

# 黄河三角洲新生湿地土壤金属元素 空间分布特征

于君宝<sup>1,2</sup>, 董洪芳<sup>1</sup>, 王慧彬<sup>3</sup>, 陈小兵<sup>1</sup>, 谢文军<sup>2</sup>, 毛培利<sup>1</sup>,  
高永军<sup>4</sup>, 单凯<sup>5</sup>, 陈景春<sup>3</sup>, 马向明<sup>3</sup>

(1.中国科学院烟台海岸带滨海湿地生态实验室, 海岸带环境过程重点实验室, 山东烟台 264003; 2.山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州学院, 山东滨州 256600; 3.东营市科学技术局, 山东东营 257091; 4.美国休斯敦大学地球与大气科学系, 得克萨斯休斯敦 77204; 5.山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257091)

**摘要:** 采用样带布点法, 研究了黄河三角洲新生滨海湿地从黄河岸边至盐滩不同植物带上12种金属元素(Na、Mg、Ca、Al、Cr、Pb、Sr、Co、Ga、V、Ni和Ti)空间分布特征。结果表明, 由黄河岸边至盐滩方向, 除Ti以外, 土壤中其他11种金属元素含量均呈逐渐升高的趋势; 0~30 cm表层土壤中各金属元素含量均高于内陆沼泽; 将土壤背景值作为标准, 黄河三角洲土壤重金属Cr、Pb和Ni处于轻微污染状态; 各金属元素在剖面上的变化差异较大, 总体上Na和Sr含量随着剖面深度的增加而逐渐升高, Ca和Mg则表现出相反的规律, Pb、Co、Ga、V、Ni和Ti在剖面上出现了近S形的变化规律。相关分析表明, 研究区域土壤中总有机碳含量、总氮含量、硝态氮含量与Ca、Mg、Al、V、Co、Ga、Sr、Cr、Ni、Pb含量都呈极显著正相关, 说明黄河三角洲新生湿地土壤总有机碳含量、总氮含量和硝态氮含量是影响土壤吸附金属元素的主导因素。

**关键词:** 金属元素; 空间分布; 滨海湿地; 黄河三角洲

**中图分类号:** X142; X171.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-5948(2011)04-297-08

随着人类活动对环境影响的强度增大, 重金属污染日益加剧。重金属污染物一旦进入土壤就很难被排除, 并极易随着食物链在生物体内富集, 因此, 重金属在生态系统中的含量、分布及迁移转化引起了人们的广泛关注<sup>[1-6]</sup>。黄河三角洲是中国暖温带保存最完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统。由于该区域是东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙重要的中转站、越冬栖息地和繁殖地, 目前已成为国际上保护新生湿地系统和珍稀濒危鸟类为主体的重要湿地之一。黄河三角洲湿地也是目前世界上土地面积自然增长最快的地区之一, 无论其在中国经济发展上, 还是在环境建设上都具有重要的地位。然而, 由于全球气候变化及人类活动的影响如淡水补给减少、农田扩张及石油开采

等, 致使黄河三角洲湿地退化现象严重, 因此, 从元素生物地球化学角度探讨湿地生态修复具有重要的意义。关于黄河三角洲滨海湿地生态系统生源元素生物地球化学行为研究极少, 近期才有关于本区域营养元素分布特征的研究报道<sup>[7,8]</sup>, 而关于重金属元素的研究仅限于道路沿线、农田和河流<sup>[9-13]</sup>。尽管黄河三角洲地区重金属的污染源比较少, 但随着工农业生产及区域开发的高速发展, 重金属的使用范围和数量与日俱增<sup>[10]</sup>; 同时, 因该区受海水作用强烈, 与土壤盐渍化相关的金属元素如Na、Ca、Mg等也不容忽视。为此, 研究新生滨海湿地不同植被群落下土壤部分金属元素的生物地球化学特征及其与相关营养元素的关系, 可以为进一步深入探讨滨海湿地金属元素生物地球

收稿日期: 2011-01-10; 修订日期: 2011-06-23

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223)、公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001)、中国科学院百人计划项目、中国科学院—国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划、山东省科技攻关计划项目(2008GG20005006, 2008GG3NS07005)和山东省自然科学基金项目(JQ201114)资助。

作者简介: 于君宝(1970-), 男, 吉林省长春人, 博士, 研究员, 主要从事湿地生物地球化学与生态修复研究。E-mail: Junbao.yu@gmail.com

化学循环过程、控制重金属污染和退化湿地生态修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲国家级自然保护区(37°40'N~38°10'N, 118°41'E~119°16'E)内,黄河入海口处。该保护区总面积为  $15.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,属温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温为 12.1 °C,年降水量约为 551.6 mm。区内植被以水生植被和盐生植被为主(85%以上)<sup>[14]</sup>,芦苇(*Phrag-*

*mites australis*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和翅碱蓬(*Suaeda heteropter Kitagawa*)分布较广,植被的分布主要决定于土壤含盐量状况。该保护区土壤质地以轻壤土和中壤土为主,土壤类型以潮土和盐土为主。

### 1.2 方法

2008年8月,在黄河三角洲国家级自然保护区核心区新生湿地内,由黄河岸边向海的方向布设了两条平行样带。每条样带根据植被类型设置10个采样点(表1)。由于该区受人类干扰少,因此样带内的植被为原生序列。

表1 采样点特征  
Table 1 The characteristics of sample sites

采样点	地理坐标	植被带	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	土壤含盐量 (g/kg)	备注
A	37°45'47.7"N, 119°09'45.2"E	无植被河滩	1.13	0.63	黄河岸边
B	37°45'48.3"N, 119°09'45.0"E	三棱蔗草( <i>Sparganium stoloniferum</i> )	1.17	0.58	粉砂,有未分解植物残体
C	37°45'49.3"N, 119°09'44.6"E	朝天委陵菜( <i>Potentilla supina</i> )	1.00	2.95	
D	37°45'50.3"N, 119°09'43.4"E	假苇拂子茅( <i>Calamagrostis pseudophragmites</i> )	1.01	1.51	
E	37°45'51.5"N, 119°09'42.9"E	白茅( <i>Imperata cylindrica</i> )	1.00	4.79	
F	37°45'53.6"N, 119°09'42.0"E	白茅—芦苇	0.97	6.05	30~40 cm 处 有粘土层
G	37°45'57.0"N, 119°09'40.7"E	翅碱蓬—芦苇	0.97	15.04	
H	37°46'35.8"N, 119°09'36.0"E	翅碱蓬—柽柳	0.86	17.63	
I	37°46'38.9"N, 119°09'41.4"E	翅碱蓬	1.09	21.03	纯翅碱蓬群落
J	37°46'41.1"N, 119°09'41.3"E	无植被光滩	1.09	26.63	潮沟边

注:表中土壤容重和土壤含盐量为土壤剖面0~10 cm表层的数据。

在每个采样点的土壤剖面分层采集土壤样品,每层间隔 10 cm。其中 A 点因受水分限制仅采至 20 cm 深度,其余样点采集深度至 80 cm。样品风干后研磨,过 100 目筛孔尼龙筛,用于各项目测定。筛分后的土壤样品用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消解,去离子水定容,采用电感耦合等离子体发射光谱(ICPS-7500),测定元素 Na、Mg、Ca、Al、Cr、Pb、Sr、Co、Ga、V、Ni 和 Ti 含量。土壤容重采用环刀法测

定;pH 采用电位法由 pH B-4 型酸度计测定,含盐量采用 Cond XXX 型盐度计测定,每个指标重复测定 3 次。

根据野外实测数据与实验室的分析结果,数据差异显著性检验采用单因素法差分析,相关性分析采用 person 相关系数评价。图形绘制采用 origin7.0 软件和 Adobe Illustrator CS3 软件等绘图软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 金属元素的剖面分布特征

黄河三角洲新生滨海湿地各采样点土壤剖面中,各金属元素的变化存在较大差异(图1)。元素Na和Sr含量变化趋势相似,除J采样点外,其他各采样点都表现出元素Na和Sr含量由土壤表层向下逐渐升高,而J采样点土壤表层的Na含量最高。各采样点土壤剖面中,Ca和Mg含量由表层向下逐渐

降低。土壤剖面上,Al含量则表现为先升后降,峰值出现在10~20 cm土层处。其他重金属元素(Ti、V、Cr、Co、Ni、Ga和Pb)的含量的剖面变化极为相似,表现为近S形的变化规律,除土壤表层的金属元素含量较高外,其含量峰值出现在剖面30~40 cm土层。单因素方差分析(One-way-ANOVA)结果表明,Na、Ca、Al、Cr、Pb、Sr、Co、V、Ni和Ti含量剖面差异极显著( $n=74, sig < 0.01$ ),Mg和Ga含量剖面差异显著( $n=74, sig < 0.05$ )。

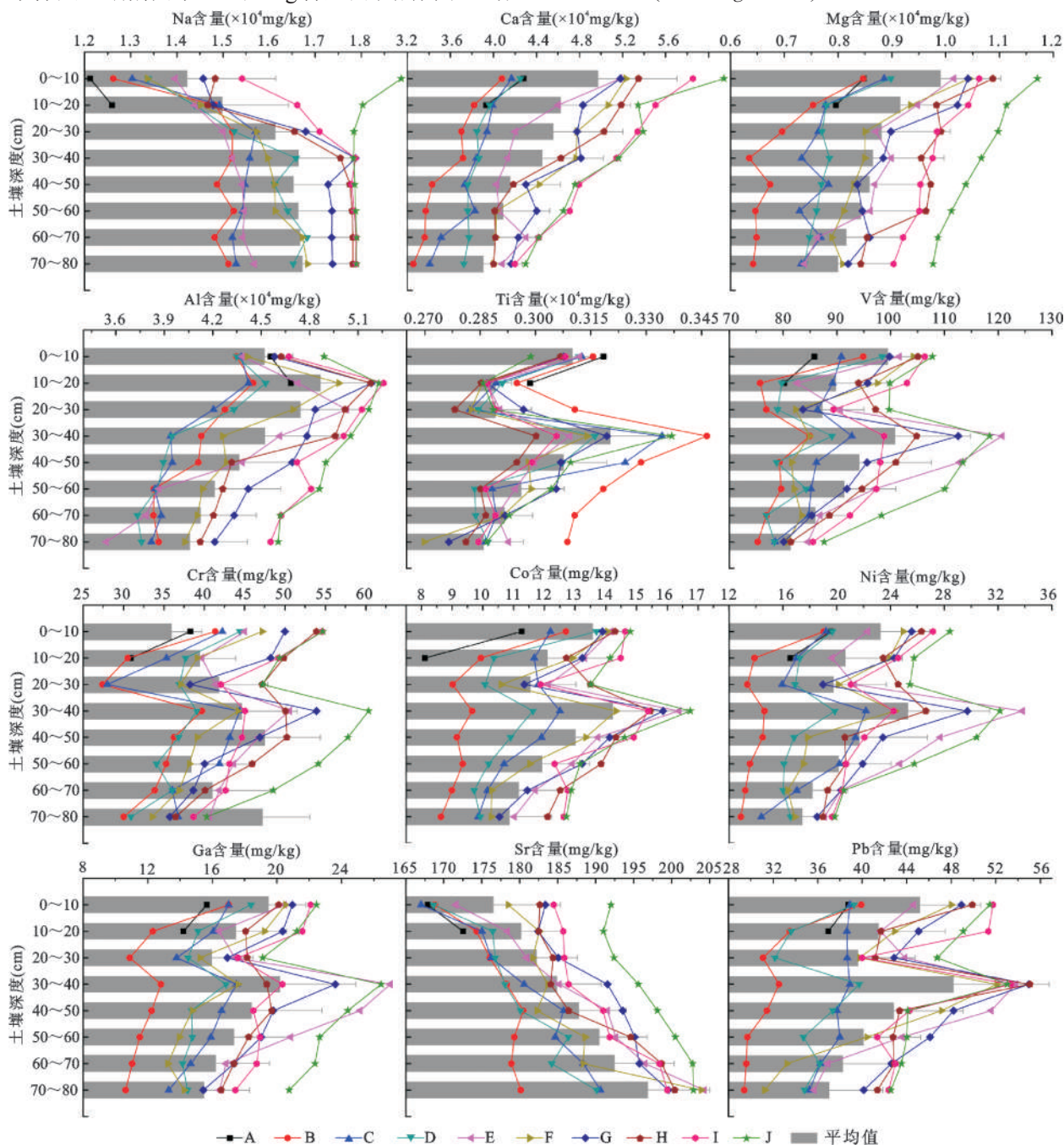


图1 黄河三角洲新生滨海湿地土壤中12种金属元素垂直分布

Fig.1 The vertical distributions of 12 kinds of metal elements in the soil of the new-born coastal wetlands in the Yellow River Delta

黄河三角洲新生滨海湿地是典型泥沙造陆的结果,从源头来讲,其金属元素应主要来源于海水和陆源的输入。黄河来水为淡水,盐分含量低,因此湿地土壤中的盐分主要来源于海水,在黄河淡水作用范围内,土壤剖面盐分从表层向下逐渐升高,Sr元素的剖面含量变化原因与之相似,至盐滩(J采样点)位置,由于受潮汐影响强烈,加之蒸发作用,使该采样点的土壤Na元素含量表层明显高于其他层次。土壤剖面中,Ca和Mg含量的变化趋势与Na含量的变化趋势(除J采样点)恰好相反,实际上,湿地土壤中Ca和Mg除来自泥沙以外,海水亦是其主要来源,但在土壤中,Ca离子和Mg离子可与Na离子发生代换,从而降低土壤盐分,在淡水影响下,Na离子可向下发生淋溶,这也是一些学者采用离子代换剂如石膏来治理盐碱地的主要原因<sup>[15,16]</sup>。另外,Ca和Mg都是植物生长所需的养分,在植物的吸收和分解归还作用下,土壤中的Ca和Mg逐渐在土壤表层积累。Al是构成土壤粘土矿物的重要元素,Al<sup>3+</sup>可充当粘土矿物和腐殖物质之间的键桥,在土壤有机复合体、无机复合体的形成过程中起着重要作用<sup>[17]</sup>,Al元素主要分布在土壤剖面的10~30 cm土层,这与黄河三角洲湿地植物根系分布层相一致,说明这一土层为湿地土壤主要的熟化层。重金属Cr、Pb、Co和Ni及其他金属元素Ti、V、Ga在剖面表层含量较高,并在30~40 cm土层出现峰值,其可能来源之一是大气干湿沉降,如Spokes L等研究发现,北大西洋中的Mg和Al主要来源于大气干湿沉降<sup>[18]</sup>,而北海的南部海湾沉积物中的Cd、Pb和Zn等重金属的20%~70%来源于大气湿沉降<sup>[19,20]</sup>;另外,临近区域的农业施肥、工业发展也可能是金属元素的主要来源,如Williams M R等通过对爱尔兰海沉积物中Cu、Pb和Mn的来源分析证明,大约3%~6%的重金属来源于大气输入,而约29%~34%来源于径流<sup>[21]</sup>,Zhang J等认为中国黄海中的Co、Cu、Ni、Pb和Zn主要来源于人类活动和大气污染物的传输<sup>[22]</sup>。假如金属Cr、Pb、Co、Ni、Ti、V和Ga的剖面变化是由上述两种原因所导致,那么在30~40 cm土层出现的重金属含量峰值极有可能在该时间段出现异常的人类活动或者大气污染物的输入,这还需要进一步证明,本文作者下一步将采用同位素方法确定该层土壤的沉积年代,以便与该区域人类开发

活动历史和气候状况相对应。同时,在土壤剖面的该土层,观测到含有尚未分解的植物残体,这些金属元素虽然不是植物生长所必需的元素,但可在植物体内胁迫富集,在植物残体分解过程中,可再次释放到土壤中,从而导致重金属含量峰值的出现。

## 2.2 表层土壤金属元素水平分异

从黄河三角洲滨海湿地表层土壤(0~30 cm)金属元素水平分布状况来看(图2),从黄河岸边至

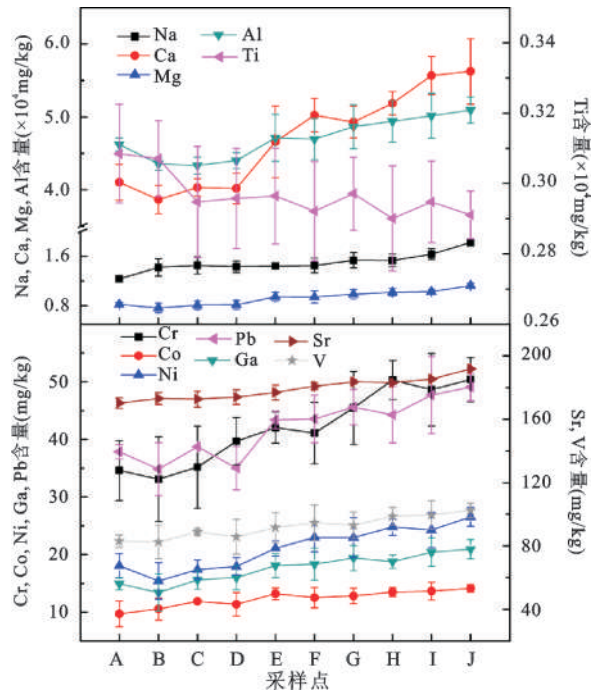


图2 黄河三角洲新生滨海湿地表层土壤(0~30 cm)金属元素水平分布

Fig.2 The horizontal distribution of metals in the topsoil (0-30 cm) of the new-born coastal wetlands in the Yellow River Delta

盐滩区(由A采样点至J采样点),除Ti外,表层土壤中其他各金属元素含量变化呈逐渐升高趋势,而Ti含量则呈现出波动下降的变化趋势。单因素方差分析的结果表明,各采样点金属元素Na、Mg、Ca、Al、Pb、Sr、Ga和Ni含量差异显著( $sig < 0.05$ ),元素V、Ti、Cr和Co含量差异不显著。从黄河三角洲新生滨海湿地形成过程分析,金属元素的主要来源为黄河泥沙输入、海水输入(通过潮汐、海水入侵等)、大气输入(干湿沉降)及研究区人为污染。研究区为新生原生湿地,受人类活动干扰相对较小,故金属元素为大气输入的可能性较大。有研究表明,全球大气每年向北太平洋输送16%~76%的

溶解 Fe<sup>[23]</sup>, 太平洋表层水的总溶解 Mn 主要来自于大气输入<sup>[24]</sup>, 而英吉利海峡及北海的南部海湾滨海湿地 20%~70% 的金属元素如 Cd、Cu、Pb 和 Zn 来源于大气输入<sup>[19]</sup>, 本研究中重金属元素 Pb、Ni 和 Cr 水平变化特征反映出它们很可能来自大气输入。黄河三角洲新生湿地的成陆泥沙来源于黄土, 而黄土风成土, 长距离迁移以轻、浅色矿物为主, 多数金属元素处于缺乏状态<sup>[25]</sup>。黄河三角洲新生滨海湿地的另外来源为海水输入, 海水含有多种金属离子, 显而易见, 距海越近的区域受海水的影响越大, 从研究区域金属元素的分布来看, 黄河岸边至盐滩区(由 A 采样点至 J 采样点), 除 Ti 外, 表层土壤中其他各金属元素含量变化呈逐渐升高趋势, 从而充分反映了研究区强烈受海水影响的特征。另外, 土壤金属元素的水平

分布状况与营养元素总氮、有机碳的分布趋势相似<sup>[7]</sup>, 说明二者之间存在着较强的联系(具体见 2.3 讨论部分)。

黄河三角洲滨海湿地 0~30 cm 土壤中金属元素平均含量及范围见表 2。从表 2 中可以看出, 滨海湿地土壤中金属元素含量都远远高于内陆沼泽, 黄河三角洲湿地重金属 Cr 含量明显低于江苏盐城湿地和附件闽江河口湿地, Pb 含量略低于闽江河口湿地。研究区土壤重金属 Cr 和 Ni 含量低于土壤环境质量一级标准(GB15618—1995); Cr 含量高于土壤背景值(27.55 mg/kg); Pb 含量则略高于一级标准, 但小于二级标准, 高于背景值(29.27 mg/kg) 0.4 倍, 说明黄河三角洲土壤环境已经受到轻微污染, 这主要与区域交通车辆尾气排放有关<sup>[13]</sup>, 因此, 该区域的环境污染问题应引起足够重视。

表 2 新生滨海湿地金属元素含量

Table 2 The soil metal element contents in new-born coastal wetland

金属元素	含量单位	平均含量	含量范围	其他湿地土壤金属元素平均含量			土壤质量标准中的金属元素含量
				江苏盐城盐沼湿地 <sup>[26]</sup>	闽江河口湿地 <sup>[27]</sup>	三江平原湿地 <sup>[28]</sup>	
Na		14.98	12.12~18.87				
Ca		47.02	37.01~61.42			3.70	
Mg	(g/kg)	9.26	6.96~11.71			1.79	
Al		47.05	42.05~52.59			15.30	
Ti		2.97	2.78~3.18			0.67	
V		92.03	75.77~107.77			9.43	
Cr		42.05	27.39~54.67	66.29	58.04	27.84	90
Co		12.34	8.12~14.80			6.29	
Ni	(mg/kg)	21.15	13.35~28.45	38.38	20.81	8.91	40
Ga		17.60	10.89~22.46				
Sr		179.19	167.01~192.41			35.59	
Pb		42.00	31.08~51.75	32.52	99.12		35

注: 表中土壤质量标准是指土壤环境质量一级标准(GB15618—1995)。

### 2.3 金属元素含量与有机碳含量、有机氮含量及土壤容重的关系

土壤中金属元素迁移及累积状况与土壤有机碳含量、有机氮含量及土壤物理性状关系密切。有研究表明, 土壤中 Hg、Cr、Cu 和 As 元素的累积浓度与土壤有机碳含量呈显著的正相关, 而土壤中重金属元素的淋溶与土壤容重关系密切<sup>[29]</sup>。黄河三角洲新生滨海湿地土壤金属元素含量与土壤

理化参数的相关关系见表 3。相关分析表明, 除土壤氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和土壤容重与大部分金属元素含量的相关性不显著外, 研究区土壤中总有机碳(TOC)、总氮(TN)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量与大部分金属元素含量相关性显著, 其中 Ca、Mg、Al、V、Co、Ga、Sr 及重金属 Cr、Ni、Pb 含量与这三者呈极显著正相关, 说明这些元素在黄河三角洲滨海湿地具有同源性和很好的共生组合性。同时观测到, 在土壤

有机碳含量较高的区域,土壤的金属含量也较高,这主要是由于黄河三角洲新生湿地的形成时间较短,土壤中腐殖质输入相对较高的区域碳、氮含量也较高<sup>[7]</sup>,这样会加速这类区域土壤的熟

化,其形成的土壤粘粒对金属元素起到吸附作用。因此,黄河三角洲新生湿地土壤 TOC 含量、TN 含量和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量是影响金属元素累积的主导因素。

表3 土壤中金属元素含量与有机碳含量、有机氮含量及土壤容重的相关系数  
Table 3 The correlation coefficients between metal contents and organic carbon contents, organic nitrogen contents and soil bulk densities

金属元素	TOC	TN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	土壤容重	C/N
Na	0.17	-0.25*	0.03	0.07	-0.09	0.50**
Ca	0.65**	0.70**	0.51**	-0.00	-0.16	0.25*
Mg	0.65**	0.71**	0.49**	-0.20	-0.26*	0.29*
Al	0.48**	0.42**	0.43**	-0.25*	-0.12	0.32**
Ti	-0.23	-0.17	-0.11	-0.06	0.24	-0.22
V	0.55**	0.64**	0.46**	-0.16	-0.15	0.17
Cr	0.44**	0.61**	0.44**	-0.09	-0.10	0.05
Co	0.58**	0.65**	0.45**	-0.19	-0.21	0.24*
Ni	0.61**	0.68**	0.48**	-0.17	-0.23	0.27*
Ga	0.58**	0.66**	0.46**	-0.28*	-0.26*	0.26*
Sr	0.47**	0.47**	0.41**	-0.17	-0.19	0.26*
Pb	0.51**	0.57**	0.38**	-0.25*	-0.22	0.23

注:\*\*表示在0.01水平上显著相关;\*表示在0.05水平上显著相关;n=148。

### 3 结论

受海洋潮汐影响,黄河三角洲新生滨海湿地土壤中12种金属元素含量显著高于内陆沼泽。研究区土壤重金属Pb、Cr和Ni含量都高于土壤背景值,说明黄河三角洲土壤处于重金属Cr、Pb和Ni轻微污染状态。

新生滨海湿地表层土壤中,除Ti以外,其他11种金属元素含量从黄河岸边至盐滩区逐渐升高;总体上,Ca、Mg含量的剖面垂直变化与Na、Sr含量变化规律相反,而Ti、V、Cr、Co、Ni、Ga和Pb含量剖面表现为近S形的变化规律,峰值出现在30~40 cm深度土层,这极有可能是在该时间段出现异常的人类活动或者大气污染物的输入所致。新生滨海湿地土壤中,Ca、Mg、Al、V、Co、Ga、Sr、Cr、Ni、Pb含量与总有机碳、总氮、硝态氮含量之间存在着极显著的正相关关系,说明黄河三角洲新生湿地土壤总有机碳、总氮和硝态氮含量是影响土壤吸附金属元素的主导因素。

致谢:感谢黄河三角洲国家级自然保护区管理局刘月良总工程师和中国科学院黄河三角洲滨海湿

地生态试验站对本研究野外工作的支持。

### 参考文献

- [1] Rai P K. Heavy metal pollution in lentic ecosystem of sub-tropical industrial region and its phytoremediation[J]. International Journal of Phytoremediation, 2010, 12(3): 226-242.
- [2] Yang H J, Shen Z M, Zhu S H, et al. Heavy metals in wetland plants and soil of Lake Taihu, China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(1): 38-42.
- [3] Sousa A I, Cacador I, Lillebo A I, et al. Heavy metal accumulation in *Halimione portulacoides*: Intra- and extra-cellular metal binding sites[J]. Chemosphere, 2008, 70(5): 850-857.
- [4] Rai P K. Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: An ecosustainable approach [J]. International Journal of Phytoremediation, 2008, 10(2): 133-160.
- [5] Yongpisanphop J, Kruatrachue M, Pokethitiyook P. Toxicity and accumulation of lead and chromium in *Hydrocotyle umbellata*[J]. Journal of Environmental Biology, 2005, 26(1): 79-89.
- [6] Heckman C W. The Fate of Aquatic and Wetland Habitats in an Industrially Contaminated Section of the Elbe Floodplain in Hamburg[J]. Arch. Hydrobiologie, 1990, Suppl., 75(2): 135-250.
- [7] 于君宝, 陈小兵, 孙志高, 等. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 855~861.

- [8]董洪芳, 于君宝, 陈小兵, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物—土壤系统有机碳空间分布特征[J]. 环境科学, 2010, 21(6): 1 590~1 594.
- [9]蓝先洪. 中国主要河口沉积物的重金属地球化学研究[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(12): 1~4.
- [10]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.
- [11]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.
- [12]芮玉奎, 曲来才, 孔祥斌. 黄河流域土地利用方式对土壤重金属污染的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4): 934~936.
- [13]车 驰, 齐 伟, 斯钧浪, 等. 黄河三角洲道路沿线土壤中重金属污染物的分布与评价[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(21): 10 067~10 069.
- [14]贺 强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析[J]. 湿地科学, 2007, 5(3): 208~214.
- [15]Khosla B K, Gupta R K, Abrol I P. Salt leaching and the effect of gypsum application in a saline-sodic soil[J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(3): 193-202.
- [16]Sivapalan S. Effect of gypsum and polyacrylamides on water turbidity and infiltration in a sodic soil[J]. Australian Journal of Soil Research, 2005, 43(6): 723-733.
- [17]黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 21~41.
- [18]Spokes L, Jickells T, Jarvis K. Atmospheric inputs of trace metals to the northeast Atlantic Ocean: the importance of southeasterly flow[J]. Marine Chemistry, 2001, 76(4): 319-330.
- [19]Deboudt K, Flament P, Bertho M L. Cd, Cu, Pb and Zn concentrations in atmospheric wet deposition at a coastal station in Western Europe[J]. Water Air and Soil Pollution, 2004, 151(1-4): 335-359.
- [20]Rojas C M, Injuk J, Vangrieken R E. Dry and wet deposition fluxes of Cd, Cu, Pb and Zn into the southern Bight of the North-Sea[J]. Atmospheric Environment Part a-General Topics, 1993, 27(2): 251-259.
- [21]Williams M R, Millward G E, Nimmo M, *et al.* Fluxes of Cu, Pb and Mn to the northeastern Irish Sea: The importance of sedimental and atmospheric inputs[J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 36(5): 366-375.
- [22]Zhang J, Liu S M, Huang W W. Atmospheric input of particulate heavy-metals to the Yellow Sea[J]. Ambio, 1993, 22(4): 196-199.
- [23]Duce R A. The atmospheric input of trace species to the world ocean[J]. Global Biogeochem Cycle, 1991, 5: 193-259.
- [24]Guieu C, Duce R A, Imoto R. Dissolved input of man-ganese to the ocean : Aerosol source[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 18 789-18 800.
- [25]于君宝, 陈小兵, 毛培利, 等. 新生滨海湿地土壤微量营养元素空间分异特征[J]. 湿地科学, 2010, 8(3): 213~219.
- [26]赵雪琴, 赵善道, 左 平, 等. 江苏盐城原生湿地表层沉积物中的重金属污染评价[J]. 环境保护科学, 2010, 36(1): 64~68.
- [27]侯晓龙, 黄建国, 刘爱琴. 福建闽江河口湿地土壤重金属污染特征及评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2 302~2 306.
- [28]于君宝, 王金达, 刘景双. 三江平原泥炭地微量元素垂直分布特征[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 398~400.
- [29]Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter[J]. Science of the Total Environment, 1998, 209(1): 27-39.

## Spatial Distribution Characteristics of Metals in New-born Coastal Wetlands in the Yellow River Delta

YU Jun-Bao<sup>1,2</sup>, DONG Hong-Fang<sup>1</sup>, WANG Hui-Bin<sup>3</sup>, CHEN Xiao-Bing<sup>1</sup>, XIE Wen-Jun<sup>2</sup>,  
MAO Pei-Li<sup>1</sup>, GAO Yong-Jun<sup>4</sup>, SHAN Kai<sup>5</sup>, CHEN Jing-Chun<sup>3</sup>, MA Xiang-Ming<sup>3</sup>

(1. *Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, P.R.China*; 2. *Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256600, Shandong, P.R.China*; 3. *Science & Technology Bureau of Dongying City, Dongying 257091, Shandong, P.R.China*; 4. *Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston, Houston 77204, Texas, USA*; 5. *Administration of Shandong Yellow-River-Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, Shandong, P.R.China*)

**Abstract:** Applying method of samples with transects, the spatial distributions of 12 kinds of soil metal elements (Na, Mg, Ca, Al, Cr, Pb, Sr, Co, Ga, V, Ni and Ti) in the new-born coastal wetland of the Yellow River delta were studied by laying two transects running riverward to seaward. The results showed that, from the Yellow River bank to salt beach, 11 kinds of metals except Ti showed increasing trend gradually. The contents of all of studied metal elements in 0-30 cm soil depth were much higher than those in inland marsh. Comparing with soil background values of the study area, heavy metals of Cr, Pb and Ni were all at light pollution level in soil of the Yellow River Delta. The variation differences in soil profile were significant for all metal elements. The contents of Na and Sr increased with soil depth, while inverse variations of Ca and Mg were observed, the variations of Pb, Co, Ga, V, Ni and Ti contents showed an 'S' shape in soil profile. Correlation analysis showed that there were extremely significant positive correlations of contents of total organic carbon, total nitrogen,  $\text{NO}_3^-$ -N and contents of Ca, Mg, Al, V, Co, Ga, Sr, Cr, Ni and Pb in studied soils. The results indicates that the contents of total organic carbon, total nitrogen,  $\text{NO}_3^-$ -N were key factors for soil adsorption of metal elements in new-born coastal wetlands of the Yellow River Delta

**Keywords:** metal element; spatial distribution; coastal wetland; the Yellow River Delta