

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的蔡代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征

杨耿, 秦延文*, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨

(中国环境科学研究院环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 近些年, 岷江水体 TP 污染情况严重, 而水体沉积物这一潜在污染源, 对水质安全带来的威胁也不容忽视. 为揭示岷江干流表层沉积物中磷形态的空间分布特征, 于 2016 年 12 月, 采集了岷江干流(阿坝~宜宾)表层沉积物样品, 应用改进的 SEDEX 法对表层沉积物中的弱吸附态磷 Ex-P、可提取态有机磷 Org-P、铁结合态磷 Fe-P、自生磷灰石磷 Ca-P、碎屑磷 De-P 和非活性磷 Res-P 等 6 种磷形态质量浓度进行了测定. 结果表明, 岷江干流表层沉积物中总磷 TP 的质量浓度为 $522.17 \sim 979.22 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 已远超全国土壤磷素背景值 $700 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 表明岷江沉积物中 TP 浓度较高. 从空间分布来看, 岷江中游眉山河段中的表层沉积物是颗粒最细、有机质和 TP 质量浓度最高的区域. 岷江干流表层沉积物磷的主要赋存形态为 Ca-P 和 De-P, 两者共占 TP 的质量分数为 75% 以上. 同时, 岷江干流表层沉积物中的生物可利用磷(Ex-P、Org-P 和 Fe-P 总和)占 TP 的质量分数为 10.31%~29.62%, 其中以中游河段(尤其是眉山段、乐山段)质量浓度最高, 这表明岷江中游河段表层沉积物中磷的生物可利用性较强, 潜在环境风险较高.

关键词: 岷江; 表层沉积物; 磷形态; 水质; 分布

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2165-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708130

Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams

YANG Geng, QIN Yan-wen*, HAN Chao-nan, MA Ying-qun, LIU Zhi-chao, YANG Chen-chen

(State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In recent years, the total phosphorus pollution in Minjiang River was serious, and the surface sediments of the Minjiang River also threatened water quality. To study the spatial distributions of phosphorus in the surface sediments of the Minjiang River, samples of surface sediments were collected upstream (Aba District) and downstream (Yibin District) of the Minjiang River in December, 2016. The sediments were analyzed with the modified sequential extraction method (SEDEX) to obtain six forms of phosphorus, including exchangeable phosphorus (Ex-P), exchangeable organic phosphorus (Org-P), iron-bound phosphorus (Fe-P), authigenic phosphorus (Ca-P), detrital phosphorus (De-P), and refractory phosphorus (Res-P). The results indicated that the contents of total phosphorus (TP) in surface sediments ranged from $522.17 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ to $979.22 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, which were far more than the soil phosphorus background values ($700 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). The spatial distribution characteristics of the TP of surface sediments indicated that the TP concentrations in sediments at the Meishan sections (the middle reach of the Minjiang River) were higher than those in the other sections. This was related to the smaller particle size and higher OM contents in sediments in the Meishan sections. The main phosphorus forms in the sediments in the Minjiang River were Ca-P and De-P, with their concentrations accounting for 75% of TP in the sediments. The bio-available phosphorus, which included Ex-P, Org-P, and Fe-P, accounted for 0.31%-29.62% of TP in the sediments of the Minjiang River. The concentrations of bio-available phosphorus in sediments at the Meishan sections and Leshan sections (the middle reach) were highest, indicating that bio-available phosphorus in the surface sediments was high, and its potential environmental impact risks were higher.

Key words: Minjiang River; surface sediment; phosphorus forms; water quality; distribution

2016 年中国环境状况公报显示^[1], 目前总磷是长江流域的首要污染因子. 磷是河流生态系统中的主要营养因素之一^[2], 过量排放的磷是导致湖库、河口及近岸海域富营养化的关键^[3,4]. 近些年, 长江三峡水库形成之后干支流水质变化及支流富营养化问题受到研究学者的关注, 相关研究指出磷是三峡水库生态系统生产力的限制性因素^[5,6], 且上游入库河流输入是三峡水库磷的主要来源, 其占三峡总入库磷负荷的 85% 以上^[7]. 岷江位于四川盆

地腹部地区, 是长江上游最主要的支流之一. 然而, 据 2016 年四川省环境状况公报显示^[8], 岷江水系有超过 35% 的监测断面由于总磷污染, 水质低于 IV 类水标准. 作为长江上游的重要支流, 岷江水

收稿日期: 2017-08-16; 修订日期: 2017-11-14

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS)项目; 四川省科技项目(SCZC328301_20160004)

作者简介: 杨耿(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域磷污染调查与综合整治, E-mail: yanggeng321@163.com

* 通信作者, E-mail: qinyw@craes.org.cn

体总磷污染必然会对长江上游干流水质产生较大影响,进而间接对三峡水库水质变化和富营养化过程产生一定程度的影响。

目前,国内外学者针对岷江水系研究多集中于水体中磷形态的季节和空间分布特征^[9,10],而关于水体沉积物这一潜在污染源^[11],其中的磷在合适条件下释放出来,对水质安全带来的威胁有所忽视。而国内关于沉积物的研究则主要集中于湖泊、水库、海湾等相对宽广的水域^[12~15],结果表明水体富营养化状态与沉积物中磷形态有着密切联系^[16]。但关于河流沉积物中磷形态的组成分布的研究相对缺乏^[17],因此了解岷江水系表层沉积物中磷的分布及其变化具有重要的现实意义。本文以岷江干流水系为研究对象,系统采集岷江干流表层沉积物样品,采用改进后的 SEDEX 法对岷江干流沉积物中的磷形态分布展开研究,揭示流域环境下沉积物中磷形态组成及空间分布特征,以期控制岷江磷污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域与采样点布设

岷江全长 735 km,流域面积为135 881 km²,流经阿坝州、成都、眉山、乐山、宜宾市等地,在宜宾汇入长江^[9]。岷江全流域均在四川省境内,以都江堰为界,都江堰以上为上游,以下至乐山为中游,乐山以下为下游^[18]。

岷江从上游按照行政区划分为 5 个河段,分别是阿坝、都江堰-成都、眉山、乐山、宜宾。重点参考岷江干流的国控与省控监测断面设置,并为了确保反映全河段状况,每个河段至少布设干流入境、出境点位两个,中间适当增设点位,以此布设本次采样点位。如图 1 所示,岷江干流点位阿坝 2 个,编号为 G1~G2;都江堰-成都 3 个,编号为 G3~G5;眉山 3 个,编号为 G6~G8;乐山 3 个,编号为 G9~G11;宜宾 3 个,编号为 G12~G14,共计 14 个站点的样品采集。

1.2 样品的采集与处理

2016 年 12 月,采集了岷江干流 14 个断面的表层沉积物和水样。采集表层沉积物样品,剔除碎石和植物残体,置于塑料袋中密封并低温保存。实验室内表层沉积物样品经冷冻干燥后,研磨过筛(100 目),将其保存在干燥器中,用于磷形态分析。取一部分水样立即装于聚乙烯瓶中,4℃ 冷藏保存;另取一部分水样立即经 0.45 微孔过滤器过滤,滤液

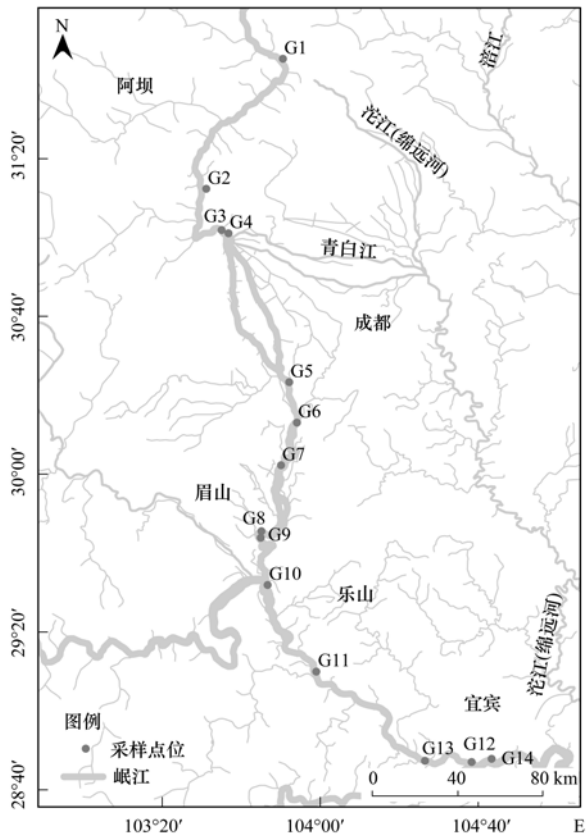


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

装于聚乙烯瓶中,加入 2 滴氯仿,进行 4℃ 冷藏保存。

1.3 分析测试方法

(1) 水样

表层水体的 pH 值、水温、溶解氧等常规水质参数的测定使用 YSI 便携式多参数水质监测仪(美国 YSI6600V2 型)进行现场测定和直接读取;采用磷钼蓝分光光度法分别测定水样中溶解态总磷 TDP、溶解态磷酸盐 PO₄³⁻ 和总磷 TP 的浓度(表 1)。溶解有机磷 DOP 为溶解态总磷 TDP 与溶解态

表 1 化学分析方法

Table 1 Methods for the chemical analysis

样品类型	测试指标	测试方法说明
未过滤水样	TP 全量(全量磷)	水样摇匀,全样,测定总磷,测定方法参照 GB 3838-2002
0.45 μm 微孔滤膜过滤之后的水样	TDP(总溶解态磷)	测定方法参照 GB 3838-2002
水样	PO ₄ ³⁻ (活性磷酸盐)	测定方法参照 GB 3838-2002
水样	TPP(总颗粒态磷)	TPP = TP 全量 - TDP
水样	DOP(溶解态有机磷)	DOP = TDP - PO ₄ ³⁻ - P
悬浮颗粒物	Σ P 以及磷形态	SEDEX 提取法

磷酸盐 PO_4^{3-} 之差, 颗粒态总磷 TPP 为总磷 TP 与溶解态总磷 TDP 之差.

(2) 沉积物

表层沉积物中总磷 (TP) 利用 SMT 方法测定^[19], 沉积物有机质 (OM) 含量用重铬酸钾容量法测定, 粒径的测定利用激光粒度分析仪 MS2000 (英国 Malvern) 进行分析. 沉积物中各磷形态质量浓度的测定采用改进的 SEDEX 连续提取方法^[20], SEDEX 连续提取方法是 1992 年 Ruttenberg 提出的海洋沉积物不同形态磷的连续提取方法, 该法在提取相之间用 MgCl_2 淋洗, 减少了磷的再吸附效应, 并将沉积物磷划分为弱吸附态磷、可提取态有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷和非活性有机磷这 6 种形态^[21,22], 具体方法见表 2.

表 2 改进的 SEDEX 连续提取方法

步骤	提取试剂和条件	磷形态
1	1 mol·L ⁻¹ MgCl ₂ , 1 h, 25℃	弱吸附态 Ex-P
2	1% SDS, 2 h, 3~6 次, 25℃	可提取有机态 Org-P
3	CDB, 8~12 h, 25℃	铁结合态 Fe-P
4	1 mol·L ⁻¹ HAC-NaAC, 6 h, 25℃	自生磷灰石 Ca-P
5	1 mol·L ⁻¹ HCl, 16~20 h, 25℃	碎屑态 De-P
6	550℃ 加热 2 h, 1 mol·L ⁻¹ HCl, 20 h, 25℃	非活性磷 Res-P

1.4 质量控制

实验所用试剂均为分析纯或分析纯以上试剂, 本研究选用国家标准物质 (GBW-07309) 水系沉积

物标准参考样 GSD-9, 其给定 TP 质量浓度介于 634~706 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 即 20.45~22.77 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 采用改进的 SEDEX 连续提取方法测得的 TP 均在标样给定的范围内, 回收率为 92.54%~93.08%. 所有样品均做 3 次平行实验, 相对标准偏差均小于 5%, 确保了实验分析过程的可靠性.

2 结果与讨论

2.1 采样点水质的基本情况

水体中 TP 质量浓度较高区域集中在成都出境, 中游眉山、乐山河段. 眉山河段水体中 TP 的平均质量浓度为 0.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 乐山段中 TP 平均质量浓度为 0.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 都超过了Ⅲ类水标准. 其中眉山、乐山河段 TDP 占水体中 TP 的平均比例分别为 80.19%, 59.71%, 而溶解态磷酸盐 PO_4^{3-} 占水体中 TDP 的平均比例分别为 79.44%, 63.89%, 水体中磷形态是以溶解性磷酸盐 PO_4^{3-} 为主, 生物可利用性较高. 同时, 岷江水体中 pH 和 DO 的最低点分别出现在中游眉山 G6 和乐山 G11 处 (表 3 和图 2).

2.2 表层沉积物的基本理化性质 (粒径、有机质)

岷江干流表层沉积物中粒径和有机质测定分析结果见表 4.

2.2.1 粒径

岷江上游阿坝、都江堰地区表层沉积物为粒径较大的砂土, 砂粒 (2.0~0.02 mm) 组分质量浓度

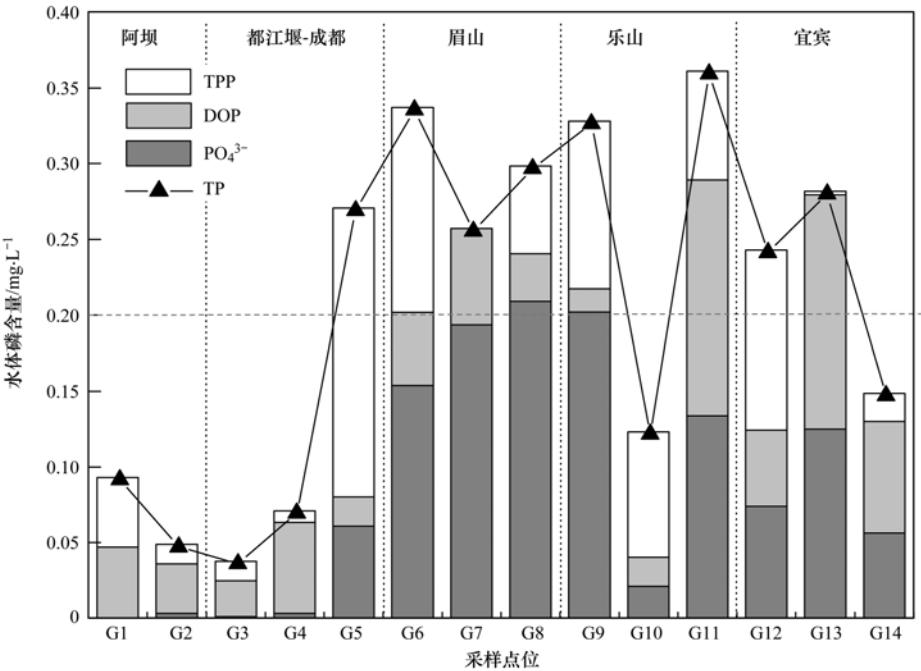


图 2 岷江干流水体磷的质量浓度与组成分布

Fig. 2 Distribution of P concentrations and compositions in the Minjiang River

表 3 岷江水质参数

Table 3 Hydrology and water quality parameters

项目	pH	溶解氧 DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$
阿坝	8.36	6.82	13.35
都江堰-成都	8.40	9.01	10.77
眉山	8.11	6.47	11.90
乐山	8.19	6.11	15.17
宜宾	8.27	6.49	12.00

超过 80%。岷江中下游眉山至宜宾地区沉积物为粒径较小的粉砂质砂土,粉砂(0.02~0.002 mm)和黏土(<0.002 mm)组分质量浓度较上游有所增加。岷江中游眉山河段的表层沉积物颗粒最细,沉积物颗粒的粗细与河流的沉积作用相关,眉山河段和岷江上下游相比,流速较慢,河流沿程携带的细颗粒

物质易于沉积。岷江干流总体上呈现出从上游向下游表层沉积物颗粒逐渐细化的趋势。

2.2.2 有机质

岷江干流表层沉积物中有机质(OM)含量范围为 0.02%~2.03%,这与黄河沉积物中有机质含量接近^[23],但与长江中下游湖泊有机质含量(OM)相比^[24],岷江干流的有机质含量较低。这主要是因为湖泊流动性差^[25],有利于细颗粒物质沉积,细颗粒对有机质的吸附能力强。岷江沉积物中有机质的质量浓度最大值出现在岷江中游眉山河段,这主要是由于岷江干流眉山河段,汇入多条途径城区的支流如体泉河、思蒙河等,其污染源分布集中,含磷污水入河总量较大^[26]。同时,眉山河段沉积物中的细颗粒也有利于有机质的富集。

表 4 岷江干流表层沉积物中有机质和粒径的分布/%

Table 4 Distribution of soil organic matter and particle size in the surface sediment of Minjiang River/%

项目	岷江表层沉积物				
	阿坝	都江堰-成都	眉山	乐山	宜宾
有机质	0.14~0.70	0.02~0.81	0.31~2.03	0.14~1.34	0.17~1.09
黏土	2.75~3.55	0.52~2.42	2.42~6.35	0.63~5.26	3.83~8.63
粉砂	4.38~13.36	6.90~22.30	22.22~48.87	6.17~32.97	22.24~42.40
砂	72.71~93.23	71.59~91.85	44.76~72.50	61.74~92.96	48.93~73.78

2.3 总磷的质量浓度及空间分布特征

岷江干流按上下游划分成阿坝、都江堰-成都、眉山、乐山和宜宾河段,其表层沉积物 TP 质量浓度的最大值、最小值和平均值分布如图 3 所示。可以看出,沉积物 TP 质量浓度范围为 453.16~1 338.15 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均质量浓度为 744.98 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。据相关报道,中国土壤磷元素背景值^[27]为 700 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,四川省的磷元素背景值^[28]为 453 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,岷江干流沉积物磷质量浓度已远超背景值。

TP 的分布受沉积物的粒径和有机质质量浓度的影响,从空间分布上来看,沉积物 TP 质量浓度最小值出现在岷江上游阿坝河段,平均质量浓度为 522.17 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;最大值在中游眉山河段,平均质量浓度为 979.22 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,最大值和最小值之间相差近一倍。由表 4 测定结果可知,眉山河段表层沉积物的粒径较小,有机质含量最高,这些特征都有利于 TP 在眉山的富集。

2.4 不同形态磷的质量浓度

岷江干流表层沉积物中磷形态质量分数分布如图 4 所示。弱吸附态磷 Ex-P、铁磷 Fe-P、自生磷灰石磷 Ca-P 和碎屑磷 De-P 是岷江沉积物中无机磷(IP)组分,可提取态有机磷 Org-P 和非活性有机磷

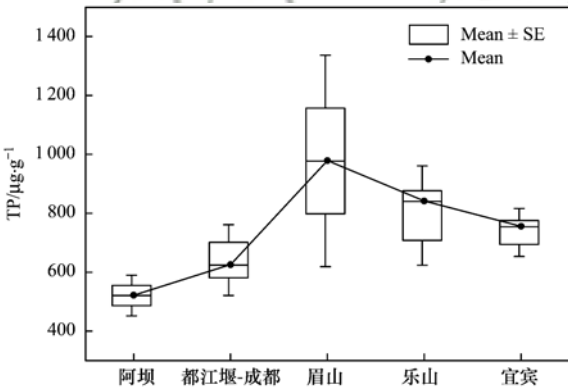


图 3 岷江干流表层沉积物中总磷质量浓度变化

Fig. 3 Distribution of TP content in surface sediment of Minjiang River

Res-P 是岷江沉积物中有机磷(OP)组分。IP 的浓度为 418.57~1 033.98 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,OP 的范围在 34.58~304.17 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,IP 占 TP 的 77.27%~92.37%,OP 所占比例较小。表明岷江干流表层沉积物中 OP 质量浓度较低,主要以 IP 为主。

可以看出,IP 中磷形态以自生磷灰石磷 Ca-P 和碎屑磷 De-P 为主,自生磷灰石磷 Ca-P 的质量浓度范围为 26.73~108.98 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均质量浓度为 67.01 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。碎屑磷 De-P 的质量浓度范围为

410.93 ~ 548.54 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，平均质量浓度 466.94 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，两者含量之和占 IP 的 43.48% ~ 99.35%。这主要是由于自生磷灰石磷 Ca-P 和碎屑磷 De-P 属于生物不可利用磷，在沉积物中的稳定性较强，一般的水力扰动下不会释放到水体中，且岷江干流表层沉积物中颗粒组成以砂粒等粗颗粒为主，而自生磷灰石磷 Ca-P 和碎屑磷 De-P 一般在较大粒径中有着较高质量浓度^[29]。而弱吸附态磷 Ex-P 和铁磷 Fe-P 所占比例较小，弱吸附态磷 Ex-P 的质量浓度变化范围为 4.91 ~ 31.01 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，平均质量浓度为 15.71 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，仅占 TP 的 2.48%。铁磷 Fe-P 的质量浓度变化范围为 13.34 ~ 219.21 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，平均质量浓度 82.92 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Fe-P 被认为是沉积物中最易被解吸的部分之一，其在适当的氧化还原条件下可

被生物利用，铁结合态磷与环境的污染程度及人类活动密切相关，可以反映区域受磷污染的状况^[30]。铁磷的循环与转化受到铁元素的地球化学循环的影响^[31]，铁是浮游藻类生长的限制因子，地壳丰度为 6.71%。

OP 不能被生物吸收利用，但其矿化过程中部分转化成无机磷酸盐释放进入水体中，进而被生物吸收利用^[32]，其中可提取态有机磷 Org-P 是易被矿化降解的活性有机磷形态，质量浓度变化范围为 24.50 ~ 142.42 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，平均质量浓度为 74.95 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，主要以磷酸酯、磷脂、核酸等为主，Org-P 占 OP 的 17.06% ~ 83.15%。非活性磷 Res-P 的质量浓度在 18.03 ~ 56.70 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间，平均质量浓度为 38.62 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，所占 OP 比例较小。

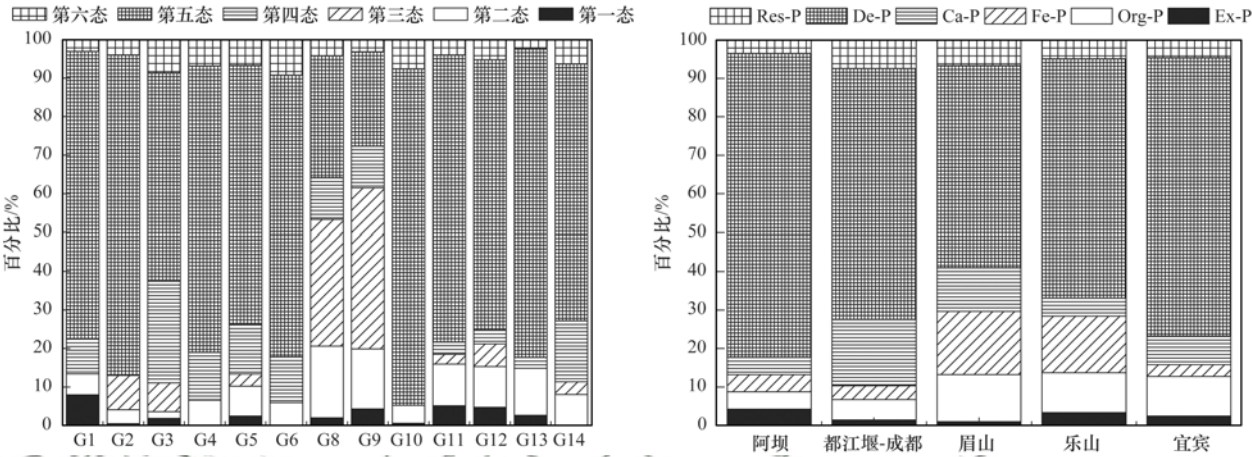


图 4 岷江表层沉积物中各形态磷相对质量浓度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of relative contribution of P fractions in surface sediment of Minjiang River

2.5 不同形态磷的空间分布

由于受到河段的地形环境、水动力学特征、水体中生物活动及污染来源等因素的影响，岷江干流不同河段的表层沉积物中磷形态分布特征有所差异^[33]。

由 2.3 节可知岷江沉积物 TP 质量浓度范围为

453.16 ~ 1 338.15 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，平均质量浓度为 744.98 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，低于黄河与洞庭湖，而高于三峡库区支流（香溪河、大宁河与小江）和鄱阳湖 TP 质量浓度的平均水平^[34]，结果表明岷江沉积物中 TP 质量浓度处于较高水平，见图 5。

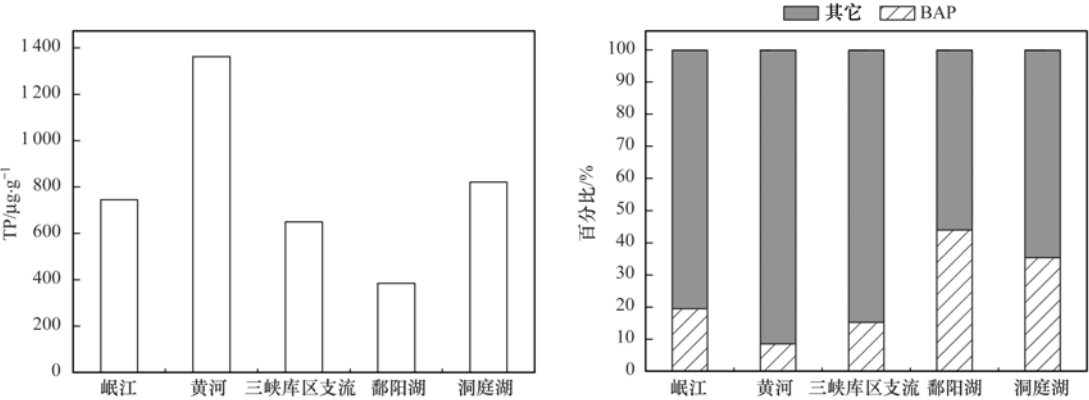


图 5 岷江及不同河流湖泊沉积物中磷质量浓度

Fig. 5 Contents of P in sediments of different rivers and lakes

但是,仅通过 TP 质量浓度不能很好地反映磷内负荷的影响作用,不同形态的磷对水体中磷质量浓度的影响作用不同. 其中 BAP(生物可利用磷,即 Ex-P + Org-P + Fe-P)最容易释放,对水体磷负荷影响最大. 岷江沉积物以碎屑态磷 De-P 为主,占 TP 的 66.05%,而易释放的 BAP 占 TP 质量浓度的 10.31% ~ 29.62%,长江中下游湖泊(鄱阳湖、洞庭湖)沉积物中 BAP 所占 TP 比例均显著高于岷江沉积物,但岷江沉积物中的 BAP 质量浓度与其他河流相比如黄河、三峡库区支流,处于较高水平. 其中马旭阳^[23]将 $\omega(\text{BAP})/\omega(\text{Ca-P})$ 作为评价水体酸化或碱化所引起磷释放的风险,当 $\omega(\text{BAP})/\omega(\text{Ca-P})$ 高于 0.5 时,在碱性环境下 P 的释放强度大, $\omega(\text{BAP})/\omega(\text{Ca-P})$ 低于 0.5 时,在酸性环境下 P 的释放强度大. 由图 6 可知,岷江干流全程仅有眉山~乐山处点位 $\omega(\text{BAP})/\omega(\text{Ca-P})$ 高于 0.5,岷江全程为弱碱性水体. 因此,岷江干流沉积物中 TP 质量浓度较高,且岷江中游存在潜在的磷释放风险.

2.5.1 生物可利用磷(BAP)

研究估算生物可利用磷是分析沉积物磷形态的一个重要目的,生物可利用磷在表层沉积物中的质量浓度对水体中磷的质量浓度有着重要影响. 表层沉积物中生物可利用磷的质量浓度是磷释放潜力的一个直观表现,本研究中将第一态弱吸附态磷 Ex-P,第二态可提取态有机磷 Org-P,第三态铁结合态磷 Fe-P 确定为生物可利用磷. 其与水体较高的磷负荷有相当大的关系,这种潜在的巨大磷负荷与水

体的高营养级和藻类暴发关系密切^[35].

从空间分布结果来看,由图 4 和图 6 所示,第一态弱吸附态磷 Ex-P 最大值出现在岷江中游乐山段,最小值出现在上游阿坝段. 对于第二态可提取态有机磷 Org-P,其最高值出现在中游眉山段,占 TP 比例为 12.23%. 由表 4 可知,岷江干流眉山段沉积物中 OM 所占质量分数是全河段最高为 1.17%,且沉积物中 Org-P 与 OM 呈显著正相关关系($R=0.94^*$, $P<0.05$, $n=14$),较高质量浓度的 OM 是导致眉山段 Org-P 高的原因之一,此外眉山段林地覆盖面积较大,造纸工业污染源分布集中,也是导致眉山段 Org-P 高的原因.

第三态铁结合态磷 Fe-P,最高值也出现在岷江中游眉山段,占 TP 比例为 16.38%. 最小值出现在上游阿坝段. 根据 Tessier 等的研究^[36],可将颗粒物中铁分为水可溶态铁、可交换态铁等 6 种形态. 其中可溶态铁或可交换态铁,当理化因子发生改变时,就会解吸被释放进入水体,与水体中磷酸根 PO_4^{3-} 产生 $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ ($K_{sp}=1.0 \times 10^{-36}$) 或 FePO_4 ($K_{sp}=1.3 \times 10^{-22}$) 沉淀,或吸附在 $\text{FeO}(\text{OH})$ 表面,形成 Fe-P 使水体中磷质量浓度降低. 但在弱碱性环境中, OH^- 与 PO_4^{3-} 竞争表面吸附点位,导致部分 Fe-P 释放^[23]. 由表 3 可知,眉山段 pH 值为全河段最低(弱碱性)、OM 最高,且沉积物中 Fe-P 与 pH 呈显著负相关关系($R=-0.92^*$, $P<0.05$, $n=14$),与 OM 呈显著正相关关系($R=-0.89^*$, $P<0.05$, $n=14$). 岷江眉山段自身低 pH 和高 OM 的水文环境条件是导致 Fe-P 高的原因之一.

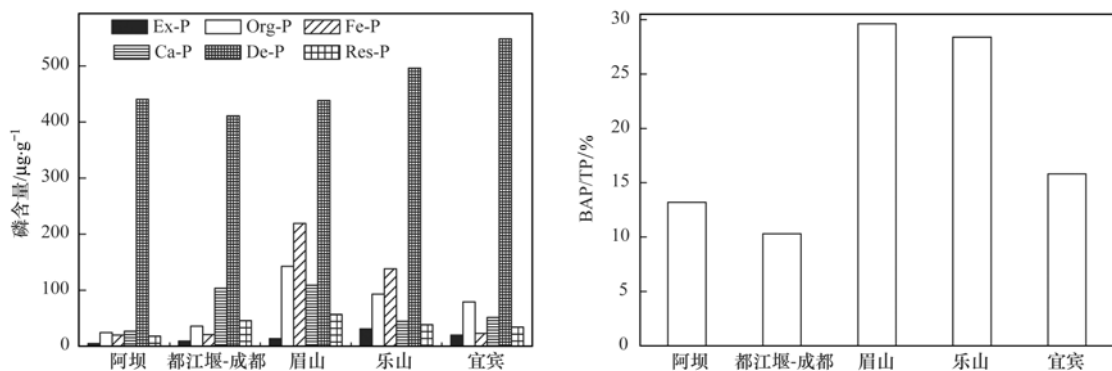


图 6 岷江表层沉积物磷形态质量浓度变化

Fig. 6 Distribution of P fractions in surface sediment of Minjiang River

岷江干流表层沉积物中生物可利用磷,其质量浓度范围为 39.99 ~ 375.16 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占 TP 的 10.31% ~ 29.62%,平均为 19.46%. 从图 6 可以看出,中游眉山河段之前,生物可利用磷质量浓度

较低,眉山之后,生物可利用磷浓度升高,且维持一定的高浓度. 生物可利用磷占总磷的比例亦呈现出相似的规律. 有研究表明,沉积物颗粒越小,有机质质量浓度越高,沉积物 TP 中生物可利用磷的

质量浓度就越高^[37]。由 2.2 节的测定结果可知, 岷江中游眉山河段是干流表层沉积物中颗粒粒径最细, 有机质质量浓度最高的区域。

同时, 由表 5 可知, Org-P 和 Fe-P 与岷江水体中 PO_4^{3-} 呈显著正相关, R 分别为 0.98 和 0.92。岷江眉山段水体中高质量浓度的磷酸盐与该段沉积物中高质量浓度的 Org-P 和 Fe-P 质量浓度有着密切联系。陈雨艳^[38]等得到的岷江流域水质状况综合评价结果显示, 岷江上游和下游水质状况较好, 岷江中游水质状况较差, 这与图 6 所表现出的中游生物可利用磷质量浓度高, 上下游较低的分布趋势有着一定关系。而 Org-P 和 Fe-P 是生物可利用磷的主要组成成分, Ex-P 浓度较低且自身转化周期较短,

由此判断, 岷江水体中溶解性磷酸盐浓度主要受沉积物中 Org-P 和 Fe-P 浓度的影响。

2.5.2 生物不可利用磷

第五态碎屑态磷 De-P 是岷江干流沉积物中质量浓度最高的无机磷形态, 碎屑磷 De-P 最大值出现在岷江下游宜宾段, 最小值出现在上游都江堰-成都处, 质量浓度分布相对比较稳定。对于第四态自生磷灰石磷 Ca-P 和第六态非活性磷 Res-P, 沉积物中平均质量浓度分别为 $67.01 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $38.62 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 最大值出现在岷江中游眉山处, 最小值位于上游阿坝段(图 6)。这些磷形态在沉积物中稳定存在, 很难被生物利用, 对岷江水体富营养化的影响较小。

表 5 岷江各水质和沉积物指标的相关系数矩阵¹⁾ ($n = 14$)

	PO_4^{3-}	Ex-P	Org-P	Fe-P	Ca-P	De-P	Res-P	pH	DO	OM
PO_4^{3-}	1									
Ex-P	0.53	1								
Org-P	0.98 **	0.50	1							
Fe-P	0.92 *	0.39	0.91 *	1						
Ca-P	0.41	-0.20	0.43	0.44	1					
De-P	0.24	0.66	0.24	-0.09	-0.50	1				
Res-P	0.73	0.24	0.74	0.69	0.89 *	-0.19	1			
pH	-0.97 **	-0.55	-0.96 **	-0.92 *	-0.22	-0.28	-0.56	1		
DO	-0.57	-0.54	-0.55	-0.47	0.50	-0.63	0.15	0.72	1	
OM	0.93 *	0.19	0.94 *	0.89 *	0.51	0.03	0.70	-0.90 *	-0.47	1

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

3 结论

(1) 水体中 TP 质量浓度较高区域集中在成都出境, 中游眉山、乐山河段, 并以磷形态是以溶解性磷酸盐 PO_4^{3-} 为主。沉积物中总磷 TP 质量浓度在 $522.17 \sim 979.22 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。其岷江中游眉山河段中的沉积物是颗粒最细、有机质 OM 和总磷 TP 质量浓度最高的区域。岷江沉积物的总磷 TP 质量浓度高于黄河、三峡流水系, 可见岷江干流表层沉积物中 TP 质量浓度处于较高水平, 且向水体释放磷的风险较高。

(2) 岷江干流表层沉积物中颗粒组成以砂粒等粗颗粒为主, 利于 IP 中自生磷灰石磷 Ca-P 和碎屑磷 De-P 的富集, 其平均质量浓度分别为 $67.01 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $466.94 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。同时, 可提取态有机磷 Org-P 和非活性磷有机磷 Res-P 的平均质量浓度分别为 $74.95 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $38.62 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, OP 占 TP 的质量分数低于 30%, 表明了岷江干流表层沉积物中有有机磷质量浓度较低, 主要以 IP 的 Ca-P 和 De-P 形式

为主。

(3) 沉积物中的弱吸附态磷 Ex-P、可提取有机磷 Org-P 和铁结合态磷 Fe-P 为能被生物利用的生物可利用磷。沉积物颗粒越细, 有机质质量浓度越高, 生物可利用磷的质量浓度就越高。第一态弱吸附态磷 Ex-P 最大值出现在岷江中游乐山段, 最小值出现在上游阿坝段。第二态可提取态有机磷 Org-P 和第三态铁结合态磷 Fe-P, 最大值均出现在岷江中游眉山段, 分别占 TP 的比例为 12.23% 和 16.38%。

(4) 生物可利用磷约占 TP 的 10.31% ~ 29.62%, 集中分布在中游眉山、乐山地区, 岷江眉山段水体中高质量浓度的磷酸盐与该段沉积物中高质量浓度的 Org-P 和 Fe-P 质量浓度呈显著正相关。

参考文献:

[1] 国家环境保护总局. 2016 年《中国环境状况公报》(摘录)[J]. 环境保护, 2017, 45(11): 35-47.
[2] 骆伙仁. 湖库沉积物中磷的化学形态研究综述[J]. 广州环境科学, 2012, 27(1): 6-8, 24.
Luo H R. Review of Researches on phosphorus chemical

- speciation in lake and reservoir sediments [J]. *Guangzhou Environmental Sciences*, 2012, **27**(1): 6-8, 24.
- [3] Yuan H Z, Chen L, Liu E F, *et al.* Fractions and transformation of organic phosphorus in sediments from a eutrophic lake in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(35): 27314-27325.
- [4] Stokal M, Kroeze C, Wang M R, *et al.* Reducing future river export of nutrients to coastal waters of China in optimistic scenarios[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 517-528.
- [5] 张永生, 李海英, 任家盈, 等. 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- Zhang Y S, Li H Y, Ren J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of nutrients in Daning River sediments and their correlations with chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- [6] 罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- Luo Y H, Nie X Q, Li X L, *et al.* Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- [7] 冉祥滨, 姚庆祯, 巩瑶, 等. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J]. *水生态学杂志*, 2009, **30**(2): 1-8.
- Ran X B, Yao Q Z, Gong Y, *et al.* Nutrient budget of Three Gorges Reservoir pre-and-post impoundment [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, **30**(2): 1-8.
- [8] 四川省环境保护厅. 2015 年四川省环境质量状况[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2016.
- [9] 冷荣艾. 岷江干流水污染趋势分析及其防治措施探讨[J]. *四川水利*, 2014, (1): 58-62.
- [10] 孟春晓, 王小波, 黄芸, 等. 基于季节性 Kendall 法的岷江干流水质变化趋势分析[J]. *四川环境*, 2015, **34**(6): 87-93.
- Meng C X, Wang X B, Huang Y, *et al.* Analysis of water quality tendency of the mainstream of Minjiang River with seasonal Kendall method[J]. *Sichuan Environment*, 2015, **34**(6): 87-93.
- [11] Zhang W Q, Jin X, Zhu X L, *et al.* Phosphorus characteristics, distribution, and relationship with environmental factors in surface sediments of river systems in Eastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(19): 19440-19449.
- [12] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.
- Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze estuary reservoir, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [13] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物中不同形态氮的时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(3): 235-242.
- Zhao H C, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of the nitrogen forms in the sediments of Erhai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 235-242.
- [14] Guan Q Y, Wang L, Wang F F, *et al.* Phosphorus in the catchment of high sediment load river: a case of the Yellow River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 660-670.
- [15] Wang L Q, Liang T. Distribution characteristics of phosphorus in the sediments and overlying water of Poyang Lake [J]. *PLoS One*, 2015, **10**(5): e0125859.
- [16] 尹爱经, 吴鹏豹, 周慧平, 等. 秦淮河干流沉积物磷形态沿程分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1366-1373.
- Yin A J, Wu P B, Zhou H P, *et al.* Forms and distribution of phosphorus in Qinhuai River sediments along an urbanization gradient[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1366-1373.
- [17] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- Li R Z, Li F, Zhou A J, *et al.* Distribution and bioavailability of nitrogen and phosphorus species in the sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [18] 蒋红, 陈明千, 王文君. 岷江上游河流健康状况的表征及评价[A]. 见: 2013 生态环境评价研讨会论文集. 南京: 中国环境科学学会, 中国环境保护产业协会, 2013.
- [19] Zhang W Q, Jin X, Ding Y K, *et al.* Composition of phosphorus in wetland soils determined by SMT and solution ^{31}P -NMR analyses[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(9): 9046-9053.
- [20] 韩超南. 大辽河河口区水体及悬浮颗粒物氮、磷的形态分布与变化特征研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2014.
- [21] 刘军, 臧家业, 冉祥滨, 等. 长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3243-3253.
- Liu J, Zang J Y, Ran X B, *et al.* Sedimentary phosphorus speciation in the coastal hypoxic area of Changjiang estuary and its environmental significance [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3243-3253.
- [22] Yang B, Liu S M, Wu Y, *et al.* Phosphorus speciation and availability in sediments off the eastern coast of Hainan Island, South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2016, **118**: 111-127.
- [23] 马旭阳. 黄河水体沉积物中铁与磷的形态分布及相关分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2015.
- [24] 黎睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(6): 1831-1839.
- Li R, Wang S R, Xiao S B, *et al.* Sediments phosphorus forms and loading in the lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River and Yunnan Plateau, China [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1831-1839.
- [25] 王春雨. 碳、氮同位素示踪北京城区河湖沉积物有机质来源[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [26] 蒋华英, 吴艳娟, 易灵. 岷江眉山段水环境容量研究[J]. *广州化工*, 2012, **40**(22): 121-123.
- Jiang H Y, Wu Y J, Yi L. The research on the water environmental capacity for Mijiang River in Meishan [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, **40**(22): 121-123.
- [27] 谭和平, 陈能武, 黄苹, 等. 四川茶区土壤营养元素背景值研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, **12**(6): 784-788.
- Tan H P, Chen N W, Huang P, *et al.* Background of nutrition

- elements in tea garden soils in Sichuan province [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, **12**(6): 784-788.
- [28] 朱礼学, 刘志祥, 陈斌. 四川成都土壤地球化学背景及元素分布[J]. *四川地质学报*, 2004, **24**(3): 159-164.
- Zhu L X, Liu Z X, Chen B. Geochemical background and element distribution in soil in Chengdu, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2004, **24**(3): 159-164.
- [29] 魏俊峰, 陈洪涛, 刘月良, 等. 2008 年调水调沙期间黄河下游悬浮颗粒物中磷的赋存形态[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 368-374.
- Wei J F, Chen H T, Liu Y L, *et al.* Phosphorus forms of the suspended particulate matter in the Yellow River downstream during water and sediment regulation 2008 [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 368-374.
- [30] 胡喆. 南四湖沉积物-水体界面氮磷迁移转化规律研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2015.
- [31] 杨宏伟, 马旭阳. 黄河干流表层沉积物总磷、总铁的含量及相关性分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(8): 145-149.
- Yang H W, Ma X Y. Distribution and correlation analysis of total phosphorus and iron content in surface sediments of Yellow River mainstream[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(8): 145-149.
- [32] Zhang W Q, Zhu X L, Jin X, *et al.* Evidence for organic phosphorus activation and transformation at the sediment-water interface during plant debris decomposition[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 458-465.
- [33] 秦延文, 郑丙辉, 韩超南, 等. 引江济太调水河段悬浮颗粒物中磷的形态与分布研究[A]. 见: 中国环境科学学会. 2013 水资源生态保护与水污染控制研讨会论文集[C]. 北京: 中国环境科学学会, 2013.
- [34] 潘婷婷, 赵雪, 袁轶君, 等. 三峡水库沉积物不同赋存形态磷的时空分布[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2968-2973.
- Pan T T, Zhao X, Yuan Y J, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of different phosphorus forms in sediments from the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2968-2973.
- [35] 孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 等. 北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3361-3367.
- Meng J, Yao Q Z, Chen H T, *et al.* Forms and distributions of particulate phosphorus in the surface sediments of North Yellow Sea[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3361-3367.
- [36] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*. 1979, **51**(7): 844-851.
- [37] Yao Q Z, Du J T, Chen H T, *et al.* Particle-size distribution and phosphorus forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(4): 3385-3398.
- [38] 陈雨艳, 杨坪, 向秋实, 等. 岷江流域水质状况评价及变化趋势分析[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(6): 53-57.
- Chen Y Y, Yang P, Xiang Q S, *et al.* Evaluation of the water quality in Minjiang River and analysis on its variation trend[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(6): 53-57.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)