

永康城市土壤重金属污染评价及来源分析

钱 力, 张 超, 齐 鹏, 余树全

(浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 基于浙江省永康市市域范围内 7 种土地利用类型的采样点共计 203 个, 利用描述性统计分析、单因素评价分析、内梅罗综合污染指数、相关性分析、主成分分析和聚类分析等方法对研究区土壤表层重金属质量分数、污染程度和重金属相关关系及来源进行研究。结果表明: ①永康市城市土壤表层重金属砷(As), 钴(Co), 铬(Cr), 铜(Cu), 锰(Mn), 镍(Ni), 铅(Pb), 钛(Ti), 钒(V), 锌(Zn)的平均质量分数为 6.57, 10.57, 119.55, 22.978, 528.51, 22.45, 37.67, 5751.81, 84.37, 90.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; ②研究区表层土壤均呈现为轻度及以上污染水平, 重金属元素的平均单因素污染指数由大到小依次为铬>镍>钒>钴>钛>铜>锌>锰>铅>砷; 平均内梅罗综合污染指数由高到低排序为工业用地>交通过用地>公园绿地>住宅用地>林地>市政文教用地>耕地。③永康市城市土壤表层中铬、铜、镍、铅、锌元素主要来源与当地的五金制造业和交通运输, 砷和钒主要来源于工业与自然成土过程中的元素积累, 钴和钛主要来源于五金制造业。图 2 表 8 参 22

关键词: 环境污染与防治; 重金属元素; 城市土壤; 主成分分析; 永康市

中图分类号: X53; S7-05 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2016)03-0427-07

Sourcing and evaluating heavy metal pollution in the urban topsoil of Yongkang City

QIAN Li, ZHANG Chao, QI Peng, YU Shuquan

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To assess pollution characteristics and the degree of heavy metal pollution and to discuss their probable sources, the topsoil of Yongkang City was divided into seven zones based on a survey of the region. Altogether 203 urban soil samples were collected, and ten kinds of heavy metal elements were analyzed. Then a single factor evaluation and the Nemerow integrated pollution index for different functional zones were employed to investigate pollution characteristics of heavy metals. Also a multivariate statistical analysis was used to analyze sample dates. Results showed that mean concentrations for heavy metals (in $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) were As (6.57), Co (10.57), Cr (119.55), Cu (22.97), Mn (528.51), Ni (22.45), Pb (37.67), Ti (5751.81), V (84.37), and Zn (90.25). The single factor integrated pollution index for order of different heavy metals was $\text{Cr} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Co} > \text{Ti} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{As}$, and the Nemerow integrated pollution index order was industrial zone > traffic zone > parkland zone > residential zone > woodland zone > municipal zone > cultivated land. Results of the principal component analysis indicated that Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were mainly from hardware manufacturing industry and local transportation; As and V came from industrial and natural soil forming processes; and Co and Ti mainly originated from hardware manufacturing industry. [Ch, 2 fig. 8 tab. 22 ref.]

Key words: environmental pollution and control; heavy metals; urban soils; principal component analysis; Yongkang City

收稿日期: 2015-04-10; 修回日期: 2015-05-27

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027)

作者简介: 钱力, 从事恢复生态、城市生态研究。E-mail: bake_li@163.com。通信作者: 余树全, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林生态、恢复生态和生态规划研究。E-mail: yushq@zafu.edu.cn

城市土壤作为地球土壤圈的重要组成部分,是构成城市环境的一部分,在人类居住环境质量、城市生态功能等方面有着重要的作用^[1]。随着城市化的推进,人类活动将大量的污染物带入城市环境中^[2],城市土壤中的重金属通过地面扬尘、食物链传递等途径破坏城市生态环境,造成了城市环境污染,并在一定程度上威胁人类的健康^[3]。中国对于城市土壤重金属的研究起步较晚,但目前相关学者已对许多大中型城市^[4],如海口^[3]、北京^[5]、南京^[6]等地土壤铅(Pb),锌(Zn),铜(Cu),铬(Cr),钛(Ti)等重金属污染含量、分布、来源等方面进行研究。浙江省永康市主要以防盗门、滑板车、五金机械、建材等为主要支柱产业,产业的集聚,给当地带来了巨大的规模效应,但却对周边环境造成了一定程度的影响^[7]。本研究基于浙江省土壤表层背景值^[8]和金衢盆地土壤背景值^[9],研究土壤表层重金属来源,为全面了解永康城市土壤表层重金属的污染现状积累基础资料,准确评估永康市城市发展、规划管理及环境保护提供参考依据。

1 研究区概况

永康市,隶属浙江省金华市,位于浙江省中部低山丘陵地区,地理坐标为 28°46'~29°07'N, 119°53'~120°21'E。永康市是浙江中部城市群副中心城市,五金机械、电动工具、防盗门、保温杯、滑板车等制造业集中,是全国现代五金产业中心之一^[7]。本次研究土壤采集的采样点遍及永康市城市范围,西启城西新区,东至五金工业园,北启西城街道,南至江南街道。

2 研究方法

本研究在永康市城区 7 种不同土地利用类型内采集土壤样品,利用手持式能量色散型 X 射线荧光分析仪研究砷(As),钴(Co),铬(Cr),铜(Cu),锰(Mn),镍(Ni),铅(Pb),钛(Ti),钒(V),锌(Zn)共 10 种重金属元素的特征。

2.1 样地选取与取样

本次土壤采集的采样点按照《全国土壤污染状况调查点布置技术规定》进行布点,并参照土地利用类型,在 7 种土地利用类型上布置样点共计 203 个,于 2014 年 10 月 17 日至 2014 年 10 月 18 日在永康市市区进行现场土壤样本采样。在 203 个样点中,交通用地 24 个,工业用地 25 个,住宅用地 30 个,市政文教用地 11 个,公园绿地 18 个,林地 33 个,耕地 62 个。

2.2 样品测试

土壤样品的元素质量分数分析利用 X-MET7000 手持式能量色散型 X 射线荧光(EDXRF)分析仪,测试完成于浙江农林大学生态学实验室。手持式能量色散 X 射线荧光分析仪(国家农业信息化工程技术研究中心、北京普析通用仪器有限公司研制),配置 Ag 靶微型 X 光管、Al+Mo 滤片、电子冷却 Si-PIN 探测器。测试电压 30 kV,测试电流 40 μ A。

2.3 数据处理

2.3.1 单因素评价分析 单因素评价分析可以分别反映不同污染物对环境的污染程度。在本研究中,为了同时反映当地区域的土壤表层重金属特征,以金衢盆地土壤元素背景值作为重金属评价标准的临界值。 $P_i=C_i/S_i$ 。其中: P_i 为第 i 种重金属的污染分指数; C_i 为第 i 种重金属元素的实测质量分数; S_i 为重金属评价标准的临界值,本研究中为金衢盆地土壤元素背景值^[7]。 $P_i \leq 1$ 表示未污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示存在潜在污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示造成轻度污染, $P_i > 3$ 表示当地区域土壤已受到该元素重度污染。

2.3.2 内梅罗污染综合指数评价 内梅罗指数法是当前国内外进行综合污染指数计算的最常用方法之一。公式为: $P_n = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}}$ 。其中: P_n 为内梅罗污染综合指数; $P_{\max}$ 为污染物种最大的污染指数; P_{ave} 为各污染元素指数的算术平均值。根据内梅罗污染指数,可将污染等级划分为 5 个不同等级^[10-12],具体划分标准如表 1。

表 1 表层土壤内梅罗指数分级标准

Table 1 Classification standard of the Nemerow integrated pollute index

土壤综合污染等级	土壤综合污染指数	污染程度	污染水平
I	$P_n \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_n \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P_n \leq 2.0$	轻污染	污染物超过起初污染值，作物开始污染
IV	$2.0 < P_n \leq 3.0$	中污染	土壤和作物污染明显
V	$P_n > 3.0$	重污染	土壤和作物污染严重

3 结果与讨论

3.1 重金属质量分数特征

永康市城市土壤表层重金属元素质量分数如表 2 所示。重金属砷、钴、铬、铜、锰、镍、铅、钛、钒、锌在永康市城市土壤表层的平均质量分数分别为 6.57, 10.57, 119.55, 22.97, 528.51, 22.45, 37.67, 5 751.81, 84.37, 90.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 2 永康城市土壤中的重金属质量分数特征

Table 2 Concentration of heavy metals of the soils in Yongkang

项目	元素质量分数/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)									
	砷	钴	铬	铜	锰	镍	铅	钛	钒	锌
最小值	0.01	0.12	56.43	1.41	53.67	8.28	1.80	2 628.59	0.89	39.21
最大值	46.75	66.49	740.82	440.55	1 728.69	78.11	264.01	10 244.50	229.47	932.17
平均值	6.57	10.57	119.55	22.97	528.51	22.45	37.67	5 751.81	84.37	90.25
变异系数/%	105.21	92.80	47.46	176.97	54.13	34.95	68.19	23.13	109.67	94.65
金衢盆地背景值	6.49	7.20	45.37	18.03	429.10	12.45	35.12	4 091.00	53.51	72.13
浙江省背景值	9.20	13.20	55.99	17.60	620.51	24.60	35.70	4 406.11	73.60	70.60

说明：样本数 $n=203$ 。

本研究中，变异系数值越大则表明该重金属元素在土壤中的分布受人为因素影响越大，反之则表明受自然源控制显著^[13]。由表 2 可知：永康市城市土壤表层重金属质量分数的离散程度较大，其中铜质量分数的变异系数最高，属强变异；钒和砷的变异系数次之，同属强变异。由此可见：永康市人为活动对城市土壤中重金属质量分数的干扰程度较强，部分区域的重金属污染已比较显著^[14]。

永康市城市土壤表层重金属质量分数与浙江省土壤表层背景值和金衢盆地土壤背景值的比值如图 1 所示，其中，金属铬有明显的富集现象，其质量分数分别是浙江省土壤表层背景值的 2.1 倍和金衢盆地土壤背景值的 2.6 倍。

3.2 土壤重金属污染评价

3.2.1 单因素污染评价 运用单因素污染指数对永康市城市土壤表层中 10 种重金属进行污染程度评价，评价结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 可知：永康市城市土壤表层受重金属污染的状况并没有十分严重，除铬的污染程度达到轻度污染，其余各元素都处于潜在污染。各元素的染指数由大到小依次为铬>镍>钒>钴>钛>铜>锌>锰>铅>砷。由表 4 可知：铬在研究区的污染程度最为普遍，所有样点的土壤表层都在一定程度上受到该元素的污染，表现为重度污染样点占有所有采样点的 14.78%，轻度污染样点占有所有采样点的 72.91%。

3.2.2 内梅罗污染指数评价 单因素评价分析虽然能较明显地反映出各重金属元素对土壤的污染程度，但由于土壤中各重金属元素间存在一定的联系，共同对土壤产生作用，所以运用单因素评价对土壤污染

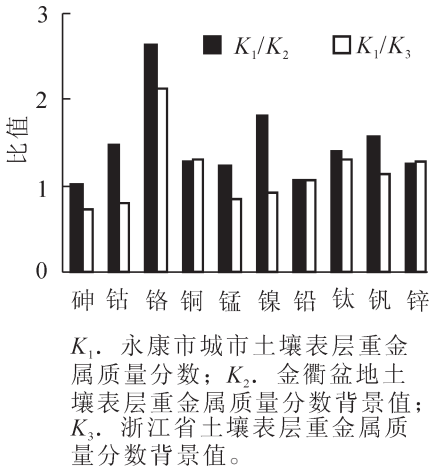


图 1 永康市城市土壤表层重金属富集状况

Figure 1 Enrichments of heavy metals of the soils in Yongkang

表3 永康市土壤表层重金属单因素评价统计(无量纲)

Table 3 Single-factor pollution index of heavy metals of city topsoil in Yongkang

项目	砷	钴	铬	铜	锰	镍	铅	钛	钒	锌
最小值	0.002	0.016	1.243	0.078	0.125	0.665	0.051	0.643	0.017	0.544
最大值	7.203	9.234	16.328	24.434	4.027	6.274	7.514	2.944	4.288	12.943
平均值	1.012	1.468	2.635	1.274	1.232	1.803	1.073	1.406	1.577	1.251
污染程度	潜在污染	潜在污染	轻度污染	潜在污染	潜在污染	潜在污染	潜在污染	潜在污染	潜在污染	潜在污染

表4 永康市土壤表层重金属单因素评价统计结果

Table 4 Results of city topsoil single-factor pollution index of heavy metals in Yongkang

污染程度	砷	钴	铬	铜	锰	镍	铅	钛	钒	锌
未污染	120	86	0	131	91	3	115	11	106	110
潜在污染	54	77	25	55	89	142	79	180	10	77
轻度污染	17	18	148	4	18	50	5	12	26	7
重度污染	12	22	30	13	5	8	4	0	61	9

评价并不能如实反映各重金属元素的共同作用。本研究用内梅罗综合污染指数法来评价永康市城市表层土壤重金属元素的综合污染程度。由表5可知：永康市城市表层土壤受重金属的复合污染已不容忽视，永康市城市表层土壤的平均内梅罗综合污染指数为2.63，为中度污染，此时土壤和作物相应也受到中等程度的重金属污染。不同用地类型下的城市表层土壤均呈现为轻度及以上污染水平，平均内梅罗综合污染指数由高到低排序为：工业用地>交通用地>公园绿地>住宅用地>林地>市政文教用地>耕地。

表5 耕地表层土壤重金属内梅罗污染指数评价统计

Table 5 Nemerow integrated pollute index of heavy metals of city topsoil in cultivated land

	永康市	交通用地	工业用地	住宅用地	市政文教用地	公园绿地	林地	耕地
最大值	17.94	6.59	17.94	10.60	1.32	6.73	5.35	4.33
最小值	0.88	1.48	1.82	1.37	2.11	1.88	0.99	0.87
平均值	2.63	3.20	3.74	2.72	1.88	2.84	1.98	1.83
污染程度	中度污染	重度污染	重度污染	中度污染	轻度污染	中度污染	轻度污染	轻度污染

3.3 土壤重金属来源分析

3.3.1 重金属相关性分析 相关系数(r)是用于研究变量之间线性相关程度的指标^[15]。在本研究中，相关系数的值代表各金属元素的同源性，若为正代表两者具有同源的可能性，反之亦然；而相关系数的绝对值越大，说明变量间的线性相关越强，同源的可能性越大。通过表6可知：永康市城市土壤表层中大多数重金属之间存在着显著或极显著的相关性，其中，66.67%为正相关关系，33.33%为负相关关系。铜和锌的相关性最大，为0.894，呈极显著正相关；铬和铜、铬和镍、铜和镍、铬和锌的相关性次之。

表6 永康市城市土壤表层重金属元素含量相关性

Table 6 Relation coefficient of heavy metals of the urban soils in Yongkang

	砷	钴	铬	铜	锰	镍	铅	钛	钒	锌
砷	1									
钴	0.281**	1								
铬	0.211**	0.128	1							
铜	0.083	-0.064	0.800**	1						
锰	0.121	0.193**	0.165*	0.145*	1					
镍	0.195**	-0.023	0.784**	0.735**	0.025	1				
铅	-0.230**	-0.109	0.348**	0.597**	0.080	-0.427**	1			
钛	-0.074	0.500**	-0.249**	-0.268**	0.072	-0.280**	-0.054	1		
钒	0.451**	-0.126	0.148*	0.084	-0.001	0.155*	-0.119	-0.419**	1	
锌	0.103	-0.089	0.717**	0.894**	0.255**	0.643**	0.641**	-0.252**	0.102	1

说明：** $P < 0.01$ ；* $P < 0.05$ 。

由此可知：研究区内的土壤表层中， 铬、铜、镍、锌这 4 种重金属污染可能具有相同的污染源。与此同时， 锌和铅、 锌和镍、 铅和镍均呈极显著正相关， 且相关系数较大； 钴与钛也呈极显著正相关。

3.3.2 主成分分析 对研究区采集的 203 个样本得到的砷、钴、铬、铜、锰、镍、铅、钛、钒、锌等 10 种重金属质量分数进行主成分分析， 分析得出主成分贡献率、 累计贡献率、 因子负荷矩阵如表 7 和表 8 所示， 其中旋转方式为最大方差旋转。由结果分析可知， 永康市城市土壤表层重金属污染来源主要由 3 个主成分所支撑， 累积贡献率为 72.20%， 说明该结果在很大程度上能真实地反映出永康市城市土壤表层重金属污染来源的情况。其中， 3 个主成分因子 F_1 ， F_2 和 F_3 对永康市城市土壤表层重金属污染的贡献率分别为 37.88%， 17.55%和16.77%。表 8 为永康市城市土壤表层重金属主成分分析的因子载荷矩阵。由表 8 可知：主成分因子 F_1 包括铬、铜、镍、铅、锌， 其贡献率为 37.88%。由于永康市五金机械、 防盗门、 保温杯等制造业集中， 而铬、 镍是不锈钢的主要化学成分， 所以工业来源是铬与镍的主要来源之一； 铜、 铅通常被认为与交通运输状况有关， 主要受机动车污染排放影响^[16-17]， 土壤中的铜、 铅也来源于工业“三废”排放、 城市生活垃圾和废水； 研究表明： 土壤中所累积的锌元素主要来源汽车轮胎的老化^[4, 18-19]。近几年来， 永康市民用汽车拥有量由 2009 年的 9.5 万辆^[20]增长到了 2013 年的 19.1 万辆^[21]， 短短 4 a 总量增长了 1 倍多。因此， 因子 F_1 主要可以归纳为是五金业与交通源的混合源。砷和钒在因子 F_2 中有较高的负荷， 因子 F_2 的贡献率为 17.55%。已知土壤中钒元素主要来源于工业生产与“三废”排放； 永康市城市土壤表层中砷的质量分数与金衢盆地土壤背景值较为接近， 说明其主要受土母质的影响。因而可知， 因子 F_2 可以归纳为工业与自然源的混合源。因子 F_3 主要有钴与钛元素， 其贡献率为 16.76%。据了解， 钴元素多用于硬质合金、 磁铁、 陶瓷和特殊玻璃的制造； 而钛元素多用于合金的制造， 也常用于油漆、 橡胶、 纸的颜料和某些轻质材料的制造。因此， 因子 F_3 也可以归结于五金业在永康市的盛行。

3.3.3 聚类分析 元素聚类分析可以有效地揭示不同元素间的来源相似性， 可以用来检验主成分分析的结果。图 2 为基于永康市 203 个城市土壤表层样点各重金属元素含量所得到的聚类树状图， 研究区所研究的 10 种重金属可以大致分为 4 类， 即铜、 锌、 铬、 镍与铅聚成一类； 钴与钛聚为一类； 砷与钒聚为一类； 锰自成一类。这与因子分析得到的分类结果几乎一致。聚类图上的距离轴反映了组间元素的关联程度， 距离越小， 关联度越显著^[22]， 反之亦然。由此可知： 在第一类中铜、 锌、 铬、 镍这 4 个元素的关联度较为显著， 其中铜和锌与铬和镍各自间的距离最近， 这与利用元素相关性研究元素间来源的结果一致(表 7)。

4 结论

基于永康市城市表层土壤 203 个样本数据， 分析测试了砷、 钴、 铬、 铜、 锰、 镍、 铅、 钛、 钒、 锌

表 7 主成分分析的特征值及贡献率

Table 7 Characteristic vectors,eigenvalues and contribution rate of PCA in Yongkang						
主成分因子	旋转前			旋转后		
	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
F_1	3.85	38.50	38.50	3.79	37.88	37.88
F_2	1.72	17.24	55.74	1.76	17.55	55.43
F_3	1.65	16.46	72.20	1.68	16.76	72.20

表 8 旋转后主成分分析的负荷矩阵

Table 8 Factor load matrix of components							
重金属元素	主成分因子负荷量			重金属元素	主成分因子负荷量		
	F_1	F_2	F_3		F_1	F_2	F_3
砷	0.064	0.809	0.337	镍	0.825	0.195	-0.014
钴	-0.056	0.088	0.877	铅	0.701	-0.420	-0.080
铬	0.851	0.230	0.146	钛	-0.286	-0.415	0.705
铜	0.948	0.026	-0.015	钒	0.071	0.804	-0.259
锰	0.212	0.072	0.449	锌	0.924	0.015	0.000

等 10 种重金属元素的质量分数, 评价了重金属的污染程度, 并在一定程度上探讨了各元素的来源, 得到以下结论: ①永康市城市表层土壤中重金属砷、钴、铬、铜、锰、镍、铅、钛、钒、锌的平均质量分数分别为 6.57, 10.57, 119.55, 22.97, 528.51, 22.45, 37.67, 5 751.81, 84.37, 90.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。②永康市城市表层土壤受重金属污染的状况整体上并没有十分严重, 但个别元素在局部地区污染较为严重, 各元素的平均单因素污染指数由大到小依次为铬>镍>钒>钴>钛>铜>锌>锰>铅>砷。③研究区表层土壤均呈现为轻度污染及以上污染水平, 平均内梅罗综合污染指数由高到低排序为: 工业用地>交通过地>公园绿地>住宅用地>林地>市政文教用地>耕地。④永康市城市土壤表层重金属污染主要受工业制造、交通运输及自然成土的影响, 其中以五金制造最为突出。

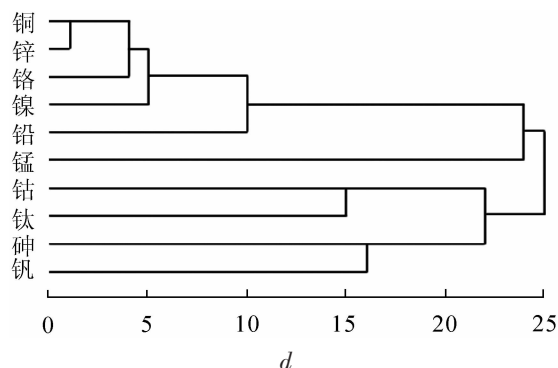


图2 永康市城市土壤表层重金属聚类分析图

Figure 2 Cluster analysis of heavy metals of urban soils in Yongkang

5 参考文献

- [1] 张浩, 王济, 曾希柏, 等. 城市土壤重金属污染及其生态环境效应[J]. 环境监测管理与技术, 2010, **22**(2): 11 – 18.
ZHANG Hao, WANG Ji, ZENG Xibai, *et al.* Heavy metal pollution in urban soil and eco-environmental effect [J]. *Admin Tech Environ Monit*, 2010, **22**(2): 11 – 18.
- [2] 林晓峰. 泉州市城市表层土壤重金属污染评价研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2011.
LIN Xiaofeng. *Assessment of Heavy Metal Pollution in the Urban Topsoil of Quanzhou City* [D]. Quanzhou: Hua Qiao University, 2011.
- [3] 何玉生. 海口城市土壤重金属污染特征与生态风险评估[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(2): 421 – 428.
HE Yusheng. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Haikou urban soils [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(2): 421 – 428.
- [4] LUO Xiaosan, YU Shen, ZHU Yongguan, *et al.* Trace metal contamination in urban soils of China [J]. *Sci Total Environ*, 2012, **421/422**(3): 17 – 30.
- [5] XIA Xinghui, CHEN Xi, LIU Ruimin, *et al.* Heavy metals in urban soils with various types of land use in Beijing, China[J]. *J Hazardous Mater*, 2011, **186**(2/3): 2043 – 2050.
- [6] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 123 – 126.
LU Ying, GONG Zitong, ZHANG Ganlin, *et al.* Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15**(1): 123 – 126.
- [7] 段慧敏. 永康市城市土壤重金属污染研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2012.
DUAN Huimin. *The Study on Heavy Metal Pollution of Urban Soils in Yongkang* [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2012.
- [8] 国家环境保护局, 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.
- [9] 汪庆华, 董岩翔, 郑文, 等. 浙江土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. 地质通报, 2007, **26**(5): 590 – 597.
WANG Qinghua, DONG Yanxiang, ZHENG Wen, *et al.* Soil geochemical baseline values and environmental background values in Zhejiang, China [J]. *Geol Bull China*, 2007, **26**(5): 590 – 597.
- [10] 曲向荣. 土壤环境学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [11] 康彩霞. GIS 与地统计学支持下的哈尔滨市土壤重金属污染评价与空间分布特征研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
KANG Caixia. *Study on Evaluation and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution in Soil of Harbin Base on GIS and Geo-statistic* [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [12] 李玉文, 王粟, 崔晓阳. 东北老工业基地不同土地利用类型土壤重金属污染特点[J]. 环境科学与管理, 2009, **24**(1): 115 – 118.

- 2011, **36**(3): 118 – 122.
- LI Yuwen, WANG Su, CUI Xiaoyang. The different land-use types characteristics of heavy metal pollution in China's Northeastern Old Industrial Base [J]. *Environ Sci Manage*, 2011, **36**(3): 118 – 122.
- [13] HAN Yongming, DU Peixuan, CAO Junji, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. *Sci Total Environ*, 2006, **355**(1/3): 176 – 186.
- [14] 许金朵. 基于 GIS 的金华市区土壤重金属含量空间分布与污染评价研究[D]. 南京：南京师范大学, 2008.
- XU Jinduo. *Research on Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Soil of Jinhua City Based on GIS* [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.
- [15] 马旺海, 曹斌, 杨进峰, 等. 城市重金属污染特征[J]. 中央民族大学学报：自然科学版, 2008, **17**(1): 66 – 73.
- MA Wanghai, CAO Bin, YANG Jinfeng, *et al.* Characteristics of urban heavy metal pollution [J]. *J Cent Univ National Nat Sci Ed*, 2008, **17**(1/2): 66 – 73.
- [16] PATERSON E, SANKA M, CLARK L. Urban soils as pollutant sinks: a case study from Aberdeen, Scotland [J]. *Appl Geochem*, 1996, **11**(1/2): 129 – 131.
- [17] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京：高等教育出版社, 2003.
- [18] BI Xiangyang, LIANG Siyuan, LI Xiangdong. A novel in situ method for sampling urban soil dust: particle size distribution, trace metal concentrations, and stable lead isotopes [J]. *Environ Pollut*, 2013, **177**(4): 48 – 57.
- [19] ZHU Zongmin, SUN Guangyi, BI Xiangyang, *et al.* Identification of trace metal pollution in urban dust from kindergartens using magnetic, geochemical and lead isotopic analyses [J]. *Atmo Environ*, 2013, **77**(3): 9 – 15.
- [20] 永康市统计局. 永康市 2009 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 2010-04-19[2015-10-19] http://www.yktj.gov.cn/tjgb/yktjgb/201409/t20140922_23363.shtml.
- [21] 永康市统计局. 永康市 2013 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 2014-04-23[2015-10-19] <http://www.yktj.gov.cn/tjgb/yktjgb/>.
- [22] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environ Poll*, 2001, **114**(3): 313 – 324.