

# 基于 GIS 的黄淮海平原典型潮土区土壤 重金属积累研究\*

夏 敏<sup>2</sup> 赵炳梓<sup>1†</sup> 张佳宝<sup>1</sup>

(1 封丘农田生态系统国家试验站, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

**摘 要** 以黄淮海平原典型潮土区——河南省封丘县为例, 基于 GIS 数据统计分析方法和地统计学空间插值方法, 其目的是为了: (1) 明确土壤重金属 Cr、Hg、As、Cu、Zn 的当前含量水平及其历史变化趋势; (2) 通过与潮土自然背景值(背景值)、国家土壤环境质量标准一级标准(一级标准)和绿色食品产地环境质量标准(绿色标准)的比较, 阐明各重金属元素符合不同标准的土壤面积及其空间分布; (3) 在上述研究基础上采用内梅罗综合指数法定量评价基于一级标准的土壤重金属综合环境质量及其县域分布。结果表明, 5 种重金属含量平均值除 Hg 与背景值相当外, 其余均略高于背景值而远低于一级标准, 除 As 外, 土壤 Cr、Hg、Cu、Zn 含量均有随年限增加的趋势; 占全县土壤总面积 98% 以上的 Cr、As、Zn 含量, 100% 的 Hg 含量, 91% 以上的 Cu 含量符合一级标准, 超过 99% 以上的土壤符合绿色标准; 基于一级标准的内梅罗综合指数进一步表明封丘地区土壤综合环境质量良好, 仅有不足 3% 的土壤受到轻度污染。表明就重金属污染角度, 当前状况下的封丘土壤适宜种植各类农作物, 但个别超过绿色标准的地点应引起重视并及时采取防治措施。

**关键词** 重金属含量; 时间变化; 空间分布; 环境质量评价

**中图分类号** X53 **文献标识码** A

潮土是我国黄淮海地区最主要的农业土壤类型, 是我国粮食作物, 尤其是玉米、小麦的主产土壤。随着采矿、工业、经济、交通的发展, 潮土的环境质量令人担忧<sup>[1]</sup>。Lu 等<sup>[2]</sup>采用多元分析和地统计学方法研究北京市顺义区农田潮土的重金属分布, 发现土壤重金属含量均高于当地背景值。李红伟等<sup>[3]</sup>、贾琳等<sup>[4]</sup>分别对不同尺度农田潮土重金属污染的研究表明, 土壤重金属含量均超过黄河下游潮土区的背景值, 存在不同程度的生态风险。霍霄妮等<sup>[5]</sup>则采用空间自相关分析方法研究北京耕作土壤重金属的分布规律, 指出了存在潜在污染风险的区域。

传统的土壤环境质量评价主要采用基于单个采样点进行的数量统计分析方法<sup>[6-8]</sup>, 这种研究方法的优点是计算简单, 缺点是单个样点评价虽能够客观地反映离散样本点的级别, 但无法体现面上的状况, 容易导致以偏概全<sup>[9]</sup>。随着 GIS 技术的发展, 采用地统计学空间插值方法对采样点数据进行

空间插值, 实现从土壤环境质量指标的点状数据到面状分布信息的获取和表达, 成为学者们研究区域内土壤环境质量指标分布状况的重要手段<sup>[10-13]</sup>。

我国农产品产地土壤环境质量标准较为多样<sup>[9]</sup>, 早期常以土壤自然背景值作为评价基准<sup>[14]</sup>。土壤自然背景值反映当前、当地土壤环境未受或很少受人类活动影响的情况, 是当前人类保护土壤环境质量的目标, 我国在 20 世纪 70 年代编辑出版的《中国土壤元素背景值》<sup>[15]</sup>一书中调查统计了不同土壤类型(包括潮土)的自然背景值。现有土壤环境质量评价研究中通常采用我国 1996 年颁布的国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)<sup>[8,10,16-17]</sup>, 标准中污染物质的指标值根据这些物质在土壤中的最低含量确定, 是全国统一的。此外, 农业部 2005 年发布了绿色食品产地环境质量标准(NY/T 391-2000), 其目的是为了保证绿色食品的质量, 合理选择符合绿色食品生产要求的环境条件。

\* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB100506)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX2-EW-N-08, ISSASIP1118)资助

† 通讯作者: E-mail: bzhao@issas.ac.cn

作者简介: 夏 敏(1971—), 女, 副教授, 主要从事土地评价和土地信息系统等方面的研究。E-mail: xm@njau.edu.cn

收稿日期: 2012-06-20; 收到修改稿日期: 2012-12-20

河南省封丘县位于黄淮海平原中部,当地土壤为典型潮土。由于该县地处内陆,通常认为重金属污染源不多,土壤重金属污染问题通常不在评价土壤环境质量考虑之列,但是缺乏具体数据支撑,对于土壤重金属的空间分布状况更是尚未见报道,这将妨碍相关调控措施的及时建立。本文以封丘县为例,基于 GIS 技术,以土壤中重金属 Cr、Hg、As、Cu、Zn 为研究对象,主要研究目的包括:(1)明确土壤重金属的当前含量水平及其历史变化趋势;(2)阐明分别符合潮土自然背景值(简称为背景值)、国家土壤环境质量标准一级标准(简称为一级标准)、绿色食品产地环境质量标准(简称为绿色标准)的土壤面积,并分析其空间分布状况;(3)利用内梅罗综合指数法定量评价土壤重金属综合环境质量及其县域分布。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

封丘县位于河南省北部,地处北纬  $34^{\circ}53' \sim 35^{\circ}14'$ ,东经  $114^{\circ}14' \sim 114^{\circ}45'$ 。全县区域面积  $1\,220\text{ km}^2$ ,其中除黄河河道之外的土地面积为  $1\,099\text{ km}^2$ 。属于北暖温带半干旱性季风气候区,年平均气温  $13.9^{\circ}\text{C}$ ,平均降水量  $626\text{ mm}$ ,全年无霜期  $214\text{ d}$ 。农作物生长季节的积温较高,能满足作物一年两熟的要求,主要粮食作物包括小麦、玉米、大豆等。

### 1.2 资料收集与土壤样品采集、分析

通过封丘县政府,收集了封丘县土地利用现状图、土壤图和行政区划图。在综合考虑样点分布的

均匀性、土壤类型、土地利用方式、和作物生产潜力的基础上,于 2008 年 9 月底在封丘县布设了 132 个采样点(图 1),同时,在每个采样点选中的田块采集 5 个点的  $0 \sim 20\text{ cm}$  土样,然后混合带回实验室风干。每个采样田块用 GPS 定位。

测定全量 Hg 和 As 时,土样先用  $\text{HNO}_3/\text{HCl}$  消化<sup>[18]</sup>,然后原子荧光测定;测定全量 Cr、Cu、Zn 时,土样经过  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4/\text{HF}$  消化后,用 ICP-AES 测定<sup>[19]</sup>。所有样品测定 2 次,并与标样比较。

### 1.3 土壤重金属环境质量评价

**1.3.1 土壤重金属质量单指标评价** 土壤重金属单指标污染评价采用土壤污染指数法进行。根据文献<sup>[20]</sup>,土壤污染指数计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, $P_i$ 为单项指标  $i$  的污染指数,也就是其质量指数; $C_i$ 、 $S_i$ 分别为其实测浓度和评价标准。本研究采用的评价标准为国家土壤环境质量标准一级标准。

**1.3.2 土壤重金属环境质量综合评价** 内梅罗指数是一种兼顾极值或称突出最大值的计权型多因子环境质量指数。由于其在加权过程中避免了权系数中主观因素的影响,因此在土壤环境质量评价研究中应用较多<sup>[16-17,21]</sup>。本文土壤重金属环境质量综合评价采用内梅罗综合指数法。计算公式为:

$$P_{COM} = \sqrt{\frac{P_{iAVE}^2 + P_{iMAX}^2}{2}} \quad (2)$$

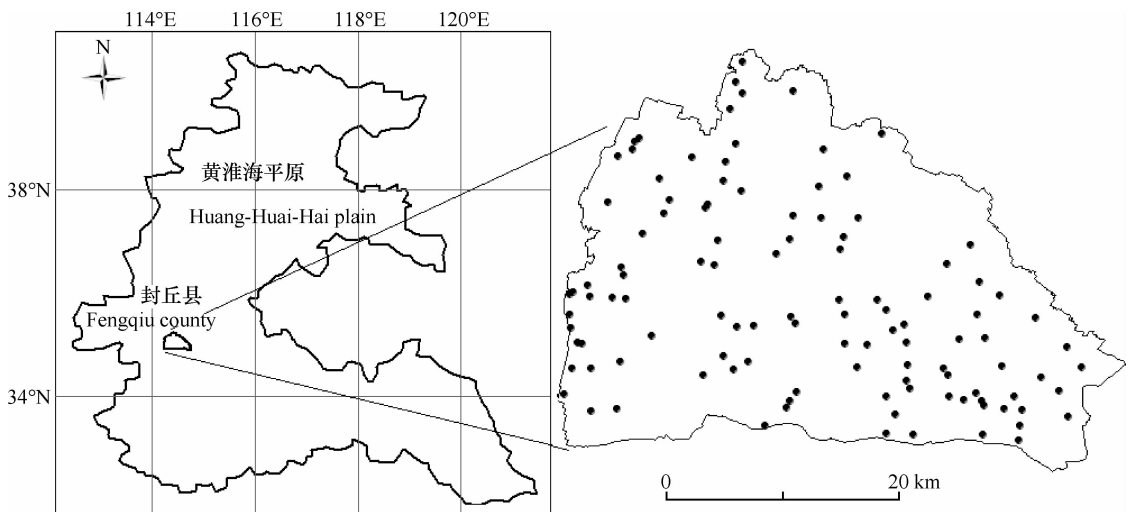


图 1 土壤采样点位置图

Fig. 1 Location of soil sampling points

式中,  $P_{COM}$  为内梅罗综合评价指数,  $P_{IAVE}$  为评价单元  $i$  各单项指标质量指数平均值,  $P_{IMAX}$  为该评价单元各指标质量指数最大值。内梅罗指数反映了各重金属元素对土壤的作用, 可按其大小划定土壤环境质量等级<sup>[22]</sup>:  $P \leq 0.7$  时, 土壤环境质量为清洁;  $0.7 < P \leq 1$  时, 土壤环境质量尚清洁;  $1 < P \leq 2$  时, 土壤环境质量为轻度污染;  $P$  越大, 则污染程度越重。

#### 1.4 数据处理

数据处理主要在地理信息系统软件 ArcGIS 9.2 中完成。

在地统计分析模块中, 首先采用探索性数据分析方法对 132 个采样点的 Cr、Hg、As、Cu、Zn 含量进行了描述性统计分析。ArcGIS 提供了多种空间插值方法, 包括逆距离加权插值法和克里格插值法, 前者主要适用于非正态分布数据, 而后者则适用于正态分布的数据。对本研究的 5 种重金属含量的正态分布检验表明, 其含量均非正态分布, 因此本文选用逆距离加权插值法完成土壤重金属指标的空间插值。为便于今后指导实际应用的需要, 根据研究区域土地利用现状图中农用地和土壤图最小图斑的面积, 设定栅格尺寸  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ , 将插值结果保存为栅格图层, 得到重金属空间分布图。

利用 ArcGIS 空间分析模块的重分类功能, 区分  $\leq$  背景值、背景值 ~ 一级标准、一级标准 ~ 绿色标准、 $>$  绿色标准四个级别, 对重金属空间分布图进行重分类, 得到重金属含量各级别分布图, 并统计得到各级别土壤面积占全县总面积百分比。

最后基于重金属空间分布图, 以栅格为评价单元, 运用 ArcGIS9.2 提供的栅格计算器, 根据土壤质量单指标(式(1))和综合评价公式(式(2))编写地图代数表达式并执行<sup>[23]</sup>, 得到土壤重金属环境单指标质量指数图和内梅罗综合评价指数图, 根据内梅罗综合评价指数的大小重分类, 得到封丘县土壤重金属综合环境质量等级图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属含量描述性统计及其时间变化

表 1 结果表明, 5 种重金属含量均近似正态分布, 其数据分布的变异系数介于 21% ~ 54% 之间, 属于中等变异程度, 其中 Hg 的变异性略高; 相比表 2 的不同重金属含量标准, 发现 Cr、As、Cu、Zn 量的均值均介于背景值和一级标准之间, 并且均略高于背景值而远低于一级标准, 而 Hg 含量甚至与背景值

相当, 表明就重金属含量的平均值来看, 封丘潮土中 Cr、Hg、As、Cu、Zn 含量均处于较低水平。本研究结果中, Hg、Cu 和 Zn 含量与山东省禹城市农田潮土土壤重金属基本相同, 但封丘县的 As 含量较禹城市略低, Cr 含量略高<sup>[4]</sup>, 此外, 封丘县 Cr、Cu 和 Zn 的含量范围变化较禹城市大, 显示其可能受人为因素的影响较大。

纵观封丘潮土重金属含量的历史变化, 我们发现 Cr、Hg、Cu、Zn 含量均有随年限增加的趋势(表 3)。1984 年封丘县 58 个点的 Cr、Hg、Cu、Zn 含量均值均远低于背景值, 而 As 含量则略高于背景值(表 2, 表 3), 但 2003 年 134 个点的 Cr、Cu、Zn 含量平均值较 1984 年的含量分别增加了 16.44%、63.17%、61.51%, 年均增速分别为 0.49、0.48、1.46  $\text{mg kg}^{-1}$ , 并且 2003 年的含量几乎均与背景值相当(表 2); 至本研究的 2008 年, Cr、Hg、Cu、Zn 的平均含量较 1984 年分别增加 21.43%、29.03%、85.52%、64.08%, 年均增速分别为 0.51、0.00、0.52、1.20  $\text{mg kg}^{-1}$ , 表明 Cr 和 Cu 的增速也随着年限延长而增加; 相反, As 含量随时间变化很少, 无论是 2008 年还是 1984 年的含量, 其值均略高于背景值(表 3), 这可能与 As 主要来源于土壤母质有关<sup>[2]</sup>。Lu 等<sup>[2]</sup>研究同时认为土壤中 Hg 主要来源于城市大气沉降, Cu 和 Zn 来源于农业活动。由于封丘县远离城市, 工业不很发达, 从而可能导致土壤中 Hg 含量较低, 无论是 1984 年还是 2008 年, Hg 的平均含量甚至均低于背景值, 并且随耕种年限的变化也不大(表 2, 表 3)。此外, 除化肥、农药外, 土壤中 Cu、Zn 的另一主要来源为家禽养殖场废弃物, 这可能与家禽饲料中添加的 Cu、Zn 有关<sup>[24]</sup>; 而利用家禽养殖场废弃物培肥土壤越来越受重视, 因而源头控制重金属进入土壤是防止重金属污染的重要环节之一。

### 2.2 符合不同标准的土壤重金属含量空间分布

根据潮土重金属含量标准(表 2), 将本研究获取的封丘县域重金属含量分别分成  $\leq$  背景值、背景值 ~ 一级标准、一级标准 ~ 绿色标准、 $>$  绿色标准四个级别, 但由于封丘县的全汞含量均小于一级标准, 因而只适用于前两个级别; As 的一级标准与绿色标准相同, 而文献没有提供 Zn 的绿色标准, 因而 As 和 Zn 均只适用于前三个级别。不同级别重金属含量的空间分布见图 2, 结果显示不同级别的土壤重金属含量均存在空间分布连续性, 其中 Cu 的分布最为分散, 而 Hg 的分布则较为均一。

不同级别土壤面积占封丘县总面积的百分比如表 4 所示,封丘县超过 98% 面积的土壤 Cr 含量均符合国家一级标准,其中分布于陈固、应举、獐鹿市、黄德、潘店、油坊等乡镇的 Cr 含量甚至均低于背景值,其面积占全县面积 34% 左右;含量介于一级和绿色标准之间及超过绿色标准的土壤主要零星分布在县城和司庄的南面(图 2)。全县几乎 80% 面积的 Hg 含量均小于背景值,分布于封丘县南部

的司庄、陈桥等乡镇的 Hg 含量略高(图 2),但也均在国家一级范围内,即封丘全县土壤 Hg 含量均符合国家土壤环境质量标准的一级标准。对 As 和 Zn 而言,超过 98% 面积的土壤均符合它们的一级标准。与以上 4 种重金属相比,符合 Cu 一级标准的土壤面积略少,但也占全县面积的 91.08%;其中超过绿色标准的田块应该引起关注,它们主要零星分布于王村、潘店、油坊等乡镇(图 2)。

表 1 封丘土壤重金属含量的基本统计特征(2008 年)

Table 1 Basic statistical characteristics of the heavy metal contents in the soils of Fengqiu County in 2008

重金属 Heavy metal	最小值 Min (mg kg <sup>-1</sup> )	最大值 Max (mg kg <sup>-1</sup> )	均值 Mean (mg kg <sup>-1</sup> )	中值 Median (mg kg <sup>-1</sup> )	变异系数 CV(%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
Cr	32.0	128.0	68.97	68.0	21.60	1.37	6.06
Hg	0.02	0.12	0.04	0.03	53.90	1.69	5.63
As	6.79	17.33	10.37	10.27	21.57	0.74	3.30
Cu	8.0	70.0	26.90	22.0	46.21	1.28	4.45
Zn	40.0	127.0	74.0	75.0	24.61	0.31	2.78

表 2 潮土重金属含量标准

Table 2 Standards for heavy metal contents in fluvo-aquic soil (mg kg<sup>-1</sup>)

重金属 Heavy metal	背景值 Background	一级标准 Grade I	绿色标准 Green standard
Cr	66.60	90.0	120.0
Hg	0.047	0.15	0.35
As	9.70	15.0	15.0
Cu	24.10	35.0	60.0
Zn	71.70	100.0	

注:表中潮土自然背景值来源于文献[15];一级标准依据中华人民共和国土壤环境质量标准(GB 15618-1995);绿色标准则依据绿色食品产地环境质量标准(NY/T 391-2000),其中根据土壤 pH 的高低分为三种情况规定了土壤污染物的含量限度,封丘县 132 个采样点土壤 pH 均大于 7.5,依据绿色食品产地环境质量标准水旱轮作地的标准值取严不取宽的原则,得到该表中的标准,但绿色食品产地环境质量标准中未确定土壤中 Zn 含量标准 Note: Natural background values of the Fluvo-aquic soil were quoted from literature [15]; Criteria Grade I was based on the National Standard for Soil Environmental Quality of P. R. China (GB15618-1995); Green standard was based on the Standard of Soil Environmental Quality for Green Food Production (NY/T391-2000), which prescribe limits for contents of soil pollutants in light of soil pH. The soils collected from all the 132 sampling points in Fengqiu were higher than 7.5 in pH. According to the principle of the Standard of Soil Environmental Quality for Green Food Production of tending to be strict rather than being loose for soils under paddy-upland crop rotation, the data in the table were cited. But the standard for green food production does not specify any limit for soil Zn

表 3 封丘县历年土壤重金属含量演变趋势

Table 3 Evolution trend of soil heavy metal contents in Fengqiu County over the years (mg kg<sup>-1</sup>)

年份 Year	样品数 Sample number	Cr		Hg		As		Cu		Zn	
		含量 Content	范围 Range	含量 Content	范围 Range	含量 Content	范围 Range	含量 Content	范围 Range	含量 Content	范围 Range
1984	58	56.8	28.1 ~ 115.6	0.031	0.004 ~ 0.115	10.7	5.1 ~ 19.3	14.5	5.4 ~ 24.4	45.1	31.2 ~ 52.6
2003	134	66.14	41.08 ~ 91.41	—	—	—	—	23.66	13.77 ~ 69.22	72.84	46.0 ~ 117.8
2008	132	68.97	32 ~ 128	0.04	0.02 ~ 0.12	10.37	6.79 ~ 17.3	26.90	8 ~ 70	74.0	40 ~ 127

注:表中 1984 年和 2003 年数据来源于文献[1] Note: The data of 1984 and 2003 were quoted from literature [1]

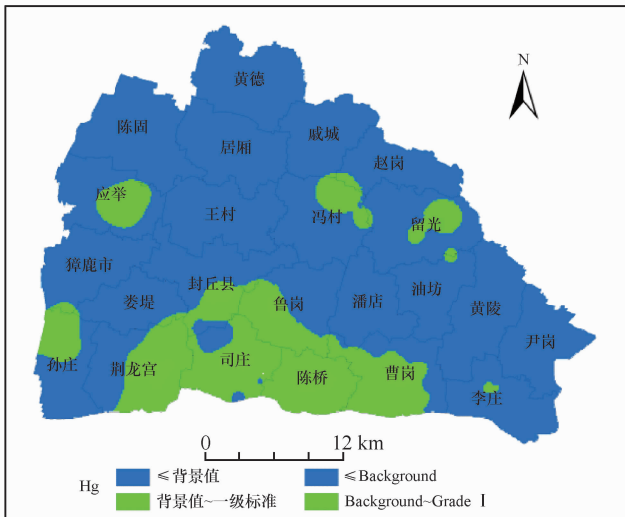
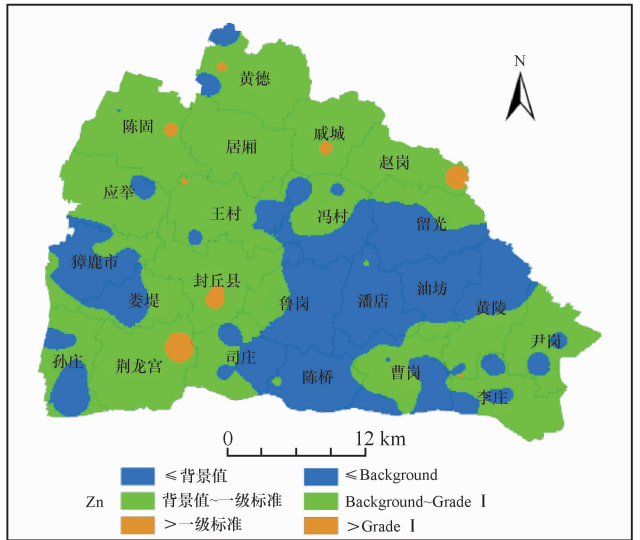
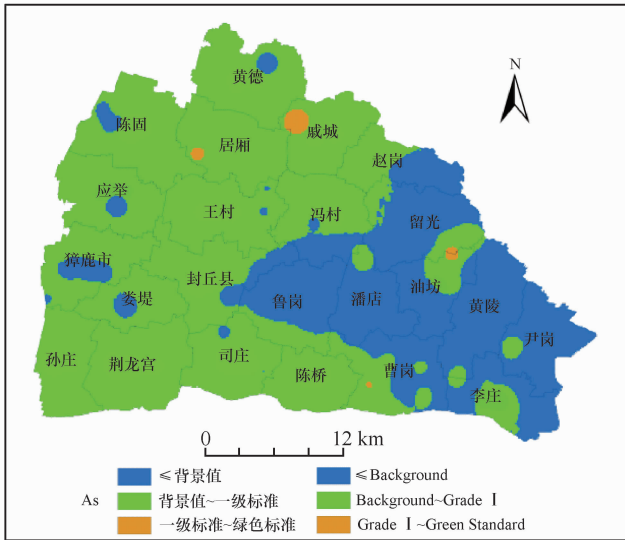
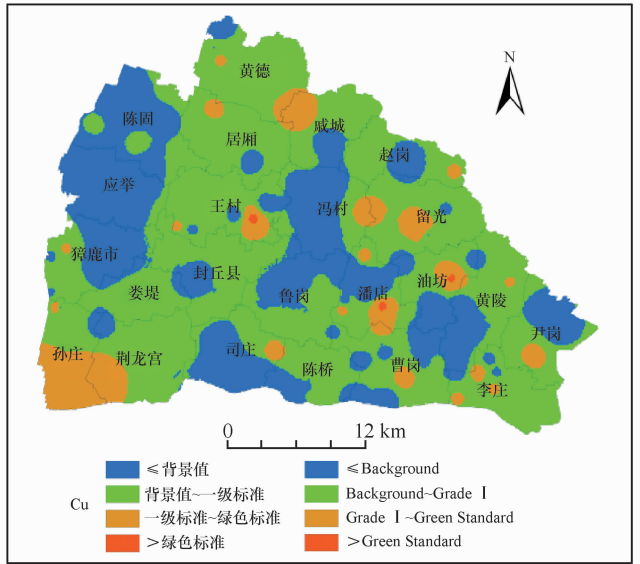
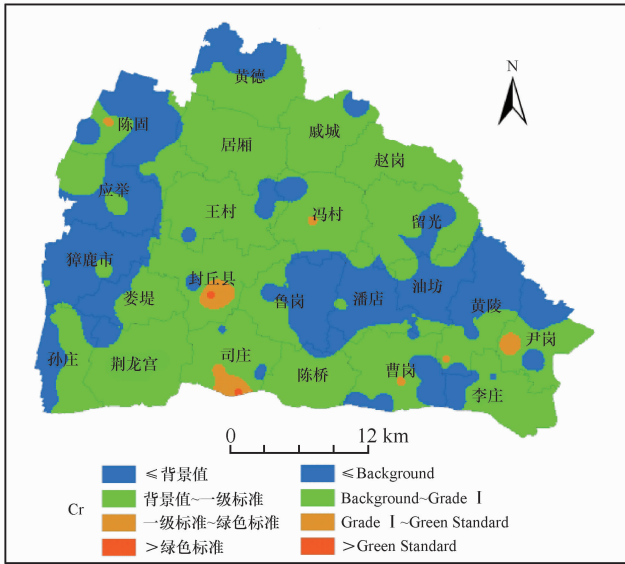


图 2 封丘潮土不同级别重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil heavy metal contents of various levels in Fengqiu County

表 4 符合不同重金属含量标准的封丘潮土面积占总面积百分比

Table 4 Percentages in area of the soils up to various standards for heavy metal contents in Fengqiu County

重金属 Heavy metal	≤背景值 ≤ Background	背景值~一级标准 Background ~ Grade I	一级标准~绿色标准 Grade I ~ Green standard	>绿色标准 > Green standard
Cr	34.22	64.26	1.46	0.06
Hg	78.45	21.55		
As	32.43	67.03	0.54	
Cu	31.98	59.10	8.81	0.11
Zn	34.91	63.80		

从封丘县 5 种重金属污染角度来看,当地土壤环境质量较好,占全县总面积 91% 以上的土壤满足国家土壤环境质量标准的一级标准,超过 99% 以上的土壤满足绿色食品产地环境质量标准,表明封丘土壤基本满足绿色食品生产的土壤要求。但从其最大值看,Cr、Cu 和 Zn 含量超出国家土壤环境质量一级标准较多,特别是 Cr、Cu 含量略超过绿色食品产地环境质量标准,反映了封丘部分地区潮土存在轻微的污染。

### 2.3 土壤重金属环境质量综合评价

以国家土壤环境质量标准一级标准为评价标准,土壤环境质量单指标评价结果的统计见表 5,所研究的 5 种重金属指标中,Hg 的质量指数最低,表明其质量最好;As 的质量指数变化幅度最小,表明其受外来影响较小;而 Cr、Cu、Zn 的质量指数相似,并且相对较高,表明它们与其他两种重金属相比存在污染可能性较大,这与上述二部分的研究结果一致。

表 5 封丘潮土重金属单指标质量指数

Table 5 Quality index for individual heavy metal in fluvo-aquic soil in Fengqiu County

重金属 Heavy metal	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min
Cr	0.77	1.42	0.36
Hg	0.27	0.77	0.11
As	0.71	1.15	0.45
Cu	0.78	1.99	0.24
Zn	0.75	1.27	0.40

根据内梅罗综合评价指数,封丘县环境质量总体优良,其空间分布见图 3。清洁、尚清洁和轻度污染的土壤面积分别为 231.5、835.3 和 32.24 km<sup>2</sup>,占全区总面积的 21.07%、76.00% 和 2.93%。由图中可见,清洁土壤主要分布于獐鹿市和鲁岗、潘店、油坊、黄陵一带,轻度污染土壤则分散分布于封丘各处。

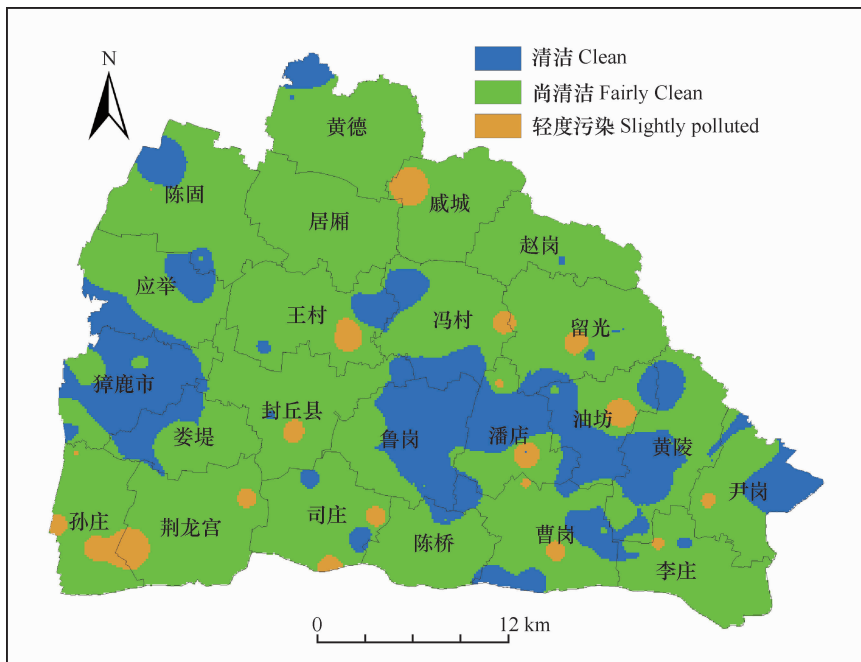


图 3 封丘土壤重金属环境质量内梅罗综合评价等级图

Fig. 3 Grades of the Nemerow comprehensive evaluation of heavy metal environmental quality of the soils in Fengqiu County

土壤环境质量受到土壤自然条件如土壤质地、土壤有机质含量和 pH 等的影响,也受到包括土地利用类型和利用方式等人为因素的影响。尽管从重金属污染角度来看,封丘县土壤基本符合国家土壤环境质量标准的一级标准,也几乎全部满足绿色食品产地环境质量标准,但在今后的农业生产中,需要重视土壤环境污染问题,采取积极措施控制肥料和农药等带入土壤的重金属,进一步加强土壤重金属污染的机制研究,对于轻度污染的土壤进行恢复治理,以防止土壤环境质量进一步退化。

### 3 结 论

就封丘地区 Cr、Hg、As、Cu、Zn 含量的历史变迁、空间分布、及其综合评价角度来看,当地土壤环境质量较好,占全县土壤总面积 91% 以上的土壤满足国家土壤环境质量标准的一级标准,超过 99% 以上的土壤满足绿色食品产地环境质量标准,适于作为绿色食品(AA 级和 A 级)生产的农田、蔬菜地、果园和茶园利用;以国家土壤环境质量标准的一级标准为评价基础的内梅罗综合评价结果也显示当地仅有不足 3% 的土壤受到轻度污染。但 Cr、Hg、Cu、Zn 含量随耕种年限增加的趋势值得引起关注,尤其是 Cr 和 Cu 含量的增速也随之加快。建议未来在进一步扩大重金属监测种类的基础上,就重金属来源和去向的机制及其对农产品质量的潜在影响行为上进行深入剖析。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 曹志洪,周健民,等. 中国土壤质量. 北京:科学出版社,2008:528—529. Cao Z H,Zhou J M,et al. Soil quality of China (In Chinese). Beijing:Science Press,2008:528—529

[ 2 ] Lu A X,Wang J H,Qin X Y,et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2012, 425: 66—74

[ 3 ] 李红伟,邢维芹,赵财,等. 长期耕作条件下潮土重金属空间分布及变异性研究. *河南农业科学*,2007(9):61—71. Li H W,Xing W Q,Zhao C,et al. Spatial distribution and variation of heavy metals in Chaotu soil with long-term farming history (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural Sciences*,2007(9):61—71

[ 4 ] 贾琳,杨林生,欧阳竹,等. 典型农业区农田土壤重金属潜在生态风险评价. *农业环境科学学报*,2009,28(11):2270—2276. Jia L,Yang L S,Ouyang Z,et al. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in the farmland soils in

Yucheng City, Shandong Province (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*,2009,28(11):2270—2276

[ 5 ] 霍霄妮,李红,孙丹峰,等. 北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析. *环境科学学报*,2009,29(6):1339—1344. Huo X N,L i H,Sun D F,et al. Spatial autocorrelation analysis of heavy metals in cultivated soils in Beijing (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*,2009,29(6):1339—1344

[ 6 ] Burt R,Wilson M A,Mays M D,et al. Major and trace elements of selected pedons in the USA. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(8): 2109—2121

[ 7 ] Brus D J,Gruijter J J,Walvoort D J J,et al. Mapping the probability of exceeding critical thresholds for cadmium concentrations in soil in the Netherlands. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6): 1875—1884

[ 8 ] 郭海全,杨志宏,李宏亮,等. 河北平原表层土壤重金属环境质量及污染评价. *中国地质*,2011,38(1):218—225. Guo H Q,Yang Z H,Li H L,et al. Environmental quality and anthropogenic pollution assessment of heavy metals in topsoil of Hebei plain (In Chinese). *Geology in China*,2011,38(1):218—225

[ 9 ] 李润林,姚艳敏,唐鹏钦. 农产品产地土壤环境质量评价研究进展. *中国农学通报*,2011,27(6):296—300. Li R L,Yao Y M,Tang P Q. Research progress on evaluation of soil environmental quality in agricultural production area (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2011,27(6):296—300

[ 10 ] 刘勇,张红,尹京苑. 汾河太原段土壤中 Hg、Cr 空间分布与污染评价. *农业工程学报*,2008,24(5):57—60. Liu Y,Zhang H,Yin J Y. Pollution assessment and spatial distribution of soil Hg and Cr in the Taiyuan area of the Fenhe River (In Chinese). *Transactions of the CSAE*,2008,24(5):57—60

[ 11 ] Burgos P,Madejo'n E,Perezdemora A,et al. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. *Geoderma*, 2006, 130: 157—175

[ 12 ] Mico C,Recatala L,Peris M,et al. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariable analysis. *Chemosphere*, 2006, 65: 863—872

[ 13 ] 臧淑英,毕雪梅. 庆安县绿色食品产地环境质量 GIS 探讨. *中国生态农业学报*,2006,14(1):170—173. Zang S Y,Bi X M. GIS analysis on the environment quality of green food production base in Qing'an County (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2006,14(1):170—173

[ 14 ] 王明聪,成杰民,纪发文. 土壤重金属环境质量评价基准体系进展与研究. *资源环境与发展*,2008(1):13—16. Wang M C,Cheng J M, Ji F W. Review and study on evaluation standard system of soil heavy metal quality (In Chinese). *Resources Environment and Development*,2008(1):13—16

[ 15 ] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京:中国环境科学出版社,1990:94—125. China Environmental Monitoring Center. The background values of soil elements in China (In Chinese). Beijing:China Environmental Science Press,1990:94—125

[ 16 ] 韩平,王纪华,潘立刚,等. 北京郊区田块尺度土壤质量评价.

- 农业工程学报,2009,25(增刊2):228—234. Han P, Wang J H, Pan L G, et al. Evaluation of soil quality in suburb of Beijing under field scale (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2009, 25(Suppl2):228—234
- [17] 黄绍文,金继运,和爱玲,等. 农田不同利用方式下土壤重金属区域分异与评价. 农业环境科学学报,2007, 26(增刊): 540—548. Huang S W, Jin J Y, He A L, et al. Regional differentiation and status of heavy metals in rural soils under different patterns of land use (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(Suppl): 540—548
- [18] Rowell D L. Soil science: Methods and applications. UK: Longman Group, 1994: 324—327
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社,2000:205—226. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2000:205—226
- [20] 李柞泳,丁晶,彭荔红. 环境质量评价原理与方法. 北京:化学工业出版社,2004:30—74. Li Z Y, Ding J, Peng L H. Theory and methods of environment quality assessment (In Chinese). Beijing:Chemistry Industry Press,2004:30—74
- [21] 郑海龙,陈杰,邓文靖,等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价. 土壤学报,2006,43(1):39—45. Zheng H L, Chen J, Deng W J, et al. Spatial analysis and pollution assessment of soil heavy metals in the steel industry areas of Nanjing periurban zone (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2006,43(1):39—45
- [22] 刘庆,臧宏伟,史衍玺. 小尺度农田土壤重金属污染评价与空间分布. 土壤通报,2009,40(3):673—678. Liu Q, Zang H W, Shi Y X. The pollution assessment and spatial distribution of soil heavy metals in field scale (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science,2009,40(3):673—678
- [23] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京:科学出版社,2009:280—285. Tang G A, Yang X. Spatial analysis instruction of Geographic Information System, ArcGIS (In Chinese). Beijing:Science Press,2009:280—285
- [24] Zhao B Z, Maeda M, Zhang J B, et al. Accumulation and chemical fractionation of heavy metals in Andisols after a different, 6-year fertilization management. Environmental Science and Pollution Research, 2006, 13: 90—97

## GIS-BASED RESEARCH ON SOIL HEAVY METAL ACCUMULATION IN A FLUVO-AQUIC SOIL AREA TYPICAL OF THE HUANG-HUAI-HAI PLAIN

Xia Min<sup>2</sup> Zhao Bingzi<sup>1†</sup> Zhang Jiabao<sup>1</sup>

(1 State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract** Heavy metal pollution of soils is an issue that has aroused high concerns among scientists the world over, and it is the premise of establishing related regulatory measures to specify trend of the spatio-temporal variation of heavy metal content in the soil. A case study was performed of Fengqiu County of Henan Province, a fluvo-aquic soil area typical of the Huang-Huai-Hai Plain, based on statistical analysis and geostatistical spatial interpolation of GIS data. The study was aimed at specifying current contents of soil heavy metals (Cr, Hg, As, Cu, and Zn) and their variation trends in the past years; determining areas and spatial distributions of the soils up separately to various standards for soil heavy metals, such as the natural background values, Criteria of Grade I of the National Standard for Soil Environmental Quality and the Standard of Soil Environmental Quality for Green Food Production; and eventually based on the two preceding researches quantitatively evaluating comprehensive soil heavy metal environment quality of the soils up to the criteria of Grade I of the National Standard with the Nemerow integrated pollution index method and their distributions within the county. Results show that the average contents of the five heavy metals, except Hg of which the average content was nearly on the same level as the background value, were slightly higher than the background values, but far below the Criteria of Grade I. And all the five heavy metals, except As, showed an increasing trend in content with the years passing by. The county had over 98% of its area of soils exceeding the criteria of Grade I of the National Standard in content of Cr, As and Zn, 100% in content of Hg, and over 91% in content of Cu, and over 99% beyond the Standard of Soil Environmental Quality for Green Food Production. Based on the criteria of Grade I, analysis with the Nemerow integrated pollution index method revealed that the soils of Fengqiu were good in comprehensive soil environmental quality, except for less than 3% slightly polluted, which means that the soils in Fengqiu are suitable to cultivation of all kinds crops in view



of the current condition of soil heavy metal pollution. However, in some individual localities where the soils are beyond the standard for green food production, special attention should be paid to timely preventive measures for the issue of heavy metals pollution.

**Key words** Heavy metal content; Temporal change; Spatial distribution; Environmental quality evaluation

(责任编辑:陈德明)