

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2018.11.009

孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 1019-1026.

MENG Min, YANG Lin-sheng, WEI Bing-gan, et al. Contamination Assessment and Spatial Distribution of Heavy Metals in Greenhouse Soils in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(11): 1019-1026.

## 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征

孟敏<sup>1,2</sup>, 杨林生<sup>1,2</sup>, 韦炳干<sup>1①</sup>, 李海蓉<sup>1,2</sup>, 虞江萍<sup>1</sup> (1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 收集了 1997 年以来我国设施农田土壤重金属研究文献的数据并对其进行统计分析, 评价我国设施农田土壤重金属污染现状及空间分布。结果表明我国设施农田土壤重金属含量呈现一定的空间分布规律, 南部地区土壤 Cd、Pb 和 Hg 含量最高, 北部地区土壤 As、Cu、Zn 和 Cr 含量最高, 西北部地区土壤 Ni 含量最高。与 HJ/T 333—2006《温室蔬菜产地环境质量评价标准》相比, 设施农田土壤 Cd 含量超标最严重, 其在南部、北部和西北部地区的超标率分别为 41.7%、54.5% 和 11.1%; 其次是 Pb, 在 3 大区域的超标率分别为 33.3%、18.2% 和 0。地累积指数评价结果显示我国设施农田土壤 Cd 污染最严重, 其次为 Hg 污染。另外, 随种植年限的延长, 设施农田土壤重金属累积明显, 且土壤重金属的累积量随土层加深呈下降趋势。就重金属的来源而言, 我国设施农田土壤重金属来源以肥料, 尤其是畜禽粪便有机肥为主。

**关键词:** 设施农田; 土壤; 重金属; 污染评价

**中图分类号:** X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2018)11-1019-08

**Contamination Assessment and Spatial Distribution of Heavy Metals in Greenhouse Soils in China.** MENG Min<sup>1,2</sup>, YANG Lin-sheng<sup>1,2</sup>, WEI Bing-gan<sup>1①</sup>, LI Hai-rong<sup>1,2</sup>, YU Jiang-ping<sup>1</sup> (1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to evaluate the contamination level and explore the spatial distribution pattern of heavy metals in greenhouse soils of China, the peer literatures on heavy metals in greenhouse soils since 1997 were systematically reviewed and the data analyzed. The results indicate that the heavy metals in greenhouse soils of China generally showed a spatial distribution pattern. The concentrations of Cd, Pb and Hg in greenhouse soils are higher in the south, the concentrations of As, Cu, Zn and Cr are higher in the north, while the value for Ni is the highest in the northwest. Moreover, 41.7%, 54.5% and 11.1% of soil sample sites from the south, north and northwest, respectively, showed higher Cd concentration than the standard value for farmland of greenhouse vegetables production; while for Pb concentration, 33.3%, 18.2% and 0 of the soil sample sites in the three regions respectively, exceeded standard value. The geo-accumulation index shows that for the greenhouse soils in China, Cd pollution is the most serious, followed by Hg pollution. In addition, the concentrations of heavy metals accumulated in greenhouse soils in China increase accordingly with planting years, and the heavy metals concentrations decrease with the soil layer. The main source of heavy metals in greenhouse soils is fertilizer, especially manure.

**Key words:** greenhouse farmland; soil; heavy metal; contamination assessment

20 世纪 90 年代以来, 随着工业化和城市化进程的加快, 工业污染物排放、含重金属农药化肥的使用以及采用污水灌溉等导致农田重金属累积和超标等环境问题日益凸显, 已经引起了社会各界的高度关注<sup>[1]</sup>。作为农田质量的一个重要评价指标, 农田重金属含量状况越来越受到广泛关注<sup>[2]</sup>。我国设施农业自 20 世纪 80 年代以来发展迅速, 2010

年我国设施园艺面积达 362 万  $\text{hm}^2$ , 其中, 设施蔬菜面积为 335 万  $\text{hm}^2$ , 占设施园艺总面积的 90% 以上, 到 2012 年我国设施园艺面积已达 386 万  $\text{hm}^2$ , 设施

收稿日期: 2017-10-27

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0801004); 国家自然科学基金青年基金(41601559); 国家自然科学基金重点基金(41230749)

① 通信作者 E-mail: weibg@igsnrr.ac.cn

园艺产业净产值达 5 800 多亿元<sup>[3]</sup>。据统计,2015 年北京市设施蔬菜和食用菌播种面积为 34 113 hm<sup>2</sup>,占设施农业总播种面积的 83.2%<sup>[4]</sup>。我国设施农业栽培常处于半封闭状态,具有气温高、湿度大、蒸发量大、无雨水淋洗、无沉降、复种指数高、施肥量(尤其是有机肥)较大等特点,导致设施土壤理化性质和生物学性状发生重大变化,主要表现为土壤酸化、盐渍化,养分不平衡及过量累积,以及重金属累积等<sup>[5-6]</sup>。已有研究表明,设施栽培土壤中重金属呈明显累积趋势,且含量显著高于露地栽培土壤<sup>[7-8]</sup>。设施菜地已经成为继工矿/污灌菜地之后重金属累积较严重的菜地类型,应该引起足够重视<sup>[9]</sup>。

近年来,虽然关于设施农田土壤中重金属的研究报道较多,但各研究区域较小,且分布较为分散,不能综合反映我国设施农田土壤重金属污染的现状。因此,笔者收集了 1997 年以来全国关于设施农田重金属研究的数据,通过统计分析,阐述了不同地区设施农田土壤中重金属污染现状及空间分布特征,并探讨设施农田土壤重金属的主要来源,以期为我国设施农田土壤重金属防控和农田质量安全提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

相关统计数据主要检索自中国知网(1997—2017 年)、维普(1997—2017 年)和 Web of Science(1997—2017 年)等数据库中关于我国设施农田重金属污染研究的文献。共收集全国 31 个地区的数据,包括不同种植年限和不同土层重金属含量和分布数据。收集的所有数据的分析方法均符合中国环境保护部规定方法或美国环境保护局(USEPA)推荐方法,数据来源真实可靠。符合正态分布的重金属含量数据采用算术平均值描述;符合对数正态分布的重金属含量数据采用几何平均值描述;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验差异显著性。采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析。

### 1.2 数据分布情况

共收集全国各地 31 个地区的数据<sup>[5-34]</sup>,按照农业气候区划和数据分布情况,将其分为 3 个区域:南部地区,包括上海、安徽、江苏、浙江、湖北、云南和河南 7 个省(直辖市);北部地区,包括北京、河北、天津、辽宁、吉林、黑龙江、山东和山西(部分地区)8 个省(直辖市);西北部地区,主要包括陕西、山西

(部分地区)、内蒙古、甘肃、宁夏、青海和西藏 7 个省(自治区)。

### 1.3 重金属污染评价方法

地累积指数( $I_{geo}$ )是由德国科学家 Muller 于 1969 年提出的<sup>[35]</sup>,是一个基于重金属总浓度与背景值的关系研究水环境沉积物中重金属的定量指标,现在也常用于土壤重金属污染评价,计算公式为

$$I_{geo} = \log_2 C_n / (1.5 \times B_n) \quad (1)$$

式(1)中, $C_n$ 为沉积物中元素  $n$  含量,mg · kg<sup>-1</sup>;  $B_n$ 为黏质沉积岩中该元素的地球化学背景值,mg · kg<sup>-1</sup>; 1.5 是考虑了各地岩石差异可能引起的变动而选取的系数。地累积指数分级标准见表 1。

表 1 地累积指数( $I_{geo}$ )分级标准

Table 1 Grading standards for geo-accumulation index

$I_{geo}$	分级	污染程度
≤0	I	无
>0~1	II	轻度
>1~2	III	中度
>2~3	IV	中强
>3~4	V	强
>4~5	VI	较强
>5	VII	极强

通常在地累积指数计算中,元素的地球化学背景值选取工业化前全球沉积物重金属的平均背景值作为参考,由于不同地球化学背景可能造成各地重金属污染程度不同,故选择各省(直辖市、自治区)土壤重金属含量背景值作为  $B_n$ <sup>[36]330-386</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 设施农田土壤重金属含量

由表 2 可知,我国设施农田 Cd、Pb 和 Hg 平均含量以南部地区为最高,比北部地区分别高 42.5%、10.8% 和 100.0%,比西北部地区分别高 137.5%、40.7% 和 15.8%; As、Cu、Zn 和 Cr 平均含量均以北部地区为最高,其比南部地区分别高 24.3%、13.2%、46.4% 和 13.9%,比西北部地区分别高 38.9%、30.8%、20.9% 和 21.4%; 而 Ni 平均含量则以西北部地区为最高,其比南部和北部地区分别高 43.2% 和 12.9%。大部分设施农田种植蔬菜,故将数据与 HJ/T 333—2006《温室蔬菜产地环境质量评价标准》进行比较,结果显示 Cd、Cu、Zn、Pb、Hg 超标率分别为 37.5%、8.1%、5.9%、18.8% 和 20.0%,其余元素未出现超标情况。其中,Cd 含量超标最严重,南部、北部和西北部地区超标率分别为 41.7%、54.5% 和 11.1%,Pb 超标率分别为

33.3%、18.2% 和 0, Hg 超标率分别为 29.8%、20.0% 和 0, Cu 超标率分别为 12.5%、10.0% 和 0, Zn 仅在北部地区出现超标, 超标率为 11.1%。

表 2 不同地区设施农田重金属含量统计

Table 2 Statistics of heavy metals content of greenhouse soils in different areas

重金属	地区	样本数	分布类型	$w/(mg \cdot kg^{-1})$					
				算术平均值	算术标准差	几何平均值	最大值	最小值	标准值 <sup>1)</sup>
As	南部地区	608	正态分布	9.54 <sup>a</sup>	5.67	8.61	22.20	5.37	30
	北部地区	431	正态分布	11.86 <sup>a</sup>	4.66	11.22	22.94	7.22	25
	西北部地区	231	近似正态分布	8.54 <sup>a</sup>	6.01	3.35	13.33	0.09	20
Cd	南部地区	738	正态分布	0.57 <sup>a</sup>	0.69	0.33	2.47	0.05	0.30
	北部地区	502	正态分布	0.40 <sup>ab</sup>	0.25	0.31	0.98	0.04	0.30
	西北部地区	427	正态分布	0.24 <sup>b</sup>	0.11	0.22	0.42	0.11	0.40
Cu	南部地区	613	正态分布	36.63 <sup>a</sup>	13.10	34.24	51.31	18.24	50
	北部地区	359	近似正态分布	41.48 <sup>a</sup>	24.45	37.51	107.89	24.46	100
	西北部地区	337	正态分布	31.72 <sup>a</sup>	7.66	30.97	44.63	24.10	100
Zn	南部地区	274	正态分布	72.24 <sup>a</sup>	24.78	68.86	114.40	43.70	200
	北部地区	339	对数正态分布	118.69	70.15	105.76 <sup>a</sup>	293.98	48.99	250
	西北部地区	323	对数正态分布	96.72	56.12	87.45 <sup>a</sup>	196.10	64.33	300
Cr	南部地区	626	正态分布	59.76 <sup>a</sup>	21.68	54.97	91.46	19.85	150
	北部地区	514	正态分布	68.04 <sup>a</sup>	24.32	64.39	120.85	37.23	200
	西北部地区	251	正态分布	56.04 <sup>a</sup>	39.89	27.88	122.61	0.42	250
Ni	南部地区	154	正态分布	22.34 <sup>a</sup>	7.46	21.22	29.38	12.19	40
	北部地区	298	正态分布	28.32 <sup>ab</sup>	4.70	28.01	37.70	22.80	50
	西北部地区	216	正态分布	31.98 <sup>b</sup>	3.19	31.85	35.53	28.59	60
Pb	南部地区	738	对数正态分布	40.32	34.65	30.42 <sup>a</sup>	138.40	5.44	50
	北部地区	472	对数正态分布	33.03	24.15	27.46 <sup>a</sup>	90.18	14.53	50
	西北部地区	397	正态分布	21.62 <sup>a</sup>	11.05	13.29	39.57	0.15	50
Hg	南部地区	235	正态分布	0.22 <sup>a</sup>	0.27	0.13	0.61	0.05	0.25
	北部地区	193	近似正态分布	0.11 <sup>a</sup>	0.11	0.07	0.31	0.02	0.30
	西北部地区	126	对数正态分布	0.19	0.03	0.19 <sup>a</sup>	0.21	0.17	0.35

不同地区重金属含量平均值后字母不同表示各地区间差异显著 ( $P < 0.05$ )。1) HJ/T 333—2006《温室蔬菜产地环境质量评价标准》。

## 2.2 设施农田土壤重金属污染评价

地累积指数法同时考虑了人为因素和土壤环境地球化学背景值对重金属富集的影响, 该方法最初应用于沉积物中重金属含量评价, 后来也广泛应

用于土壤环境中重金属含量评估, 是目前国内外土壤环境评价中广泛采用的方法<sup>[37]</sup>。不同地区设施农田重金属地累积指数见表 3。

表 3 不同地区设施农田重金属地累积指数

Table 3 The geo-accumulation index of heavy metals in greenhouse soils in different areas

重金属	地累积指数								
	南部地区			北部地区			西北部地区		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
As	-0.66	0.57	-1.06	-0.33	0.64	-1.03	-0.64	-0.50	-0.80
Cd	1.05	4.55	-1.81	0.74	2.12	-2.40	-0.12	1.22	-3.04
Cu	-0.04	0.86	-0.64	-0.08	0.54	-0.72	-0.31	0.30	-1.16
Zn	-0.57	0.28	-1.69	-0.03	1.71	-0.88	-0.29	0.93	-1.25
Cr	-0.45	3.31	-2.70	-0.33	0.91	-1.22	-1.00	-0.33	-2.50
Ni	-1.39	-0.77	-2.42	-0.33	0.01	-0.59	-0.60	-0.40	-0.89
Pb	-0.13	1.96	-2.90	-0.20	1.47	-1.26	-0.22	1.30	-1.49
Hg	0.20	0.49	-0.22	0.37	2.91	-1.14	1.45	2.37	0.53

由表 3 可知, 南部地区 Cd、Hg 地累积指数平均值分别为 1.05 和 0.20, 分别显示中度污染和轻度污染, 其余元素地累积指数平均值均小于 0, 显示无

污染。南部地区 Cd 地累积指数显示无污染、轻度污染、中度污染和中强污染的点位数分别占总点位数的 33.3%、33.3%、22.2% 和 11.2%; 与南部地区

相似,北部地区 Cd、Hg 地累积指数分别为 0.74 和 0.37,均属轻度污染状态,其余元素地累积指数均小于 0,Cd 无污染、轻度污染、中度污染和中强污染的点位数分别占总点位数的 10.0%、40.0%、40.0%和 10.0%。西北部地区 Hg 地累积指数平均值为 1.45,达中度污染,但西北部地区 Hg 含量数据较少,无法全面地反映整体污染状况,评价结果可能存在较大偏差;其余 7 种重金属元素的地累积指数平均值均小于 0,但个别地区 Cd、Cu、Zn 和 Pb 最大地累积指数大于 0,说明西北部地区个别区域存在污染现象。从评价结果来看,我国设施农田重金属污染最严重的是 Cd 污染,其次为 Hg 污染,此外,Cu 污染也应引起重视。

### 2.3 设施农田土壤重金属累积趋势

南部、北部和西北部 3 大区域不同年限设施农田重金属含量的统计结果(表 4)表明除南部地区 Pb 以外,经过>10 a 种植时间各区域土壤重金属含量均呈现不同程度的增加,其中,Cd 含量增幅最大。南部、北部和西北部地区>10 a 种植时间土壤 Cd 平

均含量比<3 a 种植时间土壤分别增加 103.8%、123.1%和 110.7%;而土壤 Cu 含量分别增加 50.0%、36.1%和 61.1%,土壤 Zn 含量分别增加 31.0%、23.2%和 50.1%。从不同地区来看,种植时间>10 a 时,南部地区土壤 As 含量增加 105.6%,而北部和西北部地区仅分别增加 8.4%和 3.8%;南部和西北部地区 Ni 含量分别增加 63.5%和 40.4%,而北部地区仅增加 7.8%。西北部地区 Cr 含量增加 56.1%,南部和北部地区分别增加 12.6%和 7.6%。此外,南部地区 Pb 含量出现随年限增加而降低的情况,这可能是由于南部部分地区土壤 Pb 背景值较高<sup>[3,27]</sup>。3 大地区土壤在种植 3~6 a 时重金属含量增幅较大,这主要是由于当种植 3~6 a 时,重金属元素累积到限制作物正常生长的临界浓度时,农户便会采取一些措施来减少损失,如揭棚、翻耕甚至休耕等,待土壤条件稍有改善再进行种植,所以导致种植年限>6 a 后,重金属累积速率有所下降<sup>[8,19]</sup>。

表 4 不同年限设施农田土壤重金属含量

Table 4 Heavy metals contents in greenhouse soils under different planting years

区域	种植年限/ a	$w/(mg \cdot kg^{-1})$						
		As	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb
南部地区	<3	3.41	0.26	36.13	35.98	85.09	7.98	24.28
	3~6	5.67	0.44	48.23	49.01	89.49	14.03	21.65
	>6~10	5.40	0.42	55.56	42.70	95.50	13.68	20.36
	>10	7.01	0.53	54.20	47.12	95.77	13.05	15.85
北部地区	<3	10.02	0.26	25.65	82.90	50.52	25.00	15.24
	3~6	10.22	0.42	28.44	86.83	51.07	25.32	15.47
	>6~10	10.64	0.45	32.08	94.70	53.35	26.41	16.37
	>10	10.86	0.58	34.90	102.15	54.38	26.95	18.18
西北部地区	<3	12.89	0.28	29.19	62.20	31.59	27.17	26.54
	3~6	12.21	0.29	37.32	83.45	44.98	35.91	29.46
	>6~10	12.82	0.40	41.72	90.36	46.92	37.80	29.99
	>10	13.38	0.59	47.03	93.35	49.32	38.15	31.93

### 2.4 设施农田土壤重金属垂直分布特征

不同地区设施农田土层重金属含量的垂直分布特征见表 5。由表 5 可知,各地区土壤重金属含量随土壤深度增加而下降,但个别土壤出现不减反增的情况。南部、北部和西北部地区>20~40 cm 土层与表层(0~20 cm)相比,Cd 含量分别降低 43.3%、78.6%和 33.3%,Cr 含量分别降低 41.0%、9.7%和 1.5%,As 含量分别降低 34.4%、5.1%和 26.7%,Pb 含量分别降低 5.8%、8.1%和 4.7%。与>20~40 cm 土层相比,南部、北部地区>40~60 cm 土层 Cd 含量分别降低 25.0%和 33.3%;南部地区 As、Cr 和 Pb 含量分别降低 14.3%、15.3%和

10.8%,而北部地区 As、Cr 和 Pb 含量反而升高 15.7%、7.0%和 0.8%;与>40~60 cm 土层相比,南部地区>60~80 cm 土层 Cd、As、Cr 和 Pb 含量分别降低 38.6%、61.1%、25.5%和 24.1%。

## 3 讨论

### 3.1 分区的合理性和数据有效性问题

笔者充分收集了近 20 a 来我国设施农田重金属的研究结果并对其进行统计分析。收集过程中,华南地区广东、广西和福建等地以及西南地区四川、重庆和贵州等地均未见相关研究,且我国设施农业分布呈现明显的区域化特点,主要集中在环渤

海湾及黄淮海地区、长江中下游地区以及西北地区<sup>[38]</sup>。故参考农业气候区划,并同时考虑文献中不同研究地区土壤 pH 值,将收集到的数据分为南部、北部和西北部 3 大区域进行统计分析。关于数据的准确性方面,虽然收集的时间尺度较长,但对设施农田重金属的研究多集中在近 10 a,样品的分析方法业已规范,检测精度相对较高,且在数据统计分析过程中剔除了异常值。考虑到数据分布的不均匀性,对样点较为集中的区域,只保留最新的研究数据,以提高分析结果的准确性。在数据统计方面,既统计了各个地区多个点位土壤重金属含量的平均值,也统计了区域的最大值和最小值,但以平均值评价各地区设施农田重金属污染水平可能存在一定偏差。

表 5 设施农田不同土层各重金属含量的分布

Table 5 Distribution of heavy metals in different greenhouse soil layers

区域	土层深度/ cm	$w/(mg \cdot kg^{-1})$			
		Cd	As	Cr	Pb
南部地区	0~20	1.34	8.00	80.50	17.25
	>20~40	0.76	5.25	47.50	16.25
	>40~60	0.57	4.50	40.25	14.50
	>60~80	0.35	1.75	30.00	11.00
北部地区	0~20	0.56	8.27	37.23	18.48
	>20~40	0.12	7.85	33.63	16.98
	>40~60	0.08	9.08	35.99	17.12
西北部地区	0~20	0.36	22.82	71.16	35.21
	>20~40	0.24	16.72	70.07	33.56

### 3.2 我国设施农田重金属污染空间分布特征

从收集到的数据可看出,我国设施农田土壤重金属含量呈现一定的空间分布特征,南部地区土壤 Cd、Pb 和 Hg 平均含量最高,北部地区 As、Cu、Zn 和 Cr 平均含量最高,而西北部地区 Ni 平均含量则最高。地累积指数表明南部地区土壤 Cd 和 Hg 为中度污染和轻度污染,北部地区土壤 Cd、Hg 均为轻度污染,而西北部地区土壤 Hg 为中度污染,其余元素的平均地累积指数均显示无污染;此污染趋势与不同地区设施农田土壤重金属含量水平所显示的结果基本一致,曾希柏等<sup>[9]</sup>对我国菜地重金属的研究也表明 Cd、Hg 污染较严重。设施农田土壤 Cu、Zn 和 Pb 含量与种植年限呈显著正相关关系<sup>[39]</sup>,但是不同重金属元素累积速率有所差异,其中 Cu 和 Zn 累积速率最快,Cr、Pb 次之,而 Cd 累积速率最慢,这与贾月慧等<sup>[33]</sup>对北京郊区设施菜地的研究结果一致。随土层深度的增加,各地区土壤重金属含量整体呈下降趋势,但南部地区几种重金属含量随土层

加深而下降的趋势大于北部、西北部地区(表 5)。李树辉<sup>[5]</sup>对山东寿光的研究表明,不同土层中重金属 As、Cd、Cu、Zn、Cr 和 Ni 含量随种植年限的延长均有不同程度的增加,侯鹏程<sup>[19]</sup>对上海松江地区的研究也得出类似结论。由此可见,重金属在设施农田中均存在累积特性,且存在由表层向下迁移的趋势。已有研究表明土壤 pH 值降低,重金属溶解度则显著升高<sup>[40]</sup>,因此,随灌溉水向下迁移的淋溶趋势也就越大<sup>[34]</sup>。同时,施用有机肥也可导致重金属活性增强而加速重金属的迁移<sup>[41]</sup>。此外,干湿交替、淹水和温度升高也可导致重金属随溶解性有机质(DOM)的淋滤作用增强<sup>[42]</sup>。由此可见,土壤酸化、高温环境、频繁灌溉以及土壤有机质累积等因素均可导致设施菜地土壤重金属向下层迁移。

### 3.3 关于我国设施农田土壤重金属污染来源的探讨

研究表明设施农田土壤重金属含量与肥料的施用有密切关系<sup>[7,9,22]</sup>。薛延丰等<sup>[13]</sup>对江苏沿海地区的研究认为 Cd、Cu 和 Zn 与有机质、速效氮和速效磷可能具有相似的来源。李树辉<sup>[5]</sup>对吉林四平、甘肃武威的研究表明有机肥和化肥的施用可能是导致设施农田土壤 Cd、Zn、Cr、Cu 和 Pb 等累积的重要原因,但氮肥和钾肥对土壤重金属累积的影响较小<sup>[43]</sup>。任顺荣等<sup>[44]</sup>通过定位试验发现长期施用尿素未显著提高土壤 Cd、Cr、As 和 Hg 含量,氮磷钾肥料配施和氮磷肥料配施两种处理之间土壤 Cr、Hg 和 As 含量不存在显著差异,但磷肥能够显著增加土壤 Cd 含量<sup>[45]</sup>。由此可见,施用磷肥可能是土壤 Cd 累积的主要来源。有机肥中重金属含量远高于化肥<sup>[44]</sup>,而不同种类有机肥中重金属含量也有所差异,以畜禽粪便为主要原料的商品有机肥中 Cu、Zn 含量高于以造纸废弃物、腐植酸和作物秸秆等为原料的商品有机肥<sup>[46]</sup>。王美等<sup>[43]</sup>报道施用有机肥的土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量比不施用有机肥的土壤增加 0.08~13.98、0~26.5、1.63~5.31 和 0~0.34  $mg \cdot kg^{-1}$ 。畜禽粪便已经成为最主要的基肥之一,农户为追求高产会施入大量有机肥<sup>[7,13,32]</sup>,加之,设施农田复种指数高,导致肥料投入量更大<sup>[47]</sup>。由此可见,施用有机肥能加大土壤污染风险,造成土壤重金属,尤其是 Cu、Zn 的累积,这可能是我国设施农田土壤重金属的最主要来源。尤其是北部地区的山东、河北等省是我国设施农田比较发达的地区,设施大棚集约化程度高,种植年限长,农业投入品总量大,导致土壤中 As、Cu、Zn 和 Cr 含量较高。

除肥料外,工业三废的排放依旧是我国农田土壤重要的污染源<sup>[48]</sup>。曾希柏等<sup>[9]</sup>认为污泥/垃圾等

固体废弃物的农业利用,是我国菜地土壤重金属含量增高的一个重要原因。于彩莲等<sup>[28]</sup>对哈尔滨蔬菜大棚的研究表明 Cd 超标严重可能与采样地长期污灌历史有关。我国南部地区以及北部地区的辽宁、吉林等省经济相对发达,采矿、冶炼和造纸等工业排放,以及历史污灌等都造成农田重金属污染<sup>[49]</sup>,部分农田改为设施农田后,土壤重金属污染仍存在。张小敏等<sup>[1]</sup>对我国农田土壤重金属分布特征的研究表明,南方地区由于工业活动和矿区开采,导致土壤 Cd 累积明显强于北方地区。另外,Pb 的工业污染源主要来自大气沉降,肥料中 Pb 含量较低,设施菜地长期处于覆膜状态,大气沉降对其影响相对较小<sup>[50]</sup>。

此外,含有 Cd、Pb 等重金属元素的农药、薄膜等其他农业生产投入品也会造成设施农田土壤重金属累积<sup>[9]</sup>。茹淑华等<sup>[32]</sup>对河北省设施菜地的研究发现,由于老棉田、经济作物田多年使用 Hg、铜制剂和砷制剂等含重金属的农药,改造为设施农田后依然残留大量重金属污染物。此外,我国不同地区土壤的元素背景值不同,也是影响设施农田重金属污染分布特征的重要因素,如西部高原地区西藏和青海等土壤背景值普遍较高,可能是导致西北部地区设施农田土壤 Ni 含量高于南部、北部地区的重要原因<sup>[36]330-386</sup>。

#### 4 结论

通过对国内外关于我国设施农田重金属研究文献的分析统计,发现我国设施农田重金属呈现一定的空间分布特征,主要表现在以下方面:南部、北部和西北部 3 大地区设施农田土壤重金属含量及其分布规律各异,其中,Cd、Pb 和 Hg 含量以南部地区为最高,与我国南部地区工业活动频繁且受到农业投入品的影响有关;而 As、Cu、Zn 和 Cr 含量则以北部地区为最高,除受到工业活动的影响外,近年来北部地区设施农业发展迅速,肥料(尤其是有有机肥)施用量较大,可能也是造成这一现象的原因;Ni 含量以西北部地区为最高,主要是由于西北部地区 Ni 的土壤背景值较高。我国设施农田土壤重金属含量随种植年限的延长而呈现不同程度的增加,表明重金属在设施农田中有明显累积,3 大地区均以 Cu、Zn 的累积速率最快。设施农田重金属含量呈现随土层加深而下降的趋势。

#### 参考文献:

[1] 张小敏,张秀英,钟大洋,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. [ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 692-703.]

- [2] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等.中国农田重金属问题的若干思考[J].土壤学报,2013,50(1):186-194. [ZENG Xi-bai, XU Jian-ming, HUANG Qiao-yun, et al. Some Deliberations on the Issues of Heavy Metals in Farmlands of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 186-194.]
- [3] 张震,刘学瑜.我国设施农业发展现状与对策[J].农业经济问题,2015,36(5):64-70,111. [ZHANG Zhen, LIU Xue-yu. The Progress and Countermeasure of Facility Agriculture Development in Our Country [J]. Issues in Agricultural Economy, 2015, 36(5): 64-70, 111.]
- [4] 北京市统计局.北京统计年鉴[M/OL].北京:中国统计出版社,2016:10-18. [2017-10-04]. <http://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2016-tjnj/zk/indexch.htm>. [Beijing Statistical Bureau. Beijing Statistical Yearbook [M/OL]. Beijing: China Statistics Press, 2016: 10-18. [2017-10-04]. <http://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2016-tjnj/zk/indexch.htm>.]
- [5] 李树辉.北方设施菜地重金属的累积特征及防控对策研究[D].北京:中国农业科学院,2011. [LI Shu-hui. Characteristics of Heavy Metals Accumulation and Regulation Strategies in Soils of Protected Vegetables Cultivation in Northern China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.]
- [6] LIU Y, HUA J, JIANG Y, et al. Nematode Communities in Greenhouse Soil of Different Ages From Shenyang Suburb [J]. Helminthologia, 2006, 43(1): 51-55.
- [7] 白玲玉,曾希柏,李莲芳,等.不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J].中国农业科学,2010,43(1):96-104. [BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of Land Use on Heavy Metal Accumulation in Soil and Source Analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(1): 96-104.]
- [8] 黄霞,李廷轩,余海英.典型设施栽培土壤重金属含量变化及其风险评价[J].植物营养与肥料学报,2010,16(4):833-839. [HUANG Xia, LI Ting-xuan, YU Hai-ying. Risk Assessment of Heavy Metal in Typical Greenhouse Soils [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 833-839.]
- [9] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣.中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J].中国农业科学,2007,40(11):2507-2517. [ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, MEI Xu-rong. Heavy Metal Concentration in Soils of Vegetable-Growing Lands in China and Source Analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2507-2517.]
- [10] 张慧智,李红.通州区设施菜地土壤重金属积累特征研究[J].天津农林科技,2015(增刊1):4-6,56.
- [11] 黄宝同,徐永刚,宇万太,等.不同轮作模式下设施菜地土壤和蔬菜中砷汞镉铬铅的分布特征[J].中国科学院研究生院学报,2012,29(2):212-219. [HUANG Bao-tong, XU Yong-gang, YU Wan-tai, et al. Distribution Characteristics of As, Hg, Cd and Pb in Soil and Vegetable in Protected Vegetable Field Under Different Rotation Modes [J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 29(2): 212-219.]

- [12] 张琳, 谭雾淞, 杜蒙, 等. 瓦房店市设施大棚用地土壤重金属累积评价[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 13-19. [ZHANG Lin, TAN Wu-song, DU Meng, *et al.* Soil Heavy Metal Accumulation Assessment of Greenhouses in Wafangdian City[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 38(2): 13-19.]
- [13] 薛延丰, 石志琦. 不同种植年限设施地土壤养分和重金属含量的变化特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 125-130. [XUE Yan-feng, SHI Zhi-qi. Characteristics of Soil Nutrient and Heavy Metal Content With the Different Years of Cultivation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 125-130.]
- [14] 方勇. 不同棚龄土壤重金属含量变化及污染评价[J]. 湖南农业科学, 2012(1): 58-61. [FANG Yong. Content Change and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Different Age of Greenhouse Soils[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012(1): 58-61.]
- [15] 楚纯洁, 王章涵, 周金凤, 等. 设施菜地和露天菜地的土壤重金属含量及累积特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 125-132. [CHU Chun-jie, WANG Zhang-han, ZHOU Jin-feng, *et al.* Contents and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Open and Protected Vegetable Soils[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 125-132.]
- [16] 孔晓乐, 吴重阳, 曹靖, 等. 干旱地区设施土壤和蔬菜重金属含量及人体健康风险: 以白银市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 92-97. [KONG Xiao-le, WU Chong-yang, CAO Jing, *et al.* A Survey of Heavy Metal Concentrations in Soils and Vegetables in Baiyin Green-House Production and Their Health Risk[J]. Journal of Arid Land Resource and Environment, 2014, 28(1): 92-97.]
- [17] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1498-1506. [YAO Rong-jiang, YANG Jin-song, XIE Wen-ping, *et al.* Accumulation and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Greenhouse Soils From Coastal Area of Jiangsu Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(8): 1498-1506.]
- [18] 张润花, 李志国, 刘旭东, 等. 露地栽培向设施栽培转变对菜田土壤重金属含量及形态的影响[J]. 植物科学学报, 2016, 34(4): 575-582. [ZHANG Run-hua, LI Zhi-guo, LIU Xu-dong, *et al.* Impact of Cultivation Change From Open Field to Green-House on Heavy Metal Contents and Fractions of Soil[J]. Plant Science Journal, 2016, 34(4): 575-582.]
- [19] 侯鹏程. 上海松江“浦南”地区设施菜地土壤重金属含量及其风险评价[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(6): 1609-1614. [HOU Peng-cheng. Heavy Metal Accumulation and Its Risk Assessment in Greenhouse Soils in Punan, Shanghai[J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 2014, 26(6): 1609-1614.]
- [20] 禹红红, 胡学玉. 武汉市郊区设施蔬菜地土壤重金属含量及其生态风险[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 582-585. [YU Hong-hong, HU Xue-yu. Contents of Heavy Metals in Greenhouse Soil Around Wuhan Suburb and Their Potential Ecological Risk[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2012, 18(4): 582-585.]
- [21] 陈永, 黄标, 胡文友, 等. 设施蔬菜生产系统重金属累积特征及生态效应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 693-702. [CHEN Yong, HUNAG Biao, HU Wen-you, *et al.* Heavy Metals Accumulation in Greenhouse Vegetable Production System and Its Ecological Effects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4): 693-702.]
- [22] 段小蕙, 史静, 张乃明, 等. 设施土壤重金属污染物累积的影响因素分析[J]. 土壤, 2008, 40(3): 469-473. [DUAN Yong-hui, SHI Jing, ZHANG Nai-ming, *et al.* Accumulation of Heavy Metals and Its Influential Factors in Greenhouse Soils[J]. Soils, 2008, 40(3): 469-473.]
- [23] 孙小凤, 代辛, 韩燕, 等. 西宁市设施基地蔬菜重金属污染特征及评价[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 91-95, 106. [SUN Xiao-feng, DAI Xin, HAN Yan, *et al.* Pollution Characteristics and Assessment of Vegetables Fields Polluted by Heavy Metal in Xining[J]. Journal of Qinghai University (Natural Science Edition), 2016, 34(2): 91-95, 106.]
- [24] 章圣强. 沿黄灌区设施蔬菜土壤养分状况及重金属含量与评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. [ZHANG Sheng-qiang. Nutrient Status, Heavy Metal Concentrate and Its Assessment in Greenhouse Soils in Yellow River Irrigation Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.]
- [25] 湛润生. 阳高县设施栽培土壤汞、铅、锌、镍污染综合评价[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2013, 29(3): 54-56. [ZHAN Run-sheng. Comprehensive Evaluation of Hg, Pb, Zn, Ni Pollution in Protected Cultivation Soil in Yanggao County[J]. Journal of Shanxi Datong University (Nature Science Edition), 2013, 29(3): 54-56.]
- [26] 贺婧, 钟艳霞. 银川市不同耕种年限设施蔬菜土壤重金属含量变化研究[J]. 北京农业, 2011(10): 136-137. [HE Jing, ZHONG Yan-xia. Variation of Heavy Metal of Different Planting Age Greenhouse Vegetables Soil in Xingqing Area of Yinchuan[J]. Beijing Agriculture, 2011(10): 136-137.]
- [27] 史静, 张乃明. 云南设施土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2010, 25(6): 862-867. [SHI Jing, ZHANG Nai-ming. The Distributing Character of Heavy Metals and Its Pollution Estimate in Greenhouse Soils of Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Nature Science), 2010, 25(6): 862-867.]
- [28] 于彩莲, 李文霞, 杨莹, 等. 哈尔滨市蔬菜大棚土壤重金属污染评价[J]. 北方园艺, 2010(18): 61-63. [YU Cai-lian, LI Wen-xia, YANG Ying, *et al.* Evaluation on Pollution of Heavy Metal Concentrations in Vegetable Greenhouse Soils in Harbin City[J]. Northern Horticulture, 2010(18): 61-63.]
- [29] 唐希望, 同延安, 吉普辉, 等. 关中地区日光温室重金属污染及其田块尺度下的特征[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 272-278, 287. [TANG Xi-wang, TONG Yan-an, JI Pu-hui, *et al.* Assessment of Greenhouse Heavy Metal Pollution in Guanzhong Area and Analysis of Its Spatial Distribution on Field Scale Using Geo-Statistical Software[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 272-278, 287.]
- [30] 旦增, 洛桑, 李承鼎, 等. 拉萨市区大棚蔬菜重金属污染现状分析及评价[J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2011, 26(1): 31-

- 35, 45. [DAN Zeng, LUO Sang, LI Cheng-ding, *et al.* Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution Status of Green House Vegetables in Lhasa Region [J]. *Journal of Tibet University*, 2011, 26 (1): 31-35, 45.]
- [31] 高砚芳, 段增强, 郇恒福. 太湖地区温室土壤重金属污染状况调查及评价[J]. *土壤*, 2007, 39(6): 910-914. [GAO Yan-fang, DAUN Zeng-qiang, HUAN Heng-fu. Investigation and Evaluation of Heavy Metal Contamination of Greenhouse Soils in Tai Lake Region [J]. *Soils*, 2007, 39(6): 910-914.]
- [32] 茹淑华, 耿暖, 张国印, 等. 河北省典型蔬菜产区土壤和蔬菜中重金属累积特征研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1407-1411. [RU Shu-hua, GENG Nuan, ZHANG Guo-yin, *et al.* Heavy Metals Accumulation in Soil and Vegetable Collected From Typical Vegetable Production Areas in Hebei Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1407-1411.]
- [33] 贾月慧, 郭家选, 刘杰, 等. 北京郊区设施菜地剖面中重金属的分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(3): 282-288. [JIA Yue-hui, GUO Jia-xuan, LIU Jie, *et al.* Vertical Distribution of Heavy Metals in Soil of Facility Vegetable Fields From Beijing Suburbs, China [J]. *Journal of Agriculture Resources and Environment*, 2015, 32(3): 282-288.]
- [34] 薄润香, 樊文华, 王宏燕, 等. 太原市 5 个无公害蔬菜基地温室土壤重金属含量的研究[J]. *山西农业科学*, 2008, 36(9): 43-46. [BO Run-xiang, FAN Wen-hua, WANG Hong-yan, *et al.* Study on Greenhouses Soil Heavy Metals in Five Pollution Free Vegetable Bases in Taiyuan [J]. *Journal of Shanxi Agriculture Sciences*, 2008, 36(9): 43-46.]
- [35] MULLER G. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River [J]. *GeoJournal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [36] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [37] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. *环境化学*, 2015, 34(2): 225-233. [WANG Fei, HUANG Yi-zong, WANG Xiao-ling, *et al.* Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surrounding Soils of Tungsten Ores: Comparison of Different Evaluation Methods [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(2): 225-233.]
- [38] 徐茂, 邓蓉. 国内外设施农业发展的比较[J]. *北京农学院学报*, 2014, 29(2): 74-78. [XU Mao, DENG Rong. A Comparative Research on the Facility Agriculture Development at Home and Broad [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2014, 29(2): 74-78.]
- [39] 李见云, 侯彦林, 化全县, 等. 大棚设施土壤养分和重金属状况研究[J]. *土壤*, 2005, 37(6): 626-629. [LI Jian-yun, HOU Yan-lin, HUA Quan-xian, *et al.* Study on Soil Nutrient and Heavy Metal Concentrations in Greenhouse Soils [J]. *Soils*, 2005, 37(6): 626-629.]
- [40] GERRITSE R G. Column- and Catchment-Scale Transport of Cadmium; Effect of Dissolved Organic Matter [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1996, 22(3/4): 145-163.
- [41] KALBITZ K, WENNRICH R. Mobilization of Heavy Metals and Arsenic in Polluted Wetland Soils and Its Dependence on Dissolved Organic Matter [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, 209 (1): 27-39.
- [42] MERCKX R, BRANS K, SMOLDERS E. Decomposition of Dissolved Organic Carbon After Soil Drying and Rewetting as an Indicator of Metal Toxicity in Soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 235-240.
- [43] 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]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 466-480. [WANG Mei, LI Shu-tian. 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.]
- [44] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 9(4): 96-99. [REN Shun-rong, SHAO Yu-cui, GAO Bao-yan. Effects of Long-Term Located Fertilization on Heavy-Metal Content of Soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 9(4): 96-99.]
- [45] 马榕. 重视磷肥中重金属镉的危害[J]. *磷肥与复肥*, 2002, 17(6): 5-6. [MA Rong. Pay Attention to the Hazardous Cadmium in Phosphate Fertilizer [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2002, 17(6): 5-6.]
- [46] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 392-397. [LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, *et al.* Content of Heavy Metals in Commercial Organic Fertilizer and Organic Wastes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392-397.]
- [47] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 不同栽培方式菜田耕层土壤重金属状况[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 707-718. [HUANG Shao-wen, TANG Ji-wei, LI Chun-hua, *et al.* Status of Heavy Metals in Vegetable Soils Under Different Patterns of Land Use [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 707-718.]
- [48] NRIAGU J O, PACYNA J M. Quantitative Assessment of Worldwide Contamination of Air, Water and Soils by Trace Metals [J]. *Nature*, 1988, 333(6169): 134-139.
- [49] 崔力拓, 耿世刚, 李志伟. 我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J]. *现代农业科技*, 2006(11): 184-185.
- [50] 刘小诗, 李莲芳, 曾希柏, 等. 典型农业土壤重金属的累积特征与源解析[J]. *核农学报*, 2014(7): 1288-1297. [LIU Xiao-shi, LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, *et al.* Characterization of Heavy Metal Accumulation in Typical Agriculture Soils and Its Source Analysis [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014(7): 1288-1297.]

作者简介: 孟敏(1992—), 女, 甘肃金昌人, 博士生, 研究方向为污染土壤修复。E-mail: mengm.15s@igsrr.ac.cn

(责任编辑: 李祥敏)