

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



2020

Vol.41 No.5  
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 ..... 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 ..... 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 ..... 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 ..... 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铎鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中元素分布特征及来源解析 ..... 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 ..... 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 ..... 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素分析 ..... 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM<sub>2.5</sub> 关联关系时空变异特征分析 ..... 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 ..... 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 ..... 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 ..... 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 ..... 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 ..... 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 ..... 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 ..... 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 ..... 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 ..... 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 ..... 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 ..... 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 ..... 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 ..... 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 ..... 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 ..... 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 ..... 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 ..... 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 ..... 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 ..... 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系 ..... 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 ..... 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 ..... 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 ..... 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> 体系降解苯甲酸 ..... 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 ..... 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 ..... 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮 ..... 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 ..... 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 ..... 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 ..... 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 ..... 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 ..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 ..... 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 ..... 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 ..... 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 ..... 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 ..... 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 ..... 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N<sub>2</sub>O 相关功能微生物的影响 ..... 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N<sub>2</sub>O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 ..... 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,阎伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 ..... 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 ..... 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 ..... 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 ..... 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209,2263,2309)

# 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应

史鹏程<sup>1,2</sup>, 朱广伟<sup>1\*</sup>, 杨文斌<sup>2</sup>, 许海<sup>1</sup>, 朱梦圆<sup>1</sup>, 刘明亮<sup>3</sup>, 虞左明<sup>3</sup>, 吴志旭<sup>4</sup>, 郑文婷<sup>4</sup>, 王裕成<sup>4</sup>, 笪文怡<sup>1</sup>, 胡林娜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241003; 3. 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310000; 4. 杭州市生态环境局淳安分局, 杭州 311700)

**摘要:** 为分析降雨入流影响下水库悬浮颗粒物的时空分布及沉降特征, 在华东地区最大水库新安江水库(千岛湖)的河流区、过渡区和湖泊区(分别对应街口、小金山和大坝这3个水质断面)布设水体沉降物自动捕获器和水质高频自动监测浮标, 结合定期水样采集分析, 开展了为期1 a的水体颗粒物沉降通量及其营养盐效应观测研究。结果发现, 水库水体浊度、悬浮颗粒物浓度(SS)、颗粒物沉降通量与降雨量、入库流量极显著相关( $P < 0.01$ ), 其中浊度与SS的相关性最好( $R^2 = 0.86$ ); 在降雨较多的春夏季, SS空间差异明显(河流区 > 过渡区 > 湖泊区), 而秋冬空间差异不大; 颗粒物沉降通量具有明显的时空异质性, 空间上河流区 > 过渡区 > 湖泊区[分别为  $27.82$ 、 $4.34$  和  $0.26 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ], 时间上春夏季 > 秋冬季; 结合全湖60个点位四季悬浮物浓度调查估算, 全库颗粒物沉降通量为  $2.57 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中春夏季沉降通量高于秋冬季; 街口、小金山和大坝捕获沉降物中颗粒态氮含量(PN)分别为  $6812$ 、 $15886$  和  $21986 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 磷含量(PP)分别为  $2545$ 、 $3269$  和  $3077 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 自上游向下递增。统计分析表明, 中雨以上降雨过程与河流区浊度增量呈指数相关( $R^2 = 0.81$ ), 持续强降雨则对浊度有累加效应, 但对过渡区影响不大; SS浓度自河流入库区至下游大坝坝距增加呈较好的指数下降特征( $R^2 = 0.84$ ), 降雨较多的春夏季更为明显。结果还表明, 新安江水库年均库容淤损率为  $0.07\%$ , 与全国其它大型水库相比较低, 但是坝前沉降物营养盐含量较高, 具有一定的内源释放风险; 管理上应加强流域水土保持治理, 降低降雨冲刷对水质的影响; 同时关注坝前高营养沉积物的内源释放对水质的影响。

**关键词:** 悬浮颗粒物; 沉降物捕获器; 高频监测浮标; 沉降通量; 新安江水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2137-12 DOI: 10.13227/j.hjlx.201910053

## Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China

SHI Peng-cheng<sup>1,2</sup>, ZHU Guang-wei<sup>1\*</sup>, YANG Wen-bin<sup>2</sup>, XU Hai<sup>1</sup>, ZHU Meng-yuan<sup>1</sup>, LIU Ming-liang<sup>3</sup>, YU Zuo-ming<sup>3</sup>, WU Zhi-xu<sup>4</sup>, ZHENG Wen-ting<sup>4</sup>, WANG Yu-cheng<sup>4</sup>, DA Wen-yi<sup>1</sup>, HU Lin-na<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Environment and Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 3. Hangzhou Institute of Environmental Sciences, Hangzhou 310000, China; 4. Hangzhou Bureau of Ecology and Environment Chun'an Branch, Hangzhou 311700, China)

**Abstract:** To analyze the spatial-temporal distribution and sedimentation characteristics of suspended solids in reservoirs, high-frequency monitoring of a sediment trap and buoy, combined with three-dimensional water sampling, was conducted and analyzed in Xin'anjiang Reservoir for a year. The results showed that the turbidity data of the buoy has significant correlation with rainfall, inflow, and suspended solids (SS), particularly for SS ( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.86$ ). There is an obvious spatial difference in SS between spring and summer, when the rainfall season occurs (river area > transition area > lake area). However, there is little difference in SS concentration between autumn and winter. There is a spatial trend of river area > transition area > lake area (with rates of  $27.82$ ,  $4.34$ , and  $0.26 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , respectively), and a temporal trend of spring and summer > autumn and winter. The sedimentation flux of the whole lake is  $2.57 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  combined with the investigation of the four-season SS at 60 points across the whole lake, and the settlement flux in spring and summer is higher than that in autumn and winter. The contents of particulate nitrogen (PN) in JK, XJS, and DB were  $6812$ ,  $15886$ , and  $21986 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and the particulate phosphorus (PP) contents were  $2545$ ,  $3269$ , and  $3077 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Statistical analysis shows that there is a good exponential relationship between moderate rainfall and turbidity growth rate in the river area of the reservoir ( $R^2 = 0.81$ ). Moreover, the continuous heavy rainfall affects turbidity in river area, but has little effect on the transition area. The concentration of SS has a good exponential decay with distance from the river to the dam ( $R^2$

收稿日期: 2019-10-09; 修订日期: 2019-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830757); 中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW036); 前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008); 南京地理与湖泊研究所“一三五”项目(NIGLAS2017GH04)

作者简介: 史鹏程(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水库生态环境, E-mail: spc1994@126.com

\* 通信作者, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

=0.84), especially in spring and summer. Research shows that the average annual deposition rate in Xin'anjiang Reservoir is 0.07%, lower than other large reservoirs in the country; however, there are certain risks in front of the dam because the nutrient sediments are high. The results suggest that reservoir managers should pay attention to water and soil conservation in the watershed to reduce the impact of rainfall on reservoir water quality. Meanwhile, the potential nutrient internal release risk in the downstream area before the dam should be considered.

**Key words:** suspended solids; sediment trap; high-frequency monitor buoy; sedimentation flux; Xin'anjiang Reservoir

水库是由人工筑坝形成的水体,水库的修建改变了天然河流的水流运动状态,由于水位升高,过水面积加大,流速减缓,从而使挟沙能力降低最终必然会导致库内发生淤积<sup>[1]</sup>. 水库淤积会导致兴利库容和防洪库容不断减少,影响水库的综合效益<sup>[2]</sup>,据不完全统计,全球每年由于泥沙淤积造成的水库总库容损失达 0.5%~1%,我国则为 2.3%<sup>[3,4]</sup>. 其次,由于泥沙表面往往吸附大量污染物和有机质,库内泥沙淤积往往会导致这些物质逐渐积累,对水生生物甚至人类健康可能会有危害<sup>[1]</sup>,这些污染物通常以悬浮颗粒物(SS)为载体. 水库 SS 是由湍流作用形成的絮凝聚合物,分为无机和有机两种<sup>[5]</sup>,SS 浓度的增加还会导致水体光穿透性降低和温度变化,影响水体浊度(Turb)及透明度(SD)<sup>[6]</sup>;此外,附着在 SS 上的重金属和营养盐释放会对鱼类及浮游植物生长有影响<sup>[7,8]</sup>. 水库 SS 与降雨、风速、水位和水中营养盐水平均有密切关系<sup>[9,10]</sup>.

水体 SS 与水体 Turb 关系紧密,故可以用高频且连续的水质 Turb 浮标测定来表征<sup>[11]</sup>. 目前,水质高频监测浮标的应用越来越广泛,特别是在海洋监测中<sup>[12-14]</sup>. 通过构建自动监测浮标参数与水体 SS、营养盐等之间的关系,水质高频监测浮标可以对湖泊和水库实施实时 SS、总磷(TP)等的高频和分层过程监测<sup>[15,16]</sup>,具有即时性、连续性和低成本等优点.

河流 SS 进入水库后,随着流速下降和水深增加,SS 的沉降作用加强. 颗粒物沉降通量( $F_{ss}$ )是用来表征悬浮物的沉降强度的重要指标. 目前关于水库悬浮物沉降通量的研究多采用同位素计年法<sup>[17,18]</sup>,然而该方法价格昂贵,监测频次低,1次或几次采样往往具有很大的误差. 沉降物捕获器最早应用于海洋中,如今在湖泊中的应用技术也已成熟,多用于沉降通量的计算以及再悬浮的研究<sup>[19-21]</sup>,但在水库中的应用较少.

新安江水库是我国华东地区最大的人工淡水水体,属典型的深水山谷型水库,流域植被覆盖率较高<sup>[22]</sup>,库区水体总悬浮颗粒物呈现明显的时空差异<sup>[23,24]</sup>,水库中 SS 主要是由雨季降雨从上游河道带入. 新安江水库 SS 对水质影响甚大,但是目前对其时空分布、沉降特征缺乏了解,对该水库泥沙过程及其水质效应的了解更少. 因此,本文首次在新安江水库

投放沉降物自动捕获器,结合水库投放的浊度等水质高频监测浮标,以及四季全库悬浮颗粒物及营养盐调查,构建了新安江水库 Turb-SS- $F_{ss}$  相关关系,结合沉降物捕获器分析新安江水库悬浮颗粒物沿程变化及沉降特征,并估算全湖沉降通量,分析其影响因素,以期为新安江水库的水质管理及类似水库的生态监测方法和水库淤积状况评估提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

新安江水库(也称“千岛湖”)位于浙江西部与安徽南部交界的淳安境内(29°22'~29°50' N; 118°36'~119°14' E),是 1959 年新安江水电站大坝建成蓄水后形成的深水水库. 水库地处亚热带季风气候区,温暖湿润,雨量充沛,四季分明,年均气温约为 17℃,年均降水量为 1636.5 mm<sup>[25]</sup>. 水库水面面积 580 km<sup>2</sup>(水位为 108 m 时),流域面积超过 10 000 km<sup>2</sup>,水库库容为 178 亿 m<sup>3</sup>,平均水深 31 m,最大水深 100 m<sup>[26]</sup>. 新安江是最主要的入库河流,约占入库径流的 2/3,水库湖区径流主要集中在 5~9 月,约占全年径流的 77%<sup>[27]</sup>.

### 1.2 样品采集与分析

本次采样点位如图 1 所示,自上游向下分别在水库河流区(街口)、过渡区(小金山)和湖泊区(大坝)3 个国控断面布设沉降物捕获器,型号为 TECHNICAP-PPS(G). 沉降物捕获器投放于泥上约 10 m 处,依靠重锤和浮球使其保持垂直状态,沉降物被捕获后沉降入底端收集桶中,预先设定程序让收集桶每 2 d 自动更换到下一个,一共 12 个,转完自动停止等待回收再设定程序;捕获器捕获口径为 25 cm,底端收集桶的容量为 250 mL. 街口(JK)和小金山(XJS)沉降物捕获器每个月回收 1 次,因此每月只能收集 12 个样品;大坝(DB)捕获器底端收集桶的更换时间设为 5 d,每 2 个月回收投放一次,一次收集 12 个样品.

JK、XJS 和 DB 断面布设有 YSI 水质自动监测浮标,每 4 h 进行水体 Turb、pH、溶解氧(DO)、浮游植物叶绿素 a(Chla)等水质指标的剖面监测. 其中 0~20 m 水深每 0.5 m 采集一个数据,10 m 以下则每 2 m 采集一个数据. 本文 Turb 分析时,使用表层

0.5 ~ 5 m 水层的平均值进行分析。

为分析  $F_{SS}$  与水质的关系,同时开展了3种人工采样:①每月定期对包括 JK、XJS 及 DB 等国控断面的新安江水库 9 个省控点位进行水样采集(图 1);②JK 及 XJS 断面每 3 d 进行一次人工水样采集;③每个季度对全湖 60 个采样点进行悬浮物浓度及水质采样调查(图 1)。采样时,采取水下 1、3 和 5 m 的混合水,水样采集后,现场用 Whatman GF/F 滤膜进行悬浮颗粒物(SS)的过滤,滤后水和原水也立刻冷藏,当天送回实验室冷冻,然后每月 1 批进行 SS 及主要营养盐分析。

采集水样的水质指标测定参考文献[28]。其中总氮(TN)采取碱性过硫酸钾消解、紫外(波长 210 nm)分光光度法测定;总磷(TP)采取碱性过硫酸钾消解、钼锑抗显色分光光度法(波长 700 nm)测定;溶解性总氮(DTN)和溶解性总磷(DTP)为 Whatman GF/F 滤膜过滤后水样中的 TN 和 TP;硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、亚硝态氮( $\text{NO}_2^-$ -N)、氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)和磷酸根( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)则用荷兰 Skalar 流动注射分析仪自动比色测定 GF/F 滤膜滤后水样。水样在 GF/F 滤膜过滤后(滤膜事先烘干、称重),采取 105℃ 烘干重量法测出 SS,然后用 550℃ 马弗炉灼烧后再次冷却称重,计算出剩余灰分则为无机悬浮颗粒物(ISS)重量,SS 与 ISS 之差则为有机悬浮颗粒物(OSS)重量。沉降桶中颗粒物的估算时,将沉降桶中的水泥混合,分取一定体积的混合样,按照 SS、ISS 和 OSS 的测定方法进行测定,然后按照体积估算出单位时间内捕获器收集到的颗粒物总量。

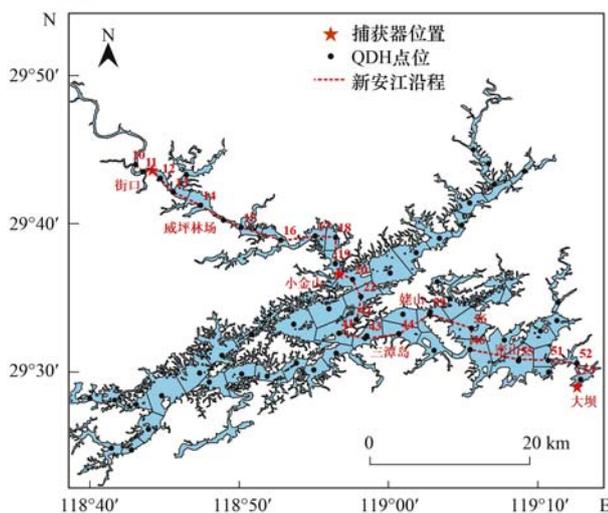


图 1 新安江水库采样点位及沉降物捕获器位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites and sediment trap in Xin'anjiang Reservoir

### 1.3 沉降速率及通量的计算

沉降物沉降速率通过公式(1)计算得出:

$$F_{SS} = \frac{M \cdot V}{1000 \cdot D \cdot S} \quad (1)$$

式中, $F_{SS}$ 为沉降物沉降速率 [ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ]; $M$ 为沉降物 SS 的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $V$ 为底端收集桶体积 (L); $D$ 为每个瓶子收集的天数(d,其中街口和小金山为 2 d,大坝为 5 d); $S$ 为沉降物捕获器收集上口的有效面积( $\text{m}^2$ )。无机颗粒物沉降速率( $F_{ISS}$ )计算方法与之相同,只需将  $M$  换为 ISS 的浓度。

利用 ArcGIS 10.2 根据全湖 60 个采样点位将新安江水库分为 60 个不同的泰森多边形(图 1),并计算出每个区域面积,全湖 60 个区域全年沉降通量通过公式(2)计算:

$$F_{TSS} = \sum_{n=1}^{365} \frac{T_n \cdot A \cdot r \cdot B \cdot S}{10^6} \quad (2)$$

式中, $F_{TSS}$ 为 1 个区域全年沉降通量(t); $T_n$ 为街口第  $n$  天的浊度(NTU); $r$ 为 4 季全湖 60 个点位采样 SS 与街口 SS 的比率(春夏秋冬各不相同); $S$ 为该区域面积( $\text{m}^2$ ); $A$ 为 Turb 和 SS 的转换系数; $B$ 为 SS 和  $F_{SS}$ 的转换系数,由二者的相关分析获得。最后将 60 个点位沉降通量相加得出全湖 1 a 总沉降通量  $F_T$ 。

将水库新安江沿程点位连接起来<sup>[29]</sup>,以 10 号点为起点,计算得出每个点位离起点的距离,以探究悬浮颗粒物在新安江沿程的沉降特征。

### 1.4 气象水文数据获取与处理

本文使用的千岛湖气象水文数据均在淳安县环保局千岛湖水质监测预警系统数据管理平台下载获得。入库流量使用屯溪和渔梁水文站数据叠加得出。

数据图表及统计分析主要由 Excel 2016、Origin 2018、ArcGIS 10.2、R 3.6.0 和 SPSS 23.0 等统计和绘图软件完成;相关关系用 Pearson 相关系数( $P$ )表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨量、Turb 及 SS 的周年变化特征

图 2 展示了 2018 年 4 月 1 日至 2019 年 3 月 31 日这 1 a 时间内街口日降雨量、入库流量、SS、ISS 和 Turb 的同步数据。由图可知,降雨量和入库流量具有基本同步的峰值,而 SS、ISS 与 Turb 基本上是同步的,但是其峰值与降雨量存在着 1 ~ 2 d 的滞后,这在降雨量较多的春夏两季尤为明显。这说明降雨过后,从上游河道带来大量的悬浮颗粒物,是导致水体浊度变高的根本驱动。图 2(a)中虚线分别为小雨 (< 10 mm)、中雨 (10 ~ 25 mm)、大雨 (25 ~ 50 mm)、暴雨 (> 50 mm) 的分界线,可以看到入库流量在中雨及以上降雨时响应更好,这可能是由于小雨对河道流速等影响不大,浊度效应不明显。表 1 为 1 a 中所有中雨以上降雨与 SS、ISS 和浊度的相关性

表 1 降雨量与 SS 的 Pearson 相关性<sup>1)</sup>

Table 1 Pearson correlation between rainfall and SS

因子	降雨量	入库流量	浊度	SS	ISS	OSS
降雨量	1	0.638 **	0.501 **	0.390 *	0.435 **	-0.019
入库流量	0.638 **	1	0.607 **	0.729 **	0.789 **	0.043

1) \* 表示显著相关( $P < 0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ )

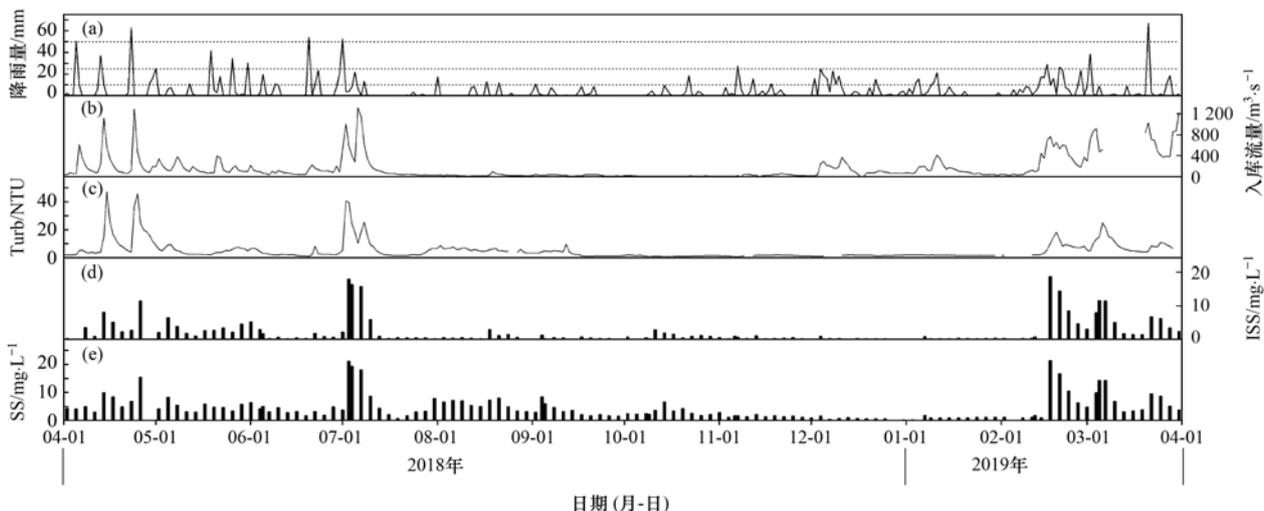


图 2 街口降雨量、入库流量、SS 和浊度逐日变化

Fig. 2 Daily changes in rainfall, inflow, SS, and turbidity in JK

分析,其中 SS 与降雨量呈显著相关( $P < 0.05$ ),ISS 则有极显著相关( $P < 0.01$ ),说明降雨对 ISS 的影响更显著,进而影响水体浊度.

2.2 水体 SS 时空差异

以 2017 年 12 月、2018 年 4 月、2018 年 8 月和

2018 年 10 月的冬、春、夏和秋的四次全湖 60 个点位水质调查数据分析悬浮颗粒物全湖分布特征以及季节差异(图 3),其中春、夏、秋和冬这四季 SS 平均浓度为  $(5.71 \pm 6.46)$ 、 $(5.17 \pm 2.27)$ 、 $(1.18 \pm 0.55)$ 和  $(1.34 \pm 0.58) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .表 2 为采样前 5 d 总降雨量,可以看到在

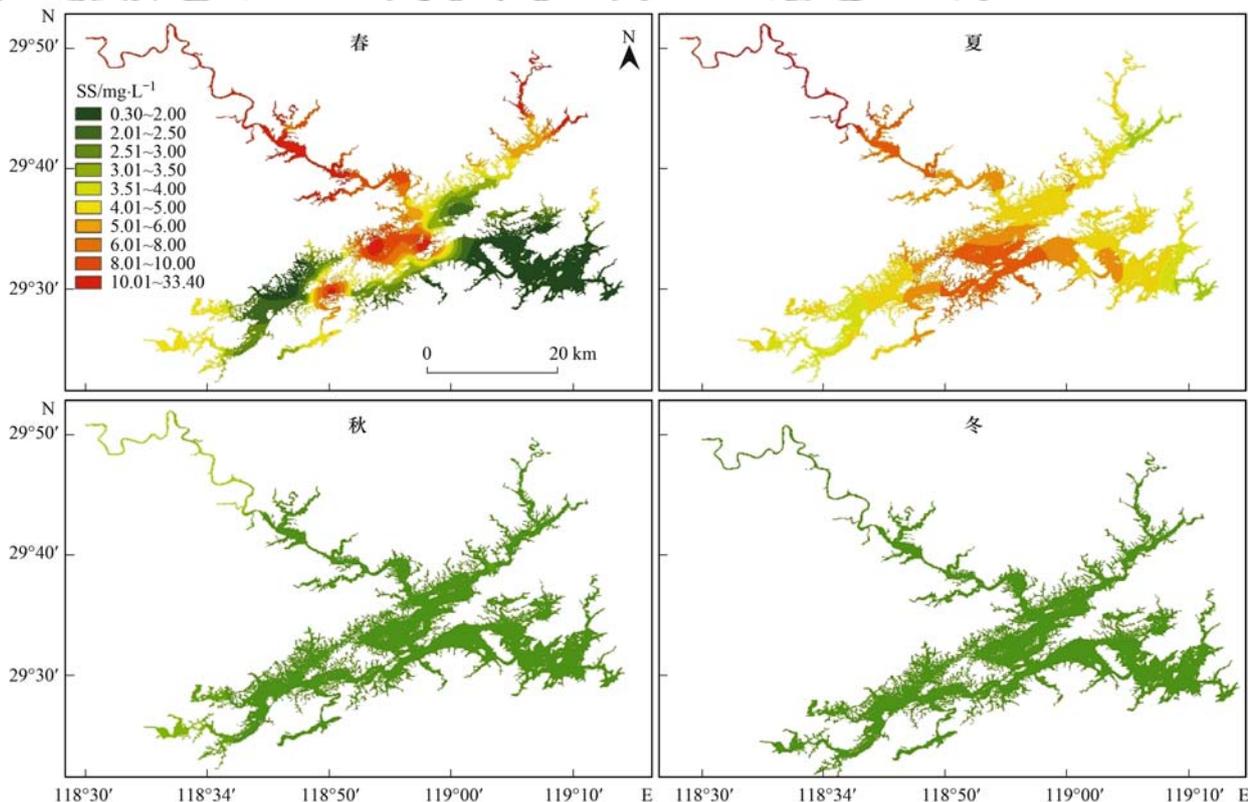


图 3 全湖水体 SS 的四季空间插值

Fig. 3 Spatial distribution of SS in Xin'anjiang Reservoir over four seasons

降雨之后的春季 SS 浓度在全湖各个区域的差异更为明显;夏季虽然没有降雨,但是全库各湖区 SS 也有差异,与春季相同,总体呈现河流区 > 过渡区 > 湖泊区的趋势;而秋冬两季 SS 浓度差异则不明显.

表 2 采样前 5 d 总降雨量

季节	春	夏	秋	冬
降雨量/mm	65.4	0	15.4	41.5

### 2.3 捕获器监测 $F_{SS}$ 时空差异

街口、小金山和大坝这 3 个国控断面 1 a (2018 年 4 月 ~ 2019 年 4 月) 悬浮颗粒物沉降通量变化如图 4 所示. 其中街口、小金山和大坝 SS 年平均沉降速率分别为 27.82、4.34 和 0.26  $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ; ISS 年平均沉降速率分别为 20.97、3.75 和 0.19  $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ . 可以看出小金山和大坝 SS 沉降速率与街口分别有着 6 倍和 106 倍的差距,说明经过河道和过渡区的沉降,悬浮颗粒物到达坝前时仅仅只有入库河道的 1%. 4 个季度街口断面的  $F_{SS}$  分别为 47.39、50.33、8.88 和 12.08  $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ;小金山断面的  $F_{SS}$

分别为 0.81、7.18、0.73 和 10.05  $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ;大坝断面的  $F_{SS}$  分别为 0.37、0.17、0.16 和 0.01  $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ . 四季基本上呈现春夏 > 秋冬的趋势,这与降雨的季节性差异有着相同的趋势.

### 2.4 $F_{SS}$ 与 SS 及 Turb 定量关系

图 5(a) 和 5(b) 为街口、小金山和大坝 3 个点  $F_{SS}$  与水体 SS、ISS 的关系,可以看到  $F_{SS}$  和 水体 SS 和 ISS 具有较好地相关性(表 3),说明水体 SS、ISS 可以较好地反映其沉降状况,具有一定的指示作用;图 5(c) 为水体 SS 与水质自动监测浮标获得的 Turb 之间的相关关系,同样地具有较好的拟合 ( $R^2 = 0.86$ ),说明水库中高频且连续的浮标 Turb 能在一定程度上反映水体 SS 的浓度.

表 3  $F_{SS}$  与水体 SS 各组分及 Turb 与 SS 的 Pearson 相关性<sup>1)</sup>

因子	Turb	SS	OSS	ISS
$F_{SS}$	0.691 **	0.742 **	0.220 **	0.773 **
SS	0.874 **	1	0.552 **	0.926 **

1) \* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )

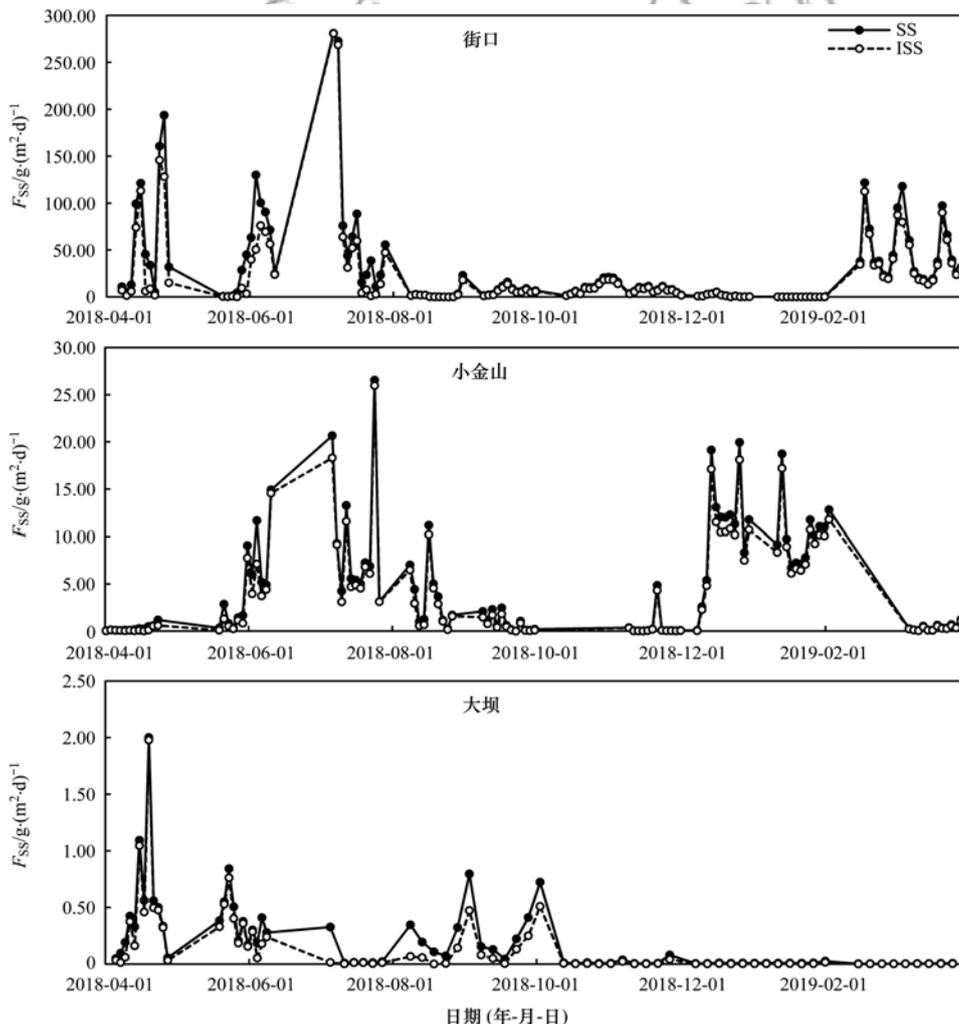


图 4 新安江水库 3 个沉降物捕获器获得的沉降通量年变化

Fig. 4 Time variation of sedimentation rate at three sampling sites in Xin'anjiang Reservoir

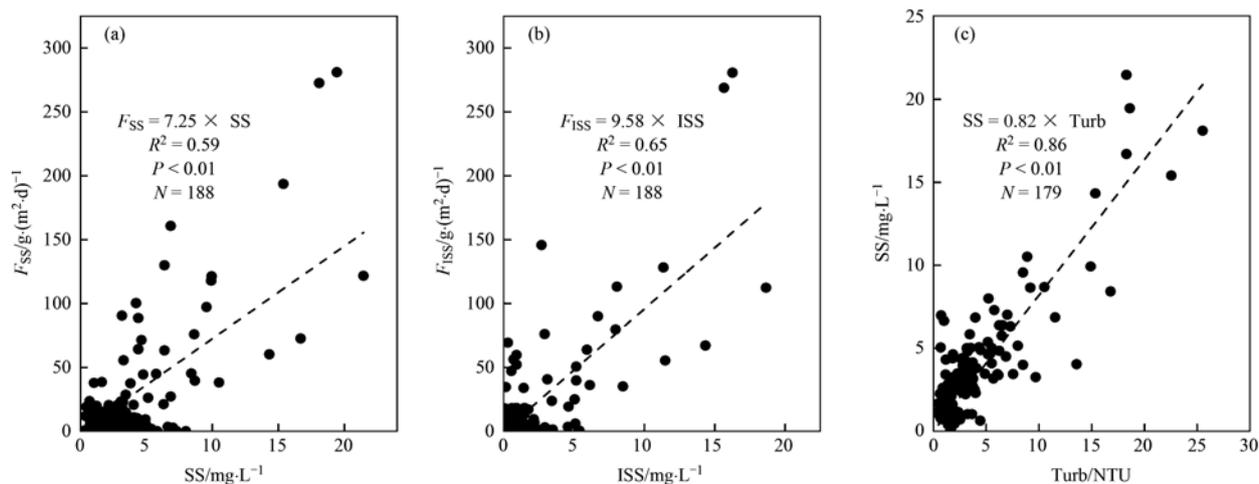


图5 沉降速率与SS及SS与浊度的关系

Fig. 5 Relationship between sedimentation rate and SS, and between SS and turbidity

## 2.5 全湖总沉降量估算

利用 ArcGIS 10.2 将新安江水库分为 60 个不同的泰森多边形(图 1),利用公式(2)分别计算出每个区域的沉降通量,再将所有 60 个点相加得出全湖沉降通量(表 4). 计算得出千岛湖全年的 SS 总沉降通量( $F_T$ )为  $2.57 \times 10^6$  t,其中夏季沉降通量最高,春季次之,冬季高于秋季,这可能是由于本年度冬季总降雨量(521.3 mm)远高于秋季(201.3 mm).

## 2.6 捕获沉降物中营养盐含量特征

图 6 为捕获器每月捕获的 SS 中颗粒态氮磷(PN 和 PP)含量,其中街口、小金山和大坝这 3 个点

表 4 全库悬浮颗粒物的四季总沉降量估算  $\times 10^6$  /t

Table 4 Seasonal sedimentation flux of whole reservoir

季节	sediments $\times 10^6$ /t			
	春	夏	秋	冬
$F_T$	0.73	0.94	0.35	0.55
全年	2.57			

全年 PN 平均值分别为 6 812、15 886 和 21 986  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相较于街口,其余两点分别增长了 133% 和 223%; PP 年均值为 2 545、3 269 和 3 077  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,小金山和大坝相较于街口分别增长了 28% 和 21%. 总体来说,颗粒态氮磷呈现从上游到下游递增的现象.

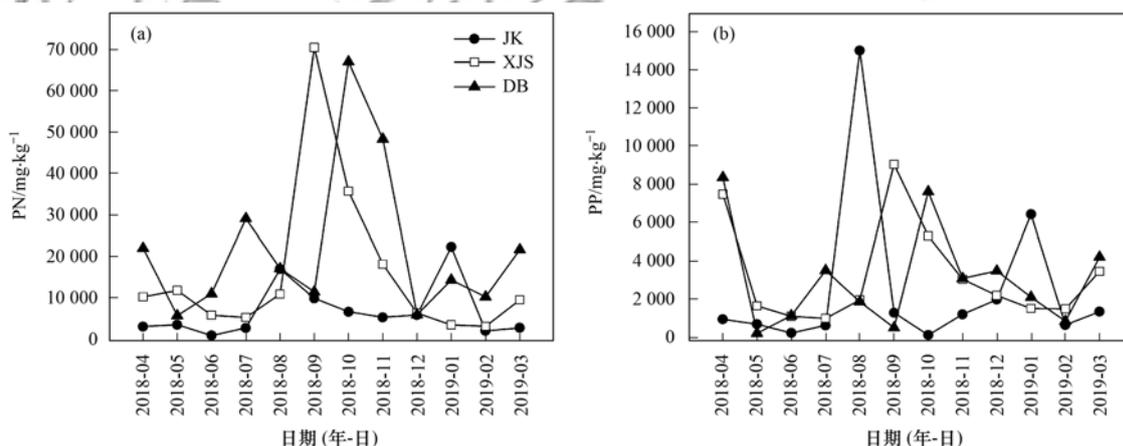


图6 捕获沉降物中PN和PP月均值变化

Fig. 6 Monthly mean changes in PN and PP in sediments

## 3 讨论

### 3.1 入库河道携沙的强降雨效应

图 7 展示了街口不同强度降雨后 1 d 内浊度增长率和降雨量之间的关系,增长率越大说明该强度降雨对浊度影响越大,可以看到降雨量和浊度增长率有着较好的指数关系( $R^2 = 0.81$ ),大雨及暴雨

(降雨量  $> 25$  mm)时浊度和降雨量的响应更加明显,这表明大雨及以上降雨会明显增加水体浊度,究其原因,主要是由于高强度降雨增加了水体 ISS 的浓度,进而导致水体浊度增高.

为了进一步分析暴雨事件对处于河道上游和下游的街口(JK)和小金山(XJS)浊度的影响,选取本年度 4 月、6 月和 7 月 3 次暴雨事件 7 d 后 JK 和

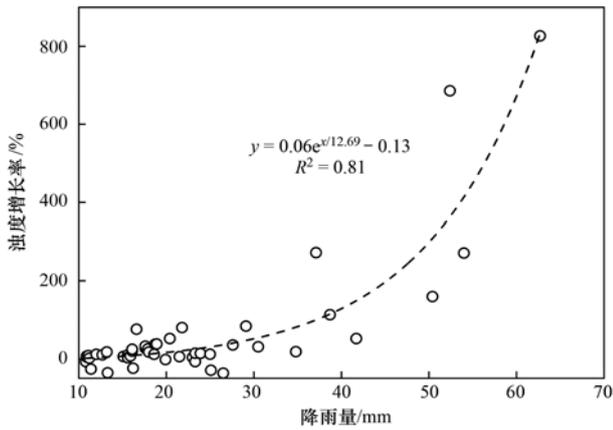


图7 中雨及以上降雨与浊度增长率的关系

Fig. 7 Relationship between rainfall and turbidity growth rate during moderate rain and above

XJS 浊度的变化[图 8(a)~8(c)]. 结果发现,暴雨过后 1~2 d,街口水体浊度会达到一个峰值,并且远远高于降雨当天,这与图 7 结果相同,峰值过后浊度立刻降低并逐渐恢复到降雨当天水平,这主要是由于强降雨会导致水体流速加快,携沙能力变强<sup>[30]</sup>,并最终导致街口浊度增长;而小金山浊度增幅明显变小,说明强降雨事件对处于过渡区的小金山水域浊度影响大为削减.图 8(d)为 2018 年 5 月 18 日~

6 月 7 日连续 3 次大雨事件后街口和小金山浊度的变化,连续的强降雨会导致街口浊度持续升高,而小金山的变化仍然有限.

新安江水库降雨量存在着显著的季节差异,3~7 月降雨量超过全年的 70%<sup>[31]</sup>,强降雨事件往往也集中在这几个月,这些强降雨带入大量的 ISS 进入水库河道,由于流速加快,导致水体携沙能力增强,最终导致街口表层浊度出现峰值;而由于千岛湖河道较长,降雨事件对水库过渡区表层浊度影响要小得多.此外,多次强降雨事件对浊度会有一个累积效应,值得关注.

### 3.2 水体 SS 浓度在水库中的沿程衰减特征

新安江水库周边共有 25 条河流,其中新安江是最大的入库河流,约占全部入库径流的 2/3<sup>[32]</sup>,故对悬浮颗粒物及其组分在新安江沿程上的衰减情况进行分析.选取街口上游约 3.5 km 的 10 号点为起点,将新安江沿程流经的点与 10 号点的距离计算出来,以四季水体中 SS、ISS 和 OSS 的平均值为纵坐标,做出其随距离的衰减图(图 9),图中竖线分别为小金山和三潭岛的位置,可以看作是河流区、过渡区和湖泊区的分界线.如图 9 所示,SS、ISS 和 OSS 随着距离呈现指数衰减,这说明 SS 的沉降速率在河流

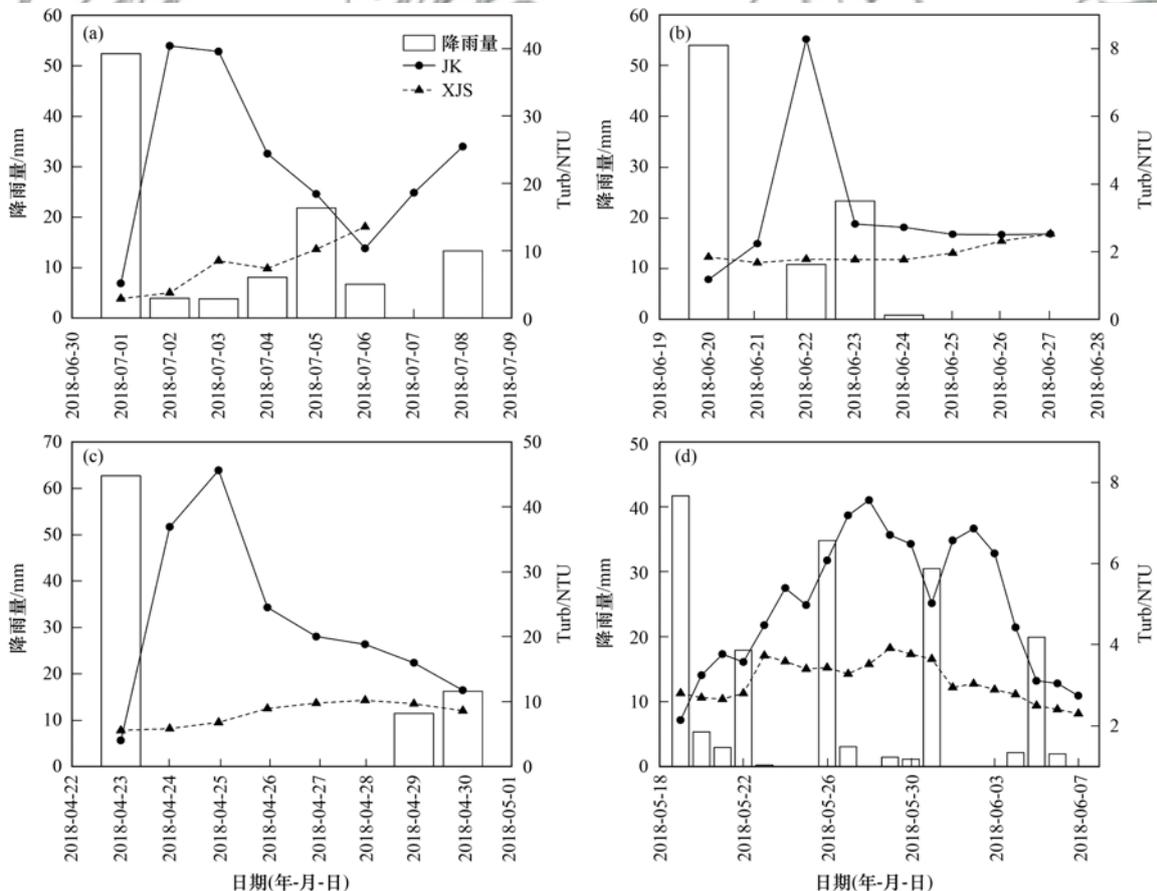


图 8 大雨及暴雨对街口和小金山浊度的影响

Fig. 8 Influence of heavy rain on turbidity in JK and XJS in Xin'anjiang Reservoir

区衰减最快,过渡区减慢,湖泊区最慢,这与水库不同区域流速不同有关.此外,悬浮颗粒物不同组分的沿程变化也不同,ISS的衰减主要在河流区,而OSS则呈现较为匀速的衰减过程.

水库中藻类生长对SS的沿程衰减规律产生影响.图9表明,处于过渡区的点位(如图9中42号点)往往OSS较高从而导致SS浓度增高,此外,水库过渡区OSS占比要高于河流区和湖泊区(表5).进一步对OSS比例在新安江沿程的变化情况(图10)进行分析发现,在春夏季降雨时期[图10(a)]SS有机比例在新安江沿程上有一个

逐渐增长并趋于稳定的过程,这主要是由于降雨过后上游河道带入大量ISS,并在水库河流区不断衰减,到了过渡区基本衰减到降雨前水平, OSS比例趋于稳定,并且由于过渡区流速减慢,悬浮物大量沉降,较高的透明度、足量的营养盐以及合适的温度为浮游植物提供了较好的生长环境,因此该区藻类生物量一般较高<sup>[33]</sup>,此时SS以有机藻颗粒为主;而在低温少雨的秋冬两季, OSS比例在新安江沿程基本上变化不大[图10(b)],并且以OSS为主(有机占比高达75%左右),但是其SS浓度不高(图3).

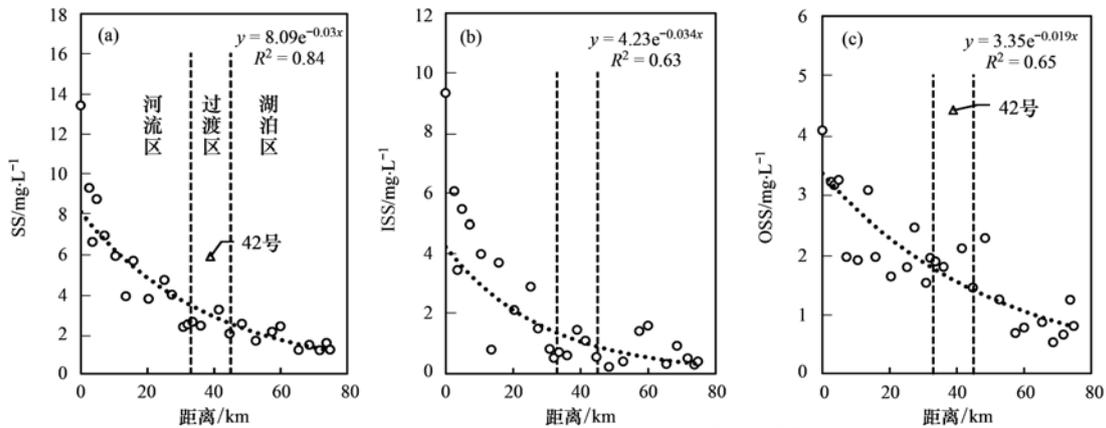


图9 悬浮颗粒物不同组分沿程变化

Fig. 9 Different components of SS changes along the path

表5 全库不同区域 OSS 占比

Table 5 Organic proportion of SS in different areas of the reservoir

水库区域	河流区	过渡区	湖泊区
OSS 占比/%	47.0	72.0	60.2

为178.4亿 $m^3$ <sup>[34,35]</sup>,年淤损量仅占库容的0.07%,远低于世界大型水库年平均淤损量(0.5%~1%)<sup>[2]</sup>;新安江水库于1959年建坝蓄水,至今已有60a<sup>[36]</sup>,故其库容淤积比率约为4.2%.这表明,新安江水库是属于淤损率较低的水库.

### 3.3 新安江水库的库容淤损估算

基于悬浮颗粒物和沉降速率计算全湖1a沉降通量为 $2.57 \times 10^6$  t,结合所采单位体积泥样重量计算出全湖年淤积体积为0.122亿 $m^3$ ,千岛湖总库容

新安江水库的淤损率与我国其它大型水库相比也是较低的.前人对我国大河流域水库淤积情况调查结果如表6所示,其中超大型水库平均淤积比率为16.03%,年均淤积比率为0.48%<sup>[37]</sup>.与我国内地

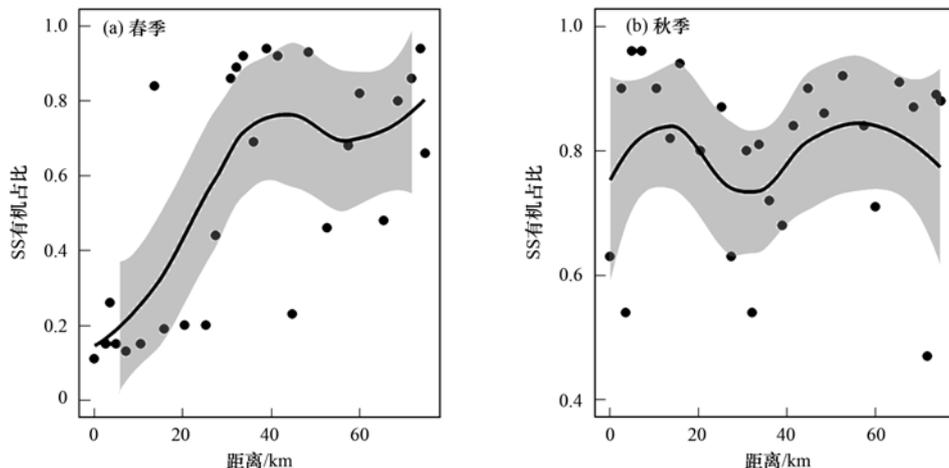


图10 悬浮颗粒物有机比例沿程变化

Fig. 10 Organic proportion of SS changes along the path

其它水库相比,千岛湖库容淤积和年均淤损量相对较低,与淮河流域水库类似. 新安江水库较高的流域

植被覆盖率以及良好的水土保持是保持较低淤损率的原因<sup>[19,38]</sup>.

表 6 我国内地水库淤积情况<sup>[37]</sup>/%

Table 6 Siltation of reservoirs in inland China/%

水库所在流域	松花江	辽河	海河	淮河	黄河	长江	珠江、西南诸河	部分内流河
库容淤积比率	10	24.7	14.5	1.7	22.3	10.5	15.9	18.5
库容年均淤积率	0.24	0.65	0.43	0.07	0.72	0.44	2.46	0.92

### 3.4 颗粒物沉降的营养盐效应

图 11 为全年沉降物中颗粒态氮(PN)和颗粒态磷(PP)质量浓度逐月变化的箱线图,颗粒态氮磷总体呈现上游到下游递增的现象(夏季由于藻类生物量较高,导致街口和小金山沉降物营养盐偏高). 这说明街口和小金山虽然沉降量远远大于大坝,但是其沉降物以 ISS 为主,而到了坝前虽然沉降总量很少,但是沉降物却以 OSS 为主,故大坝颗粒态氮磷的沉降高于街口和小金山.

悬浮颗粒物全年平均质量沉降速率存在着街口 > 小金山 > 大坝的现象,沉降物中 OSS 占比分别为 30.9%、24.8% 和 51.5%. 街口、小金山和大坝全年单位面积 PN 沉降量分别为 57.0、23.0 和 1.2  $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ; PP 为 21.0、4.8 和 0.2  $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 入库的颗粒态氮、磷主要沉降在街口至小金山的河道段. 虽然大坝年沉降量小于街口和小金山,但是其颗粒态氮磷占 SS 总沉降量比(PN 为 0.54%、1.36% 和 1.64%; PP 为 0.20%、0.28% 和 0.27%) 呈现坝前高于街口的现象. 这说明大坝沉降物中藻颗粒等富含氮、磷的颗粒组分占比高于街口和小金

山,随着藻颗粒等带入的 PN 和 PP 导致大坝沉积物中营养盐含量较高. 这与 Jia 等<sup>[39]</sup>的研究结果类似. 由于温跃层的存在,坝前深水区库底沉积物中的营养盐可能暂时较少释放到上层水体中<sup>[40-42]</sup>,但水质高氮磷组分的长期沉积,对水质影响的风险会越来越大,值得关注.

### 3.5 对水库治理的启示

流域植被保护、土地利用方式的管控,是新安江水库水质保护的关键环节. 流域植被覆盖率及降雨强度的季节变化导致新安江水库悬浮颗粒物的时空差异巨大,总体呈现春夏高、秋冬低; 河流区 > 过渡区 > 湖泊区的趋势. 中雨及以下降雨在前期无连续降雨的情况下,一般很难形成长距离的地表径流进入河流,故对水库河流区浊度的影响不大<sup>[43]</sup>; 但是暴雨和连续的大雨事件仍然会导致水体无机颗粒物迅速增长,甚至影响水库过渡区的浊度. 这也凸显了流域水土保持的重要性,较高流域植被覆盖程度不但能有效降低强降雨对水库浑浊度的影响,同样也能带来巨大的生态、经济和社会效益<sup>[44,45]</sup>. 因此,在管理上,实施严格的流域植被保护,强化“水土共

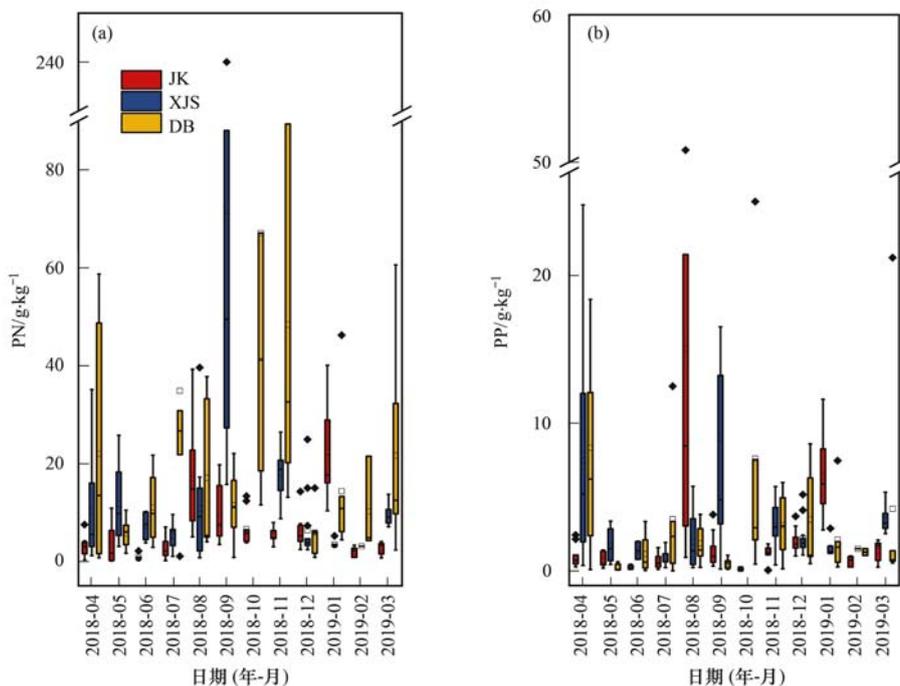


图 11 采样点沉降物颗粒态氮磷全年变化

Fig. 11 Annual variation in particulate nitrogen and phosphorus in sediment

治”,是保障新安江水库水质良好的根本。

水库水体物理环境的变化及其引发的藻类效应对水库水质的影响不容小觑. 本文研究发现,过渡区水体有机颗粒物比例往往高于河流区和湖泊区(从上游到下游平均值分别为47%、72%和60%),这是由于过渡区流速较慢,悬浮物大量沉降,较高的透明度和足量的营养盐为浮游植物提供了较好的生长环境,因此该区藻类生物量一般为全库最高<sup>[33]</sup>. 此外,由于淳安县城位于水库过渡区周边,人类活动产生的生活污水为藻类生长提供了一定的营养盐,藻类增殖的风险进一步加剧. 因此,在水库水质风险防范上,应特别关注水文气象条件突变带来的藻类异常增殖问题.

高频自动监测能够为水库水质风险防控提供有力的信息支撑. 本研究表明,水质高频监测浮标及沉降物捕获器的自动监测能够在很大程度上反映了水库水质的快速变化过程,为水库水质风险防控提供信息支撑. 新安江水库的研究同样为其他同生态背景的水库提供一定的启示. 新安江水库是典型的深水山谷型水库,采样难度较大,浮标自动监测以及沉降物捕获器的使用大大降低了采样难度,同时其高频和连续性的特点也是传统采样不具备的;此外,通过对水库的研究发现提高水库植被覆盖、控制营养盐外源输入能有效控制水库悬浮颗粒物的危害;同样地,也应注意坝前营养盐的潜在风险. 通过分析新安江水库悬浮颗粒物时空分布及沉降特征得出的这些结论同样可以为其它水库提供一定的启发.

#### 4 结 论

(1)强降雨等气象事件对水库悬浮颗粒物浓度、浊度等水体物理特征及其伴随的水质变化产生较大的影响. 水质高频自动监测浮标获得的 Turb 与水体 SS 浓度、悬浮颗粒物沉降通量等相关性好,能够有效反映外源输入带来的浊度等影响.

(2)新安江水库悬浮颗粒物沉降通量存在着明显的时空异质性,空间上河流区 > 过渡区 > 湖泊区,沿程上有着指数衰减的趋势,季节上春夏 > 秋冬. 沉降物中的有机、无机比例的时空差异也很大,与水库的水文过程密切联系,也受区域性和季节性藻类增殖的影响.

(3)新安江水库颗粒物年沉降量估算为  $2.57 \times 10^6 \text{t}$ ,水库年均库容淤损率为 0.07%,与国内外水库相比总体属于较低水平;鉴于颗粒物对水质的影响,在水环境保护上,应注重流域水土保持和土地利用方式管控,实施“水土共治”,并关注季节性、区域性藻类增殖对水质的影响;技术上,实施关键断面的水

质高频自动监测,为水质风险防控提供重要信息.

致谢:季鹏飞和李元鹏硕士研究生等在采样过程中提供帮助,胡春华副研究员和叶小锐实验员等协助样品分析处理,在此一并感谢!

#### 参考文献:

- [1] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 谢金明, 吴保生, 刘孝盈. 水库泥沙淤积管理综述[J]. 泥沙研究, 2013, (3): 71-80.  
Xie J M, Wu B S, Liu X Y. Review of reservoir sedimentation management[J]. Journal of Sediment Research, 2013, (3): 71-80.
- [3] 曹文洪, 刘春晶. 水库淤积控制与功能恢复研究进展与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1079-1086.  
Cao W H, Liu C J. Advance and prospect in research on reservoir sediment control and functional restoration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1079-1086.
- [4] 姜乃森, 傅玲燕. 中国的水库泥沙淤积问题[J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 1-8.  
Jiang N S, Fu L Y. Problems of reservoir sedimentation in China [J]. Journal of Lake Sciences, 1997, 9(1): 1-8.
- [5] Droppo I G. Rethinking what constitutes suspended sediment [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(9): 1551-1564.
- [6] Zhang Y B, Shi K, Zhang Y L, et al. Long-term change of total suspended matter in a deep-valley reservoir with HJ-1A/B: implications for reservoir management [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(3): 3041-3054.
- [7] Haygarth P M, Bilotta G S, Bol R, et al. Processes affecting transfer of sediment and colloids, with associated phosphorus, from intensively farmed grasslands: an overview of key issues [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(20): 4407-4413.
- [8] 任杰, 周涛, 朱广伟, 等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1742-1753.  
Ren J, Zhou T, Zhu G W, et al. Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu Province, China and its control factors [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1742-1753.
- [9] Gibbs R J. The geochemistry of the Amazon River system; Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids[J]. GSA Bulletin, 1967, 78(10): 1203-1232.
- [10] Zheng Z B, Li Y M, Guo Y L, et al. Landsat-based long-term monitoring of total suspended matter concentration pattern change in the wet season for Dongting Lake, China [J]. Remote Sensing, 2015, 7(10): 13975-13999.
- [11] Bilotta G S, Brazier R E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota[J]. Water Research, 2008, 42(12): 2849-2861.
- [12] Blain S, Guillou J, Treguer P, et al. High frequency monitoring of the coastal marine environment using the MAREL buoy [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2004, 6(6): 569-575.
- [13] Mitsuyasu H, Tasai F, Suhara T, et al. Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy [J]. Journal of Physical Oceanography, 1975, 5(4): 750-760.
- [14] Pascal R W, Yelland M J, Srokosz M A, et al. A spar buoy for high-frequency wave measurements and detection of wave breaking in the open ocean [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011, 28(4): 590-605.
- [15] Jones A S, Stevens D K, Horsburgh J S, et al. Surrogate measures for providing high frequency estimates of total

- suspended solids and total phosphorus concentrations [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2011, **47**(2): 239-253.
- [16] Read J S, Hamilton D P, Jones I D, *et al.* Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data[J]. Environmental Modelling & Software, 2011, **26**(11): 1325-1336.
- [17] 朱晓磊, 张洪, 雷沛, 等. 官厅水库沉积物中大量元素的历史分布特征[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 442-449.  
Zhu X L, Zhang H, Lei P, *et al.* Historical distribution characteristics of major elements in Guanting Reservoir sediment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 442-449.
- [18] 杨玉雪, 向鹏, 卢玮琦, 等. 贵州乌江渡水库沉积速率及碳氮埋藏通量估算[J]. 地球与环境, 2017, **45**(1): 66-73.  
Yang Y X, Xiang P, Lu W Q, *et al.* The sedimentation rate and burial fluxes of carbon and nitrogen in Wujiangdu Reservoir, Guizhou, China[J]. Earth and Environment, 2017, **45**(1): 66-73.
- [19] Brewer P G, Nozaki Y, Spencer D W, *et al.* Sediment trap experiments in the deep North Atlantic: isotopic and elemental fluxes[J]. Journal of Marine Research, 1980, **38**(4): 703-728.
- [20] Eadie B J, Chambers R L, Gardner W S, *et al.* Sediment trap studies in Lake Michigan: Resuspension and chemical fluxes in the southern basin[J]. Journal of Great Lakes Research, 1984, **10**(3): 307-321.
- [21] Zhu M Y, Zhu G W, Nurminen L, *et al.* The influence of macrophytes on sediment resuspension and the effect of associated nutrients in a shallow and large lake (Lake Taihu, China) [J]. PLoS One, 2015, **10**(6): e0127915.
- [22] 汤旭光, 李恒鹏, 聂小飞, 等. 应用 MODIS 数据监测千岛湖流域植被覆盖动态(2001—2013 年)[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(3): 511-518.  
Tang X G, Li H P, Nie X F, *et al.* Vegetation dynamical status in the Lake Qiandao drainage basin using time-series MODIS data (2001-2013) [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(3): 511-518.
- [23] 张毅博, 张运林, 查勇, 等. 基于 Landsat 8 影像估算新安江水库总悬浮物浓度[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 56-63.  
Zhang Y B, Zhang Y L, Zha Y, *et al.* Remote sensing estimation of total suspended matter concentration in Xin'anjiang Reservoir using Landsat 8 data [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 56-63.
- [24] 王明珠, 张运林, 施坤, 等. 千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2528-2538.  
Wang M Z, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Characteristics of optical absorption coefficients and their differences in typical seasons in Lake Qiandaohu [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2528-2538.
- [25] 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 等. 新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 713-727.  
Da W Y, Zhu G W, Li Y X, *et al.* High frequent dynamics of water quality and phytoplankton community in inflowing river mouth of Xin'anjiang Reservoir, China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 713-727.
- [26] Wu Z X, Zhang Y L, Zhou Y Q, *et al.* Seasonal-spatial distribution and long-term variation of transparency in Xin'anjiang Reservoir: implications for reservoir management [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, **12**(8): 9492-9507.
- [27] 郑艳妮, 闻昕, 方国华. 新安江流域气候变化及径流响应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(1): 106-110.  
Zheng Y N, Wen X, Fang G H. Research on climate change and runoff response in Xin'an river basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, **26**(1): 106-110.
- [28] Zhu G W, Cui Y, Han X X, *et al.* Response of phytoplankton to nutrient reduction in Shahe Reservoir, Taihu catchment, China [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2015, **30**(1): 41-58.
- [29] Gu Q, Zhang Y, Ma L G, *et al.* Assessment of reservoir water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Qiandao Lake, China[J]. Sustainability, 2016, **8**(3): 243.
- [30] 钟小燕, 王船海, 庾从蓉, 等. 流速对太湖河道底泥泥沙、营养盐释放规律影响实验研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(8): 2862-2869.  
Zhong X Y, Wang C H, Yu C R, *et al.* Characteristics of sediments and nutrient release under different flow velocity [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(8): 2862-2869.
- [31] 笪文怡, 黎云祥, 朱广伟, 等. 水文气象过程对千岛湖氮磷变化的影响[J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(5): 9-19.  
Da W Y, Li Y X, Zhu G W, *et al.* Influence of hydrometeorological processes on nutrient dynamics in Qiandao Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2019, **40**(5): 9-19.
- [32] 张倚铭, 兰佳, 李慧贇, 等. 新安江对千岛湖外源输入总量的贡献分析(2006-2016 年)[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1534-1546, doi: 10.18307/2019.0621.  
Zhang Y M, Lan J, Li H Y, *et al.* Estimation of external nutrient loadings from the main tributary (Xin'anjiang) into Lake Qiandao [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(6): 1534-1546, doi: 10.18307/2019.0621.
- [33] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 151-160.  
Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(2): 151-160.
- [34] Li Y, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Monitoring spatiotemporal variations in nutrients in a large drinking water reservoir and their relationships with hydrological and meteorological conditions based on Landsat 8 imagery [J]. Science of the Total Environment, 2017, **599-600**: 1705-1717.
- [35] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China) [J]. Water Research, 2015, **75**: 249-258.
- [36] 笪文怡, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2002-2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1320-1333.  
Da W Y, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1320-1333.
- [37] 田海涛, 张振克, 李彦明, 等. 中国内地水库淤积的差异化分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, **26**(6): 28-33.  
Tian H T, Zhang Z K, Li Y M, *et al.* Differences in reservoir sedimentation in Inland China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, **26**(6): 28-33.
- [38] 刘玉安, 黄波, 程涛, 等. 基于像元二分模型的淮河上游植被覆盖度遥感研究[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(1): 93-97.  
Liu Y A, Huang B, Cheng T, *et al.* Vegetation coverage in upper Huaihe River basin based on binary Pixel Model of remote

- sensing[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32** (1): 93-97.
- [39] Jia X B, Luo W Y, Wu X Q, *et al.* Historical record of nutrients inputs into the Xin'an Reservoir and its potential environmental implication[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(25): 20330-20341.
- [40] Liu M, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Thermal stratification dynamics in a large and deep subtropical reservoir revealed by high-frequency buoy data [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 614-624.
- [41] 吴志旭, 刘明亮, 兰佳, 等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(3): 460-465.
- Wu Z X, Liu M L, Lan J, *et al.* Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(3): 460-465.
- [42] 季香, 刘红玉, 李玉凤, 等. 不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应[J]. *环境科学*, 2016, **37** (6): 2101-2112.
- Ji X, Liu H Y, Li Y F, *et al.* Spatial response of river water quality to watershed land use type and pattern under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2101-2112.
- [43] 刘明亮, 吴志旭, 何剑波, 等. 新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 447-454.
- Liu M L, Wu Z X, He J B, *et al.* Thermodynamics and stratification in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 447-454.
- [44] 仲艳维. 潮白河流域水土保持效益评价及生态补偿制度构建研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- Zhong Y W. Research on the benefit evaluation of soil and water conservation and construction of ecological compensation system in Chaobaihe River basin [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [45] 李洁, 马香玲, 任启文. 官厅水库上游流域水土保持生态修复分区及实用技术研究[J]. *中国水土保持*, 2019, (1): 32-34.
- Li J, Ma X L, Ren Q W. Soil and water conservation ecological rehabilitation zoning and operative technology of the upper reaches of Guanting Reservoir[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019, (1): 32-34.



## CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Shanghai; Using Hourly Resolved PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differences in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM <sub>2.5</sub> Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM <sub>2.5</sub> Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N <sub>2</sub> O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)