

# 基于总量及有效态的铜陵矿区农田土壤 重金属生态风险评价\*

窦智勇 程建华 周平 徐德聪 孙庆业<sup>#</sup>

(安徽大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230601)

**摘要** 于铜陵矿区采集147个农田土壤样品,分析土壤样品中Cd、Cu、Pb、Zn 4种重金属总量和有效态含量,探讨该地区农田土壤重金属的污染现状、潜在生态风险和来源,并基于不同类型农田土壤有效态重金属的风险评价提出农作物种植建议。结果表明:铜陵矿区农田土壤重金属平均值普遍高于铜陵市土壤背景值,局部地区潜在生态风险极大;4种重金属元素的单项潜在生态危害指数依次为Cd>Cu>Pb>Zn,铜陵矿区农田土壤重金属的潜在生态风险程度为中等,Cd为最主要的潜在生态危害因子;基于有效态重金属对不同类型农田土壤进行潜在生态风险评价,春季农田土壤的综合潜在生态危害指数排序为油菜地>蔬菜地>麦地,秋季农田土壤的综合潜在生态危害指数排序为稻田>蔬菜地。基于上述结果,建议在重金属污染程度较高的区域实施小麦-蔬菜轮作,而在蔬菜种植中选择对重金属吸收能力较低的种类或品种。

**关键词** 铜陵矿区 农田土壤 重金属 潜在生态风险评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.11.002

**Eological risk assessment based on total and available content of heavy metals in farmland soil of Tongling mining area** DOU Zhiyong, CHENG Jianhua, ZHOU Ping, XU Decong, SUN Qingye. (School of Resource and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei Anhui 230601)

**Abstract:** 147 farmland soil samples were collected in Tongling mining area. The total and available content of four heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in these soil samples were analyzed to assess the pollution characteristics, potential ecological risk and source of heavy metals and to provide suggestions of crop planting in this area. Results showed that the content of heavy metals in the farmland soils was higher than the soil background values in Tongling City and the pollution risk in local area was very high. Single potential ecological risk index among different heavy metals displayed a following order of Cd > Cu > Pb > Zn. And the overall level of potential ecological risk was medium. Among four heavy metals investigated, Cd was the main factor contributing to potential ecological risk. The potential ecological risk index of the available heavy metal displayed a following order: rapeseed land > vegetable land > wheat land in spring and paddy land > vegetable land in autumn. Based on the above results, it was suggested that in wheat and vegetable crop rotation should be implemented in heavy polluted area, and vegetables with low absorption rate of heavy metals should be chosen.

**Keywords:** Tongling mining area; farmland soil; heavy metal; potential ecological risk assessment

土壤中的重金属具有隐蔽性、难降解、移动性差和易被富集等特点<sup>[1]</sup>。重金属超标不仅影响植物的生长发育,而且会间接影响人体和其他动物的健康<sup>[2]</sup>。环境保护部和国土资源部于2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤环境状况不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃地土壤环境问题突出,全国土壤总污染率为16.1%,其中轻微、轻度、中度和重度污染率分别为11.2%、2.3%、1.5%、1.1%<sup>[3]</sup>。

农田土壤—农作物—人体是重金属进入人体的

主要途径之一,农田土壤的重金属污染状况与人体健康息息相关。对于农田土壤重金属污染的研究在国内外期刊上多有报道<sup>[4-5]</sup>,目前对土壤重金属污染程度的评价方法主要有内梅罗综合污染指数法<sup>[6]</sup>、富集因子法<sup>[7]</sup>、地累积指数法<sup>[8]</sup>和潜在生态危害指数法<sup>[9]</sup>等。潜在生态危害指数法是由瑞典科学家HAKANSON提出,该方法由于引入了毒性响应系数使得评价更侧重于毒理方面,与人体健康的联系更加紧密。然而,重金属在土壤与植物之间的迁移受到许多因素的影响,因此许多学者认为,土壤中的

第一作者:窦智勇,男,1990年生,硕士研究生,主要从事生态工程与环境修复技术研究。<sup>#</sup> 通讯作者。

\* 国家自然科学基金资助项目(No.41171418)。

有效态重金属相较于重金属总量更能反映植物对重金属的富集。因此,对于不同类型农田的土壤,有效态重金属的风险评估显得更加重要。

本研究以铜陵矿区农田土壤为研究对象,探讨该地区农田土壤重金属的污染现状、潜在生态风险和来源,并基于不同类型农田土壤有效态重金属的风险评价提出农作物种植建议,以期为当地农田土壤合理利用和生态安全保障提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

安徽省铜陵市地处长江中下游南岸,位于北纬 $30^{\circ}15' \sim 30^{\circ}58'$ ,东经 $117^{\circ}50' \sim 118^{\circ}20'$ ,属亚热带季风气候,年平均气温 $16.2^{\circ}\text{C}$ ,年降水量 $1\,390\text{ mm}$ ,无霜期为 $158 \sim 237\text{ d}$ ,5—9月为降雨季节<sup>[10]</sup>。铜陵市位于长江铜铁成矿带上,除盛产有色金属铜矿外,金属矿产还有铁、金、铝、锰、锌等。其矿产地主要位于铜官山、狮子山、新桥、凤凰山等地<sup>[11]</sup>。本研究在上述矿区周围布置采样点位并采集农田土壤样品。

### 1.2 样品采集与分析

于2011年春季(4—5月)和秋季(11月)采集铜陵矿区农田表层土壤(0~20 cm)样品,采样器为内径5 cm的聚氯乙烯(PVC)管,采样点位由全球定位系统(GPS)定位。采集的147个土壤样品中包括春季蔬菜地(主要种植大蒜、韭菜、大白菜等)土壤样品44个、油菜地土壤样品36个、麦地土壤样品25个以及秋季稻田土壤样品20个、蔬菜地(主要种植萝卜和辣椒)土壤样品22个。

将采集的土壤样品充分混合后装入封口袋中,带回实验室,自然风干后用玛瑙研钵研磨,过20、100目筛后留存待测。检测指标为Cd、Cu、Pb、Zn 4种重金属的总量和有效态含量。重金属总量测定方法为 $\text{HNO}_3\text{-HF}$ 微波消解、电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP/AES)法测定;有效态含量测定方法为三乙三胺五乙酸(DTPA)浸提、ICP/AES法测定。土壤重金属总量分析过程中加入国家标准土壤样品GSS-1进行分析质量控制,每种元素测定值均在国家标准参比物质允许的误差范围内。采用Excel 2007与SPSS 16.0软件对数据进行统计分析。

### 1.3 评价方法

采用潜在生态危害指数法对铜陵矿区农田土壤进行生态风险评价,评价公式如下:

$$Cf_i = \frac{c_{\text{实测}i}}{c_{\text{背景}i}} \quad (1)$$

$$Er_i = Tr_i \times Cf_i \quad (2)$$

$$RI = \sum_i Er_i \quad (3)$$

式中: $Cf_i$ 为重金属*i*的单项污染系数; $c_{\text{实测}i}$ 为土壤中重金属*i*的实测值, $\text{mg/kg}$ ;  $c_{\text{背景}i}$ 为当地土壤中重金属*i*的背景值, $\text{mg/kg}$ ;  $Er_i$ 为重金属*i*的单项潜在生态危害指数;  $Tr_i$ 为重金属*i*的毒性响应系数;  $RI$ 为重金属综合潜在生态危害指数。

当采用有效态重金属含量进行生态风险评价时, $c_{\text{实测}i}$ 代入有效态重金属的实测值, $c_{\text{背景}i}$ 则根据本研究中各重金属有效态含量与总量的比例计算,得到有效态重金属的背景值。4种重金属总量背景值、有效态背景值及毒性响应系数见表1<sup>[12-14]</sup>。

表1 4种重金属总量背景值、有效态背景值及毒性系数  
Table 1 Reference value of total and available content of four heavy metals and their toxicity coefficient

项目	Cd	Cu	Pb	Zn
总量背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.709	79.00	67.00	139.00
有效态背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.210	14.39	10.16	6.38
毒性响应系数	30	5	5	1

单项潜在生态危害指数用于描述某单一重金属的生态风险程度,由低到高可分为5个等级;综合潜在生态危害指数是多种重金属的潜在生态风险综合值,可分为4个等级,潜在生态风险的分级标准见表2。

表2 潜在生态危害指数与生态风险分级  
Table 2 Indices and grades of potential ecological risk

项目	范围	潜在生态风险程度
$Er_i$	$<40$	轻微
	$40 \sim 80$	中等
	$80 \sim 160$	强
	$160 \sim 320$	很强
	$\geq 320$	极强
$RI$	$<50$	轻微
	$50 \sim 300$	中等
	$300 \sim 600$	强
	$\geq 600$	很强

## 2 结果与讨论

### 2.1 铜陵矿区农田土壤各重金属总量特征

对铜陵矿区农田土壤各重金属总量进行统计分析,结果见表3。

由表3可见,铜陵矿区农田土壤中Cd、Cu、Pb、Zn质量浓度最大值分别为24.840、1 516.09、495.50、

表 3 铜陵矿区农田土壤重金属总量统计特征值  
Table 3 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in farmland soil of Tongling mining area

元素	范围 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	平均值 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	标准偏差 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数	平均值/背景值	标准值 <sup>1)</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	超标率 /%
Cd	0.120~24.840	1.740	2.910	1.67	2.45	0.3	89.12
Cu	13.42~1 516.09	121.15	181.60	1.50	1.53	100	35.37
Pb	18.88~495.50	91.36	81.64	0.89	1.36	300	3.40
Zn	54.68~1 078.85	220.52	153.27	0.70	1.59	250	31.29

注: <sup>1)</sup> 为《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准值。

1 078.85 mg/kg, 远超出当地土壤背景值和 GB 15618—1995 中的二级标准值, 说明该区域农田土壤已受到了很强的重金属污染。变异系数可以反映总样本中各采样点位的平均变异程度, 变异系数越大, 说明重金属元素的空间分布差异越大。研究区农田土壤中 Pb 与 Zn 的变异系数分别为 0.89 和 0.70, 属于中等变异程度, 而 Cd 与 Cu 的变异系数均大于 1, 属于强变异程度, 表明研究区农田重金属的空间分布均匀性较差、离散性显著, 不同区域农田重金属的污染程度差异很大, 这与杨西飞等<sup>[15]</sup>对铜陵矿区农田土壤重金属的研究结果一致。4 种重金属的平均值/背景值排序为 Cd>Zn>Cu>Pb, Cd 的平均值/背景值明显高于其他 3 种重金属, 说明铜陵矿区农田土壤受 Cd 的影响最大。该地农田土壤重金属中 Cd、Cu、Zn 的超标率分别达到了 89.12%、35.37%、31.29%, 且质量浓度最大值远超标值, 表明该地区土壤受此 3 种重金属的污染风险较高, 且局部地区存在极大的污染。

## 2.2 重金属潜在生态风险评价

基于重金属总量的铜陵矿区农田土壤潜在生态风险评价结果见表 4。

表 4 基于重金属总量的潜在生态风险评价  
Table 4 Potential ecological risk assessment  
base on total heavy metals

项目	Cd	Cu	Pb	Zn
单项潜在生态危害指数	73.50	7.65	6.80	1.59
潜在生态风险程度	中等	轻微	轻微	轻微

由表 4 可见, 铜陵矿区农田土壤 4 种重金属中 Cd 的单项潜在生态危害指数最高, 为 73.50, 达到中等潜在生态风险程度, 其他 3 种重金属均处于轻微潜在生态风险程度。4 种重金属的单项潜在生态危害指数依次为 Cd>Cu>Pb>Zn。土壤中 Cd 的质量浓度不高, 但其单项潜在生态危害指数最高, 主要有两方面原因: (1) Cd 的毒性响应系数是其他 3 种重金属的几倍甚至几十倍; (2) Cd 总量背景值仅为 0.709 mg/kg, 远低于他 3 种重金属总量背景值。邹建美等<sup>[16]</sup>发现, 北京近郊耕作土壤重金属的单项潜

在生态危害指数依次为 Hg>Cd>As>Cu>Pb>Cr, Cd 有较大的潜在生态危害。曹会聪等<sup>[17]</sup>发现, 吉林省黑土区农田中, Cd 相较于 Pb 具有更高的潜在生态风险, 说明农田土壤中的 Cd 很容易造成较强的生态风险。丁海霞等<sup>[18]</sup>认为, 对于农田土壤而言, 重金属的潜在生态风险程度达到中等及以上水平时就会对农产品的质量产生影响。因此, 铜陵矿区农田土壤的 Cd 污染需要高度重视。Cd 主要来源于人为的工业或农业活动, 毒性极强, 对生物体危害极大<sup>[19]</sup>, 土壤中积累的 Cd 会引起农作物 Cd 超标, 进一步威胁人类健康。铜陵矿区农田土壤 4 种重金属综合潜在生态危害指数为 89.54, Cd 对其的贡献最大, 贡献率达到 82.09%, 说明 Cd 为铜陵矿区农田土壤最主要的潜在生态危害因子。

重金属的相关性在一定程度上能够反映重金属间污染程度或来源的相似性<sup>[20]</sup>。铜陵矿区农田土壤 4 种重金属的相关性分析见表 5。

表 5 4 种重金属的相关性分析<sup>1)</sup>  
Table 5 Correlation analysis of four heavy metals

重金属	Cd	Cu	Pb	Zn
Cd	1.000			
Cu	0.685 **	1.000		
Pb	0.513 **	0.346 **	1.000	
Zn	0.724 **	0.715 **	0.833 **	1.000

注: <sup>1)</sup> \*\* 代表极显著相关,  $p < 0.01$ 。

由表 5 可见, 铜陵矿区农田土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 间均呈现极显著的正相关关系, 表明 4 种重金属元素具有同源性。结合各采样点位的位置分析, 发现潜在生态风险较高的采样点位基本处于与矿业开采活动相关的区域, 而潜在生态风险较低的区域则远离矿业开采区域, 这与沈昌高等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。矿体风化、矿山开采、冶炼等过程中, 重金属元素会通过大气沉降、废水排放等方式进入土壤, 使得土壤中重金属大量富集。因此, 矿业活动是铜陵矿区农田土壤重金属污染的主要来源。

## 2.3 不同类型农田土壤有效态重金属分析

将距离大型矿山或尾矿库 2 km 以内的区域划为高值区, 而 2 km 以外的区域划为低值区。在 147

表 6 基于有效态重金属的潜在生态风险评价  
Table 6 Potential ecological risk assessment base on available content of heavy metals

项目	春季			秋季	
	蔬菜地	油菜地	麦地	稻田	蔬菜地
高值区	样本数	10	15	4	11
	RI	108.44	134.74	106.76	255.14
	潜在生态风险程度	中等	中等	中等	中等
低值区	样本数	34	21	21	9
	RI	52.29	85.80	36.59	72.01
	潜在生态风险程度	中等	中等	轻微	中等

个采样点位中,位于高值区的点位有 45 个,位于低值区的点位有 102 个。采用有效态重金属含量对不同类型农田土壤重金属的潜在生态风险进行评价,结果见表 6。

由表 6 可见,高值区不同类型农田土壤有效态重金属的综合潜在生态危害指数均高于低值区,这间接验证了矿业活动是铜陵矿区农田土壤重金属污染主要来源的结论。高值区春季不同类型农田土壤的综合潜在生态危害指数排序为油菜地>蔬菜地>麦地,秋季两种类型农田土壤的综合潜在生态危害指数排序为稻田>蔬菜地,几种类型农田土壤的潜在生态风险程度均为中等。低值区春秋两季不同类型农田土壤的综合潜在生态危害指数排序与高值区一致,而在潜在生态风险程度方面,除麦地的潜在生态风险程度为轻微外,其余类型农田土壤的潜在生态风险程度均为中等。

郑袁明等<sup>[22-24]</sup>对北京市不同土地类型的土壤重金属进行研究,发现菜地、稻田、果园和绿化地土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量明显高于麦地,与本研究结果一致。这可能与麦地的耕作经营强度较小有关<sup>[25]</sup>。本研究中无论高值区还是低值区,油菜地的有效态重金属的综合潜在生态危害指数均高于其他 2 种春季农田土壤类型,这可能与农作物根系分泌物会影响土壤重金属的活性有关,根系分泌物中往往含有许多低分子量有机酸,如甲酸、乙酸、柠檬酸、苹果酸等,这些有机酸可以通过降低土壤 pH 提高土壤中重金属的活性。赵宽等<sup>[26]</sup>运用离子色谱法检测油菜根系分泌物中的有机酸,发现油菜根系分泌物中草酸、柠檬酸、酒石酸、苹果酸、丁二酸分别为 0.49、0.40、0.44、0.39、0.13 mg/g,有机酸总量为 1.85 mg/g,远高于其他农作物。卢豪良等<sup>[27]</sup>研究发现,根际沉积物中可交换态与碳酸盐结合态重金属含量大于非根际沉积物。而土壤有效态重金属主要存在形态为可交换态和碳酸盐结合态<sup>[28]</sup>。师荣光等<sup>[29-30]</sup>利用定性风险分析技术,对不同土地利用

类型中土壤 Pb、Cd 的人体健康风险进行计算,发现稻田中重金属对人体的健康风险大于菜地,这与本研究结果相一致。水稻是一种喜多湿的沼泽植物,在其生长过程中需要吸收大量水分,而它的水分主要是通过根系从土壤中吸收得到。魏伟等<sup>[31]</sup>对铜陵地区河流生态系统的研究表明,由于受到矿厂废水的影响,河流重金属存在超标现象,如 Zn 的最高监测值达到 8.610 mg/L,是《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 V 类水质标准(2.0 mg/L)的 4.3 倍。利用这些污染较重的河水灌溉水稻将导致严重的土壤污染。基于上述分析,本研究认为,在高值区范围内宜实施小麦-蔬菜轮作,而在蔬菜种植中应选择对重金属吸收能力较低的种类或品种,具体的农作物选择还需要结合经济效益、自然条件等因素综合考虑。

### 3 结 论

(1) 铜陵矿区农田土壤重金属平均含量普遍高于铜陵市土壤背景值,且污染程度不一。各重金属平均值/背景值的排序为 Cd>Zn>Cu>Pb。

(2) 4 种重金属元素的单项潜在生态危害指数排序为 Cd>Cu>Pb>Zn,铜陵矿区农田土壤重金属的潜在生态风险程度为中等,Cd 为最主要的潜在生态危害因子。

(3) 重金属元素间的相关性分析表明,Cd、Cu、Pb、Zn 4 种重金属具有同源性,矿业活动是该地区农田土壤重金属污染的主要来源。

(4) 基于有效态重金属含量对不同类型农田土壤进行排序,春季农田土壤类型的综合潜在生态危害指数排序为油菜地>蔬菜地>麦地,秋季农田土壤类型的综合潜在生态危害指数排序为稻田>蔬菜地,建议在潜在生态风险较高的区域实施小麦-蔬菜轮作,在蔬菜种植中应选择对重金属吸收能力较低的种类或品种。

参考文献:

- [1] 刘勇,岳玲,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.
- [2] 张小敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703.
- [3] 王玉军,刘存,周东美,等.客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J].农业环境科学学报,2014,33(8):1465-1473.
- [4] XU Decong, ZHOU Ping, ZHAN Jing, et al. Assessment of trace metal bioavailability in garden soils and health risks via consumption of vegetables in the vicinity of Tongling mining area, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 90:103-111.
- [5] 豆长明,徐德聪,周晓铁,等.铜陵矿区周边土壤-蔬菜系统中重金属的转移特征[J].农业环境科学学报,2014,33(5):920-927.
- [6] 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,等.呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J].环境科学,2013,34(4):1561-1567.
- [7] 秦飞,李倩,季宏兵,等.密云水库上游铁矿区土壤中重金属污染评价[J].环境科学与技术,2013,36(增刊2):353-361,367.
- [8] 张成,陈宏,王定勇,等.三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J].环境科学,2014,35(3):1060-1067.
- [9] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [10] SUN Qingye, AN Shuqing, YANG Linzhang, et al. Chemical properties of the upper tailings beneath biotic crusts[J]. Ecological Engineering, 2004, 23(1):47-53.
- [11] 殷汉琴,陈富荣,陈兴仁,等.铜陵市及其周边地区土壤重金属元素污染评价[J].安全与环境学报,2010,10(3):98-102.
- [12] 李如忠,潘成荣,陈婧,等.铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J].中国环境科学,2012,32(12):2261-2270.
- [13] 韩平,王纪华,冯晓元,等.北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究[J].农业环境科学学报,2015,34(1):103-109.
- [14] 任丽敏,何江,吕昌伟,等.达里诺尔湖生物有效态重金属的形态分布及生态风险评价[J].农业环境科学学报,2013,32(2):338-346.
- [15] 杨西飞,周涛发,张鑫,等.基于 Matlab-FIS 的土壤中重金属污染模糊综合评价[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2007,30(10):1245-1249.
- [16] 邹建美,孙江,戴伟,等.北京近郊耕作土壤重金属状况评价分析[J].北京林业大学学报,2013,35(1):132-138.
- [17] 曹会聪,王金达,张学林.吉林黑土中 Cd、Pb、As 的空间分布及潜在生态风险[J].中国环境科学,2007,27(1):89-92.
- [18] 丁海霞,南忠仁,刘晓文,等.金昌市郊农田土壤重金属的污染特征[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2183-2188.
- [19] 顾翠花,王懿祥,白尚斌,等.四种园林植物对土壤镉污染耐受性研究[J].生态学报,2015,35(8):1-11.
- [20] 王美青,章明奎.杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究[J].环境科学学报,2002,22(5):603-608.
- [21] 沈昌高,高超,王登峰,等.铜陵矿区土壤和油菜中铜的分布特征[J].应用生态学报,2007,18(10):2374-2378.
- [22] 郑表明,陈同斌,郑国砥,等.不同土地利用方式对土壤铜积累的影响——以北京市为例[J].自然资源学报,2005,20(5):690-696.
- [23] 郑表明,宋波,陈同斌,等.北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险[J].自然资源学报,2006,21(1):64-72.
- [24] 郑表明,陈同斌,陈煌,等.北京市不同土地利用方式下土壤铅

的积累[J].地理学报,2005,60(5):791-797.

- [25] 郑表明,罗金发,陈同斌,等.北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征[J].地理研究,2005,24(4):542-548.
- [26] 赵宽,吴沿友.4种植物幼苗根茎叶及根系分泌物中低分子量有机酸的特征[J].西北植物学报,2014,34(5):1002-1007.
- [27] 卢豪良,严重玲.秋茄(*Kandelia candel* (L.))根系分泌低分子量有机酸及其对重金属生物有效性的影响[J].生态学报,2007,27(10):4173-4181.
- [28] CHOJNACKA K, CHOJNACKI A, GÓRZECKA H, et al. Bio-availability of heavy metals from polluted soils to plants[J]. The Science of the Total Environment, 2005, 337(1/2/3):175-182.
- [29] 师荣光,刘凤枝,郑向群,等.不同土地利用类型下土壤-作物铅的积累特征及其健康风险分析[J].农业环境科学学报,2010,29(3):481-486.
- [30] 师荣光,赵玉杰,彭胜巍,等.不同土地利用类型下土壤-作物镉含量积累及其健康风险分析[J].资源科学,2008,30(12):1904-1909.
- [31] 魏伟,王丽,周平,等.安徽铜陵地区河流生态系统健康的多指标评价[J].中国环境科学,2013,33(4):691-699.

编辑:丁怀 (收稿日期:2015-06-10)

(上接第5页)

- [4] 王东方.上海冬春季 PM<sub>2.5</sub> 中不挥发和半挥发颗粒物的浓度特征[J].中国环境科学,2013,33(3):385-391.
- [5] 白志鹏,蔡斌彬,董海燕,等.灰霾的健康效应[J].环境污染与防治,2006,28(3):198-201.
- [6] 叶文波.宁波市大气可吸入颗粒物 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的源解析研究[J].环境污染与防治,2011,33(9):66-69.
- [7] EDWARDS J, WALTERS S, GRIFFITHS R K. Hospital admissions for asthma in preschool children: relationship to major roads in Birmingham, United Kingdom[J]. Archives of Environmental Health, 1994, 49(4):223-227.
- [8] VAN VLIET P, KNAPE M, DE HARTOG J, et al. Motor vehicle exhaust and chronic respiratory symptoms in children living near freeways[J]. Environmental Research, 1997, 74(2):122-132.
- [9] ENGLISH P, NEUTRA R, SCALF R, et al. Examining associations between childhood asthma and traffic flow using a geographic information system[J]. Environmental Health Perspectives, 1999, 107(9):761-767.
- [10] KIM Y M, HARRIS S, HARRISON R M. Concentrations and sources of VOCs in urban domestic and public microenvironments[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(6):997-1004.
- [11] KINGHAM S, BRIGGS D, ELLIOTT P, et al. Spatial variations in the concentrations of traffic-related pollutants in indoor and outdoor air in Huddersfield, England[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(6):905-916.
- [12] 金均,吴建,蔡菊珍,等.杭州市灰霾天气基本特征及成因分析[J].环境污染与防治,2010,32(5):61-67.
- [13] WALTON G N, DOLS W S. Contam 3.1 user guide and program documentation[R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [14] 中国气象局气象信息中心气象资料室.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2015-03-24)