

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



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

基于湖泊与出入湖水质关联性研究：以鄱阳湖为例

黄冬凌^{1,2}, 倪兆奎², 赵爽², 张波涛², 冯明雷³, 陈宏文³, 李晓秀^{1*}, 王圣瑞^{2,4*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 江西省环境保护科学研究院, 南昌 330029; 4. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

摘要: 基于1996~2016年鄱阳湖及出入湖水质数据, 解析了鄱阳湖与出入湖河流水质间关联及影响因素。结果表明TN和TP是引起鄱阳湖水质下降的主要因子, 其中, 1996~2003年, 鄱阳湖及出入湖水质总体较好, 但呈下降趋势, 主要受流域污染负荷增加影响; 2004~2011年, 水质继续下降, “五河”水质下降明显, 并引起鄱阳湖水质下降; 由于鄱阳湖较强的水质净化能力, 其出湖水质相对较好, 该阶段水质下降受流域污染负荷增加与水文条件变化共同影响; 2012~2016年, 水质进一步下降, 入湖河流水质快速下降及来水量减少, 使鄱阳湖水质净化能力降低, 进而导致出湖水质也有所下降, 该阶段鄱阳湖水质下降仍受流域污染负荷增加与水文条件变化共同影响。由此可见, 入湖河流与鄱阳湖水质关联密切, 南部和东部湖区TN浓度明显高于西部湖区, 主要与赣江和信江TN负荷输入有关; 南部湖区TP浓度明显高于东部和西部湖区, 主要与赣江和抚河TP负荷较高有关。相对于水文条件变化, 流域污染增加对湖泊水污染贡献更明显。

关键词: 鄱阳湖; 出入湖河流; 演变; 关联性; 影响因素

中图分类号: X524; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4450-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201902103

Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake

HUANG Dong-ling^{1,2}, NI Zhao-kui², ZHAO Shuang², ZHANG Bo-tao², FENG Ming-lei³, CHEN Hong-wen³, LI Xiao-xiu^{1*}, WANG Sheng-rui^{2,4*}

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Jiangxi Academy of Environmental Science, Nanchang 330029, China; 4. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The relationships between inflow and outflow water quality data for Poyang Lake from 1996 to 2016 are discussed and the main influencing factors are identified. TN and TP were the main factors causing a decline in water quality in Poyang Lake during the study period. The water quality of both the inflow and outflow rivers was generally good between 1996 and 2003; however, water quality declined over the study period, which is attributed to an increase in nutrients loads in the watershed. From 2004 to 2011, the water quality of the “Five Rivers” decreased significantly, which caused the water quality of Poyang Lake to decline. Due to the high purification capacity of Poyang Lake, the water quality of the outflow during this period was relatively good. A decline in water quality after this point was affected by pollution loads and hydrological conditions. Specifically, from 2012 to 2016, water quality in Poyang Lake and of the inflow water declined further. This was combined with a decrease in the water-purification capacity of the lake due to changes in the hydrological conditions, resulting in lower water quality at the outflow. Overall, the water quality of the inflow river has been closely related to the water quality in Poyang Lake. The concentrations of TN were significantly higher in the southern and eastern areas of Poyang Lake compared to the western areas. Higher nutrient loading from the Ganjiang River and the Xinjiang River has been an important driver. The concentrations of TP in the southern area of the lake have been significantly higher than in the eastern and western areas. This is attributed to comparatively high TP loads in the Ganjiang River and the Fuhe River. Compared to the changes in hydrological conditions, variations in nutrient loading have had a greater effect on water quality in the lake.

Key words: Poyang Lake; inflow/outflow river; evolution; correlation; influencing factors

我国是一个多湖泊国家, 面积大于1 km²的湖泊超过2 600个; 由于湖泊具有供水、灌溉及调蓄洪水等多种功能, 在国民经济发展中发挥着重要作用^[1]。伴随流域经济社会快速发展, 过量氮磷等污染物持续入湖导致我国湖泊较为严重的水污染及富营养化等问题^[2], 严重影响湖泊生态服务功能, 特别是威胁饮用水安全供应^[3,4]。湖泊水质变化是自然因素及人为活动对流域生态环境影响的综合体现^[5-7], 不同湖泊由于受气候变化、流域水文过程

和经济社会发展等影响差异较大。因此, 解析水质变化及影响因素是湖泊水质管理的关键所在。

鄱阳湖是中国最大淡水湖, 具有完整的水系单元, 汇纳赣江、抚河、信江、饶河和修河这5条河

收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900805); 国家万人计划项目(312232102)

作者简介: 黄冬凌(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化过程与机制, E-mail: 1132064227@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangsr@bnu.edu.cn; lixiaoxiu0548@sina.com

来水，经入江水道汇入长江，湖泊与出入湖河流存在空间上的连续性^[8]，且入湖河流是鄱阳湖氮磷输入的重要途径，陆域氮磷输入与湖泊氮磷输出间存在显著正相关关系^[9~12]；同时，其独特的生境与复杂的水文条件等形成了其极具特色的湿地生态系统，具有较好的水质净化作用。因此，客观认识鄱阳湖水质特征及变化趋势需要综合考虑入湖、湖泊及出湖水质间的相互作用，并解析其相互关系，对鄱阳湖保护治理具有重要意义。

目前针对鄱阳湖水污染特征及水质演变等方面的研究较多，主要包括水质时空变化^[13]，主要水质指标与污染源间关系解析^[14,15]及水质与水位间关系研究等方面^[1]。鉴于出入湖水质与鄱阳湖水质间关系密切，而现有针对鄱阳湖水质时空变化方面的研究，并不能从流域特征与空间关联性等方面，综合考虑入湖、湖泊及出湖水质间相互作用，全面认识鄱阳湖水质特征及演变趋势。本研究基于1996~2016年鄱阳湖及出入湖河流水环境、流域社会经济发展及水文等数据资料，分析鄱阳湖及出入湖水质演变特征，揭示不同时期水质变化、主要影响因素及其与出入湖河流水质间关联，试图更加科学地认识鄱阳湖水质问题，并提出水环境保护治理建议，以期对鄱阳湖水环境保护提供科学支撑。

表1 鄱阳湖流域监测点位地理位置信息

Table 1 Geographical location information for monitoring points in Poyang Lake basin							
编号	点位	北纬/(°)	东经/(°)	编号	点位	北纬/(°)	东经/(°)
A1	吴城修河	29.19	116.00	B7	蚌湖	29.27	116.21
A2	永修县城	29.03	115.82	B8	鄱阳湖出口	29.21	116.01
A3	吴城赣江	29.18	116.02	B9	金溪咀刘家	28.73	116.33
A4	昌邑	29.02	116.06	B10	南湖村	28.58	116.21
A5	朝阳水厂	28.67	115.85	B11	南矶山	28.95	116.36
A6	塔城	28.48	116.08	B12	伍湖分场	29.02	116.23
A7	梅港	28.44	116.81	B13	白沙洲	29.16	116.56
A8	赵家湾	29.03	116.64	B14	康山	28.94	116.43
B1	星子	29.45	116.05	B15	莲湖	28.99	116.54
B2	吴城	29.19	116.02	B16	梅溪咀	28.82	116.38
B3	三山	29.15	116.31	B17	余干	28.93	116.49
B4	老爷庙	29.75	116.22	C1	新港	29.76	116.11
B5	蛤蟆石	29.38	116.07	C2	金鸡坡	29.75	116.04
B6	都昌	29.61	116.14	C3	湖口	29.74	116.26

1.2.2 研究方法

水质综合评分法是在主成分分析法基础上，建立水质综合评价函数，从而获得水质指标的对应评分^[19]。因此，本研究采用水质综合评分法试图综合研究鄱阳湖及出入湖水质间关系，具体方法如下。

①建立原始变量矩阵 X 由 m 个样本和 n 个因

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖(28°24′~29°46′N、115°49′~116°46′E)是中国最大淡水湖，具有独特的湿地系统^[16]，其在淡水供应，污染物分解和防洪等方面发挥着重要作用^[17]。受五河及长江来水双重影响，具有典型过水性、吞吐性、季节性特征^[18]，其水质与出入湖水质关系密切。根据鄱阳湖与出入湖水质空间差异，将其空间上分为组1、组2和组3共3组(图1)，并在结果部分利用聚类分析进行具体表述。

1.2 数据来源及研究方法

1.2.1 数据来源

本研究所用水质、水位和流量等数据来自江西省环境监测中心站和江西水利厅，社会经济数据来自江西省统计年鉴。水质指标为1996~2016年鄱阳湖及出入湖DO、高锰酸盐指数、BOD₅、NH₄⁺-N、TN和TP这6项；其中入湖监测点位为A1~A8，湖泊监测点位中1996~2003年为B1(星子)、B5(蛤蟆石)、B6(都昌)、B14(康山)和B15(莲湖)，2003~2016年为B1~B17，出湖监测点位为C1~C3(图1)，各监测点位具体地理位置信息见表1。

子构成。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

②标准化处理原始变量矩阵 X ，采用 Z-Score

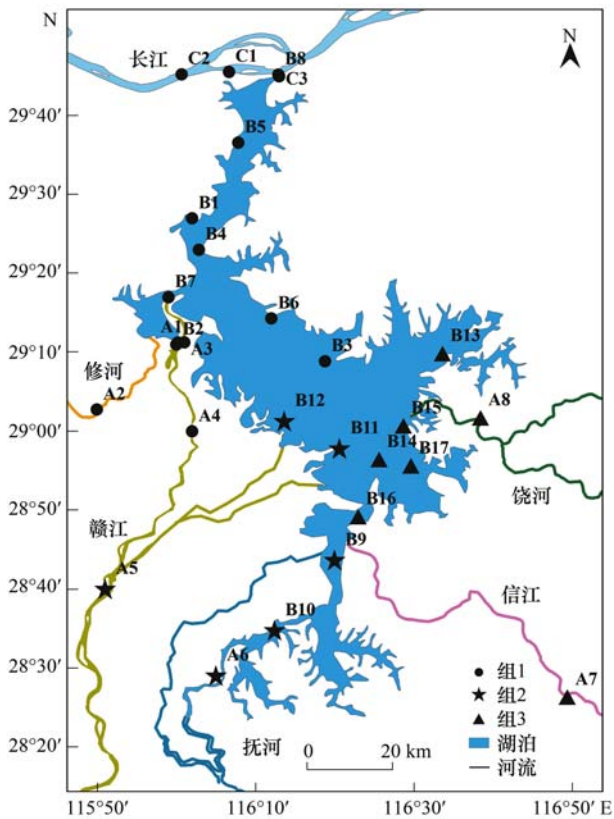


图1 鄱阳湖流域研究区监测点示意图

Fig. 1 Monitoring sites in the Poyang Lake basin

变换进行标准化,其标准化公式为:

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / S_j$$

式中:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$$

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$$

③计算标准化数据相关系数矩阵,并求出特征根 λ .

④确定主成分个数.

根据累计方差贡献率确定主成分个数,即按照方差占总方差比例确定.

$$\alpha = \sum_{i=1}^p \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

式中,通常取 $\alpha \geq 85\%$, p 为主成分的个数.

⑤确定主成分 $F_i (i=1, \dots, p)$ 表达式.

$$\begin{cases} F_1 = a_{11}ZX_1 + a_{12}ZX_2 + \dots + a_{1n}ZX_n \\ F_2 = a_{21}ZX_1 + a_{22}ZX_2 + \dots + a_{2n}ZX_n \\ \dots\dots\dots \\ F_n = a_{n1}ZX_1 + a_{n2}ZX_2 + \dots + a_{nn}ZX_n \end{cases}$$

⑥建立综合评价函数,并计算水质综合评分.

$$F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} F_2 + \dots + \frac{\lambda_p}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} F_p$$

$$\dots + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} F_p$$

1.3 数据分析

采用 Origin 作图, SPSS statistics 24 统计分析; DPS 进行灰色关联分析; Spearman 秩相关系数进行 Daniel 趋势检验; 聚类分析 (CA) [20] 进行鄱阳湖流域空间分组; 单因素方差分析 (ANOVA) 判别各水质指标空间差异, 灰色关联分析 (GRM) 判别鄱阳湖与出入湖水质的关联度 [21~23], 用主成分分析和多元回归统计法识别影响因素.

2 结果与分析

2.1 鄱阳湖及出入湖水水质演变的阶段特征

2.1.1 不同阶段鄱阳湖及出入湖水水质变化

水质综合评分的最大优势是将多个物理和化学水质参数转化为一个综合反映水质状况的指标来评价水质状况, 从而消除由于不同参数评价标准间的差异而导致的不同水质评价结果的问题 [24,25]. 评分越高 (正得分越高水质越差, 负得分越高水质越好), 表明水质受污染程度越重 [19]. 本研究运用该方法评价 1996~2016 年鄱阳湖及出入湖水水质变化趋势, 由图 2 可见, “五河”入湖水水质综合评分范围为 -0.29~0.79, 近

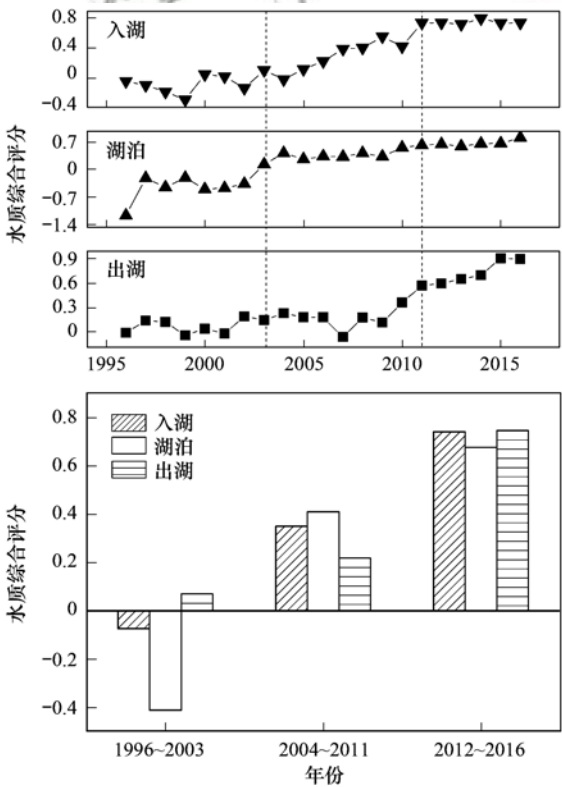


图2 1996~2016年鄱阳湖入湖与湖泊及出湖综合水质评分阶段变化趋势

Fig. 2 Trends in the comprehensive water quality score of Poyang Lake and the inflow/outflow rivers from 1996 to 2016

20 年增加了 0.78；鄱阳湖水质综合评分范围为 -1.18 ~ 0.81，近 20 年增加了 1.99；出湖水质综合评分为 -0.06 ~ 0.9，近 20 年增加了 0.9。Daniel 趋势检验结果表明(表 2)，鄱阳湖及出入湖水水质综合评分秩相关系数 $r_s > 0$ 且均大于其临界值 W_p 。因此，均呈极显著上升趋势 ($P < 0.01$)，即近 20 年鄱阳湖及出入湖水水质呈下降趋势；其中“五河”入湖水质由于人类活动影响持续下降，受入湖水质及水文过程变化等影响，湖泊水质下降最快，由于鄱阳湖较大水质净化能力，而使出湖水质下降幅度最小。

就变化特征来讲，1996 ~ 2016 年鄱阳湖及出入湖水水质综合评分变化总体可分为 3 个阶段，其中 1996 ~ 2003 年，入湖综合水质评分年均增加 0.02，湖泊综合水质评分年均增加 0.16，出湖水质综合评

分年均增加 0.02，该阶段鄱阳湖及出入湖水水质均呈下降趋势，其中湖泊水质下降幅度最大；由于受流域人类影响活动相对较小，鄱阳湖及出入湖水水质均较好。2004 ~ 2011 年，入湖水质综合评分年均增加 0.09，而湖泊和出湖水质综合评分年均增加为 0.03 和 0.02，该阶段入湖水质下降幅度最大，鄱阳湖水质和出湖水质均变差，由于鄱阳湖较大的水质净化效果，使出湖水质优于入湖和湖泊水质。2012 ~ 2016 年，入湖和湖泊水质综合评分年均增加为 0.002 和 0.03，而出湖水质综合评分年均增加 0.06，该阶段出湖水质下降幅度最大，由于人类活动影响使入湖水质持续下降，进而导致湖泊水质下降，并且由于污染负荷增加及湖泊自身净化效果减弱，导致出湖水质下降最快，最终使鄱阳湖及出入湖水水质均较差。

表 2 鄱阳湖及出入湖水水质演变特征统计分析¹⁾

Table 2 Statistical analysis of water quality evolution characteristics for Poyang Lake and the inflow/outflow rivers				
指标	r_s 值	W_p ($P < 0.05$)	W_p ($P < 0.01$)	评价结果
入湖水水质综合评分	0.939	0.435	0.556	上升(极显著)
湖泊水质综合评分	0.940	0.435	0.556	上升(极显著)
出湖水水质综合评分	0.783	0.435	0.556	上升(极显著)

1) $r_s > 0$ 表明呈上升趋势， $r_s > W_p$ 表明达到显著或极显著水平

2.1.2 不同水期鄱阳湖及出入湖水水质变化

由于鄱阳湖及出入湖水水质受来水影响较大^[26]，本研究分析了 1996 ~ 2016 年不同水期鄱阳湖及出入湖水水质变化特征。由图 3 可见，丰水期，入湖和出湖水质综合评分近 20 年增加了 0.49 和 0.79；而湖泊水质综合评分近 20 年增加了 1.19；平水期，入湖和出湖水质综合评分近 20 年增加了 0.46 和 0.5；而湖泊水质综合评分近 20 年增加了 1.37；枯水期，入湖和出湖水质综合评分近 20 年增加了 0.4 和 0.42；而湖泊水质综合评分近 20 年增加了 1.02；因此，近 20 年不同水期鄱阳湖及出入湖水水质均下降，且丰水期、平水期和枯水期湖区水质下降幅度均大于入湖和出湖水质。

不同水期鄱阳湖及出入湖水水质变化特征结果见图 4 所示，3 个阶段枯水期鄱阳湖及出入湖水水质综合评分值均高于丰水期和平水期，即相对于丰水期和平水期，1996 ~ 2016 年的 20 年间鄱阳湖枯水期水质均最差。而 1996 ~ 2003 年间，不同水期入湖与湖泊及出湖水质综合评分较为稳定，水质较好；2004 ~ 2011 年，3 个水期入湖与湖泊及出湖水质综合评分较上一阶段均大幅增加，尤其是枯水期入湖水水质综合评分增加 0.39，湖泊和出湖水质综合评分

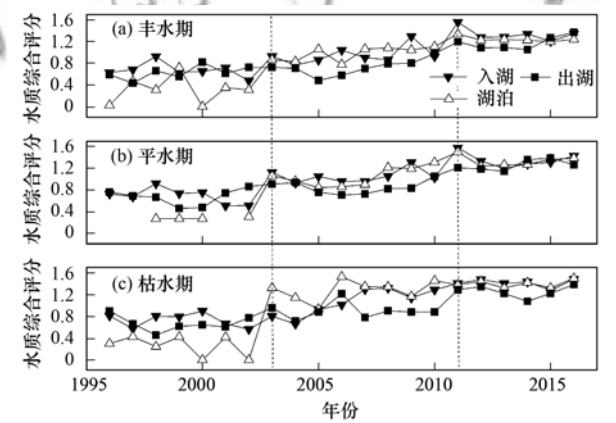


图 3 1996 ~ 2016 年不同水期入湖与湖泊及出湖水水质综合评分

Fig. 3 Comprehensive water quality scores for Poyang Lake and the inflow/outflow rivers during different water periods from 1996 to 2016

增加 0.72 和 0.24，因此枯水期鄱阳湖与出入湖水水质下降最为明显；2012 ~ 2016 年，3 个水期入湖与湖泊及出湖综合水质评分较上一阶段进一步增加，其中枯水期入湖水水质综合评分增加 0.24，湖泊和出湖综合水质评分增加 0.13 和 0.3，该阶段枯水期鄱阳湖与出入湖水水质下降较明显，并且由于流域污染不断累积及枯水期水位持续降低使鄱阳湖水动力条件及水生态系统退化^[27]，最终导致枯水期入湖与湖泊及出湖水质均污染较严重。

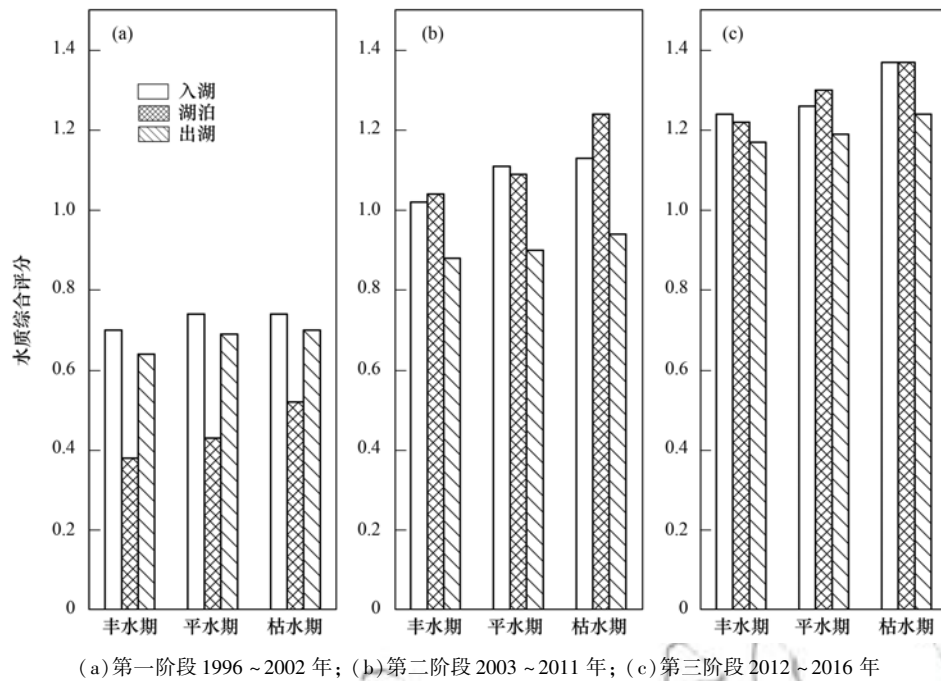


图 4 1996 ~ 2016 年不同水期各阶段入湖与湖泊及出湖水水质综合评分

Fig. 4 Comprehensive water quality scores for Poyang Lake and the inflow/outflow rivers at different stages between 1996 and 2016

2.2 鄱阳湖与出入湖水水质间的关联性分析

2.2.1 鄱阳湖水水质空间差异

基于 2012 ~ 2016 年 DO、高锰酸盐指数、BOD₅、NH₄⁺-N、TN 和 TP 这 6 项水质指标,对鄱阳湖与五河监测点聚类,结果见图 5, 欧姆距离大于 20 时,可分为 3 组,其中组 1 包括赣江的昌邑和吴城赣江,修河的吴城修河和永修县城,长江九江段的金鸡坡、新港和湖口及鄱阳湖西部湖区与入江水道区域的都昌、三山、蛤蟆石、鄱阳湖出口、老爷庙、星子、吴城和蚌湖;组 2 包括赣江的朝阳水厂,抚河的塔城及鄱阳湖南部湖区的南湖村、伍湖分场、金溪咀刘家和南矶山;组 3 包括饶河的赵家湾,信江的梅港及鄱阳湖东部湖区的白沙洲、莲湖、康山、梅溪咀和余干。由此可见,鄱阳湖入江水道和西部湖区水质主要受赣江(北支)和修河影响较大,而长江九江段水质受鄱阳湖西部湖区及入江水道影响较大,鄱阳湖南部湖区水质主要受赣江和抚河影响较大,而东部湖区水质则主要受饶河和信江影响较大。

聚类分析结果同时表明各组间水质差异(图 5),入湖河流及鄱阳湖水水质空间聚类可分为 3 组,分别为鄱阳湖西部、南部与东部区域,并根据 ANOVA 可得出造成组间差异的主要水质指标(表 3),其中 DO,高锰酸盐指数, BOD₅ 和 NH₄⁺-N 浓度空间差异不显著($P > 0.05$),而 TN 和 TP 浓度达到极显著水平($P < 0.01$);其中东部区域 TN 浓度均值最大为 1.44 mg·L⁻¹;西部区域 TN 浓度最小为

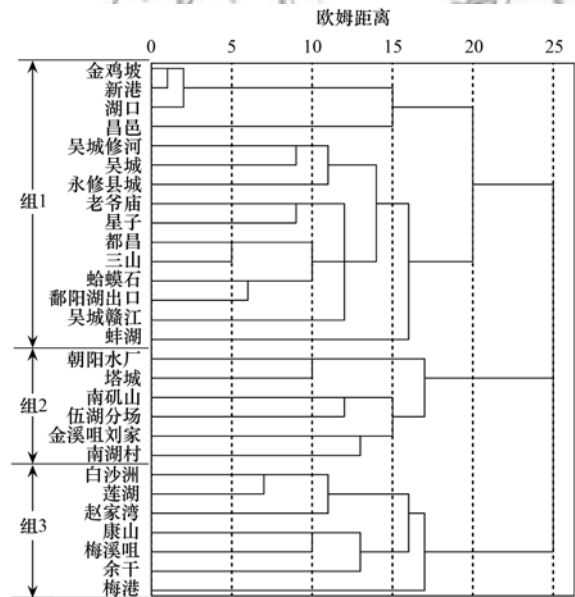


图 5 基于水质指标的鄱阳湖与出入湖河流监测点聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of monitoring sites in Poyang Lake and the inflow/outflow rivers based on water quality indices

1.04 mg·L⁻¹; 南部区域 TP 浓度均值为 0.08 mg·L⁻¹,显著高于西部和东部区域。因此,东部区域 TN 污染较严重,南部区域 TP 污染较严重。由此可见,造成鄱阳湖及出入湖水水质空间差异的主要水质指标是 TN 和 TP,并且南部和东部区域水污染较西部严重。

2.2.2 入湖河流对鄱阳湖不同湖区水质影响

2012 ~ 2016 年,鄱阳湖及“五河”TN 浓度变化范围在 0.08 ~ 1.82 mg·L⁻¹之间,其中修河 TN 浓

表 3 鄱阳湖及入湖河流不同空间水质方差分析/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质指标	组 1	组 2	组 3	ANOVA
	均值 $\pm$ 标准差	均值 $\pm$ 标准差	均值 $\pm$ 标准差	
DO	7.89 ± 0.85	8.06 ± 1.78	7.24 ± 0.81	$F = 3.071, P = 0.052$
高锰酸盐指数	2.51 ± 0.27	2.42 ± 0.45	2.67 ± 0.56	$F = 2.03, P = 0.138$
BOD ₅	1.98 ± 0.13	2.16 ± 0.62	2.12 ± 0.45	$F = 1.91, P = 0.155$
NH ₄ ⁺ -N	0.29 ± 0.17	0.36 ± 0.20	0.38 ± 0.18	$F = 1.68, P = 0.194$
TN	1.04 ± 0.26	1.25 ± 0.35	1.44 ± 0.39	$F = 8.356, P = 0.005$
TP	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.06 ± 0.03	$F = 8.395, P = 0.001$

度最低, 年均 $0.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 赣江的朝阳水厂 TN 浓度最高, 年均 $1.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 鄱阳湖湖区 TN 浓度年均 $1.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. TP 浓度变化范围在 $0.05 \sim 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 经济合作与发展组织 (OECD) 提出的水体富营养化水体的 TP 浓度大于 $0.035 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 与 Huang 等^[28] 得出的结论一致, 即鄱阳湖及五河水体 TN 和 TP 浓度均处于较高水平. 因此, 探究鄱阳湖与出入湖水水质 TN, TP 浓度空间关联性具有十分重要的意义.

如图 6, 赣江、抚河、信江、饶河和长江九江段

TN 与 TP 浓度均高于鄱阳湖, 其中, 南部和东部入湖河流 TN 浓度高于西部, 相应南部和东部湖区 TN 浓度也高于西部湖区; 南部入湖河流 TP 浓度高于西部和东部, 相应南部湖区 TP 浓度高于西部和东部湖区. 因此, 入湖河流 TN 和 TP 浓度高, 其对应湖区也较高, 即入湖河流对鄱阳湖水质具有较大影响.

根据“五河”和长江(九江段)与相应湖区水质灰色关联结果(表 4), 分辨系数取 0.5 时, “五河”和鄱阳湖水质关联度较大($r > 0.5$), 鄱阳湖与长江(九江段)水质也具有一定的关联性($r > 0.5$), 其中

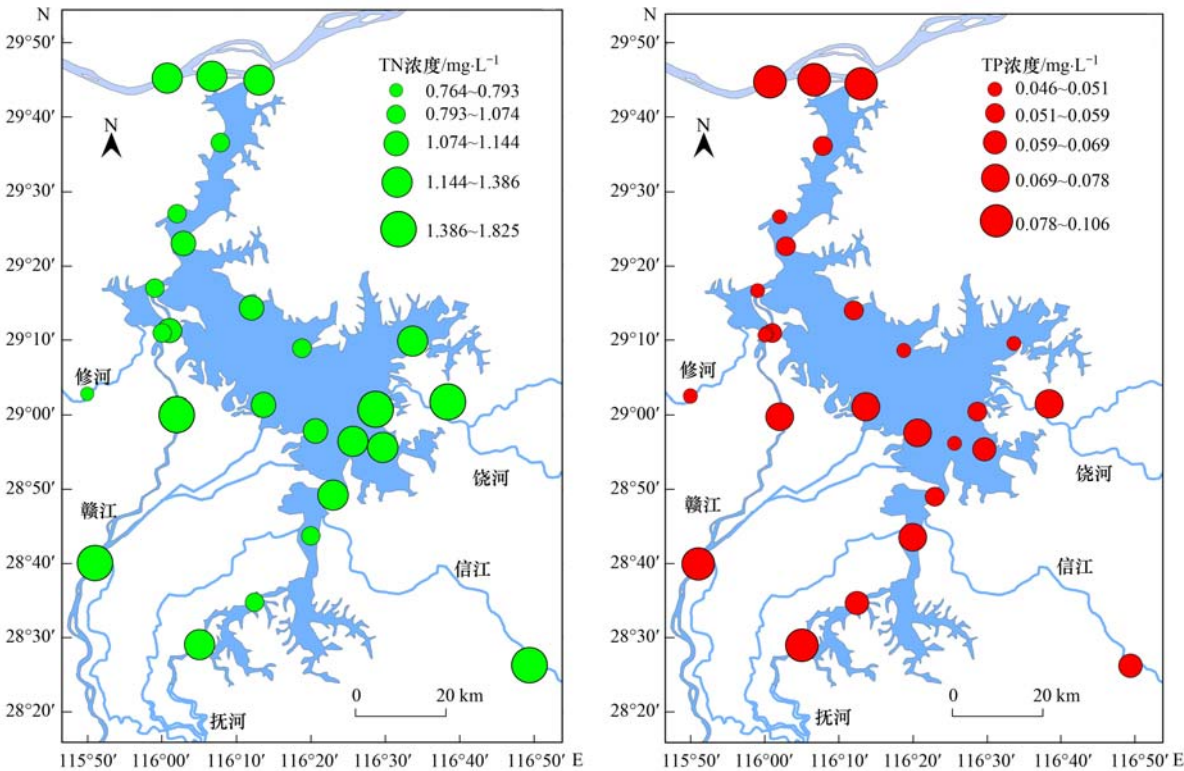


图 6 鄱阳湖及入湖河流 TN 和 TP 浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of TN and TP concentrations in Poyang Lake and inflow rivers

表 4 鄱阳湖与出入湖河流中 TN 和 TP 浓度灰色关联度(r)

变量		赣江北支	修河	赣江	抚河	信江	饶河	长江(九江段)
TN	鄱阳湖	0.71	0.56	0.68	0.83	0.68	0.69	0.69
TP	鄱阳湖	0.71	0.71	0.72	0.64	0.82	0.8	0.58

湖泊对于入湖河流水质变化响应迅速. 因此, 入湖河流水质对鄱阳湖湖区水质关联性较大, 流域污染对湖泊水污染贡献明显.

3 讨论

3.1 不同阶段鄱阳湖水质演变影响因素差异

根据前文研究结果, 1996 ~ 2016 年鄱阳湖水质在各阶段均呈现下降趋势. 流域社会经济快速发展与江湖关系变化对鄱阳湖水质均具有重要影响^[29]. 因此, 进一步剖析导致近 20 年不同阶段鄱阳湖水质变化主要影响因素差异, 试图为鄱阳湖保护治理提供科学依据.

根据主成分分析结果(图 7), 近 20 年不同阶段鄱阳湖水质变化主要影响因素主成分分析提取出了 2 个有效因子, 原始变量累积贡献率已经达到 94% 以上, 基本概括了全部信息, 因子 1 对总方差贡献率为 72.78%, 包括第一产业增加值、人口密度、化肥施用量、地区生产总值、第二产业增加值和工业废水排放总量占有较高的权重, 即因子 1 表征流域发展尤其是农业发展, 可视为流域污染. 因子 2 载荷主要分布在入湖流量和 水位上, 对方差贡献率为 21.68%, 代表水文情势影响. 以上 2 个因素较好地解释了两个相关变量信息, 说明流域污染和水文情势变化为鄱阳湖水质变化的主要驱动因素.

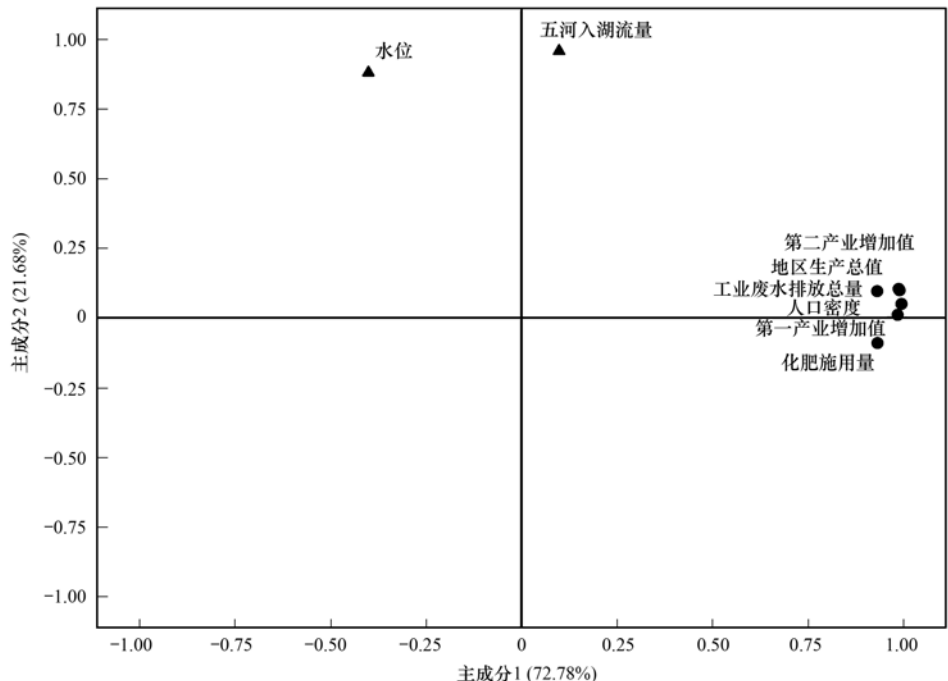


图 7 鄱阳湖流域社会经济及水文等指标主成分分析因子载荷

Fig. 7 Principal component analysis factor load map of socio-economic and hydrological indicators for the Poyang Lake basin

为进一步探究不同阶段鄱阳湖水质与主要驱动因素间关系, 对各个阶段分别进行多元回归分析, 结果见表 5. 1996 ~ 2003 年, 鄱阳湖综合水质评分与因子 1 呈显著正相关($P < 0.05$); 即该阶段流域污染负荷对鄱阳湖水质影响较大. 2004 ~ 2011 年, 水质指标 BOD_5 与因子 1 呈显著正相关($P < 0.05$),

DO 和 NH_4^+-N 与因子 2 呈显著正相关($P < 0.01$), 即该阶段流域污染负荷和水文情势变化对鄱阳湖水质影响较大; 2012 ~ 2016 年, 水质指标 TN 与因子 1 呈显著正相关($P < 0.05$), 水质指标 TP 和综合水质评分均与因子 1 呈显著正相关($P < 0.01$), DO 和 NH_4^+-N 与因子 2 呈显著正相关($P < 0.05$), 即该阶

表 5 多元回归分析结果¹⁾

Table 5 Results of multiple linear regression

变量	因子 1 多元回归系数			因子 2 多元回归系数		
	1996 ~ 2003 年	2004 ~ 2011 年	2012 ~ 2016 年	1996 ~ 2003 年	2004 ~ 2011 年	2012 ~ 2016 年
DO	—	0.885	0.872	—	0.000 **	0.004 **
高锰酸盐指数	0.342	0.315	0.072	0.242	0.491	0.452
BOD_5	—	0.001 **	0.779	—	0.639	0.224
NH_4^+-N	0.091	0.878	0.061	0.511	0.000 **	0.039 *
TN	0.383	0.125	0.031 *	0.72	0.63	0.108
TP	0.456	0.515	0.006 **	0.784	0.107	0.183
综合水质评分	0.011 *	0.056	0.009 **	0.782	0.063	0.529

1) * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示显著相关($P < 0.01$)

段流域污染负荷和水文情势变化也对鄱阳湖水质影响较大。由此可见, 以上两个阶段均受到流域污染负荷与水文条件变化影响, 其中第三阶段 TN 和 TP 浓度, 以及综合水质主要受到流域污染负荷影响。

综上所述可见, 不同阶段鄱阳湖水质变化影响因素不同, 其一是流域快速发展导致入湖污染负荷持续增加, 入湖水质下降进而引起湖泊水质下降; 其二是“五河”入湖水量和湖区水位变化引起洲滩面积增加出露时间延长, 致使出露沉积物表层理化性质和微生物群落结构出现变化, 从而促使表层沉积物营养盐含量、释放潜能和生物有效性升高, 进而影响湖泊水质^[11,30]。1996~2003 年, 随流域经济社会发展, 人类活动逐步取代自然变化成为鄱阳湖水质变化主要驱动力^[31], 流域人口增加、土地利用、化肥施用及废水排放等逐步增加湖泊营养盐输入强度, 对湖泊水质造成了一定负面影响^[32]。2004

~2011 年及 2012~2016 年, 流域污染负荷输入进一步增加及水文情势变化共同影响水质变化, 主要是农田过量的肥料投入随径流输入湖泊, 使 TN、TP 浓度持续增加^[17]; 同时, 第二阶段地区生产总值[图 8(a)]、人口密度[图 8(a)]、第一产业增加值[图 8(b)]、化肥施用量[图 8(b)]、第二产业增加值[图 8(c)]及工业废水排放量[图 8(c)]均明显增加, 而湖区水位和入湖水量则明显下降[图 8(d)]。第三阶段流域社会经济进一步发展, 受流域降水减少和三峡工程蓄水等影响, 鄱阳湖枯水期提前, 低枯水位频繁出现^[33], 使鄱阳湖水域面积明显缩小, 湿地面积减少, 水环境容量减小, 水质下降^[34,35]。因此, 与第一阶段相比, 第二和第三阶段鄱阳湖水质下降幅度较大, 且由于枯水期湖区水量减少, 引起的净化能力下降等原因导致枯水期水污染较重。

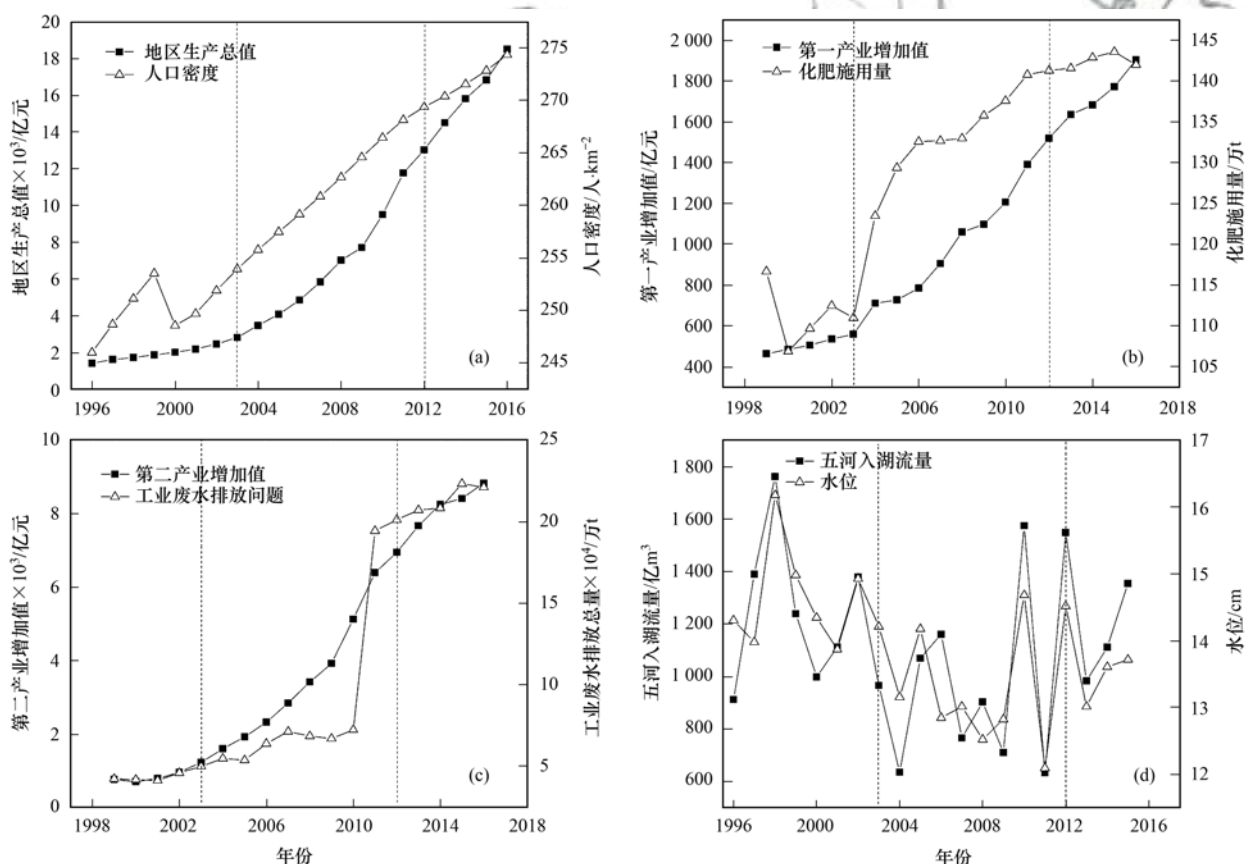


图 8 鄱阳湖流域主要影响因素变化

Fig. 8 Changes in the main influencing factors in the Poyang Lake basin

3.2 鄱阳湖水质与入湖污染负荷间关系

湖泊是流域污染物的主要汇集区, 陆域氮磷输入增加引起入湖河流和湖泊氮磷等营养盐含量升高^[36]。本研究“五河”氮磷输入对湖泊水质影响较大, 是鄱阳湖水体氮磷浓度空间显著差异的主要原因。如图 9 所示, “五河”入湖负荷中, 赣江输入 TN 占比最大, 达到为 62%, 其次为信江 17%, 修河占

比最小为 2%。TP 输入赣江占比也为最大, 达到 53%, 其次为抚河, 占比为 19%, 修河占比最小 3%。由此可见, 导致鄱阳湖南部和东部湖区 TN 浓度明显高于西部湖区, 主要是由于赣江和信江 TN 负荷输入; 导致鄱阳湖南部湖区 TP 浓度明显高于东部和西部湖区, 主要是由于赣江和抚河 TP 负荷输入。

为进一步了解造成“五河”流域氮磷污染的主要原因,对流域社会发展数据进行分析.结果如图10所示,其中赣江人口密度,工业规模及农业发展均为五河中占比最大,信江的工业和农业比较发达,而抚河的农业较发达,可见赣江和信江的农业和工业污染对鄱阳湖氮磷浓度影响最大,抚河农业污染对鄱阳湖氮磷浓度影响最大,而饶河和修河各项影响因素的占比较小,对水质影响较小.因此,“五河”流域污染排放严重,特别是赣江、信江流域的农业和工业污染及抚河流域农业污染对鄱阳湖水水质影响最大.

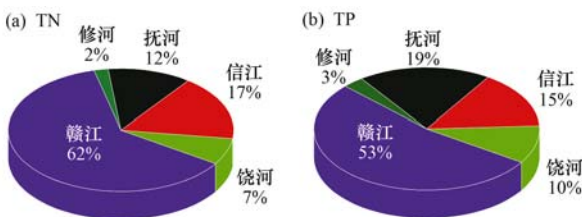


图9 “五河”入湖中 TN 和 TP 的负荷百分比

Fig. 9 “Five Rivers” loadings of TN and TP into Poyang Lake

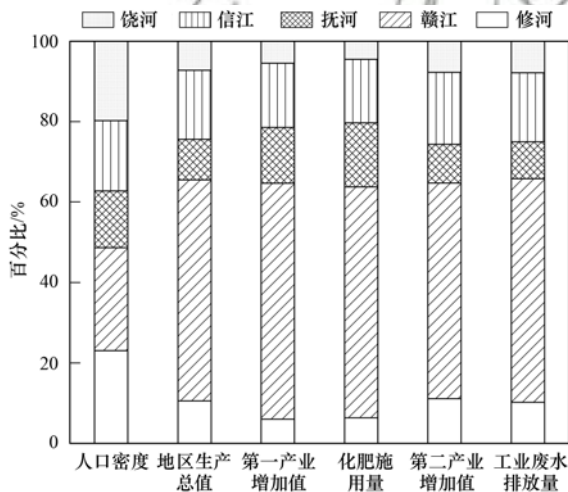


图10 “五河”流域主要影响因素百分比

Fig. 10 Percentage of major influencing factors in the “Five Rivers” basin

综上所述可见,目前鄱阳湖保护治理首先应加强流域污染控制,重点是要防控流域面源污染,推广应用农业清洁生产技术,重点推广化学肥料和农药的科学施用方法^[37];重点控制赣江,信江及抚河流域农业面源污染,源头控制氮磷排放.针对工业较发达的赣江和信江流域,推广应用工业企业清洁生产技术及工艺,将污染预防概念纳入管理,源头削减污染物排放^[38].同时,也要关注水文条件变化对鄱阳湖水环境影响.2003年后,受三峡工程运行等影响,长江与鄱阳湖水文情势发生了较大变化,年内和年际水位波动加大,特别是枯水期提前,持续时间延长,影响湿地植被生长及分布等,进而影

响湖泊水质^[39].鄱阳湖水文过程不仅与三峡工程运行引起的江湖关系变化有关^[40],而且与“五河”入湖水量有关.因此,保护鄱阳湖水环境,应清晰地认识“江湖关系”与“河湖关系”,不仅要重视流域污染控制,也要保证基本水文节律及枯水期水位.

4 结论

(1)1996~2016年,鄱阳湖及出入湖水水质总体可分为3个阶段,1996~2003年,鄱阳湖及出入湖水水质呈现下降趋势,但水质总体较好;2004~2011年,鄱阳湖及出入湖水水质继续下降,其中枯水期水质下降最为明显,随入湖水水质大幅下降,导致湖泊水质较差,由于湖泊较大净化能力,使出湖水水质较好;而2012~2016年,鄱阳湖及出入湖水水质进一步下降,随入湖水水质持续下降,湖泊水质净化作用下降导致出湖水水质也大幅度下降,该阶段入湖与湖泊及出湖水水质均较差.

(2)鄱阳湖在空间上分为西部、东部和南部湖区,造成水质空间差异的主要水质指标为TN和TP,各湖区TN,TP浓度均处于较高水平.入湖河流水质与鄱阳湖湖区水质关联性较大,导致鄱阳湖南部和东部湖区TN浓度明显高于西部湖区,主要是由于赣江和信江TN负荷输入;导致鄱阳湖南部湖区TP浓度明显高于东部和西部湖区,主要是由于赣江和抚河TP负荷输入,流域污染对湖泊水污染贡献明显.

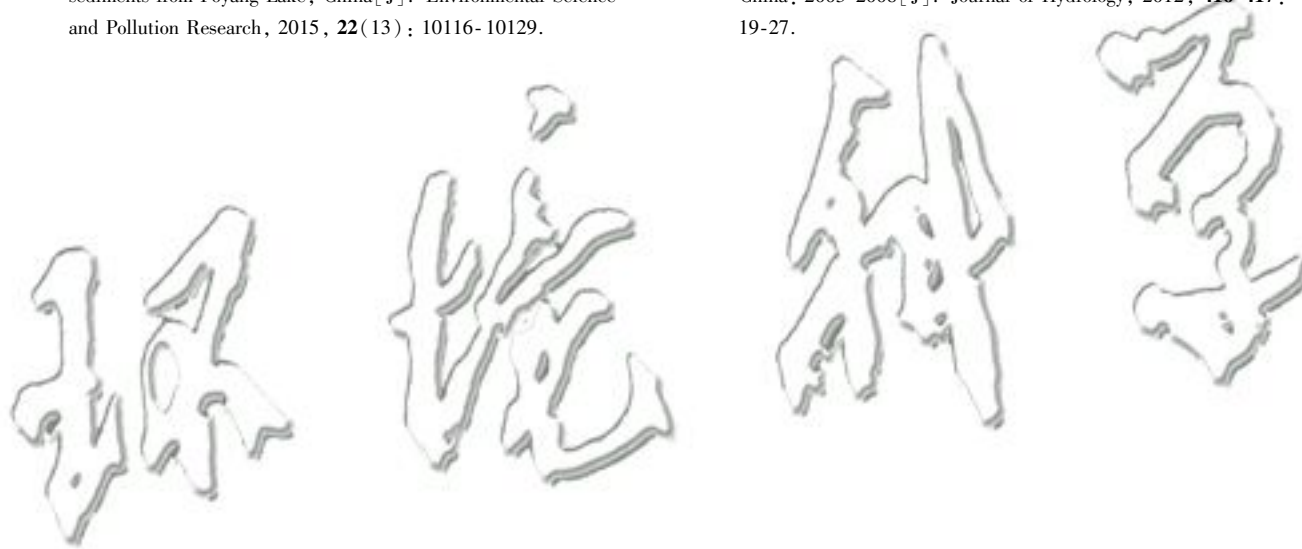
(3)1996~2003年,流域入湖污染负荷与综合水质评分呈显著正相关,即该时段鄱阳湖水水质变化主要受流域入湖污染负荷影响;2004~2011年,鄱阳湖水水质变化受到流域污染与水文条件影响,其中流域入湖污染负荷对BOD₅影响较大,水文条件变化对DO和NH₄⁺-N影响较大;2012~2016年,鄱阳湖水水质变化仍受到流域污染与水文条件影响,其中流域入湖污染负荷对TN、TP和综合水质评分影响较大,水文条件变化对DO和NH₄⁺-N影响较大.

参考文献:

- [1] Wu Z S, Zhang D W, Cai Y J, *et al.* Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17999.
- [2] Wang M R, Stokal M, Burek P, *et al.* Excess nutrient loads to Lake Taihu: opportunities for nutrient reduction[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 865-873.
- [3] Wang J H, Yang C, He L Q S, *et al.* Meteorological factors and water quality changes of Plateau Lake Dianchi in China (1990-2015) and their joint influences on cyanobacterial blooms[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 406-418.
- [4] D'Haese P C, Douglas G, Verhulst A, *et al.* Human health risk

- associated with the management of phosphorus in freshwaters using lanthanum and aluminium[J]. *Chemosphere*, 2019, **220**: 286-299.
- [5] Li Y P, Tang C Y, Yu Z B, *et al.* Correlations between algae and water quality: factors driving eutrophication in Lake Taihu, China[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, **11**(1): 169-182.
- [6] Cui N X, Wu J, Dai Y R, *et al.* Influence of nitrogen loading and flooding on seedling emergence and recruitment from a seed bank in Chaohu Lake Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(28): 22688-22697.
- [7] Zhang X K, Li B L, Xu H, *et al.* Effect of micronutrients on algae in different regions of Taihu, a large, spatially diverse, hypereutrophic lake[J]. *Water Research*, 2019, **151**: 500-514.
- [8] 李恒鹏, 陈伟民, 杨桂山, 等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 785-798.
- Li H P, Chen W M, Yang G S, *et al.* Reduction of nitrogen and phosphorus emission and zoning management targeting at water quality of lake or reservoir systems: a case study of Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir area[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 785-798.
- [9] Li B, Yang G S, Wan R R, *et al.* Using fuzzy theory and variable weights for water quality evaluation in Poyang Lake, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, **27**(1): 39-51.
- [10] Wu Z S, Cai Y J, Zhang L, *et al.* Spatial and temporal heterogeneities in water quality and their potential drivers in Lake Poyang (China) from 2009 to 2015[J]. *Limnologia*, 2018, **69**: 115-124.
- [11] Howarth R, Swaney D, Billen G, *et al.* Nitrogen fluxes from the landscape are controlled by net anthropogenic nitrogen inputs and by climate[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, **10**(1): 37-43.
- [12] Hong B, Swaney D P, M? rth C M, *et al.* Evaluating regional variation of net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NAN/NAPI), major drivers, nutrient retention pattern and management implications in the multinational areas of Baltic Sea basin[J]. *Ecological Modelling*, 2012, **227**: 117-135.
- [13] Duan W L, He B, Nover D, *et al.* Water quality assessment and pollution source identification of the eastern Poyang Lake Basin using multivariate statistical methods[J]. *Sustainability*, 2016, **8**(2): 133.
- [14] Wu Z S, Cai Y J, Liu X, *et al.* Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: the largest freshwater lake in China[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(3): 476-483.
- [15] 都达古拉, 何江, 吕昌伟, 等. 呼伦湖水-沉积物系统中重金属的含量特征[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(1): 118-123.
- Dudagula, He J, Lü C W, *et al.* Distribution of heavy metals in water-sediment system of Hulun Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(1): 118-223.
- [16] 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 等. 鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 87-93.
- Shen H Y, Zhang M M, Ni Z K, *et al.* Distribution of transferable nitrogen in Poyang Lake sediments and its response to the variation of river-lake relationship [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 87-93.
- [17] Li B, Yang G S, Wan R R, *et al.* Hydrodynamic and water quality modeling of a large floodplain lake (Poyang Lake) in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(35): 35084-35098.
- [18] Zhang Z X, Chen X, Xu C Y, *et al.* Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **522**: 510-521.
- [19] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 3187-3192.
- Liu X, Xue Y, Ji Y P, *et al.* An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 3187-3192.
- [20] Shrestha S, Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, **22**(4): 464-475.
- [21] Ip W C, Hu B Q, Wong H, *et al.* Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **379**(3-4): 284-290.
- [22] Huang Y P, Huang C C. The integration and application of fuzzy and grey modeling methods[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, **78**(1): 107-119.
- [23] Deng J L. Introduction to grey system theory[J]. *Journal of Grey System*, 1989, **1**(1): 1-24.
- [24] 王晓鹏. 河流水质综合评价之主成分分析方法[J]. *数理统计与管理*, 2001, **20**(4): 49-52.
- Wang X P. The principal component analysis method of the water quality assessment in rivers[J]. *Application of Statistics and Management*, 2001, **20**(4): 49-52.
- [25] 姚焕玫, 黄仁涛, 甘复兴, 等. 用改进的主成分分析法对东湖的水质污染进行评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, **30**(8): 732-735.
- Yao H M, Huang R T, Gan F X, *et al.* Principal component analysis of the water quality evaluation in East Lake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, **30**(8): 732-735.
- [26] Zhang Y M, Zhang Y C, Gao Y X, *et al.* Water pollution control technology and strategy for river-lake systems: a case study in Gehu Lake and Taige Canal[J]. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(5): 1154-1159.
- [27] 王圣瑞, 倪兆奎, 储昭升, 等. 江湖关系变化及其对鄱阳湖水环境影响研究——代“江湖关系变化及其对鄱阳湖水环境影响研究”专栏序言[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1259-1264.
- Wang S R, Ni Z K, Chu Z S, *et al.* Studies on the change of the river-lake relationship and its impact on water environment in Poyang Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1259-1264.
- [28] Huang J, Wang X X, Xi B D, *et al.* Long-term variations of TN and TP in four lakes fed by Yangtze River at various timescales [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3993-4009.
- [29] Du Y L, Peng W Q, Wang S Y, *et al.* Modeling of water quality evolution and response with the hydrological regime changes in Poyang Lake[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(7): 265.
- [30] Chen X K, Liu X B, Peng W Q, *et al.* Hydroclimatic influence on the salinity and water volume of a plateau lake in southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 746-

- 755.
- [31] Steffen W, Crutzen P J, McNeill J R. The anthropocene; are humans now overwhelming the great forces of nature[J]. *Ambio*, 2007, **36**(8): 614-621.
- [32] Carpenter S R. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(29): 10002-10005.
- [33] Yang G S, Zhang Q, Wan R R, *et al.* Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river-lake interactions: advances in research on the middle Yangtze river[J]. *Hydrology Research*, 2016, **47**(S1): 1-7.
- [34] Wang S R, Jiao L X, Yang S W, *et al.* Effects of organic matter and submerged macrophytes on variations of alkaline phosphatase activity and phosphorus fractions in lake sediment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **113**: 355-360.
- [35] Ni Z K, Wang S R, Zhang L, *et al.* Role of hydrological conditions on organic phosphorus forms and their availability in sediments from Poyang Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(13): 10116-10129.
- [36] Gao W, Howarth R W, Swaney D P, *et al.* Enhanced N input to Lake Dianchi Basin from 1980 to 2010: drivers and consequences [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 376-384.
- [37] Chen M Q, Chen M J, Lu Y F, *et al.* The farmers' perceptions of ANPS pollution and its influencing factors in Poyang Lake Region, China[J]. *Water Science and Technology*, 2016, **73**(7): 1591-1598.
- [38] Moss L R. Local governments reduce costs through pollution prevention[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2008, **16**(6): 704-708.
- [39] 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 等. 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2141-2148.
- Liu X, Liu B G, Chen Y W, *et al.* Responses of nutrients and chlorophyll a to water level fluctuations in Poyang Lake [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2141-2148.
- [40] Guo H, Hu Q, Zhang Q, *et al.* Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003-2008[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **416-417**: 19-27.



CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)