

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O₃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, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶(917)

涌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, 王金泉, 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菲的影响 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, 余广炜, 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, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪(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)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征

尹肃^{1,2}, 冯成洪^{1,2*}, 李扬颺¹, 殷立峰², 沈珍瑶¹

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 基于长江口沉积物 8 种重金属 (As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn) 总量与形态在丰、平、枯水期以及 14 个典型点位的分布特征, 通过平衡分配法建立了长江口沉积物质量基准 (SQGs), 并以此评价长江口沉积物重金属生态风险, 揭示重金属生态风险与其形态特征间的相关关系。结果表明, 除 Cd 之外, 长江口沉积物重金属以残渣态为主导形态, 尤其是 As、Cr、Hg, 其残渣态含量均为 90% 以上。长江口 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的沉积物质量基准分别为 43.29、0.672、79.65、19.08、0.569、339.09、30.87、411.36 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Cu 的生态风险程度最高, 对水生生物具有较大的毒性影响, 应当引起重视。河口上游受到长江径流影响大, 在丰水期风险较高, 在平水期和枯水期则风险偏低; 而下游受上海等城市排污影响较大, 风险较高 (尤其在平水期和枯水期)。8 种重金属的生态风险与赋存形态之间表现出 3 种不同的相关关系。

关键词: 长江口; 重金属; 沉积物质量基准; 平衡分配法; 赋存形态; 生态风险

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0917-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.016

Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary

YIN Su^{1,2}, FENG Cheng-hong^{1,2*}, LI Yang-yang¹, YIN Li-feng², SHEN Zhen-yao¹

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory for Water and Sediment Science of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the investigation on the distribution of total contents and speciation of 8 heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) in the surface sediments at 14 typical sites of the Yangtze Estuary during three hydrological seasons (wet, normal, and dry seasons), this study applied equilibrium partitioning approach to build the sediment quality guidelines (SQGs) of the Yangtze Estuary, and assessed ecological risks of the heavy metals. The relationship between ecological risk and speciation of heavy metals was also revealed. The results showed that, except for Cd, the residual fraction was the main speciation of heavy metals, especially for As, Cr and Hg, their residual fraction proportions were all over 90%. The sediment quality guidelines of the Yangtze Estuary for As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn were 43.29, 0.672, 79.65, 19.08, 0.569, 339.09, 30.87, 411.36 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Cu had the highest ecological risk to aquatic organisms. The upstream of Yangtze Estuary was mainly affected by Yangtze River runoff, where the risks were relatively high in wet season and relatively low in normal and dry seasons. However, the downstream of the estuary was mainly affected by municipal sewage of cities like Shanghai, where the risks were relatively high, especially in normal and dry seasons. There were three different relationships between the ecological risks and speciation of the eight heavy metals.

Key words: Yangtze Estuary; heavy metals; sediment quality guidelines; equilibrium partitioning approach; speciation; ecological risk

重金属具有分布广泛、难降解、生物积累性大、毒性高等典型特征, 是人类和生态安全的严重威胁^[1], 其环境行为尤其是生态风险一直是国内外关注的焦点。目前, 已有多种方法应用于沉积物重金属风险评价, 其中沉积物质量基准法 (sediment quality guidelines, SQGs) 受到越来越多的关注。然而, 因我国尚未制定河流、湖泊等水体沉积物质量基准, 以往研究大多采用北美沉积物质量基准中的 ERL/ERM 和 TEL/PEL^[2,3] 来进行风险评价^[4~6]。因此, 有必要针对我国水环境特征, 提出适用于当地环境的沉积物质量基准, 以提高沉积物风险评价结果的准确性。

平衡分配法是已有研究中数值型沉积物质量基准建立的典型方法^[7], 具有简洁直观、逻辑性强、可信度高、适用性广等特点, 已被广泛使用^[8]。平衡分配法是建立在沉积物-水相间的热力学平衡基础上, 利用水质基准数据, 通过水相中污染物含量, 反映沉积物中污染物浓度与生物响应之间的关系^[9]。平衡

收稿日期: 2015-07-22; 修订日期: 2015-10-20

基金项目: 北京市高等学校青年英才计划项目 (YETP0235); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB429003); 环境保护公益性行业科研专项 (201409040)

作者简介: 尹肃 (1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染物迁移转化及环境效应, E-mail: 201321180009@mail.bnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: fengchenghong@bnu.edu.cn

分配法的计算过程与沉积物中重金属的赋存特征有着密切联系。考虑到重金属总量测定的简便性,现有研究一般采用重金属总量评价其生态风险。然而,重金属在沉积物中的迁移性能、生物有效性以及生态毒性更多取决于其赋存形态^[10,11]。因此,基于平衡分配法计算分析沉积物中重金属的生态风险,并探讨与其赋存形态的相关关系,势必有助于进一步明确沉积物中重金属的风险因子及风险特征。

长江口是世界上最大的河口之一,陆源物质约有 90% 经由长江口进入东海^[12]。在陆地径流与海水的交汇作用下,大量污染物经吸附、絮凝、生物累积等过程,转移到沉积物中,成为长江三角洲地区生态环境的长期潜在影响因素^[13]。目前,大量研究探讨了长江口水体及沉积物中重金属的分布特征,但却未建立起长江口重金属沉积物质量基准,并应用其分析重金属生态风险的时空分布特征。

因此,本研究以长江口为研究对象,在明确长江口表层沉积物 8 种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)总量与形态在丰、平、枯这 3 个水文期以及 14 个典型点位分布特征的基础上,利用平衡分配法建立长江口重金属沉积物质量基准,评价长江口沉积物重金属生态风险,并利用相关性分析研究生态风险与形态特征之间的关系,以期为制定沉积物环境质量标准、提高沉积物污染管理水平提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

长江口是典型的分岔河口,在徐六泾以下被崇明岛分为南支和北支,南支又被长兴岛和横沙岛分为南港和北港。本研究分别在徐六泾、北支上、北支下、南支上、黄浦江、北港、南港共 7 个断面优化设置 14 个采样点(如图 1),分别于 2013 年 7 月(丰水期)、2013 年 10 月(平水期)、2014 年 2 月(枯水期)采集底层水体及表层沉积物。采集后沉积物样品在 -20°C 下保存待测。

1.2 重金属含量与形态测定

重金属含量(包括水样及沉积物)及形态测定均在由国家实验室认可委员会认证的中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所进行。As 采用氢化物发生原子荧光光谱法(HG-AFS, GB/T 7485-1987)测定, Hg 采用冷蒸气原子荧光光谱法(CV-AFS, GB/T 7468-1987), Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 采用高分辨率电感耦合等离子体质谱法(HR-ICP-MS, Thermo)测定。每 10 个样品设置 1 个重复样品确保

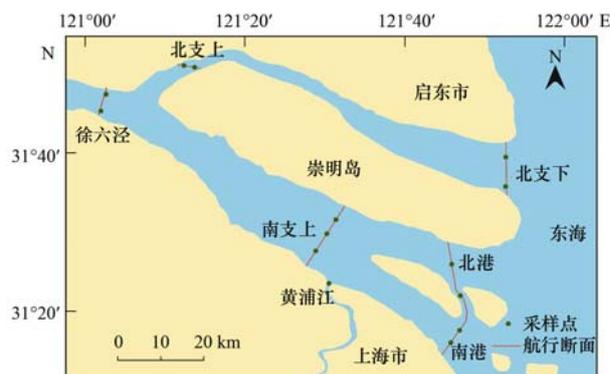


图 1 长江口采样点位示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites in Yangtze Estuary

测定准确性,同时测定结果准确性也通过标准参考样品进行检验。标准样品和重复样品回收率均在 95% ~ 105% 之间。

重金属 5 种形态(可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态)采用 Tessier 5 步法连续提取^[14]。所有样品 5 种形态含量之和与直接测定的总量进行对比,回收率为 86% ~ 112%。

1.3 沉积物质量基准建立

长江口 SQGs 的建立采用平衡分配法。该方法认为,当与沉积物相处于平衡的水相中污染物浓度达到水质基准时,沉积物中污染物的浓度即可视为该物质在沉积物中的质量基准^[15],可用下述方程描述:

$$\text{SQG} = K_p \times \text{WQC} \quad (1)$$

$$K_p = c_s / c_w \quad (2)$$

式中, SQG 为污染物的沉积物质量基准, WQC 为该污染物的水质基准, K_p 为污染物的沉积物-水相分配系数, c_s 为污染物在沉积物中的质量浓度, c_w 为该污染物在水相中的浓度。由于我国尚没有河流重金属慢性生物毒性的水质基准,所以 WQC 一般采用美国环保局(USEPA)颁布的水生生物基准连续浓度(criteria continuous concentration, CCC)^[16]。CCC 表示持续暴露在环境中不会对水生生物产生显著影响的污染物质最大浓度。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的 CCC 分别为 150、0.25、11、1.45、0.77、52、2.5、120 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[17,18]。

但是对于重金属而言,沉积物中的重金属并非全部参与到与水相中重金属的平衡之中。沉积物原生矿物中含有的重金属(相当于沉积物重金属形态提取中的残渣态),其性质十分稳定,通常不参与沉积物与水相的平衡过程,这一部分重金属在 K_p 计算中需要剔除^[19]。此外,还有研究发现,当沉积物中酸可挥发性硫化物(AVS)含量较高时, Cd、Cu 等二价重金属强烈倾向于生成不具有生物有效性的重金

属硫化物沉淀,这部分重金属一般也不参与上述平衡分配^[20],也应该被剔除. 因此,计算公式可修正为:

$$SQG = K_p \times WQC + M_R + M_{AVS} \quad (3)$$

$$K_p = \frac{c_s - M_R - M_{AVS}}{c_w} \quad (4)$$

式中, M_R 为沉积物中重金属残渣态含量, M_{AVS} 为沉积物中与 AVS 相结合的重金属含量,一般指 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 这 5 种重金属元素. 因长江中的沉积物为氧化型沉积物,其 AVS 含量很低,可不考虑 AVS 影响^[21].

2 结果与讨论

2.1 长江口沉积物中重金属总量分布与形态赋存特征

长江口沉积物中 8 种重金属总量的时空分布特征如图 2 所示. 从不同水文期来看,长江口北支区域(包括北支上和北支下)丰水期重金属含量均高于平水期和枯水期;徐六泾枯水期重金属含量也明显低于丰水期和平水期. 但是对于南支区域(包括南支上、黄浦江入口处、北港、南港)而言,不同水文期重金属含量却没有一致规律. 这是由于南支区域毗邻上海市,受城市排污的影响显著高于徐六泾和北支区域,这就会减弱不同水文期的长江径流差异对重金属污染的影响. 从空间分布来看,北支下、南港、黄浦江入口三个区域一般都有着较高的重金属含量. 其中,黄浦江入口处与南港分别接近上海市的两个主要污水排放口(吴淞口污水排放口和南区污水排放口),上海市的排污导致其重金属含量较高;而北支下区域同时受启东市排污以及污染较高的黄海近岸流的影响,是重金属含量较高的主要原因. 此外,南港和北支下区域属于咸淡水混合处,水体盐度增加会加速重金属的沉积^[22]. 相对而言,处于上游的徐六泾和北支上区域重金属含量则一般较低. 以上分析表

明,除长江径流输入外,河口区城市排污输入也是长江口重金属的一个主要来源,尤其在平水期和枯水期其来源比重更高.

此外,本研究还探讨了长江口沉积物重金属 5 种形态的时空分布特征(图 3). 在 8 种重金属元素中,除 Cd 以外,其它重金属主要形态都是残渣态,尤其是 As、Cr、Hg,残渣态含量超过了 90%,主要原因可能是由于 As、Cr、Hg 与沉积物中的残渣晶格部分有较强的结合性能^[23]. 可交换态是 5 种形态中生物有效性最高、最容易被生物吸收,对生物的危害最大的. 其含量除 Cd(12.91% ~ 30.71%)以外,其它重金属含量都几近忽略. 一般而言,高含量的碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态代表着人类活动的强烈影响^[24]. Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 的碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态都有较高的含量,表明它们受到人类活动的影响较大. Cu 的有机结合态含量(6.76% ~ 19.05%)较高,表明 Cu 与有机质尤其是腐殖质有着较强的结合性能. 从不同水文期来看,除 Hg、Zn 以外,其它重金属的各形态含量在不同水文期之间的差异都较小. Zn 在丰水期的碳酸盐结合态含量(3.31% ~ 26.62%)高于平水期和枯水期(2.89% ~ 9.11%),这也导致其残渣态比例低于平水期和枯水期. 丰水期水量大,航行活动最为活跃,而船只也正是河口 Zn 的一个重要人为来源^[25]. 在丰水期的北支上和北支下区域,以及平水期北支下区域,有机结合态 Hg 含量出现异常高值.

2.2 长江口重金属沉积物质量基准(SQGs)

表 1 列出了长江口重金属沉积物质量基准计算结果,并与加拿大沉积物质量基准中临界效应浓度(threshold effect level, TEL)进行了对比. 可以看出,Cd、Cr、Cu、Pb 的标准与 TEL 较为接近,而 As、Hg、Ni、Zn 的标准则明显高于 TEL. 其中,As 的偏高可能是由于长江口沉积物中其环境背景值偏高^[26]造成. Hg、Ni、Zn 的偏高则可能由于长江口

表 1 长江口重金属沉积物质量基准(SQGs)/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 1 Sediment quality guidelines of heavy metals in the Yangtze Estuary/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

位置	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
长江口	43.29	0.672	79.65	19.08	0.569	339.09	30.87	411.36
TEL ^[3]	7.24	0.68	52.3	18.7	0.13	15.9	30.2	124
黄河 ^[27]		0.5	20	20		60	35	65
辽河 ^[28]		5.42		52.8			18.9	177.7
湘江 ^[7]	2.01		59.26			71.99	1 285.30	
太湖 ^[8]			21.2 ~ 68.7	52.3 ~ 281.0			21.2 ~ 307.4	399.7 ~ 1 659.1
巢湖 ^[29]	71.84	23.90	78.53	56.95			362.93	74.68

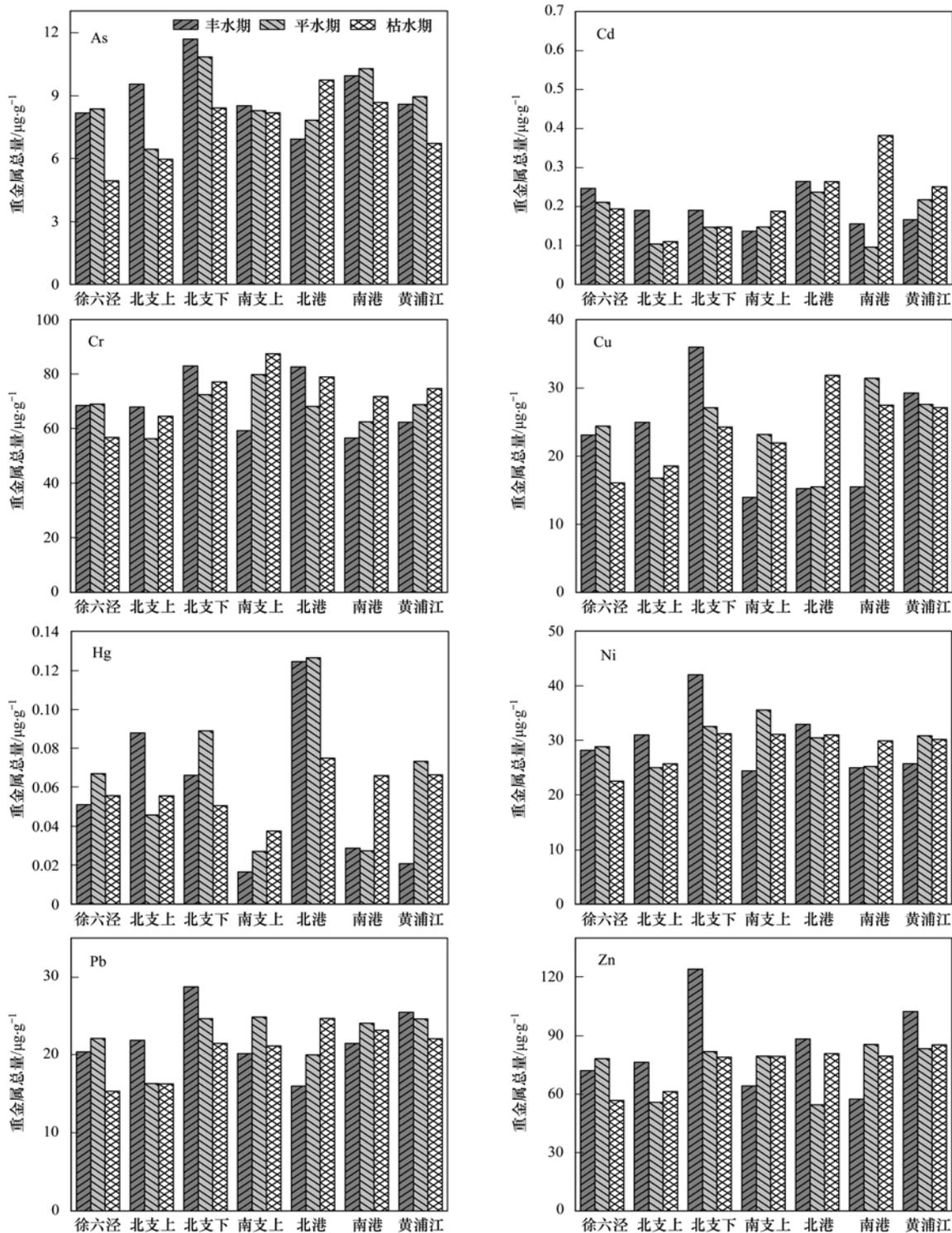


图 2 长江口沉积物 8 种重金属总量时空分布特征

Fig. 2 Temporal and spatial distribution characteristics of eight heavy metals' total contents in the surface sediment of the Yangtze Estuary

潮汐作用使得咸淡水不断混合,从而引起金属离子沉降而导致 K_p 值降低所造成. 由于目前国内外还没有研究利用平衡分配法计算河口区域的重金属沉积物质量基准,本研究选取了同样使用 USEPA 重金属基准连续浓度进行平衡分配法计算所得的国内其

它典型河流或湖泊的重金属沉积物质量基准进行比较(表 1). 与黄河相比, Cd、Cu、Pb 的基准值比较接近,而 Cr、Ni、Zn 则明显较高. 与辽河相比, Cd、Cu 的基准值较低, Pb、Zn 的基准值则较高. 与湘江相比, Cr 的基准值较为相近, As、Ni 则明显较高,而

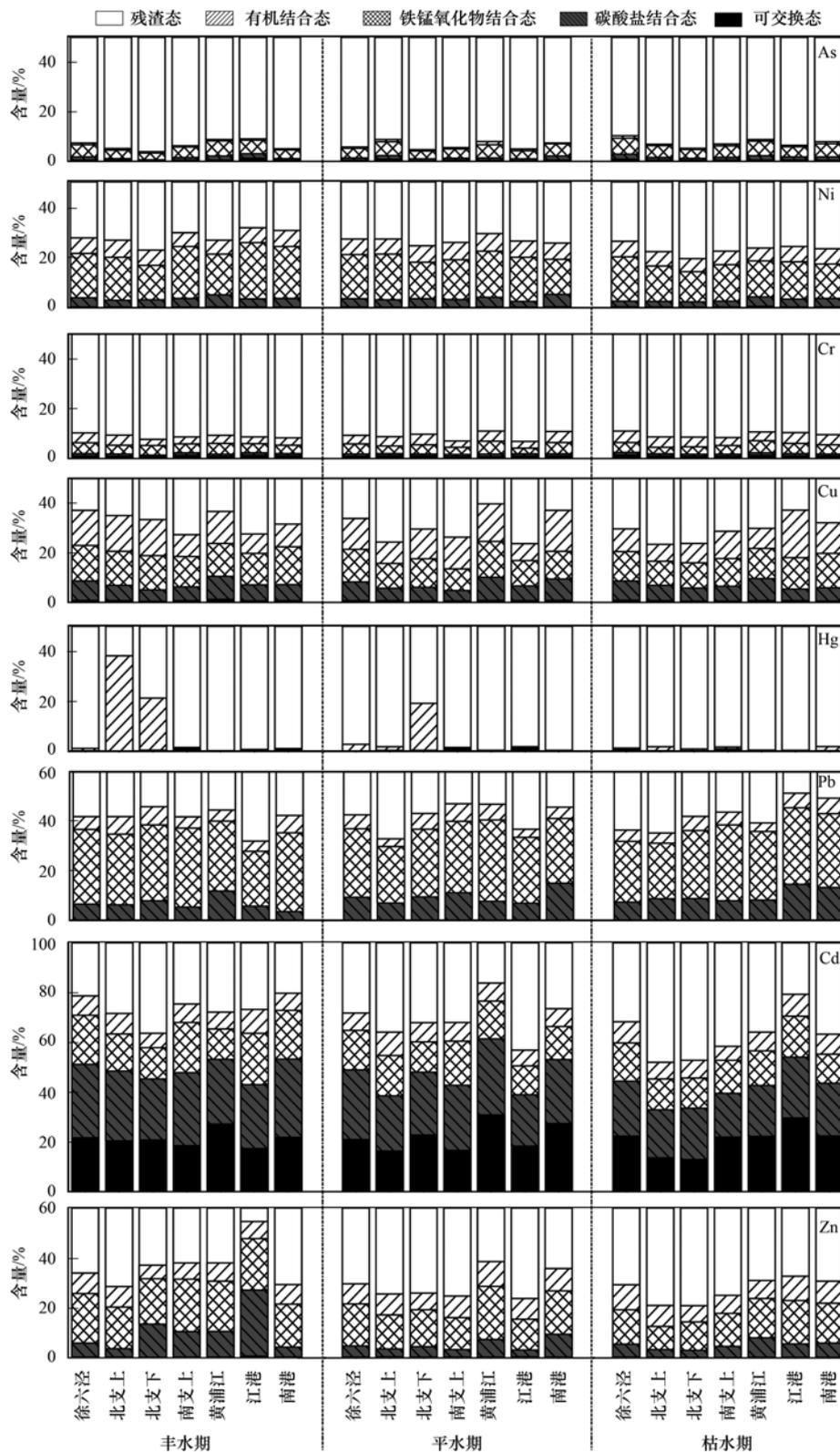


图3 长江口沉积物中重金属5种形态的时空分布特征

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of heavy metal speciation in the surface sediments of the Yangtze Estuary

Pb 则低了许多. 与太湖和巢湖相比,Cr 的基准值比较接近,As、Cd、Cu、Pb 的基准值明显较低,Zn 的基准值与太湖接近,而高于巢湖. 由上可知,长江口

重金属沉积物质量基准与国内其它水体具有可比性,可用于长江口沉积物重金属风险评价. 不同水体所得基准的差别主要归因于不同区域污染程度差

异、沉积物自身性质差异、水生生物不受毒性影响的水质基准差异、沉积物重金属生物有效性和毒性因素的复杂性等因素。

2.3 基于 SQGs 的重金属生态风险评价

沉积物中重金属浓度与 SQGs 的比值被定义为沉积物质量基准系数 SQG-Q^[30]。当 SQG-Q < 0.1 时,则表明重金属没有风险;当 $0.1 \leq \text{SQG-Q} < 1$ 时,则表明重金属可能存在生态风险;当 $1 \leq \text{SQG-Q} < 10$ 时,则表明重金属可能有中等生态风险;当 SQG-Q ≥ 10 时,则表明重金属有高生态风险^[31]。基于长江口重金属沉积物基准(表 1),本研究进一步计算分析了长江口不同区域沉积物重金属生态风险(SQG-Q)。如图 4 所示,在长江口沉积物 8 种重金属中,Cu 的 SQG-Q 值最高,所有区域均超过 1,存在中等生态风险,对水生生物可能具有较大的毒性影响,应当引起重视。此外,Cr 与 Pb 的 SQG-Q 值也较高,大多处于 0.7~0.9 之间,平水期时南港和南支上区域上甚至大于 1(分别为 1.042 4 和 1.068 5),也可能存在中等生态风险。其余 5 种金属 SQG-Q 值虽都较低,但都高于 0.1,表明它们都可能存在生态风

险。从空间上看,南港和黄浦江入口区域重金属生态风险在丰、平、枯水期都较高,这可能归因于上海市城市排污的影响。徐六泾位于长江口上游,受城市排污影响较小,其风险指数在丰水期较高,而在平水期和枯水期则偏低,这表明徐六泾沉积物中重金属生态风险受长江径流影响较大。由上可知,长江口沉积物中重金属生态风险时空分布特征与长江口周边污染源分布特征以及沉积物中重金属来源特征基本一致。这也在一定程度上验证了本研究基于 SQG-Q 计算重金属生态风险方法的可行性。

2.4 重金属生态风险与其赋存形态间的相关性

8 种重金属的生态风险与其各自 5 种赋存形态之间的相关关系如表 2 所示。Ni 的生态风险与可交换态、碳酸盐结合态都有显著的正相关性($P < 0.01$); Cu 的生态风险与其碳酸盐结合态比例也有着显著的正相关性($P < 0.05$)。一般而言,沉积物中重金属的可交换态和碳酸盐结合态最容易被释放,它们比例越高常常被认为生态风险越高(如:风险评价准则 RAC^[32]的计算方法)。然而,Cd、Cr 却表现出相反的规律,其生态风险与非残渣态大多都

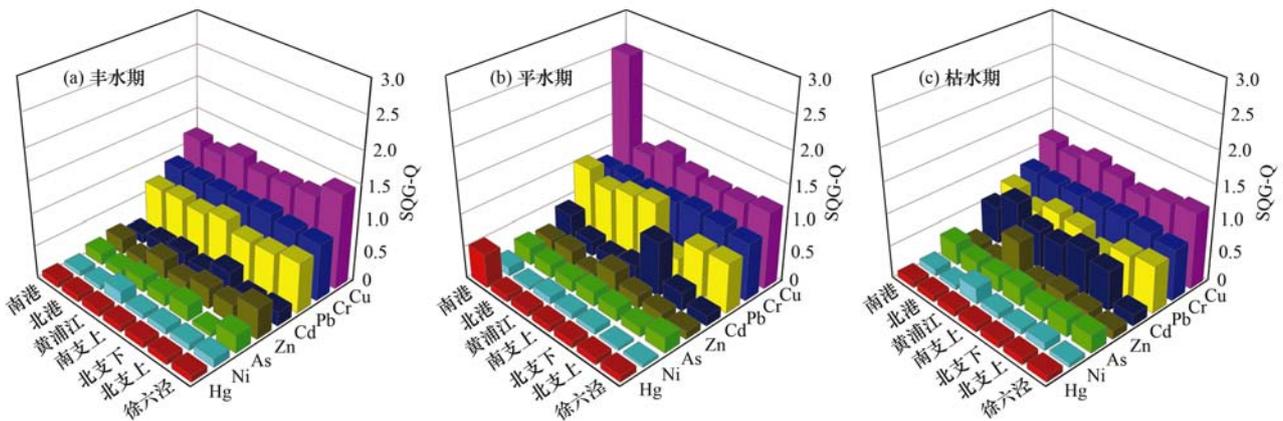


图 4 长江口沉积物重金属 SQGs 风险评价结果

Fig. 4 Assessment results of heavy metals in the sediments of the Yangtze Estuary with SQGs

表 2 重金属生态风险与 5 种赋存形态之间的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between ecological risk of heavy metals and the speciation

重金属	可交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态
Ni	0.658 9**	0.554 5**	-0.337 1	-0.384 9	0.213 5
Cu	0.229 5	0.465 1*	0.054 8	0.427 0	-0.460 4*
Cd	0.039 9	-0.568 9**	-0.514 6**	-0.053 0	0.415 1
Cr	-0.462 6*	-0.387 0	-0.287 3	-0.401 8	0.476 7*
As	-0.218 8	0.238 1	0.220 9	0.039 5	-0.164 0
Hg	-0.148 0	-0.080 4	-0.197 4	-0.095 3	0.101 6
Pb	-0.045 4	0.071 2	0.064 9	-0.088 9	-0.058 0
Zn	-0.129 9	-0.071 0	0.023 6	-0.295 2	0.087 8

1) * 表示在 0.05 水平下显著, ** 表示在 0.01 水平下显著

有显著或较高的负相关性,而与残渣态却有显著或较高的正相关性. 潮汐影响导致的盐水入侵会使长江口水体盐度增加,而盐度增加就会使大量的 Cd 和 Cr 从沉积物中解吸出来^[33,34]. 其中可能包括它们的残渣态,而 K_p 的计算公式中剔除了残渣态的含量,这就会导致重金属生态风险与残渣态有着正相关性,而与其它形态表现出负相关性. 其余 4 种重金属(As、Hg、Pb、Zn)的生态风险与它们的赋存形态之间都没有显著的相关性,并且也没有较为一致的正负相关性,这可能是由于多种因素的复合影响造成的. 因此,对于长江口沉积物重金属生态风险的预防,需关注 Ni、Cu 的可交换态和碳酸盐结合态含量,但对于 Cd、Cr 要着重考虑残渣态含量,而对于 As、Hg、Pb、Zn 而言,只需对其总量进行分析研究.

3 结论

(1) 北支下、南港、黄浦江入口这 3 个区域有着较高重金属含量. 长江口沉积物 8 种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)中,除 Cd 之外,均以残渣态为主导形态. 除 Hg、Zn 之外,重金属各形态比例在不同水文期及不同区域间的差异都较小.

(2) 平衡分配法计算的长江口 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 沉积物质量基准分别为 43.29、0.672、79.65、19.08、0.569、339.09、30.87、411.36 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,与国内外其它研究有较好可比性.

(3) 长江口沉积物 8 种重金属都可能造成生态风险,其中 Cu 有中等生态风险,需要引起重视. 南港和黄浦江入口区域受上海排污影响风险较高,而徐六泾区域则受长江径流影响更大.

(4) Ni、Cu 生态风险与可交换态和碳酸盐结合态有显著正相关性; Cd、Cr 生态风险与残渣态有显著正相关性,与非残渣态表现为负相关性; As、Hg、Pb、Zn 生态风险与形态之间没有显著相关关系.

参考文献:

- [1] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 186-193.
- [2] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Management, 1995, **19**(1): 81-97.
- [3] Macdonald D D, Carr R S, Calder F D, *et al.* Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters [J]. Ecotoxicology, 1996, **5**(4): 253-278.
- [4] Deng G P, Yang W Q, Zhou G Y, *et al.* Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Shenzhen River, South China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(18): 10594-10600.
- [5] 柏建坤, 李潮流, 康世昌, 等. 雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3346-3351.
- [6] 周军, 高风杰, 张宝杰, 等. 松花江表层沉积物有毒重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2701-2708.
- [7] Han C N, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Sediment quality assessment for heavy metal pollution in the Xiang-jiang River (China) with the equilibrium partitioning approach [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(12): 5007-5018.
- [8] 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 基于平衡分配法的太湖沉积物重金属质量基准及其在生态风险评价中的应用研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 2951-2959.
- [9] 钟文珏, 曾毅, 祝凌燕. 水体沉积物质量基准研究现状[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(3): 285-294.
- [10] 臧飞, 王胜利, 南忠仁, 等. 工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 497-506.
- [11] Sander S G, Hunter K A, Harms H, *et al.* Numerical approach to speciation and estimation of parameters used in modeling trace metal bioavailability[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(15): 6388-6395.
- [12] 王岚, 张桂玲, 孙明爽, 等. 春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N_2O 的分布和海-气交换通量[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4502-4510.
- [13] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 563-569.
- [14] 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.
- [15] 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 等. 应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1715-1724.
- [16] 王鸣宇. 重金属污染河流沉积物质量评价方法研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2011. 13-14.
- [17] USEPA, Office of Water. Aquatic Life Ambient Freshwater Quality Criteria-Copper [R]. Washington D C: US Environmental Protection Agency Office of Water Office of Science and Technology, 2007.
- [18] USEPA, Office of Water of Science and Technology. National Recommended Water Quality Criteria[R]. Washington D C: US Environmental Protection Agency Office of Water Office of Science and Technology, 2009.
- [19] 郑丙辉, 秦延文, 张雷, 等. 重金属污染沉积物质量评价研究——以太湖为例[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(10): 1860-1866.
- [20] 蒋博峰, 桑磊鑫, 孙卫玲, 等. 湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 98-107.

- [21] 方涛, 徐小清. 应用平衡分配法建立长江水系沉积物金属相对质量基准[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(4): 525-531.
- [22] Zhao S, Feng C H, Yang Y R, *et al.* Risk assessment of sedimentary metals in the Yangtze Estuary: new evidence of the relationships between two typical index methods[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **241-242**: 164-172.
- [23] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3562-3571.
- [24] Mahanta M J, Bhattacharyya K G. Total concentrations, fractionation and mobility of heavy metals in soils of urban area of Guwahati, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **173**(1-4): 221-240.
- [25] Turner A. Marine pollution from antifouling paint particles[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, **60**(2): 159-171.
- [26] Zhao S, Feng C H, Wang D X, *et al.* Relationship of metal enrichment with adverse biological effect in the Yangtze Estuary sediments: role of metal background values[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(1): 464-472.
- [27] 洪松, 陈静生, 程兵岐. 黄河水系悬浮物和沉积物重金属质量基准研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(12): 61-65.
- [28] 邓保乐, 祝凌燕, 刘慢, 等. 太湖和辽河沉积物重金属质量基准及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(1): 33-42.
- [29] Huo S L, Xi B D, Yu X J, *et al.* Application of equilibrium partitioning approach to derive sediment quality criteria for heavy metals in a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **69**(7): 2275-2285.
- [30] 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 等. 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1067-1075.
- [31] Feng H, Jiang H Y, Gao W S, *et al.* Metal contamination in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China [J]. Journal of Environmental Management, 2011, **92**(4): 1185-1197.
- [32] Perin G, Craboledda L, Lucchese M, *et al.* Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea: a new approach for environmental toxicity determination [A]. In: Lakkas T D (Ed.). Heavy Metals in the Environment [M]. Edinburg: CEP Consultants, 1985, **2**: 454-456.
- [33] Zhao S, Feng C H, Wang D X, *et al.* Salinity increases the mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the sediments of Yangtze Estuary: Relative role of sediments' properties and metal speciation[J]. Chemosphere, 2013, **91**(7): 977-984.
- [34] Pope N D, Langston W J. Sources, distribution and temporal variability of trace metals in the Thames Estuary [J]. Hydrobiologia, 2011, **672**(1): 49-68.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron 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, ZHAGN 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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