

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市场尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征

程豹, 望雪, 马金川, 杨正健*, 刘德富, 马骏

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 澜沧江梯级水库群建设对流域水生态环境产生了一定的影响, 将流域水体划分为自然河道段和水库段。为了探究梯级水库建设后澜沧江流域不同类型水体氮、磷营养盐和叶绿素 a 浓度的空间变化规律以及叶绿素 a 浓度与环境因子之间的关系, 于 2017 年 6 月对澜沧江流域生态环境进行了调查分析。结果表明, 澜沧江水体总氮质量浓度变化范围为 $0.37 \sim 1.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $0.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 总磷质量浓度变化范围 $0.01 \sim 0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。单因素 ANOVA 分析表明, 总氮空间差异显著, 表现为支流段 > 水库段 > 自然河道段; 但总磷没有明显的空间差异。澜沧江水库段水体叶绿素 a 浓度变化范围为 $2.6 \sim 10.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $5.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Pearson 相关性分析结果显示, 水体叶绿素 a 浓度与总磷浓度、水温 and 真光层与混合层之比 ($Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$) 等具有显著相关性, 其中与 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 的相关性最高 ($R^2 = 0.689$, $P = 0.001$), 表明水温分层驱动下的 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 是影响澜沧江水库水体中浮游植物生长的关键性指标。

关键词: 澜沧江; 梯级水库; 营养盐; 叶绿素 a; 空间变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1779-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809047

Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs

CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, YANG Zheng-jian*, LIU De-fu, MA Jun

(Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, College of Civil Construction and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Construction of cascade reservoirs in Lancang River had a certain influence on the ecological water environment of the basin, dividing the water into natural reaches and reservoir reaches. To explore the impact of the cascade reservoirs on the ecological environment, the nutrient and the chlorophyll a distribution data were measured in the natural reaches, reservoir reaches, and tributaries in June 2017. The results showed that the TN ranged from 0.37 to $1.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average of $0.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the TP ranged from 0.01 to $0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average of $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. One-way ANOVA analysis showed significant spatial differences in the TN, with the TN concentration following the order tributaries > reservoir reaches > natural reaches. However, the TP concentration did not show a significant trend. The chlorophyll a concentration varied from 2.6 to $10.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, with a mean of $5.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. Pearson correlation analysis showed significant relationships between the chlorophyll a concentration and the TP, water temperature, and $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$. The relationship between chlorophyll a and $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ was particularly significant, which indicated the $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ caused by thermal stratification may be the key factor influencing the growth of phytoplankton.

Key words: Lancang River; cascade reservoirs; nutrient; chlorophyll a; spatial variation

浮游植物是河流生态系统中重要的生产者, 对河流生态系统的物质循环和能量转化过程中起着重要作用^[1]。浮游植物作为河流生态系统的重要组成部分, 其空间分布特征直接影响了水生态系统的功能和稳定性, 同时反映了生态系统中环境的变化。浮游植物受河流形态、光照、水温、盐度、营养盐和其他生物因素的影响, 具有明显的空间变化特征^[2-4]。水电梯级开发会改变河流原始水体环境, 进一步造成水库水文情势改变, 营养盐的迁移转化, 生源要素比例的变化等等, 这些变化将直接影响到浮游植物生物量和种类组成^[5-8]。而叶绿素 a 浓度与浮游植物生物量之间有着密切的联系, 叶绿素 a 是水体理化因子和生物指标的综合作用表现, 同时受到环境因子制约^[9]。因此, 利用叶绿素 a 表

征水体浮游植物的生长状态, 研究叶绿素 a 的空间分布特征及其与环境因子的相互关系, 具有重要意义^[10]。

位于西南高山的国际河流澜沧江梯级水电开发形成了首尾相连的深水、超长型特大梯级水库群^[11]。这些梯级水库的运行使水体氮、磷营养盐时空分布产生了变化, 不仅影响库区自身的水环境和生态系统的演替, 还影响了跨界的氮、磷营养盐输送^[12]。澜沧江梯级水库的建设, 蓄水后使水域面

收稿日期: 2018-09-06; 修订日期: 2018-10-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402204, 2016YFC0401702); 国家自然科学基金项目 (91647207, 51509086)

作者简介: 程豹 (1994 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为生态水利, E-mail: 554042749@qq.com

* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

积增加,库区内流速降低,改变了河流原有的生态连通性和纵向连通性,将库区内的原生河道生境转变为静水区.因此水库建设导致库区和自然河流之间水环境和水生态系统的差异性也是需要关注的重要问题之一.目前针对澜沧江的研究主要是水库内营养盐含量及其营养状态进行的分析,澜沧江流域水体氮、磷总体处于高含量水平,综合营养状态指数表明水体处于中营养水平^[13, 14],而对库区内水体与自然河道水体之间的营养盐空间差异以及叶绿素 a 浓度变化的研究较少.本文根据澜沧江云南境内的水质监测资料,将澜沧江中下游流域分为自然河道段和水库段,分析了氮、磷营养盐及叶绿素 a 浓度的空间分布规律,并探讨了叶绿素 a 与理化因子之间的关系,揭示了浮游植物对理化因子的响应机制,以期为我国梯级水库群管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

澜沧江发源于青藏高原唐古拉山的青海省杂多县,由格尔吉河和鄂穆楚河两河自青海流入西藏于昌都汇合后称澜沧江,其经西藏流入云南,于云南南部西双版纳州流出国境.澜沧江在我国境内流经青、藏、滇三省,在我国境内长2 153 km,流域面积17.4 万 km²,在云南省境内河长1 240 km,流域面积 91×10^3 km²^[15].澜沧江在云南境内经迪庆藏族自治州、怒江傈僳族自治州、大理白族自治州、保山市、临沧市、普洱市、西双版纳傣族自治州等七地级市、自治州,由勐腊县出境,干流总长度1 216 km.主要支流有黑惠江、黑河、小黑江等.

1.2 样点布设

于2017年6月在澜沧江干流对云岭(YL)、托巴(TB)、黄登(HD)、大华桥(DHQ)、苗尾坝上(MVB)、功果桥坝下(XW03)、小湾库区(XW02)、小湾坝上(XW01)、漫湾库区(MW02)、漫湾坝上(MW01)、大朝山坝上(DCSS)、糯扎渡库区(NZD)、景洪库区(JHB)、橄榄坝(GLB)以及支流黑惠河(HHH)、小黑江左支(XHJZZ)、小黑江01(XHJ01)、小黑江02(XHJ02)采集样品.云岭(YL)至大华桥(DHQ)流域内水流湍急,水体浊度高,没有受到水库影响,为自然河道段;苗尾坝上(MVB)至橄榄坝(GLB)建设了苗尾、功果桥、小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡和景洪水电站,对澜沧江水文情势和流域形态产生较大的影响,为水库段;主要支流有黑惠河和小黑江.具体位置如图1所示.

1.3 样品采集与分析

使用5 L 采水器在水面下0.5 m处采集水样,

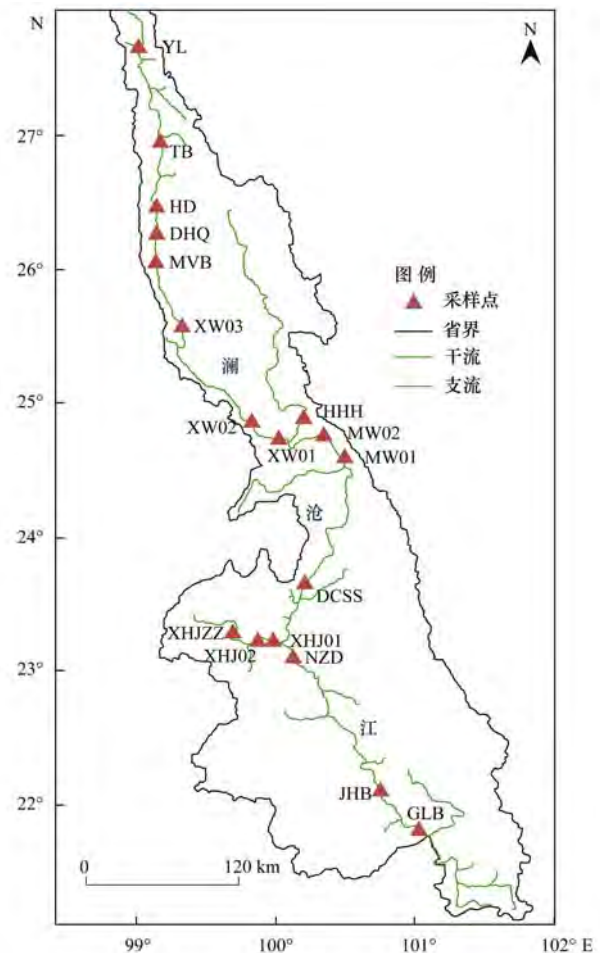


图1 澜沧江中下游流域调查样点布置示意

Fig. 1 Sampling sites in the middle and lower reaches of the Lancang River

将样品保存于两个1 L的聚乙烯瓶中,其中一瓶加入H₂SO₄调节pH(pH<2),放入冰箱中冷冻保存,带回实验室测定高锰酸盐指数、总氮(TN)、总磷(TP).另一瓶用0.45 μm的醋酸纤维膜过滤水样后收集到采样瓶中,冷冻保存,用于测定氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、正磷酸盐(PO₄³⁻-P),过滤后的滤膜低温干燥保存,于室内采用分光光度法测定叶绿素 a 浓度.

高锰酸盐指数、叶绿素 a(Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)、硝氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、正磷酸盐(PO₄³⁻-P)在室内根据文献[16]测定.透明度(SD)采用塞氏盘法现场测定,水下光强用International Light 4100 光照计(美国)测定,水温(WT)、浊度(Tur)、溶解氧(DO)、水深(depth)、pH等参数由YSI-EXO多参数水质分析仪(美国)现场测定.

1.4 数据分析方法

真光层深度(Z_{eu})是植物光合作用能有效发生的水体深度,一般取为水下光合作用有效辐射为水

面 1% 处对应的深度. 水体表面混合层深度 Z_{mix} 是指垂向混合充分的表层水体的深度, 取与表层水体温差 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 处对应的水深^[17]. 采用 ArcGIS 9.0 绘制研究区域的监测断面, 营养盐平面图采用 Excel 表格绘制, Pearson 相关性分析均借助 SPSS 13.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 氮形态空间分布规律

澜沧江流域水体各形态氮浓度变化如图 2 所示, TN 质量浓度变化范围为 $0.37 \sim 1.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总体处于 III 类水标准下, 水体 TN 含量过高, 是主要的污染因子. 就平均值而言, TN 质量浓度在支流段 ($1.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 最大, 其次为水库段 ($0.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 自然河道段 ($0.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 最低. 单因素 ANOVA 分析得出, 自然河道段和水库段 ($P=0.025$)、自然河道段与支流段 ($P=0.000$)、水库段与支流段 ($P=0.001$) 均存在显著差异. 澜沧江流域水体硝氮 ($\text{NO}_3^{-}\text{-N}$) 质量浓度变化范围为 $0.15 \sim 0.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮 ($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$) 质量浓度变化范围为 $0.08 \sim 0.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 硝氮 ($\text{NO}_3^{-}\text{-N}$) 质量浓度显著高于氨氮 ($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$) ($P=0.048$). 可以看出, 澜沧江流域水体溶解性无机氮主要为硝态氮. 橄榄坝和黑惠河表现为氨氮 ($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$) 质量浓度高于硝氮 ($\text{NO}_3^{-}\text{-N}$), 主要原因是受到了点源污染, 附近的工业废水是氨氮 ($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$) 的主要来源.

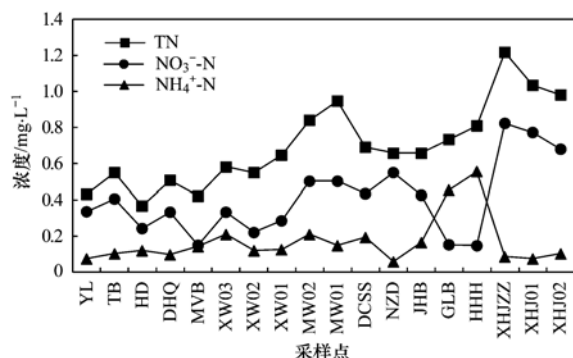


图 2 澜沧江流域各采样点及支流氮元素浓度分布

Fig. 2 Variation of the nitrogen concentration in the Lancang River

2.2 磷形态空间分布规律

本次调查表明, 澜沧江流域水体 TP 质量浓度变化范围为 $0.01 \sim 0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总体处于 II 类水标准下 (图 3). 自然河道段、水库段和支流段 TP 质量浓度均值分别为 0.02 、 0.03 和 $0.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且自然河道段和水库段 ($P=0.633$)、自然河道段与支流段 ($P=0.265$)、水库段

与支流段 ($P=0.301$) 均没有显著差异. 大朝山水库和黑惠河 TP 污染严重, 质量浓度分别为 $0.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远高于其他点位. 巴重振等^[18]的研究表明, 大朝山库区水体总磷质量浓度年均值为 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且最大值出现在 6 月, 总磷质量浓度高于漫湾水库, 与本文研究结果一致. 采样期间为云南境内丰水期, 水体流失严重, 进一步影响了库区总磷的含量. 大朝山库区位于云南省临沧市凤庆县和云县, 该地区以农业为主, 生活污水为主要污染源, 每天产生污水 $52\,500 \text{ t}$, 总磷 156 kg , 雨水冲刷作用导致生活污水直接进入河流^[19], 同时大朝山库区的一条常年浑浊的支流大寨河, 大量的悬浮物和泥沙的流入也进一步导致了库区水体总磷含量的增加^[18]. 黑惠江水质较差, 一般在 III ~ IV 类之间, 大理石排放的工业和生活废水为主要污染源, 主要污染物为氨氮 ($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$) 和 TP^[20]. 正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 质量浓度变化范围为 $0.01 \sim 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其分布规律与 TP 质量浓度变化基本一致.

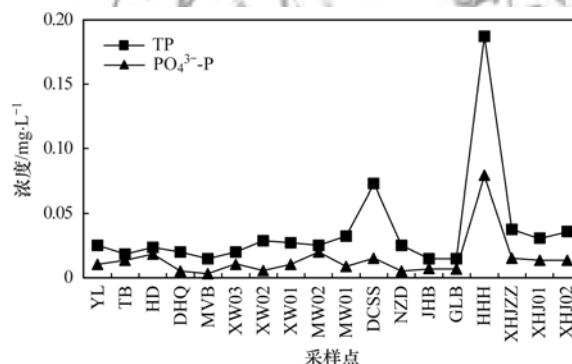


图 3 澜沧江流域各采样点及支流磷元素浓度分布

Fig. 3 Variation of the phosphorus concentration in the Lancang River

2.3 下游各水库水温垂向分布特征

水温垂向分布直接影响水体营养盐、电导率、pH 等理化因子的大小, 从而间接地影响水中浮游植物的生长^[21, 22]. 澜沧江下游各水库水温垂向变化特征如图 4 所示, MW02 和 JHB 表底水温差约为 0.0°C 和 0.2°C , 垂向水温几乎没有变化, 没有水温分层现象, 2 个水库库容较小, 水深较浅, 垂向交换程度强, 水体的营养物质以及能量的交换比较充分. MW01 和 DCSS 在表层 $0 \sim 5 \text{ m}$ 处水温差分别为 2.2°C 和 0.7°C , 温度变化剧烈, 从 5 m 到底层水温基本保持一致, 没有分层现象. 深水水库受光照影响会出现水温分层, 稳定的热分层会阻碍水体的垂向交换, 从而对水体理化指标产生较大影响^[23], 而小湾水库和糯扎渡水库库容较大, 水体流速缓慢, 水深达 150 m 以上, 水体滞留时间大大延长,

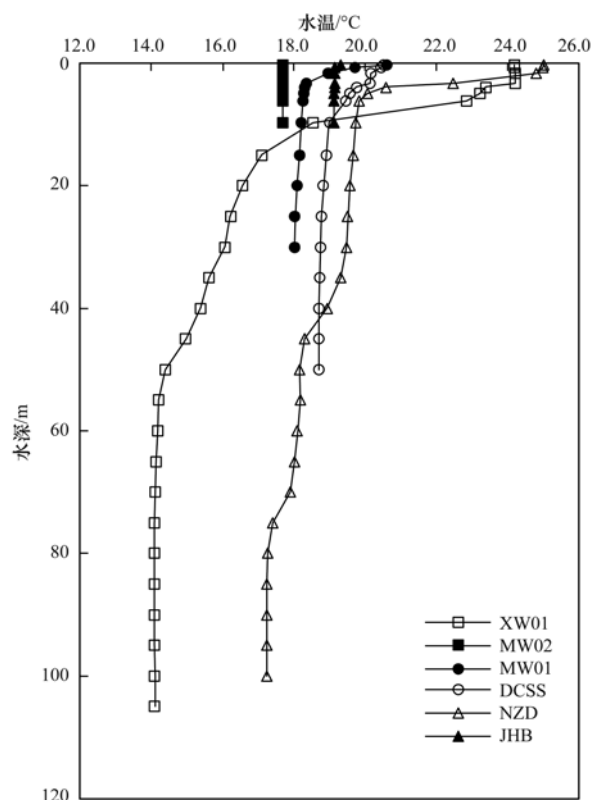


图4 澜沧江下游各水库水温垂向变化

Fig. 4 Variation of the vertical water temperature in the downstream of the Lancang River Reservoir

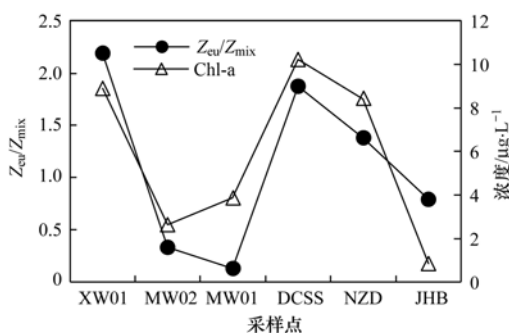
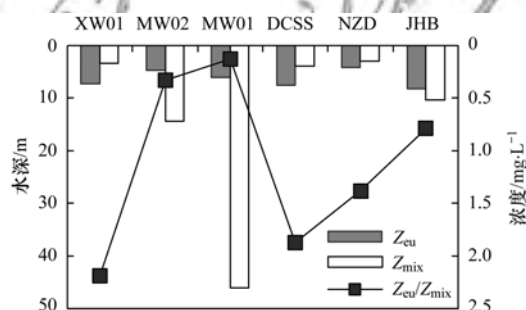
图5 澜沧江流域 Z_{eu} 、 Z_{mix} 以及 Chl-a 浓度变化

Fig. 5 Variation of Z_{eu} , Z_{mix} , and Chl-a concentration in the Lancang River

Chl-a 浓度与 Z_{eu}/Z_{mix} 有很好的对应关系 ($R^2 = 0.69$), 同时也会受 Z_{eu}/Z_{mix} 变化的影响。

3 讨论

3.1 氮形态空间变化成因分析

众多研究表明, 梯级水库建设对氮素迁移转化有非常重要的影响, 由于水库的拦截效应, 在微生物以及浮游生物的作用下会影响库区本身氮形态的相互转化^[24~27]. 水库建设会导致水体滞留时间显著增加, 同时也会增强氮素的沉降过程, 减少对下游氮素的输送^[28, 29]. 澜沧江流域梯级水库群建设对氮素迁移转化产生了重要的影响, 澜沧江流域自然河道段没有水库的建设, 水流较快, 水深较浅,

从而导致表底层水体发生物质和能量交换的可能性较小, 出现了混合层、温跃层、滞温层的稳定分层结构, 对水库内营养元素的形态特征也有一定的间接影响. XW01 和 NZD 的表底温差分别为 10.1℃ 和 7.8℃, 在 5~20 m 深度出现温跃层, 受大坝影响较大. 由于各个水库所处地理位置不同, 又受到采样时间和采样当天天气的影响, 导致各个水库表层水温差异明显, 糯扎渡表层水温最高, 为 25.0℃, 漫湾水库表层水温最低, 为 17.7℃.

2.4 下游各水库 Z_{eu} 、 Z_{mix} 和 Chl-a 空间变化

下游各水库 Z_{eu} 、 Z_{mix} 及 Z_{eu}/Z_{mix} 的空间变化规律如图 5 所示, 下游水库 Z_{eu} 变化范围为 4.23~8.21 m, Z_{mix} 变化范围为 3.06~46.1 m, Z_{eu}/Z_{mix} 变化范围为 0.13~2.19, 各水库的 Z_{mix} 不同是 Z_{eu}/Z_{mix} 变化的直接原因. Chl-a 浓度变化范围为 2.6~10.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 5.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 大朝山水库 Chl-a 浓度最高, 为 10.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其他水库 Chl-a 浓度均没有超过水体富营养化的阈值 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

MW02 和 MW01 的 Z_{eu}/Z_{mix} 比值分别为 0.33 和 0.13, 其对应的 Chl-a 浓度也很低, 分别为 2.63 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 3.86 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. XW01 的 Z_{eu}/Z_{mix} 比值为 2.19, 对应的 Chl-a 浓度也较高 (8.90 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

其主要位于云南省迪庆藏族自治州, 人口稀少, 周边工业发展较慢, TN 的污染源主要为农业非点源的污染^[30]. 水土流失也是影响自然河道段 TN 增加的一个重要原因, 自然河道段水体携带大量泥沙, 泥沙中携带的含氮污染物导致了水质的恶化^[31]. 水库段的 TN 质量浓度显著大于自然河道段, 其氮素增加主要来源于水库上游来水, 农业非点源污染以及周边工厂的点源污染. 水库段水体受大坝影响, 水体透明度增加, 水体滞留时间增大, 大量悬浮物和泥沙沉降使得颗粒态氮沉降, 同时浮游植物有足够的时间利用溶解性氮生成有机氮, 之后死亡被迁移至沉积物, 减少对下游氮的输送. 而水库段 (MVB~GLB) 流经临沧、保山、大理、思茅、

西双版纳等多个市(县),人口稠密,各地区的工业废水、生活污水和化肥、农药的面源污染,是导致 TN 质量浓度增加的主要原因.高天明等^[32]的研究表明,西双版纳州橡胶林种植面积同有林地面积的比例已经达到了 27.1%,橡胶林种植所施的化肥和农药随着雨水冲刷进入河流和天然橡胶加工废水的排放增加了河道中氮盐的负荷.顾磊^[33]的研究表明澜沧江流域沿岸分布的工矿企业所排放的工业废水,以及农药的使用也会对水体中氮含量增加产生影响.有研究表明,澜沧江流域内工业及生活污水为水体悬浮物氮素的主要贡献源,占比约为 42.43%.而澜沧江下游水库段中水体悬浮物氮素来源的贡献率在农业化肥、土壤有机颗粒氮、工业及生活污水 3 种分别为 16.11%、20.37% 与 46.38%,可见水库段受工业废水排放、农业的化肥使用以及生活污水的排放影响较大.同时又受到各支流污染物排放的影响, TN 污染更为严重^[34, 35].支流段水体 TN 质量浓度显著高于干流水体,陈帆^[20]的研究表明支流黑惠江汇入干流时水质为Ⅳ类水,主要的污染源为西洱河,西洱河受到大理市排放的工业和生活污水之后汇入黑惠江,主要污染物为总磷、氨氮、铅,与本文的研究结果一致(图 2).小黑江是贯穿于普洱市景谷、宁洱县和思茅区的主要河流之一,最后汇入澜沧江,因经济发展的需要,小黑江周围工厂发展迅速,不经处理的工业废水和城镇生活污水直接排入江中是造成小黑江氮污染严重的主要原因^[33, 36].澜沧江流域水体硝态氮质量浓度显著高于氨态氮($P=0.048$),化肥的过度使用、生活污水的排放和农业面源污染(包括水体流失)可能是导致硝态氮质量浓度较高的原因.经调查统计,澜沧江上游自然河道段沿岸云南境内人口约为 140 万人,农业人口居多,农业面源废水排放量可达 $33\,078\,500\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,生活污水排放量为 $24\,947\,504\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,主要污染物是固态氮、溶解态氮^[30].化肥使用是农业面源废水的主要污染来源,化肥的过度使用会造成无机氮尤其是硝态氮的大量流失,生活污水排放的氨氮在水体中经微生物的硝化作用也可能是硝氮增加的原因.下游水库段水土流失严重,水土流失面积占总面积的 25%~50%^[37],在雨季期间,雨水冲刷土壤表层,土壤中含有不易被土壤吸附的硝态氮^[38],这可能是导致水体硝态氮含量增加的主要原因之一.澜沧江梯级水库建设对氮素的空间分布有一定的影响,但梯级水库是如何导致河流氮素的迁移输出,需要持续关注 and 进一步地研究.

3.2 磷形态空间变化成因分析

人类活动会改变河流磷循环的过程,梯级水库的建设使磷素的迁移转化和滞留特征更加复杂.梯级水电的开发,会截留大量的磷元素,使河流磷的输出减少^[39, 40].对磷而言,水库的滞留效率较高,可高达 80%,是磷一个有效的汇^[41, 42].有研究表明,Seine River 上游水库滞留了 60% 的磷元素,主要沉降在沉积物中^[41];三峡水库的建设,使长江上游流域向下游输送的 TP 减少了 77%^[43];猫跳河梯级水电开发程度高,对磷有显著滞留效果,使磷酸盐的浓度降低了约 90%^[44].澜沧江流域水体 TP 质量浓度相对较低,且没有明显的空间分布差异,农业非点源污染、化肥和农药的使用、支流工业点源污染以及雨水冲刷携带泥沙中的颗粒态磷是水体 TP 质量浓度增加的原因^[30, 45].本研究结果表明,澜沧江水库段正磷酸盐含量占总磷含量的变化范围为 18.87%~52.67%,均值为 38.26%(图 3),水体中溶解态磷主要以正磷酸盐形式存在,可见颗粒态磷为本次研究中水体磷素的主要形态,且雨季冲刷携带泥沙中的颗粒态磷是 TP 质量浓度增加的主要原因.朱春灵^[37]的研究表明,小湾库区颗粒态磷(PP)/总磷(TP)的变化范围在 52%~71%之间,PP 是小湾库区水体主要的磷素形态,与本研究结果一致.水库段沉积物中 TP 质量浓度均值为 $1.432\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[46],可以看出,澜沧江梯级水库的建设对磷产生了一定的滞留效应,其滞留程度大小需进一步研究.同时值得注意的是,大朝山水库 TP 质量浓度高达 $0.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远高于其他水库,主要原因是大朝山水电站建设已久,底泥中沉积了大量的磷元素,而无论好氧与厌氧环境,磷的释放都随温度升高而增长,温度升高 1~3℃,将使底泥中总磷的释放增加 9%~57%^[47],且大朝山库区没有水温分层现象,水体混合均匀,导致水体 TP 质量浓度增加.

3.3 水库段 Chl-a 变化的驱动因子分析

为了寻找澜沧江控制藻类生长的关键因子,采用不同的理化指标与 Chl-a 浓度进行相关性分析,结果见表 1. Chl-a 浓度与 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 、WT 和 TP 呈显著的正相关.

有研究表明,磷营养盐是影响澜沧江水体浮游植物生物量变化的主要因子^[1],水体中 TN/TP 大于 21 时,磷可能成为水体营养水平的限制因子^[48].澜沧江水库段 Chl-a 与 TP 显著正相关($R^2=0.413$, $P=0.024$),且澜沧江水库段 TN/TP 均值为 29.3,说明磷是澜沧江浮游植物生长的限制因子,该结果与葛优等^[10]对西湖的调查结论相一致.同时澜沧江水库段 Chl-a 与水温显著正相关($R^2=$

0.48, $P=0.013$), 而水温对浮游植物的生长有促进作用. 澜沧江不同水库的表层水温变化范围为 18

~25℃, 适宜藻细胞的新陈代谢作用, 从而促进了浮游植物的生长繁殖^[49].

表 1 澜沧江下游水库叶绿素 a 浓度与环境因子的相关性¹⁾

Table 1 Correlation between chlorophyll a and its influencing factors in the downstream of the Lancang River Reservoir

	Z_{eu}	Z_{mix}	Z_{eu}/Z_{mix}	WT	DO	TN	TP
Chl-a	-0.027	-0.473	0.830 **	0.693 *	0.365	-0.433	0.643 *

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关

Chl-a 浓度与 Z_{eu}/Z_{mix} 呈显著的正相关($R^2 = 0.689$, $P=0.001$), 可见 Z_{eu}/Z_{mix} 对 Chl-a 浓度变化有重要的影响. 前人研究发现水温分层不仅影响水体理化因子和营养盐的垂向物质交换, 而且混合层深度对表层叶绿素 a 浓度有很大影响^[50, 51], 澜沧江流域得到了相似的结果. 临界层理论指出具有分层状态的水体, 如果临界层深度大于混合层深度, 在其它条件满足的条件下, 浮游植物因不易被水体携带入真光层以下而在表层水体中充分接受光照进行光合作用, 迅速繁殖并形成水华; 若临界层深度小于混合层深度, 则混合水体易将浮游植物携带入真光层以下, 减少其进入真光层接受光照的几率, 浮游植物生长受到限制^[17, 52, 53]. 水库建设使水体流速变缓, 水体滞留时间增大, 由于水库的水力停留时间过长, 水体的对流交换不佳, 导致水温会在深度方向上形成分层现象, 使水体在垂直方向上形成变温层、斜温层和恒温层 3 层水体, 水库稳定分层的形成会对水体理化指标产生较大影响^[23, 54, 55]. 另一方面, 水库建设使库区泥沙更容易沉降, 使水体透明度显著增加, 进而光照的有效辐射深度增加, 更利于藻类的生长繁殖, 所以水库建设导致的水温分层现象、以及对真光层深度和混合层深度的改变对库区藻类生长繁殖有重要的促进作用^[56~58]. 本研究得出, 漫湾水库和景洪水库 Chl-a 浓度较低($0.8 \sim 3.9 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 这是因为两库区水体没有水温分层现象, 表层到底层水体处于完全混合状态, 水体混合层深度大于真光层深度, 垂直方向上水体不断地进行对流交换, 藻类在混合层深度范围内不断运动, 长期处于无光环境下无法大量繁殖. 小湾水库、糯扎渡水库和大朝山水库 Chl-a 浓度($8.4 \sim 10.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)高于漫湾水库和景洪水库, 原因是这 3 个水库表层水温变化较大, 出现了明显的分层, 导致混合层深度小于真光层深度, 混合层的藻类在混合层上下运动均可以获得充足的光照, 且营养物质充足, 可以进行生长繁殖. 可见 Z_{eu}/Z_{mix} 为控制澜沧江流域水体中浮游植物生长的关键性指标, 而 Z_{mix} 是 Z_{eu}/Z_{mix} 变化的直接原因.

4 结论

(1) 澜沧江水体 TN 污染较为严重, 整体在 III 类水标准下, 溶解性无机氮主要以硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)的形式存在, 而磷元素污染相对较轻, TP 质量浓度整体在 II 类水标准下, 主要以正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$)的形式存在. 澜沧江两大支流黑惠江和小黑江污染比较严重, 流域周边的工厂、城市以及农业对水质的影响应加以重视.

(2) 澜沧江水体 TN 存在显著的空间差异, TN 质量浓度表现为支流段 > 水库段 > 自然河道段, TP 质量浓度没有表现出明显的空间差异.

(3) 澜沧江水库段水体 Chl-a 浓度与 TP、WT 和 Z_{eu}/Z_{mix} 呈显著的正相关. 水库段水体 TN/TP 均值为 29.3, 说明磷可能是澜沧江藻类生长的限制因子, 同时水温分层驱动下的 Z_{eu}/Z_{mix} 的变化是控制澜沧江浮游植物生长的关键性指标.

参考文献:

- [1] 田时弥, 杨扬, 乔永民, 等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 31-37.
Tian S M, Yang Y, Qiao Y M, *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang River, Pearl River basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 31-37.
- [2] Davidson K, Gowen R J, Tett P, *et al.* Harmful algal blooms: how strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence? [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 115: 399-413.
- [3] Hutchins M G, Johnson A C, Deflandre-Vlandas A, *et al.* Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms: reducing nutrient pollution or riparian shading? [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(21): 5065-5577.
- [4] 江源, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 浮游藻类与河流生境关系研究进展与展望[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 461-472.
Jiang Y, Peng Q Z, Liao J Y, *et al.* Advances and prospects for research into phytoplankton and river habitats [J]. Resources Science, 2013, 35(3): 461-472.
- [5] 肖晶. 梯级筑坝对浮游植物功能群变化的影响——以乌江流域为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017. 14-23.
- [6] 杨梦迪, 崔高仰, 李亲凯, 等. 梯级水库群水体碳、硫元素循环及耦合效应——以嘉陵江为例[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 651-660.
Yang M D, Cui G Y, Li Q K, *et al.* The cycle and coupling

- effect of carbon and sulfur in cascade reservoirs: a case study of Jialing River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 651-660.
- [7] Hart D D, Johnson T E, Bushaw-Newton K L, *et al.* Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration; we develop a risk assessment framework for understanding how potential responses to dam removal vary with dam and watershed characteristics, which can lead to more effective use of this restoration method[J]. *BioScience*, 2002, **52**(8): 669-682.
- [8] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(4): 384-396.
- Liu C Q, Wang F S, Wang Y C, *et al.* Responses of aquatic environment to river damming—from the geochemical view[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 384-396.
- [9] Lamont III E C, Reckhow K H, Havens K E. Using generalized additive models for prediction of chlorophyll *a* in Lake Okeechobee, Florida[J]. *Lakes & Reservoirs Research & Management*, 1996, **2**(1-2): 37-46.
- [10] 葛优, 周彦锋, 吕大伟, 等. 阳澄西湖叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(7): 1068-1075.
- Ge Y, Zhou Y F, Lv D W, *et al.* Temporal and spatial distribution of chlorophyll *a* and its relationship with environmental factors in Yangcheng West Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(7): 1068-1075.
- [11] 郭有安, 周毅. 澜沧江中下游梯级电站发电与生态需水耦合优化研究[J]. *水力发电*, 2017, **43**(7): 92-95.
- Guo Y A, Zhou Y. Coupling research of power generation and ecological water requirement of cascade hydropower stations in the middle and lower reaches of Lancang River[J]. *Water Power*, 2017, **43**(7): 92-95.
- [12] 刘恒, 刘九夫, 唐海行. 澜沧江流域(云南段)水资源开发利用现状及趋势分析[J]. *水科学进展*, 1998, **9**(1): 70-76.
- Liu H, Liu J F, Tang H X. Present and future of water resources development in Lancang River basin in Yunnan Province[J]. *Advances in Water Science*, 1998, **9**(1): 70-76.
- [13] 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, (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]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, (S1): 577-581.
- [14] 巴重振, 李爱军, 潘瑛, 等. 澜沧江梯级水电站库区水体富营养化研究[J]. *环境科学导刊*, 2015, **34**(1): 15-19.
- Ba C Z, Li A J, Pan Y, *et al.* Study on the eutrophication state of the reservoirs of cascade hydropower plants of Lancang River[J]. *Environmental Science Survey*, 2015, **34**(1): 15-19.
- [15] 张继来. 澜沧江中下游水沙和鱼中重金属分布及其生态风险评价[D]. 昆明: 云南大学, 2015. 23-25.
- [16] 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. 525-644.
- [17] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [18] 巴重振, 李爱军, 潘瑛, 等. 澜沧江梯级水电站库区水环境时空差异性研究[J]. *环境科学导刊*, 2015, **34**(2): 35-40, 55.
- Ba C Z, Li A J, Pan Y, *et al.* Study on the spatiotemporal differences in the reservoir of cascade hydropower of Lancang River[J]. *Environmental Science Survey*, 2015, **34**(2): 35-40, 55.
- [19] 贾志翔. 大朝山水电站库区污染成因及防治对策[J]. *环境科学导刊*, 2011, **30**(6): 37-39.
- Jia Z X. Origin analysis and countermeasures of water pollution in reservoir area of Dachao Shan hydropower station[J]. *Environmental Science Survey*, 2011, **30**(6): 37-39.
- [20] 陈帆. 澜沧江流域水质现状及影响分析[J]. *环境科学导刊*, 1999, **18**(1): 47-49.
- Chen F. Status quo and influence of water quality in the basin of Lancang River[J]. *Environmental Science Survey*, 1999, **18**(1): 47-49.
- [21] Diehl S, Berger S, Ptacnik R, *et al.* Phytoplankton, light, and nutrients in a gradient of mixing depths: field experiments[J]. *Ecology*, 2002, **83**(2): 399-411.
- [22] 周艳蕾, 张传松, 石晓勇, 等. 黄渤海海水中叶绿素 a 的分布特征及其环境影响因素[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4259-4265.
- Zhou Y L, Zhang C S, Shi X Y, *et al.* Distribution characteristics of chlorophyll *a* and its influencing environmental factors in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4259-4265.
- [23] 卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(5): 698-706.
- Lu J S, Li Z L. Seasonal effects of thermal stratification on the water quality of deep reservoirs: a case study of Heihe reservoir, Xi'an City[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(5): 698-706.
- [24] 朱媛媛, 刘琰, 周北海, 等. 丹江口水库流域氮素时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(2): 50-57.
- Zhu Y Y, Liu Y, Zhou B H, *et al.* The temporal and spatial distribution of nitrogen in Danjiangkou reservoir watershed[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(2): 50-57.
- [25] 胡春华, 周文斌, 钟夏莲, 等. 江西省万安水库对氮、磷营养盐的滞留效应[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(1): 35-39.
- Hu C H, Zhou W B, Zhong X L, *et al.* Retention of nitrogen and phosphorus in Wan'an reservoir, Jiangxi Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(1): 35-39.
- [26] Howarth R W, Billen G, Swaney D, *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences[J]. *Biogeochemistry*, 1996, **35**(1): 75-139.
- [27] David M B, Wall L G, Royer T V, *et al.* Denitrification and the nitrogen budget of a reservoir in an agricultural landscape[J]. *Ecological Applications*, 2006, **16**(6): 2177-2190.
- [28] 向鹏, 王仕禄, 卢玮琦, 等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究[J]. *地球与环境*, 2016, **44**(5): 492-501.
- Xiang P, Wang S L, Lu W Q, *et al.* Distribution and retention efficiency of nitrogen and phosphorus in cascade reservoirs in Wujiang River Basin[J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(5): 492-501.
- [29] 张春华, 黄廷林, 方开凯, 等. 周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4187-4193.
- Zhang C H, Huang T L, Fang K K, *et al.* Analysis of driving

- factors on the nitrogen decrease in the early stage of the thermal stratification in main area of Zhoucun Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4187-4193.
- [30] 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.
- [31] 李丽娟. 澜沧江水环境质量评价与成因分析[J]. *地理学报*, 1999, **54**(S1): 127-132.
- Li L J. Water quality status assessment and causal analysis of Lancang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, **54**(S1): 127-132.
- [32] 高天明, 沈镭, 刘立涛, 等. 橡胶种植对景洪市经济社会和生态环境的影响[J]. *资源科学*, 2012, **34**(7): 1200-1206.
- Gao T M, Shen L, Liu L T, *et al.* The impacts of rubber plantation on society, economy and eco-environment in Jinghong City[J]. *Resources Science*, 2012, **34**(7): 1200-1206.
- [33] 顾磊. 威远江、小黑江流域面源污染调查[J]. *环境科学导刊*, 2007, **26**(1): 62-63.
- Gu L. Investigation of non-point source pollution in Wei yuanjiang River and Xiaoheijiang River [J]. *Environmental Science Survey*, 2007, **26**(1): 62-63.
- [34] 杨树, 杨开菊. 云南普洱山区性河流梯级水电站整体开发研究[J]. *人民长江*, 2011, **42**(5): 15-17.
- Yang S, Yang K J. Study on integral development of cascade hydropower stations in mountainous basin of Pu'er City in Yunnan province[J]. *Yangtze River*, 2011, **42**(5): 15-17.
- [35] Liu S F, Forrest J. The role and position of Grey system theory in science development[J]. *Journal of Grey System*, 1997, **9**(4): 351-356.
- [36] 吉灯才. 云南糯扎渡水库水质预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004. 26-29.
- [37] 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. 30-34.
- [38] 杨丽静. 西双版纳勐仑地区不同类型小流域氮流失规律分析[D]. 西双版纳: 中国科学院研究生院(西双版纳热带植物园), 2009. 15-30.
- [39] Maavara T, Parsons C T, Ridenour C, *et al.* Global phosphorus retention by river damming [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2015, **112**(51): 15603-15608.
- [40] 鲍林林, 李叙勇, 苏静君. 筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养化特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(14): 4663-4670.
- Bao L L, Li X Y, Su J J. Phosphorus cycling and the associated ecological effects of eutrophication in dam-regulated rivers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(14): 4663-4670.
- [41] Jossette G, Leporeq B, Sanchez N, *et al.* Biogeochemical mass-balances (C,N,P,Si) in three large reservoirs of the Seine basin (France)[J]. *Biogeochemistry*, 1999, **47**(2): 119-146.
- [42] 冉祥滨, 于志刚, 姚庆祯, 等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 614-622.
- Ran X B, Yu Z G, Yao Q Z, *et al.* Advances in nutrient retention of dams on river[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 614-622.
- [43] Zhou J J, Zhang M, Lu P Y. The effect of dams on phosphorus in the middle and lower Yangtze river [J]. *Water Resources Research*, 2013, **49**(6): 3659-3669.
- [44] 李亦秋, 鲁春霞, 邓欧, 等. 猫跳河流域梯级开发的生态效应区域响应[J]. *资源科学*, 2011, **33**(8): 1454-1461.
- Li Y Q, Lu C X, Deng O, *et al.* Regional response of ecological effects of cascade reservoirs development within the Maotiaohe River watershed[J]. *Resources Science*, 2011, **33**(8): 1454-1461.
- [45] 黄文典. 河流悬移质对污染物吸附及生物降解影响试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2005. 8-39.
- [46] 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.
- [47] 郭鹏程, 王沛芳, 贾锁宝. 河流内源磷释放环境影响因子研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, **32**(3): 117-121.
- Guo P C, Wang P F, Jia S B. Research progress of the environmental impact factors of internal phosphorus loading release in river systems [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, **32**(3): 117-121.
- [48] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1441-1450.
- [49] 阮晓红, 石晓丹, 赵振华, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(5): 556-562.
- Ruan X H, Shi X D, Zhao Z H, *et al.* Correlation between chlorophyll-a concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(5): 556-562.
- [50] 刘流. 三峡水库支流库湾水温分层及其对水华的影响[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012. 5-29.
- [51] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- Chen Y, Yang Z J, Huang Y L, *et al.* Research on the influence of mixing layer depth on algal growth [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- [52] Brown C W, Esaias W E, Thompson A M. Predicting phytoplankton composition from space—using the ratio of euphotic depth to mixed-layer depth: an evaluation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **53**(3): 172-176.
- [53] Doyon P, Klein B, Ingram R G, *et al.* Influence of wind mixing and upper-layer stratification on phytoplankton biomass in the Gulf of St. Lawrence [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, **47**(3-4): 415-433.
- [54] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1477-1485.
- Xia P H, Lin T, Li C X, *et al.* Features of the water column stratification and the response of water quality of Hongfeng reservoir in Guizhou, China[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(9): 1477-1485.
- [55] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- Zhang L, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a, and their relationship in Pengxi River backwater area, Three Gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- [56] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 7-12.

- Zhang S, Li C M, Fu Y C, *et al.* Trophic states and nutrient output of tributaries bay in Three Gorges reservoir after impoundment[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(1): 7-12.
- [57] 王敬富, 陈敬安, 杨永琼, 等. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(8): 845-851.
- Wang J F, Chen J A, Yang Y Q, *et al.* Physical and chemical characteristics of water in Lake Hongfeng during the disappearance of seasonal stratification [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(8): 845-851.
- [58] Liu L, Liu D F, Johnson D M, *et al.* Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges reservoir: implications for management [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2121-2130.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkn.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkn@rcees.ac.cn;网址:www.hjkn.ac.cn

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)