关。7 ~ 8 月一方面由于浮游动物摄食,另一方面受到降雨的影响,导致 Chla 浓度显著下降。

空间上(图 3),混合水源补给组 pH 高于完全再生水补给组和无再生水补给组,可能是由于混合水源补给组浮游植物密度较大,浮游植物光合作用消耗 CO_2 ,水体 pH 较高^[22]。ORP 为完全再生补给组高于无再生水补给组和混合水源补给组。DO 为:混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组,在营养水平较高的水体中,DO 浓度主要受藻类光合作用的影响^[22]。TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均表现为:完全再生水补给组 > 混合水源补给组 > 无再生水补给组。TP 表现为:混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组,SRP 为完全再生水补给组和混合水源补给组高于无再生水补给组。总体上 N/P 与 TP 相反,表现为:无再生水补给组 > 完全再生水补给组 > 混合水源补给组。DOC、COD 和 Chla 均表现为:混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组。

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 种类组成、密度与生物量

本研究期间各采样点共鉴定出浮游植物 9 门 127 种,硅藻、绿藻和蓝藻为优势种群,其中硅藻门占比最多为 52 种,占种类总数的 40.94%,其次为绿藻门 44 种,占 34.65%;蓝藻门 13 种,占 10.24%;裸藻门、隐藻门和甲藻门分别为 6、5 和 4 种,分别占 4.72%、3.94% 和 3.15%;金藻门、黄藻门

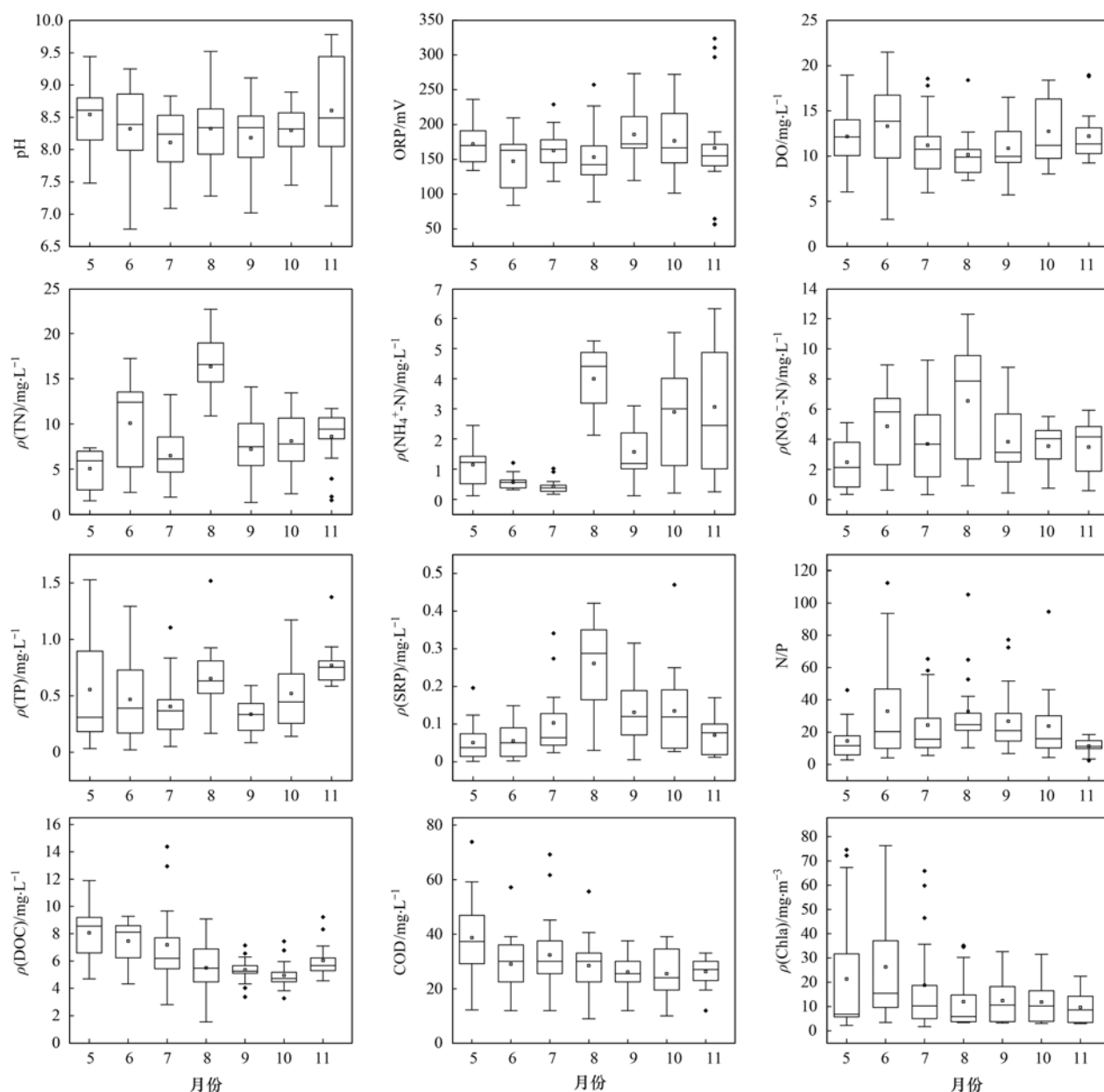


图2 水质参数时间分布

Fig. 2 Time distribution of water quality parameters

和定鞭藻门各1种. 浮游植物群落特征时空变化见图4, 浮游植物群落组成百分比时空变化见图5. 浮游植物种类数在各时期差异较小, 5~7月呈减少趋势, 8月种类最多, 之后逐月减少. 空间上, 种类数表现为: 混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组. 无再生水补给组和完全再生水补给组硅藻占比最大, 混合水源补给组绿藻占比最大, 且混合水源补给组蓝藻比例高于无再生水补给组和完全再生水补给组, 整体上, 所有河流均为硅藻-绿藻型河流.

浮游植物密度介于 $(0.24 \sim 169.14) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $38.20 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$. 密度与蓝藻所占比例密切相关. 6月和8~11月蓝藻密度百分比比较高, 5月和7月较低. 相应地6月和8~11月

密度较高, 而5月和7月密度较低. 从空间上看, 整体表现为: 混合水源补给组 > 完全再生水组 > 无再生水组. 组成上, 无再生水补给组绿藻密度占比最高(50%), 完全再生水补给组硅藻占比最高(60%), 混合水源组蓝藻占比最高(68%).

浮游植物生物量介于 $0.21 \sim 78.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $16.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 生物量随时间变化先降低后升高, 6月为最低值. 组成上, 各月份生物量以硅藻门占比最大, 其中8月蓝、绿藻细胞增殖较多, 绿藻门与蓝藻门物种生物量占比有所升高. 空间上, 浮游植物生物量与密度特征相似, 总体上表现为: 混合水源补给组 > 完全再生水组 > 无再生水组. 各组生物量均以硅藻门贡献为主, 其次为绿藻门, 混合水源补给组蓝藻生物量明显高于另两组.

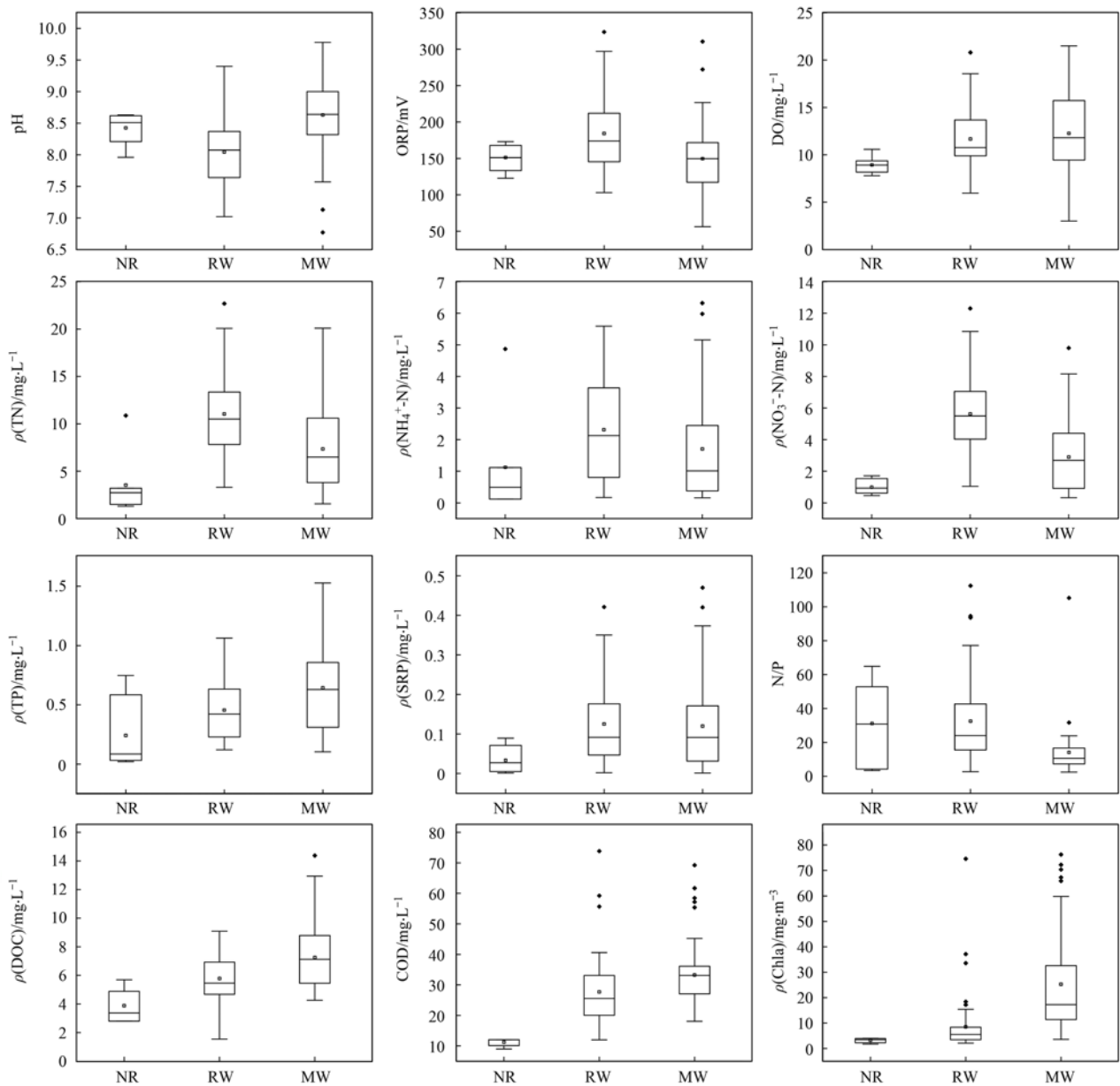


图3 水质参数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water quality parameters

2.2.2 优势种

研究期间浮游植物优势种共3门15种,其中硅藻门优势种最多为6种,绿藻门5种,蓝藻门4种(图6)。不同河流优势种有所差异,无再生水补给组京密引水渠硅藻门曲壳藻(0.158)优势度最大,完全再生水补给组坝河、凉水河和清河分别为硅藻门菱形藻(0.234)、硅藻门小环藻(0.432)和绿藻门克里藻(0.322)优势度最大,混合水源补给组沙河和温榆河为硅藻门小环藻(0.172和0.224)优势度最大,永定河蓝藻门伪鱼腥藻优势度最大(0.374)。整体上无再生水补给组硅藻门优势度较大,完全再生水组硅藻门和绿藻门优势度较大,而混合水源补给组硅藻门和蓝藻门优势度较大。

2.2.3 生物多样性与均匀度

浮游植物多样性及均匀度如图7所示,5~11月浮游植物多样性指数 H' 均值范围为1.56~2.18,均匀度指数 J 均值范围为0.47~0.67。整体来看,5~11月 H' 和 J 平均值变化趋势相似,5月 H' 和 J 最高,5~8月逐月降低,8月达到最低值,9月有所升高,之后呈下降趋势。空间上,完全再生水补给组和混合水源补给组个别点位 H' 较低,污染较重,整体处于 α -中污型~重污型之间。完全再生水补给组和混合水源补给组个别点位 J 小于0.3,为重污染状态,大部分点位处于中污染状态。 H' 和 J 均表现为:无再生水补给组>混合水源补给组>完全再生水补给组。

2.3 优势种与水质参数的关系

对优势种数据进行DCA去趋势分析,结果显示

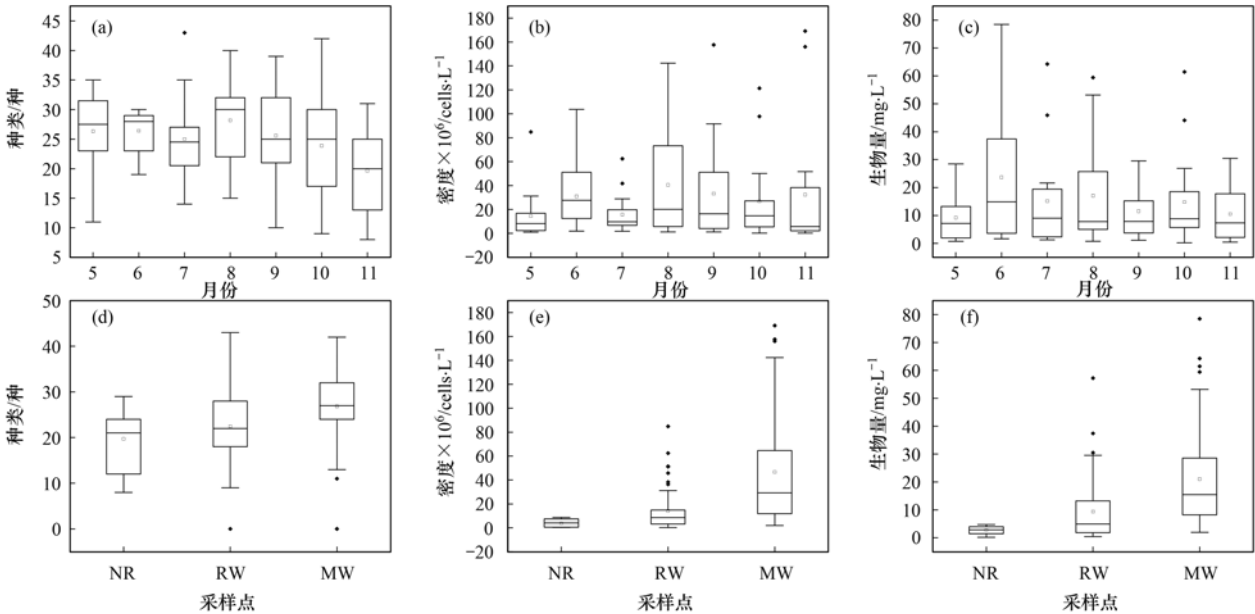


图 4 浮游植物群落特征时空变化

Fig. 4 Spatial and temporal variations in phytoplankton community characteristics

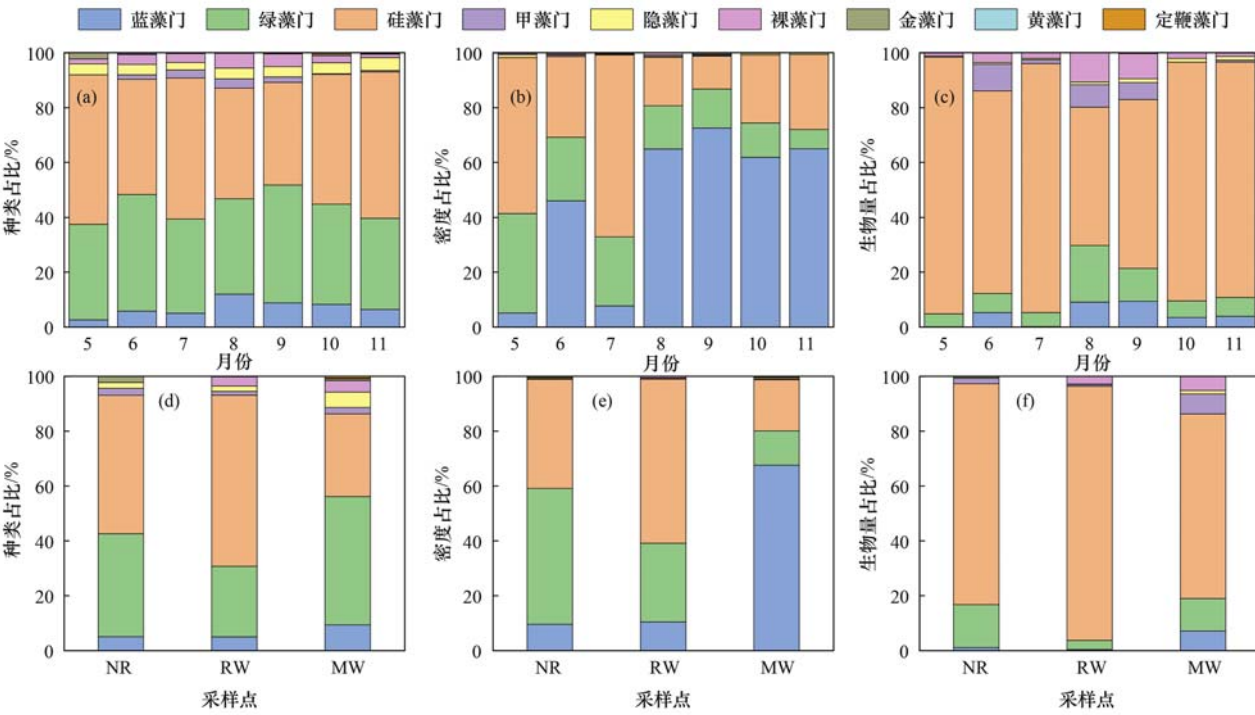


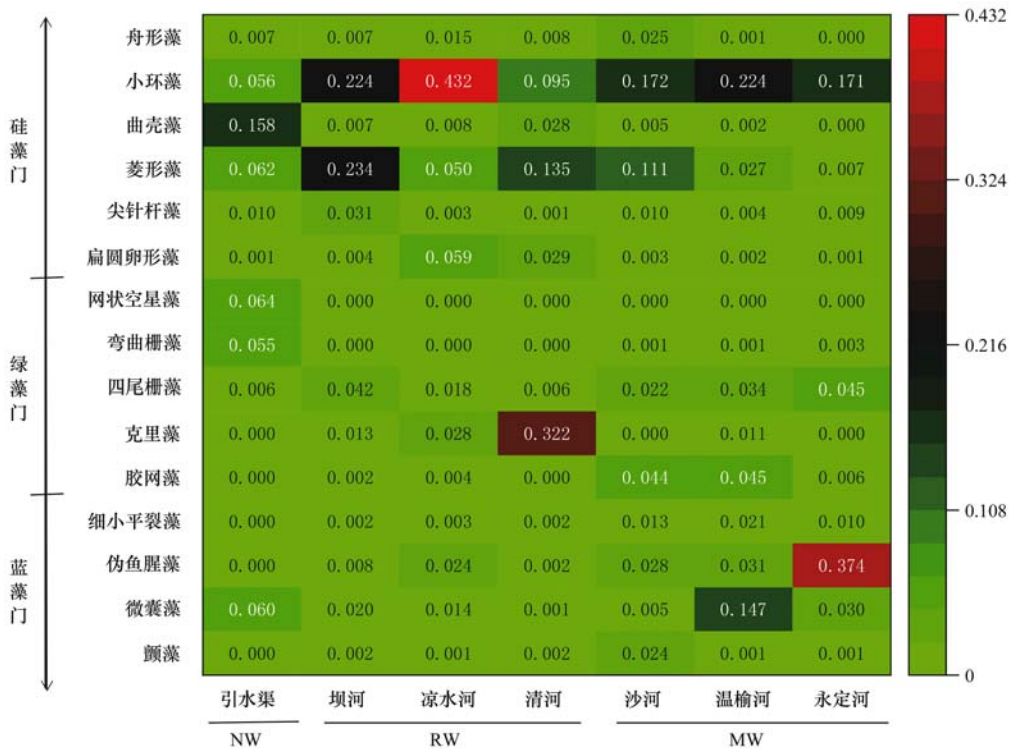
图 5 浮游植物群落组成百分比时空变化

Fig. 5 Spatial and temporal variations in phytoplankton composition percentages

排序轴最大梯度长度为 2.81, 表明线性模型中的 RDA 冗余分析能更好地解释浮游植物优势种与环境因子的关系. 为避免环境因子间多元共线性的影响, 相关系数大于 0.75 ($P < 0.01$) 的一对环境因子只保留其中 1 个. RDA 结果显示, 第一排序轴和第二排序轴对浮游植物优势种的总解释率为 72.08%, Monte Carlo 置换检验所有排序轴均达到显著水平 ($P < 0.01$), 表明排序结果可靠.

RDA 排序显示(图 8), 无再生水补给组和完全

再生水补给组采样点主要分布在第三象限, 混合水源补给组采样点主要分布在第一、四象限, 表明采样点水环境特点存在明显差异. 其中, DOC、pH、Chla、DO 和 TP 是影响混合水源补给组浮游植物优势种的主要环境因子, TN、 NH_4^+-N 、N/P 和 ORP 是影响无再生水补给组和完全再生水补给组浮游植物优势种的主要环境因子. RDA 结果表明, 与轴 1 明显正相关的为 pH 和 Chla, 明显负相关的为 N/P, 与轴 2 明显正相关的为 DOC, 明显负相关的有 TN 和



颜色表示优势指数大小

图 6 浮游植物优势种及优势指数

Fig. 6 Dominant species and dominance index of phytoplankton

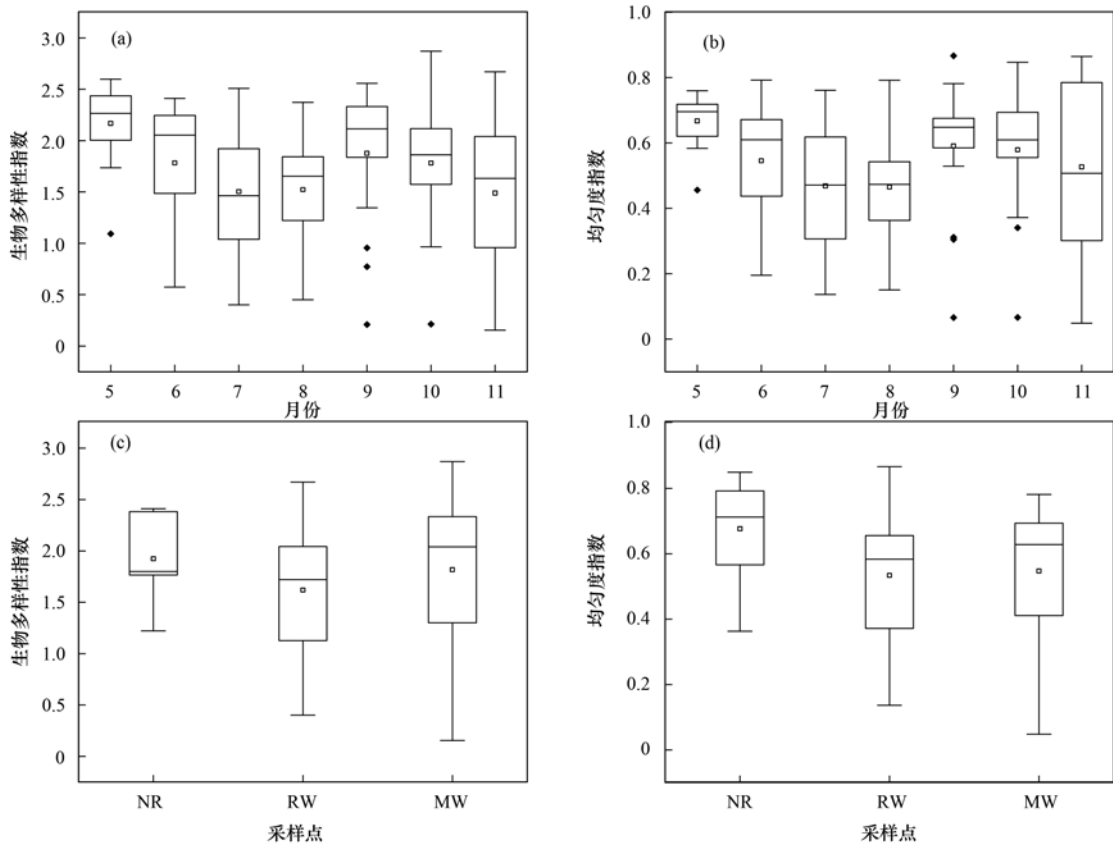


图 7 生物多样性指数与均匀度指数时空变化

Fig. 7 Temporal and spatial variations in biodiversity index and evenness index

NH_4^+-N 、pH、Chla、TP 和 DOC 与弯曲栅藻、细小平裂藻、伪鱼腥藻、菱形藻和胶网藻等呈正相关,与

四尾栅藻、网状星空藻、尖针杆藻和小环藻呈负相关; TP 与舟形藻、微囊藻和扁圆卵形藻呈正相关,

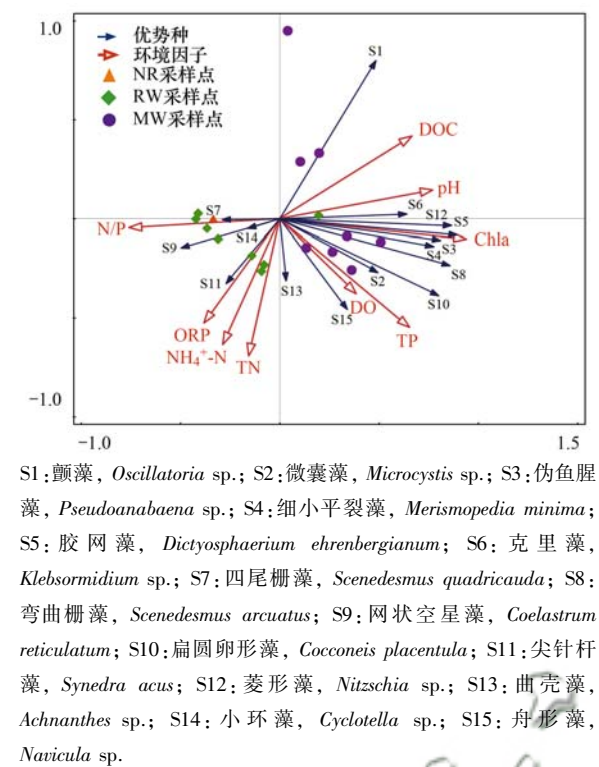


图8 优势种、环境因子与样点间的 RDA 排序

Fig. 8 RDA diagram of dominant species, environmental factors, and sample sites

与四尾栅藻呈负相关。

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征

整体上浮游植物种类、密度和生物量均表现为:混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组,而 H' 和 J 均表现为:无再生水补给组 > 混合水源补给组 > 完全再生水补给组。这说明虽然无再生水补给组浮游植物种类和数量最少,但群落结构较为复杂,稳定性较高,水质也最好。与混合水源补给组相比,完全再生水补给组群落结构较简单,稳定性低,水质相对较差。在群落组成上,3 组河流均为硅藻-绿藻型河流,与马煜等^[24] 和高梦蝶等^[25] 的研究结果一致。有研究表明,硅藻是河流中浮游植物中的优势种群,相对于其他浮游植物在河流中

生长具有生理竞争优势^[26, 27]。本研究中,各组河流硅藻门优势度均较大。硅藻密度与 TP 呈极显著正相关($P < 0.01$),说明 P 对硅藻生长影响较大。在有充足的磷酸盐供应时,绿藻相较于蓝藻生长更快,有较强的竞争力^[5]。与完全再生水补给组相比,混合水源补给组蓝藻门优势度较大。相关性分析表明,蓝藻密度与硝态氮含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。由于完全再生水补给组硝态氮占比高于混合水源补给组,而蓝藻在硝态氮较多时竞争力较弱^[5],导致完全再生水组蓝藻种类低于混合水源补给组。Chen 等^[5] 研究了再生水与地表水湖泊中浮游植物的结构特征,表明再生水湖泊蓝藻密度远远低于地表水湖泊,这可能是由于再生水湖泊含有较多的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,而蓝藻在利用 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 方面的竞争力与其他浮游植物种相比较弱,相比之下硅藻利用 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的能力较强。本研究中河流整体为贫-中营养型水体。浮游植物各门类密度、生物量与总密度和总生物量的相关性分析表明,蓝藻门、隐藻门和定鞭藻门对总密度贡献较大($P < 0.01$),硅藻门和裸藻门对总生物量贡献较大($P < 0.01$)。

3.2 浮游植物功能群特征

近年来有学者认为,以门或纲等单位来对浮游植物进行分类的传统方法,不足以全面理解浮游植物群落结构。基于此,Reynolds 等^[20] 根据浮游植物的生理特征及其生态环境适应策略对浮游植物进行功能分组,将具有相似生长特征,能适应相似生境条件的植物集群称为功能群^[28, 29]。本研究中的优势种划分出 7 种功能群(表 2),其中以 MP 功能群优势种最多,其次为 J 和 D 功能群。MP 类和 D 类多为硅藻, J 类多为绿藻,表明所调查水体以硅藻和绿藻为主,与前面的结果一致。本研究表明 MP 类浮游植物多生活在频繁搅动的浑浊型水体,北京市再生水河道大多水位较浅,适合 MP 类浮游植物的生长繁殖。D 类主要生活在富含营养盐的浑浊水体,本研究中 D 类尖针杆藻和菱形藻主要为完全再生水补给组的优势种,而完全再生水组营养盐含量较高。J 类

表 2 优势种功能群分类

Table 2 Classification of functional groups of dominant species

优势种	功能群	适宜生境
小环藻 (<i>Cyclotella</i> sp.)	B	中营养水体,对分层敏感
颤藻 (<i>Oscillatoria</i> sp.)、伪鱼腥藻 (<i>Pseudoanabaena</i> sp.)、扁圆卵形藻 (<i>Cocconeis placentula</i>)、曲壳藻 (<i>Achnanthes</i> sp.)、舟形藻 (<i>Navicula</i> sp.)	MP	频繁搅动的浅层浑浊水体
细小平裂藻 (<i>Merismopedia minima</i>)	Lo	深层和浅层富营养化中型、大型水体
尖针杆藻 (<i>Synedra acus</i>)、菱形藻 (<i>Nitzschia</i> sp.)	D	富含营养盐的混浊水体
四尾栅藻 (<i>Scenedesmus quadricauda</i>)、弯曲栅藻 (<i>Scenedesmus arcuatus</i>)、网状空星藻 (<i>Coelastrum reticulatum</i>)	J	浅层混合的中至富营养水体
胶网藻 (<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i>)	F	深层混合的中至富营养水体
微囊藻 (<i>Microcystis</i> sp.)	M	稳定的中营养水体,高透明度

主要生活在中至富营养浅水水体,绿藻通常为中营养型水体的优势种^[30].

3.3 环境因子与浮游植物群落结构的关系

浮游植物各门类密度、总密度、总生物量与环境因子的相关性见图9. 浮游植物组成特征可作为水生环境的指标,其群落结构受到多种环境因子的影响. 营养盐含量是影响浮游植物群落的主要环境因子. 氮和磷是藻类生长所必需的元素,一定浓度的N和P通常会促进藻类的生长,而过多或不足的N和P则会限制藻类的生长^[26]. 在内陆水域,磷的限

制比氮的限制更受到重视^[3]. 有研究表明磷是主要的限制因子^[31~35],磷的添加能显著促进浮游植物生物量的增加. 根据图9,生物量与TP呈极显著正相关($P < 0.01$),总密度与 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 呈显著负相关($P < 0.05$),表明P对浮游植物的影响较大. 混合水源补给组蓝藻门密度大于其他两组,RDA分析表明,TN与各蓝藻门优势种呈负相关,与吴红艳等^[36]研究结果一致. 蓝藻繁殖过程中需要消耗大量 NH_4^+-N ,因此蓝藻成为优势种通常与氮元素的耗竭,尤其是形成低N/P密切相关^[37,38].

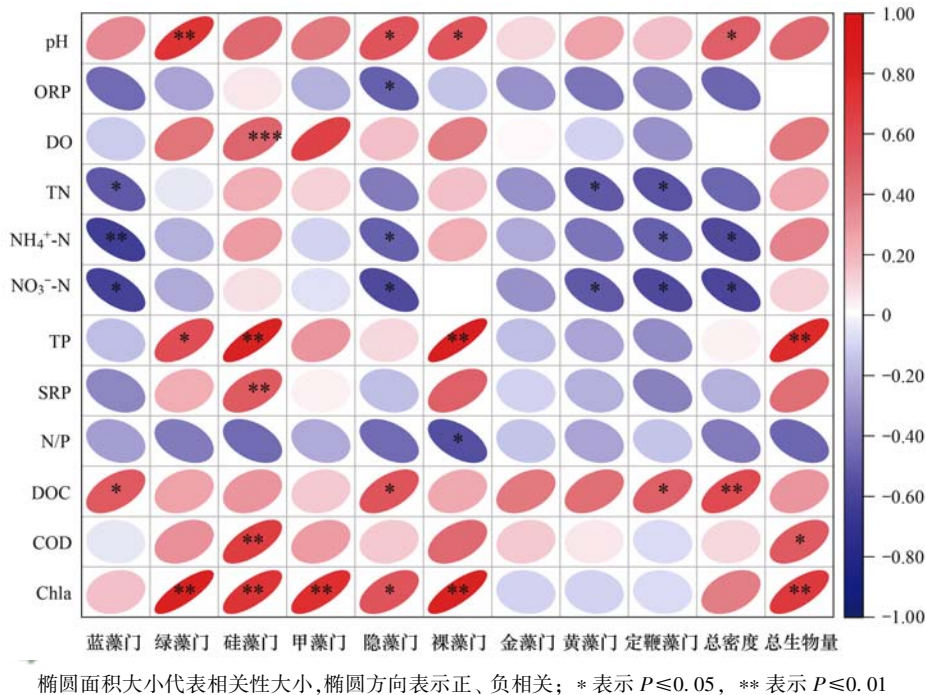


图9 浮游植物组成与环境因子相关系数矩阵

Fig. 9 Correlation coefficient matrix between phytoplankton composition and environmental factors

对于富营养化水体,浮游植物生长已不受营养盐限制,其他环境因子如pH对浮游植物密度与生物量影响较大^[39]. 由图9可知,pH与浮游植物密度呈显著正相关($P < 0.05$),其中与绿藻呈极显著正相关($P < 0.01$),RDA分析表明pH与绿藻优势种克里藻相关性最强. 另外,pH对蓝藻的生长产生显著影响,本研究中混合水源补给组蓝藻占比远远高于完全再生水补给组,这与混合水源组pH较高有关. 在水体溶解性无机碳中, CO_2 是浮游植物光合作用最易利用的形态. 不同藻类对 CO_2 的利用能力不同,许海等^[40]的研究表明蓝藻吸收 CO_2 的能力比真核藻类更强. pH升高导致 CO_2 含量降低,导致绿藻和硅藻生长繁殖缓慢,容易诱发蓝藻优势^[40,41]. 同时,浮游植物的生长反过来也会影响水体pH值.

此外,Chla含量与浮游植物群落组成密切相关. Chla是浮游植物现存量的重要指标,也是反映水体富营养化程度的一个重要水质参数,能综合反

映水体理化性质的动态变化^[42,43]. 本研究RDA结果表明,Chla与浮游植物生物量呈极显著相关($P < 0.01$),优势种对Chla影响较大^[27]. 绿藻门、硅藻门、甲藻门和隐藻门对Chla呈显著相关($P < 0.05$),对Chla贡献较大. Chla与优势种伪鱼腥藻、细小平裂藻、胶网藻和菱形藻相关性最强. DOC与浮游植物密度呈极显著正相关($P < 0.01$),RDA结果表明,DOC与蓝藻门颤藻相关性最强. 外源性DOC的输入使一些微生物大量繁殖,从而导致其与水体中的浮游植物竞争N、P等营养元素,影响水体初级生产力^[44]. 同时,浮游植物生长代谢和衰亡过程也会释放内源性DOC^[45].

4 结论

(1)无再生水补给组、完全再生水补给组和混合水源补给组水环境特征表现出明显差异. pH表现为:混合水源补给组 > 无再生水补给组 > 完全再生

水补给组; N 元素表现为:完全再生水补给组 > 混合水源补给组 > 无再生水补给组; DO、TP、DOC、COD 和 Chla 浓度均表现为:混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组。

(2) 本研究共监测到 9 门 127 种浮游植物, 硅藻、绿藻和蓝藻为优势种群, 其它门类在群落结构中所占比例较小。不同河流优势种及优势度有所差异, 无再生水组硅藻门优势度较大, 完全再生水组硅藻门和绿藻门优势度较大, 而混合水源补给组硅藻门和蓝藻门优势度较大。

(3) 浮游植物种类、密度和生物量均表现为:混合水源补给组 > 完全再生水补给组 > 无再生水补给组。蓝藻门、隐藻门和定鞭藻门对总密度贡献较大, 而绿藻门、硅藻门和裸藻门对总生物量贡献较大。生物多样性指数和均匀度指数均表现为:无再生水补给组 > 混合水源补给组 > 完全再生水补给组。

(4) DOC、pH、Chla、DO 和 TP 是影响混合水源补给组浮游植物优势种的主要环境因子, TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、N/P 和 ORP 是影响无再生水补给组和完全再生水补给组浮游植物优势种的主要环境因子。浮游植物密度与 pH 和 DOC 呈显著正相关, 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈显著负相关。浮游植物生物量与 Chla、COD 和 TP 呈显著正相关。

参考文献:

- [1] Yi L L, Jiao W T, Chen X N, *et al.* An overview of reclaimed water reuse in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1585-1593.
- [2] Wei D B, Tan Z W, Du Y G. A biological safety evaluation on reclaimed water reused as scenic water using a bioassay battery[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1611-1618.
- [3] Zhao H J, Wang Y, Yang L L, *et al.* Relationship between phytoplankton and environmental factors in landscape water supplemented with reclaimed water[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 113-121.
- [4] Chu J Y, Chen J N, Wang C, *et al.* Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management[J]. *Water Research*, 2004, **38**(11): 2746-2756.
- [5] Chen R, Ao D, Ji J Y, *et al.* Insight into the risk of replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **324**: 573-582.
- [6] Lv X M, Zhang J, Liang P, *et al.* Phytoplankton in an urban river replenished by reclaimed water: features, influential factors and simulation[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **112**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106090.
- [7] Liu W, Xu Z Q, Long Y J, *et al.* Replenishment of urban landscape ponds with reclaimed water: spatiotemporal variations of water quality and mechanism of algal inhibition with alum sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **790**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148052.
- [8] Millier H K G R, Hooda P S. Phosphorus species and fractionation-why sewage derived phosphorus is a problem[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, **92**(4): 1210-1214.
- [9] Ao D, Chen R, Wang X C, *et al.* On the risks from sediment and overlying water by replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 488-497.
- [10] Muhid P, Davis T W, Bunn S E, *et al.* Effects of inorganic nutrients in recycled water on freshwater phytoplankton biomass and composition[J]. *Water Research*, 2013, **47**(1): 384-394.
- [11] Yang L, He J T, Liu Y M, *et al.* Characteristics of change in water quality along reclaimed water intake area of the Chaobai River in Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **50**: 93-102.
- [12] 陈红, 刘清, 潘建雄, 等. 潮河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, **39**(1): 173-184.
- Chen H, Liu Q, Pan J X, *et al.* Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 173-184.
- [13] 张淑珍, 王培京. 再生水补水景观水体浮游植物群落结构及其与水质参数的关系[J]. *环境科学导刊*, 2021, **40**(2): 14-22.
- Zhang S Z, Wang P J. Phytoplankton community structure and its relationship with water quality parameters in landscape water supplemented by reclaimed water[J]. *Environmental Science Survey*, 2021, **40**(2): 14-22.
- [14] 许洪斌, 王文东, 王楠, 等. 再生水补水景观湖浮游藻类群落结构特征及与环境因子的关系[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(11): 6416-6424.
- Xu H B, Wang W D, Wang N, *et al.* Phytoplankton community structure and its relation to environmental factors in landscape lake supplemented with reclaimed water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(11): 6416-6424.
- [15] 刘克. 北京市典型河湖再生水补水生态环境效应研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- [16] 李怡, 李垒, 陈忠林. 京密引水渠水质评价及分析[J]. *北京水务*, 2018, (2): 27-33.
- Li Y, Li L, Chen Z L. Assessment and analysis on water quality of Jing-mi diversion canal[J]. *Beijing Water*, 2018, (2): 27-33.
- [17] 蔡庆华. 水域生态系统观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [18] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of china-systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [20] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [21] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [22] 张澎浪, 孙承军. 地表水体中藻类的生长对 pH 值及溶解氧含量的影响[J]. *中国环境监测*, 2004, **20**(4): 49-50.
- Zhang P L, Sun C J. The influence of algae growing on pH and DO in surface water[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2004, **20**(4): 49-50.
- [23] Chen N H, Bianchi T S, McKee B A. Early diagenesis of

- chlorophyll biomarkers in the lower Mississippi River and Louisiana shelf; implications for carbon cycling in a river-dominated margin[J]. *Marine Chemistry*, 2005, **93**(2-4): 159-177.
- [24] 马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性[J]. *生态学报*, 2021, **41**(1): 224-234.
- Ma Y, Lu X X, Fan Y W. Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(1): 224-234.
- [25] 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 等. 晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4576-4586.
- Gao M D, Li Y F, Li Y L, *et al.* Characteristics of phytoplankton community structure and their relationships with environmental factors in autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4576-4586.
- [26] Cheng B F, Xia R, Zhang Y, *et al.* Characterization and causes analysis for algae blooms in large river system[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **51**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101707.
- [27] Ding S M, Chen M S, Gong M D, *et al.* Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 872-884.
- [28] 胡昝, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(1): 11-23.
- Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 11-23.
- [29] 君珊, 王东波, 周健华, 等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 787-798.
- Jun S, Wang D B, Zhou J H, *et al.* Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 787-798.
- [30] 潘继征, 熊飞, 李文朝, 等. 抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因子[J]. *生态学报*, 2009, **29**(10): 5376-5385.
- Pan J Z, Xiong F, Li W C, *et al.* Structure, distribution and its impact factors of phytoplankton community in Fuxian Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(10): 5376-5385.
- [31] Lewis W M, Wurtsbaugh W A, Paerl H W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(24): 10300-10305.
- [32] Schindler D W. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, **279**(1746): 4322-4333.
- [33] 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 等. 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3242-3252.
- He S H, Ouyang T, Zhao L, *et al.* Analysis of phytoplankton community stability and influencing factors in a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3242-3252.
- [34] Yuan L L, Jones J R. Rethinking phosphorus-chlorophyll relationships in lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, **65**(8): 1847-1857.
- [35] 罗宜富, 李磊, 李秋华, 等. 阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4151-4159.
- Luo Y F, Li L, Li Q H, *et al.* Spatial and temporal distribution of chlorophyll a and its relationship to algae and environmental factors in Aha Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4151-4159.
- [36] 吴红艳, 赵以军, 郭厚良, 等. 无机盐诱导蓝藻细胞液泡化[J]. *水生生物学报*, 2002, **26**(3): 234-238.
- Wu H Y, Zhao Y J, Guo H L, *et al.* Cell vacuolization induced by inorganic salts in cyanobacterium[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**(3): 234-238.
- [37] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [38] 董静, 高云霓, 李根保. 淡水湖泊浮游藻类对富营养化和气候变暖的响应[J]. *水生生物学报*, 2016, **40**(3): 615-623.
- Dong J, Gao Y N, Li G B. A review: responses of phytoplankton communities to eutrophication and climate warming in freshwater lakes[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(3): 615-623.
- [39] 路枫, 李磊, 齐青松, 等. 哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3253-3262.
- Lu F, Li L, Qi Q S, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of phytoplankton community in Harbin urban river network during wet season[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3253-3262.
- [40] 许海, 刘兆普, 袁兰, 等. pH 对几种淡水藻类生长的影响[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(1): 27-30.
- Xu H, Liu Z P, Yuan L, *et al.* Effect of pH on growth of several freshwater algae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(1): 27-30.
- [41] Shapiro J. The role of carbon dioxide in the initiation and maintenance of blue-green dominance in lakes[J]. *Freshwater Biology*, 1997, **37**(2): 307-323.
- [42] 周彦锋, 宋江腾, 刘凯, 等. 怀洪新河浮游植物群落结构与水环境因子的关系研究[J]. *生态科学*, 2017, **36**(1): 35-42.
- Zhou Y F, Song J T, Liu K, *et al.* Study on the relation between phytoplankton community structure and aquatic environment factors in Huaihong River[J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(1): 35-42.
- [43] 胡芳, 许振成, 姚玲爱, 等. 剑潭水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 950-958.
- Hu F, Xu Z C, Yao L A, *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationship with aquatic environment factors in Jiantan Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 950-958.
- [44] Burkholder J M, Glibert P M, Skelton H M. Mixotrophy, a major mode of nutrition for harmful algal species in eutrophic waters[J]. *Harmful Algae*, 2008, **8**(1): 77-93.
- [45] 高小丰, 吴莹, 朱卓毅. 长江口外浮游植物死亡释放溶解有机质的降解及其溶氧消耗[J]. *海洋与湖沼*, 2015, **46**(5): 1010-1017.
- Gao X F, Wu Y, Zhu Z Y. Degradation of dissolved organic matter from dead phytoplankton off the Changjiang River estuary and the resulting dissolved oxygen consumption[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, **46**(5): 1010-1017.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)