

渭北黄土高原苹果园土壤重金属空间分布及其累积性评价

胡克宽¹, 王英俊¹, 张玉岱¹, 李会科^{1,2*}, 梅立新³, 梁俊³

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与肥料及农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过对渭北黄土高原苹果园 217 个样点 0~40 cm 土层土壤取样分析,采用地统计学和 GIS 相结合的方法,研究了苹果园土壤中 Hg、Cd、Pb、As、Cr、Cu 6 种重金属的含量及其积累状况、空间结构及其分布特征,并根据绿色食品产地环境质量标准对苹果园土壤环境质量进行了评价。结果显示,渭北苹果园土壤中 6 种重金属已出现一定程度的累积,其累积程度依次为: Hg>Pb>Cd>As>Cu>Cr。各采样点 Hg、Cd 含量变异程度较大,变异系数在 50%以上;而 Pb、As、Cr、Cu 各采样点含量差异较小,变异系数为 19.10%~23.70%。6 种重金属均表现为较强的空间相关性,其空间变异性主要由成土母质、气候、地形等结构性因素控制。其中随机因素对 Cd 的空间变异的影响程度相对较大,一定程度上削弱了结构性因素对 Cd 空间变异的主导作用,而 Pb、Cr、Cu 空间变异受随机因素的影响较弱,随机性因素对各重金属空间变异的影响程度依次为: Cd>As>Hg>Pb>Cr>Cu。重金属积累的单项评价指数均小于 1,综合评价指数小于 0.7,果园土壤环境质量完全满足绿色食品产地环境质量的要求,其中 As 的累积对绿色食品苹果生产可能有较大的潜在影响,应加以有效控制以防止其持续累积。

关键词: 重金属; 空间分布; 土壤环境质量; 苹果园; 黄土高原

中图分类号: X833 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)05-0934-08

Spatial Distribution and Cumulation Evaluation of Soil Heavy Metals in Apple Orchards of Weibei Area, the Loess Plateau

HU Ke-kuan¹, WANG Ying-jun¹, ZHANG Yu-dai¹, LI Hui-ke^{1,2*}, MEI Li-xin³, LIANG Jun³

(1.College of Environment and Resource, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3.College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: From the apple orchards in the Weibei area of the southern Loess Plateau of China, 217 surface soil samples of 0~40 cm layer soil were collected to analysis the spatial distribution of 6 heavy metals (Hg, Cd, Pb, As, Cr and Cu) with the help of geo-statistical method and GIS technology. Simultaneously, soil environmental quality was evaluated according to the environmental quality standards of green food production base by methods of both the single factor and the Nemerow multi-factor. The results indicate that the content of these 6 metals are cumulated in the studied apple orchards, especially the element of Hg and Pb, when compared with the corresponding natural background values. However, the soil environmental hazards to these 6 metals are little currently. Coefficient of variation of Hg and Cd are more than 50% and higher than that of Pb, As, Cr and Cu. Distribution of these 6 heavy metals present a stronger spatial relevance because their spatial pattern are mainly influenced by natural factors such as the soil parent material, climate, topography and other structural factors. Random factors play a relatively greater role in spatial variability of Cd than others listed as Cd > As > Hg > Pb > Cr > Cu. Single factor index of all metals are

收稿日期: 2012-01-01

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103005-9); 国家现代农业产业技术体系(CARS-28); 陕西省科技攻关(2010K01-04-2)资助; 陕西省科技统筹创新工程计划(2011KTZB02-02-05)

作者简介: 胡克宽(1985—), 男, 山东省济宁人, 硕士研究生, 主要从事农业环境方面的研究。E-mail: hukekuan@163.com

* 通信作者: 李会科 E-mail: lihuike@nwsuaf.edu.cn

less than 1 and their multi-factor index are less than 0.7, it shows that the studied apple orchards meet the needs of the green food production base for further development. On the other hand, the content of As may have a potential negative influence to the green food production, therefore, real-time monitoring and protection measures are required to prevent its further enrichment.

Keywords: heavy metals; spatial distribution; soil environmental quality; apple orchard, Loess Plateau

农产品的质量安全与产地土壤状况有着密切联系。土壤重金属累积、迁移不仅影响动植物生长发育与食品安全,而且可通过食物链直接危害人类健康^[1]。因此,针对土壤中重金属累积状况进行调查和评价,已是国内外广泛关注的问题。目前国内外有关果园土壤重金属的研究不断增多,重点多为土壤重金属累积^[2]、污染评价、可能来源^[3-4]、食品安全^[5]等。

渭北黄土高原是中国乃至世界优质苹果生产基地之一,其果品质量是保证苹果产业持续发展的关键。土壤重金属作为土壤环境中天然存在的化学物质,其积累是影响果品质量安全的潜在因素之一^[6],过量重金属累积不仅会对土壤环境造成污染,而且会影响果树生长和果品质量安全,土壤重金属已作为绿色食品苹果产地环境要求检测的一项重要指标^[7],因此针对渭北黄土高原苹果园土壤中重金属含量及其积累状况进行调查和评价,对于优化生产技术、保护生态环境具有重要作用,而且可为发展安全级别较高的绿色果品提供科学依据。近些年来,已有一些学者在小尺度范围内对渭北黄土高原苹果园土壤重金属含量进行了研究^[8-9],但这些研究取样点少且主要集中于重金属含量及其污染状态评价方面,针对渭北苹果园土壤重金属含量及其积累状况全面、系统地调查,尤其对该区域果园土壤重金属空间分布方面的研究尚未见报道。鉴于此,本研究系统探讨了渭北苹果园土壤重金属含量及其积累状况、空间分布特征,并根据绿色食品产地环境质量标准对该区域苹果园土壤环境质量进行了评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭北苹果产区位于北纬 34°10′~36°20′,东经 106°20′~110°40′之间,地处黄土高原南部黄土台塬沟壑区,该区属典型的暖温带大陆性季风气候区,年均气温 8~12℃,年均降水量 560~650 mm,海拔高 800~1 200 m,土壤主要为黄绵土,有少量黄壤土、黄土、黑垆土,pH 值 7.6~9.7。区内光热资源充足,年日照时数达 2 200~2 400 h,昼夜温差大(11.8~16.6℃),土层深

厚(黄土层 50~200 m),是我国 7 项指标均符合优质苹果生产的最佳生产区域。20 世纪 80 年代以来,苹果产业得到较快发展,目前栽培面积已达 53 万 hm²,居全国首位,产量 626.64 万 t,产值超过 100 亿元^[10],苹果产业成为促进区域经济发展,解决“三农”问题,实现小康社会发展目标的支柱产业。

1.2 采样与分析

采样点根据研究区苹果园分布情况采用系统-随机布点法布设^[11],同时考虑苹果园分布的集中情况进行布点疏密调整,共布设采样点 217 个,并对各采样点使用 GPS 定位(图 1)。由于苹果根系多分布在 0~40 cm 土层,因此本研究采集与分析 0~40 cm 果园土层重金属含量,更能反映其对苹果生长和果实安全性的潜在影响。每一采样点采用混合法采样,即每一采样点均采自 10 m×10 m 正方形 4 个顶点和中心点的 0~40 cm 土样,混合后从中取 1.0 kg 为该采样点的样品,并用调查表记录采样点的环境状况。土壤样品自然风干后,去除砂砾和植物残体,用木棒压磨揉碎,过 2 mm 尼龙筛,取 200 g 用玛瑙钵研磨至过 0.15 mm 筛,并充分混匀,作为分析用样品。Pb、Cd 用石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T 17141—1997),Hg、As

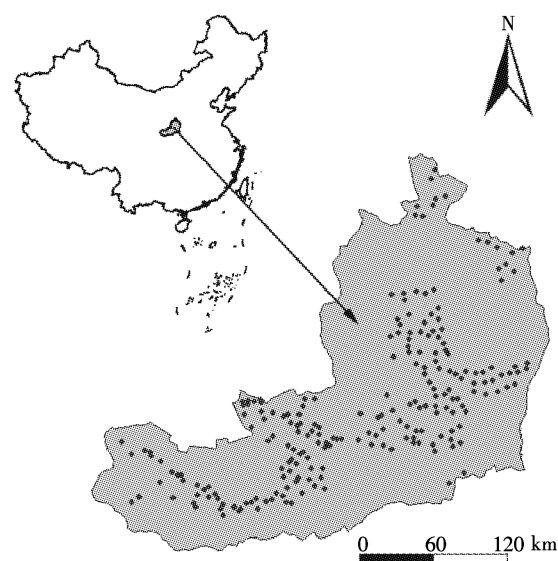


图 1 采样点分布

Figure 1 Distribution of sampling points

用原子荧光法测定(GB/T 17136—1997,GB/T 17136—1997),Cr 用二苯碳酰二肼分光光度法测定(GB/T 7467—1987),Cu 用火焰原子吸收分光光度法测定(GB/T 17138—1997)^[12-13],分析过程加入国家标准土壤参比物质(GSS1)对测量样品进行误差控制,重复 3 次,分析结果符合质量控制要求,各种重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内,即重金属元素误差均小于 5%。分析过程中使用试剂均为优级纯,实验用水为 18.3MΩ 的超纯水。

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS18.0 进行数据的统计分析、正态性检验和数据转换;利用 GS+7.0 进行半方差函数计算和理论模型的选择;采用 ArcGIS9.3 中的 Geostatistics 模块进行空间插值和图形绘制。

1.4 土壤环境质量评价方法

采用单项指数和综合指数法对土壤中重金属累积状况进行评价。单项指数法计算公式如下:

$$P_i=C_i/S_i$$

式中: P_i 为重金属 i 的累积指数, C_i 为重金属 i 的实测值, S_i 为重金属 i 的评价参比值。绿色果品生产是现今世界果品产业发展的潮流与趋势,考虑到研究区域以绿色食品苹果生产为目标,对环境质量要求较高,本研究采用《绿色食品产地土壤环境质量标准》(NY/T 391—2000)^[14]中的标准为评价参比值。

综合累积指数采用内梅罗综合指数法,其计算公式如下:

$$P=[(P_{\max}^2+P_{\text{ave}}^2)/2]^{1/2}$$

式中: P 为内梅罗综合指数, $P_{\max}$ 为单项指数最大值, P_{ave} 为单项指数算术平均值。土壤重金属评价具体分级标准见表 1。该分级标准为此次调查评价中的相对参比值,其累积情况与苹果中相应元素含量的关系,特别是在何种情况下使得苹果中重金属含量超过食

表 1 单项指数和综合指数法分级标准

Table 1 Classification standards of single factor index and multi-factor index

等级	单项指数法分级标准		综合指数法分级标准	
	指数值	累积状况	指数值	累积状况
I	$P_i<1$	未累积	$P\leq 0.7$	未累积
II	$1\leq P_i<2$	轻度累积	$0.7<P\leq 1$	警戒
III	$2\leq P_i<3$	中度累积	$1<P\leq 2$	轻度累积
IV	$P_i\geq 3$	重度累积	$2<P\leq 3$	中度累积
V			$P>3$	重度累积

品卫生标准的限量值,从而构成土壤污染,是后续工作需要特别关注的问题。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量现状

检测分析可知,渭北黄土高原苹果园土壤 Hg、Cd、Pb、As、Cr、Cu 平均含量为 0.06 mg·kg⁻¹、0.11 mg·kg⁻¹、20.6 mg·kg⁻¹、12.0 mg·kg⁻¹、59.1 mg·kg⁻¹、24.4 mg·kg⁻¹,均已超过该区域相应的背景值^[15](表 2,表 3),说明果园土壤已表现出不同程度的重金属累积,但不同

表 3 土壤重金属环境标准

Table 3 Environmental standards of soil heavy metals

元素	背景值/ mg·kg ⁻¹	超标率/%	绿色食品标准/ mg·kg ⁻¹	二级标准限值/ mg·kg ⁻¹
Hg	0.016	93.09	0.35	1.0
Cd	0.098	68.20	0.4	0.6
Pb	16.8	77.42	50	350
As	10.5	83.41	20	20
Cr	57.5	58.53	120	350
Cu	23.0	60.83	100	200

注:绿色食品和二级标准的土壤重金属环境标准均为土壤 pH 值大于 7.5 的含量限值。土壤环境质量标准 Cu 的二级标准限值为果园土壤含量限值。

表 2 土壤重金属含量统计描述

Table 2 Statistics of soil heavy metal contents

元素	最小值/ mg·kg ⁻¹	最大值/ mg·kg ⁻¹	平均值/ mg·kg ⁻¹	中位数/ mg·kg ⁻¹	标准差/ mg·kg ⁻¹	变异 系数/%	偏度	峰度	K-S 检验		
									Asymp Sig.(2-tailed)	对数转换 Sig.(2-tailed)	Box-Cox 转换 Sig.(2-tailed)
Hg	0	0.31	0.06	0.05	0.04	67.24	2.31	9.36	0.001	0.263	0.605
Cd	0	0.24	0.11	0.12	0.06	50.44	-0.40	-0.32	0.061	—	0.005
Pb	7.2	35.4	20.6	21.1	4.9	23.70	-0.20	0.28	0.640	0.018	0.640
As	5.0	19.8	12.0	11.8	2.9	19.10	-0.18	1.50	0.004	0	0.052
Cr	26.5	98.7	59.1	60.1	12.9	21.43	-0.12	0.44	0.545	0.022	0.149
Cu	11.3	61.4	24.4	24.1	5.3	21.74	2.26	12.99	0.004	0.097	0.049

注:重金属 Box-Cox 变换的参数分别为: Hg 0.19, Cd 0.81, Pb 1.16, As 0.95, Cr 0.72, Cu -0.51。

类型重金属累积程度不同,Cu、Cr 整体外源输入少,累积量较低,分别超过背景值的 5.9%和 2.7%;Pb 的富集量较大,为其背景值的 1.23 倍;Hg 富集程度最大,为其背景值的 3.63 倍,各重金属富集程度具有 $Hg > Pb > Cd > As > Cu > Cr$ 的特征。与渭北土壤环境背景值相比,各重金属的中位值均超过背景值,说明多数采样点的重金属含量超过了当地的背景值,217 个土壤样点中,Hg、Cd、Pb、As、Cr、Cu 的超背景值样点数占总采样点的比率分别为 93.09%、68.20%、77.42%、83.41%、58.53%、60.83%,表现为 $Hg > As > Pb > Cd > Cu > Cr$ 。各采样点重金属含量变异程度大致呈现二个层次,Hg、Cd 的变异系数在 50%以上,达 67.24%和 50.44%,表明在不同地点的 Hg 和 Cd 含量有较大的差异,离散性较大,具有较大的分异特征;Pb、As、Cr、Cu 的变异系数介于 19.10%~23.70%,其含量分布比较集中,离散性明显较小。不同果园土壤重金属含量的分异及其变异程度,可能与不同果园采取农艺措施的不同、施用农药化肥种类和数量的不同、土壤成土过程差异有关。参照国家土壤环境质量标准二级标准^[16](表 3),渭北黄土高原苹果园土壤 Hg、Cd、Pb、As、Cr、Cu 含量的最大值、平均值均未超过其安全警戒值,说明果园土壤环境中的重金属含量水平对苹果生产尚不存在威胁。然而,重金属积累的安全性不仅与其总量有关,而且与环境条件有着十分密切的关系,为了保证苹果的安全生产,应该加强重金属在土壤-果树(果实)系统中迁移和转化的研究。

2.2 土壤重金属空间分布特征

采用柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov test)对数据进行正态分布检验^[17],结果表明 Cd、Pb、Cr 呈正态分布;通过 Box-Cox 转换后 Hg、As 服从正态分布;Cu 呈对数正态分布(表 2)。利用半方差函数的计算公式,分别用不同模型拟合,得到模型的相关参数,以决定系数(R^2)最大为原则选择最佳模型^[18](表 4),结果显示,Cd、Cr 拟合效果以高斯模型最

佳,Cu 拟合效果以球状模型最佳,Hg、Pb、As 拟合效果以指数模型最佳。空间变异参数中的块金值和结构方差可用于描述重金属受人为因素和自然因素影响的程度,块金值和基台值的比值 $C_0/(C_0+C)$ 反映随机部分引起的空间变异占总体变异的比重,如果比值小于 25%,说明重金属具有强烈的空间相关性,变异主要由结构性变异组成;比值在 25%~75%之间,说明重金属具有中等的空间相关性;比值大于 75%,说明重金属空间相关性很弱,变异主要由随机变异组成^[19-20]。由表 4 可知 6 种元素的 $C_0/(C_0+C)$ 介于 7.21%~23.64%,均小于 25%,表明该区域重金属表现出强烈的空间相关性,其空间变异绝大部分是由成土母质、气候、地形等结构性因素引起。其中 Cd 的 $C_0/(C_0+C)$ 相对较大,为 23.64%,最为接近 25%,表明随机因素,如施用肥料、农药等果园生产活动,对 Cd 的空间变异的影响程度要比其他元素大,一定程度上削弱了结构性因素对重金属空间变异所起的主导作用;Pb、Cr、Cu 的 $C_0/(C_0+C)$ 相对较小,均低于 10%,说明 Pb、Cr、Cu 的空间变异受随机性因素影响程度较小。6 种重金属的 $C_0/(C_0+C)$ 大小依次为: $Cd > As > Hg > Pb > Cr > Cu$ 。

根据对 6 种重金属半方差函数模型的分析,利用克里格插值方法(Kriging)进行土壤重金属含量的空间插值,通过交叉验证法(Cross Validation)对不同参数的数据模型精度进行比较(表 5),并以标准平均值(Mean Standardized)最接近于 0,均方根预测误差

表 5 土壤重金属模型插值交叉验证

Table 5 Cross validation of soil heavy metals interpolation

元素	模型	标准平均值	均方根预测误差	平均标准误差	标准均方根预测误差
Hg	指数模型	0.002	0.038	0.037	1.041
Cd	高斯模型	-0.009	0.056	0.059	0.956
Pb	指数模型	-0.013	4.674	4.978	0.939
As	指数模型	-0.016	2.255	2.341	0.963
Cr	高斯模型	0.004	12.42	12.050	1.027
Cu	球状模型	-0.017	5.088	4.503	1.176

表 4 土壤重金属半方差函数特征参数

Table 4 Semi-variance functions of soil heavy metals and these parameters

元素	模型	变程/km	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	块金基台比/%	R^2 /%
Hg	指数模型	50.10	0.000 2	0.001 5	15.33	0.82
Cd	高斯模型	334.50	0.000 9	0.003 7	23.64	0.95
Pb	指数模型	66.40	2.18	22.80	9.56	0.86
As	指数模型	37.20	0.71	4.37	16.25	0.84
Cr	高斯模型	38.90	13.80	156.30	8.83	0.82
Cu	球状模型	18.70	0.000 2	0.002 9	7.21	0.54

(Root-Mean-Square) 最小, 平均标准误差(Average Standard Error)最接近于均方根预测误差, 标准均方根预测误差(Root-Mean-Square Standardized)最接近于 1 为标准选择最优的插值模型^[21], 并绘制土壤重金属含量的空间分布格局图(图 2)。由表 5 可知所选插值模型的精度满足克里格插值的要求。

由图 2 可知, 渭北苹果产区大部分地区 Hg 含量 ($0.04\sim0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 整体偏高, 是其背景值 2.5 倍以上, 显示存在着累积程度的相似性, 具有一定的同源

性。相关研究指出化石燃料、燃煤、石油冶炼等排放的气体, 导致大气中 Hg 含量增加, 通过大气沉降等进入土壤^[22], 根据实地调查, 该区域有多条跨省主干道横跨全境, 交通量大, 陕西最大的石化企业(陕西省洛川炼油厂)位于该地区, 而且该区域冬季漫长(冬季长达 5 个月), 长期以来冬季取暖以燃料煤为主, 因此大气沉降是该地区土壤 Hg 富集的因素之一。此外, 苹果园中普遍使用含 Hg 的农药、化肥、叶面肥也是 Hg 富集的主要因素^[23]。如图 2 所示, 果园土壤 Hg 高

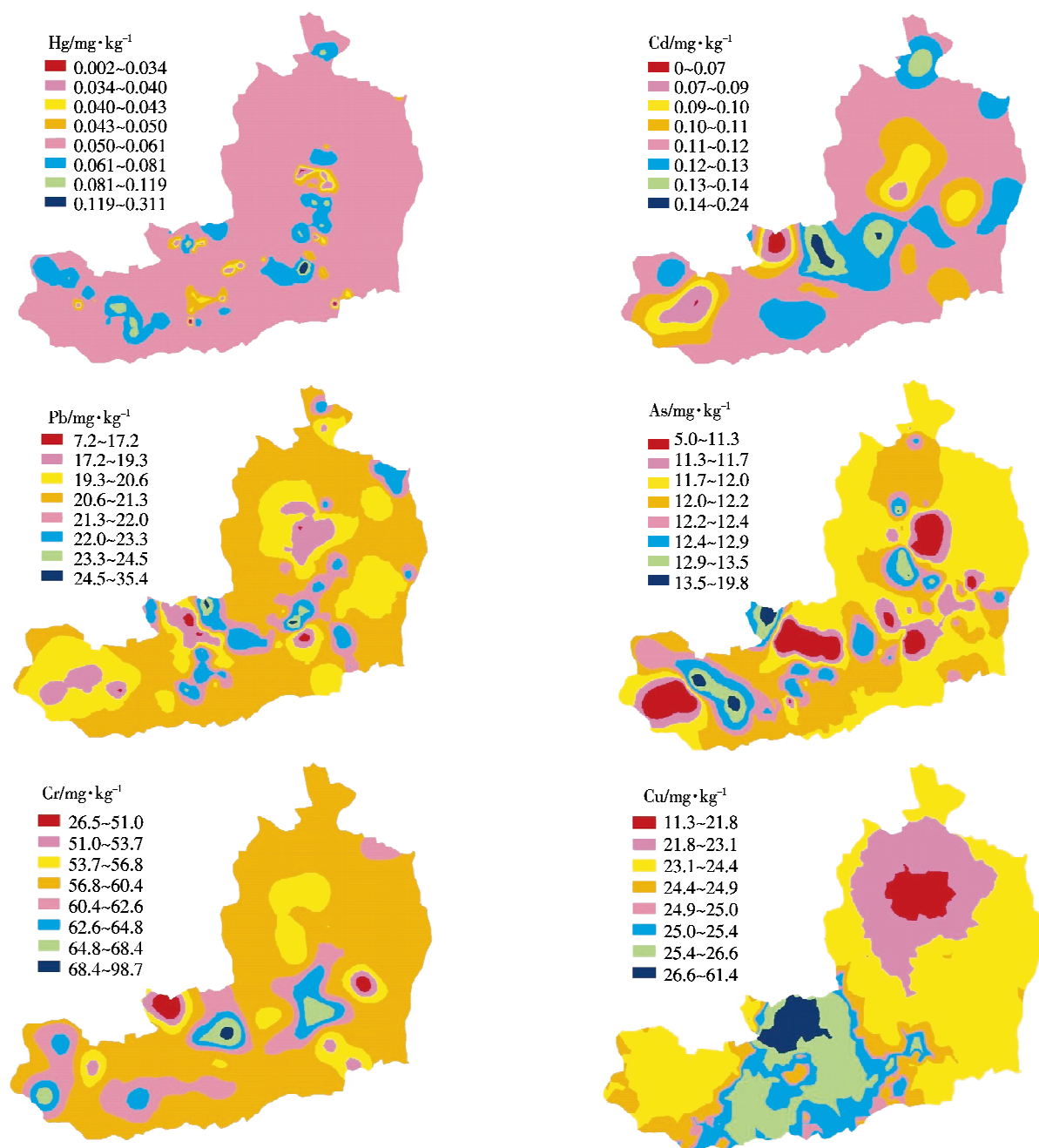


图 2 土壤重金属空间分布

Figure 2 Spatial distribution of soil heavy metals

值区($0.12\sim0.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)呈斑块分布在中南部。结合实地环境调查,中部及南部果园土壤 Hg 高值区主要分布在人类活动密集的区域及其边缘,这种分异除了与果园生产有关外,可能是由于人类活动所引起的。赵晶等研究指出 ^{124}Cd 主要来源是施肥尤其是磷肥的使用,Cd 含量最高($0.13\sim0.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的区域主要分布在西南部和北部的部分区域,结合图 3 可知,该区域是苹果园分布相对集中的区域,也是渭北苹果发展较早的区域,苹果生产中大量施用化肥可能是导致 Cd 含量升高的主要原因。从空间分布上看,Pb、As 的高值区主要分布在西南部,果园土壤的 Pb 污染与含 Pb 杀虫剂的使用有很大关系^[25],As 累积与使用含 As 的化肥、杀虫剂、防腐剂(如磷肥、福美肿等)有关^[26],而 Pb、As 的高值区是苹果园分布相对集中的区域(见图 1),也是渭北苹果发展较早的区域,大量施用化肥和农药可能是导致果园土壤 Pb、As 含量异常升高的主要原因。Cr 和 Cu 的空间分布较为相似,大部分地区富集程度较低,显示 Cr 和 Cu 总体处于稳定水平,只有西南部果园土壤中的 Cr、Cu 含量相对较高,含有 Cr、Cu 肥料、农药的施用是果园土壤 Cr、Cu 积累的重要原因,如鸡粪中 Cr 的含量达 $20.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,喷施含铜杀菌剂如波尔多液等^[27-28],因此,西南部局部果园土壤中 Cr、Cu 含量相对较高的可能来源是肥料、农药的不合理使用。

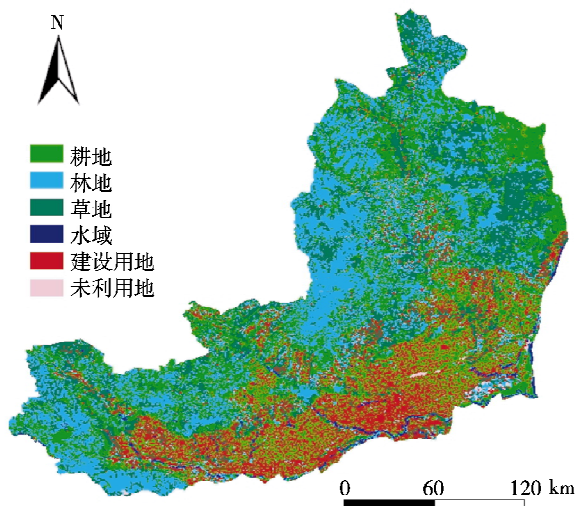


图 3 研究区土地利用现状图
Figure 3 Land use type in study area

2.3 土壤环境质量评价

以绿色食品土壤环境质量标准作为评价参比值,分别计算 217 个采样点 6 种重金属积累的单项指数和综合积累指数,结果见表 6。从评价结果可看出,6

种重金属积累单项指数最大值和平均值均小于 1,处于 I 级清洁水平,符合绿色食品土壤环境质量标准。综合累积指数评价结果表明,除两个采样点大于 0.7,处于 II 级警戒水平外,其余采样点综合积累指数均小于 0.7,处于 I 级安全水平,显示研究区绝大多数果园土壤重金属积累对发展绿色食品苹果生产不具有威胁,只存在局部个别果园处于轻度积累水平,为了保证绿色果品的安全生产,应对这些果园加以有效地控制以防止重金属持续累积。如表 6 所示,As 的单项累积指数平均值为 0.60,高于其他元素,其单项指数的最大值为 0.99,已接近绿色食品土壤环境质量标准限值,说明果园土壤中 As 的累积对绿色食品苹果生产具有较大的潜在影响,如继续累积则部分区域土壤可能将不适合绿色食品苹果的生产,今后应加以有效控制,以防止其持续累积,同时也应该特别关注 As 对果树产量和质量的影响。

表 6 土壤重金属环境质量评价结果
Table 6 Evaluation of soil heavy metals environmental quality

项目	最小值	最大值	平均值	样点频数分布				
				I	II	III	IV	V
P_i	Hg	0.01	0.89	0.17	217	0	0	0
	Cd	0.01	0.60	0.28	217	0	0	0
	Pb	0.14	0.71	0.41	217	0	0	0
	As	0.25	0.99	0.60	217	0	0	0
	Cr	0.22	0.82	0.49	217	0	0	0
	Cu	0.11	0.61	0.24	217	0	0	0
P		0.36	0.77	0.52	215	2	0	0

3 结论

(1)渭北黄土高原苹果园土壤中 Hg、Cd、Pb、As、Cr、Cu 的平均含量为 $0.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $12.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $59.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $24.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均已超过该区域相应的背景值,不同类型重金属累积程度不同,其中 Hg、Pb 的累积程度较大,但 6 种重金属含量的最大值、中值、平均值均未超过绿色食品产地土壤环境质量标准。各采样点 Hg、Cd 含量变异程度较大,变异系数在 50%以上,而各采样点 Pb、As、Cr、Cu 含量差异较小,变异系数介于 19.10%~23.70%。

(2)6 种重金属均表现为较强的空间相关性,其空间变异主要由成土母质、气候、土壤类型等结构性因素引起。苹果生产活动等随机性因素对 Cd 的空间变异的影响程度比其他元素大,一定程度上削弱了结构性因素对重金属空间变异的主导作用;随机性因素

对 Pb、Cr、Cu 空间变异的影响相对较弱和不明显。果园土壤中 Hg 高值区呈斑块状分布在渭北苹果产区的中南部果园, Pb、As、Cd、Cr、Cu 含量高值区主要分布该区域西南部果园。

(3) 研究区果园土壤重金属单项累积指数均小于 1, 处于 I 级清洁水平; 绝大多数采样点综合累积指数小于 0.7, 说明研究区绝大多数果园土壤重金属积累对发展绿色食品苹果生产不具有威胁, 只存在局部个别果园处于 II 级警戒水平。6 种元素中, As 的累积对绿色食品苹果生产可能有较大的潜在影响, 应加以有效地控制以防止其持续累积。在今后的研究中应特别关注重金属在土壤-果树(果实)系统中的迁移和转化, 研究土壤重金属的累积状况与苹果的产量和质量之间的关系, 以便较为全面而客观地评估产地土壤环境质量状况。

参考文献:

- [1] 吴学丽, 杨永亮, 徐青, 等. 沈阳地区河流灌溉渠沿岸农田表层土壤中重金属的污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 282-288.
WU Xue-li, YANG Yong-liang, XU Qing, et al. Evaluations of heavy metal pollution status in surface soils adjacent to the rivers and irrigation channel in Shenyang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 282-288.
- [2] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 3-11.
GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 3-11.
- [3] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析评判土壤重金属来源[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 45-50.
ZHAO Yan-feng, GUO Heng-liang, SUN Zhi-ying, et al. Principle component analyses based on soil knowledge as a tool to indicate origin of heavy metals in soils[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(1): 45-50.
- [4] Chen Tao, Liu Xingmei, Zhu Muzhi, et al. Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 151: 67-78.
- [5] 刘凤枝, 师荣光, 徐亚平, 等. 农产品产地土壤环境质量适应性评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 6-14.
LIU Feng-zhi, SHI Rong-guang, XU Ya-ping, et al. Study on soil environmental suitability assessment for agricultural producing area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 6-14.
- [6] 陈学民, 朱阳春, 伏小勇. 天水苹果土壤重金属富集状况评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 893-898.
CHEN Xue-min, ZHU Yang-chun, FU Xiao-yong, et al. Source and enrichment situation of heavy metals in apple orchard soils of Tianshui Area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 893-898.
- [7] Peryea F J. Heavy metal contamination in deciduous tree fruit orchards: Implications for mineral nutrient management[J]. *Acta Hort*, 2001, 564: 31-39.
- [8] 张林森, 梁俊, 吴春林, 等. 陕西苹果园土壤重金属含量水平及其评价[J]. 果树学报, 2004, 21(2): 103-105.
ZHANG Lin-sen, LIANG Jun, WU Chun-lin, et al. Evaluation and concentration of soil heavy metals in apple orchards of Shaanxi Province[J]. *Journal of Fruit Science*, 2004, 21(2): 103-105.
- [9] 梁俊, 赵政阳, 樊明涛. 陕西渭北苹果园土壤中汞、镉污染与分布特征研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 209-213.
LIANG Jun, ZHAO Zhen-yang, FAN Ming-tao. Spatial distribution and pollution of mercury and cadmium in Weibei apple orchard soils of Shaanxi Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 209-213.
- [10] 赵政阳, 戴军, 王雷存. 陕西苹果产业现状及国际竞争力分析[J]. 西北农业学报, 2002, 11(4): 108-111.
ZHAO Zheng-yang, DAI Jun, WANG Lei-cun. Analysis of the apple industrial present situation and international competition ability in Shaanxi Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2002, 11(4): 108-111.
- [11] 李艳霞, 徐理超, 熊微, 等. 典型矿业城市农田土壤重金属含量的空间结构特征: 以辽宁省阜新市为例[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 679-687.
LI Yan-xia, XU Li-chao, XIONG Wei, et al. The spatial structure feature of heavy metals in agricultural soil of mining city: A case study of Fuxin, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4): 679-687.
- [12] 李飞, 易卫东. 原子荧光光谱法代替传统方法同时测定汞和砷[J]. 工业水处理, 2003, 23(10): 54-56.
LI Fei, YI Wei-dong. Determination of hydrargyrum and arsenic simultaneously by atomic fluorescence spectrometry instead of the traditional method[J]. *Industrial Water Treatment*, 2003, 23(10): 54-56.
- [13] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(DD2005-3)[S]. 北京: 2005: 9-10.
China Geological Survey. Technical Specification for Sample Analysis in Eco-geochemistry Assessment(DD2005-3)[S]. Beijing: China Geological Survey, 2005: 9-10.
- [14] 食用农产品产地环境质量标准[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
Farmland environmental quality evaluation standards for edible agricultural products [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [15] 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
Chinese environmental background value for soils[M]. Beijing: Chinese environmental science Press, 1990.
- [16] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准(GB 15618—1995).
State Environmental Protection Administration of China. Chinese Environmental Quality Standard for Soils(GB 15618—1995).
- [17] 霍霄妮, 李红, 张薇薇, 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.
- HUO Xiao-ni, LI Hong, ZHANG Wei-wei, et al. Multi-scale spatial structure of heavy metals in Beijing cultivated soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (3):223-229.
- [18] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. *Advanced Agronomy*, 1985, 38:44-49.
- [19] 刘庆, 杜志勇, 史衍玺, 等. 基于GIS的山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10):258-263.
- LIU Qing, DU Zhi-yong, SHI Yan-xi, et al. Spatial distribution characteristics of soil heavy metals in vegetable growing area based on GIS in Shouguang City, Shandong Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10):258-263.
- [20] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征:以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(1):33-40.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, LI Jiang-tao, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze river delta: A case study of Taicang City in Jingsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1):33-40.
- [21] 吴文学, 晏路明. 普通Kriging法的参数设置及变异函数模型选择方法:以福建省一月均温空间内插为例[J]. 地球信息科学, 2007, 9(3):104-108.
- WU Xue-wen, YAN Lu-ming. Setting parameters and choosing optimum semivariogram models of ordinary Kriging interpolation: A case study of spatial interpolation to January average temperature of Fujian Province[J]. *Geo-Information Science*, 2007, 9(3):104-108.
- [22] 刘俊华, 陈乐恬, 王文华, 等. 北京市区及郊区大气中的汞沉降的估算[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5):643-645.
- LIU Jun-hua, CHENG Le-tian, WANG Wen-hua, et al. The estimation of mercury deposition in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(5):. 643-645.
- [23] 郑国章, 岳乐平. 洛川苹果园土壤重金属污染调查与评价[J]. 土壤通报, 2008, 39(2):402-405.
- ZHENG Guo-zhang, YUE Le-ping. Investigation and assessment on heavy metals pollution of soil in Luochuan apple orchard[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2):402-405.
- [24] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):953-961.
- ZHAO Jing, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):953-961.
- [25] 朱美玲, 庞奖励, 张卫青, 等. 洛川塬区典型农业土壤与苹果土壤重金属分布调查与评价[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2):142-146.
- ZHU Mei-ling, PANG Jiang-li, ZHANG Wei-qing, et al. Distribution features and environmental risk assessment of heavy metals in apple tree plantations in Luochuan tableland[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 25(2):142-146.
- [26] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 3(11):205-219.
- [27] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 果园土壤重金属污染调查与评价:以重庆市金果园为例[J]. 中国农学通报, 2011, 27(14):244-249.
- TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, et al. Pollution investigation and assessment of heavy metals in orchard soil: A case study in golden orchard of Chongqing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(14):244-249.
- [28] 单正军, 王连生, 蔡道基, 等. 果园土壤铜污染状况及其对作物生长的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2):119-121.
- SHAN Zheng-jun, WANG Lian-sheng, CAI Dao-ji, et al. Pollution of copper in orchard soil and its effects on plant growth[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(2):119-121.