

关中地区日光温室重金属污染及其 田块尺度下的特征

唐希望¹, 同延安¹, 吉普辉¹, 梁连友¹,
庞妍¹, Nguyen Thanh Hung^{1,2}, 王力¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. College of Resources and Environment, Thu Dau Mot University, Binh Duong, VietNam 72000)

摘要: 对关中地区8个日光温室集中分布区域土壤重金属污染进行了调查, 并比较了两个相同年限相近位置日光温室污染分布特征, 在田块尺度下应用 ARCGIS 软件地统计学模块进行了插值模型分析。结果表明, 8个日光温室采样点污染负荷指数(PLI)在 1.087~1.723 之间, 均为中等污染; 区域 PLI 值为 1.311, 区域日光温室土壤重金属为中等污染。地统计学插值图表明 1号日光温室 Cd, 2号日光温室 Cd、Cu、Pb 均出现不同程度累积。在田块尺度下, 日光温室 1 中 Cd 上层土壤分布高于下层, Cr、Cu 和 Pb 在 0~1 m 土壤随机分布; 日光温室 2 中 Cd 和 Cu 上层土壤分布高于下层, Pb 和 Cr 下层土壤分布高于上层。日光温室重金属污染具有复杂性, 即便相同年限相近位置不同日光温室内土壤重金属污染特点也不尽相同。

关键词: 关中地区; 日光温室; 重金属污染; 地统计学; 空间分布

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Assessment of greenhouse heavy metal pollution in Guanzhong area and analysis of its spatial distribution on field scale using Geo-statistical software

TANG Xi-wang¹, TONG Yan-an¹, JI Pu-hui¹, LIANG Lian-you¹,
PANG Yan¹, Nguyen Thanh Hung^{1,2}, WANG Li¹

(1. Collage of Resource and Environment Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Resources and Environment, Thu Dau Mot University, Binh Duong, Vietnam 72000)

Abstract: To assessment the greenhouse heavy metal pollution in Guanzhong area, eight facility agricultural areas were selected to collect soil samples. Two greenhouses from the same place with the same planting years were also selected to analysis the spatial distribution of heavy metals in soil on field scale using Geo-statistical software. Samples were digested with HClO₄ - HNO₃ - HF and subsequently assayed for Cd, Cr, Cu, Pb by ICP - AES. The findings showed the PLI(Pollution load index) of eight greenhouse soil were 1.403, 1.323, 1.261, 1.258, 1.723, 1.372, 1.087, 1.152, and the greenhouse soil in Guanzhong area was slightly polluted with PLI 1.311. The method of analysis vertical section of soil spatial distribution of heavy metals on field scale using Geo-statistical software was established. Maps of heavy metals spatial distribution in two greenhouses soil were made using Kriging method. The maps showed the pollutant in No.1 greenhouse was Cd and in No.2 greenhouse were Cd, Cu and Pb. At field size, Cd content in No.1 greenhouse topsoil and Cd and Cu content in No.2 greenhouse topsoil were both higher than in subsoil, while Pb in No.2 greenhouse topsoil lower than subsoil. In conclusion, we detected complexity of soil heavy metal pollution of greenhouse, as evidenced by the contrasting mechanism of similar greenhouses.

Keywords: Guanzhong area; greenhouse; heavy metal pollution; geostatistics; spatial distribution

收稿日期: 2015-01-10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203045); 高等学校学科创新引智计划资助(B12007)

作者简介: 唐希望(1988—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生, 主要研究方向为污染物迁移与调控。E-mail: txw@nwsuaf.edu.cn。

通信作者: 同延安, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤化学、施肥与环境、农业生态等方面研究。E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn。

土壤污染是目前我国农业环境面临的主要问题之一,尤其是重金属污染问题最为复杂,得到了很多研究者的重视^[1-3]。污灌是典型的重金属污染源之一^[4-5],关于厂矿排污造成重金属污染报道也逐渐增多^[6-9]。由于化肥、农药和有机肥的过量施用^[10-12],日光温室土壤同样存在严重的重金属累积问题^[13],且土壤多为 Cd, Cr, Cu, Pb 的累积。关中地区自 1992 年起修建了大量日光温室,截止 2009 年其面积已经达到 22 533 hm²^[14]。然而目前尚未见到以关中区域为整体,研究日光温室土壤重金属污染的文献报道。

相较于其他重金属污染土壤,日光温室面积小,具有一定的封闭性和独立性,重金属污染源只能通过人为因素。同时由于中国当前设施农业生产标准化水平较低,施肥方式、种类难以标准化,决定了重金属在日光温室内的迁移分布迥异。很多研究者利用地统计学软件对土壤重金属污染特征进行了研究^[15-17],但多集中在区域空间尺度上,主要分析表层土壤重金属分布特征。王纪华^[18]等认为这种研究方式并不能应用于我国当前生产实际,提出了田块尺度上的土壤污染特征分析。但其采样步长为 100 m,大于日光温室的长度,使用仍然具有局限性。本文以关中日光温室土壤为研究对象,分析重金属 Cd, Cr, Cu, Pb 污染状况,并利用地统计学软件,分析同一地点两个相同年限日光温室田块尺度上重金属空间分布特征。本研究对于了解关中设施农业重金属污染现状,保护农作物生产和人体健康具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及采样点布设

关中地区位于陕西省中部,属于半湿润易旱区,温带季风性气候,年降水量 500 ~ 800 mm,农业用水以灌溉为主,土壤类型为塿土,土壤呈碱性, pH > 7.5。对关中 8 个设施农业基地,分别随机选取 10 个日光温室,使用不锈钢土钻,“之”字形分布,采集温室内 5 个混合土壤样品,采样深度为 0 ~ 20 cm。样品采集过程使用 GPS 定位,设施农业基地位置如图 1,8 个设施农业基地周边无可见污染源。根据调查结果,选取杨凌区五泉镇南营村两个 16 年年限重金属污染日光温室(日光温室 1 和日光温室 2),采用地统计学手段对污染特征进行田块尺度分析,两个日光温室采样点位置在日光温室土壤内分布相

同,采样点分布见图 2。每个日光温室共选取 6 个 0 ~ 1 m 剖面采集土壤样品,每 20 cm 取样,各剖面间隔 10 m。日光温室长 75 m,宽 7.5 m。



图 1 关中地区日光温室采样点位置

Fig. 1 Greenhouse sampling sites location in Guanzhong area

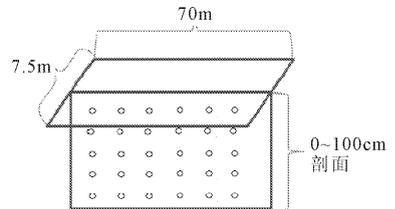


图 2 田间尺度采样点分布

Fig. 2 The field scale sample points distribution

1.2 土壤样品分析方法

土壤样品放置于阴凉干燥处,自然阴干后磨细,全部过 100 目尼龙筛。称取 0.25 g 土壤样品于 25 ml 聚四氟乙烯消解管中,加入 9 ml HNO₃ 和 3 ml HClO₄,摇匀,130℃电热板消解,待溶液沸腾 1 h 后,加入 5 ml HF,继续消解至瓶内消解物呈现黄色糊状或无色,结束消解。用高纯水将聚四氟乙烯瓶内固体全部转移到 10 ml 塑料管中,清洗三次定容后摇匀,使用 ICP-AES 测定 Cd、Cr、Cu、Pb 含量。每个样品两个重复,使用环境标准物质 GSF-4 进行质量控制。

1.3 土壤污染评价方法

土壤污染质量评价方法有指数法、综合评价法以及基于 GIS 等的一系列方法^[19]。其中污染负荷指数(Pollution load index, PLI)不仅可以用来反映单一污染点污染程度,还可以对区域污染程度进行反映,因此选为本研究评价方法^[20]。本文中所用公式为:

$$P = \sqrt[4]{C_{Cd} \times C_{Cr} \times C_{Cu} \times C_{Pb}} \quad (1)$$

$$P_{area} = \sqrt[2]{P_{G1} \times P_{G2} \times P_{G3} \times \cdots \times P_{G8}} \quad (2)$$

(1)式为单一点污染程度的计算公式,(2)式为

区域污染程度的计算公式。 $C = \text{元素实测值}/\text{背景值}$ 。PLI 等级划分标准为: $P < 1$ 时表示无污染; $1 \leq P < 2$ 为中等污染; $2 \leq P < 3$ 为强污染; $P \geq 3$ 为极强污染。

1.4 田块尺度重金属分析方法

两个日光温室田块均为狭长地块,其宽度为 7.5 m,故对其垂直剖面上重金属分布进行地统计分析。在采样点空间构建上,为便于直观分析,在水平方向尺度为 m,垂直方向尺度为 cm。使用 ArcGIS 10.2

地统计学模块,选取最优拟合模型,普通克里格法空间插值。数据统计分析采用 SPSS 20.0 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属污染评价

对关中地区 8 个设施农业日光温室土壤采样,编号 G1 ~ G8,测定土壤 Cd、Cr、Cu、Pb 含量,结果见表 1。

表 1 日光温室土壤重金属含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($n = 50$)
Table 1 Heavy metal concentration in greenhouse soil($n = 50$)

元素 Element	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	背景值 ^[21] _a Background value	环境标准 ^[22] _b Environment standard limits	
Cd	平均值 Mean	0.41	0.45	0.47	0.42	1.13	0.37	0.22	0.32	0.109	0.6
	SD	0.21	0.05	0.13	0.11	0.57	0.14	0.08	0.13		
	最大值 Max.	0.64	0.52	0.56	0.53	1.68	0.63	0.3	0.51		
	最小值 Min.	0.24	0.33	0.37	0.31	0.56	0.19	0.14	0.17		
Cr	平均值 Mean	83.80	71.00	68.40	74.80	76.40	74.10	68.70	65.40	58.10	250.0
	SD	16.10	2.46	7.37	2.10	7.48	13.20	8.20	3.02		
	最大值 Max.	82.10	93.90	78.30	82.10	69.70	71.90	67.10	70.10		
	最小值 Min.	75.00	73.00	77.00	61.80	57.10	56.30	51.70	59.40		
Cu	平均值 Mean	16.80	15.50	13.90	15.60	23.20	32.20	32.30	23.40	24.10	100.0
	SD	2.07	1.68	1.81	1.76	15.00	11.60	20.30	4.82		
	最大值 Max.	62.40	34.50	33.60	36.70	44.10	64.70	37.80	30.30		
	最小值 Min.	32.90	26.90	23.20	32.50	26.20	23.30	21.80	22.30		
Pb	平均值 Mean	35.50	39.10	37.60	30.30	25.50	24.10	18.90	25.60	18.10	350.0
	SD	3.51	5.90	0.88	10.50	5.75	4.98	7.17	5.09		
	最大值 Max.	18.40	18.50	15.70	17.60	45.30	59.20	46.70	31.00		
	最小值 Min.	14.50	13.10	12.60	14.20	12.40	22.30	18.00	19.20		
PLI	1.403	1.323	1.261	1.258	1.723	1.372	1.087	1.152			
污染程度 Pollution level	中等 Medium										

注:a 背景值取关中地区壤土表层土壤(0~20 cm)为背景值;b 环境质量标准值为《土壤环境质量标准》^[22] 二级标准(pH>7.5)。下同。

Note: a: the value stands for the background of loss soil (0~20 cm) in Guanzhong area; b: the value are secondary standard in 《Environmental quality standard for soils》^[22] while pH>7.5. The same below.

表 1 显示,G1~G8 日光温室土壤中 Cd、Cr 含量均值高于土壤环境背景值,其中 G5 日光温室土壤 Cd 含量均值超出土壤环境质量二级标准值;G6~G7 Cu、G1~G8 Pb 均值均高于环境背景值。从结果看只有 Cd 出现超出国家土壤环境质量二级标准的情况,但采用污染负荷指数法,分别对日光温室基地土壤重金属污染进行评价,其各点 PLI 指数均处于 1.087~1.723 之间,为中等污染。根据公式(2)计算出的关中地区区域 PLI 值为 1.311,区域内日光温室为中等污染。

2.2 田块尺度重金属污染特征分析

2.2.1 样品的数据统计 使用 SPSS 20.0 软件对日光温室 1 和日光温室 2 土壤样品的数据统计分析见表 2。

结果表明,30 个采样点中 1 号日光温室土壤 Cd、Cr、Cu、Pb 含量均值分别为 1.53、61.25、25.18、14.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为 2 号日光温室含量的 54.84%、90.78%、88.00%和 62.99%。独立样本 t 检验结果表明,两个日光温室土壤重金属含量差异均达到极显著水平(表 3)。日光温室 1 的 Cd 和日光温室 2 的

Cd, Cu, Pb 均显著高于薛澄泽等^[21]1986 年测定的关中地区重金属背景值, 出现累积。其中日光温室 1 和 2 Cd 含量均高于土壤环境质量规定的二级标准值, 出现污染。

表 2 土壤样品统计特征

Table 2 Statistic characteristics of the soil samples

温室编号 Greenhouse number	元素 Element	样本数 Number of sample	极小值 Min. value (mg·kg ⁻¹)	极大值 Max. value (mg·kg ⁻¹)	均值 Mean (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 CV	方差 Variance	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	环境背景 ^{[21]a} Background value (mg·kg ⁻¹)	环境标准 ^{[22]b} Environment limits (mg·kg ⁻¹)
1	Cd	30	0.87	2.65	1.53	0.48	0.31	0.23	0.58	-0.45	0.118	0.6
	Cr	30	46.37	79.48	61.25	9.56	0.16	91.31	0.48	-0.86	65.7	250
	Cu	30	18.87	28.98	25.81	2.18	0.08	4.76	-1.37	2.35	23.5 ± 2.36	100
	Pb	30	11.05	19.85	14.40	1.76	0.12	3.10	0.59	2.21	16.3 ± 2.96	300
2	Cd	30	1.54	4.10	2.79	0.71	0.26	0.51	0.10	-0.82	0.118	0.6
	Cr	30	57.22	79.55	67.47	6.47	0.10	41.85	0.35	-0.95	65.7	250
	Cu	30	23.06	40.90	29.33	4.62	0.16	21.39	1.00	0.67	23.5 ± 2.36	100
	Pb	30	12.88	33.46	22.86	5.14	0.23	26.46	0.43	-0.33	16.3 ± 2.96	300

注: a 背景值取关中地区壤土平均背景值。

Note: a: the value stands for the background of loss soil in Guanzhong area.

表 3 两个温室结果独立样本 t 检验结果(置信区间 99%)

Table 3 Independent sample t test results of the two greenhouses

元素 Element		方差方程 Levene 检验 The variance equation Levene test		均值方程 t 检验 The mean equation t test		
		F	Sig.	t	df	Sig. (two tailed)
Cd	假设方差相等 Equal variances assumed	5.82	0.02	-8.82	88.00	9.49 × 10 ⁻¹⁴
	假设方差不相等 Equal variances not assumed			-10.00	79.94	9.66 × 10 ⁻¹⁶
Cr	假设方差相等 Equal variances assumed	6.89	0.01	-3.66	88.00	4.24 × 10 ⁻⁴
	假设方差不相等 Equal variances not assumed			-3.22	42.48	2.45 × 10 ⁻³
Cu	假设方差相等 Equal variances assumed	11.26	0.00	-3.98	88.00	1.41 × 10 ⁻⁴
	假设方差不相等 Equal variances not assumed			-4.94	87.87	3.74 × 10 ⁻⁶
Pb	假设方差相等 Equal variances assumed	24.36	0.00	-8.80	88.00	1.07 × 10 ⁻¹³
	假设方差不相等 Equal variances not assumed			-11.54	81.13	8.79 × 10 ⁻¹⁹

2.2.2 土壤重金属变异函数 土壤重金属变异函数见表 4。ArcGIS 地统计模块下采用稳态模型可以对数据很好地拟合。日光温室土壤重金属 Cd, Cr, Cu, Pb 的各向同性下的变异函数(表 4)展示了很好的空间结构, 除 1 号日光温室 Pb 采用 J-Bessel 模型, 其他元素使用 Stable 模型可以很好地插值。4 种重金属元素变程在数值上均大于 20, 即空间自相关尺度远大于采样间隔 20, 说明采样设计是恰当的, 并且表明空间插值图可以较好地反映 4 种重金属的空间分布。

块金值/基台值是一个很重要的数值: 比值 < 25%, 表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; 比值 > 75% 说明系统空间相关性很弱^[23]。1 号日光温室 Cd 和 Pb, 2 号日光温室 Pb 块金值/基台值比值

较高, 说明随机部分引起的空间异质性程度较高。同时也可以说明区域因素(自然因素)和非区域因素(人为因素)谁占主导作用, 当该比值较高时非区域因素占主导地位。根据表 1 结果, 1 号日光温室和 2 号日光温室 Cd 出现累积。磷矿肥料的施用会带来 Cd 的累积^[24], 因此可以推测 1 号日光温室和 2 号日光温室 Cd 分布是由于施用磷肥引起的。1 号日光温室 Pb 不存在累积问题, 对其分布影响的人为因素还需要进一步的研究。

2.2.3 数据的空间插值 根据上述分析, 使用 ARCGIS10.2 中地统计学模块, 使用普通克里格插值, 得到了 1 号日光温室和 2 号日光温室土壤重金属 Cd, Cr, Cu, Pb 插值图(图 3 和图 4)。从图 3 和图 4 中可以很清晰地观察到土壤重金属在日光温室剖面上的空间分布。

表 4 土壤重金属变异函数
Table 4 Variogram of heavy metals in soil

温室编号 Greenhouse number	元素 Element	模型类型 Model type	块金值 Nugget	偏基台 Partial sill	块金值/偏基台值/% Nugget/partial sill	步长 Step size	变程 Range
1	Cd	Stable	0.33	0.61	54	4.94	35.86
	Cr	Stable	0.00	88.34	0	3.77	29.84
	Cu	Stable	0.00	1.18	0	3.54	28.77
	Pb	J - Bessel	0.39	0.61	64	7.52	20.66
2	Cd	Stable	0.55	0.57	96	3.54	22.35
	Cr	Stable	0.27	0.71	38	4.39	35.15
	Cu	Stable	0.09	0.82	11	4.05	32.43
	Pb	Stable	0.03	30.51	0	3.45	23.79

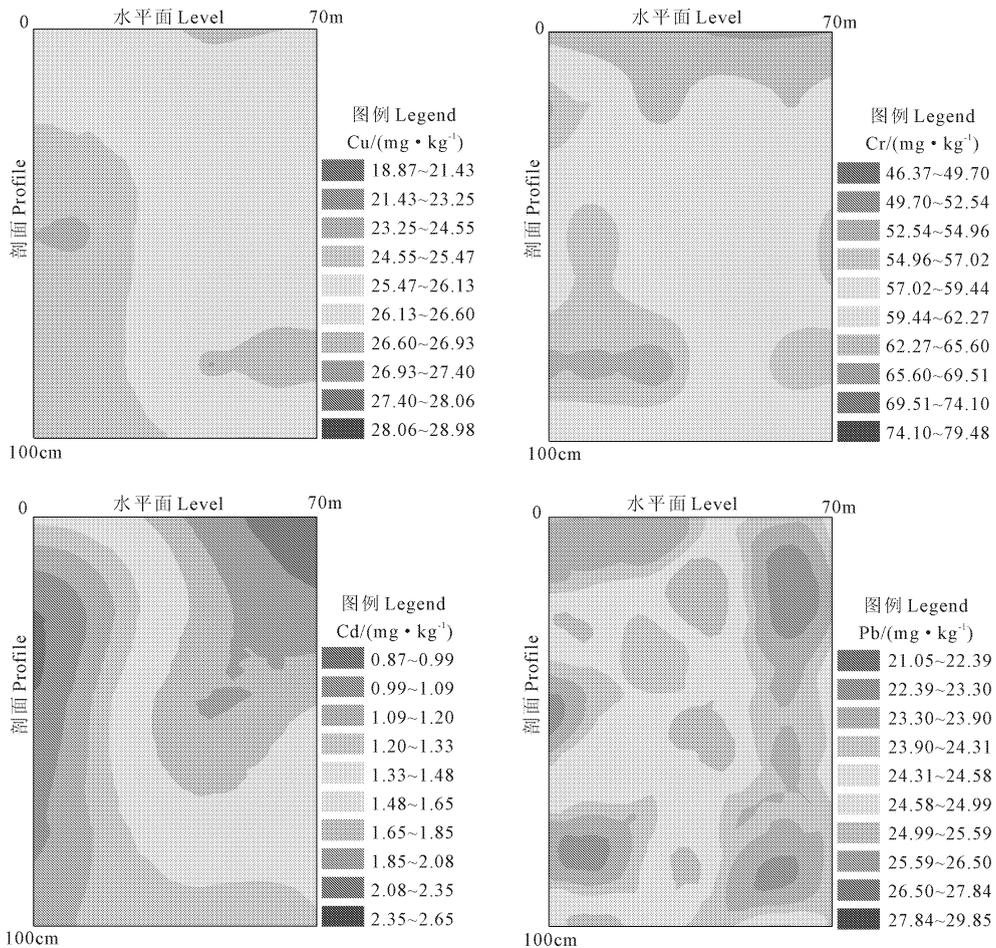


图 3 日光温室 1 土壤重金属含量分布

Fig.3 Distribution of heavy metals in No.1 greenhouse soil

日光温室 1 中 Cd 在剖面的分布与空间相关性很高,主要集中于日光温室内部表层(50 cm 深度以上)土壤;Cr,Cu 和 Pb 在日光温室内部分布比较随机。日光温室 2 中 Cd 和 Cu 含量在 0~1 m 剖面具有相似分布,20 cm 以上和 60~100 cm 含量高于 20~60 cm 土层;Cr 和 Pb 的含量分布具有相似性,60 cm 以下土层含量高于 60 cm 以上土层。重金属在垂直方向上的分布反映重金属在剖面的迁移情况,从图

3 和图 4 中可以看出 Cd, Cr, Cu 在日光温室的迁移比 Pb 剧烈。1 号和 2 号日光温室相同元素剖面的迁移水平不同。

3 讨论与结论

3.1 关中地区日光温室农田总体重金属污染状况
关中地区农田土壤重金属已有的相关研究^[25-26]表明,关中地区除西安污灌区以外不存在

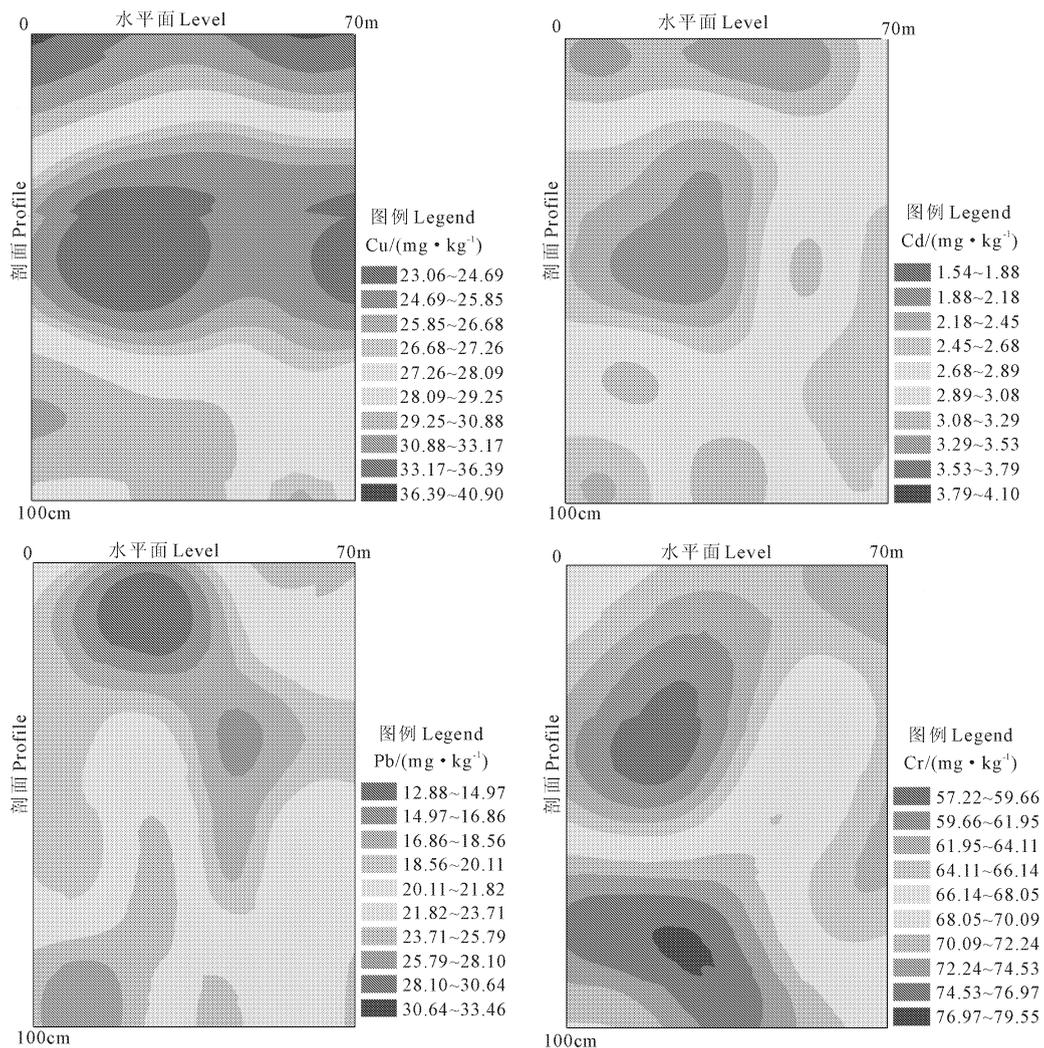


图 4 日光温室 2 土壤重金属含量分布

Fig. 4 Distribution of heavy metals in No. 2 greenhouse soil

大面积区域性土壤重金属污染,这与本研究结果一致。调查的 8 个日光温室基地中,只有一个出现了土壤 Cd 含量超出《国家土壤环境质量标准》^[22]规定的二级土壤质量标准的情况。但关中地区农田土壤重金属已经出现了不同程度的累积问题。胡明对富平^[27]和潼关^[28]农业土壤重金属进行了研究,以当地土壤背景值作为评价标准,富平整体农业土壤处于中度污染水平,潼关处于重度污染水平。同样以土壤背景值为评价标准,关中地区日光温室土壤为中等污染(见表 1)。

关中地区日光温室内土壤重金属累积主要来源为肥料。关中地区目前灌溉用水总量为 59.02 亿 m^3 ,其中 26.06 亿 m^3 为地下水^[29],其余用水来自渭河支干流。对渭河沉积物^[30-31]和渭河水^[32]的相关研究表明,在渭河沉积物中重金属的赋存形态主要以残渣态为主,渭河支干流自 2011 年起水体重金属含量均降至环境可接受程度。而地下水一般是安全

的,因此灌溉不是日光温室内土壤重金属累积的原因。关中地区设施农业保护地土壤种植强度大,复种指数高,有机肥化肥投入过量。对于直接从养殖场到农田的这一部分有机肥的重金属含量情况我们无法判断,但是市售有机肥中重金属含量较高,部分甚至存在重金属超标的现象^[12,33]。磷肥等矿质肥料重金属含量较高^[11],也会带来日光温室重金属累积。但是总体来说,日光温室土壤重金属的累积程度是缓慢的,Zhang 等的研究表明在北京通州蔬菜基地,20 年日光温室土壤 Cd 含量累积到 1 年日光温室的 3.2 倍^[34]。

3.2 日光温室内土壤重金属分布情况

本文选取的两个日光温室内土壤重金属的分布特点完全不同。造成这种现象的原因主要是日光温室个体之间具有相对的独立性,加之标准化生产程度不高,使得重金属在日光温室土壤中具有不同的迁移,形成了不同的分布。本研究得到的日光温室

内土壤重金属的分布与露地污染土壤重金属分布也不同^[35]。李斌等对西安污灌区相同土壤条件下经过一定年限种植大棚菜地和农耕地重金属迁移的研究认为大棚菜地种植强度大,重金属随作物的茎秆果实而被移出菜地;而农耕地种植强度小,同时存在秸秆还田,部分重金属又重新回到土壤^[36]。另一方面日光温室在长期的种植过程中土壤性质发生变化,土壤 pH 值的降低提高了重金属的生物有效性,促进了作物的吸收,但是有机质的提高又会影影响作物对 Cu 和 Zn 的吸收^[37]。因此,在多种因素影响下,每个日光温室土壤污染元素的分布都是各不相同的。

3.3 结 论

本文对关中地区 8 个日光温室集中区土壤进行了采样调查,并应用 ARCGIS 地统计模块对相同地区两个不同的日光温室重金属分布特征进行了插值分析,得到了如下结论:

(1) 8 个采样地区日光温室土壤 PLI 分别为 1.403, 1.323, 1.261, 1.258, 1.723, 1.372, 1.087, 1.152, 均为中等程度污染。PLI 最高值为 G5 采样点,该采样点土壤重金属 Cd 超过土壤重金属环境质量标准规定的二级标准值,出现超标情况。该区域 PLI 指数为 1.311,区域日光温室总体评价为中等程度污染。

(2) 两个相同年限相同地区日光温室插值分析中,1 号日光温室的 Cd, 2 号日光温室的 Cd, Cu, Pb 均出现不同程度累积。在多种元素作用之下,不同日光温室重金属污染元素的分布均不相同。

参 考 文 献:

[1] Yang L, Huang B, Hu W, et al. Assessment and source identification of trace metals in the soils of greenhouse vegetable production in eastern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 97:204-209.

[2] Khan S, Rehman S, Zeb Khan A, et al. Soil and vegetables enrichment with heavy metals from geological sources in Gilgit, northern Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(7):1820-1827.

[3] Huang Z, Pan X D, Wu P G, et al. Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China[J]. *Food Control*, 2014, 36(1):248-252.

[4] Wang Y, Qiao M, Liu Y, et al. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater irrigated area, Beijing-Tianjin city cluster, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(4):690-698.

[5] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. Uptake of heavy metals by vegetables irrigated using wastewater and the subsequent risks in Harare, Zimbabwe[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2007, 32(15-18):1399-1405.

[6] Luo C, Liu C, Wang Y, et al. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1):481-490.

[7] Wang L J, Lu X W, Ren C H, et al. Contamination assessment and health risk of heavy metals in dust from Changqing industrial park of Baoji, NW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(5):2095-2104.

[8] 徐玉霞,薛雷,汪庆华,等.关中西部某铅锌冶炼区周边土壤重金属污染特征与生态风险评价[J]. *环境保护科学*, 2014, (2):110-114.

[9] 戴前进,冯新斌,仇广乐,等.陕西省潼关采金地区汞污染的初步研究[J]. *环境化学*, 2004, (4):460-464.

[10] Atafar Z, Mesdaghinia A, Nouri J, et al. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1-4):83-89.

[11] Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H, et al. Heavy metal risk assessment for potatoes grown in overused phosphate-fertilized soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2):1825-1831.

[12] 王飞,赵立欣,沈玉君,等.华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19):202-208.

[13] Liu P, Zhao H, Wang L, et al. Analysis of Heavy Metal Sources for Vegetable Soils from Shandong Province, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(1):109-119.

[14] 田庚.关中地区日光温室蔬菜产业发展分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.

[15] 马溪平,李法云,肖鹏飞,等.典型工业区周围土壤重金属污染评价及空间分布[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(2):326-329.

[16] 胡森,吴家强,彭佩钦,等.矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. *环境科学学报*, 2014, (2):423-430.

[17] 吴文勇,尹世洋,刘洪禄,等.污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4):165-173.

[18] 王纪华,沈涛,陆安祥,等.田块尺度上土壤重金属污染地统计分析及评价[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11):226-229.

[19] 李朝奎,王利东,李吟,等.土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. *矿产与地质*, 2011, (2):172-176.

[20] 王婕,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, (2):97-103.

[21] 薛澄泽,肖玲,吴乾丰,等.陕西省主要农业土壤中十种元素背景值研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 1986, 14(3):30-53.

[22] 国家环境保护局. GB15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,1995.

[23] 张淑娟,何勇,方慧.基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2):39-44.

[24] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils — to mobilize or to immobilize? [J]. *J Hazard Mater*, 2014, 266:141-166.

[25] 郑国璋.关中灌区农业土壤重金属污染调查与评价[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2):473-478.

[26] 李艳.陕西省关中粮食主产区土壤环境质量评价[J]. *农业环境与发展*, 2008, 25(3):111-113.

[27] 胡明.关中东部农业土壤重金属分布特征与污染评价——以富平县为例[J]. *甘肃农业大学学报*, 2013, 48(3):99-104.

- [7] 宋冬梅,肖笃宁,张志城,等.甘肃民勤绿洲的景观格局变化及驱动力分析[J].应用生态学报,2003,14(4):535-539.
- [8] 戴晟懋,邱国玉,赵明.甘肃民勤绿洲荒漠化防治研究[J].干旱区研究,2008,25(3):319-324.
- [9] 马立鹏,李晓兵.甘肃省荒漠化宏观监测研究[J].中国沙漠,2002,22(2):122-128.
- [10] 罗先香,杨建强.基于 GIS 的荒漠化系统中人文作用的定量分析[J].干旱区资源与环境,2005,19(6):28-32.
- [11] 武称意,郭百平,李庆和,等.基于 RS 和 GIS 的盐池县土地荒漠化演化规律研究[J].中国水土保持,2008,(11):48-50.
- [12] 魏怀东,周兰萍,徐先英,等.2003—2008 年甘肃民勤绿洲土地荒漠化动态监测[J].干旱区研究,2011,28(4):572-579.
- [13] 李虎,陈冬花,慈龙骏,等.新疆艾比湖地区土地荒漠化时空格局的变化[J].中国水土保持科学,2008,6(4):28-32.
- [14] 徐海量,陈亚宁.塔里木河下游荒漠化多元回归模型分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(4):78-82.
- [15] 林长存.民勤县农业结构特征的时间序列分析[J].宁夏农林科技,2012,53(7):129-130.
- [16] 王枫叶,刘善幸,徐左军.石羊河下游民勤绿洲农业结构动态研究[J].人民黄河,2009,31(11):64-65.
- [17] 蒋志荣,安力,柴成武.民勤县荒漠化影响因素定量分析[J].中国沙漠,2008,28(1):35-38.
- [18] 张勃,刘秀丽.基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测——以甘肃省为例[J].生态学报,2011,31(20):6251-6260.
- [19] 张军谋,石惠春.基于能值分析的干旱区农业生态经济系统可持续发展研究——以石羊河下游民勤县为例[J].水土保持通报,2012,32(1):150-155.
- [20] 赖力,黄贤金,刘伟良.区域人均生态足迹的社会经济驱动模型——以 1995—2003 年江苏人均足迹为例[J].资源科学,2006,28(1):14-18.
- [21] 方建德,杨扬,叶堤,等.重庆市生态足迹时间序列动态特征及其驱动因子分析[J].生态环境学报,2009,18(4):1337-1341.
- [22] 陈发虎.民勤绿洲的开发与演变——近 2000 年土地利用/土地覆盖变化研究[M].北京:科学出版社,2008.
- [23] 民勤县统计局.民勤县社会经济统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1957—2009.
- [24] 民勤县统计局.数字民勤 1949—2009[M].北京:中国统计出版社,2010.
- [25] 白雪梅,赵松山.协整及误差修正模型[J].数量经济技术经济研究,1998,15(8):39-42.
- [26] 龙开胜,陈利根.耕地资源数量与经济发展和城乡收入关系的计量分析[J].资源科学,2007,29(4):139-145.
- [27] 张兴平,赵旭,顾蕊.我国煤炭消费与经济增长关系的多变量协整分析[J].煤炭学报,2008,33(6):713-716.
- [28] 李序颖,岳丹,顾岚.我国交通货物运输量的时间序列分析[J].系统工程理论与实践,2005,25(1):49-55.
- [29] 李子奈.高级应用计量经济学[M].北京:清华大学出版社,2012.
- [30] 李亚明,佟仁城.中国房地产财富效应的协整分析和误差修正模型[J].系统工程理论与实践,2007,27(11):1-6.
- [31] 李俭富,马永开.基于证券价格时间序列的协整优化指数跟踪方法研究[J].系统工程理论与实践,2006,26(11):17-25.
- [32] 徐群,韩雯,程毅.上海农业发展的实证检验 1978—2009[J].统计与决策,2011,(7):118-121.
- [33] 韩瑞玲,佟连军,佟伟铭,等.基于分解模型与 VEC 模型的沈阳经济区经济与环境时空关系研究[J].环境科学学报,2012,32(5):1261-1269.
- [34] 高铁梅.计量经济学分析方法与建模[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [35] 叶浩,濮励杰.江苏省耕地面积变化与经济增长的协整性与因果关系分析[J].自然资源,2007,22(5):766-774.
- [36] 李锋.荒漠化监测中生态环境与社会经济评价指标体系及评价方法的研究[J].干旱环境监测,1997,11(1):1-5.
- [37] 贾宝全,慈龙骏,高志海,等.绿洲荒漠化及其评价指标体系的初步探讨[J].干旱区研究,2001,18(2):19-24.
- [38] 胡丽莉.1953—2010 年民勤县沙尘暴变化趋势分析[J].现代农业科技,2011,(19):21-25.
- [39] 孙雪涛.民勤绿洲水资源利用的历史现状和未来[J].中国工程科学,2004,6(1):1-9.
- [40] 吴希瑞.石羊河流域生态治理措施[J].甘肃水利水电技术,2009,45(6):63-64.
- [41] 孙丹峰.民勤 1988—1997 年间土地荒漠化社会经济驱动力分析[J].农业工程学报,2005,21(13):131-135.
- [42] 徐先英,丁国栋,高志海,等.近 50 年民勤绿洲生态环境演变及综合治理对策[J].中国水土保持科学,2006,4(1):41-48.

(上接第 278 页)

- [28] 胡明.潼关农田土壤重金属污染评价[J].中国农学通报,2013,29(35):277-280.
- [29] 陈静.基于用水总量控制的关中地区“十二五”末节水指标研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):135-140.
- [30] 张斌斌.渭关中段河床沉积物中重金属赋存形态分析[D].西安:长安大学,2012.
- [31] 罗琳,宋进喜,王颖.渭河陕西段河床沉积物重金属污染分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(1):79-84.
- [32] 杨学福,关建玲,王蕾,等.渭河陕西段水体中重金属的时空动态变化特征研究[J].安全与环境学报,2013,13(6):115-119.
- [33] 程旭艳,王定美,乔玉辉,等.中国商品有机肥重金属分析[J].环境污染与防治,2012,34(2):72-76.
- [34] Zhang H Z, Li H, Wang Z, et al. Accumulation characteristics of copper and cadmium in greenhouse vegetable soils in tongzhou district of Beijing[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10:289-294.
- [35] 徐玉霞,汪庆华,薛雷,等.关中西部某铅锌冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律[J].土壤通报,2013,44(5):1240-1244.
- [36] 李斌,刘波,方兰,等.西安郊区农耕地和大棚菜地土壤重金属迁移的对比研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):223-227.
- [37] Yang L, Huang B, Hu W, et al. The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in eastern China[J]. Chemosphere, 2014, 103:121-130.