

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.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM_{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM_{2.5}改善效果评估 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM_{2.5}中水溶性无机离子污染特征 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O₃污染特征及敏感性 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO_x排放特征对比分析 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe⁰/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO₂及CH₄排放与市政排水管网污水输入的关联影响 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N₂O排放的影响 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应

王朔月^{1,2}, 高扬^{1,2*}, 陆瑶^{1,2}, 贾珺杰^{1,2}, 李兆喜^{1,2}, 马明真^{1,2}, 温学发^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 本文选取鄱阳湖梯级流域内从初级支流到湖区(香溪→架竹河→赣江→鄱阳湖)连通水系线路为研究对象, 通过对鄱阳湖流域磷(P)湿沉降及径流过程进行监测, 探讨鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其对浮游植物群落结构的影响. 结果表明: ① 鄱阳湖流域的P浓度呈明显的季节变化, 除香溪流域外, 其余流域的总磷(TP)、可溶性总磷(DTP)和磷酸根(PO_4^{3-})浓度均为枯水期较高, 丰水期较低; 丰水期时, TP浓度与硅藻密度存在极显著的相关关系, 枯水期时, TP浓度与隐藻有极显著的相关关系. ② 次降雨过程研究表明: 不同降雨强度下TP和 PO_4^{3-} 的浓度及地表径流通量的大小顺序均为: 小雨 > 中雨 > 大雨. ③ 丰水年和枯水年的沉降通量存在显著差异, 丰水年约为枯水年的2.8倍, P的输出通量呈明显的季节性变化, 丰水期大于枯水期; 随流域逐级增大, 但P输出贡献率未显著增加, 说明逐级支流P输送并不是各级流域P的主要来源.

关键词: 鄱阳湖流域; 磷沉降; 输出通量; 浮游植物; 丰、枯水期

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3186-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201910074

Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake

WANG Shuo-yue^{1,2}, GAO Yang^{1,2*}, LU Yao^{1,2}, JIA Jun-jie^{1,2}, LI Zhao-xi^{1,2}, MA Ming-zhen^{1,2}, WEN Xue-fa^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, a cascaded watershed system in the Poyang Lake area was selected as the study site, which ranged from the primary tributaries to the lake area (Xiangxi River → Jiazhu River → Ganjiang River → Poyang Lake). The aims of the study were to monitor the P wet deposition and runoff process in the Poyang Lake area and discuss the P transport characteristics at the multi-scale watershed and its impact on phytoplankton community structure in the Poyang Lake. The results showed that the P concentration in the Poyang Lake area exhibited significant seasonal changes. Apart from the Xiangxi River watershed, the concentrations of total phosphorus (TP), dissolved total phosphorus (DTP), and orthophosphate (PO_4^{3-}) were higher in the low flow period than in the high flow period at other watersheds. There was a significant correlation between TP concentration and diatom density during the high flow period, and between TP concentration and cryptophyta during the low flow period. The order of the amounts of TP and PO_4^{3-} transport by runoff under different rain intensities is as follows: light rain > moderate rain > heavy rain. There is a significant difference in the deposition flux between the wet season and the dry season with seasonal change, in which the flux during the wet years was about 2.8 times higher than in the dry years. The export flux of P was also shown to be higher in the high flow than in the low flow period. As watershed size increased, the contribution rate of P export did not increase, indicating that P transported at different scales was not the main source of P in each watershed.

Key words: Poyang Lake watershed; P deposition; output flux; phytoplankton; wet season and dry season

磷是湖泊生态系统中初级生产力的主要影响因素之一, 可能会对浮游植物藻类生长繁殖速率产生限制^[1], 同时磷是造成水体富营养化的主要因子^[2,3], 一般认为当水体中TP浓度在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上时, 就对水体富营养化起明显的促进作用. 磷循环与碳、氮循环不同的是几乎不存在气态^[4], 天然水体中磷的含量很低, 磷的来源主要有大气沉降、地表径流、土地的侵蚀、农业排水、底泥释放、城市污水和工业污染源等^[5], 而大气湿沉降输入的磷是磷循环中的重要一环.

富营养化蓝藻水华问题越来越受到公众和研究者的关注^[6-8]. 根据经济合作与发展组织(OECD)

的研究, 全球80%湖泊的营养受磷的控制, 另外10%与磷和氮有直接关系, 其余10%是由氮或其它因素制约^[9]. Schindler等^[10]的研究指出, 即使将总氮(TN)削减至0, 也不能消除水体富营养化, 甚至进一步削减TN反而能诱发固氮类蓝藻水华, 而控制磷的输入是更有效的方法, 由此可以看出磷是控制富营养化问题的关键. 目前国内外对大气沉降的研究主要集中在氮沉降^[11,12], 国内磷沉降的相关研

收稿日期: 2019-10-12; 修订日期: 2020-01-22

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(41922003); 国家自然科学基金项目(41871080)

作者简介: 王朔月(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文, E-mail: wangshuo-yue19@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn

究的开展相对比较晚^[13],已在我国黄土高原^[14]、滇池地区^[15]、太湖地区^[16]和南方红壤区^[17]等区域进行相关研究,但是目前对于多流域尺度的磷沉降及输送特征对 P 汇区的影响如何鲜见报道。

流域是陆地-水生生态系统的基本单元,水循环过程是各种物质、能量循环的主要驱动力和载体^[18]。鄱阳湖位于长江中下游,是我国最大的淡水湖,同时它也是兼具灌溉、供水、水产和航运等多种功能的湖泊^[19]。目前,关于鄱阳湖富营养化特征的研究逐步展开^[20~22],表明了鄱阳湖局部已经发生富营养化,水体处于中营养状态,并且磷会对初级生产力产生限制^[23],所以控制磷营养盐的输入会对鄱阳湖富营养化起到一定的遏制作用。因此,研究鄱阳湖流域磷源的输送特征及水体中磷过度输入所导致的环境效应,对于保护鄱阳湖的水环境安全及维护生态系统的平衡具有重要意义。本文选取鄱阳湖流域内从初级支流到最大干流再到湖区这一水系路线为研究对象,通过对鄱阳湖流域磷湿沉降及径流过程进行监测,进一步分析丰水期和枯水期内降雨及径流过程各形态磷浓度和磷输送通量的变化及贡献,探讨鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其对浮游植物的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文选取的研究区域包括鄱阳湖流域内的鄱阳湖湖区[图 1(a)]、其最大支流赣江的中下游[图 1(b)]、赣江的二级支流架竹河[图 1(c)]以及初级

支流香溪[图 1(d)]这 4 个部分。鄱阳湖流域位于长江中下游(115°04'13"~116°24'06"E, 26°44'48"~29°44'40"N),流域面积为 $16.70 \times 10^4 \text{ km}^2$,与江西省行政辖区基本重叠,由赣江、抚河、信江、饶河、修水五大河流及各级支流和鄱阳湖组成,气候类型属于亚热带季风气候,年均气温为 17.50℃,多年平均降水量为 1 635.90 mm,年内降雨分布不均,流域内大多数地区 4~6 月降雨量占全年的 40%~50%^[24]。

鄱阳湖地处江西省九江市和南昌市,属季节性洪泛湖泊,水域面积变化显著,呈“高水湖相,低水河相”。湖口站历年实测最高水位 22.59 m (1998 年 7 月 31 日),相应湖区水面积 4 070 km^2 ;历年实测最低水位 5.9 m (1963 年 2 月 6 日)^[25]。赣江是鄱阳湖的第一大支流,自南向北流经江西省赣州、吉安和新余等 44 个县(市、区),流域面积为 81 923 km^2 ,径流量约占鄱阳湖水系总径流量的 46.6%^[26],本文选取赣江中下游作为研究整个流域向鄱阳湖的输出状况的代表性区域;架竹河为赣江的二级支流,位于吉安市泰和县境内,经仙槎河汇入赣江,全长 20.98 km,流域面积为 121.61 km^2 ;香溪为架竹河流域的初级支流,位于泰和县中国科学院千烟洲试验站内,河流长度为 2.08 km,流域面积为 0.98 km^2 。

1.2 样品采集

根据各级流域的地理位置、水文特征、土地利用及采样条件等因素在 4 个研究区域内共布设 33 个采样点,其中,鄱阳湖共布设 15 个采样点;沿赣江

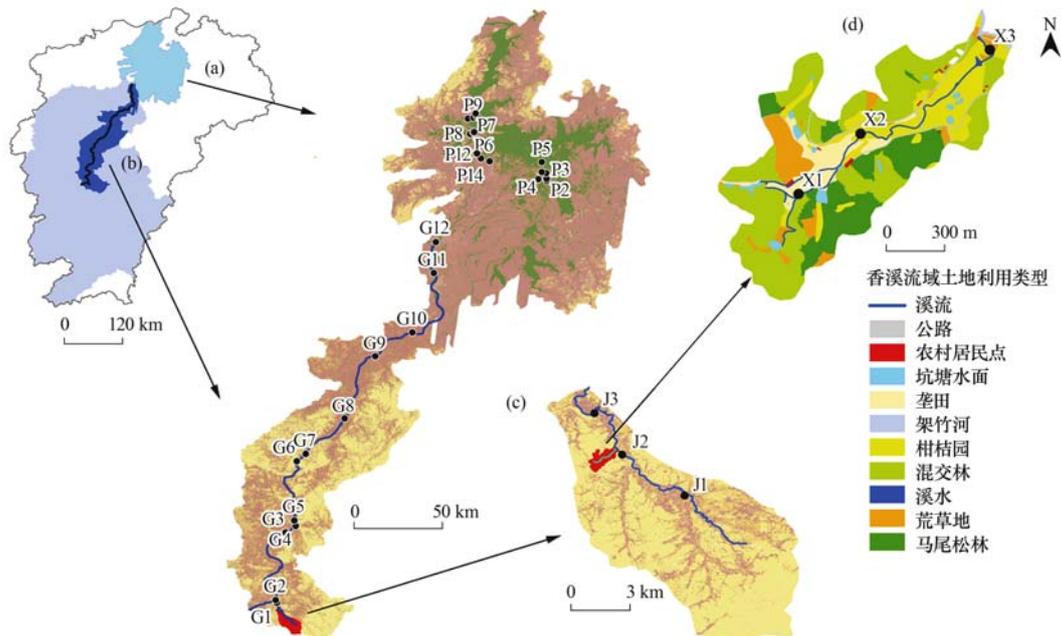


图 1 鄱阳湖流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

上游至下游共布设 12 个采样点;在架竹河以及香溪按上、中、下游分别沿河布设 3 个采样点(图 1)。采集了自 2014 年 1 月至 2018 年 12 月的雨水水样和自 2017 年 1 月至 2018 年 12 月的常规水样、降雨后地表径流水样。采样用 100 mL 的聚乙烯塑料瓶收集 8 个固定监测点的水样;在水文站处设置 1 台 ISOC6710 水沙自动采样装置,用于采集降雨后的地表径流。采样装置的触发模块设置为 5 mm(即降雨量达到 5 mm 时,开始采集地表径流),频率为每间隔 30 min 采样 1 次,每次采样量为 200 mL,共持续 12 h,同时实时监测水位,流量以及流速的变化;雨水通过实验区屋顶上的雨量计采集,每月采集 1 次。浮游植物的采样方法为人工采取河流及湖水表层 0~50 cm 的水样 1 L 于聚乙烯塑料瓶中,加入 15 mL 鲁哥试剂固定。静置 48 h 后,用虹吸法吸去上层清液,将样品浓缩至 100 mL 并加入 1 mL 甲醛保存^[27]。样品采集后,于 4℃ 冰箱内保存并在 1 个月内送至中国科学院地理科学与资源研究所进行分析。

1.3 样品分析

本实验测定的指标主要包括总磷(TP)、可溶性总磷(DTP)和磷酸根(PO_4^{3-})。具体分析方法如下:总磷(TP)根据过钼酸铵分光光度法进行消解后用流动分析仪测定,可溶性总磷(DTP)和磷酸根(PO_4^{3-})是将水样用 0.45 μm 有机微孔滤膜抽滤,通过流动分析仪测定。浮游植物密度测定参考文献^[27],将浓缩水样摇匀后吸取 0.1 mL 样品,注入 0.1 mL 计数框内,在 10×40 倍显微镜下计数,每瓶标本计数两片并取其平均值计算浮游植物的种类及密度。

统计分析采用 SPSS 20.0 软件,采用 ArcGIS 10.2 和 Origin 9.0 软件进行绘图。

1.4 数据分析

1.4.1 P 湿沉降通量的计算方法

P 湿沉降通量公式如下^[28]:

$$F_p = \frac{P_R \times \rho_p}{100}$$

式中, F_p 代表磷的湿沉降通量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), P_R 代表降雨量(mm), ρ_p 代表雨水中磷素的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),100 为单位换算系数。

1.4.2 地表径流量的计算方法

地表径流量的计算公式如下^[29]:

$$x = \int_0^t q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t \frac{q_i + q_{i+1}}{2}$$

式中, x 为径流量(m^3); q_t 为 t 时刻的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); q_i 为样本 i 在监测时的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.4.3 P 输送通量及地表径流通量的计算方法

P 输送通量及地表径流通量计算公式如下^[30]:

$$y_i = \int_0^t c_i(t) \times q_i(t) dt$$

$$\approx \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{q_i + q_{i+1}}{2}$$

式中, q_t 为 t 时刻的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); q_i 为样本 i 在监测时的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); y_i 为某种元素的排放负荷(g); c_t 为 t 时刻径流中某种元素的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_i 为某种元素在样本 i 监测时的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Δt 为样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔(s)。流域 P 输出通量使用靠近出河口位置点(X_3 、 G_2 和 G_{12})的浓度计算。

2 结果与分析

2.1 鄱阳湖 P 浓度变化特征

2.1.1 鄱阳湖多年降雨量变化

2010 年 1 月至 2015 年 12 月,鄱阳湖流域年平均降雨量为 1 194~1 962 mm,2010、2012 和 2015 年的年降雨量在 1 927~1 962 mm 之间,为丰水年,而 2011、2013 和 2014 年的年降雨量在 1 194~1 522 mm 之间,为枯水年。其中春季(3~5 月)降雨量均值为 629.19 mm、夏季(6~8 月)为 562.73 mm、秋季(9~11 月)为 233.84 mm 和冬季(12 月至次年 2 月)为 231.99 mm,分别占年均总降雨量的 37.95%、33.95%、14.11% 和 13.99%。如 2010~2015 年的降雨量的变化所示(图 2),鄱阳湖流域的降雨主要集中在春、夏两季,占全年总降雨量的 70% 左右,而秋季和冬季降雨相对较少,因此本文选取 7 月代表丰水期,12 月代表枯水期。

2.1.2 P 浓度的变化特征

如图 3 所示,丰水期,香溪流域 TP 浓度总体稳

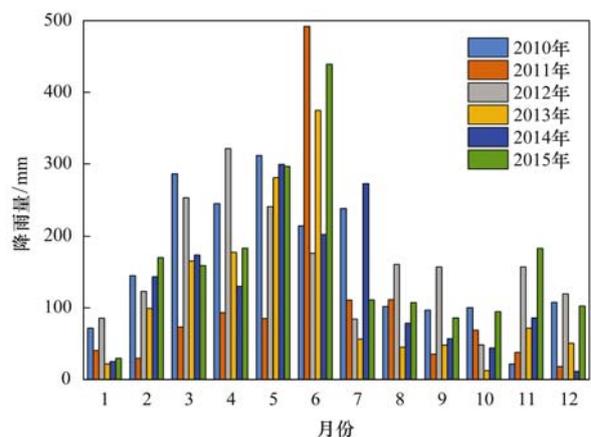


图 2 鄱阳湖地区多年降雨量变化

Fig. 2 Annual variation of rainfall in the Poyang Lake area

定,架竹河流域仅在上游 J1 点处检测到浓度值且浓度较小,赣江流域的 TP 浓度波动较大并且显著高于其余流域,总体呈上游浓度小,下游浓度高的趋势,在下游的 G12 点处达到最高值为 $1.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. TP 浓度在鄱阳湖流域的 P7 点处达到最大值,为

$1.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除 P7 和 P15 两点出现较大峰值外,鄱阳湖流域其他样点的 TP 浓度都较低.此外,丰水期各流域的 DTP 和 PO_4^{3-} 浓度都很低,无明显的浓度变化特征.其中,DTP 和 PO_4^{3-} 的浓度都在 G9 点处取得最大值.

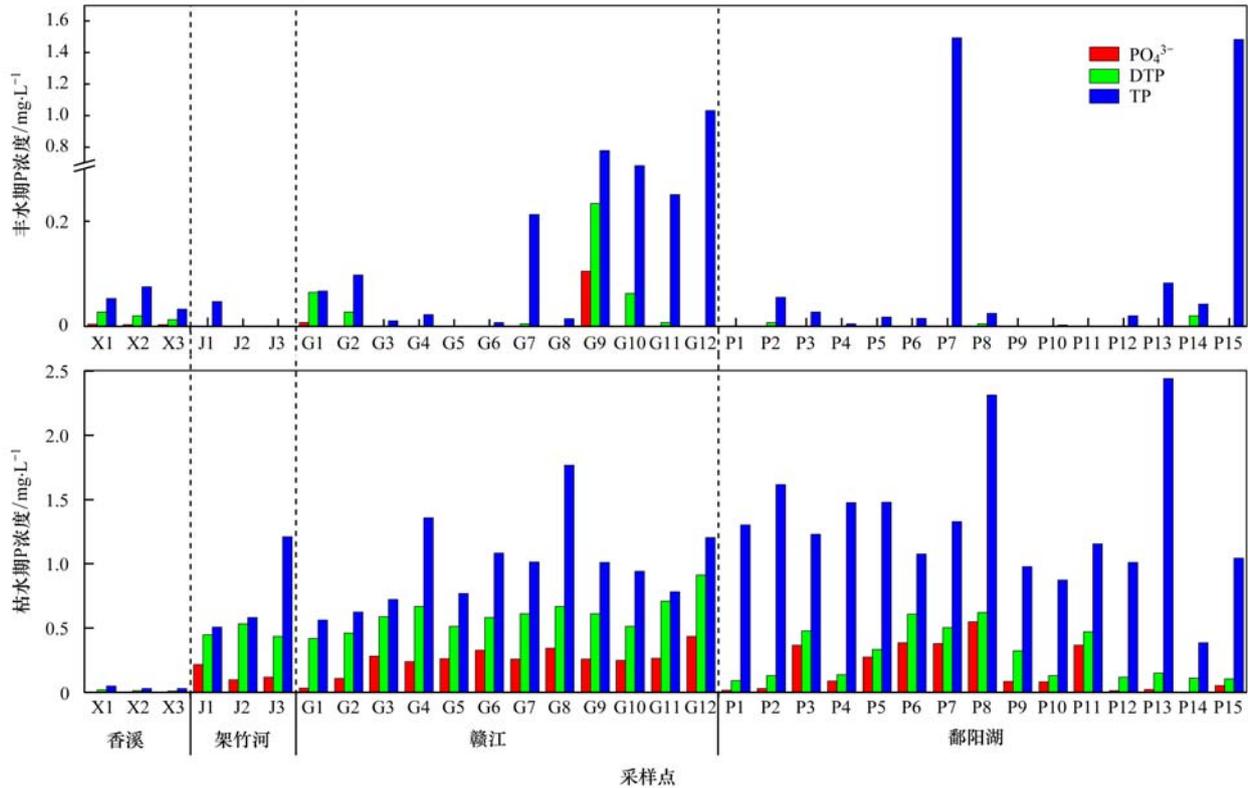


图3 丰、枯水期各形态P在香溪、架竹河、赣江和鄱阳湖的浓度变化

Fig. 3 Concentration changes of various forms of P in the Xiangxi River, Jiazhu River, Ganjiang River, and Poyang Lake during wet season and dry season

枯水期,香溪流域 TP 浓度总体稳定在 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,架竹河流域自上游至下游呈上升的趋势;而在赣江流域,TP 浓度大致出现“M”型的变化特征,在 G4 和 G8 点处出现两个明显峰值,并且在中游 G8 点处达到最大值 $1.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最低值则出现在上游 G1 点,均值为 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 鄱阳湖流域 TP 浓度无明显区域变化特征,主要在 P8 和 P13 点处出现两个明显峰值,且在 P8 点处达到最高值 $2.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,P14 处为最低值 $0.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

香溪流域 DTP 和 PO_4^{3-} 浓度在枯水期低于检测限,架竹河流域 DTP 和 PO_4^{3-} 浓度都基本稳定,均值分别为 $0.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,赣江流域 DTP 和 PO_4^{3-} 浓度与 TP 浓度变化趋势基本一致,均无较大波动.鄱阳湖流域 DTP 和 PO_4^{3-} 浓度都略有波动且变化趋势较为一致,都呈现出下游浓度较低,上游和中游浓度较高的趋势,DTP 和 PO_4^{3-} 浓度均值分别为 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 总体来说,枯水期 TP、DTP 和 PO_4^{3-} 的均值为 1.03 、 0.39 和 0.19

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均大于丰水期的 TP、DTP 和 PO_4^{3-} 均值: $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $14.94 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.71 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

鄱阳湖各流域 P 的年输出通量存在明显的季节性差异(表 1). 香溪流域每年共输出 P $5.88 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,其中丰水期共输出 $3.69 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,枯水期共输出 $2.19 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,丰水期约为枯水期输出量的 1.68 倍;架竹河流域每年共输出 P $3202 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,其中,丰水期共输出 $1025 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,枯水期共输出 $2177 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,枯水期是丰水期的两倍多;赣江流域 P 的年输出通量为 $8.30 \times 10^7 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,丰水期为 $5.64 \times$

表1 丰、枯水期P的输送通量

Table 1 Output flux of P in wet season and dry season			
时期	河流	径流量 $/\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$	P 输送通量 $/\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$
丰水期	香溪	1.14×10^5	3.69
	架竹河	1.05×10^7	1.03×10^3
	赣江	5.47×10^{10}	5.64×10^7
枯水期	香溪	7.30×10^4	2.19
	架竹河	3.48×10^6	2.18×10^3
	赣江	2.21×10^{10}	2.66×10^7

$10^7 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 枯水期为 $2.66 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 丰水期是枯水期输出通量的 2.12 倍. 香溪流域和赣江流域 P 丰水期输出通量大于枯水期, 架竹河流域 P 丰水期输出通量小于枯水期.

2.2 次降雨下流域 P 浓度的动态变化

6~8 月为鄱阳湖流域的丰水期, 通过选取丰水期 3 场不同强度的降雨(小雨: 2018-08-01, 日降雨量 0.2 mm; 中雨: 2017-08-01, 日降雨量 10.6 mm; 大雨: 2017-06-01, 日降雨量 26.2 mm), 观测不同降雨强度下流域磷浓度变化. 不同强度降雨条件下, 水体中各形态磷浓度在 12 h 内的变化曲线如图 4. 在小雨时, TP 和 PO_4^{3-} 浓度均有明显波动, 随着降雨过程的发生, TP 浓度呈总体下降趋势, 而 PO_4^{3-} 浓度呈总体上升趋势, PO_4^{3-} 浓度在降雨开始后的第 11.5 h 达到最大值为 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在中雨时, TP 和 PO_4^{3-} 浓度均有波动, TP 浓度波动较大, 刚开始降雨时 TP 浓度最大, 为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降雨开始 2.5

h 时达到最小值, 为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} 浓度值较小且波动较为平稳, 基本稳定在 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 在大雨时, TP 浓度有较大波动, 在降雨开始后的第 1.5 h 达到最大值为 $0.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 6.5 h 达到最小值为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} 浓度非常小且呈总体小幅上升的趋势. 在整个监测过程中, 不同降雨强度 TP 的大小关系为小雨远大于中雨和大雨, 不同降雨强度 PO_4^{3-} 浓度的大小关系大致为: 小雨 > 中雨 > 大雨, 降雨强度与 PO_4^{3-} 浓度大致成反比.

根据地表径流通量的计算方法, 计算三场不同强度降雨过程中 TP 和 PO_4^{3-} 的地表径流量, TP 的地表径流量分别为(按降雨强度从小到大): 867.2、13.6 和 12.4 kg, PO_4^{3-} 的地表径流量分别为: 35.8、1.9 和 0.2 kg. 不同降雨强度下各形态 P 地表径流量与浓度的大小关系一致, 均为小雨 > 中雨 > 大雨.

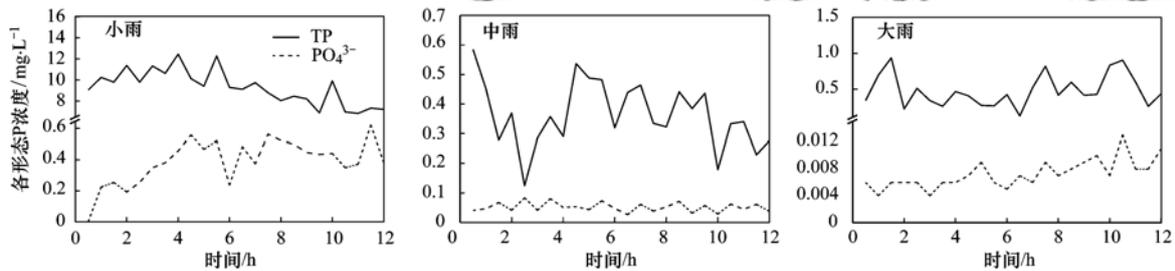


图 4 12 h 内不同降雨强度下磷浓度动态变化

Fig. 4 Dynamic change of phosphorus concentration under different rainfall intensities within 12 h

2.3 鄱阳湖地区常年 P 湿沉降的变化特征

结合丰水年和枯水年雨水中的月均 P 浓度值, 根据湿沉降通量计算方法得出丰水年年均 P 湿沉降的输入通量为 $6.04 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 枯水年为 $2.19 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 丰水年约为枯水年的 2.8 倍. 从图 5 可以看出, 丰水年的磷湿沉降通量在 3 月达到最高值, 为 $2.34 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 约占年均总通量的 39%. 其中, 丰水年 9 月的雨水中 P 浓度低于检测限. 枯水年磷湿沉降主要集中在 8 月和 9 月, 沉降通量约占年均总通量的 46%, 在 9 月达到最高值, 为

$0.57 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 在 1 月达到最低值为 $0.04 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 流域内磷湿沉降表现出了明显的季节性差异, 并且沉降通量和降雨量之间并没有表现出显著的相关关系 ($P > 0.05$).

2.4 丰、枯水期浮游植物群落组成

本研究共采集鉴定到浮游植物 8 门 87 属, 丰水期和枯水期分别鉴定出浮游植物 8 门 87 属和 8 门 60 属. 由图 6 可知, 丰水期蓝藻门占绝对优势地位, 占有藻类密度的 63.14%; 其次为绿藻, 占藻类密度的 18.23%; 再次为硅藻、隐藻和金藻; 另外甲藻、

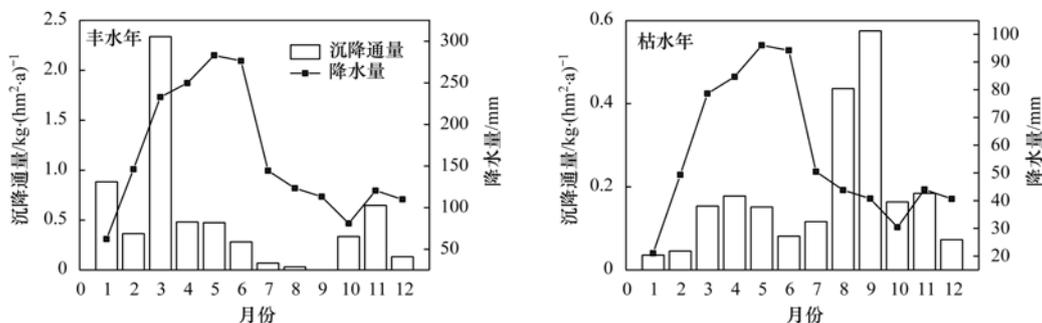


图 5 丰枯水年 P 湿沉降通量的年际变化

Fig. 5 Interannual variation of P wet deposition flux in wet and dry years

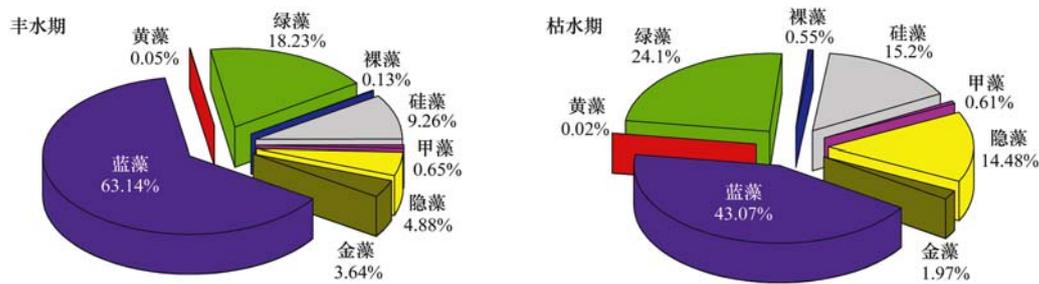


图6 丰、枯水期浮游植物群落组成

Fig. 6 Phytoplankton community composition during wet season and dry season

黄藻和裸藻占比均低于1%。枯水期蓝藻密度的占比为43.07%，仍然是优势种；其次，绿藻占比为24.1%；再次为硅藻和隐藻，占比均在15%左右；金藻、甲藻、裸藻和黄藻占比均低于2%，并且黄藻门的检测值极低，冬季未发现黄藻门。丰水期和枯水期浮游植物各类群的密度大小关系均为：蓝藻 > 绿藻 > 硅藻 > 隐藻 > 金藻 > 甲藻 > 裸藻 > 黄藻，无论丰、枯水期都是蓝藻占绝对优势。丰、枯水期不同藻类密度占比的差别较大，其中蓝藻丰、枯水期的密度占比差了两成左右，在所有藻类中差别最大，其次是隐藻，差值为9.6%，另外硅藻和绿藻的密度占比也差了近6%。

选取鄱阳湖流域浮游植物中4个主要的优势门类即蓝藻、绿藻、硅藻以及隐藻丰、枯水期的密度与丰、枯水期的TP浓度进行Pearson相关性分析(表2)。结果表明，在丰水期时，TP浓度与硅藻密度存在极显著的相关关系($P < 0.01$)，但是与蓝藻、绿藻和隐藻都没有显著的相关关系，枯水期时，TP浓度与隐藻有极显著的相关关系($P < 0.01$)，但是与蓝藻、绿藻和硅藻不存在明显的相关关系。

表2 丰、枯水期的TP浓度与浮游植物各类群相关性¹⁾

Table 2 Correlation between TP concentration in wet season and dry season and various species of phytoplankton

指标	项目	蓝藻	绿藻	隐藻	硅藻
TP	丰水期	0.278	-0.128	0.116	0.631 **
	枯水期	-0.162	-0.068	0.598 **	0

1) **表示在0.01水平上(双侧)显著相关

3 讨论

3.1 丰枯水期P浓度变化特征及P输送通量对各级流域的贡献

香溪流域丰水期和枯水期各形态P浓度都比较小，可能是由于香溪流域多为森林生态系统，无农业区和工业区，因而面源污染较少。丰、枯水期鄱阳湖流域某些点出现较大峰值，这可能是由于这些采样点靠近岸边，受到陆地上含P有机物的影响。由于丰水期降雨频次较高以及降雨量较大，对水体的稀释作用显著，导致丰水期各流域的DTP和 PO_4^{3-}

浓度都很低，并且枯水期TP、DTP和 PO_4^{3-} 的均值都大于丰水期的TP、DTP和 PO_4^{3-} 均值。

各流域P输出通量多为丰水期大于枯水期，其原因可能是丰水期流量升高的程度大于P浓度降低的程度。田宇鹏^[31]对九龙江流域的研究表明，河流中各营养元素的输出通量均为丰水期大于枯水期，且流量影响可能是造成这一现象的主要因素。将鄱阳湖流域P的输出通量与径流量做相关性分析，结果表明，P的输送通量与径流量在99%的置信水平上呈极显著相关关系($R^2 = 0.996, P < 0.01$)。

3.2 年均P沉降变化动态特征

丰水年的沉降通量约为枯水年的2.8倍，在3月达到最高值，约占年均总通量39%，枯水年磷湿沉降主要集中在8月和9月，沉降通量约占年均总通量的46%，可见流域内磷湿沉降表现出了较为显著的季节性差异。徐冯迪等^[17]指出，2013~2014年香溪流域磷湿沉降通量达 $0.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，且磷沉降主要发生在夏季。另外，沉降通量和降雨量之间并没有表现出明显的相关关系，丰水期沉降通量的峰值出现在3月，枯水期的峰值出现在9月，这两个月的月均降雨量并不是最高的，尤其是枯水期9月的月均降雨量仅为约40mm，但是雨水中的P浓度显著高于其他月份，因此导致这两个月的沉降通量远高于其他月份。

3.3 丰、枯水期P浓度变化对浮游植物密度的影响

一般来说，浮游植物密度和优势种通常能够反映水体的营养状态。丰水期和枯水期浮游植物各类群的密度大小关系均为：蓝藻 > 绿藻 > 硅藻 > 隐藻 > 金藻 > 甲藻 > 裸藻 > 黄藻，无论丰、枯水期都是蓝藻占绝对优势，这与陈格军等^[32]得出的绿藻在鄱阳湖占绝对优势的结论不一致，这是因为本文在评估优势类群时所用的指标是密度而非生物量。丰、枯水期不同藻类密度占比的差别较大，与Sommer等^[33]提出的浮游生物生态群落模型(plankton ecology group model, PEG-model)中所描述的藻类群落演替过程相类似，即鄱阳湖秋冬季气温较低，有效光照相对较低，藻类繁殖受到一定的影响，而硅藻对环境有

良好的适应性,因此,枯水期硅藻密度占比会上升。此外,陈泽恺^[34]通过对鄱阳湖地区着生藻类群落与环境因子进行相关性分析时也发现,总磷是鄱阳湖着生硅藻分布的影响因子之一,Jia 等^[22]和陈格君等^[32]的研究结果也表明鄱阳湖藻类群落分布与 P 显著相关。

4 结论

(1) 鄱阳湖流域的 P 浓度呈明显的季节变化。香河流域丰水期的 TP 和 DTP 浓度均大于枯水期;其余流域的 TP、DTP 和 PO_4^{3-} 浓度均为枯水期较高,丰水期较低。丰水期时,TP 浓度与硅藻密度存在极显著的相关关系($P < 0.01$),枯水期时,TP 浓度与隐藻有极显著的相关关系($P < 0.01$),这表明 P 是鄱阳湖藻类群落生长的一个影响因子。

(2) 流域丰水年和枯水年的沉降通量存在显著差异,丰水年约为枯水年的 2.8 倍,并且流域内磷湿沉降表现出了明显的季节性差异;另外,沉降通量和降雨量之间并没有表现出明显的相关关系。

(3) P 的输出通量呈明显的季节性变化,各流域多为丰水期大于枯水期,其原因可能是丰水期 P 浓度升高的程度大于流量降低的程度,各流域对下一级河流的贡献率都较小,这说明通过各级支流输送的 P 并不是各级流域 P 的最主要来源。

参考文献:

- [1] 许海,陈浩,朱广伟,等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1239-1247.
Xu H, Chen J, Zhu G W, *et al.* Effect of concentrations of phosphorus and nitrogen on the dominance of cyanobacteria[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1239-1247.
- [2] Dolman A M, Wiedner C. Predicting phytoplankton biomass and estimating critical N:P ratios with piecewise models that conform to Liebig's law of the minimum[J]. Freshwater Biology, 2015, **60**(4): 686-697.
- [3] Lürling M, Mackay E, Reitzel K, *et al.* Editorial - A critical perspective on geo-engineering for eutrophication management in lakes[J]. Water Research, 2016, **97**: 1-10.
- [4] 胡正峰. 加拿大格兰德河水体磷素形态转化及水生生物对磷素吸收释放研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
Hu Z F. Seasonal variation of phosphorus forms and mutual transformation in grand river watershed, Canada [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [5] 秦巧燕,朱建强. 磷的环境效应及水生植物修复技术研究进展[J]. 长江大学学报(自科版)农学卷, 2009, **6**(4): 53-57.
- [6] Li A, Strokal M, Bai Z H, *et al.* How to avoid coastal eutrophication - a back-casting study for the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2019, **692**: 676-690.
- [7] 钱奎梅,刘霞,段明,等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 261-267.
Qian K M, Liu X, Duan M, *et al.* Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 261-267.
- [8] Su X M, Steinman A D, Oudsema M, *et al.* The influence of nutrients limitation on phytoplankton growth and microcystins production in Spring Lake, USA[J]. Chemosphere, 2019, **234**: 34-42.
- [9] 彭近新,陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [10] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [11] Wang Z, Zhang X Y, Liu L, *et al.* Evaluating the effects of nitrogen deposition on rice ecosystems across China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, **285**: 106617.
- [12] Guan B, Xie B H, Yang S S, *et al.* Effects of five years' nitrogen deposition on soil properties and plant growth in a salinized reed wetland of the Yellow River Delta[J]. Ecological Engineering, 2019, **136**: 160-166.
- [13] 王江飞. 杭嘉湖大气氮、磷沉降特征及其对水环境的影响[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
Wang J F. Atmospheric deposition of nitrogen and its effect on the water environment in the Hangjiahu area [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [14] 陈世博,汪亚峰,高扬,等. 黄土高原磷湿沉降特征及其对坝系流域磷输出影响——以羊圈沟为例[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(2): 721-728.
Chen S B, Wang Y F, Gao Y, *et al.* Characteristics of phosphorus wet deposition in the loess plateau and its effect on the phosphorus export in the dam watershed: a case study of Yangguangou watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(2): 721-728.
- [15] 任加国,贾海斌,焦立新,等. 滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 582-589.
Ren J G, Jia H B, Jiao L X, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus formation in atmospheric deposition in Dianchi Lake and their contributions to lake loading[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 582-589.
- [16] 张智渊. 太湖大气湿沉降氮、磷营养盐特征及其对浮游植物的影响[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2018.
Zhang Z Y. Atmospheric wet deposition characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake and its influence on phytoplankton [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2018.
- [17] 徐冯迪,高扬,董文渊,等. 我国南方红壤区氮磷湿沉降对森林流域氮磷输出及水质的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(20): 6409-6419.
Xu F D, Gao Y, Dong W Y, *et al.* Impact of atmospheric nitrogen and phosphorus wet deposition on nitrogen and phosphorus export and associated water quality: a case study of forest watershed in the red soil area, Southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(20): 6409-6419.
- [18] 陆瑶,高扬,贾璐杰,等. 鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2696-2704.
- [19] Lu Y, Gao Y, Jia J J, *et al.* C and N transport flux and associated changes of water quality parameters from a multiscale subtropical watershed in the Poyang Lake area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2696-2704.
- [19] 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.
- [20] 杜冰雪, 徐力刚, 张杰, 等. 鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(5): 795-801.
Du B X, Xu L G, Zhang J, *et al.* The spatial-temporal characteristics of eutrophication in Poyang Lake and its relationship with the water level[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(5): 795-801.
- [21] 高伟, 高波, 严长安, 等. 鄱阳湖流域人为氮磷输入演变及湖泊水环境响应[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(9): 3137-3145.
Gao W, Gao B, Yan C A, *et al.* Evolution of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to Lake Poyang Basin and its' effect on water quality of lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(9): 3137-3145.
- [22] Jia J J, Gao Y, Song X W, *et al.* Characteristics of phytoplankton community and water net primary productivity response to the nutrient status of the Poyang Lake and Gan River, China [J]. Ecohydrology, 2019, **12**(7): e2136, doi: 10.1002/eco.2136.
- [23] Gao Y, Hao Z, Yang T T, *et al.* Effects of atmospheric reactive phosphorus deposition on phosphorus transport in a subtropical watershed: a Chinese case study[J]. Environmental Pollution, 2017, **226**: 69-78.
- [24] 刘剑宇, 张强, 邓晓宇, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 432-443.
Liu J Y, Zhang Q, Deng X Y, *et al.* Quantitative analysis the influences of climate change and human activities on hydrological processes in Poyang Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 432-443.
- [25] 徐更生. 鄱阳湖非汛期水位降低的成因分析与对策[J]. 价值工程, 2019, **38**(24): 95-97.
Xu G S. Cause analysis and countermeasure of water level decline in Poyang Lake during non-flood period[J]. Value Engineering, 2019, **38**(24): 95-97.
- [26] 李传琼, 王鹏, 陈波, 等. 鄱阳湖流域赣江水系溶解态金属元素空间分布特征及污染来源[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 139-149.
Li C Q, Wang P, Chen B, *et al.* Spatial distribution and pollution source of dissolved metals in the Ganjiang River of Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 139-149.
- [27] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 崔键, 周静, 杨浩. 农田生态系统大气氮、硫湿沉降通量的观测研究[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2243-2248.
Cui J, Zhou J, Yang H. Observations of the input for atmospheric wet-deposition of nitrogen and sulfur into Agroecosystem[J]. Ecology and Environment, 2009, **18**(6): 2243-2248.
- [29] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(2): 326-331.
Xu Q G, Liu H L, Shen Z Y, *et al.* Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(2): 326-331.
- [30] 韩震, 罗焯轲, 王中根, 等. 土地利用方式对流域氮输入输出关系的影响——以加州 San Joaquin 流域为例[J]. 地理科学进展, 2010, **29**(9): 1081-1086.
Han Z, Luo Y Z, Wang Z G, *et al.* Impact of land use on input and export of nitrogen of watersheds: a case study in San Joaquin Valley, CA[J]. Progress in Geography, 2010, **29**(9): 1081-1086.
- [31] 田宇鹏. 九龙江河水营养元素的地球化学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
Tian Y P. The geochemical characteristics of nutrient elements in river water in Jiulongjiang basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [32] 陈格君, 周文斌, 李美婷, 等. 鄱阳湖氮磷营养盐对浮游植物群落影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2013, (3): 48-52, 61.
Chen G J, Zhou W B, Li M T, *et al.* Research on the of nitrogen and phosphorus on the phytoplankton community in Poyang Lake [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (3): 48-52, 61.
- [33] Sommer U, Gliwicz Z M, Lamper T W, *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. Archiv fur Hydrobiologie, 1986, **106**(4): 433-471.
- [34] 陈泽恺. 鄱阳湖着生藻类分布格局及其与环境相关性的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
Chen Z K. Distribution pattern of periphytic algae and correlation to its environmental factors in the Poyang Lake[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)