

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.1

第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及耐药基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤钾空间分布及农作物钾富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近 30 年水质变化为例

田伟^{1,2}, 杨周生^{1*}, 邵克强², 潘辉³, 胡洋², 白承荣², 姜星宇², 高光², 汤祥明^{2*}

(1. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241003; 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; 3. 江苏江达生态环境科技有限公司, 无锡 214125)

摘要: 自“十五”以来, 为改善水质, 我国许多城市湖泊均先后采取了水环境治理措施。为了解这些措施对富营养化城市湖泊水质改善成效, 根据中国科学院太湖湖泊生态系统研究站对蠡湖的长期监测数据和本课题组 2017 年对蠡湖的两次调查结果进行汇总分析, 探讨了无锡蠡湖综合整治前后近 30 年来水环境质量变化情况。结果表明: ① TN、TP、高锰酸盐指数和 Chl-a 等水质指标的浓度从 20 世纪 90 年代初开始呈现快速上升的趋势, 1997~2003 年间处于最差状态, 2003 年经过综合整治后呈现逐年递减趋势, 但近两年略有反弹; 水体透明度整治前后无明显改善。② 从季节上看, 综合整治之前, 水质波动较大; 综合整治之后, 蠡湖各项指标出现显著差异, 冬季水质明显好于夏季。③ 从区域上来看, 蠡湖西部水质明显优于东部湖区。综合其他城市湖泊治理情况, 研究表明水环境治理可以改善湖泊水质, 但在水质改善后需要恢复草型生态系统, 推进以生物调控为主的生态修复, 逐步提升物种多样性, 真正恢复湖泊生态系统服务功能。

关键词: 蠡湖; 城市湖泊; 富营养化; 水环境整治; 水质改善

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0183-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906022

Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years

TIAN Wei^{1,2}, YANG Zhou-sheng^{1*}, SHAO Ke-qiang², PAN Hui³, HU Yang², BAI Cheng-rong², JIANG Xing-yu², GAO Guang², TANG Xiang-ming^{2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Jiangsu Jianda Ecological Technology Co., Ltd., Wuxi 214125, China)

Abstract: In order to improve water quality, many urban lakes in China have undergone environmental restoration since the introduction of China's tenth five-year plan. To understand the effectiveness of improvement projects on eutrophic urban lakes, we analyze the changes in water quality of Lihu Lake over the past 30 years, i. e., before and after comprehensive remediation. We use long-term monitoring data from TLLER and from two regional investigations undertaken in 2017. The results were as follows.

① Concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP), the permanganate index, and chlorophyll-a (Chl-a) in Lihu Lake all increased dramatically since the 1990s and reached the worst levels during the period from 1997 to 2003. After comprehensive improvement measures for the lake undertaken by the local government in 2003, the water quality improved remarkably year by year, but reduced slightly in the past two years assessed here. There was no obvious improvement in water transparency when comparing data from before to after the remediation. ② Before the improvement measures, the water quality fluctuated greatly with season, however, water quality sampled during the winter post remediation was significantly better than during the summer. ③ Spatially, the water quality in the western region of Lihu Lake was significantly better than of that in the eastern region. When comparing government measures in different eutrophic urban lakes, we found that engineering management measures can improve the water quality of urban lakes over a relatively short time period. However, after the water quality has been improved, it is necessary to restore the macrophyte-dominated ecosystem, which should be supplemented by ecological restoration based on biological regulation. By improving species diversity, the aquatic ecosystem can be successfully transformed from being phytoplankton-dominated to macrophyte-dominated, thereby enabling the service functions of a lake ecosystem to be truly restored.

Key words: Lihu Lake; urban lake; eutrophication; water environment improvement; water quality improvement

近几十年来, 随着国民经济的发展, 我国许多湖泊出现河湖水力和生态联系阻隔、水体富营养化、

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-07-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07203-004); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展项目 (NIGLAS2017GH05); 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDJ-SSW-DQC008)

作者简介: 田伟 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市湖泊生态环境修复, E-mail: tianwei94glas@163.com

* 通信作者, E-mail: yzhoushe@mail.ahnu.edu.cn; xmtang@niglas.ac.cn

水质下降、生物多样性减少与生态系统退化等一系列环境问题.这种主要由富营养化导致的湖泊水环境问题,在我国东部平原区尤为严重^[1,2].城市湖泊作为水体富营养化的重灾区,由于水浅、自身环境容量小,在受纳大量外源污染时,水质急剧恶化;其次,污染物进入湖体后沉积不稳定,底泥在风浪扰动时极易与湖水发生营养物质交换,造成水体二次污染^[3,4].因此,如何控制城市湖泊富营养化及恢复其原有健康的水生生态系统,已成为环境科学、淡水生态学和湖沼学研究的热点之一^[5~8].

蠡湖(31.48°~31.55°N, 120.22°~120.29°E),又名五里湖,是一个典型的浅水城市湖泊.它位于无锡市西南部,是太湖西北部伸入无锡市区的一个湖湾,东西长约6.0 km,南北宽0.3~1.8 km,常水位时湖体周长21 km,面积约9.1 km²^[9].20世纪50年代,蠡湖水草丰茂,清澈见底,水质处于中营养水平,是无锡市区重要水源地^[10].自20世纪60年代后期,蠡湖开始大规模围湖造田和围网养殖,水域面积急剧缩减33%,水生植被大面积消失,生态系统恶化.到80年代,随着蠡湖周边乡镇企业的迅速兴起,湖岸进一步被侵占蚕食,大量生产生活污水未经处理直接入湖,使得蠡湖水质加速恶化,生态环境严重退化,成为太湖地区富营养化最为严重的水域^[11].本世纪初,无锡市对蠡湖全面实施生态清淤、污水截流、退渔还湖、生态修复、湖岸整治和环湖林带建设等水环境综合整治工程^[12],使得蠡湖水质和生态环境相比整治前发生了显著变化.

本文利用国家野外科学观测研究站——太湖湖泊生态系统研究站长期监测数据以及2017年蠡湖全湖水水质调查结果,结合相关历史文献资料,以国家五年规划为时间节点,分析蠡湖在各时间段的水质状况,探讨蠡湖综合整治十几年后水环境质量变化情况,以期对蠡湖进一步实施水环境深度改善提供基础资料.同时,通过对比分析国内其他城市湖泊治理成效,总结城市湖泊水环境治理得失经验,以期对类似湖泊乃至大型浅水湖泊综合治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 采样点的布设

根据蠡湖的自然状况及综合整治措施的差异性,将蠡湖划分为3个区(图1)^[13],其中A区为“西蠡湖”北部退渔还湖区,蠡堤以东水域,实施过“干湖清淤”工程;B区为从蠡堤至宝界桥的“西蠡湖”南部和“东蠡湖”部分水域,曾经展开过底泥环保疏浚治理工程和水生植被生态重建工程;C区为“东蠡湖”的大部分水域,包括宝界桥和蠡湖大桥之间的

宽阔水域,以及蠡湖大桥以东的金城湾水域,其沿岸实施了绿化整治工程.

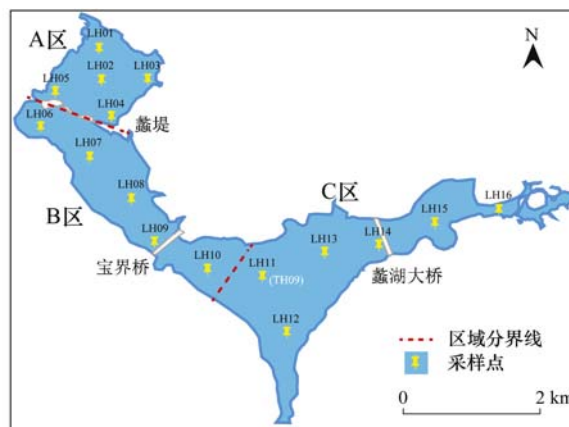


图1 蠡湖水水质监测点位示意

Fig. 1 Monitoring points and location of Lihu Lake

太湖湖泊生态系统研究站(TLLER,太湖站)在蠡湖布设的一个长期季度性监测点(TH09,图1),位于蠡湖中部,采样分别于每年2月(冬季)、5月(春季)、8月(夏季)和11月(秋季)的中旬进行.此外,为了全面了解蠡湖不同湖区水质,课题组分别于2017年7月和12月在蠡湖布设了16个采样点,分别在A区(采样点LH1~LH5)、B区(采样点LH6~LH10)和C区(采样点LH11~LH16)进行采样.

1.2 理化数据测定

用塞氏盘现场测定水体透明度.然后采集表层水样(水面下约50 cm)带回实验室分析水质指标,所有水质参数测定方法均参照文献^[14].本文主要利用总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数、叶绿素a(Chl-a)和透明度(SD)这5项检测指标对蠡湖水质进行评价.

1.3 数据收集及处理分析

选取1991~2017年TN、TP、高锰酸盐指数、Chl-a浓度和SD年平均值,对蠡湖年际水质状况进行分析,其中1991~1997年的数据引用相关文献资料^[15,16],1998~2017年数据来自太湖站.空间分布特征数据来自课题组2017年7月和12月两次蠡湖水质调查结果.用Excel 2017对数据进行初步整理,用R软件平台进行非参数Kruskal-Wallis秩和检验分别对水质指标的季节及区域差异显著性进行分析.利用Arcgis 10.2,Origin 2017和R对分析结果作图.采用综合营养状态指数对蠡湖水质进行综合评价^[17],根据0~100连续数值对湖泊营养状态进行分级.

2 结果与分析

2.1 水环境背景

从1991~2017年蠡湖水体TN浓度看,TN从

“八五”到“十二五”的 5 a 平均值分别为 4.78、5.66、6.98、3.05 和 1.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，总体呈现先升高

后降低的趋势(图 2)。从 90 年代初开始，蠡湖 TN 呈现上升趋势，到 2003 年达到峰值，相比 1991 年增长

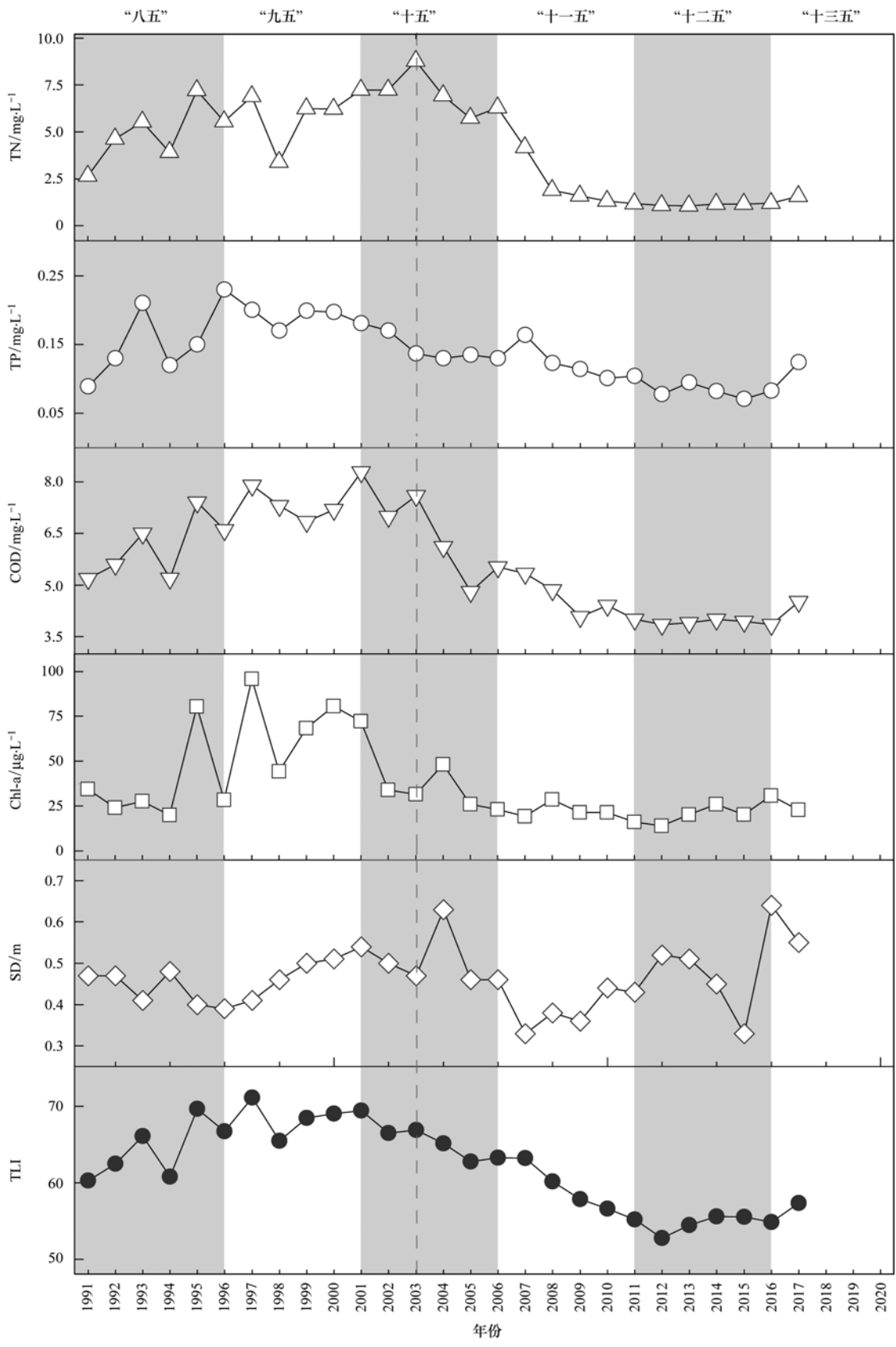


图 2 蠡湖水水质长期变化特征(1991 ~ 2017 年)

Fig. 2 Long-term variations in the water quality of Lihu Lake (1991-2017)

了194%。2003年以后,TN浓度得到控制,总体呈现下降趋势。2013年降到最低值 $1.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达地表水Ⅳ类标准(根据GB 3838-2002《地表水环境质量标准》评价,下同),较2003年峰值降幅86%,但是2015~2017年,TN浓度出现上升态势。

TP也呈现明显的先升高后降低的趋势,从“八五”到“十二五”的5a平均值分别为0.140、0.199、0.152、0.126和 $0.086\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。TP浓度在1996年达到峰值,相比1991年增长了158%;1996年往后呈波动下降,但2007年TP异常升高,这与太湖梅梁湾暴发大规模蓝藻水华时间点相对应,说明较高的磷浓度出现可能与蓝藻水华发生有关;到2015年,蠡湖的TP年平均浓度降到最低值,较1996年峰值降幅69%;2016和2017年TP浓度也出现反弹,分别升高到 $0.083\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.124\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较2015年上升17%和75%。

高锰酸盐指数在2003年以前呈上升趋势,2003年之后呈现下降。在“九五”前后(1997~2001年)一直处于高浓度,其5a均值为 $7.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,并在2001年达最大值。到“十二五”期间,高锰酸盐指数的5a平均值下降至 $3.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较历史最高浓度值降幅47%;2017年较往年有升高。

随着蠡湖水体中营养盐浓度得到控制,Chl-a浓度也发生明显变化。Chl-a在1997~2001年期间达最高浓度水平,5a平均值为 $72.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此后,整体呈现下降趋势,到“十二五”期间,其5a均值下降至 $19.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,较治理前最高浓度降幅73%。

SD在过去十几年中相比其他指标波动较多,有几个明显峰点,一个峰值出现在2004年,随后几年呈现下降趋势;2007年后SD逐渐升高,在2012年出现另一个峰值,而后几年又出现下降,到2015年达最小值,且为近十几年最低;还有一个峰值在2016年,SD陡然升高,较上年上涨94%;2017年又下降。

TLI分析结果表明,1991~2001年间蠡湖水质一直处于中度富营养化水平,1997年富营养化程度最高($\text{TLI}_{1997}=71$);自2001年后,TLI开始下降,2012年降到最低值($\text{TLI}_{2012}=52$),但仍处于轻度富营养化状态;值得注意的是从2012年往后,TLI出现反弹,说明蠡湖整体上富营养化问题没有得到有效解决。

2.2 蠡湖水质指标季节变化特征

选取太湖站1998~2017年监测数据对蠡湖进行季节趋势变化(图3)及差异性(图4、图5)分析,除TN和高锰酸盐指数整体上季节差不显著外($P>0.05$),TP、Chl-a和SD表现出明显的季节差异。

TN在1998~2017年整体上季节差异性不显著,但在2008年之前季节差异显著($P<0.01$),冬季多年平均值为 $8.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}>$ 春季($6.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $>$ 秋季($5.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $>$ 夏季($3.71\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。在综合整治效果逐步显现的2008年往后,冬春季TN浓度明显降低,TN浓度的季节变化趋势为夏季 $>$ 秋季 $>$ 冬季 $>$ 春季,多年的平均值分别为1.62、1.43、1.16和 $1.09\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

在治理前,蠡湖TP浓度季节变化有波动,但差异不显著($P>0.05$);2004年之后,TP呈现显著季节差异($P<0.01$),夏季浓度值明显高于其他季节。TP浓度依次为夏季 $>$ 秋季 $>$ 春季 $>$ 冬季,多年平均值分别为0.17、0.11、0.09和 $0.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

高锰酸盐指数季节差异不显著($P>0.05$),但综合整治前后有所不同,这种趋势与TP相似。在2005之前蠡湖高锰酸盐指数各季节差异不显著($P>0.05$);2009年后季节差异显著($P<0.01$),表现为夏季 $>$ 春季 $>$ 秋季 $>$ 冬季。

1998~2017年Chl-a总体上季节变化显著($P<0.001$),春季均值为 $45.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,夏季均值达 $49.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,秋季均值为 $24.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而冬季均值仅为 $15.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。SD多年季节性差异也显著($P<0.001$),且与Chl-a趋势相反,SD冬季均值要显著高于秋季、春季和夏季。

蠡湖TLI整体上存在明显季节性差异($P<0.05$),但在2009年之前季节差异不显著($P>0.05$),整体均处于富营养化状态。2009~2017年间,蠡湖整体季节变化的差异达到显著水平($P<0.01$),总体趋势为夏季 $>$ 秋季 $>$ 春季 $>$ 冬季,冬季已经达到中营养水平,但夏季仍处于富营养水平。

2.3 蠡湖水质指标空间变化特征

全湖采样结果显示夏季蠡湖TN高值主要分布在C区,水质全部差于Ⅳ类水,个别点位水质甚至为劣Ⅴ类(图5)。B区水质处于Ⅳ~Ⅴ类水质,而A区整体已达Ⅲ类水质。TP浓度显示A区为Ⅲ类,B区为Ⅳ~Ⅴ类,C区全部为劣Ⅴ类。A区高锰酸盐指数要优于B区和C区,均值分别为6.03、7.36和 $7.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Chl-a也呈现较显著的空间差异性,在退渔还湖的A区,夏季均值为 $51.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在生态修复的B区,均值为 $93.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在居民密集的C区,均值达 $151.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。透明度A区 $>$ B区 $>$ C区。

冬季蠡湖水质较夏季有一定提升,但是TN、TP和高锰酸盐指数在空间分布上与夏季类似,即A区 $<$ B区 $<$ C区。Chl-a浓度受温度影响冬季整体处于较低水平,空间差异不明显。透明度在空间上分布与

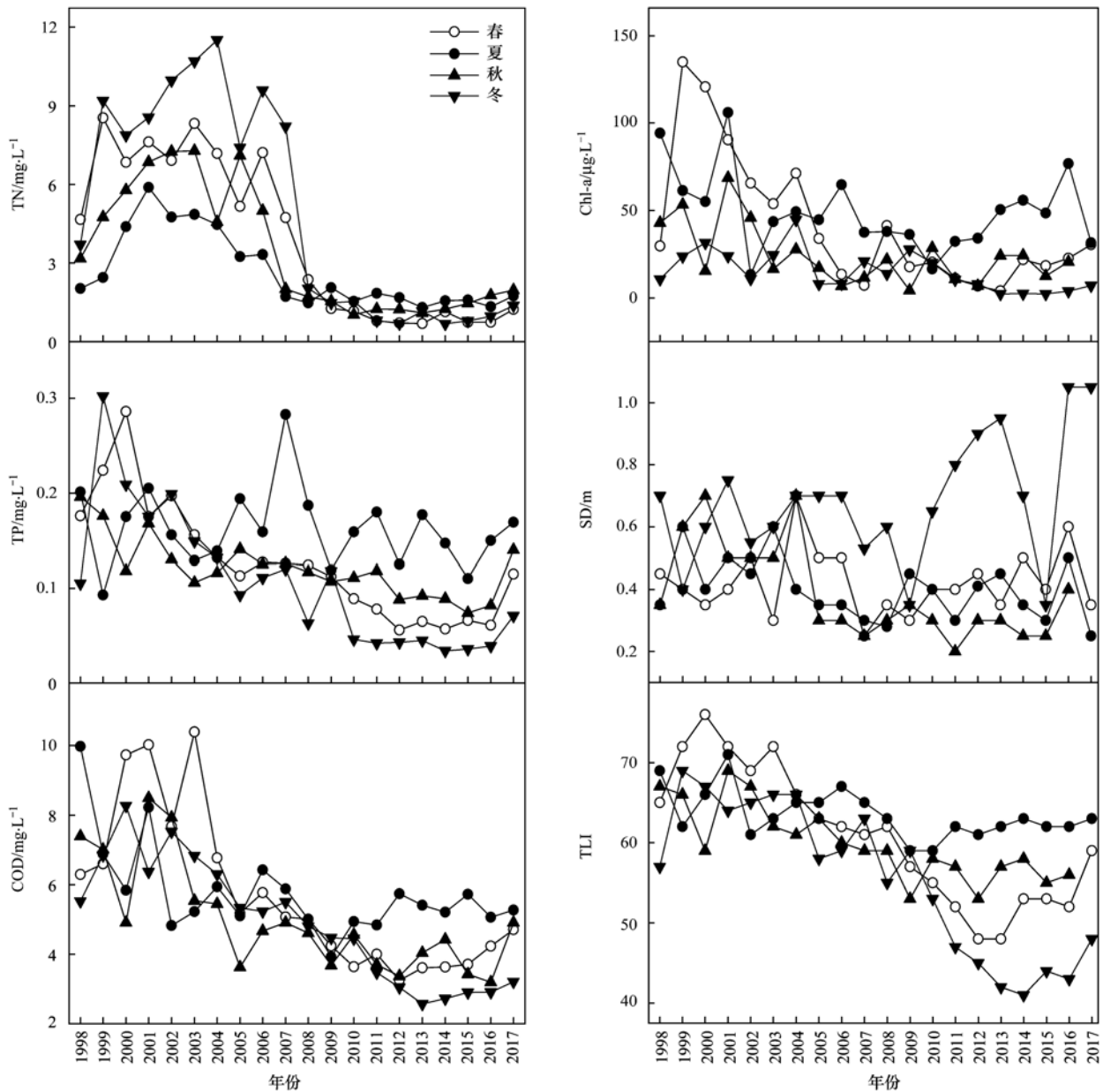


图3 蠡湖水质不同季节变化曲线

Fig. 3 Seasonal variation curve of Lihu Lake's water quality

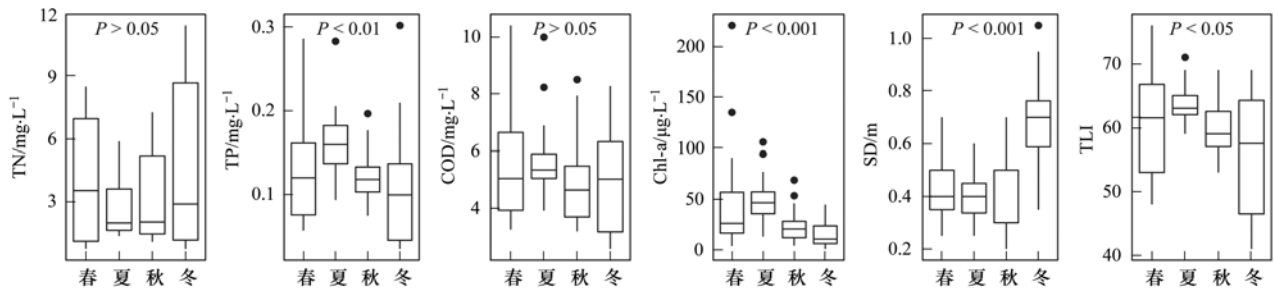


图4 蠡湖水质不同季节差异显著性分析

Fig. 4 Significance analysis of water quality in different seasons at Lihu Lake

夏季一致,最大值在 A 区,最小值在金城湾和宝界桥附近.由富营养化指数 TLI 来看,从 A 区到 C 区分别为中度营养、轻度富营养化和中度富营养化水平.

2017 年 TN、TP、高锰酸盐指数、Chl-a 和 SD 年平均值分别为 $1.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.126 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $6.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $58.2 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.50 m ,整体水质处于Ⅲ~Ⅴ类.差异性分析表明:蠡湖不同区域各水质

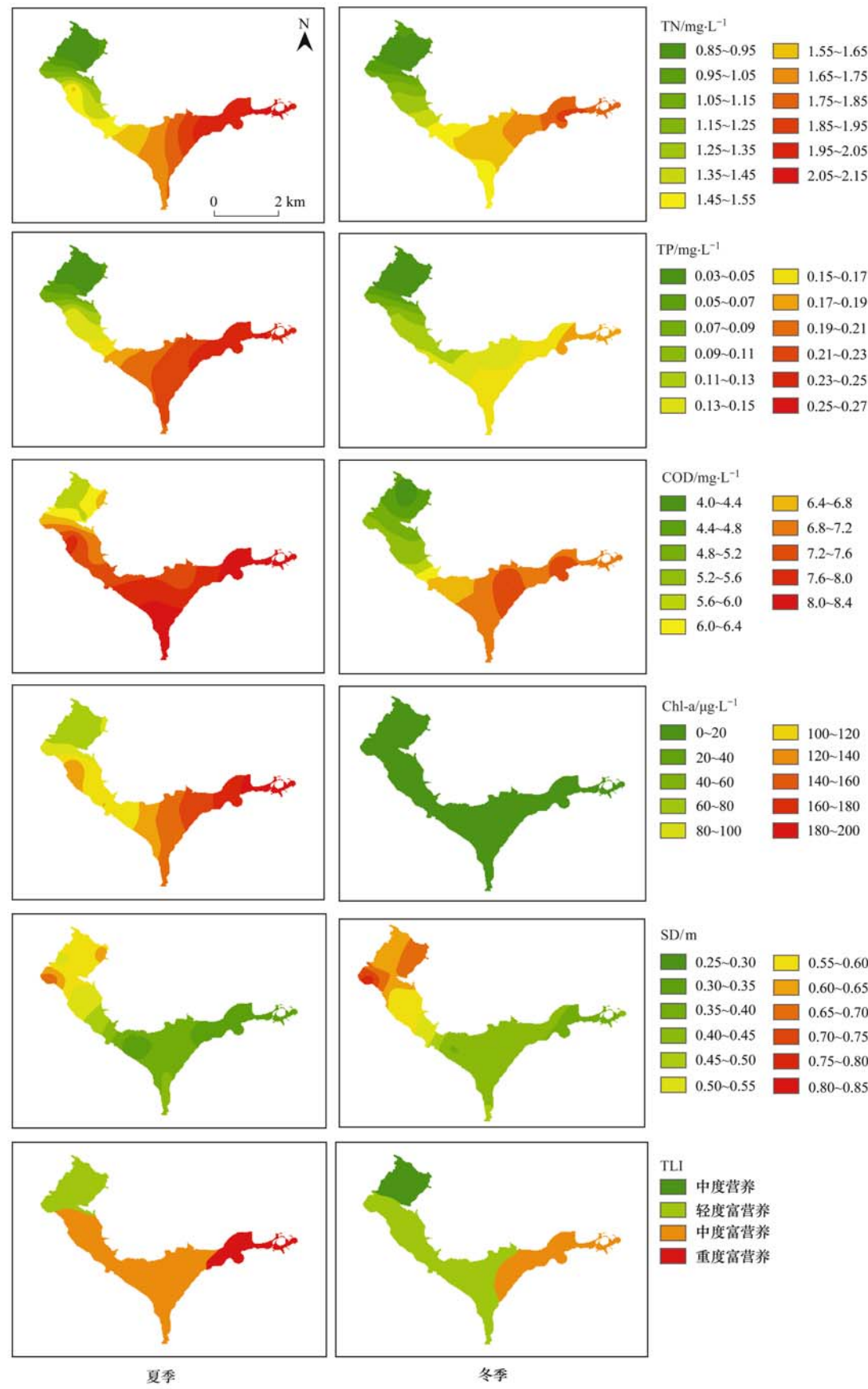
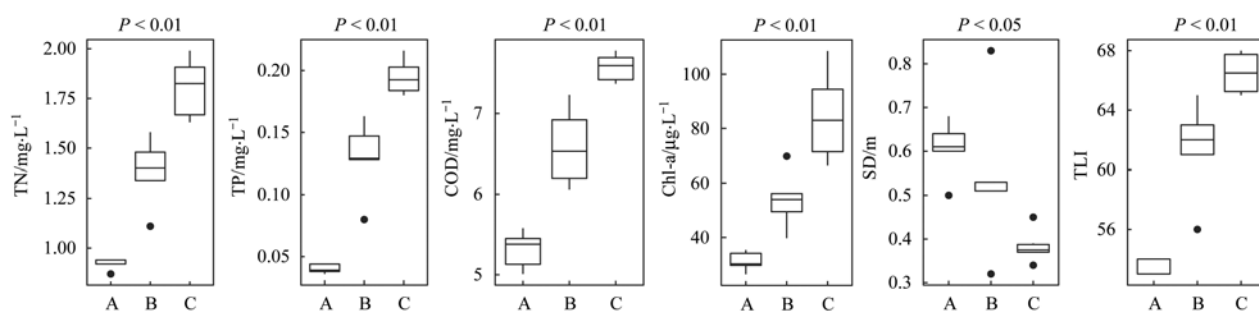


图 5 蠡湖不同区域水质指标夏冬两季变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of water quality indexes in different regions of Lihu Lake in summer and winter

指标差异均达到显著水平 ($P < 0.05$, 图 6). 综合各项指标, 蠡湖 A 区水质较其他区域要好, B 区次之,

C 区最差. 总体呈现从西北退渔还湖区向东蠡湖至金城湾一个水质由好到差的趋势.



A 为“退渔还湖”区, B 为“生态修复”区, C 为“居民密集”区

图 6 蠡湖不同区域水质指标均值及显著性分析

Fig. 6 Average and significance analysis of water quality indexes in different areas of Lihu Lake

3 讨论

3.1 蠡湖水质年际变化分析

氮、磷是藻类生长的重要基础物质,也是水体富营养化防治中首要控制指标^[18,19],高锰酸盐指数是表征水体中有机污染物含量的重要参数,Chl-a 可以表示水体中藻类生物量的多少,SD 是湖泊水质重要的感观表现之一. 在过去近 30 年,蠡湖水体 TN、TP、高锰酸盐指数和 Chl-a 指标发生了显著变化. “八五”初期,蠡湖水质低于地表 V 类水标准;至“九五”期间,受水产养殖和入湖污染物大幅增加等多种因素影响,湖体中各项水质指标总体呈上升趋势,浮游植物随营养盐升高而大量生长. 随着湖体日渐缩小,水环境容量已超负荷,在外源污染又得不到有效治理的处境下,蠡湖水质急剧恶化,蓝藻水华频繁暴发. 世纪交替期间(1997~2003 年)蠡湖水质达到最差. “十五”时期是蠡湖水质出现好转的关键阶段,2002 年国务院批准了《蠡湖综合整治工程》,无锡市政府开始对蠡湖地区重新进行区域规划,并展开了一系列治理措施^[20,21],主要措施包括:污水截留、生态疏浚、退渔还湖、生态修复、湖岸整治和环湖林带建设. 通过综合整治工程实施,蠡湖氮磷浓度不再上涨,高锰酸盐指数大幅下降,Chl-a 持续下降,水体富营养化得到控制. “十一五”时期,蠡湖水质进一步得到改善. 这主要得益于从 2007 年开始,对蠡湖和梅梁湾的水流交换实施闸控,保持蠡湖常年高水位,防止周边河流污水流入. “十二五”时期,无锡市政府把污染源控制和生态修复有机结合,对蠡湖实施区域的联防联控^[22]. 蠡湖水质整体上开始由中度富营养化过渡到轻度富营养化水平,各项水质指标基本维持稳定. 进入“十三五”,蠡湖部分水质指标出现反弹,2016 年营养盐浓度上升可能是因为这一年降水比历史平均值严重偏高,雨水携带大量污染物入湖,使浓度升高,藻类生物量增加^[23,24]. 另一方面,水位升高也使得蠡湖水环境容

量增加,透明度出现短暂高值. 此外,由于气候变暖,蓝藻水华暴发时间较往年提前,且强度高于往年,水体中实际存在的有机颗粒态磷含量很高. 蓝藻水华暴发使水体 pH 值升高,水底溶解氧降低,促进底泥中磷释放. 而底泥中磷释放反过来促进蓝藻生长和水华暴发,形成恶性循环,将更多磷以藻体颗粒等形式储存在水相中. 这可能是近几年水体磷浓度异常增高的一个主要原因.

3.2 蠡湖水质季节变化分析

在综合整治前,蠡湖主要受外源污染,水产养殖肥水、大量工业废水和城市生活污水通过河道、地表径流汇入蠡湖,在亚热带季风气候影响下,冬春季降水少,水位下降使氮素浓缩,因此 TN 浓度冬春季较高;而夏季降水增多在一定程度上稀释了湖体营养盐浓度^[25]. 综合整治之后,外源污染得到逐步控制. 2007 年之后,冬春季 TN 浓度明显降低,而夏秋季浓度升高,这可能是由于降雨冲刷将地表和周边断浜河流污染物携带入湖,使得营养物质增多;其次夏季藻类和微生物大量繁殖加速水体物质循环,加之鱼类扰动,促进了底泥中营养物质再悬浮. 相比之下,在综合整治后 TP 浓度没有发生大幅降低,表明内源磷已经累积到相当高的水平. 有研究表明^[26~28],太湖水体中磷主要以颗粒态形式存在,夏季藻类大量生长会促进底泥 P 的释放,秋季藻类死亡产生大量有机磷颗粒,这可能是磷浓度夏秋季大于冬春季的主要原因. Chl-a 浓度呈现春夏季高于秋冬季,主要是由于春夏季节水温升高,藻类生长加速,导致生物量增加^[29,30]. 相反,SD 最大值出现在冬季. 春夏季藻类生长和强风浪扰动底泥再悬浮都会使 SD 降低^[31,32],而秋季浮游植物死亡的残体腐烂分解产生的絮状物也会对透明度造成影响,而冬季水温较低,水体中藻类浓度低,故 SD 明显升高. 综合营养状态指数在综合整治之后呈现夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,2017 年对蠡湖调查结果也表明,现阶段蠡湖水质整体上冬季要明显优于夏季. 总体而

言,蠡湖在综合整治前水质的季节变化主要受外部污染物输入控制,而综合整治后水质的季节变化主要受湖泊内部藻类生长及营养盐内循环的影响。

3.3 蠡湖水质空间变化分析

整体来看,目前西蠡湖的水质是要明显优于东蠡湖,特别是西蠡湖北部退渔还湖区(A区)已基本达到Ⅲ类水质标准,B区TN、TP基本处于Ⅳ类水平,而金城湾水域(C区)仍处于Ⅴ类,个别点TP甚至为劣Ⅴ类。这种空间分布与蠡湖综合整治实施状况较为一致,说明退渔还湖、生态清淤、水生植被重建及流域治理措施效果显著。一方面,底泥疏浚很大程度上清除了蠡湖底泥氮磷营养盐,有效地减少了内源污染负荷^[33];另一方面,水生植被恢复增加了对湖体氮磷的吸收,抑制、减少底泥再悬浮和营养盐释放^[34]。金城湾外围多商业区和住宅区,其生活污水对东蠡湖水质有较大威胁。最新调查发现,东蠡湖周边仍有多条完全连通和半连通河流流入,且水质均为Ⅴ类及劣Ⅴ类,对蠡湖水体造成一定影响。针对目前蠡湖东西湖区水质差异的现状,需要因地制宜对蠡湖实施分区治理。在水质较好的西蠡湖北部,进一步扩大水生植被面积,构建完善的食物网,提高物种多样性,形成稳定健康的草型生态系统。在污染重的金城湾地区,加强对外源污染控制,杜绝污水入湖,待营养盐降低后再进行生态修复。

3.4 城市湖泊治理效果分析

纵观近30年蠡湖水质变化情况,不难发现,蠡湖水环境质量相比于综合整治前显著提高,TN、TP营养盐水平明显降低,Chl-a和高锰酸盐指数得到有效控制,但透明度改善并不明显,整体水质仍处于轻度富营养化状态。气候变化引起的水质波动,给蠡湖水水质改善带来了更大的压力。需要思考的是,目前的工程治理手段——单纯控制污染的输入和清淤,在随着时间的推移是否到达了对浅水富营养化湖泊修复能力的瓶颈?怎样才能形成维持湖泊稳态的长效机制?笔者认为:一方面,这要坚持和完善对湖泊水质连续的长时间定期监测工作,做好对水质变化趋势的分析;另一方面,要想将富营养湖泊由浊水态过渡到清水稳态,真正实现水质有效改善,必须要构建以沉水植物为主体的健康的草型生态系统。

对比武汉东湖^[35],与蠡湖水环境变化历程相似,受人类活动和工业发展的影响,东湖水质在短短几十年由中营养发展到富营养和超富营养水平,水生植物群落严重萎缩,原有生态功能丧失,从草型湖泊退化成藻型湖泊。为控制其富营养化问题,对东湖实施一系列水环境综合整治^[36,37]。东湖是国内首个实施鱼类控藻的浅水富营养湖泊^[38],利用较高密度

的滤食性鲢鳙鱼的摄食作用控制浮游植物生物量,并取得了良好成果。但过多放养鱼类形成的扰动,又会使清水草型生态系统难以恢复。有研究表明,水生植物的竞争和化感作用能有效控制蓝藻水华的暴发^[39,40]。南京玄武湖从20世纪90年代就开始通过污水截流整治工程和疏浚清淤工程治理湖体富营养化问题,这些措施短期内取得了一定效果,但在2005年夏依然暴发了大面积蓝藻水华^[41,42]。在随后实施的生态工程中,由于生境上缺少竞争者,菹草在隔年快速生长并蔓延全湖^[43],季节转换时,菹草短期内大面积衰亡,植株的腐烂对湖体又造成严重二次污染^[44,45]。因此,多种群落的构建和适当的人工调控在生态恢复后期尤为重要。惠州西湖在20世纪80年代,每逢春夏季都会发生蓝藻水华。1998年开始采取环湖污水截流、湖底淤泥清理和引新水源换水等工程措施,西湖水质得到改善,但水体透明度等景观指标无明显提升^[46]。陈光荣等^[47,48]在平湖进行鱼类控制和水生植被构建与恢复研究,结果表明生物调控及水生态系统构建使示范区水质得到明显提升,水体透明度几乎清澈见底。对比近几年惠州西湖修复区和未修复区调查研究表明^[49~51],生态修复形成以沉水植物为主的草型生态系统后,湖泊中生境多样性得到显著提升,与此同时湖体内浮游动物、植物以及分解者细菌等的生物多样性也有了明显提高^[52]。如此形成的一个良性循环保证了水生生态系统的稳定性,更有利于水质的长期改善。

结合国内多个城市富营养湖泊的治理历程,大都经历了控源截污、底泥疏浚、区域调水等工程治理措施。实践证明,这些工程实施在短期内能改善水质,提高透明度;但从长期来看,不能从根本上保证水质的持续稳定改善。借鉴国内外城市湖泊治理经验,在外源污染得到有效控制、水体营养盐浓度相对较低的前提条件下,需要进行以沉水植物恢复为主的生态修复,逐步提升物种多样性,构型完成健康的草型生态系统,并辅以生物调控和长效管理,才能实现水质有效改善,真正恢复城市湖泊生态系统服务功能。

4 结论

(1) 蠡湖综合整治工程实施对TN、TP和高锰酸盐指数的季节性差异影响较大;综合整治之后,蠡湖各项指标表现显著季节差异,冬季水质明显好于夏季;现阶段蠡湖不同水域水质差异显著,西蠡湖北部水质好于西蠡湖南部及东蠡湖水质。

(2) 经过近30年的水环境综合整治,蠡湖水质由原来的劣Ⅴ类逐步恢复到地表Ⅳ类水标准,说明

控源截污和生态清淤等举措对控制水体富营养化有显著效果;但透明度在整治后没有显著提升以及“十三五”后蠡湖水质指标出现小幅反弹,表明要实现水质长期有效改善,关键还是要构建健康的草型生态系统,通过逐步恢复沉水植被并辅以生物调控,提高物种多样性,从而提升湖体自身净化能力。

致谢:国家野外科学观测站江苏太湖湖泊系统研究站提供了长期监测数据,水样处理及水质分析得到薛静琛的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 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.
Yang G S, Ma R H, Zhang L, *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799-810.
- [2] 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.
- [3] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. 中国环境科学, 2002, 22(2): 150-153.
Qin B Q, Fan C X. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake[J]. China Environmental Science, 2002, 22(2): 150-153.
- [4] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(3): 193-202.
- [5] Qin B Q. A large-scale biological control experiment to improve water quality in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Lake and Reservoir Management, 2013, 29(1): 33-46.
- [6] 苟婷, 马千里, 王振兴, 等. 龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4141-4150.
Gou T, Ma Q L, Wang Z X, *et al.* Eutrophication and characteristics of cyanobacteria bloom in the summer in Guishi Reservoir[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4141-4150.
- [7] 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 等. 合肥市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.
Li R Z, Liu K F, Qian J, *et al.* Nitrogen and phosphate pollution characteristics and eutrophication evaluation for typical urban landscape waters in Hefei city[J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1718-1726.
- [8] 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 等. 几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 589-599.
Yao C, Hu X Z, Lu S Y, *et al.* Repression of nitrogen and phosphorus release from lakeshore sediment by five littoral-zone plants[J]. Environmental Science, 2017, 38(2): 589-599.
- [9] 柏祥, 陈开宁, 黄蔚, 等. 五里湖水环境现状与变化趋势[J]. 水资源保护, 2010, 26(5): 6-10.
Bai X, Chen K N, Huang W, *et al.* Current status and variation tendency of water quality in Wuli Lake, Jiangsu province[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(5): 6-10.
- [10] 李文朝, 杨清心, 周万平. 五里湖营养状况及治理对策探讨[J]. 湖泊科学, 1994, 6(2): 136-143.
Li W C, Yang Q X, Zhou W P. Studies on eutrophication of Wuli Lake and possible restoration strategies[J]. Journal of Lake Sciences, 1994, 6(2): 136-143.
- [11] 李文朝. 五里湖富营养化过程中水生生物及生态环境的演变[J]. 湖泊科学, 1996, 8(S1): 37-45.
Li W C. Biological and environmental succession in Wuli Bay of Taihu Lake along with the eutrophication processes[J]. Journal of Lake Sciences, 1996, 8(S1): 37-45.
- [12] 蔡琳琳, 朱广伟, 王永平, 等. 五里湖综合整治对湖水水质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 482-488.
Cai L L, Zhu G W, Wang Y P, *et al.* Influences of comprehensive treatment on water quality in Wuli Bay of Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(5): 482-488.
- [13] 俞海桥, 方涛, 夏世斌, 等. 不同生态修复措施下太湖西五里湖沉积物氮磷形态的时空分布[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 683-689.
Yu H Q, Fang T, Xia S B, *et al.* Seasonal and vertical distribution of nitrogen and phosphorus in the sediment under different ecological restoration measures in the West Lake Wuli, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6): 683-689.
- [14] 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.
- [15] 朱喜, 张杨文. 五里湖水污染治理现状及继续治理对策[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 86-89.
Zhu X, Zhang Y W. Control of water pollution in Wuli Lake[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1): 86-89.
- [16] 姜霞, 王书航, 杨小飞, 等. 蠡湖水环境综合整治工程实施前后水质及水生态差异[J]. 环境科学研究, 2014, 27(6): 595-601.
Jiang X, Wang S H, Yang X F, *et al.* Change in water quality and ecosystem of Lihu Lake before and after comprehensive water environmental improvement measures[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(6): 595-601.
- [17] 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.
- [18] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [19] Smith V H, Wood S A, McBride C G, *et al.* Phosphorus and nitrogen loading restraints are essential for successful eutrophication control of Lake Rotorua, New Zealand[J]. Inland Waters, 2016, 6(2): 273-283.
- [20] 顾岗, 陆根法. 太湖五里湖水环境综合整治的设想[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 56-60.
Gu G, Lu G F. On the integrated control of water environment of Wuli Lake, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(1): 56-60.
- [21] 王栋, 孔繁翔, 刘爱菊, 等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 263-268.
Wang D, Kong F X, Liu A J, *et al.* Analysis of the influence of the ecological dredging to ecosystem of Lake Wuli, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(3): 263-268.
- [22] 姜伟立, 吴海锁, 边博. 五里湖水环境治理经验对“十二五”

- 治理的启示[J]. 环境科技, 2011, **24**(2): 62-64, 69.
- Jiang W L, Wu H S, Bian B. Inspiration for "12th Five-Year" from governance experiences of water environment governance in Wuli Lake[J]. Environmental Science and Technology, 2011, **24**(2): 62-64, 69.
- [23] 车蕊, 林澍, 范中亚, 等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4440-4449.
- Che R, Lin S, Fan Z Y, *et al.* Effects of continuous extreme rainfall on water quality of the Dongjiang River Basin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4440-4449.
- [24] 朱伟, 谈永琴, 王若辰, 等. 太湖典型区2010-2017年间水质变化趋势及异常分析[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 296-305.
- Zhu W, Tan Y Q, Wang R C, *et al.* The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 296-305.
- [25] 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1102-1112.
- Zha H M, Zhu M Y, Zhu G W, *et al.* Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1102-1112.
- [26] 王睿喆, 王沛芳, 任凌霄, 等. 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1301-1308.
- Wang R Z, Wang P F, Ren L X, *et al.* Effects of nutrient inputs on changes of phosphorus forms and phytoplankton growth in Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1301-1308.
- [27] 张毅敏, 王宇, 杨飞, 等. 太湖不同生态型湖区悬浮颗粒磷空间分布和降解速率[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 2128-2138.
- Zhang Y M, Wang Y, Yang F, *et al.* The spatial distribution and degradation characteristic of phosphorus in suspended particulate matter among different ecological types in Taihu[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 2128-2138.
- [28] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China[J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(2): 288-295.
- [29] 赵巧华, 孙国栋, 王健健, 等. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 385-393.
- Zhao Q H, Sun G D, Wang J J, *et al.* Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 385-393.
- [30] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 2005-2017年北部太湖水体叶绿素a和营养盐变化及影响因素[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.
- Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 279-295.
- [31] 王书航, 姜霞, 王雯雯, 等. 蠡湖水体透明度的时空变化及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(7): 688-695.
- Wang S H, Jiang X, Wang W W, *et al.* Dynamic spatial and temporal changes in water transparency and their influencing factors in Lihu Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(7): 688-695.
- [32] 王书航, 姜霞, 王雯雯, 等. 蠡湖水体悬浮物的时空变化及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1548-1555.
- Wang S H, Jiang X, Wang W W, *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of the water suspended matter and its influencing factors in Lihu Lake [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1548-1555.
- [33] 余居华, 钟继承, 张银龙, 等. 湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3368-3375.
- Yu J H, Zhong J C, Zhang Y L, *et al.* Influence of dredging on sediment resuspension and phosphorus transfer in lake: a simulation study [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3368-3375.
- [34] 杨旻, 吴小刚, 张维昊, 等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(7): 98-102.
- Yang M, Wu X G, Zhang W H, *et al.* Application of aquatic plant in ecological restoration of eutrophic water [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **30**(7): 98-102.
- [35] 甘义群, 郭永龙. 武汉东湖富营养化现状分析及治理对策[J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 277-281.
- Gan Y Q, Guo Y L. Evaluation analysis and remedy strategy for eutrophication in Wuhan lake Donghu [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, **13**(3): 277-281.
- [36] 张萌, 曹特, 过龙根, 等. 武汉东湖水生植被重建及水质改善试验研究[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(6): 154-159.
- Zhang M, Cao T, Guo L G, *et al.* Restoration of constructed hydrophytes community in East Lake of Wuhan and experimental study on water quality improvement [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **33**(6): 154-159.
- [37] 刘志文, 王一峰, 王全益, 等. 武汉东湖水体营养物质含量变化趋势分析[J]. 科技创新导报, 2014, **11**(31): 115-116.
- [38] 刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境, 1999, **8**(3): 312-319.
- Liu J K, Xie P. Unraveling the enigma of the disappearance of water bloom from the East Lake (Lake Donghu) of Wuhan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999, **8**(3): 312-319.
- [39] 鲜啟鸣, 陈海东, 邹惠仙, 等. 四种沉水植物的克藻效应[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 75-80.
- Xian Q M, Chen H D, Zou H X, *et al.* Allelopathic effects of four submerged macrophytes on microcystis aeruginosa [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, **17**(1): 75-80.
- [40] 杨清心. 富营养水体中沉水植物与浮游藻类相互竞争的研究[J]. 湖泊科学, 1996, **8**(S1): 17-24.
- Yang Q X. Studies on the interaction of submerged plant and phytoplankton in eutrophic waters [J]. Journal of Lake Sciences, 1996, **8**(S1): 17-24.
- [41] 张哲海, 徐瑶. 生态补水对玄武湖水质的影响[J]. 环境监测管理, 2012, **24**(5): 40-43.
- Zhang Z H, Xu Y. Effects analysis on water quality of ecological water compensation from Yangtze River to Xuanwu Lake [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2012, **24**(5): 40-43.
- [42] 肖琼, 王锦旗. 人工调控措施对玄武湖水质的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, **10**(2): 232-237.
- Xiao Q, Wang J Q. Artificial control effects on water quality of Xuanwu Lake [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, **10**(2): 232-237.
- [43] 王锦旗, 郑有飞, 王国祥. 玄武湖菹草种群的发生原因及人工收割对水环境的影响[J]. 水生生物学报, 2013, **37**(2): 300-305.

- Wang J Q, Zheng Y F, Wang G X. Reasons for the occurrence of Potamogeton crispus population and harvesting impact on the water environment in Xuanwu Lake [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, **37**(2): 300-305.
- [44] 张菊, 邓焕广, 吴爱琴, 等. 东平湖菹草腐烂分解及其对水环境的影响[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2590-2596.
Zhang J, Deng H G, Wu A Q, *et al.* Decomposition of Potamogeton crispus and its effect on the aquatic environment of Dongping Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(9): 2590-2596.
- [45] 唐金艳, 曹培培, 徐驰, 等. 水生植物腐烂分解对水质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 83-89.
Tang J Y, Cao P P, Xu C, *et al.* Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(1): 83-89.
- [46] 李传红, 黄水祥, 彭俊杰, 等. 惠州西湖富营养化现状评价及治理探讨[J]. 生态科学, 2004, **23**(2): 156-159.
Li C H, Huang S X, Peng J J, *et al.* Assessment on eutrophication in Huizhou Xihu Lake and its restoration [J]. Ecologic Science, 2004, **23**(2): 156-159.
- [47] 陈光荣, 刘正文, 钟萍, 等. 热带城市湖泊生态恢复中水生植被、浮游动物和鱼类的关系研究[J]. 生态环境, 2007, **16**(1): 1-7.
Chen G R, Liu Z W, Zhong P, *et al.* The Situation and relation of mycophyte, zooplankton and fish in the ecological restoration of a tropical shallow lake in a city [J]. Ecology and Environment, 2007, **16**(1): 1-7.
- [48] 陈光荣, 刘娟, 雷泽湘, 等. 惠州西湖生态恢复中营养盐和浮游生物监测[J]. 水生态学杂志, 2009, **2**(6): 30-35.
Chen G R, Liu X, Lei Z X, *et al.* The response of nutrient salt and plankton to ecological restoration in Huizhou West Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2009, **2**(6): 30-35.
- [49] 苗滕, 高健, 陈炳辉, 等. 惠州西湖生态修复对浮游甲壳动物群落结构的影响[J]. 生态科学, 2013, **32**(3): 324-330.
Miao T, Gao J, Chen B H, *et al.* The effects of ecological restoration on the community structures of planktonic crustaceans in Huizhou West Lake [J]. Ecological Science, 2013, **32**(3): 324-330.
- [50] 高健, 周敏, 闵婷婷, 等. 惠州西湖生态修复对浮游植物功能类群的影响[J]. 生态科学, 2013, **32**(5): 540-545, 563.
Gao J, Zhou M, Min T T, *et al.* Response of the phytoplankton functional groups to ecological restoration in Huizhou Lake [J]. Ecological Science, 2013, **32**(5): 540-545, 563.
- [51] 毛杰, 邢鹏, 刘正文. 惠州西湖沉水植被修复对浮游细菌群落结构的影响[J]. 水生态学杂志, 2011, **32**(3): 26-31.
Mao J, Xing P, Liu Z W. Impact of submerged vegetation restoration on the structure of bacterioplankton in Huizhou West Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2011, **32**(3): 26-31.
- [52] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. Hydrobiologia, 2009, **621**(1): 1-19.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshangang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)