

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳输运的影响

张婷婷^{1,2}, 姚鹏^{1,3,4*}, 王金鹏^{1,2}, 潘慧慧^{1,2}, 高立蒙^{1,2}, 赵彬^{1,2}, 李栋^{1,2}

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 3. 海洋科学与技术青岛协同创新中心, 青岛 266100; 4. 中国海洋大学海洋有机地球化学研究所, 青岛 266100)

摘要: 流域内各种自然过程及人为活动对河流有机碳的输运都会产生影响, 而正确认识河流有机碳的输运过程是全球碳循环研究的重要方面. 于2012年调水调沙期间(6月19日至7月20日)在黄河利津采集了表层悬浮颗粒物, 进行了粒度组成、颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)及其稳定同位素丰度($\delta^{13}\text{C}$)等参数的分析, 用来研究调水调沙期间POC的来源、组成和丰度的变化规律与影响因素. 结果表明, 2012年黄河调水调沙可以根据径流量和输沙量的变化分为排水和排沙两个阶段, 这两个阶段黄河水沙及POC和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化, 体现了调水调沙对颗粒物及其赋存有机碳来源的影响. 排水阶段径流量高达 $4\,270\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 下游河道被冲刷, 使底层泥沙再悬浮, 因此这一阶段颗粒物粒径较粗(平均中值粒径 $13.9\text{ }\mu\text{m}$), 有机碳含量较低(平均 0.38%), $\delta^{13}\text{C}$ 偏正且稳定($-24.2\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$), 可能与底层泥沙中POC年龄较老、降解程度高有关; 排沙阶段含沙量大(可达 $17.8\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 颗粒物较细(平均中值粒径 $5.9\text{ }\mu\text{m}$), 有机碳含量较高(平均 0.50%), $\delta^{13}\text{C}$ 偏负且波动较大($-24.8\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$), 这与颗粒物主要来自上游水库和下游暴雨冲刷河岸, POC相对新鲜有关. 2012年调水调沙期间POC日通量与输沙量的变化一致, 总输送量约为 $1.13 \times 10^5\text{ t}$, 占全年POC输送量的12%. 与往年相比, 2012年黄河调水调沙时期径流量增大, 但输沙量和POC通量有所减小. 由此可见, 调水调沙对黄河颗粒有机碳的输运有重要影响, 而颗粒有机碳在调水调沙期间不同阶段也有明显不同的来源、组成和输运模式.

关键词: 黄河; 调水调沙; 颗粒有机碳; 稳定碳同位素; 输运

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2817-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.012

Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River

ZHANG Ting-ting^{1,2}, YAO Peng^{1,3,4*}, WANG Jin-peng^{1,2}, PAN Hui-hui^{1,2}, GAO Li-meng^{1,2}, ZHAO Bin^{1,2}, LI Dong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Collaborative Innovation Center of Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China; 4. Institute of Marine Organic Geochemistry, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Both natural processes and human activities in river basins have important impacts on the transport of riverine organic carbon (OC). Better understanding of the riverine OC transport processes is critical for the studies of global carbon cycling. Suspended particulate matters collected from the Lijin Station in the lower Yellow River during the water and sediment regulation (WSR) period in 2012 (19 June–20 July) were analyzed for grain size, particulate OC (POC) and stable carbon isotopic ratios ($\delta^{13}\text{C}$) to investigate the sources, composition, abundance of POC and the effect of WSR on the transport of POC. The results showed that the WSR in 2012 could be divided into two stages according to the variation of water and sediment discharges: the water-release stage (WRS) and the sediment-release stage (SRS). Variations of the water discharge, sediments, POC and $\delta^{13}\text{C}$ in these two stages reflected the impacts of WSR on the sources of particulate matters and associated OC. The water discharge in the WRS stage was the highest ($4\,270\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), and the sediments scoured from the riverbed in the lower reaches were the major source of suspended particulate matters in this stage, therefore the particles were characterized by relatively coarse grain size ($13.9\text{ }\mu\text{m}$ in average of median grain size), low POC (avg. 0.38%) and relatively enriched and constant $\delta^{13}\text{C}$ ($-24.2\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$), probably because POC in the sediments scoured from the riverbed had old radiocarbon ages and high degradation. The suspended particulate matters in the SRS stage were mainly derived from the upstream reservoirs and flushed riverbanks due to local rainstorm, and the POC age was relatively young, thus this stage was characterized by high concentration of suspended particulate matters (up to $17.8\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), fine particles ($5.9\text{ }\mu\text{m}$ in average of median grain size), high POC (avg. 0.50%), and depleted and varied $\delta^{13}\text{C}$ values ($-24.8\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$). Variation of daily POC flux had similar pattern with sediment discharge, and the total POC flux during the water and sediment regulation period was 1.13×10^5

收稿日期: 2015-01-11; 修订日期: 2015-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176063, 41221004)

作者简介: 张婷婷(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生物地球化学, E-mail: zhtt_2012@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yaopeng@ouc.edu.cn

tons, accounting for 12% of the total POC flux in 2012. Compared with previous years, the total water discharge during the WSR period in 2012 has increased, while the total sediment flux and POC flux have reduced. In general, WSR played an important role on the transport of POC in the Yellow River. And furthermore, there was significant difference in the sources, composition and transport of POC in different stages of WSR.

Key words: Yellow River; water and sediment regulation; particulate organic carbon; stable carbon isotope; transport

河流是陆源物质向海洋输运的主要途径,记录着流域内自然过程和人为活动的影响,并控制着河流自身、河口及近海的元素循环^[1,2]. 据估计,全球河流每年向海洋输送约 2×10^{10} t 颗粒物,其携带的有机碳($\sim 2 \times 10^8$ t)占到河流输出总有机碳的一半左右^[3]. 河流中颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)的来源及在输运过程中的迁移转化直接影响其入海之后的归宿^[4-6]. 研究表明,河流中 POC 主要来源于土壤、植物碎屑以及浮游生物、细菌等,人类活动所排放的有机碳(如生活污水、工业废水等)也是河流有机碳的来源之一^[1,7,8]. 工业革命以来,流域内人类活动(如农业灌溉、大坝建设、森林砍伐等)的加剧改变了河流自身的输运规律,进而对河口和边缘海包括碳在内的生源要素的生物地球化学循环和生态系统的发展产生了深远影响^[8-10]. 因此,对河流 POC 的来源、输运和归宿的认识不但是全球碳循环研究的重要内容,也有助于加深对河口和边缘海生态环境演变的了解.

黄河是中国第二大河,全长 5 464 km,在国际上素以含沙量高而著称^[11]. 然而,由于受到气候变化和人为活动的影响,在过去的 50 多年里黄河径流量和输沙量已大大降低,处于黄河下游的利津年径流量从 $4.74 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (1962 ~ 1969 年)下降到 $1.41 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (1990 ~ 1999 年),年输沙量则从 $1.37 \times 10^9 \text{ t}$ (1952 ~ 1959 年)下降到 $1.34 \times 10^8 \text{ t}$ (1990 ~ 1999 年),甚至一度出现断流^[12-15]. 为了解决黄河水沙输运不平衡导致的库区和河道泥沙淤积,自 2002 年

开始,每年的汛期初期(6 月底 ~ 7 月中旬)进行调水调沙,通过中游大型水库排水排沙,来清理水库淤积和冲刷河道,这期间进入河口的水量和泥沙量因此大幅增加. 无论是从时间的分布上,还是从有机碳的来源和性质上,这些过程势必会对黄河有机碳的输运产生影响,调水调沙也因此成为研究人为活动对黄河物质输运影响的绝佳人工实验. 研究表明,调水调沙期间具有较高的含沙量和 POC 通量,POC 对有机碳的贡献占绝对优势^[16-18];调水调沙在高水量阶段由于河道中颗粒物较粗,POC 质量分数(%)偏低,在高沙量阶段由于异重流的影响,含沙量与 POC 的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)会迅速增大^[19]. 然而,已有的研究中调水调沙期间采样密度较小,且多侧重于 POC 的质量浓度变化,而对整个调水调沙期间黄河下游 POC 组成、丰度、来源和通量的变化特点及调水调沙调度过程对其的影响了解还很少.

本研究对黄河下游利津 2012 年调水调沙期间的悬浮颗粒物进行了高密度采样(每天两次),分析这些颗粒物样品的粒度组成、POC 含量、稳定碳同位素丰度等参数,讨论调水调沙期间黄河下游 POC 的来源、丰度和组成的变化过程,以期为研究人为活动对黄河 POC 输运以及对河口和邻近海域碳的生物地球化学循环过程和生态系统的影响提供基础.

1 材料与方法

1.1 样品采集

如图 1 所示,采样点位于黄河下游的利津水文站

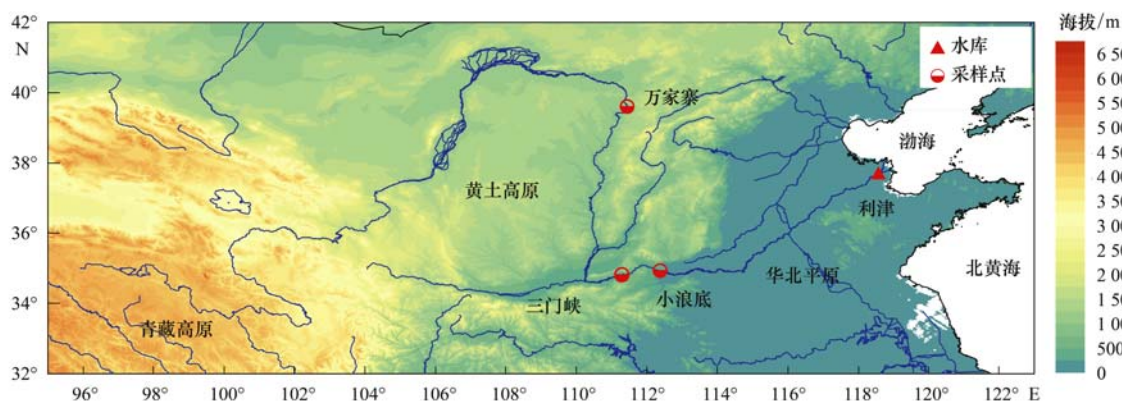


图 1 黄河流域及利津采样点示意

Fig. 1 Yellow River basin and sampling site of Lijin

(37.52°N, 118.31°E), 距黄河入海口 104 km. 由于利津以下无支流输入, 且不受潮汐的影响(在黄河非汛期, 潮汐仅能影响到距入海口 20 km 处)^[20], 通常利用此处所采集样品来计算黄河向渤海的物质入海通量.

2012 年黄河第 14 次调水调沙自 6 月 19 日 09:00 开始, 7 月 9 日 08:00 结束, 历时 20 d. 调水调沙主要分为排水和排沙两个阶段进行. 在排水阶段(6 月 19 日 09:00 至 7 月 3 日 08:00), 黄河中上游三门峡(位于小浪底水库上游 130 km 处)、万家寨(位于三门峡水库上游 860 km 处)等水库蓄水, 小浪底水库下泄清水, 最大下泄流量达 $4\,270\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. 在排沙阶段(7 月 3 日 08:00 至 7 月 9 日 08:00), 利用三门峡水库下泄过程中大的流量冲刷小浪底库区淤积的泥沙, 使之形成异重流, 向小浪底坝前推进, 同时利用万家寨水库下泄过程, 冲刷三门峡水库淤积泥沙, 并与前期小浪底库区形成的异重流衔接, 在连续的后续动力作用下, 小浪底库区异重流于 7 月 4 日 08:00 排沙出库, 出库泥沙达 $7.28 \times 10^7\text{ t}$, 7 月 4 日 15:30 最大出库含沙量约 $0.40\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$.

因为小浪底水库所排水沙需 5 d 左右才能影响到下游, 故调水调沙期间在利津的采样自 6 月 19 日开始, 至 7 月 20 日流量恢复之后结束. 整个采样时间分为前期(6 月 19 日至 6 月 23 日)、排水阶段(6 月 24 日至 7 月 7 日 08:00)、排沙阶段(7 月 7 日 16:00 至 7 月 17 日)以及后期(7 月 18 日至 7 月 20 日)这 4 个阶段. 在此期间, 每天早晨 08:00 和下午 16:00 左右在利津水文站采集表层水样约 300 mL, 用预先称重的 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 孔径的醋酸纤维滤膜(直径 47 mm)过滤, 滤膜于 -20°C 冷冻保存, 带回实验室用于悬浮颗粒物浓度(suspended particulate matters, SPM)和有机碳分析. 另取表层水样 500 mL 左右, 常温保存用于颗粒物的粒度组成分析. 调水调沙期间利津水文站采样当日径流量由水利部水文局水利信息中心提供(<http://xxfb.hydroinfo.gov.cn>).

1.2 悬浮颗粒物浓度和粒度组成分析

悬浮颗粒物浓度分析采用重量法, 将冷冻的滤膜冷冻干燥后称量, 与滤膜的质量差减后得到. 颗粒物粒度组成使用激光粒度仪(Mastersizer 2000, 英国马尔文)进行分析^[20], 共分为 3 个粒级, 按颗粒粒径从小到大依次为: 黏土($<4\text{ }\mu\text{m}$)、粉砂($4\sim63\text{ }\mu\text{m}$)和砂($>63\text{ }\mu\text{m}$). 粒度分析多次测定的相对标准偏差 $<3\%$ ($n=6$).

1.3 元素和稳定碳同位素分析

元素分析参照文献[22]的方法, 该方法采用盐

酸雾熏蒸去除样品中的无机碳, 然后使用元素分析仪进行测定, 适用于无机碳含量小的样品, 并特别适用于样品量少的样品分析. 将称重计算悬浮颗粒物浓度之后的颗粒物样品研磨, 取约 40 mg 放入 $4\times6\text{ mm}$ 的银囊中, 然后加入适量 Milli-Q 水以润湿样品, 将装有银囊的 96 孔板放入加有浓盐酸的干燥器, 熏蒸 12 h 以去除无机碳, 熏蒸结束后将样品置于烘箱内于 55°C 下烘干至恒重, 然后使用元素分析仪-稳定同位素比值质谱联用仪(vario MICRO cube EA + Isoprime IRMS)测定 POC 和颗粒氮(particulate nitrogen, PN)含量及稳定碳同位素丰度. POC 和 PN 所占质量分数以 POC(%) 和 PN(%) 表示, 多次测量的标准偏差为 $\pm 0.02\%$ (POC) 和 $\pm 0.01\%$ (PN) ($n=10$). 之后由公式 $\rho(\text{POC}) = \rho(\text{SPM}) \times \text{POC}\%$ 计算出 POC 的质量浓度.

同位素丰度的计算方法为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 1\,000 \quad (1)$$

式中, $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标准}}$ 分别是样品和标准(vienna peedee belemnite, VPDB)的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值. $\delta^{13}\text{C}$ 分析精度优于 $\pm 0.1\text{ ‰}$ ($n=10$).

2 结果与分析

2.1 2012 年调水调沙期间黄河下游径流量和悬浮颗粒物浓度的变化

调水调沙期间黄河利津径流量和悬浮颗粒物浓度均有剧烈的变化. 如图 2 所示, 径流量的变化为双峰型, 从调水调沙开始前的约 $700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 持续增长, 7 月 3 日达到最大值 $3\,470\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 然后迅速降低至 7 月 7 日的 $1\,620\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 之后再次升高至 $2\,950\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (7 月 10 日), 并逐渐降低至约 $1\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

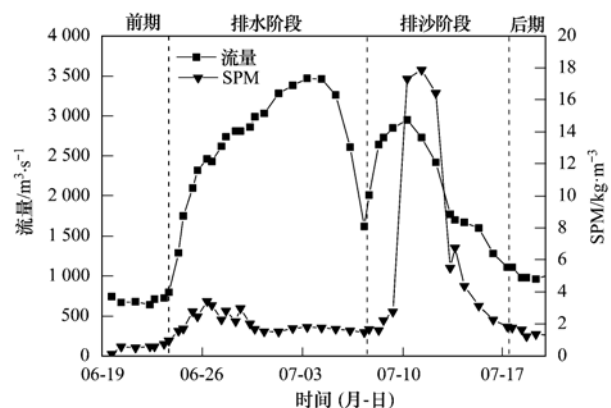


图 2 2012 年调水调沙期间黄河利津流量和悬浮颗粒物浓度的变化

Fig. 2 Variation of water discharge and SPM at the Lijin station during the water and sediment regulation period in 2012

(7月18日),之后保持平稳.调水调沙期间悬浮颗粒物浓度的变化也为双峰型,在6月24日左右也开始缓慢升高,并在6月26日达到第一个峰值($3.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),后略有下降,但保持波动,至6月30日降低至 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,并保持稳定至7月9日,然后迅速升高,并在7月11日达到第二个峰值($17.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),之后又迅速降低,并逐渐趋于平稳.到7月20日左右,黄河利津水文站径流量和悬浮颗粒物浓度受调水调沙的影响基本结束,转入正常状态.

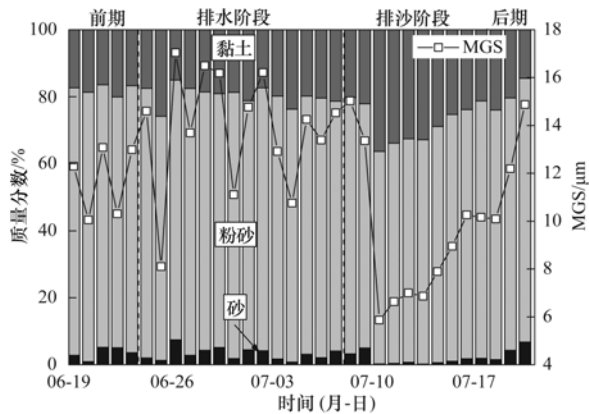


图3 2012年调水调沙期间黄河利津颗粒物粒度组成的变化

Fig. 3 Variation of particle size composition of SPM at the Lijin station during the water and sediment regulation period in 2012

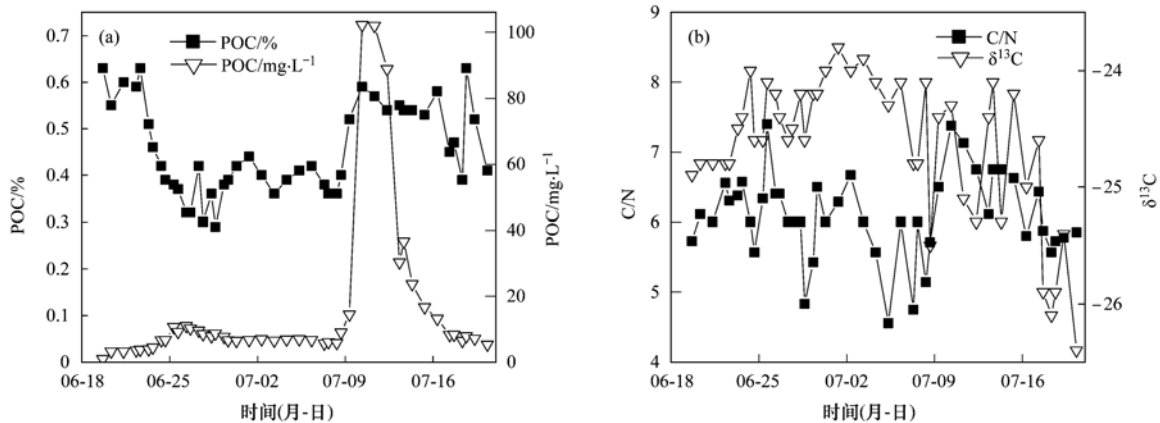
2.2 2012年调水调沙期间黄河下游颗粒物粒度组成的变化

如图3所示,调水调沙期间黄河利津悬浮颗粒物主要以粉砂为主($63.5\% \sim 80.5\%$,平均为 75.3%),其次为黏土($14.5\% \sim 36.3\%$,平均为 21.9%),砂的贡献最小,平均只有 2.8% ($0.2\% \sim 6.8\%$).粉砂在调水调沙前期($74.9\% \sim 80.5\%$,平均为 78.7%)和排水阶段($72.9\% \sim 80.5\%$,平均为

77.1%)所占比例波动较小,进入排沙阶段后,即在7月10日突降至 63.5% ($63.5\% \sim 76.9\%$,平均为 70.8%),其后随时间推移逐渐增大.黏土所占比例在排水阶段波动也较小($15.0\% \sim 25.8\%$,平均为 19.7%),但是在7月10日突增至 36.3% ,其后随时间推移逐渐减小.砂所占比例在排水阶段波动明显($0.8\% \sim 4.4\%$,平均为 3.2%),峰值出现在6月26日(6.8%),在7月10日突降至 0.2% ,其后随时间推移所占比例逐渐增大.粒度组成的这些变化造成中值粒径(median grain size, MGS)在调水调沙期间具有明显的变化特点.中值粒径在整个调水调沙期间在 $5.9 \sim 17.0 \mu\text{m}$ 之间变化,平均值为 $11.9 \mu\text{m}$.在调水调沙前期,中值粒径平均为 $11.7 \mu\text{m}$,在排水阶段增加为 $13.9 \mu\text{m}$,进入排沙阶段后,即7月10日突降至 $5.9 \mu\text{m}$,随后开始逐渐增大,整个排沙阶段平均为 $9.2 \mu\text{m}$;调水调沙后期中值粒径增大至 $14.9 \mu\text{m}$.

2.3 2012年调水调沙期间黄河下游 POC 和稳定碳同位素的变化

如图4(a)所示,调水调沙期间利津悬浮颗粒物中POC的质量分数在 $0.29\% \sim 0.63\%$ 之间(平均为 0.46%),具有明显的变化趋势.在调水调沙前期,POC的质量分数平均为 0.57% ;自6月23日POC的质量分数开始降低,并在排水阶段保持一个较低的水平(平均为 0.38%);7月9日突增至 0.52% ,并在整个排沙阶段保持一个较高的水平(平均为 0.50%);在调水调沙后期,即7月17日后POC的质量分数有所降低但波动较大,平均为 0.48% [图4(a)和图5(a)].调水调沙期间POC的质量浓度范围为 $0.9 \sim 102.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均为 $14.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与



(a) POC 质量分数和 POC 质量浓度; (b) C/N 比和 $\delta^{13}\text{C}$

图4 2012年调水调沙期间黄河利津 POC 质量分数和质量浓度、C/N 比和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化

Fig. 4 Variation of POC content, POC concentration, C/N and $\delta^{13}\text{C}$ during the water and sediment regulation period at the Lijin station in 2012

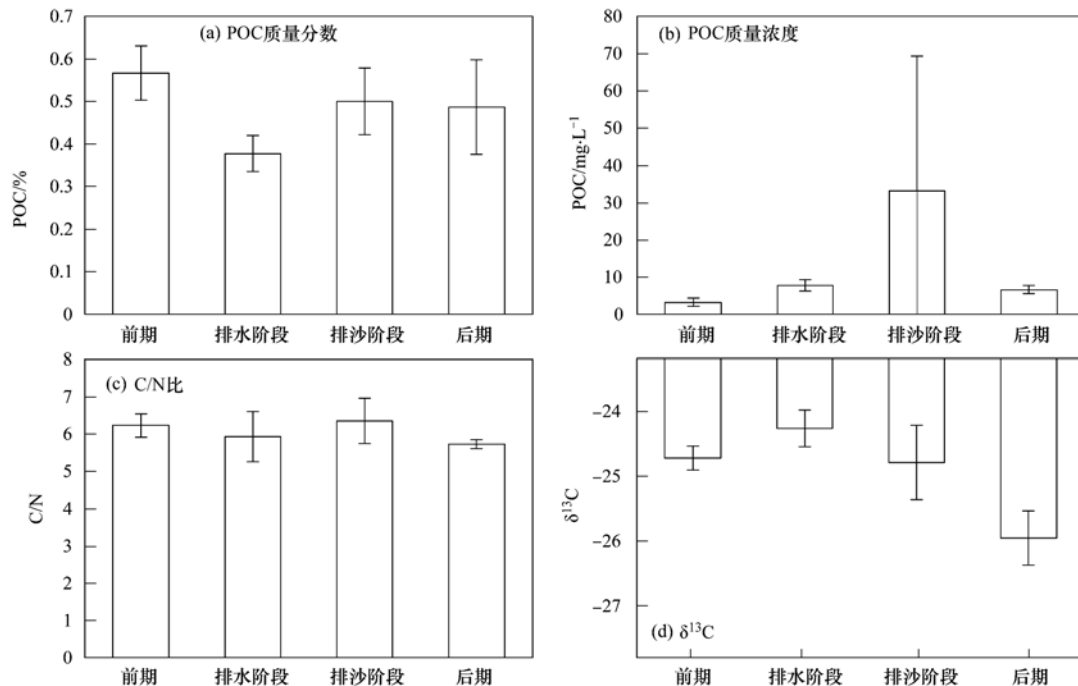


图5 2012年调水调沙时期各阶段POC质量分数和质量浓度、C/N比和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化

Fig. 5 Variation of POC content, POC concentration, C/N and $\delta^{13}\text{C}$ in different water and sediment regulation stages at the Lijin station in 2012

悬浮颗粒物浓度具有相似的变化趋势,即呈现双峰型.在6月24日左右开始缓慢升高,6月25日达到第一个峰值($10.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),后略有下降,至7月8日降低至 $5.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然后迅速升高达到第二个峰值($102.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),之后又迅速降低,并逐渐趋于平稳[图4(a)和图5(b)].

调水调沙期间悬浮颗粒物中PN的质量分数在0.05%~0.11%之间(平均值0.07%),与POC的质量分数一样也具有明显的变化趋势.在调水调沙前期,PN的质量分数平均为0.09%;自6月23日PN的质量分数开始降低,并在排水阶段保持一个较低的水平(平均为0.06%);在整个排沙阶段保持一个略高的水平(平均为0.08%);在调水调沙后期,即7月17日后PN的质量分数波动较大,平均为0.08%.

如图4(b)所示,调水调沙期间悬浮颗粒物的C/N比在4.8~7.4,平均为6.1,在各个阶段并不稳定.在调水调沙前期,C/N比平均为6.2;排水阶段先升高后逐渐降低(平均为5.9),6月25日有一个最高值7.4;在整个排沙阶段保持一个较高的水平(平均为6.4);在调水调沙后期逐渐下降,平均为5.7[图4(b)和图5(c)].

黄河调水调沙期间悬浮颗粒物的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 -23.8‰ ~ -26.4‰ 之间,平均为 -24.6‰ .在调

水调沙前期,悬浮颗粒物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均为 -24.7‰ ;在6月24日左右开始缓慢升高,7月1日达到峰值(-23.8‰),后开始下降,平均为 $-24.2\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$;在整个排沙阶段波动幅度较大($-24.8\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$);在调水调沙后期更加偏负,平均为 -26.0‰ [图4(b)和图5(d)].

3 讨论

3.1 黄河下游调水调沙期间水沙运输特征

调水调沙期间黄河水沙的变化明显不同步,体现了颗粒物来源的不同.水沙关系常用来识别悬浮颗粒物来源,顺时针变化和水峰滞后表示悬浮颗粒物源于河道冲刷引起的沉积物再悬浮,而逆时针变化和沙峰滞后则表示异重流的存在,悬浮颗粒物主要来源于上游水库或外源输入(如流域内暴雨引起的沿岸输入)^[19, 23~26].2012年黄河调水调沙排水阶段流量与含沙量呈现顺时针变化且存在水峰滞后现象[图2和图6(a)],此阶段悬浮颗粒物应主要来自于小浪底水库下游河道,因为下泄流量较大,受冲刷而悬浮^[26~28],这部分颗粒物砂的比例较高,因此中值粒径高于非调水调沙时期(图3).排沙阶段流量与含沙量呈现逆时针变化且存在沙峰滞后现象[图2和图6(b)],此阶段悬浮颗粒物应主要来自于小浪底水库下泄的以细颗粒为主的异重流^[27, 29].

以及在这一时期中下游暴雨冲刷沿岸的一部分外源输入(7月7日至7月9日下游普降暴雨),这一时期泥沙的中值粒径明显小于排水阶段,且黏土的比

例达到最大,砂的比例最小,而随着时间的推移,异重流的影响逐渐减弱,中值粒径和粒度组成趋向正常值(图3).

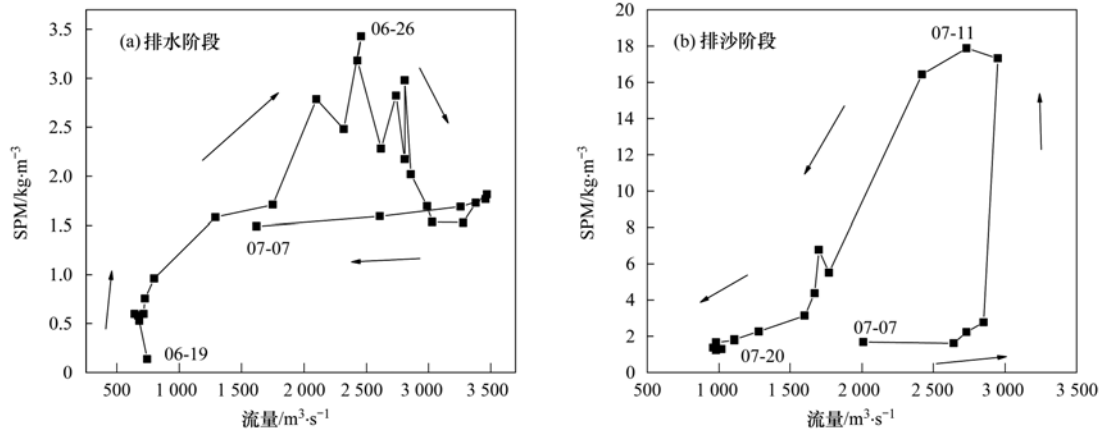


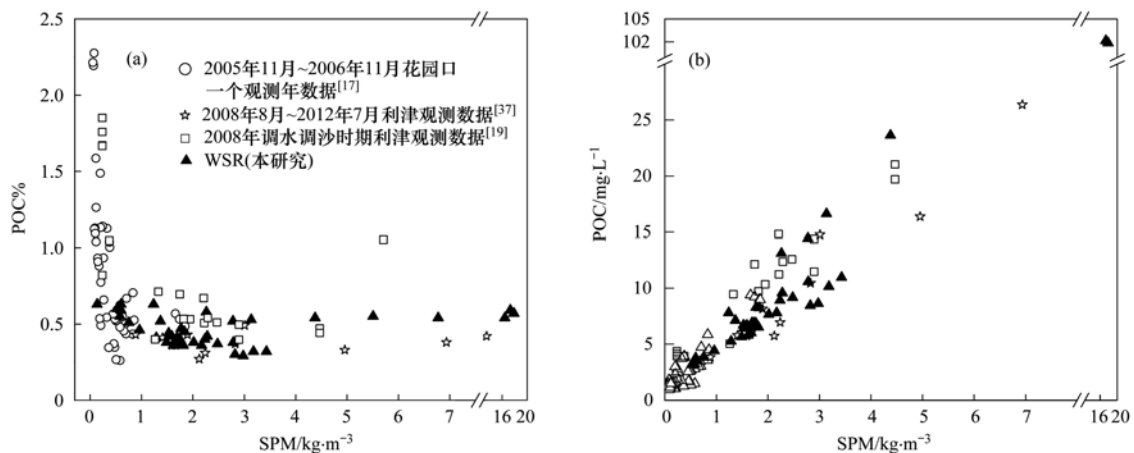
图6 2012年调水调沙期间排水和排沙两个阶段利津流量和悬浮颗粒物浓度的关系

Fig. 6 Relationship of discharge and SPM at Lijin station during the two stages of water and sediment regulation in 2012

3.2 黄河下游调水调沙期间颗粒有机碳的运输特征

黄河利津悬浮颗粒物中POC质量分数从总体上来看,其范围要低于世界其他河流,如长江(1.1%)^[7]、密西西比河(1.6%)^[30]和亚马逊河(1.2%)^[31],更接近于我国黄土高原土壤有机碳含量的平均值(0.4%)^[32].造成这种现象的原因可能是:当土壤被侵蚀时,植物碎屑会最先从地表被冲走,而随着水土流失的加剧,会有更多的土壤进入到河流中;研究表明黄土高原土壤提供黄河约90%的悬浮颗粒物,黄土中矿物成分主

要是硅酸岩碎屑矿物、黏土矿物以及碳酸岩矿物,矿物比重较大,造成POC的质量分数被矿物稀释而降低^[32, 33];同时,高含沙量降低了透光度,限制水生生物的生长,淡水浮游生物对POC的质量分数的贡献较弱^[19].不过,黄河利津POC的质量分数与悬浮颗粒物浓度总体也体现了世界多数河流的经典模式,即POC的质量分数随着悬浮颗粒物浓度的增加呈现降低趋势[图7(a)],而POC的质量浓度随着悬浮颗粒物浓度的增大而增大[图7(b)]^[19, 34~36].



(a) POC 质量分数与悬浮颗粒物浓度的关系; (b) POC 质量浓度与悬浮颗粒物浓度的关系

图7 黄河利津颗粒物中POC质量分数和质量浓度与悬浮颗粒物浓度的关系

Fig. 7 Relationships between POC content and SPM, and POC concentration and SPM of the Yellow River

随着中值粒径增大,POC的质量分数逐渐降低[图8(a)],一方面是由于较细颗粒物比表面积较大,容易吸附更多的有机物;另一方面随着颗粒物

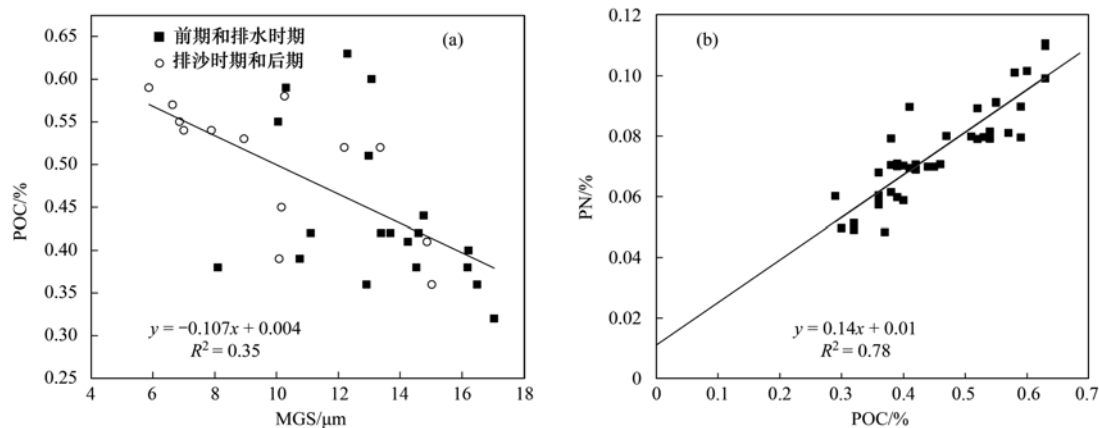
中值粒径增大,石英和长石等矿物的含量也随之增大,对有机碳有稀释作用^[38, 39].排水阶段悬浮颗粒物主要来源于小浪底下游河道,河道中的粗化层随

水流的增大进入到悬浮层中,这部分泥沙中值粒径较大,所含矿物质较多,有机碳相对较小。排沙阶段的异重流总体来说由较细的颗粒物占据主导地位,中值粒径较小,其表面容易吸附有机物而导致有机碳较高[图 8(a)]。

黄河调水调沙期间 POC 的质量分数在不同阶段表现也不相同。在排水阶段,由于含有机物较少的较粗悬浮颗粒物贡献较大,随着流量变化 POC 的质量分数在较低值空间内呈逆时针变化[图 9(a)]。在排沙阶段,由于异重流主要来自库区和中游河道冲刷,POC 的质量分数较高,因为有研究表明浮游生物含量较高的水库 POC 的质量分数要明显高于黄河干流^[19]。另外,雨水冲刷也会将大量有

机物带入河流中,这也可能导致排沙阶段 POC 的质量分数较高。随着流量变化,排沙阶段 POC 的质量分数在较高值空间内也呈现逆时针变化。在调水调沙前期和后期,POC 的质量分数与流量并没有明显趋势[图 9(a)]。这同时也说明了 4 个阶段 POC 在来源上的不同。

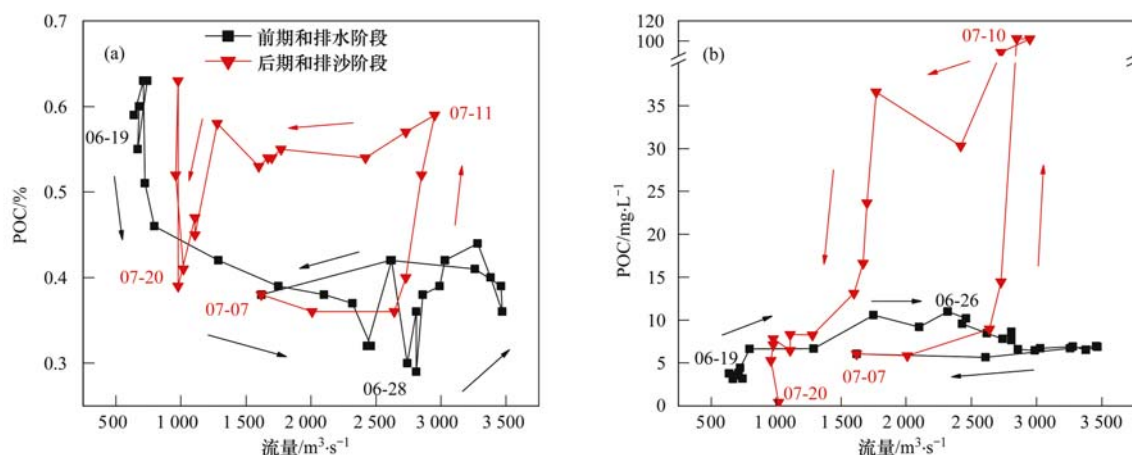
黄河悬浮颗粒物中 POC 的质量浓度由于与悬浮颗粒物浓度呈现良好的正相关[图 7(a)],在排水刚开始时,流量和悬浮颗粒物浓度都有显著的升高,POC 的质量浓度也由于悬浮颗粒物浓度的升高而升高,与流量的关系呈现顺时针变化[图 9(b)];在排沙阶段,异重流的产生是 POC 的质量浓度迅速升高的主要原因,与流量的关系呈现逆时针变化[图 9(b)]。



(a) 中值粒径与 POC 质量分数的关系; (b) PN 和 POC 质量分数的关系

图 8 2012 年调水调沙期间中值粒径和 PN 质量分数与 POC 质量分数的关系

Fig. 8 Relationship between POC content and MGS, and POC content and PN content during the water and sediment regulation period at the Lijin station in 2012



(a) POC 质量分数与流量的关系; (b) POC 质量浓度与流量的关系

图 9 2012 年调水调沙期间利津 POC 质量分数和质量浓度与流量的关系

Fig. 9 Relationships between discharge with POC content and POC concentration at Lijin station during the water and sediment regulation period in 2012

黄河利津调水调沙期间悬浮颗粒物的 C/N 比范围(4.8~7.4)与前人研究的黄河利津表层悬浮颗粒物全年平均 C/N 比(范围为 4.6~7.2,平均值为 5.9)较为一致^[37],但要明显低于有着显著的土壤有机碳输入的长江(平均值为 13.5)^[7]、亚马逊河(平均为 11.6)^[35]和大部分美国河流颗粒物的平均 C/N 比(11.2)^[40]。研究表明,颗粒物中较低的 C/N 比代表了水体中存在一些含氮的化合物(如亚硝酸盐、硝酸盐)以及细颗粒物(如黏土矿物)对水体中 NH_4^+ 的吸附^[21, 41]、土壤来源^[42]或浮游生物的有机物的贡献^[43, 44]。由于 POC 与 PN 的质量分数具有显著的正相关($R^2=0.78$),显示有机碳和有机氮的来源基本相同,但当 POC 的质量分数为零时,PN 的质量分数轴有正截距[~0.01%,图 8(b)],表明 PN 中可能有部分无机氮^[45~47]。因此,黄河利津颗粒物中较低的 C/N 比可能是由于其颗粒物中相对较低的 POC 的质量分数引起的,也可能是与农业施肥或生活污水的排放而导致的氮含量增加有关。

稳定碳同位素丰度与其他地球化学参数相结合可以用来有效地识别河流体系中 POC 的来源^[32, 35, 48]。黄河利津调水调沙期间悬浮颗粒物中 $\delta^{13}\text{C}$ 在排水阶段较为稳定,并且偏正。有研究表明,河道沉积物上的有机碳年龄较高,多是“老碳”,降解程度可能较大,可能造成其 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正^[49]。 $\delta^{13}\text{C}$ 在此阶段变化并不明显,这可能与黄河携带的颗粒有机碳主要来自黄河流域的预陈化土壤和沉积岩等较老碳的贡献有关^[10, 48],当这二者的量占绝对优势时,其他来源贡献容易被掩盖。 $\delta^{13}\text{C}$ 在排沙阶段波动较大,并且逐渐偏负,体现了在来源上的不同。排沙阶段的 POC 主要来自上游水库,相对较新鲜,浮游生物含量较高可能是 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负的原因,因为淡水浮游生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 具有明显偏负的特点^[38]。此外,在 2012 年调水调沙排沙阶段,中下游普降暴雨,降水冲刷两岸也可能导致植物碎屑等有机物进入河流中,也可能导致 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负。宁有丰等^[50]通过测定和分析一个水文年内黄河潼关段河流悬浮物和底泥中有机物的碳同位素组成,发现河流悬浮物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-27.4\text{‰} \sim -23.5\text{‰}$ 之间,波动较大,底泥的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-24.5\text{‰} \sim -23.4\text{‰}$,波动较小,这与本研究中排水阶段具有偏正且较为平稳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值而排沙阶段 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负且波动较大相一致。

3.3 调水调沙对黄河下游水沙和颗粒有机碳输送通量的影响

根据调水调沙期间采样当天径流量(Q)、悬浮

颗粒物浓度和 POC 的质量分数,计算了各自的日通量:

$$F_{\text{POC}} = \text{POC} \cdot \text{SPM} \times Q \times 3600 \times 24 \times 100 \quad (2)$$

$$F_{\text{SPM}} = \text{SPM} \cdot Q \times 3600 \times 24 \quad (3)$$

$$F_Q = Q \cdot 3600 \times 24 \quad (4)$$

式中, F_{POC} 代表 POC 日通量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; F_{SPM} 代表日输沙量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; F_Q 代表日径流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; POC(%)、SPM、 Q 分别为当天两个采样时间点结果的平均值。

如图 10 所示, POC 日通量与日输沙量的变化趋势一致,可见黄河调水调沙时期 POC 输运主要受控于黄河输沙量,即悬浮颗粒物浓度的变化。进一步的计算表明,2012 年整个调水调沙期间黄河利津径流量约为 $5.44 \times 10^9 \text{ m}^3$, 约占全年径流量的 19%; 输沙量约为 $2.24 \times 10^7 \text{ t}$, 占全年输沙量的 12%^[51]。POC 输送量约为 $1.13 \times 10^5 \text{ t}$, 占全年 POC 输送量的 12% (未发表数据)。调水调沙排水阶段总径流量($3.37 \times 10^9 \text{ m}^3$)占调水调沙时期的 59%, 要明显高于排沙时期($2.07 \times 10^9 \text{ m}^3$); 调水调沙排水阶段总输沙量($6.46 \times 10^6 \text{ t}$)占调水调沙时期的 29%, 则明显低于排沙时期($1.58 \times 10^7 \text{ t}$); 排水阶段 POC 输送总量($2.51 \times 10^5 \text{ t}$)约占调水调沙时期的 22%, 明显低于排沙时期($8.77 \times 10^5 \text{ t}$)。与往年相比,2012 年调水调沙期间径流量有所提高(2005~2010 年调水调沙时期平均径流量约为 $3.75 \times 10^9 \text{ m}^3$), 输沙量与往年相比有明显降低(2002~2011 年调水调沙时期平均输沙量约 $4.90 \times 10^7 \text{ t}$, 黄河水利委员会)。2012 年调水调沙时期有机碳输送通量与 2011 年调水调沙时期有机碳输送量(约 $1.64 \times 10^5 \text{ t}$)^[52]和 2008 年(约 $2.20 \times 10^5 \text{ t}$)^[17]相比有所下降,可能与 2012 年调水调沙期间输沙量下降有关。

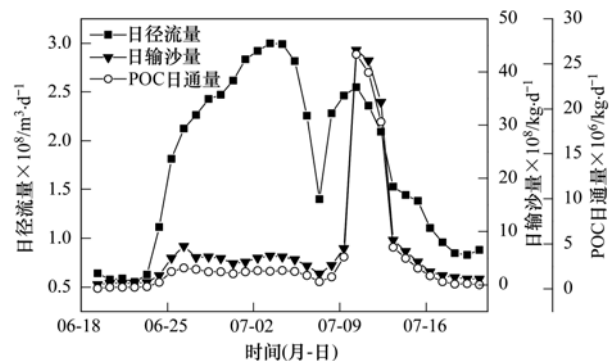


图 10 2012 年调水调沙期间黄河利津日径流量、日输沙量和 POC 日通量变化

Fig. 10 Variation of daily discharge, SPM and POC flux during the water and sediment regulation period at the Lijin station in 2012

4 结论

(1)2012 年调水调沙期间不同阶段黄河水沙的变化,体现了颗粒物来源的不同. 调水调沙排水阶段的泥沙主要来源于黄河下游河道沉积物的再悬浮,排沙阶段的泥沙则主要来自三门峡和小浪底水库截留的泥沙,以及暴雨冲刷两岸的泥沙.

(2)调水调沙期间颗粒物粒度组成、有机碳及其稳定同位素的变化同样体现了颗粒物及其赋存有机碳来源的不同. 调水调沙不同阶段有机碳在来源及组成上有着显著的差异. 在排水阶段表层悬浮颗粒物具有较高的中值粒径、偏低的有机碳含量和 C/N 比及偏正且稳定的 $\delta^{13}\text{C}$,这与颗粒物来自于河道再悬浮泥沙、POC 年龄较老、降解程度高有关;排沙阶段中值粒径降低、POC 质量分数升高和 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负,这与颗粒物主要来自上游水库,POC 相对新鲜有关.

(3)POC 日通量与日输沙量的变化趋势一致,表明黄河调水调沙期间 POC 输运主要受控于黄河输沙量的变化. 与往年相比,2012 年黄河 WSR 时期径流量增大,输沙量和 POC 通量有所减小,说明不但每一次调水调沙期间 POC 的输送有剧烈的变化,每年的调水调沙期间的 POC 输送也都是不同的.

参考文献:

- [1] Balakrishna K, Probst J L. Organic carbon transport and C/N ratio variations in a large tropical river: Godavari as a case study, India [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(3): 457-473.
- [2] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers [J]. *American Journal of Science*, 1982, **282**(4): 401-450.
- [3] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis [J]. *Marine Chemistry*, 1995, **49**(2-3): 81-115.
- [4] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1301-1346.
- [5] 邢建伟, 线微微, 绳秀珍. 2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2520-2527.
- [6] 张连凯, 覃小群, 杨慧, 等. 珠江流域河流碳输出通量及变化特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3025-3034.
- [7] Wu Y, Zhang J, Liu S M, *et al.* Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **71**(1-2): 13-25.
- [8] 姚冠荣, 高全洲. 河流碳循环对全球变化的响应与反馈 [J]. *地理科学进展*, 2005, **24**(5): 50-60.
- [9] Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, *et al.* The changing carbon cycle of the coastal ocean [J]. *Nature*, 2013, **504**(7478): 61-67.
- [10] Tao S Q, Eglinton T I, Montluçon D B, *et al.* Pre-aged soil organic carbon as a major component of the Yellow River suspended load: Regional significance and global relevance [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, **414**: 77-86.
- [11] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yangtze and Yellow rivers (China) [J]. *Marine Chemistry*, 1993, **43**(1-4): 235-246.
- [12] 楚纯洁, 李亚丽. 近 60 年黄河干流水沙变化及其驱动因素 [J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(5): 41-47.
- [13] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, *et al.* Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, **57**(3-4): 331-354.
- [14] Bi N S, Yang Z S, Wang H J, *et al.* Impact of artificial water and sediment discharge regulation in the Huanghe (Yellow River) on the transport of particulate heavy metals to the sea [J]. *CATENA*, 2014, **121**: 232-240.
- [15] Yu Y G, Shi X F, Wang H J, *et al.* Effects of dams on water and sediment delivery to the sea by the Huanghe (Yellow River): The special role of Water-Sediment Modulation [J]. *Anthropocene*, 2013, **3**: 72-82.
- [16] 刘冬梅. 黄河干流有机碳及调水调沙时期碳输运规律 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [17] 孙超. 黄河调水调沙时期的碳输运特征及花园口站碳系统各分量的年变化 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [18] 王亮. 黄河干流碳输运及人类活动对其影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [19] Zhang L J, Wang L, Cai W J, *et al.* Impact of human activities on organic carbon transport in the Yellow River [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(4): 2513-2524.
- [20] 陈友媛, 高丽, 杨应斌, 等. 黄河口生物地球化学指标特征在河海划界中的应用 [J]. *中国海洋大学学报*, 2008, **38**(4): 647-652.
- [21] Hu J F, Peng P A, Ha G D, *et al.* Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **98**(2-4): 274-285.
- [22] Yao P, Zhao B, Bianchi T S, Guo Z G, *et al.* Remineralization of sedimentary organic carbon in mud deposits of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: Implications for carbon preservation and authigenic mineral formation [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, **91**: 1-11.
- [23] Steegen A, Govers G, Nachtergaele J, *et al.* Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium [J]. *Geomorphology*, 2000, **33**(1-2): 25-36.
- [24] He H J, Yu Z G, Yao Q Z, *et al.* The hydrological regime and particulate size control phosphorus form in the suspended solid fraction in the dammed Huanghe (Yellow River) [J]. *Hydrobiologia*, 2010, **638**(1): 203-211.
- [25] Sui J J, Yu Z G, Xu B C, *et al.* Concentrations and fluxes of

- dissolved uranium the Yellow River estuary: seasonal variation and anthropogenic (Water-Sediment Regulation Scheme) impact [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, **128**: 38-46.
- [26] 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研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 368-374.
- [27] 刘俊峰, 和瑞莉, 姚宝萍. 黄河调水调沙试验对泥沙粒径变化影响分析[J]. *中国粉体技术*, 2005, **11**(2): 40-43.
- [28] 张龙军, 徐雪梅, 何会军. 黄河不同粒径悬浮物中 POC 含量及输运特征研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 342-347.
- [29] 李国英. 黄河中下游水沙的时空调度理论与实践[J]. *水利学报*, 2004, (8): 1-7.
- [30] Bianchi T S, Wysocki L A, Stewart M, *et al.* Temporal variability in terrestrially-derived sources of particulate organic carbon in the lower Mississippi River and its upper tributaries [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, **71**(18): 4425-4437.
- [31] Bouchez J, Galy V, Hilton R G, *et al.* Source, transport and fluxes of Amazon River particulate organic carbon: Insights from river sediment depth-profiles [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, **133**: 280-298.
- [32] Liu W G, An Z S, Zhou W J, *et al.* Carbon isotope and C/N ratios of suspended matter in rivers: an indicator of seasonal change in C₄/C₃ vegetation [J]. *Applied Geochemistry*, 2003, **18**(8): 1241-1249.
- [33] Zhang J, Huang W W, Létolle R, *et al.* Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **168**(1-4): 173-203.
- [34] Coynel A, Etcheber H, Abril G, *et al.* Contribution of small mountainous rivers to particulate organic carbon input in the Bay of Biscay [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **74**(2): 151-171.
- [35] Moreira-Turcq P, Bonnet M-P, Amorim M, *et al.* Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, **27**(1): 119-130.
- [36] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(1): 23-41.
- [37] Ran L S, Lu X X, Sun H, G *et al.* Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **498**: 76-88.
- [38] Alin S R, Aalto R, Goni M A, *et al.* Biogeochemical characterization of carbon sources in the Strickland and Fly rivers, Papua New Guinea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(F1): F01S05.
- [39] 杨作升, 赵晓辉, 乔淑卿, 等. 长江和黄河入海沉积物不同粒级中长石/石英比值及化学风化程度评价[J]. *中国海洋大学学报*, 2008, **38**(2): 244-250.
- [40] Onstad G D, Canfield D E, Quay P D, *et al.* Sources of particulate organic matter in rivers from the continental USA: lignin phenol and stable carbon isotope compositions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(20): 3539-3546.
- [41] Schubert C J, Calvert S E. Nitrogen and carbon isotopic composition of marine and terrestrial organic matter in Arctic Ocean sediments: implications for nutrient utilization and organic matter composition [J]. *DeepSea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2001, **48**(3): 789-810.
- [42] Ramaswamy V, Gaye B, Shirodkar P V, *et al.* Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopic signatures in sediments from the Ayeyarwady (Irrawaddy) continental shelf, northern Andaman Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2008, **111**(3-4): 137-150.
- [43] Hu L M, Guo Z G, Feng J L, *et al.* Distributions and sources of bulk organic matter and aliphatic hydrocarbons in surface sediments of the Bohai Sea, China [J]. *Marine Chemistry*, 2009, **113**(3-4): 197-211.
- [44] Xing L, Zhang H H, Yuan Z N, S, *et al.* Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Sea shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 2011, **31**(10): 1106-1115.
- [45] 陈彬, 胡利民, 邓声贵, 等. 渤海湾表层沉积物中有机碳的分布与物源贡献估算[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, **31**(5): 37-42.
- [46] 胡利民, 邓声贵, 郭志刚, 等. 夏季渤海湾及邻近海域颗粒有机碳的分布与物源分析[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 39-46.
- [47] Goni M A, Cathey M W, Kim Y H, *et al.* Fluxes and sources of suspended organic matter in an estuarine turbidity maximum region during low discharge conditions [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **63**(4): 683-700.
- [48] Wang X C, Ma H Q, Li R H, *et al.* Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(2): GB2025.
- [49] Hu B Q, Li J, Bi N S, *et al.* Effect of human-controlled hydrological regime on the source, transport, and flux of particulate organic carbon from the lower Huanghe (Yellow River) [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, doi: 10. 1002/esp. 3702.
- [50] 宁有丰, 王琦, 曹苗苗, 等. 黄河悬浮物及底泥的有机碳同位素研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, **28**(3): 119-122.
- [51] 苏茂林. 2012 年黄河泥沙公报 [EB/OL]. <http://www.yellowriver.gov.cn/nishagonggao/>. 2013-10-12.
- [52] 肖纯超. 黄河入海水质状况年内变化及河口羽流面积变化趋势研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行