

基于地积累指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染

何东明^{1,3}, 王晓飞^{2*}, 陈丽君², 苏 荣³

(1.广西大学化学化工学院,广西 南宁 530004; 2.广西大学轻工与食品工程学院,广西 南宁 530004; 3.广西壮族自治区环境监测中心站,广西 南宁 530028)

摘 要:采用地积累指数法和潜在生态风险指数法对广西某蔗田土壤中重金属污染进行评价。结果表明:4种重金属元素的地积累指数污染程度由强到弱依次为: Cd>Zn>Pb>Cu, 潜在生态危害指数污染程度由强到弱依次为: Cd>Pb>Cu>Zn, 其中 Zn 的影响程度发生了变化。2种评价方法的结果存在差异, 蔗田土壤的地积累指数污染程度处于无污染情况, 而潜在生态危害指数污染程度处于低度危害程度。潜在生态危害指数考虑外源重金属的富集程度和不同重金属的生物毒性的影响, 使其评价结果更准确。

关键词:蔗田土壤; 重金属; 污染评价; 地积累指数法; 潜在生态危害指数法

中图分类号: X820.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2014)02-0126-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0008

Assessment on Heavy Metals Contaminations of Sugarcane Soil in Guangxi Province by the Geo-accumulation Index and Potential Ecological Risk Index

HE Dong-ming^{1,3}, WANG Xiao-fei^{2*}, CHEN Li-jun², SU Rong³

(1.School of Chemistry & Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3.Environmental Monitoring Station of Guangxi, Nanning 530028, China)

Abstract: Assessment of heavy metals contaminations of sugarcane soil in Guangxi Province was conducted by the geo-accumulation index and potential ecological risk index respectively. The results showed the relative degree of geo-accumulation index was in order of Cd>Zn>Pb>Cu, while the potential ecological risk index was in order of Cd>Pb>Cu>Zn, the influence of Zn was changed. Both of the evaluation methods could get different conclusions. The sugarcane soil was characterized by no contamination of geo-accumulation index and posed low hazard by potential ecological risk index. The potential ecological risk index consider not only the exogenous enrichment of heavy metals, but also the effects of different biological toxicity of heavy metals, so it would be more reasonable.

Keywords: sugarcane soil; heavy metals; pollution assessment; geo-accumulation index; potential ecological risk index

农田是食物和其他各种农畜产品最主要的生产载体^[1], 为人类提供生存所必需的能量物质。近年来, 农田土壤重金属污染严重威胁农产品的产地环境, 成为影响食品质量安全与农业生态环境的突出问题^[2]。重金属在土壤中的积累直接影响土壤的理化性质和微生物活性, 降低养分的有效吸收率和土壤微生物的生物量, 并可以从土壤迁移到其他生态系统通过污染食

物、大气和水环境间接影响环境的质量, 对人类的生存和发展有着严重的威胁^[3-6]。因此, 对土壤重金属污染程度和危害性进行评价具有重大的意义。根据重金属评价的结果可以了解其对环境危害程度, 进而采用适当的方法对被污染的农田土壤实施修复、治理和管理, 或者对已治理过的农田土壤的修复程度监测, 防止污染的进一步扩大和发展。

土壤中重金属污染评价的方法有很多, 有单因子污染指数法^[7]、内梅罗综合指数法^[5]、地积累指数法^[8-9]、污染负荷指数法^[10-11]和潜在生态危害指数法^[12-13]等。另外, 还有改性灰色聚类法、改进层次分析法^[14]、结合模糊数学理论发展的模糊综合评价法^[15]、人体健康风

收稿日期: 2014-01-08

基金项目: 广西突发污染事故应急技术研究特聘专家岗位项目资助

作者简介: 何东明(1984—), 女, 广西百色人, 在读工程硕士, 从事环境监测工作。E-mail: he881118@163.com

* 通信作者: 王晓飞 E-mail: wangxiaofei26@163.com

险评价方法^[16-18]和基于 GIS 技术的评价方法^[19]等。这些评价方法都有其各自的优缺点,使用的具体范围还没有统一的规定,而且这些评价方法没有被系统化的分类。本文主要使用地积累指数法和潜在生态危害指数法对广西某蔗田土壤的重金属污染程度进行评价。

1 材料与方法

1.1 采样区的概况

样品采集区域位于黔中高原南部边缘的斜坡地带,总地势为北高南低,四周山岭绵延,中部偏南为丘陵,东北部山地是九万山系的一部分,属于山地;西南部则为岩溶山地,喀斯特地貌下的生态环境较为脆弱。最高海拔为 1 693 m,最低海拔为 149 m。样品采集区气候属于亚热带季风气候区,年均气温南丘陵一带为 19.9℃,北部山区为了 15.7℃。年均日照时数 145.1 h,全年太阳辐射量为 98.89 kcal·m⁻²,年平均降雨量 1 389~1 750 mm。

1.2 土壤样品的采集与处理

采样点集中在 24°2'56"~25°3'7"N 和 108°14'37"~108°14'42"E 的研究蔗田,土壤采样按照每 667 m² 网格布设 1 个采样点,布点网格约为 25.8 m×25.8 m,使用 GPS 卫星定位仪进行定位布点。围绕每个网格布设中心点,1 个分点及四周 4 个分点,采样深度 20 cm,共取 5 个分点的土壤样品,组成一个约 1 kg 干重的土壤混合样品,然后用无菌的聚乙烯袋将采集的样品装好,并贴上标注有采样序号和日期的标签,共采集了 153 个样品。

将采集好的蔗田土壤样品运回实验室,并置于通风、避光、阴凉、干燥的地方,在室温条件下将土壤样品自然风干,剔除碎石块和植物根茎。风干土样粗磨后用玛瑙研钵细磨,分别过 20 目和 100 目尼龙筛,装瓶贴签。其中过 20 目用于分析土壤 pH 值,过 100 目用于分析土壤重金属含量。

1.3 样品的分析

土壤样品 pH 值用电极法进行测定:利用 pH 计测定土样的 pH 值,使用仪器为 Seven-Easy 梅特勒 pH 计和 FE20 梅特勒 pH 计。

土样的重金属测定:按照国标上测定重金属的方法先对土壤样品进行消解,然后将经过消解后的土样,利用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138—1997)测定 Cu 和 Zn 的含量水平,利用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141—1997)测定 Pb 和 Cd 的含量水平,使用的仪器为德国耶拿 contrAA700、德国耶拿

ZEEnit700。

1.4 评价标准

根据《土壤环境质量标准》GB 15618—1995 中的分级和分类原则,水田、旱地和蔬菜地执行二级标准(表 1),并按照 pH 值范围执行不同标准值。

表 1 土壤环境质量标准(mg·kg⁻¹)
Table 1 Standard of soil environment quality(mg·kg⁻¹)

重金属	标准		
	pH<6.5	pH 6.5~7.5	pH>7.5
Cu	50	100	100
Zn	200	250	300
Pb	250	300	350
Cd	0.3	0.3	0.6

1.5 评价方法

1.5.1 地积累指数法

地积累指数法(I_{geo})是由德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Muller 在 1969 年提出的一种研究水环境中重金属污染的一个定量指标^[20]。利用地积累指数法评价土壤中重金属污染状况及程度较为科学和直观。因为该方法不但考虑了人为污染因素和环境地球化学对背景值的影响,还考虑了由于自然成岩作用可能引起的背景值的变动的的影响。地积累指数法常被用来分析土壤重金属污染的评价,其一共分为 7 级,见表 2,其计算的公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5BE_n} \right]$$

式中: C_n 为样品中元素 n 的浓度, BE_n 为土壤环境质量标准中二级标准值,常量 1.5 是转换系数(为消除各地岩石差异可能引起背景值的变动)。

表 2 地积累指数与污染程度分级
Table 2 The geo-accumulation index and classification of pollution degree

地积累指数(I_{geo})	分级	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度-中等污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中等污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中等-强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强-极严重污染
$5 < I_{geo} \leq 10$	6	极严重污染

1.5.2 潜在危害风险指数法

潜在生态危害指数法是瑞典学者 Hakanson 于 1980 年建立的一套应用沉积学原理评价重金属污染

及生态危害的方法^[21]。该方法不仅考虑了重金属含量,还将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用了具有可比性、等价属性指数分级进行评价^[22],进而对其潜在的生态危害进行评价。在为环境改善提供科学依据的同时还能为人们健康生活提供科学参照。潜在生态危害指数法是按照单因子污染物生态风险指标 E_i^i 和总的潜在生态风险 RI 指标进行生态风险分级的,详见表 3。其计算公式为:

$$P_i=C_s/C_n^i$$
$$E_i^i=T_r^i \times P_i$$
$$RI=\sum_{i=1}^n E_i^i=\sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_s/C_n^i$$

式中: P_i 为单因子污染指数, C_s 为重金属浓度实测值, C_n^i 为土壤环境质量标准中二级标准值, E_i^i 为单因子危害系数, T_r^i 为毒性响应系数, RI 为多因子综合潜在生态危害指数。其中毒性响应因子采用 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数为评价依据,分别为: $Zn=1$, $Cu=Pb=5$, $Cd=30$ 。

2 结果与分析

2.1 重金属含量分析

关于研究地区蔗田土壤的 pH 值及重金属元素含量的结果,详见表 4。从表 4 中可以看出研究地区土壤的 pH 值范围为 2.96~7.32。研究地区土壤重金属元素的含量($mg \cdot kg^{-1}$)范围分别为 Cu 是 8~42;Zn 为 40~1 074;Pb 为 20~885;Cd 为 0.07~3.48。研究地区土壤

中重金属元素,Cu、Zn、Pb、Cd 含量的平均值分别为 17、106、164、0.18 $mg \cdot kg^{-1}$,其平均值都在国标规定的指标范围内。该区域的 pH 值和 Cu 的变异系数分别为 0.19%和0.37%,其余的 3 种重金属元素的变异系数均较大,表明 Zn、Pb 和 Cd 的空间差异较大。

2.2 地积累指数法的评价结果

研究地区蔗田土壤 4 种重金属元素的地积累指数计算统计结果,详见表 5。从表 5 可以得到,从平均地积累指数来看,研究蔗田土壤中的 Cu、Zn、Pb 和 Cd 4 种元素不存在污染的情况,其污染程度由强到弱依次为: $Cd>Zn>Pb>Cu$ 。

表 5 地积累指数(I_{geo})评价结果
Table 5 Evaluation results of geo-accumulation index

I_{geo}	Cu	Zn	Pb	Cd
最小值	-4.09	-2.89	-4.22	-2.77
最大值	-0.85	1.52	1.24	2.95
中值	-2.29	-1.95	-2.08	-1.68
平均值	-2.26	-1.79	-1.92	-1.63

为进一步了解研究蔗田地积累污染的级别,计算并统计了该区域的重金属元素的地积累指数分级频率,其统计结果详见表 6。从表 6 污染分级频率的结果可得到:该区域样品中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染频率分别为 0%、2.62%、11.11%、和 3.91%,其中 1.31%的 Zn、9.15%的 Pb 和 2.61%的 Cd 受到了轻度-中等污染,1.31%的 Zn、1.96%的 Pb 和 0.65%的 Cd 受到了中等污染,0.65%的 Cd 受到了中等-强污染。

表 3 重金属污染潜在生态危害指标与分级关系
Table 3 The relation between heavy metals potential pollution and classification

单个重金属潜在生态风险指数 E_i^i	单因子污染物生态风险程度	多种重金属潜在生态危害指数 RI	总的潜在生态风险程度
$E_i^i<40$	低	$RI<150$	低
$40 \leq E_i^i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_i^i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_i^i < 320$	重	$600 \leq RI$	严重
$320 \leq E_i^i$	严重		

表 4 土壤 pH 值及重金属元素含量($mg \cdot kg^{-1}$)
Table 4 Heavy metals contents and pH values in the study area($mg \cdot kg^{-1}$)

项目	最小值	最大值	中值	平均值	标准偏差	变异系数/%
pH 值	2.96	7.32	4.14	4.35	0.81	0.19
Cu	8	42	15	17	6.36	0.37
Zn	40	1 074	78	106	110.36	1.04
Pb	20	885	96	164	182.71	1.11
Cd	0.07	3.48	0.14	0.18	0.29	1.60

注: $n=153$ 。

表 6 地积累指数分级频率分布表(%)
Table 6 The distribution of geo-accumulation index grading frequency(%)

重金属	无污染	轻度-中等污染	中等污染	中等-强污染	强污染	强-极严重污染	极严重污染
Cu	100.00	0	0	0	0	0	0
Zn	97.38	1.31	1.31	0	0	0	0
Pb	88.89	9.15	1.96	0	0	0	0
Cd	96.09	2.61	0.65	0.65	0	0	0

以上的评价结果表明该蔗田受重金属污染的频率除 Pb 外都较小,但是随着广西城镇整体经济不断推进,农村环境污染问题日益凸显:生活污水产生量呈现递增趋势;生活垃圾就地堆放、填埋、焚烧,甚至就近丢到河里;农药化肥过量使用,使无机污染物和有机污染物残留在土壤;企业三废随意排放以及当地矿产资源开采量逐年增加,对蔗田的重金属污染加重造成威胁。

2.3 潜在生态风险指数法的评价结果

研究地区蔗田土壤 4 种重金属元素的潜在生态风险指数的计算统计结果,见表 7。从表 7 可以得到,从平均潜在风险指数来看,单个重金属潜在风险指数 Cu、Zn、Pb 和 Cd 都为低度污染,综合所有元素的潜在生态危害指数(RI)级别为低度污染,其污染程度由强到弱依次为: Cd>Pb>Cu>Zn。

表 7 潜在生态风险指数评价结果
Table 7 Evaluation results of potential ecological risk index

统计项目	Cu(E_i)	Zn(E_i)	Pb(E_i)	Cd(E_i)	RI
最大值	4.16	4.30	17.70	348.00	359.18
最小值	0.44	0.20	0.40	6.60	10.20
中值	1.53	0.39	1.77	14.00	17.78
平均值	1.68	0.52	3.26	18.16	23.63

为进一步了解研究蔗田潜在生态风险污染的级别,计算并统计了该区域的重金属元素的潜在生态风险指数分级频率,其统计结果详见表 8。从表 8 污染分级频率的结果可得到:在研究蔗田土壤中 Cu、Zn 和 Pb 都是低度污染,潜在生态危害较小;重金属 Cd 在该研究区的潜在生态危害性较大,其中低度危害、中度生态危害、较重生态危害、重度生态危害、严重生态危害的百分比分别为:96.09%、2.61%、0.65%、0%、0.65%,整体为低度污染。综合考虑所有重金属元素的潜在生态危害,该区域内潜在生态危害的综合评价的结果,低度危害、中度生态危害、较重生态危害、重度生态危害、严重生态危害的百分比分别为:93.47%、3.92%、1.96%、0%、0.65%,整体为低度潜在生态危害。

表 8 潜在生态风险指数分级频率分布表(%)
Table 8 The distribution of potential ecological risk index grading frequency(%)

项目	低	中	较重	重	严重
Cu	100	0	0	0	0
Zn	100	0	0	0	0
Pb	100	0	0	0	0
Cd	96.09	2.61	0.65	0.00	0.65
RI	93.47	3.92	1.96	0.00	0.65

以上评价结果表明:该蔗田有局部地区已受到了 Cd 的污染,且该地区水流域上游有色金属矿区分布较多,从长远发展角度分析具有潜在加重危害的可能。此外,甘蔗可以多年留根种植,甘蔗根系能够吸收并富集 Cd 元素,随着种植年限的增加,土壤中重金属元素的富集增加。为确保该蔗田的可持续发展,应对该污染问题加以重视,采取相应措施以控制土壤中的重金属污染。

2.4 2 种方法评价结果比较分析

该研究区域蔗田土壤 4 种重金属的地积累指数和潜在生态危害指数的平均值的污染级别见表 9。由表 9 可见,两评价方法的结果存在差异。该区域用地积累指数法评价土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 4 种元素时不存在污染情况,而用潜在生态危害指数法评价时存在低度污染情况,其原因可能是前者主要考虑外源重金属的富集程度,而后者在此基础上还考虑了不同重金属的生物毒性的影响。此外,在 4 种元素污染程度强弱的比较中,Zn 的强弱排序也存在差异。对于 Zn 污染强弱排序的差异,是 Zn 的重金属毒性系数最低,计算出的潜在生态危害系数最小,因而其潜在生态危害程度最低。

3 结论

(1)在该研究区域的样点中,4 种重金属元素含量的变异系数存在较大的差异,变异程度的强弱为: Cd>Pb>Zn>Cu。其中蔗田土壤中 Cd、Pb、Zn 的样点变异程度大,变异系数都大于 1。其原因可能是研究区域邻近

表 9 4 种重金属元素在 2 种评价方法的污染评级
Table 9 Pollution rating of four heavy metals by two evaluation methods

评价方法	重金属元素			
	Cu	Zn	Pb	Cd
$\bar{I}$	-2.26	-1.79	-1.92	-1.63
地积累指数污染等级	无污染	无污染	无污染	无污染
$\bar{E}$	1.68	0.52	3.26	18.16
潜在生态风险指数污染等级	低度污染	低度污染	低度污染	低度污染

水流域,上游分布着众多的有色金属矿区,导致水流域中的重金属含量增加,且该区域之前有受到垮坝事故的影响也受到重金属污染,距离污染地区的远近程度使重金属含量存在差异。此外人们的生产活动的影响也不可忽略。

(2)该研究区域内 Cd 受污染的程度相对高,有小部分地区受到重度及以上的污染。

(3)该研究区域土壤重金属的潜在生态危害指数(RI)大部分处于低度污染程度,小部分处于中度以上污染,这主要是由于 Cd 潜在生态危害系数高的缘故,Cd 的作用占主导地位。

(4)地积累指数评价主要考虑了外源重金属的富集程度,而潜在生态危害指数在此基础上还考虑了不同重金属的生物毒性的影响。相比之下,潜在生态危害指数的评价结果更加全面和准确,即该研究蔗田土壤的重金属污染程度为低度污染。

(5)虽然潜在生态危害指数的评价结果比地积累指数的评价结果更准确,但是土壤中重金属的含量是多种因素共同作用的结果,如:pH 值、有机质成分和含量、元素的价态和化合态等,此外还有各种重金属间的生物毒性作用的加权和拮抗作用的影响。因此,在使用以上方法进行土壤重金属污染程度评价时,对其进行改良或参数修正后再综合使用,结果会更合理。

参考文献:

- [1] 罗永清,陈银萍,陶玲,等.兰州市农田土壤重金属污染评价与研究[J].甘肃农业大学学报,2011,46(1):98-104.
LUO Yong-qing, CHEN Yin-ping, TAO Ling, et al. Investigation and evaluation on heavy metals pollution in farmland soil in Lanzhou City[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2011, 46(1):98-104.(in Chinese)
- [2] 刘琼峰,李明德,段建南,等.长沙城郊农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险评价研究[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1564-1570.
LIU Qiong-feng, LI Ming-de, DUAN Jian-nan, et al. Ecological risk assessment of heavy metals of Pb and Cd in the suburban cropland soils in Changsha[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2013, 32(8):1564-1570.(in Chinese)
- [3] 林强.我国的土壤污染现状及其防治对策[J].福建水土保持,2004,16(1):25-28.
LIN Qiang. Status and prevention measure to soil pollution problems of China[J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 2004, 16(1):25-28.(in Chinese)
- [4] 杨潇瀛,张力文,张凤君,等.土壤重金属污染潜在风险评价[J].世界地质,2011,30(1):103-109.
YANG Xiao-ying, ZHANG Li-wen, ZHANG Feng-jun, et al. Potential risk assessment of heavy metal pollution in soil[J]. *World Geology*, 2011, 30(1):103-109.(in Chinese)
- [5] 包丹丹,李恋卿,潘根兴,等.苏南某冶炼厂周边农田土壤重金属分布及风险评价[J].农业环境科学学报,2011,30(8):1546-1552.
BAO Dan-dan, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Distribution and risk assessment of soil heavy metals around a smelter in south Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8):1546-1552.(in Chinese)
- [6] 张乃明.环境土壤学[M].北京:中国农业大学出版社,2013:235-241.
ZHANG Nai-ming. Environmental pedology[M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2013: 235-241.(in Chinese)
- [7] 李静,谢正苗,徐建明,等.杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J].生态环境,2003,12(3):277-280.
LI Jing, XIE Zheng-miao, XU Jian-ming, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in vegetable plantation soils in the suburb of Hangzhou[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3):277-280.(in Chinese)
- [8] 叶琛,李思悦,张全发.三峡库区消落区表层土壤重金属污染评价及源解析[J].中国生态农业学报,2011,19(1):146-149.
YE Chen, LI Si-yue, ZHANG Quan-fa. Sources and assessment of heavy metal contamination in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1):146-149.(in Chinese)
- [9] 刘衍君,汤庆新,白振华,等.基于地质累积与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J].中国农学通报,2009,25(20):174-178.
LIU Yan-jun, TANG Qing-xin, BAI Zhen-hua, et al. The research of heavy metals pollution in soil based on the connection of geo-accumulation index and nemero index [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(20):174-178.(in Chinese)

- [10] 王捷,刘桂建,方婷,等.基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J].中国科学技术大学学报,2013,43(2):97-103.
WANG Jie, LIU Gui-jian, FANG Ting, et al. Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui Section) by pollution load index[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2013, 43(2):97-103. (in Chinese)
- [11] 徐争启,倪师军,张成江,等.应用污染负荷指数评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J].四川环境,2004,23(3):64-67.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, et al. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua area by pollution load index[J]. *Sichuan Environment*, 2004, 23(3):64-67. (in Chinese)
- [12] 刘勇,岳玲玲,李晋昌.太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J].环境科学学报,2011,31(6):1285-1293.
LIU Yong, YUE Ling-ling, LI Jin-chang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential risk to the soil in Taiyuan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6):1285-1293. (in Chinese)
- [13] 陈江,张海燕,何小峰,等.湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价[J].土壤,2010,42(4):595-599.
CHEN Jiang, ZHANG Hai-yan, HE Xiao-feng, et al. Distribution and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soils of Huzhou[J]. *Soils*, 2010, 42(4):595-599. (in Chinese)
- [14] 孟宪林,郭威.改进层次分析法在土壤重金属污染评价中的应用[J].环境保护科学,2001,27(103):34-36.
MENG Xian-lin, GUO Wei. The application of reformed AHP in the assessment of heavy metal pollution [J]. *Environmental Protection Science*, 2001, 27(103):34-36. (in Chinese)
- [15] 葛康,汪明武,陈光怡.基于集对分析与三角模糊数耦合的土壤重金属污染评价模型[J].土壤,2011,43(2):216-220.
GE Kang, WANG Ming-wu, CHEN Guang-yi. A coupling model of set pair analysis and triangular fuzzy numbers for evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Soils*, 2011, 43(2):216-220. (in Chinese)
- [16] 李政红,毕二平,张胜,等.地下水污染健康风险评价方法[J].南水北调与水利科技,2008,6(6):47-51.
LI Zheng-hong, BI Er-ping, ZHANG Sheng, et al. Method for health risk assessment of groundwater pollution[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 6(6):47-51. (in Chinese)
- [17] 于云江,胡林凯,李定龙,等.某典型农业区农田土壤重金属污染的健康风险初步评价[J].环境与健康杂志,2010,27(8):693-695.
YU Yun-jiang, HU Lin-kai, LI Ding-long, et al. Health risk assessment of heavy metals pollution in farmland soils in a typical agricultural area: a preliminary report[J]. *Chinese Research Academy of Environmental Science*, 2010, 27(8):693-695. (in Chinese)
- [18] 陈鸿汉,湛宏伟,何江涛,等.污染场地健康风险评价的理论和方法[J].地学前缘,2006,13(1):216-223.
CHEN Hong-han, CHEN Hong-wei, HE Jiang-tao, et al. Health-based risk assessment of contaminated sites: Principles and methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1):216-223. (in Chinese)
- [19] 张军,余江,陈文清.基于GIS的土壤重金属污染评价研究[J].安徽农业科学,2011,39(29):18106-18107,18196.
ZHANG Jun, YU Jiang, CHEN Wen-qing. Study on soil heavy metal pollution assessment based on GIS [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(29):18106-18107, 18196. (in Chinese)
- [20] 孙锐,舒帆,郝伟,等.典型Pb/Zn矿区土壤重金属污染特征与Pb同位素源解析[J].环境科学,2011,32(4):1146-1153.
SUN Rui, SHU Fan, HAO Wei, et al. Heavy metal contamination and Pb isotopic composition in natural soils around a Pb/Zn mining and smelting area[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4):1146-1153. (in Chinese)
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [22] 徐玉霞,彭固凯,汪庆华,等.应用地积累指数法和生态危害指数法对关中西部某铅锌地区冶炼区周边土壤重金属的污染评价[J].四川环境,2013,32(4):79-82.
XU Yu-xia, PENG Gu-kai, WANG Qing-hua, et al. Soil heavy metal assessment of lead and zinc smelting areas in Western Guanzhong by geo-accumulation and potential ecological risk index method [J]. *Sichuan Environment*, 2013, 32(4):79-82. (in Chinese)