

青海湖典型湿地土壤重金属空间分布特征

芦宝良¹, 陈克龙^{1,2}, 曹生奎^{1,2}, 杨龙¹, 陈生云³, 马进¹

(1. 青海师范大学 生命与地理科学学院, 西宁 810008;

2. 青藏高原环境与资源教育部重点实验室, 西宁 810008; 3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:以青海湖黑马河湿地为研究对象,对湿地土壤重金属铜、锌、铅、铬(Cu,Zn,Pb,Cr)4种元素的空间分布特征进行了研究。结果表明:湿地表层土壤(0—10 cm)中,Cu,Cr,Pb和Zn的平均含量分别为 16.38 ± 4.95 mg/kg, 65.46 ± 7.34 mg/kg, 14.26 ± 4.28 mg/kg, 46.35 ± 7.27 mg/kg。垂直湖岸的水平方向上,Cu,Cr,Pb和Zn的含量高值出现在湿地高水位带以及陆相带,低值出现在湿地水陆过渡带。在土壤剖面方向上,各重金属元素表现出不同的分布特征:Cu呈现出表面聚集现象;Zn随深度变化有明显的淋溶和积聚趋势;Pb含量沿土层剖面纵深分布的特征是先增加后减少;Cr呈显著的表面聚集现象。湿地表层土壤的对比结果显示研究区内土壤环境质量良好。湿地土壤中Cu,Zn,Pb,Cr四种元素之间呈显著正相关,表明本区域重金属具有同源性。

关键词:重金属; 湿地土壤; 青海湖; 空间分布; 相关性

中图分类号:X131.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0190-05

Spatial Distribution Characteristics of Soil Heavy Metals of Wetlands in Some Representative Regions around Qinghai Lake

LU Bao-liang¹, CHEN Ke-long^{1,2}, CAO Sheng-kui^{1,2}, YANG Long¹, CHEN Sheng-yun³, MA Jin¹

(1. College of Life and Geography Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Environment and Resources, Ministry of Education, Qinghai 810008, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The content and distribution characteristics of soil heavy metals such as Cu, Zn, Pb, and Cr in wetlands of Heima River wetlands around Qinghai Lake were studied. The results showed that the average contents of Cu, Cr, Pb and Zn in top soil of 0—10 cm depth were 16.38 ± 4.95 mg/kg, 65.46 ± 7.34 mg/kg, 14.26 ± 4.28 mg/kg, 46.35 ± 7.27 mg/kg, respectively. In the horizontal direction to perpendicular the shore, the high contents of Cu, Cr, Pb and Zn appeared in the high water level and terrestrial area in wetlands, while low contents appeared in water and land transition zone. In the soil profile direction, different heavy metals showed different distribution. Cu presented a surface aggregation; distribution of Zn showed significant leaching and accumulation trends to soil profile; Pb increased first and then decreased along the soil profile; distribution of Cr showed a significant surface aggregation. Comparison among these elements showed the quality of soil in the study area maintained a good natural level. Cu, Zn, Pb and Cr exhibit a significant positive correlation with each other, which indicated that there was a homology among them in the study area.

Key words: heavy metals; wetland soil; Qinghai Lake; spatial distribution; correlation

湿地作为地球上水陆交互作用形成的独特生态系统,是重要的生存环境和自然界最富生物多样性的生态景观之一,在抵御洪水、调节径流、蓄洪防旱、控制污染等方面有着其它系统所不能代替的重要作用^[1]。青海湖位于青南高原高寒区、西北干旱区和东

部季风区的交汇处,是我国最大的高原内陆咸水湖,具有极为重要的生态地位^[2]。环湖区域内主要的湿地有泉湾沼泽湿地,倒淌河、沙柳河沼泽湿地,黑马河、泉吉河河口湿地,仙女湾湖滨湿地,鸟岛保护区盐碱化沼泽湿地等。随着环青海湖区域旅游业的蓬勃

收稿日期:2011-10-19

修回日期:2011-11-28

资助项目:国家自然科学基金(40861026,40761010);国家社科基金(08XJY012,10CJY015);青海省科技厅项目(2010276)

作者简介:芦宝良(1987—),男,青海西宁人,硕士研究生,从事环境变化及碳循环方面的研究。E-mail:w-w987@163.com

通信作者:陈克龙(1965—),男,安徽巢湖人,教授,主要从事全球变化及自然保护方面的研究。E-mail:ckl7813@163.com

发展,环湖湿地的土壤环境状况将直接影响区域的可持续发展。

在湿地生态系统中,重金属是普遍存在的污染物之一,其在土壤中的累积,不仅降低土壤生物活性、影响土壤理化性质、阻碍植物的生长,而且会进入食物链直接或间接对人体健康造成威胁^[3]。目前,青海湖湿地的研究,特别是湿地土壤重金属的研究甚为缺乏。为此,本文以青海湖黑马河湿地土壤为研究对象,对湿地土壤中的 Cr、Pb、Zn 和 Cu 四种典型重金属元素含量和空间分布特征进行分析,以期对青海湖湿地的保护提供基础资料和决策依据。

1 研究区概况

青海湖流域地处祁连山脉,北依大通山,南靠青海南山,东邻日月山,西以阿木尼尼库山为界。流域面积约 2.966 万 km²,海拔高程 3 194~5 200 m,青海湖湖周长 360 km,面积 4 300 km²。流域行政区划包括天峻县、刚察县、海晏县和共和县^[4]。入湖较大的支流有布哈河、哈尔盖河、沙柳河、泉吉河、黑马河。流域内太阳辐射强,日温差大,年均气温 -1~4℃,干寒,降水少而不均,年降水量 270~500 mm,年蒸发量 1 422~2 066 mm,属半干旱高原气候。

本文研究的黑马河河口湿地是青海湖环湖区域内为数不多的河口湿地中最为典型的湿地之一。地处青海湖的南岸湖滨带,位于青海省共和县内,东经 99°47'02"—99°50'08",北纬 36°44'28"—36°42'34",平均海拔 3 200 m。是以华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)群落和华扁穗草+高山嵩草(*B. sinocompressus*+*Kobresia pygmaea* C. B. Clarke)群落为主的湿地。研究区域的土壤母质以第四纪黄土为主。

2 采样与样品分析

于 2010 年 7—8 月根据黑马河湿地的分布特征以及主要的环境因素状况,设置两条垂直于湖岸的样带,长 1 000 m;样带之间相隔 500 m,从高潮滩开始采样,每隔 100 m 随机采集样地土壤样品(3 次重复)。整个样带跨越湿地长期水淹带(0~500 m),季节水陆过渡带(500~600 m)以及陆相带(600~1 000 m)。采样点的定位利用 GPS 手持定位仪测定。土壤样品分 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 和 30—40 cm 四层采集,共采集样品 264 份,将采集土壤放入自封袋中带回实验室。经自然风干后剔除植物残体和石块,放入烘箱中进行烘干(105℃)至恒重,用玛瑙研钵研磨成粉末样,并过 200 目尼龙网筛,取过筛后的粉末样 0.6~0.8 g 用 HNO₃—HClO₄—

HF 混合酸消解,消解完全后加少量稀硝酸溶解后转移到 50 ml 容量瓶中定容。用 TAS-990 型原子吸收光谱仪火焰法分别测定 Cu、Pb、Zn、Cr 的含量^[5]。土壤有机质含量的测定采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法^[6]。

3 结果与分析

3.1 黑马河湿地土壤重金属元素的统计特征

黑马河湿地土壤重金属含量的统计特征如表 1 所示。统计结果显示,Cu 和 Cr 的含量都随着土层深度的增加逐渐减少。其中 Cu 在表层含量高,并沿土壤剖面递减,Cr 的含量在 10—20 cm 的土层内比 0—10 cm 大幅度减少,其平均含量减少了 46.44%。Pb 和 Zn 的含量沿剖面纵深分布的变化特征是先增加后减少。Cu 和 Zn 的变异系数随着土层深度的增加而增大。Pb、Cr 的变异系数表现为随土层深度的增加先增加后减小其后又增加的变化趋势。由于土壤特性空间变异性的的大小可由变异系数的大小来表征,通常认为变异系数≤15%时为小变异,15%<变异系数<35%时为中等变异,变异系数≥35%时为高度变异^[7]。研究结果显示,Cu 在土壤剖面(0—40 cm)的变异系数为 30.25%和 35.18%~47.77%,Pb 在土壤剖面(0—40 cm)的变异系数为 20.99%~33.59%和 40.90%,均属于中等变异和高度变异土壤性质。Zn 在土壤剖面(0—40 cm)的变异系数为 15.69%~34.27%,属于中等变异土壤性质。Cr 在土壤剖面(0—40 cm)的变异系数为 11.22%,32.25%和 36.44%~46.39%,分别是小变异、中等变异以及高度变异土壤性质。

土壤表层重金属元素的含量特征是分析研究区域环境状况的重要指标。研究区表层金属元素与青海湖流域均值、青海省均值、全国均值差异的对比结果见表 2。表 2 表明,黑马河湿地土壤中 Cr 平均含量高于青海湖流域均值以及全国土壤平均值,这可能与河口湿地的土壤特征以及土纲分区有关^[8]。Cu、Pb 和 Zn 含量较少,均低于青海湖流域均值、青海省均值、全国平均值,其中 Zn 元素含量明显偏低。其含量差异主要与区域内的成土母质、岩石风化、淋溶有关^[9]。对比结果显示黑马河湿地人为影响少,区域内的土壤保持了较好的自然背景水平。同时样品采集时间为夏季,湿地土壤中的地上生物量为一年中的最高值,像 Cu、Zn 不仅是重金属元素同时也是植物正常生长发育所必需的微量营养元素^[10-12],因此土壤中的重金属分布可能受其影响,其影响程度大小和分布形态特征还需进一步的研究。

表 1 湿地土壤重金属统计特征 (n=88)

土层深度/cm	统计量	Cu	Cr	Pb	Zn
0—10	最小值/(mg·kg ⁻¹)	10.79	55.05	9.45	36.52
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	26.87	76.80	20.00	55.77
	平均值/(mg·kg ⁻¹)	16.38	65.46	14.26	46.35
	标准差/(mg·kg ⁻¹)	4.95	7.34	4.28	7.27
	变异系数/%	30.25	11.22	20.99	15.69
10—20	最小值/(mg·kg ⁻¹)	6.76	15.90	8.51	36.97
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	21.03	53.15	26.68	68.75
	平均值/(mg·kg ⁻¹)	13.15	35.06	17.43	51.83
	标准差/(mg·kg ⁻¹)	4.63	12.77	5.85	9.68
	变异系数/%	35.18	36.44	33.59	18.68
20—30	最小值/(mg·kg ⁻¹)	4.61	16.59	8.27	23.24
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	16.89	43.23	22.39	55.96
	平均值/(mg·kg ⁻¹)	11.73	28.58	14.27	48.07
	标准差/(mg·kg ⁻¹)	4.50	9.22	3.59	11.64
	变异系数/%	38.38	32.25	25.13	24.22
30—40	最小值/(mg·kg ⁻¹)	3.34	8.45	6.42	20.21
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	17.02	44.70	21.32	55.74
	平均值/(mg·kg ⁻¹)	9.77	27.11	11.89	42.03
	标准差/(mg·kg ⁻¹)	4.67	12.58	4.98	14.41
	变异系数/%	47.77	46.39	41.90	34.27

3.2 重金属元素的水平分布特征

黑马河湿地土壤(0—10 cm)重金属含量变化如图 1 所示,结果显示表层土壤中 Cu, Cr, Pb 和 Zn 含量的高值出现在样带起点的高水位带各点以及样带终点的陆相带各点,低值出现在水陆过渡带区域。变化特征大体上呈现出中间低,样带起点和终点高的趋势。特别是高潮滩重金属整体含量明显高于低潮滩。这主要与水动力过程直接相关,大量的细颗粒泥沙在

高潮滩沉积,因此相对来说水动力作用较弱,同时由于细颗粒泥沙表面积相对较大,有机质含量较高,因而重金属浓度比粗颗粒泥沙含量高^[13-14]。相比较而言,远离湖岸的区域重金属整体含量无论是在表层还是在梯度上都高于中间区域,产生这种结果的主要原因则可能是因为远离湖岸的陆相区域更加靠近公路,人类的活动较为频繁,特别是汽车的活动。Rodríguez 等的研究表明^[15], Pb, Cu, Zn 的分布与汽车活动数据是相关的,说明此区域人类活动的影响在日益增强。

3.3 重金属元素的垂直剖面分布特征

湿地土壤重金属含量的垂直剖面分布结果显示(图 1), Cu 含量在整个研究区域呈现出表面聚集的现象,表现为 Cu 含量在 0—10 cm 的土壤中高于 10—20 cm,剖面最高含量出现在 0—10 cm 的土层范围内。只在陆相带区域一个点(800 m)上土壤中 Cu 的含量在 10—20 cm 略高于 0—10 cm。从最高水位点开始 10—40 cm 土壤中 Cu 含量大体沿土壤剖面递减,但在不同点位上呈现出不同的波动变化,其变化趋势是:随着湿地水分的减少,在长期水淹带各点逐渐变缓然后到水陆过渡带区域各点波动变化趋于明显,最后到陆相带各点波动变化又逐渐变缓。主要体现在 30—40 cm 相比 20—30 cm 土壤中 Cu 含量的变化。说明土壤水分含量的变化对于 Cu 在剖面的淋溶迁移产生影响。同时,根据 Cu 和有机质的相关性分析结果($r=0.656, p<0.01$),表明 Cu 与有机质有很强的亲和力。因此,在土壤有机质含量较高的区域 Cu 的含量也相应高些。

表 2 区域土壤重金属元素平均含量对比

区位	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)	Cr/(mg·kg ⁻¹)	数据来源
黑马河湿地	16.38	46.35	14.26	65.46	本文
青海湖流域	19.72	64.28	20.47	54.17	文献 ^[11]
青海省	22.30	74.20	20.40	—	文献 ^[12]
全国	22.60	74.20	26.00	61.00	文献 ^[5]

注:“—”表示无此值。

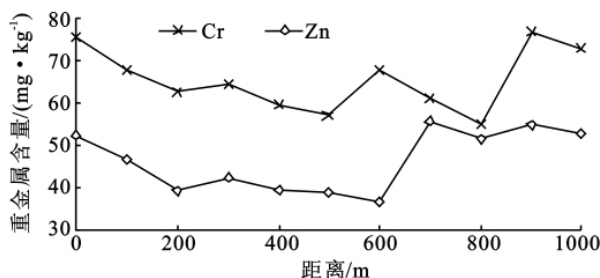
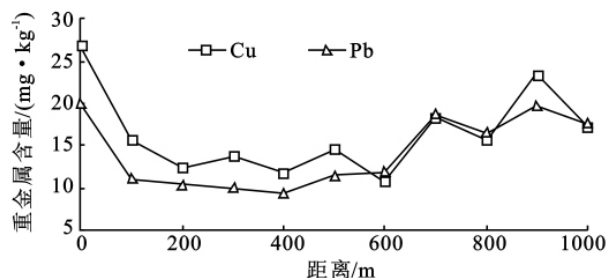


图 1 湿地表层(0—10 cm)土壤重金属的水平分布特征

Zn 在研究区域中的长期水淹带各点以及陆相带各点有明显的淋溶和积聚趋势,在 10—20 cm 的范围



内有积聚层。其主要原因是 Zn 元素淋溶累积的结果,因为 Zn 在水分较多的厌氧还原条件下易溶于水

并向下淋溶,在土壤某一层形成累积,其后随着剖面深度的增加含量逐渐下降。Zn 在水陆过渡带各点略微显现出表聚的现象,产生这种现象的原因可能与复杂的水温环境、水体扰动促进重金属解析以及 Zn 在沉积过程中的迁移有关。

Pb 在水位最高点有明显的表面聚集现象。其后的长期水淹带上各点都呈现出了淋溶和积聚的趋势,其在土壤剖面上的波动变化趋势随着水量的减少逐渐变缓,剖面最高含量出现在 10—30 cm 的范围内。Pb 在水陆过渡带上各点也出现了表面聚集现象。产生这种现象的原因可能与复杂的水温环境、水体扰动促进重金属解析有关。陆相带各点 Pb 在土壤剖面 10—20 cm 的含量高于 0—10 cm。由于此区域内的植物根茎主要分布范围在 10 cm 以下,同时植物有着特殊的根际泌氧功能^[16],因此可能对 Pb 的分布产生

一定的影响。

无论水分程度如何,在 0—10 cm 的土壤中 Cr 的含量显著高于次表层(10—20 cm),呈显著的表面聚集现象,随着土层深度的增加而迅速减少。可能原因是湿地土壤表层的大量有机质的还原作用,使 Cr 易被吸附、沉淀聚集在表层,所以表层以下的含量明显减少。不同区域范围内的 10—40 cm 土壤中的变化受水淹程度不同而发生不同的变化,在水相带各点和水陆过渡带各点波动变化幅度不大。但在陆相带则是随着剖面纵深分布逐渐减少,变化趋势明显。Cr 在表层的显著富集除了自然的原因外,应充分给予重视。因为黑马河湿地位于黑马河的入湖口,由于悬浮泥沙的吸附和搬运积累作用,是黑马河注入青海湖金属元素的主要归宿地之一^[17]。所以其在表层的大量富集可能是人为原因造成的。

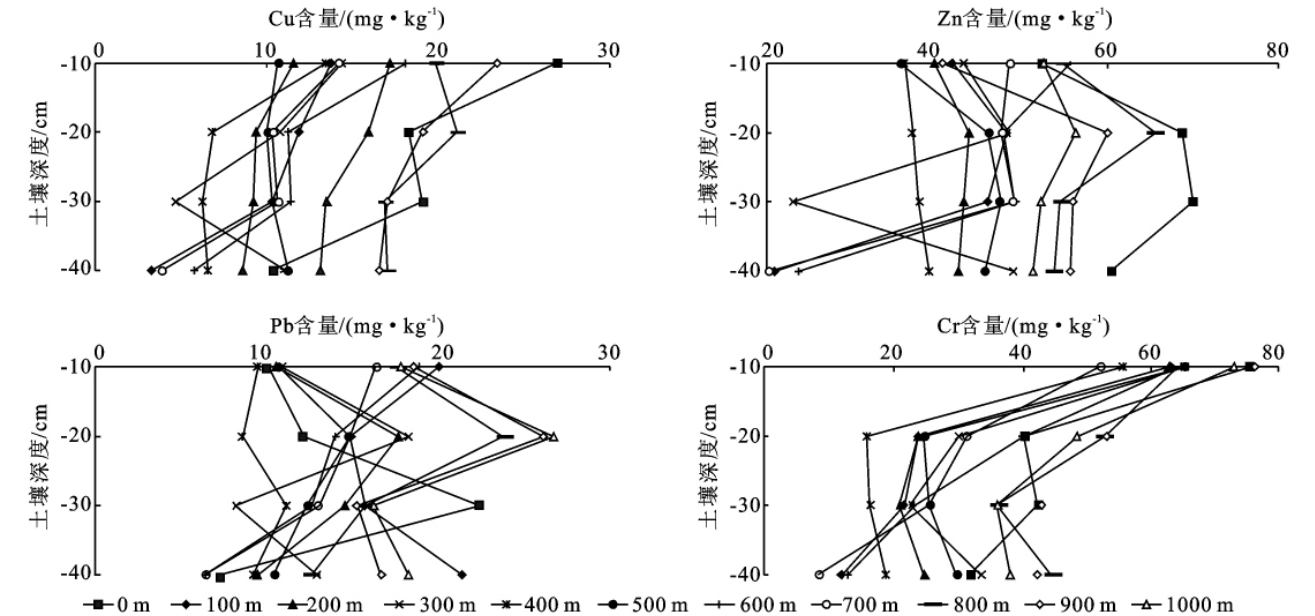


图 2 湿地土壤剖面(0—40 cm)重金属的分布特征

3.4 重金属元素之间的相关性

土壤样品重金属含量的相关分析见表 3,结果显示,土壤中 Cu,Zn,Pb,Cr 四种重金属之间呈显著正相关($p<0.01$)。由于土壤重金属的来源是否相同可以通过研究土壤中重金属全量的相关性进行推测,若重金属含量有显著的相关性,说明有相同来源的可能性较大,否则来源可能不止一个。

湿地土壤四种金属离子之间的相关性说明重金属之间具有同源性。其中 Cu 与 Zn 的相关系数最大为 0.897($p<0.01$),Cr 与 Pb 的相关性最小为 0.541($p<0.01$)。重金属元素之间显著的相关性也表明了自然条件下重金属元素之间的伴生性^[18],进一步说明湿地土壤环境状况较好。

表 3 湿地土壤重金属的相关性

金属元素	Cu	Zn	Pb	Cr
Cu	1.000			
Zn	0.897**	1.000		
Pb	0.637**	0.610**	1.000	
Cr	0.869**	0.858**	0.541**	1.000

注: **表示 0.01 水平显著相关,*表示 0.05 水平显著相关; $n=88$ 。

4 结论

(1) 湿地土壤剖面重金属含量的统计特征显示青海湖典型湿地土壤重金属元素 Cu、Pb 和 Zn 含量较低,均低于全国、青海省和青海湖流域平均水平,Cr 平均含量高于全国土壤平均值和青海湖流域平均值;总体而言,Cu 和 Cr 在土壤表层含量高,并沿土壤的

剖面纵深分布递减。Pb 和 Zn 的含量沿剖面纵深分布变化是先增加后减少。Cu, Zn, Pb, Cr 四种重金属在空间上的变异性以中等变异为主。

(2) 湿地土壤表层重金属在垂直于湖岸的水平方向上表现出 Cu, Cr, Pb 和 Zn 含量的高值出现在湖岸高水位带以及远离湖岸的陆相带, 含量低值出现在水陆过渡带的分布特征, 大体上呈现中间低, 两端高的变化。产生这种变化的主要原因是受水动力过程, 有机质含量和人类活动的影响。

(3) 湿地土壤中 Cu, Zn, Pb, Cr 四种重金属在 0—40 cm 剖面上的分布特征和影响因素各有不同。Cu 含量在整个研究区域的土壤内呈现了表面聚集的现象, 主要集聚在 0—10 cm。10—40 cm 土壤中 Cu 含量波动变化, 其分布受水位变化和土壤中有机的含量影响。Zn 在湿地长期水淹带各点以及陆相带各点有明显的淋溶和积聚趋势, 在 10—20 cm 的范围内有积聚层, 在水陆过渡带略微显现出表聚的现象, 分布主要受水位的影响。Pb 在水位最高点和在水陆过渡带上各点有明显的表面聚集现象。其他长期水淹带各点以及陆相带各点出现淋溶和积聚, 最高含量出现在 10—30 cm 的范围内。无论水分程度如何, 在 0—10 cm 的 Cr 的含量显著高于次表层, 呈显著的表面聚集现象, 随着土层深度的增加而迅速减少。Pb、Cr 两者的这种变化可能受水位、人为活动、土壤有机质以及植物分布等的共同作用, 影响程度如何还需进一步研究。重金属含量间的相关性说明黑马河湿地土壤中的重金属来源具有同源性。

参考文献:

- [1] 赵如金, 高晶, 王晓静, 等. 北固山湿地土壤氮磷及重金属空间分布[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 10-12.
- [2] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原形成演化及其环境资源效应研究进展[J]. 中国基础科学, 2004, 6(2): 15-21.
- [3] 汪霞, 南忠仁, 武文飞, 等. 干旱区绿洲土壤中重金属的形态分布及生物有效性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1663-1667.
- [4] 陈克龙, 李双成, 周巧富, 等. 近 25 年来青海湖流域景观结构动态变化及其对生态系统服务功能的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(2): 274-280.
- [5] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [7] 张晓霞, 李占斌, 李鹏. 黄土高原草地土壤微量元素分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 45-48.
- [8] 杨继红, 洪涛, 彭莉, 等. 滇池及青海湖沿岸土样中总铬分布[J]. 环境化学, 2002, 21(5): 519-520.
- [9] 王旭. 青海湖流域土壤元素背景值及其分异规律[D]. 西安: 中国科学院地球环境研究所, 2009: 28-32.
- [10] 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): 213-218.
- [11] 王平, 曹军骥, 吴枫. 青海湖流域表层土壤环境背景值及其影响因素[J]. 地球环境学报, 2010, 1(3): 189-200.
- [12] 杨继红, 杜远康, 彭莉, 等. 青海湖、滇池沿岸土样中某些重金属元素的含量和差异[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1): 70-72.
- [13] 陈振楼, 许世远, 柳林, 等. 上海滨岸潮滩沉积物重金属元素的空间分布与累积[J]. 地理学报, 2000, 55(6): 641-650.
- [14] Huang Jiaxiang, Yin Yong, Xu Jun, et al. Spatial distribution features and environment effect of heavy metal in intertidal surface sediments of Guanhe estuary, Northern Jiangsu Province[J]. Front Earth Sci., China, 2008, 2(2): 147-156.
- [15] Rodríguez-Salazar M T, Morton-Bermea O, Hernandez-Alvarez E, et al. The study of metal contamination in urban topsoils of Mexico City using GIS[J]. Environ. Earth Sci., 2011, 62(5): 899-905.
- [16] 李光辉, 何长欢, 刘建国. 不同湿地植物的根系泌氧作用与重金属吸收[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 17-20.
- [17] Willian T P, Bubb J M, Lestter J N. Metal accumulation within salt marsh environment: A review[J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, 28(5): 277-290.
- [18] 易秀, 谷晓静, 侯燕卿, 等. 陕西省泾惠渠灌区土壤重金属环境质量现状及评价[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 153-157.