

县域土壤有效态微量元素的空间 变异特征及影响因素

——以徐水县为例

张小桐¹, 张瑞芳^{2,3,4}, 王 红^{2,3,4}, 张爱军^{2,3,4}, 周大迈^{2,3,4}

(1. 河北农业大学渤海校区基础课部, 河北 沧州 061100; 2. 国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北 保定 071001;
3. 河北省山区农业工程技术研究中心, 河北 保定 071001)

摘 要: 以徐水县土壤有效态铜(Cu)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)为研究对象, 利用 GIS 与地统计学相结合的方法, 分析了 4 种微量元素的空间变异特征及影响因素。结果表明: 4 种有效态微量元素含量在空间上都属于中等程度变异; 4 种微量元素的块金效应值在 12.21% ~ 49.97% 之间, 其中 Cu 和 Fe 具有强烈的空间相关性, Zn 和 Mn 具有中等的空间相关性。Cu 和 Mn 在空间分布上呈现连续性, 而 Zn 和 Fe 大体呈现岛状分布; 除有效铜平均含量处于高含量水平, 其它微量元素平均值均处于中含量水平; 相关性分析显示除 Fe 对部分养分的正相关性不强外, Cu、Zn、Mn 均与土壤养分呈极显著的正相关性; 土壤 pH 值与 4 种微量元素均呈负相关性, 其中 Fe 呈极显著的负相关性。

关键词: 土壤微量元素; 空间变异; 地统计学
中图分类号: S153.6⁺1 **文献标志码:** A

Spatial variability and contributing factors of soil available micronutrients at county level

——A case study at Xushui County

ZHANG Xiao-tong¹, ZHANG Rui-fang^{2,3,4}, WANG Hong^{2,3,4}, ZHANG Ai-jun^{2,3,4}, ZHOU Da-mai^{2,3,4}

(1. The Department of Foundation Courses, Agricultural University of Hebei, Cangzhou, Hebei 061100, China;
2. National Engineering Research Center for Agriculture in Northern Mountainous Areas, Baoding, Hebei 071001, China;
3. Agricultural Engineering Technology Research Center of Hebei Province mountain, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: In this paper, we followed the method of combining GIS (geographical information system) and geostatistics to analyze the spatial variability and contributory factors of four available micronutrients in soils. The results showed that available Cu, Zn, Fe and Mn exhibited moderate spatial variations. The nugget effect values of these micronutrients varied between 12% and 50%, with Cu and Fe showing the highest while Mn and Zn moderate. A continuous distribution pattern was detected for Cu and Mn but not for Zn and Fe. Average content of Cu was high, while the other micronutrients were medium. Soil nutrients including organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium had highly significant positive correlations with Cu, Zn and Mn. The soil pH had negative correlation with the four micronutrients, with Fe the most significant.

Keywords: soil micronutrients; spatial variability; geostatistics

土壤微量元素如铜(Cu)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)等是作物必不可少的营养物质之一, 其中微量元素有效态含量是指以相对活动态存在于土壤中, 能够被作物吸收和利用的那部分微量元素^[1]。这部分微量元素含量更能反映土壤中微量元素的丰缺状况, 并在促进作物生长、提高作物产量和改善作物品质

收稿日期: 2015-01-11
基金项目: 基于 GIS 的河北省山区土壤养分空间变异特征研究(ZD20131023)
作者简介: 张小桐(1989—), 女, 河北保定人, 硕士, 主要从事土壤变异及现代农业园区功能分区研究。E-mail: zhxiaot@163.com。
通信作者: 周大迈(1957—), 男, 河北安平人, 研究员, 博士生导师, 主要从事山区生态治理及土壤改良方面研究。E-mail: shyhn@hebau.edu.cn。

质方面有十分重要的作用^[2-3]。

自 20 世纪 90 年代以来,土壤养分的空间变异规律开始受到普遍关注,并取得了一定的研究成果。其中对土壤中大量元素的空间变异规律的研究较多^[4-6],研究涉及地域地形不断丰富,如东北旱地^[7]、黄土高原^[8]、南方丘陵^[9]等。研究方法也越来越趋向复杂性和综合性,主要有 GIS 与地统计学结合技术^[10-11]、序贯高斯模拟^[12-13]和 BP 神经网络^[14]等。尽管土壤养分的空间变异规律方面研究已经取得了不少成果,但总结起来仍然存在以下几点问题:一是这些研究多在小尺度空间范围上进行,采样点数量不够丰富,有研究表明养分空间分布的全局趋势随采样尺度增大而增强^[15];二是多数研究集中于土壤中大量元素,对土壤中有效态微量元素的研究较少。为此,本研究以县域为单位,共采集土壤样品 3 209 个,运用 GIS 与地统计学相结合的方法对土壤有效态微量元素进行研究分析,总结其空间变异规律和影响因素。以期为微量元素在大尺度区域上的研究提供参考,并为当地农业合理布局提供依据。

1 研究区概况

徐水县位于河北省中部,辖 7 镇 7 乡、1 个城区

办事处,总人口 56 万人。全县面积 723 km²,其中耕地面积 473 km²,是国家商品粮基地之一。徐水县自然环境优越,属暖温带季风型大陆性气候,年平均气温 12.3℃,年平均降水 575 mm,光照充足,四季分明,所处的华北平原属冲积平原,地面平坦开阔。总地势西北高、东南低,平均海拔高度 20 m。第二次土壤普查结果显示全县共有 2 个土类、6 个亚类、10 个土属、42 个土种。

2 研究方法

2.1 样品采集

徐水县土壤数据与图件资料主要来源于徐水县测土配方施肥与耕地地力评价项目。研究中布点及采样遵循《耕地地力调查与质量评价技术规程》^[16]规定,结合徐水县行政区划图、土地利用现状图、土壤图等资料确定采样点位。利用 GPS 进行样点定位,在 0~20 cm 土层进行取样,具体取样点位见图 1。

2.2 样品分析与测定

将样品置于室内洁净通风的环境中,经风干,剔除杂物,碾碎,过筛后,获得有效土壤样品 3 209 个。土壤有效态铜、锌、铁、锰的测定采用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法^[17]测定。

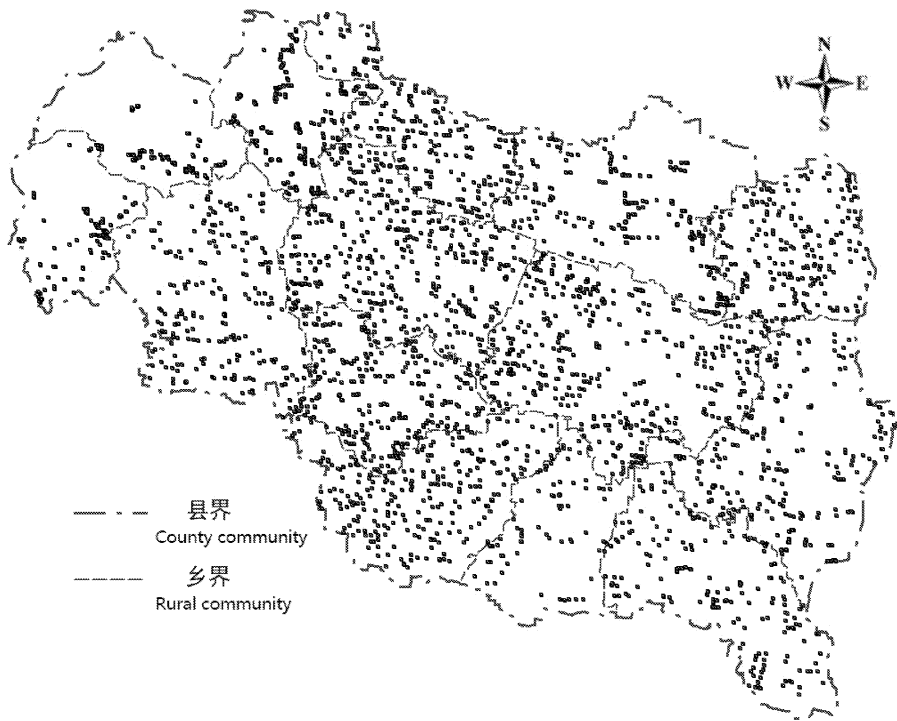


图 1 徐水县土壤样点分布
Fig.1 Soil sampling sites at Xushui County

2.3 数据处理

本文运用 SPSS 19.0 软件对土壤中微量元素进行描述性分析和正态分布检验;运用 GS + 7.0 软件进行半方差函数分析及模型拟合;运用 ArcGIS 10.1 软件进行空间分布规律的统计分析。

3 结果与分析

3.1 微量元素描述性统计分析

由于数据中异常值的存在会影响数据统计结果与变量空间结构特征^[18],所以,在进行描述性统计分析之前,对数据中的异常值进行处理。本文采用域法识别异常值,即以数据平均值加减三倍标准差

为域内的上下限,替换超出上下限的数据。经域法识别异常值之后,有效铜、有效锌替换异常值 61 个,有效铁替换异常值 50 个,有效锰替换异常值 4 个。数据异常值经替换之后显现出一定的差异(表 1)。其中有效铜和有效锌含量数据的最大值经替换后变化较大,进而对变异系数、偏度、峰度的大小产生了一定的影响,与原始数据相比差异较大。有效铁和有效锰因为替换数据与原始数据差异不大或替换数量较少,所以描述性统计分析对比变化不显著。数据的剔除异常值处理对数据的平均值、标准差和变异系数的影响不大。

表 1 土壤有效态微量元素的统计性描述
Table 1 Statistical characteristics of soil available microelements

微量元素 Microelements		样品数 Sample number	最大值 Max. /(mg·kg ⁻¹)	最小值 Min. /(mg·kg ⁻¹)	平均值 Mean /(mg·kg ⁻¹)	标准差 SD	变异系数 CV /%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
Cu	原始数据 Raw data	3209	22.80	0.33	2.21	1.58	71.49	4.24	30.41
	处理数据 Processed data	3209	6.95	0.33	2.15	1.24	57.67	1.98	4.37
Zn	原始数据 Raw data	3209	25.16	0.10	2.64	1.93	73.11	4.35	33.32
	处理数据 Processed data	3209	8.43	0.10	2.57	1.51	58.75	1.77	3.92
Fe	原始数据 Raw data	3209	31.40	0.50	9.89	3.29	33.27	1.04	3.94
	处理数据 Processed data	3209	19.76	0.50	9.85	3.13	31.78	0.62	1.75
Mn	原始数据 Raw data	3209	23.94	1.91	14.28	3.22	22.55	0.05	-0.25
	处理数据 Processed data	3209	23.94	4.62	14.28	3.22	22.55	0.06	-0.30

变异系数(CV)是衡量土壤特性空间变异性的一个统计量,一般认为 $CV \leq 10\%$ 为弱变异性, $CV = 10\% \sim 100\%$ 为中等变异性, $CV \geq 100\%$ 为强变异性。徐水县土壤有效态铜、锌、铁和锰含量在空间上都属于中等程度变异。各微量元素变异系数从大到小排列依次为 $Zn(58.75\%) > Cu(57.67\%) > Fe(31.78\%) > Mn(22.55\%)$ 。偏度是用于衡量分布的不对称程度或偏斜程度的指标,偏度值越接近于 0,数据越服从正态分布。峰度是用于衡量分布的集中程度或分布曲线的尖峭程度的指标,峰度值越接近于 0,数据越服从正态分布。经过数据分析结果显示只有有效锰含量的偏度和峰度值均接近于 0,初步判断有效锰含量服从正态分布。

3.2 有效态微量元素的正态分布检验

采用偏度-峰度检验与正态 Q-Q 图联合检验的方法,确保数据服从正态分布。正态 Q-Q 图的检验方法为观测数据的散点分布是否接近于这条直线。由偏度-峰度检验可知,只有有效锰含量初步认定为服从正态分布。因此,对有效锌、有效铜进行对数转换,对有效铁用差分转化的方法进行转换,使

其服从正态分布。正态 Q-Q 图检验结果如图 2。

3.3 土壤微量元素半方差函数分析

半方差函数是研究土壤养分空间变异的关键函数,能有效研究土壤养分在空间分布上的结构性和随机性^[19]。徐水县土壤有效态铜、锌、锰拟合的最优半方差模型为高斯模型,土壤有效态铁的最优模型为线性模型。块金值(Co)代表随机变异的量,主要代表一些人为因素引起的土壤变异,如施肥、耕作。而基台值(Co + C)代表变量空间变异的结构性方差,主要代表自然因素引起的土壤变异,如母质、气候、地形^[20]。块金值/基台值 $[Co/(Co + C)]$ 代表空间异质性程度,该值 $< 25\%$ 、 $25\% \sim 75\%$ 、 $> 75\%$ 分别代表强烈、中等、很弱的空间相关性。表 2 中有效铜与有效铁具有强烈的空间相关性而有效锌与有效锰具有中等的空间相关性。在徐水县,有效锌的该比值最高为 49.97%,说明该元素的空间变异受人为耕作和施肥的共同影响。有效铁的该比值最低,为 12.02%,说明该元素主要受人为耕作而引起的空间变异较小。变程反映空间自相关性的最大距离,大于该距离的区域变量不存在自相关性^[21]。

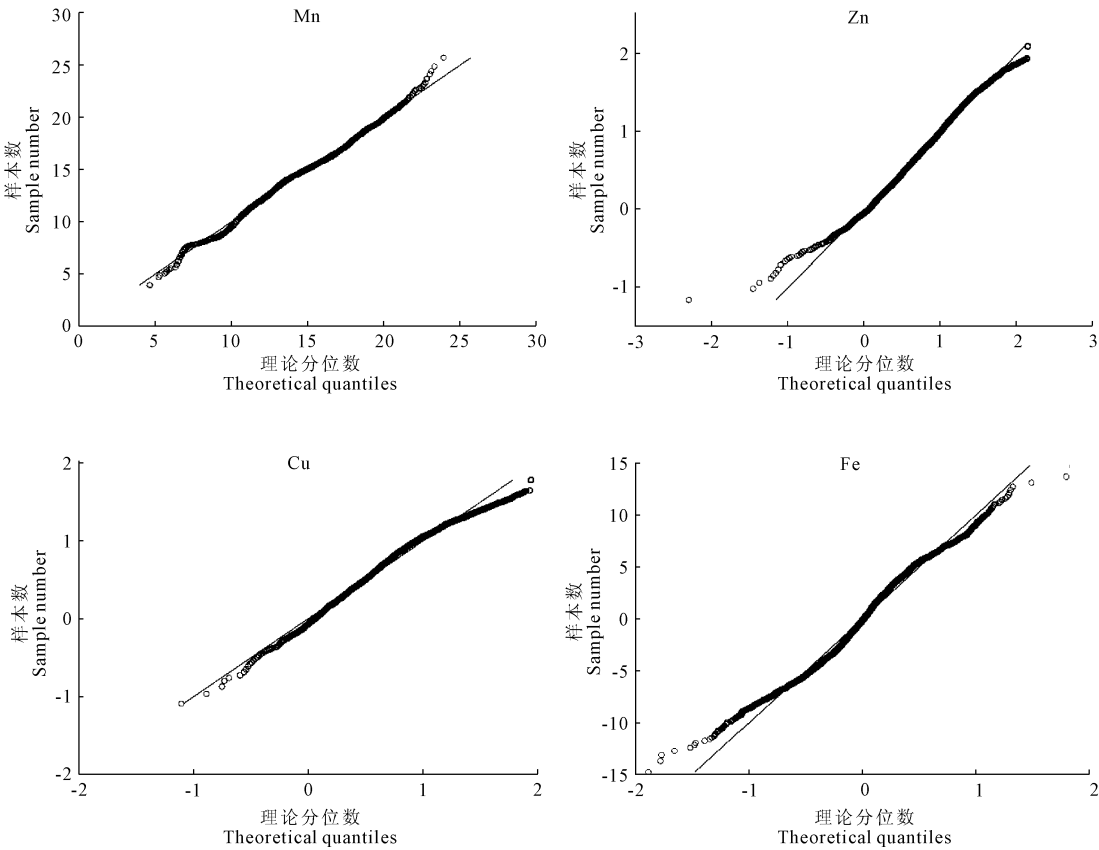


图 2 土壤有效态微量元素的正态 Q - Q 图

Fig.2 Normal Q - Q plot of soil available microelements

表 2 土壤有效态微量元素的半方差函数及其拟合参数

Table 2 Semi-variograms and the fitting parameters of soil available microelements

微量元素 Microelements	拟合模型 Theory model	块金值 Nugget (Co)	基台值 Sill (Co + C)	块金值/基台值/% Nugget/Sill Co/(Co + C)	变程 Range /km	决定系数 R ²	残差 RSS
Cu	高斯模型 Gaussian	0.080	0.655	12.21	0.01	0.278	0.056
Zn	高斯模型 Gaussian	0.815	1.631	49.97	0.37	0.919	0.012
Fe	线性模型 Linear	0.530	4.409	12.02	0.02	0.838	0.284
Mn	高斯模型 Gaussian	3.060	11.129	27.50	0.25	0.983	0.469

3.4 土壤微量元素空间格局与分区统计分析

参考第二次土壤普查时微量元素的养分分级标准和相关文献分级标准,结合徐水县土壤微量元素实际含量,制订徐水县微量元素养分分级标准,如表 4。根据确定的微量元素分级标准,利用 ArcGIS 10.3 软件将已检验正态分布的微量元素数据生成普通 Kriging 插值,绘制出徐水县土壤有效态微量元素分布图(图 3),再应用空间分析(Spatial Analyst)模块统计各级分布数据(见表 3)。

由图 3 可以看出,徐水县土壤中 4 种有效态微量元素的分布,呈现出一定的规律。其中,有效铜的

空间分布基本呈现西北与东南含量高而中部较低的趋势,高值区分布于徐水县西北部;有效锰的空间分布基本呈现由西北方向向东南方向递减的规律,高值区分布于徐水县西北部。西北部的丘陵坡地含量较高,这可能与土壤形成的地质环境有关。有效锌和有效铁的空间分布比较复杂,大体呈现岛状分布,有效锌的高值区零散分布于全县,有效铁的高值区零散分布在徐水县的中东部。这可能与人为因素的影响有关,目前果蔬生产上,部分施用锌、铁微肥,导致有效锌和有效铁的空间分布上的不规则性。

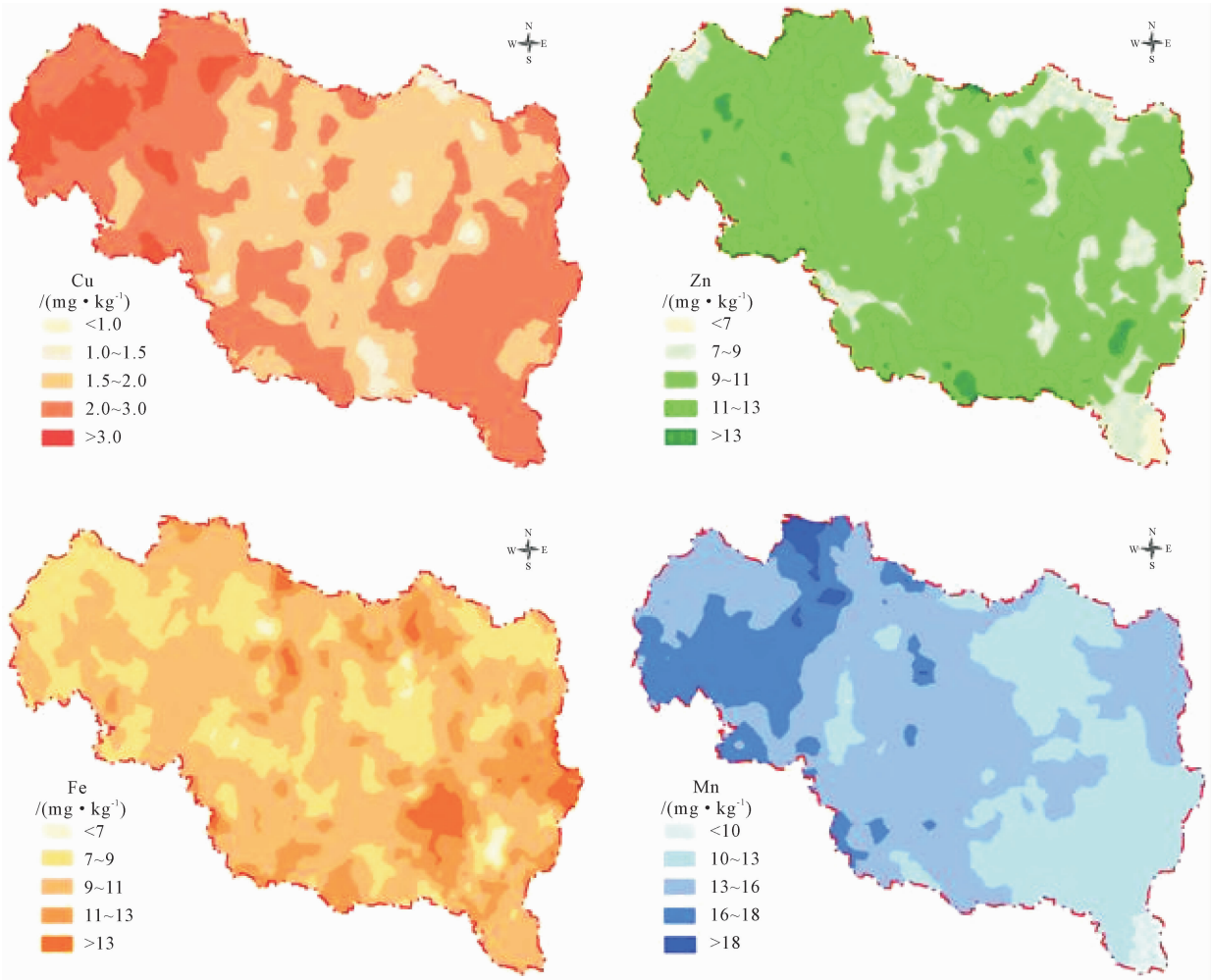


图 3 土壤有效态微量元素分布

Fig.3 Distribution of soil available microelements

表 3 土壤微量元素含量分级面积统计

Table 3 Grading statistics of the area the contents of soil available microelements

微量元素 Microelements	项目 Items	分级 Classification				
		极高 Very high	高 High	中 Middle	低 Low	极低 Very low
Cu	标准 Standard/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	> 3.0	2.0 ~ 3.0	1.5 ~ 2.0	1.0 ~ 1.5	< 1.0
	面积 Area/ km^2	52.71	366.56	282.11	21.26	0.36
	比例 Proportion/%	7.29	50.70	39.02	2.94	0.05
Zn	标准 Standard/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	> 4	3 ~ 4	2 ~ 3	1 ~ 2	< 1
	面积 Area/ km^2	20.82	106.57	402.93	187.98	4.70
	比例 Proportion/%	2.88	14.74	55.73	26.00	0.65
Fe	标准 Standard/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	> 13	11 ~ 13	9 ~ 11	7 ~ 9	< 7
	面积 Area/ km^2	8.89	111.49	369.81	224.56	8.31
	比例 Proportion/%	1.23	15.42	51.15	31.06	1.15
Mn	标准 Standard/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	> 18	16 ~ 18	13 ~ 16	10 ~ 13	< 10
	面积 Area/ km^2	14.24	154.29	426.28	123.92	4.27
	比例 Proportion/%	1.97	21.34	58.96	17.14	0.59

结合表 3 的统计值进行分析,徐水县有效铜以 2.0 ~ 3.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的高水平分布为最广,全县土壤

有效铜几乎都处于中等及中等偏高的水平,占总面积的 97.01%,含量极低的地块只占到全县的 0.05%,说明徐水县有效铜含量比较丰富,基本可以满足作物生长的日常需要;有效锌以 2~3 mg·kg⁻¹ 的分布为最广,但分布比较零散,全县有效锌含量基本处于中等水平,有效锌缺乏地区占到总面积的 26.65%,主要分布于徐水县东南部;有效铁以 9~11 mg·kg⁻¹ 的分布为最广,全县范围皆有分布,全县有效铁平均值含量处于中等水平,缺乏地区占到总面积的 32.21%;有效锰以 13~16 mg·kg⁻¹ 的分布为最广,与有效锌、有效铁一样养分含量处于中等水平。有效锌、有效铁和有效锰的含量分布非常相似,均处于中等水平,需要及时补充微量元素肥料。

土壤中有有效态微量元素的含量分布不仅由成土母质、地形、气候等因素决定。还受耕作、施肥等人

为因素影响。其中,施肥管理是影响土壤中微量元素含量变化的重要因素之一。徐水县是粮食生产大县,全县土壤利用率较高,人为活动对土壤中微量元素的影响也较大,通过对比第二次土壤普查时 4 种微量元素含量,证明经过近三十年的农业生产活动,土壤中微量元素含量普遍显著增加,这可能是由于近年来秸秆还田面积增大的原因,全县小麦玉米种植区秸秆还田率在 90% 以上,秸秆中的大量微量元素留在了土壤中。

3.5 微量元素与土壤养分和 pH 值的相关性分析

影响土壤有效态微量元素空间分布的因素较多,本研究主要探讨土壤养分和 pH 值对土壤有效态微量元素的影响。土壤养分和 pH 值的统计性描述见表 4。土壤养分及 pH 值与土壤有效态微量元素含量的相关性分析见表 5。

表 4 土壤养分和 pH 值的统计性描述

Table 4 Statistical characteristics of soil nutrients and pH

项目 Items	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	水解性氮/(mg·kg ⁻¹) Available N	有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available P	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available K	pH
样品数 Sample size	3209	3209	3209	3209	3209
最大值 Max.	34.7	223.4	117.2	289.5	8.9
最小值 Min.	1.5	41.0	0.6	38.0	6.1
平均值 Mean	16.61	119.30	29.72	120.87	7.72
标准差 SD	5.69	32.67	22.43	48.68	0.17
变异系数 CV/%	34.26	27.38	75.47	40.27	2.20
偏度 Skewness	0.263	0.885	1.674	1.734	-2.050
峰度 Kurtosis	0.644	1.222	3.211	3.198	12.180

表 5 土壤养分和 pH 值与土壤微量元素的相关性

Table 5 Correlations between soil nutrients, pH and soil available microelements

土壤养分及 pH 值 Soil nutrient and pH	Cu	Zn	Fe	Mn
有机质 Organic matter	0.139**	0.124**	0.020	0.301**
碱解氮 Available N	0.139**	0.139**	0.013	0.243**
有效磷 Available P	0.499**	0.252**	0.053**	0.194**
速效钾 Available K	0.338**	0.229**	0.020	0.277**
pH	-0.019	-0.009	-0.070**	-0.024

注: * 表示 $P < 0.05$ 显著水平, ** 表示 $P < 0.01$ 显著水平。
Note: * significant difference at $P < 0.05$, and ** significant difference at $P < 0.01$.

有机质、碱解氮、有效磷和速效钾都与 Cu、Zn、Mn 呈极显著的正相关性,只有 Fe 与有机质、碱解氮

和速效钾的正相关性不强。说明这 4 种土壤养分含量越高的地区,有效态微量元素的含量就越高。由此可知,可以通过人为增加土壤养分的施入量,从而改变土壤的理化性状,最终达到提升土壤微量元素的目的。土壤 pH 值与 4 种微量元素均呈负相关性,其中 Fe 呈极显著的负相关性,说明 pH 值越高的地区,土壤中 4 种微量元素的含量越低。

4 结 论

- 1) 域法识别异常值既保证了样本信息,又保证了分析结果的可靠性。处理后的数据峰度、偏度值变化较大,均有向 0 值靠拢的趋势,说明处理后的数据更接近于正态分布,保证了后续研究的可靠性。统计性描述显示,徐水县土壤 4 种微量元素的有效态含量均为中等变异强度,其中以有效锌的变异系数最大,为 58.75%,变异系数从大到小排列依次为 Zn > Cu > Fe > Mn。
- 2) 徐水县土壤有效态铜、锌、锰的最优半方差

模型为高斯模型,土壤有效态铁的最优模型为线性模型。4 种有效态微量元素的块金效应值在 12.02% ~ 49.97% 之间,其中,有效态铜和铁具有强烈的空间相关性,有效态锌和锰具有中等的空间相关性;4 种微量元素的变程在 0.01 ~ 0.37 km 之间。

3) 徐水县土壤有效态微量元素空间分布规律:有效铜基本呈现西北与东南含量高而中部较低的趋势;有效锌和有效铁大体呈现岛状分布;有效锰的空间分布基本呈现由西北方向向东南方向递减的规律。基于 GIS 技术,生成各微量元素普通 Kriging 插值图,以及各分级的面积与比例,除有效铜含量处于偏高水平,其余 3 种微量元素均处于中等含量水平。

4) 土壤各养分含量对微量元素有重要影响。土壤中 Cu、Zn、Mn 均与有机质、碱解氮、有效磷和速效钾呈极显著的正相关性。4 种微量元素均与 pH 值呈现负相关关系,表明随着 pH 值的升高,各微量元素含量均呈下降趋势。其中 Fe 与 pH 值呈现极显著负相关关系,有相关研究发现,在 pH 值升高使土壤呈碱性的时候,Fe 离子逐渐转化为氢氧化物或氧化物,从而溶解度降低,使有效 Fe 含量减小。

参 考 文 献:

[1] 董国涛,张爱娟,罗格平,等.三工河流域绿洲土壤微量元素有效含量特征分析[J].土壤,2009,41(5):726-732.
[2] 牟金明,王明辉,宋 日,等.作物根茬留田对土壤有效微量元素动态的影响[J].吉林农业科学,1998,(1):59-61.
[3] 陆景陵.植物营养学(上)[M].北京:中国农业大学出版社,2001.
[4] 王红娟.我国北方粮食主产区土壤养分分布特征研究[D].北京:中国农业科学院,2007.
[5] 庞 凤,李廷轩,王永东,等.土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):114-120.

[6] 秦占飞,常庆瑞.县域土壤养分空间变异分析—以蒲城县为例[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):30-35.
[7] 王丹丹,岳书平,林芬芳,等.东北地区旱地土壤全氮空间变异性对幅度拓展的响应[J].土壤学报,2012,49(4):625-635.
[8] 刘世梁,郭旭东,连 纲,等.黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析—以横山县为例[J].水土保持学报,2005,19(5):105-108.
[9] 张世熔,孙 波,赵其国,等.南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J].土壤学报,2007,44(5):885-892.
[10] 王志刚,赵永存,黄 标,等.采样点数量对长三角典型地区土壤肥力指标空间变异解析的影响[J].土壤,2010,42(3):421-428.
[11] ZHU and H. S. LIN. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes[J]. Pedosphere, 2010,20(5):594-606.
[12] Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation[M]. New York: Oxford University Press. 1997.
[13] 赵永存,黄 标,孙维侠,等.张家港土壤表层铜含量空间预测的不确定性评价研究[J].土壤学报,2007,44(6):974-981.
[14] 雷能忠,王心源,蒋锦刚,等.基于 BP 神经网络插值的土壤全氮空间变异[J].农业工程学报,2008,24(11):130-134.
[15] 潘瑜春,刘巧芹,阎波杰,等.采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响[J].土壤通报,2012,41(2):257-262.
[16] 中华人民共和国农业部. NY/T 1634 - 2008. 耕地地力调查与质量评价技术规程[S]. 北京:中国农业出版社,2008.
[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
[18] 刘付程,史学正,于东升,等.基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究—以土壤全氮制图为例[J].土壤学报,2004,41(1):20-27.
[19] 刘贤赵,衣华鹏.渭北旱塬土壤水分空间变异性[J].山地学报,2004,22(5):521-527.
[20] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1994,58(5):1501-1511.
[21] 宋丰骥,常庆瑞,钟德燕,等.黄土丘陵沟壑区土壤微量元素空间变异特征及其影响因素[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):36-42.

(上接第 37 页)

[14] 张 娜,张永强,李大平,等.滴灌量对冬小麦光合特性及干物质积累过程的影响[J].麦类作物学报,2014,34(6):795-801.
[15] 程裕伟,马富裕,冯治磊,等.滴灌条件下春小麦耗水规律研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):112-117.
[16] 王冀川,徐雅丽,高 山,等.滴灌条件下根区水分对春小麦根系分布特征及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):21-26.
[17] 樊引琴,蔡焕杰,王 健,等.冬小麦田棵间蒸发的试验研究[J].灌溉排水,2000,19(4):1-4.
[18] Lei H M, Yang D W. Interannual and seasonal variability in evapo-

transpiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(4):581-589.
[19] 孙宏勇,刘昌明,张喜英,等.华北平原冬小麦田间蒸散与棵间蒸发的变化规律研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):62-64.
[20] 于利鹏,黄冠华,刘海军,等.喷灌冬小麦耗水与棵间蒸发试验[J].中国农业科学,2009,42(9):3179-3186.
[21] 王幼奇,樊 军,邵明安.陕北黄土高原雨养区谷子棵间蒸发与田间蒸散规律[J].农业工程学报,2010,26(1):6-10.