

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



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年)

杨佳^{1,2}, 周健², 秦伯强², 权秋梅¹, 黎云祥^{1*}

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637002; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 浮游动物作为水体食物链的重要组成部分, 在湖泊生态系统中发挥着重要作用。然而, 作为水质重要监测指标, 由于浮游动物群落结构长期连续监测数据的缺失, 导致关于浮游动物群落结构长期变化特征的认识较为缺乏。基于太湖梅梁湾 1997 ~ 2017 年逐月连续监测数据, 研究了浮游动物群落结构的长期变化特征, 探讨了其与环境因子的关系。结果显示, 在此期间, 太湖梅梁湾浮游动物丰度和生物量均显著下降 ($P < 0.05$)。其中, 轮虫和桡足类丰度和生物量均缓慢下降, 枝角类丰度处于波动而生物量表现为显著下降 ($P < 0.05$)。枝角类生物量对太湖梅梁湾浮游动物生物量的贡献最大。小型的枝角类和桡足类的优势度随着轮虫丰度的降低而增大, 浮游动物的平均体型显著减小 ($P < 0.05$), 浮游动物呈现出小型化演化特征, 并潜在减弱对浮游植物的下行效应。此外, 浮游动物丰度和生物量在春季呈上升趋势而在秋冬季呈下降趋势, 并在 9 月达到最大值 $1\,406.70 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而在夏季它们的变化趋势则相反。Pearson 相关性分析显示, 浮游动物群落结构主要与水体物理特征 (碱度、电导率、水深、悬浮物质和水温)、叶绿素 a 和氮元素密切相关 ($P < 0.05$), 说明太湖梅梁湾水体富营养化对浮游动物的群落结构具有重要影响。

关键词: 太湖; 浮游动物; 丰度; 生物量; 群落结构; 小型化

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1246-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907054

Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu

YANG Jia^{1,2}, ZHOU Jian², QIN Bo-qiang², QUAN Qiu-mei¹, LI Yun-xiang^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Zooplankton, as an important part of the water food chain, plays an important role in lake ecosystems. It is an important monitoring indicator for water bodies. However, due to the lack of long-term monitoring data of zooplankton community structure, there is a lack of understanding about its long-term characteristics. Based on monthly monitoring data from 1997 to 2017 of Meiliang Bay in Lake Taihu, the long-term trends of zooplankton community structure and its relation to the environment were examined. The results showed that the abundance and biomass of zooplankton in Meiliang Bay significantly decreased from 1997 to 2017 ($P < 0.05$). In particular, the abundance and biomass of rotifer and copepod slowly declined, and the abundance of cladocerans fluctuated but its biomass presented a significant decreasing trend ($P < 0.05$). The cladoceran biomass contributed the most to the zooplankton biomass in Meiliang Bay. The dominance of smaller cladocerans and copepods increased with decreasing rotifer density, significantly decreasing the average body size of zooplankton ($P < 0.05$). This study indicated that zooplankton were becoming smaller, potentially weakening the top-down control on phytoplankton. In addition, zooplankton abundance and biomass showed an upward trend in spring and decreased in autumn and winter, and reached maximum values of $1\,406.70 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$ and $25.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, in September. In the summer, their changes were the opposite. Pearson correlation analysis showed that zooplankton community structure was significantly related to water physical characteristics (alkalinity, electrical conductivity, water depth, suspended substance, and water temperature), chlorophyll a, and nitrogen ($P < 0.05$). This indicated that the eutrophication of Meiliang Bay in Lake Taihu had a significant impact on the community structure of zooplankton.

Key words: Lake Taihu; zooplankton; abundance; biomass; community structure; miniaturization

浮游动物作为湖泊生态系统重要组成部分, 在物质转化、能量流动和信息传递等过程中发挥着至关重要的作用^[1]。浮游动物的种类组成、数量变化、优势种及污染指示种的变化受湖泊的自然地理环境、水体类型以及人类活动影响较大, 不同的种类对环境的敏感性和适应性不同, 所作出的响应也不同^[2]。因此, 浮游动物常作为水质监测的重要指标,

用于指示和评估湖泊生态系统^[3, 4]。

自 20 世纪 80 年代开始, 太湖逐渐富营养化并暴发蓝藻水华, 特别是 1990 年之后, 太湖北部的梅

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2019-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701098, 41621006)

作者简介: 杨佳 (1994 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为浮游动物生态学, E-mail: 1185142316@qq.com

* 通信作者, E-mail: yx_li@263.net

梁湾开始频繁暴发蓝藻水华并逐渐扩大到整个太湖西北部^[5]。2007 年 5 月,位于太湖北部的贡湖湾水厂由于蓝藻水华积聚发生了严重的水危机事件,数百万居民饮用水出现危机,直接影响饮用水供水安全^[6]。梅梁湾系太湖北部一较大湖湾,地处无锡市郊,面积约 132 km²,平均水深约 2 m,是无锡市主要旅游区及水源地。由于受入湖河道及沿岸污染源的影响,水质严重恶化,蓝藻水华连年发生^[7]。目前关于太湖梅梁湾浮游动物的研究较少且主要集中于短期的野外调查。例如,1998 年 2 ~ 3 月,调查表明梅梁湾浮游动物中的枝角类和桡足类的生物量与水温变化关系密切,水温越高则生物量越高,而温度相同时,其生物量与透明度呈正比^[8];2004 年 11 月至 2005 年 10 月的调查结果表明,梅梁湾浮游甲壳动物总丰度和生物量随营养盐水平和温度的升高而增加^[2];研究还发现鲢、鳙放养对浮游甲壳动物的生物量产生了较大的影响,枝角类各种类的生物量受鲢、鳙放养的影响程度大于桡足类各种类^[9]。然而,以上的研究多关注短期浮游动物群落的组成、年际及季节变化、环境因子的相关性等,对于梅梁湾蓝藻水华及多种环境因子胁迫对浮游动物群落结构演替及长期变化特征的影响尚不清楚。而了解太湖梅梁湾浮游动物丰度和生物量的长期变化特征,对认识富营养化对淡水湖泊生态系统的未来影响具有重要参考价值。

目前,受限于湖泊长期调查和监测资料的匮乏,对于国内湖泊浮游动物群落结构长期变化及其影响因素分析研究极其缺乏。因此,本文选取太湖梅梁湾为研究对象,基于太湖湖泊生态系统研究站 1997 ~ 2017 年浮游动物群落结构的逐月连续监测数据,分析了在人类活动和气候变化复合作用下太湖梅梁湾浮游动物群落结构的长期变化特征及其主要影响因素,以期对太湖浮游动物长期变化提供参考以及太湖生态系统的研究与管理提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查时间及采样点布设

基于太湖湖泊生态系统研究站常规监测,太湖梅梁湾共设置了 6 个采样点(图 1),采样点的坐标见表 1。1997 ~ 2017 年分别于每月月中旬对梅梁湾 6 个采样点进行采样监测。本文数据均来自太湖湖泊生态系统研究站。

1.2 样品采集及测定方法

使用 YSI 6600 V2(美国 Yellow Stone 公司)多参数水质分析仪现场测定每个点位水温(water

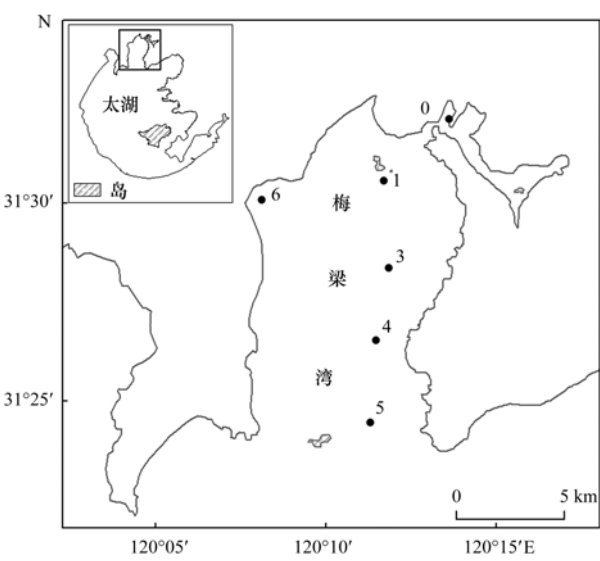


图 1 太湖梅梁湾采样点位分布示意

Fig. 1 Sampling sites in Meiliang Bay, Lake Taihu

temperature, WT)、pH、电导率(electrical conductivity, EC)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、碱度(alkalinity, ALK)和水深。营养盐及叶绿素 a(chlorophyll a, Chl-a)取上、中和下 3 层混合水样进行测定,其中 Chl-a 采用热乙醇提取-分光光度法测定^[10];水体总氮(total nitrogen, TN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定(测定波长:210 nm);总磷(total phosphorus, TP)采用碱性过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法(测定波长:700 nm);亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₃⁺-N)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)采用 Skalar 流动注射光度法(荷兰 Skalar 公司, SAN++ 型)^[11]。高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾滴定法测定^[12];硫酸盐(SO₄²⁻)采用离子色谱直接测定。此外,悬浮颗粒物(suspended substance, SS)采用 Whatman CF/F 滤膜过滤,105℃烘干重量法测定^[13]。

表 1 太湖梅梁湾浮游动物采样点坐标位置
Table 1 Coordinates of the sampling site of zooplankton in Meiliang Bay, Lake Taihu

采样点	经度	纬度
0	120. 222 17°N	31. 539 83°E
1	120. 194 33°N	31. 513 17°E
3	120. 188 83°N	31. 476 33°E
4	120. 187 33°N	31. 445 83°E
5	120. 181 17°N	31. 503 83°E
6	120. 190 67°N	31. 411 17°E

浮游动物枝角类和桡足类定量样品用柱状采水器取上、中和下 3 层水样各 10 L,混合均匀后经 25 号(64 μm)浮游生物网过滤收集,最后用 4% 中性甲醛溶液固定。轮虫定量样品取上、中和下 3 层混合水样 1 L,用 4% 中性甲醛溶液及 1.5% 的鲁哥氏

液固定,静置 24 h 后浓缩至 50 mL. 最后将浮游动物样品放置在 40 × 显微镜 (Olympus Corporation, Tokyo, Japan) 下进行分类鉴定和计数,并根据不同种类浮游动物的数量和个体大小计算出相应的生物量^[14~16]. 当种群密度很高时,用分小样的方法抽样计数.

1.3 数据分析

运用 SPSS 23.0 软件对太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化的数据进行统计分析,及 R 3.6.3 软件对浮游动物年均值进行了拟合,通过 Pearson 相关性分析了浮游动物及不同门类丰度和生物量与环境因子的相关性. 此外,浮游动物丰度和生物量的季节变化趋势及所占百分比的图由 Origin 2019 完成.

2 结果与分析

2.1 梅梁湾浮游动物丰度和生物量的年际变化情况

2.1.1 浮游动物丰度和生物量的变化情况

1997~2017 年梅梁湾浮游动物丰度呈现出显著下降 $[P < 0.05]$,图 2(a)],在 2003 年出现最高值 1 774.33 ind. · L⁻¹,并在 2014 年达到最低值 199.07 ind. · L⁻¹. 与之相似,浮游动物生物量也显著下降 $[P < 0.05]$,图 2(b)],最高值出现在 2000 年 (36.67 mg · L⁻¹),2008 年之后迅速下降,并在 2017 年出现最低值 1.12 mg · L⁻¹. 由于浮游动物种属数据的缺失,本研究将利用各采样点生物量和丰度的比值与时间的关系,探讨浮游动物群体的平均体型变化. 结果表明,1997~2007 年浮游动物平均个体大小相对

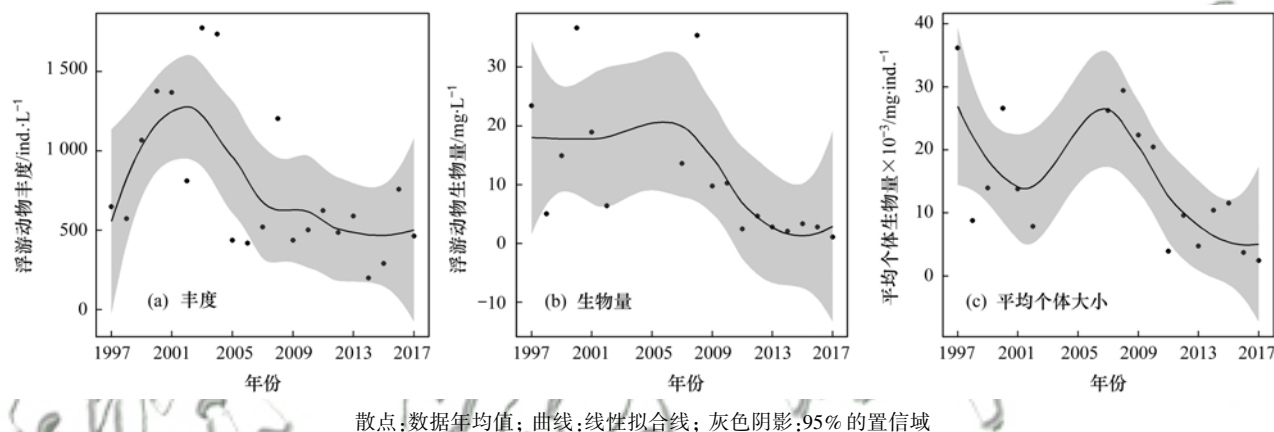


图 2 1997~2017 年太湖梅梁湾浮游动物丰度、生物量及平均个体大小的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of zooplankton abundance, biomass, and average body-size in Meiliang Bay, Lake Taihu from 1997-2017

较大,2007 年以后显著减小 $[P < 0.05]$,图 2(c)],说明太湖梅梁湾浮游动物呈现出小型化演替特征.

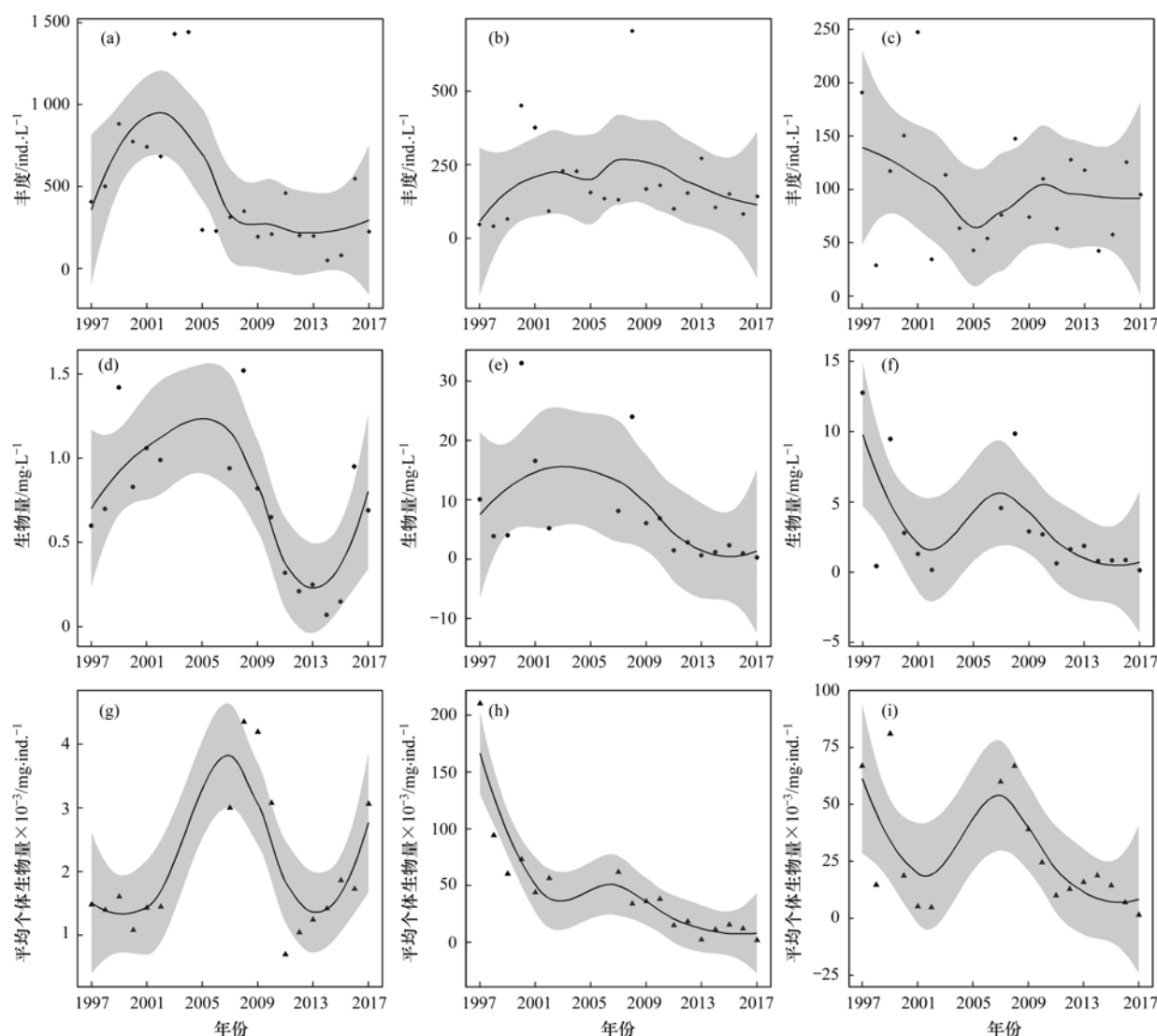
2.1.2 浮游动物不同门类丰度和生物量的年际变化情况

1997~2017 年太湖梅梁湾浮游动物不同门类丰度和生物量的长期变化情况如图 3 所示. 其中,轮虫丰度总体上呈显著下降趋势 $[P < 0.05]$,图 3(a)],自 1997 至 2004 年快速增长并达到最高值 1 442.86 ind. · L⁻¹后,迅速下降并在 2014 年出现最低值 51.15 ind. · L⁻¹. 轮虫生物量与丰度总体变化趋势相似,也呈下降趋势[图 3(d)],但趋势不明显 $(P > 0.05)$. 枝角类丰度呈波动变化并在 2000 年 (451.15 ind. · L⁻¹) 和 2008 年 (704.51 ind. · L⁻¹) 出现两个极大值 $[P > 0.05]$,图 3(b)]. 然而,枝角类生物量却表现为显著下降趋势 $[P < 0.05]$,图 3(e)],并在 2017 年出现最低值 0.29 mg · L⁻¹,较 2000 年下降了 99.12%. 此外,桡足类丰度和生物量总体上均呈缓慢波动下降趋势[图 3(c) 和 3(f)],丰度最高值和最低值分别出现在 2011 年

(247.71 ind. · L⁻¹) 和 1998 年 (28.94 ind. · L⁻¹),而生物量最高值和最低值分别出现在 1997 年 (12.77 mg · L⁻¹) 和 2017 年 (0.14 mg · L⁻¹). 生物量变化的方向与丰度不同[图 3(b)、3(c)、3(e) 和 3(f)],说明太湖浮游动物群落和体型在过去 21 a 发生了显著变化.

在此期间,不同类群的浮游动物平均个体大小呈现出不同的变化趋势. 轮虫的平均个体大小变化幅度较大,但总体呈上升趋势[图 3(g)];枝角类的平均个体大小则呈现出显著下降趋势 $[P < 0.05]$,图 3(h)];与浮游动物变化趋势相似,桡足类的平均个体大小出现波动并在 2007 年以后显著降低 $[P < 0.05]$,图 3(i)]. 这些结果表明,浮游动物的体型变小主要与浮游甲壳动物的体型变小有关.

自 1997 年以来,轮虫丰度的占比缓慢下降,从 1997 年的 63.11% 下降到 2017 年的 48.70%;而枝角类和桡足类的丰度表现出上升趋势[图 4(a)]. 此外,枝角类和桡足类生物量所占百分比表现为逐



(a) 轮虫-丰度; (b) 枝角类-丰度; (c) 桡足类-丰度; (d) 轮虫-生物量; (e) 枝角类-生物量; (f) 桡足类-生物量; (g) 轮虫-平均个体大小; (h) 枝角类-平均个体大小; (i) 桡足类-平均个体大小; 散点: 数据年均值; 曲线: 线性拟合线; 灰色阴影: 95% 的置信域

图3 1997~2017 年太湖梅梁湾不同门类浮游动物丰度、生物量和平均个体大小的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of zooplankton abundance, biomass, and average body-size of different species in Meiliang Bay, Lake Taihu from 1997-2017

渐减少,而轮虫生物量呈增长趋势,并在2017年占比超过了50% [图4(b)]. 轮虫、枝角类和桡足类丰度所占百分比平均值分别为: $(57.23 \pm 20.01)\%$ 、 $(27.91 \pm 16.22)\%$ 和 $(14.88 \pm 7.20)\%$; 其生物量所占百分比平均值分别为: $(12.06 \pm 14.79)\%$ 、 $(58.78 \pm 21.08)\%$ 和 $(29.17 \pm 19.08)\%$. 结果表明,丰度主要为轮虫占优势,而生物量则主要是枝角类占优势.

2.2 梅梁湾浮游动物丰度和生物量的季节变化情况

2.2.1 浮游动物丰度和生物量的季节变化情况

浮游动物丰度有着明显的季节变化特征(图5),在春、夏季呈上升趋势而在秋、冬季呈下降趋势,并在9月达到峰值 $1406.70 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$ 及4月出现最低值 $317.75 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$. 浮游动物生物量与丰度

在1~8月变化趋势相反,而在9~12月的变化趋势相似,其峰值也出现在9月 ($25.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),最小值出现在1月 ($1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2.2.2 浮游动物不同门类丰度和生物量的季节变化情况

1997~2017 年太湖梅梁湾浮游动物不同门类丰度和生物量的季节变化情况如图6所示. 其中,轮虫的丰度和生物量在春、夏、冬季均呈现出相似的变化趋势,并分别在4月出现最低值 $112.02 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图6(a)],而在秋季它们的变化趋势相反;枝角类的丰度和生物量的季节变化特征完全一致[图6(b)],在春季呈现增加趋势而夏季的变化趋势刚好相反,9月达到最大值 $701.54 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $21.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,1月出现最低值

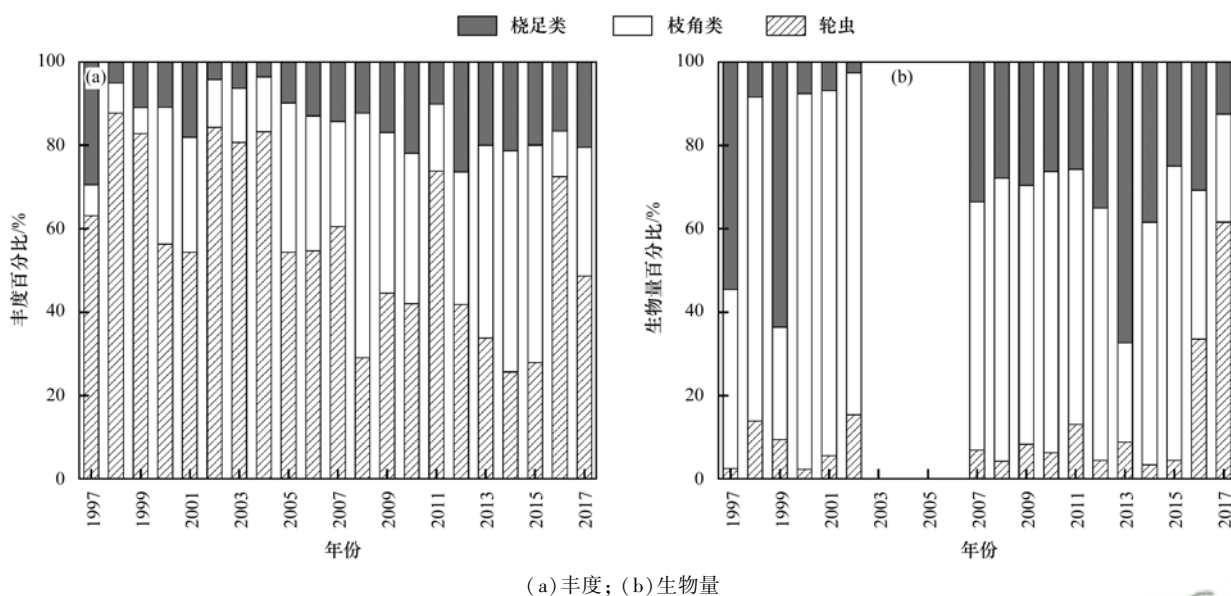


图 4 1997 ~ 2017 年太湖梅梁湾不同门类浮游动物丰度和生物量的年际占比变化情况
Fig. 4 Interannual variation in the abundance and biomass proportion of zooplankton of different species in Meiliang Bay, Lake Taihu from 1997-2017

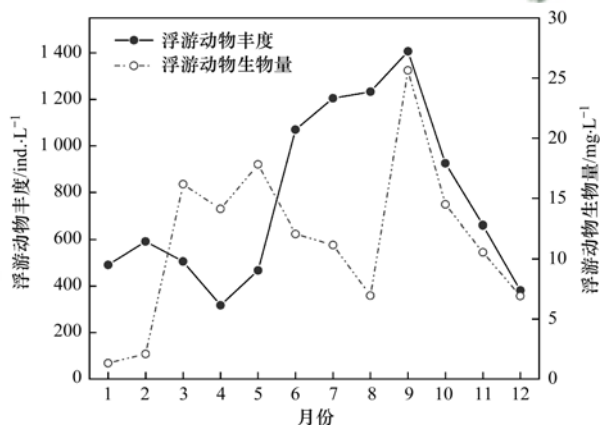


图 5 1997 ~ 2017 年太湖梅梁湾浮游动物丰度和生物量的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of zooplankton abundance and biomass in Meiliang Bay, Lake Taihu from 1997-2017

3.24 ind. · L⁻¹和0.33 mg · L⁻¹;此外,桡足类丰度和生物量除了11月表现出相反的变化趋势外,其余月份变化趋势完全一致[图6(c)].丰度和生物量的最大值分别出现在9月和3月,而丰度和生物量最小值均出现在1月。

轮虫丰度对浮游动物丰度的贡献率在4个季节中不断上升,特别是在1月和2月贡献率达到了97.13%和93.96%(图7)。枝角类丰度贡献率的季节变化情况与轮虫丰度恰好相反,桡足类丰度的贡献率在3~8月处于稳定的较低水平,1月和2月的贡献率均低于平均值13.60%。轮虫生物量对浮游动物生物量贡献率的季节变化特征与丰度相似,而枝角类和桡足类的生物量分别在3~10月和11~12月处于优势地位(图7)。

2.3 浮游动物群落结构变化主要影响因子分析

梅梁湾在1997~2017年的252个月中6个样点浮游动物及不同门类丰度和生物量与环境因子的Pearson相关性分析结果表明(表2),WT、DO、NH₄⁺-N及ALK与浮游动物关系最密切,WT与浮游动物、枝角类和桡足类的丰度和生物量均呈极显著负相关($P < 0.01$),DO与轮虫和枝角类的丰度和生物量、浮游动物生物量及桡足类丰度均呈极显著相关($P < 0.01$)。而NH₄⁺-N、ALK与浮游动物和轮虫的丰度和生物量、枝角类和桡足类的生物量均呈显著相关($P < 0.05$)。此外,浮游动物对水深、SS、pH、EC、高锰酸盐指数、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、TP、PO₄³⁻-P、Chl-a、SO₄²⁻及硅酸盐也有着较密切的关系,表明浮游动物对各种水环境因子非常敏感。

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构的年际变化特征

目前关于太湖浮游动物的研究主要是短期的调查研究,集中于浮游动物的野外调查^[8]、不同湖区对比^[2]、湖泊富营养化响应^[17]和实验研究^[18]等,但浮游动物群落结构的长期变化特征及其对环境变化的响应在太湖却鲜有报道。基于太湖梅梁湾1997~2017年浮游动物群落结构的逐月连续监测数据,系统分析了在人类活动和气候变化复合影响下太湖梅梁湾浮游动物群落结构的变化特征及其主要影响因素。本研究表明,随着水体富营养化和气候变暖,太湖梅梁湾轮虫丰度下降,取而代之的是较小的浮游甲壳动物,浮游动物的长期变化特征为小型化。基

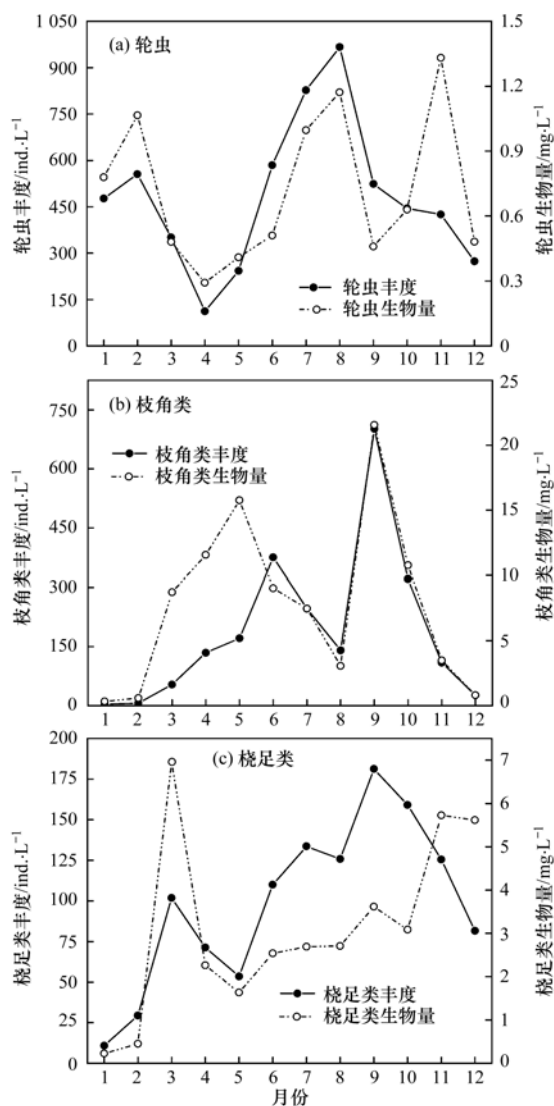


图6 1997~2017年太湖梅梁湾不同门类浮游动物丰度和生物量的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of zooplankton abundance and biomass of different species in Meiliang Bay, Lake Taihu from 1997-2017

于浮游动物群落长期变化的综合认识是预测和保护水生生态系统的基础。

浮游动物长期变化的原因十分复杂,气候变化、富营养化和人类的过度捕捞等因素都扮演十分重要的角色^[19]。如,水温升高是影响大型桡足类隆线拟哲水蚤(*Calanoides carinatus*)丰度的主要因素,全球变暖加上鱼类的捕食控制可能是浮游动物生物量下降的原因^[20];而且 McKee 等^[21]也证明了气候变暖与浮游动物成熟时的体型大小之间存在负相关关系。另外,有报道显示,自1951年以来,随着温度升高南加州海域的大型浮游动物生物量下降了80%^[22]。George 等^[23]的研究也表明英国温德米尔湖浮游甲壳动物生物量长期的波动与水温的变化密切相关,但与主要鱼类的丰度关系不大,这是气候引起淡水浮游生态系统变异的一个确凿证据。相关性分析显示,WT与浮游动物、枝角类及桡足类的丰度和生物量呈显著负相关($P < 0.01$,表2)。近几十年来,太湖年均气温和水温以每10年0.36℃和0.37℃的速率显著增加^[24],气候变暖可能通过加强下行效应的调控^[25]或改变浮游动物之间的竞争关系来改变它们的群落结构^[26]。总体而言,温度较高的环境中小型浮游动物的丰度较高。

除气候变化,太湖梅梁湾浮游动物群落结构的变化规律亦受到人类活动的影响,这一现象可以从以下3个方面进行探讨。近几十年来,富营养化一直是大多数水生系统中最棘手的问题,它改变了浮游生物的群落结构,破坏了营养级之间的能量流动。太湖梅梁湾浮游动物群落结构变化特征最明显的是轮虫丰度的降低,这有利于小型枝角类和桡足类形成优势。这一现象在国内其它湖泊也有发现。例如:对

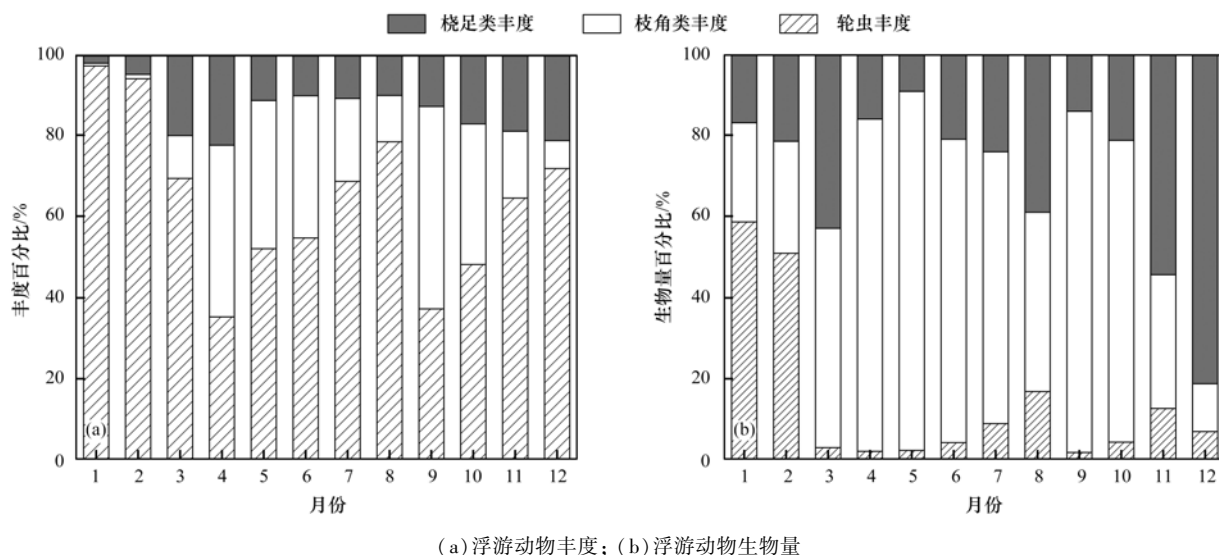


图7 1997~2017年太湖梅梁湾不同门类浮游动物丰度和生物量不同月份的占比变化情况

Fig. 7 Seasonal variation in the abundance and biomass proportion of zooplankton of different types in Meiliang Bay, Lake Taihu from 1997-2017

表 2 浮游动物及不同门类丰度、生物量与环境因子的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of abundance, biomass, and environmental factors of zooplankton and different species

项目	浮游动物丰度	浮游动物生物量	轮虫丰度	轮虫生物量	枝角类丰度	枝角类生物量	桡足类丰度	桡足类生物量
水深	-0.12 **	-0.05 *	-0.14 **	-0.09 **	-0.01	-0.05	-0.02	-0.04
WT	-0.11 **	-0.16 **	-0.02	0.05	-0.17 **	-0.15 **	-0.17 **	-0.09 **
SS	-0.08 **	-0.04	-0.07 *	-0.01	-0.04	-0.05	-0.07 **	-0.01
pH	-0.01	0.00	-0.03	0.01	0.03	-0.01	0.05 *	-0.01
EC	0.06 *	0.00	0.10 **	0.14 **	-0.03	0.01	-0.13 **	-0.02
高锰酸盐指数	0.04	-0.01	0.06 *	0.05	-0.04	-0.02	-0.01	0.02
DO	0.02	0.10 **	-0.08 **	-0.08 **	0.17 **	0.10 **	0.18 **	0.04
NH ₄ ⁺ -N	0.18 **	0.08 **	0.23 **	0.15 **	-0.05	0.09 **	-0.03	0.08 **
NO ₂ ⁻ -N	0.11 **	0.00	0.16 **	0.20 **	-0.07 **	0.01	-0.03	0.03
NO ₃ ⁻ -N	0.10 **	0.03	0.12 **	0.11 **	0.00	0.04	-0.01	0.00
TN	0.17 **	0.04	0.23 **	0.17 **	-0.05 *	0.05	-0.06 *	0.04
PO ₄ ³⁻ -P	-0.05 *	-0.04	-0.01	-0.01	-0.08 **	-0.04	-0.08 **	0.01
TP	0.00	0.00	0.05 *	0.07 *	-0.08 **	-0.01	-0.05	0.03
ALK	0.16 **	0.06 *	0.19 **	0.15 **	0.00	0.12 **	-0.05	0.12 **
Chl-a	-0.04	-0.07 **	-0.01	0.02	-0.06 *	-0.07 *	-0.04	-0.02
SO ₄ ²⁻	0.14 **	0.08 **	0.15 **	0.13 **	0.03	0.10 **	-0.04	0.02
硅酸盐	0.03	-0.06 *	0.09 **	-0.02	-0.08 *	-0.05	-0.12 **	-0.09 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

武汉东湖不同营养水平湖区进行研究发现,营养水平高的湖区体型较小的微型裸腹蚤 (*Moina micrura* Kurz) 的生物量较高,而营养水平较低的湖区体型较大的盃型透明蚤 (*Daphnia hyaline*) 的生物量较高^[27];黄祥飞等^[28]的研究发现随着富营养化程度的加重浮游动物的丰度和生物量增大了,但浮游动物却呈小型化的趋势.相关性分析还发现,浮游动物群落的丰度和生物量与营养盐密切相关($P < 0.05$,表2),这一结果表明,营养物可能是决定湖泊浮游动物群落的关键机制.另一方面,从上行效应角度分析,相关性分析显示太湖梅梁湾 Chl-a 与浮游动物生物量、枝角类丰度及生物量呈显著负相关($P < 0.05$,表2).多年监测数据显示太湖叶绿素 a 浓度表现出显著的增加趋势,而其中主要是蓝藻含量的增加^[29],而蓝藻的大量繁殖往往严重限制了大型浮游甲壳动物的生长,而有利于小型浮游甲壳动物的生长^[30, 31],这是因为体型小的浮游动物可以有效地捕获有优势但不能被食用的微囊藻^[32].同时蓝藻对大型浮游甲壳动物有较强的毒害作用,亦会导致水体中浮游动物趋于小型化^[33].此外,从下行效应角度分析,捕食被认为是决定浮游动物群落的丰度与结构及浮游动物群落演替的最主要因子^[34],在鱼类生物量水平较高的水体中,小型浮游动物占据优势,而在鱼类生物量水平较低或缺乏鱼类的水体中大型浮游甲壳动物占据优势^[35].由于缺乏数据,鱼类不能作为环境因素纳入这项研究.然而,根据以往的研究,自 20 世纪 90 年代以来,太湖的鱼类生物量和浮游鱼类的百分比都有了显著的增长^[36].太湖的优势

种鱼类以湖鲢、银鱼等体型较小的种类为主.其中,湖鲢以捕食枝角类为主,银鱼以捕食桡足类为主^[37].通过鱼类的选择性捕食,大型浮游动物的丰度可能随着小型浮游甲壳动物优势度的增加而降低^[38],而小型浮游甲壳动物优势度的增加反过来又降低了枝角类和桡足类动物的平均体型,导致其对浮游植物下行效应的控制力减弱^[39].因此,鱼类可能通过选择性捕食使太湖梅梁湾大型浮游动物优势度下降.

3.2 浮游动物群落结构的季节变化特征

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^[40].与以往的短期调查研究不同^[41],本次对太湖梅梁湾浮游动物的研究发现,丰度和生物量均在 9 月达到最大值,并分别于 4 月和 1 月出现最低值,这与枝角类和桡足类的季节消长有直接关系.温度的升高可以使浮游甲壳动物的繁殖加快,发育期缩短,进而可使浮游甲壳动物的数量在温暖期(9 月)达到峰值^[42].但水温过高也不宜于浮游甲壳动物的生长,例如, Hanazato^[43]指出了除了鱼类较高的捕食压力外,夏天较高的水温可能抑制了大型蚤 (*Daphnia*) 的出现,因为 25℃ 以上的高温减少了许多 *Daphnia* 种类的摄食效率,从而控制了它们的种群存在.此外,在自然水体中,水温增加能够加剧有毒蓝藻对 *Daphnia* 种群的抑制作用^[44].研究还发现,浮游动物丰度主要为轮虫占优势,生物量主要是枝角类占优势(图 7).这是因为轮虫个体较小、发育快和生命周期短等特点,在淡水生态系统中常处

于优势地位,浮游动物的丰度受到轮虫的影响最大^[45].四季中枝角类与桡足类丰度所占比例则均较少[图 7(a)],有研究表明枝角类与轮虫存在较强的竞争关系,当轮虫数量大量升高时,会给枝角类的生长带来抑制作用^[46].

其次,Chl-a 的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数量与浮游动物的生长繁殖密切相关^[4].李娟等^[2]对太湖梅梁湾研究时表明,Chl-a 浓度与浮游动物生物量呈正相关.在本研究中,秋季浮游动物生物量显著高于冬季,主要原因是秋季 Chl-a 浓度要高于冬季,有利于浮游动物生长^[47];虽然秋季蓝藻浓度高,但由于一些小型浮游动物长期与蓝藻共存时,产生了一定适应性^[48].另外,秋季温度较高,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^[49].

3.3 浮游动物间的竞争作用

竞争也是影响浮游动物群落结构的一个重要因素^[50].本研究发现 1997~2017 年轮虫的丰度呈下降趋势[图 3(a)],且轮虫丰度低的月份枝角类和桡足类丰度较高,反之亦然[图 7(a)],这可能与浮游动物间的竞争有关.这一现象可以从 2 个方面探讨,在食物资源利用方面,轮虫和浮游甲壳动物之间存在重要的竞争关系,浮游甲壳动物与轮虫相比一般个体较大,因而具有更高的滤食效率;另一方面,浮游甲壳动物通过机械损伤对轮虫有抑制作用^[51],当轮虫进入 *Daphnia* 的胸腔之间后会受到损伤,有些桡足类甚至会直接摄食轮虫^[52].有研究表明,在大型(≥ 1.2 mm) *Daphnia* 和桡足类存在的情况下,即使食物资源很丰富,通常轮虫也不会淡水浮游动物群落中占优势^[53].因此,太湖梅梁湾轮虫丰度的降低有利于小型枝角类和桡足类形成优势,而小型枝角类和桡足类形成优势后又反过来又抑制了轮虫数量的增长.

4 结论

(1)1997~2017 年梅梁湾浮游动物丰度和生物量均呈现出显著下降趋势($P < 0.05$),轮虫丰度下降最为明显;浮游动物、枝角类和桡足类的平均个体大小均呈现出下降趋势.因此,在人类活动和气候变化复合作用下太湖梅梁湾浮游动物个体大小呈现出小型化演替趋势,主要是枝角类和桡足类的小型化造成的,潜在减弱了浮游动物对浮游植物的下行效应;

(2)梅梁湾浮游动物表现出长期的季节变化特征.浮游动物丰度在夏秋季较高,在春冬季较低,而

生物量在春秋季较高,在夏冬季较低,这与温度及食物有着密切关系.

(3)浮游动物群落结构变化与水环境密切相关,特别是与水体物理因子、Chl-a 及氮元素最为显著($P < 0.05$).全球气候变化和水体富营养化对湖泊浮游动物群落结构具有重要影响.

致谢:感谢中国科学院太湖湖泊生态系统研究站提供了浮游动物和环境因子相关数据.

参考文献:

- [1] 王海邻,刘玉飞,任玉芬,等.北京市河流秋季浮游动物群落特征分析[J].环境科学,2019,40(8):3568-3576.
Wang H L, Liu Y F, Ren Y F, et al. Analysis of river zooplankton community characteristics in autumn in Beijing[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3568-3576.
- [2] 李娟,温周瑞,李庚辰,等.太湖梅梁湾和贡湖湾浮游甲壳动物群落结构及其与环境因子的相互关系[J].长江流域资源与环境,2014,23(S1):81-90.
Li J, Wen Z R, Li G C, et al. Relationship between crustacean zooplankton community structure and aquatic environmental factors of Meiliang and Gonghu bay in Lake Taihu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(S1): 81-90.
- [3] 刘歆璞,王丽卿,张宁,等.青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J].生态学杂志,2013,32(5):1238-1248.
Liu X P, Wang L Q, Zhang N, et al. Community structure of metazoan zooplankton and its relationships with environmental factors in Qingcaosha Reservoir of Shanghai, East China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1238-1248.
- [4] 杜彩丽,杨丽,赵诣,等.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[J].环境科学,2019,40(10):4513-4522.
Du C L, Yang L, Zhao Y, et al. Temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4513-4522.
- [5] Chen Y W, Qin B Q, Teubner K, et al. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25(4): 445-453.
- [6] 戴秀丽,钱佩琪,叶凉,等.太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985-2015 年)[J].湖泊科学,2016,28(5):935-943.
Dai X L, Qian P Q, Ye L, et al. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015 [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(5): 935-943.
- [7] 张运林,秦伯强,杨龙元.太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性[J].生态学报,2006,26(12):3969-3979.
Zhang Y L, Qin B Q, Yang L Y. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 3969-3979.
- [8] 陈伟民,秦伯强.太湖梅梁湾冬末春初浮游动物时空变化及其环境意义[J].湖泊科学,1998,10(4):10-16.
Chen W M, Qin B Q. The zooplankton distribution during winter and early spring and its environmental effects in Meiliang Bay, Taihu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 10-16.
- [9] 柯志新,谢平,过龙根,等.太湖梅梁湾大型控藻围栏对浮

- 游甲壳动物群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2270-2276.
- Ke Z X, Xie P, Guo L G, *et al.* Effects of large bio-manipulation fish pen on community structure of crustacean zooplankton in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(8): 2270-2276.
- [10] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- Chen Y W, Chen K N, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 550-552.
- [11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 164-188.
- [12] 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. 223-227.
- [13] 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- Sun X, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- [14] 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.
- [15] 沈嘉瑞, 戴爱云, 张崇洲. 中国动物志: 淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [16] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [17] Chen F Z, Ye J L, Shu T T, *et al.* Zooplankton response to the lake restoration in the drinking-water source in Meiliang Bay of subtropical eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnologia, 2012, **42**(3): 189-196.
- [18] 周健, 杨桂军, 秦伯强, 等. 后生浮游动物摄食对太湖夏季微囊藻水华形成的作用[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 398-405.
- Zhou J, Yang G J, Qin B Q, *et al.* Effect of the ingestion of metazooplankton on the formation of *Microcystis* blooms in summer in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(3): 398-405.
- [19] Lin Q Q, Xu L, Hou J Z, *et al.* Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan lakes; implication for the effect of climate warming[J]. Water Research, 2017, **124**: 618-629.
- [20] Wiafe G, Yaqub H B, Mensah M A, *et al.* Impact of climate change on long-term zooplankton biomass in the upwelling region of the Gulf of Guinea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2008, **65**(3): 318-324.
- [21] McKee D, Atkinson D, Collings S, *et al.* Macro-zooplankter responses to simulated climate warming in experimental freshwater microcosms[J]. Freshwater Biology, 2002, **47**(8): 1557-1570.
- [22] Roemmich D, McGowan J. Climatic warming and the decline of zooplankton in the California current[J]. Science, 1995, **267**(5202): 1324-1326.
- [23] George D G, Harris G P. The effect of climate on long-term changes in the crustacean zooplankton biomass of Lake Windermere, UK[J]. Nature, 1985, **316**(6028): 536-539.
- [24] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss[J]. Water Resources Research, 2018, **54**(7): 4319-4331.
- [25] Jeppesen E, Meerhoff M, Holmgren K, *et al.* Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function[J]. Hydrobiologia, 2010, **646**(1): 73-90.
- [26] Fey S B, Cottingham K L. Thermal sensitivity predicts the establishment success of nonnative species in a mesocosm warming experiment[J]. Ecology, 2012, **93**(11): 2313-2320.
- [27] 鲁敏, 谢平. 武汉东湖不同湖区浮游甲壳动物群落结构的比较[J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(2): 174-181.
- Lu M, Xie P. Comparative study on crustacean zooplankton communities in different areas in Lake Donghu, Wuhan[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, **33**(2): 174-181.
- [28] 黄祥飞, 陈雪梅, 伍焯田, 等. 武汉东湖浮游动物数量和生物量变动的研究[J]. 水生生物学集刊, 1984, **8**(3): 345-358.
- Huang X F, Chen X M, Wu Z T, *et al.* Studies on the changes in abundance and biomass of zooplankton in Lake Donghu Wuhan[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1984, **8**(3): 345-358.
- [29] 李洪利, 王坚红, 程军, 等. 太湖叶绿素 a 年际变化的主要驱动因子及未来气候的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(5): 1332-1341.
- Li H L, Wang J H, Cheng J, *et al.* Main factors driving inter-annual variability of chlorophyll-a and the influence of future climate on chlorophyll-a in Lake Taihu[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(5): 1332-1341.
- [30] Van Egeren S J, Dodson S I, Torke B, *et al.* The relative significance of environmental and anthropogenic factors affecting zooplankton community structure in Southeast Wisconsin Till Plain lakes[J]. Hydrobiologia, 2011, **668**(1): 137-146.
- [31] Zhang J, Xie P, Tao M, *et al.* The impact of fish predation and cyanobacteria on zooplankton size structure in 96 subtropical lakes[J]. PLoS One, 2013, **8**(10): e76378.
- [32] DeMott W R. The role of competition in zooplankton succession[A]. In: Sommer U (Ed.). Plankton Ecology: Succession in Plankton Communities[M]. Heidelberg: Springer, 1989. 195-252.
- [33] 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.
- [34] Gliwicz Z M, Pijanowska J. The role of predation in zooplankton succession[A]. In: Sommer U (Ed.). Plankton Ecology: Succession in Plankton Communities[M]. Heidelberg: Springer, 1989. 253-296.
- [35] Post J R, McQueen D J. The impact of planktivorous fish on the structure of a plankton community[J]. Freshwater Biology, 1987, **17**(1): 79-89.
- [36] Chen Y F, Zhu S Q. Change of fish fauna and long-term dynamics of the harvest of aquatic product in a large shallow lake (Lake Taihu, China)[J]. Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2008, **3**(1): 72-76.
- [37] 毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 太湖鱼类群落结构及多样性[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2836-2842.
- Mao Z G, Gu X H, Zeng Q F, *et al.* Community structure and diversity of fish in Lake Taihu[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(12): 2836-2842.
- [38] Iglesias C, Mazzeo N, Meerhoff M, *et al.* High predation is of key importance for dominance of small-bodied zooplankton in warm shallow lakes: evidence from lakes, fish enclosures and surface sediments[J]. Hydrobiologia, 2011, **667**(1): 133-147.
- [39] Meerhoff M, Clemente J M, de Mello F T, *et al.* Can warm

- climate - related structure of littoral predator assemblages weaken the clear water state in shallow lakes? [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(9): 1888-1897.
- [40] 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.
- [41] Yang G J, Zhong C N, Pan H K, *et al.* Comparative studies on seasonal variations of metazooplankton in waters with different eutrophic states in Lake Taihu [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **150**(1-4): 445-453.
- [42] 刘宝贵, 刘霞, 吴瑶, 等. 鄱阳湖浮游甲壳动物群落结构特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(24): 8205-8213.
Liu B G, Liu X, Wu Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of planktonic crustaceans in Lake Poyang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(24): 8205-8213.
- [43] Hanazato T, *Oceanography*. Effects of a *Chaoborus* - released chemical on *Daphnia ambigua*: reduction in the tolerance of the *Daphnia* to summer water temperature[J]. *Limnology*, 1991, **36**(1): 165-171.
- [44] Claska M E, Gilbert J J. The effect of temperature on the response of *Daphnia* to toxic cyanobacteria [J]. *Freshwater Biology*, 1998, **39**(2): 221-232.
- [45] 朱冲冲, 李秋华, 陈文生, 等. 贵州草海后生浮游动物群落季节动态特征及与环境因子的关系[J]. *生态科学*, 2018, **37**(6): 131-138.
Zhu C C, Li Q H, Chen W S, *et al.* Metazooplankton community structure and its relationship with environmental factors of Caohai, Guizhou Province, China [J]. *Ecological Science*, 2018, **37**(6): 131-138.
- [46] 冯世敏, 吴明姝, 熊莲, 等. 太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究[J]. *水生生物学报*, 2017, **41**(3): 700-711.
Feng S M, Wu M S, Xiong L, *et al.* The research of dynamic succession of zooplankton and its correlation with environmental factors in Taiping Lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(3): 700-711.
- [47] 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.
- [48] Sarnelle O, Wilson A E. Local adaptation of *Daphnia pulicaria* to toxic cyanobacteria[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(5): 1565-1570.
- [49] 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.
- [50] 赵帅营, 林秋奇, 刘正文, 等. 南亚热带湖泊—星湖后生浮游动物群落特征研究[J]. *水生生物学报*, 2007, **31**(3): 405-413.
Zhao S Y, Lin Q Q, Liu Z W, *et al.* Characteristics of the metazoan zooplankton community in Xinghu Lake—a Southern Sub-Tropical Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(3): 405-413.
- [51] 杨桂军, 秦伯强, 高光, 等. 太湖不同湖区轮虫群落结构季节变化的比较研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2963-2969.
Yang G J, Qin B Q, Gao G, *et al.* Comparative study on seasonal variations of community structure of rotifer in different lake areas in Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2963-2969.
- [52] Couch K M, Burns C W, Gilbert J J. Contribution of rotifers to the diet and fitness of *Boeckella* (Copepoda: Calanoida) [J]. *Freshwater Biology*, 1999, **41**(1): 107-118.
- [53] Yoshida T, Ban S, Takenouchi T, *et al.* Top-down control of population dynamics of the dominant rotifers in two mesotrophic lakes in Hokkaido, Japan [J]. *Archiv Für Hydrobiologie*, 2000, **148**(4): 481-498.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)