

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859)	
《环境科学》征订启事(3952)	
信息(3644, 3688, 3768)	

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价

刘群群, 孟范平*, 王菲菲, 崔鸿武, 王曰杰

(中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 2016 年 5 月在东营市北部海域采集沉积物样品并测定 7 种重金属含量, 分析其空间分布特征和来源, 并采用沉积物质量基准 (SQGs) 和潜在生态风险指数 (PERI) 两种方法评价其生态风险。结果表明, 该海域沉积物中 Hg、As、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 含量分别为 0.005 ~ 0.092、3.44 ~ 10.41、6.59 ~ 19.00、0.50 ~ 1.10、32.42 ~ 60.25、1.72 ~ 23.78、31.13 ~ 69.96 mg·kg⁻¹; 重金属含量最高值、次高值多出现在靠近挑河入海口且有机质、粉砂和黏土含量较高的 S10 站位。沉积物中的 As、Pb 主要来自岩石风化, 其它金属则来自地表径流输送的陆源污染物。某些站位的 As、Cd、Cr、Cu 含量超出临界效应浓度 (TEL), 会偶尔产生不利生物毒性效应。除 S10、S3、S9 站位 (属于高生态风险) 外, 该海域沉积物中的重金属处于中等生态风险, 且风险主要来自 Cd、Hg。为降低该海域的重金属生态风险水平, 必须采取措施控制挑河等河流的重金属入海通量。

关键词: 河口; 沉积物; 重金属; 分布; 来源; 生态风险

中图分类号: X55; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3635-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701048

Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City

LIU Qun-qun, MENG Fan-ping*, WANG Fei-fei, CUI Hong-wu, WANG Yue-jie

(Key Laboratory for Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Concentrations of seven heavy metals in the coastal sediments of the northern Dongying City were measured. The spatial distribution and sources of heavy metals were discussed and the ecological risk was assessed using sediment quality guidelines (SQGs) and the potential ecological risk index (PERI). The concentration ranges of Hg, As, Pb, Cd, Cr, Cu, and Zn were calculated as 0.005-0.092, 3.44-10.41, 6.59-19.00, 0.50-1.10, 32.42-60.25, 1.72-23.78, and 31.13-69.96 mg·kg⁻¹, respectively. Higher metal concentrations were observed at site S10, which was close to the mouth of Tiaohe River and contained plenty of organic matter, silt, and clay. Principal component analysis (PCA) indicated that As and Pb in the sediments were derived from natural weathering processes, while other metals were mainly attributed to anthropogenic sources, i. e., land-sourced pollutants transported by runoff. Concentrations of As, Cd, Cr, and Cu at some sampling sites exceeded the threshold effect level (TEL) stated in the SQGs implying occasional harmful effects on biological life. PERI showed that the sediments in this area generally had a medium risk, except sites S10, S3, and S9 posing a considerable risk, and that Cd and Hg were the major contributors to the ecological risk. It is necessary to take effective measures to control heavy metal fluxes from rivers around this area and to reduce the risk.

Key words: estuary; sediment; heavy metals; distribution; source; ecological risk

重金属因具有高毒性、不可降解性、易被生物富集等特点而存在较高生态风险。国家环境保护部、美国环境保护署 (EPA) 等机构很早就将 Hg 等重金属列为环境优先控制污染物^[1,2]。进入海水中的重金属大多被颗粒物吸附而沉降到沉积物中, 在一定环境条件下 (例如: pH 降低、氧化还原电位下降、有机质降解等), 这些重金属又会重新释放到水体中, 形成二次污染, 干扰甚至破坏生态平衡。为此, 许多国际组织/公约将重金属作为海洋沉积物污染的评价指标, 并建立了评价沉积物重金属环境风险的多种方法^[3]。较简单的有富集因子法 (EF)、地积累指数法 (I_{geo})、污染因子法 (CF) 等^[4-6], 主要是根据单一重金属的总量与其背景值 (或标准值) 的

比值进行评价, 但未能提供有关重金属毒性的信息, 也不能反映多种重金属的综合毒性效应^[7]。沉积物质量基准法 (SQGs) 根据重金属生物毒性推导出两个基准值 [临界效应浓度 (TEL) 和可能效应浓度 (PEL)] 评价重金属对底栖生物的潜在不利影响^[8], 目前已在淡水、海洋沉积物质量评价中得到广泛应用^[9,10]。Hakanson 创立的潜在生态风险指数法 (PERI)^[11] 在计算单因子指数基础上引入毒性系

收稿日期: 2017-01-07; 修订日期: 2017-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41240040); 山东省海洋资源与环境研究院委托项目

作者简介: 刘群群 (1992 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为海洋污染化学, E-mail: shendaijun456@163.com

* 通信作者, E-mail: mengfanping@ouc.edu.cn

数,将重金属的生物效应与生态风险相结合,消除了区域差异和异源污染的影响^[12]. 该方法既能区分单一重金属的生态风险,也能评价多种重金属的综合生态风险,因而成为海洋沉积物重金属污染评价的常用方法^[13,14].

近 20 年来,我国学者已对渤海、黄海、东海、南海海域的主要河口及沿海表层沉积物重金属污染进行了广泛调查研究^[15]. 在渤海,由于黄河巨大径流量对渤海海域生态系统的重要影响,位于山东省东营市东部海域的黄河口已成为研究沉积物重金属污染的重要区域,有关其沉积物重金属的环境地球化学行为、分布特征及影响因素、生物毒性评价研究已有很多^[16~18]. 但是,东营市北部海域同样具有重要的经济、生态地位. 这里拥有丰富的滩涂和浅海资源,是全国著名的贝类生产区,2008 年国家海洋局批准设立的“东营河口浅海贝类生态国家级海洋特别保护区”(保护区)就位于其滩涂及 -5 m 浅海海域 ($118^{\circ}07'30'' \sim 118^{\circ}25'00''\text{E}$, $38^{\circ}02'49'' \sim 38^{\circ}16'44''\text{N}$)^[19]. 该海域受黄河径流影响很小,但是陆域工业和养殖业迅速发展带来的污染压力却在不断增加. 本研究拟根据 2016 年 5 月的采样监测结果,对该海域沉积物中重金属的含量范围、空间分布和污染来源进行分析,并采用 SQGs 和 PERI 评价重金属污染的生态风险,以期为该海域的环境管理以及保护区内重金属污染控制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

东营市是一座典型的石油化工城市. 位于该市北部沿海的河口区境内分布着石油开采、石油化工、机械制造、金属加工、塑料加工、电镀、制革、制药等众多工业企业以及多家大型畜禽养殖业,所排废水经潮河、马新河、沾利河、草桥沟、挑河等河流输送入海. 该海域地处渤海湾西南部,属粉沙淤泥质海岸;潮汐类型为不正规半日潮;潮流主要为半日潮和全日潮,运动形式以往复流为主,余流整体较小,流速一般为 $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;有效波高总体小于 3 m ^[20]. 根据历史监测资料,该海域的海水水质总体上符合《海水水质标准》(GB 3097-1997)的二类标准,但是挑河河口海水的某些指标(化学需氧量、无机氮和石油类)存在超标现象^[21].

1.2 样品采集

2016 年 5 月,在东营北部海域布设 12 个站位

(图 1). 每个站位上利用抓斗式采泥器采集适量表层(0~20 cm)沉积物样品,现场去除其中的砾石、动植物残体等杂物后,装入预先经硝酸溶液(1+3)浸泡过的聚乙烯袋中,冷冻保存并立即运回实验室.

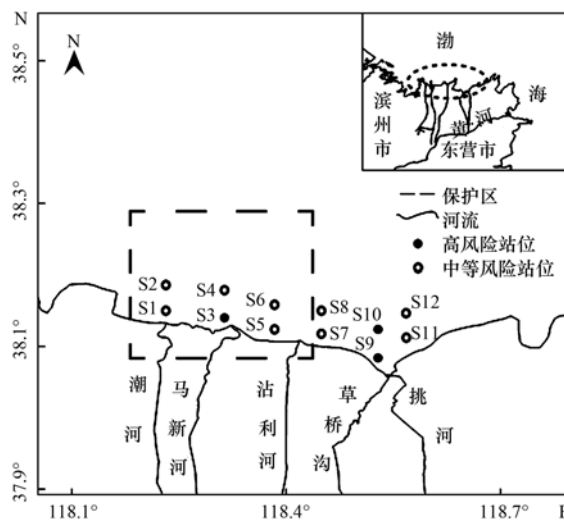


图 1 采样站位分布示意

Fig. 1 Map of the sediment sampling sites

1.3 样品处理与分析方法

重金属:根据《海洋监测规范》(GB 17378.5-2007)^[22],将用于 Hg 测定的样品自然风干;用于其它重金属分析的样品在 90°C 下烘至恒重. 随后,两种样品分别用球磨机研磨,过 160 目尼龙筛. 对测定 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 的样品进行微波消解^[23],然后采用 ICAP-6300 型等离子体发射光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司)测定,仪器参数为:RF 功率 1150W,辅助气流量 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 对于 Hg 和 As,采用原子荧光法^[22]进行测定,仪器为 PF6-3 型多道全自动原子荧光光度计(北京海光仪器有限公司). 在样品重金属分析的同时,通过测定近海海洋沉积物标准物质(GBW 07314,国家海洋局第二海洋研究所)进行质量控制. GBW 07314 中 7 种重金属元素回收率介于 96.6%~115%,均在沉积物标准物质允许的误差范围之内,表明重金属含量分析结果具有较好准确性.

有机质(OM):样品经自然风干后于球磨机研磨,过 80 目尼龙筛. 采用重铬酸钾氧化还原-容量法^[22]进行 OM 测定.

沉积物粒度组成:样品按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.8-2007)^[24]自然风干,采用 MS2000 型激光粒度分析仪(英国马尔文公司)进行测定,并计算沉积物中砂、粉砂、黏土的质量分数.

1.4 沉积物质量评价方法

1.4.1 沉积物质量基准法(SQGs)

SQGs 是基于临界效应浓度(TEL)和可能效应浓度(PEL)评价沉积物中重金属潜在生态危害的方法^[8]。7 种重金属的 TEL、PEL 基准值见表 1。当沉积物中某种重金属含量小于 TEL,不利生物毒性效应很少发生;大于 PEL 时,不利生物毒性效应将频繁发生;介于两者之间时,不利生物毒性效应偶尔

发生。

为比较不同站位的潜在急性毒性,首先按照公式(1)计算毒性单位(TU),将各种重金属的毒性标准化,然后求得每个站位 7 种重金属的毒性单位总和($\sum TU_s$)^[25]。

$$TU = C_i/PEL_i \tag{1}$$

式中, C_i 为沉积物中重金属 i 的含量($mg \cdot kg^{-1}$); PEL_i 为重金属 i 的 PEL 值。

表 1 沉积物中重金属的 TEL 和 PEL(干基)/ $mg \cdot kg^{-1}$

重金属	Hg	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	As
TEL	0.13	0.68	30.2	52.3	18.7	124	7.24
PEL	0.70	4.21	112	160	108	271	41.6

1.4.2 潜在生态风险指数(PERI)法

按下列公式计算 PERI^[11]:

$$C_f^i = C_s^i/C_n^i \tag{2}$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \tag{3}$$

$$PERI = \sum E_r^i \tag{4}$$

式中, C_f^i 为重金属 i 的污染指数; C_s^i 为重金属 i 实测含量($mg \cdot kg^{-1}$); C_n^i 为重金属 i 的背景值($mg \cdot kg^{-1}$),由于研究区域地处渤海,故选用渤海沉积物重金属背景值(Cu $16.5 mg \cdot kg^{-1}$ 、Pb $14.6 mg \cdot kg^{-1}$ 、Zn $20.7 mg \cdot kg^{-1}$ 、Cr $23.1 mg \cdot kg^{-1}$ 、Cd $0.120 mg \cdot kg^{-1}$ 、Hg $0.025 2 mg \cdot kg^{-1}$ 、As $7.06 mg \cdot kg^{-1}$)^[26]进行计算; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应因子,其中,Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 的毒性响应因子分别为 40、30、10、5、5、2 和 1。根据 E_r^i 、PERI 的大小可进行单因子生态风险、综合生态风险等级的划分(见表 2)。

1.5 数据统计分析

图表制作采用 Origin 8.6 软件。沉积物中重金属之间及其与粒度组成、OM 之间的 Pearson 相关性分析(统计显著性水平为 $P < 0.05$)以及主成分分析均采用数据处理软件 SPSS 19.0。

表 2 基于 E_r^i 、PERI 的潜在生态风险等级划分

Table 2 Classification of ecological risks based on E_r^i and PERI			
E_r^i	生态风险等级 (单因子)	PERI	生态风险等级 (综合)
$E_r^i \leq 40$	低	$PERI \leq 150$	低
$40 < E_r^i \leq 80$	中等	$150 < PERI \leq 300$	中等
$80 < E_r^i \leq 160$	高	$300 < PERI \leq 600$	高
$160 < E_r^i \leq 320$	很高	$PERI > 600$	极高
$E_r^i > 320$	极高		

2 结果与讨论

2.1 沉积物的基本特征

由表 3 可见,东营市北部海域沉积物的 OM 含量范围为 0.07% ~ 0.28% (平均为 0.12%),最高值

表 3 研究海域沉积物基本特征/%

Table 3 General characteristics of sediments collected from the studied area/%					
站位	OM	粒度组成			沉积物质地
		砂	粉砂	黏土	
S1	0.10	61.52	38.48	0.00	粉砂质砂
S2	0.11	55.08	44.92	0.00	粉砂质砂
S3	0.09	60.23	35.98	3.79	粉砂质砂
S4	0.08	60.28	39.72	0.00	粉砂质砂
S5	0.11	49.91	43.44	6.65	粉砂质砂
S6	0.07	56.52	42.33	1.15	粉砂质砂
S7	0.19	22.89	66.85	10.26	砂质粉砂
S8	0.08	66.82	31.99	1.19	粉砂质砂
S9	0.10	49.15	44.62	6.23	粉砂质砂
S10	0.28	14.14	66.83	19.03	黏土质粉砂
S11	0.09	58.07	41.93	0.00	粉砂质砂
S12	0.09	66.03	30.50	3.47	粉砂质砂
平均值	0.12 ± 0.06	51.72 ± 16.52	43.97 ± 11.64	4.31 ± 5.69	

和最低值分别出现在 S10 和 S6 站位. 砂、粉砂、黏土的含量范围分别为 14.14% ~ 66.03%、30.50% ~ 66.85%、0 ~ 19.03%, 平均值分别为 51.72%、43.97%、4.31%. 各站位沉积物粒度组成均以砂、粉砂为主. 除 S7(砂质粉砂)、S10(黏土质粉砂) 站位外, 其它站位的质地均为粉砂质砂.

2.2 沉积物中重金属的含量与分布

研究区域 12 个站位沉积物中重金属的含量变化见图 2. Hg、As、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 的含量范围分别为 0.005 ~ 0.092、3.44 ~ 10.41、6.59 ~ 19.00、

0.50 ~ 1.10、32.42 ~ 60.25、1.72 ~ 23.78、31.13 ~ 69.96 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 重金属含量平均值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)由高到低依次为: Zn(53.24) > Cr(41.3) > Cu(12.3) > Pb(11.3) > As(6.14) > Cd(0.6) > Hg(0.040). 各站位的 Cd 含量全部超过《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)^[27] 一类标准, 但符合二类标准; 其它重金属的含量均符合一类标准. 与国内外其它近岸海域的重金属含量相比(表 4), 东营市北部海域 7 种重金属含量均处于中等水平, 但是, Zn、Cr 含量明显高于黄河口沉积物的重金属含量.

表 4 不同海域沉积物重金属含量比较/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Metal concentrations in various sediments of the marine environments/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

研究区域	Hg	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn
东营市北部海域 ¹⁾	0.005 ~ 0.092	3.44 ~ 10.40	6.59 ~ 16.62	0.50 ~ 1.10	32.42 ~ 60.25	1.72 ~ 23.78	31.20 ~ 69.96
胶州湾 ^[28] , 中国	0.12 ~ 0.58	10.0 ~ 20.8	42.3 ~ 93.1	0.07 ~ 0.37	83.3 ~ 140.6	12.8 ~ 124.5	66.8 ~ 243.4
Aqaba 湾 ^[29] , 埃及	0.004 ~ 0.051	—	1.07 ~ 2.59	0.05 ~ 0.11	—	0.16 ~ 2.06	6.69 ~ 60.67
Suez 湾 ^[29] , 埃及	0.010 ~ 0.031	—	0.31 ~ 2.69	0.07 ~ 0.17	—	0.11 ~ 0.14	4.69 ~ 119.89
Chabahar 湾 ^[30] , 伊朗	—	8.67 ~ 20	10.33 ~ 15.5	—	86.67 ~ 400	<5 ~ 26	24 ~ 43
黄河口 ^[16] , 中国	0.0094 ~ 0.0923	5.1 ~ 7.6	11.7 ~ 24.7	—	13.0 ~ 24.1	12.2 ~ 22.6	14.8 ~ 25.4
长江口 ^[31] , 中国	0.24 ~ 1.29	9.55 ~ 19.3	10.2 ~ 91.3	1.30 ~ 3.83	—	10.3 ~ 51.3	49.0 ~ 126
珠江口 ^[32] , 中国	0.004 ~ 0.047	1.10 ~ 4.40	0.33 ~ 1.93	0.04 ~ 0.35	0.10 ~ 1.28	0.70 ~ 3.91	1.00 ~ 20.5
滦河口 ^[33] , 中国	0.002 ~ 0.065	3.4 ~ 13.6	22.6 ~ 43.7	0.020 ~ 0.240	11.6 ~ 76.2	9.6 ~ 35.6	12.9 ~ 94.7
双台子河口 ^[34] , 中国	0.007 ~ 0.021	—	4.383 ~ 9.649	0.241 ~ 0.764	—	2.175 ~ 17.675	18.250 ~ 126.750
北部湾潮间带 ^[35] , 中国	ND ²⁾ ~ 0.437	3.02 ~ 21.51	7.50 ~ 148.95	ND ~ 0.306	12.30 ~ 27.97	7.15 ~ 41.13	21.36 ~ 1271.88
一类标准 ³⁾	0.20	20.0	60.0	0.50	80.0	35.0	150.0
二类标准 ³⁾	0.50	65.0	130.0	1.50	150.0	100.0	350.0

1) 本研究; 2) 未检出; 3) 《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)

重金属含量在空间上有较大变化. Cd、Cr、Zn 的最高值和 Cu、Hg、As 的次高值均出现在 S10 站位, 该站位的 Pb 含量也较高(仅次于 S1、S8 站位). 这可能与陆域径流向海输送重金属以及沉积物理化性质有关. S10 站位处于研究区域东部, 在陆域方向上毗邻挑河, 直接受到该河输送的污染物影响. 2016 年 3 ~ 11 月, 笔者在挑河等 5 条河流入海口处进行河水采集, 分析重金属浓度并同步测定河水流量(共 9 期, 12 月、1 月和 2 月因河水结冰而无法采样, 数据未列出, 将另文发表), 由此计算的重金属入海通量(表 5)表明, 与其它河流相比, 挑河向海输送的 7 种重金属数量最大, 占 5 条河流总入海通量的 46% ~ 61%. 排入海洋中的重金属因吸附于颗粒物表面而沉降于海底^[36], 造成 S10 站位沉积物中重金属积累量增加. 另外, 该站位沉积物的 OM 含量以及粉砂、黏土含量在各站位中均处于最高水平(表 3), 也是重金属含量较高的原因. 有机质可通过提供更多吸附位点而增加沉积物对痕量金属的吸附程度^[37]. 粒径分布也是影响沉积物中痕量金属

地球化学行为的重要因素. 与粒径较大($>63 \mu\text{m}$)的砂相比, 粉砂、黏土等细颗粒($\leq 63 \mu\text{m}$)因具有较大的比表面积而有利于无机组分吸附^[38]. 值得注意的是, 在同样毗邻挑河、且距河流入海口更近的 S9 站位, 沉积物中各重金属的含量却普遍低于 S10 站位, 这主要是由于该站位沉积物的 OM 以及粉砂、黏土含量相对较低所致. 此外, 虽然沾利河的重金属入海通量也处于较高水平(表 5), 但是, 其入海口附近的 S5 ~ S8 站位重金属含量总体上低于 S10 站位(图 2), 与这些区域沉积物中 OM 以及细颗粒(特别是黏土)含量较低有很大关系.

2.3 沉积物中重金属的来源解析

确定重金属的来源对于有效控制重金属污染至关重要. 本研究首先进行沉积物中 7 种重金属之间的 Pearson 相关性分析, 以判断重金属相互间依存关系的密切程度. 由表 6 可见, 研究区域存在显著相关性的重金属有 2 组: ① Cu 和 Zn ($P < 0.01$); ② Cd 和 Hg、Cr、Cu、Zn ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 表明这些污染物之间关系密切. 相反, As、Pb 与其它

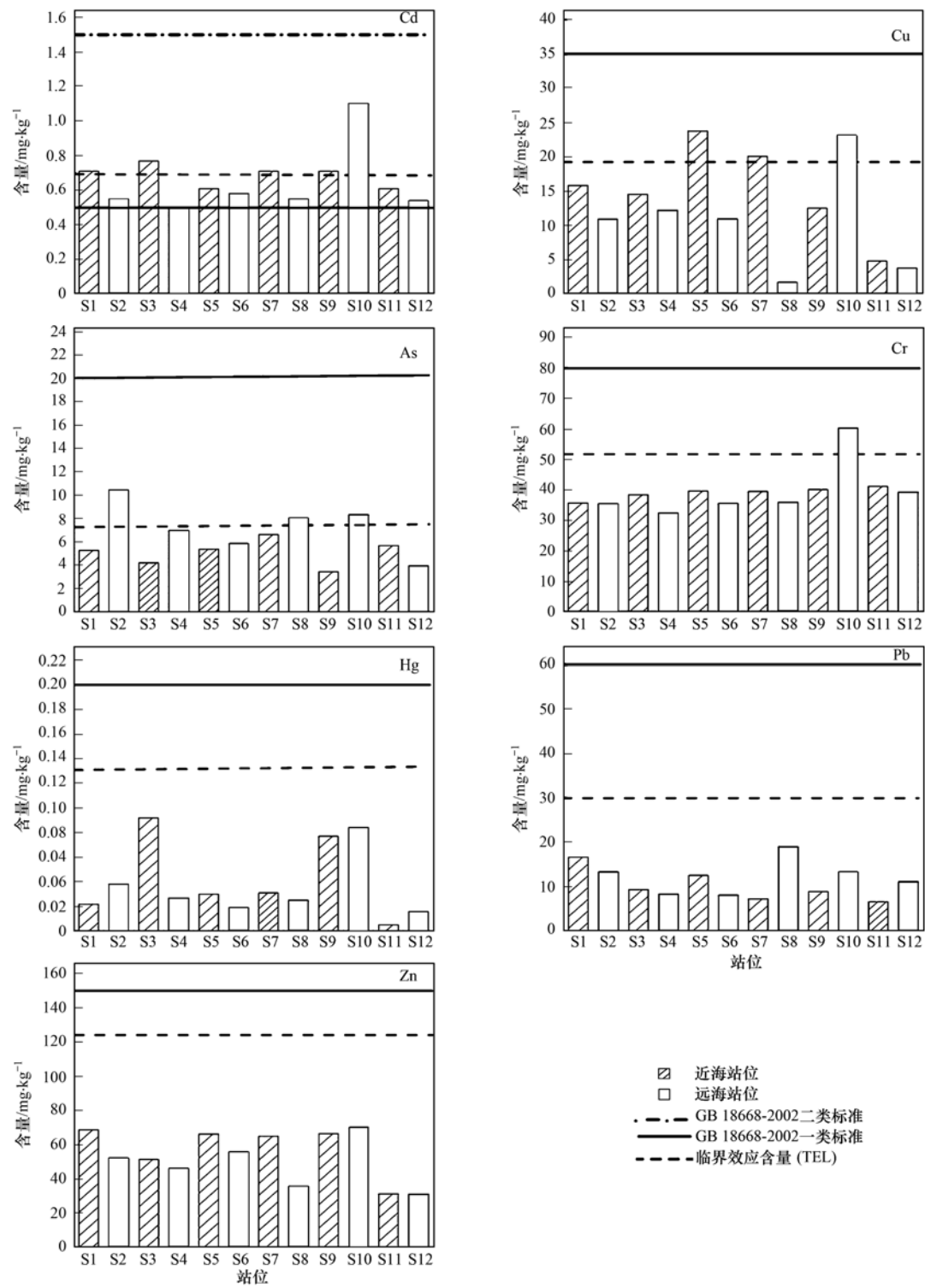


图 2 东营市北部海域沉积物中 7 种重金属的含量

Fig. 2 Contents of heavy metals in the coastal sediments of the northern part of Dongying City

重金属之间均无显著相关性,表明两者具有不同于其它元素的来源. 东营市北部海域重金属的可能来源主要有 3 类:①自然来源(岩石风化等);②陆域工业废水;③陆域农业生产(牲畜养殖)活动.

KMO 和 Bartlett 球形度检验表明,标准化后的数据适合进行因子分析. 根据主成分分析结果(表

7), 3 个主成分(PC1、PC2、PC3)的累计方差贡献率为 81.53%,可反映研究区域沉积物原始监测数据的大部分信息. 在 PC1 上,Hg、Cd、Cr 具有较高载荷. Cd-Hg、Cd-Cr 之间的显著相关性也证明它们的同源性. 研究区域所有站位的 Cd、Cr 含量以及大多数站位的 Hg 含量超过渤海沉积物的背景值

表 5 5 条入海河流的重金属入海通量/kg·a⁻¹

Table 5 Heavy metal fluxes of five rivers into Bohai Bay/kg·a⁻¹

河流	Hg	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn
潮河	16.51	592.63	62.09	57.96	570.43	707.15	1 997.44
马新河	3.19	126.67	13.27	10.79	139.31	131.99	483.52
沾利河	38.15	1 440.05	84.52	96.25	1 044.94	897.97	3 694.51
草桥河	2.96	109.23	12.48	12.40	138.72	139.58	446.19
挑河	60.74	1 929.79	231.66	208.37	1 939.76	2 976.25	7 935.73
合计	121.54	4 198.37	404.02	385.76	3 833.17	4 852.95	14 557.39

(见 1.4.2 节),表明人为活动对该区域 3 种金属的积累具有重要贡献. 研究区域的南部陆地分布着滨州市沾化区、东营市河口区的多个工业园区,其中,制革、制药工业产生含 Cr 废水^[39,40]; Hg 是石化废水、塑料加工废水中的主要重金属^[41,42]; 电镀工业排放含 Cd、Cr 的废水^[43]. 这些重金属通过河流输送入海并在沉积物中富集. 因此,第一主成分主要表征了工业生产活动对海洋沉积物的重金属污染. PC2 中 Cu、Zn 的载荷较大,且两者呈显著相关. 研究区域沉积物中的 Cu、Zn 含量总体上呈现近岸高、远岸低的趋势(图 2),为陆域污染通过径流排海所致. 根据调查,挑河、沾利河两侧分布着多家大型

畜禽养殖基地. 为加快畜禽生长,目前的动物养殖业大多向饲料中添加过量添加剂(包括 Cu、Zn 等重金属)^[44],造成畜禽粪便和养殖业废水中含有一定量的 Cu、Zn,随雨水冲刷进入河流和邻近海域. 同时注意到,Cu、Zn 在 PC1 中也有一定载荷,表明研究区域沉积物中的部分 Cu、Zn 来自工业废水. 因此,第二个主成分反映了陆地养殖业和工业生产的联合污染. PC3 中 As、Pb 的载荷值较大. 两者的含量在大多数站位上低于渤海沉积物的背景值,且站位间差异不大(图 2),表明其主要来自岩石风化、陆地水土流失等途径. 因此,第三个主成分反映了自然作用对海洋沉积物污染的贡献.

表 6 研究区域沉积物重金属含量之间的相关系数¹⁾

Table 6 Pearson's correlation coefficient (r) between heavy metals in sediments from the study area

	Hg	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn
Hg	1						
As	-0.089	1					
Pb	-0.017	0.364	1				
Cd	0.708**	0.036	0.068	1			
Cr	0.506	0.126	0.042	0.883**	1		
Cu	0.447	0.045	-0.080	0.612*	0.447	1	
Zn	0.480	0.006	0.065	0.588*	0.332	0.878**	1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关

表 7 研究海域沉积物重金属的主成分分析结果

Table 7 Results of principal component analysis for heavy metals in the sediments from the study area

重金属	第一主成分(PC1)	第二主成分(PC2)	第三主成分(PC3)
Cr	0.918	0.113	0.115
Cd	0.903	0.367	0.055
Hg	0.737	0.311	-0.129
Zn	0.254	0.940	0.035
Cu	0.318	0.907	-0.022
As	0.005	0.025	0.832
Pb	0.024	-0.017	0.814
方差贡献率/%	33.827	27.878	19.829
累积方差/%	33.827	61.705	81.534

2.4 沉积物的重金属生态风险评价

2.4.1 基于 SQGs 的评价结果

与表 1 的沉积物质量基准相比,研究区域 7 种

重金属的含量均小于 PEL,但是,部分站位的重金属含量已超过 TEL,包括:3 个站位(S2、S8、S10)的 As; 5 个站位(S1、S3、S7、S9、S10)的 Cd; 3

个站位 (S5、S7、S10) 的 Cu; 1 个站位 (S10) 的 Cr, 表明这些站位上的 As、Cd、Cr、Cu 偶尔会对水生生物产生毒性效应。∑TUs 计算结果显示 (表 8), 各站位的潜在急性毒性由高及低依次为: S10 > (S5、S7、S1) > (S2、S3、S9) > (S6、S8、S4、S11、S12)。

表 8 研究区域每种重金属的 TU 值和各站位的 ∑TUs 值

站位		TU							∑TUs
		Hg	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	
保护区内	S1	0.03	0.13	0.15	0.17	0.22	0.15	0.25	1.10
	S2	0.05	0.25	0.12	0.13	0.22	0.10	0.19	1.07
	S3	0.13	0.10	0.08	0.18	0.24	0.13	0.19	1.06
	S4	0.04	0.17	0.07	0.12	0.20	0.11	0.17	0.88
	S5	0.04	0.13	0.11	0.14	0.25	0.22	0.24	1.14
	S6	0.03	0.14	0.07	0.14	0.22	0.10	0.21	0.91
	平均值	0.05 ± 0.04	0.15 ± 0.05	0.10 ± 0.03	0.15 ± 0.02	0.23 ± 0.02	0.14 ± 0.05	0.21 ± 0.03	1.03 ± 0.11
保护区外	S7	0.04	0.16	0.06	0.17	0.25	0.19	0.24	1.11
	S8	0.04	0.19	0.17	0.13	0.22	0.02	0.13	0.90
	S9	0.11	0.08	0.08	0.17	0.25	0.12	0.24	1.05
	S10	0.12	0.20	0.12	0.26	0.38	0.21	0.26	1.55
	S11	0.01	0.14	0.08	0.16	0.27	0.06	0.14	0.86
	S12	0.02	0.09	0.12	0.15	0.25	0.06	0.11	0.81
	平均值	0.06 ± 0.05	0.14 ± 0.05	0.10 ± 0.04	0.17 ± 0.05	0.27 ± 0.06	0.10 ± 0.08	0.18 ± 0.07	1.05 ± 0.30

2.4.2 基于 PERI 的评价结果

沉积物中重金属的 E_r^i 、PERI 计算结果见表 9。就单种重金属而言,所有站位上的 As、Cu、Zn、Pb、Cr 处于低生态风险; Hg 在 3 个站位 (S3、S9、S10) 上属于高生态风险,在 4 个站位 (S2、S4、S5、S7) 上属于中等生态风险,其它站位为低生态风险; Cd 在 5 个站位 (S1、S3、S7、S9、S10) 具有很高的生态风险,其它站位均为高生态风险。显然,在每个站位上, Cd 和 Hg 都是 PERI 的主要贡献者。基于 PERI 的站位排序为: S10 > S3 > S9 > S7 > S1 > S2, S5 > S8

> S6 > S4 > S11、S12, 其中, 前 3 个站位属于高生态风险, 其它站位为中等水平风险。

2.4.3 两种评价方法的结果比较

采用 PERI 和 SQGs 得到的评价结果基本一致, 即: S10 站位的生态风险最高, 而 S4、S11、S12 等站位的风险较低。但是两种方法对于其它站位的风险排序不尽相同。例如, S5、S7、S1 站位的 ∑TUs 仅次于 S10 站位, 而它们的 PERI 值却不及 S3、S9 站位。这是因为两种方法对生物毒性的评价侧重点不

表 9 研究区域重金属的 E_r^i 、PERI 计算值及潜在生态风险等级

站位		E_r^i							PERI	风险等级
		Hg	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn		
保护区内	S1	34.92	7.45	5.69	177.50	3.10	4.80	3.32	236.78	中等
	S2	60.32	14.75	4.57	137.50	3.07	3.31	2.52	226.04	中等
	S3	146.03	5.98	3.20	192.50	3.33	4.41	2.48	357.93	高
	S4	42.86	9.87	2.84	125.00	2.81	3.71	2.22	189.31	中等
	S5	47.62	7.63	4.28	152.50	3.43	7.21	3.20	225.87	中等
	S6	30.16	8.30	2.77	145.00	3.08	3.32	2.69	195.32	中等
	平均值	52.92 ± 49.28	9.00 ± 3.09	3.89 ± 1.16	155.00 ± 25.40	3.14 ± 0.22	4.46 ± 1.47	2.74 ± 0.43	238.54 ± 61.43	中等
保护区外	S7	49.21	9.36	2.47	177.50	3.42	6.08	3.13	251.17	中等
	S8	39.68	11.35	6.51	137.50	3.11	0.52	1.73	200.40	中等
	S9	122.22	4.87	3.03	177.50	3.48	3.79	3.20	318.10	高
	S10	133.33	11.78	4.55	275.00	5.22	7.01	3.38	440.28	高
	S11	7.94	8.05	2.26	152.50	3.57	1.45	1.51	177.27	中等
	S12	25.40	5.58	3.80	135.00	3.41	1.15	1.50	175.85	中等
	平均值	43.13 ± 47.61	8.50 ± 2.88	3.77 ± 1.59	175.83 ± 52.00	3.70 ± 0.76	3.33 ± 2.74	2.41 ± 0.91	260.51 ± 103.37	中等

同;SQGs 方法以 PEL 作为计算单一重金属相对毒性的依据;而 PERI 则将重金属背景值和毒性响应因子同时用于单一重金属相对毒性计算。鉴于此,为降低评价结论的不确定性,有必要综合考虑多种评价方法的结果,以便为环境管理决策者提供较为全面的生态风险信息。

2.4.4 保护区内外的重金属生态风险差异性

根据表 8,保护区内、外(各 6 个站位)的 $\sum TU_s$ 平均值非常接近(1.03 和 1.05)。PERI 平均值(238.54 和 260.51)也显示保护区内、外均处于中等生态风险(表 9),只是保护区外的生态风险性稍高一些,主要是由于 S10 站位附近的重金属含量普遍较高所致。考虑到研究区域沉积物的重金属污染已达到中等生态风险,而且这些重金属在一定条件下会溶解释放到上覆水体中,并在潮流作用下迁移扩散到保护区内,为避免保护区重金属含量继续增加而造成更大的生态风险,必须加强东营市北部海域附近地表径流(特别是 S10 站位邻近的挑河)的重金属入海通量控制。根据 2.3 节的分析,该海域的重金属人为来源主要是陆地畜禽养殖业和工业生产废水,建议采取以下控制对策:沿河两侧企业实施清洁生产以降低重金属产生量;严格工业废水达标排放管理以削减重金属外排量;河流入海口附近建设人工湿地以减少重金属入海量。

3 结论

(1)东营北部海域沉积物中 Hg、As、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 含量范围分别为 0.005~0.092、3.44~10.41、6.59~19.00、0.50~1.10、32.42~60.25、1.72~23.78、31.13~69.96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;重金属含量最高值或次高值多出现在 S10 站位;各站位重金属(Cd 除外)含量均符合《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)一类标准;与世界其它海域相比,研究区域的重金属含量处于中等水平。

(2)主成分分析表明,沉积物中 Hg、Cd、Cr 主要来自工业废水随地表径流输送入海;Cu、Zn 来自河道两侧畜禽养殖基地使用的添加剂和工业废水排放;As、Pb 主要来自岩石风化、陆地水土流失等自然作用。

(3)基于 SQGs 和 PERI 的评价表明,某些站位 As、Cd、Cr、Cu 含量超出 TEL 值,会偶尔对水生生物产生毒害效应。S10、S3、S9 站位达到高生态风险,其它站位为中等风险。Cd、Hg 是潜在生态风险的主要贡献元素。

(4)与保护区内相比,保护区外的重金属生态风险水平稍高。为防止沉积物中重金属含量继续增加而造成更大的生态风险,应加强地表径流(特别是挑河)的重金属入海通量控制。

参考文献:

- [1] 周文敏,傅德黔,孙宗光. 中国水中优先控制污染物黑名单的确定[J]. 环境监测管理与技术, 1991, 3(4): 18-20.
Zhou W M, Fu D Q, Sun Z G. Determination of black list of China's priority pollutants in water [J]. Research of Environmental Sciences, 1991, 3(4): 18-20.
- [2] Protano C, Zinnà L, Giampaoli S, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risks in rivers: a case study from southern Italy [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, 92(1): 75-80.
- [3] Maanan M, Saddik M, Maanan M, et al. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco [J]. Ecological Indicators, 2015, 48: 616-626.
- [4] Buat-Menard P, Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 42(3): 399-411.
- [5] Müller G. Heavy-metals in sediment of the Rhine-changes since 1971 [J]. Umschau in Wissenschaft und Technik, 1979, 79(24): 778-783.
- [6] Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust [J]. Geological Society of America Bulletin, 1961, 72(2): 175-192.
- [7] Wolska L, Sagajdakow A, Kuczyńska A, et al. Application of ecotoxicological studies in integrated environmental monitoring: possibilities and problems [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2007, 26(4): 332-344.
- [8] 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.
- [9] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, 39(1): 20-31.
- [10] Uluturhan E, Kontas A, Can E. Sediment concentrations of heavy metals in the Homa Lagoon (Eastern Aegean Sea): assessment of contamination and ecological risks [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(9): 1989-1997.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] 冯慕华,龙江平,喻龙,等. 辽东湾东部浅水区沉积物中重金属潜在生态评价[J]. 海洋科学, 2003, 27(3): 52-56.
Feng M H, Long J P, Yu L, et al. Ecological risk evaluation of heavy metals of marine sediment in Liaodong Bays shallow waters [J]. Marine Sciences, 2003, 27(3): 52-56.
- [13] Bastami K D, Bagheri H, Kheirabadi V, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea [J]. Marine Pollution

- Bulletin, 2014, **81**(1): 262-267.
- [14] Cheng W H, Yap C K. Potential human health risks from toxic metals via mangrove snail consumption and their ecological risk assessments in the habitat sediment from Peninsular Malaysia [J]. *Chemosphere*, 2015, **135**: 156-165.
- [15] Pan K, Wang W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 3-16.
- [16] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1324-1332.
- Wu B, Song J M, Li X G. Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe estuary [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1324-1332.
- [17] 刘淑民, 姚庆祯, 刘月良, 等. 黄河口湿地表层沉积物中重金属的分布特征及其影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(9): 1625-1631.
- Liu S M, Yao Q Z, Liu Y L, *et al.* Distribution and influence factors of heavy metals in surface sediments of the Yellow River estuary wetland [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(9): 1625-1631.
- [18] Li L, Wang X J, Zhu A M, *et al.* Assessing metal toxicity in sediments of Yellow River wetland and its surrounding coastal areas, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, **151**: 302-309.
- [19] 国家海洋局. 国务院关于印发全国海洋主体功能区规划的通知, 国发[2015]42号 [EB/OL]. http://www.soa.gov.cn/zw/gk/fwjgwyj/gwyfgwj/201508/t20150820_39597.html, 2015-08-20.
- [20] 李建伟. 渤海湾西南部海域海底沉积物分布特征研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. 15-27.
- Li J W. Research on distribution characteristics of bed sediments in Southwest of Bohai Bay [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. 15-27.
- [21] 张汉珍, 隋海洋, 曲玉环. 东营市近岸海域海洋环境状况分析 [J]. *海洋开发与管理*, 2013, **30**(3): 98-100.
- [22] GB 17378.5-2007, 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析 [S].
- GB 17378.5-2007, The specification for marine monitoring-Part 5: Sediment analysis [S].
- [23] HY/T 132-2010, 海洋沉积物与海洋生物体中重金属分析前处理 微波消解法 [S].
- HY/T 132-2010, Pretreatment guideline of heavy metals analysis in the marine sediments and organisms-microwave assisted acid digestion [S].
- [24] GB/T 12763.8-2007, 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查 [S].
- GB/T 12763.8-2007, Specifications for oceanographic survey-Part 8: marine geology and geophysics [S].
- [25] Pedersen F, Bjørnstad E, Andersen H V, *et al.* Characterization of sediments from Copenhagen Harbour by use of biotests [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(6-7): 233-240.
- [26] 暨卫东. 中国近海海洋环境质量现状与背景值研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 2011. 161-165.
- [27] GB 18668-2002, 海洋沉积物质量 [S].
- GB 18668-2002, Marine sediment quality [S].
- [28] Lin Y C, Meng F P, Du Y X, *et al.* Distribution, speciation, and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2016, **22**(5): 1253-1267.
- [29] El Nemr A, El-Said G F, Khaled A, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of some heavy metals in coastal surface sediments along the Red Sea, Egypt [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, **31**(2): 164-172.
- [30] Agah H, Saleh A, Bastami K D, *et al.* Ecological risk, source and preliminary assessment of metals in the surface sediments of Chabahar Bay, Oman Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **107**(1): 383-388.
- [31] 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.
- Fang M, Wu Y J, Liu H, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(2): 563-569.
- [32] 张亚南, 贺青, 陈金民, 等. 珠江口及其邻近海域重金属的河口过程和沉积物污染风险评价 [J]. *海洋学报*, 2013, **35**(2): 178-186.
- Zhang Y N, He Q, Chen J M, *et al.* Heavy metals' process in water and pollution risk assessment in surface sediments of the Zhujiang River estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, **35**(2): 178-186.
- [33] Liu J Q, Yin P, Chen B, *et al.* Distribution and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of the Luanhe River estuary, northwest of the Bohai Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **109**(1): 633-639.
- [34] Li C, Song C W, Yin Y Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of Shuangtaizi estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **98**(1-2): 358-364.
- [35] 王志峰, 王建春, 程凤莲, 等. 北部湾潮间带沉积物中重金属和多氯联苯的分布特征及生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2012, **31**(9): 1293-1302.
- Wang Z F, Wang J C, Cheng F L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals and polychlorinated biphenyls in the intertidal sediments along the Beibu Bay [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(9): 1293-1302.
- [36] Hedge L H, Knott N A, Johnston E L. Dredging related metal bioaccumulation in oysters [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58**(6): 832-840.
- [37] Guven D E, Akinici G. Effect of sediment size on bioleaching of heavy metals from contaminated sediments of Izmir Inner Bay [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(9): 1784-1794.
- [38] Horowitz A J, Elrick K A. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry [J]. *Applied Geochemistry*, 1987, **2**(4): 437-451.
- [39] 王俊耀, 苏海佳, 谭天伟. 制革厂铬鞣废水中铬的回收处理研究 [J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(1): 23-26.
- Wang J Y, Su H J, Tan T W, *et al.* Study on reuse and treatment of tannery chrome effluents [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(1): 23-26.

- [40] 钱进省. 制药工业含铬废水处理新工艺[J]. 化学世界, 1996, (7): 386-387.
- [41] 李军辉, 卢瑛, 张朝, 等. 广州石化工业区周边农业土壤重金属污染现状与潜在生态风险评价[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1242-1246.
Li J H, Lu Y, Zhang C, *et al.* The status quo and potential ecological risks' assesment of heavy metals in agricultural soils near a petrochemical complex in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1242-1246.
- [42] 王玉晶, 臧文超, 赵静, 等. 我国电石法生产聚氯乙烯行业汞排放清单[J]. 化工环保, 2016, 36(5): 572-576.
Wang Y J, Zang W C, Zhao J, *et al.* Mercury emission inventory of PVC production by calcium carbide process in China[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2016, 36(5): 572-576.
- [43] 周国平, 罗士平, 孙英. ISC 聚合物去除电镀废水中铬和镉离子[J]. 水处理技术, 2003, 29(3): 177-179.
Zhou G P, Luo S Y, Sun Y. Removal of chromium and cadmium ions from electroplating wastewater with carboxyl-containing starch graft polymer[J]. Technology of Water Treatment, 2003, 29(3): 177-179.
- [44] 吴二社, 张松林, 刘焕萍, 等. 农村畜禽养殖与土壤重金属污染[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 285-288.
Wu E S, Zhang S L, Liu H P, *et al.* Livestock and poultry breed aquatics in rural areas and soil heavy metal pollutions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 285-288.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016年10月12日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续15次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3451)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)