

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.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应

黄亚玲^{1,2}, 唐莉¹, 黄金良^{1*}, 肖才荣¹

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 闽江学院海洋研究院, 福州 350108)

摘要: 本研究应用现场监测、地理信息技术(GIS)、模型模拟和数理统计等方法, 基于2015年3月至2017年2月九龙江流域不同主导土地利用类型源头小流域和两条干流河流表层水总磷(TP)、总溶解态磷(TDP)和颗粒态磷(PP)的浓度监测, 探究河流磷浓度与输出负荷的时空变化特征, 揭示九龙江流域磷输出对土地利用模式及水文状况的响应。结果发现, 九龙江流域河流磷浓度和磷输出负荷具有明显的时空变异性。在空间上, 农业流域>城市流域>自然流域, 西溪>北溪。在季节上, 不同类型流域不同形态磷浓度总体表现为春、冬季节较高, 而夏、秋季节较低。TP、TDP、和PP输出负荷春、夏季高于秋、冬季, 与径流深度的变化趋势基本一致。磷浓度、输出负荷与林地和裸地面积百分比呈负相关关系, 与耕地、果园面积百分比呈正相关关系。但不同季节, 磷浓度和输出负荷对土地利用和水文状况的响应存在差异, 在夏季的相关性最强。结果表明农业非点源污染是九龙江流域河流磷的关键源, 提升林地比例有助于保持水土, 改善河流水质, 尤其在雨季。

关键词: 近海流域; 磷输出; 土地利用模式; 水文状况; 时空变异性

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5340-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905234

Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed

HUANG Ya-ling^{1,2}, TANG Li¹, HUANG Jin-liang^{1*}, XIAO Cai-rong¹

(1. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Institute of Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In-situ monitoring, geographic information technology (GIS), watershed model, and statistical techniques were coupled in this study to explore the responses of riverine phosphorus exports to land use pattern and hydrological regime in the Jiulong River Watershed (JRW). We analyzed riverine phosphorus concentrations and exports from March 2015 to February 2017 across a land use gradient spanning 14 monitored sampling sites. Results showed that significantly spatial and seasonal variations of phosphorus concentrations and exports were observed in JRW. Mean phosphorus concentrations and exports were the highest in the agricultural watershed, followed by the urban watershed, whereas the West River reach had higher mean phosphorus concentration and export than the North River reach. Mean concentrations of phosphorus were higher in spring and winter, whereas lower concentrations were observed in autumn and summer. Phosphorus exports were higher in spring and summer, consistent with the seasonal trend of runoff. Phosphorus concentrations and exports had negative correlations with percentages of forest and bare land, and were positively correlated with cropland and orchard. The responses of riverine phosphorus to land use types and hydrological regime varied across seasons, whereas the relationships between phosphorus concentrations/exports and land use or runoff were the strongest in summer, suggesting that non-point source pollution associated with agricultural activities would be the critical source of riverine phosphorus and an increase in forest percentage could be useful for improving water quality. Overall, the spatiotemporal patterns of phosphorus exports were affected by land use pattern, as well as the characteristics of the hydrological regime.

Key words: coastal watershed; phosphorus exports; land use pattern; hydrological regime; spatiotemporal variations

磷作为限制性营养盐^[1], 过量输入会造成水体富营养化和其他生态损害, 威胁人们所依赖的生态系统服务与功能^[2, 3]。有研究表明, 河流磷营养盐状况是植被、土壤、地形、气候和土地利用状况等自然和人为因素综合作用的结果^[4], 而这些影响因素受到人类活动和气候变化的共同作用^[5, 6]。在流域范围内, 土地利用主要通过影响污染源类型、污染物产生量以及传输过程, 从而决定河流磷空间分布格局^[7, 8]。受气候变异性或气候变化影响的水文过程和生物地球化学过程是驱动磷输出季节变化的重要因素^[9~11]。因此, 在流域尺度上, 从土地利用模

式和水文变异性等视角, 综合分析磷输出的时空分布特征及其驱动因素, 对流域综合管理, 促进水资源可持续利用具有重要的参考价值。

从人类活动、气候变异性或水文变异性等角度研究河流磷输出驱动机制是近年来的热点^[1, 12~15]。目前普遍认为跟人类活动相关的水污染是导致地表

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471154); 厦门大学校长基金项目(20720150129)

作者简介: 黄亚玲(1988~), 女, 博士, 主要研究方向为流域水环境, E-mail: huangyaling0602@163.com

* 通信作者, E-mail: jilhuang@xmu.edu.cn

水磷浓度和输出负荷增加的直接原因^[9, 16, 17], 受气候因子影响的流域水文状况, 主要通过稀释、浓缩和非直接的物质运移过程影响河流磷。由于污染源、生物地球化学过程、气候因素等的差异, 不同类型流域或区域不同形态磷输出的时空变化模式存在明显的区域性。九龙江流域作为福建省第二大河流, 是漳州、龙岩和厦门三地市超过1 000万人口的工农业和饮用水水源地, 生态意义重大。现有研究表明, 磷是影响九龙江流域水体富营化的重要因素, 如: 河流呈现季节性的磷限制^[18, 19]。因此, 本文选取深受自然和人类双重扰动的亚热带中尺度近海流域——九龙江流域为研究对象, 基于不同形态磷浓度监测与分析, 探究土地利用模式和水文状况对九龙江流域河流磷输出的影响, 有助于九龙江流域河流磷控制和水资源的可持续利用。

1 材料与方法

1.1 研究区域

九龙江地处福建省东南沿海地区(116°46′55″~118°02′17″E, 24°23′53″~25°53′38″N), 流经农业集约化程度高的漳州平原, 是福建省第二

大河流, 主要由北溪、西溪两大干流构成, 在漳州龙海市福河口汇合, 由厦门港入海(图1)。流域总面积14 700 km², 其中北溪和西溪流域的面积分别为9 560 km²和3 772 km²。北溪发源于龙岩梅花山一带, 2010~2017年日平均流量300.0 m³·s⁻¹, 年平均流量9.47×10⁹ m³; 西溪源于南靖、平和以及西部的板寮岭, 2010~2017年日平均流量135.6 m³·s⁻¹, 年平均流量4.3×10⁹ m³。北溪流经龙岩市区、漳平市、漳州华安和长泰县, 主要污染源为生活污水和畜禽养殖。相比北溪流域, 西溪流域具有海拔较低, 农业活动强度大(主要种植蜜柚、龙眼、花卉和蔬菜)、人口密度高等特点。

1.2 水质监测与分析

本研究遴选九龙江流域不同主导土地利用类型源头小流域(农业、城市和自然流域)及两条干流出口开展河流表层水磷浓度监测, 共设置14个点位。不同主导土地利用类型小流域划分原则为: 建设用地比例高于8%的流域为城市流域, 农业用地比例高于10%的流域为农业流域, 林地比例高于80%的为自然流域^[20]。划分依据主要参考LAWA、冯媛研

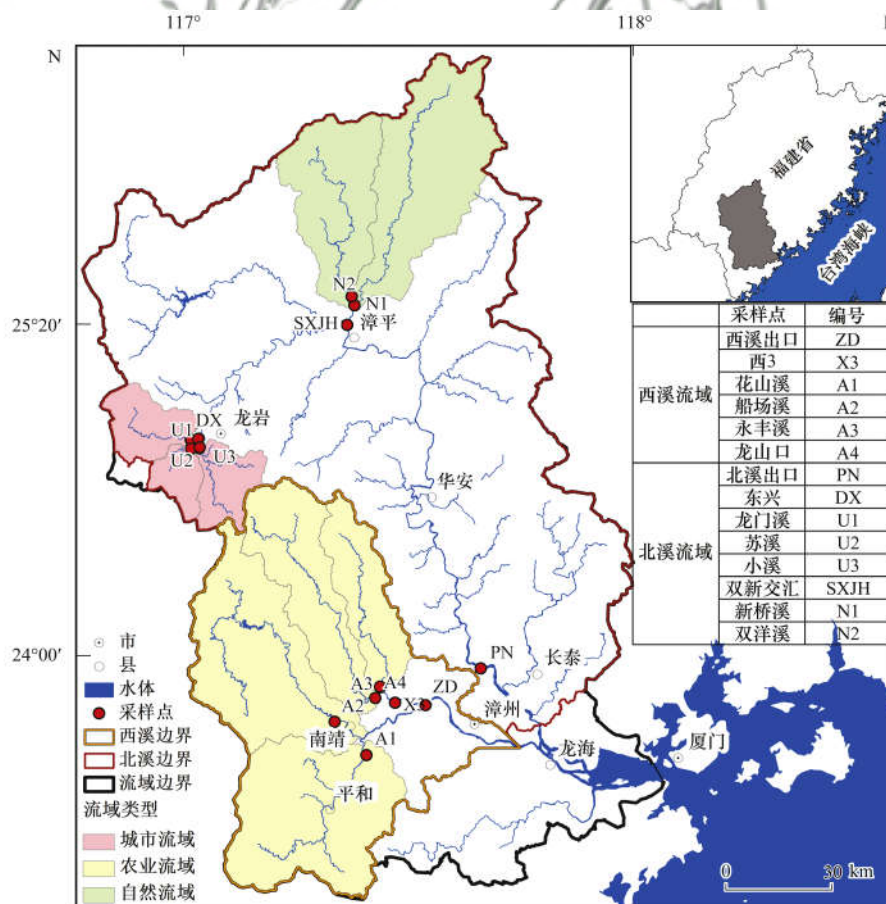


图1 采样点位分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites

究并综合考虑流域地理位置等因素设计^[21, 22]. 北溪和西溪流域出口设置主要考虑到流量获取及水文模型验证的需求,因此,以省控断面为流域出口^[23],分别在 PN 和 ZD 采样点开展水质监测.

总磷的监测时间为 2015 年 3 月至 2017 年 2 月,溶解态总磷和颗粒态磷的监测时间为 2015 年 7 月至 2017 年 2 月. 2015 年 3 月至 2016 年 3 月的采样频率为每月 2 次,2016 年 4 月至 2017 年 2 月为每月 1 次. 本研究使用有机玻璃采水器(型号为 WB-PM)采集各站点表层水(距水面 0.5 m),一般在桥中央采集,样品采集完后立即放入 4℃ 的采样箱保存,带回实验室测定. 采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定表层水的总磷(TP)和溶解态总磷(TDP),颗粒态磷(PP) = TP - TDP^[24].

1.3 研究方法

1.3.1 流量模拟

本研究应用九龙江流域已构建的 HSPF 模型^[25]模拟未设置水文监测站点的 12 个小流域采样点的流量. 利用 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (E_{ns})和决定系数(R^2)来评估 HSPF 模型在流量校准和验证过程的效果. 结果表明 HSPF 模型对九龙江流域日径流量的模拟效果较好(表 1).

表 1 HSPF 径流量模拟表现

Table 1 Performance of HSPF in simulating runoff

位置	日径流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			
	E_{ns}		R^2	
	校准期	验证期	校准期	验证期
北溪	0.60	0.67	0.61	0.67
西溪	0.67	0.79	0.70	0.80

1.3.2 通量的计算

采用两种较为常用的方法来计算磷的通量:全局平均法(global mean method)、流量权重法(flow weighted method). 为了减少水文状况等因素引起的不确定性,本研究中磷输出负荷是基于两种方法结果的平均值除以流域面积计算的^[26].

(1)全局平均法 全局平均法是用所有样品浓度的均值与研究期流量的总值相乘,其表达式见公式(1),该方法并未考虑水文响应.

$$\text{Flux} = m \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \times Q_i$$

(1)

式中, c_i 是水样浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q_i 是年径流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$); n 是月采样次数; m 是单位转换因子.

(2)流量权重法 流量权重法是利用流量对浓度进行加权,即通量由年流量与加权浓度相乘得到,

其表达式见公式(2),该方法考虑到了水文响应,应用较为广泛.

$$\text{Flux} = m \frac{\sum_{i=1}^n c_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

(2)

式中, Q_i 是采样当天的流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),其他参数含义同上.

1.3.3 统计分析

Pearson 相关分析是研究变量之间关系紧密程度的一种统计方法,主要用于描述变量之间的相关关系. 运用 Pearson 相关分析方法,探究土地利用、水文状况与磷浓度和输出负荷的关系. 本研究中主要利用的数据分析软件为 ArcGIS 10.7、SPSS 17.0 和 OriginPro 8.0.

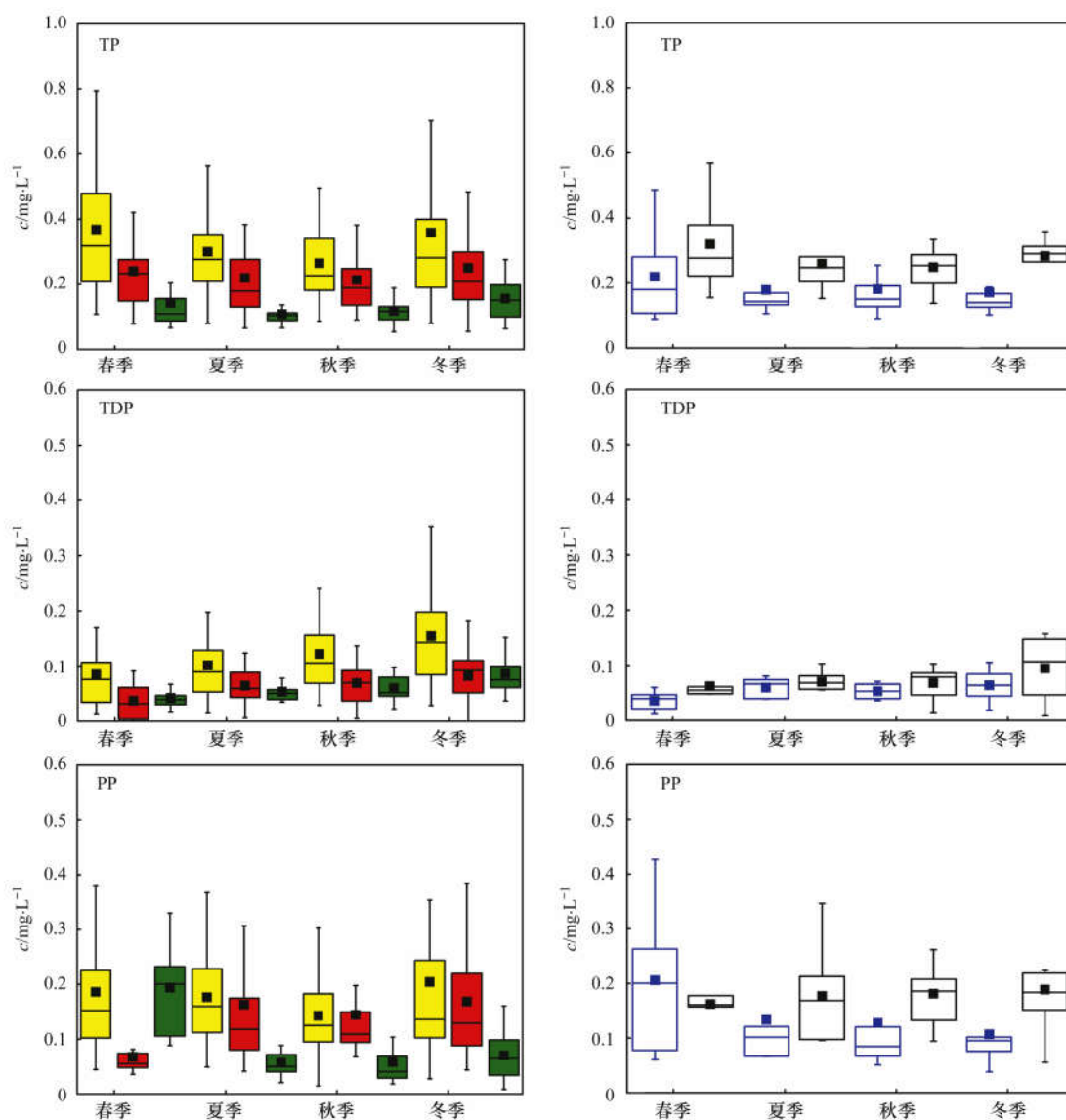
2 结果与分析

2.1 河流磷浓度的时空分布特征

九龙江流域河流表层水磷浓度存在明显的时空差异(图 2). 在空间尺度上,大部分形态磷的平均浓度变化趋势为:农业流域 > 城市流域 > 自然流域,西溪 > 北溪. 在时间尺度上,农业流域的颗粒态磷(PP)平均浓度值在冬、春季高,夏、秋季低;在城市流域,PP 平均浓度则在夏、冬季高,春、秋季低;在自然流域,PP 平均浓度的最高值出现在春季,最低值出现在夏季. 所有类型小流域中,TP 平均浓度表现为春、冬季高,夏、秋季节低,TDP 均表现为春-夏-秋-冬季逐渐递增趋势. 对于北溪和西溪流域出口而言,TP 平均浓度最高值也出现在春季,分别为 $(0.22 \pm 0.12) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(0.32 \pm 0.12) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度最低值则分别出现在冬季 $[(0.17 \pm 0.09) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 和秋季 $[(0.25 \pm 0.12) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}]$;TDP 的季节变化趋势均为冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季;北溪流域出口的 PP 平均浓度在春季最高 $[(0.21 \pm 0.15) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}]$,在冬季最低 $[(0.11 \pm 0.09) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}]$,西溪流域 PP 平均浓度的变化趋势则反之. 不同形态磷的组成而言,颗粒态磷的平均浓度高于溶解态磷,说明九龙江流域表层水磷的主要赋存形态为颗粒态磷(图 2).

2.2 河流磷输出负荷时空分布特征

农业流域和西溪流域的径流深度(runoff)变化模式为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,而城市流域、自然流域以及北溪流域的径流深度由春季到冬季逐季节递减. 在春季,城市流域和自然流域的径流深度高于农业流域,而在其余季节,则相反(图 3).



黄色、红色、绿色分别代表农业、城市、绿色小流域;蓝色和黑色分别代表北溪和西溪流域

图2 不同形态磷浓度时空变化模式

Fig. 2 Spatiotemporal variations of phosphorus concentrations

不同尺度、不同类型流域的不同形态磷输出负荷存在明显的季节变异性(图3)。对于农业流域而言,TP输出负荷的最高值出现在夏季,春季次之,而秋、冬季无明显差异;对于城市流域而言,TP输出负荷的变化模式为春季>夏季>冬季>秋季。自然流域的TP输出负荷的季节变化模式与城市流域一致。对于两条干流而言,西溪的TP输出负荷最高值也出现在夏季,即径流高的季节;北溪的TP输出负荷在春季最高,夏季次之,输出负荷的最低值出现在冬季。3种典型小流域以及两条干流的TDP和PP输出负荷均表现为春、夏高,秋、冬低的变化趋势。总体而言,农业流域的磷输出负荷最高,城市流域次之,西溪高于北溪。

2.3 河流磷输出与土地利用和水文状况的关系

不同季节磷浓度和输出负荷与土地利用面积百

分比和径流深度的关系呈非稳定模式。总体而言,磷浓度和输出负荷与林地、裸地面积百分比呈负相关关系,与农业用地和果园面积百分比呈正相关,而不同形态磷浓度和负荷与建设用地的关系不一致(表2)。相比建设用地,农业用地与磷输出的关系更密切,意味农业活动的空间差异是导致九龙江流域不同主导土地利用类型流域河流磷输出差异的重要因素。对于不同季节而言,林地面积百分比与所有形态磷的浓度和输出负荷的负相关性在夏季最强,尤其是与PP的浓度呈显著负相关性,说明在丰水季节林地可以有效保持水土,减少河流中PP的输入。与其他季节相比,TP、TDP和PP浓度及输出负荷在夏季与耕地、果园和径流深度的正相关性也是较强的,表明在夏季农业非点源污染源是河流磷的重要来源。

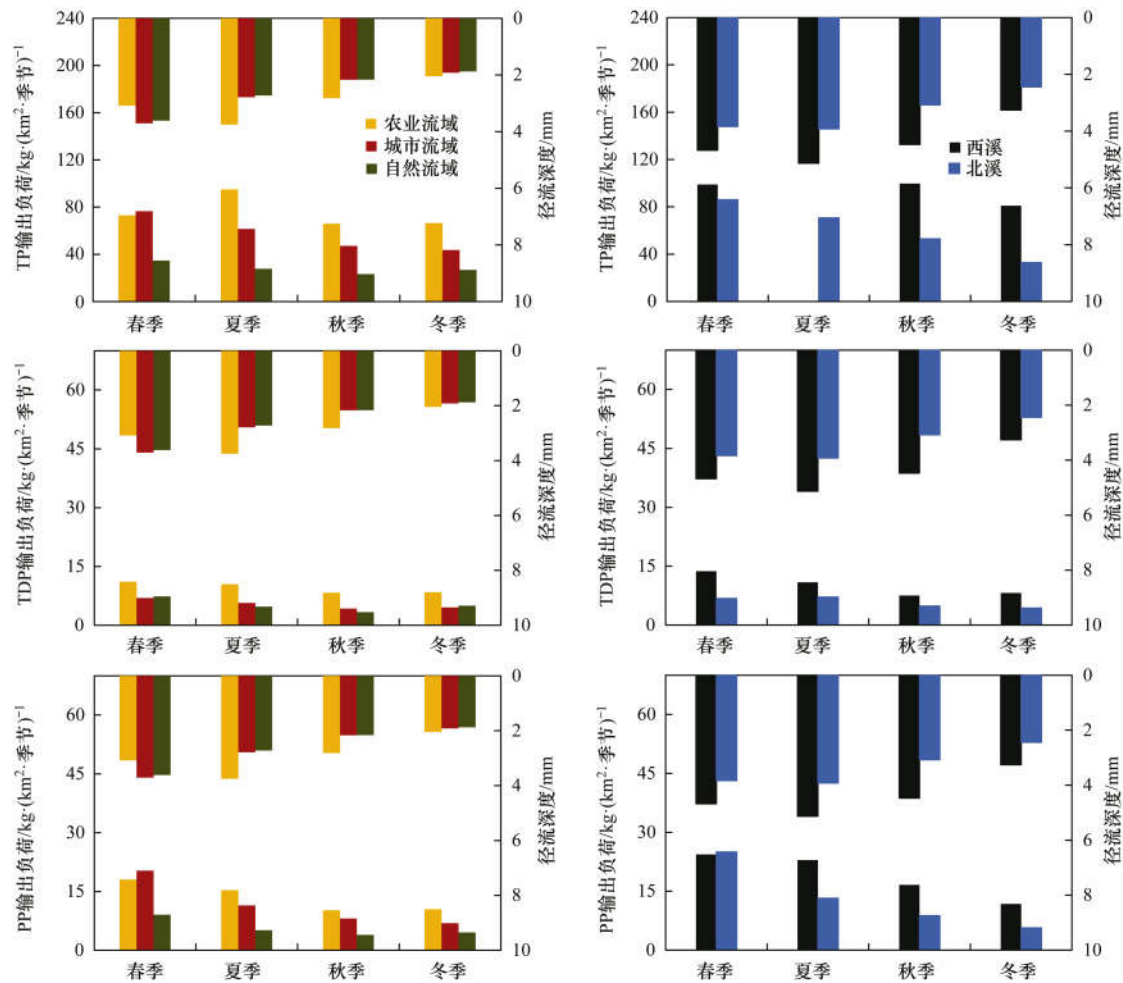


图3 磷输出负荷时空变化模式

Fig. 3 Spatiotemporal variations of phosphorus exports

表2 磷浓度及输出负荷与环境因子的 Pearson 相关关系¹⁾

Table 2 Pearson correlations between phosphorus concentrations and exports and environmental factors

水质指标	季节	林地	耕地	建设用地	果园	裸地	径流深度	样本数
TP 浓度	春	-0.18	0.24	-0.01	0.17	-0.35	0.17	14
	夏	-0.43	0.43	0.19	0.27	-0.34	0.25	14
	秋	-0.38	0.38	0.19	0.22	-0.29	0.19	14
	冬	-0.34	0.39	0.07	0.28	-0.34	0.09	14
TDP 浓度	春	-0.24	0.45	-0.21	0.34	-0.53	0.05	14
	夏	-0.27	0.38	-0.01	0.23	-0.56 *	0.29	14
	秋	-0.23	0.35	-0.04	0.22	-0.49	0.14	14
	冬	-0.24	0.37	-0.11	0.28	-0.45	0.06	14
PP 浓度	春	-0.43	0.23	0.51	0.08	-0.10	-0.26	14
	夏	-0.58 *	0.40	0.47	0.27	-0.20	0.14	14
	秋	-0.43	0.31	0.37	0.16	-0.01	0.18	14
	冬	-0.39	0.36	0.19	0.25	-0.22	0.10	14
TP 输出负荷	春	-0.41	0.27	0.41	0.11	-0.04	-0.12	14
	夏	-0.48	0.60 *	0.02	0.41	-0.15	0.46	14
	秋	-0.40	0.52	0.01	0.32	-0.05	0.40	14
	冬	-0.43	0.52	0.02	0.37	-0.19	0.18	14
TDP 输出负荷	春	-0.34	0.54 *	0.16	0.40	-0.61 *	0.18	14
	夏	-0.43	0.70 **	-0.21	0.49	-0.49	0.56 *	14
	秋	-0.41	0.65 *	-0.14	0.43	-0.44	0.37	14
	冬	-0.39	0.63 *	0.22	0.49	-0.43	0.18	14
PP 输出负荷	春	-0.42	0.30	0.38	0.13	-0.06	0.01	14
	夏	-0.58 *	0.64 *	0.11	0.45	-0.18	0.43	14
	秋	-0.47	0.55 *	0.08	0.35	-0.06	0.36	14
	冬	-0.50	0.64 *	0.04	0.49	-0.24	0.21	14

1) * 代表显著性水平为 <0.05; ** 代表显著性水平为 <0.01

3 讨论

3.1 河流磷输出的空间变异性

九龙江流域河流磷浓度和磷输出存在明显的空间差异. 农业流域磷浓度和输出负荷高于其他两种类型流域, 其中农业流域的 TP 输出负荷高于城市流域和自然流域 5 ~ 16 倍, 西溪高于北溪. 总体上农业活动强度越大的流域, 磷浓度和输出负荷越高, 说明农业面源污染是导致九龙江流域水体中磷输出空间变化的重要因素. 磷是水体营养盐的重要组成部分, 也是农业生产不可或缺的营养元素. 因此, 在农业生产较发达的地区其河流水体中的磷通常能反映农业生产活动的情况^[27].

在流域范围内, 土地利用主要通过影响污染源类型、污染物产生量以及传输过程^[28], 从而决定河流污染物空间分布格局. 农业小流域位于平和、南靖农业发展集约化区域, 该区域果园和耕地占地面积大, 化肥施用量高, 表明农业面源污染会造成水体中磷污染^[1, 29]. 城市小流域位于龙岩市区, 社会经济相对发达, 生活污水排河以及未处理的生活垃圾渗透等因素使得河流水质相对较差, 加之城市流域的上游仍然存在一些畜禽养殖, 其 TP 浓度和输出复合仅次于农业流域. 其他研究也表明, 生活污水和工业废水是河流磷的重要来源^[9, 16]. 自然流域林地所占比重大, 植被覆盖是防护水土流失的天然屏障, 而且人类活动强度较低, 污染源较少, TP 浓度总体较低, 与其他研究结果一致^[30]. 西溪流域的农业活动强度和人口密度均比北溪流域大, 其 TP 和 PP 的浓度总体上高于北溪, 进一步说明了人类活动导致的污染源差异是河流磷输出空间差异的重要驱动因素^[12, 31]. 此外, 农业流域和西溪流域的 PP 浓度和输出负荷远远高于其他类型小流域和北溪, 说明农业活动, 尤其是坡地果园开发导致的水土流失也是影响九龙江流域河流磷输出的重要因素^[29]. 总体上, 各季节农业流域的磷浓度波动性高于城市和自然流域, 西溪高于北溪.

3.2 河流磷输出的时间变异性

不同类型流域不同磷形态浓度总体表现为春、冬季节较高, 而夏、秋季节较低. 春季是九龙江流域的耕作季节, 农事活动频繁, 化肥施用量大, 加上 3 ~ 5 月的梅雨季节, 容易造成磷流失, 直接导致河流磷浓度增加^[24]. 冬季为枯水期, 降雨量少, 径流小, 不利于排入河道的污染物稀释^[32, 33]. 夏季为丰水期, 随着径流导致河流量增大, 面源污染物被径流冲刷入河, 但是在河流中的磷滞留时间短, 且流量对磷浓度的稀释作用大于冲刷作用, 河流的自净能力

大, 导致磷平均浓度降低^[34]. 相比春、夏季节, 秋季为收获阶段, 化肥施用量、降雨量和径流量减少, 入河的污染物总量有所削减, 河流水质状况较好. 但对于输出负荷而言, TP、TDP 和 PP 输出负荷表现为春、夏季高于秋、冬季, 与径流深度的变化趋势一致. 径流深度大的季节, 磷输出负荷高, 说明水文状况是控制磷输出负荷的重要因子^[13, 35].

温度的季节变化导致的微生物的转化过程存在差异, 也是影响河流水质季节变化的重要因素^[36]. 冬、春季, 温度较低, 不利于沉水植物及浮游植物活动, 其在此阶段处于休眠状态, 对水体中的磷利用率低. 另外, 上层水中藻类下沉到沉积物中, 沉积物中藻类丰富, 导致颗粒态总磷浓度偏高. 夏秋季, 温度较高, 流域浮水及沉水植物处于活跃状态, 藻类在上层水中较丰富, 所以对磷的利用率高^[32, 37]. 此外, 在春、夏季节, 降雨较为丰富, PP 占 TP 的比重高于秋、冬季, 说明在雨季水土流失对河流磷的贡献不可忽视. 九龙江流域土壤表层土壤的全磷含量为 $0.28 \sim 2.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 降雨主要集中在春、夏季节, 造成土壤侵蚀, 水土流失, 加剧水质恶化, 因此, 在春、夏季节特别要重视水土流失带来的水环境问题.

3.3 河流磷输出对土地利用和水文状况的响应

河流水质受到自然和人为因素的综合作用^[36, 38], 本研究发现土地利用类型和水文状况与河流磷浓度及输出负荷关系密切. 总体而言, 磷浓度、输出负荷与林地和裸地面积百分比呈负相关关系, 与耕地、果园面积百分比呈正相关关系, 而不同形态磷的浓度与输出负荷与建设用地和径流深度的关系不一致. 研究结果进一步表明, 农业活动(如化肥施用)是九龙江流域河流磷的重要来源, 而林地比例增加有助改善河流水质, 这与其他研究结论一致^[8, 11, 39, 40].

由于流域特征、污染源类型、污染物排放量以及迁移转化过程的时空差异^[41], 土地利用和水文状况与磷浓度和输出负荷的关系存在不稳定性. 总体而言, 耕地和径流深度与磷浓度和输出负荷在夏季的关系最密切, 说明农业非点源污染是河流磷的关键源. 此外, 耕地和径流深度与磷输出负荷的相关系数高于磷浓度, 而磷浓度或输出负荷与土地利用的相关系数大于径流深度, 说明河流磷输出负荷受到人类活动和水文状况的综合作用, 农业活动是影响河流磷输出的主要因素, 河流径流增加对磷输出负荷具有一定的增益效应^[42]. 林地与大部分磷浓度和输出负荷的负相关系数也是在夏季最高, 尤其是与 PP 呈显著负相关性, 进一步验证林地的比例

增加有助于保持水土,改善河流水质. 建设用地对不同指标的影响不同,与 PP 的关系最密切,尤其在春、夏季节,说明在雨季城市径流也是河流 PP 的一个重要来源^[43].

4 结论

(1) 磷浓度和输出负荷存在明显的空间差异. 总体表现为农业流域 > 城市流域 > 自然流域,西溪 > 北溪,说明农业面源污染的空间差异是决定九龙江流域水体中磷输出空间变化的关键因素.

(2) 不同类型流域不同磷形态浓度总体表现为春、冬季节较高,而夏、秋季节较低. 磷输出负荷表现为春、夏季高于秋、冬季,与径流深度的变化趋势基本一致,说明水文状况是控制磷输出负荷季节变化的重要因子.

(3) 磷浓度、输出负荷与林地和裸地呈负相关关系,与耕地、果园面积百分比和径流深度呈正相关关系,而不同形态磷浓度和输出负荷与建设用地的关系不一致,表明河流磷输出时空变化特征受土地利用模式和水文状况的共同作用. 但不同季节,磷浓度和输出负荷对土地利用模式和水文状况的响应存在差异,总体上在夏季的相关性最强,说明在夏季农业非点源污染源是河流磷的重要来源.

参考文献:

- [1] 李莹杰,王丽娟,李虹,等. 不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2170-2177.
Li Y J, Wang L J, Li H, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of phosphorus in the Dongting Lake at different water periods[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2170-2177.
- [2] Paerl H W. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: interactive effects of human and climatic perturbations[J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(1): 40-54.
- [3] Whitehead P G, Crossman J. Macronutrient cycles and climate change: key science areas and an international perspective[J]. Science of the Total Environment, 2012, **434**: 13-17.
- [4] Canter L W. River water quality monitoring[M]. Chelsea: Lewis Publishers, 1985.
- [5] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 2010, **468**(7321): 334.
- [6] Kundzewicz Z W, Krysanova V. Climate change and stream water quality in the multi-factor context[J]. Climatic Change, 2010, **103**(3-4): 353-362.
- [7] Hale R L, Grimm N B, Vörösmarty C J, *et al.* Nitrogen and phosphorus fluxes from watersheds of the northeast U. S. from 1930 to 2000: role of anthropogenic nutrient inputs, infrastructure, and runoff[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2015, **29**(3): 341-356.
- [8] 王琼,卢聪,范志平,等. 辽河流域太子河流域 N、P 和叶绿素 a 浓度空间分布及富营养化[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 297-307.
Wang Q, Lu C, Fan Z P, *et al.* Eutrophication and spatial distribution of N, P and chlorophyll-a in the Taizihe River Basin, Liaohe River Catchment[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(2): 297-307.
- [9] Duan S W, Kaushal S S, Groffman P M, *et al.* Phosphorus export across an urban to rural gradient in the Chesapeake Bay watershed[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, **117**(G1): G01025.
- [10] Ouyang Y, Nkedi-Kizza P, Wu Q T, *et al.* Assessment of seasonal variations in surface water quality[J]. Water Research, 2006, **40**(20): 3800-3810.
- [11] 卓泉龙,林罗敏,王进,等. 广州流溪河氮磷浓度的季节变化和空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(10): 3100-3109.
Zhuo Q L, Lin L M, Wang J, *et al.* Seasonal and spatial variation of nitrogen and phosphorus concentrations in Liuxi River in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(10): 3100-3109.
- [12] Kaushal S S, Pace M L, Groffman P M, *et al.* Land use and climate variability amplify contaminant pulses[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2010, **91**(25): 221-222.
- [13] Morse N B, Wollheim W M. Climate variability masks the impacts of land use change on nutrient export in a suburbanizing watershed[J]. Biogeochemistry, 2014, **121**(1): 45-59.
- [14] 华玲玲,李文超,翟丽梅,等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 138-146.
Hua L L, Li W C, Zhai L M, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 138-146.
- [15] 秦延文,韩超南,郑丙辉,等. 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2152-2159.
Qin Y W, Han C N, Zheng B H, *et al.* Analysis of transport and transformation characteristics between dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2152-2159.
- [16] 张亚娟,李崇巍,胡蓓蓓,等. 城镇化流域“源-汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报, 2017, **37**(7): 2437-2446.
Zhang Y J, Li C W, Hu B B, *et al.* Impact of a “source-sink” landscape pattern in an urbanized watershed on nitrogen and phosphorus spatial variations in rivers: a case study of Yuqiao Reservoir watershed, Tianjin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(7): 2437-2446.
- [17] 孙丽梅,裴钱玲琳,杨磊,等. 长三角城郊樟溪流域水体氮磷分布特征及其影响因素[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(4): 30-37.
Sun L M, Qiuqian L L, Yang L, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus and its influencing factors in Zhangxi Watershed of a Peri-urban area in the Yangtze River Delta[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(4): 30-37.
- [18] 陈聪聪,饶拉,黄金良,等. 东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3238-3247.
Chen C C, Rao L, Huang J L, *et al.* Seasonal variation on nutrient limitation for phytoplankton growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3238-3247.
- [19] Li Y, Cao W Z, Su C X, *et al.* Nutrient sources and composition

- of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jiulong River, Southeast China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63** (5-12): 249-254.
- [20] Huang Y L, Huang J L, Ervinia A, *et al.* Land use and climate variability amplifies watershed nitrogen exports in coastal China [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2018.02.024.
- [21] LAWA. German guidance document for the implementation of the EC water framework directive[EB/OL]. <https://www.lawa.de/English-Publications.html>, 2003.
- [22] 冯媛. 九龙江流域不透水地表提取及其与水质关联分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2012.
- Feng Y. Estimating impervious surface areas (ISA) and linking ISA with stream water quality in the Jiulong River Basin[D]. Xiamen: Xiamen University, 2012.
- [23] 黄金良, 洪华生, 杜鹏飞, 等. 基于 GIS 和 DEM 的九龙江流域地表水文模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2005, (2): 44-46, 50.
- Huang J L, Hong H S, Du P F, *et al.* Surface water hydrology simulation of Jiulong River Basin based on GIS and DEM[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005, (2): 44-46, 50.
- [24] 李乐, 王圣瑞, 王海芳, 等. 滇池入湖河流磷负荷时空变化及形态组成贡献[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(5): 951-960.
- Li L, Wang S R, Wang H F, *et al.* Temporal and spatial variations of phosphorus loading and the forms, compositions and contributions in inlet river of Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(5): 951-960.
- [25] 周培. 流域尺度土地利用与水质关联研究的理论分析和实践[D]. 厦门: 厦门大学, 2016.
- [26] Huang J C, Lee T Y, Kao S J, *et al.* Land use effect and hydrological control on nitrate yield in subtropical mountainous watersheds[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, **16** (3): 699-714.
- [27] 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.
- [28] Yu S Y, Xu Z X, Wu W, *et al.* Effect of land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **60**: 202-212.
- [29] 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(5): 866-871.
- Huang J L, Hong H S, Zhang L P, *et al.* Nitrogen and phosphorus loading of agricultural non-point sources in Jiulong River Watershed based on GIS[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(5): 866-871.
- [30] Tu J. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression[J]. *Applied Geography*, 2011, **31**(1): 376-392.
- [31] Hunter H M, Walton R S. Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **356**(1-2): 131-146.
- [32] 金鑫, 单保庆, 李思敏, 等. 北方典型干旱缺水型河流氮磷时空分布特征与富营养化评价[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(7): 3538-3544.
- Jin X, Shan B Q, Li S M, *et al.* Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in typical arid river in northern China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(7): 3538-3544.
- [33] 赵光影, 刘景双, 王洋, 等. 三江平原主要河流氮、磷营养元素时空变化规律研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23** (2): 144-149.
- Zhao G Y, Liu J S, Wang Y, *et al.* Study on spacial and seasonal changes of the content of carbon, nitrogen and phosphorus in Marsh Rivers[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23**(2): 144-149.
- [34] Smith D R, Warnemuende E A, Haggard B E, *et al.* Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance[J]. *Ecological Engineering*, 2006, **27**(1): 71-78.
- [35] 陈能汪, 吴殷琪, 张玉珍, 等. 流域氮磷输出、河流输送与库区富营养化关联分析——以福建山仔水库为例[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(9): 1862-1869.
- Chen N W, Wu Y Q, Zhang Y Z, *et al.* Linking watershed nutrient loads and riverine export to reservoir eutrophication: the case of Shanzai Reservoir, Fujian Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(9): 1862-1869.
- [36] Huang J L, Huang Y L, Zhang Z Y. Coupled effects of natural and anthropogenic controls on seasonal and spatial variations of river water quality during baseflow in a coastal watershed of southeast China[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(3): e91528.
- [37] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1268-1276.
- Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of nitrogen and phosphorus and difference analysis in water body of Lihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1268-1276.
- [38] Xia X H, Zhang S B, Li S L, *et al.* The cycle of nitrogen in river systems: sources, transformation, and flux[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2018, **20**(6): 863-891.
- [39] 王琼, 姜德娟, 于靖, 等. 小清河流域氮磷时空特征及影响因素的空间与多元统计分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(2): 137-145.
- Wang Q, Jiang D J, Yu J, *et al.* Spatio-temporal distribution of nitrogen and phosphorus and spatial and multi-variable statistical analysis of its impacting factors in Xiaoqinghe Watershed[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(2): 137-145.
- [40] Xiao H G, Ji W. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, **82** (1): 111-119.
- [41] Gonzales-Inca C A, Kalliola R, Kirkkala T, *et al.* Multiscale landscape pattern affecting on stream water quality in agricultural watershed, SW Finland [J]. *Water Resources Management*, 2015, **29**(5): 1669-1682.
- [42] Xia J, Cheng S B, Hao X P, *et al.* Potential impacts and challenges of climate change on water quality and ecosystem: case studies in representative rivers in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, **1**(1): 31-35.
- [43] Pratt B, Chang H. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **209-210**: 48-58.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)