

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析

冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉*

(河南师范大学环境学院, 黄淮水污染防治省部共建教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007)

摘要: 本研究于 2010 年 8 月采集黄河河南段 26 个表层水及悬浮颗粒物样品, 采用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 测定 22 种正构烷烃 ($C_{14} \sim C_{36}$) 的含量, 分析其组成特征, 并利用特征参数解析其来源。结果表明, 黄河河南段水相中正构烷烃浓度为 $521 \sim 5\,843 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $1\,409 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 组成特征以 C_{25} 为主峰碳的高碳单峰型。悬浮颗粒相中正构烷烃浓度范围为 $463 \sim 11\,142 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $1\,951 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 组成特征表现为双峰型, C_{25} 为主峰碳的高碳烃占优势, 同时存在低碳峰。多特征参数 OEP、CPI、% Wax C_n 以及 TAR 表明, 黄河河南段水相及悬浮颗粒物中正构烷烃主要来源于化石燃料的燃烧, 同时存在陆生植物来源。

关键词: 黄河河南段; 正构烷烃; 分布特征; 特征参数; 来源分析

中图分类号: X131.2; X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0893-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.013

Distribution Characteristics and Source Apportionment of *n*-Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section

FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, LIU Shu-hui, SUN Jian-hui*

(Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: To investigate the distributions and possible sources of *n*-alkanes in water and suspended particulate matter from Yellow River in Henan section, 26 water and suspended particulate matter samples were collected in August 2010 and 22 *n*-alkanes ($C_{14} \sim C_{36}$) were quantitatively determined by gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS). Potential sources of *n*-alkanes were analyzed using different characteristic parameters. The results indicated that total concentrations of 22 *n*-alkanes were $521 \sim 5\,843 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ with a mean concentration of $1\,409 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, while the total amounts of *n*-alkanes in the suspended particulate matter were $463 \sim 11\,142 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ with a mean value of $1\,951 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. The composition profiles of *n*-alkanes in water showed unimodal distribution with a peak at C_{25} in water. However, the composition characteristics of *n*-alkanes in SPM were of bimodal type, but still with the advantage of high carbon hydrocarbons peak at C_{25} . Results of characteristic parameters including CPI, TAR, OEP and % Wax C_n showed that *n*-alkanes in the studied area were derived mainly from combustion of fossil fuel, while terrestrial higher plant played a role in the existence of *n*-alkanes in water and suspended particulate matter from Yellow River in Henan section.

Key words: Yellow River in Henan section; *n*-alkanes; distribution; characteristic parameters; source analysis

正构烷烃是一类直链的饱和碳氢化合物, 其碳分子数分布范围具有天然的连续性, 分子中含有高能键的碳-碳键, 结构稳定, 不易降解^[1~3]。随着其相对分子质量的增大, 麻醉性增强。当分子中碳数大于 16 时, 随着碳数的进一步增加, 正构烷烃不但能损伤皮肤, 甚至可能产生癌变^[4,5]。由于水生生物、陆生植物、化石燃料燃烧的产物以及石油烃污染的输入^[6], 使正构烷烃成为水环境中普遍存在的一类痕量有机污染物。且不同来源的正构烷烃具备不同的组成特征, 如低等浮游生物 (包括细菌和藻类) 来源的正构烷烃主要集中在 nC_{20} 以前; 高等植物来源的正构烷烃以高分子量 $\Delta nC_{27} \sim nC_{33}$ 为主, 并且有明显的奇偶优势; 化石燃料燃烧产物或者石油烃污染来源的正构烷烃分布广泛, 并且无奇偶特征^[7]。因

此, 正构烷烃作为一种重要的生物标志物广泛应用于环境中烃类污染物来源的判别, 准确解析水环境中正构烷烃的污染来源对其污染控制十分必要。

黄河是中国的第二大河, 干流河道全长 5 464 km, 流域面积 79.5 万 km^2 。黄河自风陵渡大桥流入河南省, 经三门峡、洛阳、郑州、新乡、开封、濮阳流入山东省, 是沿途耕地用水、居民生活用水以及湿地的重要水源。近年来, 随着工农业的迅速发展, 沿岸工、农业及生活废水的排放, 致使大

收稿日期: 2015-09-23; 修订日期: 2015-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41103071); 河南省高等学校科技创新人才支持计划项目 (14HASTIT049); 河南省创新型科技人才队伍建设工程项目; 河南省科技创新人才计划项目 (134200510014)

作者简介: 冯精兰 (1979 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境化学, E-mail: fengjinglan@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunjhj@163.com

量有机污染物(包括正构烷烃)进入黄河,导致黄河河南段水体污染日益严重. 进入水体的正构烷烃除了会对水生生物产生明显的毒害作用外^[8~12],还会随着正构烷烃的地球化学循环过程危及人类健康. 此外,黄河水体泥沙含量高,悬浮颗粒物对正构烷烃的吸附与解吸使其可以在液相与固相之间反复交换,从而影响它们在水体中的迁移转化过程^[13,14],使水体污染具有较长的滞后效应,对河流生态环境危害增大^[15,16].

因此,本研究在分析黄河河南段水相和悬浮颗粒物中正构烷烃含量、分布特征的基础上,利用多特征参数判定其污染来源,以期为准确评估和有效控制黄河水中正构烷烃的污染提供科学依据,对其水环境质量改善具有一定的指导意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

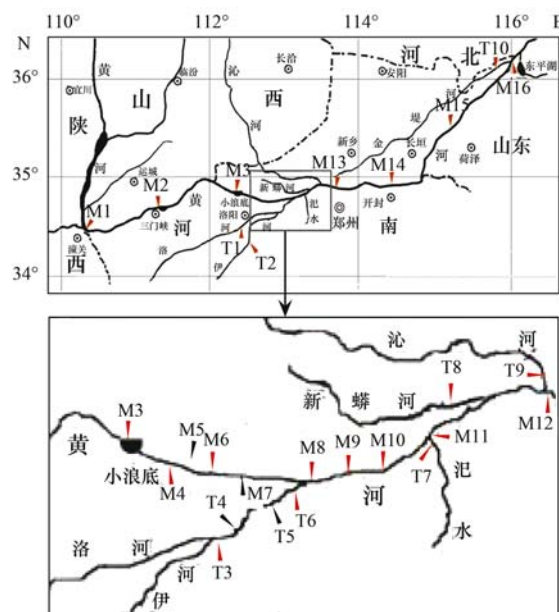
2010年8月(丰水期)沿黄河河南段干、支流自上而下设置26个采样点,其中干流16个采样点,支流10个采样点,具体采样点位置见图1. 在各采样点用自制不锈钢水样采样器采集表层水样(干流平均流量 $1\,058\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$),水样采集器以及贮水容器在采样前分别用去污粉水、自来水和蒸馏水清洗干净. 采集水样时用黄河水冲洗采样器和容器2次,水样采集量约25 L,采集后带回实验室及时处理和分

1.2 实验材料

实验所用二氯甲烷、正己烷和甲醇等有机试剂均为色谱纯. 硅胶(80~100目,青岛化工厂)、氧化铝(100~200目,上海五四化工厂)经二氯甲烷索氏抽提72 h后,真空干燥,使用前分别在180℃、250℃活化12 h,并置于干燥器中冷却至室温,加入3%(质量分数)的蒸馏水去活化,保存于干燥器中备用;无水硫酸钠为分析纯,使用前在450℃灼烧4 h后置于干燥器中备用;玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F No. 150)用铝箔包好,置于马弗炉中450℃灼烧4 h,冷却至室温,称量每张滤膜的质量并用铝箔包好,保存于干燥器中备用.

1.3 实验方法

将采集的25 L水样,经Whatman GF/F玻璃纤维滤膜过滤后,分别收集水相及悬浮颗粒相. 取过滤后的水样4 L,过活化后的C18小柱富集正构烷烃,之后用10 mL乙酸乙酯洗脱,洗脱液经无水硫酸钠干燥后旋转蒸发浓缩至约1 mL,用 N_2 吹至近干,



M1:风陵渡大桥; M2:三门峡水库; M3:小浪底水库; M4:孟津大桥; M5:洛阳石化排污口; M6:杨树沟; M7:首阳山电厂(孟津东良村); M8:黄河①; M9:黄河; M10:黄河③; M11:汜水入黄河后; M12:沁河入黄河后; M13:花园口; M14:开封大桥; M15:濮阳东明公路大桥; M16:金堤河入黄河; T1:高崖寨; T2:龙门公路大桥; T3:伊洛河汇合口; T4:首阳山电厂排污口; T5:河南化工厂; T6:伊洛河神北村; T7:汜水入黄河前; T8:东平滩; T9:沁河大桥; T10:金堤河贾垓桥

图1 黄河河南段水相及悬浮颗粒物采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of water and suspended particulate matter from Yellow River in Henan section

再用正己烷定容至1 mL待测.

收集悬浮颗粒物的玻璃纤维滤膜冷冻干燥后用 $\text{CH}_2\text{Cl}_2/\text{CH}_3\text{OH}$ (2:1,体积比)索氏抽提48 h,抽提液经浓缩后过层析柱净化,层析柱中依次加入1 g无水硫酸钠、2.0 g去活化氧化铝、4.0 g去活化硅胶及1 g无水硫酸钠. 层析柱首先用20 mL正己烷润洗,上样,然后再用20 mL正己烷洗脱正构烷烃,收集洗脱液浓缩至1 mL,用 N_2 吹至近干,再用正己烷定容至1 mL待测.

1.4 正构烷烃的测定

正构烷烃的测定采用Agilent气相色谱-质谱联用仪(5890GC/5972MS),色谱柱为HP-5MS柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm). 载气为高纯氦气,流量为 $1.5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样量为1 μL ,不分流进样;使用程序升温,80℃时保持2 min,然后以 $3\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至290℃,保持15 min. 质谱条件:EI电离源70 eV,离子源温度为230℃,核质比范围50~500. 参照标准样品在色谱图上保留时间和质谱图进行样品定性,以六点校正曲线和内标法进行正构烷烃定量,方法

回收率为 75% ~ 110%.

2 结果与讨论

2.1 黄河河南段水体中正构烷烃浓度水平及分布特征

黄河河南段水相和悬浮颗粒相中正构烷烃的浓度分布如图 2 所示,水相中正构烷烃的浓度范围为 521 ~ 5 843 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 1 409 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$;悬浮颗粒相中正构烷烃浓度范围为 463 ~ 11 142 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 1 951 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,高于水相中正构烷烃的浓度. 这与正构烷烃溶解度低,容易吸附在颗粒物表面^[17],且黄河水中悬浮颗粒物浓度高有关. 将黄河河南段水体中正构烷烃总浓度(水相 + 悬浮颗粒相)与长江表层水体及珠江上游水体中正构烷烃总浓度相比,黄河河南段水体中总正构烷烃的浓度(1 275 ~ 11 918 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)远大于长江表层水体(120 ~ 3 600 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[18]及珠江上游水体(225 ~ 7 160 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[19]. 一方面是由于黄河水体颗粒物含量远高于长江及珠江,且黄河颗粒物携带大量正构烷烃;另一方面采样期间黄河河南段夏季风活跃,降水丰沛,沿岸土壤肥沃,有机质含量高,地表径流冲刷大量有机质进入黄河.

黄河河南段水相正构烷烃浓度最高值位于采样点 T7(汜水入黄河前,5 843 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$),其他各采样点正构烷烃浓度水平差异不显著. 经现场勘查,汜水流经荥阳入黄河,沿途工、农业及交通较为发达,工、农业及生活污水为其主要污染源. 悬浮颗粒相中正构烷烃浓度最高值位于采样点 T4(首阳山电厂排污口),其次是采样点 T6(伊洛河入黄河前,位于 T4 的下游),其余各采样点位差异不显著. 首阳山电厂是河南省较大的火力发电厂,大量煤炭堆积扬尘及燃烧过程产生的粉尘随着大气沉降及工业废水排入该流域,成为该区域颗粒相正构烷烃的主要输入源. 此外,由图 2 可以看出,黄河河南段支流采样点 T4、T6、T7、T8 水体正构烷烃总浓度与干流相比均较高,其原因是以上 4 个采样点相应应有伊洛河、汜水河、新蟒河流水系相继汇入,伊洛河流经首阳山电厂,汜水河、新蟒河流经工农业生产及主要粮食种植基地,因此支流洛河、汜水河、新蟒河都已遭受正构烷烃的污染,其浓度较高;而黄河河南段中游至下游黄河河床逐渐抬高,干流有较少的支流汇入且支流流量较小,干流两岸建有较为宽阔的大堤,以粮食种植业为主,工业废水及城市污水难以排入,水体逐步实现自净,正构烷烃浓度进而下降.

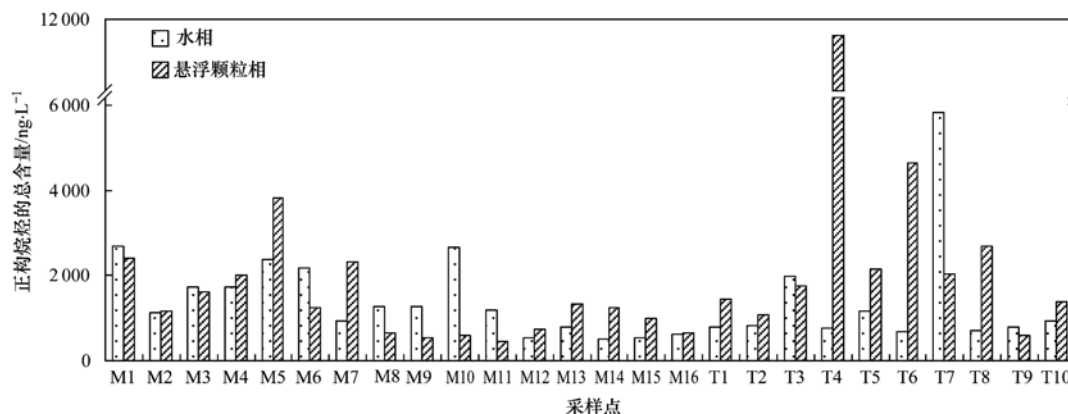


图 2 黄河河南段水相及悬浮颗粒相中总正构烷烃的浓度分布

Fig. 2 Distribution of $\sum$ alkanes in water and suspended particulate matter from Yellow River Henan section

2.2 黄河河南段水体中正构烷烃组成特征

黄河河南段水相正构烷烃碳数分布见图 3,各采样点碳数分布特征十分相似(T3、T4 除外),表明研究区域正构烷烃的来源基本一致. 黄河河南段水相正构烷烃碳数范围为 $C_{14} \sim C_{36}$,表现出明显的单峰型分布,以 $C_{23} \sim C_{31}$ 含量较高,主峰碳为 C_{25} ,且高碳区有轻微奇碳优势($C_{27} \sim C_{31}$). 黄河河南段水相中等碳链正构烷烃含量高(主峰碳为 C_{25}),表明化石燃料的燃烧是其主要来源. 而高碳区轻微的奇

碳优势及 $C_{27}/C_{29}/C_{31}$ 是高等植物源正构烷烃的特征碳数^[20],表明黄河河南段水相中正构烷烃也受陆源影响. 这是由于研究区域地处暖温带,非常适宜高等植物的生长,且夏季雨水丰沛,地表径流携带陆生高等植物进入黄河水体,致使水中正构烷烃显示一定的陆源特征. 此外,黄河河南段水相短链烷烃(C_{20} 以下)含量较低,表明水生生物来源的正构烷烃较少. 这是由于短链烷烃相对长链烷烃不够稳定,更易生物降解,且短链烷烃一般来自藻类和浮游植

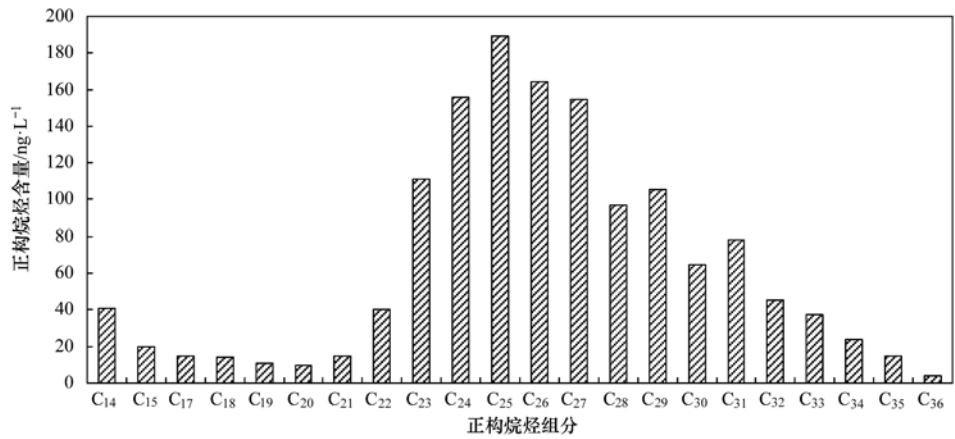


图3 黄河河南段水相中正构烷烃的组成特征

Fig. 3 Profiles of *n*-alkanes in water from Yellow River of Henan section

物残体,易被浮游或底栖生物摄食或微生物利用乃至水流作用下碎片化^[21,22]. T3 采样点也呈现单峰型高碳优势(C₂₉~C₃₃),但特征碳数是C₃₁(表1),表明陆生高等植物输入为主. T4 采样点显示单峰后峰型碳数分布,C₂₅为主峰,C₃₁为次主峰,且无明显奇偶优势. 表明该点位正构烷烃来源以化石燃料燃烧的输入为主,这与T4 采样点位于首阳山电厂排污口附近有关.

黄河河南段颗粒相中正构烷烃组成特征相似,均表现为双峰型,结果见图4. 前峰主峰碳为C₁₅/C₁₈/C₂₀,奇偶优势不明显. 主峰为C₁₅/C₁₇的短链正构烷烃主要来自浮游和底栖藻类衍生脂类的输入^[23];然而并不排除来自于原油、汽车尾气或化石燃料的不完全燃烧产物正构烷烃的干扰,该来源主峰碳数中等,不具有明显的奇偶优势^[24]. 相比水相,悬浮颗粒相出现前主峰,与研究区域在采样期间正处于高温、炎热时期,水中藻类和细菌等活动旺盛,且微生物更易附着于颗粒物表面,使悬浮颗粒相中低碳正构烷烃含量增加. 后峰表现为中高碳数优势(C₂₃~C₃₁,主峰碳为C₂₅),与水相相似,且后峰中高碳含量明显高于前峰低碳,表明化石燃料的输入仍是黄河河南段悬浮相正构烷烃的主要来源,但同时水生藻类及陆生高等植物也占有一定的比例.

2.3 黄河河南段水体中正构烷烃来源分析

正构烷烃的单一特征参数很难准确判断其来源,本研究通过分析黄河河南段水体中多种正构烷烃特征参数,以更准确地判断其来源. 表1列出了黄河河南段水相正构烷烃的特征参数计算结果. 碳优势指数(CPI)是评价环境中正构烷烃来源的一个常用参数,不同来源正构烷烃的CPI比值范围不同,CPI≈1时表明正构烷烃主要来源于原油和人为

表1 黄河河南段水相中正构烷烃各特征参数和比值¹⁾

Table 1 Characteristic parameters and ratios of *n*-alkanes in water from Yellow River of Henan section

采样点	OEP	TAR	CPI	% WaxC _n
M1	1.08	5.85	1.10	0.62
M2	1.11	2.86	1.18	1.12
M3	1.14	4.46	1.17	0.87
M4	1.13	5.05	1.17	0.72
M5	1.10	18.1	1.14	0.00
M6	1.12	8.50	1.14	3.50
M7	1.14	7.83	1.29	3.82
M8	1.17	6.87	1.24	1.89
M9	1.14	8.49	1.20	2.34
M10	1.93	16.2	1.90	1.28
M11	1.14	7.34	1.20	3.09
M12	1.27	7.46	1.50	2.88
M13	1.30	11.1	1.59	2.29
M14	1.21	6.48	1.29	2.72
M15	1.14	2.55	1.37	10.6
M16	1.25	7.80	1.35	5.84
T1	1.18	7.22	1.24	5.07
T2	1.13	6.76	1.24	4.35
T3	1.17	8.82	1.28	2.00
T4	1.36	5.45	1.58	0.00
T5	1.13	12.8	1.19	0.78
T6	1.16	3.78	1.30	4.39
T7	1.07	13.2	1.23	0.42
T8	1.06	5.19	1.19	4.60
T9	1.15	8.04	1.25	1.92
T10	1.18	10.4	1.26	3.12
均值	1.19	8.02	1.29	2.67

1) 陆生/水生优势正构烷烃含量之和比值 $TAR = \sum(C_{27} + C_{29} + C_{31}) / \sum(C_{15} + C_{17} + C_{19})$; 碳优势指数 $CPI = 1/2 [\sum C_{15-35}(\text{奇碳}) / \sum C_{14-34}(\text{偶碳}) + C_{15-21}(\text{奇碳}) / \sum C_{16-36}(\text{偶碳})]$; $OEP = (C_{25} + 6C_{27} + C_{29}) / 4(C_{26} + C_{28})$; $\% WaxC_n = 100 [C_n - 0.5(C_{n+1} + C_{n-1})] / \sum C_n$

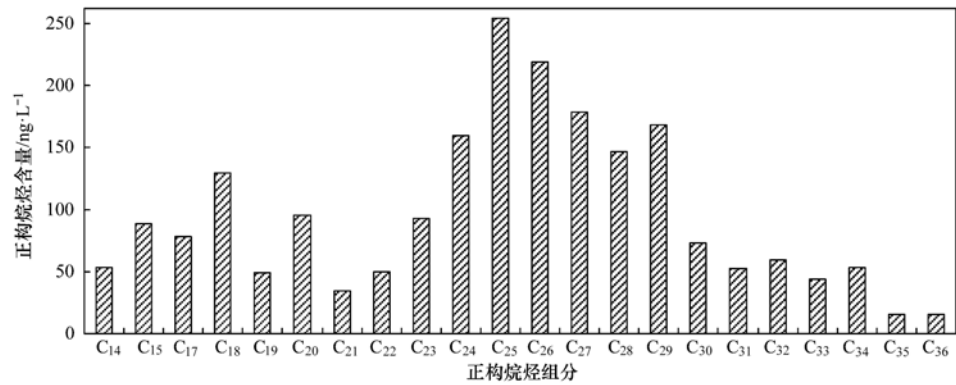


图4 黄河河南段悬浮颗粒相中正构烷烃的组成特征

Fig. 4 Profiles of *n*-alkanes in suspended particulate matter from Yellow River of Henan section

活动如汽车尾气排放、化石燃料燃烧; $1 < \text{CPI} < 3$ 时,则正构烷烃主要来源于高等植物、细菌等现代生物和化石燃料的双重来源^[25]. 本研究中黄河河南段水相 CPI 范围 1.10 ~ 1.90, 均值 1.29. CPI 值小于 3 但很接近于 1, 这可能是化石燃料燃烧和生物混合来源的结果. TAR 为陆生与水生来源正构烷烃比值, 反映水生生物与陆生高等植物相对贡献比例^[26], 当陆地植物输入占优势时 $\text{TAR} > 1$, 反之指示水体中内源有机质即水生生物的输入占优势^[27]. 黄河河南段水相中 TAR 最小值为 2.55, 最大值 18.1, 平均值为 8.02, 说明生物来源正构烷烃为陆源输入占优势. 此外, 奇偶优势指数 OEP 值分布范围为 1.06 ~ 1.93, 其平均值为 1.19, 如此低的 OEP 值进一步表明这些正构烷烃可能主要来自于人为活动如化石燃料的燃烧^[28]. 除了上述 3 个指标, 总的植物蜡碳数 % WaxC_n 也经常被用来表征正构烷烃组分的来源^[29]. 这个值越大, 说明生物来源的成分越大. 若此值越接近于 0, 则说明正构烷烃组分中人为来源越大. 研究区域内所有水样中 % WaxC_n 最低值为 0%, 最高值为 10.6%, 平均值为 2.67%. 表明这些水样的正构烷烃组分当中, 绝大部分来源于人为源, 而陆生高等植物来源的正构烷烃可能只占总烷烃的 2.67%.

黄河河南段悬浮颗粒相中正构烷烃特征参数列于表 2. 从中可知, 所有样品中 CPI 最小值为 0.55, 最高值为 3.05, 平均值为 1.33. 接近于 1 的 CPI 值表明黄河河南段悬浮颗粒相中正构烷烃主要以生物来源和化石燃料的双重来源为主, 与水相结果一致. 颗粒相中正构烷烃 TAR 比值范围为 0.37 ~ 7.31, 平均值为 2.46. 除采样点 M7、T7、T9、M12 外, 其余各采样点 TAR 值均大于 1, 且平均值较水相有所降低, 说明陆源输入正构烷烃虽仍占优势, 但水生源正

构烷烃浓度明显增加. 其原因是黄河河南段地势平坦, 水体流动性差, 泥沙易于沉降, 因而水体的透光率增加, 有利于水体浮游生物的光合作用, 且浮游生物更易吸附在颗粒物表面, 使得颗粒相中低碳正构烷烃的含量相比水相有所上升. 奇偶优势指数 OEP 最小值为 0.25, 最大值为 2.76, 平均值为 1.1, 如此低的 OEP 值进一步表明这些正构烷烃可能主要来自于人为活动如化石燃料的燃烧^[28]. 黄河河南

表2 黄河河南段悬浮颗粒相中正构烷烃各特征参数和比值

Table 2 Characteristic parameters and ratios of <i>n</i> -alkanes in suspended particulate matter from Yellow River of Henan section				
采样点	OEP	TAR	CPI	% WaxC_n
M1	1.08	3.51	1.17	5.63
M2	1.23	2.64	1.28	8.31
M3	1.43	2.31	1.38	4.59
M4	1.25	7.31	1.07	2.44
M5	0.24	2.40	0.55	4.04
M6	1.20	3.46	1.01	7.30
M7	1.85	0.93	1.93	24.4
M8	1.21	2.52	1.02	7.80
M9	1.25	3.25	1.74	8.88
M10	1.26	1.52	1.00	7.23
M11	1.26	1.56	1.04	10.7
M12	0.25	0.44	0.50	8.24
M13	2.76	4.89	3.05	2.92
M14	1.10	2.22	1.33	2.11
M15	0.32	1.12	1.74	3.61
M16	0.46	4.90	1.40	2.68
T1	1.34	4.41	1.22	7.38
T2	1.17	3.66	1.16	7.94
T3	1.17	1.04	0.78	4.80
T4	0.37	1.17	1.05	0.00
T5	1.53	1.02	0.83	3.38
T6	2.13	1.72	2.08	0.00
T7	1.04	0.90	1.28	2.59
T8	1.48	3.05	1.37	0.00
T9	0.30	0.37	1.24	6.70
T10	1.26	1.72	2.37	0.14
均值	1.15	2.46	1.33	5.31

段悬浮颗粒物中% WaxC_n 最低值为 0%, 最高值为 24.4%, 平均值为 5.31%。表明陆生高等植物来源的正构烷烃只占总烷烃的 5.31%, 绝大部分来源于人为源。

综上所述, 各特征比值结果都表明黄河河南段水体中正构烷烃主要来自于人为活动, 且生物来源正构烷烃的陆源贡献远大于水生源。黄河河南段水体中的另一类烃类物质多环芳烃约 90% 是来自于化石燃料燃烧^[30], 这与本研究的结论是一致的。

3 结论

(1) 黄河河南段水体正构烷烃碳数范围为 C₁₄ ~ C₃₆, 水相正构烷烃浓度为 521 ~ 5 843 ng·L⁻¹ (平均为 1 409 ng·L⁻¹), 悬浮颗粒相正构烷烃浓度为 463 ~ 11 142 ng·L⁻¹ (平均为 1 951 ng·L⁻¹)。此外, 总正构烷烃浓度高于长江与珠江上游, 与黄河水体颗粒物含量高及地表径流冲刷有关。

(2) 黄河河南段水相正构烷烃呈单峰型高碳分布, 主峰碳为 C₂₅, 且高碳区存在轻微奇碳优势; 悬浮颗粒相中正构烷烃呈双峰型分布, 低链主峰碳为 C₁₈, 高链主峰碳仍为 C₂₅, 且高碳正构烷烃含量远大于低碳正构烷烃含量, 表明化石燃料燃烧与陆生植物的双重来源。

(3) 碳优势指数 CPI、奇偶优势指数 OEP、TAR 及总的植物蜡碳数% WaxC_n 表明黄河河南段水相中正构烷烃主要来源于化石燃料的燃烧, 陆源正构烷烃(高等植物的输入)只占 2.67%。悬浮颗粒相与水相相比, 陆源正构烷烃贡献增加(5.31%), 但化石燃料的燃烧仍是正构烷烃的主要来源。

参考文献:

- [1] 卢冰, 周怀阳, 陈荣华, 等. 北极现代沉积物中正构烷烃的分子组合特征及其与不同纬度的海域对比[J]. 极地研究, 2004, **16**(4): 281-294.
- [2] Blyth A J, Asrat A, Baker A, *et al.* A new approach to detecting vegetation and land-use change using high-resolution lipid biomarker records in stalagmites [J]. Quaternary Research, 2007, **68**(3): 314-324.
- [3] Xing L, Zhao M X, Gao W X, *et al.* Multiple proxy estimates of source and spatial variation in organic matter in surface sediments from the southern Yellow Sea [J]. Organic Geochemistry, 2014, **76**: 72-81.
- [4] Baxter C S, Miller M L. Mechanism of mouse skin tumor promotion by *n*-dodecane [J]. Carcinogenesis, 1987, **8**(12): 1787-1790.
- [5] Horton A W, Denman D T, Trosset R P. Carcinogenesis of the skin. II. The accelerating properties of aliphatic and related hydrocarbons [J]. Cancer Research, 1957, **17**(8): 758-766.
- [6] 何奉朋, 张枝焕, 高丹丹. 北京典型土壤剖面中饱和烃的组成及垂向分布特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 170-178.
- [7] Volkman J K, Holdsworth D G, Neill G P, *et al.* Identification of natural, anthropogenic and petroleum hydrocarbons in aquatic sediments [J]. Science of the Total Environment, 1992, **112**(2-3): 203-219.
- [8] Gilde K, Pinckney J L. Sublethal effects of crude oil on the community structure of estuarine phytoplankton [J]. Estuaries and Coasts, 2012, **35**(3): 853-861.
- [9] Bejarano A C, Chandler G T, He L, *et al.* Individual to population level effects of South Louisiana crude oil water accommodated hydrocarbon fraction (WAF) on a marine meiobenthic copepod [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, **332**(1): 49-59.
- [10] Ewa-Obobo I, Amu O. Effect of crude oil extracts on early stages of African catfish *Heterobranchus longifilis* (val.) reared under controlled condition [J]. Global Journal of Environmental Sciences, 2009, **8**(2): 23-28.
- [11] Rodrigues R V, Miranda-Filho K C, Gusmão E P, *et al.* Deleterious effects of water-soluble fraction of petroleum, diesel and gasoline on marine pejerrey *Odontesthes argentinensis* larvae [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(9): 2054-2059.
- [12] Pacheco M, Santos M A. Biotransformation, endocrine, and genetic responses of *Anguilla anguilla* L. to petroleum distillate products and environmentally contaminated waters [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, **49**(1): 64-75.
- [13] Guillaud J F, Andrieux F, Menesguen A. Biogeochemical modelling in the Bay of Seine (France): an improvement by introducing phosphorus in nutrient cycles [J]. Journal of Marine Systems, 2000, **25**(3-4): 369-386.
- [14] 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 等. 重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3212-3219.
- [15] Liu Z H, Dreybrodt W. Significance of the carbon sink produced by H₂O-carbonate-CO₂-aquatic phototroph interaction on land [J]. Science Bulletin, 2015, **60**(2): 182-191.
- [16] Jiang Y J, Hu Y J, Schirmer M. Biogeochemical controls on daily cycling of hydrochemistry and δ¹³C of dissolved inorganic carbon in a karst spring-fed pool [J]. Journal of Hydrology, 2013, **478**: 157-168.
- [17] Douglas E K, Dawson R. Marine organic chemistry: evolution, composition, interactions and chemistry of organic matter in seawater (Elsevier Oceanography Series: 31) [M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 1981, 513.
- [18] 戚艳平, 吴莹, 张经, 等. 夏季长江口中颗粒态及溶解态正构烷烃的组成和迁移[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(8): 1354-1361.
- [19] 梁波, 张凯, 沈汝浪, 等. 珠江三角洲外围水体中正构烷烃的来源分析和通量估算: 加强珠江上游区域生态环境保护的必要性[J]. 地球化学, 2012, **41**(1): 55-62.

- [20] Prah1 F G, Ertel J R, Goni M A, *et al.* Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(14): 3035-3048.
- [21] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**(5-6): 213-250.
- [22] Okoh A I. Biodegradation alternative in the cleanup of petroleum hydrocarbon pollutants[J]. *Biotechnology and Molecular Biology Review*, 2006, **1**(2): 38-50.
- [23] Sánez J, Froehner S, Falcão F. Use of biomarkers indices in a sediment core to evaluate potential pollution sources in a subtropical reservoir in Brazil [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2013, **73**(4): 555-563.
- [24] Lü X X, Zhai S K. Distributions and sources of organic biomarkers in surface sediments from the Changjiang (Yangtze River) Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, **26**(1): 1-14.
- [25] 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 等. 保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 441-447.
- [26] Bourbonniere R A, Meyers P A. Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of Lakes Ontario and Erie[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(2): 352-359.
- [27] Wang N, Zong Y Q, Brodie C R, *et al.* An examination of the fidelity of *n*-alkanes as a palaeoclimate proxy from sediments of Palaeolake Tianyang, South China[J]. *Quaternary International*, 2014, **333**: 100-109.
- [28] 罗宪婴, 赵宗举, 孟元林. 正构烷烃奇偶优势在油源对比中的应用——以塔里木盆地地下古生界为例[J]. *石油实验地质*, 2007, **29**(1): 74-77.
- [29] Kavouras I G, Stephanou E G. Particle size distribution of organic primary and secondary aerosol constituents in urban, background marine, and forest atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D8): AAC 7-1-AAC 7-12.
- [30] Feng J L, Li X Y, Guo W, *et al.* Potential source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from the middle and lower reaches of the Yellow River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(9): 11447-11456.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supermicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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

国内外公开发刊