河北省麻山药种植区土壤重金属元素空间分布特征

未红红，杨浩然，刘会玲，张毅功

（河北农业大学 资源与环境科学学院，河北 保定 071001）

摘　要：[目的] 明确河北省麻山药种植区土壤重金属的空间分布特征以及土壤性状、社会经济因素对土壤重金属含量的影响。[方法] 在研究区内通过网格法均匀分布取样获取土壤样本，室内试验得到样本的各元素含量；结合 SPSS 和 ArcGIS 9.3 软件的数据相关性、地统计学、空间分析等方法进行分析研究。[结果] 从相关系数来看，除 Cr 以外，其他 4 种重金属在研究区内均呈现正相关关系；土壤数据中 Cr，Pb，As 服从正态分布，Cd，Hg 经对数转换后服从正态分布；通过元素的块金效应分析发现，元素 Hg 在研究区的空间相关性最弱。[结论] 河北省麻山药种植区土壤重金属含量与母质、土壤质地、有机质含量以及工业化、城市化和农村集约化程度密切相关。

关键词：重金属；空间变异；地统计学；麻山药；GIS

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2015)05-0227-05　　**中图分类号**：S151.9

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.108

Spatial Variation of Heavy Mentals in *Dioscorea Opposita* Thunb. Planted Areas of Hebei Province

WEI Honghong, YANG Haoran, LIU Huiling, ZHANG Yigong

(*College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei* 071001, *China*)

Abstract: [Objective] To understand the spatial distribution of heavy metal concentrations in *Dioscorea opposita* Thunb. planted soils and the influences of soil properties and socio-economic factors on the heavy metal concentrations in order to selecte the priority areas for the *D. opposita* Thunb. platation. [Methods] Soil samples were collected using the grid sampling method, and the element concentrations were tested in laboratory, then the relationships of data was analyzed with geostatistics and spatial analysis methods in SPSS and ArcGIS 9.3. [Results] The four elements, except for Cr, showed a positive correlation with each other; Cr, Pb and As followed a normal distribution in the soil data and Cd, Hg followed a normal distribution after logarithmic conversion; Hg showed little spatial correlation according to the nugget effect analysis. [Conclusion] The heavy metal concentrations in the *D. opposita* Thunb. soils in Hebei Province were closely related to their parent material, soil texture, and organic matter contents and the degree of industrialization, urbanization and agricultural intensities of a city.

Keywords: heavy mental; spatial variability; geostatistics; *Dioscorea opposita* Thunb.; GIS

近年来，随着城市化和工业化的快速发展，环境污染问题日益突出[1]，人们对环境污染而引发的食品污染问题引发了广泛关注。重金属污染具有多种潜在危害，不仅能破坏土壤的正常功能，阻碍作物正常生长，造成农作物产量和品质下降，进而通过食物链危害人类身体健康，也可导致大气和水环境质量的进一步恶化[2]。目前国内外对重金属污染的研究，大多集中于城市边缘的农田和工矿企业周边地带，针对特色农产品主产区土壤环境质量的区域性研究较少。土壤重金属污染问题是中国当前发展绿色、无公害和有机产品的一个重要瓶颈，农产品主产区内土壤中重金属的来源、含量、空间分布特征及环境风险评价等方面的工作亟需解决[3-4]。

本文以河北省麻山药主产区高阳和蠡县为研究

收稿日期：2014-05-08　　修回日期：2014-08-12

资助项目：国土资源部及农业厅河北省农业地质调查项目“保定典型矿山生态环境演变与恢复技术研究”(200040007-3-5)

第一作者：未红红(1988—)，女(汉族)，河北省邯郸市人，硕士研究生，研究方向为土地资源。E-mail:903848882@qq.com。

通信作者：张毅功(1963—)，男(汉族)，河北省保定市人，博士，教授，土壤学专业博士生导师，主要从事于土壤利用与改良、新型肥料研制工作。E-mail:zhangyg63@hebau.edu.cn。

区域，在研究区域内采用 km^2 网格法均匀取样，运用地统计学分析方法[5]，对土壤中 As，Pb，Hg，Cd，Cr 这5种微量元素空间分布特征的分析，结合其迁移规律，揭示了目前麻山药主产区主要土壤重金属背景值，从而为产区内优势种植地的划分提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于太行山北部东麓，冀中平原西部。北纬38°10′—40°00′，东经113°40′—116°20′，属于华北平原腹地，太行山地区。地貌为冲积扇平原，土壤质地主要为砂土或砂壤质黏土，年均降水量在500～550 mm之间，平均气温为12～13 ℃，年日照时数为2 600～2 700 h。区内水系丰富，滹沱河、潴龙河等河道穿境而过。是小麦、玉米、棉花等作物的主产区，境内种植麻山药历史丰富。

2 材料与方法

2.1 供试材料与样品采集

2.1.1 样品采集 综合考虑高阳、蠡县2县的土壤种类、土体构型分布情况及2县的地形地貌，水文地质、土地利用方式等条件因素，采用综合分析、GPS定位的方式，利用 km^2 网格法在研究区内均匀分布取样。土样深度为0—20 cm，2个县共采集样品288个。

2.1.2 样品处理 样预处理采用的方式为在阴凉处自然风干，取出杂质，过100目尼龙筛，密封、待检[6]。

2.2 指标测试及数据分析方法

2.2.1 各元素的测定方法

(1) Cd 土样经盐酸—硝酸—高氯酸(或盐酸—硝酸—氢氟酸—高氯酸)消解后，萃取—火焰原子吸收法测定。

(2) Hg 土样经硝酸—硫酸—五氧化二钒或硫、硝酸—高锰酸钾消解后，冷原子吸收法测定。

(3) As 土样经硫酸—硝酸—高氯酸消解后，二乙基二硫代氨基甲银分光光度法测定。

(4) Pb 土样经盐酸—硝酸—氢氟酸—高氯酸消解后，萃取—火焰原子吸收法测定。

(5) Cr 土样经盐酸—硝酸—氢氟酸消解后，加氯化铵液，火焰原子吸收分光光度法测定。

2.2.2 数据分析方法 数据分析采用SPSS软件与ArcGIS软件相结合的方法。

Arc GIS是地统计学中分析土壤元素空间变异特征常用软件，可以方便快捷的拟合半方差图以及Kriging插值。半方差图是利用变异函数研究土壤特性空间变异所产生的一个空间变异模型，是地统计学解释土壤特性空间变异结构的基础[7]，其可以揭示样本变异程度以及个样本之间的偏离关系。而Kriging分析则是利用半方差模型进行测定点之间最优内插的一种方法。将各采样点的位置及其数据导入ArcGIS中，以获得样点分布的空间数据库，通过关键词段与分析数据之间实现连接，作为Kriging插值的源属性数据，运用Cross—Validation交叉验证选择合适的Kriging插值模型进行验证和对各参数进行修正，以得到各元素最合理的分布图[8]。

3 结果与分析

3.1 土壤重金属含量正态分布检验及异常值处理

地统计学分析要求所分析的数据呈正态分布。特异值的存在会导致插值连续表面中断，从而掩盖变量的空间结构特征，使插值结果偏离实际值，将严重影响Kriging插值结果[9]，所以在进行插值前应进行异常值检验，由于均值和标准差的耐抗性极小，由此判断的异常值个数不会多于总数0.7%，用于非正态分布数据中判断异常值，有效性十分有限。本文采用安德森—达令(A—D)正态分布检验概率对数据进行检验，检验过程中显著水平 a 设为0.05，若 $p_{A-D}>0.05$，说明数据服从正态分布。5种重金属经检验后，Cr，Pb，As服从正态分布，Cd，Hg经对数转换后服从正态分布，满足地统计学分析要求。

处理后的数据统计特征值见表1。5种元素的变异系数范围集中在0.105～0.498，除Hg属于高度变异外，其他4种元素均属于中度和小变异，说明研究区土壤Hg元素含量差异较大，其与母质、地形地貌以及人为活动等条件的关系相对比较密切，Cd，As 2种元素的变异系数分别为17.7%和19.2%，属于中等变异强度，说明这2种元素的含量不仅受到成土因素、土体构型、水文地质等自然条件的影响，还与当地农作物的耕种条件，施肥情况及管理因子有关。Cr，Pb元素变异系数分别为10.5%和11.3%，属于小变异程度。Cr，Pb元素在研究区土壤中的分布较为平均，受环境因素影响较小。

通过对数据偏度和峰度的分析，可以看出研究区内的5种重金属元素的偏度系数均大于0，说明5种元素的峰向均向左偏斜，其中Hg元素向左偏斜程度最大，说明其分布情况与正态分布相差最大；As元素向左偏斜最小，说明其分布情况在5种元素中最接近正态分布。5种元素中Cr，Pb，As元素的峰度为负值，说明其分布为正态分布，其余2种元素的分布均为对数正态分布。造成元素不成正态分布的原因可能是由于作物对养分的吸收，影响了土壤中不同重金

属的释放,从而影响重金属的分布,作物对土壤养分具有选择性吸收,同一作物长期连作,必然造成某种元素的丰缺变化,高阳、蠡县长期以来就是粮食作物的主产区,而且具有悠久的麻山药种植历史。

表 1　土壤中重金属元素含量的描述性统计

微量元素	最大值/(mg·kg^{-1})	最小值/(mg·kg^{-1})	平均值/(mg·kg^{-1})	标准差/(mg·kg^{-1})	变异系数	偏度系数/%	峰度系数/%	分布类型
Pb	30.550	16.550	23.669	2.681	0.113	0.315	−0.277	正态分布
Cr	96.400	58.400	74.928	7.858	0.105	0.375	−0.034	正态分布
Cd	0.270	0.110	0.164	0.029	0.177	1.215	1.795	对数正态分布
Hg	0.250	0.010	0.037	0.017	0.498	7.431	88.454	对数正态分布
As	15.200	5.210	9.978	1.918	0.192	0.158	−0.238	正态分布

3.2　土壤各重金属元素间相关关系

同一区域土壤重金属的来源可以是单一的,也可以是多种的,研究土壤重金属全量之间的相关性可以推测出重金属来源是否相同,如果重金属含量有显著的相关性,说明元素之间具有相同来源的可能性大,反之则表示来源不同[10]。从表 2 可以看出,研究区域内土壤各种重金属含量之间普遍表现出正相关关系。Pb,Cd,As,Hg 相互之间存在极显著的相关性,由此可以初步推断 Pb,Cd,As,Hg 之间来源相同,可能源于成土母质。Cr 与 Hg,Pb,As,Cd 相关性不显著,表明 Cr 与 Hg,Pb,As,Cd 的来源不同。

表 2　土壤重金属元素含量相关系数矩阵

微量元素	Pb	Cr	Cd	As	Hg
Pb	1				
Cr	−0.627**	1			
Cd	0.761**	−0.582*	1		
As	0.753**	−0.636**	0.654*	1	
Hg	0.933**	−0.733*	0.781*	0.791**	1

注:* 表示显著性水平为 0.05;** 表示显著性水平为 0.01。

3.3　重金属空间变异特征

3.3.1　重金属的空间结构　经地统计学模块进行分析以后,得到各种模型拟合的各项参数值,最优指数模型的选取应满足以下条件:标准平均值最接近于 0,均方根预测误差最小,平均标准误差最接近于均方根预测误差,标准均方根预测误差最接近于 1[11-12],然后用交叉验证法来修正模型的参数[13],5 种重金属元素各要素变异函数理论模型得出的相应参数见表 3。从表 3 中可以看出,Cd,Cr,As 符合高斯模型,Pb,Hg 符合球状模型。

块金值反映的是最小抽样尺度以下变量的变异性及测量误差。5 种微量元素由于试验或采样误差引起的变异大小依次为:Hg>As>Cd>Cr>Pb。块金效应反映系统变量的空间相关性程度,如果比值小于 25%,说明系统具有强烈的空间相关性,比值在 25%~75%之间,表明系统具有中等的空间相关性,而比值大于 75%说明系统空间相关性很弱[14]。Pb 元素块金效应为 22.37%,具有强烈的空间相关性,Hg 元素的块金效应为 82.34%,说明空间相关性很弱,而其他 2 种元素属于中等空间相关性。

基台值表示的是变量的最大变异程度,从表 3 中可知,汞的变异程度最大,基台值为 0.067 0,铬的变异程度最小基台值为 0.006 9。

表 3　土壤重金属元素统计特征值

微量元素	指数模型	块金值	基台值	块金效应/%	长轴变程	短轴变程
Pb	球状模型	0.002 5	0.008 8	28.94	12 991.5	7 811.1
Cr	高斯模型	0.004 6	0.006 9	66.35	16 883.1	10 096.4
Cd	高斯模型	0.005 4	0.016 2	33.16	16 439.2	8 390.5
Hg	球状模型	0.052 9	0.067 0	78.93	13 285.7	8 887.0
As	高斯模型	0.012 9	0.020 1	64.09	17 027.6	9 254.1

变程表示随机变量在空间上的自相关性尺度,反映了变量空间自相关范围的大小。5 种微量元素的变程大小依次为:Cr>As>Hg>Cd>Pb。

3.3.2　重金属的空间分布　根据上述各元素得到的半方差函数模型,应用 Kriging 法进行最优内插,绘制了各重金属元素的空间分布格局图(图 1—5)。

从图 1—2 中我们可以看出:Pb,Cd 元素总体趋势从东南向西北逐渐增加,其在高阳县北部和蠡县西北部出现较高值,研究区西北部偏高是由于该地区为石油化工、轻工食品、纺织等企业密集的地区,该区域土壤受污染比较严重。另外,该区域土壤质地黏重,有机质含量较高,有机质对各重金属元素有较强的螯

合和吸附能力。虽然这 2 种重金属含量的空间分布有一定的相似性，但也有各自的分布特点，Pb 元素以潴龙河为界向两侧逐渐增加，Cd 元素分布较分散，高值区成散点状分布。

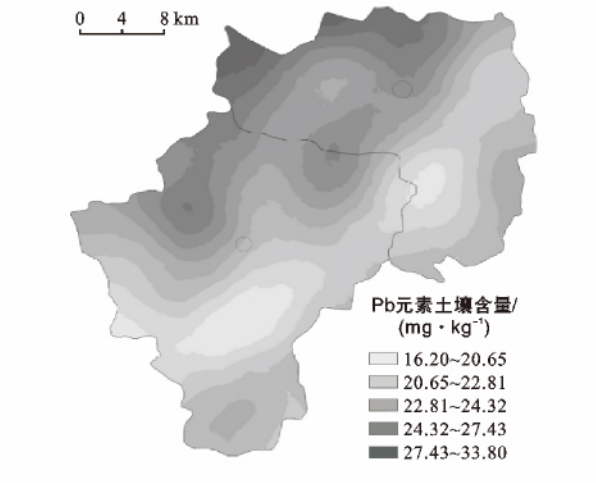


图 1 重金属无素 Pb 的空间分布

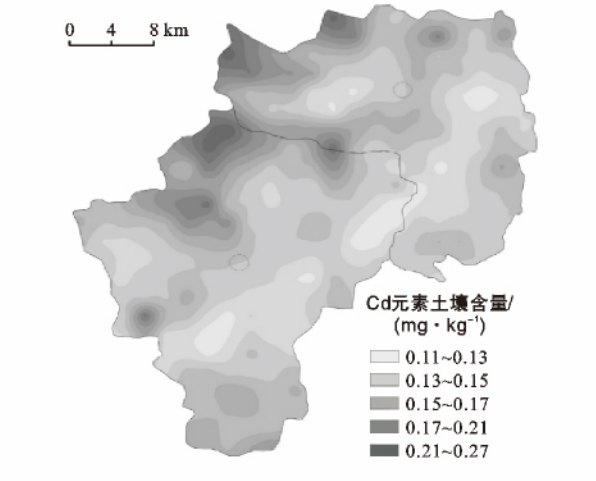


图 2 重金属无素 Cd 的空间分布

从图 3 可以看出 Cr 元素在研究区内呈西北低—东南高的分布趋势，在蠡县东北部出现高峰值，主要原因为蠡县东北部地区矿藏资源丰富，重金属 Cr 元素经雨水冲刷渗入地下，使土壤中 Cr 含量增加，出现富集。

土壤 As 的含量分布(图 4)总体上西北地区大于东南地区，这与 As 随水迁移有一定的关系，其含量最高的地方位于蠡县的大白尺、东郭丹，高阳的陶口店、良村等地，明显高于背景值含量，这是由于位于该区域的孝义河污染严重，而该区域主要以孝义河作为灌溉水源；另外该区域为高阳和蠡县主要的粮果蔬生产地区，而该区农业生产历史上曾大量使用有机磷农药和含砷农药，此外，有研究发现，中国磷肥中的磷矿石含砷量一般在 20～50 mg/kg，高的可达每千克几百毫克，若长期大量施用含砷量高的磷肥，会造成砷的累积。

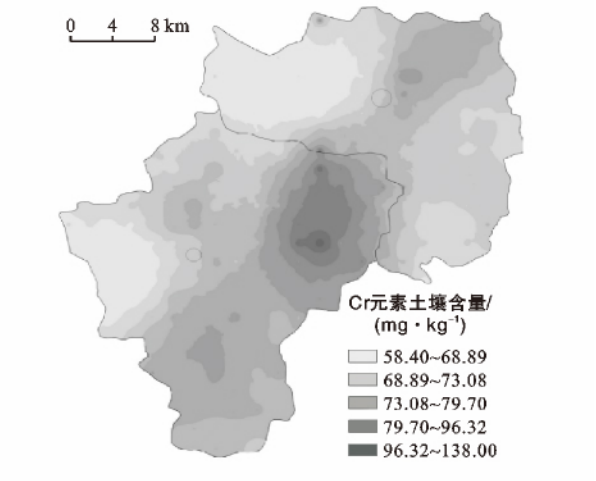


图 3 重金属无素 Cr 的空间分布

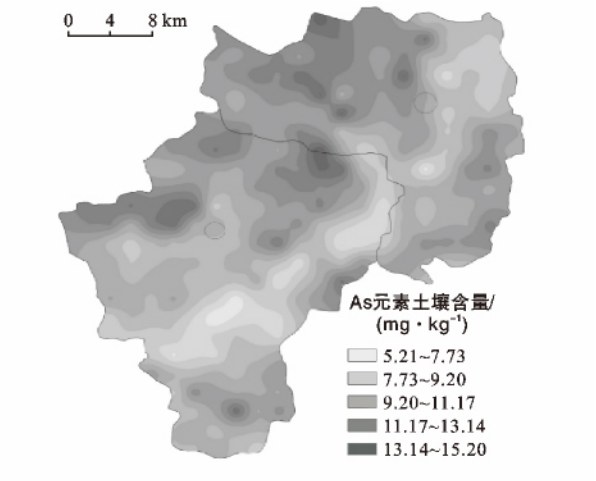


图 4 重金属无素 As 的空间分布

土壤 Hg 含量(图 5)以蠡县西部的郑村和东北寺最高，其主要原因与当地母质有关，蠡县西部为全新统泻湖堆积亚黏土母质，由此发育的土壤质地较黏，黏性的土壤具较强的吸附能力，可吸附较多的 Hg。

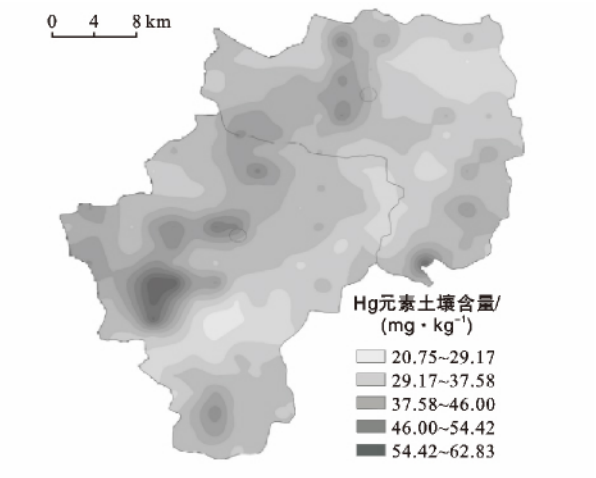


图 5 重金属元素 Hg 的空间分布

4 结 论

（1）研究区表层土壤 5 种重金属含量统计结果表明，除 Hg 属于高度变异外，其他 4 种元素均属于中度和小变异；通过对数据偏度和峰度的分析，5 种重金属元素的偏度系数均大于 0，说明 5 种元素的峰向均向左偏斜；5 种元素中 Cr，Pb，As 元素的峰度为负值，说明其分布为正态分布，其余 2 种元素的分布均为对数正态分布。

（2）从半方差函数模型拟合结果可见，Pb，Hg 符合球状模型，其他重金属元素均符合指数模型。5 种重金属元素在一定范围内均存在空间相关性，其中 Cr 与其他几种元素之间呈负相关性，说明 Cr 元素含量分布存在空间孤立，Pb 与 Cd，As，Hg 之间表现出明显的正相关，说明 Pb 和 Cd，As，Hg 元素间为复合污染或具有同源性。

（3）采用 Kriging 最优内插法得到了研究区表层土壤重金属含量的空间分布图，发现土壤重金属含量与母质、土壤质地、有机质含量以及工业化、城市化和农村集约化程度密切相关。

［ 参 考 文 献 ］

[1] 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.

[2] 雷凌明，喻大松，陈玉鹏，等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报，2014，30(6)：88-96.

[3] 唐发静，祖艳群. 土壤重金属空间变异的研究方法[J]. 云南农业大学学报，2008，23(4)：558-561.

[4] 霍霄妮，李红，张微微，等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J]. 农业工程学报，2009，25(3)：223-229.

[5] 卢振兰，赵晓松，高珊，等. 吉林省无公害中药材种植基地土壤环境质量评价[J]. 中国生态农业学报，2006，14(3)：210-213.

[6] 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.

[7] 李阔，王元杰，刘会玲，等. 河北献县表层土壤全氟空间变异性特征分析[J]. 土壤通报，2011，42(2)：726-729.

[8] 赵月，周冀衡，陈习羽，等. 云南陆良烟叶与土壤微量元素的空间分布特征及主要影响因素[J]. 湖南农业大学学报，2012，38(3)：235-240.

[9] 朱建宁，崔江慧，文宏达，等. 泊头市重金属元素空间变异规律研究[J]. 北方园艺，2011(2)：171-175.

[10] 陈京都，戴其根，许学宏，等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. 生态学报，2012，32(11)：3487-3496.

[11] 汤国安，杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京：科学出版社，2006：420-430.

[12] 郭旭东，傅伯杰，陈利顶，等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征：变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报，2000，55(5)：555-566.

[13] Johnston K，ver Hoef J M，Krivoruchko K. et al. Using ArcGIS Geostatistical Analyst[M]. GIS by Environmental Systems Reserarh Institute，2001.

[14] Ana D S，Jose M Q，Antonio D. Long-term effects of tillage on the availability of iron，copper，manganese，and zinc in a Spanish Vertisol[J]. Soil & Tillage Research，2008，98(2)：200-207.

（上接第 226 页）

［ 参 考 文 献 ］

[1] 程若敏，梁晓乐，陈少容. 药用银花环境因子特性研究概况[J]. 中国试验方剂学杂志. 2011，17(03)：232-234.

[2] 武雪芬，李玉贤，侯怀恩，等. 金银花修剪枝中绿原酸含量测定[J]. 中药材，1996，19(2)：69-70.

[3] 石钺，石任兵，陆蕴如. 我国药用金银花资源、化学成分及药理研究进展[J]. 中国药学志，1999，34(11)：724-727.

[4] 赵进平，岩山地区金银花种植技术[J]. 现代农业科技. 2009，(19)：143-144.

[5] 王昶，马少娜，魏大鹏等. 中药材中重金属污染分析以及防治措施[J]. 天津科技大学学报，2005，20(3)：12-161.

[6] 杨春，成红砚. 黔东南州 9 种药材重金属污染评价[J]. 贵州农业科学，2010，38(4)：231-234.

[7] 王锦芳，王纯健. 金银花药材中重金属铅、镉含量分析[J]. 海峡医学，2010，22(10)72-74.

[8] 茅向军，杨永东，熊慧林，等. 贵州杜仲中铅、砷、汞含量的研究[J]. 药物分析杂志，2000，20(3)：172.

[9] 薛朝金，海市，舒光明，等. 半夏与土壤中重金属含量相关性研究[J]. 中药材，2010. 33(3)：331-333.

[10] 杭州大学化学系分析化学教研室. 分析化学手册：第一分册第二版[M]. 北京：化学工业出版社 1997：3801.

[11] 环境保护部. 土壤环境质量标准(GB15618-1995)[S]. 北京：中国环境出版社，1995.

[12] 国家对外贸易经济合作部发部. 药用植物及制剂外经贸绿色行业标准(WM/T 2-2004)[S]. 北京：中国标准出版社，2005.

[13] 刘元生，何腾兵，罗海波等. 贵阳市乌当区耕地土壤重金属污染现状及评价[J]. 重庆环境科学，2003，25(10)：42-45.

[14] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京：中国标准出版社，2001：590-597.

[15] 魏复盛，杨国治，蒋德珍，等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测，1991，7(1)：1-6.

[16] 刘周莉，何兴元，陈玮. 忍冬：一种新发现的镉超富集植物[J]. 生态环境学报，2013，22(4)：666-670.