

百方知库
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.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛满萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO_x排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N₂O排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征

陆瑶^{1,2}, 高扬^{1,2*}, 贾琚杰^{1,2}, 宋贤威^{1,2}, 陈世博³, 马明真^{1,2}, 郝卓^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 本文选取鄱阳湖流域内从初级支流到最大干流再到湖区(香溪→架竹河→赣江→鄱阳湖)这一联通水系线路为研究对象, 通过对丰水期和枯水期内各级河流对应流域及鄱阳湖湖区内水体中的各形态 C、N 浓度进行监测, 计算各级河流间 C、N 元素运移通量, 探讨鄱阳湖流域水体 C、N 迁移过程机制和水质参数变化特征, 为鄱阳湖流域生态系统的综合健康管理提供科学依据。结果表明: ①鄱阳湖通江流域的 C、N 浓度呈明显季节变化, 其中 TIC、TOC、TC 浓度丰水期较高, 而 NO_3^- -N 和 DTN 浓度枯水期较高。丰水期 TC 增加的主要原因是 TIC 增加, 丰水期 TN 主要以非溶解态存在, 而枯水期 TN 主要以 DTN 中的 NO_3^- -N 形式存在。②鄱阳湖通江流域的 C、N 输出通量呈明显季节变化, 其中香溪各形态 C 丰水期通量较枯水期小, 架竹河、赣江各形态 C 丰水期通量较枯水期大, 香溪、架竹河、赣江流域各形态 N 在丰水期通量大多较枯水期小, 各形态 C、N 通量与径流量在 99% 的置信水平上呈极显著正相关关系。③鄱阳湖流域水体参数丰水期 COND、TDS、pH 小于枯水期, 丰水期 ORP 大于枯水期。

关键词: 鄱阳湖流域; 通江湖泊; C、N 迁移; 输出通量; 丰水期; 枯水期

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2696-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811018

C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area

LU Yao^{1,2}, GAO Yang^{1,2*}, JIA Jun-jie^{1,2}, SONG Xian-wei^{1,2}, CHEN Shi-bo³, MA Ming-zhen^{1,2}, HAO Zhuo^{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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this study, a connected waterflow watershed system in the Poyang Lake area was selected as the study site, which ranged from the primary tributary to the lake area (Xiangxi River → Jiazhu River → Ganjiang River → Poyang Lake). The aims of the study were to monitor different forms of C and N and evaluate the transport flux of C and N, and then, the transport mechanisms of C and N and the variation characteristics of water quality parameters in Poyang Lake were discussed, with the intent of providing a scientific basis for the comprehensive management of watershed health within the Poyang Lake Basin ecosystem. The main results were as follows. ① The concentrations of C and N in the Poyang Lake watershed exhibited significant seasonal changes, wherein the TIC, TOC, and TC concentrations in the Poyang Lake Basin were higher in the wet season than those in the dry season, and the NO_3^- -N and DTN concentrations were higher in the dry season than those in the wet season. The main reason for the increase of TC in the wet season was the increase of TIC. Most of the TN in the wet season was transported by non-dissolved forms of N, while the TN in the dry period mostly was transported by DTN, and the DTN was mostly in the form of NO_3^- -N. ② The C and N transport fluxes in the Poyang Lake watershed also showed significant seasonal variation. The C transport flux of Xiangxi River was lower during the wet season than that during the dry season, and the C transport flux of Jiazhu River and Ganjiang River was higher during the wet season than that during the dry season. The various forms of N transport flux in Xiangxi River, Jiazhu River, and Ganjiang River watershed were higher in the wet season than those in the dry season. There was a very significant positive correlation between the flux and runoff at the 99% confidence level. ③ The COND, TDS, and pH in the Poyang Lake watershed were lower during the wet season than those during the dry season, while the ORP in the wet season was higher than that in the dry season.

Key words: Poyang Lake watershed; Yangtze River and its connected lakes; transport of C and N; output flux; wet season; dry season

C 和 N 在流域生物地球化学循环中具有重要地位:一方面, C、N 浓度是反映水体生产力和富营养化的重要指标, 水生动植物的生存受其含量的影响^[1], 并反过来影响着水体中 C、N 含量^[2]; 另一方面, C、N 的浓度携带了贡献区土地利用及河流形态特征信息^[3], 从流域尺度揭示陆地-水生生态系统在水文过程驱动下的 C、N 的变化, 有助于人

们从景观水平尺度提高对生物地球化学循环与水循环耦合过程的理解^[3, 4]. 因此, C、N 等营养物质通过河流向下游水体输送及其对下游水生态系统的影

收稿日期: 2018-11-02; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871080)

作者简介: 陆瑶(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文, E-mail: luyao26@mail2.sysu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn

响已经成为国际上流域生态学领域关注的重点问题。

同时流域是陆地-水生生态系统的基本单元, 水循环过程作为各种物质、能量循环的主要驱动力和载体^[5], 带动 C、N 等营养物质的输移。随着水体流动, C、N 从上游迁移到下游, 从支流汇入到干流, 其间受氧化还原条件及微生物的控制^[6]以及流域内气候、地形地貌、土地利用及水文条件等因素影响^[7], 并伴随着元素不同形态的互相转化^[8]。鄱阳湖流域位于长江中下游, 是东亚地区亚热带流域生态系统的典型研究区^[9, 10]。目前, 仅有少量研究针对流域生态系统的 C、N 化学计量特征, 且选取的流域范围较小、对支流的测定较少^[7, 11~13]、研究对象多为植被和土壤^[14~18], 关于不同流域尺度对鄱阳湖水体溶解 C、N 元素浓度特征以及在不同等级河流之间的输入通量的研究鲜见报道。

从较小尺度的支流开始监测水流中各形态 C、N 的浓度, 并计算支流的通量, 进一步推算较大尺度干流输入及输出比例, 有助于对水体生态系统进行宏观的把握, 从而指导流域生态系统管理。因此, 本研究选取鄱阳湖流域内从初级支流到最大干流再到湖区(香溪→架竹河→赣江→鄱阳湖湖区)这一多尺度联通水系为研究对象, 通过丰水期和枯水期对各级河流及鄱阳湖湖区内水体中的 C、N 浓度进行监测, 评估多尺度河流间 C、N 元素运移通量, 探讨流域水体 C、N 元素的迁移过程机制, 并结合水质参数相关指标探讨鄱阳湖水质变化特征, 以为鄱阳湖流域生态系统的综合健康管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖流域位于长江中下游, 流域面积 16.2 万 km²^[19]。占长江流域面积的 9%, 其中江西境内面积为 157 086 hm², 占江西全省面积的 94%。该流域地理环境特殊, 三面环山, 北邻长江, 赣江、抚河、信江、饶河、修水分别从南、东、西三面向北汇入鄱阳湖, 构成山江湖为一体的核心——边缘结构体系。鄱阳湖流域属北亚热带季风气候, 主要土壤类型为红壤, 地处亚热带常绿阔叶林区, 年均气温 16.5~17.8℃, 年平均降水量 1 570 mm^[20]。

本次研究从鄱阳湖水系的赣江二级支流——香溪开始。其中, 香溪河、架竹河流域位于中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站区域内(115°04'13"E, 26°44'48"N, 图 1), 地属江西省泰和县。赣江是长江中游主要支流之一, 为鄱阳湖五河之

首^[21], 年径流量占鄱阳湖水系的 45.87%^[22], 以万安、新干为界, 分为上游、中游、下游三段。鄱阳湖是中国第一大淡水湖, 也是中国第二大湖, 位于江西省北部, 承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五大河, 湖区周边还有 14 条 30 km 以上的河流直流入湖。湖体通常以都昌和吴城间的松门山为界, 分为东西两湖。鄱阳湖是长江中游通江季节性湖泊^[23], 水位变化显著^[24], 年内入湖流量在 1 200~12 000 m³·s⁻¹ 间变化, 变幅达 10 倍^[25]。整体上, 鄱阳湖遵循枯(12 月~次年 3 月)-涨(4~5 月)-丰(6~9 月)-退(10~11 月)的水文节律^[26], 6 月径流量最大^[27]。

1.2 采样方法

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 19 个采样点, 其中, 鄱阳湖的东鄱湖和西鄱湖分别布设 3 个采样点; 沿赣江中下游布设 7 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)。2017 年 9 月和 2018 年 5 月共进行两次采样活动, 依据水位特征, 两次采样时鄱阳湖分别处于丰水期和枯水期。共采集到 35 个样品(枯水期鄱阳湖湖区风浪过大, 东南部 P1~P3 采样点未能采集到水样)。采样方法为人工采取河流及湖水表层 0~40 cm 的水样 100 mL 于聚乙烯塑料瓶中, 样品采集后放置于培养箱中冷藏保存, 并送至中国科学院地理科学与资源研究所进行试验分析。在香溪流域和架竹河流域出水口处均设置有 ISOC6710 水沙自动采样装置实时监测获取水位及径流量数据, 赣江流域径流量数据来自外洲水文控制站点 2016 年的观测资料。

1.3 样品分析

本实验测定的指标包括水样的电导率(COND)、电阻率(RES)、溶解性固体总量(TDS)、氧化还原电位(ORP)、酸碱度(pH)、总磷(TP)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、溶解性总氮(DTN)、总氮(TN)、总无机碳(TIC)、总有机碳(TOC)共 12 项指标。采样完成后, 将水样通过水质检测仪(美国 6PFCE 型号)检测 pH 后分为两部分, 一部分通过国家标准碱性过硫酸钾-紫外分光光度法(GB 11894-89)的消解方法处理水样, 用流动分析仪(法国 Futura 型号)测定 TN; 另一部分经 0.45 μm 有机微孔滤膜(经过 80℃ 水浴 8 h 处理)抽滤后用流动分析仪测定 DTN、NO₃⁻-N 及 NH₄⁺-N, 总有机碳分析仪(德国 varioTOC 型号)测定 TIC 和 TOC。

1.4 数据分析

1.4.1 地表径流量的计算方法

计算地表径流量的公式如下:

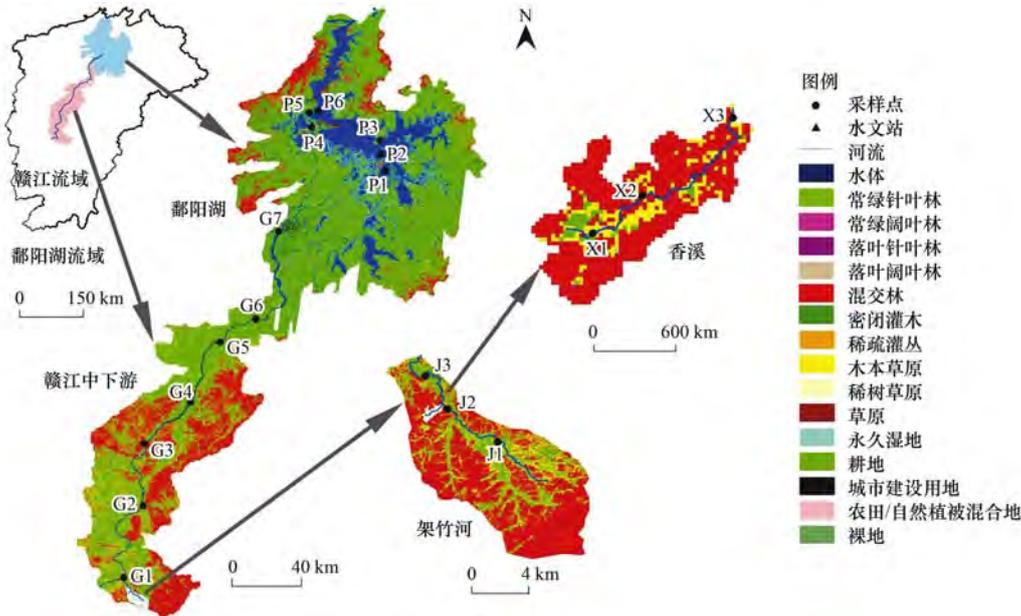


图1 鄱阳湖流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

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

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 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

1.4.2 碳氮输出负荷计算方法^[28-30]

计算碳氮输出负荷的公式如下:

$$y_j = \int_0^t c_j(t) \times q_t(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \quad (2)$$

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_j 为第 j 种污染物的排放负荷 (g); c_t 为 t 时刻径流中第 j 种污染物的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_i 为第 j 种污染物在样本 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). 流域输出负荷使用靠近出河口位置点 (X3、J3 和 G7) 的浓度计算.

2 结果与分析

2.1 C 的浓度变化特征

丰水期, 香溪流域 TC 浓度自上游至下游呈下降趋势, 架竹河流域浓度稳定, 赣江流域波动较大且无规律, 而香溪小流域 TC 浓度显著高于其余流域, 在上游达到最高值为 $30.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2). TIC 和 TOC 浓度的变化趋势与 TC 大致相同, TIC 波动较大, TOC 波动较小且稳定在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 其中 TOC 浓度在赣江中游 G3 点处达到最低值 $3.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 香溪流域的 TC 呈上升趋势, 而 TIC

先上升后下降, 即在香溪下游 TIC 较低, TOC 较高. 在枯水期, 香溪流域 TC 浓度自上游至下游呈上升趋势, 架竹河流域呈先下降后上升的趋势. 其中, 香溪小流域下游 TC 浓度显著高于其余流域, 在下游达到最高值为 $19.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; TIC 浓度的变化趋势与 TC 大致相同, TOC 浓度稳定在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.

丰水期香溪流域 C 浓度自上游至下游逐渐降低, 而枯水期趋势相反. 而在赣江流域, 丰水期各项 C 浓度指标波动趋势与枯水期趋向于一致, 均呈现 G1 → G2 点上升, G2 → G3 点下降, G3 → G5 点上升, G5 → G6 点下降, G6 → G7 点上升的趋势. 整体而言, 丰水期各项 TC 和 TIC 显著高于枯水期 ($P < 0.05$), 而 TOC 无显著差异. 其中, 丰水期 TIC、TOC 和 TC 均值为 8.71 、 4.70 和 $13.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 均大于枯水期的 TIC、TOC 和 TC 均值: 6.70 、 4.58 和 $11.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2 N 的浓度变化特征

如图 3 所示, 在丰水期, 香溪流域 TN 浓度自上游至下游呈下降趋势, 架竹河流域呈先下降后上升趋势, 赣江流域呈先上升后下降趋势; 其中, 在鄱阳湖 P1 点达到最高值为 $5.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在架竹河 J2 点达到最低值为 $1.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. NO_3^- -N 和 DTN 浓度趋势大致相当, 香溪流域 NO_3^- -N 和 DTN 浓度呈上升趋势, 架竹河流域呈下降趋势, 赣江流域呈上游上升, 中游先上升后下降, 下游先上升后下降趋势. 其中, NO_3^- -N 和 DTN 浓度在赣江下游 G6 点处达到最高值 $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在鄱阳湖 P3

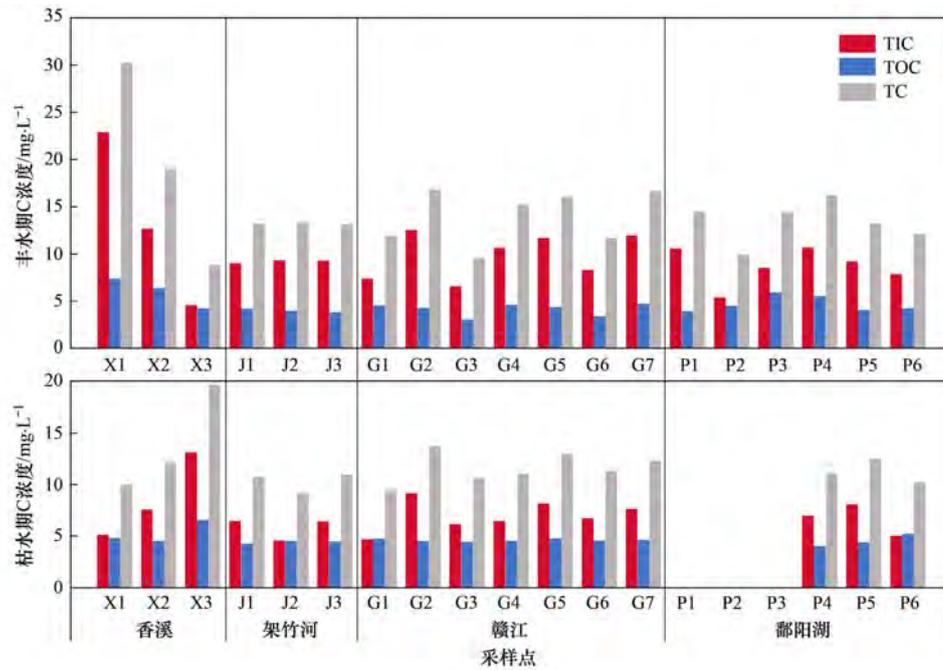


图 2 丰、枯水期各形态 C 在香溪、架竹河、赣江和鄱阳湖的浓度变化

Fig. 2 Concentration changes of various forms carbon in Xiangxi River, Jiazhu River, Ganjiang River, and Poyang Lake during the wet and dry periods

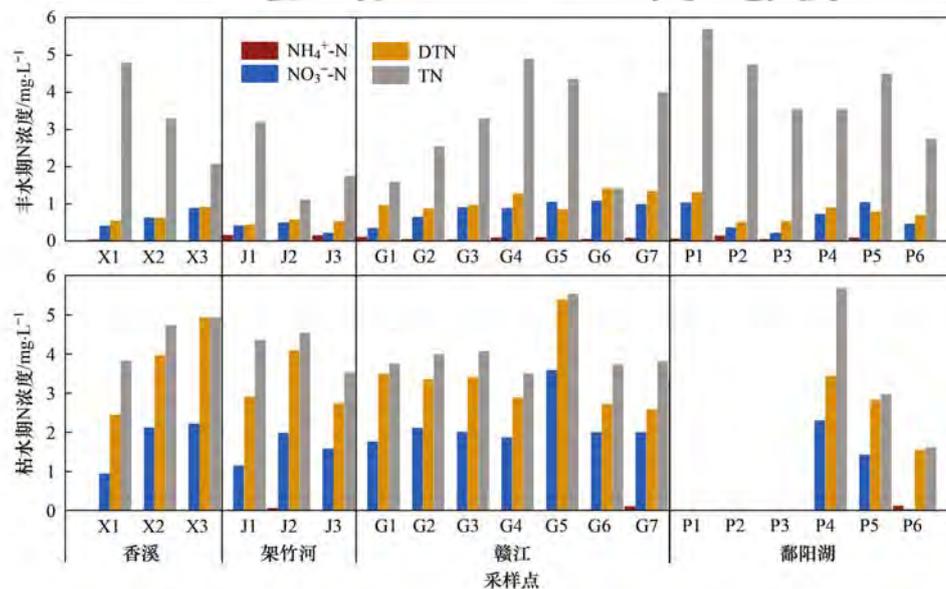


图 3 丰、枯水期各形态 N 在香溪、架竹河、赣江和鄱阳湖的浓度变化

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

点达到最低值 0.23 和 $0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在各采样点均较低, 最高值 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在 J1 点. 在枯水期, 香溪流域 TN 浓度自上游至下游呈上升趋势, 架竹河流域呈先上升后下降趋势, 赣江流域基本稳定, 在 G5 点出现较高值 $5.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在鄱阳湖 P4 点达到最高值为 $5.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 香溪流域 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DTN 浓度呈上升趋势, 架竹河流域呈先上升, 后下降趋势, 赣江流域呈上游平稳, 中游先下降后上升, 下游下降趋势; 其中, DTN 浓度在鄱

阳湖 P4 点处达到最高值 $3.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在鄱阳湖 P6 点达到最低值 $1.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在赣江 G6 点达到最高值 $5.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在鄱阳湖 P6 点达到最低值 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在各采样点均较低, 最高值 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在 P6 点. 整体而言, 丰水期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 DTN 浓度显著低于枯水期 ($P < 0.01$). 枯水期 TN 浓度并未明显增加, 而 DTN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著上升, 即丰水期 TN 主要以非溶

解态存在,而枯水期 TN 主要以 DTN 中的 NO_3^- -N形式存在,其中枯水期的 NO_3^- -N和 DTN 浓度均值为 $1.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均大于丰水期的 NO_3^- -N和 DTN 浓度均值($0.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2.3 通江流域水质参数变化特征

对于一般的地下水来说,电导率与溶解性总固体之间有 $\text{TDS}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) = \alpha \times \text{COND}(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$ 的关系^[31],鄱阳湖流域 COND、TDS 呈明显正相关关系(图4),且 $\alpha_{\text{丰水}} = 0.65$, $\alpha_{\text{枯水}} = 0.64$.经相关性分析,鄱阳湖流域水体溶液的 COND 与 TDS 之间有高

度正相关性($R = 0.999$, $P < 0.05$).整体而言,丰水期 COND 和 TDS(均值 $120 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)小于枯水期(均值 $138 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).枯水期香溪流域上游 COND 和 TDS 有所降低($68 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),中游和下游都有升高.架竹河流域枯水期和丰水期上中下游 COND 和 TDS 均呈 V 字型趋势,在枯水期有整体的上升.赣江流域丰水期自上游至下游呈上升趋势(G2 点例外),枯水期趋势仍自上游至下游升高(G2 和 G5 点例外).鄱阳湖流域西鄱湖 P4 和 P5 点升高,P6 点显著降低($66 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

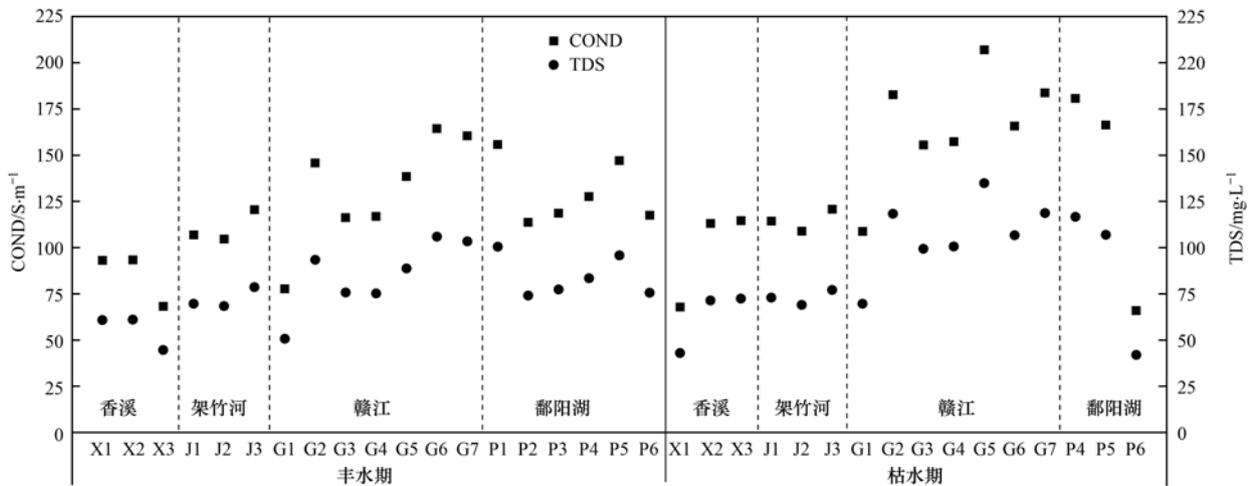


图4 丰、枯水期 COND、TDS 在香溪、架竹河、赣江和鄱阳湖的变化

Fig. 4 Changes of COND and TDS during the wet season and dry season in Xiangxi River, Jiazhu River, Ganjiang River, and Poyang Lake

鄱阳湖流域 pH、ORP 具有中等程度负相关关系($R = -0.540$, $P < 0.05$).整体而言,各流域丰水期 ORP(均值 245 mV)大于枯水期(均值 195 mV ,见图5).丰水期内架竹河、赣江、鄱阳湖流域各点之间的差异大于枯水期,丰水期架竹

河 J2 点(292 mV)较高,赣江 G1(256 mV)和 G3(255 mV)点较高,枯水期架竹河 J1 点(218 mV)较高,赣江 G2(201 mV)、G4(200 mV)点较高.香溪流域枯水期差异较大,X2 点达到最低值(170 mV).

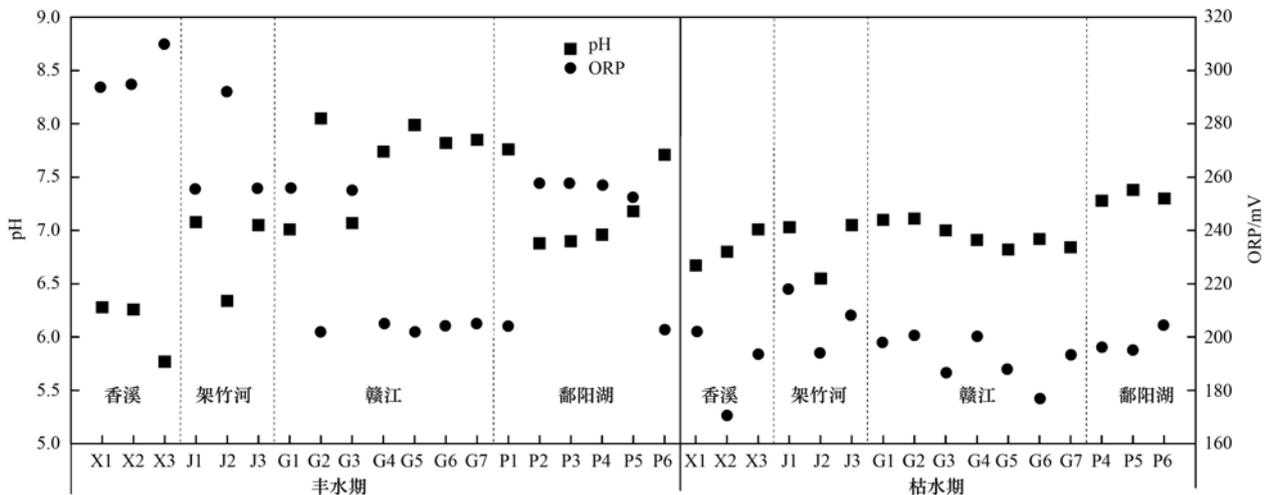


图5 丰、枯水期 pH、ORP 在香溪、架竹河、赣江和鄱阳湖的变化

Fig. 5 Changes of pH and ORP during the wet season and dry season in Xiangxi River, Jiazhu River, Ganjiang River, and Poyang Lake

3 讨论

3.1 C、N 上下游变化原因分析

陆地侵蚀来源的有机物与其他来源的向河口、近岸带水域排放的有机物相比, 数量巨大, 种类繁多^[32], 河流 C、N 浓度受沿岸土地利用方式的显著影响^[7]. 香溪流域水质变化剧烈, 丰水期 TC、TN、COND、TDS 和 pH 自上游至下游均逐渐降低, 枯水期 TC、TN、COND、TDS 和 pH 自上游至下游均逐渐升高. 其原因可能与丰水期和枯水期香溪上下游的土地利用方式的不同有关. 香溪流域上游的主要土地利用类型为湿地松林, 中游为垄田, 下游为柑橘园^[33]. 丰水期柑橘园和垄田会堆施大量农家肥导致土壤酸化, 雨水冲刷酸化的土壤进而降低了河流 pH 值. 赣江流域和鄱阳湖流域丰枯水期存在微妙的源汇转变, TIC 浓度丰、枯水期浓度变化趋势一致, 丰水期大于枯水期. 丰水期赣江、鄱阳湖 pH 值在 7.0~8.0 之间波动, 枯水期维持在 7.0 左右, 波动较小. 丰水期偏碱性的水有利于溶解空气和鄱阳湖流域地表中 C, 构成河流的 TIC, 枯水期偏中性的水有利于 N 进入赣江. 相对来说, 赣江和鄱阳湖在丰水期是“C 源”和“N 汇”, 在枯水期是“C 汇”和“N 源”.

丰水期 TN 主要以非溶解态存在, 而枯水期 TN 主要以 DTN 中的 NO_3^- -N 形式存在, 水环境氮污染以硝态氮 (NO_3^- -N) 为主. 枯水期 NO_3^- -N 浓度达到 $1.0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于前人研究中的 $0.2 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[34]. 造成这种现象的原因可能为丰水期水流速度快, 水量大, 非溶解态氮更易于悬浮在水中, 且丰水期水量大, 对 N 元素具有稀释作用; 枯水期水流速度慢, 非溶解态氮更容易沉淀于河底. 丰水期的 TN 浓度(均值为 $3.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显著低于枯水期(均值为 $4.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $P < 0.05$), 丰水期和

枯水期的 NH_4^+ -N 浓度没有显著差异, 各点 NO_3^- -N 均小于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定的 III 类水标准 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), TN 均超过规定的 III 类水标准 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 存在富营养化的现象.

水体中的电导率的大小主要由溶解在水体中的离子种类、浓度和水温等决定^[35], 电导率的大小变化在一定程度上可反映水体的富营养化程度^[6]. 有研究表明, 河流的 COND 与流量呈相反的变化趋势^[36], 这与鄱阳湖流域的研究结果一致, 其中, 赣江流域枯水期 COND 和 TDS 上升明显, 均值达到丰水期的 1.5 倍左右. 丰水期香溪流下游 X3 点低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中对于 pH 值介于 6~9 之间的规定, 其余点均符合该规定.

3.2 C、N 输出通量及对各级流域的输入贡献

鄱阳湖与长江相通, 鄱阳湖水是长江江水的主要来源之一. 长江流域总溶解氮是氮的主要存在形式^[37], 可见鄱阳湖流域与长江流域的营养盐浓度状况相似. 通过计算鄱阳湖流域丰水期、枯水期各形态 C 在各流域的年输出通量及上一级河流占下一级河流通量的百分比, 可进一步分析支流间联系(其中, 丰水期流量为 2016 年 4~9 月的总流量, 枯水期流量为 2016 年的 1~3 月和 10~12 月的总流量).

各形态 C 在各流域的年输出通量和上级河流占下级河流通量的百分比在丰水期和枯水期存在明显差异(表 1). 香溪流域每年共输出 6600 kg TC; 其中, 丰水期共输出 2300 kg , 枯水期 4300 kg , TIC、TOC 和 TC 的月输出通量及其占比均小于枯水期; 架竹河流域每年共输出 $5 \times 10^5 \text{ kg}$ TC; 其中, 丰水期共输出 $3.4 \times 10^5 \text{ kg}$, 枯水期 $1.6 \times 10^5 \text{ kg}$, TIC、TOC、TC 的月输出通量大于枯水期, 占比与枯水期相当; 赣江流域每年共输出 $1.8 \times 10^9 \text{ kg}$ TC; 其中, 丰水期共输出 $1.2 \times 10^9 \text{ kg}$, 枯水期 $6.1 \times 10^8 \text{ kg}$, TIC、TOC、TC 的月输出通量大于枯水期.

表 1 丰、枯水期各形态 C 在各流域的年输出通量和上一级河流占下一级河流通量的百分比(占比)

Table 1 Annual output flux of each form of carbon in each basin during the wet and dry periods and the percentage of the upper-level rivers in the lower-level rivers

时期	河流	TIC/kg·a ⁻¹	占比/%	TOC/kg·a ⁻¹	占比/%	TC/kg·a ⁻¹	占比/%
丰水期	香溪	1.2×10^3	0.505	1.1×10^3	1.105	2.3×10^3	0.684
	架竹河	2.4×10^5	0.028	1.0×10^5	0.030	3.4×10^5	0.028
	赣江	8.6×10^8		3.4×10^8		1.2×10^9	
枯水期	香溪	2.8×10^3	3.533	1.4×10^3	1.786	4.3×10^3	2.662
	架竹河	8.0×10^4	0.021	8.0×10^4	0.035	1.6×10^5	0.026
	赣江	3.8×10^8		2.3×10^8		6.1×10^8	

各形态 N 在各流域的年输出通量和上级河流占下级河流通量的百分比在丰水期和枯水期存在明显差异(表 2). 香溪流域每年共输出 1650 kg TN; 其中, 丰水期共输出 550 kg , 枯水期 1100 kg ,

NH_4^+ -N 输出量极少, 丰水期仅 5.8 kg , 枯水期为 0 kg , NO_3^- -N、DTN 和 TN 的输出通量均小于枯水期, 占比均大于枯水期; 架竹河流域每年共输出 $4.8 \times 10^5 \text{ kg}$ TN; 其中, 丰水期共输出 $2.9 \times 10^4 \text{ kg}$, 枯水

期 7.9×10^4 kg, TN, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、DTN 和 TN 的输出通量及其占比均小于枯水期; 赣江流域每年共输出 4.8×10^8 kg TN; 其中, 丰水期共输出 $2.9 \times$

10^8 kg, 枯水期 1.9×10^8 kg, 丰水期 NH_4^+ -N 输出通量略大于枯水期, NO_3^- -N 输出通量小于枯水期, DTN 与枯水期大致相当, TN 输出通量大于枯水期.

表 2 丰、枯水期各形态 N 在各流域的年输出通量、上一级河流占下一级河流通量的百分比(占比)

Table 2 Annual output flux of each form of nitrogen in each basin during the wet and dry periods, and the percentage of the upper-level rivers in the lower-level rivers

河流	时期	NH_4^+ -N /kg·a ⁻¹	占比/%	NO_3^- -N /kg·a ⁻¹	占比/%	DTN /kg·a ⁻¹	占比/%	TN /kg·a ⁻¹	占比/%
丰水期	香溪	5.8×10^0	0.688	2.4×10^2	1.838	2.4×10^2	1.630	5.5×10^2	1.912
	架竹河	8.4×10^2	0.013	1.3×10^4	0.018	1.5×10^4	0.015	2.9×10^4	0.010
	赣江	6.6×10^6		7.2×10^7		9.7×10^7		2.9×10^8	
枯水期	香溪	0.0×10^0	0.000	4.8×10^2	1.383	4.8×10^2	1.383	1.1×10^3	1.346
	架竹河	1.2×10^3	0.022	3.5×10^4	0.035	3.5×10^4	0.035	7.9×10^4	0.042
	赣江	5.5×10^6		9.9×10^7		9.9×10^7		1.9×10^8	

小流域(香溪)各形态 C 丰水期通量较小, 大流域(架竹河和赣江)各形态 C 丰水期通量较大(表 3), 其原因是香溪丰水期和枯水期流量相差较小, 架竹河和赣江丰水期与枯水期流量相差较大. 大小流域各形态 N 在丰水期通量多较小, 其原因是枯水期各形态 N 浓度升高的程度大于流量降低的程度. 香溪对架竹河贡献较小(TC 丰水期占 0.68%, 枯水期占 2.66%; TN 丰水期占 1.91%, 枯水期占 1.35%). 架竹河对赣江的贡献甚微, (TC 丰水期占 0.03%, 枯水期占 0.03%; TN 丰水期占 0.01%, 枯水期占 0.04%). 据已有

研究, 河流营养盐丰水期的通量明显大于其它水期, 通量与径流量在 99% 的置信水平上呈显著相关关系^[6, 31], 将鄱阳湖流域营养盐的输出通量与径流量做相关性分析, 结果表明: 各形态 C、N 通量与径流量在 99% 的置信水平上呈极显著相关关系(其中 TIC 与流量: $R = 0.978$, $P < 0.05$; TOC 与流量: $R = 0.999$, $P < 0.05$; TC 与流量: $R = 0.987$, $P < 0.05$; NH_4^+ -N 与流量: $R = 0.994$, $P < 0.05$; NO_3^- -N 与流量: $R = 0.907$, $P < 0.05$; DTN 与流量: $R = 0.827$, $P < 0.05$; TN 与流量: $R = 0.976$, $P < 0.05$).

表 3 各形态 C、N 在各流域的输出通量丰、枯水期的大小关系¹⁾

Table 3 Relationship between the output fluxes of various forms of carbon and nitrogen in each watershed during the wet and dry seasons

水质指标	TIC	TOC	TC	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	DTN	TN
香溪	<	<	<	>	<>	<>	<>
架竹河	>	≥	≥	<	<	<	<
赣江	>	>	>	>	<	=	>

1)关于通量的符号表述:“>”表示丰水期大于枯水期,“<”表示丰水期小于枯水期,“=”表示丰水期大致等于枯水期,“<>”表示丰水期通量小于枯水期,而丰水期占比(上一级河流占下一级河流通量的百分比)大于枯水期,“<<”表示丰水期通量小于枯水期,丰水期占比小于枯水期,“>>”表示丰水期通量大于枯水期,丰水期占比大于枯水期,“≥”表示丰水期大于等于枯水期

4 结论

(1) 鄱阳湖通江流域的 C、N 浓度呈明显季节变化. 鄱阳湖流域 TIC、TOC 和 TC 浓度丰水期较高, 枯水期较低; NO_3^- -N 和 DTN 浓度枯水期较高, 丰水期较低. 丰水期 TC 增加的主要原因是 TIC 增加, 丰水期 TN 主要以非溶解态存在, 而枯水期 TN 主要以 DTN 中的 NO_3^- -N 形式存在.

(2) 鄱阳湖通江流域的 C、N 输出通量呈明显季节变化. 香溪各形态 C 丰水期通量较枯水期小, 架竹河和赣江各形态 C 丰水期通量较枯水期大, 香溪、架竹河和赣江流域各形态 N 在丰水期通量大多较枯水期小, 各形态 C、N 通量与径流量在 99% 的置信水平上呈极显著正相关关系. 香溪对架竹河的

TC 贡献率在 0.5% ~ 3% 之间, 枯水期贡献率较大; TN 贡献率在 1% ~ 2% 之间, 丰水期贡献率较大. 架竹河对赣江的 TC 贡献率在 0.02% ~ 0.03% 之间, 丰水期贡献率较大, TN 贡献率在 0.01% ~ 0.05% 之间, 枯水期贡献率较大.

(3) 鄱阳湖流域水体 COND 与 TDS 间有高度正相关性, 且 $\alpha_{\text{丰水}} = 0.65$, $\alpha_{\text{枯水}} = 0.64$, pH 和 ORP 具有中等程度的负相关关系. 丰水期 COND、TDS 和 pH 小于枯水期, 丰水期 ORP 大于枯水期. 工业废水和生活污水的过度排放以及化肥和农药的使用导致了鄱阳湖 C、N 浓度和 COND 超标. 应当通过控截污工程、污水脱氮除磷等技术, 严格控制对流域水体的营养物质输入, 从而减少鄱阳湖营养负荷的输入量, 从根本上改善水体的富营养化.

参考文献:

- [1] Xie Y H, Yu D, Ren B. Effects of nitrogen and phosphorus availability on the decomposition of aquatic plants[J]. *Aquatic Botany*, 2004, **80**(1): 29-37.
- [2] Welsh D T, Bourguès S, de Wit R, *et al.* Effect of plant photosynthesis, carbon sources and ammonium availability on nitrogen fixation rates in the rhizosphere of *Zostera noltii*[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1997, **12**(3): 285-290.
- [3] 高扬, 于贵瑞. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其调控机制[J]. *地理学报*, 2018, **73**(7): 1381-1393.
Gao Y, Yu G R. Biogeochemical cycle and its hydrological coupling processes and associative controlling mechanism in a watershed[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(7): 1381-1393.
- [4] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*[M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2002.
- [5] Manzoni S, Porporato A. Common hydrologic and biogeochemical controls along the soil-stream continuum [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(8): 1355-1360.
- [6] 刘婷婷. 嘉陵江水体中碳、氮、磷季节变化及其输出[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
Liu T T. Seasonal variation and output of C, N, P in Jialing river [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [7] 高常军. 流域土地利用对苕溪水体 C、N、P 输出的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
Gao C J. Influences of watershed land use on C, N, P export in Tiaoxi streams, Zhejiang province, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [8] Aitkenhead-Peterson J A, Steele M K. Dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen concentrations and exports upstream and downstream of the Dallas-Fort Worth metropolis, Texas, USA[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2016, **67**(9): 1326-1337.
- [9] 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.
- [10] Liu J Z, Zhu A X, Duan Z. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation product using rain gauge data in Meichuan Watershed, Poyang Lake Basin, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, **3**(4): 359-367.
- [11] Ogrinc N, Markovics R, Kandu? T, *et al.* Sources and transport of carbon and nitrogen in the River Sava watershed, a major tributary of the River Danube[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(12): 3685-3698.
- [12] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. *资源科学*, 2016, **38**(8): 1585-1593.
Zhang Y, Xie Y C, Qi S S, *et al.* Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on InVEST model[J]. *Resources Science*, 2016, **38**(8): 1585-1593.
- [13] 范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 等. 三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 129-137.
Fan Z W, Hao Q J, Huang Z, *et al.* Change and influencing factors of dissolved carbon and dissolved nitrogen in water of the three gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 129-137.
- [14] Zhang C, Liu G B, Xue S, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **54**: 16-24.
- [15] Gelaw A M, Singh B R, Lal R. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **188**: 256-263.
- [16] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化[J]. *生态学报*, 2011, **31**(17): 4985-4991.
Wang K B, Shanguan Z P. Seasonal variations in leaf C, N, and P stoichiometry of typical plants in the Yangou watershed in the loess hilly gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(17): 4985-4991.
- [17] 韩琳, 李征, 曾艳, 等. 太湖流域河岸带不同土地利用下草本植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(12): 3281-3288.
Han L, Li Z, Zeng Y, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of herbaceous plant leaf and soil in riparian zone of Taihu Lake basin, East China under effects of different land use types[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **32**(12): 3281-3288.
- [18] 郑艳明, 尧波, 吴琴, 等. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征[J]. *生态学报*, 2013, **33**(20): 6488-6496.
Zheng Y M, Yao B, Wu Q, *et al.* Dynamics of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of two dominant species in a Poyang Lake wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(20): 6488-6496.
- [19] 金腊华, 李明玉, 黄报远. 鄱阳湖洪灾特征与圩区还湖减灾运用方式研究[J]. *自然灾害学报*, 2002, **11**(4): 74-77.
Jin L H, Li M Y, Huang B Y. Research on flood disaster characteristics and embankment utilization in flood detentions for diminishing disasters in Poyang Lake [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, **11**(4): 74-77.
- [20] 王苏民, 窦鸿身, 陈克造. *中国湖泊志*[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [21] 王杰, 王保畚, 罗正齐. *长江大辞典*[M]. 武汉: 武汉出版社, 1997.
- [22] 杜彦良, 周怀东, 彭文启, 等. 近 10 年流域江湖关系变化作用下鄱阳湖水动力及水质特征模拟[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1274-1284.
Du Y L, Zhou H D, Peng W Q, *et al.* Modeling the impacts of the change of river-lake relationship on the hydrodynamic and water quality revolution in Poyang Lake [J]. *Acta Scientiarum Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1274-1284.
- [23] 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(1): 1-8.
Wan R R, Yang G S, Wang X L, *et al.* Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(1): 1-8.
- [24] 刘剑宇, 张强, 孙鹏, 等. 鄱阳湖最小生态需水研究[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2014, **53**(4): 149-153.
Liu J Y, Zhang Q, Sun P, *et al.* Minimum ecological water requirements of the Poyang Lake [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, **53**(4): 149-153.
- [25] Feng L, Hu C M, Chen X L, *et al.* Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**: 80-92.
- [26] Hu Q, Feng S, Guo H, *et al.* Interactions of the Yangtze River flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **347**(1-2): 90-100.

- [27] 徐德龙, 熊明, 张晶. 鄱阳湖水文特性分析[J]. 人民长江, 2011, **32**(2): 21-22, 27.
- [28] Hao Z, Gao Y, Yang T T, *et al.* Atmospheric wet deposition of nitrogen in a subtropical watershed in China: characteristics of and impacts on surface water quality[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(9): 8489-8503.
- [29] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. 水利学报, 2009, **40**(6): 659-666.
- [30] 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.
- [31] 魏振枢. 环境水化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 195.
- [32] 高全洲, 陶贞. 河流有机碳的输出通量及性质研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(6): 1000-1002.
Gao Q Z, Tao Z. Advances in studies on transported flux and properties of riverine organic carbon [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(6): 1000-1002.
- [33] 韩宁, 郝卓, 徐亚娟, 等. 江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 534-541.
Han N, Hao Z, Xu Y J, *et al.* Nitrogen release from sediment under dry and rainy season alternation and its contribution to N export from Xiangxi watershed in Jiangxi province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 534-541.
- [34] 陈建平, 李艳, 董思宏, 等. 江西千烟洲农业生态系统水环境氮污染研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, **23**(6): 51-54.
Chen J P, Li Y, Dong S H, *et al.* Study on N pollution of water environment of agricultural ecosystem in Qianyanzhou, Jiangxi Province[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2012, **23**(6): 51-54.
- [35] 李秋华, 林秋奇, 韩博平. 广东大中型水库电导率分布特征及其受 N、P 营养盐的影响[J]. 生态环境, 2005, **14**(1): 16-20.
Li Q H, Lin Q Q, Han B P. Conductivity distribution of water supply reservoirs in Guangdong province [J]. *Ecology and Environment*, 2005, **14**(1): 16-20.
- [36] 范宁江, 刘玉虹, 安树青, 等. 电导率作为流域水文变化指标初探[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(11): 2127-2131.
Fan N J, Liu Y H, An S Q, *et al.* Electrical conductivity as an indicator of hydrological characteristics in catchment scale [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(11): 2127-2131.
- [37] 沈志良. 长江氮的输送通量[J]. 水科学进展, 2004, **15**(6): 752-759.
Shen Z L. Nitrogen transport fluxes in the Yangtze River [J]. *Advances in Water Science*, 2004, **15**(6): 752-759.



CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)