

太原市农田土壤重金属污染评价与空间分布特征

滑小赞, 程 滨*, 赵瑞芬, 霍晓兰, 王 钊, 王 森
(山西农业大学 资源环境学院, 太原 030031)

摘 要: 【目的】揭示太原市农田土壤重金属污染现状、污染来源及其空间分布格局情况, 为区域土壤污染防控和农业生产提供依据。【方法】采集太原市农田土样 214 个, 测定土壤中 Cr、Cd、Pb、Hg 和 As 5 种重金属量, 采用单因子指数法和内梅罗综合指数法对土壤重金属进行污染评价, 运用 ArcGIS 10.3 绘制太原市农田土壤重金属空间分布图, 利用 SPSS 16.0 对数据进行相关分析, 进一步了解土壤重金属的污染来源。【结果】①太原市农田土壤中重金属量分布差别较大, Cr、Cd、As、Hg 和 Pb 均值分别为 68.38、0.121、8.59、0.08、24.23 mg/kg, 均未超过《绿色食品 产地环境质量》(NY/T 391—2013) 中的规定, 但其平均值均显著高于太原市土壤背景值。②单项污染指数值由大到小顺序为 Hg (2.36) > Pb (1.76) > Cd (1.57) > Cr (1.19) > As (1.12)。其中, Hg、Pb 和 Cd 主要受工业生产、污水灌溉、燃煤、农药化肥施用和交通运输等人为因素的影响, As 和 Cr 主要受成土母质和农业活动的影响。③太原市农田土壤内梅罗综合指数为 2.14, 呈中度污染。7 个县市区农田土壤内梅罗综合指数由大到小依次是晋源区 (4.17) > 小店区 (2.98) > 尖草坪区 (2.13) > 清徐县 (2.07) > 阳曲县 (1.71) > 娄烦县 (1.67) > 古交市 (1.57)。重金属空间分布图可以直观看出土壤重金属空间分布和污染情况, 在工业发达和人口密集的城郊晋源区、小店区、尖草坪区和清徐县, 农田土壤为重度污染和中度污染, 远离太原市市区的阳曲县、古交市和娄烦县农田土壤为轻度污染。【结论】太原市农田土壤总体呈中度污染, Hg 和 Pb 单项污染指数最高, 重金属污染较严重的区域集中在太原市城郊晋源区、小店区、尖草坪区和清徐县, 今后工作中应加强对太原市城郊污染较重区域农田土壤重金属重点监测, 尤其是 Hg 和 Pb, 以确保土壤健康和可持续利用。

关 键 词: 太原市; 农田土壤; 重金属; 污染评价; 空间分布

中图分类号: X53

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020540

OSID:



滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 101-109.
HUA Xiaozan, CHENG Bin, ZHAO Ruifen, et al. Pollution Assessment and Spatial Distribution of Heavy Metals in the Farmland Soils of Taiyuan City[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 101-109.

0 引 言

【研究意义】随着工业迅速发展和人口急剧增加, 环境问题越来越突出, 其中土壤重金属污染已经成为全世界的共性问题^[1-2]。重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性, 一旦进入土壤, 难以排除, 重金属在农田土壤中过量累积导致土壤肥力下降和农产品中重金属超标, 进而危害人类健康^[3-7]。环境保护部和国土资源部在 2014 年联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》中显示, 我国耕地土壤点位超标率为

19.4%, 其中重金属污染占 80%, 面积近 2×10^7 hm^2 , 直接经济损失高达 200 亿元^[1,8-10]。因此, 了解农田土壤重金属污染程度和空间分布情况, 解析重金属污染源对区域土壤防控和农业生产合理布局具有重要意义。【研究进展】太原市是我国煤炭能源重化工基地, 也是全国环境污染最为严重的城市之一^[11-16]。郭翠花等^[11-12]对太原市地表土壤重金属污染的研究发现, 重金属 Cu、Cr、Zn、Cd、Hg 高于中国土壤背景值, 其中, Hg 和 Cd 是主要的污染元素, 污染主要来源于工业“三废”的排放、污水灌溉及农业生产活动等。张乃明等^[13-14]对太原市污灌区土壤重金属污染的研究发现, Cd、Pb 和 Hg 高于太原市背景值, 并有逐年累积的趋势, Cd 累积主要来源于污水灌溉, Hg 累积主要来源于大气沉降, Pb 累积主要受污水灌溉和大气沉降共同影响。刘勇等^[15]对太原市城镇周边土壤重金属污染的研究发现, 城镇周边土壤重金属污染指

收稿日期: 2020-09-27

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (201803D31209-1); 山西省重点研发计划重点项目 (201603D21110-1); 山西省青年科技研究基金项目 (201601D202071)

作者简介: 滑小赞 (1982-), 女。副研究员, 主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: 1875501@qq.com

通信作者: 程滨 (1963-), 女。研究员, 主要从事植物营养与土壤污染修复研究。E-mail: chengbin0709@163.com

数高于耕地。解文艳等^[16]对太原市南郊污灌区土壤重金属污染的研究发现,污灌区土壤呈重度污染和中度污染水平,晋源区污染最重,主要的污染元素是 Hg 和 Cd。【切入点】上述的研究主要集中对太原市城镇周边和污灌区的土壤重金属污染进行分析评价,对太原市县域农田土壤重金属的分析评价和空间分布情况还鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究针对太原市农田土壤中危害系数较大的 Hg、As、Pb、Cd、Cr 等 5 种重金属元素,采用单因子指数法和内梅罗综合指数法对重金属污染程度进行分析评价,运用 ArcGIS 地统计学方法对研究区重金属含量的空间分布状况进行分析,并利用 SPSS 16.0 对数据进行相关性和主成分分析,客观全面了解该区域农田土壤重金属污染状况和污染来源。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太原市地处山西省中部,东经 111°30′—113°09′,北纬 37°27′—38°25′,东西约 144 km,南北约 107 km。以石灰性褐土为主,耕地面积为 10.7 万 hm^2 。太原市城镇化规模较大,由迎泽区、杏花岭区、万柏林区、小店区、尖草坪区、晋源区等 6 个区、清徐县、阳曲县、古交市、娄烦县等 4 个县市组成,其中,6 个区是太原市主要城区,随着城市规模的不断扩张,大部分土地已变为非农业用地,仅小店区、晋源区、尖草坪区处于太原市郊区,有约 1.5 万 hm^2 为农业用地。小店区、晋源区、尖草坪区和清徐县是水浇地,主要种植蔬菜;阳曲县、娄烦县和古交市是旱地,主要种植大田作物。

1.2 样品采集与测定

2017 年 7—10 月,根据 1:5 万县级土地利用现状图和土壤图,在研究区尽量均匀分布采集农田土壤样品,在保证样品代表性的前提下,平均每 2 km×2 km 左右布设 1 个采样点,在晋源区、小店区、清徐县有污灌历史的地区加密布点,平均每 1 km×1 km 左右布设 1 个采样点。采用五点法采集 0~20 cm 表层土壤,混合均匀后用四分法保留约 1 kg 土样。样点位置采用 GPS 定位,共采集土壤样品 214 个。使用 ArcGIS 10.3 软件生成采样点分布图(图 1)。

土壤样品自然风干,剔除有机残渣、植物根系和可见侵入体,粗磨过 20 目筛,再细磨全部过 100 目筛,用以测定土壤重金属^[17]。土壤重金属 Cr、Pb 和 Cd 采用硝酸-双氧水-氢氟酸三酸联合微波消解,Cr 采用火焰原子吸收分光光度法进行测定,Pb 和 Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法进行测定;Hg、As 采用王水水浴消解,原子荧光光度法测定^[1,17-18]。分析

方法准确度和精密度采用国家土壤标准物质(GBW 07453)和室内平行样品进行质量控制,标准曲线的相关系数 ≥ 0.999 ,Cr、Pb、Cd、Hg 和 As 的方法检出限分别为 4、0.1、0.01、0.002、0.01 mg/kg,回收率介于 100%±10%之间。

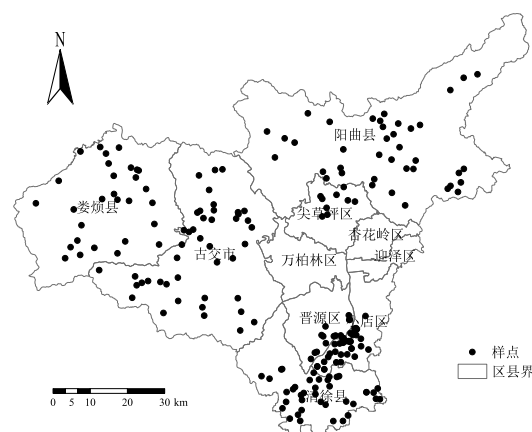


图 1 采样点分布
Fig.1 Distribution of soil sampling sites

1.3 土壤重金属污染评价方法

为评价太原市农田土壤重金属污染情况,本研究选取“七五”期间太原市土壤背景值为评价标准,评价方法采用单因子污染指数法和内梅罗综合指数法。

单因子污染指数法是对土壤中某一重金属元素的累积污染程度进行评价^[17-18]。其计算式^[2,8]为:

$$P_i = C_i / S_i, \quad (1)$$

式中: P_i 为所计算出的重金属单项污染指数; C_i 为该重金属的实测值; S_i 为评价标准值,均采用太原市的土壤背景值作为参比值。 $P_i \leq 0.7$ 为清洁, $0.7 < P_i \leq 1.0$ 为安全, $1.0 < P_i \leq 2.0$ 为轻污染, $2.0 < P_i \leq 3.0$ 为中度污染, $P_i > 3.0$ 为重污染。 P_i 数值越大,说明受到的重金属污染越严重^[18]。

内梅罗综合指数法是对土壤中几种重金属的累积污染程度进行综合评价,突出高浓度污染物对土壤环境质量的影响^[5,17-19]。其计算式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{平均}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}}, \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数; $P_{\text{平均}}$ 为各单项污染指数 P_i 的平均值; P_{max} 为各单项污染指数中的最大值。 $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 为清洁, $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ 为安全, $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ 为轻污染, $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ 为中污染, $P_{\text{综}} > 3.0$ 为重污染。

1.4 空间变异特征分析

半变异函数可同时描述区域化变量的随机性和结构性,能较好反映区域化变量的空间特征,是研究区域土壤性质空间变异规律和空间结构分析的有效

工具^[17, 20-21]。本研究利用 ArcGIS 10.3 中 Geostatistical Analyst 采用普通克里金法对研究区内土壤重金属量进行半变异函数/协方差模型分析, 得到不同重金属元素的最优半变异函数模型。

交叉验证是一种常见的空间插值精度验证方法, 是指利用预测的半变异函数模型, 在去除某个采样点实测值后, 用其他样点数据进行预测, 一直重复运算, 直到得到所有样点的预测值, 并与对应样点实测值进行比较^[17, 22]。当平均误差、标准平均误差接近于 0, 均方根误差较小以及标准均方根误差接近于 1 的时候认为可以通过交叉检验, 说明克里格插值效果较好。当预测的半变异函数模型通过交叉验证后, 根据不同土壤重金属的半变异函数模型及相关参数, 应用普通克里金方法进行最优内插, 得到各重金属元素的空间分布图、内梅罗综合指数评价图。

1.5 数据处理

根据测定的农田土壤各样点元素量数据, 利用 Excel 对数据进行描述统计特征分析, 采用 SPSS 16.0 软件对数据进行相关性和主成分分析, 运用 ArcGIS 10.3 软件绘制采样点空间分布图和土壤重金属空间分布图。

表 1 太原市农田土壤重金属量的描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistics results of heavy metal contents of farmland soils of Taiyuan city

元素	重金属量范围/(mg kg ⁻¹)	平均值/(mg kg ⁻¹)	标准差/(mg kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	背景值/(mg kg ⁻¹)	超出背景值百分率/%
Cr	50.60~97.30	68.38	7.19	10.5	57.3	96.7
As	2.39~13.32	8.59	1.85	21.5	7.6	71.0
Cd	0.075~0.193	0.121	0.025	20.5	0.077	99.5
Pb	18.30~43.80	24.23	4.56	18.8	13.8	100%
Hg	0.02~0.34	0.08	0.06	74.8	0.033	95.8

2.2 农田土壤重金属污染评价

以“七五”期间太原市土壤背景值为评价标准, 太原市各区县土壤重金属的污染指数见表 2。研究区重金属单因子污染指数平均值由大到小依次是: Hg (2.36) > Pb (1.76) > Cd (1.57) > Cr (1.19) > As (1.12), 说明 5 种重金属元素在土壤中都存在累积现象。其中, Hg、Pb 和 Cd 等 3 种重金属污染较严重, 个别点位重金属达到中度污染和重度污染水平。研究区内梅罗综合指数平均值为 2.14, 呈中度污染, 其中轻污染占 67.3%、中污染占 17.8%、重污染占 15.0%。

7 个区县内梅罗综合指数由大到小依次是: 晋源区 (4.17) > 小店区 (2.98) > 尖草坪区 (2.13) > 清徐县 (2.07) > 阳曲县 (1.71) > 娄烦县 (1.67) > 古交市 (1.57), 其中, 晋源区呈重污染水平, 小店区、尖草坪区、清徐县呈中度污染水平, 阳曲县、娄烦县、古交市呈轻度污染水平。从 7 个区县单项污染指数可

2 结果与分析

2.1 农田土壤重金属的总体特征

太原市农田土壤重金属元素量分析结果 (表 1) 显示, 重金属 Cr、Cd、As、Hg 和 Pb 量的平均值分别为 68.38、0.121、8.59、0.08、24.23 mg/kg, 均高于“七五”期间太原市土壤重金属元素背景值, 且分别为背景值的 1.19、1.57、1.12、2.36、1.76 倍, 表明各元素在表层土壤中均存在富集。5 种元素超过背景值的比例均高于 50%, 分别是 Pb=100% > Cd=99.5% > Cr=96.7% > Hg=95.8% > As=71.0%。5 种元素的变异系数从大到小依次是 Hg > As > Cd > Pb > Cr, 其中, Cr、Cd、As、Pb 量的变异系数均 ≤ 25%, 呈低变异性, 表明在区域内变化不大, 受到人类活动的影响较小; Hg 的变异系数 > 50%, 呈高变异性, 表明在区域上差异显著, 受人类活动影响较大。

太原市农田土壤 pH 值范围为 7.5~8.5, 选用《绿色食品 产地环境质量》(NY/T 391—2013) 中 Cr、Cd、As、Hg 和 Pb 标准值 120、0.40、20、0.35、50 mg/kg 为参考标准, 研究区土壤中 5 种重金属的最大值均小于该标准。故太原市农田土壤中这 5 种重金属存在潜在污染风险。

以看出, Hg 是主要污染物, Pb 和 Cd 次之。

2.3 农田土壤重金属元素空间分布特征

不同重金属的半变异函数模型及相关参数见表 3。由表 3 可知, 太原市农田土壤中 Cr、As 的块金系数均 < 25%, 表示变量具有显著地空间自相关; 土壤中 Cd、Hg、Pb 的块金系数为 74.9%、60.6%、49.5%, 表示变量具有中等程度自相关。Cr、Cd、As、Hg 和 Pb 5 种重金属的平均误差 (ME)、标准平均误差 (MSE) 均接近于 0, 均方根误差 (RMSE) 较小以及标准均方根误差 (RMSSE) 均接近于 1, 说明 5 种重金属元素的半变异函数模型均可通过交叉验证, 能够较好地预测土壤重金属的分布特征。根据不同土壤重金属的半变异函数模型及相关参数, 应用普通克里金方法进行最优内插, 得到各重金属元素的空间分布图、内梅罗综合污染指数评价结果图 (图 2)。

表 2 太原市各区县土壤重金属的污染指数统计分析结果

Table 2 Single factor pollution index and nemerow comprehensive pollution index of heavy metals in farmland soils of Taiyuan districts

县市	样本数	项目	范围	平均值	样品比例/%				
					清洁 $P_i \leq 0.7$	安全 $0.7 < P_i \leq 1.0$	轻污染 $1.0 < P_i \leq 2.0$	中污染 $2.0 < P_i \leq 3.0$	重污染 $P_i > 3.0$
晋源区	13	P_{Hg}	1.67~10.30	5.31	0	0	15.38	15.38	69.23
		P_{Pb}	1.59~3.17	2.22	0	0	23.08	69.23	7.69
		P_{Cd}	1.37~2.32	1.83	0	0	61.54	38.46	0
		P_{Cr}	0.90~1.42	1.16	0	15.38	92.31	0	0
		P_{As}	0.47~1.65	1.00	15.38	38.46	46.15	0	0
		$P_{综}$	1.53~7.63	4.17	0	0	23.08	7.69	69.23
小店区	39	P_{Hg}	0.64~10.44	3.51	2.56	5.13	25.64	20.51	46.15
		P_{Pb}	1.38~2.96	2.04	0	0	48.72	51.28	0
		P_{Cd}	1.04~2.45	1.83	0	0	58.97	41.03	0
		P_{Cr}	0.98~1.70	1.29	0	2.56	97.44	0	0
		P_{As}	0.74~1.74	1.22	0	20.51	79.49	0	0
		$P_{综}$	1.38~7.82	2.98	0	0	33.33	20.51	46.15
尖草坪区	9	P_{Hg}	1.57~3.78	2.46	0	0	22.22	55.56	22.22
		P_{Pb}	1.47~3.14	1.90	0	0	77.78	11.11	11.11
		P_{Cd}	1.31~2.09	1.60	0	0	88.89	11.11	0
		P_{Cr}	1.11~1.44	1.22	0	0	100	0	0
		P_{As}	0.71~1.11	0.92	0	55.56	33.33	0	0
		$P_{综}$	1.42~3.01	2.13	0	0	44.44	44.44	11.11
清徐县	39	P_{Hg}	0.61~8.36	2.13	2.56	5.13	58.97	17.95	15.38
		P_{Pb}	1.33~2.49	1.85	0	0	71.79	28.21	0
		P_{Cd}	0.97~2.27	1.70	0	2.56	71.79	25.64	0
		P_{Cr}	1.00~1.49	1.24	0	0	100	0	0
		P_{As}	0.54~1.75	1.14	10.26	15.38	74.36	0	0
		$P_{综}$	1.16~6.22	2.07	0	0	61.54	30.77	7.69
古交市	45	P_{Hg}	0.70~2.72	1.60	0	4.44	78.78	17.78	0
		P_{Pb}	1.38~1.91	1.59	0	0	100	0	0
		P_{Cd}	1.05~1.79	1.42	0	0	100	0	0
		P_{Cr}	0.88~1.24	1.13	0	8.89	9.11	0	0
		P_{As}	0.69~1.57	1.13	2.22	28.89	68.89	0	0
		$P_{综}$	1.35~2.24	1.57	0	0	95.56	4.44	0
阳曲县	40	P_{Hg}	1.12~5.03	1.76	0	0	87.50	5	7.5
		P_{Pb}	1.48~1.84	1.60	0	0	100	0	0
		P_{Cd}	1.21~2.50	1.42	0	0	95	5	0
		P_{Cr}	1.08~1.60	1.17	0	0	100	0	0
		P_{As}	0.31~1.41	1.04	2.05	25.00	72.50	0	0
		$P_{综}$	1.36~3.83	1.71	0	0	87.50	5.00	7.50
娄烦县	29	P_{Hg}	1.14~4.72	1.83	0	0	72.41	24.14	3.45
		P_{Pb}	1.36~1.67	1.49	0	0	100	0	0
		P_{Cd}	1.16~1.64	1.34	0	0	100	0	0
		P_{Cr}	1.05~1.26	1.13	0	0	100	0	0
		P_{As}	0.99~1.72	1.23	0	3.45	96.55	0	0
		$P_{综}$	1.31~3.62	1.67	0	0	75.86	20.69	3.45
总体	214	P_{Hg}	0.61~10.4	2.36	1.87	2.34	59.3	18.2	18.2
		P_{Pb}	1.33~3.17	1.76	0	0	79.9	19.2	0.93
		P_{Cd}	0.97~2.50	1.57	0	0.47	83.6	15.9	0
		P_{Cr}	0.88~1.70	1.19	0	3.27	96.7	0	0
		P_{As}	0.31~1.75	1.12	4.21	24.8	71.0	0	0
		$P_{综}$	1.16~7.82	2.14	0	0	67.3	17.8	15.0

表 3 重金属量的半变异函数模型及相关参数

Table 3 Semi-variogram function theoretical model, relevant parameters and verification results of heavy metals

元素	模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金系数 $C_0/(C_0+C)$	平均误差 (ME)	均方根误差 ($RMSE$)	标准平均误差 (MSE)	标准均方根误差 ($RMSSE$)
Cr	球状模型	9.57	76.34	12.5	0.164 3	6.35	0.016 1	0.985 7
Cd	指数模型	0.092 7	0.123 6	74.9	0.127 6	4.14	0.027 5	0.890 3
As	球状模型	0.306 4	5.426 4	5.65	0.006 5	1.66	0.004 3	1.05
Hg	线性模型	0.003 7	0.006 0	60.6	0.000 6	0.05	0.006 1	0.813 3
Pb	高斯模型	16.23	32.47	49.5	-0.013 2	3.34	0.001 0	1.14

从 5 种重金属空间分布图（图 2）可以看出，娄烦县、古交市、晋源区以及清徐县西北部土壤重金属 Cr 量相对较低，阳曲县、尖草坪区、小店区以及清徐县东南部量相对较高；土壤中 As 量与其他 4 种重金属空间分布差异较大，娄烦县、古交市北部、清徐

县东南部和小店区南部量相对较高，其他区县含量相对较低；土壤中 Cd、Hg 和 Pb 3 种重金属空间分布基本一致，古交市、娄烦县和阳曲县含量相对较低，尖草坪区、晋源区、小店区和清徐县含量相对较高。

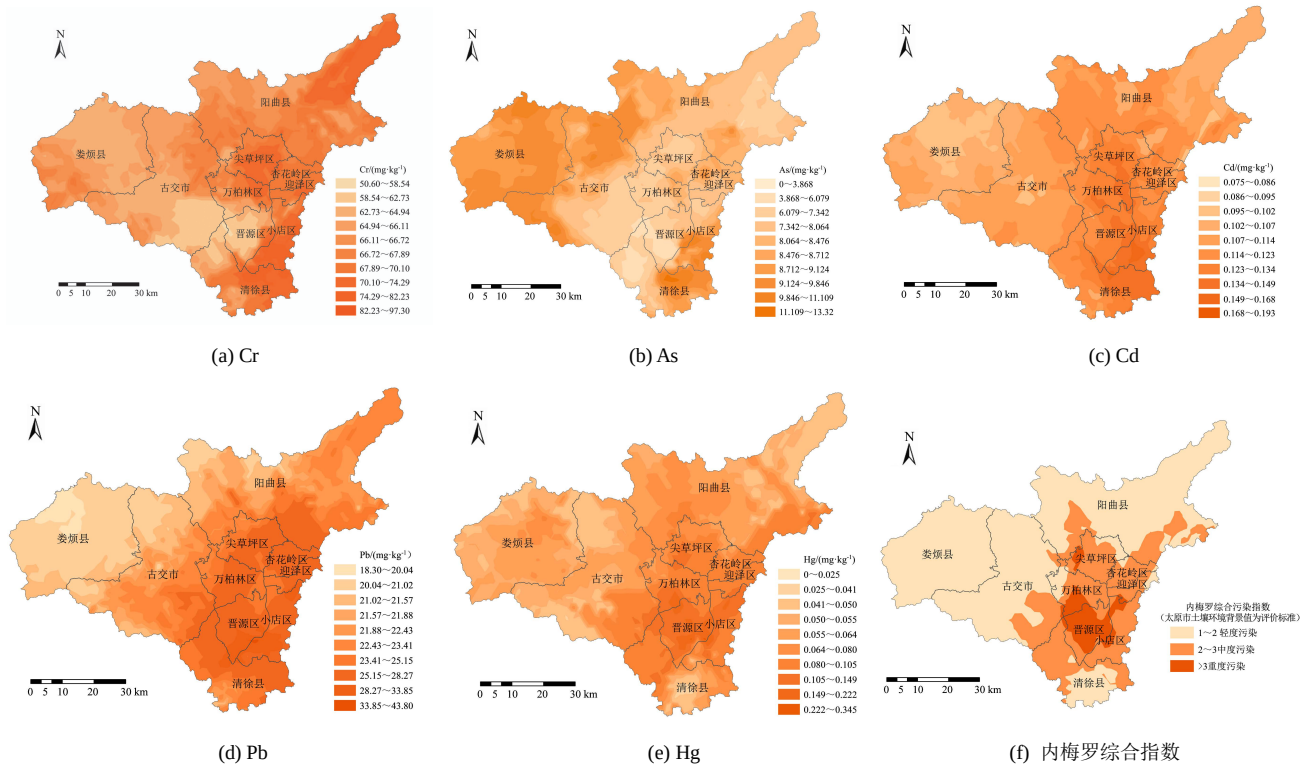


图 2 研究区各重金属空间分布图和评价结果

Fig.2 Spatial distribution of different heavy metals and evaluation results chart in study area

从内梅罗综合指数图可以看出，以“七五”期间太原市土壤背景值为参考标准，晋源区大部分土壤受重度污染；小店区大部分区域土壤呈中度污染，与晋源区相接壤的地区土壤呈重度污染；清徐县北部地区土壤呈中度污染，东南部地区土壤呈轻度污染；尖草坪区大部分土壤呈中度污染，有小部分土壤呈重度污染，与阳曲县相接壤的部分土壤呈轻度污染；古交市大部分土壤呈轻度污染，与清徐县相接壤的部分土壤呈中度污染；阳曲县大部分土壤呈轻度污染，与尖草坪区和杏花岭区相接壤的部分土壤呈中度污染；娄烦县土壤呈轻度污染。

2.4 土壤重金属相关性分析

根据重金属之间相关性可以判断污染来源是否相同，若重金属之间存在显著正相关，说明污染来源可能相同，否则污染来源不止一个^[23-24]。相关性分析结果见表 4。由表 4 可知，除 As 外，Cr、Cd、Hg、Pb 两两均具有显著的相关性（ $P<0.01$ ），表明土壤中这 4 种重金属可能具有相同或相似的来源。As 元素较为特殊，与 Cr、Cd 呈显著相关的，与 Hg、Pb 不相关，表明 As 与 Cr、Cd 可能具有相同来源，与 Hg、Pb 的污染来源不同。

表 4 土壤重金属量的相关性

Table 4 Correlation of soil heavy metal					
元素	Cr	Cd	As	Hg	Pb
Cr	1				
Cd	0.734**	1			
As	0.423**	0.322**	1		
Hg	0.239**	0.398**	-0.039	1	
Pb	0.552**	0.726**	-0.077	0.524**	1

注 *表示在 0.05 水平下差异显著；**表示在 0.01 水平下差异显著。

为了进一步明确太原市农田土壤中重金属的污染来源，对土壤重金属进行主成分分析。主成分分析结果如表 5，5 个指标可由 2 个主成分反映 78.442% 的信息，即对 2 个主成分进行分析就可以反映 5 个指标数据的大部分信息。对 5 种重金属进行主成分分析发现，在因子的初始矩阵中，Cd、Pb、Cr、Hg 在因子 1 中显示出较高的因子负荷，As 在因子 2 中表现出较高的值。经过矩阵变换后，因子 1 中 Pb、Hg 和 Cd 有较高的因子负荷，说明 Pb、Hg 和 Cd 可能具有相同的来源；因子 2 中 As 和 Cr 有较高的因子负荷，说明 As 和 Cr 可能具有相同的来源。

表 5 具有 Kaiser 标准化的正交旋转法
得到的因子和全部解释变量

Table5 Factors and all explanatory variables obtained by
orthogonal rotation method with Kaiser Standardization

元素	主成分		旋转主成分	
	1	2	1	2
Cd	0.913	0.049	0.730	0.550
Cr	0.848	0.285	0.544	0.710
Pb	0.847	-0.306	0.874	0.218
As	0.397	0.794	-0.113	0.881
Hg	0.568	-0.603	0.808	-0.184
方差贡献/%	54.999	23.443	45.570	32.985
累积贡献/%	54.999	78.442	45.570	78.555

3 讨论

3.1 太原市农田土壤重金属污染情况和污染来源

土壤重金属来源主要有 2 方面, 一方面是自然因素, 即成土母质在矿化过程中形成的; 另一方面是人为因素, 包括农业生产过程中的农业化肥施用、污水灌溉、工业废弃物排放和公路交通运输等^[18,25-26]。以区域为评价单元, 结合土壤重金属空间分布图和相关性分析结果, 对小店区、晋源区、尖草坪区、清徐县、阳曲县、古交市和娄烦县的农田土壤中 Hg、Pb、Cd、Cr 和 As 等 5 种重金属污染情况和污染来源进行分析。

主成分分析中, 因子 1 为元素 Hg、Pb 和 Cd 的组合, 表明重金属 Hg、Pb 和 Cd 污染来源基本相同。由图 2 可以看出, 重金属 Hg、Pb、Cd 的空间分布图基本相似, 在太原市城郊晋源区、小店区、尖草坪区和清徐县含量明显突出, 远离太原市的阳曲县、古交市和娄烦县含量相对较低。太原市是我国煤炭能源重化工基地, 且有较长的污灌历史, 工业三废的排放和污水灌溉引起农田土壤重金属含 Cd、Hg、Pb 量增多^[13-16]。太原市郊区交通运输比较发达, 汽车尾气排放、汽车轮胎磨损会产生大量含 Hg、Pb 等重金属的有害气体和粉尘, 同时燃煤是太原市市区最主要的能耗方式, 燃煤产生大量的含 Hg 和 Pb 的有害气体和粉尘, 这些物质随风飘落进入土壤中积累下来^[27]。另一方面, 晋源区、小店区和清徐县主要种植蔬菜, 有机肥和化肥施用量大, 在土壤有机质和全氮等养分量提高的同时, Cd、Hg 和 Pb 等有害重金属也被带入土壤中^[28-32]。因此, 因子 1 除受自然因素影响外, 主要受工业活动、农业生产、交通运输和燃煤等人为因素的影响。

因子 2 为元素 As 和 Cr 组成, As 和 Cr 是成岩元素^[33], 单项污染指数分别为 1.12 和 1.19, 接近于土壤背景值, 说明 As 和 Cr 主要受成土母质的影响, 受

人为因素影响较小。由土壤中 5 种重金属的相关性和主成分分析得知, 重金属 As 与 Pb、Hg 不相关, 而重金属 Hg 和 Pb 是污水灌溉、燃煤排放、汽车尾气排放等污染源的标志性元素, 因此重金属 As 的来源与污水灌溉、燃煤排放和汽车尾气等人为因素相关性较小, 在区域中的变异性主要是由土壤母质和农业生产活动决定的。研究结果与刘勇等^[15]的研究结果基本一致, As 和 Cr 的污染来源除了土壤母质外, 农业生产活动是其主要来源。因此, 因子 2 主要受成土母质和农业生产活动的影响。

3.2 太原市各县区农田土壤重金属综合评价

太原市农田土壤内梅罗综合指数平均值为 2.14, 呈中度污染。晋源区农田土壤呈重度污染, 小店区、尖草坪区和清徐县呈中度污染, 阳曲县、娄烦县和古交市呈轻度污染。研究结果与内梅罗综合指数图基本一致, 重度污染和中度污染的土壤主要分布在晋源区、小店区、尖草坪区、清徐县北部区域; 轻度污染的土壤主要分布在清徐县东南部、阳曲县、娄烦县和古交市。造成这种分布格局的原因包括: 晋源区、小店区、尖草坪区、清徐县北部离太原市城区较近, 工业发达、人口密集, 分布着太原钢铁厂、太钢污水处理厂、山西化工厂、山西针织厂和山西毛纺厂等能源化工企业^[13-16], 工业排放的三废、燃煤和交通运输、生活垃圾、污水灌溉及农业生产活动等引起土壤重金属 Hg、Pb、Cd 等量明显增加, 使得该区域土壤重金属内梅罗综合指数达到很高的污染水平。其中, 晋源区污染最重, 大部分区域达到重度污染水平, Hg 的单项污染指数均值为 5.31, 是主要的污染因子, 该结果与解文艳等^[16]研究结果基本一致, 主要是因为该区域分布多家化工厂、造纸厂、热电厂等能源化工企业, 土壤污染比较严重。清徐县东南部、阳曲县、古交市和娄烦县远离太原市城区, 主要种植大田作物, 重金属污染主要受农业生产活动的影响, 除与城区相邻的地区呈中度污染水平, 大部分地区都呈轻度污染水平。

晋源区、小店区和清徐县是太原市最大的污灌区, 内梅罗综合指数评价农田土壤重金属污染状况表明晋源区为重度污染, 小店区和清徐县为中度污染, 与解文艳等^[16]研究结果基本一致; 但是 Hg 和 Pb 的单项污染指数升高, Cd、Cr 和 As 的单项污染指数下降, 这可能是近 10 年来太原市加强环境治理和污水处理, 严格控制工业三废的排放和污水灌溉, 使土壤中含 Cd、Cr 和 As 量得到控制, 使其单项污染指数降低; 而随着交通运输业的不断发展及汽车拥有量的增加, 汽车尾气排放、汽车轮胎磨损产生了大量含 Hg 和 Pb 等重金属的有害气体和粉尘, 同时燃煤也可产生大量含 Hg 有害气体和粉尘, 这些物质随风飘落进入土壤

并积累下来, 引起土壤中重金属 Hg 和 Pb 量增加。

4 结 论

1) 太原市农田土壤中 Cr、Pb、Cd、Hg、As 量均低于绿色食品产地环境质量标准, 但各种重金属平均值均显著高于太原市“七五”普查背景值, 说明随着工农业生产的发展, Cr、Pb、Cd、Hg、As 从环境进入土体并累积; 其中 Hg 和 Pb 是主要污染元素, 主要来源于工业活动、农业生产、交通运输和燃煤等人为活动。

2) 太原市农田土壤总体为中度污染, 县域间土壤污染程度差异较大。在工业发达和人口密集的城郊晋源区、小店区、尖草坪区和清徐县, 农田土壤为重度污染和中度污染, 远离太原市市区的阳曲县、古交市和娄烦县农田土壤为轻度污染。

因此, 今后工作中应加强对太原市城郊晋源区、小店区、尖草坪区和清徐县等 4 个区县农田土壤重金属进行重点监测, 尤其是 Hg 和 Pb, 以确保土壤健康和可持续利用。

参考文献:

- [1] 江宏, 马友华, 尹国庆, 等. 安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 352-359.
JIANG Hong, MA Youhua, YIN Guoqing, et al. Evaluation on heavy metal pollution and potential ecological risk of farmland soils in a county of Anhui province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(4): 352-359.
- [2] 侯沁言, 张士熔, 马小杰, 等. 基于 GIS 的凯江流域农田重金属污染评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1 514-1 522.
HOU Qinyan, ZHANG Shirong, MA Xiaojie, et al. Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil of the Kaijiang watershed based on GIS[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(7): 1 514-1 522.
- [3] CHEN Shibao, WANG Meng, LI Shanshan, et al. Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(4): 765-774.
- [4] 安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 37-44.
AN Jing, GONG Xiaoshuang, CHEN Hongwei, et al. Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 37-44.
- [5] 陈锦芳, 方宏达, 巫晶晶, 等. 基于 PMF 和 Pb 同位素的农田土壤中重金属分布及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1 026-1 035.
CHEN Jinfang, FANG Hongda, WU Jingjing, et al. Distribution and

- source apportionment of heavy metals in farmland soils using PMF and lead isotopic composition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(5): 1 026-1 035.
- [6] 王金霞, 罗乐, 陈玉成, 等. 三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2 711-2 717.
WANG Jinxia, LUO Le, CHEN Yucheng, et al. The characteristics and potential risk of heavy metals pollution in farmland soil of an agricultural land in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2 711-2 717.
- [7] 孙国红, 王鹏超, 徐应明, 等. 施用钾肥对稻田土壤镉污染修复效应影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 38-45.
SUN Guohong, WANG Pengchao, XU Yingming, et al. Potassium fertilizer enhances the mobility of cadmium in paddy soil amended with sepiolite[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 38-45.
- [8] 张敏, 陈海, 史琴琴, 等. 黄土丘陵沟壑区耕层土壤重金属空间分异及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2 465-2 475.
ZHANG Min, CHEN Hai, SHI Qinqin, et al. Spatial heterogeneity of heavy metals and influencing factors in the surface cultivated soil of the loess hillygully region, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(11): 2 465-2 475.
- [9] 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 223-230.
CAI Meifang, LI Kaiming, XIE Danping, et al. The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals, China[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(120): 223-230.
- [10] 李乐乐, 刘源, 李宝贵, 等. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 53-58, 72.
LI Lele, LIU Yuan, LI Baogui, et al. Screening of low-accumulation wheat varieties with Cadmium[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 53-58, 72.
- [11] 郭翠花, 黄淑萍, 原洪波, 等. 太原市地表土中五种重金属元素的污染监测及评价[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1995, 18(2): 222-225.
GUO Cuihua, HUANG Shuping, YUAN Hongbo, et al. Monitoring and evaluation of heavy-metal pollution state in surface-layer soil of Taiyuan city[J]. Journal of Shanxi University (Nat. Sci. ED.), 1995, 18(2): 222-225.
- [12] 郭翠花, 王应刚, 任燕萍, 等. 太原市地表土汞含量的分析特征[J]. 山西大学学报, 1996, 19(3): 339-334.
GUO Cuihua, WANG Yinggang, REN Yanping, et al. The distribution characteristics of Hg-element content in the surface soil in Taiyuan city[J]. Journal of Shanxi University, 1996, 19(3): 339-344.
- [13] 张乃明, 李保国, 胡克林. 污水灌区耕层土壤中铅、镉的空间变异特征[J]. 土壤学报, 2003, 40 (1): 151-154.
ZHANG Naiming, LI Baoguo, HU Kelin. The spatial variation characteristics of lead and cadmium in the soil of the sewage irrigation area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (1): 151-154.

- [14] 张乃明, 陈建军, 常晓冰. 污灌区土壤重金属累积影响因素研究 [J]. 土壤, 2002(2): 90-93.
- ZHANG Naiming, CHEN Jianjun, CHANG Xiaobing. Study on influencing factors of heavy metal accumulation in soil of sewage irrigation area [J]. Soils, 2002(2): 90-93.
- [15] 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): 1 285-1 293.
- LIU Yong, YUE Lingling, LI Jinchang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1 285-1 293.
- [16] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 太原市污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1 553-1 560.
- XIE Wenyan, FAN Guisheng, ZHOU Huaiping, et al. Access of heavy metals pollution of the sewage irrigation region in Taiyuan, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(8): 1 553-1 560.
- [17] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2 475-2 485.
- ZHAO Jie, LUO Zhijun, ZHAO Yue, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in Poyang Lake area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6): 2 475-2 485.
- [18] 穆莉, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 573-582.
- MU Li, WANG Yuehua, XU Yaping, et al. Pollution characteristics and sources of heavy metals in paddy soils in a county of Human Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(3): 573-582.
- [19] NIE Jiyun, KUANG Lixue, LI Zhixia, et al. Assessing the concentration and potential health risk of heavy metals in China's main deciduous fruits[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(7): 1 645-1 655.
- [20] 伍海闻, 罗婷, 马瑾, 等. 基于 PCA 和地统计的西南烟田土壤重金属源解析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1 010-1 018.
- WU Haiwen, LUO Ting, MA Jin, et al. Principal component analyses and geostatistical analyses to estimate source apportionment of heavy metal(oids) in tobacco-growing soils in the Southwest region of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 1 010-1 018.
- [21] 任加国, 王彬, 师华定, 等. 沱江上源支流土壤重金属污染空间相关性及其变异解析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 530-541.
- REN Jiaguo, WANG Bin, SHI Huading, et al. Spatial correlation and variation analysis of soil heavy metals contamination in upper source tributary of Tuo-jiang River, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(3): 530-541.
- [22] 王梅霞, 冯文兰. 土壤砷空间分布特征及其与地理要素的关联分析 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 106-111.
- WANG Meixia, FENG Wenlan. Spatial variation of soil arsenic and correlation analysis with geographical factors[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(9): 106-111.
- [23] 谢龙涛, 潘剑君, 白浩然, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以南京市江宁区某乡镇为例[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 316-325.
- XIE Longtao, PAN Jianjun, BAI Haoran, et al. GIS-Based spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soils: a case study of a town of Jiangning, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 316-325.
- [24] 李晋昌, 张红, 石伟. 汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布[J]. 环境科学, 2013 (1): 116-120.
- LI Jinchang, ZHANG Hong, SHI Wei. Concentrations of soil heavy metals and their spatial distribution in the surrounding area of Fenhe reservoir[J]. Environmental Science, 2013 (1): 116-120.
- [25] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染源解析研究综述[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 232-242.
- LI Jiao, WU Jin, JIANG Jinyuan, et al. Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(1): 232-242.
- [26] 师荣光, 张又文, 许萌萌, 等. 天津市郊区土壤重金属的污染评价与来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1 069-1 078.
- SHI Rongguang, ZHANG Youwen, XU Mengmeng, et al. Pollution evaluation and source apportionment of heavy metals in soils from Tianjin suburbs, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(5): 1 069-1 078.
- [27] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 城乡结合带土壤重金属时空变异特征与源解析: 以南京市柘塘镇为例[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1 066-1 077.
- FU Chuancheng, WANG Wenying, PAN Jianjun, et al. Spatial-temporal variation and source apportionment of soil heavy metals in peri-urban area: a case study of Zhetang town, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 1 066-1 077.
- [28] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥对土壤及玉米籽粒中 Pb、As 含量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4 827-4 836.
- YANG Zhenxing, ZHOU Huaiping, XIE Wenyan, et al. Effect of long-term fertilization on Pb, As contents of soil and maize grain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4 827-4 836.
- [29] 苏姝, 王颖, 刘景, 等. 长期施肥下黑土重金属的演变特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4 837-4 845.
- SU Shu, WANG Ying, LIU Jing, et al. Evolution characteristics of heavy metals in the black soil under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4 837-4 845.
- [30] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(2): 466-480.
- WANG Mei, LI Shutian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 466-480.
- [31] NING Chuanchuan, GAO Pengdong, WANG Bingqing, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments

- supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1 819-1 831.
- [32] 滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市农田土壤养分和重金属累积特征及相关性分析[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 1 027-1 033.
- HUA Xiaozan, CHENG Bin, ZHAO Ruifen, et al. Analysis on characteristics and correlation of main soil nutrients and heavy metals accumulation in Taiyuan[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(6): 1 027-1 033.
- [33] LIU Ping, ZHAO Haijun, WANG Lili, et al. Analysis of heavy metal sources for vegetable soils from shandong province, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2011, 10(1): 109-119.

Pollution Assessment and Spatial Distribution of Heavy Metals in the Farmland Soils of Taiyuan City

HUA Xiaozan, CHENG Bin*, ZHAO Ruifen, HUO Xiaolan, WANG Zhao, WANG Sen
(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: 【Objective】 Heavy metal pollution is an important source of soil pollution. At present, the research mainly focuses on the urban area and the sewage irrigation area soil, but the heavy metal pollution and the spatial distribution of the whole farmland soil in Taiyuan have not been reported. The objective of present study was to describe the present situation, pollution sources and spatial distributions of heavy metals in the farmland soil of Taiyuan city. This work will be helpful for pollution control and agricultural production. 【Method】 The concentrations of Cr, Cd, Pb, Hg and As in the 214 farmland soils of Taiyuan city were determined. The pollution level of soil heavy metal elements was evaluated using single factor index method and nemerow comprehensive index method. The spatial distribution map of heavy metals was drew using ArcGIS 10.3 and the correlation analysis was done by SPSS 16.0 to reveal the pollution sources of heavy metals in soils. 【Result】 ①The concentrations distribution of heavy metals in farmland soils was quite different. The average content of Cr, Cd, As, Hg and Pb in soil was 68.38, 0.121, 8.59, 0.08 and 24.23 mg/kg, respectively. These contents were significantly higher than the corresponding background values of soil in Taiyuan, although they did not exceed the environmental quality standard of the green food producing area. ②The Single Pollution Index was shown as $Hg(2.36) > Pb(1.76) > Cd(1.57) > Cr(1.19) > As(1.12)$. The contaminations of Hg, Pb and Cd mainly originated from industrial production, sewage irrigation, coal burning, application of pesticide and chemical fertilizer and transportation. On the other hand, the pollution of As and Cr were mainly associated with soil parent material and agricultural activities. ③The Nemerow index of Taiyuan farmland soil was 2.14, indicating the moderate pollution. The Nemerow index of farmland soil was 4.17 in Jinyuan district, 2.98 in Xiaodian district, 2.13 in Jiancaoping district, 2.07 in Qingxu county, 1.71 in Yangqu county, 1.67 in Loufan county and 1.57 in Gujiao county. The spatial distribution map of heavy metals and pollution status could be visualized, showing moderately and severely polluted in the suburb soils of Taiyuan city (especially in Jinyuan and Xiaodian districts), and slightly polluted in the countries far from Taiyuan city. 【Conclution】 We conclude that the farmland soils of Taiyuan city were moderately polluted, and Hg and Pb were the main contaminants. The more serious heavy metal pollution was located in the suburbs of Taiyuan city (i.e., Jinyuan, Xiaodian, Jiancaoping and Qingxu). We recommend that it is necessary to strengthen monitoring Hg and Pb in soils in these heavily polluted areas to ensure the soil health and agriculture sustainability.

Key words: Taiyuan; arable land soil; heavy metals; pollution envaluation; spatial distribution

责任编辑：白芳芳