

# 黄河三角洲表层土壤重金属环境质量评价

缪雄谊<sup>1,2,3</sup>, 叶思源<sup>2,3</sup>, 郝玉培<sup>1</sup>, 阳莲锦<sup>4</sup>, 陈伟海<sup>1</sup>, 黄保健<sup>1</sup>, 沈利娜<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 国土资源部 广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质调查局 滨海湿地生物地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 4. 贵州地矿基础工程有限公司, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 主要针对黄河三角洲表层土壤及沉积物的重金属分布调查, 在 2006~2008 年间采集表层土壤样品 219 个(其中浅海湿地 25 个), 并运用受普遍认可的生态危害指数法、单因子及内梅罗污染指数法对黄河三角洲整体进行环境质量评价, 得出以下结论: (1)黄河三角洲表层土壤中重金属元素的污染指数从高到低为: Cr>Pb>Zn>As>Cu>Cd>Hg; (2)浅海湿地的近海表层沉积物中的重金属元素含量较上三角洲平原的表层土壤低, 前者最大影响来源于 As, 土壤样品一级标准率达到 96%; 后者的最大威胁是 As 和 Cd, 土壤样品一级标准率达到 88.5%; (3)黄河三角洲表层土壤及近海沉积物的  $E_r^I$  值、RI 值、单因子污染指数及综合污染指数均较小, 远未达到轻微污染的标准, 表明黄河三角洲土壤环境状况较好, 整体处于清洁水平。

**关键词:** 黄河三角洲; 表层土壤; 沉积物; 重金属

中图分类号: X8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)02-0065-12  
doi: 10.11759/hyqx20150316003

黄河三角洲是中国乃至世界暖温带唯一一块保存最完整, 最典型, 最年轻的湿地生态系统, 是具有国际意义的重要保护湿地, 黄河经三角洲入海, 来源于上游工业基地以及人口密集城市的各种污染物质被其携带入区内, 影响着黄河三角洲土壤质量的安全, 同时黄河三角洲又因其相当丰富的石油天然气储量, 成为全国的重要原油产区, 在石油开采到油气集输的一系列过程中, 处处存在着石油对脆弱生态系统的影响和土壤环境的污染。近几年, 黄河三角洲农业生产得到快速发展, 农用薄膜、化肥和农药的使用量也逐年增加, 由于人们环保意识薄弱, 致使农业土壤重金属污染的例子屡见不鲜。加上土壤重金属污染问题是人类的生活和健康最重要的威胁, 同时也造成生态环境恶化现象的罪魁祸首。在土壤重金属污染日益严重的背景下, 围绕着重金属展开的土壤环境调查显得及其重要, 土壤重金属环境调查对之后的土壤修复或治理的实施具有关键性意义。

此前学术界对黄河三角洲生态系统进行了地质、水文、生物地球化学以及生态多样性等多方面的基础调查研究<sup>[1-5]</sup>。对该区域的重金属调查也时有发生, 如李任伟等<sup>[6]</sup>、刘志杰等<sup>[7]</sup>、郭德英等<sup>[8]</sup>, 但研究较为局部, 仅对三角洲部分区域土壤重金属状况作出评价, 针对此区域的全区的环境地球化学特征

研究却是无人问津。在当今世界都注重生态安全, 努力追求可持续发展的形势下, 加强有关生态脆弱区的环境地球化学研究, 是对区域生态环境监测、管理和发展提供科学的依据, 对本区的可持续发展也有着重要的现实意义。本研究通过黄河三角洲获取的表层土壤样的分析测试, 对黄河三角洲表层土壤重金属进行环境质量评价, 深化对黄河三角洲生态环境状况的了解。

## 1 材料方法

实验分析样品均于 2006 年~2008 年取自黄河三角洲上三角洲平原上的表层土壤及近海表层沉积物(0~20 cm), 地理坐标介于 37°30'N~38°10'N, 118°19'E~119°27'E 的区域(图 1)。上三角洲平原采样时间为

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-04-23

基金项目: 国土资源部公益性行业基金(201111023); 国家自然科学基金(41240022)以及海洋地质保障工程项目(GZH201200503); 大地调项目(1212010611402)联合资助

[Foundation: Scientific research fund of Ministry of land and resources public welfare profession of China(201111023); The National Natural Science Fund(41240022) and Marine Geological support Engineering Project(GZH201200503); Geological survey project(1212010611402)]

作者简介: 缪雄谊(1988-), 男, 贵州贵阳人, 实习研究员, 从事环境地质研究, E-mail: 44224630@qq.com; 郝玉培, 通信作者, 主要从事水文地质、工程地质研究, E-mail: 936979627@qq.com.

2006年~2007年,共布设了194个采样站位,在各采样站位采集表层土壤样(0~20 cm)。本次调查在黄河三角洲浅海-6 m等深线以浅水域布设了25个采样

点,样品采集时间为2008年分布在北部黄河古道及东面黄河现行流路入海口等5条重要观测断面,采集0~20 cm的近海表层沉积物。

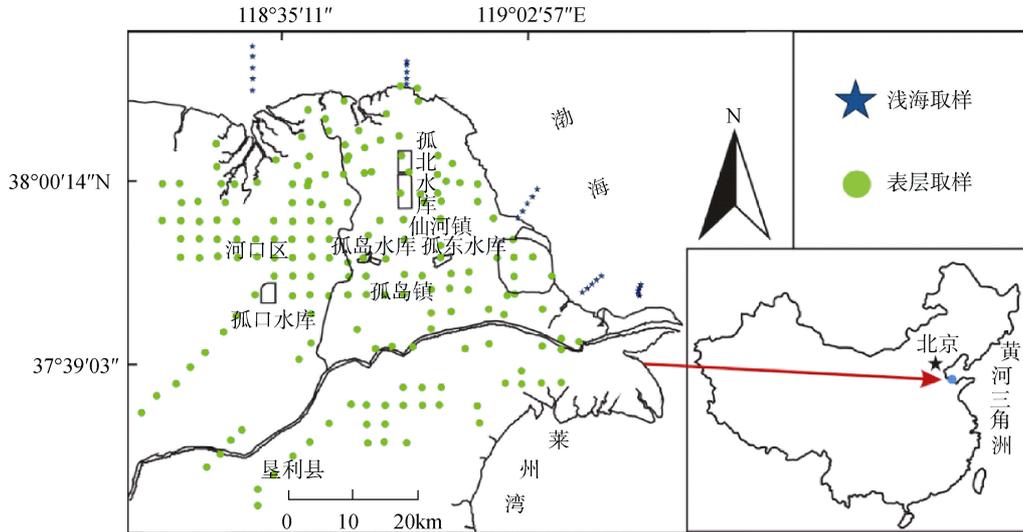


图1 黄河三角洲研究区域及表层样品取样点分布图

Fig. 1 Sample plots in the Yellow River Delta

### 1.1 样品分析测试及质量控制

沉积物样品使用冷冻干燥机干燥,待干燥后去杂物及石块,经玛瑙研钵研磨处理后过100目尼龙筛,贮存于塑料自封袋密封待用。重金属分析项目有: Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg、As,其中Cu用等离子发射光谱ICPOES(VARIAN VISTA-MPX)测定,Cd用等离子体质谱法(ICP-MS)测定,Cr、Pb、Zn用压片法-X射线荧光光谱(XRF)测定,Hg用AFS-230a型双道原子荧光光度计进行测定,As用氢化物-原子荧光光谱法(HG-FS)测定。沉积物重金属分析方法根据文献<sup>[9]</sup>进行。本实验表层样的元素测试工作中在化地地质矿山总局地质研究院完成。所测样品均设置两个平行样,分析时采用国标液控制工作曲线,测量分析的相对标准偏差控制在10%以内。实验所用试剂均为优级纯,实验用水为超纯水。

### 1.2 评价方法

在本研究中,拟选三种应用较广且被学者广泛认可的评价方法——单因子污染指数法、内梅罗(N. L. Nemerow)综合污染指数法、潜在生态危害指数法,联合对黄河三角洲表层土壤及沉积物进行重金属污染评价。

#### 1.2.1 潜在生态危害指数法

生态危害指数法(Potential Ecological Risk Index, RI)由瑞典科学家 Hakanson<sup>[9]</sup>提出,此方法是目前最为常用的评价重金属污染程度的方法之一,能够定量描述重金属在沉积物中潜在危害程度,根据这一方法,某一区域的沉积物中第*i*种重金属元素的潜在生态危害系数 $E_r^i$ 及沉积物中多种重金属元素的潜在生态危害指数 $RI$ 可分别表示为:

$$E_r^i = T_r^i \cdot c_f^i$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \cdot c_f^i = \sum T_r^i \cdot c_s^i / c_n^i$$

式中: $c_f^i$ 为重金属元素的污染指数( $c_f^i = c_s^i / c_n^i$ ); $c_s^i$ 为表层沉积物重金属元素*i*浓度的实测值; $c_n^i$ 为计算所需的参照值,参照值采用工业化以前沉积物中重金属元素的最高背景值(表1); $T_r^i$ 为重金属元素*i*的毒性系数,它主要反映重金属元素的毒性水平和生物对重金属元素污染的敏感程度,有关重金属元素的毒性参数见表1。

沉积物重金属元素生态危害程度的划分标准: $E_r^i < 40$  或  $RI < 150$  为生态轻微危害; $40 \leq E_r^i \leq 80$  或  $150 \leq RI < 300$  为生态危害中等; $80 \leq E_r^i \leq 160$  或  $300 \leq RI < 600$  为生态危害强; $160 \leq E_r^i \leq 320$  或  $> 600$  为生态危害很强; $E_r^i > 320$  为生态危害极强<sup>[11]</sup>。

#### 1.2.2 单因子污染指数法

采取指数法进行黄河三角洲表层土壤重金属污

表 1 重金属元素的浓度参照值( $c_n^i$ )和毒性系数( $T_r^i$ )<sup>[10]</sup>

Tab. 1 The global maximum background values ( $c_n^i$ ) and toxic factors ( $T_r^i$ ) of heavy metal elements<sup>[10]</sup>

金属元素	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
$C_n^i(\times 10^{-6})$	60.00	30.00	80.00	25.00	0.50	15.00	0.25
$T_r^i$	2.00	5.00	1.00	5.00	30.00	10.00	40.00

染评价的时候,以国标土壤环境质量一级标准(GB15618-1995)为参照标准<sup>[12]</sup>。其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为土壤中污染物的污染指数;  $C_i$  为污染物  $i$  浓度的实测值(mg/kg);  $S_i$  为污染物的评价标准(mg/kg),  $P_i \leq 1$  表示土壤未污染;  $1 < P_i \leq 2$  表示轻污染;  $2 < P_i \leq 3$  表示中污染;  $P_i > 3$  表示重污染,  $P_i$  值越大,则说明土壤污染越严重。

### 1.2.3 内梅罗(N. L. Nemerow)综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法进行评价是国内外较常用的土壤重金属污染评价方法<sup>[10, 13]</sup>。其计算公式为:

$$P_{int} = \sqrt{\frac{(P_{i\max}^2 + P_{iave}^2)}{2}} \quad (2)$$

式中:  $P_{int}$  为内梅罗综合污染指数;  $P_{i\max}$  为某样点单因子污染指数的最大值;  $P_{iave}$  为某样点单因子污染指数的平均值。

综合污染指数可以用来评价每一个测试点的样品重金属综合污染水平。综合评价分级标准见表 2。

表 2 土壤污染评价分级标准<sup>[13-17]</sup>

Tab. 2 The classification standards for the evaluation of soil pollution<sup>[13-17]</sup>

等级划分	$P$	污染等级	污染水平
	$P \leq 0.7$	安全	清洁
	$0.7 < P \leq 1$	警戒线	尚清洁
	$1 < P \leq 2$	轻污染	土壤轻污染, 作物已受污染
	$2 < P \leq 3$	中度污染	土壤、作物均受中度污染
	$P > 3$	重度污染	土壤、作物已严重受污染

## 2 重金属元素分布特征

### 2.1 黄河三角洲表层土壤重金属元素分布

为研究黄河三角洲表层土壤重金属元素分布(图 2), 将表层土壤重金属元素含量数据用 surfer 软件投影在黄河三角洲底图上, 同时也投影上重金属含量超过土壤环境质量一级标准的取样站位, 但这些取样站位表层土壤重金属含量均满足土壤环境质量二级标准。除 Hg 元素以外, 上三角洲平原中的其余各重金属元素的含量变化具有较一致的规律, 最高值

点的出现沿着入海河流依次分布, Hg 元素的最高值点出现在上三角洲平原东部离入海口较近的区域。浅海湿地在紧邻东部入海口的近海表层沉积物中, Hg 元素的含量出现 0.03 mg/kg 的最大值, 向北逐渐降低; Cr 元素含量出现最低值, 为 56.15 mg/kg, 而向北延伸逐渐增加, 在孤北水库的正北方向的近海表层沉积物中出现为 62.43 mg/kg 的最大值; 元素 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的最大含量出现点较 Hg 元素最大含量的出现点, 稍向北移, 往北延伸各元素含量逐渐降低, 在黄河三角洲北部的近海区域测得最小值。表明 Cr 元素较其他重金属元素具有较强的迁移能力, 能在富集在稍远的近海表层沉积物中, 而 Hg 元素较其他重金属元素具有较弱的迁移能力, 只能在离入海口较近的近海表层沉积物中富集, Cu、Zn、Pb、Cd、As 等元素的迁移能力处于中位位置, 容易富集在距入海口, 较 Hg 元素富集地稍远, 却较 Cr 元素富集地近的近海表层沉积物中。区内重金属元素中的 Cd 和 As 具有最多的超标点, 超标点为 24 个, 超标点所处的区域也近乎一致, 推测 Cd 和 As 来源一致, Cu 的超标点次之, 为 11 个, Cr、Zn 和 Pb 存在的超标点较少, 分别为 3 个、2 个和 1 个, Hg 没有超标点。从重金属分布来看, 在近入海口处, 各重金属元素都出现高浓度, 这与大量物质沉降使得重金属元素吸附率增高有关, 而重金属元素浓度的向海降低则与海水的稀释有关。

### 2.2 黄河三角洲表层土壤及近海表层沉积物中重金属含量

表 3 列出黄河三角洲表层土壤及近海表层沉积物 224 个表层样重金属元素的含量。由表 3 可见, 上三角洲平原表层土壤中 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、As、Hg 的含量变化范围分别为: 46.7~97.0、10.0~42.8、34.1~102.6、13.4~39.2、0.08~0.28、5.9~21.9、0.004~0.145 mg/kg, 浅海湿地近海表层沉积物中 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、As、Hg 的含量变化范围分别为: 45.9~75.8、8.2~33.2、30.5~84.56、13.8~24.7、0.07~0.19、5.1~15.3、0.003~0.062 mg/kg, 将黄河三角洲表层土壤及近海表层沉积物的重金属元素平均值与之前研究相比<sup>[19]</sup>, 重金属元素含量比较接近, 也表明这次

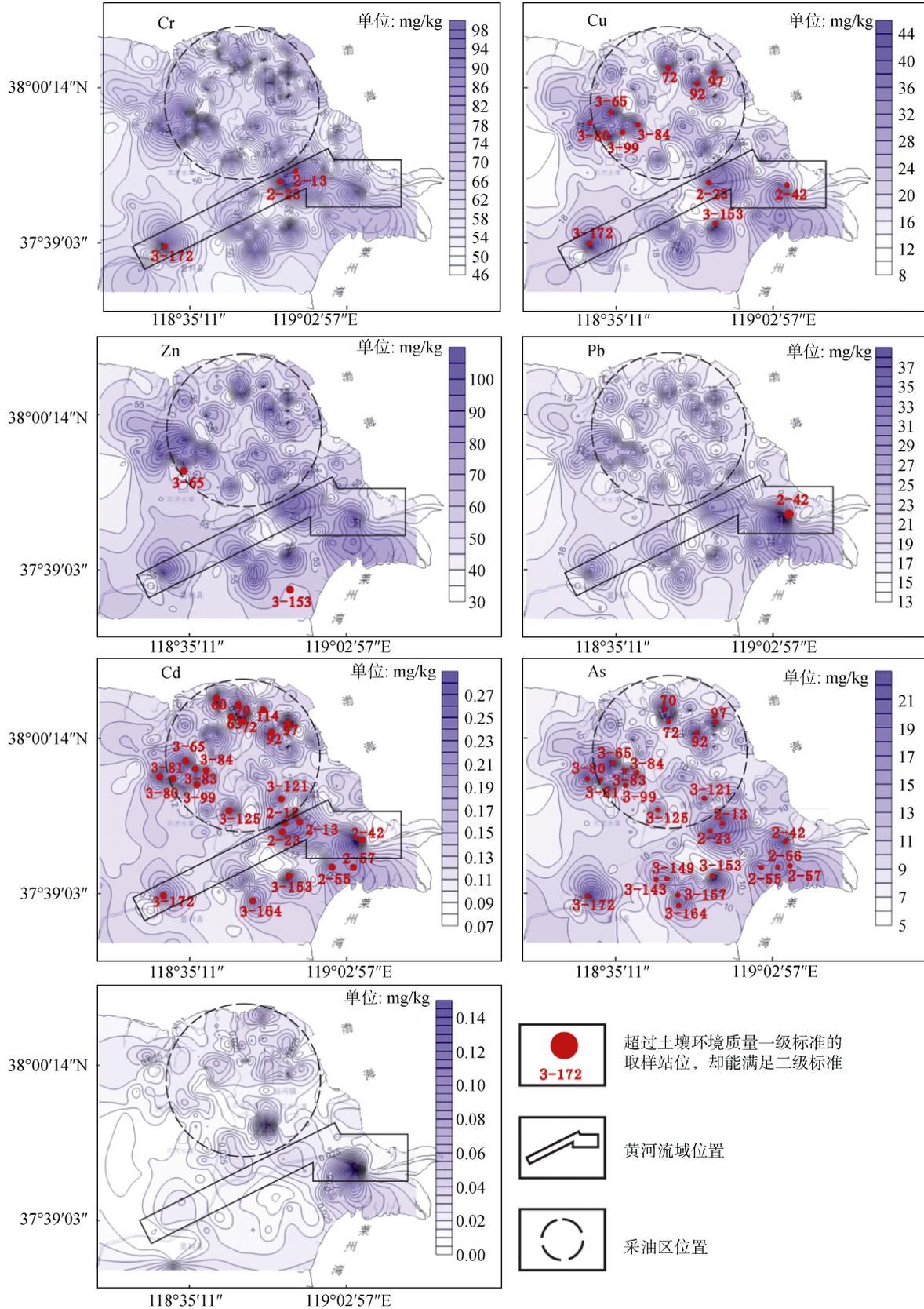


图 2 黄河三角洲表层土壤重金属元素分布据<sup>[18]</sup>

Fig. 2 The distribution of heavy metal elements in the Yellow River Delta<sup>[18]</sup>

表 3 黄河三角洲表层土壤及近海沉积物中重金属元素的含量(mg/kg)及其他地区

Tab. 3 The content of heavy metal elements in the Yellow River Delta and other region

地区	采样时间 (年份)	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
Ssjzav	2006~2007	63 (46.7~97)	19.9 (10~42.8)	58.3 (34.1~102.6)	19.4 (13.4~39.2)	0.14 (0.08~0.28)	10.5 (5.9~21.9)	0.022 (0.004~0.145)
Qhav	2007~2008	59.5 (45.9~75.8)	15.9 (8.2~33.2)	48.7 (30.5~84.6)	18.1 (13.8~24.7)	0.11 (0.07~0.19)	8.9 (5.1~15.3)	0.015 (0.003~0.062)
黄河口潮间带 <sup>[19]</sup>	2008	38.7	10.5	344.3	7.7	0.98	—	—
黄河口沉积物 <sup>[21]</sup>	2004~2005	20	18.6	32	13.3	0.13	9	0.045
莱州湾沉积物 <sup>[22]</sup>	2007	57.1	13.3	59.4	20.2	0.081	13.1	0.053
长江口潮滩 <sup>[23]</sup>	2001~2003	33.6	27.7	112	22.1	—	—	—
珠江口沉积物 <sup>[24]</sup>	2003~2005	81.1	38.6	100.7	44	0.2	22.9	0.17
英国梅德韦河口 潮间带 <sup>[25]</sup>	1998	76	42	138	67	—	14	—
美国哈德逊河口 沉积物 <sup>[26]</sup>	1994~1995	—	94	168	92	0.62	—	—
土壤环境质量 一级标准 <sup>[12]</sup>	1995	90	35	100	35	0.2	15	0.15
中国土壤环境 背景值 <sup>[20]</sup>	1991	61	22.6	74.2	26	—	—	—
北黄海 <sup>[27]</sup>	2007	—	11.6	52.7	25.2	0.22	13.3	0.07
东海 <sup>[28]</sup>	2008	146.2	13.01	68.72	22.21	—	—	0.116
南海 <sup>[29]</sup>	1998	57.9	34	108	24.1	0.25	6.58	0.061

注: Ssjzav<sup>[18]</sup>为上三角洲平原表层土壤平均; Qhav<sup>[18]</sup>为浅海湿地近海表层沉积物平均

研究的准确性;与国家土壤环境质量一级标准<sup>[12]</sup>比较,不论是上三角洲平原还是浅海湿地都能完全符合要求,但是在上三角洲仅有 28 个取样点,浅海湿地仅有 1 个取样点出现不同程度的重金属元素含量超标,此少数取样点虽未能满足国家土壤环境质量一级标准,但却完全能满足国家土壤环境质量二级标准,土壤环境质量一级标准率接近 87%,并且这些点主要分布在黄河三角洲东部和北部区域,沿入海河流分布,这与刘志杰等<sup>[19]</sup>在 2008 年黄河三角洲局部区域的采样分析研究一致;与中国土壤环境背景值<sup>[20]</sup>相比,上三角洲平原中 Cr、Cd、As 含量较高,Cu、Zn、Pb、Hg 含量都较低,浅海湿地中仅 Cd、As 含量较高,Cu、Zn、Pb、Hg、Cr 含量都较低;与 2004~2005 年间吴晓燕等<sup>[21]</sup>在黄河口的研究结果相比,上三角洲平原中 Cr、Cu、Pb、Zn、Cd、As 含量均高于黄河沉积物,仅 Hg 含量低于黄河沉积物,浅海湿地中 Cr、Zn、Pb 含量高于黄河沉积物,Cu、Cd、As、Hg 含量都低于黄河沉积物,表现出黄河三角洲表层土壤的重金属来源与自身的工农业发展及其相关,并非完全来源于上游黄河;与胡宁静等<sup>[22]</sup>的研

究结果相比,黄河三角洲表层土壤及沉积物与莱州湾沉积物中的重金属含量较为接近,其中 Cr、Cd 和 Cu 的含量整体稍高,As、Hg、Zn 和 Pb 含量稍低于莱州湾;与毕春娟<sup>[23]</sup>对长江口潮滩的研究结果相比,黄河三角洲整体仅 Cr 含量高于长江口潮滩,Cu、Pb、Zn 含量都低于长江口潮滩;与甘华阳等<sup>[24]</sup>的研究结果相比,黄河三角洲整体 Cu、Pb、Zn 含量都低于珠江口沉积物;对比英国梅德韦河口潮间带<sup>[25]</sup>和美国哈德逊河口沉积物<sup>[26]</sup>,黄河三角洲中的重金属元素含量均低于这两条河流;研究区与北黄海沉积物<sup>[27]</sup>较为接近,仅 Cu 的含量略高,其余重金属含量均略低于北黄海,这与此区的向海排污不无关系;与东海沉积物<sup>[28]</sup>相比,仅 Cu 较高,其余均低于东海沉积物;与南海沉积物<sup>[29]</sup>相比,研究区中的 Cr 和 As 含量略高,其余重金属远低于南海沉积物。

## 2.3 黄河三角洲表层土壤及沉积物的重金属主要来源分析

### 2.3.1 区域流系和水文动力对重金属的影响

黄河三角洲上最重要的河流属黄河,图 2 中框

出了研究区内的黄河流经区域,从利津县南宋乡流入区内,然后向东北继续流动,经垦利县进入渤海,在此区域中,重金属高值点和超标点多次出现,并具有沿岸分布特征,此特征并在不同重金属含量分布图上都有体现,这与黄河与携带的上游污染物的沿岸富集密切相关。黄河作为中国第二大长河,世界第五大长河,自青藏高原的发源地流出以后,横跨我国北方大部分地区,由于北方大部分工业区和人口密集区处于黄河流域范围,因此众多未被处理的工业污水和生活污水被直接排入黄河,如黄河兰州段,该区以石油、化工、电力、机械、冶金、煤炭等重工业为主体,炼油厂、化工厂和矿业公司遍布,用水量和排水量都十分巨大,生活污水的排放也由2001年的5381万吨,飞速增加到2005年的6505万吨,年均增长134.8万吨,在污水治理能力有限的情况下,大量污水直接排入黄河,根据多年的监测结果,由于黄河各支流的工业污水和生活污水的排放,造成河水中六价铬、石油类、高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮、总磷、粪大肠杆菌群浓度居高不下,直接影响黄河水质<sup>[30]</sup>。由于灌溉用水量的巨大和土壤肥料施用量的不断增加,加之不科学的灌溉方式和肥料利用率低下,导致黄河干流河水的各主要离子和总离子浓度近40年来不断上升,污染物浓度也呈明显升高趋势<sup>[31]</sup>。

黄河三角洲重金属的分布也受到水动力状况的影响,由于黄河三角洲位处滨海,受到水流的冲刷以及海水的侵蚀的持续作用,其沉积环境受影响而持续发生着变化,沉积环境的变化能够促使某些形态的重金属从颗粒态转变为溶解态而释放出来,从重金属分布来看,在近入海口处,河水与海水作用强烈,大量物质沉降使得重金属元素吸附率增高,各重金属元素高值点得以出现,而重金属元素浓度的向海降低则与海水作用增强,重金属的稀释有关。

### 2.3.2 人类活动对重金属的影响

人类活动的影响,即是区内工业、农业和生活污水带来的影响,黄河三角洲蕴含着丰富的石油天然气资源,是胜利油田作业的主要范围,胜利油田已探明石油地质储量约为 $30 \times 10^8 \text{t}$ ,天然气储量为 $2300 \times 10^8 \text{m}^3$ ,另有伴生气资源近 $10 \times 10^6 \text{m}^3$ <sup>[32]</sup>。油气开采,易造成笨类、烃类及重金属等环境污染,所处该区胜利油田的油气开采是我们石油工业的重要支柱,也是该区生态环境最主要的潜在威胁。

胜利油田在1984年到1999年的15年期间,

油田集中区面积从 $245.71 \text{ km}^2$ 增加到 $799.69 \text{ km}^2$ ,年平均增长率为8.18%,不仅油田集中区的面积为增长,油井的密度也有很大的增加,从油田开发初期的低油井密度到后来的高油井密度区。1984年以前的老油田主要集中在黄河以南的垦利县、东营区以及黄河北岸河口区境内。1984年以来,新增的油田开发区主要集中在黄河以北的黄河三角洲东北的渤海沿岸,形成非常密集的油田建成区<sup>[33]</sup>,图2中虚线圈出的正是该区域,从图中可以发现,黄河以北的重金属高值点和超标点与密集的油田建成区重合,表明重金属含量分布与区域油气开采密不可分,而Cr、Pb、Hg和Zn在该区无超标点或超标点极少的事实,表明黄河三角洲上受石油开采的影响较大重金属元素主要是Cu、Cd和As。

近年来,由于不合理的农业活动的进行,如污水灌溉、污泥利用、化肥、有机肥、农药和杀虫剂的滥用,对土壤和生态环境造成威胁的例子比比皆是,而城市人口急剧增加同样导致了生活污水的成倍暴增,在污水处理能力限制的背景下,含有各种污染物的污水未经处理便直接排放,此类活动也逐渐成为Hg、Cr、Cd、As、Cu和Zn等多种重金属污染的重要来源<sup>[34-36]</sup>,研究区东南部重金属高值点和超标点出现在离城市生活区较近的位置,此位置并不是传统的油田建成区,也离黄河有一定距离,其潜在主要来源为农业活动和生活污水的联合影响。

### 2.3.3 有机质对重金属富集的影响

黄河三角洲是典型的滨海湿地,具有生物化学作用强烈的特征,因此表层土壤中有机质含量较高,普遍大于1%<sup>[1]</sup>,有机碳是重金属元素主要的迁移载体<sup>[28]</sup>,重金属元素易于在有机质中富集,是因为有机质与重金属元素之间存在着络合、螯合作用,在此类作用下有机碳将重金属元素吸附其上,于是重金属元素随着有机碳进行迁移转化,所以有机碳含量的高低能够对重金属元素的含量产生直接影响<sup>[37]</sup>。由于有机碳与有机质之间具有较好的正相关关系,因此有机碳的变化能够较好的对有机质的变化作出反映。

此外重金属富集也受沉积物的粒度组成和季节变化的影响,粒度组成的不同使得沉积物的矿物组成、表面物理化学性质、比表面积和表面自由能出现差异<sup>[38]</sup>,Forstner等<sup>[37]</sup>指出:重金属元素含量随着沉积物颗粒由粗到细的变化,而逐渐增加。通常解释为越细的沉积物颗粒就越具有较大接触表面积,因

此吸附的重金属元素含量也就越高;碎屑矿物在具有较粗粒度的沉积物中含量较高,由于碎屑矿物本身富含重金属元素的缘故,因此当粒径增加到 63 μm 以上时,重金属元素含量又具有增高的趋势。一般认为<sup>[38]</sup>,沉积物中的细粒部分(主要为黏土部分,细粉砂部分其次),表面积和吸附交换能力均较高,因此重金属元素喜欢赋存在此部分上,而粗粉砂中重金属元素含量则相对较少。黄河三角洲表层土壤及近海沉积物继承于黄河沉积物,黄河沉积物多为粉砂质,而重金属元素易富集在黏土部分,因而研究区良好的环境状况与此不无关系。由于黄河携带物质的成分和粒径受季节性的气候更替能够形成周期性变化,进而引起重金属元素含量的变化,季节性演替也引起生物活动的改变,黄河三角洲内由于水源充足和生态环境较好,所以植被覆盖丰富、动物种类繁多、微生物活动也较为频繁,这些生物对于重金属元素的富集运移扮演者非常重要的角色。植物生长的周期性变化能够引起沉积物含量的季节性循环,重金属元素较低的含量出现在植物生长期内<sup>[39]</sup>,重金属元素的分布还能够受不同种类的覆盖植物影响。

### 3 黄河三角洲重金属元素环境污染评价

#### 3.1 黄河三角洲重金属元素的污染指数分析

经计算,上三角洲平原表层土壤的重金属元素整体较浅海湿地近海表层沉积物高,其中的 Zn 含量较浅海湿地中高约 20%,Cu、Cd 含量较浅海湿地中高约 25%,也反映出重金属元素受海水清扫作用的客观事实。通过重金属元素含量实测值与全球最高背景值对比,得到污染指数见表 4。从表中可以看出黄河三角洲表层土壤及沉积物中污染程度最大的是 Cr,在上三角洲平原中的平均污染指数为 1.05,而在浅海湿地中的平均污染指数也达到 0.99,其次依次为 Pb、Zn、As、Cu、Cd 和 Hg,在上三角洲平原中的平均污染指数分别为 0.78、0.73、0.7、0.66、0.27 和 0.09,而在浅海湿地中的平均污染指数分别为 0.72、0.61、0.59、0.53、0.22 和 0.06。因此黄河三角洲中重金属元素的污染指数为: Cr>Pb>Zn>As>Cu>Cd>Hg,而浅海湿地中近海表层沉积物中的重金属元素含量都较上三角洲平原表层土壤中重金属元素的含量低。

表 4 黄河三角洲表层土壤及近海沉积物中重金属元素的含量(mg/kg)及其污染指数<sup>[18]</sup>

Tab. 4 The content ( $\times 10^{-6}$ ) and accumulation ratios of heavy metal elements in surface soil and sediment<sup>[18]</sup>

地区		Cr		Cu		Zn		Pb		Cd		As		Hg	
		含量	污染指数	含量	污染指数	含量	污染指数	含量	污染指数	含量	污染指数	含量	污染指数	含量	污染指数
上三角洲平原	最大值	96.97	1.62	42.76	1.43	102.63	1.28	39.15	1.57	0.28	0.55	21.89	1.46	0.14	0.58
	最小值	46.73	0.78	10.01	0.33	34.07	0.43	13.44	0.54	0.08	0.16	5.90	0.39	0.00	0.01
	平均值	63.00	1.05	19.93	0.66	58.29	0.73	19.39	0.78	0.14	0.27	10.47	0.70	0.02	0.09
	标准偏差	10.15	0.17	7.01	0.23	15.92	0.20	3.92	0.16	0.04	0.08	3.48	0.23	0.02	0.07
	变异系数	0.16	0.16	0.35	0.35	0.27	0.27	0.20	0.20	0.30	0.30	0.33	0.33	0.74	0.74
浅海湿地	最大值	75.77	1.26	33.18	1.11	84.59	1.06	24.72	0.99	0.19	0.38	15.31	1.02	0.06	0.25
	最小值	45.89	0.76	8.17	0.27	30.52	0.38	13.83	0.55	0.07	0.14	5.11	0.34	0.00	0.01
	平均值	59.49	0.99	15.93	0.53	48.75	0.61	18.09	0.72	0.11	0.22	8.91	0.59	0.01	0.06
	标准偏差	8.09	0.13	7.32	0.24	16.49	0.21	3.03	0.12	0.03	0.06	2.81	0.19	0.01	0.05
	变异系数	0.14	0.14	0.46	0.46	0.34	0.34	0.17	0.17	0.29	0.29	0.32	0.32	0.90	0.90

注: 污染指数为实测的重金属含量与全球最高背景值的比值, 全球最高背景值见表 1 中重金属的参照值

#### 3.2 潜在生态危害评价

为将土壤中重金属含量与重金属的生态效应、环境效应和毒理学联系起来,并消除重金属区域背景值差异对重金属污染评价的影响,划分真实可靠的重金属潜在危害的程度,因而选用潜在生态危害指数法进行重金属污染评价,评价结果见表 5。按工

业化以前沉积物中重金属元素最高背景值为参照值的计算结果列于表 1 中。从表 5 可知上三角洲平原中重金属元素的潜在污染程度为 Cd>As>Pb>Hg>Cu>Cr>Zn, 浅海湿地中重金属的潜在污染程度为 Cd>As>Pb>Cu>Hg>Cr>Zn, 在浅海湿地中 RI 值和  $E_r^i$  值都比上三角洲平原中的 RI 值和  $E_r^i$  值低,表明海水

对近海沉积物中的重金属有一定的清扫作用。整个黄河三角洲平原的  $RI$  值没有大于 80 的, 在上三角洲平原中  $RI$  值为 16.93~70.68, 平均为 28.75, 在浅海湿地中  $RI$  值为 16.67~37.22, 平均为 23.66, 上三角洲平原的  $RI$  值高于浅海湿地中的  $RI$  值; 整个三角洲的  $E_r^i$  值没有大于 30 的, 均值更是没有大于 10 的; 无论是上三角洲平原, 还是浅海湿地的  $E_r^i$  值都低于 40,  $RI$  值也远低于 150 的轻微生态危害程度, 表明黄河三角洲生态环境良好, 整体处于清洁水平。

### 3.3 单因子及综合因子污染评价

为更全面有效地了解研究区重金属污染状况, 特在潜在生态危害评价基础上引入单因子及综合因子污染评价。由于土壤环境质量标准 GB15618-1995 是根据全国样点资料制定的<sup>[12]</sup>, 将其作为评价标准, 不仅能降低区域土壤环境背景值的差异, 也将更客观真实地反映研究区内重金属污染状况。

鉴于国家土壤环境质量一级标准包含于研究区各重金属含量区间内, 遂选取国家土壤环境质量一级标准作为  $Si$  评价参照标准<sup>[12]</sup>, 对研究区重金属污染情况运用单因子指数及综合因子指数进行评价, 评价结果如表 6、表 7 所示。计算研究区土壤样品中不同重金属单因子指数值变异系数规律与重金属含量规律基本相同, 在上三角洲平原 209 个取样点的表层土壤样品中, 各重金属含量达到国家土壤环境质量一级标准的频率分别为 Cr 98.56%、Cu 94.74%、Zn 99.04%、Pb 99.52%、Cd 88.52%、As 88.52%、Hg 100%; 综合污染指数最小值为 0.45, 最大值达 1.24, 仅略低于一级标准, 平均为 0.63, 变异系数达 27.67%, 表明上三角洲平原各取样点间重金属综合污染指数值平均差异程度较大。

从以上结果(表 6)可以看出, 上三角洲平原各重金属元素的污染指数均值均小于等于 0.7, 最低平均污染指数出现在 Hg 中, 仅为 0.11, 而综合污染指数

表 5 黄河三角洲表层土壤及近海沉积物中重金属元素的潜在生态危害系数( $E_r^i$ )和危害指数( $RI$ )  
Tab. 5 The potential ecological risk factors ( $E_r^i$ ) and risk indices ( $RI$ ) of heavy metal elements in the Yellow River Delta

地区		$E_r^i$							$RI$
		Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg	
上三角洲平原	最大值	3.23	7.13	1.28	7.83	16.62	14.59	23.15	70.68
	最小值	1.56	1.67	0.43	2.69	4.70	3.93	0.56	16.93
	平均值	2.10	3.32	0.73	3.88	8.20	6.98	3.54	28.75
	标准偏差	0.34	1.17	0.20	0.78	2.49	2.32	2.62	8.51
	变异系数	0.16	0.35	0.27	0.20	0.30	0.33	0.74	0.30
浅海湿地	最大值	2.53	5.53	1.06	4.94	11.30	10.20	9.86	37.22
	最小值	1.53	1.36	0.38	2.77	4.28	3.41	0.49	16.67
	平均值	1.98	2.65	0.61	3.62	6.53	5.94	2.32	23.66
	标准偏差	0.27	1.22	0.21	0.61	1.87	1.87	2.10	7.09
	变异系数	0.14	0.46	0.34	0.17	0.29	0.32	0.90	0.30

表 6 上三角洲平原表层土壤重金属污染指数统计分析  
Tab. 6 The descriptive statistics of the heavy metal pollution index in the upper delta plain

项目	样本数	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数 (%)	$P_i \leq 1$		$P_i > 1$	
							样本数	频率	样本数	频率
$P_{Cr}$	194	1.08	0.52	0.70	0.11	16.11	206	98.56	3	1.44
$P_{Cu}$	194	1.22	0.29	0.57	0.20	35.19	198	94.74	11	5.26
$P_{Zn}$	194	1.03	0.34	0.58	0.16	27.32	207	99.04	2	0.96
$P_{Pb}$	194	1.12	0.38	0.55	0.11	20.24	208	99.52	1	0.48
$P_{Cd}$	194	1.39	0.39	0.68	0.21	30.34	185	88.52	24	11.48
$P_{As}$	194	1.46	0.39	0.70	0.23	33.21	185	88.52	24	11.48
$P_{Hg}$	194	0.72	0.02	0.11	0.08	74.10	209	100.00	0	0.00
$P_{int}$	194	1.24	0.45	0.63	0.18	27.67	193	92.34	16	7.66

表 7 浅海湿地表层沉积物重金属污染指数统计分析

Tab. 7 The descriptive statistics of the heavy metal pollution index in the shallow sea

项目	样本数	最大值	最小值	平均值	标准 偏差	变异系数 (%)	$P_i \leq 1$		$P_i > 1$	
							样本数	频率	样本数	频率
$P_{Cr}$	25	0.84	0.51	0.66	0.09	13.60	25	100.00	0.00	0.00
$P_{Cu}$	25	0.95	0.23	0.46	0.21	45.99	25	100.00	0.00	0.00
$P_{Zn}$	25	0.85	0.31	0.49	0.16	33.82	25	100.00	0.00	0.00
$P_{Pb}$	25	0.71	0.40	0.52	0.09	16.73	25	100.00	0.00	0.00
$P_{Cd}$	25	0.94	0.36	0.54	0.16	28.62	25	100.00	0.00	0.00
$P_{As}$	25	1.02	0.34	0.59	0.19	31.51	24	96.00	1.00	4.00
$P_{Hg}$	25	0.31	0.02	0.07	0.07	90.22	25	100.00	0.00	0.00
$P_{int}$	25	0.90	0.46	0.60	0.12	20.27	25	100.00	0.00	0.00

也只达到了 0.63, 远低于土壤轻微污染的临界值 1, 再次说明了上三角洲表层土壤未受污染的良好状况, 受威胁程度较高的重金属为 As、Cd, 在所有取样点中造成约 11.5% 的表层土壤未达到一级标准, 但其含量超过一级标准不多, 应与局部地区的工农业活动有关, 而其余各重金属的威胁较小, 土壤达到一级标准的比例接近甚至高于 95%, 未达标的最高含量也与一级标准接近, 特别是 Hg, 达标率为 100%, 表明区内完全不受此元素的影响。

在浅海湿地 25 个取样点的近海表层沉积物中, As 含量达到国家土壤环境质量一级标准的频率为 96%, 而其余各重金属含量达到国家土壤环境质量一级标准的频率均为 100%, 综合污染指数最小值为 0.46, 最大值为 0.9, 平均值为 0.6, 变异系数为 20.27%, 远低于上三角洲平原, 说明潜在的综合污染指数平均差异程度较小。

从以上结果(表 7)可以看出浅海湿地各重金属元素的污染指数均值均低于 0.7, 最低的平均污染指数也出现在 Hg, 仅为 0.07, 而综合污染指数只达到了 0.6, 较上三角洲平原中更低, 表明表层沉积物的环境状况更加良好, 整个浅海湿地中有且仅有一个未达到一级标准的点, 未达标的也只是 As 元素, 其污染指数近似于 1, 其余均满足土壤一级标准。

从整体上看, 黄河三角洲表层土壤及近海沉积物中个重金属单因子污染指数、综合污染指数都小于 1, 均未达到轻微污染的标准, 浅海湿地中各重金属单因子污染指数、综合污染指数更较上三角洲平原中低, 并且达到一级标准的比例也大大高于上三角洲平原, 反映出更加良好的表层沉积物环境状况。

## 4 结论

(1) 黄河三角洲表层土壤及沉积物中重金属含量高于黄河口及其附近区域的沉积物, 而与国内其他河口沉积物比较, 重元素含量低于国内河口沉积物, 同时也低于发达国家城市化地区的污染水平, 满足国家土壤环境质量的一级标准。

(2) 黄河三角洲表层土壤中重金属元素的相对污染指数为:  $Cr > Pb > Zn > As > Cu > Cd > Hg$ , 浅海湿地中近海表层沉积物中的重金属元素含量都较上三角洲平原表层土壤中重金属元素的含量低。

(3) 上三角洲平原中重金属元素的潜在污染程度为  $Cd > As > Pb > Hg > Cu > Cr > Zn$ , 浅海湿地中重金属的潜在污染程度为  $Cd > As > Pb > Cu > Hg > Cr > Zn$ , 浅海湿地中  $RI$  值和  $E_r^i$  值都比上三角洲平原中的  $RI$  值和  $E_r^i$  值低, 表明海水对近海沉积物中的重金属有一定的清扫作用。黄河三角洲的  $E_r^i$  值都低于 40,  $RI$  值也远低于 150 的轻微生态危害程度, 表明生态环境良好, 整体处于清洁水平。

(4) 黄河三角洲表层土壤及近海沉积物中个重金属单因子污染指数、综合污染指数都小于 1, 均未达到轻微污染的标准, 浅海湿地中各重金属单因子污染指数、综合污染指数更较上三角洲平原中低, 并且达到一级标准的比例也大大高于上三角洲平原, 反映出更加良好的表层沉积物环境状况。

(5) 单因子污染指数分析的结果是上三角洲表层土壤中受威胁程度较高的重金属为 As、Cd, 此两元素造成约 11.5% 的表层土壤未达到一级标准, 但其含量超过不多, 应与局部地区的工农业活动有关, 浅海湿地近海表层沉积物中仅 As 出现未达到一级标

准的情况,但达标率却高达96%。

(6) 从整体上看,黄河三角洲表层土壤及近海沉积物中个重金属单因子污染指数、综合污染指数都小于1,均未达到轻微污染的标准,浅海湿地中各重金属单因子污染指数、综合污染指数更较上三角洲平原中低,并且达到一级标准的比例也大大高于上三角洲平原,反映出更加良好的表层沉积物环境状况。

#### 参考文献:

- [1] 缪雄谊,叶思源,丁喜桂,等. 黄河三角洲不同类型湿地稀土元素配分模式[J]. 中国地质, 2014, (1): 303-313.  
Miao Xiongyi, Ye Siyuan, Ding Xigui, et al. REE distribution characteristics of different kinds of wetlands in Yellow River delta[J]. Geology in China, 2014, (1): 303-313.
- [2] 丁喜桂,叶思源,赵广明,等. 黄河三角洲滨海湿地演化及其对碳与营养成分的扣留[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 94-102.  
Ding Xigui, Ye Siyuan, Zhao Guangming, et al. Accumulation of carbon and nutrients in coastal wetland in the yellow river delta[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2014, 45(1): 94-102
- [3] 叶思源, Jame S G, 高茂生, 等. 黄河三角洲滨海湿地健康条件评价概念模型[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 545-551.  
Ye Siyuan, Jame S G, Gao maosheng, et al. A Conceptual model for the assessment of coastal wetlands health in the yellow river delta[J]. Geological Review, 2009, 55(4): 545-551.
- [4] 高茂生,叶思源,张国臣. 现代黄河三角洲滨海湿地生态水文环境脆弱性[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5), 111-115.  
Gao maosheng, Ye siyuan, Zhang guochen. Vulnerability of ecological environment in the modern Yellow River delta wetland[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 111-115.
- [5] 薛春汀,叶思源,高茂生,等. 现代黄河三角洲沉积物沉积年代的确定[J]. 海洋学报, 2009, (1): 117-124.  
Xue Chunting, Ye Siyuan, Gao Maosheng, et al. Determination of depositional age in the Huanghe Delta in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, (1): 117-124.
- [6] 李任伟,李禾,李原,等. 黄河三角洲沉积物重金属、氮和磷污染研究[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 622-629.  
Li Renwei, Li He, Li Yuan, et al. Study of the heavy metals, nitrogen and phosphorus contaminants in the sediments of the yellow river delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 622-629.
- [7] 刘志杰,李培英,张晓龙,等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1182-1188.  
Liu Zhijie, Li Peiying, Zhang Xiaolong, et al. Regional distribution and ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments from coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. Environmental science, 2012, 33(4): 1182-1188.
- [8] 郭德英. 黄河三角洲重金属分布状况及分析评价[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2007, 17(1): 88-89.  
Guo Deying. Analysis on heavy metals distribution in the yellow river delta[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2007, 17(1): 88-89.
- [9] 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第三版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 446-457.  
National environmental protection burea. water and exhausted water monitoring analysis method(3rd edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997. 446-457.
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [11] 缪雄谊. 黄河三角洲滨海湿地表层土壤矿物与地球化学特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
Miao Xiongyi. The geochemical and mineral research of surface soil of coastal wetland in Yellow River delta[D]. Qingdao: Ocean university of China, 2014.
- [12] 国家环保总局. 土壤环境质量标准(GB15618-1995)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.  
State Environmental Protection Administration. Environmental Quality Standard for Soils (GB 15618-1995)[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [13] 贾振邦,梁涛,林健枝,等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 33(4): 485-492.  
Jia Zhenbang, Liang Tao, Lin Jianzhi, et al. Study on Heavy Metal Contamination and Potential Ecological Risk in Hong Kong Rivers[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(4): 485-492.
- [14] 金艳,何德文,柴立元,等. 重金属污染评价研究进展[J]. 有色金属工程, 2007, 59(2): 100-104.  
Jin Yan, He Dewen, Chai Liyuan, et al. Review on Pollution Assessment of Heavy Metals[J]. Nonferrous Metals, 2007, 59(2): 100-104.
- [15] 王春光,张思冲,辛蕊,等. 哈尔滨市东郊菜地土壤重金属环境质量评价[J]. 中国农学通报, 2010, (2): 262-266.  
Wang Chunguang, Zhang Sichong, Xin Rui, et al. Heavy metal environmental assessment of soil in east suburb of harbin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010.
- [16] 李海华,张杰,申灿杰,等. 郑州市近郊土壤和蔬菜中重金属污染状况调查与评价[J]. 河南农业科学, 2007, (1): 90-92.

- Li Haihua, Zhang Jie, Shen Canjie, et al. Survey and evaluation of heavy metal contamination of soils and vegetables in the suburbs of Zhengzhou[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2007, (1): 90-92.
- [17] 黄华瑞, 庞学忠. 渤海西南部潮间带沉积物中的重金属[J]. 海洋科学, 1992 (5): 44-47.
- Huang Huarui, Pang Xuezhong. Heavy metals in sediments of tidal zone from South-West Bohai Sea [J]. Marine Sciences, 1992 (5): 44-47.
- [18] 缪雄谊, 郝玉培, 阳莲锦, 等. 黄河三角洲表层土壤重金属元素的空间分布及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, (1): 57-68.
- Miao Xiongyi, Hao Yupei, Yang Lianjin, et al. Surface soil of the spatial distribution and influences of heavy metal element in Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016(1): 57-68.
- [19] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1182-1188.
- Liu Zhijie, Li Peiying, Zhang Xiaolong, et al. Regional distribution and ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments from coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. Environmental science, 2012, 33(4): 1182-1188.
- [20] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.
- Wei Fusheng, Chen Jingsheng, Wu Yanyu, et al. The research of environmental background value of soil in China[J]. Environmental science, 1991, 12(4): 12-19.
- [21] 吴晓燕, 刘汝海, 秦洁, 等. 黄河口沉积物重金属含量变化特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007, S1, 69-74.
- Wu Xiaoyan, Liu Ruhai, Qin Jie, et al. Study on the variance character of heavy metals contents in sediments in yellow river estuary[J]. Transactions of Oceanology & Limnology, 2007, S1, 69-74.
- [22] 胡宁静, 石学法, 刘季花, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 63-72.
- Hu Ningjing, Shi Xuefa, Liu Jihua, et al. Distributions and Impacts of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(1): 63-72.
- [23] 毕春娟. 长江口滨岸潮滩重金属环境生物地球化学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- Bi Chunjuan. Environmental Biogeochemistry of Heavy Metals in Intertidal Flat of the Yangtze Estuary[D]. East China Normal University Doctoral Thesis, Shanghai: East China Normal University, 2004.
- [24] 甘华阳, 梁开, 郑志昌. 珠江口沉积物的重金属背景值及污染评价分区[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 344-350.
- Gan Huayang, Liang Kai, Zheng Zhichang. Background Values, Contamination Assessment and Zoning of Heavy Metals in Sediments of the Pearl River Estuary[J]. Earth & Environment, 2010, 38(3): 344-350.
- [25] Spencer K L. Spatial variability of metals in the inter-tidal sediments of the Medway Estuary, Kent, UK[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(9): 933-944.
- [26] Feng H, Kirk Cochran J, J Hirschberg D. Transport and sources of metal contaminants over the course of tidal cycle in the turbidity maximum zone of the Hudson River estuary[J]. Water Research, 2002, 36(3): 733-743.
- [27] 杜俊涛, 陈洪涛, 田琳. 北黄海表层沉积物中重金属含量及其污染评价[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010.
- Du Juntao, Chen Hongtao, Tian Lin. Heavy Metals in the Surface Sediments of the North Yellow Sea and Its Ecological Risk[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, (S1): 167-172.
- [28] 赵宝刚, 邵秘华, 鲍永恩, 等. 东海表层沉积物中重金属集散特征及变化规律[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(3): 13-16.
- Zhao Baogang, Shao Mihua, Bao Yongen, et al. The features of concentration and dispersion of the heavy metals and their changing patterns in surface sediment of East China Sea[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(3): 13-16.
- [29] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. 海洋学报(中文版), 2005, 27(4): 161-166.
- Zhang Yuan hui, Du Jun min. Background values of pollutants in sediments of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4): 161-166.
- [30] 冯书涛, 马和梅, 俞发荣. 黄河兰州段水污染现状分析[J]. 人民黄河, 2005, 27(6): 28-29.
- Feng Shutao, Ma Hemei, Yu Farong. Analysis of water pollution sediment of Yellow River in Lanzhou[J]. Yellow River, 2005, 27(6): 28-29.
- [31] 于涛, 陈静生. 农业发展对黄河水质和氮污染的影响——以宁夏灌区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18: 1-7.
- Yu Tao, Chen Jingsheng. Impacts of the agricultural development on the water quality and nitrogen pollution of the yellow river- case of ningxia irrigation area[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004, 18: 1-7.
- [32] 胡琳. 黄河三角洲油气资源开发对生态的影响及相关科技问题[J]. 中国科技纵横, 2013, (1): 12-13.
- Hu Lin. The ecological effect and related problems of science and technology of oil and gas resources development of the Yellow River delta[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2013, (1): 12-13.
- [33] 汪小钦, 王钦敏, 刘高焕, 等. 黄河三角洲油田集中区土地利用演化的遥感分析[J]. 地球信息科学, 2002, 4(4): 75-79.
- Wang Xiaoqin, Wang Qinmin, Liu Gaohuan, et al. Remote sensing analysis of land use change in oil fields of the Yellow River Delta[J]. Geo-information Science, 2002, 4(4): 75-79.

- [34] 刘昌岭, 张经. 颗粒态重金属通过河流与大气向海洋输送[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(4): 68-76.  
Liu Changling, Zhang Jing. Transport of the particulate heavy metals towards the ocean via riverine and atmospheric pathway[J]. Marine environmental science, 1996, 15(4): 68-76.
- [35] 董悦, 刘晓群, 李翠兰, 等. 土壤重金属污染研究进展[J]. 现代农业科技, 2009, (4): 143-145.  
Dong Yue, Liu Xiaoqun, Li Cuilan, et al. The Research progress of soil heavy metal pollution[J]. Modern agricultural science and technology, 2009, (4): 143-145.
- [36] 奥贝尔 H, 潘塔 M. 土壤中的微量元素[M]. 北京: 科学出版社. 1982.  
Obel H, Panta M. Trace elements in the Soil[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [37] Förstner U, Wittmann G T W, Prosi F, et al. Metal pollution in the aquatic environment[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
- [38] 丘耀文, 朱良生, 黎满球, 等. 海陵湾沉积物重金属与粒度分布特征[J]. 海洋通报, 2004, 23(6), 49-53.  
Qiu Yaowen, Zhu Liangsheng, Li Manqiu, et al. Distribution characteristics of heavy metals and grain size of sediments from hailing bay[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(6), 49-53.
- [39] 王永红, 张经, 沈焕庭. 潮滩沉积物重金属累积特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 69-77.  
Wang Yonghong, Zhang Jing, Shen Huanting. Review of accumulation features study of heavy metal in sediment of tidal flat[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(1): 69-77.

## Assessment of heavy metal Contamination in the surface soil of the Yellow River Delta, China

MIAO Xiong-yi<sup>1, 2, 3</sup>, YE Si-yuan<sup>2, 3</sup>, HAO Yu-pei<sup>1</sup>, YANG Lian-jin<sup>4</sup>, CHEN Wei-hai<sup>1</sup>, HUANG Bao-jian<sup>1</sup>, SHEN Li-na<sup>1</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Coastal Wetland, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; 4. Guizhou Geology and Mineral Foundation Engineering Co., Ltd, Guiyang 550001, China)

**Received:** Mar., 16, 2015

**Key words:** Yellow River Delta; Heavy metal; Surface Soil; Sediment

**Abstract:** The research focuses on the distribution of heavy metal elements in surface soil and sediments. Total 219 surface soil samples, including 25 samples of shallow coastal wetlands, were sampled. The content of heavy metal elements in these samples were tested using modern techniques. The potential ecological risk index (RI), single-factor pollution index, and Nemerow index were used, which reflects Cr > Pb > Zn > As > Cu > Cd > Hg. Because the sea water washes the shallow coastal wetlands, their samples have a lower content of heavy metal elements. The greatest threat of heavy metal pollution in the upper delta plain is from As and Cd, and 88.5% of soils achieved the soil environmental standard of National First Grade. Further, the greatest threat of heavy metal pollution in the shallow coastal wetlands is from As, and 96% of soils achieved the soil environmental standard of National First Grade. A deeper analysis of potential pollution disclosed that RI, single-factor pollution index, and Nemerow index are too low. They do not reach the lowest pollution standard, implying that the soils in the Yellow River Delta are in good environmental condition.

(本文编辑: 康亦兼)