

# 包头市不同功能区土壤重金属污染评价

张连科<sup>1,2</sup>, 张花娟<sup>2</sup>, 黄学敏<sup>1</sup>, 李玉梅<sup>2</sup>, 孙鹏<sup>2</sup>, 姚卫华<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 为了解包头市城市土壤重金属污染状况, 将包头市城区土壤按使用功能不同进行分区, 采其表层土壤进行重金属含量的测定, 并用地累积指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法对其进行评价。结果表明: 重金属元素除 Cr 外, 包头市各功能区土壤 Pb、Zn、Cu 和 Cd 含量均已超过本地区自然土壤重金属元素含量的平均值; 地累积指数法显示城区土壤中 Pb 和 Cd 为中度污染, 其他重金属为轻度污染或者无污染; 内梅罗污染指数法显示工业区、商业区和科教区均呈重度污染, 居民区和城市绿地为中度污染; 包头市城市土壤整体处于“中等”潜在生态风险危害水平, 这需要引起相关部门的注意。

**关键词:** 包头; 功能区; 土壤重金属; 污染评价

**中图分类号:** X53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2016)02-0352-05

## Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in Different Function Areas in Baotou

ZHANG Lianke<sup>1,2</sup>, ZHANG Huajuan<sup>2</sup>, HUANG Xuemin<sup>1</sup>, LI Yumei<sup>2</sup>, SUN Peng<sup>2</sup>, YAO Weihua<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. College of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

**Abstract:** In order to understand the pollution status of soil heavy metal in different function areas in Baotou, we analyzed the heavy metal in the surface soil, and used the geoaccumulation index, the Nemerow Indices and the potential ecological risk to estimate pollution levels. The result shows that the heavy metals such as Pb, Zn, Cu and Cd are above the background value of soil in Baotou except for Cr. The geoaccumulation index shows that the pollution status of Pb and Cd in the soil of the urban area is in middle level pollution, the others are in the mild contamination or pollution-free. The Nemerow Indices displayed in industrial area, commercial area and science or education area are in severe pollution, residential areas and urban green space belong to the moderate pollution. Soils in Baotou City as a whole are at the ‘medium’ the potential ecological risk level, to which should be paid the attention by relevant departments.

**Keywords:** Baotou; functional areas; soil heavy metal; pollution assessment

重金属是典型的土壤污染物, 因其具有隐蔽、难降解、移动性差和易被富集等特性, 且可通过大气、水体或食物链直接或间接地进入人体, 使人体产生慢性中毒甚至“三致”效应<sup>[1-2]</sup>, 已引起了社会和学术界的广泛关注<sup>[3]</sup>。

重金属污染是指由铅、镉、汞、铬和类金属砷等生物毒性显著的金属及有一定毒性的锌、铜、镍、钴等元素所引起的污染<sup>[4]</sup>。与自然土壤相比, 城市土壤受到人类活动的影响强烈, 土地利用状况、人类干扰程度及与污染源距离的不同使得各城市土壤重金属的来源、分布不同; 同一城市不同功能区甚至同一功能区重金属含量也可能存在显著差异<sup>[5-8]</sup>。研究表明我国局部区域已经受到很严重的土壤重金属污染<sup>[9]</sup>。

包头是国务院首批确定的十三个较大城市之一, 是中国少数民族地区建设最早的工业城市, 是国家重要的基础工业基地, 拥有涵盖稀土、钢铁制造、冶金、机械制造及军工等多项支柱产业。包头市工业迅猛发展的同时, 以各种形式排放的重金属对周边环境带来巨大威胁, 个别地区甚至出现了农田耕种功能丧失, 居民骨质疏松、半身不遂乃至癌症等地方病多发现象。为此, 很多学者开始关注和开展有关包头市重金属污染土壤的相关研究, 目前多集中于对农田、郊区、工企业周边和矿区等区域土壤重金属污染状况的调查及评价, 对包头市各功能区的总体研究则极为少见<sup>[10-16]</sup>。本研究从土壤利用方式出发, 将包头市城区土壤划分为城市绿地、居民区、科教区、商业区、工业区 5 大功能

区,共采集土壤样品 88 个,分析土壤样品中 Cu,Zn,Pb,Cd,Cr 的含量,并利用地累积指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法对研究区域土壤重金属的污染状况进行评价,利用相关性分析解析包头市土壤重金属的可能来源,以期对包头市城市土壤环境的保护及土地资源的合理和可持续利用提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

包头地处内蒙古自治区西部,地理坐标为东经 109°50"—111°25"、北纬 41°20"—42°40",总面积为 27 691 km<sup>2</sup>,平均海拔 1 125 m,属半干旱中温带大陆性季风气候,全年平均气温为 7.2℃,年平均风速 1.2 m/s,年降水总量 421.8 mm,年日照时数 2 882.2 h。全市常住人口 276.6 万人,其中市区人口 226.8 万人。包头市矿产资源丰富,是自治区制造业、工业中心,是呼包银经济带、呼包鄂城市群的中心城市,是中国重要的基础工业基地和全球轻稀土产业中心,被誉为“草原钢城”、“稀土之都”。

1.2 样品采集及测试

2014 年 10—11 月,在包头市昆都仑区、东河区、九原区、青山区按照一定的路线和随机多点混合原则,采用 GPS 定位,采集地表 0—20 cm 的土壤样品,每个样品均由临近相同类型的 5 个点的土壤样品均匀混合而成,每个采样点采集土壤样品不少于 1 kg,保存于聚乙烯塑料袋中,并注明采样日期、采样地点等。其中城市绿地、居民区、科教区、商业区、工业区分别布设 21,22,7,8,30 个采样点,共 88 个采样点。土壤样品在室内自然风干后,剔除植物残体、碎石,经研磨过 20 目和 100 目尼龙筛后装入聚乙烯塑料袋中保存待测。为防止人为因素影响,样品采集、混合、粉碎、研磨、装袋等处理过程均采用木头、塑料、玛瑙等

用具,避免与金属接触。

土壤样品进行消解后,采用石墨炉原子吸收分光光度法(美国赛默飞公司 AA800 型)对 Cd,Pb(GB/T17141—1997)含量进行测定,采用火焰原子吸收分光光度法对 Cu,Zn(GB/T17138—1997)和 Cr(HJ491—2009)含量进行测定。试验所用 Cu,Zn,Pb,Cr,Cd 的混合标准液购于国家物质研究中心、其他药品均为优级纯,所用玻璃器皿和塑料器皿均用 10% 优质纯硝酸浸泡 24 h,然后用超纯水洗涤,试验过程中所用。消解过程中均设置空白样品,分析过程中均加入国家标准土壤参比物质(GSS-1)进行质量控制。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 多元统计分析 对得到的数据进行均值、标准差、范围、变异系数等描述性统计,然后采用相关性分析对重金属来源进行解析。以上统计分析均利用 SPSS 19.0 和 Excel 2003 进行。

1.3.2 地累积指数法 地累积指数法是德国海德堡大学的 Muller 教授于 1969 年提出的一种用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,近年来被国内外学者应用于土壤重金属污染的评价,并取得了较好的效果。其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{k B_n}$$
 (1)

式中: $I_{geo}$ ——地质累积指数; $C_n$ ——样品中元素 n 的测定浓度(mg/kg); $B_n$ ——沉积物中该元素的地球化学背景值,有时也采用当地无污染区域该元素含量作为背景值(mg/kg),本文选用内蒙古自治区土壤重金属背景值均值; $k$ ——修正指数,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),用来表征沉积特征、岩石地质及其他影响。

根据  $I_{geo}$  的计算结果,重金属的污染程度共分为 7 级(0—6 级),具体如表 1 所示。

表 1 地累积指数与污染程度分级

污染指数	5~10	4~5	3~4	2~3	1~2	0~1	≤0
分级	6	5	4	3	2	1	0
污染程度	严重污染	重污染	偏重污染	中度污染	偏中度污染	轻度污染	无污染

1.3.3 内梅罗综合污染指数法 内梅罗综合污染指数法是在单因子指数评价基础上进行的一种兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量指数。具体公式如下所示:

$$P_n = \{ [(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2] / 2 \}^{\frac{1}{2}}$$
 (2)

式中: $P_n$ ——综合污染指数; $C_i$ ——污染物的实测浓度(mg/kg); $S_i$ ——污染物的评价标准(mg/kg),本文选用内蒙古土壤重金属元素的平均背景值作为污染物的评价标准。

内梅罗综合污染指数评价标准见表 2。

表 2 内梅罗指数分级标准

等级划分	$P_n$	污染等级	污染水平
1	$P_n \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_n \leq 1$	警戒线	尚清洁
3	$1 < P_n \leq 2$	轻度污染	土壤轻度开始污染
4	$2 < P_n \leq 3$	中度污染	土壤受中度污染
5	$P_n > 3$	重度污染	污染已很严重

1.3.4 潜在生态风险评价法 潜在生态风险评价法是 1980 年瑞典科学家 Hankanson 根据重金属性质

及环境行为特点,从沉积学角度提的对土壤中重金属污染评价的方法,考虑了土壤的重金属含量,并且将重金属的生态效应、环境效应和毒理学综合考虑,采用等价属性指数分级法评价。RI 为多种重金属综合潜在生态风险指数,其数值等于各个重金属潜在生态危险系数之和。

$$RI=\sum_{i=1}^nE_r^i=T_r^i\times C_f^i=T_r^i\times (C_{表}^i/C_n^i) \tag{3}$$

式中: $C_{表}^i$ ——重金属的实测含量; $C_n^i$ ——计算所参比的数值(mg/kg),文中采用内蒙古土壤环境背景值作为参照标准; $C_f^i$ ——某一重金属的污染参数; $T_r^i$ ——第*i*种重金属元素的毒性系数; $E_r^i$ ——第*i*种重金属的潜在生态危害指数。重金属元素的毒性系数、参比值和评价标准分别见表 3、4。

表 3 重金属元素的参比值和毒性系数

重金属	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn
$T_r^i$	30	5	2	5	1
$C_n^i$ (内蒙古)	0.045	13.9	39.3	14.2	53.8

2 结果与分析

2.1 土壤重金属的污染状况

2.1.1 包头市土壤重金属含量 对样品中 5 种重金

表 5 包头市土壤重金属平均含量

元素	含量范围/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	平均值±标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异 系数/%	超标 率/%	内蒙古土壤背景/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	比值
Cr	12.85~109.75	35.60±13.97	39.24	25.00	39.3	0.91
Pb	11.76~168.00	39.82±28.23	70.89	93.18	13.9	2.86
Cd	0.012~1.822	0.292±0.355	121.57	86.36	0.045	6.49
Zn	33.20~227.03	79.45±40.11	50.48	70.45	53.8	1.48
Cu	1.43~237.16	27.76±27.00	97.26	95.45	14.2	1.95

注:比值为平均值/内蒙古土壤背景值,下同。

2.1.2 包头市不同功能区土壤重金属含量 将所有样品的 5 种重金属含量按功能区不同进行分析,所得结果见表 6。由表 6 可知,包头市各个功能区土壤中 Cu,Zn,Pb,Cd 均发生不同程度的污染,其中 Cu 在各功能区土壤中的污染为工业区>科教区>居民区>商业区>城市绿地,Zn,Pb 的污染均为工业区>科教区>居民区>城市绿地>商业区,Cd 的污染为工业区>商业区>科教区>城市绿地>居民区;包头市各功能区 Cr 的污染程度相对其他重金属较轻,都与背景值接近或者低于背景值,说明其未受到人为活动影响或者影响较小。5 种重金属含量均表现为工业区最大,其中尤以 Cd 污染最为突出,含量为评价基准的 10.40 倍,Pb,Cu,Zn 和 Cr 依次为 3.67,2.69,1.85,1.04 倍。

2.2 不同功能区土壤重金属环境质量评价

2.2.1 地累积指数法评价 由公式 1 计算得到各功能区土壤中 5 种重金属的地累积指数见表 7。Cd 在

属元素含量进行分析,所得结果见表 5。其中,Cu,Zn,Pb,Cd 4 种重金属含量普遍超过背景值,其超标率分别为 95.45%,70.45%,93.18%和 86.36%,超标倍数为 1.95,1.48,2.86,6.49;Cr 超标率仅为 25.00%,总体显示未超标。在重金属含量分析中,变异系数可以反映总体样本中各采样点平均变异程度,变异系数越大,说明所在地土壤受人类活动干扰越强烈,重金属在空间上的分布差异越大。本文研究的 5 种重金属变异系数大小顺序为: Cd>Cu>Pb>Zn>Cr,具体数值分别为 121.57%,97.26%,70.89%,50.48%和 39.24%。可见,Cd、Cu,Pb 的变异性较强,空间分布差异显著,受人类工业生产、交通、商业等活动的干扰较为强烈;而 Zn 和 Cr 受人类活动的干扰则较小。

表 4 单个重金属的生态风险系数及综合生态风险指数的等级标准

潜在生态 风险因子	潜在生态 风险指数 RI	分级	潜在生态 危机程度
≤40	≤150	1	轻微生态危机
40~79	150~299	2	中等生态危机
80~159	300~600	3	强生态危机
160~320	>600	4	很强生态危机
>320	—	5	极强生态危机

各功能区的地累积指数为工业区>商业区>科教区>城市绿地>居民区,在工业区表现为中度污染,在其他功能区表现为偏中度污染;Pb 在各功能区的地累积指数为工业区>科教区>居民区>城市绿地>商业区,在工业区表现为偏中度污染,其他区域为轻度污染;Cu 在工业区、科教区和居民区表现为轻度污染,在其余区域地累积指数均小于 0,呈现出未污染势态;Zn 在工业区表现为轻度污染,在其他功能区属于无污染;而 Cr 在各功能区土壤样品中地累积指数均小于 0,属于无污染。由此可以发现,Pb 和 Cd 为包头市土壤污染的主要因子。

2.2.2 内梅罗污染指数评价 由公式 2 计算得出包头市各功能区土壤重金属内梅罗指数,并按照表 2 对包头市各功能区土壤重金属进行评价,评价结果见表 8。不同功能区土壤重金属污染指数大小为:工业区(7.86)>商业区(3.63)>科教区(3.62)>居民区

(2.73)>城市绿地(2.62),其中,科教区、商业区和工业区内梅罗综合污染指数较高,呈重度污染,其他功能区呈中度污染。总之,包头市土壤已经受到很大程度的重金属污染,应该引起有关部门的高度重视。

表 6 不同功能区土壤重金属含量						mg/kg
重金属	科教区	城市绿地	居民区	商业区	工业区	
Cu 平均值	24.26±6.62	17.77±9.69	24.13±13.72	19.89±7.67	38.16±43.22	
比值	1.71	1.25	1.70	1.40	2.69	
Zn 平均值	77.70±23.03	66.68±31.59	71.34±31.62	58.49±31.05	99.37±49.77	
比值	1.44	1.24	1.33	1.09	1.85	
Pb 平均值	35.01±9.28	29.24±10.01	34.50±13.17	27.70±11.63	51.03±36.89	
比值	2.52	2.10	2.48	1.99	3.67	
Cd 平均值	0.207±0.143	0.152±0.109	0.150±0.093	0.213±0.173	0.468±0.448	
比值	4.60	3.38	4.73	4.73	10.40	
Cr 平均值	40.14±17.21	32.00±9.69	33.69±10.05	27.79±4.56	40.95±18.24	
比值	1.02	0.81	0.71	0.71	1.04	

注:表中数据为平均值±标准差。

表 7 不同功能区土壤重金属的地累积指数 $I_{geo}$					
分区	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr
科教区	0.75	0.19	-0.05	1.62	-0.55
城市绿地	0.49	-0.26	-0.28	1.17	-0.88
居民区	0.73	0.18	-0.18	1.15	-0.81
商业区	0.41	-0.10	-0.46	1.66	-1.08
工业区	1.29	0.84	0.30	2.79	-0.53

2.2.3 潜在生态风险进行评价 根据公式 3 计算得出各功能区土壤重金属元素潜在生态风险指数见表 9。由表 9 可知,Cd 在工业区生态风险指数为 312,介于 160~320,表现“强”生态风险危害,在其他功能区的生态风险指数均处于 80~160,总体表现为“中等”潜在生态危害;而 Cu,Zn,Pb 和 Cr 在 5 个功能区

的生态风险指数均小于 40,处于“轻微”的生态风险等级,无潜在生态风险影响。结合表 9 所列 RI 值和表 4 生态风险评价标准可知:工业区处于“强”潜在生态危害等级,商业区、居民区、科教区处于“中等”潜在生态危害等级,城市绿地处于“轻微”潜在生态危害等级,而包头市整体处于“中等”潜在生态危害水平。

表 8 包头市城区土壤重金属内梅罗指数					
	$P_n$	污染指数	污染等级	等级划分	污染水平
城市绿地	2.69	$2 < P_n \leq 3$	中度污染	4	受中度污染
居民区	2.73	$2 < P_n \leq 3$	中度污染	4	受中度污染
科教区	3.62	$P_n > 3$	重度污染	5	污染已很严重
商业区	3.63	$P_n > 3$	重度污染	5	污染已很严重
工业区	7.86	$P_n > 3$	重度污染	5	污染已很严重

表 9 重金属元素潜在生态风险指数及划分等级							
功能区	生态风险指数 $E_r^i$					RI	生态危害指数
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr		
城市绿地	6.26	1.24	10.52	101.33	1.63	120.98	轻微
居民区	8.50	1.33	12.41	100.00	1.71	123.95	中等
科教区	8.54	1.44	12.59	138.00	2.04	162.62	中等
商业区	7.00	1.09	9.96	142.00	1.41	161.47	中等
工业区	13.44	1.85	18.36	312.00	2.08	347.72	强
均值	8.75	1.39	12.77	158.67	1.78	183.35	中等

3 讨论

本研究中对包头市 5 种重金属的含量分析及污染评价结果均显示 Cd 超标最为严重,尤其是工业区 Cd 超标 10.40 倍,污染等级最重,呈现“强”潜在生态危害等级。研究表明<sup>[17]</sup>Cd 主要来源于工业活动,如冶炼厂的废水、尘埃和废渣等,施用磷肥、含锌肥料等也会带来一定程度的 Cd 污染。本研究所选的工业区及

部分绿地监测点位于包钢集团、希望铝业等厂区附近,上述企业各个生产加工环节产生的废气、废渣、废液直接或间接借助空气的扩散传播作用而降落于土壤并产生富集,造成工业区及附近绿地 Cd 的实际含量远超过其背景值。除 Cd 外,Pb,Cu 与 Zn 的超标现象也较为普遍。Pb 主要来源于汽车尾气排放,Cu,Zn 主要来源于汽油、车体的磨损等<sup>[17]</sup>;此外,交通活动产生的灰尘经外力扬起沉积在周围土壤中,也会导致土

壤中 Pb、Zn 和 Cu 含量升高;同时,工业活动对 Pb、Cu 和 Zn 的影响也不容忽视。包头地区 Cr 主要来自于自然源,受成土母质控制,人为影响较小。

采用地累积指数法、内梅罗污染指数法和潜在生态危害指数法对包头市 5 种重金属的评价结果总体一致,但因地累积指数法侧重评价单一重金属对不同功能区土壤的污染,不考虑多种重金属的协同作用,因此判定的污染等级较其他两种方法较轻。内梅罗污染指数法与潜在生态危害指数法分别从重金属污染程度和生态风险两方面评价了 5 种重金属综合作用下各功能区的污染等级和生态风险等级,两种方法的定量评价结果分别为工业区(7.86) > 商业区(3.63) ≈ 科教区(3.62) > 居民区(2.73) > 城市绿地(2.62) 和工业区(347.72) > 科教区(162.62) ≈ 商业区(161.47) > 居民区(123.95) > 城市绿地(120.98),虽然两种评价方法中城市绿地和居民区所得数值顺序相反但大小非常接近,因此认为两种方法具有很强的一致性。但污染评价定性结果为工业区、商业区、科教区重度污染,居民区与城市绿地轻度污染;生态风险评价定性结果为工业区“强”潜在生态危害,商业区、居民区、科教区“中等”潜在生态危害,城市绿地“轻微”潜在生态危害,差别较大。这主要是因为有些功能区污染评价或生态风险评价的计算结果与等级划定界限特别接近所致。综合考虑上述因素,对包头市重金属的环境危害进行评价时,考虑多种金属共同作用的综合评价法较单一金属评价方法更能反映实际的土壤污染状况;对同一对象,多种评价方法并行对该对象的实际污染状况的判断更为准确和全面。

## 4 结论

(1) 包头市土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量普遍超过背景值,其中 Cd 超标最严重;人类活动对包头市土壤中 Cd、Cu、Pb 均产生了较大影响。

(2) 不同重金属对不同功能区土壤污染情况不同。所有重金属在工业区含量均明显高于其他区;各功能区受 Cd 的污染最为严重,Pb、Cu 次之。采用地累积指数法对包头市土壤进行评价表明,Cd 和 Pb 已呈现中度污染,其他重金属为轻度污染或者无污染。不同功能区土壤重金属内梅罗污染指数大小为:工业区(7.86) > 商业区(3.63) > 科教区(3.62) > 居民区(2.73) > 城市绿地(2.62),工业区、商业区和科教区均已呈重度污染,居民区和城市绿地中度污染。

(3) 从生态风险评价结果来看,包头市城市土壤目前整体处于“中等”潜在生态风险危害水平,其中仅

因 Cd 的贡献已使工业区处于“强”生态风险危害等级,为此应对包头市城市土壤尤其是工业区的 Cd 污染给予高度关注和防治。

### 参考文献:

- [1] 陈满怀.土壤环境学[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] 管东生,陈玉娟,阮国标.广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响[J].中山大学学报:自然科学版,2001,40(4):93-96.
- [3] 孟昭虹,周嘉,郑元福.哈尔滨市城市土壤重金属生态风险评价[J].水土保持研究,2009,16(2):152-155.
- [4] 郑喜坤,鲁安怀,高翔,等.土壤中重金属污染现状与防治方法[J].土壤与环境,2002,11(1):79-84.
- [5] 余健,房莉,方凤满,等.芜湖市不同功能区土壤重金属污染状况与环境质量评价[J].水土保持学报,2010,24(2):210-213,217.
- [6] 秦普丰,刘丽,侯红,等.工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评价[J].生态环境学报,2010,19(7):1668-1674.
- [7] 孙文惠.呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[D].呼和浩特:内蒙古大学,2012.
- [8] 马建华,李灿,陈云增.土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响:以开封市为例[J].土壤学报,2011,48(4):744-750.
- [9] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [10] 张庆辉,王贵.包头市农田表层土壤重金属含量综合评价[J].安徽农业科学,2008,36(31):13527-13528,13546.
- [11] 张庆辉,王贵,朱晋.包头南郊灌溉区农田表层土壤重金属潜在生态风险综合评价[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(7):181-186,192.
- [12] 唐力.包头市常见绿化树种体内与生境土壤中重金属元素含量的相关分析研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [13] 郭伟,赵仁鑫,张君,等.内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J].环境科学,2011,32(10):3009-3105.
- [14] 王贵,王芳.重工业城市土壤重金属含量分布特征及污染评价:以包头市为例[J].干旱区资源与环境,2008,22(8):170-173.
- [15] 王贵,姚德,郜睿智.公园土壤重金属含量水平及污染评价[J].山东理工大学学报:自然科学版,2007,21(5):1-4.
- [16] 徐清,张立新,刘素红,等.表层土壤重金属污染及潜在生态风险评价:包头市不同功能区案例研究[J].自然灾害学报,2008,17(6):6-12.
- [17] 宋玉芳,许华夏,任丽萍,等.土壤重金属污染对蔬菜生长的抑制作用及其生态毒性[J].农业环境科学学报,2003,22(1):13-15.