

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素：以骆马湖为例

黄雪滢^{1,2}, 高鸣远³, 王金东⁴, 王明明⁵, 陈思恩⁶, 龚志军², 王腊春¹, 蔡永久^{2*}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 南京 210008; 3. 江苏省水文水资源勘测局, 南京 210029; 4. 江苏省骆运水利工程管理处, 宿迁 223800; 5. 宿迁市水利局, 宿迁 223800; 6. 南京大学环境学院, 南京 210023)

摘要: 过水性湖泊——骆马湖是南水北调东线工程的重要调蓄湖泊, 具有防洪抗旱、饮用水供给和生态维护等多种功能。为了解骆马湖水水质演变及驱动因素, 基于 2009~2020 年长序列逐月实测数据, 结合 1996~2008 年历史资料, 分析了骆马湖总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数和氨氮(NH₄⁺-N)等指标的长期演变、季节动态和空间格局, 探究了气象和水文因子对湖泊水质的影响机制。结果表明, 近 25 年来, 骆马湖水水质总体处于 IV~劣 V 类。 ρ (TN) 变化明显(1.06~3.49 mg·L⁻¹), 历经波动下降(1996~2002 年)、显著的年际波动(2002~2015 年)和显著上升(2015~2020 年)这 3 个阶段, 是骆马湖的主要污染因子。高锰酸盐指数显著下降(2.97~6.38 mg·L⁻¹), ρ (TP) 和 ρ (NH₄⁺-N) 波动相对较小, 分别介于 0.024~0.076 mg·L⁻¹ 和 0.11~0.69 mg·L⁻¹。2017~2020 年夏季 ρ (TN) 和 ρ (TP) 异常增高, 8 月分别达到 3.30 mg·L⁻¹ 和 0.14 mg·L⁻¹, 约为年平均值的 1.5 倍和 2.4 倍。季节动态方面, 夏秋季水质较 2015 年前发生较大转变, 表现为夏秋季劣于冬春季, 存在富营养化加剧风险。空间上南部湖区水质明显优于北部湖区。沂河和中运河污染负荷的输入随入湖水量的增加而增强, 进而驱动骆马湖的水质变化。建议从加强流域污染治理、内源防控、退圩还湖和生态修复等方面保障骆马湖水环境安全。

关键词: 浅水湖泊; 水质; 时空演变; 季节动态; 驱动因素

中图分类号: X524; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0219-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203097

Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province

HUANG Xue-ying^{1,2}, GAO Ming-yuan³, WANG Jin-dong⁴, WANG Ming-ming⁵, CHEN Si-en⁶, GONG Zhi-jun², WANG La-chun¹, CAI Yong-jiu^{2*}

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China; 4. Jiangsu Luoyun Hydraulic Engineering Management Division, Suqian 223800, China; 5. Suqian Water Conservancy Bureau, Suqian 223800, China; 6. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Lake Luoma is an important storage lake for the Eastern route of the South-to-North Water Diversion Project (NSBD), which has many functions including flood control and irrigation, drinking water supply, and ecological maintenance. In order to understand the succession patterns and driving factors of water quality in Lake Luoma, we used monthly monitoring data from 2009 to 2020 in combination with historical data from 1996 to 2008. The long-term succession patterns, seasonal dynamics, and spatial patterns of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), permanganate index, and ammonia nitrogen (NH₄⁺-N) were examined, and the influence of meteorological and hydrological factors on water quality was explored through correlation analyses and generalized additive models. The results showed that it remained in the status of grade IV-inferior V over the past 25 years. The concentration of TN, which was the main pollutant, changed significantly (1.06-3.49 mg·L⁻¹), experiencing three stages of gradual decline (1996-2002), significant interannual fluctuation (2002-2015), and significant increase (2015-2020). Permanganate index decreased significantly (2.97-6.38 mg·L⁻¹), whereas TP and NH₄⁺-N concentration fluctuated slightly, ranging from 0.024-0.076 mg·L⁻¹ and 0.11-0.69 mg·L⁻¹, respectively. The concentration of TN and TP increased abnormally in the summer of 2017-2020, reaching 3.30 mg·L⁻¹ and 0.14 mg·L⁻¹ in August, respectively, which was approximately 1.5 and 2.4 times the annual average. In terms of seasonal dynamics, the seasonal variation in water quality between summer/autumn and winter/spring reversed after 2015, with water quality in summer/autumn being worse than that in winter and spring, indicating the exacerbation of eutrophication. The water quality in the southern area was obviously better than that in the northern area. The input of pollutants from the Yihe River and Middle Canal increased with water quantity since 2015, which drove the water quality deterioration through nutrients. Our results suggested that the water quality of Lake Luoma should be improved by strengthening exogenous pollution reduction, endogenous control, polder dismantling, and ecological restoration.

Key words: shallow lake; water quality; spatiotemporal succession patterns; seasonal dynamics; driving factors

湖泊水文情势变化与入、出湖河流息息相关, 过水性湖泊由多条河流连续体 (river continuum concept, RCC) 连接而成, 在湖区的降水汇流时间较短, 产流效果明显, 对湖泊水环境的影响极其显著^[1]。我国长江中游的洞庭湖和鄱阳湖是典型的过

收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-04-22

基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(2020316); 国家自然科学基金项目(42171119); 江苏省水利科技项目(2022068)

作者简介: 黄雪滢(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊水动力与水环境模拟, E-mail: Sylvia_Huangxy@163.com

* 通信作者, E-mail: caiyj@niglas.ac.cn

水性吞吐型湖泊,均呈“汛期湖相,枯期河相”的形态特征;洪泽湖是淮河流域最大的拦洪蓄水的平原水库型湖泊^[2],淮河干流横贯其中,入湖水量占总入湖水量的 80% 以上^[3];太湖和巢湖虽属于长江水系,但江湖水情联系不甚紧密,水量吞吐相对较小^[4]. 过水性湖泊中的营养物质循环和能量传递频繁^[5],对水生生态系统表现为相互矛盾的两方面:一方面,入湖河流水量增加,缩短湖泊水体换水周期,加快污染物的稀释和自净,提高出湖氮磷通量,同时,进入的大量固体颗粒物吸附营养盐并沉积在底泥中,降低磷等可利用性营养盐的浓度^[6,7];另一方面,径流携带大量的营养盐进入水体,可能增加水体营养盐的负荷^[8]. 一般来说,过水性湖泊换水周期短,不易导致氮磷等营养盐在湖体累积,富营养化和暴发蓝藻水华的风险较低^[9],然而,嵇晓燕等^[10]发现近年来骆马湖、东平湖和洪湖等存在富营养化加重趋势,过水性湖泊水环境的演变因湖而异,因此,有必要结合湖泊-流域的具体特征分析其影响程度.

骆马湖作为南水北调东线工程的重要调蓄湖泊和重要饮用水水源地,其水质直接关系到调水成效与用水安全. 骆马湖承泄上游沂沭泗河流域 5.8 万 km² 的来水,多年入湖水量介于 0.8 ~ 78.3 亿 m³ (2009 ~ 2020 年),均值为 30.0 亿 m³,年内年际变异巨大,其库容仅为 9.2 亿 m³,受入湖河流影响显著,生态系统脆弱^[11]. 20 世纪 90 年代以来,骆马湖水水质波动明显,沂河入湖口戴场附近发生过多起污染事故,其水质不容乐观^[12]. 目前已有研究主要关注过水性湖泊水质的阶段性评价,缺少水质长期演变趋势及其驱动因子的研究. 因此,本文以骆马湖为例,基于 1996 ~ 2020 年的水质数据,探讨骆马湖水水质时空变化规律,并定量解析不同驱动因素对其变化的贡献,识别骆马湖水水质演变的主控因子,以期为提升骆马湖水水质和保障地区用水安全等决策制定提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

骆马湖地处江苏省北部 (34°00' ~ 34°14' N, 118°05' ~ 118°19' E),是淮河流域第三大湖泊、江苏省第四大湖泊,为宿迁、徐州两市共辖^[13]. 骆马湖北面通过运河与山东南四湖相连,南与洪泽湖相连,主要入湖河道为沂河和中运河;出湖河道为新沂河、六塘河和中运河,控制建筑物分别为嶂山闸、洋河滩闸和皂河闸等 (图 1). 1949 ~ 1958 年,骆马湖先后完成了水利枢纽设施等工程建设,成为了受

人工控制的平原水库型湖泊. 多年平均水位 22.5 m,正常蓄水位 22.8 m,相应水面积 287 km²,平均水深 2.7 m,年换水次数约 10 次,是典型的过水性湖泊.

1.2 数据搜集

1.2.1 水文气象数据

气温、风速和降水等气象数据通过搜集骆马湖周边邳州站和睢宁站的气象资料获得,水位和出入湖水系流量等水文数据通过水利部^[14]获取. 以苗圩、窑湾、嶂山闸、洋河滩和皂河闸求得骆马湖平均水位. 以沂河和运河入湖水量总和作为骆马湖总入湖水量,以嶂山闸、洋河滩闸、皂河闸和运河计算总出湖水量.

1.2.2 水质数据

综合考虑入湖河流、湖泊形态、水产养殖和水动力条件等因素,共布设 11 个常规监测点 (图 1),基本覆盖骆马湖主要水域. 水质监测时段为 2009 ~ 2020 年,监测频率为每月 1 次. 现场用便携式测深仪测定样点水深,用塞氏盘测定水体透明度 (SD),用 YSI 6600 多参数水质监测仪测定 pH、溶解氧 (DO). 同时用有机玻璃采水器取表层、中层和底层水样,混合后取 1 L 冷藏保存并带回实验室测定理化指标. 总氮 (TN) 测定采用过硫酸钾氧化、紫外分光光度法 (GB 11894-1989),总磷 (TP) 测定采用过硫酸钾氧化、钼锑抗显色分光光度法 (GB 11893-1989),氨氮 (NH₄⁺-N) 测定采用纳氏试剂光度法 (GB 7479-1987),高锰酸盐指数采用滴定法测定,叶绿素 a (Chl-a) 采用热乙醇萃取分光光度法测定,过滤水样滤膜用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜 (孔

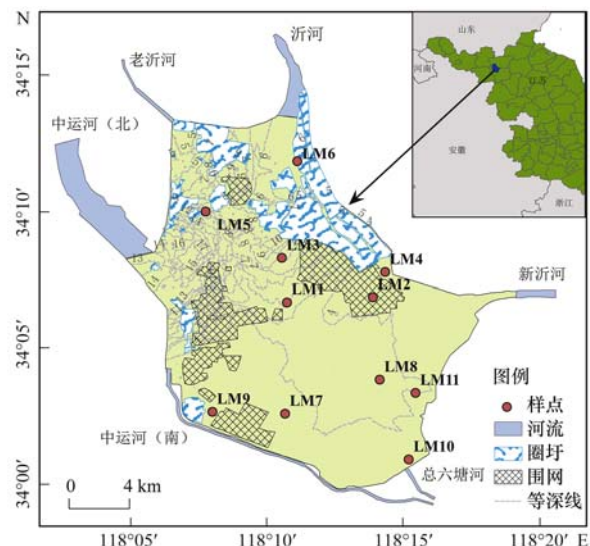


图 1 骆马湖水水质采样点分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of water quality sampling sites in Lake Luoma

径约 $0.7 \mu\text{m}$). 同时为分析水质长期演变, 查阅已有研究搜集 1996 ~ 2008 年主要水质指标年均值^[12,15~17].

1.3 数据分析

采用 Mann-Kendall 非参数突变检验法分析水质变化趋势和突变点. 用 R 平台中 trend 包 mk.test 函数进行 MK 统计检验, 在双侧的趋势检验中, 统计检验量 $|Z| \geq Z_{(1-\alpha/2)}$, 则在 α 置信水平上, $|Z| \geq 1.645$ 时通过 90% 的显著性检验, $Z > 0$ 时呈上升趋势, $Z < 0$ 时呈下降趋势. 运用秩序列 UF_k 和反序列 UB_k 统计量检验序列突变, 计算公式参照文献[18].

用 R 平台 factoextra 包和 cluster 包中 k-means 函数进行均值聚类分析, 研究水质季节和空间变化特征. 水质指标进行 Z-score 标准化后, 计算欧氏距离度, 以 eclust 函数计算最佳聚类簇数. 本研究联系将月份和空间分别聚类为 2 组和 3 组, 因此分别采用 t 检验和 F 检验进行差异显著性检验. 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) LSD 方法检验各水质指标在分组间的差异.

各监测点主要水质指标的变异性用变异系数 (CV) 来表达, 文献[19]表明 CV 可以用来表征过水性湖泊自净能力.

根据文献[20]采用综合营养状态指数 (TLI) 对各月份湖泊营养状态进行评价, 计算公式为:

$$TLI = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中, TLI 为综合营养状态指数; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数相关权重. 各参数营养状态指数计算公式和分级标准参照文献[21].

用 R 平台 pheatmap 包 cor 和 pheatmap 函数进行相关性分析与绘图, 并使用 mgcv 包 gam 函数进行非参数回归拟合, 通过解释变量的平滑函数建立广义相加模型 (generalized additive models, GAM), 自动选择并拟合出合适的多项式^[22].

$$g[E(WQ)] = \sum_{j=1}^m s(x) + \beta \quad (2)$$

式中, g 为连接函数, $E(WQ)$ 为因变量的期望值, s 为光滑函数, x 为气温、风速、降水、水位和出入湖水流量因子等自变量.

2 结果与分析

2.1 水文气象特征

2009 ~ 2020 年骆马湖多年平均降水 759.8 mm, 属于暖温带季风气候区 (图 2). 年最大降水量

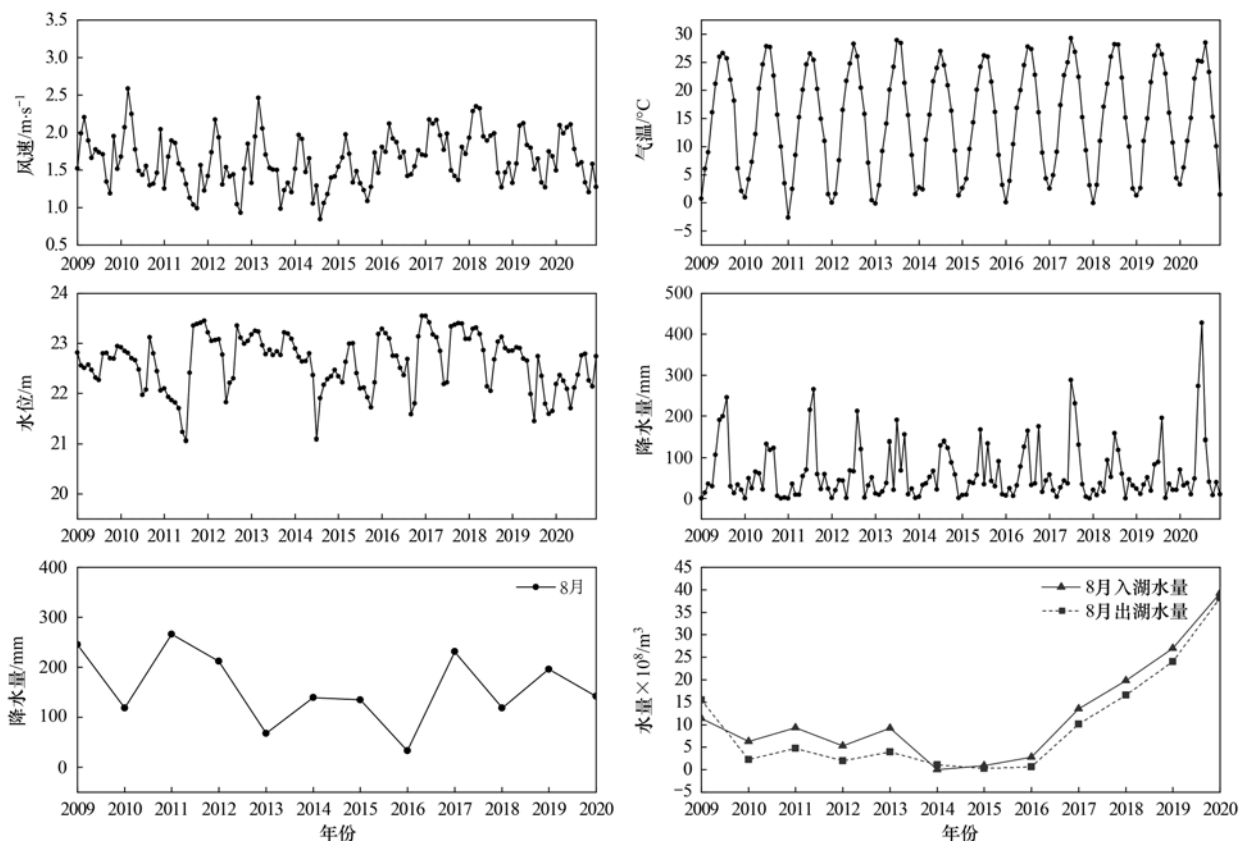


图 2 骆马湖水文气象因子长期变化趋势

Fig. 2 Long term changes in hydrometeorological parameters in Lake Luoma

为142.2 mm,发生在2020年;2019年降水量最小,为587.3 mm.降水量年内分布不均,雨季集中在6~9月,汛期降水量占全年值的65.4%.年平均气温为14.9℃,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年温差较大.年平均风速为 $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,3月最大(平均值为 $2.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),10月最小(平均值为 $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),年最大风速平均值为 $7.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.风向主要为NNE和WNW,冬季多偏北风,夏季多偏东风.骆马湖出入湖水量变化较大,2014年入湖水量最小(0.8 亿 m^3),2020年最大(78.3 亿 m^3),多年平均入湖 30.0 亿 m^3 .入湖水量主要集中在7~9月,占年均总量的70.0%,与降水量呈正比($r=0.42$, $P<0.01$).运河、沂河入湖水量各占55%和45%.2014年出湖水量最小(6.9 亿 m^3),2020年出湖水量最大,为 57.2 亿 m^3 ,多年平均出湖 24.7 亿 m^3 .嶂山闸、皂河闸和洋河滩闸站出湖水量各占44%、13%和7%.水位受人为调控大,6~7月处于低水位(多年均值22.1 m),12月至次年3月处于高水位(多年均值22.8 m).

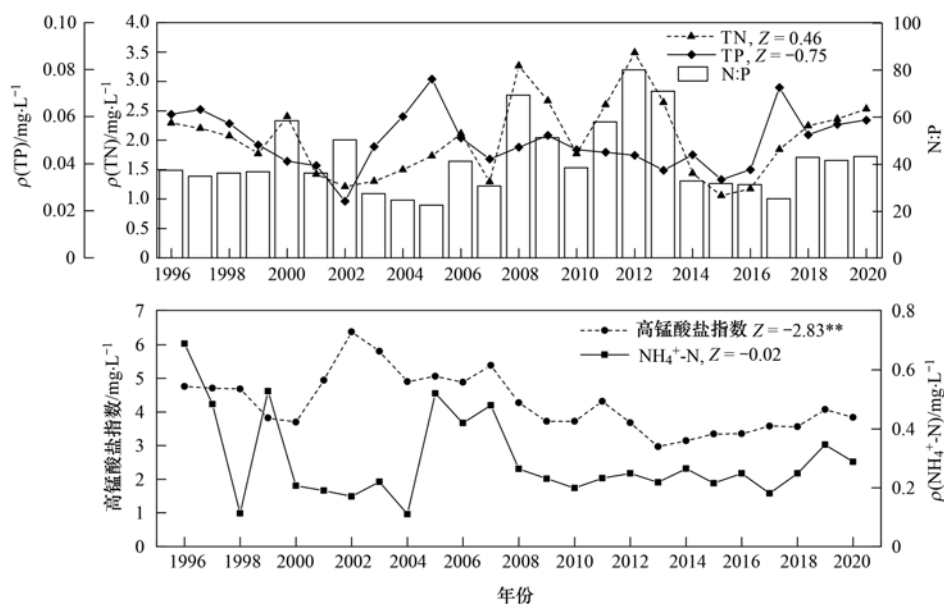
2.2 水质时空演变特征

2.2.1 年际变化

2009~2020年, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 变化范围为 $0.18\sim 0.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (II类,表1),均值为 $0.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;高锰酸盐指数变化范围为 $2.97\sim 4.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (II~III类),均值为 $3.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\rho(\text{Chl-a})$ 变化范围为 $4.79\sim 11.19\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $7.09\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\rho(\text{TP})$

变化范围为 $0.033\sim 0.072\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (III~IV类),均值为 $0.048\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;污染最严重的因子 $\rho(\text{TN})$ 在 $1.06\sim 3.49\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(IV~劣V类),年际差异较大,均值为 $2.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

从1996~2020年长期数据来看,高锰酸盐指数范围为 $2.97\sim 6.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经Mann-Kendall趋势检验,在25 a间呈显著下降趋势, Z 值为 -2.83 ($P<0.01$,图3). $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 范围分别为 $1.06\sim 3.49$ 、 $0.024\sim 0.076$ 和 $0.11\sim 0.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Z 值分别为 0.46 、 -0.75 和 -0.02 ,整体变化趋势不显著.氮磷比的范围在 $22.64\sim 80.17$ 之间,且与TN趋势大致相同.将1996~2020年营养盐指标波动分为3个阶段:①1996~2002年, $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 分别由 2.29 、 0.061 和 $0.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 1.21 、 0.024 和 $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高锰酸盐指数由 $4.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $6.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;②2002~2015年, $\rho(\text{TN})$ 呈现显著的年际波动,波动范围为 $1.06\sim 3.49\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;高锰酸盐指数波动下降,由2002年的 $6.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到2015年的 $3.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 均呈现先上升后下降的趋势,在2005年达到拐点;③2015~2020年, $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、高锰酸盐指数和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 均有不同程度的上升趋势.总体来说,TN和高锰酸盐指数的年际波动较大,TP和 NH_4^+-N 相对稳定,2015年以来各营养盐指标呈现逐年变差趋势,TN超过劣V类.



**表示在0.01水平呈显著差异

图3 1996~2020年骆马湖水水质指标年际变化趋势

Fig. 3 Interannual trend of water quality parameters in Lake Luoma from 1996 to 2020

2.2.2 年内变化

在2009~2020年骆马湖逐月水质指标的

Mann-Kendall趋势分析中(图4),高锰酸盐指数和TP浓度的 Z 值分别为 3.47 和 2.59 ,均呈显著上升

表 1 2009 ~ 2020 年骆马湖水质指标年均值

Table 1 Annual averages of water quality parameters in Lake Luoma from 2009 to 2020						
年份	$\rho(\text{DO})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{TP})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{TN})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{Chl-a})$ /μg·L ⁻¹
2009	8.64 ± 2.05	0.23 ± 0.09	3.72 ± 0.40	0.052 ± 0.012	2.67 ± 0.68	—
2010	9.50 ± 1.72	0.20 ± 0.06	3.73 ± 0.63	0.046 ± 0.013	1.77 ± 0.65	—
2011	8.73 ± 2.24	0.23 ± 0.14	4.32 ± 1.33	0.045 ± 0.010	2.60 ± 1.86	11.19 ± 6.52
2012	9.02 ± 1.48	0.25 ± 0.14	3.68 ± 0.29	0.045 ± 0.010	3.49 ± 1.17	8.28 ± 4.67
2013	9.14 ± 1.35	0.22 ± 0.07	2.97 ± 0.36	0.044 ± 0.017	2.64 ± 0.51	8.68 ± 2.38
2014	9.20 ± 1.67	0.26 ± 0.13	3.14 ± 0.36	0.037 ± 0.011	1.44 ± 0.51	5.41 ± 1.38
2015	9.60 ± 1.51	0.22 ± 0.08	3.34 ± 0.28	0.044 ± 0.008	1.06 ± 0.30	4.79 ± 0.82
2016	9.55 ± 1.62	0.25 ± 0.04	3.35 ± 0.35	0.033 ± 0.007	1.17 ± 0.36	4.90 ± 0.93
2017	9.60 ± 1.70	0.18 ± 0.03	3.58 ± 0.27	0.037 ± 0.011	1.84 ± 0.45	5.12 ± 0.82
2018	9.35 ± 1.84	0.25 ± 0.06	3.57 ± 0.36	0.072 ± 0.060	2.25 ± 0.87	5.07 ± 0.27
2019	9.53 ± 1.36	0.35 ± 0.08	4.07 ± 0.37	0.052 ± 0.017	2.36 ± 0.82	8.14 ± 0.28
2020	9.58 ± 1.32	0.29 ± 0.08	3.84 ± 0.32	0.057 ± 0.028	2.53 ± 0.84	8.15 ± 0.15
均值	9.29	0.24	3.61	0.048	2.15	7.09
类别	I	II	II ~ III	III ~ IV	IV ~ 劣 V	—

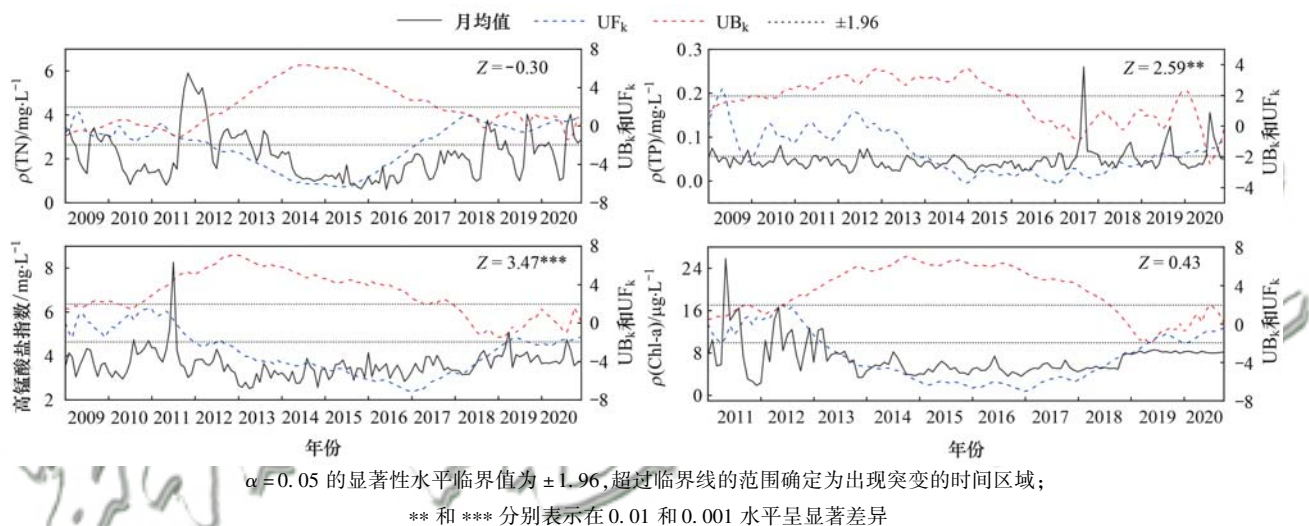


图 4 2009 ~ 2020 年骆马湖水质指标逐月变化和 Mann-Kendall 趋势检验

Fig. 4 Monthly changes in water quality parameters and Mann-Kendall trend test in Lake Luoma from 2009 to 2020

趋势($P < 0.01$); TN 和 Chl-a 浓度的 Z 值分别为 -0.30 和 0.43 , 整体变化趋势不显著. $\rho(\text{TN})$ 在 2015 年前缓慢下降, 之后呈现逐年增加的趋势, 2018 年后的夏季 $\rho(\text{TN})$ 趋于稳定并显著高于其他月份, 2017 ~ 2020 年 8 月平均值为 $3.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\rho(\text{TP})$ 在 2017 年前较为稳定, 2017 年 8 月异常增高 ($0.260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 之后的夏季 $\rho(\text{TP})$ 逐年增加,

2017 ~ 2020 年 8 月平均值为 $0.141 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 将月份聚类为两类: 冬春 (11 月 ~ 次年 4 月) 和夏秋 (5 月 ~ 10 月), t 检验结果表明 TN 和 TP 在季节上存在显著差异 ($P < 0.01$), 尤其在 2017 年之后, 8 月浓度均值约为年平均值的 1.5 倍和 2.4 倍.

选取 2010、2014、2017 和 2020 年这 4 个典型年分析各指标月平均值变化 (图 5), 总体上 $\rho(\text{TN})$

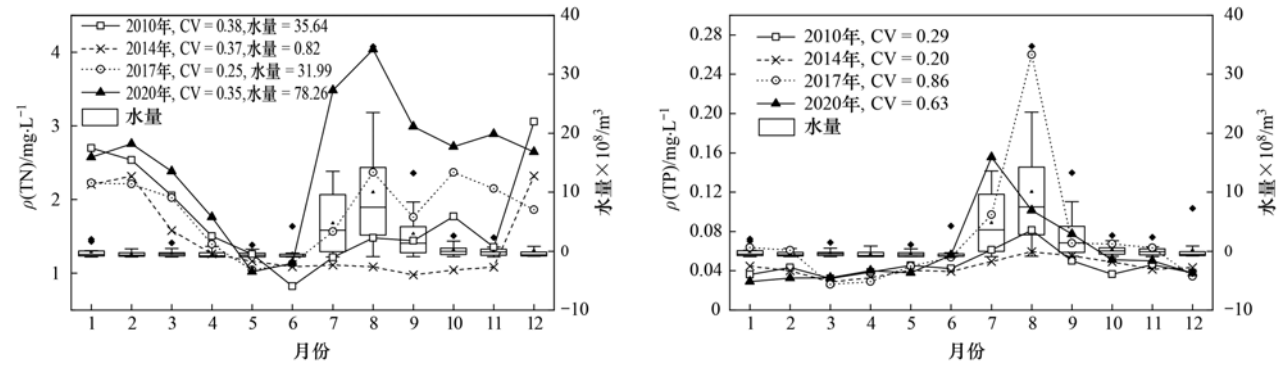


图 5 骆马湖典型年水质指标年内季节变化

Fig. 5 Seasonal changes in water quality parameters for typical years in Lake Luoma

在5月和6月最低(1.02~1.76 mg·L⁻¹),冬春季保持较高浓度.2010年和2014年的TN冬春季较高于夏秋季,而2017年和2020年夏季浓度随水量增加,显著高于其他季节,2020年8月 ρ (TN)高达4.04 mg·L⁻¹.通过变异系数(CV)的归一化处理,表征年内TN和TP的季节差异.TP浓度在2010年和2014年变异系数分别为0.29和0.20,而2017年和2020年增加为0.86和0.63,表明季节波动增大,夏季TP异常增高是变异系数增大的原因.

2.2.3 空间分异特征

典型年水质空间格局显示(图6),TN、TP和

Chl-a浓度在骆马湖北部均高于南部湖区,不同的是,Chl-a浓度随时间变化在南北空间上的差异逐渐增大,以2020年最为显著;而TN和TP浓度空间差异逐渐减小.高锰酸盐指数在南部年际波动大于北部湖区,近3年内浓度有所升高.

聚类分析将11个监测点分为3组:北部(LM5~6)、中部(LM1~4)和南部(LM7~11).方差分析结果显示,3组区域的pH、SD、TN、TP、NO₃⁻-N和Chl-a浓度均存在显著差异(表2).多重比较结果显示,不同湖区的 ρ (TN)和 ρ (TP)均值梯度为:北部湖区(3.18 mg·L⁻¹和0.060 mg·L⁻¹)>中部湖区

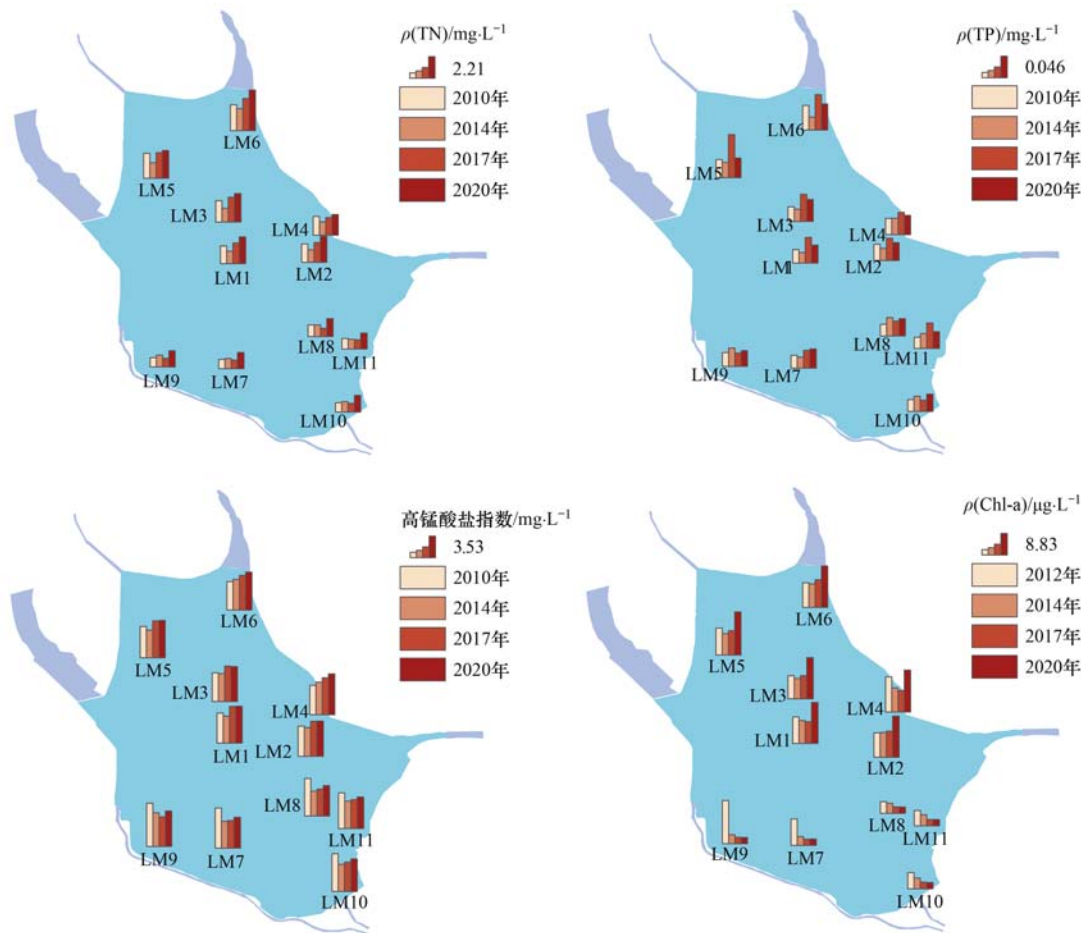


图6 骆马湖11个监测点典型年水质空间格局

Fig. 6 Spatial patterns of water quality parameters at 11 sampling sites for typical years in Lake Luoma

表2 骆马湖不同湖区水质指标方差分析和多重比较¹⁾

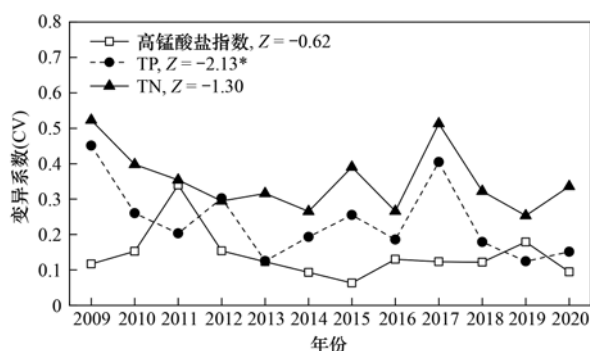
Table 2 One-way ANOVA and multiple comparisons of water quality parameters among regions of Lake Luoma

水质指标	北部湖区	中部湖区	南部湖区	全湖	P
pH	8.18 ± 0.07a	8.22 ± 0.08a	8.10 ± 0.13b	8.16 ± 0.12	<0.001
ρ (DO)/mg·L ⁻¹	9.24 ± 0.30a	9.32 ± 0.32a	9.28 ± 0.52a	9.29 ± 0.42	0.864
ρ (SD)/m	0.86 ± 0.13a	0.84 ± 0.13a	0.72 ± 0.19b	0.79 ± 0.17	<0.001
ρ (TN)/mg·L ⁻¹	3.18 ± 1.01a	2.51 ± 0.91b	1.45 ± 0.53c	2.16 ± 1.03	<0.001
ρ (TP)/mg·L ⁻¹	0.060 ± 0.023a	0.049 ± 0.015b	0.042 ± 0.011c	0.048 ± 0.017	<0.001
ρ (NH ₄ ⁺ -N)/mg·L ⁻¹	0.25 ± 0.06a	0.24 ± 0.05a	0.25 ± 0.09a	0.24 ± 0.07	0.977
ρ (NO ₃ ⁻ -N)/mg·L ⁻¹	2.05 ± 0.82a	1.51 ± 0.64a	0.49 ± 0.22b	1.28 ± 0.84	<0.001
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	3.62 ± 0.48a	3.63 ± 0.51a	3.59 ± 0.85a	3.61 ± 0.68	0.782
ρ (Chl-a)/μg·L ⁻¹	9.58 ± 3.79a	9.25 ± 3.23a	4.56 ± 3.96b	7.22 ± 4.37	<0.001

1) 相同小写字母表示差异不显著(P>0.05),不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

($2.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.049 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 南部湖区 ($1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。pH、SD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 Chl-a 在北部和中部湖区显著高于南部湖区, 而其余指标在各湖区间差异不显著。

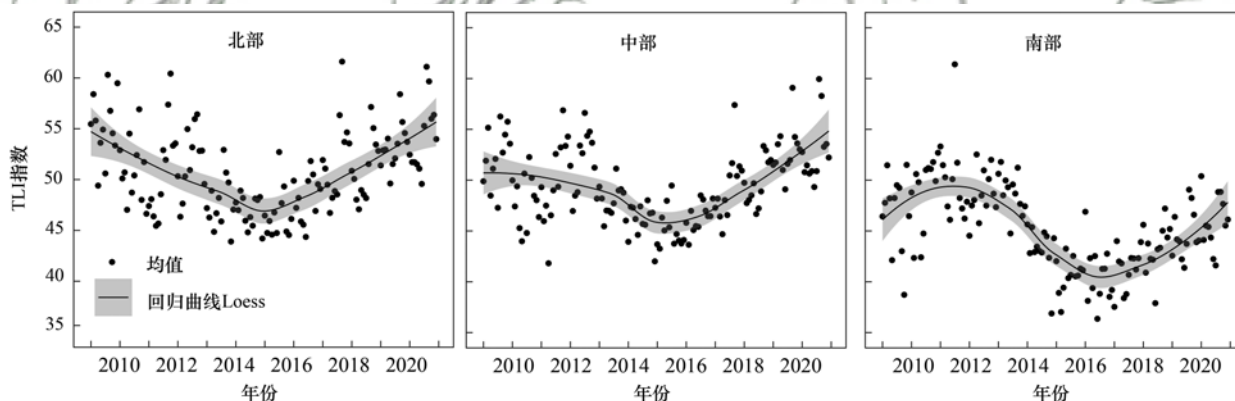
水体对入湖河流污染物的削减能力以变异系数 (CV) 表达 (图 7), TP 变异系数下降趋势明显 ($P < 0.05$), Z 值为 -2.13 。TN、TP 和高锰酸盐指数的变异系数变化范围分别为 $0.25 \sim 0.52$ 、 $0.12 \sim 0.45$ 和 $0.06 \sim 0.34$, 均有不同程度的下降。



* 表示在 0.05 水平呈显著差异

图 7 骆马湖水水质指标空间分布变异系数

Fig. 7 Coefficient variation of spatial distribution of water quality parameters in Lake Luoma



拟合回归线为局部加权回归 Loess, 灰色阴影为 98% 置信区间

图 8 骆马湖综合营养状态指数时空变化

Fig. 8 Spatiotemporal variation in trophic level index in Lake Luoma

2.3 水质演变驱动因素

分别对北部、中部、南部和全湖的水质指标与驱动因子做相关分析 (图 9), 北部和中部湖区 TN 和入湖水量的相关系数分别为 0.83 和 0.81, 相关性随着北部进入湖体后逐渐减弱。此外, 北部和中部湖区的 Chl-a 和 TLI 指数与出湖水量呈显著正相关。气象水文因子对骆马湖水水质影响显著, 尤其与入湖水量呈显著正相关 ($P < 0.01$)。

广义相加模型 (GAM) 分析结果表明 (表 3), 北部和中部湖区 TN、TP 和 TLI 指数与入湖水量的关系强烈, TN 与入湖水量存在极显著非线性相关 ($P < 0.001$)。进一步说明不同湖区水质的驱动因素有

2.2.4 营养状态评价

北部湖区 LM5 和 LM6 综合营养状态指数 (TLI) 评价结果最高 (图 8), 2009 ~ 2020 年多年平均 TLI 分别为 50.48 和 50.97; 中部湖区 LM1 ~ 4 样点多年平均 TLI 范围为 48.91 ~ 49.82, 南部湖区 LM7 ~ 11 样点 TLI 指数最低, 平均为 45.27。北部湖区 LM5 和 LM6 紧邻沂河、中运河入湖口, 与河流输入负荷关联较强, 处于中度富营养状态, 其余 9 个样点均处于轻度富营养状态。

对 11 个监测点 TLI 指数求年平均, 2009 ~ 2020 年 TLI 指数范围为 43.34 ~ 50.50, 其中 2009、2011 和 2012 年骆马湖 TLI 指数超过 50。2015 年之后, TLI 指数由 43.35 上升至 2020 年的 49.93, 较 2015 年前显著增加 ($P < 0.05$)。对 2009 ~ 2020 年 TLI 指数求多年月平均, 范围为 46.31 ~ 50.07, 夏季 TN、TP 和 Chl-a 等指标达到全年峰值, 其中 8 月 TLI 指数超过 50。总体而言, 综合营养状态指数 (TLI) 评价结果范围在中营养至中度富营养之间 (33.21 ~ 64.76), 基本呈现从湖区北部至南部逐渐降低的趋势, 方差分析结果与 TN 和 TP 一致, 骆马湖基本处于轻度富营养状态。

所不同, 北部湖区水质受上游来水影响强烈; 南部湖区受水文脉冲作用相对较弱, 还受到气温、水位等因素影响。

以沂河入湖口点位 (LM6) 为对象, 进一步分析汛期营养盐年际波动与水量的关系 (图 10), 发现 8 月 TN 与水量相关系数为 0.37, TP 则为 0.88 ($P < 0.001$); 9 月 TN 与水量相关系数为 0.63 ($P < 0.05$), TP 则为 0.08。

3 讨论

3.1 骆马湖水水质年际及年内变化驱动因素

近 25 年来, 尽管从总体趋势看骆马湖高锰酸盐

表 3 骆马湖不同湖区水质指标与驱动因素的 GAM 拟合结果
Table 3 GAM fitting results of water quality parameters and driving factors among regions of Lake Luoma

湖区	因变量	自变量	自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
北部	TP	水位	2.857	3.542	2.619	0.045
		入湖水量	7.840	8.548	2.192	0.026
	TN	气温	2.452	3.067	3.713	0.013
		降水	1.000	1.000	5.572	0.020
		入湖水量	4.401	5.392	9.196	<0.001
	TLI	降水	1.000	1.000	8.720	0.004
入湖水量		3.127	3.834	9.155	<0.001	
中部	TN	降水	1.000	1.000	9.616	0.002
		入湖水量	4.729	5.752	9.890	<0.001
	TLI	降水	1.000	1.000	6.446	0.013
		入湖水量	4.113	5.040	6.950	<0.001
		出湖水量	1.000	1.000	5.425	0.022
南部	TP	降水	4.688	5.706	2.414	0.033
		入湖水量	2.266	2.803	3.723	0.010
	TN	气温	1.000	1.000	9.207	0.003
		入湖水量	5.808	6.714	3.778	0.002
	TLI	风速	2.193	2.777	4.749	0.004
		气温	1.000	1.000	4.189	0.044
		水位	6.689	7.773	7.047	<0.001
		入湖水量	2.583	3.234	3.655	0.015

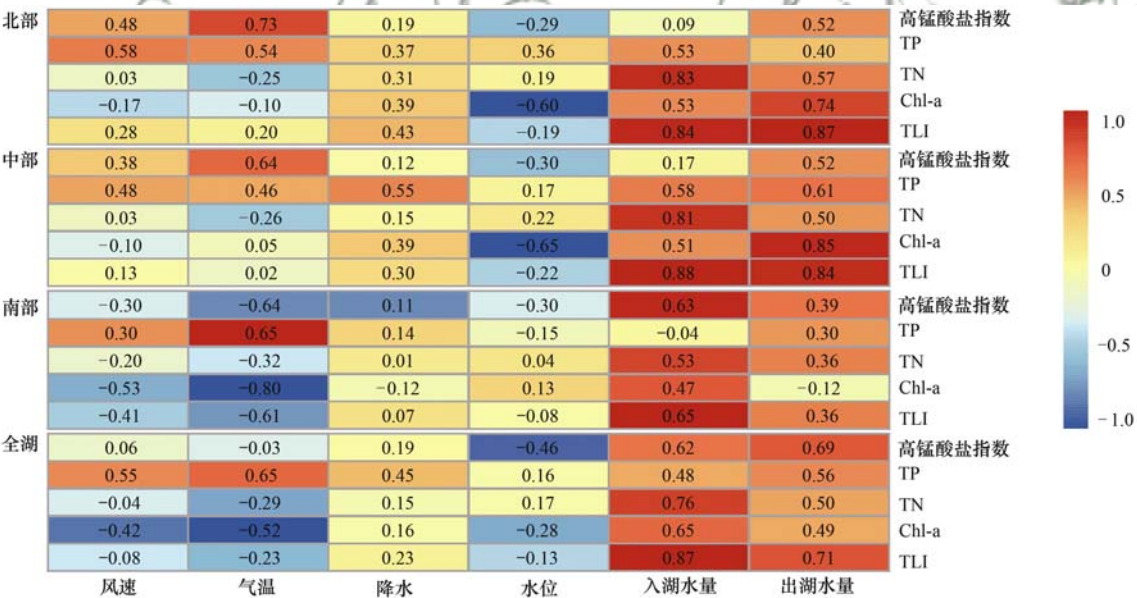


图 9 不同湖区和全湖水水质指标与气象水文因子的相关性

Fig. 9 Correlation between water quality parameters and driving factors in different regions and the entire lake

指数($Z = -2.83$, $P < 0.01$)、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 是呈下降趋势的,但 2015 年以来,高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 均有不同程度的上升。TN 长期处于 IV ~ 劣 V 类状态,年际波动较大,是骆马湖的主要污染因子。2013 年南水北调东线一期工程通水后,骆马湖水位显著抬升,一定程度上改善了骆马湖的水质。2014 ~ 2015 年,进入骆马湖的年平均水量仅为 1.7 亿 m^3 ,占多年平均入湖水量(2009 ~ 2020 年)的 6%,加之 2015 年 6 月全面禁采黄砂资源,湖体水质转好,TN、TP、高锰酸盐指数和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度明显降

低,TLI 指数恢复为中营养状态。然而 2015 年后,汛期入湖水量年均增加 1.4 倍,强烈的水流输移河流中的溶解物质和悬浮物质^[23],替换湖区大量的淡水,促使这些物质在湖滨系统中循环。TN 和 TP 与水量的相关系数分别为 0.63 ($P < 0.05$) 和 0.88 ($P < 0.001$),水质对河流水量的响应强烈,各项营养盐指标浓度均明显上升,存在富营养化加剧趋势。不同的是,TN 和 TP 在汛期水量响应的时间效应上存在差异,这与氮磷在水体中的迁移转化规律不同有关^[24,25]。N/P ≥ 22.60 时存在明显的 P 限制^[26],而

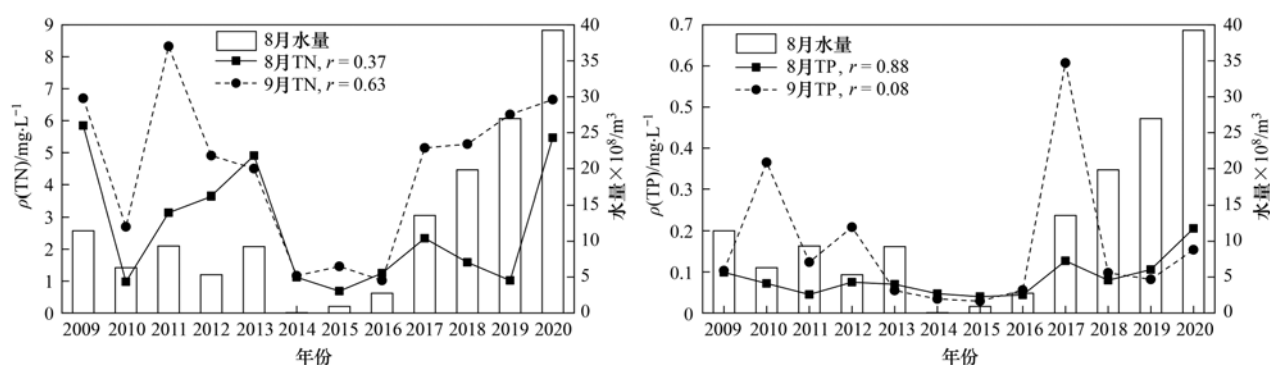


图 10 2009 ~ 2020 年沂河入湖口点位夏季水质水量年际趋势

Fig. 10 Interannual trend of water quality and quantity of Yihe River in summer from 2009 to 2020

骆马湖多年平均 N/P 已达到 42.22 (1996 ~ 2020 年), 失衡日益严重, 且 2015 年后稳中有升。河流氮的大量输入源于骆马湖上游农业用地的氮损失, 而磷倾向于湖泊内循环, 水量增加引起的水动力扰动使底泥颗粒物中磷的再悬浮^[27,28], 导致 TN 出现峰值的时段并不会导致 TP 出现峰值。此外, 2017 年 6 月, 骆马湖开始网箱养殖整治^[29], 大量养殖残渣和饵料可能释放至湖体^[30], 2017 年 8 月 $\rho(\text{TP})$ 甚至达到了 $0.260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2015 年后的夏季, 骆马湖降水增多, 入湖污染负荷通量增加, 2017 ~ 2020 各年的 8 月入湖水量分别为 13.6、19.8、27.0 和 39.2 亿 m^3 , 尤其在 2020 年 8 月沂河流域迎来 1960 年以来最大洪水^[31] [刘家道口 (沂) 水文站实测最大流量 $7830 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]。夏季湖泊增温, 导致沉积物中底层有机物厌氧分解, 可能会加剧内源负荷的季节变化^[32,33]。上述两个因素导致骆马湖夏季 TN 和 TP 增加幅度增大, $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 在 2020 年 8 月甚至达到 $3.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.156 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, N/P 降为 30 以下, 存在藻类暴发的潜在威胁, 冬春季水质明显优于夏秋季, 与 2015 年前冬春季污染物浓度显著高于夏秋季的规律相反^[34]。夏季浮叶植物荇菜和浮萍的分布面积呈现稳步上升的趋势, 逐渐发展成为了水生植物类群中的优势种, 而其作为典型的耐污种, 也进一步表征骆马湖夏季水质的下降。另一方面, 调水工程运行期间, 骆马湖换水频率高, 换水周期短, 过水性增强, 氮、磷营养盐和藻类之间的关系弱化, 降低了藻类爆发性生长的可能^[35]。全湖高锰酸盐指数 ($r = -0.46$)、Chl-a ($r = -0.28$) 和 水位呈负相关, 冬季 (12 月至次年 3 月) 水位抬高, 湖泊流速变缓, 水体中悬浮的营养盐、杂质离子等物质沉积于湖泊底泥, 不易受上边界风浪干扰, 高锰酸盐指数和 Chl-a 减小, 与东平湖等的研究结果一致^[36~38]。

3.2 骆马湖水水质空间分异成因分析

骆马湖北部的两条主要入湖河道营养盐污染最

重, 据调查, 2011 年从中运河和沂河汇入骆马湖的 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和高锰酸盐指数等污染物总量分别为 17 735、398、934 和 14 154 t, 占全湖污染来源的 90% 以上^[39]。沂河 Chl-a 浓度最高, 浮游藻类数量最大, TN 和 TP 都明显高于其它河道, 而高锰酸盐指数和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 则是在中运河中最高^[39]。骆马湖水质与进入湖泊的外部负荷密切相关^[40], 入湖水量是主要的表现因素^[41]。全湖 TN、TP、高锰酸盐指数和 Chl-a 等指标与入湖水量相关系数基本都大于 0.5, 而北部入湖口 TN 对上游河流的入湖水量变化响应强烈 ($r = 0.83$)。在空间聚类得到的北、中、南这 3 个湖区中, 出湖口 TN、TP 和 Chl-a 显著小于北部入湖口, 南部水质明显优于北部。可见, 入湖河道的水系分布对水质的空间分异有决定性的影响, 与太湖和东平湖等研究结果一致^[34,42~44]。

骆马湖北部和中部的 TN 和 TP 均大于南部湖区, 这与围网养殖主要分布于骆马湖北部和中部近岸区域有关。非法围垦和过度养殖使增加的氮磷占湖体滞留氮磷总量的 27% 和 33%^[45]。外源性饵料、化学药剂和产生的鱼类排泄物等加剧北部和中部湖区的富营养化风险。另一方面, 北部湖口是采砂的集中区, 直接损坏湖底原生植被, 加速北部水域荒漠化, 南部水生植被可以抑制沉积物的悬浮, 并吸收水体中的营养元素并将其储存在植株内^[11], 对南部湖区水体起到一定的净化作用。然而, 近 10 年来 TN、TP 和高锰酸盐指数在监测点间的变异系数均有不同程度的下降, 骆马湖对入湖污染物负荷的自净能力在降低。

3.3 骆马湖水生态系统保护对策及建议

基于本文研究, 骆马湖水水质波动主要受到流域外源输入和湖泊内源污染的影响, 此外湖泊生态系统的退化亦导致其自净能力减弱, 建议从外源治理、内源控制和生态修复等方面强化治理保护。入湖河流是外源氮磷输入湖泊的主要途径^[24], 治理骆马湖生态环境的关键一步就是控源截污, 制定有效的流

域管理战略^[46].从推广应用农业绿色技术、减少化肥用量和加强农药减量控害上减小流域面源污染的影响;考虑优化水利调度,完善南水北调东线截污导流工程^[47].从内源上加强对骆马湖水产养殖业的规范化管理,实施大水面生态渔业,以退圩还湖方式减小饵料入湖量.此外,有研究发现骆马湖沉积物中活性磷交换通量为 $0.066 \sim 0.698 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ^[48,49],底泥内源负荷加重,可根据实际情况对局部湖区的底泥实施清淤.实施生态修复工程,在主要入湖河流构建河口湿地,充分利用芦苇、菖蒲、马来眼子菜和苦草等植被的净化功能,削减入湖污染物通量^[50,51];在退圩还湖区集成微地形改造、底质改良和水生植物定殖等技术,重建草型生态系统;在骆马湖大堤进行生态湖滨带建设,包括硬质驳岸生态化改造、营造生态防护林和生态经济林等,提升湖滨带对面源污染的拦截功能.

4 结论

(1)1996~2020年骆马湖水质总体处于Ⅳ~劣Ⅴ类.长期来看 $\rho(\text{TN})$ 介于 $1.06 \sim 3.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,是主要污染因子,其变化可分为3个阶段:1996~2002年缓慢下降,2002~2015年呈现显著的年际波动,2015~2020年显著上升. $\rho(\text{TP})$ 介于 $0.024 \sim 0.076 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,波动相对较小.高锰酸盐指数和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 范围分别在 $2.97 \sim 6.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.11 \sim 0.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间.

(2)水质年内季节变化明显,聚类结果表明,总体上TN在冬春季保持较高浓度,夏秋季TN和TP随入湖水量增加而升高,2015年后季节波动呈现加剧趋势,水质季节动态转变为夏秋季劣于冬春季.空间上,骆马湖南部湖区水质明显优于北部湖区.

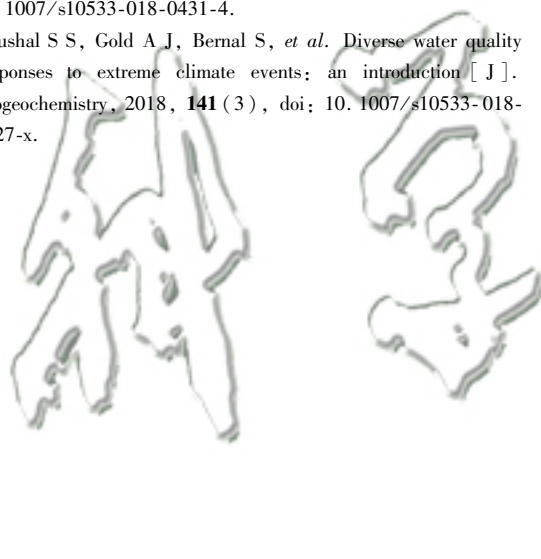
(3)驱动因素分析结果表明,骆马湖水质演变与入湖水量存在极显著的相关性,2015年以来夏季骆马湖入湖污染负荷增强是导致近年水质恶化的主要原因,建议系统实施外源治理、内源控制和生态修复等工程以保障骆马湖水质安全.

参考文献:

- [1] 罗赟,董增川,刘玉环,等.基于Copula函数的连河通江湖泊防洪安全设计:以洪泽湖为例[J].湖泊科学,2021,33(3):879-892.
Luo Y, Dong Z C, Liu Y H, et al. Safety design for rivers-connected lake flood control based on copula function: a case study of Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 879-892.
- [2] 高俊峰,蒋志刚.中国五大淡水湖保护与发展[M].北京:科学出版社,2012.
- [3] 刘翊竣,徐国宾.风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):174-178,184.
Liu Y J, Xu G B. Effects of wind field and throughput flow on the flow field of Hongze Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(2): 174-178, 184.
- [4] 窦鸿身,姜加虎.中国五大淡水湖[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
- [5] 王亚宁,李一平,程月,等.大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析[J].环境科学,2021,42(6):2778-2786.
Wang Y N, Li Y P, Cheng Y, et al. Sensitivity analysis of boundary load reduction in a large shallow lake water quality model[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2778-2786.
- [6] Kiedrzyńska E, Kiedrzyński M, Zalewski M. Flood sediment deposition and phosphorus retention in a lowland river floodplain: impact on water quality of a reservoir, Sulejów, Poland[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2008, 8(2-4): 281-289.
- [7] Sokal M A, Hall R I, Wolfe B B. The role of flooding on inter-annual and seasonal variability of lake water chemistry, phytoplankton diatom communities and macrophyte biomass in the Slave River Delta (Northwest Territories, Canada)[J]. Ecohydrology, 2010, 3(1): 41-54.
- [8] 连心桥,朱广伟,杨文斌,等.强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响[J].环境科学,2020,41(11):4970-4980.
Lian X Q, Zhu G W, Yang W B, et al. Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4970-4980.
- [9] Schindler D W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(1 part 2): 356-363.
- [10] 嵇晓燕,侯欢欢,王姗姗,等.近年全国地表水水质变化特征[J].环境科学,2022,43(10):4419-4429.
Ji X Y, Hou H H, Wang S S, et al. Variation characteristics of surface water quality in China in recent years[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4419-4429.
- [11] 邹伟,李太民,刘利.苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价[J].湖泊科学,2017,29(5):1177-1187.
Zou W, Li T M, Liu L. Macrozoobenthic community structure and water quality assessment of Lake Luoma, Jiangsu province, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5): 1177-1187.
- [12] 黄文钰,许朋柱,范成新.网围养殖对骆马湖水体富营养化的影响[J].农村生态环境,2002,18(1):22-25.
Huang W Y, Xu P Z, Fan C X. Effect of cage aquaculture on eutrophication in Luoma Lake[J]. Rural Eco-Environment, 2002, 18(1): 22-25.
- [13] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志[M].北京:科学出版社,1998.
- [14] 中华人民共和国水利部水文局.中华人民共和国水文年鉴(2009~2020)[M].北京:中国水利水电出版社,2010-2021.
- [15] 宋友坤,王秀梅,伍军.骆马湖水体氮污染特征分析[J].干旱环境监测,2006,20(3):142-145.
Song Y K, Wang X M, Wu J. The water body nitrogen pollution characteristic analysis of the Luoma Lake[J]. Arid Environmental Monitoring, 2006, 20(3): 142-145.
- [16] 万蕾,徐德兰,高明侠,等.大型水生植物对骆马湖氮、磷元素的影响[J].环境工程学报,2012,6(10):3579-3584.
Wan L, Xu D L, Gao M X, et al. Effect of macrophytes on nitrogen and phosphorus in Luoma Lake[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(10): 3579-3584.
- [17] 崔彩霞,花卫华,袁广旺.骆马湖水质现状评价与趋势分析[J].河北渔业,2013,(8):31-34,40.
- [18] 普发贵. Mann-Kendall 检验法在抚仙湖水质趋势分析中的应用[J].环境科学导刊,2014,33(6):83-87.

- Pu F G. Application of Mann-Kendall test method on water quality trend analysis in Fuxian Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2014, **33**(6): 83-87.
- [19] 任瑞丽, 刘茂松, 章杰明, 等. 过水性湖泊自净能力的动态变化[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(8): 1222-1227.
- Ren R L, Liu M S, Zhang J M, *et al.* Self-purification ability of a water-carrying lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(8): 1222-1227.
- [20] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [21] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002, **18**(5): 47-49.
- Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49.
- [22] Murphy R R, Perry E, Harcum J, *et al.* A Generalized additive model approach to evaluating water quality: Chesapeake bay case study[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, **118**: 1-13.
- [23] Li Q, Wang G Q, Wang H Q, *et al.* Macrozoobenthos variations in shallow connected lakes under the influence of intense hydrologic pulse changes[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **584**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124755.
- [24] 高可伟, 朱元荣, 孙福红, 等. 我国典型湖泊及其入湖河流氮磷水质协同控制探讨[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(5): 1400-1414.
- Gao K W, Zhu Y R, Sun F H, *et al.* A study on the collaborative control of water quality of nitrogen and phosphorus between typical lakes and their inflow rivers in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(5): 1400-1414.
- [25] Peñuelas J, Sardans J. The global nitrogen-phosphorus imbalance[J]. *Science*, 2022, **375**(6578): 266-267.
- [26] Zhou J, Han X X, Brookes J D, *et al.* High probability of nitrogen and phosphorus co-limitation occurring in eutrophic lakes[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118276.
- [27] van der Grift B, Broers H P, Berendrecht W, *et al.* High-frequency monitoring reveals nutrient sources and transport processes in an agriculture-dominated lowland water system[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, **20**(5): 1851-1868.
- [28] 朱伟, 胡思远, 冯甘雨, 等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响: 以2016年太湖为例[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(2): 325-336.
- Zhu W, Hu S Y, Feng G Y, *et al.* Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: a case study of Lake Taihu in 2016[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(2): 325-336.
- [29] 穆新武. 骆马湖网箱养殖现状及可持续发展策略探讨[J]. *水产养殖*, 2020, **41**(1): 68-70.
- [30] 张庆吉, 王业宇, 王金东, 等. 骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1648-1656.
- Zhang Q J, Wang Y Y, Wang J D, *et al.* Succession pattern of phytoplankton and its drivers in Lake Luoma, Jiangsu province[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1648-1656.
- [31] 赵艳红, 王秀庆, 于百奎. 沂沭泗河“2020.8.14”暴雨洪水及调度分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2021, **31**(3): 40-44.
- Zhao Y H, Wang X Q, Yu B K. Analysis of storm flood and dispatching in Yi-Shu-Si River on August 14, 2020[J]. *China Flood & Drought Management*, 2021, **31**(3): 40-44.
- [32] Tong Y D, Xu X W, Qi M, *et al.* Lake warming intensifies the seasonal pattern of internal nutrient cycling in the eutrophic lake and potential impacts on algal blooms[J]. *Water Research*, 2021, **188**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116570.
- [33] 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 等. 湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3058-3065.
- Liu Z Z, Ni Z K, Liu S R, *et al.* Kinetic release characteristics of organic phosphorus of sediment-water and water quality risks[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3058-3065.
- [34] 胡婷婷, 刘劲松, 戴小琳, 等. 骆马湖水质时空变化特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(5): 794-801.
- Hu T T, Liu J S, Dai X L, *et al.* Spatio-Temporal variation of water quality in Lake Luoma, Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(5): 794-801.
- [35] 朱天顺, 刘梅, 申恒伦, 等. 南水北调东线湖群水体营养状态评价及其限制因子研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(12): 2992-3002.
- Zhu T S, Liu M, Shen H L, *et al.* Eutrophication assessment and limited factors of impounded lakes in the East route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(12): 2992-3002.
- [36] Ding Y K, Wang S R, Zhang W Q, *et al.* A rule of hydrological regulating on nutritional status of Poyang Lake, since the operation of the Three Gorges Dam[J]. *Ecological Indicators*, 2019, **104**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.04.054.
- [37] 曾凯, 王家生, 章运超, 等. 华阳河湖群水位变化对水质的影响[J]. *长江科学院院报*, 2020, **37**(8): 49-53, 68.
- Zeng K, Wang J S, Zhang Y C, *et al.* Influence of water level fluctuation on water quality of Huayang River and Lake Group[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(8): 49-53, 68.
- [38] 李景璇, 陈影影, 韩非, 等. 1990-2016年东平湖水位变化及其对水质的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, **37**(23): 94-100.
- Li J X, Chen Y Y, Han F, *et al.* Water level change of Dongping Lake and its impact on water quality from 1990 to 2016[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(23): 94-100.
- [39] 申霞, 洪大林, 谈永锋, 等. 骆马湖生态环境现状及其保护措施[J]. *水资源保护*, 2013, **29**(3): 39-43, 50.
- Shen X, Hong D L, Tan Y F, *et al.* Ecological environment of Luoma Lake and protection measures[J]. *Water Resources Protection*, 2013, **29**(3): 39-43, 50.
- [40] Guo Y, Dong Y, Chen Q Y, *et al.* Water inflow and endogenous factors drove the changes in the buffering capacity of biogenic elements in Erhai Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150343.
- [41] 崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟, 等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010-2019年)[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(6): 1727-1741.
- Cui J Y, Guo R, Song X W, *et al.* Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010-2019[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(6): 1727-1741.
- [42] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(5): 439-445.
- Zhu G W. Spatio-Temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(5): 439-445.
- [43] 栗文佳, 陈影影, 于世永, 等. 近40年来东平湖水环境变迁及驱动因素[J]. *环境工程*, 2018, **36**(10): 48-52.
- Li W J, Chen Y Y, Yu S Y, *et al.* Water environment changes

- of Dongping Lake in nearly 40 years and its driving factors[J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(10): 48-52.
- [44] 唐金玉, 覃宝利, 吴春, 等. 骆马湖夏季水质空间分布特征及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(3): 360-367.
Tang J Y, Qin B L, Wu C, *et al.* Trophic assessment and water-quality spatial distribution of Luoma Lake during summer time [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(3): 360-367.
- [45] 徐勇峰, 陈子鹏, 吴翼, 等. 环洪泽湖区域农业面源污染特征及控制对策[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, **40**(2): 1-8.
Xu Y F, Chen Z P, Wu Y, *et al.* Advances on agricultural non-point source pollution and the control in regions around Hung-Tse Lake [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2016, **40**(2): 1-8.
- [46] Huang Y L, Huang J L, Ervinia A, *et al.* Land use and climate variability amplifies watershed nitrogen exports in coastal China [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, **207**, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2018.02.024.
- [47] 叶茂盛, 王童, 苏海旺. 基于绿色发展理念的南水北调东线治污工程探讨[J]. *中国水利*, 2021, (20): 82-85.
Ye M S, Wang T, Su H W. Discussion on the pollution control project for East Route of the South-to-North Water Diversion Project based on green development concept [J]. *China Water Resources*, 2021, (20): 82-85.
- [48] 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 等. 骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3562-3574.
Huang J H, Wu W, Huang T Y, *et al.* Characteristics, sources, and risk assessment of polyfluoroalkyl substances in surface water and sediment of Luoma Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3562-3574.
- [49] 林建宇, 苏雅玲, 韩超, 等. 骆马湖泥-水界面磷铁硫原位同步变化特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(12): 5637-5645.
Lin J Y, Su Y L, Han C, *et al.* In situ and combined variations of phosphorus, iron and sulfur across the sediment-water interface of Lake Luoma [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(12): 5637-5645.
- [50] Hanrahan B R, Tank J L, Dee M M, *et al.* Restored floodplains enhance denitrification compared to naturalized floodplains in agricultural streams [J]. *Biogeochemistry*, 2018, **141**(3), doi: 10.1007/s10533-018-0431-4.
- [51] Kaushal S S, Gold A J, Bernal S, *et al.* Diverse water quality responses to extreme climate events: an introduction [J]. *Biogeochemistry*, 2018, **141**(3), doi: 10.1007/s10533-018-0527-x.



CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)