

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珩,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜酸降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析

李昆¹, 王玲², 李兆华³, 王祥荣^{1*}, 陈红兵³, 吴忠⁴, 朱鹏⁴

(1. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 3. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062; 4. 荆州市环境科学研究所, 荆州 434100)

摘要: 通过对丰水期不同程度富营养化的洪湖全湖 139 个监测点位的高密度采样分析, 采用 GIS 空间插值技术得到洪湖水体中各污染因子、水生植物生物量和水质类别的空间分布特征图。结果表明, 丰水期 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、高锰酸盐指数的质量浓度总体上呈现出自南向北逐步增高的变化趋势: 北部河流入湖区 > 围网养殖区 > 开阔水体 > 保护区 > 南部长江入湖区; 水质参数的贡献率依次为 $\text{TN} > \text{TP} > \text{高锰酸盐指数} > \text{NH}_4^+\text{-N} > \text{DO}$ 。受工农业废水、生活污水、饵料投放、水生植物、水体交换等因素的影响, TN 在丰水期超过目标水质 59%, TP 超标 35.2%, 高锰酸盐指数超标 13.7%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 超标 4.3%, 综合水质超标 66.2%。在季风等环境因子的影响下水体中的 DO 达到水质目标。通过水质空间变异性分析, 能直观反映人类活动、土地利用类型和环境因子之间相互作用对洪湖水环境产生的巨大影响。为了使洪湖水环境更有利于人们的生产和生活, 应大力控制北部区域工农业废水和生活污水的排放, 控制养殖面积, 逐步恢复洪湖水体自净能力, 实现洪湖水环境生态的可持续发展。

关键词: 洪湖; 丰水期; GIS; 空间异质性; 水质参数

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1285-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.020

Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period

LI Kun¹, WANG Ling², LI Zhao-hua³, WANG Xiang-rong^{1*}, CHEN Hong-bing³, WU Zhong⁴, ZHU Peng⁴

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China; 4. Jingzhou Institute of Environmental Science, Jingzhou 434100, China)

Abstract: Based on the high-density analysis of 139 monitoring points and samples in water of honghu lake with different degrees of eutrophication during the high water-level period, we could get the figures of spatial variability characteristics of pollution factors, the biomass of aquatic plants and water quality in Honghu Lake using the GIS interpolation methods. The result showed that the concentrations of TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, permanganate index gradually increased from south to north during this period, the trend of water pollution degree in Honghu Lake was the region of inflowing rivers > enclosure culture area > open water area > the lake protection area > region of the Yangtze river into the lake; and the contribution rate of water quality parameters was in the order of $\text{TN} > \text{TP} > \text{permanganate index} > \text{NH}_4^+\text{-N} > \text{DO}$; under the influence of industrial sewage, agricultural sewage, domestic sewage, bait, aquatic plants and water exchange, 59% of TN, 35.2% of TP, 13.7% of permanganate index, 4.3% of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ exceeded the water quality targets, respectively, accordingly, 66.2% of the water quality also exceeded the water quality target. Nonetheless, DO reached the water quality target due to the influences of monsoon climate and other environment factors. The spatial variation analysis could directly reflect the mutual interaction among human activity, land-use types and environment factors which had an enormous impact on Honghu Lake water environment. In order to ensure that the lake water environment is beneficial for human productions and livings, it is necessary for us to control the discharge of industrial sewage, agricultural sewage and domestic sewage, as well as the expanding area of aquaculture, all the above measures would be significant for gradually resuming the self-purification capacity of water body and finally achieving the ecological sustainable development of Honghu Lake water environment.

Key words: Honghu Lake; high water-level period; GIS; spatial distribution characteristics; water quality parameters

湖泊作为一种重要的自然资源, 具有蓄水、供水、养殖、航运和旅游等多项生态功能, 在区域经济社会可持续发展中起着重要作用^[1], 其水环境受季风、大气降水^[2]、水体透明度、水位变化^[3]以及人类活动^[4,5]等因素影响, 而浅水湖泊的表现更为显著。20 世纪 80 年代开始, 我国城市化和工业化进程加快, 经济发展迅速, 资源利用强度加

大, 导致湖泊氮、磷等营养盐严重富集, 以太湖^[6]、滇池^[7]、巢湖^[8]三湖为代表的湖泊生态系统结构遭到严重破坏, 功能紊乱, 蓝藻水华频繁暴发, 湖

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(14ZDB140)

作者简介: 李昆(1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化治理, E-mail: likun211@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xrxwang@fudan.edu.cn

泊富营养化和水质都出现了急剧恶化的态势^[9]. 洪湖是中国七大淡水湖之一, 原为通江湖泊, 水位随长江水位自然涨落, 自 20 世纪 50 ~ 70 年代的围湖造田和大规模水利工程建设后, 其江湖一体格局被打破, 使洪湖成为这一地区的大型平原水库, 水位主要受人工调控和来水量变化影响, 承担着长江中下游地区汛期蓄洪、冬春灌溉的任务^[10]. 洪湖也与其它许多大型浅水湖泊一样, 在近几十年里随着湖区经济的快速发展和人口的急剧增长, 人类对其水土资源、水生生物资源的高强度开发, 使其水环境面临着水域面积减少、湖滨湿地萎缩、水生生物量下降、珍稀物种减少和水质不断下降等一系列生态环境问题. 其中 2000 ~ 2003 年洪湖水质开始恶化, 总体上以地表水Ⅲ类和Ⅳ类为主^[11]. 这些问题已引起管理部门的重视并在 2004 年与世界自然基金会合作开展“洪湖生物多样性保护与重建江湖联系项目”以加强洪湖的生态环境保护; 同时也促使研究人员开始对洪湖生物资源、富营养化和湖底沉积环境等方面开展了研究^[12], 但是其水质在 2005 ~ 2008 年有所好转后于 2008 ~ 2010 年又出现水质下降的趋势^[13]; 同时在研究中针对湖体水质空间特征差异性及影响因子的定量、定性分析相对较少; 在研究方法上是对局部区域进行多指标综合相关分析, 缺少以洪湖整体空间划分为基础的水质分析.

不同形态元素在湖泊水体中的空间分布具有不均匀性^[14], 一般描述性统计只是说明了各指标浓度变化的基本特征, 并不能反映各指标在空间上的变化规律, 也不能反映其相关性和独立性的空间特征, 因此使用传统方法进行不同形态元素质量浓度的空间分布研究具有一定的局限性^[15]. 而基于 GIS 空间插值技术和统计学方法相结合的研究思路则可以较好地弥补传统方法中的不足. 因丰水期洪湖流域内种植业发达, 河流携带入湖污染物总量高, 同时洪湖湖体接受大量降水、外界来水, 水量充足, 湖中水生植物处于生长繁殖季节, 使水体中各营养物质的含量和形态处于快速变化中, 因此丰水期的水质特征分析更具有典型性和全面性. 笔者选取 139 个洪湖水质监测数据为基础, 在丰水期对该湖进行全程高密度水质监测, 采用 GIS 空间插值技术, 实现洪湖水质特征信息的空间分析与可视化, 对洪湖水质污染物因子在不同尺度上的空间分异进行了定量、定性分析, 以揭示洪湖水质参数的空间变异特征及驱动力,

以期为更全面地了解洪湖水环境质量现状、维持洪湖水资源的可持续利用以及对江汉平原淡水资源的管理与保护提供科学依据.

1 研究区概况

洪湖位于湖北省的中南部, 长江中游北岸 ($113^{\circ}12' \sim 113^{\circ}26'E$, $29^{\circ}40' \sim 29^{\circ}58'N$), 是湖北省最大的湖泊, 也是我国长江中下游流域重要的湿地自然保护区和生态功能区, 属北亚热带湿润季风气候. 其四周以洪湖围堤为界, 地跨洪湖市和监利县, 湖泊面积为 344 km^2 , 区域内地势平坦, 湖区的地面径流主要通过江汉平原四湖流域内的四湖总干渠汇入湖泊, 以及经若干涵闸通过长江对湖内水量进行排蓄和调节, 年平均水深 1.35 m , 洪湖汇水面积广阔, 多年平均入湖水量 $19.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 汇水区多年平均降雨量 $1000 \sim 1300 \text{ mm}$ (图 1). 洪湖是其流域内主要调蓄型湖泊, 并兼有灌溉、生产生活供水、物种保护、养殖、旅游等多项功能, $4 \sim 10$ 月总降水量约占全年总降水量的 77%, 且 $5 \sim 8$ 月为丰水期^[16], 湖内水生生物种类繁多, 生物饵料资源充足, 水域生物生产力高. 在洪湖湿地自然保护区的基础上, 根据洪湖不同部位水流、水深、植被、保护和利用情况将其分为 4 个区域: 养殖区、开阔水体、河流入湖区、保护区^[17], 目标水质是地表水Ⅲ类 (湖北省水功能区划). 洪湖东南部区域主要通过涵闸与长江相连, 北部区域可接受四湖总干渠的来水, 水产养殖在围网养殖区占有较大面积, 保护区主要以湿地保护为主, 植被受人为干扰较小. 其中洪湖蓝田生态旅游风景区位于洪湖北部的河流入湖区旁, 北部河流入湖区周边包括数量众多的居民区和工业区, 同时分布大量的水田、旱地, 种植类型以水稻和棉花等作物为主 (图 2).



图 1 洪湖地理位置示意

Fig. 1 Location of Honghu Lake

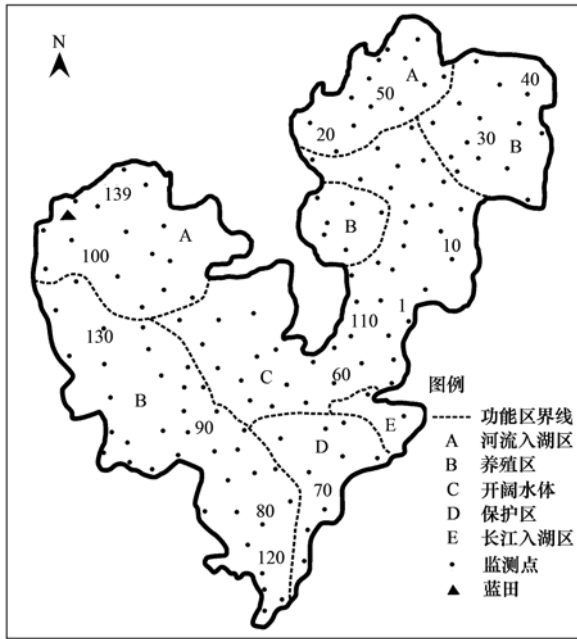


图 2 洪湖监测点位和水功能区划示意

Fig. 2 Distributions of monitoring sites and water environment function zones in Honghu Lake

2 材料与方法

2.1 数据来源

水质监测和分析数据来源于实地监测和实验室分析;土地利用类型数据、人口数据、水产养殖等数据来源于实地调查勘测和荆州市统计年鉴 2010~2012、湖北省统计年鉴 2010~2012 及其它相关报表;2010 年水质监测数据来源于荆州市环境保护局、荆州市环境科学研究所提供的洪湖水水质全年监测平均值。

2.2 水样、水生生物采集

洪湖为浅水草型湖泊,根据《水质湖泊和水库采样技术指导》GB/T 14581-93、《中华人民共和国地表水环境质量标准》GB 3838-2002 等湖泊水质采样的相关要求^[18,19],同时结合本次水质监测的目的和洪湖各区域的水环境功能确定水质监测点位(图 2)。于 2012 年 8 月 20~21 日(天气阴,微风),由两个监测团队运用 GPS 对覆盖全湖的具有代表性的 139 个监测点位进行同步采样,同时在主要河流入湖口处、围网养殖区和工农业、旅游业等产业集中区域增设监测点位;于 8 月 22~23 日对洪湖主要河流入湖口处上游 100~150 m 处采集入湖河流水样。分析的水环境指标包括水温(T)、pH 值、透明度(SD)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)、高锰酸盐指数、溶解氧

(DO),所有水样于水面下 0.5 m 处采集。同时在全湖 41 个监测点位上采用平行多次重复随机小样方的取样方法,用 20 cm × 50 cm 的采草器采集水生植物,采集 0.1 m² 面积的水生植物地上部分,在同一采样点采集 3 次,样品采集后立即用湖水清洗去泥,装入样品袋内,室内去除枯枝、败叶和其他杂质;去除植物体表多余的水分,称鲜重。采用 3 次样品的重量平均值为该样方水生植物生物量;并记录各点的物种组成、数目。

2.3 水质分析方法

除 pH 值、 DO 、 T 和 SD 现场测定外,其他指标均于 8 月 22~25 日在湖北大学实验室分析得出,其中 pH 值使用玻璃电极法(GB/T 6920-86), DO 使用电化学探头法(GB 11913-89),高锰酸盐指数使用酸性法(GB 11892-89), TN 使用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894-89), TP 使用钼锑抗分光光度法(GB 11893-89), NH_4^+-N 使用纳氏试剂光度法(GB 7479-87), SD 使用塞克盘法(GB 11901-89)。所有样品均设置 2 个平行样,测量分析的相对标准偏差均保持在 10% 以内。依据本次总氮、总磷、化学需氧量、氨氮 4 个具有代表性的水质参数,选择单因子指数评价法进行水质综合评价^[20] 以得到洪湖水体综合评价结果。

2.4 GIS 空间插值法

空间插值方法就是在已知有限空间点的属性值,采用数学公式对区域内其他空间点进行插值,从而将点数据转换成面数据^[21]。研究中选用空间估值效果明显好于其他方法的 Kriging 内插法进行洪湖水水质参数的空间分析^[22],在 ArcGIS 9.0 空间分析中利用实测监测点数据建立高锰酸盐指数、 TN 、 TP 等影响因子以及水质类别点状矢量分布图,采用 GIS 矢量叠加技术得到水质类别图层叠加的综合评价图,并按《中华人民共和国地表水环境质量标准》GB 3838-2002 将研究区域内水质分为五类:Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类。同时运用统计学的理论和方法,结合研究区湖泊的人为用途、水域生态保护及生物多样性的要求,对湖泊水质的时空变异性进行研究。

3 结果与分析

通过对洪湖水体 139 个监测点的高密度采样分析,并利用 GIS 空间插值得到丰水期洪湖水体中 TN 、 TP 、高锰酸盐指数、 NH_4^+-N 、 SD 、水生植物生物量和水质类别的空间变异分布图(图 3~9),比较

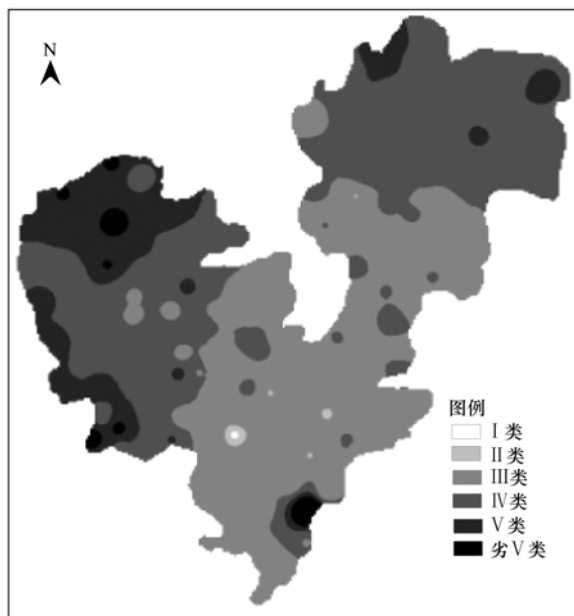


图3 TN空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of TN

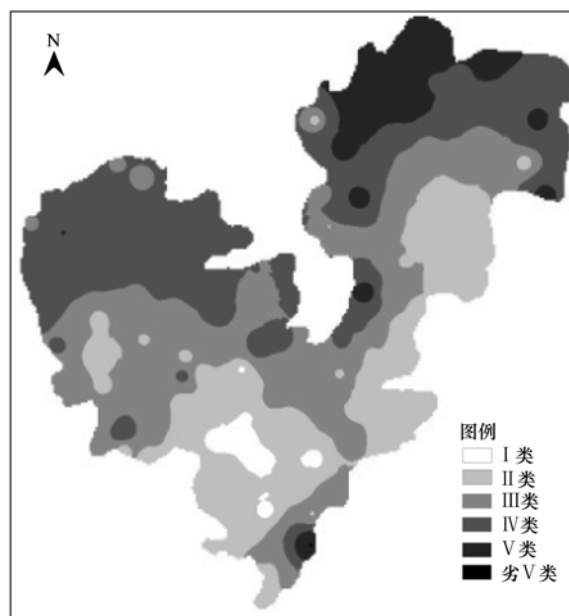


图5 TP空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of TP

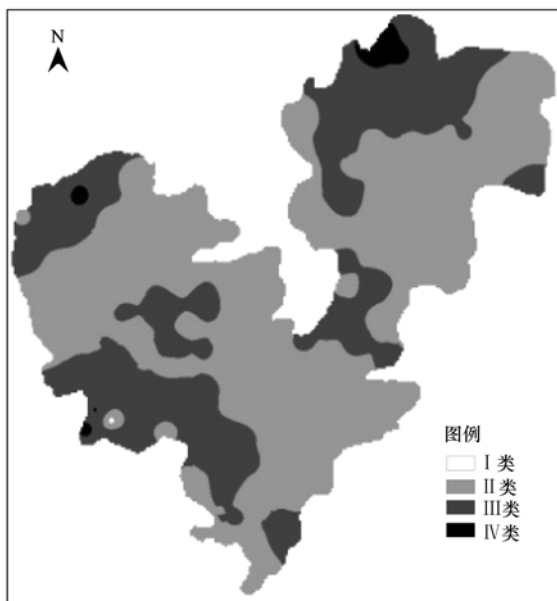
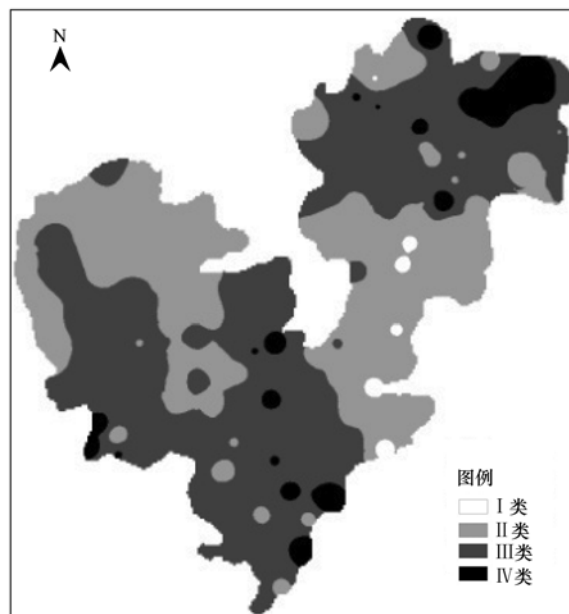
图4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 空间分布特征Fig. 4 Spatial distribution characteristics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 

图6 高锰酸盐指数空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of permanganate index

清晰地发现 TN、TP、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的污染程度在空间上具有显著的空间相关性,北部地区污染较重,各污染物因子含量高,只有极少数监测点的 TN、TP、高锰酸盐指数数值在南部出现异常(图3、图5、图6),在空间上总体呈现出自南向北逐步增高的变化趋势,污染程度表现为北部河流入湖区>围网养殖区>开阔水体>保护区>南部长江入湖区的趋势,表明洪湖各区域受到不同程度的污染。同时依据综合营养状态指数法计算得出洪湖北部河流

入湖区为轻度富营养化水平,其他区域基本处于中营养水平,但是其指数相对较高,总体上全湖呈现向轻度富营养化水平转变的趋势。其中Ⅲ类水质主要分布于南部区域的河流入湖区、保护区和开阔水体,北部河流入湖区和蓝田生态旅游区附近水质为地表水 V 类(图8),TN 在该段时间超过目标水质 59%,TP 超标 35.2%,高锰酸盐指数超标 13.7%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 超标 4.3%,综合水质超标 66.2%(表1)。丰水期全湖以地表水Ⅳ类为主,污染严重,污染趋势

表 1 丰水期污染因子的水质类别和数值

Table 1 Water quality and numerical of pollution factors during the high water-level period									
污染因子	最低值 /mg·L ⁻¹	最高值 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹	I 类/%	II 类/%	III 类/%	IV 类/%	V 类/%	劣 V 类/%
NH ₄ ⁺ -N	0.084	1.210	0.515	0.7	63.3	31.7	4.3	0	0
TN	0.105	4.369	1.143	0.7	3.6	36.7	41.7	11.5	5.8
TP	0.005	0.203	0.042	8.6	31.7	24.5	23.7	10.8	0.7
高锰酸盐指数	0.99	8.84	4.31	4.2	46.8	35.3	13.7	0	0
综合水质				0	0	33.8	40.3	19.4	6.5

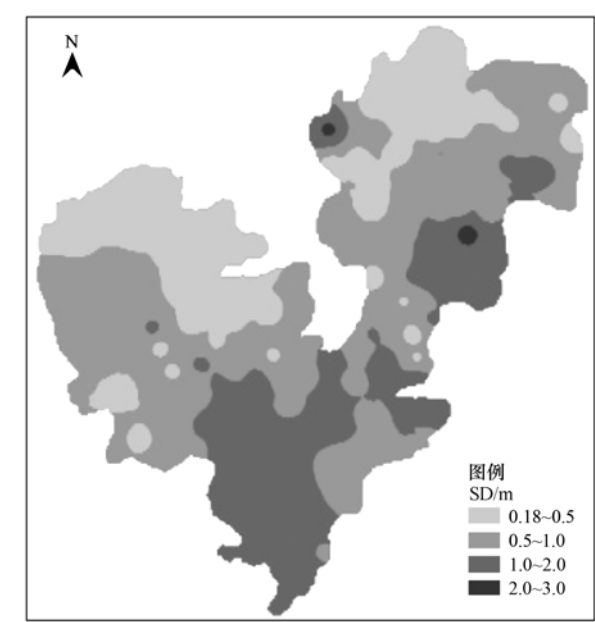


图 7 SD 空间分布特征
Fig. 7 Spatial distribution characteristics of SD

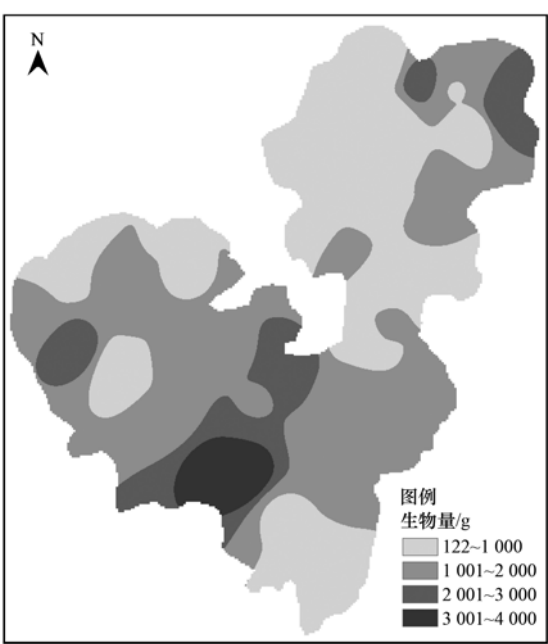


图 9 水生植物生物量空间分布特征
Fig. 9 Spatial distribution characteristics of the biomass of aquatic plants

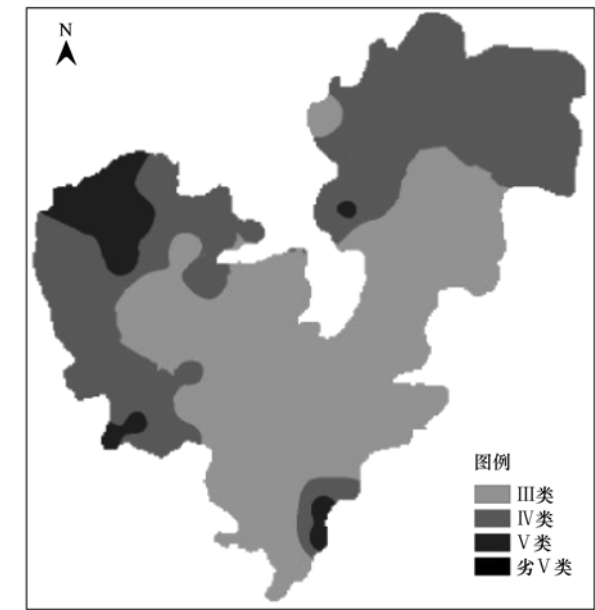


图 8 水质类别空间分布特征
Fig. 8 Spatial distribution characteristics of water quality

类似,主要超标因子为 TN,其空间变异幅度大,污染程度最高,其次为 TP、高锰酸盐指数和NH₄⁺-N的污染,湖中 P 含量空间变化较小,同时有机物和 NH₄⁺-N含量相对不高. 水体中 DO 达到目标,以 I 类为主,只有靠蓝田旅游区和部分养殖区内数值相对较低;而决定洪湖水系统化学稳定性的 pH 值都保持为弱碱性水体;丰水期的透明度在南部长江入湖口处数值较小,北部区域的透明度劣于南部区域(图 7);在开阔水体和围网养殖区部分区域内水生植物的分布量较高,处于 20 ~ 40 kg·m⁻²水平,而北部河流入湖区的生物量相对较少,维持在 1 ~ 10 kg·m⁻²之间(图 9).

4 讨论

4.1 洪湖北部水质变化特征及驱动力分析

洪湖水质受不同湖区自身条件、污染来源、湖

区流场和流动性差异等因素的影响,研究区湖泊水质参数在丰水期具有显著的空间变异特征,其中 TN 的空间变异从 $0.105 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升到 $4.369 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP 的空间变异从 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升到 $0.203 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、高锰酸盐指数的空间变异从 $0.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升到 $8.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的空间变异从 $0.084 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升到 $1.210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,各指数均在此段时间大幅上升. 丰水期北部区域内的河流入湖区和围网养殖区(V类和劣V类为主)的N、P、有机物的污染程度很大(图3~6),同时水体酸碱指数大于8的高值区主要也分布于此,但是透明度却在0.5 m以下(图7),其驱动因素为2011年洪湖流域工业污染源中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 排放量为871.1 t,农村生活废水中TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的排放量分别905.5 t、64.9 t、779.4 t^[23],并且大部分位于洪湖周边的农村地区. 由于缺失污水收集、处理设施,造成工业废水和生活污水未经处理就随河网汇入四湖总干渠并流入洪湖,导致洪湖水体N、P和有机物含量的增加,从而使洪湖出现水体富营养化趋势^[24];同时流域内的农业种植区域主要分布于洪湖的北部,以水稻、棉花占有比例最大,其中2012年洪湖市和监利县中稻种植面积分别为70万亩、114.2万亩,各占其粮食总面积的51.8%和42.5%;棉花种植面积也已达到10.36万亩和33.66万亩,8月为其生长季节,需向水田、旱地中施加大量含N、P的化肥,而流域内化肥的利用率仅为30%左右^[25],未经作物充分吸收的化肥就会随回归水流入河网,使北部入湖河流中TN、TP、高锰酸盐指数的质量浓度分别高达1.692、0.182、6.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,致使入湖口处的TN、TP、高锰酸盐指数质量浓度分别高于1.5、0.1、4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,造成农业面源污染对洪湖水质的影响日趋严重^[26,27]. 而北部湖区周围涵闸等水利设施的建设,和围湖造田改变了湖环境和水系格局,切断了湖河生态系统之间的天然生态联系通道,造成彼此之间物质循环、能量流通、信息传递受阻^[28],同时该区内水生植物分布量少,生物量只处于1~10 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的水平,使营养物质不能被植物吸收、同化,导致水质恶化的趋势不断加剧. 蓝田旅游区附近区域内的水质已由河流入湖区的V类水质恶化到劣V类水质(图8),其中TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均质量浓度由2001年蓝田旅游区对外开园后的0.33、0.018、0.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 急剧上升到目前的1.143、0.042、0.515 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,主要是由于旅游活动中产生的部分生活污水未经处理就直接入湖以及该段时间内旅游

开发中人为造成的湖面萎缩削减了该区域湖水淡化稀释能力,同时8月是蓝田旅游区的旅游旺季.

4.2 洪湖西南部水质变化特征及驱动力分析

围网养殖区内环境污染综合指数比较高,有机物的含量比河流入湖区更高,对湖泊的局部污染最严重,其中该区内TN质量浓度高达1~1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,部分水体的质量浓度已超过2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但氨氮质量浓度却过低的保持在0.5~1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,主要驱动力是养殖中大量投放饵料,同时该区围网极多、网眼密集阻碍了各污染物的扩散以及削弱了水体的自净能力,加速了水体富营养化进程^[29]. 虽然围网自2000年后已逐步开始拆除^[30],但是2012年的剩余养殖面积仍然接近14万亩,超出政策安置面积近9万亩,其中绝大部分位于养殖区内,同时该区域内水生植物生物量很大,基本处于20~30 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 水平,部分区域高达30~40 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,可能是由于近些年来一直通过保护性措施和人工种植水生植物使该区域内生物量逐渐恢复到较高的水平^[31],但是养殖中依然存在打捞水草进行喂养的行为,使水生植物遭到一定的破坏,同时未食用完的水草沉入湖底,造成有机物不断富集,高锰酸盐指数质量浓度逐步高于其他湖区(图6);N、P、有机物等营养物质进入水体速度加快,水中营养物质的输入大于输出,使围网养殖区的营养盐含量明显高于保护区和开阔水体.

4.3 洪湖南部和保护区水质变化特征及驱动力分析

全湖水质最好的区域为与长江相连的南部入湖口和保护区,主要驱动力是洪湖在长江汛期通过涵闸调节接纳大量长江来水,水交换频繁,吞吐流量大,致使该区域的流场结构发生变化,导致湖水中N、P和有机物浓度得到稀释,水质偏好. 同时该区长江进水中的TN、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度(0.418、0.021、0.241 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)远远低于全湖的平均质量浓度(1.143、0.042、0.515 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),使该区域内TN、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度分别降低到0.5、0.025、0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,高锰酸盐指数已达到Ⅱ类水质,综合水质(Ⅲ类)优于北部入湖口处(V类). 而SD在此区域内维持在0.5~1 m,远低于保护区和围网养殖区的1~2 m(图7),更是直接说明在交换过程中水体流速大,波浪对湖底底泥进行搅动,使水中含有的微生物、悬浮物等物质难以沉降而产生混浊现象^[32].

总体上2012年丰水期的水质污染程度比2010年全年较轻,主要驱动因素可能是由于丰水期充足

的降雨和湖区适宜的水温、太阳辐射等环境因素为水生植物的大量繁殖提供了极其有利的条件,同时丰水期是洪湖沉水植物中占生物量比例较大的菹齿眼子菜的花果期和金鱼藻、狐尾藻的果期^[33],其在生长、繁殖过程中能够不断地吸附、分解水中的 N、P 等营养盐和污染物,使水质得到净化,致使 N、P、高锰酸盐指数的平均质量浓度由 2010 年的 1.28、0.047、4.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到丰水期的 1.143、0.042、4.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但是全湖达到地表水Ⅲ类的目标水质比例仍只有 33.8%,可能是由于 2006 年三峡大坝建成后,枯、洪水季节水位变化减小,中水位水期长,因而影响“四湖”地区地下水位起落幅度变小,造成滞水时间延长和地下水位上升,加重洪湖渍害^[34],影响了水质进一步的好转;同时 2012 年湖区周边洪湖、监利两县市淡水养殖面积分别达到 86.94 万亩、56.99 万亩,较 2000 年增加了 3 倍以上^[10],而 2011 年洪湖流域内水产养殖产生的 TN、TP 入湖量已达到 1 863.9 t 和 370.4 t^[23],使水产养殖也成为污染来源之一^[35]。洪湖夏季盛行的东南季风和西南季风对水体也产生了一定的影响^[36],主要表现在 DO 在开阔水体的值较大,处于 8.1~11.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,高于北部区域的 6.2~7.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时较近几年的数值也有明显的上升,可能是因洪湖较浅,夏季的风场引起湖区表层和底层流场的变化,使表层水体与空气充分接触,这也更加印证洪湖流场变化对水质的影响,所以洪湖呈现的水质特征与其特殊的环境因子密切相关,是营养因子和环境因子共同作用的结果,同时也说明由于其特殊地域环境因子的作用造成洪湖生态脆弱,湖泊承载能力不高。

本研究根据洪湖不同区域的生态环境、资源条件和经济社会发展水平等客观差异形成的多种主体功能区,来比较不同湖区的功能与水质在时间和空间上的关系,以分析不同尺度上的水环境问题,而密集的水质监测允许对洪湖的水质及其时空变化特点、水生态系统服务功能的分区和总体分异规律进行深入分析。但是水环境问题是一个长期的动态过程,只有连续地评估才能了解和掌握水环境变化特点以及人类活动和管理对其产生的影响,本研究只是对洪湖水环境现状的一个初步估算,还不能完全清楚地表明流域水环境恶化与各影响因素之间的相互作用关系,在今后的研究中需要长期、连续地对洪湖水水质进行监测、分析,以进一步认识研究区内水质在时间、空间上的差异性,从而为洪湖流域解决水污染问题提供数据、理论和方法支持。

5 结论

(1)洪湖水水质受环境因子和营养因子的共同作用,丰水期洪湖水水质污染程度在空间上呈现出北部河流入湖区>围网养殖区>开阔水体>保护区>南部长江入湖区的趋势;各污染因子对水质的贡献率依次为 $\text{TN}>\text{TP}>\text{高锰酸盐指数}>\text{NH}_4^+-\text{N}>\text{DO}$ 。

(2)从驱动力分析来看,北部河流入湖区因沿途河流接纳的工业和生活废水直接排入湖区而污染最严重,该区域旁的蓝田旅游区的水质受旅游活动的影响已恶化;围网养殖区内的水质最为显著的特点是受饵料投放和水草打捞的影响,使水体中各营养盐含量显著增高;开阔水体和保护区的水质相对偏好,主要受季风等环境因子的影响;南部长江入湖区的水质因其与长江水体交换频繁,透明度降低,水体得到稀释净化,水质较好。

(3)要从根本上改变洪湖的营养化状态,应大力控制北部湖区周围的工业废水和城镇生活污水的排放,减少流域内化肥、农药的使用量;同时应控制养殖面积,减少饵料的投放量,使湖内水草资源得以恢复和可持续利用,逐步恢复其水体自净能力,使洪湖富营养化水质恶化趋势得以遏制,实现洪湖水环境生态的可持续发展。

参考文献:

- [1] 孙金华,曹晓峰,黄艺,等.滇池水质时空特征及与流域人类活动的关系[J].湖泊科学,2012,24(3):347-354.
- [2] 龚春生,毛献忠,张锡辉.城市浅水湖泊雨水溢流总磷输运的数值模拟[J].环境科学,2009,30(4):1016-1022.
- [3] 邱小琮,赵红雪,孙晓雪.宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J].环境科学,2012,33(7):2265-2271.
- [4] Lehrter J C. Regulation of eutrophication susceptibility in oligohaline regions of a northern Gulf of Mexico estuary, Mobile Bay, Alabama[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(8): 1446-1460.
- [5] 张婷,刘静玲,王雪梅.白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J].环境科学学报,2010,30(2):261-267.
- [6] 李一平,逢勇,向军.太湖水质时空分布特征及内源释放规律研究[J].环境科学学报,2005,25(3):300-306.
- [7] Xing K X, Guo H C, Sun Y F, et al. Assessment of the spatial-temporal eutrophic character in the Lake Dianchi[J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 37-43.
- [8] 温胜芳,单保庆,张洪.巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J].环境科学,2012,33(7):2322-2329.
- [9] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J].湖泊科学,2010,22(6):799-810.
- [10] 可群,梁益同,周金莲,等.人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响[J].生态学报,2014,34(5):1302-1310.
- [11] 汪红军,颜昌龙,李嗣新,等.洪湖水水质空间特异性及主导

- 因子分析[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(3): 72-75.
- [12] 胡学玉, 陈德林, 艾天成. 1990-2003 年洪湖水体环境质量演变分析[J]. 湿地科学, 2006, **4**(2): 115-120.
- [13] 姜刘志, 王学雷, 厉恩华, 等. 生态恢复前后的洪湖水质变化特征及驱动因素[J]. 湿地科学, 2012, **10**(2): 188-193.
- [14] Zhou A M, Wang D S, Tang H X. Phosphorus fractionation and bio-availability in Taihu Lake (China) sediment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, **17**(3): 384-388.
- [15] 王世岩, 刘晓波, 刘畅. 洱海表层水体中氮素空间变异分析[J]. 水资源保护, 2010, **26**(6): 37-41.
- [16] 班璇, 余成, 魏珂, 等. 围网养殖对洪湖水质的影响分析[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(9): 125-129.
- [17] 王学雷, 厉恩华, 余璟, 等. 生态恢复前后洪湖水生植被景观各向异性动态变化研究[J]. 湿地科学, 2010, **8**(2): 105-109.
- [18] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 25-27.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版: 增补版). 北京: 中国科学出版社, 2002.
- [20] 李兆华, 李瑞勤. 清江水污染防治研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 105-110.
- [21] Chang K T 著. 陈健飞等译. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 11-16.
- [22] 卢进登, 帅方敏, 梁雄兵, 等. 空间插值法在湖泊水污染现状评价中的应用研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, **22**(3): 125-128.
- [23] 李洁. 洪湖流域水污染源解析与环境容量研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2013. 16-22.
- [24] 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 等. 合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1718-1726.
- [25] 李华刚, 赵丽生. 洪湖市中稻产能开发潜力探析[J]. 现代农业科技, 2014, (5): 85-86.
- [26] 杨启红, 张慧婷, 胡望斌, 等. 长江中游地下水水位变化对氮输出的影响研究[J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(2): 1-6.
- [27] 靳晓莉, 高俊峰, 赵广举. 太湖流域近 20 年社会经济发展对水环境影响及发展趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(3): 298-302.
- [28] 顾延生, 李颀家, 秦养民, 等. 历史时期以来人类活动与江汉湖群生态环境演变[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2013, **38**(S1): 133-144.
- [29] 王夏晖, 陆军, 张庆忠, 等. 基于流域尺度的农业非点源污染物空间排放特征与总量控制研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2554-2561.
- [30] 刘平. 洪湖湿地恢复工程效益评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. 32-37.
- [31] 闫伟伟. 基于 GIS 的洪湖湿地水生植物分布结构的研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2013. 22-27.
- [32] James R T, Havens K, Zhu G W, *et al.* Comparative analysis of nutrients, chlorophyll and transparency in two large shallow lakes (Lake Taihu, P. R. China and Lake Okeechobee, USA) [J]. Hydrobiologia, 2009, **627**(1): 211-231.
- [33] 赵家荣, 刘艳玲. 水生植物图鉴[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009. 21-33.
- [34] 吴后建, 王学雷, 宁龙梅, 等. 变化环境下洪湖湿地生态恢复初步研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, **40**(1): 124-127.
- [35] 马玉宝, 陈丽雯, 刘静静, 等. 洪湖流域农业面源污染调查与污染负荷核算[J]. 湖北农业科学, 2013, **52**(4): 803-806.
- [36] 欧阳潇然. 气象场驱动下太湖水温及溶解氧的数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. 21-25.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行