

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

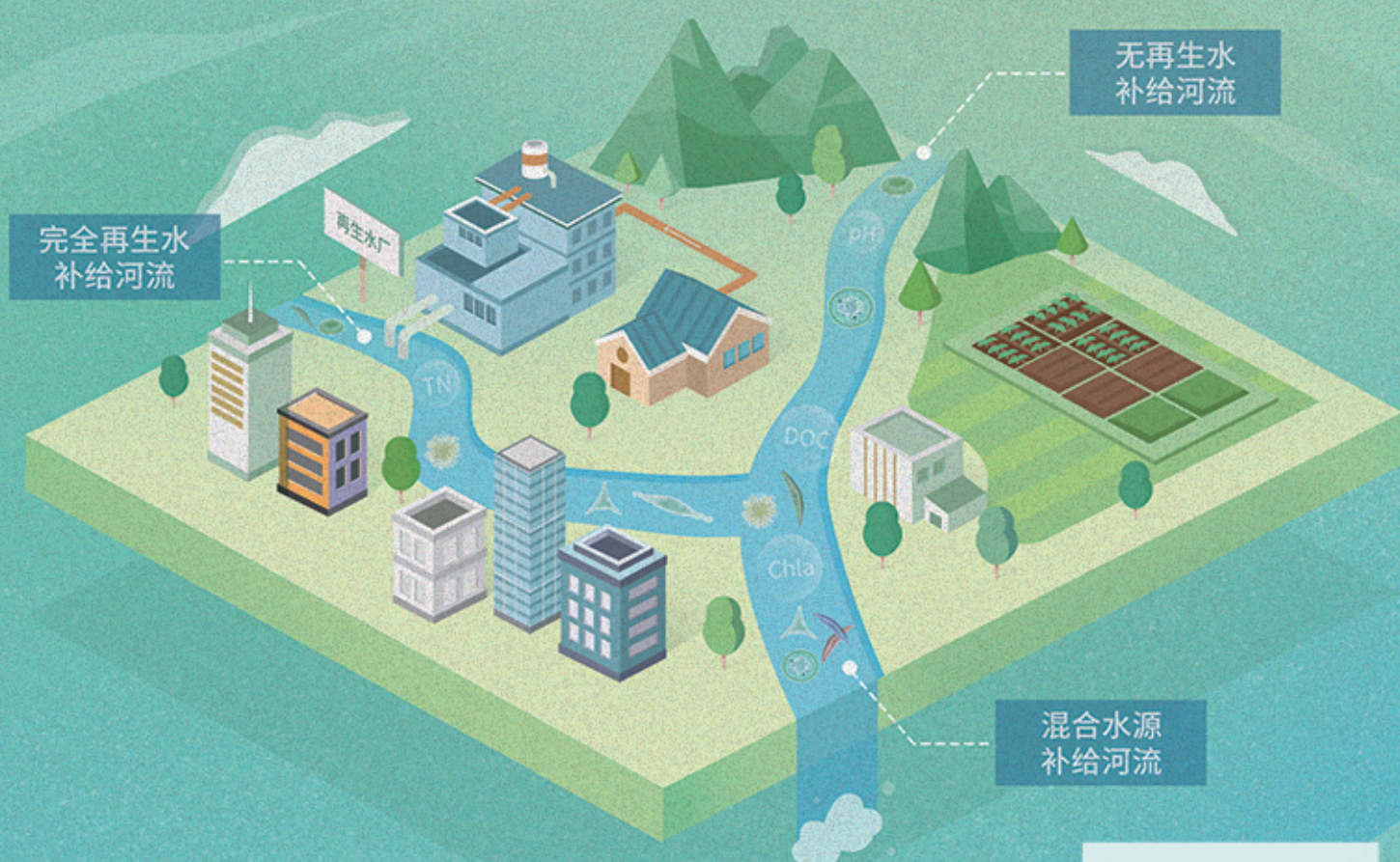
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析

郭树芳¹, 陈安强¹, 习斌², 居学海², 黄宏坤², 刘建香¹, 毛妍婷¹, 郭云周¹, 雷宝坤^{1*}

(1. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650201; 2. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125)

摘要: 有效控制氮磷输入是水质持续改善的关键因素。为识别澜沧江水系水体中氮磷浓度、氮污染物来源及其空间分布特征, 在澜沧江流域开展了干流和支流水样的采集, 分析流域不同区域水体氮磷浓度, 并利用氮氧同位素技术结合稳定同位素 SIAR 模型, 解析了水系不同区域氮素来源及其贡献率。结果表明: ① 澜沧江水系氮浓度偏低, $\rho(\text{TN})$ 分布在 $0.34 \sim 4.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 从上游至下游有升高趋势; $\rho(\text{TP})$ 分布在 $0.11 \sim 2.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。② 澜沧江水系的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值分别分布在 $-5\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 和 $-16\text{‰} \sim 16\text{‰}$ 之间, 主要落在降雨及肥料和土壤氮范围内, 主要存在硝化作用。③ 澜沧江干流中土壤氮和化学肥料的贡献率分别为 $37.67\% \sim 42.41\%$ 和 $34.22\% \sim 38.56\%$, 粪便和生活污水占 $15.01\% \sim 20.79\%$, 大气沉降仅占 $4.49\% \sim 7.32\%$ 。中游支流和下游支流中土壤氮的贡献明显高于化学肥料, 土壤氮的贡献率达 $53.97\% \sim 61.57\%$, 化学肥料占 $33.37\% \sim 38.30\%$, 而大气沉降、粪便和生活污水的贡献率较低。研究分析了澜沧江水系上、中和下游干流和支流的氮素来源, 为该区域的水质管理和污染源治理提供了依据。

关键词: 澜沧江流域; NO_3^- -N; 氮同位素; 氧同位素; 来源解析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5491-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202112182

Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River

GUO Shu-fang¹, CHEN An-qiang¹, XI Bin², JU Xue-hai², HUANG Hong-kun², LIU Jian-xiang¹, MAO Yan-ting¹, GUO Yun-zhou¹, LEI Bao-kun^{1*}

(1. Agricultural Environment and Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650201, China; 2. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: The effective control of nitrogen (N) and phosphorus (P) input is a key factor in the improvement of water quality. In order to identify the concentrations of N and P and the sources of N pollutants and their spatial distribution characteristics in the Lancang River, water samples of Lancang mainstream and major tributaries were collected, and the N sources and contribution rates were analyzed by using nitrogen and oxygen isotope technology combined with a stable isotope SIAR model. The results showed that: ① the N concentrations in the Lancang River were low, and the TN concentrations ranged from 0.34 to $4.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and increased from upstream to downstream; the TP concentrations ranged from 0.11 to $2.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. ② $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ in the Lancang River were in the range of $-5\text{‰} \sim 5\text{‰}$ and $-16\text{‰} \sim 16\text{‰}$, respectively, and mainly fell in the range of rainfall, fertilizer, and soil N. The nitrification process occurred mainly in the Lancang River. ③ The contribution rates of soil N and chemical fertilizer in the mainstream of the Lancang River ranged from $37.67\% \sim 42.41\%$ and $34.22\% \sim 38.56\%$, respectively, manure and sewage accounted for $15.01\% \sim 20.79\%$, and atmospheric deposition accounted for only $4.49\% \sim 7.32\%$. The contribution rates of soil N of $53.97\% \sim 61.57\%$ in tributaries in the middle and downstream reaches were higher than that of chemical fertilizer ($33.37\% \sim 38.30\%$), whereas the contributions of atmospheric deposition and manure and sewage were low. This study analyzed the N source of the Lancang mainstream and tributaries in the upper, middle, and lower reaches, providing a theoretical basis for water quality management and pollution source control in the Lancang River basin.

Key words: Lancang River Basin; NO_3^- -N; nitrogen isotope; oxygen isotope; source apportionment

人为活动的增加,如化石燃料燃烧、工业废水、生活污水和人畜粪便的排放和化肥施用等,导致全球范围内活性氮排放和大气氮沉降迅速增加而流失到空气、水和土地中,造成一系列环境问题^[1,2]。化肥为全球粮食增产做出了约 50% 的贡献,然而氮肥过量投入会导致产量不再增加或有所下降,且氮肥在土壤中残留量或损失到环境中的量会显著增加^[3,4]。有研究显示,由于过量施用化肥,1984 ~ 2014 年间我国农田氮素盈余量增加了 1.3 倍左右,约为 730 万 t^[5],有研究表明河流氮素输入一般与土壤盈余氮素呈线性相关关系^[6~9]。可见,化肥过量投入增加了土壤氮磷的流失风险,进而污染大气环境和周边水体。人类活动显著增加了活性氮向大气的

排放,大气中的氮通过沉降也能进入水体^[10]。因此,识别水体的氮磷输入源是河流水质改善的关键因素。

水体中氮负荷过大可能会导致富营养化,其中硝酸盐是导致水质退化的一种主要形式。氮氧同位素是识别水体环境中氮来源的重要工具,可减少氮

收稿日期: 2021-12-19; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 云南农业农村绿色发展保障技术体系专项 (53000021000000016943); 第二次全国污染源普查项目 (2110399); 云南省重大科技专项计划项目 (202102AE090011); 国家自然科学基金项目 (31960635)

作者简介: 郭树芳 (1986 ~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农业面源污染防控和水环境保护, E-mail: guosf12b@163.com

* 通信作者, E-mail: bklei@163.com

同位素之间具有的重叠性和不确定性^[11,12]. 目前, 研究者利用 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素技术, 结合已有污染源调查数据及不同源的同位素特征值, 识别不同时期河流或湖泊中硝态氮的来源和贡献^[13,14]. 如, 硝化作用和城市污水是长江中硝酸盐的主要来源^[15]. 土壤有机氮的硝化作用是雅鲁藏布江硝酸盐的主要来源, 且根据河流流域的位置、地形、地貌和气候, 显示出不同的硝酸盐来源特征^[16]. 对于澜沧江流域的研究集中在干流或下游水库对沉积物营养盐的研究^[17~19], 如 Guo 等^[20] 利用 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素对澜沧江的干流进行了不同形态氮浓度和来源分析. 然而对于整个澜沧江水系干流和支流的氮磷浓度及硝酸盐来源的研究还鲜见报道.

澜沧江是世界第九长河、亚洲唯一的一河跨六国的国际河流, 有“东方多瑙河”之称, 作为亚洲的水塔之一而备受关注^[21]. 流域气候类型多样、生物多样性丰富, 土地利用以林地为基础, 森林覆盖率达 68.2%, 是云南省橡胶、甘蔗、茶、松脂和紫胶等经济作物的主要生产区^[22]. 因此, 本研究通过对澜沧江水系(云南境内)干流和支流水体氮磷浓度和水质的测定, 分析硝酸盐中氮的来源及其空间分布特征, 并结合 SIAR 模型, 识别硝酸盐污染源的贡献率, 以期对澜沧江水系不同区域的氮磷污染控制和水环境管理提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

澜沧江在云南省境内长 1 247 km, 集水面积 8.86 万 km^2 ($\text{N } 98^\circ 20' \sim 102^\circ 19'$, $\text{E } 21^\circ 08' \sim 29^\circ 15'$), 海拔范围为 515 ~ 4 240 m, 覆盖迪庆、怒江、大理、保山、临沧、普洱和西双版纳这 7 个州(市)的 34 个县(市、区). 澜沧江流域地势呈北高南低趋势, 自北向南呈条带状, 上、下游较宽阔, 中游则狭窄, 覆盖寒温带、温带、暖温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带和北热带这 7 个气候带. 功果桥以上的流域定位为上游, 功果桥与景临桥之间的流域定位为中游, 景临桥以下的流域定为下游^[23].

1.2 样品采样和分析方法

2020 年 9 月 ~ 11 月期间从上游至下游采集了澜沧江水系(云南境内)干流及其主要支流的水样(图 1). 样品储存于 500 mL 聚乙烯瓶中, 立即送回实验室冷冻保存, 在 1 个月内完成样品检测. 测定水样: pH 值、总氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总磷(TP)、电导率(EC)和化学需氧量(COD). TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法, TP 采用钼酸铵分光光度法, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采

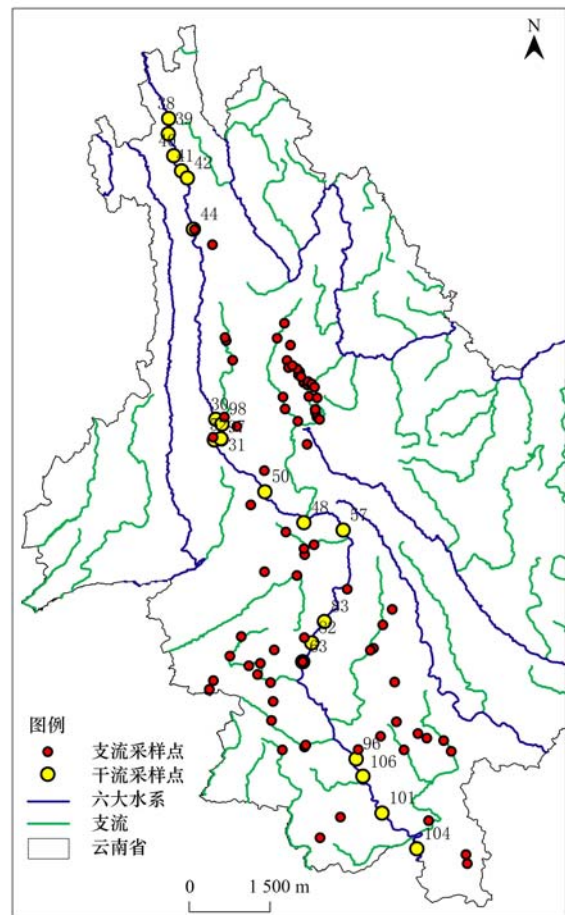


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study area

用连续流动分析仪测定, 玻璃电极法测定 pH, 电导率仪测定 EC 值, COD 仪测定 COD 值. 另外, 一部分水样经 0.22 μm 滤膜过滤后, 冷藏送于实验室进行 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析. 在实验室水样净化学预处理后, 利用 NO_2^- 还原, 经叠氮化反应将硝酸盐转化为 N_2O 气体^[24], 用 Gas-Bench-稳定同位素质谱仪 (MAT 253, Thermo) 联机测试 N_2O 气体的氮氧同位素值. 同位素测定均在国家海洋局第三海洋研究所进行, $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分析精度为 $\pm 0.3\text{‰}$.

$\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}}$ 值以空气中氮气作为参考标准, $\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}}$ 值按以下公式计算:

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}} = \left[\frac{R(^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{sample}})}{R(^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{Air}})} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}}$ 为样品的氮稳定同位素比值相对参考物质空气的稳定氮同位素比值的千分差; $R(^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{sample}})$ 为样品中氮同位素丰度比值 $R(^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{Air}})$ 为空气中氮气的氮同位素丰度比值.

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值以 SMOW 作为参考标准, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值按以下公式计算:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = \left[\frac{R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{sample}})}{R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{SMOW}})} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

式中, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为样品的氧稳定同位素比值相对参考物质标准平均海洋水的稳定氧同位素比值的千分差; $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{sample}})$ 为样品中氧同位素丰度比值; $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{SMOW}})$ 为标准平均海水中的氧同位素丰度比值。

1.3 SIAR 同位素模型

SIAR 同位素模型是由 Parnell 等^[25]开发的稳定性同位素混合模型,用于定量分析不同来源的贡献比例。主要来源包括大气沉降、化学肥料、土壤氮和粪便与生活污水,不同来源的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值来源于文献[26,27]。模型如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^k P_k (S_{jk} + C_{jk}) + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (2)$$

$$C_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (4)$$

式中, X_{ij} 为混合物 i 的 j 同位素的值,其中 $i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, J$; S_{jk} 为第 k 个端元的 j 同位素值 ($k=1, 2, \dots, K$); μ_{jk} 为平均值, ω_{jk}^2 为标准偏差; P_k 为端元 k 的贡献比例; C_{jk} 为端元 k 在 j 同位素上的分馏因子; λ_{jk} 为分馏因子的平均值, τ_{jk}^2 为标准偏差; ε_{ij} 为剩余误差,平均值为 0, σ^2 为标准偏差。

1.4 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 18.5 进行数据分析、处理和绘图,运用 SPSS 19 单因素方差分析进行显著性检验 ($P < 0.05$), Duncan 法进行均值比较。

2 结果与分析

2.1 澜沧江干流水质分析

从图 2(a) 可以看出,澜沧江干流 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 分布在 $0.04 \sim 2.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,上游、中游和下游的浓度均值分别为 0.28 、 0.73 和 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 90.5% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N}) \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 分布在 $0.10 \sim 1.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,上游、中游和下游的浓度均值分别为 0.10 、 0.22 和 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 90.5% 的采样点 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N}) \leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\rho(\text{TN})$ 分布在 $0.34 \sim 4.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,上游、中游和下游的浓度均值分别为 0.43 、 1.32 和 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 61.9% 的采样点 $\rho(\text{TN}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\rho(\text{TP})$ 分布在 $0.11 \sim 2.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,上游、中游和下游的浓度均值分别为 0.40 、 0.33 和 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅 23.8% 的采样点 $\rho(\text{TP}) \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。澜沧江 pH 值在 $7.22 \sim 8.06$ 之间,从上游至下游,呈现先升高后降低的趋势[图 2(b)]。电导率在 104

$\sim 335 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间,在上游较高且变化平稳,中下游降低且变化幅度大。

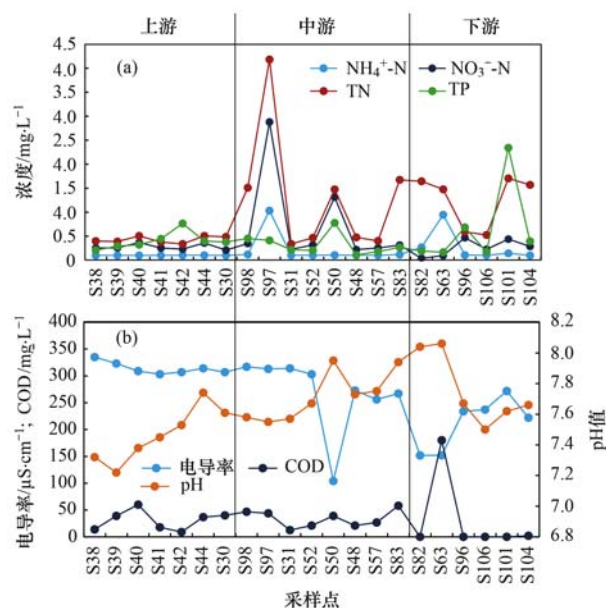


图2 澜沧江干流水质变化

Fig. 2 Variations in water quality along mainstream of the Lancang River

2.2 澜沧江支流水质分析

从图 3(a) 可以看出,澜沧江支流 $\rho(\text{TN})$ 分布在 $0.20 \sim 4.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 50% 的点 $\rho(\text{TN}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 75% 的点 $\rho(\text{TN}) \leq 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中上游最低为 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中游比下游略高; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在上游最低, 中游最高; 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度从上游到下游呈增长趋势。与 TN 相反, $\rho(\text{TP})$ 分布在 $0.13 \sim 1.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 50% 的点 $\rho(\text{TP}) \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 70% 的点 $\rho(\text{TP}) \leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在上游最高, 中游最低。支流水体电导率值分布在 $55 \sim 492 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 从上游到下游呈下降趋势, 且低于干流水体电导率 ($P < 0.05$) [图 3(b)]; 而 pH 值分布在 $7.42 \sim 8.22$ 之间, 呈不断升高趋势, 且高于干流水体 pH ($P < 0.05$) [图 3(c)]。

2.3 水体硝酸盐来源及贡献

澜沧江水系的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值分布相对集中(图 4), 分别分布在 $-5\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 和 $-16\text{‰} \sim 16\text{‰}$ 之间, 主要落在降雨与肥料中的氨氮和土壤氮范围内, 说明这两个源是澜沧江水系 NO_3^- 的主要来源。另外中游支流和下游支流的个别点还受到粪便和生活污水的影响, 主要分布在临沧市的云县、耿马县和普洱市思茅区。

结合各来源氮氧同位素组成和 SIAR 模型, 可知澜沧江水系中大气沉降、化学肥料、土壤氮、粪便和生活污水这 4 个源的贡献率分别分布 $0.83\% \sim 7.56\%$ 、 $33.37\% \sim 39.87\%$ 、 $37.67\% \sim 61.57\%$ 和

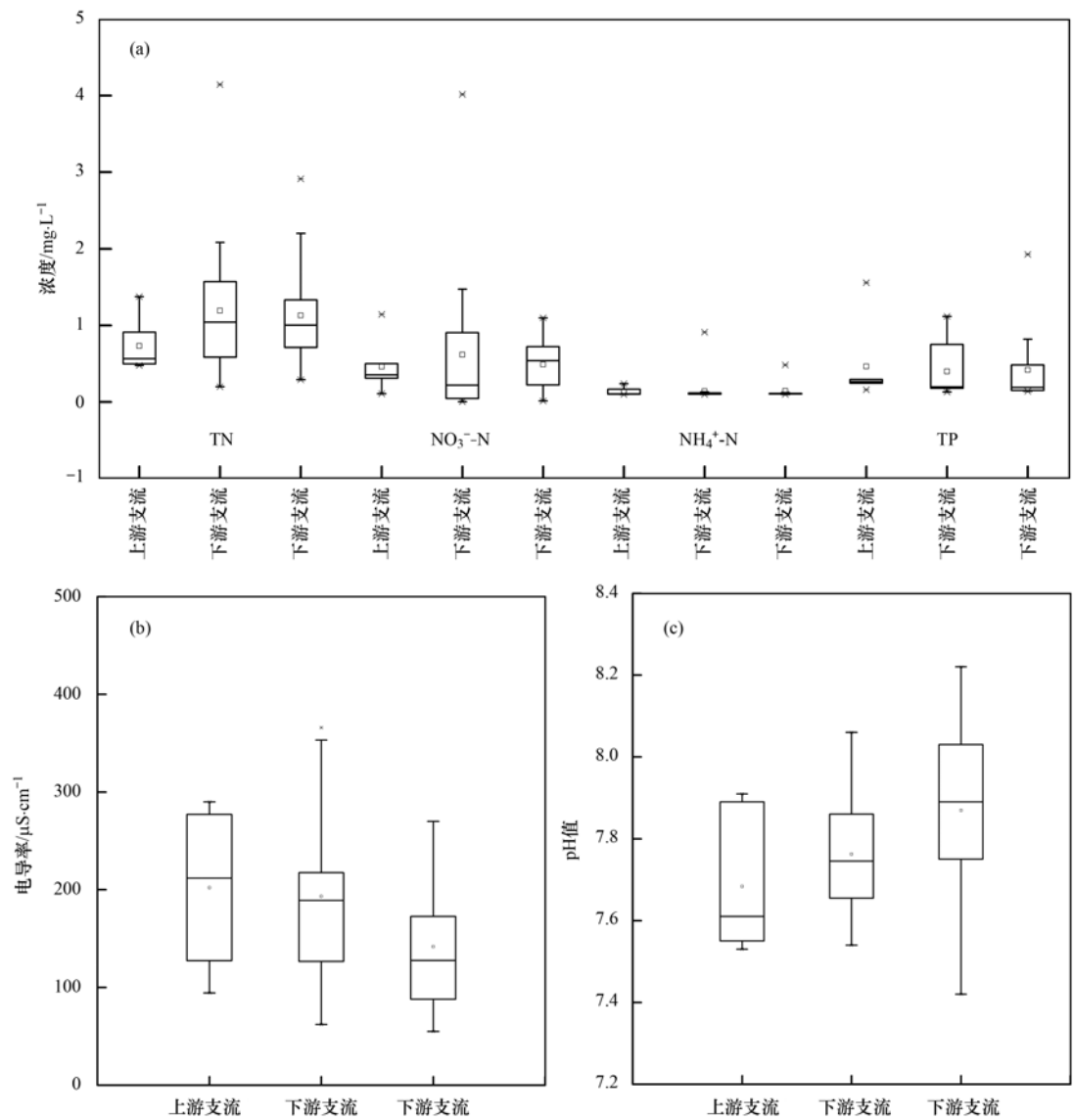
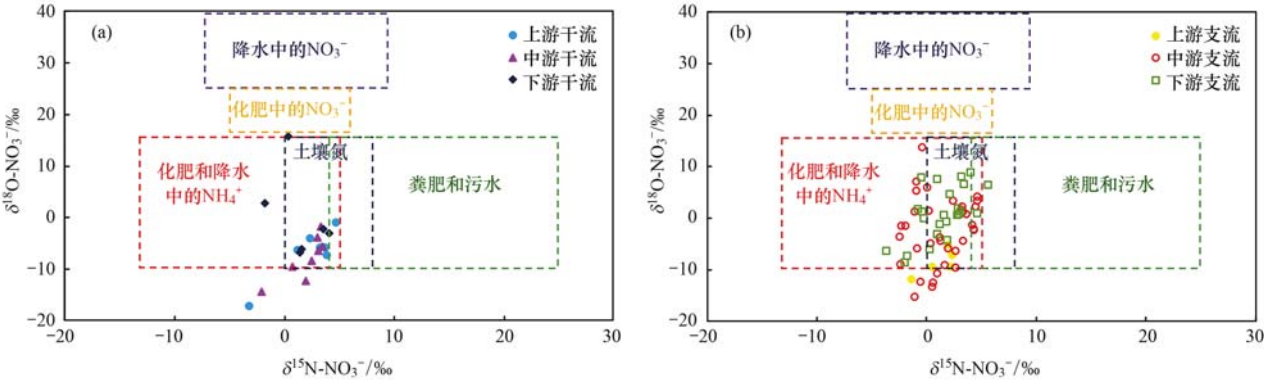


图 3 澜沧江支流水质变化

Fig. 3 Variations in water quality in major tributaries of the Lancang River



不同硝酸盐来源的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 范围参考自文献[28,29]

图 4 澜沧江水系硝酸盐中 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值及范围

Fig. 4 Isotopic compositions of $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ in the Lancang River

4.23%~20.79% [图 5(a)]. 其中, 澜沧江干流及上游支流中土壤 N 和化学肥料的贡献相差不大, 干流中土壤 N 和化学肥料的贡献率分别为 37.67%~

42.41% 和 34.22%~38.56%, 粪便和生活污水占 15.01%~20.79%, 大气沉降仅占 4.49%~7.32%. 中游支流和下游支流中土壤 N 的贡献明显高于化

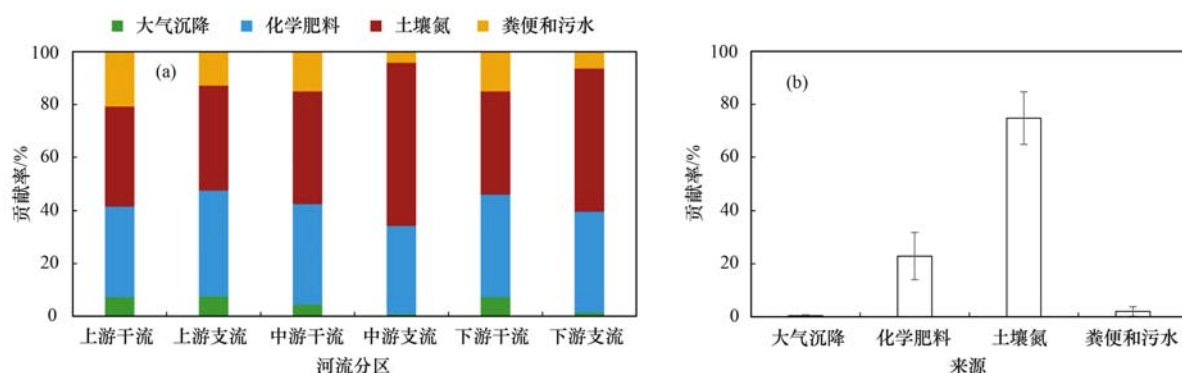


图5 澜沧江水系不同来源对硝酸盐的贡献

Fig. 5 Contributions of different nitrate source in the Lancang River

学肥料,土壤氮的贡献率为 53.97%~61.57%,化学肥料占 33.37%~38.30%,而大气沉降、粪便和生活污水的贡献率之和低于 8%。从整个河流水系来看[图 5(b)],土壤 N 和化学肥料的贡献率分别为 74.7% 和 22.9%。

3 讨论

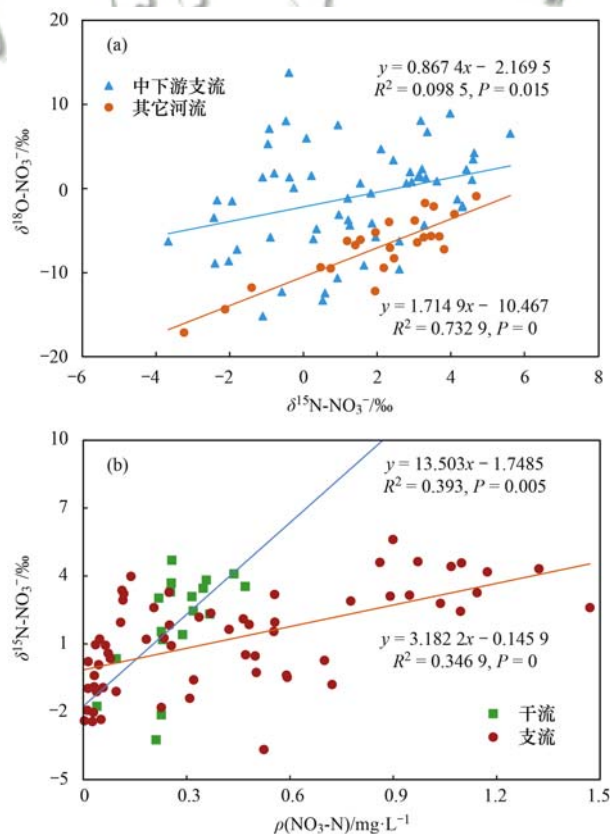
3.1 澜沧江水系水质

从澜沧江干流 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分布来看,总体处于 I~III 类水(GB 3838-2002),且浓度低于支流(II~IV 类水),上游干流 $\rho(\text{TN})$ 分布在 $0.34 \sim 0.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,中游和下游水质逐渐变差,特别是大理市、洱源县、思茅区、临翔区和景洪市等人类活动较强的区域。澜沧江水系无机氮污染以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 污染为主,且上游硝酸盐浓度整体偏低($0.108 \sim 1.143 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),是由于上游为高山峡谷区,且人口分布较少,人为活动产生的生产及生活污水排放较少^[30]。而上游支流受附近农田的影响,及城市污水处理厂效率低的原因^[31],TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均高于上游干流,因此支流的污染治理和防控是上游治理的重点。从土地利用类型来看,下游耕地面积分布广泛^[20],中游森林砍伐和大规模农业土地开发,引起了土壤侵蚀和农田氮磷养分的流失,从而增加了河流 TN 浓度。

澜沧江干流和支流 $\rho(\text{TP})$ 总体偏高,均高于 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 65% 的采样点为 III~IV 类水,约 30% 的采样点 $\rho(\text{TP})$ 高于 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为劣 V 类水。上游干流水 TP 浓度较低,主要分布在 $0.21 \sim 0.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,中游 $\rho(\text{TP})$ 有所降低,但澜沧县、思茅区、景谷县和云县等部分区域浓度在 $0.7 \sim 0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,下游西双版纳州最高,高达 $0.8 \sim 2.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Xu 等^[32] 利用 SWAT 模型分析获取澜沧江流域的 $\rho(\text{TP})$ 为 $0.335 \sim 2.778 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与本研究的 $\rho(\text{TP})$ 范围 $0.11 \sim 2.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 一致。有研究认为,澜沧江受河流沿岸人类活动的影响,并呈现从上

游至下游增加的趋势,这与人口数量和生活污水处理厂处理能力增加有关^[20]。

在澜沧江水系中 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 值呈显著或极显著正相关关系,且 $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $0 \sim 5.24$ 之间,其中比值在 $1.3 \sim 2.1$ 之间的仅 4 个点[图 6(a)]。当水体中 $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}$ 在 $1.3 \sim 2.1$ 之间时,表明有反硝化作用产生^[28,33]。澜沧江水系 $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}$ 基本均在这一范围之外,说明河水发生反硝化作用的可能性较小。另外,没有出现 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度降低伴随 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加这一反硝化作用的线性关系[图 6(b)]。澜沧江干流溶解氧在 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上^[20],COD 均值在 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上(图 2),可见河流溶解

图6 澜沧江水系 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的关系Fig. 6 Relationships between $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$, and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the Lancang River

氧充足,不利于反硝化作用的发生^[34]. 硝化作用产生的 NO_3^- 的 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值范围通常在 $\pm 10\text{‰}$ 之间^[35],本研究区域大部分水样的 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值都在此范围内,说明澜沧江水体存在强烈的硝化作用. 硝化作用也是雅鲁藏布江中下游水体最主要的氮转化过程^[36]. 因此,河流通过反硝化降低硝态氮浓度作用较小.

3.2 不同区域硝酸盐来源分析

本研究 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 分布在 $-5\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 和 $-16\text{‰} \sim 16\text{‰}$ 之间,比长江流域和珠江流域地表水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的特征范围 $1.6\text{‰} \sim 12.9\text{‰}$ 和 $0.73\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$ 偏低^[37],主要分布在土壤 N 和铵态氮肥的范围内,而珠江流域地表水主要分布在土壤有机质硝化和生活污水及人畜粪便,长江流域中上游为人畜粪便和生活污水.

地表水中硝酸盐主要受地表径流、土地利用类型和人类生产活动等的影响^[37]. 有研究表明,化肥氮输入和遗留氮是长江氮污染的关键^[38]. 土壤 N 也是澜沧江水系 NO_3^- 的主要来源,但在空间上有所差异. 本研究中云南境内澜沧江水系 NO_3^- 来源中,土壤 N 和化学肥料的贡献率分别为 74.7% 和 22.9%,其中干流中土壤 N 和化学肥料的贡献率分别为 37.67%~42.41% 和 34.22%~38.56%,粪便和生活污水占 15.01%~20.79%,大气沉降仅占 4.49%~7.32% (图 5). 可能是由于澜沧江流域高海拔和恶劣环境,人口密度低,导致河流受生活污水的影响较低. 除化肥外,本研究与唐咏春^[30] 的研究结果一致,对澜沧江干流中硝酸盐结果分析也表明,上游自然河道段内土壤矿化为主而生活污水来源较少,且硝酸盐浓度偏低,因为上游断面内水体流速较快,对岸边土壤冲刷较大,同时上游段人口分布较少,人为活动产生的生产及生活污水排放较少. Guo 等^[20] 利用 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素对澜沧江的干流进行了不同形态氮浓度和来源分析,认为硝态氮的主要来源为土壤有机氮矿化和城市污水,分别占 36%~63% (51%) 和 13%~47% (33%), NO_3^- 肥和大气沉降分别占 3%~18% (12%) 和 1%~6% (4%). 这可能与下游断面内人口较多,受到人类活动影响较大,生活生产污水排放加剧有关^[19,30]. 另外,从云南境内澜沧江水体来源看,丰水期主要受大气降水影响,下游受一定人类活动的影响^[19]. 可见,防止上游土壤冲刷、控制中下游人类活动影响是河流水环境保护的重点.

本研究中化学肥料是仅次于土壤氮的主要来源,特别是中下游支流中贡献率达 38%,这与中下游农田面积增加,且很多支流一侧的山坡开垦种植

农作物有关,农田与河流紧密相连,在雨季农田土壤随地表径进入河流进而影响河流水质,而受人类活动影响小. 水体 NO_3^- 的来源与土地利用密切相关^[39],有研究表明雅鲁藏布江中下游降雨及肥料中 NH_4^+ 成为水体 NO_3^- 最主要的来源,与耕地分布广泛有关^[36]. 澜沧江流域主要被森林和耕地两种土地利用类型覆盖^[20],草地和森林面积最大,分别占 43% 和 41.2%,农业占 8.8%^[32],中下游支流沿岸山坡开垦和耕地土壤的侵蚀作用,导致土壤 N 对河流 NO_3^- 的贡献增加. 除下游干流外,土壤 N 对水系 NO_3^- 来源逐渐增加,这可能是澜沧江流域在上游和中游上部,尤其是横断山地区多呈深 V 型峡谷,而在下游地区则年降水量相当丰富,这些都造成流域潜在土壤侵蚀量普遍较高,且下游降雨侵蚀量远高于中上游^[40],这与本研究的结果一致. 合理地增加植被覆盖度是防止土壤侵蚀的重要措施.

与 N 来源一致, Xu 等^[32] 利用 SWAT 模型分析认为澜沧江流域水系 TP 主要受土壤风化侵蚀的影响,且在流域出口土壤风化侵蚀对河流 TP 的贡献达到最高,占 82%,其次是动物饲养场与农户占 10%,农业种植和施肥、工业和生活污水均占 4%. Zhang 等^[41] 基于社会经济数据估算总磷负荷,认为自然土壤侵蚀占澜沧江流域 TP 负荷的 69%,其次是农业生产和施肥,其中农业对云龙和永平县 TP 负荷的贡献较大,分别为 42% 和 48%,且 TP 负荷的空间分布于降雨强度高度相关.

4 结论

(1) 澜沧江水系 $\rho(\text{TN})$ 分布在 $0.34 \sim 4.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,从上游至下游有升高趋势; $\rho(\text{TP})$ 分布在 $0.11 \sim 2.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,中游低,下游出口升高.

(2) 澜沧江水系的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值分别分布在 $-5\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 和 $-16\text{‰} \sim 16\text{‰}$ 之间,土壤 N 和降雨及肥料是澜沧江水系 NO_3^- 的主要来源,硝化作用是最主要的氮转化过程.

(3) 澜沧江水系中大气沉降、化学肥料、土壤 N、粪便和生活污水这 4 个源的贡献率分别分布在 $0.83\% \sim 7.56\%$ 、 $33.37\% \sim 39.87\%$ 、 $37.67\% \sim 61.57\%$ 和 $4.23\% \sim 20.79\%$. 上游土壤冲刷、中下游农田氮污染防控和人类活动影响控制是澜沧江水系水质防控的重点.

参考文献:

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892.

- [2] Gao Y, Zhou F, Ciais P, *et al.* Human activities aggravate nitrogen-deposition pollution to inland water over China [J]. *National Science Review*, 2020, **7**(2): 430-440.
- [3] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(4): 783-795.
- Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(4): 783-795.
- [4] Zhang W F, Dou Z X, He P, *et al.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(21): 8375-8380.
- [5] He W T, Jiang R, He P, *et al.* Estimating soil nitrogen balance at regional scale in China's croplands from 1984 to 2014 [J]. *Agricultural Systems*, 2018, **167**: 125-135.
- [6] Dupas R, Delmas M, Dorioz J M, *et al.* Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 396-407.
- [7] Hong B H, Swaney D P, Howarth R W. Estimating net anthropogenic nitrogen inputs to U. S. Watersheds: comparison of methodologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(10): 5199-5207.
- [8] Hong B H, Swaney D P, McCrackin M, *et al.* Advances in NANI and NAPI accounting for the baltic drainage basin: spatial and temporal trends and relationships to watershed TN and TP fluxes[J]. *Biogeochemistry*, 2017, **133**(3): 245-261.
- [9] Lian H S, Lei Q L, Zhang X Y, *et al.* Effects of anthropogenic activities on long-term changes of nitrogen budget in a plain river network region: a case study in the Taihu Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 1212-1220.
- [10] Duce R A, Laroche J, Altieri K, *et al.* Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 893-897.
- [11] Durka W, Schulze E D, Gebauer G, *et al.* Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from ^{15}N and ^{18}O measurements[J]. *Nature*, 1994, **372**(6508): 765-767.
- [12] 陈自祥, 刘后起, 刘广, 等. 淡水水体中氮污染源的识别——利用硝酸根中氮和氧同位素组成[J]. *环境化学*, 2012, **31**(12): 1855-1864.
- Chen Z X, Liu H Q, Liu G, *et al.* Tracing nitrogen sources and cycle in freshwater system using nitrogen and oxygen isotopic values in nitrate[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(12): 1855-1864.
- [13] Zhi J H, Ding A Z, Zhang S R. Nitrate sources and nitrogen biogeochemical processes in the Feng River in West China inferred from the nitrogen and oxygen dual isotope measurements of nitrate [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(18): 8243-8251.
- [14] Ding J T, Xi B D, Gao R T, *et al.* Identifying diffused nitrate sources in a stream in an agricultural field using a dual isotopic approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **484**: 10-18.
- [15] Li S L, Liu C Q, Li J, *et al.* Assessment of the sources of nitrate in the Changjiang river, China using a nitrogen and oxygen isotopic approach [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(5): 1573-1578.
- [16] Hu M M, Wang Y C, Du P C, *et al.* Tracing the sources of nitrate in the rivers and lakes of the southern areas of the Tibetan Plateau using dual nitrate isotopes [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 132-140.
- [17] 望雪, 程豹, 杨正健, 等. 澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2126-2134.
- Wang X, Chen B, Yang Z J, *et al.* Differences in diffusive fluxes of nutrients from sediment between the natural river areas and reservoirs in the Lancang River basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2126-2134.
- [18] 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 等. 澜沧江流域水体悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 空间差异及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4964-4971.
- Tang Y C, Xu P, Yang Z J, *et al.* Spatial difference and causes analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of suspended particulate matter in the Lancang River basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4964-4971.
- [19] 徐飘, 唐咏春, 张思思, 等. 基于氢氧稳定同位素的澜沧江流域水体来源差异分析[J]. *中国农村水利水电*, 2019, (2): 44-50.
- Xu P, Tang Y C, Zhang S S, *et al.* An analysis of different water source in Lancang River basin based on hydrogen-oxygen stable isotope[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (2): 44-50.
- [20] Guo X J, Tang Y C, Xu Y, *et al.* Using stable nitrogen and oxygen isotopes to identify nitrate sources in the Lancang River, upper Mekong [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **274**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111197.
- [21] Zhong R D, Zhao T T G, He Y H, *et al.* Hydropower change of the water tower of Asia in 21st century: a case of the Lancang River hydropower base, upper Mekong[J]. *Energy*, 2019, **179**: 685-696.
- [22] 李梁, 代文琼, 周睿, 等. 澜沧江流域云南段发展休闲农业的 SWOT 分析[J]. *现代农业科技*, 2015, (2): 292-293.
- Li L, Dai W Q, Zhou R, *et al.* SWOT analysis on development of leisure agriculture at Lancang River basin in Yunnan [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015, (2): 292-293.
- [23] 中老缅泰上湄公河航运联合考察团. 中老缅泰上湄公河航运联合考察报告[M]. 昆明: 云南省新闻出版局, 1993.
- Upper Mekong Associated Survey Team of China, Laos, Myanmar and Thailand. Report on an investigation of water way transportation along the upper Mekong river of China, Laos, Myanmar and Thailand [M]. Kunming: Press and Publication Administration of Yunnan Province, 1993.
- [24] 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 等. 太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1076-1084.
- Li Y L, Yang Z R, Yin X J, *et al.* Identification of nitrate sources and the fate of nitrate in downstream areas: a case study in the Taizi River basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1076-1084.
- [25] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, *et al.* Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation[J]. *PLoS One*, 2010, **5**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0009672.
- [26] Ji X L, Xie R T, Hao Y, *et al.* Quantitative identification of nitrate pollution sources and uncertainty analysis based on dual isotope approach in an agricultural watershed[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 586-594.
- [27] Wang Y J, Peng J F, Cao X F, *et al.* Isotopic and chemical evidence for nitrate sources and transformation processes in a plateau lake basin in Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134856.
- [28] Xue D M, Botte J, De Baets B, *et al.* Present limitations and

- future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater[J]. *Water Research*, 2009, **43**(5): 1159-1170.
- [29] Kendall C, Elliott E M, Wankel S D. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems[A]. In: Michener R, Lajtha K (Eds.). *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* (2nd ed.) [M]. Malden: Blackwell Pub., 2007.
- [30] 唐咏春. 梯级水库建设对澜沧江水体典型氮素来源影响研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
- Tang Y C. Sources of nitrogen pollution under the background of cascade reservoir construction in Lancang River basin [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [31] 赵祖军, 李妍丽. 澜沧江上游云南江段污染现状及防治对策[J]. *环境科学导刊*, 2013, **32**(5): 68-70.
- Zhao Z J, Li Y L. Current pollution situation and pollution control in Yunnan section of upper Lancang River [J]. *Environmental Science Survey*, 2013, **32**(5): 68-70.
- [32] Xu B, Li Y, Han F, *et al.* The transborder flux of phosphorus in the Lancang-Mekong River Basin: magnitude, patterns and impacts from the cascade hydropower dams in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **590**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125201.
- [33] Yue F J, Liu C Q, Li S L, *et al.* Analysis of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ to identify nitrate sources and transformations in Songhua River, Northeast China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 329-339.
- [34] 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 等. 氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2039-2047.
- Jin Z F, Zhang W L, Zheng Q, *et al.* Contribution of nitrogen sources in water sources by combining nitrogen and oxygen isotopes and SIAR[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2039-2047.
- [35] Yue F J, Li S L, Liu C Q, *et al.* Tracing nitrate sources with dual isotopes and long term monitoring of nitrogen species in the Yellow River, China[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-08756-7.
- [36] 孙文青, 陆光华, 薛晨旺. 雅鲁藏布江中下游含氮化合物的分布特征及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(14): 63-68.
- Sun W Q, Lu G H, Xue C W. Distribution characteristics and source analysis of nitrogenous compounds in the Middle and Lower Reaches of the Yarlung Zangbo River of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(14): 63-68.
- [37] 张鑫, 张妍, 毕直磊, 等. 中国地表水硝酸盐分布及其来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1594-1606.
- Zhang X, Zhang Y, Bi Z L, *et al.* Distribution and source analysis of nitrate in surface waters of China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1594-1606.
- [38] 姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江. 1980~2015年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5777-5785.
- Yao M Y, Hu M P, Chen D J. Dynamic of net anthropogenic nitrogen inputs and riverine nitrogen export in the Yangtze River basin in 1980-2015 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5777-5785.
- [39] 金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 等. 基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1696-1705.
- Jin Z F, Hu J, Wu A J, *et al.* Identify the nitrate sources in different land use areas based on multiple isotopes [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1696-1705.
- [40] 陈龙, 谢高地, 裴厦, 等. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(8): 2249-2256.
- Chen L, Xie G D, Pei X, *et al.* Ecosystem's soil conservation function and its spatial distribution in Lancang River Basin, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(8): 2249-2256.
- [41] Zhang B Y, Ding W, Xu B, *et al.* Spatial characteristics of total phosphorus loads from different sources in the Lancang River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **722**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137863.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)