

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/NH_4^+-N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析

查慧铭^{1,2}, 朱梦圆², 朱广伟², 杨周生^{1*}, 许海², 沈睿杰², 钟春妮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, 太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008)

摘要: 基于2016年太湖16条主要河道及对应湖体的水质逐月监测数据, 深入探讨了太湖流域不同分区河道的外源营养盐输入对湖体水质影响及其季节变化。结果发现: ①太湖流域河道总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)和溶解性总磷(DTP)的月平均浓度均高于对应湖体, 主要入流区河道与临近湖体的营养盐浓度呈现显著正相关, 表明外源补给对湖体营养盐浓度产生巨大影响; ②无论是河道还是湖体的营养盐浓度, 均呈现明显的季节变化, 且峰值产生月份不同: 河道平均TN最高值出现在3月, 为 $4.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均TP最高值出现在12月, 为 $0.218 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 湖体TN、TP峰值均出现在蓝藻水华暴发期间(7月), 分别为 $4.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.255 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; ③极端降水过程短期内能明显降低河道营养盐浓度, 但会引起湖体营养盐外源负荷的明显增高, 不利于湖体富营养化控制。本研究表明, 对于空间异质性较高的大型浅水湖泊, 流域河道入湖污染对湖体营养盐时空格局具有重要的塑造作用, 而湖体的污染物自净能力、蓝藻水华物质的空间堆积及风浪引发的底泥再悬浮作用等也都对湖体营养盐浓度、时空格局产生重要影响。

关键词: 太湖; 营养盐; 外源负荷; 时空分异; 蓝藻水华; 水动力作用

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1102-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707184

Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China

ZHA Hui-ming^{1,2}, ZHU Meng-yuan², ZHU Guang-wei², YANG Zhou-sheng^{1*}, XU Hai², SHEN Rui-jie², ZHONG Chun-ni²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research, State Key Laboratory of Lake Environment and Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The seasonal and spatial variation of external nutrient loading from rivers and their impact on lake water quality were analyzed in Lake Taihu, China, using the monthly monitoring data from 16 major inflow/outflow rivers and 32 observation sites in the lake. The results showed: ① The average monthly values of total nitrogen (TN), dissolved total nitrogen (DTN), total phosphorus (TP), and dissolved total phosphorus (DTP) in rivers were all higher than the corresponding areas in the lake. Significant positive correlations were found between nutrient concentrations in the inflow rivers and the corresponding areas in the lake, indicating the pronounced impact of external loading on lake water. ② Remarkable seasonal variations of nutrient concentration were found both in the rivers and in the lake. The highest TN and TP concentrations in inflow rivers were $4.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (March) and $0.218 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (December), while the highest TN and TP concentrations in the lake were $4.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.255 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in July. ③ Extreme rainfall events could decrease the nutrient concentration in the rivers in the short-term, but finally would increase the external loading of nutrients, and indicated disadvantages for the restoration of Lake Taihu. Our study concluded that inflow pollution showed an obvious "shaping effect" on the seasonal and spatial distribution of water quality indicators in large and shallow lakes. Additionally, the self-purification ability of lakes, wind-induced accumulation and migration of algae, as well as the sediment resuspension under the prevailing winds in different seasons, all have vital effects on nutrient concentrations and their spatial-temporal variations.

Key words: Lake Taihu; nutrients; external loading; spatial-temporal variation; algal blooms; hydrodynamics

湖泊具备供水、航运、大气调节、水质净化、土壤保持以及维持生物多样性等多种功能^[1], 对人类的生产和生活有着极其重要的意义。但近年来逐渐加重的全球性湖泊富营养化问题, 给湖泊生态功能的发挥带来前所未有的挑战。中国湖泊的富营养化问题十分严峻, 特别是东部平原河网地区^[2], 成为我国地表水生态环境治理的重点区域。

太湖流域位于长江三角洲, 湖泊富营养化问题

收稿日期: 2017-07-22; 修订日期: 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501532, 41573076, 41671494); 国际科技合作与交流专项(2015DFG91980); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008)

作者简介: 查慧铭(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体富营养化机制, E-mail: zhauiuming1994@126.com

* 通信作者, E-mail: yzhoushe@mail.ahnu.edu.cn

由来已久。2007 年蓝藻水华灾害引发了无锡市水危机事件^[3],自此,太湖蓝藻水华的防治工作受到空前的重视。有研究表明,1985~2015 期间,湖体水质呈现先恶化、后好转的变化趋势^[4]。然而,由于太湖湖体营养盐浓度存在显著的时空异质性,并且外源污染影响巨大^[5],太湖的富营养化问题并未得到根本改观。太湖 80% 以上的外源营养负荷来自周边河道,是蓝藻水华频繁暴发的重要驱动因素^[6~9]。2007 年以来,主要入湖河流营养盐浓度总体呈现下降趋势,并且与之相对应的湖体水质也开始好转^[10],但是改善的幅度与治理目标还有很大差距。燕姝雯等^[11]对环太湖入湖河流水量及污染负荷的研究表明,太湖周边不同区域入湖污染负荷差异显著,且出入湖河流水质对湖体水质影响较大。

太湖流域处于经济高度发展的长江三角洲地区,其河道水质受局地性的人类活动影响巨大,而其广阔的流域面积也导致处于不同地理位置的河道污染程度及类型差异显著。作为一个大型浅水湖泊,太湖水力停留时间一般不足 300 d^[12],流域稠密的水网和湖体较强的自净能力导致太湖湖体水质和生态类型存在很大的空间异质性^[13]。目前的河道与湖体水质关系研究,大都是基于全湖平均水质数据来进行评估和分析的,这会掩盖不同湖区水质差异性对分析结果的巨大影响,从而严重影响分析结果和结论,甚至产生误导性的结论。因此,将河道与湖体进行对应的分区处理,探讨不同分区对应河道的外源输入与相应湖区水质的关系,能够更加深入了解区域水质对湖体的影响规律。这方面,韩晓霞等^[14]对比分析了环太湖河道与对应湖区氮素及其他相关指标变化特征,但仅为夏季短时间尺度,其季节代表性不够。Li 等^[15]研究了太湖周边地域氮(N)、磷(P)入湖负荷及太湖不同湖区 N、P 和叶绿素 a (Chla)分布情况,但未系统分析河道与对应湖区的相互关系。

本研究基于 2016 年对环太湖 16 条主要出入湖河道以及对应湖区的逐月水质监测数据,比较不同湖区与对应河道的水质差异、联系及其季节变化特征,试图阐明太湖湖体受入湖河流的营养盐输入的影响强度和蓝藻水华响应特征,以期为太湖流域污染控制提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及采样点布设

太湖(119°52'~120°36'E、30°55'~31°32'N)

是我国第三大淡水湖泊,也是典型的浅水湖泊^[13,16],水域面积 2 338 km²,平均水深 1.9 m,承担着农业灌溉、工业、娱乐用水及居住生活用水等重要功能。

本次监测的 16 条河流依次为望虞河、胥江、瓜泾、太浦河、大钱港、长兜港、长兴港、合溪港、大浦河和陈东港(合并样品)、沙塘港、殷村港、漕桥河、太浦运河、雅浦港以及直湖港,采样频次为每月一次(如图 1)。此外,在太湖湖体设 32 个监测点位,其中 THL00、THL01、THL03~08、THL10、THL13、THL14、THL16、THL17、THL32 点位为逐月监测,全湖点位样品在 2、5、8、11 月采集(如图 1)。

结合流域特征、湖体形貌、水生生物分布等信息,将湖区划分为以下几个区域:梅梁湾(包括点位 THL00、THL01、THL03~06、THL09、THL15、THL32);竺山湾(包括 THL16、THL17);西北湖区(包括 THL10、THL18、THL19);西南湖区(包括 THL11、THL20、THL22);东太湖(包括 THL12、THL24、THL25);胥口湾(包括 THL26~30);贡湖湾(包括 THL13、THL14、THL31)以及湖心区(包括 THL07、THL08、THL21、THL23)。根据河道入湖口的位置将河道和相关湖体进行相对应的划分(湖心区除外),分别为:梅梁湾河道(THR16)、竺山湾河道(THR11~15)、西北湖区河道(THR09 与 THR10 合并样)、西南湖区河道(THR05~08)、东太湖河道(THR03、THR04)、胥口湾河道(THR02)、贡湖湾河道(THR01)。河流及湖体具体点位和分区如图 1 所示。

1.2 样品采集与分析

利用 YSI 6600 V2 型多参数水质监测仪现场测定水温(WT)、pH 值、浊度(NTU)、溶解氧(DO)、电导率(Cond)等指标。水深(WD)和透明度(SD)分别利用 Speedtech 测深仪和塞氏盘现场测定。河道与湖体均采集表层(0.5 m)水样,现场过滤、冷藏,带回实验室分析水质指标,包括总氮(TN)、溶解态总氮(DTN)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、溶解态总磷(DTP)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)、高锰酸盐指数、五日生化需氧量(BOD₅)和叶绿素 a(Chla)。TN 和 DTN 采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法测定, TP 和 DTP 采用钼酸铵分光光度法测定, PO₄³⁻-P 采用磷钼蓝分光光度法测定,高锰酸盐指数采用高锰酸盐滴定法测定, BOD₅ 采用稀释接种法测定, Chla 采用热乙醇

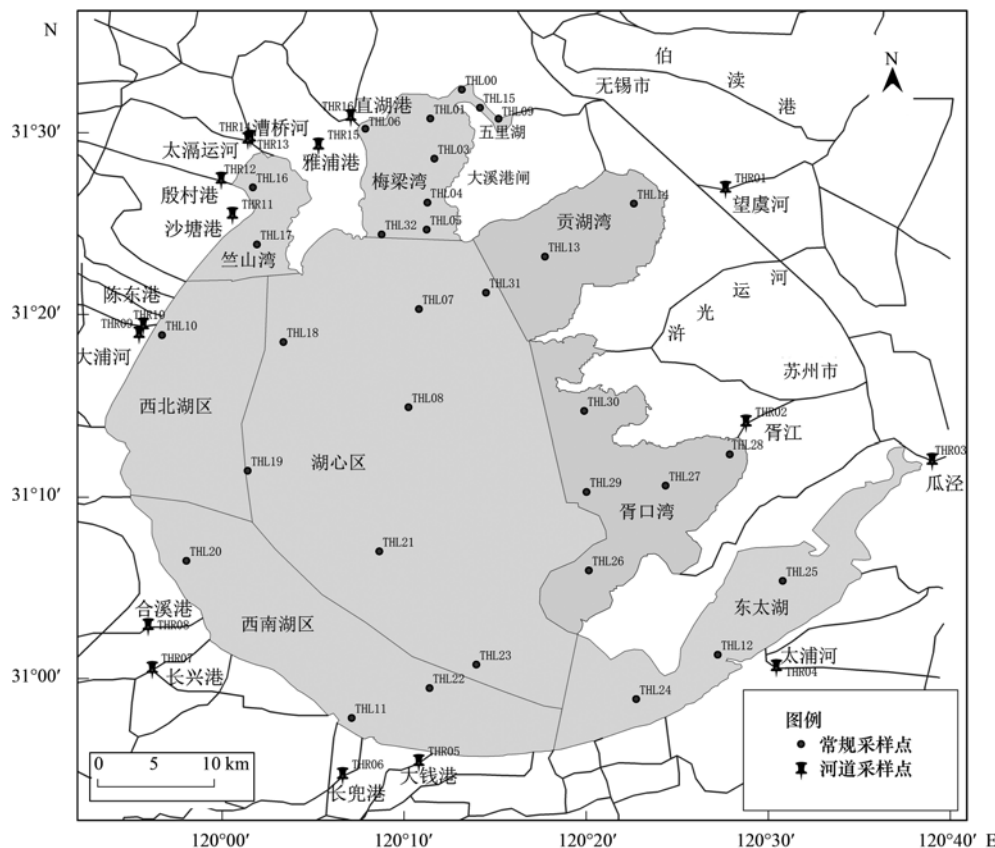


图1 环湖河道及湖区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sample sites in Lake Taihu and rivers around the lake

萃取分光光度法测量。

2 结果与分析

2.1 河道与湖体水质年变化

河道与湖体各理化指标逐月变化如图2所示。河道TN、DTN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最低浓度和最高浓度均出现8月和3月,浓度范围分别为1.87~4.82、1.12~4.44和0.11~1.73 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,三者年平均浓度分别为 (3.55 ± 0.95) 、 (3.00 ± 0.69) 、 (0.89 ± 0.45) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别是湖体对应参数浓度的1.3、1.8和3.4倍。需要指出的是,与早期报道相比,2016年的河道周年监测结果表明氮的浓度峰值明显下降。比如翟淑华等^[17]报道的2000~2002年间太湖无锡地区入湖河道TN年均值分别为6.58、7.94、7.26 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2016年的监测结果与之相比,降低了52%,部分反映出近年来太湖流域治污的成效,同时也可能是水情差异造成的。

湖体与河道TN、DTN的年最低浓度均出现在8月;湖体与河道DTN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最高浓度均出现在3月。两者不同的是,湖体TN在7月出现峰值(4.13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在4月最低(0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

河道TP最高浓度和最低浓度则分别出现在2016年的12月(0.218 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和2月(0.127 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而湖体TP最高浓度出现在7月(0.219 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),最低则在1月(0.080 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。河道TP年平均值为 (0.158 ± 0.024) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,湖体TP的年平均值为 (0.132 ± 0.048) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相比而言,2000~2002年无锡与常州入湖河道的TP平均值为0.270 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[17],2016年年均值与之相比下降了41%。

河道DTP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的最高浓度和最低浓度出现在9月和11月,浓度范围分别为0.043~0.081 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及0.031~0.059 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,年平均浓度依次为 (0.061 ± 0.011) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (0.041 ± 0.008) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。湖体DTP与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度最低值与最高值时间同步,分别为4月和8月,变化范围分别为0.021~0.063 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.004~0.041 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。河道DTP和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 年平均浓度分别是湖体的1.7倍和2.2倍。

高锰酸盐指数湖体年平均浓度为 (5.12 ± 1.78) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是河道的1.2倍,并且在7月出现远远高于河道的峰值,达到10.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,主要原

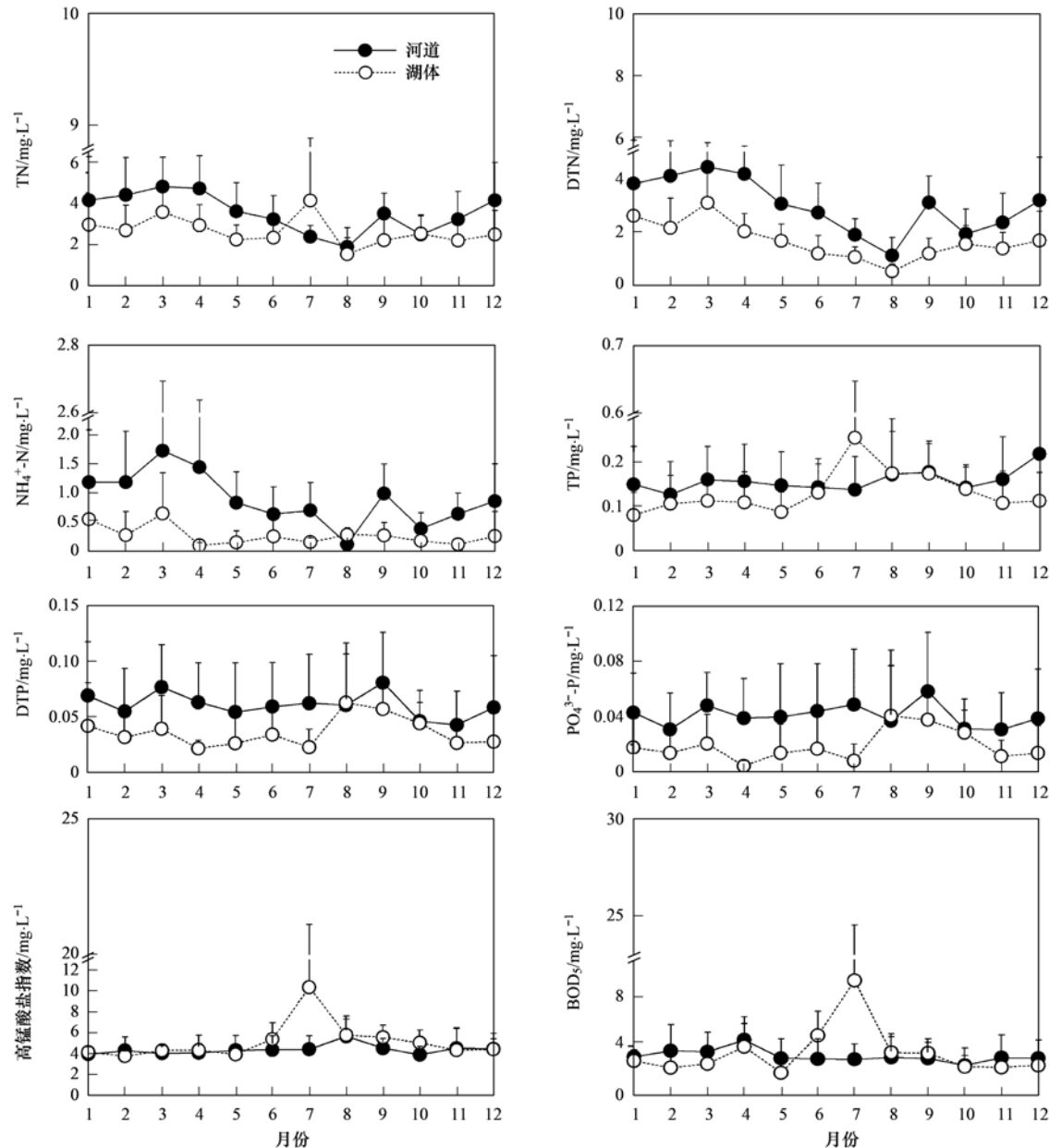


图 2 太湖环湖河道及湖体各营养盐指标逐月变化

Fig. 2 Monthly average concentrations of nutrients in the inflow rivers and the lake at Lake Taihu

因可能是相较于河道，湖体水华暴发期间藻类生物量的增加向水体引入大量的有机质，同时，高锰酸盐指数和 Chla 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，也说明了藻体生物量对高锰酸盐指数的贡献。湖体的 BOD_5 年平均浓度为 $(3.47 \pm 2.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，并在 2016 年 6~8 月出现高峰期，7 月湖体浓度是河道的 2.1 倍。而在 4 月，湖体与河道的 BOD_5 均出现小高峰，湖体该月的 BOD_5 浓度为 $3.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，河道浓度为 $4.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.2 河道与湖体水质分区比较

为更科学系统地分析河道外源输入对湖体的影

响，对太湖湖体进行分区，河道按照河口位置与湖体进行对应分区。非参数方差分析结果表明，文中不同湖区及相应河道之间各水质指标均存在显著差异 (Kruskal-Wallis, $P < 0.05$)。

河道与湖体对应分区的水质结果如表 1 所示。梅梁湾湖区对应河道中 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP、DTP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 、 BOD_5 浓度约为湖体的 1.7、2.9、7.4、1.2、2.4、3.3 和 1.4 倍，湖体高锰酸盐指数则是河道的 1.5 倍。竺山湾湖区对应河道中 DTN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度分别是湖体的 1.3、1.9 和 1.2 倍。西北湖区河道中 DTN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、DTP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$

浓度分别为对应湖区的 1.2、1.5、1.3 和 1.4 倍. 西南区河道 TN、DTN、 NH_4^+ -N、TP、DTP、 PO_4^{3-} -P、 BOD_5 分别是对应湖区的 1.6、2.0、3.0、1.2、1.7、3.0 和 1.3 倍. 东太湖区域河道中 TN、DTN、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 分别是对应湖区浓度的 1.2、1.3、2.7 和 2.0 倍. 胥口湾河道 TN、DTN、 NH_4^+ -N、TP、DTP、 PO_4^{3-} -P、 BOD_5 浓度分别是对应湖区的 1.7、

2.1、8.6、1.9、2.8、8.0 和 1.3 倍. 贡湖湾河道中 TN、DTN、 NH_4^+ -N、TP、DTP、 PO_4^{3-} -P 浓度分别是湖体的 1.3、1.4、3.3、1.4、1.5 和 2.4 倍. 上述结果表明, 出入湖河道水质明显劣于对应湖区. 对于太湖这种出入河道流速大多很小的平原河网湖泊, 河网地区的水质差, 自净能力小. 因此, 降雨引发的水量补给也同时增大了营养盐的入湖通量.

表 1 不同分区河道与临近湖体全年平均水质比较/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Comparison of nutrient concentrations between rivers and corresponding lake regions/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

分区	位置	TN	DTN	NH_4^+ -N	TP	DTP	PO_4^{3-} -P	高锰酸盐指数	BOD_5
梅梁湾	河道	4.66 ± 1.26	4.16 ± 1.45	1.26 ± 0.61	0.176 ± 0.054	0.082 ± 0.033	0.060 ± 0.031	3.87 ± 2.03	4.09 ± 1.08
	湖体	2.68 ± 1.13	1.42 ± 0.53	0.17 ± 0.09	0.148 ± 0.099	0.034 ± 0.027	0.018 ± 0.023	5.82 ± 3.15	2.91 ± 1.26
竺山湾	河道	4.50 ± 1.40	3.92 ± 1.51	1.39 ± 0.71	0.221 ± 0.038	0.094 ± 0.016	0.062 ± 0.014	5.30 ± 0.70	4.54 ± 0.79
	湖体	4.03 ± 1.12	3.03 ± 1.53	0.72 ± 0.056	0.211 ± 0.085	0.082 ± 0.036	0.053 ± 0.030	5.72 ± 1.91	4.56 ± 1.61
西北湖区	河道	3.62 ± 1.08	3.10 ± 1.12	0.98 ± 0.53	0.189 ± 0.028	0.082 ± 0.018	0.057 ± 0.020	4.70 ± 0.57	3.78 ± 1.16
	湖体	3.35 ± 1.12	2.67 ± 1.13	0.64 ± 0.57	0.173 ± 0.040	0.063 ± 0.017	0.041 ± 0.012	4.62 ± 0.84	3.47 ± 1.37
西南湖区	河道	3.48 ± 1.01	2.82 ± 0.87	0.51 ± 0.18	0.139 ± 0.061	0.040 ± 0.008	0.030 ± 0.010	3.83 ± 0.99	2.49 ± 0.60
	湖体	2.16 ± 0.74	1.42 ± 0.78	0.17 ± 0.08	0.114 ± 0.034	0.023 ± 0.002	0.010 ± 0.003	3.93 ± 0.94	1.89 ± 0.96
东太湖	河道	1.72 ± 0.52	1.38 ± 0.54	0.32 ± 0.25	0.063 ± 0.017	0.019 ± 0.011	0.008 ± 0.008	3.28 ± 0.41	1.21 ± 0.38
	湖体	1.48 ± 0.42	1.08 ± 0.49	0.12 ± 0.09	0.064 ± 0.016	0.017 ± 0.004	0.004 ± 0.001	3.68 ± 0.84	1.83 ± 0.90
胥口湾	河道	2.52 ± 2.12	2.30 ± 2.05	1.03 ± 1.28	0.095 ± 0.060	0.045 ± 0.041	0.032 ± 0.035	3.57 ± 0.60	2.31 ± 1.60
	湖体	1.50 ± 0.65	1.10 ± 0.68	0.12 ± 0.07	0.051 ± 0.011	0.016 ± 0.004	0.004 ± 0.001	3.59 ± 0.43	1.73 ± 0.35
贡湖湾	河道	2.55 ± 1.06	1.73 ± 1.06	0.46 ± 0.30	0.116 ± 0.049	0.035 ± 0.025	0.019 ± 0.022	4.34 ± 1.31	2.62 ± 0.99
	湖体	1.98 ± 0.45	1.21 ± 0.62	0.14 ± 0.14	0.085 ± 0.029	0.023 ± 0.015	0.008 ± 0.012	4.56 ± 0.58	2.81 ± 0.68

2.3 湖体营养盐的时空异质性

本研究中, 太湖湖体主要的营养指标存在明显的时空异质性(图3). 纵观全湖, 各指标浓度均呈现自西北湖区向东南湖区逐步降低的现象, 表明东南湖区的水质明显好于西北湖区. 主要原因是西北湖区所处流域范围内人口密度大、清洁来水比例低、河道自净能力差, 增加了该湖区入湖污染负荷^[18].

TN 浓度呈现出冬春季节高于夏秋季节的现象; 空间格局上, 西北湖区浓度明显高于东南湖区, 东太湖与胥口湾的 TN 浓度处于最低水平. 然而, 颗粒态氮(PN)却表现出相反的时间格局. 具体而言, PN 浓度为夏秋季节高于冬春季节, 夏季浓度最高且竺山湾、梅梁湾、贡湖湾和湖心区北部位置浓度均大于 $1.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反映出夏季蓝藻等浮游植物生长对水体氮的固定作用.

TP 和颗粒态磷(PP)浓度在湖区时空递减规律非常一致, 呈现出夏季水华期浓度显著高于非水华期的特点, 夏季整个西北湖区则都在 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上. 空间格局上来看, 竺山湾全年 TP 浓度均大于 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 属于Ⅳ类甚至Ⅴ类水质, 而东太湖和胥口湾的 TP 浓度一直处于较低水平. PP 浓度

时空格局与 TP 基本一致. 此外, 夏季 PP 浓度除竺山湾外, 在 THL21、THL31 点位以及梅梁湾部分区域也呈现较高浓度.

根据 Chla 的时空分布可知, 冬季整个太湖均无明显水华产生. 竺山湾、梅梁湾春季的 Chla 平均浓度超过 $35 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 部分区域浓度超过 $45 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 有形成水华产生的趋势. 夏季整个北部湖区浓度均超过 $65 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 蓝藻水华事件频繁出现, 并呈现西北湖区向东南湖区递减的趋势. 秋季水华产生区域主要在梅梁湾和竺山湾, 但部分区域仍高于 $55 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

就高锰酸盐指数而言, 春冬季节的全湖浓度均低于 $5.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而在秋季除了梅梁湾部分区域达到 $6.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外, 其余区域和春、冬季节相比区别不大. 在水华频发的夏季, 高锰酸盐指数浓度达到峰值, 夏季整个北部湖区其浓度均高于 $6.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在梅梁湾和竺山湾区域已经超过 $7.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. BOD_5 的季节特征比高锰酸盐指数明显, 夏季平均浓度最高且高浓度区域最大, 几乎整个北部湖区浓度都在 $3.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 春、秋、冬这 3 个季节均是西北湖区的浓度显著高于湖体其他区域.

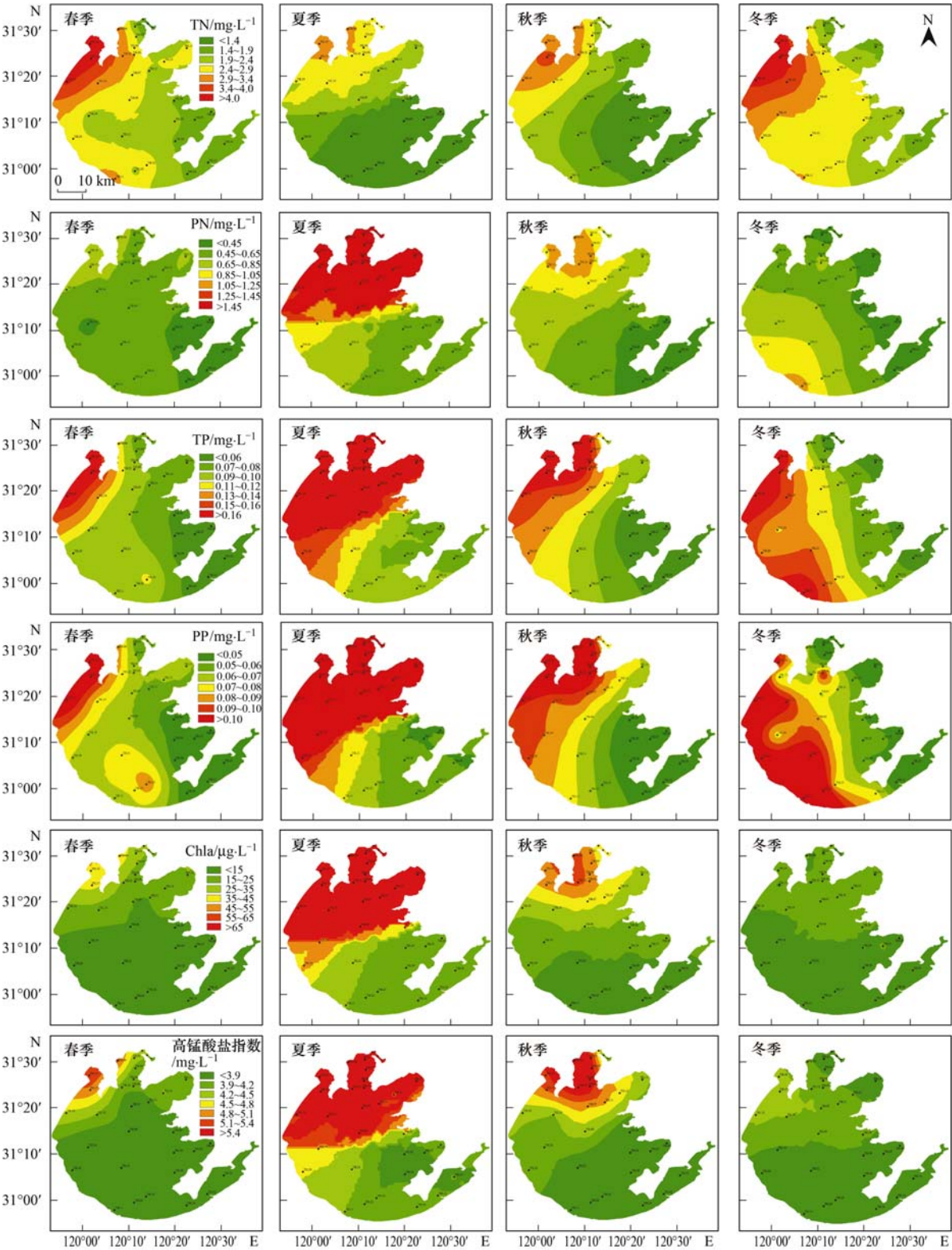


图3 太湖湖体营养盐指标的空间异质性

Fig. 3 Spatial distribution of nutrients for 32 sites in Lake Taihu

3 讨论

3.1 入、出湖河道与湖体各指标相关性分析

将河道与湖区分为入湖、出湖两部分，并对各

指标四季河湖浓度进行相关性分析。结果表明，入湖河道与对应湖区的多个营养盐参数呈显著正相关（图4）。河道与湖区 BOD_5 含量呈显著正相关 ($P = 0.01$)，其他指标均为极显著正相关 ($P < 0.01$)。

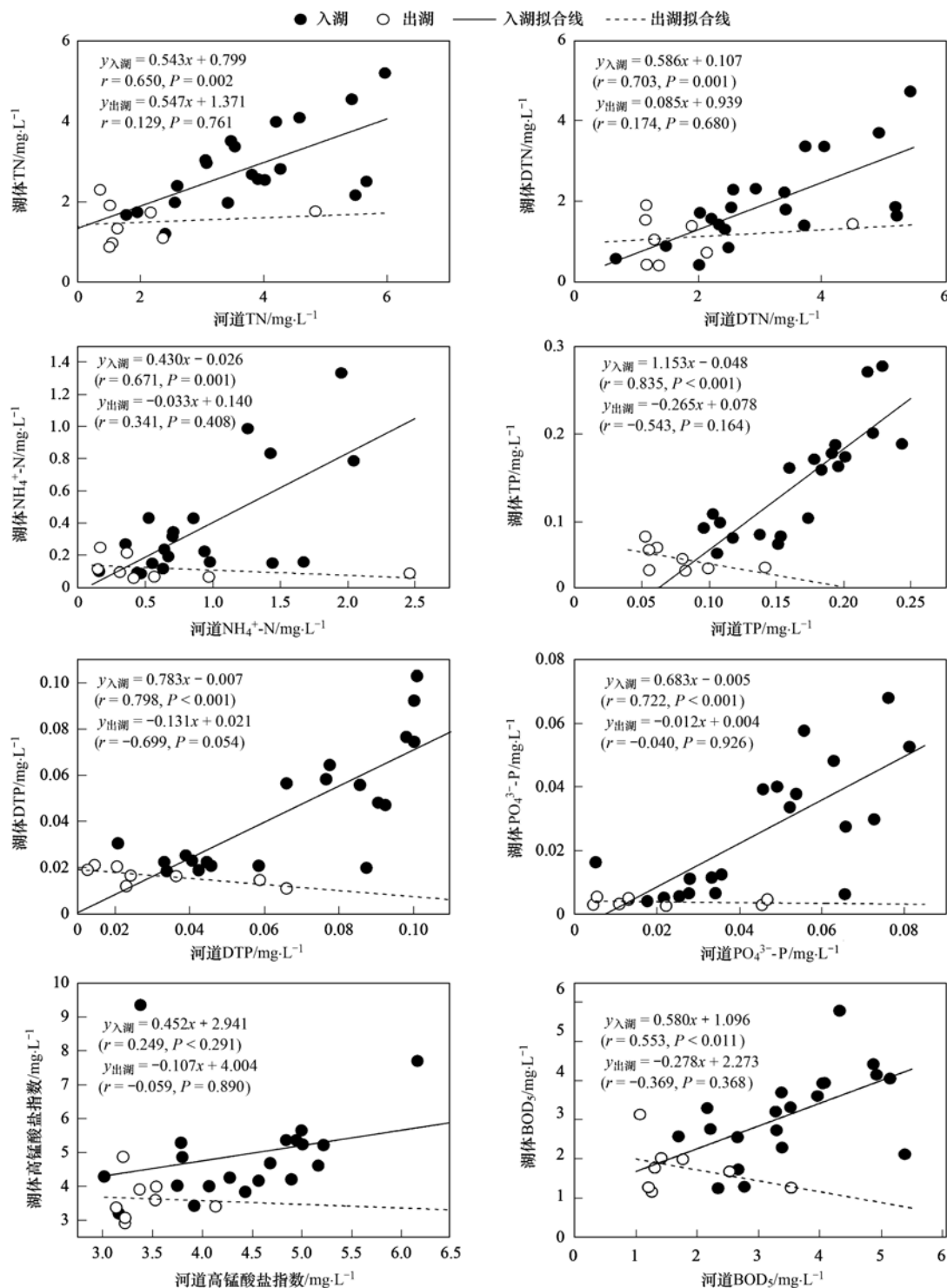


图 4 入、出湖河道与对应湖区各指标相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between inflow rivers and Taihu Lake using different indexes

太湖的主要外源污染来自河道径流输入^[19]. 河道与湖体氮素均呈显著正相关($P < 0.05$), 而河湖中各形态磷均呈极显著正相关($P < 0.01$). 该结果表明, 河道 N、P 的外源输入是湖体营养盐的主要来源. 且其它研究表明在河道入湖污染中, N 和 P 是主要的人湖污染^[8,14,20]. 因此, 太湖河道 N、P

径流输入的削减对湖体富营养化的控制具有重要意义.

高锰酸盐指数可有效地反映水体有机污染的程度^[21,22]. 入湖河道高锰酸盐指数与湖体浓度相关性不显著($P = 0.291$). 可能的原因是除河道外源输入外, 湖体高锰酸盐指数还受湖体水位、水温等理

化因子,以及藻华暴发生长产生的内源污染等多种环境因子的共同影响^[23,24]。比如,在湖体枯水期,水位降低使得库容减少,因此高锰酸盐指数浓度会相对升高,而2016年因特殊的夏季强降雨影响,太湖年平均水深为3.52 m,水位的上升会在一定程度上降低高锰酸盐指数的浓度。

湖体与出湖河道各指标的相关性均不显著($P > 0.05$),甚至湖体与出湖河道部分指标呈现负相关的趋势。主要原因如下:首先,太湖湖体对营养盐具有较强的自净功能,营养盐浓度在湖体的迁移过程中,通过碎屑沉降、沉水植物吸收、鱼类固定磷素以及氮素的反硝化等过程被湖体削减^[25];其次,选取的16条河流中,确定出湖的河流数量较少,在浓度计算以及相关性分析上会产生一定的误差,从而造成统计分析结果的不显著^[26];再次,太湖流域河流流速慢,出湖河道更多受局地性人类活动排污的影响,降低了湖体来水对水质的影响能力。

3.2 河道与湖体主要生源要素的季节动态特征

TN和DTN浓度均呈现冬春季节明显高于夏秋两季的特征,这与朱广伟等人的研究结果相符^[5,10,27]。主要原因如下:一方面,因冬春季节降雨较少,湖体水位下降会使得氮素浓缩,加之春耕时使用化肥引起大量含氮物质进入湖体,增加湖体氮素浓度;另一方面,夏季高温促进反硝化作用,消耗湖体氮素,同时,夏秋季节降雨量增加会在一定程度上稀释湖体营养盐浓度,导致冬春季节湖体氮素浓度明显高于夏秋季节^[5,6,28]。

本研究发现夏季湖体TP远高于河道(图2)以及冬季TP浓度仍高居不下的异常现象(图3)。本文认为,前者可能与风速、水位(降水)、Chla三者的共同作用有关。据此,对湖体各形态磷与上述3种因子的季节响应进行分析,结果如图5所示。在春、夏、秋这3个季节,TP、PP与风速呈明显相反的变化趋势。一般而言,较低的风速(夏季: $2.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),蓝藻会上浮到水体表面^[29,30],导致表层水中TP富集。此外,较低风速下也存在藻华的堆积效应,盛行风向下风口的采样点往往会出现极高的TP浓度^[31]。从水位的角度来看,太湖2016年全年水位在夏季达到最高值(3.95 m),夏季的高水位会对TP存在稀释效应,但对应大降雨量也会导致地表径流增加,从而加大河道向湖体的营养盐输送量。由图5可以看出,TP和PP与水位及Chla变化趋势相一致,表明降水带来的营养盐输入效应大于

对水体营养盐的稀释效应。由图5可知,在夏季水华发生期,藻类的大量生长与TP和PP的关系紧密^[6,32]。水华产生的前中期,藻类生长需要消耗大量的溶解态磷,并产生对沉积物中DTP的泵吸效应^[33],造成此时DTP浓度下降;水华后期,藻类的分解作用会向水体释放大量磷素,最终造成夏季太湖湖体TP升高^[34,35]。

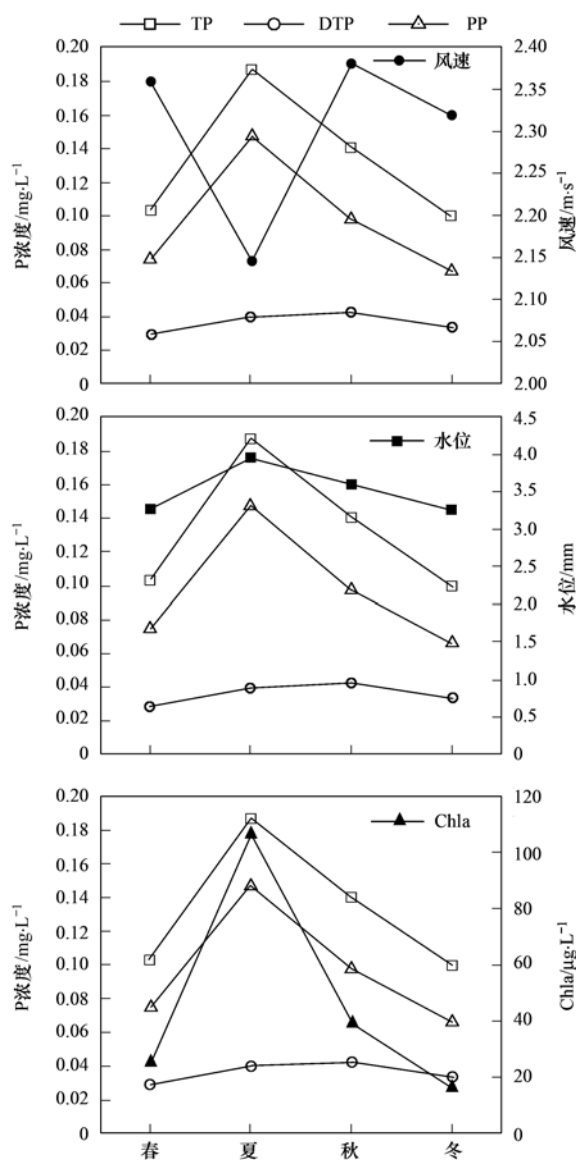


图5 湖体各形态磷对风速、水位、Chla的季节响应

Fig. 5 Seasonal response to wind speed, water level and Chla with various forms of phosphorus

从图3可以看出,冬季整个西部太湖TP浓度较高($\text{TP} > 0.110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),属于IV类水。此外,冬季较高的TP浓度也可以为春季藻类生长提供物质基础,而春季藻类生长带来的营养盐再分配也为夏季藻华暴发埋下伏笔。本文认为生活废水以及内源释放共同导致了太湖湖体冬季TP的高值,呈现出

非面源污染的特征. 一般而言, 农业面源污染、工业、生活污水以及降水都是 P 污染的主要来源, 其中农业面源污染和降水受季节影响较大^[36]. 农耕在春季开始, 因此可以排除农业污染对此现象造成的影响. 冬季较少的降水量对应较低的水位 (3.26 m), 从而产生湖体磷素的浓缩效应. 同时, 冬季悬浮颗粒物 (SS) 浓度为全年第二高, 达到 $50.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SS 的较高浓度也会造成 TP 浓度的升高^[37].

3.3 极端降雨对河道及湖体营养盐的贡献分析

2016 年太湖流域降水及太湖水位日监测结果如图 6 所示. 2016 年降雨集中在 4~7 月, 6 月总降雨量全年最高 (359.2 mm), 7 月 2 日出现年度最大单日降雨量, 达到 166.6 mm. 相应地, 太湖湖体水位在 4~7 月也出现明显上升, 一度超过警戒值, 7 月 8 日水位为 4.79 m, 达到全年最高值. 降水对太湖流域营养盐影响显著. 在 4~7 月的强降雨过程中, 河道中 TN 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度明显下降, 而湖体 TN 浓度从 5 月起逐渐上升, 7 月达到最高值, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度则稳步上升 (图 2). 原因首先在于氮污染源的

下降; 4 月起, 春耕已逐渐结束, 农业面源污染明显减弱, 从而带入河道的氮素也随之减少. 其次, 暴雨会产生明显的地表径流, 对地表有较强的冲刷作用, 导致流域氮素的平均流失速率上升^[38,39], 因此导致河道氮素浓度下降. 对于非点源污染, 降雨-径流过程会向水体输送大量的营养盐, 而降雨强度又是影响径流的最主要因素^[40,41], 加之湖体蓝藻等浮游植物生长对氮的累积作用, 导致该时间段内湖体的氮素浓度不断上升.

河道 TP 浓度在强降水过程中逐渐降低. DTP 从 5 月开始升高, 7 月之后回落 (图 2), 这主要是由于在降雨-径流过程中, 磷素流失以 PP 为主^[42], 暴雨强度对磷的携带能力影响很大. 湖体 TP 从 5 月开始上升, 7 月达到峰值, 而 DTP 在上升之后的 7 月开始下降. 湖体 4 月发生春季藻类小高峰, 藻华衰亡分解后会向水体释 P, 导致磷素从 5 月开始增加. 7 月湖体暴发蓝藻水华, 溶解态的磷素被藻类吸收转化为颗粒态贮存, 导致 DTP 下降, 加之强降雨向水体输送的大量营养盐, 使得 TP 在此时达到峰值.

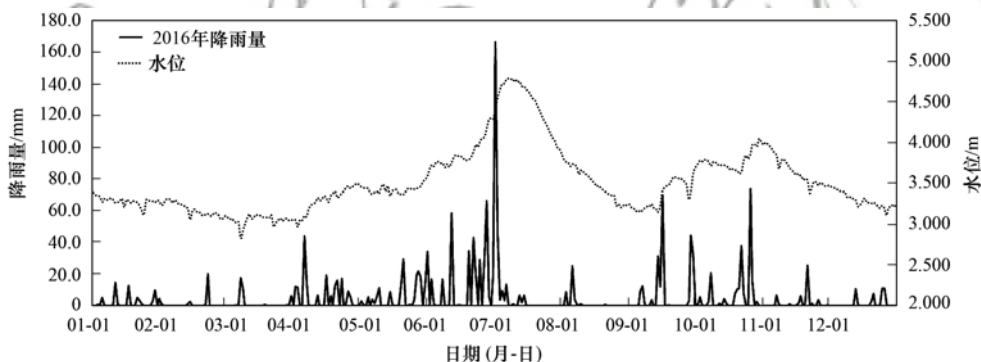


图 6 太湖湖泊生态系统研究站站点降雨及水位周年变化

Fig. 6 Annual variation of rainfall and water level in TLLER

同时, 依据河道入湖流量与对应区域的 TN 、 TP 浓度, 估算出 2016 年河道 TN 、 TP 入湖污染负荷分别为 $6.51 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $0.261 \times 10^4 \text{ t}$. 根据湖体年平均水深结合水域面积和浓度, 估算出湖体 TN 、 TP 赋存量分别为 $1.8 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $0.88 \times 10^4 \text{ t}$. 对比 2015 年太湖健康状况报告, 2016 年 TN 、 TP 的入湖污染负荷分别是 2015 年的 1.4 倍和 1.3 倍. 湖体 TN 、 TP 赋存量则是赵林林等^[43]研究的 2005~2009 年湖体平均赋存量的 1.3 倍和 1.7 倍. 河道 TN 、 TP 的平均浓度与易娟等^[10]的研究相近, 但入湖负荷量明显增大. 由此可知, 因 2016 年强降雨导致的明显水情变化可强烈地影响河道营养盐负荷与湖体赋存量.

4 结论

(1) 2016 年太湖 16 条主要环湖河道各营养盐形态平均浓度均高于湖体, 且不同分区入湖河流水质在季节与空间上都对相应湖区的营养盐浓度产生显著影响. 研究表明, 目前河道营养盐输入仍然是湖体营养盐的主要来源, 可见对太湖富营养化的治理仍需将重点放在流域面源污染控制方面.

(2) 各营养盐指标呈现出明显的季节分异特征. 氮素冬春季高, 一是由于冬季降雨少水位低浓缩了营养盐浓度, 二是受春耕施肥影响; 夏秋季低则是因为降雨增多起到了稀释作用. 磷浓度的季节变化明显受水华影响, 在夏季达到最高值, 而 TP

除夏季浓度最高外,在冬季仍保持较高的浓度和较大的污染区域.反映有机污染程度的高锰酸盐指数和 BOD_5 均在水华暴发的夏季最高.夏季藻华暴发之后的营养盐再分配机制是导致 TP 与有机质值夏季异常高的原因之一.

(3)太湖湖体污染有着明显的空间分布特征,呈现自西北向东南污染程度逐渐降低的规律.西北区域除工农业发展比较迅速外,因风向以及本身构局,易于水华生长和堆积,藻华衰亡分解再分配的营养盐容易在该区滞留,使得西北湖区污染程度最为严重.

(4)夏季极端降雨带来极大的地表径流,对地表的冲刷作用也相应增强,导致河道夏季 N、P 浓度下降;而雨水本身含有 N、P,加之暴增的入流量,使得湖体 TN、TP 在该季达到峰值.

致谢:中国科学院太湖湖泊生态系统研究站提供采样协助及湖体同步数据,薛静琛、钱荣树、夏丽萍、张成英实验员协助了水样处理及水质分析,邹伟、邓瑜兵、邱敏、国超旋在论文写作方面给予了细心指导,在此一并表示感谢.

参考文献:

- [1] 贾军梅,罗维,杜婷婷,等.近十年太湖生态系统服务功能价值变化评估[J].生态学报,2015,35(7):2255-2264.
Jia J M, Luo W, Du T T, et al. Valuation of changes of ecosystem services of Tai Lake in recent 10 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2255-2264.
- [2] Tong Y D, Zhang W, Wang X J, et al. Decline in Chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(7): 507-511.
- [3] Paerl H W, Otten T F. Blooms bite the hand that feeds them [J]. Science, 2013, 342(6157): 433-434.
- [4] 戴秀丽,钱佩琪,叶凉,等.太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985-2015年)[J].湖泊科学,2016,28(5):935-943.
Dai X L, Qian P Q, Ye L, et al. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015 [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(5): 935-943.
- [5] 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.
- [6] 赵林林,朱广伟,许海.太湖梅梁湾理化指标分层的空间分布特征[J].环境科学研究,2013,26(7):721-727.
Zhao L L, Zhu G W, Xu H. Spatial distribution of the physicochemical parameter stratification in Meiliang Bay, Lake Taihu, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7): 721-727.
- [7] 黄漪平.太湖水环境及其污染控制[M].北京:科学出版社,2001.
Huang Y P. Water environment and pollution control in Lake Taihu [M]. Beijing: Science Publishing, 2001.
- [8] 金相灿.中国湖泊环境[M].北京:海洋出版社,1995.
- [9] 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等.太湖沉积物有机碳与氮的来源[J].生态学报,2011,31(16):4661-4670.
Ni Z K, Li Y J, Wang S R, et al. The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4661-4670.
- [10] 易娟,徐枫,高怡,等.2007年以来环太湖22条主要河流水质变化及其对太湖的影响[J].湖泊科学,2016,28(6):1167-1174.
Yi J, Xu F, Gao Y, et al. Variations of water quality of the major 22 inflow rivers since 2007 and impacts on Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(6): 1167-1174.
- [11] 燕姝雯,余辉,张璐璐,等.2009年环太湖入出湖河流量及污染负荷通量[J].湖泊科学,2011,23(6):855-862.
Yan S W, Yu H, Zhang L L, et al. Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009 [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(6): 855-862.
- [12] 马倩,刘俊杰,高明远.江苏省入太湖污染量分析(1998-2007年)[J].湖泊科学,2010,22(1):29-34.
Ma Q, Liu J J, Gao M Y. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998-2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 29-34.
- [13] 秦伯强,胡维平,陈伟民.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科学出版社,2004.
Qin B Q, Hu W P, Chen W M. Process and mechanism of environmental changes of the Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [14] 韩晓霞,朱广伟,许海,等.太湖夏季水体中尿素的来源探讨[J].环境科学,2014,35(7):2547-2556.
Han X X, Zhu G W, Xu H, et al. Source analysis of urea-N in Lake Taihu during summer [J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2547-2556.
- [15] Li Y P, Kumud A, Mark C S, et al. Spatiotemporal patterns in nutrient loads, nutrient concentrations, and algal biomass in Lake Taihu, China [J]. Lake and Reservoir Management, 2011, 27(4): 298-309.
- [16] Qin B Q, Zhu G W, Gao G, et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management [J]. Environmental Management, 2010, 45(1): 105-112.
- [17] 翟淑华,张红举.环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000-2002年)[J].湖泊科学,2006,18(3):225-230.
Zhai S H, Zhang H J. Water quantity and waste load variation of rivers around Lake Taihu from 2000 to 2002 [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(3): 225-230.
- [18] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, et al. Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis [J]. Environmental Pollution, 2013, 173: 216-223.
- [19] 牛勇.太湖入湖河流污染特征及面源污染负荷研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
Niu Y. Study on inflow rivers pollution characteristics, estimation of non-point source pollution in Lake Taihu watershed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [20] 吴雅丽,许海,杨桂军,等.太湖水体氮素污染状况研究进展[J].湖泊科学,2014,26(1):19-28.

- Wu Y L, Xu H, Yang G J, *et al.* Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(1): 19-28.
- [21] 汤峰, 钱益群. 巢湖水总有机碳(TOC)-高锰酸钾指数(COD_{Mn})相关性研究[J]. *重庆环境科学*, 2001, **23**(4): 64-66.
- Tang F, Qian Y Q. Researching the relationship between TOC and COD_{Mn} of Chaohu Lake water[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2001, **23**(4): 64-66.
- [22] 李灵芝, 周云, 王占生. 饮用水深度处理工艺对有机污染物的去除效果[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 542-545.
- Li L Z, Zhou Y, Wang Z S. Effect of advanced drinking-water treatment techniques on removal of organic pollutants[J]. *China Environmental Science*, 2002, **22**(6): 542-545.
- [23] 范成新, 袁静秀, 叶祖德. 太湖水体有机污染与主要环境因子的响应[J]. *海洋与湖沼*, 1995, **26**(1): 13-20.
- Fan C X, Yuan J X, Ye Z D. Response of the organic pollution in taihu lake to the mainly environmental factors[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, **26**(1): 13-20.
- [24] Yin Y, Zhang Y L, Liu X H, *et al.* Temporal and spatial variations of chemical oxygen demand in Lake Taihu, China, from 2005 to 2009[J]. *Hydrobiologia*, 2011, **665**(1): 129-141.
- [25] 张红举. 太湖氮磷营养盐自净能力研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [26] 金颖薇, 朱广伟, 许海, 等. 太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 936-945.
- Jin Y W, Zhu G W, Xu H, *et al.* Spatial distribution pattern and stock estimation of nutrients during bloom season in lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 936-945.
- [27] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [28] Chen Y W, Qin B Q, Teubner K, *et al.* Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(4): 445-453.
- [29] Wu T F, Qin B Q, Brookes J D, *et al.* The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **518-519**: 24-30.
- [30] Carey C C, Ibelings B W, Hoffmann E P, *et al.* Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate[J]. *Water Research*, 2012, **46**(5): 1394-1407.
- [31] 范成新, 陈宇炜, 吴庆龙. 夏季盛行风对太湖北部藻类水华分布的影响[J]. *上海环境科学*, 1998, **17**(8): 4-6, 11.
- Fan C X, Chen Y W, Wu Q L. Effect of prevailing wind in summer on distribution of algal bloom in Lake Taihu[J]. *Shanghai Environmental Science*, 1998, **17**(8): 4-6, 11.
- [32] 朱梦圆. 蓝藻水华影响下太湖营养盐的再分配机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [33] 谢平. 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2005, **35**(S2): 11-23.
- Xie P. Biological mechanisms driving the seasonal changes in the internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. *China Series D Science Earth*, 2006, **49**(S1): 14-27.
- [34] 朱梦圆, 朱广伟, 王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 409-415.
- Zhu M Y, Zhu G W, Wang Y P. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 409-415.
- [35] Zhu M Y, Zhu G W, Zhao L L, *et al.* Influence of algal bloom degradation on nutrient release at the sediment-water interface in Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2013, **20**(3): 1803-1811.
- [36] 成小英, 李世杰, 濮培民. 城市富营养化湖泊生态恢复——南京莫愁湖物理生态工程试验[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 218-224.
- Cheng X Y, Li S J, Pu P M. Ecological restoration of urban eutrophic lakes—a case study on the physical and ecological engineering in Lake Mochou, Nanjing[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(3): 218-224.
- [37] Zhu G W, Wang F, Gao G, *et al.* Variability of phosphorus concentration in large, shallow and eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Water Environment Research*, 2008, **80**(9): 832-839.
- [38] 黄俊, 张旭, 彭炯, 等. 暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(2): 255-258.
- Huang J, Zhang X, Peng J, *et al.* Temporal and spatial distribution and transportation of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(2): 255-258.
- [39] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- Chen L, Liu D F, Song L X, *et al.* Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow-brown under different rainfall intensities[J]. *Environmental Sciences*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- [40] Gong Y W, Shen Z Y, Hong Q, *et al.* Parameter uncertainty analysis in watershed total phosphorus modeling using the GLUE methodology[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **142**(3-4): 246-255.
- [41] Liu R M, Wang J W, Shi J H, *et al.* Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 1069-1077.
- [42] Foster I D L, Chapman A S, Hodgkinson R M, *et al.* Changing suspended sediment and particulate phosphorus loads and pathways in underdrained lowland agricultural catchments; Herefordshire and Worcestershire, U. K. [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **494**(1-3): 119-126.
- [43] 赵林林, 朱广伟, 顾钊, 等. 太湖水体氮、磷赋存量的逐月变化规律研究[J]. *水文*, 2013, **33**(5): 28-33.
- Zhao L L, Zhu G W, Gu Z, *et al.* Monthly variation of nitrogen and phosphorus volume in Taihu Lake, China[J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(5): 28-33.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)