

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 ..... 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 ( 1 )

粤港澳大湾区大气PM<sub>2.5</sub>浓度的遥感估算模型 ..... 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 ( 8 )

典型输送通道城市冬季PM<sub>2.5</sub>污染与传输变化特征 ..... 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 ( 23 )

郑州市夏季PM<sub>2.5</sub>中二次无机组分污染特征及其影响因素 ..... 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 ( 36 )

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 ..... 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 ( 48 )

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 ..... 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 ( 61 )

2020年“三连击”台风对我国东部地区O<sub>3</sub>污染的影响分析 ..... 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 ( 71 )

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 ..... 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 ( 81 )

机动车减排降碳综合评价体系综述 ..... 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 ( 93 )

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 ..... 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 ( 104 )

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 ..... 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 ( 115 )

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 ..... 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 ( 123 )

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估 ..... 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 ( 131 )

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 ..... 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 ( 140 )

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 ..... 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 ( 151 )

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 ..... 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 ( 159 )

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 ..... 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 ( 173 )

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 ..... 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 ( 181 )

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 ..... 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 ( 194 )

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 ..... 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 ( 207 )

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 ..... 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 ( 218 )

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 ..... 王耕, 张芙蓉 ( 228 )

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 ..... 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 ( 239 )

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 ..... 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 ( 248 )

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 ..... 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 ( 262 )

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 ..... 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 ( 275 )

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 ..... 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 ( 287 )

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 ..... 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 ( 300 )

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 ..... 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 ( 314 )

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 ..... 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 ( 323 )

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 ..... 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 ( 335 )

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 ..... 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 ( 343 )

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 ..... 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 ( 354 )

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 ..... 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 ( 364 )

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 ..... 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 ( 376 )

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 ..... 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 ( 386 )

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 ..... 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 ( 396 )

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 ..... 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 ( 407 )

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 ..... 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 ( 417 )

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 ..... 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 ( 429 )

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 ..... 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 ( 439 )

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 ..... 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 ( 450 )

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 ..... 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 ( 459 )

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 ..... 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 ( 470 )

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 ..... 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 ( 480 )

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 ..... 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 ( 489 )

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 ..... 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 ( 496 )

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 ..... 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 ( 508 )

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 ..... 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 ( 520 )

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 ..... 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 ( 530 )

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 ..... 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 ( 543 )

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 ..... 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二革, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 ( 555 )

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 ..... 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 ( 567 )

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 ..... 黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 ( 576 )

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 ..... 刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 ( 584 )

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 ..... 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 ( 594 )

CO<sub>2</sub>气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb<sup>2+</sup>吸附性能对比 ..... 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 ( 606 )

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

# 长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析

娄保锋, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇

(生态环境部长江流域生态环境监督管理局监测与科研中心, 武汉 430010)

**摘要:** 磷(P)是长江流域备受关注的污染物。金沙江下游向家坝水库和溪洛渡水库分别于2012年和2013年蓄水成库,极大改变了库区及长江宜宾至江津段(金沙江、岷江和长江“三江口”与三峡水库之间)水沙条件和磷的赋存及输移规律。朱沱断面是宜宾至江津段代表断面,既可以反映金沙江梯级水库及岷沱江水环境变化等所产生的综合效应,又是三峡水库的入库断面。研究了2002~2019年长江朱沱断面径流量、悬浮泥沙(SS)浓度与输沙量、磷浓度与通量[分总磷(TP)、溶解态磷(DP)、颗粒态磷(PP)]年际变化及水期特征,基于河流基流分割原理对磷的来源进行了解析。结果表明,18年来朱沱TP和PP浓度与通量丰水期高于平、枯水期;PP与SS正相关性的规律未变。从2002~2019年,TP、PP和DP浓度与通量总体上呈先升高后下降趋势,且向家坝水库运行是SS、输沙量和TP、PP浓度与通量下降的重要时间节点。相对于2002~2012年,2014~2019年SS与输沙量分别下降了94%和77%,TP与PP浓度分别下降了46%和70%,TP与PP通量分别下降了58%和74%,下降主要发生于丰水期,其次是平水期。两座水库形成后,水沙关系和磷赋存形态都发生了巨大变化,DP占比显著升高,PP占比显著下降,枯水期和平水期的磷已由颗粒态为主转变为以溶解态为主。水沙条件改变是磷浓度、通量及形态发生显著变化的主要驱动力。向家坝水库运行前,汇水次级流域中,金沙江对朱沱TP总负荷和面源负荷的贡献率最大,运行后变为岷江贡献率最大。2017~2019朱沱断面总磷负荷平均为 $3.575 \text{万} \cdot \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ (扣除天然背景值后),其中面源和点源贡献率分别为68%和32%;朱沱TP总负荷中岷江贡献率占49%,面源负荷中岷江贡献率占43%,点源负荷中岷江贡献率占62%。长江三峡水库上游磷污染治理的重点区域是岷沱江流域。

**关键词:** 长江; 梯级水库; 磷; 通量; 形态; 源解析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0159-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302201

## Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment

LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, LIU Min-xuan

(Changjiang River Basin Ecology and Environment Monitoring and Scientific Research Center, Changjiang River Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Phosphorus (P) is a pollutant of great concern in the Yangtze River Basin. The Xiangjiaba Reservoir and Xiluodu Reservoir on the lower reach of the Jinsha River began to operate in 2012 and 2013, respectively, which greatly changed the concentrations of suspended sediment and characteristics of P form and transport in the reservoirs and the downstream reach from Yibin to Jiangjin of the Yangtze River. The Zhutuo section is representative in the water quality of the Yibin-Jiangjin reach, which can not only reflect the comprehensive effects of the formation of the two reservoirs and changes in the aquatic environment in the Min-Tuo Rivers but also reflect the quality of water flowing into the Three Gorges Reservoir. The runoff, concentrations and fluxes of suspended sediments (SS), and P concentrations and fluxes at Zhutuo section were studied during 2002-2019, and the source of P was apportioned based on the principle of river base flow. The results showed that in the past 18 years, the concentrations and fluxes of total phosphorus (TP) and particulate phosphorus (PP) at Zhutuo section in the wet season were higher than those in the level and dry seasons; the rule of positive correlation between PP and SS concentrations remained unchanged. From 2002 to 2019, the concentrations and fluxes of TP, PP, and dissolved P (DP) generally increased first and then decreased, and the operation of the Xiangjiaba Reservoir was a time node for the trend turning. Compared with that in the period from 2002-2012, the SS concentration and flux decreased by 94% and 77%, TP and PP concentrations decreased by 46% and 70%, and TP and PP fluxes decreased by 58% and 74%, respectively, during 2014-2019. The decline mainly occurred in the wet season, followed by that in the level season. After the formation of the two reservoirs, the relationship between water and sediment and the form of P greatly changed, and the proportion of DP in TP increased significantly, whereas the proportion of PP was the opposite. The TP pool in overlying water in the dry and level seasons shifted from mainly particulate to mainly dissolved. The change in water and sediment conditions was the main driving force for the significant change in P concentration, flux, and form. Before the operation of the Xiangjiaba Reservoir, the Jinsha River was the maximum contributor to the whole and diffuse source part of the TP load at Zhutuo section among the contributing catchment sub-basins; however, the Minjiang River became the largest contributor after the operation. The average TP load at Zhutuo section from 2017-2019 was  $3.575 \times 10^4 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$  (after deducting the natural background value), of which the contribution of diffuse sources and point sources accounted for 68% and 32%, respectively. The Minjiang River represented 49%, 43%, and 62% of the total TP load, diffuse source TP load, and point source TP load at Zhutuo section, respectively. Considering the load contribution and pollution intensity, the key area for P pollution control in the area upstream of the Three Gorges Reservoir was the Min-Tuo River Basin.

**Key words:** the Yangtze River; cascade reservoirs; phosphorus; flux; form; source apportionment

对世界范围内的地表水体而言,以氮(N)和磷(P)为代表元素的富营养化是一个普遍性问题,美国

收稿日期: 2023-02-24; 修订日期: 2023-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2102905); 三峡水库水质分析合同项目(0711596); 三峡工程生态与环境监测合同项目(JJ[2015-008], JJ[2015-047], JJ[2016-012])

作者简介: 娄保锋(1968~),男,博士,教授级高工,主要研究方向为水环境评价, E-mail: Lbfsdlc@126.com

河流 58% 的河长因总磷(TP)偏高而评价为劣,43% 的河长因总氮(TN)偏高而评价为劣<sup>[1]</sup>;40% 的湖泊 TP 超标,35% 的湖泊 TN 超标<sup>[2]</sup>. 我国地表水体富营养化问题亦非常突出<sup>[3-5]</sup>,2021 年开展富营养化监测的 209 个湖库中,富营养化湖泊占 27%<sup>[6]</sup>. 在长江流域,滇池<sup>[7]</sup>、洪湖<sup>[8]</sup>、巢湖<sup>[9]</sup>、太湖<sup>[10]</sup>、三峡水库支流<sup>[11]</sup>、汉江中下游<sup>[12]</sup>及城市湖泊<sup>[13]</sup>富营养化问题严重,因此,氮磷控制具有重要意义,多数情况下磷控制比氮控制更为重要<sup>[14-17]</sup>.

磷是一个非常重要的参数,是主要的营养因子<sup>[17-19]</sup>和生态因子,对鱼类、底栖动物群落健康具有显著影响<sup>[20-22]</sup>,是近 20 年来长江干流和三峡库区支流主要超标污染物<sup>[23,24]</sup>,在 2016 年之后成为长江流域首要超标污染物<sup>[25]</sup>,与流域内初级生产力、湖库营养水平和藻华风险<sup>[26,27]</sup>密切相关,直接关系到长江流域水生态安全.

长江是我国第一大河,从起点至巴塘河口一般称为长江源区,巴塘河口至宜宾“三江口”(金沙江、岷江和长江三江交界处)为金沙江,宜宾以下称长江,其中宜昌以上为上游,宜昌至湖口为中游,湖口以下为下游. 位于宜昌上游的三峡水库于 2003 年 6 月首次蓄水成库,并于 2010 年实现 175 m 正常蓄水位;金沙江下游梯级中的向家坝水库和溪洛渡水库分别于 2012 年 10 月和 2013 年 5 月开始运行,拦截了金沙江大量泥沙<sup>[28,29]</sup>,大幅度改变了库区水文和泥沙情势<sup>[30,31]</sup>,改变了其下游江段水沙关系<sup>[32]</sup>,使三峡水库上游来沙量锐减<sup>[33]</sup>. 由于水体中的磷与泥沙关系密切<sup>[34-38]</sup>,所以两大水库的运行会影响其下游江段磷浓度、通量及形态,此方面研究对三峡库区和对整个长江流域的磷循环及生态环境效应具有重要意义.

长江干流朱沱断面位于“三江口”与三峡水库之间,对上可综合反映金沙江梯级水库及岷沱江等对长江水质的影响,对下通常作为长江进入三峡水库的入库断面. 针对三峡水库及长江中下游磷研究较多<sup>[39-49]</sup>,但针对朱沱断面或所在江段磷的研究相对较少,尽管三峡水库磷研究中时有涉及.

向家坝蓄水成库,对磷的滞留效应明显<sup>[50]</sup>,2013~2016 年,向家坝下游水域及长江宜宾至江津段 TP 浓度均显著低于 2008~2012 年(基于澄清样测值,具体说明见 1.2 节)<sup>[38,51]</sup>. 2013~2018 年向家坝水库向下游输送的 TP 通量(依澄清样测值计算)亦远小于成库前,尤其是在丰水期<sup>[52]</sup>. 在磷形态的影响因素方面,Han 等<sup>[53]</sup>于 2014 年 10 月和 2015 年 1 月在朱沱断面采集表层水样分析表明,颗粒态磷(PP)在 TP 中的占比为 64%(2014 年 10 月)和 37%(2015 年 1 月). 周

建军等<sup>[54]</sup>研究表明,朱沱断面上覆水体溶解态磷(DP)在 TP 中的占比与悬浮泥沙浓度(SS)呈负相关. 尽管有越来越多的证据表明,流域 TP 污染负荷中来自面源的负荷往往占比大<sup>[55-57]</sup>,但长江宜宾至江津江段 TP 负荷解析方面的研究相对较少. 郑丙辉等<sup>[58]</sup>研究表明,2004 年和 2005 年朱沱断面 TP 通量中面源负荷占比约 90%;温泉等<sup>[59]</sup>和秦延文等<sup>[60]</sup>采用排污系数法得到 2016 年岷江流域和沱江流域 TP 入河量分别为 0.115 4 万 t·a<sup>-1</sup>和 0.143 6 万 t·a<sup>-1</sup>,面源(农村生活、农业面源和城市径流)贡献率分别为 61% 和 76%.

尽管已有上述研究,但关于两大梯级水库形成后长江宜宾至江津江段磷浓度、通量、形态及来源等方面的研究和认知仍非常有限,尤其是已有研究在采样方式方面多数仅采集表层水样,而与泥沙关系密切的 TP 在横向和垂向上具有显著非均质性<sup>[61,62]</sup>;在水样前处理方式方面多数基于对澄清样 TP 开展研究<sup>[38,51,52]</sup>,而澄清样 TP 和原样 TP 往往具有显著差别<sup>[63]</sup>,其结论存在一定局限性,在磷源解析方面的研究更是缺乏. 故此确定本文的研究目的为:系统分析 2002~2019 期间朱沱断面磷(TP、DP 和 PP)浓度、通量及形态的年际变化与季节特征,对 TP 负荷进行归因溯源分析,其结论对认知金沙江梯级水库的影响,对三峡水库乃至整个长江磷的研究,对长江上游磷污染控制规划和决策都具有重要参考价值.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域和时段

长江从起点至入海口长约 6 300 km,流域面积达  $180 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占我国陆地总面积的 1/5<sup>[64]</sup>(图 1). 就广义长江干流而言,源头至宜昌的上游江段长 4 504 km,流域面积  $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;宜昌至湖口的中游江段长 955 km,流域面积  $68 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;湖口以下的下游江段长 938 km,流域面积  $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ . 2001~2019 年长江水资源总量  $8 684 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[65]</sup>,约占全国河流径流总量的 36%.

位于宜宾以上的金沙江流经青海、西藏、四川和云南四省,流域面积约  $50 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是长江流域主要产沙区,以石鼓、攀枝花为界分为上、中和下游. 下游段规划了乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝四大梯级电站. 向家坝电站是金沙江下游梯级电站的最后一级,大坝位于宜宾“三江口”上游约 32 km 处,于 2012 年 10 月开始运行,其上一级水库——溪洛渡水库(大坝距向家坝水库大坝约 150 km)于 2013 年 5 月开始运行. 乌东德和白鹤滩水电站尚处于建设中.

两座梯级水库的运行极大改变了库区及其下游江段的水文和泥沙情势<sup>[28, 29]</sup>. 对比相近年径流量的2008年和2016年, 年输沙量由2.12亿 $t \cdot a^{-1}$ 下降为0.378亿 $t \cdot a^{-1}$ ; 相近年径流量的2009年和2015年, 年输沙量由1.52亿 $t \cdot a^{-1}$ 下降为0.212亿 $t \cdot a^{-1}$ <sup>[65]</sup>.

朱沱断面位于永川区朱沱镇, 在宜宾以下约240 km, 三峡水库库尾标志点——花红堡以上约81 km, 该断面既可以综合反映金沙江、岷江和沱江等对长江水环境的影响, 亦通常作为长江进入三峡水库的入库断面, 具体断面位置详见图1. 宜宾至朱沱江段属于长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区

范围. 该江段入汇河流中, 年径流量在50亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 以上的有金沙江、岷江、沱江和赤水, 2015~2019年平均年径流量<sup>[65]</sup>分别为1431、838、146和73.4亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ , 4条河流年径流量之和占朱沱年径流量的91%, 其他小型支流如黄沙河、长宁河、永宁河、龙溪河和大陆溪等年均径流量皆在10亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 以下. 岷江和沱江因上游段相通而合称为岷沱江. 通过河流汇入宜宾至朱沱江段的磷负荷计算中仅考虑金沙江、岷江、沱江和赤水, 其入长江控制断面分别为向家坝(大坝以下2 km处)、高场、沱江大桥和醒觉溪(图1).

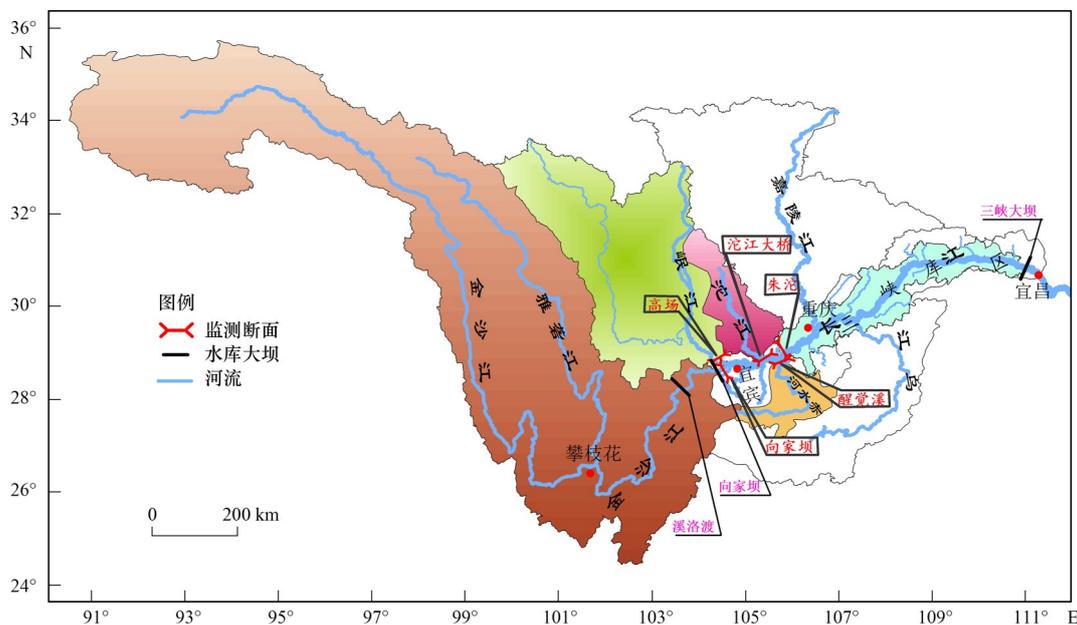


图1 长江流域朱沱断面汇水次级流域及采样断面位置示意

Fig. 1 Sampling locations and subbasins upstream of Zhutuo monitoring section in the Yangtze River

本研究时段为2002~2019年, 时间跨度为18 a. 磷源解析针对时段为2017~2019年. 长江水期划分为: 丰水期为6~9月; 平水期为4、5、10和11月; 枯水期为12月和1~3月.

## 1.2 原样、澄清样、清样总磷测值的说明

2002年我国颁布了《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)<sup>[66]</sup>, 取代之前的GB 3838-88<sup>[67]</sup>. GB 3838-2002要求对高锰酸盐指数、TP、As、Hg、Pb、Cd和Cr等参数, 采样后对水样(称为原样)静置30 min, 得到去除沉降物的水样(称为澄清样)进行测定, 测得澄清样磷浓度(CP), 而GB 3838-88要求原样混匀后进行测定, 测得原样磷浓度(TP). 两种前处理方式不同导致了GB 3838-2002实施前、后受泥沙含量影响较大的水质参数监测值缺乏可比性<sup>[68]</sup>. 另外, 还有一种水样前处理方式, 即对原样用0.45  $\mu m$  滤膜过滤, 所得到的滤液称为清样, 针对清样测得溶解态磷浓度(DP). 对于同一原始水样, TP、CP和DP测值之间的

差别随SS升高而增大, 具有规律性经验关系<sup>[63]</sup>, 譬如, 当三峡库区干流 $\rho(SS)$ 达500  $mg \cdot L^{-1}$ 时, CP与TP测值之比平均为51%, DP与TP测值之比平均为11%.

## 1.3 数据来源与分析方法

TP、DP及SS浓度数据来自长江流域水环境数据库, 采样时间为: 长江朱沱断面, 2002~2019年; 金沙江向家坝断面, 2007~2019年; 岷江高场断面和沱江大桥断面, 2004~2019年; 赤水醒觉溪断面, 2017~2019年. 每月上旬采样1次. 采样程序执行《水环境监测规范》(SL 219). 每条断面布设3条垂线(左岸、中泓和右岸), 每条垂线布设3个采样点(上、中和下). 质控样品包括现场空白样、现场平行样和加标样.

磷的测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)采用过硫酸钾氧化消解. 对同一水样, 分别测定TP、DP及CP(本文中未采用). 颗粒态磷浓度PP= TP-

DP. DP在TP中的占比表达为 $\lambda(\text{DP}/\text{TP})$ , PP在TP中的占比表达为 $\lambda(\text{PP}/\text{TP})$ . SS测定采用重量法(GB 11901-1989). 径流量和输沙量数据来自长江泥沙公报<sup>[65]</sup>.

#### 1.4 通量计算方法

河流污染物通量即单位时间内通过某断面的污染物的质量. 磷在某断面某时段内的通量计算公式为:

$$W = k \int c(t)Q(t)dt \quad (1)$$

式中,  $W$ 为磷通量,  $t$ ;  $c(t)$ 为 $t$ 时刻磷浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $Q(t)$ 为 $t$ 时刻流量,  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $k$ 为单位换算系数.

实际工作中无法实现磷浓度的连续监测, 只能获得一定时段内的代表值; 长江干流常规水质监测频率为每月1次. 根据现实条件及通量估算方法筛选<sup>[69]</sup>中误差最小原则, 采用式(2)和式(3)计算磷的月通量( $\text{t}\cdot\text{mon}^{-1}$ )和年通量( $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ):

$$W = 100cQ \quad (2)$$

$$W = 100 \sum_{i=1}^{12} c_i Q_i \quad (3)$$

式中,  $c$ 为某月磷浓度值,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $Q$ 为某月经流量,  $10^8\text{m}^3$ ;  $c_i$ 为第 $i$ 个月的P浓度值,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $Q_i$ 为第 $i$ 个月的径流量,  $10^8\text{m}^3$ . 100为单位换算系数.

#### 1.5 总磷来源界定方法

污染物来源包括点源和面源, 点源主要来源于工业废水和生活污水等定点排污口, 而面源主要来源于地表径流、农村生活和分散式畜禽养殖等. 相对于点源, 面源负荷的定量化更为复杂和困难, 其主要估算方法有面源产排污系数估算法<sup>[70]</sup>、总负荷中点源扣除法、水文分割法<sup>[58,71]</sup>和SWAT模型法<sup>[72,73]</sup>等. 面源产排污系数法是根据农业、农村生活和散养畜禽等面源类产排污系数基于农田面积、化肥使用量、农村人口和畜禽数量等基础资料进行估算; 点源扣除法需要在已知总负荷的情况下, 在相应时期内按一定频率对诸多点源排放的污染负荷进行监测或按照点源产排污系数进行估算, 其人力和物力等成本较高, 计算过程较为复杂; SWAT模型法需要的参数较多, 整个过程亦较为复杂. 而水文分割法具有简洁和直观的优点<sup>[58,74,75]</sup>, 故本文采用此法界定磷的点源和面源负荷. 其原理为<sup>[71]</sup>为: 降雨径流是非点源磷迁移转化的驱动力和载体, 枯水期陆面难以形成径流, 河流磷负荷基本来自点源, 而丰水期的磷负荷来自点源和面源两部分. 年内点源磷负荷主要来源于生活污水、工业废水及畜禽养殖场等, 其排放随季节的变化较小, 本项工作中假定年度内点源磷的排放基本恒定, 不随季节而变化, 即丰水期、平水期和

枯水期点源负荷相等. 丰水期来自面源的TP负荷等于丰水期总负荷扣除点源负荷, 即 $L_{\text{丰面}} = L_{\text{丰总}} - L_{\text{丰点}} = L_{\text{丰总}} - L_{\text{枯}}$ , 同理, 平水期面源TP负荷为 $L_{\text{平面}} = L_{\text{平总}} - L_{\text{枯}}$ , 年度面源负荷为 $L_{\text{年面}} = L_{\text{年总}} - 3L_{\text{枯}}$ .

另外, 地表水系还存在自然背景下的磷浓度和负荷, 这一部分基本上是无须也无法治理的, 磷污染控制主要针对人为负荷. 为了更清晰界定人类活动导致的磷污染源, 在磷源解析中所计算的磷污染负荷及其中的点源和面源负荷均扣除了自然背景磷负荷(文内皆已标注). 背景值浓度通过以下两种方式进行综合分析而获取或估算: ①调阅长江流域水环境数据库中1980年代我国工业暴发式增长前较为零散的磷参数监测资料并进行统计分析; ②参考文献<sup>[76,77]</sup>. TP浓度背景值调研结果为: 长江上游宜宾至重庆段丰、平和枯水期 $\rho(\text{TP})$ 背景值大概分别为0.009、0.005和0.003  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 金沙江下游段丰、平和枯水期 $\rho(\text{TP})$ 背景值大概分别为0.007、0.005和0.004  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 岷沱江水系下游段丰、平和枯水期 $\rho(\text{TP})$ 背景值大概分别为0.006、0.004和0.003  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 赤水下游段丰、平和枯水期 $\rho(\text{TP})$ 背景值大概分别为0.007、0.003和0.002  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

以宜宾至朱沱约240 km的江段为空间单元解析朱沱断面TP负荷来源. 该江段范围内, TP负荷主要来自金沙江、岷江、沱江和赤水, 以及宜宾至朱沱江段之间其他磷源, 包括点源和面源TP负荷(图2). 根据物料平衡原理, 朱沱断面TP通量( $L$ )的空间来源解析为:

$$L_{\text{朱沱}} = L_{\text{金沙江}} + L_{\text{岷江}} + L_{\text{沱江}} + L_{\text{赤水}} + L_{\text{区间汇入}} - L_{\text{区间消耗}} \quad (4)$$

式中,  $L_{\text{区间汇入}}$ 为宜宾至朱沱江段点源(工业废水、生活污水和散养畜禽等)和面源TP负荷, 以及该江段除金沙江、岷江、沱江和赤水外的其他支流汇入的TP负荷;  $L_{\text{区间消耗}}$ 为该江段磷的生物摄取、沉降和再悬浮等各种物理、化学和生物活动综合效应下所减少的TP负荷. 本文中, 将 $L_{\text{区间净增}} = L_{\text{区间汇入}} - L_{\text{区间消耗}}$ 作为区间TP负荷, 其计算方式为朱沱断面磷负荷减去金沙江、岷江、沱江和赤水进入该区间的TP负荷.

#### 1.6 数据统计方法

采用Excel软件进行统计分析. 两变量间线性

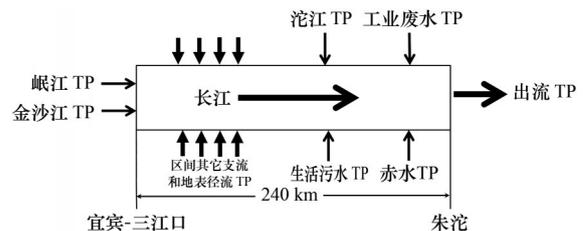


图2 长江朱沱断面磷通量来源空间分布示意

Fig. 2 Spatial distribution of sources of P load at Zhutuo section in the Yangtze River

关系显著性和两组数据差异显著性水平判定标准设定为 $P=0.05$ , 即当 $P<0.05$ 时, 达到显著性水平; 当 $P>0.05$ , 则未达到显著性水平. 在 DP、PP 与 SS 的关系拟合中, 根据应变量随自变量的变化趋势及拟合效果选择适当的表征方式(如是否采用对数形式).

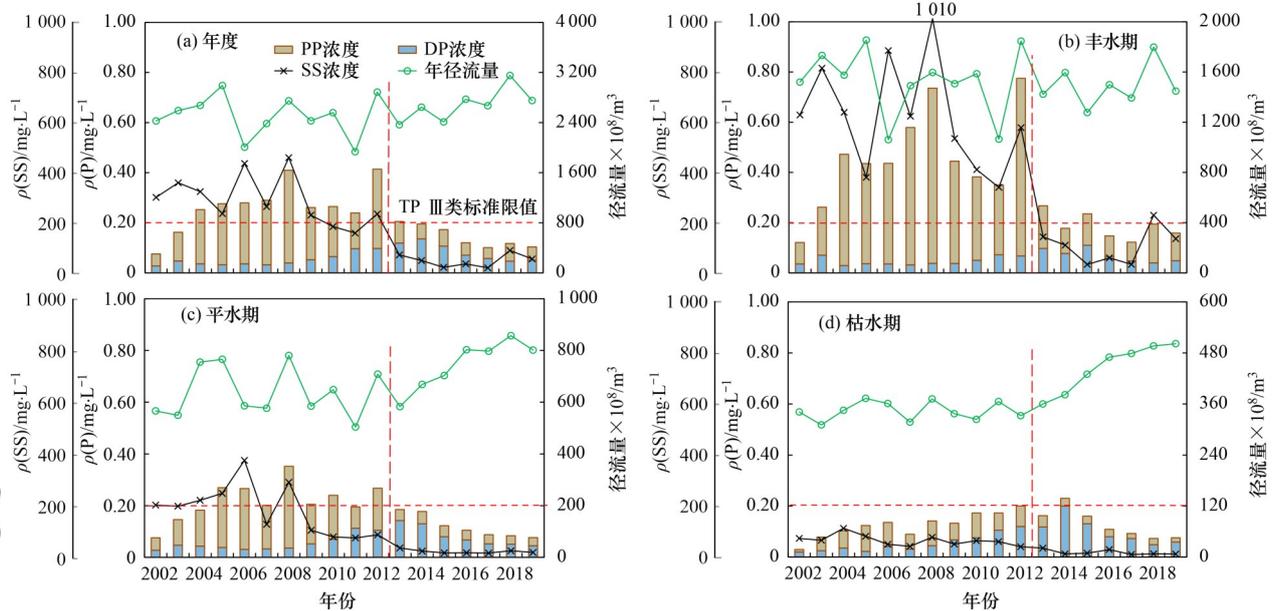
## 2 结果与分析

### 2.1 磷浓度年际及水期变化特征

#### 2.1.1 年际之间变化

图 3 所示为 2002 ~ 2019 年朱沱断面年度及各水期径流量与 SS、TP、DP 及 PP 浓度的年际变化特征. 近 18 年来年径流量均值为 2 578 亿  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 在 1 935 ~

3 152 亿  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  范围内上下波动. 丰水期径流量均值为 1 515 亿  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 在 1 061 ~ 1 854 亿  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  范围内上下波动, 而平水期和枯水期径流量在 2013 年之后总体上呈上升趋势( $P<0.0001$ ), 跟两库运行调度有关. 两座水库运行后, SS 下降剧烈( $P<0.0001$ ), 大体上分为 3 个梯度, 第一个梯度为 2002 ~ 2008 年,  $\rho(\text{SS})$  最高, 均值为  $340 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 第二个梯度为 2009 ~ 2012 年,  $\rho(\text{SS})$  中等, 均值为  $202 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 第三个梯度为 2013 ~ 2019 年,  $\rho(\text{SS})$  最低, 均值为  $49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 仅为第一个梯度时期的 24%. 相对于 2002 ~ 2012 年, 2014 ~ 2019 年  $\rho(\text{SS})$  年均值下降了  $245 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (84%), 丰、平和枯水期分别下降了  $522 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (84%)、 $162 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (89%) 和  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (77%).



$\rho(\text{TP}) = \rho(\text{DP}) + \rho(\text{PP})$ , 并未扣除背景浓度; 红色竖直虚线表示向家坝水库运行前和运行后的时间节点

图 3 朱沱断面径流量、悬浮泥沙浓度 $[\rho(\text{SS})]$ 和磷浓度 $[\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{DP})$ 、 $\rho(\text{PP})]$ 年际变化趋势

Fig. 3 Interannual variation in runoff and concentrations of suspended sediments and phosphorus [dissolved phosphorus (DP) and particulate phosphorus (PP)] at Zhutuo section in the Yangtze River in a whole year and in wet, level, and dry seasons

TP 浓度变化: 无论是年均值还是各水期均值, TP 总体上皆呈先上升后下降趋势, 2002 ~ 2012 年总体呈上升趋势( $P<0.001$ ), 在 2008 年和 2012 年  $\rho(\text{TP})$  年均值两次出现 18 年间的峰值 ( $0.410 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.414 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 2012 年之后总体呈下降趋势( $P<0.001$ ), 尤其是 2012 ~ 2013 年(向家坝水库形成后第 1 年)降幅较大, 由  $0.414 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降为  $0.205 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 下降了  $0.209 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (50%). 3 个水期中, 丰水期 TP 年际变化最大, 18 年来丰水期平均  $\rho(\text{TP})$  峰值亦出现于 2008 年和 2012 年 ( $0.736 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.775 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); 2012 ~ 2013 年发生剧降, 由  $0.736 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降为  $0.268 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 下降了  $0.468 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (64%). 平水期和枯水期 TP 的年际变化相对温和, 2014 年以来基本呈下降趋势. 就 TP 达标评

价而言[按河流 TP III 类标准 ( $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 评价], 2002 ~ 2012 年丰水期 TP 持续性高倍数超标, 平水期经常性超标, 枯水期基本不超标. 2012 年之后各水期超标情况皆较为少见.

PP 浓度变化: PP 年际变化趋势与 TP 基本一致, 总体上先上升后下降, 在 2008 年和 2012 年  $\rho(\text{PP})$  年均值出现峰值 ( $0.370 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.317 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 2012 ~ 2013 年降幅较大, 由  $0.317 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降为  $0.086 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 下降了  $0.231 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (73%). 2012 年之后,  $\rho(\text{PP})$  年均值在  $0.043 \sim 0.086 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间波动.

3 个水期中, 丰水期 PP 年际变化最大, 18 年来丰水期平均  $\rho(\text{PP})$  峰值亦出现于 2008 年和 2012 年 ( $0.698 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.708 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 与期间内强降雨导致 SS 偏高有关, 因为 PP 与 SS 高度相关(详见 3.1

节). 2012 ~ 2013年丰水期 $\rho(\text{PP})$ 平均值出现剧降,由 $0.708 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降为 $0.143 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,下降了 $0.565 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (80%),是相应时期丰水期 $\rho(\text{TP})$ 下降的原因. 平水期平均 $\rho(\text{PP})$ 峰值出现于2008年( $0.316 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),亦是因为时段内径流量和SS均偏高. 2012年之后,平水期和枯水期 $\rho(\text{PP})$ 平均值年际变化幅度较小,分别在 $0.031 \sim 0.048 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间和 $0.017 \sim 0.045 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动.

DP浓度变化:相对于TP和PP,DP年际变化趋势有独特之处,2002 ~ 2008年 $\rho(\text{DP})$ 年均值基本在 $0.028 \sim 0.047 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,均值为 $0.036 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2008年之后呈单边快速上升趋势( $P < 0.0001$ ),至2014年达18年间最高值( $0.136 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),比2008年高2.8倍;2014年之后呈单边下降趋势( $P < 0.0001$ ),至2019年下降为 $0.051 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,比2014年低63%,已接近2008年之前的水平. 丰水期 $\rho(\text{DP})$ 平均值在2015年达到峰值( $0.110 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),平水期在2013年达到峰值( $0.143 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),枯水期在2014年达到峰值( $0.200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 平、枯水期DP出现峰值以后,基本呈逐年下降趋势.

### 2.1.2 相同年份不同水期之间对比

丰水期SS显著高于平、枯水期( $P < 0.0001$ ). 2002 ~ 2012年,丰水期平均 $\rho(\text{SS})$ ( $623 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )大约是枯水期( $65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的9.6倍;2014 ~ 2019年,丰水期 $\rho(\text{SS})$ 平均值( $101 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )大约是枯水期( $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的6.6倍. 相对于2002 ~ 2012年,2014 ~ 2019年朱沱断面 $\rho(\text{SS})$ 的下降以丰水期最为突出,平均下降幅度为 $522 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而平、枯水期平均下降幅度分别为163和 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

TP、PP和DP浓度季节特征:TP和PP季节之间变化特征基本一致,皆类似于SS,表现为丰水期高于平、枯水期( $P < 0.0001$ ). 2002 ~ 2012年,丰水期 $\rho(\text{TP})$ 平均值( $0.454 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )是枯水期( $0.125 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的3.6倍;2014 ~ 2019年,丰水期 $\rho(\text{TP})$ 平均值( $0.196 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )是枯水期( $0.123 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的1.6倍. 2002 ~ 2012年,丰水期 $\rho(\text{PP})$ 平均值( $0.344 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )是枯水期( $0.064 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的5.4倍;2014 ~ 2019年,丰水期 $\rho(\text{PP})$ 平均值( $0.065 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )是枯水期( $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的2.6倍. 可见,相对于2002 ~ 2012年,2014 ~ 2019年,TP和PP在水期之间的差别变小.

DP的季节变化特征与TP和PP有很大不同. 2002 ~ 2012年,丰水期 $\rho(\text{DP})$ (平均值 $0.046 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )与枯水期(平均值 $0.053 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )差别不大,而2014 ~ 2019年丰水期 $\rho(\text{DP})$ (平均值 $0.065 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )显著低于枯水期(平均值 $0.098 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

### 2.1.3 DP与PP浓度在TP浓度中占比的变化

跟DP或PP浓度相比,DP或PP在TP中的占比 $\lambda(\text{DP}/\text{TP})$ 或 $\lambda(\text{PP}/\text{TP})$ 更多地反映了磷在水-固两相之间的分配关系. 根据图3所示TP、PP和DP浓度数据计算 $\lambda(\text{DP}/\text{TP})$ 或 $\lambda(\text{PP}/\text{TP})$ 并进行年际对比,结果表明,2012年是一个重要的时间节点,节点后 $\lambda(\text{DP}/\text{TP})$ 显著高于节点前( $P < 0.0001$ ). 从2002 ~ 2012年至2014 ~ 2019年,年均 $\lambda(\text{DP}/\text{TP})$ 由21%升高为56%,丰水期由12%升高为34%,平水期由23%升高为60%,枯水期由42%升高为78%. 相应地,从2002 ~ 2012年至2014 ~ 2019年,年均 $\lambda(\text{PP}/\text{TP})$ 由79%下降为44%,丰水期由88%下降为66%,平水期由77%下降为40%,枯水期由58%下降为22%. 可见枯水期和平水期磷赋存形态已由颗粒态为主转变为溶解态为主. 相同年份季节之间对比,无论2002 ~ 2012年还是2014 ~ 2019年, $\lambda(\text{DP}/\text{TP})$ 均为:枯水期>平水期>丰水期, $\lambda(\text{PP}/\text{TP})$ 则正好相反.

## 2.2 磷通量与源解析

### 2.2.1 朱沱断面磷通量年际变化

磷浓度和通量可以从不同角度反映磷污染<sup>[78]</sup>,前者直接表征污染程度,后者可为污染负荷核算及污染源解析继而为污染控制决策提供基础信息. 图4为长江朱沱断面2002 ~ 2019期间年度及各水期径流量、输沙量与TP、DP、PP通量年际变化情况. 对比径流量、输沙量和磷通量时间维度上的变化节律可见,在年度[图4(a)]及丰[图4(b)]、平水期[4(c)],TP和PP通量年际变化节律基本一致,TP通量变化趋势基本取决于PP通量变化趋势,而且它们与输沙量、径流量变化节律具有一定程度相似性,体现了“水、沙、磷”同步变化效应,即三者往往同时出现峰值和谷值. 以丰水期为例[图4(b)],18个年份中,“水、沙、磷”节律一致的年份有10个(2002、2005、2006、2008、2011、2012、2013、2017、2018和2019年),尤其是2012年前,同步效应更为显著. 譬如2011年TP和PP年通量出现了2003 ~ 2012期间十年一遇的极低值,是因为该年度径流量只有1934亿 $\text{m}^3$ ,为近20年来最低值,其年输沙量(0.646万t)是2003 ~ 2012间最低值,通过地表径流和泥沙输入水体的磷大幅减少. 枯水期未表现出明显的“水、沙、磷”同步效应.

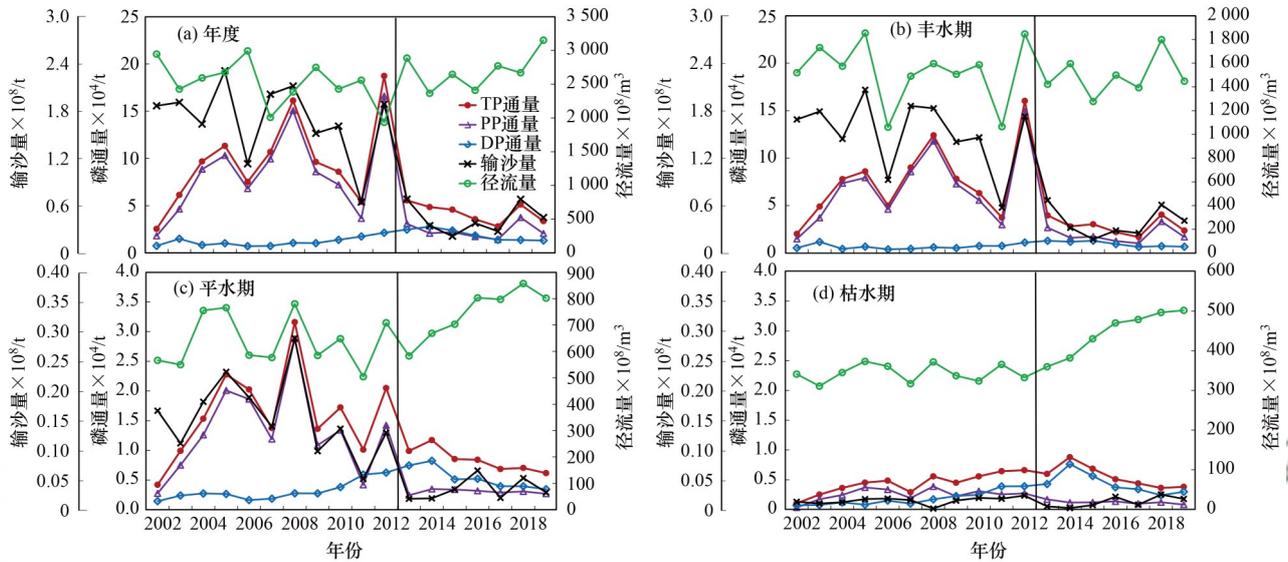
水期之间对比,丰水期TP、PP通量远大于平、枯水期( $P < 0.0001$ ). 平均而言,丰水期TP通量占年度TP通量的77%(2002 ~ 2012年)和66%(2014 ~ 2019年),丰水期PP通量占年度PP通量的81%(2002 ~ 2012年)和79%(2014 ~ 2019年). 2002 ~ 2012年,平水期TP和PP通量远大于枯水期( $P < 0.0001$ ),2014

~2019年,平、枯水期之间TP和PP通量差别较小。

两大梯级水库建成后,出现了以下4个特征:

①TP和PP年通量明显下降( $P < 0.0001$ ),2002~2012年,TP年通量平均为9.669万 $t \cdot a^{-1}$ ,至2014~2019年下降为4.639万 $t \cdot a^{-1}$ ,下降了5.030万 $t \cdot a^{-1}$ (52%)。PP通量由8.498万 $t \cdot a^{-1}$ 下降为2.795万 $t \cdot a^{-1}$ ,下降了5.70万 $t \cdot a^{-1}$ (67%)。TP通量的下降主要缘于PP通量的下降。②TP通量年际间波动变小,2002~2012年,TP年通量变化很大,标差为4.636万 $t \cdot a^{-1}$ ,最小值仅2.547万 $t \cdot a^{-1}$ ,最大值18.731万 $t \cdot a^{-1}$ ,是最小值的7.4倍,而2014~2019年标差为2.120万 $t \cdot a^{-1}$ ,最小值为

2.802万 $t \cdot a^{-1}$ ,最大值为8.671万 $t \cdot a^{-1}$ ,是最小值的3.1倍。③尽管TP和PP年通量下降,但DP通量反而有所增加( $P < 0.0001$ ),2002~2012年DP通量年均值为1.171万 $t \cdot a^{-1}$ ,而2014~2019年平均为1.844万 $t \cdot a^{-1}$ ,升高了57%。④PP通量在TP通量中的占比显著下降。2002~2012年,PP年通量在TP年通量中的占比为85%,至2014~2019年,下降为54%。各水期变化情况为:丰水期由88%下降为64%,平水期由77%下降为40%,枯水期由58%下降为22%。平水期和枯水期磷的赋存形态已由原来的颗粒态为主变为目前的以溶解态为主。



TP、DP和PP通量并未扣除背景负荷;黑色垂直虚线表示向家坝水库运行前和运行后的时间节点

图4 朱沱断面径流量、输沙量和磷通量年际变化趋势

Fig. 4 Interannual trend of runoff; suspended sediment load; and TP, DP, and PP fluxes at Zhutuo section in the Yangtze River in a whole year and in wet, level, and dry seasons

### 2.2.2 朱沱断面及汇水河流控制断面点源和面源磷负荷年际变化

依据河流基流分割原理(枯水期难以形成径流,其流量作为基流,磷负荷基本来自点源),对长江朱沱断面及金沙江、岷江、沱江入长江控制断面年度和丰水期TP负荷进行了点源和面源划分,扣除背景负荷后的结果见图5(赤水河因只有2017~2019年的数据,且其TP负荷在朱沱断面TP负荷中的占比不超过3%,对朱沱断面TP负荷年际变化趋势的影响可忽略不计,故未绘制赤水磷负荷趋势图)。可见,朱沱断面面源磷负荷年际波动远远大于点源负荷[图5(a)],TP总负荷的年际变化趋势基本上取决于面源负荷年际变化趋势,面源年度负荷主要来自于丰水期。丰水期面源磷负荷年际间波动巨大,受水、沙影响巨大,尤其是两大水库运行前,如2012年丰水期朱沱断面面源磷负荷(15.20万t)是2010年(3.009万t)的5倍。

向家坝水库运行后,朱沱断面来自面源的磷负

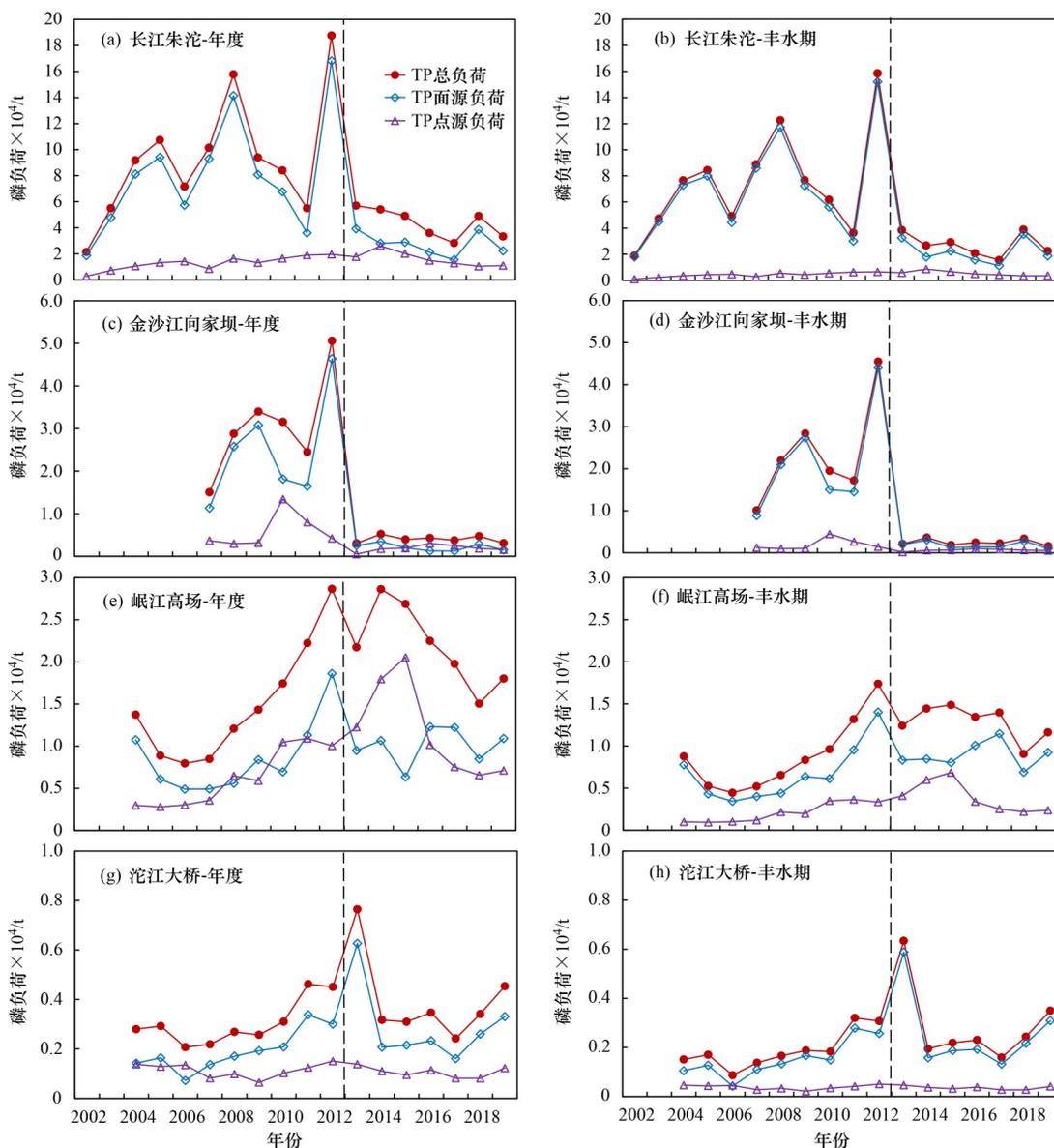
荷大幅减小,2002~2012期间平均年度面源磷负荷为8.052万 $t \cdot a^{-1}$ ,最小值为1.858万 $t \cdot a^{-1}$ (2002年),最大值为16.81万 $t \cdot a^{-1}$ (2012年);2014~2019年平均年度面源磷负荷为2.576万 $t \cdot a^{-1}$ ,比2002~2012年减小了5.476万 $t \cdot a^{-1}$ (68%);面源负荷在总负荷中的占比由2002~2012年的84.8%下降为2014~2019年的62%。2002~2012年,丰水期面源负荷占比平均为93.3%,2014~2019年下降为78%。跟已有研究对比,郑丙辉等<sup>[58]</sup>曾计算2004年和2005年朱沱断面TP负荷,其中,面源贡献率为90%(2004年)和89%(2005年),跟本文对应年份计算结果(89%和88%)极为接近,从一个侧面证明本项工作结果的可靠性。

由图5(a)可见,2002~2014年,朱沱断面点源磷负荷总体升高,说明点源污染水平总体呈加重趋势,导致枯水期TP和DP浓度总体趋高[图3(d)],2014年点源负荷达18年来年度点源负荷最高值(2.603万 $t \cdot a^{-1}$ ),成为趋势转折点,之后点源负荷呈减小趋势,

是磷污染控制效果的直接体现。

对比图 5 长江朱沱断面[图 5(a)和 5(b)]、金沙江向家坝断面[图 5(c)和 5(d)]、岷江高场断面[图 5(e)和 5(f)]和沱江大桥断面[图 5(g)和 5(h)]磷负荷年际变化趋势可见,向家坝水库运行前,在朱沱断面 TP 总负荷和面源负荷中,金沙江贡献最大,岷江其

次,向家坝水库运行后,岷江贡献超越了金沙江. 长江朱沱断面 TP 总负荷和面源负荷在 2012 后锐减[图 5(a)和 5(b)],主要缘于来自金沙江的 TP 总负荷和面源负荷锐减[图 5(c)和 5(d)],其根源在于向家坝水库 2012 年建成运行后导致库内颗粒态磷有相当一部分随泥沙一起沉降至库底。



计算过程中已扣除背景部分;黑色竖直虚线表示向家坝水库运行前和运行后的时间节点

图 5 长江朱沱断面、金沙江向家坝断面、岷江高场断面和沱江大桥断面 TP 总负荷、面源负荷和点源负荷年际变化趋势

Fig. 5 Interannual variation of total loads, diffuse loads and point loads of TP at Zhutuo section in the Yangtze River, Xiangjiaba section in the Jinshajiang River, Gaochang section in the Min River, and Daqiao section in the Tuojiang River

图 6 为 2017 ~ 2019 年朱沱断面及主要汇水区间年度和丰水期磷负荷(已扣除天然背景负荷)中的点源和面源占比. 按年度统计,2017 ~ 2019 朱沱断面 TP 平均负荷 3.575 万 t·a<sup>-1</sup>中,面源负荷为 2.436 万 t·a<sup>-1</sup>,占 68%,点源负荷为 1.139 万 t·a<sup>-1</sup>,占 32%,面源是点源的约 2 倍;金沙江、岷江、沱江和赤水年度 TP 负荷中,面源贡献率分别为 54%、60%、72% 和 58%。

年度面源磷负荷空间分布特征为:朱沱 TP 面源负荷中,岷江贡献率为 43%,金沙江、沱江、赤水和区间贡献率分别为 9.8%、10%、0.7% 和 37%. 按丰水期统计,朱沱断面 TP 负荷 2.559 万 t 中,面源负荷为 2.179 万 t,占 85%,点源负荷为 0.379 6 万 t,占 15%,面源是点源的约 9 倍;金沙江、岷江、沱江和赤水 TP 负荷中,面源贡献率分别为 76%、79%、87% 和 73%. 朱沱

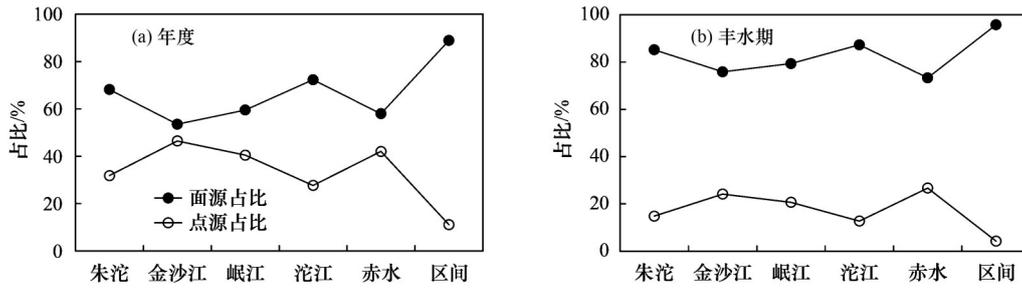


图 6 朱沱断面与汇水次级流域 2017~2019 年年度和丰水期磷污染负荷中面源和点源的贡献率

Fig. 6 Percent of diffuse-source loads and point-source loads in the total TP loads at Zhutuo section and from different secondary watersheds from 2017 to 2019

TP 点源负荷中,岷江贡献率为 62%,金沙江、沱江、赤水和区间贡献率分别为 18%、8.3%、1.6% 和 9.9%.

### 2.2.3 区域来源特征

对 2017~2019 年朱沱断面 TP 的区域来源进行解析,结果见图 7. 朱沱断面人为 TP 负荷中(3.575 万 t·a<sup>-1</sup>),丰、平和枯水期 TP 负荷占比分别为 72%、18% 和 10%. 按汇水区域界定,年度 TP 负荷中,来自金沙江、岷江、沱江和赤水的负荷占比分别为 12%、49%、9.7% 和 1.0%,来自区间的负荷占比为 28%;丰水期 TP 负荷中,来自金沙江、岷江、沱江和赤水的负荷占比分别为 11%、45%、9.8% 和 0.6%,来自区间的负荷占比为 34%;平水期 TP 负荷中,来自金沙江、岷江、沱江和赤水的负荷占比分别为

14%、58%、9.9% 和 2.3%,来自区间的负荷占比为 15%;枯水期 TP 负荷中,来自金沙江、岷江、沱江和赤水的负荷占比分别为 18%、62%、8.3% 和 1.6%,来自区间的负荷占比为 9.9%. 所以,朱沱 TP 负荷主要来自岷江. 而在向家坝成库前的 2007~2012 年间,金沙江对朱沱总负荷和面源负荷的贡献率皆显著高于岷江 [ $P < 0.0001$ , 图 5(c) 和 5(d)]. 2007~2012 年,在朱沱 TP 负荷中,金沙江和岷江贡献率分别为 30% 和 18%;朱沱 TP 面源负荷中,金沙江和岷江贡献率分别为 28% 和 12%. 图 7 所示岷江磷负荷远高于沱江,而温泉等<sup>[59]</sup>计算所得 2016 年岷江流域总磷入河量(0.115 4 万 t)却低于秦延文等<sup>[60]</sup>计算所得 2016 年沱江流域总磷入河量(0.143 6 万 t),其原因有待进一步考证.

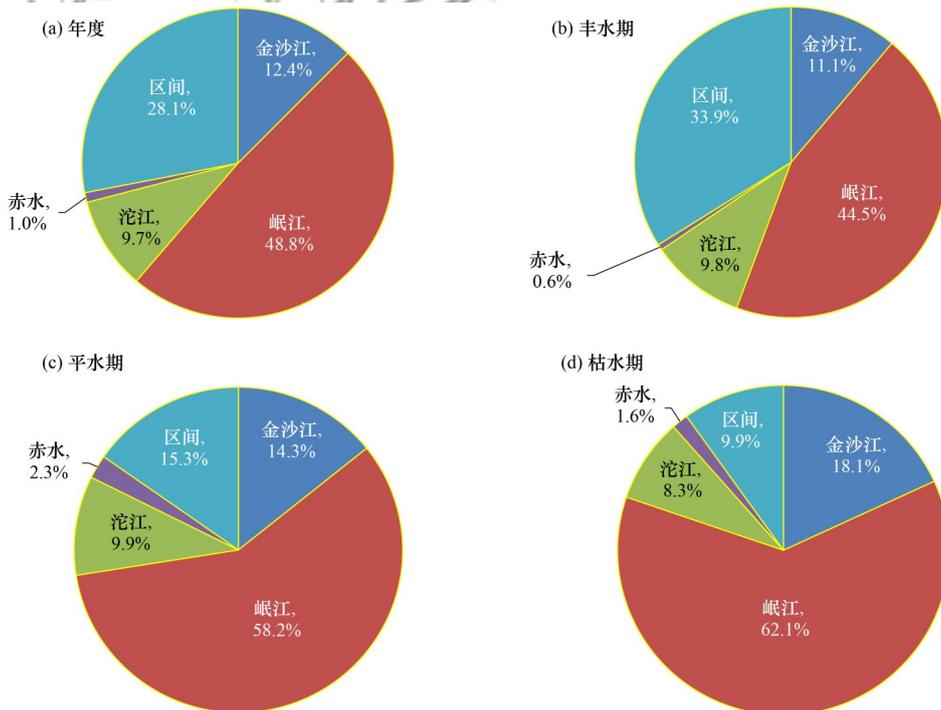


图 7 朱沱断面 2017~2019 年磷负荷空间来源解析

Fig. 7 Spatial distribution of sources as a percent of total TP loads at Zhutuo section from 2017 to 2019

### 3 讨论

#### 3.1 水沙条件改变是磷浓度、通量及形态发生显著变化的主要驱动力

地表水体中,磷在水-固两相间的分配取决于磷在悬浮泥沙上的吸附强度及悬浮泥沙含量.在上覆水体总磷浓度一定的情况下,悬浮泥沙含量越低,单位体积水中悬浮泥沙所提供的对磷的有效吸附位数量越少,则泥沙所吸附的磷在总磷中的占比越小.已有很多研究证实,TP与SS之间呈正相关<sup>[37,38]</sup>.分别将朱沱断面DP、PP和TP浓度与SS浓度进行拟合发现,PP[图8(b)]与SS相关性强于DP[图8(a)]和TP,2014~2019年拟合方程中,PP与

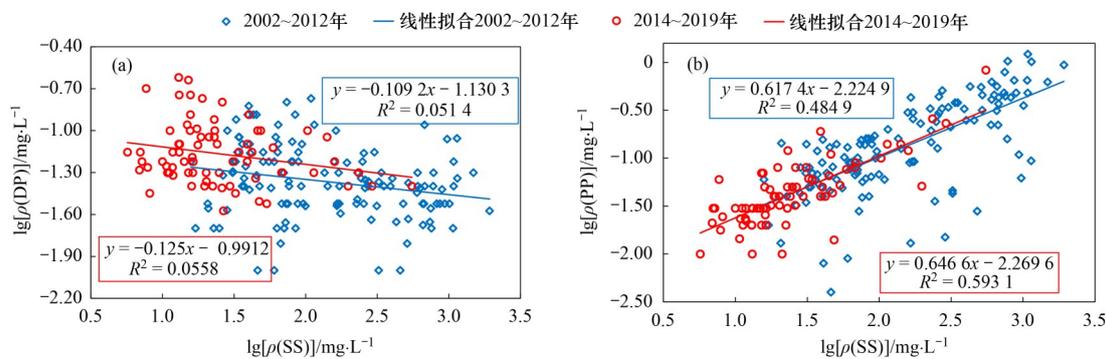


图8 2002~2012年和2014~2019年长江朱沱断面溶解态磷浓度 $[\rho(\text{DP})]$ 、颗粒态磷浓度 $[\rho(\text{PP})]$ 与悬浮泥沙浓度 $[\rho(\text{SS})]$ 之间的相关性  
Fig. 8 Correlation between concentrations of P (DP, PP) and SS at Zhuotuo section in the Yangtze River during 2002-2012 and 2014-2019, respectively

#### 3.2 磷污染控制重点

枯水期磷负荷基本为点源,在点源磷负荷保持相对恒定的情况下,水量越大,则磷浓度越小,所以2014~2019年枯水期径流量增大是DP及TP浓度下降[图3(d)]的原因之一.但枯水期TP通量的下降[图4(d)]则无法用径流量的增大来解释,归因于点源污染负荷的减小更合理,所以可以认为朱沱断面以上汇水范围磷污染控制效果明显,但从整个长江流域生态安全的角度来看,长江总磷水平仍然偏高<sup>[24,79]</sup>,如三峡水库支流回水区水华频发<sup>[11]</sup>,正在规划论证中的引江补汉工程中,长江三峡水库作为调水水源,总磷偏高对汉江水生态的影响引起了众多专家的忧虑<sup>[80]</sup>,所以长江需进一步消减总磷污染负荷.

2017~2019年,朱沱断面TP负荷的区域来源中,岷江占比最大,为49%,在丰、平和枯水期,岷江占比分别为45%、58%和62%.而其年径流量仅占朱沱断面的31%.由于面源治理更为复杂,更为艰难,涉及农业生产和化肥的使用,需进行远期规划治理,在一定时期(如未来5a)内,点源治理仍是重中之重.枯水期磷主要来自点源,在朱沱断面枯水期0.380万t

SS拟合方程的 $R^2=0.59$ ,高于DP( $R^2=0.06$ )和TP( $R^2=0.28$ ),且PP与SS关系具有时间维度上的稳定性[图8(b)].以向家坝水库开始运行为时间节点,朱沱断面SS急剧下降(图3),导致PP浓度(图3)和通量(图4)急剧下降,进而导致TP浓度(图3)和通量(图4)急剧下降[图3(b)].SS下降一方面导致PP浓度降低,另一方面导致TP中有更多比例的磷进入水相,从而导致 $\lambda(\text{DP/TP})$ 升高和 $\lambda(\text{PP/TP})$ 下降.以上变化的根源在于向家坝、溪洛渡水库形成后,通过陆面径流汇入金沙江的面源颗粒态磷有相当一部分随泥沙一起沉降至库底.所以水沙条件改变是磷浓度、通量及形态发生显著变化的主要驱动力.

的TP平均负荷(2017~2019年)中,来自岷江的负荷占62%(0.236万t).金沙江、岷江、沱江和赤水2017~2019年枯水期径流量分别为270、138、17和12亿 $\text{m}^3$ ,可见,枯水期岷江来水量大约为金沙江的一半,但其点源负荷却是金沙江(0.0688万t)的3.4倍,其原因是岷江磷污染强度大,在2017~2019年的枯水期,岷江入长江控制断面 $\rho(\text{TP})$ 分别为0.192、0.180和0.164 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为0.179 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而相同时期金沙江入长江的控制断面 $\rho(\text{TP})$ 为0.036、0.027和0.023 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为0.029 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,仅为岷江的1/6.所以控制长江上游进入三峡水库的磷负荷,岷江磷污染治理是第一个重点.另外,尽管枯水期来自沱江的污染负荷仅占8.3%,但其磷污染程度近似岷江,2017、2018和2019年枯水期沱江 $\rho(\text{TP})$ 分别为0.276、0.160和0.174 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为0.203 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而且近10年来磷污染一直较重<sup>[81]</sup>,所以沱江磷污染治理是第二个重点.赤水磷污染程度较轻,其3年枯水期 $\rho(\text{TP})$ 分别为0.053、0.057和0.058 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其重点在于维持和保护.岷沱江流域地处成渝城市群,在四川省属于人口密度大、农业和经济较为发达的地区,水污染治理形势严峻,压力较大.从

岷江和沱江入长江控制断面磷浓度和通量综合来看,岷江在2010~2016年、沱江在2011~2013年处于历史上磷污染最重的时期,譬如2015年1月岷江 $\rho$ (TP)和 $\rho$ (DP)分别高达 $0.843 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.524 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,2011年10月沱江 $\rho$ (TP)和 $\rho$ (DP)分别高达 $0.510 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.246 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。最近几年有所好转,但仍不容乐观。建议对新时期岷、沱江流域各类点源、面源磷负荷的时空分布和削减潜力进行充分调研和评估,对症施策,系统谋划,远近结合,综合治理。

#### 4 结论

(1)2002~2019年,位于金沙江下游梯级水库与三峡水库之间的朱沱断面TP、PP和DP浓度总体上呈现先升高后下降的趋势,向家坝水库运行是拐点出现的关键时间节点。节点后,SS、TP、PP和DP浓度,以及输沙量与TP和PP通量均显著下降,且下降主要发生于丰水期,其次是平水期。

(2)朱沱断面磷的赋存形态发生了显著变化,溶解态磷占比显著升高,颗粒态磷占比显著下降。枯水期和平水期的磷已由颗粒态为主转变为以溶解态为主。

(3)水沙条件改变是朱沱断面磷浓度、通量及形态发生显著变化的主要驱动力。

(4)向家坝水库运行前,各汇水次级流域中,金沙江对朱沱TP总负荷和面源负荷的贡献最大,运行后变为岷江贡献最大。2017~2019年,朱沱TP总负荷中岷江贡献占49%,面源负荷中岷江贡献占43%,点源负荷中岷江贡献占62%。综合考虑负荷贡献和污染强度,长江三峡水库上游磷污染治理的重点区域是岷沱江流域。

#### 参考文献:

- [ 1 ] USEPA. National rivers and streams assessment 2013-2014: a collaborative survey [R]. Washington: Environmental Protection Agency, 2020. 1-3.
- [ 2 ] USEPA. National lakes assessment 2012: a collaborative survey of lakes in the United States [R]. Washington: Environmental Protection Agency, 2016. 1-2.
- [ 3 ] Qin B Q, Zhang Y L, Deng J M, *et al.* Polluted lake restoration to promote sustainability in the Yangtze River Basin, China [J]. National Science Review, 2022, **9** (1), doi: 10.1093/nsr/nwab207.
- [ 4 ] Stokral M, Ma L, Bai Z H, *et al.* Alarming nutrient pollution of Chinese rivers as result of agriculture transitions [J]. Environmental Research Letters, 2016, **11** (2), doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024014.
- [ 5 ] Yu C Q, Huang X, Chen H, *et al.* Managing nitrogen to restore water quality in China [J]. Nature, 2019, **567**(7749): 516-520.
- [ 6 ] 中华人民共和国生态环境部. 2021 中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022. 28-29.
- [ 7 ] Ma J G, He F, Qi T C, *et al.* Thirty-four-year record (1987-2021) of the spatiotemporal dynamics of algal blooms in Lake Dianchi from multi-source remote sensing insights [J]. Remote Sensing, 2022, **14**(16), doi: 10.3390/rs14164000.
- [ 8 ] 郭正强, 严平川, 向宣好, 等. 藻类生长预测模型比较研究——以洪湖水体为例 [J]. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1140-1149.
- [ 9 ] Guo Z Q, Yan P C, Xiang X H, *et al.* Comparative study on algae growth prediction models—a case study of Lake Honghu [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, **34**(4): 1140-1149.
- [ 9 ] 袁俊, 曹志刚, 马金戈, 等. 1980s 以来巢湖藻华物候时空变化遥感分析 [J]. 湖泊科学, 2023, **35**(1): 57-72.
- [ 9 ] Yuan J, Cao Z G, Ma J G, *et al.* Remote sensed analysis of spatial and temporal variation in phenology of algal blooms in Lake Chao Hu since 1980s [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, **35** (1): 57-72.
- [ 10 ] 胡雪可, 王雅萍, 何湜, 等. 基于FAI的太湖水华时空分布特征与气象驱动因子分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2022, **45** (11): 46-50.
- [ 10 ] Hu X K, Wang Y P, He S, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and meteorological driving factors of cyanobacteria blooms in Taihu Lake based on FAI [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, **45**(11): 46-50.
- [ 11 ] 姚金忠, 范向军, 黄宇波. 三峡库区重点支流华现状、成因及防控对策 [J]. 环境工程学报, 2022, **16**(6): 2041-2048.
- [ 11 ] Yao J Z, Fan X J, Huang Y B. Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, **16**(6): 2041-2048.
- [ 12 ] 姜保锋. 水生态评价方法探索——以汉江中下游为例 [J]. 人民长江, 2023, **54**(1): 24-36.
- [ 12 ] Lou B F. Research on aquatic ecological assessment method: case of middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Yangtze River, 2023, **54**(1): 24-36.
- [ 13 ] 代晓颖, 徐栋, 武俊梅, 等. 2015-2019年武汉市湖泊水质时空变化 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1415-1424.
- [ 13 ] Dai X Y, Xu D, Wu J M, *et al.* Spatiotemporal variations of water quality of lakes in Wuhan from 2015 to 2019 [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(5): 1415-1424.
- [ 14 ] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [ 15 ] Paterson M J, Schindler D W, Hecky R E, *et al.* Comment: Lake 227 shows clearly that controlling inputs of nitrogen will not reduce or prevent eutrophication of lakes [J]. Limnology and Oceanography, 2011, **56**(4): 1545-1547.
- [ 16 ] Welch E B. Should nitrogen be reduced to manage eutrophication if it is growth limiting? Evidence from Moses Lake [J]. Lake and Reservoir Management, 2009, **25**(4): 401-409.
- [ 17 ] Schindler D W, Carpenter S R, Chapra S C, *et al.* Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50** (17): 8923-8929.
- [ 18 ] Paerl H W, Scott J T, McCarthy M J, *et al.* It takes two to tango: when and where dual nutrient (N & P) reductions are needed to protect lakes and downstream ecosystems [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(20): 10805-10813.
- [ 19 ] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. Science, 2009, **323** (5917): 1014-1015.

- [20] Dubrovsky N M, Burow K R, Clark GM, *et al.* Nutrients in the nation's streams and groundwater, 1992-2004 [R]. Washington: USGS, 2010.
- [21] Wang L Z, Robertson D M, Garrison P J. Linkages between nutrients and assemblages of macroinvertebrates and fish in wadeable streams: implication to nutrient criteria development [J]. *Environmental Management*, 2007, **39**(2): 194-212.
- [22] Miltner R J, Rankin A E T. Primary nutrients and the biotic integrity of rivers and streams [J]. *Freshwater Biology*, 1998, **40**(1): 145-158.
- [23] 刘录三, 黄国鲜, 王璠, 等. 长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策 [J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(5): 1081-1090.  
Liu L S, Huang G X, Wang F, *et al.* Main problems, situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1081-1090.
- [24] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析 [J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(5): 1150-1162.  
Lou B F, Zhuo H H, Zhou Z, *et al.* Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstem during recently 18 years [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1150-1162.
- [25] 秦延文, 马迎群, 王丽娟, 等. 长江流域总磷污染: 分布特征·来源解析·控制对策 [J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(1): 9-14.  
Qin Y W, Ma Y Q, Wang L J, *et al.* Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin: distribution characteristics, source and control strategy [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(1): 9-14.
- [26] Xiang R, Wang L J, Li H, *et al.* Water quality variation in tributaries of the Three Gorges reservoir from 2000 to 2015 [J]. *Water Research*, 2021, **195**, doi: 10.1016/j.watres.2021.116993.
- [27] Li Z, Ma J R, Guo J S, *et al.* Water quality trends in the Three Gorges reservoir region before and after impoundment (1992-2016) [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2019, **19**(3): 317-327.
- [28] Yan H C, Zhang X F, Xu Q X. Variation of runoff and sediment inflows to the Three Gorges reservoir: impact of upstream cascade reservoirs [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **603**: 126875.
- [29] Ren J Q, Zhao M D, Zhang W, *et al.* Impact of the construction of cascade reservoirs on suspended sediment peak transport variation during flood events in the Three Gorges reservoir [J]. *CATENA*, 2020, **188**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104409.
- [30] 秦蕾蕾, 董先勇, 杜泽东, 等. 金沙江下游水沙变化特性及梯级水库拦沙分析 [J]. *泥沙研究*, 2019, **44**(3): 24-30.  
Qin L L, Dong X Y, Du Z D, *et al.* Processes of water-sediment and deposition in cascade reservoirs in the lower reach of Jinsha River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(3): 24-30.
- [31] 陆传豪, 董先勇, 唐家良, 等. 金沙江流域大型梯级水库对水沙变化的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2019, **17**(5): 36-43.  
Lu C H, Dong X Y, Tang J L, *et al.* Impacts of large cascade reservoirs on runoff and sediment load variations in Jinsha River Basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, **17**(5): 36-43.
- [32] 陈艳超, 陈和春, 王继保, 等. 金沙江梯级水库运用对下游河段输沙影响分析 [J]. *人民长江*, 2018, **49**(S2): 6-8.  
Chen Y C, Chen H C, Wang J B, *et al.* Analysis on influence of cascade reservoirs operation on sediment transport in lower reaches of Jinsha River [J]. *Yangtze River*, 2018, **49**(S2): 6-8.
- [33] 刘洁, 杨胜发, 沈颖. 长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响 [J]. *泥沙研究*, 2019, **44**(6): 33-39.  
Liu J, Yang S F, Shen Y, *et al.* Impact of runoff and sediment from the upper Yangtze River on deposition in the Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(6): 33-39.
- [34] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover [J]. *Water Research*, 2006, **40**(6): 1258-1268.
- [35] He H J, Chen H Z, Yao Q Z, *et al.* Behavior of different phosphorus species in suspended particulate matter in the Changjiang estuary [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, **27**(4): 859-868.
- [36] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 310-315.  
Cao C J, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(2): 310-315.
- [37] 罗以生, 吕平毓, 陈虎. 长江、嘉陵江重庆主城区段悬浮泥沙与总磷浓度相关性分析 [J]. *三峡环境与生态*, 2012, **34**(6): 14-16, 35.  
Luo Y S, LV P Y, Chen H. Analysis for correlation between suspended sand and total phosphorus in Chongqing's urban sections of Yangtze River and Jialing River [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2012, **34**(6): 14-16, 35.
- [38] 刘尚武, 张小峰, 吕平毓, 等. 金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(3): 656-666.  
Liu S W, Zhang X F, Lv P Y, *et al.* Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 656-666.
- [39] Zeng X, Huang L, He G J, *et al.* Phosphorus transport in the Three Gorges reservoir over the past two decades [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **609**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127680.
- [40] Xiang R, Wang L J, Li H, *et al.* Temporal and spatial variation in water quality in the Three Gorges reservoir from 1998 to 2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144866.
- [41] Wang D Y, Tang X Q, Li R, *et al.* Spatial distribution patterns of nitrogen and phosphorus in water and bed sediment of the Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **322**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129026.
- [42] Tang X Q, Wu M, Li R. Phosphorus distribution and bioavailability dynamics in the mainstream water and surface sediment of the Three Gorges reservoir between 2003 and 2010 [J]. *Water Research*, 2018, **145**: 321-331.
- [43] Han C N, Zheng B H, Qin Y W, *et al.* Impact of upstream river inputs and reservoir operation on phosphorus fractions in water-particulate phases in the Three Gorges reservoir [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 1546-1556.
- [44] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1266-1272.  
Guo S, Li C M, Guo J S, *et al.* Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges reservoir after its impoundment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
- [45] 张晟, 宋丹, 张可, 等. 三峡水库典型支流上游区和回水区营养状态分析 [J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(2): 201-207.  
Zhang S, Song D, Zhang K, *et al.* Trophic status analysis of the upper stream and backwater area in typical tributaries, Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(2):

- 201-207.
- [46] Zhou G J, Zhao X M, Bi Y H, *et al.* Phytoplankton variation and its relationship with the environment in Xiangxi Bay in spring after damming of the Three-Gorges, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **176**(1-4): 125-141.
- [47] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生生态研究的进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 169-177.  
Cai Q H, Sun Z Y. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges reservoir, China: progress and prospects[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(2): 169-177.
- [48] 杨敏, 张晟, 胡征宇. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华暴发特性及成因探析[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 371-378.  
Yang M, Zhang S, Hu Z Y. Characteristics and preliminary regulating factors of cyanobacterial bloom in Xiangxi bay of the Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 371-378.
- [49] 娄保锋, 印士勇, 穆宏强, 等. 三峡水库蓄水前后干流总磷浓度比较[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(6): 863-867.  
Lou B F, Yin S Y, Mu H Q, *et al.* Comparison of total phosphorus concentration of Yangtze River within the Three Gorges reservoir before and after impoundment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(6): 863-867.
- [50] 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 等. 向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3530-3538.  
Wang Y Y, Lü L P, Ji D B, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and the retention effects of nutrients in Xiangjiaba reservoir[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3530-3538.
- [51] 唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 等. 三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2096-2106.  
Tang X Y, Tong S C, Huang G X, *et al.* Tempo-spatial and retention analysis of total phosphorus in the Three Gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2096-2106.
- [52] 李思璇, 宋瑞, 许全喜, 等. 长江上游总磷通量时空变化特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(5): 179-185.  
Li S X, Song R, Xu Q X, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of total phosphorus flux in the upper reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(5): 179-185.
- [53] Han C N, Zheng B H, Qin Y W, *et al.* Analysis of phosphorus import characteristics of the upstream input rivers of Three Gorges reservoir [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(12), doi: 10.1007/s12665-016-5832-x.
- [54] 周建军, 张曼, 李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(4): 865-880.  
Zhou J J, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(4): 865-880.
- [55] 乔飞, 孟伟, 郑丙辉, 等. 长江流域污染负荷核算及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 80-87.  
Qiao F, Meng W, Zheng B H, *et al.* Pollutant accounting and source analyses in the Yangtze River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 80-87.
- [56] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. *水科学进展*, 2008, **19**(4): 460-466.  
Li Q K, Li H E, Hu Y W, *et al.* Estimation of non-point source pollution loading on Tongguan section of the Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(4): 460-466.
- [57] USEPA. Hypoxia in the northern Gulf of Mexico [R]. Washington: Environmental Protection Agency, 2007. 96-97.
- [58] 郑丙辉, 王丽婧, 龚斌. 三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(2): 125-131.  
Zheng B H, Wang L J, Gong B. Load of non-point source pollutants from upstream rivers into Three Gorges reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(2): 125-131.
- [59] 温泉, 马迎群, 时瑶, 等. 基于污染负荷核算的岷江流域总磷污染成因分析及对策[J]. *地学前沿*, 2020, **27**(4): 332-339.  
Wen Q, Ma Y Q, Shi Y, *et al.* Cause and control strategy of total phosphorus pollution in the Minjiang River Basin based on pollution load analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, **27**(4): 332-339.
- [60] 秦延文, 马迎群, 温泉, 等. 沱江流域总磷污染负荷、成因及控制对策研究[J]. *环境科学与管理*, 2020, **45**(2): 20-25.  
Qin Y W, Ma Y Q, Wen Q, *et al.* Pollution load, causes and control strategy of total phosphorus pollution in Tuojiang River Basin [J]. *Environmental Science and Management*, 2020, **45**(2): 20-25.
- [61] Horowitz A J. A review of selected inorganic surface water quality-monitoring practices: are we really measuring what we think, and if so, are we doing it right? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(6): 2471-2486.
- [62] Horowitz A J. Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element and nutrient fluxes [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **400**(1-3): 315-343.
- [63] 娄保锋, 臧小平, 洪一平, 等. 水样不同处理方式对总磷监测值的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(8): 1393-1399.  
Lou B F, Zang X P, Hong Y P, *et al.* The effect of sample pretreatment on determination of total phosphorus in water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(8): 1393-1399.
- [64] 水利部长江水利委员会. 长江流域地图集 [M]. 北京: 中国地图出版社, 1999.  
Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Atlas of the Changjiang River Basin [M]. Peking: China Cartographic Publishing House, 1999.
- [65] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报(2000-2020) [R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2001-2021.
- [66] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].  
GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water[S].
- [67] GB 3838-1988, 地面水环境质量标准[S].  
GB 3838-1988, Environmental quality standard for surface water[S].
- [68] 娄保锋, 朱圣清. GB 3838-2002 实施前后水质参数的可比性研究[J]. *人民长江*, 2008, **39**(23): 127-129, 133.
- [69] 郝晨林, 邓义祥, 汪永辉, 等. 河流污染物通量估算方法筛选及误差分析[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(7): 1670-1676.  
Hao C L, Deng Y X, Wang Y H, *et al.* Study on the selection and error analysis of riverine pollutant flux estimation methods [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(7): 1670-1676.
- [70] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查技术报告(上册) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [71] 徐宗学. 水文模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [72] Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for water resources in rural basins [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, **111**(6): 970-986.
- [73] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, *et al.* SWAT: model use, calibration, and validation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, **55**(4): 1491-1508.
- [74] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3): 574-581.

- Long T Y, Liang C D, Li J C, *et al.* Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(3): 574-581.
- [75] Esralew R A, Tortorelli R L. Nutrient concentrations, loads, and yields in the Eucha-Spavinaw Basin, Arkansas and Oklahoma, 2002-09[R]. Washington: USGS, 2010. 11-15.
- [76] 黄真理, 李玉樑, 陈永灿, 等. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
Huang Z L, Li Y L, Chen Y C, *et al.* Water quality prediction and water environmental carrying capacity calculation for Three Gorges reservoir[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.
- [77] 李崇明, 黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究(1)—蓄水前污染负荷现状[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(5): 611-622.  
Li C M, Huang Z L. Study on the pollutant loads into Three Gorges reservoir (1) ——pollutant load status before impoundment [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(5): 611-622.
- [78] Stamm C, Jarvie H P, Scott T. What 's more important for managing phosphorus: loads, concentrations or both? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(1): 23-24.
- [79] 吴琼慧, 刘志学, 陈业阳, 等. 长江经济带“三磷”行业环境管理现状及对策建议[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1233-1240.  
Wu Q H, Liu Z X, Chen Y Y, *et al.* Status and countermeasures of environmental management of the 'three phosphorus' industry in the Yangtze River economic belt [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1233-1240.
- [80] 刘兆孝, 姚宛艳, 刘扬扬. 引江补汉工程生态环境影响及保护对策[J]. 中国水利, 2022, (18): 54-56.  
Liu Z X, Yao W Y, Liu Y Y. Eco-environment impacts of the river diversion project from the Yangtze River to the Han River and protective measures [J]. *China Water Resources*, 2022, (18): 54-56.
- [81] 许静, 王永桂, 陈岩, 等. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征[J]. 地球科学, 2020, **45**(6): 1937-1947.  
Xu J, Wang Y G, Chen Y, *et al.* Characteristics on spatiotemporal variations of surface water environmental quality in Tuojiang River in upper reaches of Yangtze River Basin [J]. *Earth Science*, 2020, **45**(6): 1937-1947.



## CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i>	( 1 )
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i>	( 8 )
Variation Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i>	( 23 )
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	( 36 )
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i>	( 48 )
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i>	( 61 )
Analysis of O <sub>3</sub> Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i>	( 71 )
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i>	( 81 )
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	( 93 )
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i>	( 104 )
Driving Forces and Mitigation Potential of CO <sub>2</sub> Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i>	( 115 )
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i>	( 123 )
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i>	( 131 )
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i>	( 140 )
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i>	( 151 )
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i>	( 159 )
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i>	( 173 )
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i>	( 181 )
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i>	( 194 )
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long	( 207 )
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan	( 218 )
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong	( 228 )
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i>	( 239 )
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i>	( 248 )
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i>	( 262 )
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i>	( 275 )
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i>	( 287 )
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i>	( 300 )
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i>	( 314 )
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i>	( 323 )
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i>	( 335 )
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	( 343 )
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i>	( 354 )
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i>	( 364 )
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie	( 376 )
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i>	( 386 )
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i>	( 396 )
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i>	( 407 )
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i>	( 417 )
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i>	( 429 )
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i>	( 439 )
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i>	( 450 )
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i>	( 459 )
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i>	( 470 )
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	( 480 )
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i>	( 489 )
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge	( 496 )
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i>	( 508 )
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei	( 520 )
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i>	( 530 )
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i>	( 543 )
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i>	( 555 )
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i>	( 567 )
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i>	( 576 )
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i>	( 584 )
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i>	( 594 )
Comparison of Pb <sup>2+</sup> Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO <sub>2</sub> Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i>	( 606 )