

胶州湾滨海湿地盐渍土壤中重金属的聚集与分散特性研究

李学刚¹, 袁华茂¹, 许思思^{1,2}, 段丽琴^{1,2}, 李宁¹, 张默^{1,2}, 宋金明¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 以胶州湾东北沿岸盐渍土壤为主要研究对象, 分析探讨了滨海盐渍土壤对 10 种微量重金属的聚集/分散特征。结果表明, 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd、As、Cr、Co、Ni、V、Mo 主要来源于成土母质花岗岩的风化产物, Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 为“盐渍土壤聚集元素”, As、Co、V、Mo 为“盐渍土壤分散元素”。盐渍土壤中 As、Co、Ni、V、Mo 基本没有受到人为污染, Pb、Zn 大部分区域无污染, 局部区域有轻度污染, Cu 和 Cr 在一半的区域无污染, 在另一半的区域有偏轻度污染, Cd 则存在轻到中度污染, 需要加以关注。胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 10 种重金属受人为污染影响的程度 $Cd > Cu > Cr > Zn > Pb > Ni > V > Co > As > Mo$ 。胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属的含量除受物质来源影响外, 还受重金属本身的性质和其上植被的影响, 特别是其上生长的优势盐生植物碱蓬可明显吸收盐渍土壤中的 Cd、Pb 等重金属, 碱蓬可以作为修复受 Cd、Pb 等重金属污染的盐渍土壤。

关键词: 聚集/分散; 重金属; 盐渍土壤; 碱蓬; 胶州湾东北沿岸湿地

中图分类号: P153.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)07-0088-08

盐渍土是一系列受土体中盐碱成分作用的、包括各种盐土和碱土以及其他不同程度盐化和碱化的各种类型土壤的统称, 也称盐碱土。当土壤表层或亚表层中(一般厚度为 20~30 cm 左右), 水溶性盐积累超过 0.1% 或 0.2% (即 100g 风干土中含 0.1 g 水溶性盐类, 或在富含石膏情况下, 含 0.2 g 水溶性盐类), 或土壤碱化层的碱化度超过 5%, 就属盐碱土范畴。在盐渍土发育过程中气候、地形、地质、水文及生物因素的影响最为突出。土壤盐渍化是一个世界性的资源和生态问题。据统计全球有各种盐渍土约 10 亿 ha, 占全球陆地面积的 10%, 并且每年以 100.0 万~150.0 万 ha 的速度增长。我国盐渍土壤面积大, 分布广泛, 类型多样。各种类型的盐渍土总量约为 9 913 万 ha (约合 14.87 亿亩), 相当于耕地面积的 1/3^[1-2]。但目前对盐渍土壤的深入系统研究并没有引起足够的关注。

滨海盐渍土主要受海水的浸渍而成, 沿海地区海拔低, 淤泥土层较薄, 海相盐土母质所含的盐分易升至地表, 经过毛细作用和蒸发作用致使大量盐分上升至地表, 并残留、凝聚于此而形成盐渍土; 同时, 由于在滨海地区大量开采地下水, 使海水随海潮入侵及溯河倒灌, 向滨海及河流近岸地下水继续供给盐分, 参与土壤积盐过程, 加之气候干燥、降水不足、蒸发量大, 形成人为的次生盐渍土^[3]。盐渍土的物理与化学性状都较差, 一般情况下, 空隙度减

小, 易于板结、透水透气性较差, 有机质含量降低, C、N 矿化程度降低, 土壤微生物的活动受到限制, 因而土壤肥力降低; 土壤中过量的盐离子对植物的生殖生长和营养生长都有抑制, 一些离子还可以对植物进行直接毒害, 引起植物的形态和结构发生变化^[4]。目前, 盐碱地已经成为制约我国生态环境建设和农业可持续发展的最大障碍之一。

胶州湾东北部沿岸属于充填型河口海湾海岸, 是胶州湾湿地的重要分布区域。作为青岛冲积平原和冲洪积平原的主要分布区域之一, 胶州湾东北部沿岸区域上部堆积物(土壤分布层)多为黏质砂土或砂质黏土, 土壤含盐量高, 属于盐渍土^[5]。本文选择胶州湾东北部沿岸 5 个站点的盐渍土壤和其上生长的碱蓬中的重金属为研究对象, 探讨了它们在盐渍土壤中的富集/移出特征及其主要影响因素, 以期为盐渍土壤的修复提供基础数据。

收稿日期: 2010-12-16; 修回日期: 2011-01-06

基金项目: 中国科学院知识创新方向群项目(KZCX2-YW-Q07-02); 国家自然科学基金委创新群体项目(40821004); 国家 973 课题(2007CB407305)资助

作者简介: 李学刚(1969-), 男, 副研究员, 主要从事海洋生物地球化学研究, 电话: E-mail: lixuegang@qdio.ac.cn; 宋金明, 通信作者, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋生物地球化学研究, 电话: 0532-82898583, Email: jmsong@qdio.ac.cn

1 样品的采集与分析

2008年8月,于胶州湾东北部沿岸5个地点采集了土壤和碱蓬样品(图1)。其中T1位于双埠入海口浅滩,取样地点生物种类繁多,附近有输油管道。T2点为西女姑山入海口附近浅滩,稍微偏离主河道。T2-1位于女姑村河口近水地点。T3位于白沙河入海口附近,附近植被没有人为破坏过的痕迹,碱蓬生长十分旺盛。采样点T4及T4-1位于墨水河周边,其中T4为潮滩地带,而T4-1为近水地带。T5及T5-1位于上马污水处理厂外围的盐碱地,其中T5距离污水厂近,植物分布不规则;T5-1位于附近的盐场。

道。T2-1位于女姑村河口近水地点。T3位于白沙河入海口附近,附近植被没有人为破坏过的痕迹,碱蓬生长十分旺盛。采样点T4及T4-1位于墨水河周边,其中T4为潮滩地带,而T4-1为近水地带。T5及T5-1位于上马污水处理厂外围的盐碱地,其中T5距离污水厂近,植物分布不规则;T5-1位于附近的盐场。

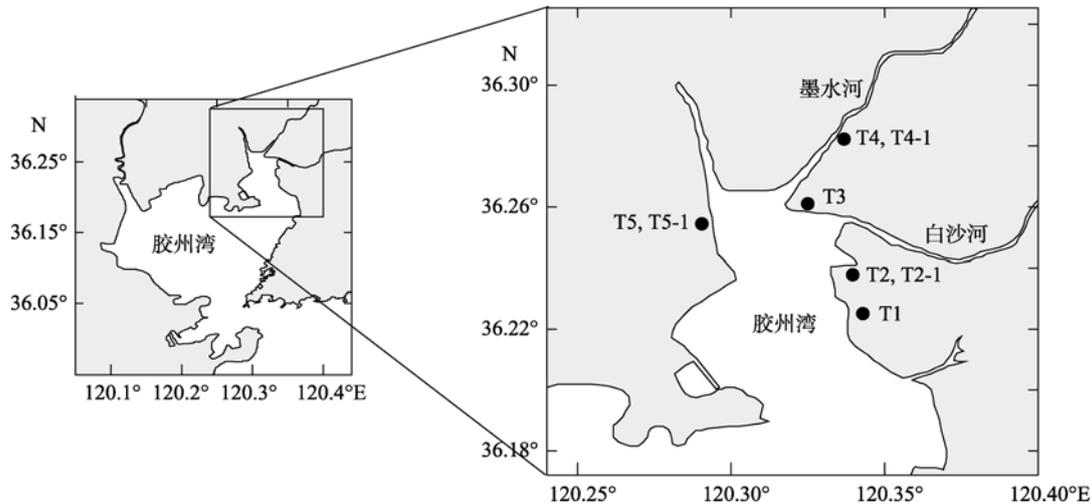


图1 胶州湾东北部滨海湿地盐渍土壤和碱蓬样品采集站位图

Fig. 1 The sampling stations of the saline soils and *Suaeda salsa* in the northeastern coastal wetland of the Jiaozhou Bay

盐渍土壤样品采集后自然风干,用玛瑙研钵将其研磨至120目以细,然后置于50℃烘箱中烘干至恒重。准确称取恒重后的样品40mg于Teflon消解罐中;加入0.6mL HNO₃+2mL HF封盖后,震荡样品,静置2h后,于150℃电热板上溶样24h;然后加入0.5mL HClO₄于120℃电热板上敞开蒸发至半干;再加入1mL HNO₃+1mL H₂O,密封后于120℃电热板上回溶12h;用ICP-MS测定其中各种重金属的含量。

与盐渍土壤对应的碱蓬仅采集其叶子进行重金属的测定。碱蓬叶子采集带回实验室立即用自来水冲洗3遍,蒸馏水冲洗2遍,以除去表面黏着的泥沙,然后用塑料剪刀将叶子剪细,并置于40℃烘箱中烘至恒重,以玛瑙研钵研碎,过120目筛,于40℃烘到恒重准确称取磨细的碱蓬叶子0.1g,用与盐渍土壤同样的样品处理方式和条件测定碱蓬叶子中Cu、Zn、Pb、Cd、As、Cr、Co、Ni、V、Mo的含量。

2 结果与讨论

2.1 盐渍土壤中重金属的含量

胶州湾北岸盐渍土壤中重金属的含量如表1所

示。Cu在各采样站位间含量差别较大,其中T2-1站含量最低,仅为21.38 μg/g的,T4-1站含量最高,为600.63 μg/g,远远高于我国土壤的背景含量22.6 μg/g(表2)。Zn在各采样站位间含量差别也较大,其中T3、T5站含量最低,仅为82.93 μg/g的,T4-1站含量最高,为1016.1 μg/g,远远高于我国土壤的背景含量74.2 μg/g(表2)。除T4-1站土壤中铅含量较高外,其他各采样站位间铅含量差别不大,但都高于我国土壤的背景值26.0 μg/g(表2)。胶州湾东北沿岸盐渍土壤中Cr的分布相对比较均匀,各采样站位间含量差别不大,但都高于我国土壤的背景含量61.0 μg/g。除T5站土壤中Cd含量较低外(仅为0.09 μg/g),其他各采样站位间Cd含量差别较大,但都远高于我国土壤的背景值0.097 μg/g(表2)。As在各采样站位之间含量差别不大,但都低于我国土壤的背景值11.2 μg/g(表2)。

Co、Ni、V的分布相似,表现为研究区的北部高于南部,北部各站(T4、T5、T5-1)土壤中Co、Ni、V的含量稍高于我国土壤的背景含量26.9 μg/g,南部各站(T1、T2、T2-1)稍低于我国土壤的背景值(表2)。Mo在各站位间的含量相差不大,低于我国土壤中Mo的背景含量2.0 μg/g。

表 1 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属的含量 (μg/g)

Tab. 1 The contents of heavy metals in the saline soils of the Jiaozhou Bay northeastern coastal wetland (μg/g)

站位	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Co	Ni	V	Mo
T1	23.32	83.92	36.76	206.62	0.93	7.08	7.65	17.57	58.29	0.78
T2	95.60	115.30	44.45	160.33	0.62	8.18	10.51	35.37	74.65	0.72
T2-1	21.38	94.10	46.11	118.01	0.66	11.03	10.98	22.59	75.46	1.04
T3	23.00	82.93	37.21	96.76	0.24	6.64	10.72	25.99	75.16	1.00
T4	80.21	152.39	34.31	88.83	0.41	6.11	12.67	30.08	82.28	0.73
T4-1	600.63	1016.1	90.98	209.55	1.33	9.37	15.19	55.01	91.88	1.40
T5	33.26	82.93	32.98	188.37	0.09	6.47	19.07	86.83	112.21	0.71
T5-1	105.10	179.45	47.45	125.63	0.51	10.58	17.35	49.75	112.76	0.87
平均	122.81	225.89	46.28	149.26	0.60	8.18	13.02	40.40	85.34	0.91

表 2 中国土壤中重金属的背景值(μg/g)^[6]

Tab. 2 The background concentrations of heavy metals in China Soil(μg/g)^[6]

含量	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Co	Ni	V	Mo
含量范围*	0.33~	2.6~	0.68~	2.20~	0.001~	0.01~	0.01~	0.06~	0.46~	0.10~
	272	593	1143	1209	13.4	626	93.9	627	1264	75.1
背景含量*	22.6	74.2	26.0	61.0	0.097	11.2	12.7	26.9	82.4	2.0

2.2 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中微量重金属的聚集与分散

土壤是独立的自然体,是由岩石通过风化及成土过程而形成的产物。因此,土壤中微量重金属的含量与成土母质关系密切,但在不同土壤类型和成土母质的条件下,微量元素含量的变幅、分布和形态等,都有大的差异。另外,人类活动的影响,特别是污染物的排放可极大的改变土壤中微量重金属的含量。在评价土壤中化学元素的富集特征时,为了减少成土母质对重金属含量的影响,突出人文活动对重金属含量的贡献,一般对土壤中的重金属进行归一化处理。归一化参比元素通常选择地壳中普遍大量存在的、人为污染很小,化学稳定性好、挥发性低且易于分析的元素。常用的参比元素有 Sr、Fe、Cs、Mn、Al、Li 等^[7]。其中 Al 已经被广泛应用于沉积物中重金属的归一化研究^[8-10],而 Li 是近年来才被用为参考元素的,Loring^[11]的研究表明,Li 不仅适宜做归一化的参考元素,并且部分地弥补了 Al 归一化的不足。为评价胶州湾东北沿岸盐渍土壤中微量重金属的富集特征,以 Li 为参比元素,按下式计算了土壤中重金属的富集系数,结果见表 3。

$$EF = \frac{\left(\frac{C_i}{C_n}\right)_{\text{样品}}}{\left(\frac{C_i}{C_n}\right)_{\text{背景}}}$$

式中: C_i ——元素 i 的浓度;

C_n ——标准化元素 Li 的浓度。

从富集系数看,As、Co、Ni、V、Mo 等 5 种重金属的富集系数在大部分站位小于 1 或接近于 1,表明这几种元素基本未受人文活动的影响;Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 等 5 种重金属的富集系数大于 1。Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 这 5 种重金属又可分为两种情形,其中 Cu、Zn、Pb、Cr 4 种元素的富集系数在大部分站位都小于 2,只有部分站位富集系数较大;而 Cd 元素的富集系数普遍大于 2。这种富集系数大于 1 的情况可能是成土母质本身元素含量高造成的,也可能是人为活动污染造成的。在这里以富集系数的大小定义: $EF > 1.0$ 的元素称为“盐渍土壤聚集元素”; $EF = 1.0$ 的元素称为“盐渍土壤平衡元素”; $EF < 1.0$ 的元素称为“盐渍土壤分散元素”,所以,在胶州湾东北沿岸的盐渍土壤中 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 为“盐渍土聚集元素”,As、Co、V、Mo 为“盐渍土壤分散元素”。如果选择在盐渍土壤上种植物来进行修复盐渍土,显然,应选择对“盐渍土壤聚集元素”有大富集因数的植物来富集吸收盐渍土中的大量聚集元素方可有效。

“盐渍土壤分散元素”从盐渍土移出的去向主要有被生物吸收或被盐水淋滤进入植物体中或水体中,袁华茂等的研究发现(待发表),这一区域盐渍土上生长的碱蓬中 As、V 主要存在于其根部,相对含量可达 66.5%和 62.8%,而 Mo、Co 主要存在于其

茎叶部, 相对含量可达 66.3%和 56.1%, 的确这些盐渍土壤分散元素被迁移到其上生长的碱蓬植物体内。
从胶州湾东北沿岸土壤中重金属的相关分析(表 4)

和聚类分析(图 2)结果看, 研究区盐渍土壤中的重金属可以分为三群: Cu、Zn、Pb、Mo; Co、Ni、V 和 As、Cr、Cd。

表 3 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属的富集系数

Tab. 3 The enrichment factors of heavy metals in the saline soils of the Jiaozhou Bay northeastern coastal wetland

站位	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Co	Ni	V	Mo
T1	1.12	1.54	1.23	3.68	10.42	0.69	0.65	0.71	0.77	0.42
T2	3.34	1.35	1.23	2.07	5.04	0.58	0.65	1.04	0.71	0.28
T2-1	0.82	1.55	1.10	1.69	5.93	0.86	0.75	0.73	0.80	0.45
T3	0.77	1.08	0.84	1.20	1.87	0.45	0.64	0.73	0.69	0.38
T4	3.10	1.15	1.79	1.27	3.69	0.48	0.87	0.98	0.87	0.32
T4-1	19.90	2.62	10.25	2.57	10.27	0.63	0.90	1.53	0.84	0.52
T5	0.93	0.80	0.71	1.95	0.59	0.36	0.95	2.04	0.86	0.22
T5-1	2.21	0.87	1.15	0.98	2.50	0.45	0.65	0.88	0.65	0.21
平均	4.02	1.37	2.29	1.93	5.04	0.56	0.76	1.08	0.77	0.35

Cu、Zn、Pb、Mo 间存在显著相关, 表明它们的成土过程相似, 即来源相似, 主要来源于成土母质花岗岩的风化产物。一般而言, 人为活动输入的 Mo 肯定不多, Mo 是典型的“盐渍土分散元素”, 在盐渍土中的钼或被生物吸收或被盐水淋滤进入植物体

中或水体中。Cu、Zn、Pb 也主要来源于成土母质, 但由于青岛地区的成土母质花岗岩中 Cu、Zn、Pb 的含量相对较低, 而它们又是典型的“盐渍土聚集元素”, 所以可肯定地说, 盐渍土壤中 Cu、Zn、Pb 有部分人为活动的输入。

表 4 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属的相关性

Tab. 4 The correlations of heavy metals in the saline soils of the Jiaozhou Bay northeastern coastal wetland

	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Co	Ni	V
Zn	0.995(**)								
Pb	0.963(**)	0.964(**)							
Cr	0.460	0.456	0.434						
Cd	0.743(*)	0.750(*)	0.803(*)	0.553					
As	0.280	0.283	0.500	0.003	0.430				
Co	0.277	0.266	0.201	0.103	-0.277	0.133			
Ni	0.280	0.262	0.176	0.393	-0.246	-0.071	0.910(**)		
V	0.204	0.187	0.148	0.024	-0.320	0.198	0.986(**)	0.858(**)	
Mo	0.789(*)	0.827(*)	0.877(**)	0.189	0.655	0.494	0.070	-0.009	0.020

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

Co、Ni、V 间也存在显著相关, 表明它们也有相似的来源, 从富集系数看, 它们在研究区盐渍土壤中基本没有受到人文活动的输入影响, 它们的低含量与其成土母质花岗岩是一致的。

As、Cr、Cd 3 种元素中, 除 Cd 与 Co、Ni、V 有一定的相关关系外, 与其他元素的相关性较差, 表明它们具有较为独立的行为。其中 As 为第 Ⅵ 主族元素, 在元素地化学分类中为亲硫元素, 性质和其他元素差别较大, 从富集系数看, 研究区盐渍土壤

中的 As 尚未受到人文活动的污染。Cr 和 Cd 是典型的易受人类活动影响的污染元素, 从富集系数看其在土壤中的分布已受到人类活动的显著影响, 青岛地区工农业活动已成为研究区盐渍土壤中 Cr、Cd 的主要来源。

2.3 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中微量重金属的污染评价

目前国内外普遍采用单因子指数法和内梅罗综

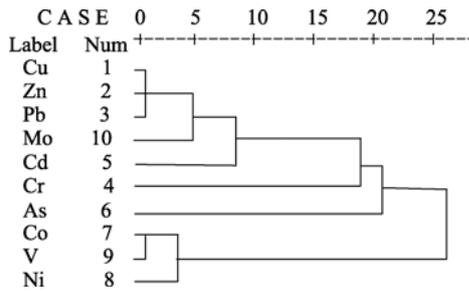


图 2 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属的聚类分析结果
Fig. 2 The Cluster analysis of heavy metals in the saline soils of the Jiaozhou Bay northeastern coastal wetland

合指数法等进行土壤重金属污染评价,这两种方法均能对研究区土壤重金属污染程度进行较为全面的评价,但无法从自然异常中分离人为异常,判断表生过程中重金属元素的人为污染情况,而地累积指数法则弥补了这种不足。

地累积指数(I_{geo})是由德国科学家 Muller 提出的一种评价沉积物及其他物质中重金属污染程度的一个定量指标,其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{R \times B_n}$$

式中, C_n 是元素 n 在土壤中的含量; B_n 是土壤中该元素的地球化学背景值; R 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。根据 I_{geo} 值的大小,将土壤中重金属的污染程度分为 6 个等级(表 5)。

胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属的地累积指数如表 6 所示,可以看出,As、Co、V、Mo 的地累积指数都小于 0,表明研究区土壤中的 As、Co、V、Mo 无污染。Ni 除在 T5 站地累积指数稍大于 1 外,其他各站都小于 1,表明 Ni 在研究区的土壤中也基本

无污染。Pb 除在 T4-1 站地累积指数稍大于 1 外,其他各站都小于 1,表明 Pb 在研究区的土壤中污染也不严重。Cu 在 T2、T4、T5-1 等站的地累积指数大于 1 而小于 2,在 T4-1 站地累积指数大于 4,而其他各站地累积指数小于 0,表明研究区土壤中的 Cu 在不同区域的污染状况不同,部分区域无污染,部分区域偏轻度污染,局部地区为重污染。Zn 除在 T4-1 站地累积指数大于 3 外,其他各站地累积指数均小于 1,表明研究区土壤中的 Zn 在大部分区域无污染,但在局部地区为中度污染。Cr 在 T1、T4-1、T5 等站的地累积指数大于 1 而小于 2,而在其他各站地累积指数小于 1,表明研究区土壤中的 Cr 在部分区域无污染,部分区域偏轻度污染。Cd 的地累积指数是所有元素中最大的,除 T3 和 T5 站地累积指数小于 1 外,其他大部分各站地累积指数大于 1,表明研究区土壤中的 Cd 在除在个别地区无污染外,在大部分地区为轻度到中度污染。从上而知,盐渍土壤中重金属的地累积指数污染程度评价结果与 2.2 节提出的这一区域盐渍土壤中 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 为“盐渍土壤聚集元素”,As、Co、V、Mo 为“盐渍土壤分散元素”完全一致。

表 5 地累积指数分级标准

Tab. 5 The grading standards of geo-accumulation index

地累积指数 I_{geo}	分级	污染程度
$I_{geo} > 5$	6	极严重污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	重度污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	中度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	轻度污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	偏轻度污染
$I_{geo} \leq 1$	1	未污染

表 6 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中微量重金属的地累积指数

Tab. 6 The geo-accumulation indexes of heavy metals in the saline soils of the Jiaozhou Bay northeastern coastal wetland

站位	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Co	Ni	V	Mo
T1	-0.54	-0.41	-0.09	1.18	2.68	-1.25	-1.32	-1.20	-1.08	-1.94
T2	1.50	0.05	0.19	0.81	2.09	-1.04	-0.86	-0.19	-0.73	-2.06
T2-1	-0.67	-0.24	0.24	0.37	2.18	-0.61	-0.79	-0.84	-0.71	-1.53
T3	-0.56	-0.42	-0.07	0.08	0.72	-1.34	-0.83	-0.63	-0.72	-1.58
T4	1.24	0.45	-0.18	-0.04	1.49	-1.46	-0.59	-0.42	-0.59	-2.04
T4-1	4.15	3.19	1.22	1.20	3.19	-0.84	-0.33	0.45	-0.43	-1.10
T5	-0.03	-0.42	-0.24	1.04	-0.69	-1.38	0.00	1.11	-0.14	-2.08
T5-1	1.63	0.69	0.28	0.46	1.81	-0.67	-0.13	0.30	-0.13	-1.79
平均	0.84	0.36	0.17	0.64	1.68	-1.07	-0.61	-0.18	-0.57	-1.77

综合所有情况,胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 As、Co、Ni、V、Mo 基本无污染,Pb、Zn 大部分区域无污染,局部区域有轻度污染,Cu 和 Cr 在一半的区域无污染,在一半的区域有偏轻度污染,Cd 存在轻到中度污染,需要加以关注。胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 10 种重金属受人为污染影响的程度 $Cd >> Cu > Cr >> Zn > Pb >> Ni > V > Co > As > Mo$ 。

2.4 影响胶州湾北部盐渍土壤中重金属聚集与分散的主要因素

重金属在土壤中富集与迁移的主要控制过程是吸附与解吸,主要控制因素是金属元素的性质、成土母质、人为输入和土壤的环境特征如土壤质地、氧化还原条件、植被等。

一般而言,离子势小的金属元素容易形成可溶解的阳离子;离子势大的金属元素可以形成可溶解的络阴离子,这两类元素都有较高的活动性,而离子势介于这两者之间的金属元素相对比较稳定。研究区土壤中 Pb、Cu、Zn、Cd 等具有较少的正电荷和较大的离子半径,导致这些元素具有较小的离子势而表现为较强的迁移能力;As 等元素半径小,电荷高,导致这些元素的离子势大,易形成酸根离子而表现较强的迁移特征;而像 V、Ni、Co、Cr、Mo 等所带电荷及其离子半径介于上述两类之间,即这些元素具有中等强度的离子势,因此导致这些元素在土壤中的迁移能力较弱。由于胶州湾北岸盐渍土壤的成土母岩主要为花岗岩,钴、镍、钒等重金属含量较少,虽然 V、Ni、Co 的活动性较小,但胶州湾北岸盐渍土壤中 V、Ni、Co 含量依然不高。虽然从

离子势来看,Mo 的活动性不大,但在表生条件的氧化作用下,Mo⁴⁺可氧化为 Mo⁶⁺,形成溶解度较高的钼酸或钼酸盐,易于随溶液流失。胶州湾北岸盐渍土壤在形成过程中不可避免的与近岸海水频繁交换,从而使盐渍土壤中的 Mo 不断流失,导致盐渍土壤中的 Mo 含量极低。随着胶州湾沿岸工农业快速发展,较多的 Pb、Cu、Zn、Cd 等重金属不断进入土壤中,这是这些元素在胶州湾北岸土壤中富集的主要原因,但由于这些元素具有较强的活动性,易于从一次污染源区扩散形成二次污染,使污染区扩大。从本研究结果看,胶州湾北岸盐渍土壤中只有部分站位 Pb、Cu、Zn、Cd 含量较高,但要注意控制这些重金属的排放,防止其二次迁移。

除了元素本身的结构和性质之外,土壤上的植被对重金属的富集和淋滤也会产生一定影响。

植被对土壤中重金属富集淋滤的过程的影响是多方面的,一方面食物根系的生长会破坏土壤的结构,改变土壤的物理状态,植物根系在生长过程中分泌的物质也会导致土壤的 pH、Eh、微生物组成等生物化学条件的变化,改变土壤中重金属的存在状态,促进土壤中重金属的迁移与转化^[8,12];另一方面,植物也可直接吸收土壤中的重金属,储存在植物的枝叶中,这一功能已被应用于土壤重金属污染的植物修复过程中^[13, 14]。植物体内的重金属含量与土壤的重金属含量有直接的相关性。从胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属与其上生长的碱蓬叶中重金属的相关系数看(表 7),土壤中的 Pb、Cd 和碱蓬叶中的 Pb、Cd 呈显著的正相关,表明碱蓬可以吸收盐渍土

表 7 胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属与其上生长的碱蓬叶中重金属的相关系数

Tab. 7 The correlation coefficients of heavy metal contents in the saline soils and *Suaeda salsa* in the Jiaozhou Bay northeastern coastal wetland

重金属	叶 Cu	叶 Zn	叶 Pb	叶 Cr	叶 Cd	叶 As	叶 Co	叶 Ni	叶 V	叶 Mo
土壤 Cu	0.67	0.59	0.64	0.70	0.74*	0.67	0.67	0.65	0.82*	0.23
土壤 Zn	0.68	0.62	0.63	0.70	0.74*	0.63	0.64	0.64	0.78*	0.23
土壤 Pb	0.80*	0.74*	0.76*	0.80*	0.82*	0.71*	0.75*	0.76*	0.83*	0.31
土壤 Cr	0.29	0.16	0.24	0.23	0.16	0.17	0.32	0.25	0.31	0.12
土壤 Cd	0.81*	0.75*	0.63	0.61	0.78*	0.59	0.70	0.74*	0.67	0.63
土壤 As	0.55	0.62	0.66	0.63	0.56	0.47	0.53	0.60	0.43	0.56
土壤 Co	-0.29	-0.26	0.02	0.11	-0.14	0.04	-0.05	-0.18	0.13	-0.20
土壤 Ni	-0.26	-0.30	0.03	0.10	-0.19	0.04	-0.01	-0.17	0.14	-0.34
土壤 V	-0.34	-0.31	-0.02	0.06	-0.19	-0.01	-0.09	-0.22	0.08	-0.20
土壤 Mo	0.81*	0.81*	0.64	0.71*	0.75*	0.48	0.51	0.66	0.56	0.16

* 表示在 0.05 的水平上显著相关

壤中的 Pb、Cd, 另外土壤中的 Pb 和碱蓬叶中的 Cu、Zn、Cr、Cd、As、Co、Ni、V 呈显著的正相关, 表明碱蓬对 Cu、Zn、Cr、Cd、As、Co、Ni、V 等元素的吸收与土壤中 Pb 的含量密切相关, 而土壤中 Mo 的含量可能对碱蓬吸收积累 Cu、Zn、Cr、Cd 也有重要影响。因此, 碱蓬等植物通过对土壤中 Pb、Cd 等重金属的直接吸收来减少土壤中重金属的含量。由于胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 等重金属在局部地区含量较高, 特别是 Cd 已处于污染状态, 种植碱蓬将有利于吸收盐渍土壤中的 Pb、Cd, 可望对盐渍污染土壤进行修复。

3 结论

通过对胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 10 种重金属的分析测定, 研究探讨了这些微量重金属在盐渍土壤中的聚集/分散特征, 获得了如下的主要结论:

胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd、As、Cr、Co、Ni、V、Mo 主要来源于成土母质花岗岩的风化产物。Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 的含量高于或与我国土壤背景值持平, 这一区域盐渍土壤中 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 为“盐渍土壤聚集元素”, As、Co、V、Mo 低于我国土壤的背景值, 为“盐渍土壤分散元素”。

胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 As、Co、Ni、V、Mo 基本没有受到人为污染, Pb、Zn 大部分区域无污染, 局部区域有轻度污染, Cu 和 Cr 在一半的区域无污染, 在另一半的区域有偏轻度污染, Cd 则存在轻度到中度污染, 需要加以关注。胶州湾东北沿岸盐渍土壤中 10 种重金属受人为污染影响的程度 $Cd \gg Cu > Cr \gg Zn > Pb \gg Ni > V > Co > As > Mo$ 。

胶州湾东北沿岸盐渍土壤中重金属的含量除受物质来源影响外, 还受重金属本身的性质和其上植被的影响, 特别是其上生长的优势盐生植物碱蓬可明显吸收盐渍土壤中的 Cd、Pb 等重金属, 碱蓬可以作为修复受 Cd、Pb 等重金属污染的盐渍土壤。

致谢: 感谢中国科学院海洋研究所邢军武研究员在采样过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-375.
- [2] 赵可夫, 李法曾. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-157.
- [3] 路浩, 王海泽. 盐碱土治理利用研究进展[J]. 现代化农业, 2004, 8: 10-12
- [4] 杨莉琳, 李金海. 我国盐渍化土壤的营养与施肥效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(2): 79-81.
- [5] 青岛市史志办公室. 青岛市志(自然地理志/气象志)[M]. 北京: 新华出版社, 1997: 1-480.
- [6] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 1-501.
- [7] Klinkhammer G P, Bender M L. Trace metal distributions in the Hodsoa R Ner estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1981, 2: 629-643.
- [8] Song J M. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas[M]. Springer-Verlag GmbH & Zhejiang University Press, 2010: 1-655.
- [9] Dai Jicui, Song Jinming, Li Xuegang, et al. Environmental changes reflected by sedimentary geochemistry in recent hundred years of Jiaozhou Bay. North China[J]. Environmental Pollution, 2007, 145(3): 656-667.
- [10] 宋金明. 中国近海生物地球化学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2004: 1-591.
- [11] Loring D H. Lithium—a new approach for the granulometric normalization of trace metal data[J]. Marine Chemistry, 1990, 29: 155-168.
- [12] 徐卫红, 黄河, 王爱华, 等. 根系分泌物对土壤重金属活化及其机理研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 184-189
- [13] 刘宇, 孟范平, 姚瑞华, 等. 碱蓬幼苗对 Pb、Cd、Cu、Zn 耐受性及富集能力[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(B12): 55-59.
- [14] 唐明灯, 胡锋, 吴龙华, 等. 香薷属植物在重金属修复中的应用进展[J]. 土壤, 2008, 40(5): 698-705.

Accumulation/dispersion of heavy metals in the saline soil of the Jianzhou Bay northeastern coastal wetland

LI Xue-gang¹, YUAN Hua-mao¹, XU Si-si^{1,2}, DUAN Li-qin^{1,2}, LI Ning¹, ZHANG Mo^{1,2}, SONG Jin-ming¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Dec., 16, 2010

Key words: accumulation/dispersion; heavy metal; saline soil; *Suaeda salsa*; the Jianzhou Bay northeastern coastal wetland

Abstract: Soil salinization is a worldwide resource and ecological problem, and systemic study on saline soil is the foundation for its bioremediation. The accumulation/dispersion of heavy metals in the saline soils was discussed based on the research on the saline soils in the northeastern coastal wetland of Jiaozhou Bay. The variations of Cu and Zn concentrations in saline soils of the Jiaozhou Bay northeastern coast were great and their concentrations were higher than the soil background values; the concentrations of Pb, Cd and Cr had little difference between sample stations but were higher than the background values; the variations of As and Mo concentration were not prominence and their concentrations were lower than the background values; the distribution was similar to V, Co and Ni, the concentrations of which in the northern part were somewhat higher than the soil background values whereas in the southern part were slight lower than the soil background values. Cu, Zn, Cr, Cd, Pb, and Ni were “elements accumulated by saline soil” and As, Co, V, Mo “elements dispersed by saline soil”. As, Co, Ni, V, Mo, Cu, Zn and Pb of saline soils in the northeastern coast of the Jiaozhou Bay mainly came from soil parent materials and were not influenced by anthropogenic activities, whereas Cr and Cd mainly originated from industrial and agricultural inputs by Qingdao besides the parent materials. Pb and Zn in most of the saline soil were not polluted, but light polluted in some areas of the northeast coastal in the Jiaozhou Bay. Half of the studied stations had no pollution of Cu and Cr, but the other half stations were polluted slightly by Cu and Zn. However, there was mild to moderate pollution for Cd. The pollution severity of the heavy metals in the region followed the order of Cd >> Cu > Cr >> Zn > Pb >> Ni > V > Co > As > Mo. Beside the effect of material source, the concentrations of heavy metals in saline soils of the northeastern coast of the Jiaozhou Bay were influence by the nature of heavy metals and vegetation on the soil. The dominant halophyte *Suaeda Salsa* can significantly absorb Pb and Cd from the saline soil, so alleviating the corresponding contamination of the soil.

(本文编辑: 康亦兼)