

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系

杜彩丽^{1,2,3}, 杨丽^{1,2,3}, 赵诣⁴, 吴晓敏^{1,2,3}, 徐慕^{1,2,3}, 王丽卿^{1,2,3*}, 张玮^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学农业部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 4. 上海市浦东新区水文水资源管理署, 上海 200129)

摘要: 淀山湖是上海市最大的淡水湖泊, 属亚热带浅水湖泊。于 2017 年对该湖的浮游动物和水质参数进行逐月调查, 并结合浮游植物群落数据, 采用多元回归树模型 (multivariate regression trees, MRT) 和主坐标分析 (principal coordinates analysis, PCoA) 等方法研究了该湖浮游动物群落结构时空分布特征及其与环境因子的关系。结果表明, 淀山湖浮游动物群落结构季节差异显著 ($P < 0.05$), 但仅在春、夏季节存在空间差异 ($P < 0.05$), 其他季节空间差异不显著 ($P > 0.05$)。水温、叶绿素 a、氨氮以及蓝藻丰度是引起淀山湖浮游动物群落时空变化的关键性因子。MRT 分析表明, 当水温 $< 13.07^{\circ}\text{C}$ 时, 表现为冬季群落特征, 当水温在 $13.07 \sim 19.57^{\circ}\text{C}$ 之间时, 表现为春季群落特征; 当水温 $\geq 19.57^{\circ}\text{C}$ 时, 叶绿素 a 浓度 $\geq 9.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 则为夏季群落特征, 而当叶绿素 a 浓度 $< 9.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 则表现为秋季群落特征。聚类分析将淀山湖浮游动物群落分成 3 个空间区域; 春季时, 当氨氮浓度 $< 1.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 上游进水区 (区域 II) 浮游动物群落与其他两个区域有显著差异 ($P < 0.05$); 而夏季当蓝藻生物量 $\geq 2.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 区域 I 的浮游动物群落与其他两个区域有显著的空间差异 ($P < 0.05$)。

关键词: 淀山湖; 浮游动物; 浅水湖泊; 生境异质性; 阈值

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4513-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903099

Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai

DU Cai-li^{1,2,3}, YANG Li^{1,2,3}, ZHAO Yi⁴, WU Xiao-min^{1,2,3}, XU Mu^{1,2,3}, WANG Li-qing^{1,2,3*}, ZHANG Wei^{1,2,3*}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrient (CREEFN) of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Pudong New Area Hydrology and Water Resource Administration, Shanghai 200129, China)

Abstract: Dianshan Lake, a subtropical shallow lake, is the largest freshwater body located in Shanghai. To reveal the temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its relationships with environmental factors, monthly data of zooplankton and phytoplankton content and associated physicochemical parameters for 2017 were analyzed using multivariate regression trees (MRT) and principal coordinates analysis (PCoA). The results indicated that there were significant seasonal differences in the community structure of zooplankton ($P < 0.05$). However, spatial variations were significant only in spring and summer ($P < 0.05$). The results indicated that water temperature (WT), chlorophyll-a (Chla), ammonia nitrogen, and cyanobacteria were the key driving factors in the observed spatial and temporal variations in the zooplankton community structure. The MRT analysis illustrated that zooplankton community structure varied strongly across four groups, including spring ($13.07^{\circ}\text{C} \leq \text{WT} < 19.57^{\circ}\text{C}$), summer ($\text{WT} \geq 19.57^{\circ}\text{C}$, $\text{Chla} \geq 9.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), autumn ($\text{WT} \geq 19.57^{\circ}\text{C}$, $\text{Chla} < 9.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), and winter ($\text{WT} < 13.07^{\circ}\text{C}$). In addition, three distinct regions were identified by the cluster analysis. The MRT analysis illustrated that the zooplankton community structure was distinct between samples with relatively lower ($< 1.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and higher concentrations ($\geq 1.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of ammonia nitrogen in spring. Furthermore, cyanobacteria were identified as a major stressor on zooplankton in summer. These observations further show that that zooplankton community structure in area I (with a cyanobacterial biomass of $\geq 2.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) was significantly different from other regions (with a cyanobacterial biomass of $< 2.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Key words: Dianshan Lake; zooplankton; shallow lake; habitat heterogeneity; threshold

浮游动物是水生态系统中重要的次级生产者, 在湖泊食物网中起着承上启下的作用; 它们一方面

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-04-28

基金项目: 上海市水务局淀山湖健康评估项目

作者简介: 杜彩丽 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为浮游动物生态学, E-mail: aquaducl@163.com

* 通信作者, E-mail: weizhang@shou.edu.cn; lqwang@shou.edu.cn

作为牧食者,影响浮游植物的多样性和丰度,另一方面为鱼类等水生脊椎动物提供食物来源^[1,2].而且浮游动物对环境变化反应敏感,常常被作为环境监测的指示生物^[3,4].在不同的湖泊中,导致浮游动物群落结构产生差异的主要因素各不相同^[5~10],如:Shurin等^[5]对北美和欧洲的53个温带湖泊进行研究,表明pH、溶解氧、温度以及磷浓度等对浮游动物生物量有显著影响;滤食性鱼类和藻类也是影响浮游动物群落的主导因子^[6,7].Ka等^[8]对浅水湖泊Guirs的研究表明,该湖浮游动物主要受浮游植物丰度的影响.Beaver等^[9]发现,水位波动是引起浅水湖泊Okeechobee中浮游动物差异的关键因素.胡梦红等^[10]对深水型水库(千岛湖)的研究表明,鳙鱼和鲢鱼的放养是引起该水库浮游动物群落变化的主要因素.此外,水动力、水文条件以及人为干扰因素等造成湖泊不同区域的生境异质性,也是影响浮游动物群落结构的重要原因^[11,12].如Maznah等指出^[11],马来西亚的Air Itam水库中上游和下游两个区域的浮游动物群落结构差异显著,其主要原因是该水库上游区域属于激流水体,下游区域属于静水水体.Massicotte等^[13]的研究表明,Lawrence河由于支流多、周边土地利用不同等因素导致该河流具有不同的生境,而生境异质性是影响浮游动物总生物量的主要因素.尽管目前科研人员从水体生境异质性对浮游动物群落影响的角度开展了一些工作,但关于亚热带浅水湖泊生境异质性与浮游动物群落关系的研究还鲜见报道.

淀山湖(北纬30°59'~31°16'和东经120°53'~121°17')是上海市最大的天然淡水湖,属亚热带浅水湖泊.面积约为62 km²,平均水深2.1 m,最大水深3.6 m.该湖出水经黄浦江流入长江口,汇入东海,沿湖岸进出河流众多,也是黄浦江上游重要的饮用水源保护区^[14].从1960年起,国内学者对淀山湖浮游动物生态特征开展了大量研究,如:文献[15~18]研究了该湖浮游动物物种多样性、群落组成与水质之间的关系;李强等^[19]研究了生态修复工程后淀山湖浮游动物群落的变化与浮游植物及水质的关系.整体而言,这些研究主要关注整个湖泊浮游动物群落演替和水质评价等方面的报道.但近年来,由于有大量的外源污染物进入淀山湖,局部区域经常暴发不同程度蓝藻水华,加之淀山湖形态非常不规则,整个湖区生境趋于多样化,呈现出一定的生境异质性^[20].目前,探讨淀山湖生境异质性对浮游动物群落结构影响的研究还未见报道.

本文基于2017年淀山湖每月调查获得的浮游动物数据,结合水质参数和浮游植物群落数据,采

用多元回归树(multivariate regression trees, MRT)和主坐标分析(principal coordinates analysis, PCoA)对浮游动物群落结构与环境因子关系进行分析,探讨淀山湖不同区域中浮游动物群落结构差异,以及造成其差异的主要因子,并尝试根据模型推导出这些关键因子的阈值,以期为淀山湖的生态治理和保护提供基础数据和理论支撑.

1 材料与方法

1.1 样点设置与采样

根据淀山湖形态,共设置13个采样点(图1).从2017年1月至2017年12月,逐月对淀山湖进行调查.

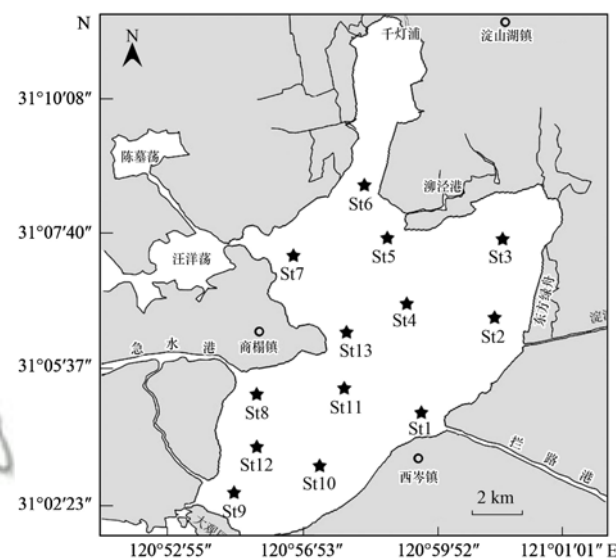


图1 淀山湖采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Dianshan Lake

透明度(SD)采用塞氏盘现场测定,水温(WT)、pH值、电导率(Cond)和溶解氧(DO)等指标使用YSI Pro-plus水质测定仪现场测定.其他水质指标,用5 L有机玻璃采水器分别在0.5 m和1.5 m水层采样,取混合水样500 mL,带回实验室进行相关水质指标测定;叶绿素a(Chla)采用90%丙酮萃取法测定,总氮、总磷、高锰酸盐指数等指标参照国家相关标准测定^[21].

取混合水样1 L,加入4%福尔马林和鲁哥氏碘液进行固定,静置48 h后,吸去上清液,浓缩至50 mL,用于轮虫和浮游植物定量分析.浮游植物定量分析时,将浓缩样充分摇匀后吸取0.1 mL于帕默尔计数框中,进行鉴定和计数,藻类鉴定参考文献[22].轮虫计数时,将浓缩样充分摇匀后,吸取1 mL置于计数框内,在10×10倍显微镜下全片镜检,每个样品计数3次,取平均值.甲壳类浮游动物(枝角类和桡足类)的分析,采集混合水样20 L,

用 13 号浮游生物网过滤到 500 mL 样品瓶中, 加入 4% 福尔马林固定, 静置 48 h 后浓缩. 在显微镜下对浓缩样品进行全瓶种类鉴定和计数, 浮游动物鉴定参考文献[23~25], 生物量按照体长-体重的回归方程计算^[26, 27].

1.2 数据分析

采用 SPSS 18.0 统计包进行方差分析, 使用 LSD 法检验各采样点以及季节之间各类指标的差异性(方差分析前, 对数据进行方差齐性检验和正态性检验); 当方差分析结果 $P < 0.05$ 时, 认为具有显著性差异. 将淀山湖浮游动物生物量进行 $\lg(X+1)$ 转化后进行聚类分析(cluster analysis, CA); 根据浮游动物群落结构之间的 jaccard 距离矩阵进行主坐标分析(principal coordinates analysis, PCoA)不同组别之间的群落 β 多样性; 以浮游动物群落数据和环境因子为依据, 使用多元回归树(multivariate regression trees, MRT)分析不同生境下浮游动物群落的结构特征; 同时, 基于 MRT 分类结果使用 MRT 函数为每个组筛选特征性物种. 数据分析采用 R 软件中“vegan”、“mvpart”以及“MVPARTwrap”软件包进行分析.

相关科学图表采用 Origin 2017 软件进行绘制. 分析前, 需根据季节对水体理化指标进行归类整理, 即: 春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12月及1、2月).

2 结果与分析

2.1 淀山湖浮游动物群落结构组成

基于 2017 年淀山湖 13 个采样点全年 12 个月的浮游动物群落结构数据进行聚类分析. 结果表明, 13 个位点可分为 3 个空间区域, 区域 I 包括 St1、St2 以及 St3, 该区域位于淀山湖东南方向, 靠近出水口; 区域 II 主要为 St4、St5、St6 以及 St7, 该区域为淀山湖东北方向, 为淀山湖上游水域; 区域 III 包括 St8、St9、St10、St11、St12 和 St13, 该区域位于淀山湖西北方向, 靠近进水口(图 2).

本研究共鉴定出浮游动物 72 种, 其中轮虫 31 种、桡足类 24 种和枝角类 17 种. 春季时, 区域 I、II 和 III 的浮游动物平均生物量分别为 7.38、18.72 和 5.57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 个区域浮游动物主要以轮虫为主, 区域 II 的浮游动物生物量显著高于区域 I 和 III ($P < 0.05$) [图 3(a)]; 夏季和秋季在 3 个区域的浮游动物均以枝角类为主, 区域 I 的浮游动物生物量均高于区域 II 和 III [图 3(b) 和 3(c)]; 夏季时, 区域 I、II 和 III 的浮游动物平均生物量分别为 14.48、6.18 和 5.95 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 秋季时, 区域 I、II

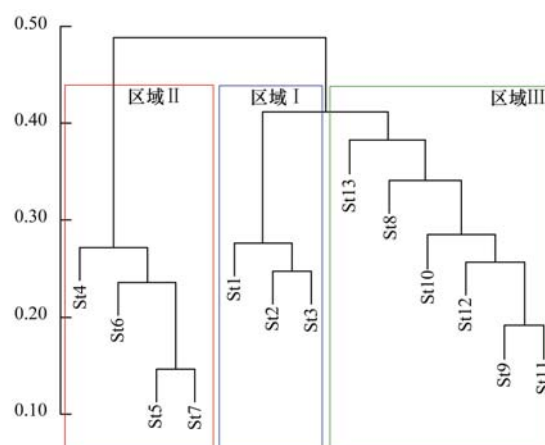


图 2 基于淀山湖浮游动物群落数据进行聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of sampling sites based on zooplankton communities in Dianshan Lake

和 III 的浮游动物平均生物量分别为 2.91、1.69 和 2.42 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 冬季时, 区域 I、II 和 III 的浮游动物平均生物量分别为 0.59、0.54 和 0.47 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 个区域的浮游动物主要以轮虫为主[图 3(d)]. 综合而言[图 3(e)], 春季、夏季、秋季以及冬季的浮游动物平均生物量分别为 9.93、7.99、2.31 和 0.51 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 夏季和秋季主要以枝角类为主, 而春季和冬季主要以轮虫为主, 春季和夏季的浮游动物生物量显著高于秋冬季节($P < 0.05$).

2.2 淀山湖浮游动物时空特征

通过 PCoA 对淀山湖不同区域浮游动物群落 β 多样性进行比较(图 4), 结果表明, 该湖浮游动物群落仅在春季和夏季存在空间差异($P < 0.05$). 春季时, PCoA 解释率为 48.75%, 降维后区域 I 的中心坐标为 (-0.06, -0.05), 区域 II 的中心坐标为 (0.16, 0.04), 区域 III 的中心坐标为 (-0.08, -0.003). 区域 II 浮游动物群落结构与另外两个区域有显著差异 (ANOVA, $P < 0.05$). 夏季时, PCoA 解释率为 53.66%, 降维后区域 I 的中心坐标为 (-0.04, 0.04), 区域 II 的中心坐标为 (0.004, -0.04), 区域 III 的中心坐标为 (0.01, 0.007), 区域 I 与另外两个区域有显著差异 (ANOVA, $P < 0.05$). 秋季和冬季浮游动物群落结构在 3 个区域中差异不显著 (ANOVA, $P > 0.05$).

通过 PCoA 对不同季节淀山湖浮游动物 β 多样性进行比较, 总解释率为 43.32% (图 5). 淀山湖 4 个季节中心坐标相距较远, 其中春季为 (-0.18, -0.11), 夏季为 (0.11, -0.18), 秋季为 (0.26, 0.08), 冬季为 (-0.17, 0.20); 通过 ANOVA 对 Jaccard 排序距离分析发现, 浮游动物群落在春、夏、秋和冬这 4 个季节间均具有极显著的差异 ($P < 0.05$).

轮虫、枝角类和桡足类浮游动物的生物量时空

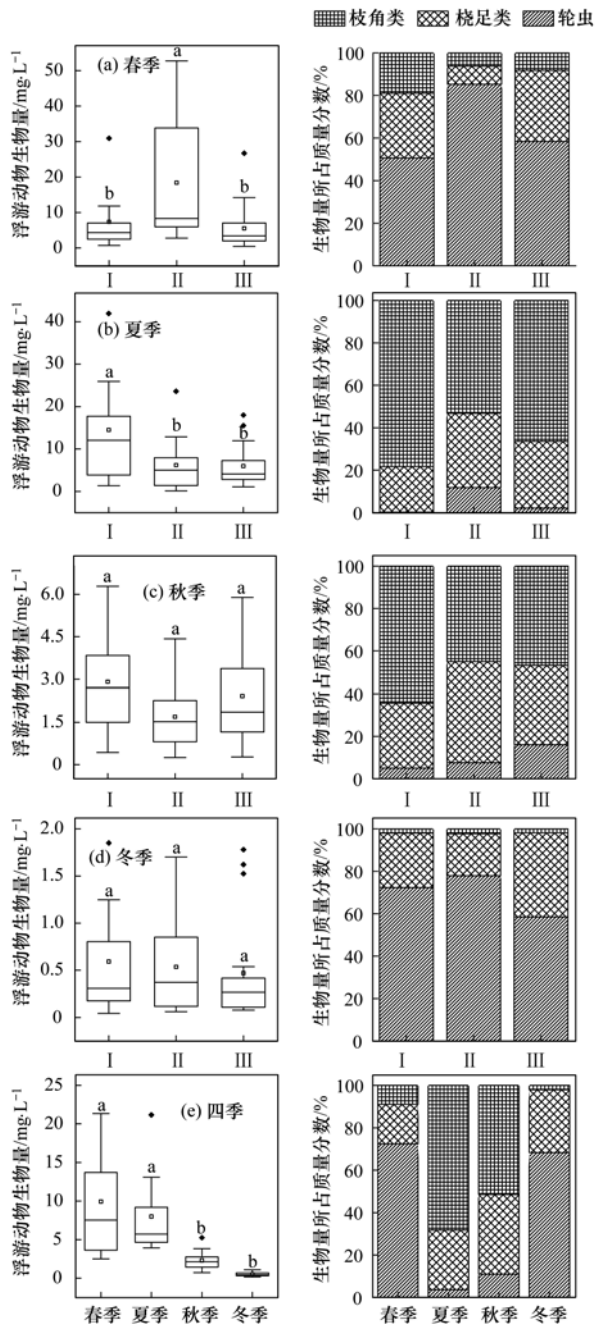


图3 淀山湖浮游动物生物量时空变化以及相对比例

Fig. 3 Temporal and spatial variation of zooplankton biomass and their relative abundances in Dianshan Lake

差异显著 ($P < 0.05$), 见图6。从空间差异来看, 枝角类生物量在群组 I 最高, 轮虫生物量在群组 II 中最高, 桡足类在 3 个群组中没有差异; 从季节变化而言, 枝角类生物量在夏季最高, 轮虫生物量在春季最高, 夏季桡足生物量略高于春季, 冬季和秋季 3 大类群均较低 (图6)。

2.3 淀山水环境因子

淀山湖非生物和生物因子分析结果显示, 各因子之间均存在季节差异 (图7)。春季时, pH 和透明度最高, 总磷含量最低; 夏季时, 高锰酸盐指数、电导率、温度、总磷以及叶绿素 a 浓度最高; 透

度、氨氮和溶解氧含量最低; 秋季时, 总磷含量最高, 总氮含量最低; 冬季时, 总氮和溶解氧含量最高, 电导率、水温和叶绿素 a 最低。绿藻、裸藻和硅藻生物量在春季均高于其他季节, 但夏季的蓝藻生物量要高于其他季节。在空间上, 春季 3 个区域中除总氮、总磷以及水温外其他水环境因子均存在差异。pH 以及氨氮仅在区域 I 和 II 中存在差异, 区域 II 的 pH 最高为 8.57, 而区域 I 的氨氮最高为 $1.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 溶解氧、高锰酸盐指数以及叶绿素 a 在区域 II 与区域 I 和 III 均存在差异 ($P < 0.05$), 区域 I 和 III 之间无差异, 区域 II 中溶解氧、高锰酸盐指数、叶绿素 a 浓度均最高, 分别为 11.11、10.68 和 $55.57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。电导率仅在区域 II 和 III 存在差异, 在区域 II 最高, 其平均值为 $657.5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$; 藻类在春季没有显著差异 ($P > 0.05$)。夏季除总氮和蓝藻外其他环境因子均无显著差异; 总氮在区域 III 与区域 I 和 II 存在差异 ($P < 0.05$), 区域 III 的总氮含量最高, 其值为 $2.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 夏季时, 浮游植物主要以蓝藻为主, 且区域 I 蓝藻生物最高, 平均达到 $2.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与区域 II 和 III 存在差异 ($P < 0.05$)。秋季时高锰酸盐指数、总氮、总磷和透明度在 3 个区域均存在显著差异 ($P < 0.05$)。冬季时叶绿素 a、溶解氧以及电导率在 3 个区域存在差异 ($P < 0.05$), 其他因子无显著差异。

2.4 浮游动物群落与环境因子的关系

MAT 模型分析显示, 水温和叶绿素 a 是引起淀山湖浮游动物全年群落结构差异的主要因素 (图8); 其中水温 $< 19.57^\circ\text{C}$ 时, 表征为春季和冬季浮游动物群落结构, 即: 水温 $< 13.07^\circ\text{C}$ 时, 表现为冬季群落特征; 温度为 $13.07 \sim 19.57^\circ\text{C}$ 时, 表现为春季群落特征。水温 $\geq 19.57^\circ\text{C}$ 时, 表征夏季和秋季浮游动物群落结构, 其中当叶绿素 a 质量浓度 $\geq 9.034 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 为夏季群落特征, 而当叶绿素 a 质量浓度 $< 9.034 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 表现为秋季群落特征。

春季时, 氨氮是影响浮游动物群落结构空间差异的主要因素 [图 9(a)], 区域 II 群落结构与其他两个区域产生差异的氨氮阈值为 $1.107 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。夏季时, 主要受蓝藻影响 [图 9(b)], 当蓝藻生物量 $\geq 2.583 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 区域 I 浮游动物群落结构与区域 II 和 III 有显著差异 ($P < 0.05$)。秋季时, 主要受总磷影响 [图 9(c)], 当总磷 $< 0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 区域 I 和 II 浮游动物群落结构与区域 III 有显著差异 ($P < 0.05$)。而冬季时, 不同区域浮游动物群落结构主要受电导率影响 [图 9(d)], 电导率达到 $396.7 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时, 区域 I 和 II 浮游动物群落与区域 III 有显著差异 ($P < 0.05$)。

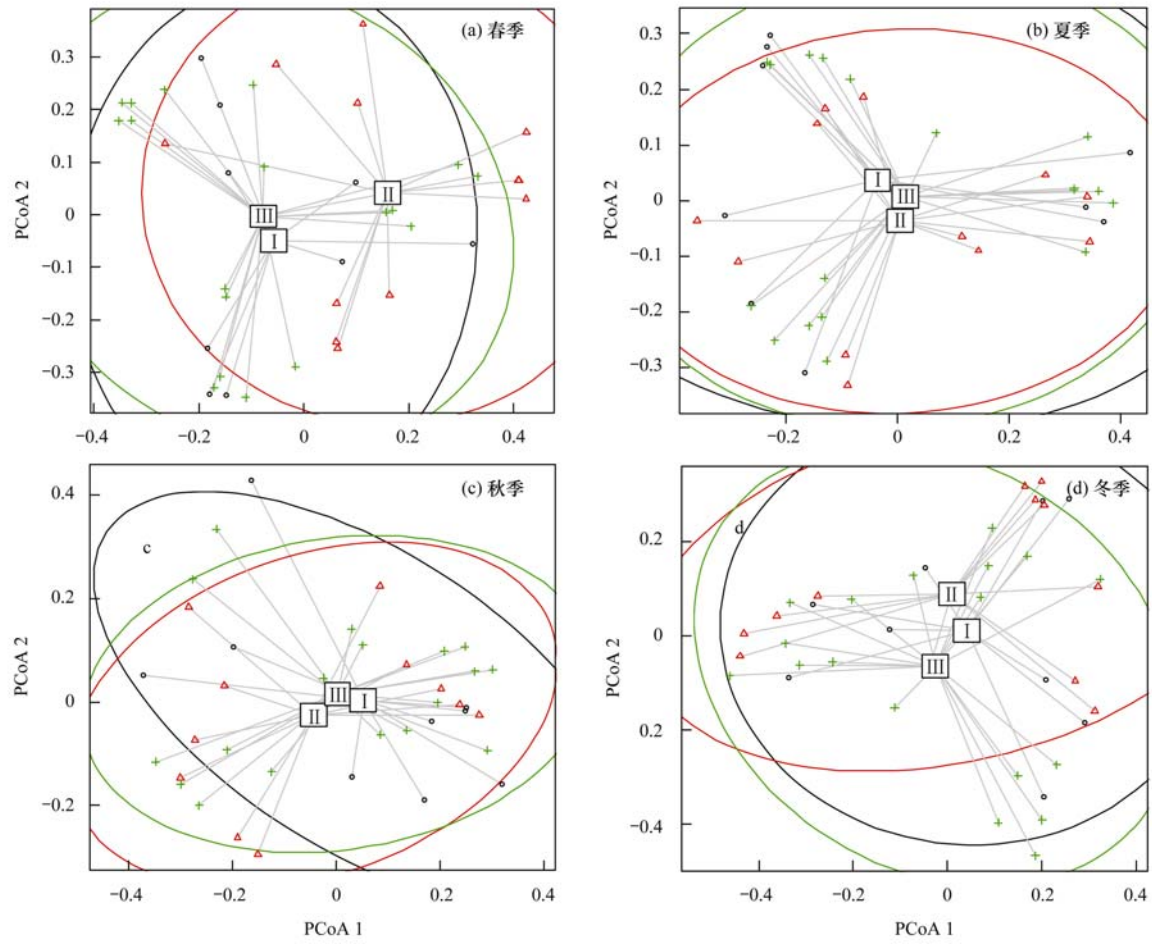


图4 淀山湖4季3个区域浮游动物群落 PCoA 分析

Fig. 4 Principal coordinate analysis for zooplankton communities in three different regions different seasons in Dianshan Lake

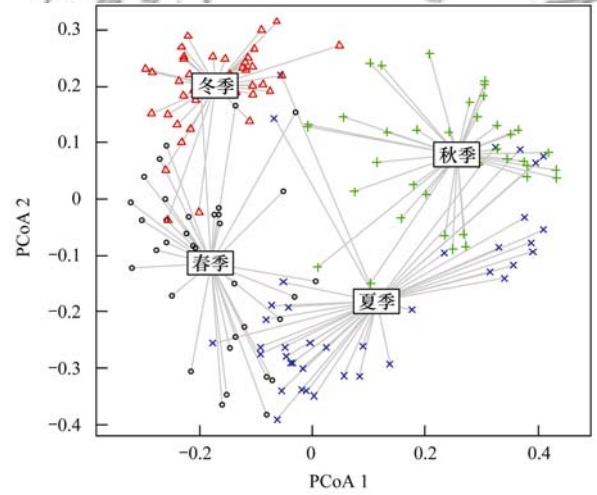


图5 淀山湖4个季节浮游动物群落的 PCoA 分析

Fig. 5 Principal coordinate analysis for zooplankton communities during different seasons in Dianshan Lake

2.5 特征性物种

基于 MAT 分类结果对每个组群的特征性物种进行识别分析,结果显示,春季和冬季浮游动物 (MAT, 水温 < 19.57℃) 的特征性物种主要以轮虫为主,包括刺簇多肢轮虫 (指示值 IV = 0.94)、中华窄腹剑水蚤 (IV = 0.75)、汤匙华哲水蚤 (IV =

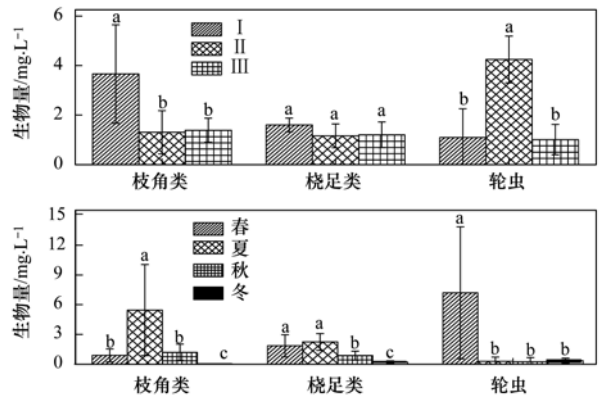


图6 淀山湖浮游动物生物量变化

Fig. 6 Variations in zooplankton biomass in Dianshan Lake

0.68)、长肢多肢轮虫 (IV = 0.68)、萼花臂尾轮虫 (IV = 0.67)、长三肢轮虫 (IV = 0.65)、螺形龟甲轮虫 (IV = 0.60)、僧帽蚤 (IV = 0.53)、前节晶囊轮虫 (IV = 0.49)、角突臂尾轮虫 (IV = 0.37) 以及矩形龟甲轮虫 (IV = 0.31) 等 ($P < 0.05$); 夏季和秋季浮游动物 (MAT, 水温 $\geq 19.57^{\circ}\text{C}$) 的特征性物种主要以枝角类为主,包括筒弧象鼻蚤 (IV = 0.86)、桡足幼体 (IV = 0.85)、脆弱象鼻蚤 (IV = 0.83)、长额象鼻蚤 (IV = 0.78)、微型裸腹蚤 (IV = 0.67)、透明温

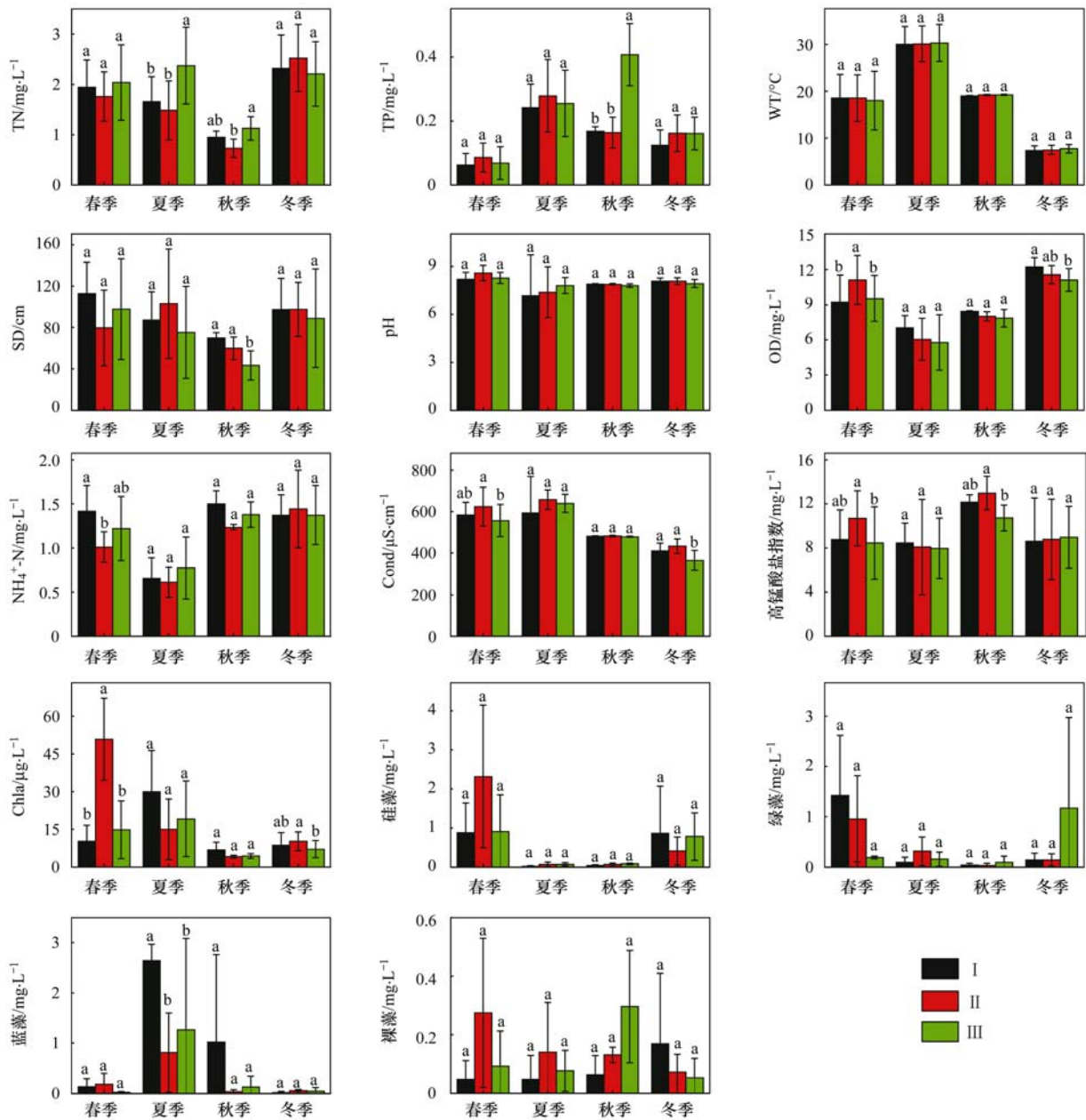


图7 淀山水环境因子时空变化

Fig. 7 Temporal and spatial variations in water environmental factors in Dianshan Lake

剑水蚤 ($IV = 0.58$)、球状许水蚤 ($IV = 0.57$)、长肢秀体蚤 ($IV = 0.54$)、老年低额蚤 ($IV = 0.50$) 以及角突网纹蚤 ($IV = 0.47$) 等。

春季时, 区域 II (MAT, 氨氮 $< 1.107 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的特征性物种全部为轮虫, 主要为裂足臂尾轮虫 ($IV = 0.80$)、前节晶囊轮虫 ($IV = 0.80$)、舞跃无柄轮虫 ($IV = 0.70$)、细异尾轮虫 ($IV = 0.60$) 以及裂痕龟纹轮虫 ($IV = 0.55$) 等。其他两个区域 (MAT, 氨氮 $\geq 1.107 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 无特征性物种; 夏季时, 区域 I (MAT, 蓝藻生物量 $\geq 2.583 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 特征性物种只有 1 种, 为老年低额蚤 ($IV = 0.70$)。其他两个区域的特征性物种为微型裸腹蚤 ($IV = 0.87$)、刺簇多肢轮虫 ($IV = 0.67$) 和无节幼体 ($IV = 0.66$); 秋

季时, 区域 I 和 II (MAT, 总磷 $< 0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的特征性物种只有 1 种, 为角突网纹蚤 ($IV = 0.70$)。区域 III 的特征性物种为长额象鼻蚤 ($IV = 0.79$) 和简弧象鼻蚤 ($IV = 0.68$); 冬季时, 区域 I 和 II (MAT, 电导率 $\geq 396.7 \text{ } \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) 无特征性物种。区域 III 的特征性物种为桡足幼体 ($IV = 0.85$)。

3 讨论

3.1 淀山湖浮游动物群落空间差异因素

氨氮作为水体中最重要的污染物之一, 对浮游动物群落结构具有显著影响^[28, 29]。Arauzo^[29]的研究表明当水体中氨氮浓度升高时, 浮游动物生物量会显著下降。本研究也出现类似结果, 区域 I

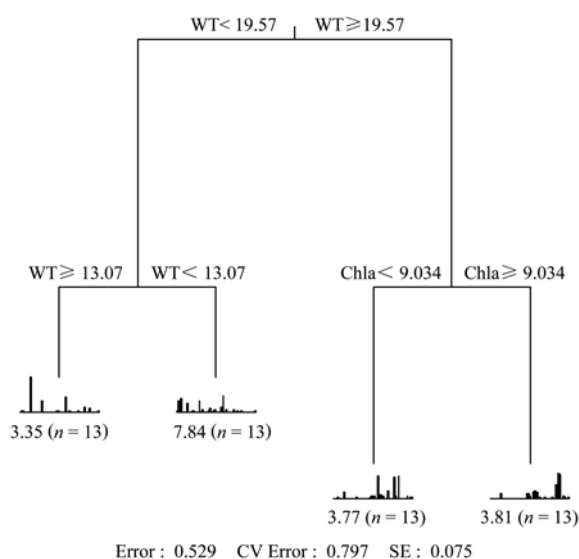


图8 基于多元回归树分析淀山湖全年浮游动物群落结构与环境因子的关系

Fig. 8 Annual multivariate regression trees for zooplankton communities and environmental factors in Dianshan Lake

$[(1.42 \pm 0.29) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 和区域Ⅲ $[(1.20 \pm 0.36) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 的氨氮浓度高于区域Ⅱ $[(1.01 \pm 0.17) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$, 相应地区域Ⅰ和Ⅲ的浮游动物生物量显著低于区域Ⅱ. 主要原因可能是较高浓度的氨氮对一些浮游动物物种具有毒害作用, 会影响它们的生长和繁殖^[30-32]; 有研究发现, 当氨氮含量高于 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时会导致大型溞 (*Daphnia magna*) 和拟同形溞 (*Daphnia similoides*) 等枝角类性成熟延迟、繁殖率降低, 甚至死亡^[30, 31]. 此外, 3 个区域中浮游动物均以轮虫为主, 通过 MRT 函数也得出区域Ⅱ的特征性物种全部为轮虫, 其他两个区域无特征性物种, 这可能是由于轮虫对氨氮的 LC_{50} 显著高于枝角类和桡足类^[32-34], 而对氨氮有较高耐受性, 并且轮虫繁殖世代较短 (属 r-对策者) 使得它们能够

在高氨氮的水环境中占相对较高的丰度.

蓝藻是水生态系统中重要的初级生产力, 一旦暴发, 可通过食物网对浮游动物造成显著影响, 甚至改变浮游动物群落结构以及生物多样性^[35]. 如微囊藻等容易形成群体, 一些丝状蓝藻的粒径也相对较大, 不易被摄食^[36, 37], 而且蓝藻营养价值低^[38, 39] 以及产生毒素^[40], 因此不利于大型浮游动物的生长繁殖. 在本研究中, 区域Ⅰ的蓝藻生物量显著高于区域Ⅱ和区域Ⅲ. 原因可能是区域Ⅰ临近出水口, 受水动力、风力以及地形等因素的影响, 造成蓝藻在区域Ⅰ内大量堆积. 淀山湖夏季浮游动物的特征性物种主要以老年低额溞、微型裸腹溞、刺簇多肢轮虫以及无节幼体等小型物种为主, 且区域Ⅰ浮游动物生物量要显著高于区域Ⅱ和区域Ⅲ. Jia 等^[41] 在太湖研究浮游动物对蓝藻的响应时得出蓝藻不会造成浮游动物生物量下降, 其原因可能是由于一些小型浮游动物属于 r 对策者, 生命周期短, 繁殖率高, 通过长时间与蓝藻共存, 耐受性逐步增强, 能在一定程度上耐受局地高蓝藻的生境^[42-44]; 甚至一些小型浮游动物 (如裸腹溞) 可以牧食和消化丝状蓝藻^[45]. 本研究结果也表明, 淀山湖中蓝藻对裸腹溞和低额溞等小型枝角类物种的影响较小, 这些物种仍能保持高生物量.

总磷和电导率分别是影响秋季和冬季浮游动物结构差异的主要因子. 在浅水湖泊中, 水体中磷含量与水体营养状况密切相关, 是判定水体富营养化程度的一个重要指标^[46]; 电导率可以反映水体中离子浓度, 也可以反映出水体的营养状况^[46], 二者变化均对水体中浮游植物造成影响^[47, 48], 进而导致浮游动物群落结构产生差异.

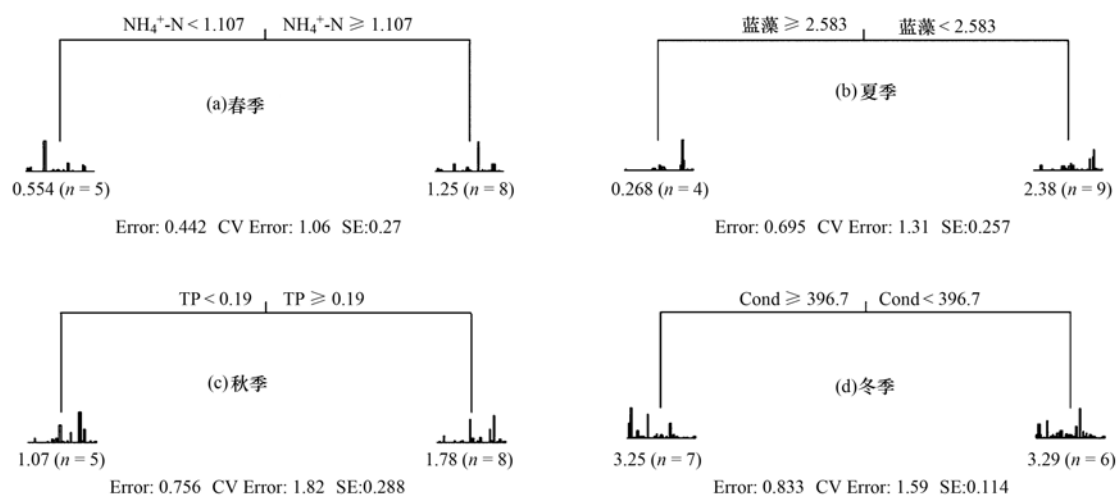


图9 基于多元回归树分析淀山湖不同季节浮游动物群落结构与环境因子的关系

Fig. 9 Multivariate regression trees for zooplankton communities and environmental factors during different season in Dianshan Lake

3.2 淀山湖浮游动物季节性差异因素

水温被认为是影响浮游动物生长、发育和物种组成的重要因子,也是影响浮游动物季节演替的一个重要因素^[49, 50]。本研究中,淀山湖浮游动物在春冬季节时的特征性物种多数为广温种,其中个别物种如僧帽溞为嗜冷性物种^[51, 52];夏秋季节的特征性物种中象鼻溞密度与温度呈正相关性^[53],微型裸腹溞、长肢秀体溞以及角突网纹溞等为嗜暖性物种^[52];春冬季节浮游动物主要以轮虫为主,夏秋季节浮游动物主要以枝角类为主;原因可能是轮虫主要以藻类、细菌和碎屑作为食物^[54],冬春季生长的浮游植物如裸藻、绿藻以及前一年水生生物死亡后形成的有机碎屑是轮虫喜食的饵料,而且捕食者(如一些小型鱼类)在低温季节活力较低,因此轮虫在冬春季节可大量繁殖形成峰值^[55];夏秋季随着水温升高,藻类大量繁殖(图7),食物资源充足,一些小型枝角类丰度开始呈上升趋势^[56]。

其次,叶绿素 a 浓度是衡量水体浮游植物生物量的主要指标,是浮游动物的主要食物来源之一,因此水体中浮游植物的密度与浮游动物的生长繁殖密切相关^[57]。邱小琮等^[47]对沙湖研究时表明叶绿素 a 浓度对该湖的浮游动物密度、生物量具有显著的促进作用。在本研究中,夏季浮游动物生物量和枝角类所占比例显著高于秋季,主要原因是夏季叶绿素 a 浓度(藻类生物量)要高于秋季,有利于浮游动物生长^[47, 58];虽然夏季蓝藻浓度高,但由于一些小型枝角类长期与蓝藻共存时,产生了一定适应性^[42~44]。如 Jiang 等^[59]研究捕食和蓝藻对枝角类竞争的影响时表明老年低额溞对蓝藻(铜绿微囊藻)有一定的耐受性,能够以蓝细菌为食并呈现出高繁殖率。另外,夏季温度较高,一些小粒径藻类会大量生长,也为浮游动物提供了充足的食物来源^[56]。

4 结论

(1) 淀山湖浮游动物群落结构春季和夏季存在空间差异;氨氮是驱动春季不同湖区空间差异的主要因子,蓝藻则是驱动夏季不同湖区差异的主要因子。

(2) 全湖浮游动物群落结构存在显著的季节性演替,水温和叶绿素 a(即藻类生物量)是引起季节性差异的主要环境因子。

参考文献:

[1] Sotton B, Guillard J, Anneville O, *et al.* Trophic transfer of microcystins through the lake pelagic food web: evidence for the role of zooplankton as a vector in fish contamination[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **466-467**: 152-163.

[2] Offem B O, Samsons Y A, Omoniyi I T, *et al.* Dynamics of the limnological features and diversity of zooplankton populations of the Cross River System SE Nigeria [J]. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 2009, **393**(2): 1-19.

[3] Jeppesen E, Nöges P, Davidson T A, *et al.* Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD) [J]. *Hydrobiologia*, 2011, **676**: 279.

[4] Pagès F, González H E, Ramón M, *et al.* Gelatinous zooplankton assemblages associated with water masses in the Humboldt Current System, and potential predatory impact by *Bassia bassensis* (Siphonophora: Calycophorae) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **210**: 13-24.

[5] Shurin J B, Winder M, Adrian R, *et al.* Environmental stability and lake zooplankton diversity - contrasting effects of chemical and thermal variability [J]. *Ecology Letters*, 2010, **13**(4): 453-463.

[6] George D G, Winfield I J. Factors influencing the spatial distribution of zooplankton and fish in Loch Ness, UK [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **43**(4): 557-570.

[7] Li Y, Xie P, Zhang J, *et al.* Effects of filter-feeding planktivorous fish and cyanobacteria on structuring the zooplankton community in the eastern plain lakes of China [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **99**: 238-245.

[8] Ka S, Pagano M, Ba N, *et al.* Zooplankton distribution related to environmental factors and phytoplankton in a shallow tropical lake (Lake Guiers, Senegal, West Africa) [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2006, **91**(5): 389-405.

[9] Beaver J, Havens K. Seasonal and spatial variation in zooplankton community structure and their relation to possible controlling variables in Lake Okeechobee [J]. *Freshwater Biology*, 1996, **36**(1): 45-56.

[10] 胡梦红, 杨丽丽, 刘其根. 竞争捕食作用对千岛湖浮游动物群落结构的影响 [J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(5): 751-758.

Hu M H, Yang L L, Liu Q G. Effects of predation and competition on zooplankton community structure in Lake Qiandao [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(5): 751-758.

[11] Maznah W O W, Intan S, Sharifah R, *et al.* Lentic and lotic assemblages of zooplankton in a tropical reservoir, and their association with water quality conditions [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018, **15**(3): 533-542.

[12] Chaparro G, Kandus P, O'Farrell I. Effect of spatial heterogeneity on zooplankton diversity: a multi-scale habitat approximation in a floodplain lake [J]. *River Research and Applications*, 2015, **31**(1): 85-97.

[13] Massicotte P, Frenette J J, Proulx R, *et al.* Riverscape heterogeneity explains spatial variation in zooplankton functional evenness and biomass in a large river ecosystem [J]. *Landscape Ecology*, 2014, **29**(1): 67-79.

[14] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析 [J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(1): 67-72.

Wu E N, Zhu M J, Tang L, *et al.* Dynamics of chlorophyll-a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(1): 67-72.

[15] 赖伟, 李逸平, 堵南山. 上海淀山湖浮游桡足类群落组成与季节变动研究 [J]. *水生生物学报*, 1987, **11**(2): 173-183.

Lai W, Li Y P, Du N S. Studies on the composition and seasonal

- variations of planktonic copepoda in Lake Dian-shan, shanghai [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1987, **11**(2): 173-183.
- [16] 由文辉. 淀山湖周丛动物群落的初步研究[J]. 水生生物学报, 1997, **21**(2): 114-122.
- You W H. Preliminary studies on zooperiphyton community in Dianshan Lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1997, **21**(2): 114-122.
- [17] 郑小燕, 王丽卿, 盖建军, 等. 淀山湖浮游动物的群落结构及动态[J]. 动物学杂志, 2009, **44**(5): 78-85.
- Zheng X Y, Wang L Q, Gai J J, *et al.* Dynamic and community structure of zooplankton in Dianshan Lake[J]. Chinese Journal of Zoology, 2009, **44**(5): 78-85.
- [18] 冯德祥, 刘一, 禹娜, 等. 淀山湖后生浮游动物群落结构特征分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, (6): 122-131.
- Feng D X, Liu Y, Yu N, *et al.* Study on meta-zooplankton community structure of Dianshan Lake[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011, (6): 122-131.
- [19] 李强, 田华, 姜民, 等. 淀山湖浮游动物群落结构特征及其影响因子[J]. 水生态学杂志, 2015, **36**(4): 69-77.
- Li Q, Tian H, Jiang M, *et al.* Community structure of zooplankton and influencing factors in Dianshan Lake of Shanghai [J]. Journal of Hydroecology, 2015, **36**(4): 69-77.
- [20] 康丽娟, 孙从军, 李小平. 淀山湖沉积物磷分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 190-196.
- Kang L J, Sun C J, Li X P. Forms and distribution of phosphorus in sediments of Dianshan Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(1): 190-196.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 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.
- [23] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [24] 沈嘉瑞. 中国动物志·淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [25] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志·淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [26] 陈雪梅. 淡水桡足类生物量的测算[J]. 水生生物学集刊, 1981, **7**(3): 397-408.
- Chen X M. Biomass calculation of freshwater copepoda[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1981, **7**(3): 397-408.
- [27] 黄祥飞, 胡春英. 淡水常见枝角类体长-体重回归方程式[A]. 见: 甲壳动物学论文集编辑委员会. 甲壳动物学论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1986. 147-157.
- [28] Yang J H, Zhang X W, Xie Y W, *et al.* Ecogenomics of zooplankton community reveals ecological threshold of ammonia nitrogen[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(5): 3057-3064.
- [29] Arauzo M. Harmful effects of un-ionised ammonia on the zooplankton community in a deep waste treatment pond [J]. Water Research, 2003, **37**(5): 1048-1054.
- [30] Xiang F H, Yang W, Chen Y F, *et al.* Acute toxicity of nitrite and ammonia to *Daphnia similoides* of different developmental stages: using the modified Gaussian model to describe [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, **84**(6): 708-711.
- [31] Martins J, Teles L O, Vasconcelos V. Assays with *Daphnia magna* and *Danio rerio* as alert systems in aquatic toxicology[J]. Environment International, 2007, **33**(3): 414-425.
- [32] Arauzo M, Valladolid M. Short-term harmful effects of unionised ammonia on natural populations of *Moina micrura* and *Brachionus rubens* in a deep waste treatment pond [J]. Water Research, 2003, **37**(11): 2547-2554.
- [33] Jepsen P M, Andersen C V B, Schjeldt J, *et al.* Tolerance of un-ionized ammonia in live feed cultures of the calanoid copepod *Acartia tonsa* Dana [J]. Aquaculture Research, 2015, **46**(2): 420-431.
- [34] Leung J, Kumar M, Glatz P, *et al.* Impacts of un-ionized ammonia in digested piggery effluent on reproductive performance and longevity of *Daphnia carinata* and *Moina australiensis* [J]. Aquaculture, 2011, **310**(3-4): 401-406.
- [35] Harke M J, Steffen M M, Gobler C J, *et al.* A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. [J]. Harmful Algae, 2016, **54**: 4-20.
- [36] Fulton III R S, Paerl H W. Effects of colonial morphology on zooplankton utilization of algal resources during blue-green algal (*Microcystis aeruginosa*) blooms [J]. Limnology and Oceanography, 1987, **32**(3): 634-644.
- [37] De Bernardi R, Giussani G. Are blue-green algae a suitable food for zooplankton? An overview [J]. Hydrobiologia, 1990, **200**(1): 29-41.
- [38] Brett M, Müller - Navarra D. The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic foodweb processes[J]. Freshwater Biology, 1997, **38**(3): 483-499.
- [39] Elert E V, Martin-Creuzburg D, Le Coz J R. Absence of sterols constrains carbon transfer between cyanobacteria and a freshwater herbivore (*Daphnia galeata*) [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2003, **270**(1520): 1209-1214.
- [40] Hansson L A, Gustafsson S, Rengefors K, *et al.* Cyanobacterial chemical warfare affects zooplankton community composition[J]. Freshwater Biology, 2007, **52**(7): 1290-1301.
- [41] Jia J M, Shi W Q, Chen Q W, *et al.* Spatial and temporal variations reveal the response of zooplankton to cyanobacteria [J]. Harmful Algae, 2017, **64**: 63-73.
- [42] Guo N C, Xie P. Development of tolerance against toxic *Microcystis aeruginosa* in three cladocerans and the ecological implications[J]. Environmental Pollution, 2006, **143**(3): 513-518.
- [43] Declerck S, Cousyn C, De Meester L. Evidence for local adaptation in neighbouring *Daphnia* populations: a laboratory transplant experiment [J]. Freshwater Biology, 2001, **46**(2): 187-198.
- [44] Sarnelle O, Wilson A E. Local adaptation of *Daphnia pulicaria* to toxic cyanobacteria[J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(5): 1565-1570.
- [45] Ka S, Mendoza-Vera J M, Bouvy M, *et al.* Can tropical freshwater zooplankton graze efficiently on cyanobacteria? [J]. Hydrobiologia, 2012, **679**(1): 119-138.
- [46] 都雪, 王齐东, 张超文, 等. 洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 269-276.
- Du X, Wang Q D, Zhang C W, *et al.* Community structure of rotifers in relation to environmental factors in Lake Hongze [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(2): 269-276.
- [47] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 896-901.
- Qiu X C, Zhao H X, Sun X X. Relationships between zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake, Ningxia of Northwest China: a multivariate analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(4): 896-901.

- [48] 贺筱蓉, 李共国. 杭州西溪湿地首期工程区浮游植物群落结构及与水质关系[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 795-800.
He X R, Li G G. Community structure of phytoplankton and its relation with water quality in Xixi Wetland for the Frist project Aera, Hangzhou[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(6): 795-800.
- [49] Marques S C, Azeiteiro U M, Marques J C, *et al.* Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns[J]. Journal of Plankton Research, 2006, **28**(3): 297-312.
- [50] Sarma S S S, Nandini S, Gulati R D. Life history strategies of cladocerans: comparisons of tropical and temperate taxa [J]. Hydrobiologia, 2005, **542**(1): 315-333.
- [51] 郭菲菲, 李慧明, 顾杨亮, 等. 大沙河水库浮游甲壳类动物群落特征[J]. 生态科学, 2015, **34**(5): 8-15.
Guo F F, Li H M, Gu Y L, *et al.* Community structure of planktonic crustaceans in large, tropical, eutrophic Dashahe reservoir, South China[J]. Ecological Science, 2015, **34**(5): 8-15.
- [52] 陈绵润, 赵帅营, 林秋奇, 等. 广东省水库枝角类组成特征的初步研究[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 77-86.
Chen M R, Zhao S Y, Lin Q Q, *et al.* Cladoceran distribution in reservoirs of Guangdong Province, South China[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, **19**(1): 77-86.
- [53] 王文侠, 陈非洲, 谷孝鸿. 南京市5座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 216-223.
Wang W X, Chen F Z, Gu X H. Community structures of zooplankton and its relation to environmental factors in five medium reservoirs in Nanjing City[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(1): 216-223.
- [54] Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality [J]. Hydrobiologia, 1983, **100**(1): 169-201.
- [55] 王丽卿, 程婧蕾, 郑小燕, 等. 淀山湖轮虫多样性及生物量时空变化[J]. 水产学报, 2008, **32**(6): 906-914.
Wang L Q, Cheng J L, Zheng X Y, *et al.* Diversity and seasonal dynamics of rotifer in Dianshan Lake[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, **32**(6): 906-914.
- [56] 王梦梦, 张玮, 杨丽, 等. 上海市河道水体拟浮丝藻生物量与环境因子的回归分析[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(1): 187-193.
Wang M M, Zhang W, Yang L, *et al.* Regression analysis between *Planktothricoides* spp. biomass and environmental factors in urban rivers from Shanghai, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(1): 187-193.
- [57] 王庆, 刘丽君, 杨宇峰. 南方某水库轮虫群落特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2010, **30**(13): 3385-3395.
Wang Q, Liu L J, Yang Y F. Response of rotifer community characteristics to environmental factors in a reservoir, Southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **30**(13): 3385-3395.
- [58] Zhao K, Wang L Z, Riseng C, *et al.* Factors determining zooplankton assemblage difference among a man-made lake, connecting canals, and the water-origin river [J]. Ecological Indicators, 2018, **84**: 488-496.
- [59] Jiang X D, Yang W, Zhang L H, *et al.* Predation and cyanobacteria jointly facilitate competitive dominance of small-bodied cladocerans[J]. Journal of Plankton Research, 2014, **36**(4): 956-965.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)