

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对PM_{2.5}浓度贡献 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)

北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)

郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)

菏泽市冬季PM_{2.5}中二元羧酸类SOA的昼夜变化特征 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)

嘉兴市2015年人为源VOCs排放清单 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)

上海某石化园区周边区域VOCs污染特征及健康风险 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)

SBR工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)

巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)

蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能菌群的影响 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)

澜沧江流域水体悬浮颗粒物¹⁵N空间差异及成因分析 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)

潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)

典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)

城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)

不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 葛德, 张守红 (5015)

四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)

厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)

光助-二茂铁/H₂O₂非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)

基于同位素技术的短程硝化过程N₂O产生途径 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)

基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)

厌氧/好氧SPNDPR系统实现低C/N城市污水同步脱氮除磷的优化运行 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)

污水处理厂SNAD工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)

盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)

中试ANAMMOX-ASBR处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)

碳氮比对颗粒污泥CANON反应器脱氮性能和N₂O释放的冲击影响 付昆明, 姜姍, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)

重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)

韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布 刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)

有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)

纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的α-HCH 姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)

株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)

生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)

颗粒有机质对水稻稻吸收及转运的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

施肥对向日葵吸收积累Cd的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

不同水稻品种对重金属的积累特性 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄久如 (5198)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)

三峡库区典型河流水-气界面CO₂通量日变化观测及其影响因素分析 罗佳宸, 李思悦 (5217)

富营养化湖区CH₄排放特征及其影响因素 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)

短期放牧对半干旱草地生态系统CO₂和N₂O排放的影响 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)

臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 冯兆忠, 袁相洋 (5257)

地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)

污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)

《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

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

唐咏春^{1,2}, 徐飘¹, 杨正健^{1*}, 张思思¹, 刘德富¹, 纪道斌²

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068; 2. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

摘要: 梯级水电建设对澜沧江流域生源物质迁移转化及其生态环境的影响目前受到国内外学者的广泛关注, 本文通过使用稳定同位素技术, 分析了澜沧江流域悬浮颗粒物氮同位素的空间分布差异及其成因. 结果表明, 澜沧江上游自然河道水体溶解无机氮 (DIN) 质量浓度变化范围为 $0.28 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 下游水库段 DIN 质量浓度显著增高, 变化范围为 $0.39 \sim 1.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 上游自然河道段悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 $4.52\text{‰} \sim 6.72\text{‰}$, 下游水库段明显增重其变化范围为 $2.3\text{‰} \sim 11.8\text{‰}$. 利用 Isosource 软件对悬浮颗粒物来源进行分析, 结果表明澜沧江流域内工业及生活污水为悬浮物颗粒物氮素的主要贡献源, 占比约为 42.43%; 土壤有机质、大气沉降、农业化肥的贡献率分别为 22.38%、18.16% 和 17.03%; 在该流域内上游自然河道段受工业及生活污水、土壤有机质以及大气沉降共同影响, 下游水库段则主要受工业及生活污水的影响. 同时小湾、漫湾、大朝山这 3 个库区内存在藻类吸收同化作用而使得悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 变轻的现象.

关键词: 同位素示踪; 悬浮颗粒物; 影响因素; 澜沧江; 来源贡献

中图分类号: X143; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4964-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201804065

Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin

TANG Yong-chun^{1,2}, XU Piao¹, YANG Zheng-jian^{1*}, ZHANG Si-si¹, LIU De-fu¹, JI Dao-bin²

(1. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, College of Resources and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The influence of cascade hydropower construction on the migration and transformation of raw material and ecological problems in the Lancang River Basin is of concern to scholars domestically and internationally. Based on stable isotope technology, this study analyzed the spatial distribution of nitrogen in the Lancang River Basin and explained the cause of this distribution. The results showed that the range of dissolved inorganic nitrogen (DIN) was $0.28\text{--}0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and that of DIN in the downstream area of the Lancang River was $0.39\text{--}1.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The range of suspended particulate matter $\delta^{15}\text{N}$ in the upstream area of this river was $4.52\text{‰}\text{--}6.72\text{‰}$, and that in the downstream reservoir section was heavier than that in the upstream reservoir, which varied between 2.3‰ and 11.8‰ . This study used Isosource to analyze the source of suspended particulate matter. The results showed that industrial wastewater and sewage, soil organic matter, atmospheric sedimentation, and agrochemicals are the main sources of suspended particulate matter, and their respective total contribution rates are 42.43%, 22.38%, 18.16%, and 17.03%. At the same time, the $\delta^{15}\text{N}$ of suspended particulate matter in Xiaowan, Manwan, and Dachaosan dams downstream of the Lancang River were influenced by algal assimilation, it leads to a reduction in the number of $\delta^{15}\text{N}$ of suspended particles.

Key words: isotope tracer; suspended particulate matter; influence factor; Lancang River; source contribution

澜沧江梯级水电建设对流域生态环境的影响备受国内外学者的关注, 目前在流域自然环境特征^[1,2]、库区累积效应^[3]、水环境特征^[4]、流域生物植被^[5,6]以及生态经济^[7-9]等方面已取得了一些研究成果. 但是, 随着澜沧江流域的深度开发, 尤其是苗尾、小湾、糯扎渡等大库的建成, 流域内出现了水质下降、水生生物多样性减少和泥沙淤积等水环境污染问题^[10-12]. 目前关于澜沧江流域氮等营养盐的研究多局限于对其质量浓度的分析^[4,13]. 这样通过传统的土地利用率和水化学特征对污染源进行分析的方法存在很大的模糊性及不确定性, 为了

解澜沧江流域生态环境现状, 分析并定量流域内不同来源物质对流域内悬浮颗粒物的影响程度, 本文拟采用氮稳定同位素技术对澜沧江流域内悬浮颗粒物中氮稳定同位素的空间分布差异进行进一步研究.

通常情况下, 悬浮颗粒物中稳定氮同位素组成

收稿日期: 2018-04-09; 修订日期: 2018-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(91647207, 51509086); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005-02)

作者简介: 唐咏春(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水利, E-mail: 995748639@qq.com

* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

的变化可以示踪氮的来源^[14~17], 判断氮的生物地球化学过程^[18,19], 还可以作为流域富营养化程度的指示参数^[20]. 因此, 利用悬浮颗粒有机物的 $\delta^{15}\text{N}$ 方法来研究流域体系中氮的迁移、转化等环境生物地球化学过程, 并揭示其环境行为, 具有重要的科学意义和现实意义. 国内对于氮同位素的研究从 20 世纪 90 年代开始, 虽然较国外起步晚, 但对鄱阳湖地区以及长江河口等地的碳氮稳定同位素均已有较深入的研究. 例如卢风云等^[21]和唐艳凌等^[22]的研究中已经可以通过悬浮颗粒物的碳氮稳定同位素值精确地计算其悬浮颗粒物中主要来源物质的贡献率.

本研究于 2017 年 6 月对澜沧江流域进行了实地考察, 通过对澜沧江干流水体悬浮颗粒物氮同位素的测定以及各硝氮、氨氮、氧化亚氮及叶绿素 a 等指标的质量浓度测定, 分析了 6 月澜沧江水体悬浮颗粒物中氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)分布特征及其变化原因, 讨论了悬浮颗粒物中氮稳定同位素的沿程变化原因及水库建设对氮稳定同位素值的影响, 通过对澜沧江流域悬浮颗粒物的同位素分布的初步认知, 以及在传统营养盐分析的基础上进一步辨识沿程主要氮素来源和其变化影响因素, 以期为之后有重点、有针对性地控制流域非点源污染, 保证水源地供水水质提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点设置

澜沧江是湄公河上游在中国境内河段的名称, 是中国西南地区的大河之一. 澜沧江发源于青海省玉树藏族自治州的杂多县吉富山, 流域位于东经 $94^\circ \sim 107^\circ$ 、北纬 $10^\circ \sim 34^\circ$ 之间, 河长 2 161.1 km, 在我国境内流域面积为 16.74 万 km^2 , 出境处多年平均流量约为 $2\,350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 天然落差约为 4 583 m. 流域覆盖寒带、寒温带、温带、暖温带、亚热带、热带这 6 种气候带, 它在气候、水文、地理、生态学等方面都具有重要的科学研究价值. 为方便研究分析, 本文以澜沧江流域沿程第一座坝(苗尾坝)为界限, 其上游段为自然河道段, 苗尾及其以下游为水库段(图 1).

1.2 样品采集与测试方法

1.2.1 样品采集与处理

根据澜沧江水文地质状况和流域分布情况, 选取了具有代表性的表层水采样地点, 使样品尽可能地覆盖整个流域. 每个采样断面使用采水器进行水

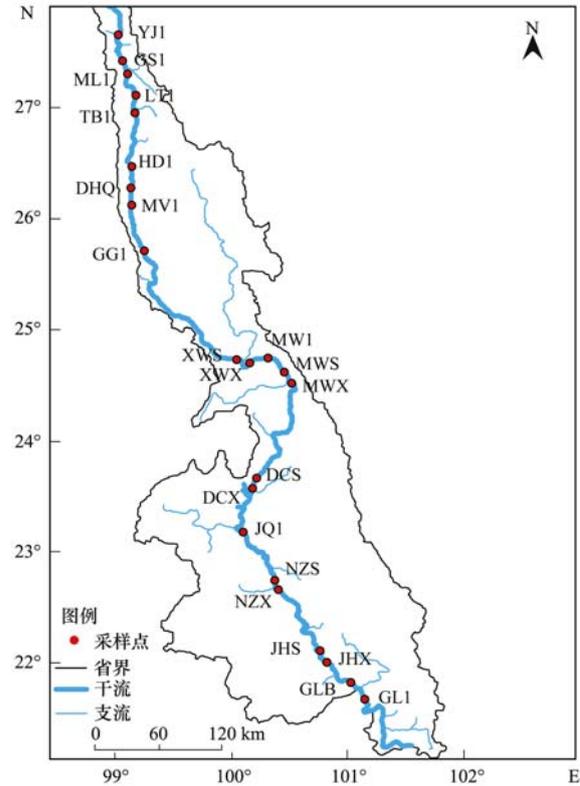


图 1 澜沧江流域监测断面分布示意

Fig. 1 Distribution map of monitoring section in the Lancang River

样采集, 采样时采集距离表层 0.5 m 左右的水样, 同时, 根据不同断面悬浮物质量浓度不同而视需要采集 1 ~ 5 L 左右水样. 悬浮物质量浓度越高取的水样越少. 同时采集距离表层 0.5 m 左右的水样贮存于 2 个洁净的 350 mL 聚乙烯瓶中. 对采集的水样一瓶加酸至 $\text{pH} < 2$, 用于室内实验室进行水化学实验分析.

1.2.2 同位素数据处理

使用预先处理过的 WhatmanGF/FGF-F 玻璃纤维滤膜($0.47 \mu\text{m}$, 预先在马弗炉 500°C 下燃烧 4 h 以除去无机物, 直至滤膜恒质量)收集水体表层悬浮颗粒物, 过滤后的悬浮颗粒物连滤膜一起用锡箔纸包好并放入冰箱于 -20°C 下冷冻避光保存. 回到实验室后将滤膜放置于 55°C 烘箱内烘干, 烘干后研磨过筛(100 目), 用 1.5 mL 离心管收集保存.

颗粒物碳、氮含量及同位素组成通过元素分析仪-同位素比值质谱仪联机进行测量. 颗粒物样品经元素分析仪的氧化炉(温度为 950°C)、还原炉(温度为 650°C)形成 CO_2 或 N_2 , 通过色谱柱分离纯化后, 送入同位素比值质谱仪进行测定. 颗粒物同位素组成以 $\delta(\text{‰})$ 值表示, 计算公式如式(1):

$$\delta(\text{‰}) = \frac{(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}})}{R_{\text{standard}}} \times 1\,000 \quad (1)$$

式中, $\delta(\text{‰})$ 表示所测定样品的同位素比值, R_{sample} 指的是样品中重同位素与轻同位素的比值, R_{standard} 指的是标准样品中重同位素与轻同位素的比值。

样品测量过程中, 为了检验仪器的稳定性与测值的准确性, 在碳、氮同位素测量过程中, 每间隔 15 份样品插入一份 USGS40 标准物质 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -26.39‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 为 -4.2‰) 和一份 USGS41a 标准物质 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 34.59‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 为 47.6‰) 进行同步测量。在氮同位素测量过程中, 标准物质的同步测量可监控仪器状态及所测数据的可信度, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 测定的相对标准偏差值均小于 $\pm 0.5\text{‰}$ 。

1.2.3 环境因子数据处理

叶绿素 a、水温这两个指标均用 HydrolabDS5 多参仪(美国)现场测定, 每 1 m 为 1 层。每个断面取 0 ~ 3 m 数据的平均值为该断面数据。

水质监测项目指标包括: 硝氮、氨氮、亚硝氮其测量方法参考文献[23]测定。

1.3 各来源贡献率计算方法

通常情况下, 稳定碳、氮同位素在特定物质中的组成是确定的, 而且不会随着污染物质的迁移转化而发生较明显的变化。因而可以采用多源线性质量混合模型对不同来源物质的贡献率进行计算。本文则采用 IsoSource 软件对流域内悬浮颗粒物来源进行计算, IsoSource 软件多应用于食物网、植物水分等方面的研究^[24-26]。该软件以多源线性混合模型(质量守恒模型)为基础, 用以估算各种来源对悬浮颗粒物的贡献率。其原理是将悬浮颗粒物来源(假设有 4 种来源)中的氮同位素数值输入, 构建质量守恒模型, 如式(2)和(3)所示:

$$\delta_M = f_A \delta_A + f_B \delta_B + f_C \delta_C + f_D \delta_D \quad (2)$$

$$1 = f_A + f_B + f_C + f_D \quad (3)$$

式中, f_A 、 f_B 、 f_C 、 f_D 分别表示各来源的贡献率; δ_A 、 δ_B 、 δ_C 、 δ_D 分别为各来源物质的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。

2 结果与分析

2.1 悬浮颗粒物碳、氮稳定同位素空间分布特征

6 月澜沧江流域 $\delta^{13}\text{C}$ 变化规律如图 2(a) 所示, $\delta^{13}\text{C}$ 波动范围为 $-28.81\text{‰} \sim -22.71\text{‰}$, 平均值为 -25.78‰ , 沿程 $\delta^{13}\text{C}$ 无明显变化规律且波动较大, 上游自然河道段内 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-27.74\text{‰} \sim -23.3\text{‰}$ 间, 平均值为 -24.91‰ , 下游水库段内 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-28.37\text{‰} \sim -23.22\text{‰}$ 间, 平均值为 -26.31‰ , 较自然河道段轻。具体表现为从 ML1 ~ DHQ 段存在逐渐变轻的趋势, MV1 ~ MWX 段 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现逐渐变

重的趋势但沿程存在较大波动, 而从 DCS ~ GLB 段 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现变轻的趋势。总体而言澜沧江流域悬浮颗粒物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在一个重→轻→重→轻的变化趋势。

澜沧江流域悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 沿程变化特征如图 2(b) 所示。 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化范围在 $2.3\text{‰} \sim 11.8\text{‰}$ 之间, 平均值为 6.54‰ , 沿程总体呈现变重趋势, 其中上游自然河道段内 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 $2.90\text{‰} \sim 7.65\text{‰}$ 波动, 平均值为 6.20‰ ; 下游水库段内 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 $2.3\text{‰} \sim 11.8\text{‰}$ 平均值为 7.76‰ , 较自然河道段内更重且波动更大, 具体表现为 ML1 ~ HD1 区间内 $\delta^{15}\text{N}$ 值无明显变化; DHQ ~ XWS 区间呈现降低趋势; 而从 XWX ~ GLB 区间内除 MWS、DCS 这 2 个点位存在 $\delta^{15}\text{N}$ 值突然降低的情况外呈现沿程增大的趋势。总体上澜沧江 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化趋势为重→轻→重。

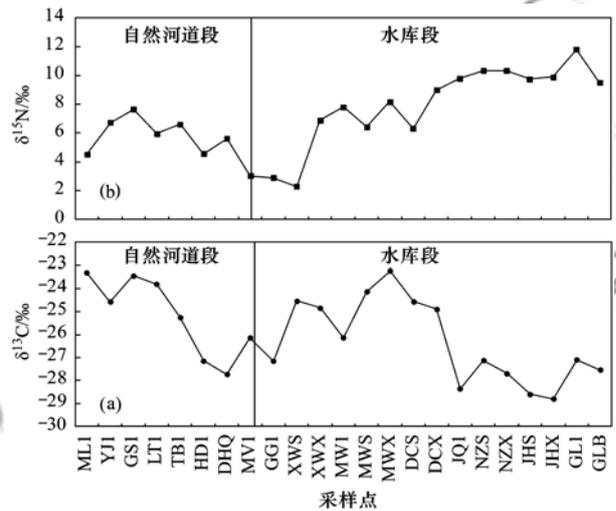


图 2 6 月澜沧江流域碳氮同位素的沿程分布

Fig. 2 Distribution of carbon and nitrogen isotopes along the Lancang River in June

2.2 环境因子空间分布特征

6 月调查期间澜沧江干流表层水体温度波动较大, 如图 3(b) 所示, 沿程水温波动范围在 $12.08 \sim 31.68\text{℃}$ 之间, 平均值为 18.12℃ , 从上游至下游呈现逐渐增大的趋势; 上下游水温相差较大, 上游自然河道段平均水温为 15.21℃ , 而下游水库段的水温较高, 平均值为 19.65℃ , 最大值出现在下游 GL1 达到 31.68℃ ; 与温度变化相反, 水体中的 pH 变化如图 3(a) 所示, 呈现从上游至下游逐渐降低, 平均为 8.17 , 全流域水体呈弱碱性, 上游自然河道段与水库段的 pH 值相差较大, 上游自然河道段内平均 pH 值为 9.64 、而下游水库段内 pH 为 7.92 。

由图 3(c) 可发现澜沧江流域叶绿素 a 沿程无明显变化规律, 其质量浓度在 $0 \sim 8.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 平均值为 $0.79 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 上游自然河道段内叶绿素 a 的质量浓度较低在 $0.1 \sim 1.04 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 平均质量浓度为 $0.63 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 各断面之间无明显差异; 下游水库段叶绿素 a 质量浓度在 $0 \sim 8.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动, 平均质量浓度为 $0.985 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 较自然河道段质量浓度高且波动较大. 水库段内变化主要发生在小湾、漫湾以及大朝山这 3 个坝的坝上坝下, 具体表现为坝上具有较大叶绿素 a 质量浓度, 而到坝下叶绿素 a 质量浓度陡降.

如图 4 所示, 该季节长江干流表层水体中各形态氮营养盐的分布呈现从上游至下游质量浓度逐渐增大的趋势. 流域内 NO_3^- 质量浓度在 $0.21 \sim 0.95 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 平均值为 $0.34 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中澜沧江上游 NO_3^- 平均质量浓度为 $0.31 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 质量浓度在 $0.1 \sim 0.465 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 波动, 沿程无明显变化, 至下游水库段质量浓度迅速升高, 变化范围在 $0.08 \sim 0.52 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间, 平均质量浓度为 $0.39 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 波动较自然河道段大且沿程质量浓度总体呈现增大趋势. NO_2^- 的质量浓度远低于 NO_3^- , 平均质量浓度为 $0.004 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 变化趋势与 NO_3^- 一致, 表现为上游自然河道段质量浓度较水库段低且波动较小; NH_4^+ 质量浓度相对 NO_2^- 较高, 平均为 $0.21 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 $0.10 \sim 0.52 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 沿程总体呈增大趋势, 上游自然河道段较下游水库段质量浓度低且波动小; 水体中的 DIN 变化趋势与各溶解态氮的变化趋势相似, 其变化主要受到 NO_3^- 质量

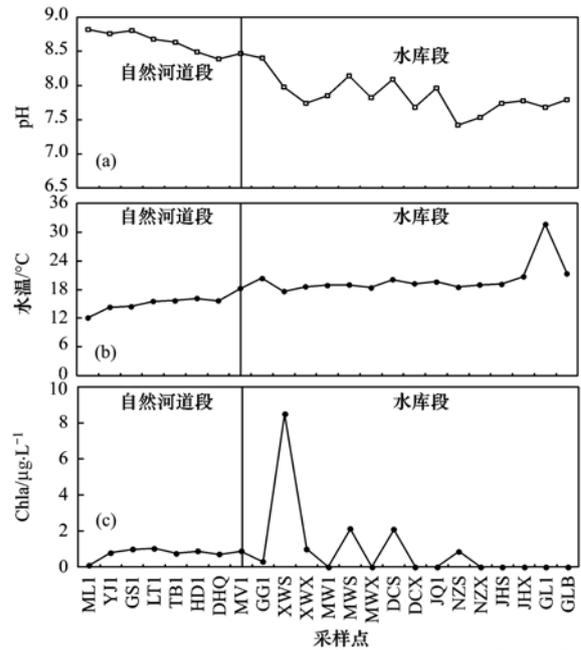


图 3 澜沧江流域 pH、水温及叶绿素 a 的沿程分布

Fig. 3 Distribution of pH, water temperature, and chlorophyll a along the Lancang River

浓度的影响, 沿程 DIN 质量浓度在 $0.28 \sim 1.15 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动, 平均质量浓度为 $0.53 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中上游自然河道段 DIN 平均质量浓度为 $0.44 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 下游水库段 DIN 质量浓度达到 $0.63 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.3 沿程各来源贡献率分布规律

陆地水体中悬浮颗粒物中氮的主要来源包含大气沉降、农业化肥、土壤有机颗粒氮、工业及生活污水等^[27,28], 故本文澜沧江干流水体中悬浮颗粒物中氮其悬浮颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围见表 1^[29-31].

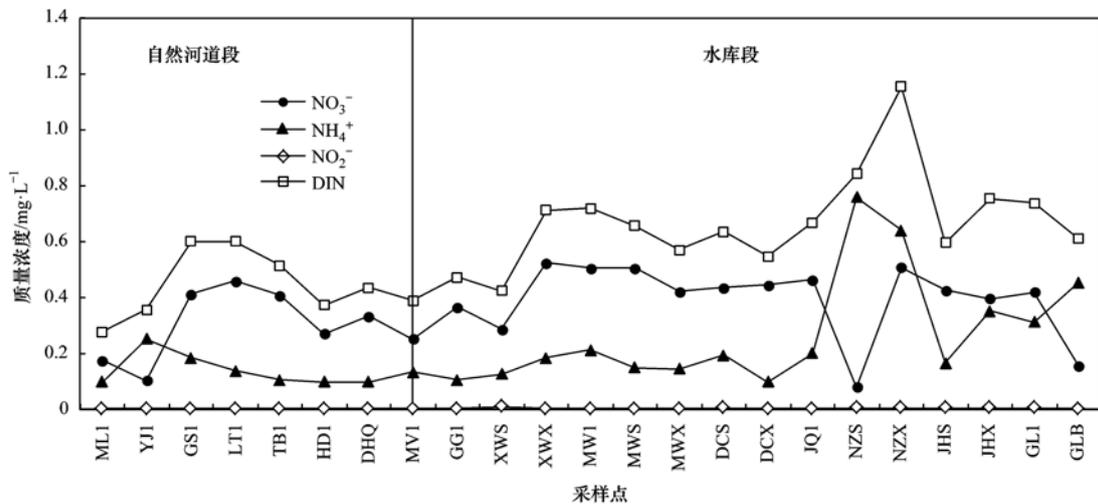


图 4 澜沧江流域溶解态氮的沿程分布

Fig. 4 Distribution of dissolved nitrogen along the Lancang River

表 1 不同来源物质的 $\delta^{15}\text{N}$ 值统计Table 1 The $\delta^{15}\text{N}$ values of different source materials

悬浮颗粒物氮来源物	$\delta^{15}\text{N}$ 值/ ‰
大气沉降	-15 ~ -15
农业化肥	-7 ~ 5
土壤来源	-3 ~ 8
工业及生活污水	7 ~ 25

将各来源 $\delta^{15}\text{N}$ 值代入 IsoSource 软件中, 并对沿程各断面内不同来源贡献率进行计算, 其结果如图 5. 从中可知, 流域内工业及生活污水始终占据着较大的贡献率, 平均贡献率为 42.43% 且沿程贡献率逐渐增大. 上游工业及生活污水的贡献率在 25.2% ~ 38.9% 间, 平均值为 33.41%, 与自然河

道段相比, 水库段贡献率较大平均值为 46.38%, 且其贡献率沿程呈上升, 在 10.8% ~ 72.6% 间波动; 土壤有机质平均贡献率为 22.38%, 其变化范围为 10.5% ~ 32.7%, 自然河道段内平均贡献率为 26.99%, 下游水库段贡献率较上游自然河道段低, 平均贡献率为 20.36%; 大气沉降的贡献率较前两种来源贡献率低, 平均贡献率为 18.16%, 自然河道段内平均贡献率为 20.46%, 水库段平均贡献率为 17.15% 较自然河道段低; 农业化肥的平均贡献率为 17.03% 与大气沉降贡献率相近, 自然河道段内平均贡献率为 19.14%, 下游水库段平均贡献率较自然河道段低为 16.11%.

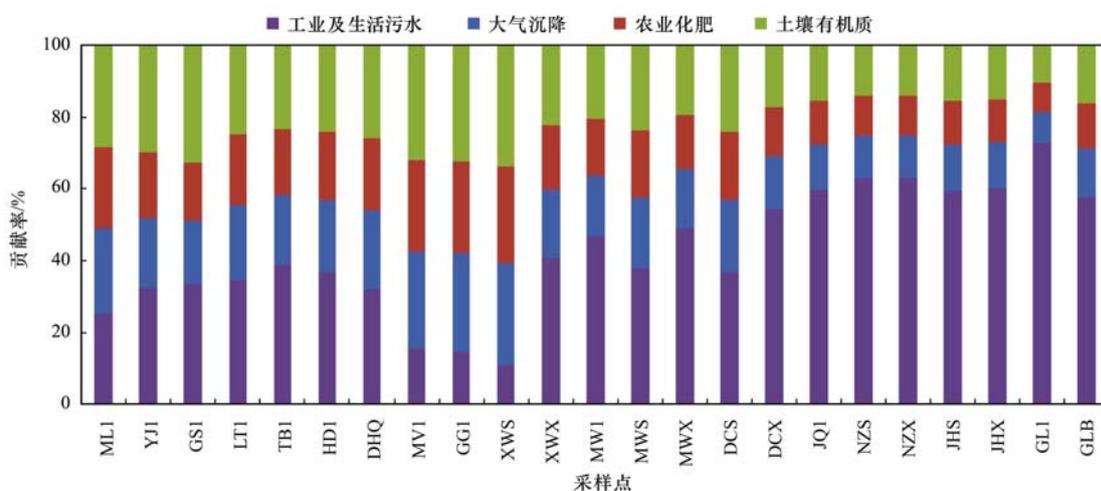


图 5 6 月澜沧江悬浮颗粒物各来源贡献率情况

Fig. 5 Contribution rate of suspended particulates in the Lancang River in June

3 讨论

3.1 水库建设对悬浮颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 沿程分布的影响

澜沧江流域中下游库区段水温高, 且溶解氧含量充足为藻类生长提供了较好的环境条件, 而下游库区段由于大坝蓄水所造成的水体流速降低以及氮磷等营养盐的滞留为藻类提供了所需的水流条件. 分析数据发现在下游库区段内 XWS、MWS、DCS 3 个断面的叶绿素 a 较高, 而这 3 个断面内的悬浮颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 则出现了降低的趋势, 同时已经有研究显示, 在氮充足的环境条件下, 因藻类吸收同化作用而引起的氮同位素分馏可达 $-16\text{‰} \sim -7\text{‰}$. 为了分析这 3 个库区内叶绿素 a 与 $\delta^{15}\text{N}$ 值之间的关系, 绘制了图 6.

图 6 所示为小湾、漫湾、大朝山这 3 个库区坝上与坝下叶绿素 a 及 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化. 其中叶绿素 a 是一种常用的度量藻类生物量的指标, 他的高低与该

水体藻类的种类、数量等密切相关, 是水体理化性质动态变化的综合反映指标^[32~34], 从图 6 可以发现坝上具有较高的叶绿素 a 质量浓度, 而坝下叶绿素 a 质量浓度则骤减, 导致这种情况发生的原因是由于坝上水温高、流速慢且含氧量充足适合藻类生长繁殖, 而坝下因受到下泄的低温水影响且坝下的流速较大, 不适宜藻类的繁殖与生存故导致坝下的叶绿素 a 质量浓度较坝上叶绿素 a 质量浓度低. 但 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化规律正与叶绿素 a 质量浓度变化规律相反, 坝上的 $\delta^{15}\text{N}$ 值要低于坝下 $\delta^{15}\text{N}$ 值. 同时叶绿素 a 与 $\delta^{15}\text{N}$ 存在较好的负相关性, 两者间 R^2 达到 0.954. 这表明在这 3 个点断面内除了一定程度的颗粒分解情况外, 藻类的同化作用对 $\delta^{15}\text{N}$ 值的降低起到重要的影响, 其作用机制是由于藻类通过吸收营养盐中的溶解态氮素来维持生长及繁衍, 而在此过程中会优先吸收各种溶解态氮素中较轻的 ^{14}N , 使得自身的 $\delta^{15}\text{N}$ 值降低, 并

最终导致了该点的悬浮颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值的降低。这种现象与牟新悦等^[35]在对大亚湾悬浮颗粒物的研究中发现河流、河口水体中强烈的硝化作用以及浮游植物会优先利用铵盐中的 ^{14}N ，因而导致颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 值发生变化；以及刘秀娟^[28]在长江口海

域的研究中发现 5 月长江外海区生物的同化吸收作用对 $\delta^{15}\text{N}$ 影响较大，而悬浮颗粒有机氮的分解作用相对较弱；在该区域藻类对硝酸盐的吸收利用使得有机质的 $\delta^{15}\text{N}$ 变轻，而硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 升高的现象相似。

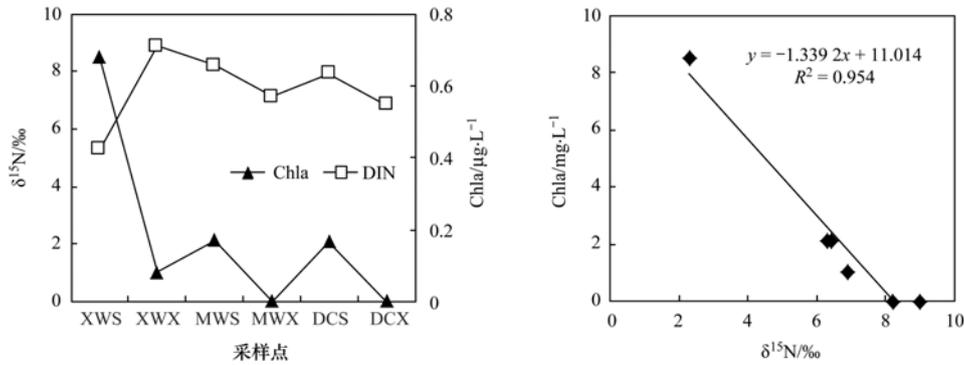


图 6 小湾、漫湾、大朝山坝上坝下叶绿素 a 值与 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化

Fig. 6 Chlorophyll a value variation and $\delta^{15}\text{N}$ values of Xiaowan, Manwan, and Dachaoshan dams

3.2 澜沧江流沿程各断面悬浮颗粒物主要来源分析

澜沧江上游自然河道段从 ML1 ~ DHQ，通过 Isosource 计算可知该段内工业及生活污水贡献率的平均值为 33.4%，土壤有机质与大气沉降的影响仅次于工业及生活污水，二者平均贡献率分别为 26.9% 与 20.5%。由图 7 可发现，该区间内 DIN 平均质量浓度为 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，变化范围为 $0.28 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；同时该段内 $\delta^{15}\text{N}$ 波动较大， $\delta^{15}\text{N}$ 值在 $4.52\text{‰} \sim 7.65\text{‰}$ 间波动，平均值为 5.87‰ 。区域内 $\delta^{15}\text{N}$ 在大气沉降和土壤有机氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 特征值范围之内，因此可以推断该段水域内悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 主要受到土壤有机氮以及大气沉降氮的影响，同时该段水域内人烟稀少，人类活动程度较低因而工业及生活污水对悬浮颗粒物的影响低于其在流域内总的平

均值 42.43% 。

而从 MV1 ~ GLB 的下游水库段内根据 Isosource 计算发现主要影响因素是工业及生活污水，在该断面内其平均贡献率达到 46.38%。其他来源土壤有机质、大气沉降与农业化肥的平均贡献率分别为 20.37%、17.15% 与 16.11%。水库段内 DIN 平均质量浓度为 $0.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，在 $0.39 \sim 1.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动，该水域水体中 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值高达 8.92‰ ，变化范围为 $6.43\text{‰} \sim 11.8\text{‰}$ ， $\delta^{15}\text{N}$ 值落在工业及生活污水、土壤有机氮及大气沉降上。其 DIN 质量浓度为 $0.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 远高于自然河道段，表明该水域受外源输入的影响程度较高；由此可以推断该水域内 $\delta^{15}\text{N}$ 较重的主要原因是由于该区间内工业、生活污水的排放量增加，而工业生活污水中

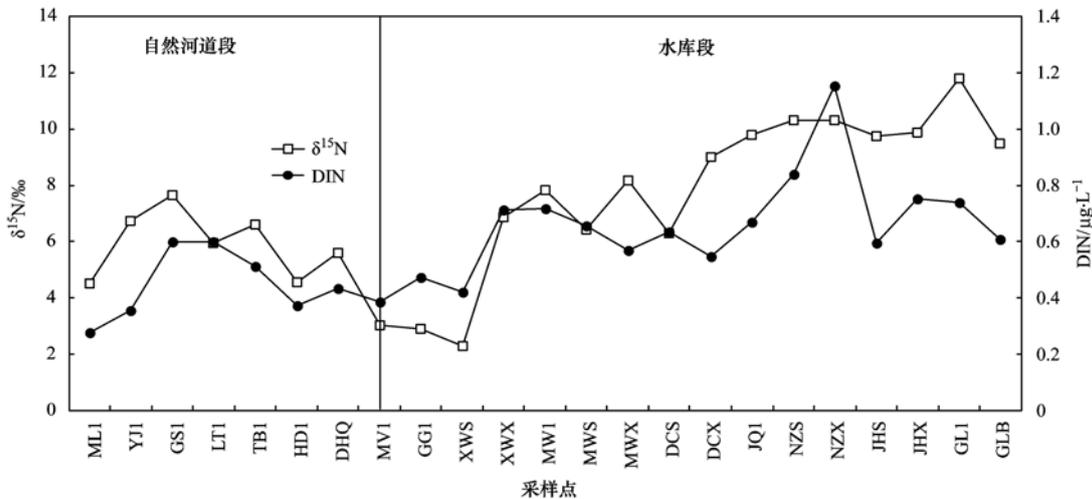


图 7 6 月澜沧江沿程 $\delta^{15}\text{N}$ 值与 DIN 质量浓度分布

Fig. 7 Distribution chart of the $\delta^{15}\text{N}$ values and the concentrations of DIN along the Langcang River

较重的 $\delta^{15}\text{N}$ 值使得水库段的悬浮颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 偏重。

在下游水库段内 DHQ 及 GG1 这两个点内出现了陡降的现象, 该段内的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比自然河道段与水库段 $\delta^{15}\text{N}$ 都低。根据 Isosource 计算该区间内工业及生活污水、土壤有机质、大气沉降与农业化肥的平均贡献率分别为 13.71%、32.67%、27.67% 与 25.97%。该段内其 $\delta^{15}\text{N}$ 范围在 2.90‰~6.32‰之间, 平均值为 4.01‰较上游自然河道段低了 1.86‰。 $\delta^{15}\text{N}$ 值落在大气沉降、农业化肥以及土壤有机质的区间内。通过分析该段内 DIN 质量浓度, 发现该段内质量浓度为 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与自然河道段的 DIN 质量浓度平均值 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间只差 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明该段内与上游段的外源输入相似, 因而农业化肥不是造成该段较上游段值变轻的主要原因。而在采样期间该段内发生过几次较大降雨, 故推断在该段内降雨湿沉降以及由于降雨冲刷导致岸边土壤输入表层水中补给的较轻 $\delta^{15}\text{N}$ 是使该区间内悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 值变轻的主要原因。

4 结论

(1) 澜沧江流域水体溶解无机氮 (DIN) 质量浓度变化范围为 $0.28 \sim 1.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。流域内 3 种溶解态无机氮的变化规律相似, 呈现沿程质量浓度逐渐增加的趋势。

(2) 澜沧江干流流域表层水体中悬浮颗粒的氮稳定同位素值分布在 2.3‰~11.8‰之间, 与国内外其他一些河口的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布水平一致。表层水体中悬浮颗粒 $\delta^{15}\text{N}$ 沿程呈增重趋势。

(3) 在澜沧江上游自然河道段内, 悬浮颗粒物中大气沉降、农业化肥、土壤有机颗粒氮、工业及生活污水 4 种来源的贡献率分别为 20.5%、19.2%、26.9% 与 33.4%, 而下游水库段这 4 种来源的贡献率分别为 17.15%、16.11%、20.37% 与 46.38%, 下游水库段受到的人为影响较大。

(4) 在下游水库段内 XWS、MWS、DCS 这 3 个断面受到藻类同化作用的影响, 藻类吸收溶解态氮素中较轻的 ^{14}N , 使得 $\delta^{15}\text{N}$ 值较下游 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值轻。

参考文献:

- [1] 汪中洋, 王刚, 张修玉, 等. 澜沧江下游水生生态环境空间分异特征分析[J]. 水产研究, 2015, 2(1): 1-10.
Wang Z Y, Wang G, Zhang X Y, et al. Spatial characteristics for aquatic ecological environment of the Lancangjiang River downstream[J]. Open Journal of Fisheries Research, 2015, 2(1): 1-10.
- [2] 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.
- [3] 陈丽晖, 何大明. 澜沧江-湄公河水电梯级开发的生态影响[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 577-586.
Chen L H, He D M. The ecological impacts of hydropower cascade development in Lancang-Mekong River [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 577-586.
- [4] 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, Cheng 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.
- [5] 李小艳, 彭明春, 董世魁, 等. 基于 ESHIPPO 模型的澜沧江中游大坝水生生物生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 517-526.
Li X Y, Peng M C, Dong S K, et al. Ecological risk assessment of hydropower dam construction on aquatic species in middle reaches of Lancang River, Southwest China based on ESHIPPO model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 517-526.
- [6] 唐文家, 崔玉香, 赵霞. 青海省澜沧江水系水生生物资源的初步调查[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(6): 20-28.
Tang W J, Cui Y X, Zhao X. Hydrobiontes resource survey of Lancang River in Qinghai Province[J]. Journal of Hydroecology, 2012, 33(6): 20-28.
- [7] 邓晴, 曾广权. 云南省澜沧江流域生态环境保护对策研究[J]. 云南环境科学, 2004, 23(S1): 135-136, 150.
Deng Q, Zeng G Q. Research of countermeasures for ecologically environmental protection in Lan Can Jiang Watershed, Yunnan Province[J]. Yunnan Environmental Science, 2004, 23(S1): 135-136, 150.
- [8] 和健全. 澜沧江流域(兰坪段)生态修复存在问题与对策[J]. 现代园艺, 2015, (6): 118-119.
- [9] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域典型生态功能及其分区[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 816-823.
Chen L, Xie G D, Zhang C S, et al. Ecosystem function and regionalization in the Lancang River basin [J]. Resources Science, 2013, 35(4): 816-823.
- [10] 姚维科, 杨志峰, 刘卓, 等. 澜沧江中段水质时空特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 148-152.
Yao W K, Yang Z F, Liu Z, et al. Spatio-temporal characteristics of Lancangjiang River water quality along middle reaches[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 148-152.
- [11] 康斌, 何大明. 澜沧江鱼类生物多样性研究进展[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 195-200.
Kang B, He D M. Research progress of biodiversity of fish species in the Lancangjiang River [J]. Resources Science, 2007, 29(5): 195-200.
- [12] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 澜沧江流域梯级开发的生态环境累积效应[J]. 水利学报, 2007, 38(S1): 577-581.
Zhong H P, Liu H, Geng L H. Cumulative effects of Lancang

- River basin cascade hydropower development on ecology and environment[J]. *Shuili Xuebao*, 2007, **38**(S1): 577-581.
- [13] 朱春灵. 澜沧江小湾水库水环境和氮磷营养盐的时空分异特征初步研究[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
Zhu C L. Spatial and temporal distribution of water environment and nitrogen and phosphorus in Xiaowan reservoir, the Lancang River[D]. Kunming: Yunnan University, 2013.
- [14] Hyodo F, Tsugeki N, Azuma J I, *et al.* Changes in stable isotopes, lignin-derived phenols, and fossil pigments in sediments of Lake Biwa, Japan: implications for anthropogenic effects over the last 100 years [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **403**(1-3): 139-147.
- [15] Wu Y, Zhang J, Li D J, *et al.* Isotope variability of particulate organic matter at the PN section in the East China Sea [J]. *Biogeochemistry*, 2003, **65**(1): 31-49.
- [16] Mariotti A, Lancelot C, Billen G. Natural isotopic composition of nitrogen as a tracer of origin for suspended organic matter in the Scheldt estuary [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, **48**(3): 549-555.
- [17] 蔡德陵, 张淑芳, 张经. 稳定碳、氮同位素在生态系统研究中的应用[J]. *青岛海洋大学学报*, 2002, **32**(2): 287-295.
Cai D L, Zhang S F, Zhang J. Applications of stable carbon and nitrogen isotope methods in ecological studies [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, **32**(2): 287-295.
- [18] Ostrom N E, Macko S A, Deibel D, *et al.* Seasonal variation in the stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry of a coastal cold ocean environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(14): 2929-2942.
- [19] Cifuentes L A, Sharp J H, Fogel M L. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(5): 1102-1115.
- [20] Voß M, Struck U. Stable nitrogen and carbon isotopes as indicator of eutrophication of the Oder river (Baltic sea) [J]. *Marine Chemistry*, 1997, **59**(1-2): 35-49.
- [21] 卢风云, 刘竹青, 季宏兵. 潮白河上游有机质的碳、氮稳定同位素分析及来源探讨[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, **42**(12): 1912-1922.
Lu F Y, Liu Z Q, Ji H B. Carbon and nitrogen isotopes analysis and sources of organic matter in the upper reaches of the Chaobai River near Beijing [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, **56**(2): 217-227.
- [22] 唐艳凌, 章光新. 基于稳定同位素示踪的流域颗粒有机物质来源辨析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(9): 1257-1267.
Tang Y L, Zhang G X. Identifying sources of particles organic matter in surface water based on stable isotope tracing on basin scale [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(9): 1257-1267.
- [23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 156-165.
- [24] 商栩, 管卫兵, 张国森, 等. 互花米草入侵对河口盐沼湿地食物网的影响[J]. *海洋学报*, 2009, **31**(1): 132-142.
Shang X, Guan W B, Zhang G S, *et al.* The impact of invasion of *Spartina alterniflora* on the food webs of estuarine salt marshes [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **31**(1): 132-142.
- [25] 朱林, 许兴, 赵小红, 等. 基于 ^{18}O 稳定同位素对银川平原北部4种灌木夏季水分利用特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, **27**(4): 24-30.
Zhu L, Xu X, Zhao X H, Tang J N. Characteristics of water use of four bushes growing in northern areas of Yinchuan Plain in summer based on the ^{18}O stable isotope analysis [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, **27**(4): 24-30.
- [26] 姜启昊, 欧志吉, 左平. 盐沼植被对江苏盐城湿地生态系统有机质贡献的初步研究[J]. *海洋通报*, 2012, **31**(5): 547-551.
Jiang Q W, Ou Z J, Zuo P. Primary study on the organic matter contribution of salt marsh vegetation to coastal wetland ecosystem in Yancheng Jiangsu [J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, **31**(5): 547-551.
- [27] 赖建平. 鄱阳湖区悬浮颗粒物和表层沉积物有机质碳、氮同位素研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
Lai J P. Study on stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate organic matter and surface sediment organic matter in Poyang Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [28] 刘秀娟. 长江口海域氮的同位素特征及其环境意义[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2009.
Liu X J. Study on the variability of nitrogen isotope in the Yangtze River (Changjiang) estuary, China and its environmental implications [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [29] Amberger A, Schmidt H L. Natürliche Isotopengehalte von Nitrat als Indikatoren für dessen Herkunft [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, **51**(10): 2699-2705.
- [30] Aravena R, Evans M L, Cherry J A. Stable Isotopes of Oxygen and Nitrogen in Source Identification of Nitrate from Septic Systems [J]. *Groundwater*, 1993, **31**(2): 180-186.
- [31] Russell K M, Galloway J N, Macko S A, *et al.* Sources of nitrogen in wet deposition to the Chesapeake Bay region [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(14-15): 2453-2465.
- [32] 徐效军, 张鹰, 刘吉堂, 等. 海州湾叶绿素 a 与水环境因子的多元分析[J]. *水利渔业*, 2007, **27**(2): 79-81.
Xu X J, Zhang Y, Liu J T, *et al.* Chlorophyll-a in relation to water environment factors [J]. *Reservoir Fisheries*, 2007, **27**(2): 79-81.
- [33] 叶麟. 三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2006.
Ye L. Studies on the eutrophication and the spring phytoplankton bloom in Xiangxi Bay of Three-Gorge Reservoir [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, 2006.
- [34] LaBaugh J W. Relation of algal biovolume to chlorophyll a in selected lakes and wet [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, **52**(2): 416-424.
- [35] 牟新悦, 陈敏, 张琨, 等. 夏季大亚湾悬浮颗粒有机物碳、氮同位素组成及其物源指示[J]. *海洋学报*, 2017, **39**(2): 39-52.
Mou X Y, Chen M, Zhang K, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotopes as tracers of sources of suspended particulate organic matter in the Daya Bay in summer [J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, **39**(2): 39-52.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)