

我国东部地区农田土壤重金属污染概况

邹萌萌¹, 周卫红^{1,2}, 张静静¹, 刘影¹, 杜小龙¹, 李建龙^{1*}

(1.南京大学生命科学学院, 南京 210093; 2.江苏科技大学苏州理学院, 江苏 张家港 215600)

摘要:随着经济和社会的高速发展,农田土壤重金属污染对粮食安全及人类的身体健康构成巨大威胁。为了解我国东部地区农田土壤重金属的污染现状,基于东部地区农田土壤重金属污染数据,采用半方差函数分析及克里金(Kriging)插值手段,通过内美罗(Nemerow)综合污染指数和地累积指数等土壤重金属评价方法,对我国东部地区农田土壤重金属砷(As)、铬(Cr)、镉(Cd)、汞(Hg)及铅(Pb)的污染概况进行综合分析。结果表明东部地区重金属Hg污染最为严重,均值为中国土壤Hg元素背景值的2.8倍,近30%东部地区处于Hg中度污染水平;其次为Cd,均值为背景值的2倍,50%以上东部地区处于Cd污染警戒线,半方差分析结果显示Cd污染受人类活动影响最强;广东省农田土壤重金属综合污染最为严重,内美罗综合污染指数高达0.854,克里金插值结果显示As、Cd、Hg及Pb的高值区域均在广东省有所分布。

关键词:土壤重金属;农田;中国东部;空间变异;重金属污染评价

doi:10.13304/j.nykjdb.2018.0064

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:1008-0864(2019)01-0117-08

Heavy Metal Pollution of Cultivated Soil in Eastern China

ZOU Mengmeng¹, ZHOU Weihong^{1,2}, ZHANG Jingjing¹, LIU Ying¹,
DU Xiaolong¹, LI Jianlong^{1*}

(1.School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093; 2.Suzhou Institute of Technology,
Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: With the rapid development of economy and society, heavy metal contamination of cultivated soil has seriously influenced food security and human health. Based on the data of heavy metal in cultivated soil in eastern China collected from documents, the degree of heavy metal pollution of cultivated land in eastern area was evaluated, by means of semi-variogram analysis, Kriging interpolation, single factor pollution index, Nemerow comprehensive pollution index, and geoaccumulation index. The conclusions showed as follows: the pollution of Pb was the most serious one; the mean value of Hg was 2.8 times higher than background value of element Hg in Chinese soil. Almost 30% of eastern area was under the middle pollution level. The pollution of Cd was the second serious one, and results of semi-variogram analysis indicated Cd was the most influenced by human activities. In addition, the mean value of Cd was 2 times higher than the background value of Cd in Chinese soil. Over 50% of eastern area was under the firing line of Cd pollution. Cultivated soil in Guangdong province may be the key region of heavy metal integrated pollution because Nemerow comprehensive pollution index in Guangdong was the highest (0.854) and Kriging interpolation revealed high value area of As, Cd, Hg, Pb distributed in Guangdong province.

Key words: heavy metal of soil; cultivated land; eastern China; spatial variation; evaluation of heavy metal pollution

随着中国工业化、城市化进程的快速推进,土壤重金属污染问题日益突出。农田土壤作为农业生产的重要资源,重金属一旦进入土壤会影响作

物产量和质量,进而通过食物链富集对人体健康产生直接或间接危害^[1,2]。据农业部调查,我国每年因重金属污染减产和受重金属污染的粮食分

收稿日期:2018-01-29; 接受日期:2018-05-24

基金项目:国家重点研发研究项目(2018YFD080020D);江苏省农业三新工程项目(SXGC[2014]287);苏州市科技计划项目(SNG201447)资助。

作者简介:邹萌萌,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染监测、治理和修复。E-mail:15764210152@163.com。*通信作者:李建龙,教授,博士生导师,研究方向为土壤重金属污染监测、治理和修复。E-mail:jlli2008@nju.edu.cn

别为 1 000 万 t 和 1 200 万 t, 合计造成的经济损失高达 200 亿元。近年来, 为确保我国粮食安全, 农田土壤重金属污染问题已受到社会广泛关注。

东部地区包括 3 个直辖市(北京、天津和上海)和 7 个省份(河北、山东、江苏、浙江、广东、福建和海南), 农业产值 19 108.2 亿元, 耕地面积 2 621.41 万 hm^2 , 粮食产量 14 949.6 万 t, 经济总量占全国的 50% 以上, 是我国城市化程度先锋和经济最发达的区域^[3,4], 然而其农田土壤正承受巨大的重金属污染负荷。安玉琴等^[5]发现河北省部分农田土壤已受到镉污染; 李瑞平等^[6]研究了山东省泰安市农田土壤铜(Cu)、镉(Cd)、锌(Zn)、镍(Ni)、铅(Pb)和铬(Cr)含量, 发现除 Pb 外均已超过当地背景值; 陈京都等^[7]研究发现 Cd 为江苏省典型地震带农田土壤重金属污染的主要因子; 杨国义等^[8]研究指出广东典型区域农业土壤重金属污染的主要原因为成土母质和不同流域水质差异。从研究尺度看, 多针对县级和省级尺度, 由于缺乏相关土壤重金属含量信息, 而难以在我国东部大尺度上开展土壤重金属污染调查与评价, 这使得我们无法全面了解我国东部整体农田土壤重金属的污染状况。河北省、山东省及江苏省作为我国重要的粮食生产地, 广东省、山东省、江苏省及浙江省作为人口大省, 综合考虑, 研究东部地区农田土壤重金属的空间分布特征及污染概况, 对保障全国粮食安全及促进区域土壤、环境相关研究的开展具有重要意义。

内美罗综合污染指数能突出高浓度污染物对

土壤环境质量的影响, 同时反映出各种污染物对土壤质量的作用, 近年来常被用于土壤重金属综合污染评价^[9,10]。地累积指数法考虑到自然成岩作用可能引起背景值变动, 弥补了其他评价方法的不足, 近年来常被国内用于评价土壤重金属的污染程度^[11-13]。鉴于此, 本文对东部地区农田土壤重金属含量数据进行统计, 利用半方差函数和克里金插值获得东部农田土壤砷(As)、铬(Cr)、镉(Cd)、汞(Hg)、铅(Pb)5 种重金属的空间变异及分布特征, 并采用内美罗综合污染指数及地累积指数对东部地区农田土壤重金属污染进行综合评价, 以期改善东部地区农田土壤生态环境及加强食品安全保障提供参考依据。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据收集和整理

基于 2007-2017 年公开发表的文献, 对我国东部地区农田土壤重金属相关数据进行收集和统计(表 1), 并构建在一定程度上能反映东部地区农田土壤重金属污染情况的数据库。文献和数据的选择原则: ①调查区域以地级行政市为单位, 兼顾县级单位; ②采集土壤为 0~20 cm 耕作层土壤, 采集样点较多; ③避开金属矿区及污灌区等特殊采样区案例; ④将每个案例中重金属的平均值作为该点位的值。数据整理后剔除异常值, 选用三倍标准差法: 平均值 ± 3 标准差。

表 1 收集的东部地区农田土壤重金属样本数量

Table 1 Amount of collected cultivated soil heavy metal samples in eastern area.

金属 Metal	北京 Beijing	天津 Tianjin	上海 Shanghai	河北 Hebei	山东 Shandong	江苏 Jiangsu	浙江 Zhejiang	福建 Fujian	广东 Guangdong	海南 Hainan	总计 Total
As	5	1	5	12	11	16	15	6	8	5	84
Cd	5	2	6	13	13	17	20	18	14	6	114
Cr	6	2	6	12	15	17	16	5	12	6	97
Hg	4	1	5	7	11	15	9	16	9	5	82
Pb	4	2	5	9	14	17	14	18	15	5	103
总计 Total	24	8	27	53	64	82	74	63	58	27	480

1.2 研究方法

1.2.1 地统计方法 半方差函数是基于区域化变量满足二阶平稳和本征假设的前提下, 描述土

壤空间异质性的一个重要函数。Matheron^[14]将其定义为随机函数 $Z(X)$ 的增量 $[Z(X+h) - Z(X)]$ 方差的 1/2, 公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(X) - Z(X+h)]^2 \quad (1)$$

其中, $\gamma(h)$ 为变异函数值, $Z(X)$ 为在空间位置 X 处土壤中重金属含量值, $Z(X+h)$ 为在空间位置 $(X+h)$ 处土壤重金属含量值, $E[Z(X) - Z(X+h)]^2$ 表示间隔为 h 时, 土壤重金属含量变化值方差的数学期望^[15], 常用的半方差理论模型有球形模型、高斯模型和指数模型。

克里金 (Kriging) 插值是在区域化变量的原始数据和半变异函数的基础上, 对未采样点的区域化变量进行线性最优无偏估计^[16]。根据半方差模型参数进行克里金插值, 得到土壤重金属的空间分布图。

1.2.2 土壤重金属污染评价方法 ①内美罗综合污染指数。内美罗综合污染指数是美国学者 Nemerow^[17] 对河流进行污染分析时提出的, 本文以省为评价单元, 在单因子污染指数评价的结果上(公式 2), 通过内美罗综合污染指数(公式 3), 对各省农田土壤重金属综合污染进行定量评价。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中, P_i 为单项污染指数; C_i 为调查元素的实测浓度; S_i 为调查元素的评价标准值; 本文选取《土壤环境质量标准》GB15618-1995 中二级标准值作为 S_i (表 2)。

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{P_i^2 + P_{i_{\text{max}}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 为内美罗综合污染指数, \bar{P}_i 为各单一元素的单项污染指数的平均值, $P_{i_{\text{max}}}$ 为各单一元素单项污染指数的最大值。

根据评价指数的大小, 将土壤重金属污染程度划分为五类(表 3)。

表 2 土壤环境二级标准^[18]

Table 2 Secondary criteria of soil environment^[18].

重金属 Heavy metal	pH		
	<6.5	6.5~7.5	>7.5
As ≤	40	30	25
Cr ≤	150	200	250
Cd ≤	0.30	0.30	0.60
Hg ≤	0.30	0.50	1.0
Pb ≤	250	300	350

表 3 土壤重金属污染分级标准

Table 3 Criteria for classification of soil heavy metal pollution.

级别 Degree	评价指数 Evaluation index	污染等级 Pollution level
I	$P_{\text{综合}} \leq 0.7$	未污染 No pollution
II	$0.7 < P_{\text{综合}} \leq 1.0$	轻度污染 Mild pollution
III	$1.0 < P_{\text{综合}} \leq 2.0$	中度污染 Moderate pollution
IV	$2.0 < P_{\text{综合}} \leq 3.0$	重度污染 Intensive pollution
V	$3.0 < P_{\text{综合}} \leq 4.0$	严重污染 Serious pollution

②地累积指数。地累积指数法由 Muller^[19] 于 1969 年提出, 主要用于沉积物中重金属污染程度的评价。计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \text{Log}_2 \frac{C_i}{1.5 B_i}$$

式中, C_i 为重金属元素 i 的实测浓度, B_i 为评价重金属元素的地球化学背景值, 本文选取中国土壤元素背景值。

地累积指数分为 7 个等级(表 4)。

1.3 数据处理

采用 Microsoft excel 2013 和 SPSS 20.0 对重金属含量数据进行描述统计, 用 K-S 检验数据是否符合正态分布; 用 GS+10.0 半方差函数分析, 获得最适半方差模型及拟合参数; ArcGIS 10.2 进行克里金插值分析, 获得重金属含量空间分布图。

2 结果与分析

2.1 农田土壤重金属含量

农田土壤重金属含量统计结果(表 5)显示, As、Cd、Cr、Hg 及 Pb 平均含量分别为 9.257 mg/kg、0.196 mg/kg、57.956 mg/kg、0.181 mg/kg 和 35.655 mg/kg, 其中 Cd、Hg 和 Pb 累积较为严重, 均值分别为中国土壤背景值的 2 倍、2.8 倍和 1.4 倍。

变异系数(coefficient of variation, CV)为标准差与均值的比值, 可以用来表征数据的离散程度, 比较不同量纲的数据。按照 Zhang 等^[20] 对变异系数的分类, $CV < 0.1$ 时为弱变异, $0.1 < CV < 0.9$ 时为中等程度变异, $CV > 0.9$ 时为高程度变异。由

表 4 地累积指数分级标准

Table 4 Criteria for classification of geoaccumulation index for heavy metal.

级别 Degree	地累积指数 I_{geo} Geoaccumulation index	污染程度 Pollution degree
I	≤ 0	无污染 No pollution
II	$0 < I_{geo} \leq 1$	无污染到中度污染 No pollution to moderate pollution
III	$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染 Moderate pollution
IV	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度污染到强度污染 Moderate pollution to intensity pollution
V	$3 < I_{geo} \leq 4$	强度污染 Intensive pollution
VI	$4 < I_{geo} \leq 5$	强度污染到极强污染 Intensive pollution to extreme pollution
VI	$5 < I_{geo}$	极强污染 Extreme pollution

表 5 可知,5 种元素在东部农田土壤分布均为中等程度变异,但 Hg 的变异系数高达 0.873,接近高程度变异,说明 Hg 分布不均匀,存在人类活动产生的异常值。

峰度是概率密度分布曲线在均值处峰值高低的特征数,偏度是统计数据分布的偏斜方向和程度的度量,偏度和峰度值接近零表明数据均匀的分布在均值两侧,服从正态分布。由表 5 可知仅有 Cr 的偏度和峰度较接近 0,K-S 检验结果表明 Cr 的数据符合正态分布,As、Cd、Hg 和 Pb 数据服从对数正态分布。

2.2 农田土壤重金属含量的空间变异性特征

块金值(C_0)表示随机部分的空间异质性,通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的差异,较大的 C_0 表明在较小尺度上某种过程不可忽

视。在取样尺度上具有内部变异和抽样分析误差是产生块金效应的主要因素。由表 6 可知,5 种重金属元素的块金值均较小,在 0.045 ~ 0.274 之间。

基台值(Sill C_0+C)表示系统内的总变异,其值越大表明系统内总变异越高。由表 6 可知,Hg 的基台值较大,表明其空间变异较大。块基比(C_0/C_0+C)表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比,根据 Cambardella 等^[21]提出的区域化变量空间相关程度的分级标准:块基比 < 25%,表示强烈的空间自相关性;25% < 块基比 < 75%,表示中等自相关;块基比 > 75%,表示弱自相关。Cd 和 Cr 的块基比小于 25%,有较强的空间自相关性,说明东部农田土壤 Cd 含量受人类活动影响较小,其空间异质性主要由成土母质、土壤

表 5 农田土壤重金属含量统计性描述

Table 5 The statistical description of heavy metal content in cultivated soil.

项目 Item	平均值 (mg/kg) Mean (mg/kg)	最小值 (mg/kg) Minimum (mg/kg)	最大值 (mg/kg) Maximum (mg/kg)	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	变异 系数 C.V	K-S	土壤 背景值 Background value
As	9.257±4.441	2.26	27.09	5.210	1.731	0.480	对数正态 Lognormal ($P=0.056$)	11.2
Cd	0.196±0.131	0.012	0.92	10.849	2.675	0.668	对数正态 Lognormal ($P=0.079$)	0.097
Cr	57.956±18.920	7.17	92.50	0.134	0.417	0.326	正态分布 Normal distribution ($P=0.924$)	61
Hg	0.181±0.158	0.03	0.732	2.805	1.661	0.873	对数正态 Lognormal ($P=0.303$)	0.065
Pb	35.655±18.035	6.74	92.36	0.303	0.998	0.506	对数正态 Lognormal ($P=0.158$)	26

表 6 农田土壤重金属元素半方差函数理论模型及有关参数

Table 6 Theoretical model and corresponding parameters of semivariogram of cultivated soil heavy metal.

项目 Item	理论模型 Model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill C_0+C	块基比 C_0/C_0+C	变程 (km) Range (km)	决定系数 R^2	残差 RSS
As	指数 Exponential	0.094	0.217	43.3%	5.790	0.392	0.016
Cd	球形 Spherical	0.045	0.444	10.4%	2.400	0.355	0.123
Cr	指数 Exponential	0.023	0.175	13.1%	2.940	0.485	0.003
Hg	高斯 Gaussian	0.274	1.059	25.9%	15.590	0.862	0.104
Pb	指数 Exponential	0.152	0.446	34.1%	35.640	0.632	0.025

类型、气候等造成。As、Hg 及 Pb 的块基比介于 25%~75%，空间自相关程度中等，表明其含量主要受人类活动如农药、施肥、污水灌溉等影响。

变程表示空间自相关范围，在变程范围内，距离越近空间自相关程度越高。由表 6 可知，变程

$Pb > Hg > As > Cr > Cd$ ，表明 Pb 的空间分布均一性最强，Cd 的空间分布情况最为复杂多变。

2.3 农田土壤重金属污染空间分布

克里金插值可以更直观地呈现重金属元素的空间分布情况。5种重金属的空间分布(图1)可

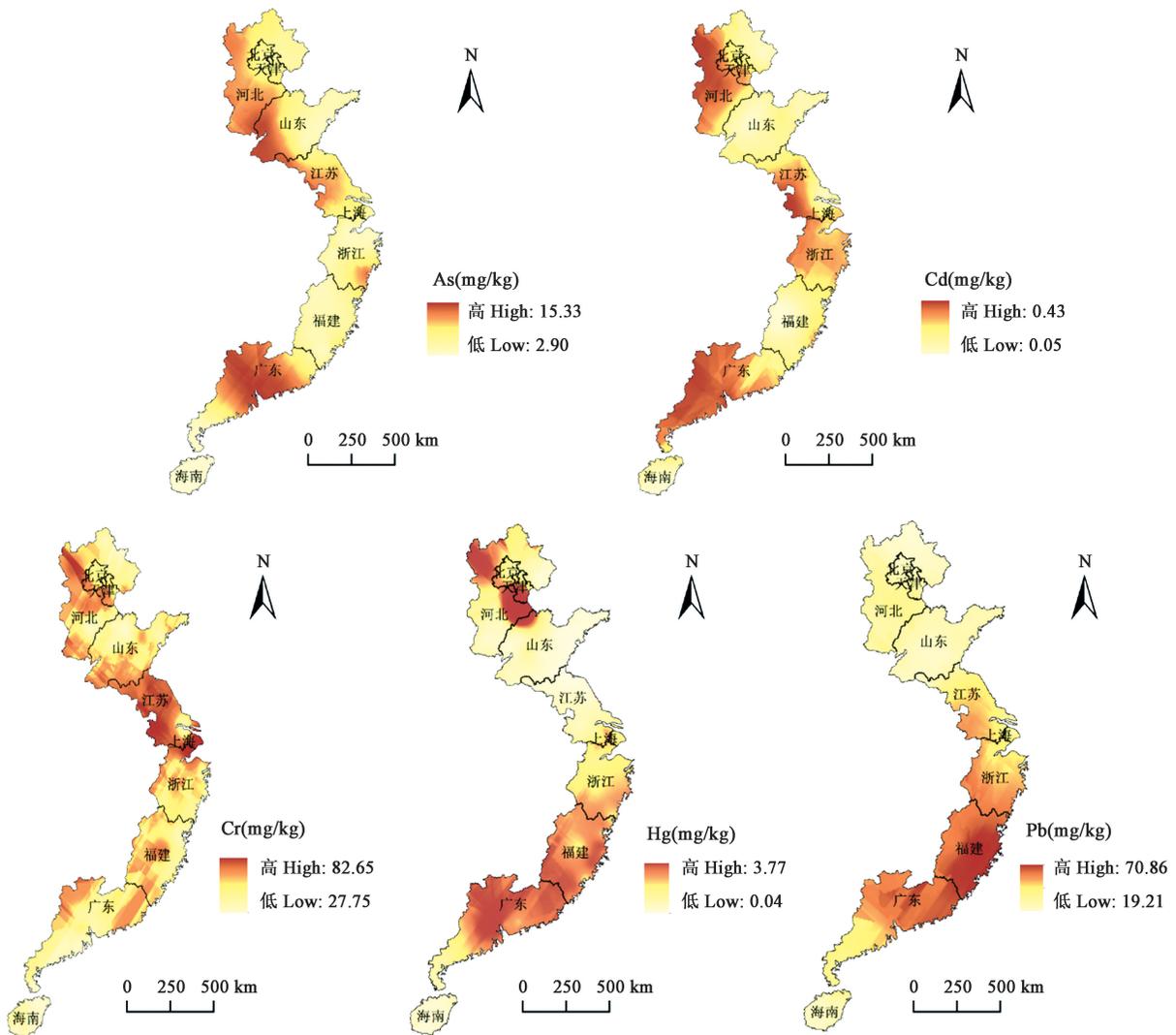


图 1 农田土壤重金属的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of heavy metal concentration in cultivated soil.

知,As 在河北南部、山东西南部及江苏中西部呈现明显连续带状分布,其次广东中部出现 As 的高值区域;Cd 的高值区域主要分布在河北中部、江苏西南部、广东西南部;对于 Cr,其在江苏及上海出现连片高值区域,在其他省份呈现斑块分布;Hg 和 Pb 呈现相似的分布趋势,均在广东东北部及福建出现大面积连片高值区,其次 Hg 还在河北与天津交界处及西北部出现明显累积。

综合来看,广东省农田土壤重金属普遍较高,可能与其发达的电子产业有关。张金莲等^[22]研究表明,简单粗放的电子垃圾回收活动是其周边农田土壤重金属污染的重要来源。其次 As、Cd、Cr 及 Hg 均在河北省出现高值区域,可能与其长期煤炭产业作为支柱产业的经济的发展有关。刘芳

等^[23]研究表明煤炭产业会造成周边土壤重金属明显累积。

2.4 农田土壤重金属污染评价结果

2.4.1 内美罗综合污染指数 应用内美罗综合污染指数评价东部各省农田土壤综合污染情况(表 7)。根据土壤环境质量评价分级标准,东部地区农田污染等级主要为无污染和轻度污染两个等级,不存在中度、重度和严重污染三个等级的农田。广东省和天津市内美罗综合污染指数分别为 0.85、0.75,其农田土壤为轻度污染。通过比较内美罗综合污染指数可得到各省(市)农田土壤污染情况由高到低顺序为:广东省>天津市>河北省>浙江省>江苏省>上海市>福建省>北京市>山东省>海南省。

表 7 内美罗综合污染指数评价结果

Table 7 Evaluation of Nemer comprehensive pollution index.

地区 Region	广东 Guangdong	天津 Tianjin	河北 Hebei	浙江 Zhejiang	江苏 Jiangsu	上海 Shanghai	福建 Fujian	北京 Beijing	山东 Shandong	海南 Hainan
内美罗综合污染指数 Nemer comprehensive pollution index	0.854	0.755	0.579	0.543	0.521	0.499	0.460	0.429	0.331	0.296

2.4.2 地累积指数 对收集的数据进行地累积指数计算,结果见表 7。对计算结果分析可知,As、Cr 元素对东部农田土壤污染贡献较小,分别仅有 3.6%和 2.1%区域为无污染到中度污染水平;Cd 元素近 10%区域为中度污染水平,55%以上区域为无污染到中度污染程度。Hg 元素近 10%区域为中度污染到强度污染水平,近 30%区

域达到中度污染水平,无污染到中度污染状态的区域为 23.4%。Pb 元素近 3%区域达到中度污染,32%区域为无污染到中度污染状态。

综合地累积指数样本分布比例可知,东部地区农田土壤 Hg 污染最严重,其次是 Cd, Pb 为轻度污染水平,As 和 Cr 污染最轻。

表 8 地累积指数级别分布

Table 8 Class distribution of geoaccumulation index for heavy metal.

土壤质量 Soil quality	As	Cd	Cr	Hg	Pb
无污染 No pollution	96.4%	32.6%	97.9%	38.3%	65.1%
无污染到中度污染 No pollution to moderate pollution	3.6%	56.1%	2.1%	23.4%	32.0%
中度污染 Moderate pollution	0%	9.6%	0%	28.4%	2.9%
中度污染到强度污染 Moderate pollution to intensity pollution	0%	1.7%	0%	9.9%	0%

3 讨论

我国东部地区人类活动剧烈,农田土壤面临

巨大的重金属污染挑战。通过系统回顾相关研究文献,辅以地统计学和 GIS 手段,运用内美罗综合污染指数和地累积指数评价方法进行研究,结果表明我国东部地区农田土壤 Hg、Cd 和 Pb 累积

较为严重。自然状态下,土壤中重金属含量主要受成土母质影响,然而随着经济社会不断发展,人类活动已成为土壤中重金属不断累积的主要驱动因素^[24,25]。王贵等^[26]研究发现包头市土壤重金属污染主要集中在工业厂区周边;谢小进等^[27]开展上海市不同工业类型土壤重金属含量差异分析,指出机械制造、化工等企业是土壤 Cr 和 Ni 的主要来源,Pb、Cu 和 Zn 的主要来源则为印刷企业;张彦等^[28]发现尽管停止污灌十余年,沈阳张土灌区农田土壤仍存在 Cd、Zn、Cu 等多种重金属污染。克里金插值结果显示,广东省和河北省形成重金属高聚集区。陈奕云等^[29]基于文献计量评价中国农田土壤重金属污染,发现广东省、广西 Pb、Cd 污染较为严重;张小敏等^[30]研究中国农田土壤重金属富集状况及空间分布时,亦发现人类活动导致广东省出现 Cd 分布高值点。河北省有着丰富的煤炭资源,冀中煤炭基地是我国 14 个亿吨级煤炭基地之一,所受煤化工产业的影响是其土壤重金属污染的主要原因。

土壤重金属污染隐蔽性强且长期存在,通过食物链富集可危害数代人健康,所以人们应采取多种措施,综合防止和治理土壤重金属污染:①对重金属有效态含量进行检测和监测,是确切了解重金属污染程度、预测重金属对生态系统产生影响及对人类健康危害的有效途径;②促进土壤重金属污染修复技术创新。为实现农田土壤的可持续利用,保障人类食品安全,迫切需要经济、高效、可行的土壤重金属修复技术;③修订土壤重金属污染标准。科学、合理的土壤重金属污染标准是评价土壤重金属的污染状况、生态风险及修复效果的基础。目前,我国的土壤环境质量标准已不能满足当前土壤环境管理的要求,亟待出台分区、分类、分级的国家土壤环境质量标准体系。

参 考 文 献

- [1] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J].生态环境学报,2013,22(10):1727-1736. Fan T, Ye W L, Chen H Y, *et al.*. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil [J]. Ecol. Environ. Sci., 2013, 22(10): 1727-1736.
- [2] 周明冬,秦晓辉,候洪,等.农田土壤重金属的危害及防控措施[J].环境与可持续发展,2014,39(2):57-58. Zhou M D, Qin X H, Hou H, *et al.*. Harm of heavy metals in farmland soil and prevention and control measures [J]. Environ. Sustain. Develop., 2014, 39(2): 57-58.
- [3] 刘惠敏.中国经济增长与能源消耗的脱钩——东部地区的时空分异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(12):157-163. Liu H M. Disengagement of China's economic growth and energy consumption: A study of the temporal and spatial variations in the eastern region [J]. China Population Res. Environ., 2016, 26(12): 157-163.
- [4] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [5] 安玉琴,裴秀坤,金红,等.河北省农田土壤重金属污染及健康风险评估[J].中国公共卫生,2016,32(9):1235-1238. An Y Q, Pei X K, Jin Hong, *et al.*. Status and health risk assessment of farmland soil heavy metal contamination in Hebei province [J]. Chin. J. Public Health, 2016, 32(9): 1235-1238.
- [6] 李瑞平,姜咏栋,李光德,等.基于GIS的农田土壤重金属空间分布研究——以山东省泰安市为例[J].山东农业大学学报(自然科学版),2012,43(2):232-238. Li R P, Jiang Y D, Li G D, *et al.*. The spatial distribution of heavy metals in the cropland based on GIS [J]. J. Shandong Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2012, 43(2): 232-238.
- [7] 陈京都,戴其根,许学宏,等.江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J].生态学报,2012,32(11):3487-3496. Chen J D, Dai Q G, Xu X H, *et al.*. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu province [J]. Acta Ecol. Sin., 2012, 32(11): 3487-3496.
- [8] 杨国义,张天彬,万洪富,等.广东省典型区域农业土壤中重金属污染空间差异及原因分析[J].土壤,2007,39(3):387-392. Yang G Y, Zhang T B, Wan H F, *et al.*. Spatial differences and causes of heavy metal pollution in agricultural soils in a typical region of Guangdong province [J]. Soils, 2007, 39(3): 387-392.
- [9] 徐争启,倪师军,张成江,等.应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江沉积物中的重金属[J].四川环境,2004,23(3):64-67. Xu Z Q, Ni S J, Zhang C J, *et al.*. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua area by pollution load index [J]. Sichuan Environ., 2004, 23(3): 64-67.
- [10] 郭朝晖,肖细元,陈同斌,等.湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J].地理学报,2008,63(1):3-11. Guo Z H, Xiao X Y, Chen T B, *et al.*. Heavy metal pollution of farmland soil and vegetables in the middle and lower reaches of Xiangjiang River [J]. Acta Geogr. Sin., 2008, 63(1): 3-11.
- [11] 赵庆令,李清彩,谢江坤,等.应用富集系数法和地累积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评估[J].岩矿测试,2015,34(1):129-137. Zhao Q L, Li Q C, Xie J K, *et al.*. Study on heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of soils in the southern region of Jining using enrichment coefficient

- method and geoaccumulation index method [J]. *Rock Min. Anal.*, 2015, 34(1): 129-137.
- [12] 柴世伟,温琰茂,张亚雷,等.地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(12): 1657-1661.
- Chai S W, Wen Y M, Zhang Y L, *et al.*. Application of index of geoaccumulation (*I_{geo}*) to pollution evaluation of heavy metals in soil [J]. *J. Tongji Univ. (Nat. Sci.)*, 2006, 34(12): 1657-1661.
- [13] 刘衍君,汤庆新,白振华,等.基于地质累积指数与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J].*中国农学通报*, 2009, 25(20): 174-178.
- Liu Y J, Tang Q X, Bai Z H, *et al.*. The research of heavy metals pollution in soil based on the connection of geoaccumulation index and Nemerow index [J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2009, 25(20): 174-178.
- [14] Matheron G. Principles of geostatistics [J]. *Econ. Geol.*, 1963, 58:1246-1266.
- [15] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社, 1999, 35-52.
- [16] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社, 2006, 65-76.
- [17] Nemerow N L. Scientific Stream Pollution Analysis [M]. Scripta Book Co, 1974, 30-31.
- [18] 国家环境保护局,国家技术监督局. GB15618-1995 土壤环境质量标准[M].北京:中国标准出版社,1995.
- [19] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969(108): 108-118.
- [20] Zhang Q L, Shi X Z, Huang B, *et al.*. Characteristics of spatial variability of soil available lead, zinc, copper and cadmium in a vegetable base in the suburbs of Nanjing [J]. *Soils*, 2005, 37(1): 41-47.
- [21] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, *et al.*. Field-scale variability of soil properties in central iowa soil [J]. *Soilence Soc. Am. J.*, 1994, 58(5):1501-1511.
- [22] 张金莲,丁疆峰,卢桂宁,等.广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价[J].*环境科学*, 2015(7): 2633-2640.
- Zhang J L, Ding J F, Lu G N, *et al.*. Heavy metal contamination in farmland soils at an e-waste disassembling site in Qingyuan, Guangdong, South China [J]. *Environ. Sci.*, 2015(7): 2633-2640.
- [23] 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,等.准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征[J].*环境科学*, 2016, 37(12): 4815-4829.
- Liu F, Tashvilati T, Ilias N, *et al.*. Spatial distribution characteristics of heavy metal pollution and health risks in the soil around Huaidong coal industry area [J]. *Environ. Sci.*, 2016, 37(12): 4815-4829.
- [24] 周雯婧,贺惠.我国农田土壤重金属污染来源及特点[J].*科教文汇*, 2013, 240(4): 102-103.
- Zhou W J, He H. Sources and characteristics of heavy metal pollution in farmland soil in China [J]. *Sci. Edu.*, 2013, 240(4): 102-103.
- [25] 曾德慧,姜凤岐.生态系统健康与人类可持续发展[J].*应用生态学报*, 1999, 10(6): 751-756.
- Zeng D H, Jiang F Q. Ecosystem health and sustainable human development [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999, 10(6): 751-756.
- [26] 王贵,王芳.重工业城市土壤重金属含量分布特征及污染评价——以包头市为例[J].*干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 170-173.
- Wang G, Wang F. Heavy metal content distribution and pollution assessment in heavy industry cities: a case study of Baotou city [J]. *J. Arid Land Res. Environ.*, 2008, 22(8): 170-173.
- [27] 谢小进,康建成,李卫江,等.上海市不同工业类型土壤重金属含量差异性分析[J].*生态环境学报*, 2009, 18(5): 1777-1782.
- Xie X J, Kang J C, Li W J, *et al.*. Analysis on the difference of heavy metals in different types of soils in Shanghai [J]. *Ecol. Environ. Sci.*, 2009, 18(5): 1777-1782.
- [28] 张彦,张惠文,苏振成,等.污水灌溉对土壤重金属含量、酶活性和微生物类群分布的影响[J].*安全与环境学报*, 2006, 6(6): 44-50.
- Zhang Y, Zhang H W, Su Z C, *et al.*. Effect of sewage irrigation on the distribution of heavy metal, enzyme activity and microbial population in soil [J]. *J. Safety Environ.*, 2006, 6(6): 44-50.
- [29] 陈奕云,唐名阳,王淑桃,等.基于文献计量的中国农田土壤重金属污染评价[J].*土壤通报*, 2016, 47(1): 219-225.
- Chen Y Y, Tang M Y, Wang S T, *et al.*. Evaluation of heavy metal pollution in farmland soils in China based on bibliometrics [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2016, 47(1): 219-225.
- [30] 张小敏,张秀英,钟太洋,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 X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al.*. Heavy metal accumulation and spatial distribution in agricultural soils in China [J]. *Environ. Sci.*, 2014, 35(2): 692-703.

(责任编辑:李爱花,温小杰)