

江西省耕地土壤有效态微量元素含量空间变异特征及其影响因素^{*1}

江叶枫^{1, 2} 钟珊^{1, 2} 饶磊^{1, 2} 孙凯^{1, 2} 郭熙^{1, 2*}

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 江西南昌 330045;

2. 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 江西南昌 330045)

【摘要】:采用 Pearson 相关性分析、Spearman 相关性分析、偏相关性分析、方差分析和地统计学方法, 对江西省耕地表层(0~20cm)土壤有效态 B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 等 5 种微量元素含量空间变异特征及其影响因素进行研究。结果表明:研究区土壤有效态 B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 总体处于中等以上水平, B 表现为强变异性, 其他有效态元素均呈中等变异性。空间结构方面, B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 的块金效应值依次为 15.68%、12.09%、87.63%、77.98%和 25.27%, 表明 B 和 Cu 具有强烈的空间相关性, Zn 呈中等空间相关性, 而 Fe 和 Mn 空间相关性较弱。空间分布方面, 土壤有效 B 含量表现出“两边低、中间高”的空间分布趋势, Fe、Cu、Zn 呈现出较为平滑的空间分布格局, Mn 在空间分布上并无明显规律。Pearson 相关性分析和偏相关性分析表明 5 种微量元素之间存在一定的耦合关系但并无直接相关性。Spearman 相关性分析和方差分析结果表明, 高程、坡度、pH、有机质、全氮、成土母质、地貌类型、土壤类型、灌溉能力、秸秆还田方式和常年耕作制度对 5 种微量元素含量的空间变异影响显著($P < 0.05$)。结果可为江西省测土配方施肥卡制定与耕地资源利用与管理及优质高产种植提供可靠参考依据。

【关键词】:江西省; 微量元素; 空间变异; 相关性分析; 偏相关性分析; 影响因素

【中图分类号】:S158 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)05-1159-11

DOI:10.11870/cjlyzyhj201805023

土壤微量元素是相对土壤中大量元素而划分的, 是土壤营养元素的重要组成部分, 也是农作物生长发育所必须的影响因素之一^[1, 2]。尽管农作物对微量元素的需求量较低, 但任何一种微量元素过量与缺乏均会严重影响种植物的生长发育, 进而影响到人们的身体健康^[3, 4]。受成土过程因素与人为因素的共同作用, 一定区域、尺度与时间内土壤微量元素的分布均具有高度的空间异质性, 这种空间异质性是在不同区域、尺度与时间内调节微量元素循环及精准施肥的基础^[5, 6]。因此, 准确描述区域内土壤微量元素的空間变异特征, 明确其空间涵养与运移的影响因素, 对调节微量元素循环、改善种植物产量与品质以及精准施肥配方卡的制定均具有重要意义。

¹收稿日期:2017-07-10; 修回日期:2017-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41361049); 江西省自然科学基金项目(20122BAB204012); 江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)

作者简介:江叶枫(1994~), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤环境与系统模拟方面研究。E-mail:jiangyf0308@163.com

***通讯作者** E-mail:xig435@163.com

在土壤微量元素的空间变异研究中，地统计学已经被证实是一种科学有效且直观明了的方法，被广泛应用于区域化变量的空间变异特征分析^[7, 8]。研究内容可分为微量元素全量与有效态两类^[9]。但由于全量仅能表示土壤中微量元素的贮量指标，并不能代表其有效性，因此研究相对较少^[10]；而有效态微量元素越来越受到国内外研究学者的关注与重视。如陶晓秋^[11]评价了西南植烟区土壤有效态微量元素含量状况及分布规律。吴彩霞等^[12]探讨了不同草地土壤有效态微量元素含量特征及其影响因素，海拔和植被类型是影响土壤有效态微量元素空间变异的重要因素。尹川等^[13]分析了林地土壤侵蚀与土壤有效态微量元素空间变异的相互关系。当前研究多集中在植烟区、草地和林地土壤微量元素有效态，有关耕地土壤微量元素有效态的研究相对较少。国内一些研究学者也对耕地土壤有效态微量元素进行了一些研究，其研究发现较其他土地利用方式而言，由于受秸秆还田随机性、农户施肥随意性和耕作方式不确定性的影响，导致耕地土壤有效态微量元素空间异质性更加明显^[9, 14, 15]。研究耕地土壤有效态微量元素的空间变异特征及其影响因素对于快速了解耕地土壤有效态微量元素含量、种植物缺素症和耕地资源综合利用具有十分迫切的意义。

近几十年来，江西省土地利用剧烈变化，如“土地复垦”工程、“退耕还湖还草”工程和“土地整理”工程等势必会对土壤微量元素及土地质量造成影响^[16~18]。该区已有研究多集中在土壤大量元素空间变异特征方面，且集中在县域以及小流域尺度^[19, 20]，涉及省域尺度的并不多见^[21]。该研究基于江西省 2012 年在全省范围内推广测土配方技术采集的 16582 个样点，以耕地土壤有效 B、Cu、Fe、Mn、Zn5 种微量元素为研究对象，运用 Pearson 相关性分析、Spearman 相关性分析、单因素方差分析、地统计学和 GIS 技术系统分析了江西省耕地土壤有效态微量元素空间变异特征及其影响因素，以期江西省耕地土壤环境保护、科学施肥体系建立和土地整理复垦工程提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区位于中国东南部(24° 29' 14" ~30° 04' 41" N, 113° 34' 36" ~118° 28' 58" E)，面积为 1.69×105km²，人口 4566 万，辖 11 个地级行政区、100 个县级行政区、1 个国家级新区，是我国长江中下游地区农业人口较为密集的农业区，也是我国 2 个从未间断向外输出粮食的省份之一。年平均气温 20~30℃，雨量充沛，年均降水量 1340~2000mm，为亚热带湿润气候。该区东、西、南三面环山，中部丘陵和河谷平原交错分布，北部则为鄱阳湖平原。土地利用类型以林地、耕地和园地为主(图 1(a))。成土母质主要包括河湖沉积物、酸性结晶岩类风化物、红砂岩类风化物和第四纪红色黏土等^[21]。土壤类型有水稻土、红壤、黄褐土、石灰土和潮土等 6 个土类，含 9 个亚类，22 个土属^[21]。常年耕作制度主要包括水稻、玉米、小麦、棉花、油菜、花生和水旱轮作等 10 余种。植被以常绿阔叶林为主，具有典型的亚热带森林植物群落。

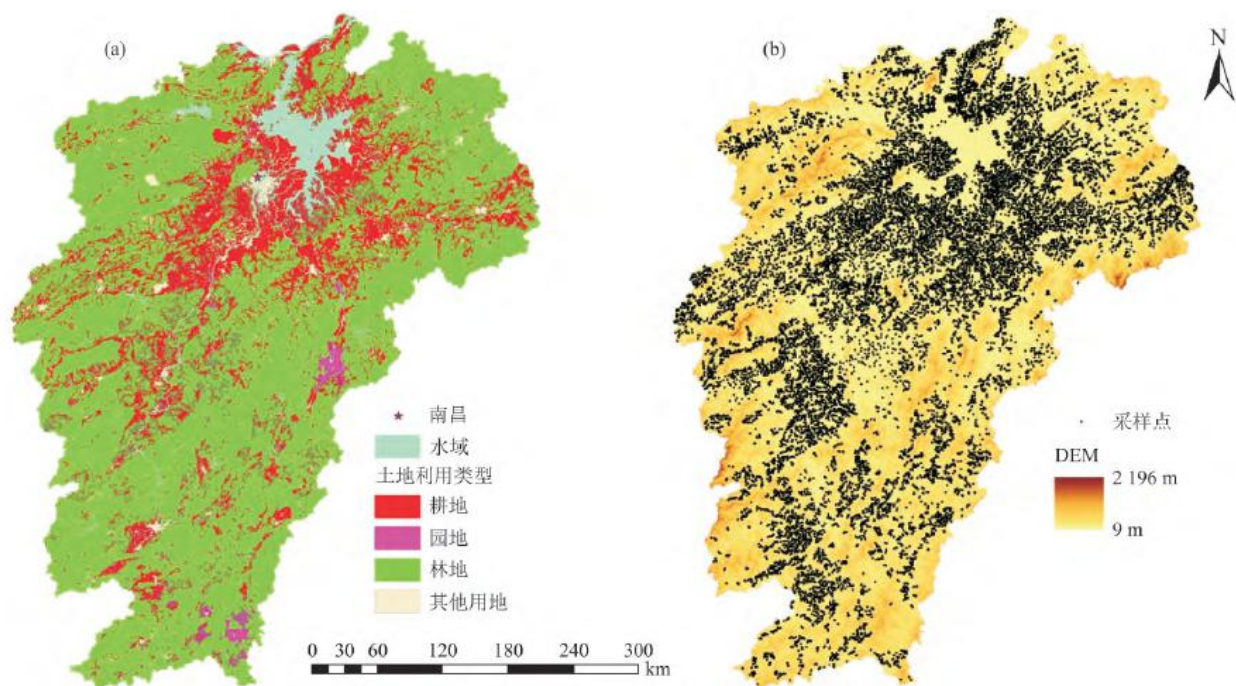


图 1 江西省土地利用类型图和样点分布图

Fig. 1 Land-use type map and soil sampling site distribution map of Jiangxi Province

1.2 土壤采样

于 2012 年 11 月至 2013 年 2 月，按照《耕地地力调查与质量评价技术规程》和《测土配方施肥技术》，在农作物收获后采用多点混合的方法采集耕地表层(0~20cm)土壤样品 16582 个(图 1(b))。每个样点采集样品 1kg，并详细记录该采样点的 GPS 坐标、土壤类型、成土母质、秸秆还田方式等信息，土壤样品经过自然风干后，带回实验室磨碎过筛。土壤有效铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)采用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法测定，土壤有效硼(B)采用沸水浸提-姜黄素比色法测定；土壤有机质采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)油浴加热测定；全氮采用 FossKjeltec8400 全自动凯氏定氮仪测定；土壤 pH 采用电位法测定；具体方法见参考文献^[22]。实验全过程采样国家土壤成分分析标准物质(GBW-07401)进行分析质量控制。

1.3 有效态微量元素含量分级

参考第二次土壤普查时期土壤有效态微量元素的分级标准和中国科学院微量元素组的土壤有效态微量元素评价标准，并结合当前国内外已有研究结果和江西省实际情况^[23~25]，制定了江西省耕地土壤 5 种有效态微量元素的丰缺状况评价标准(表 1)。

表 1 土壤有效态微量元素含量分级标准(mg/kg)

等级	B	Cu	Fe	Mn	Zn
极高	>1.0	>3.0	>60.0	>40	>4.0
较高	0.6~1.0	1.0~3.0	10.0~60.0	20~40	2.0~4.0

中等	0.3~0.6	0.5~1.0	4.5~10.0	10~20	1.0~2.0
较低	0.15~0.3	0.2~0.5	2.5~4.5	5~10	0.5~1.0
极低	<0.15	<0.2	<2.5	<5	<0.5

1.4 数据处理

本文采用拉依达准则法对采样点数据的土壤有效态微量元素含量进行异常值处理(3 倍的标准差)^[26]，剔除异常值后的土壤有效 B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 的采样点为 16066、16522、16396、16518 和 16234 个，相关研究均采用处理后的数据。运用 IBMSPSSStatistics22 进行 5 中微量元素有效态含量进行描述性统计、Pearson 相关性分析、Spearman 相关性分析和单因素方差分析。空间变异用 ArcGIS10.2 生成数据图层后再用 GS+7.0 进行空间结构分析。最后用 ArcGIS10.2 中地统计模块中普通克里格法插值生成全省 5 种有效态微量元素的空间分布图。

在 Spearman 相关性分析和单因素方差分析中^[27, 28]，把高程分为 5 组:0~30m、30~60m、60~90m、90~120m、>120m；坡度分为 3 组:零坡度、0~1°、>1°；pH 分为 3 组:pH<5、5<pH<5.5、pH>5.5；有机质分为 4 组:0~20、20~30、30~40、>40g/kg；全氮分为 4 组:0~1.0、1.0~1.5、1.5~2.0、>2.0g/kg；成土母质分为 10 组:第四纪红色黏土、河湖沉积物、红砂岩类风化物、泥质岩类风化物、石英岩类风化物、酸性结晶岩类风化物、碳酸岩类风化物、下蜀系黄土状物、紫色岩类风化物；地貌类型分为 3 组:平原、丘陵、山地；秸秆还田方式分为 3 组:不还田、翻压还田、覆盖还田；灌溉能力分为 3 组:不满足、基本满足、充分满足；土壤类型分为 6 组:水稻土、红壤、黄褐土、石灰土、潮土；常年耕作制度分为 5 种:一季旱地、两季旱地、水旱轮作、一季水田、两季水田；对分组的变量按照《耕地地力调查与质量评价技术规范》分别进行赋值。

2 结果与分析

2.1 土壤有效态微量元素含量的描述性统计特征

参考土壤有效态微量元素含量分级评价标准(表 1)和研究区土壤有效态描述性统计分析结果(表 2)。研究区土壤有效 B 含量均值达到中等水平；有效 Cu 含量极丰富，均值含量达到极高水平；其次是土壤有效 Fe 和 Zn，均值含量达到较高水平。从表 2 可以看出，5 种微量元素含量差异较大，均值由大到小依次为:Mn>Fe>Cu>Zn>B。各微量元素含量的变异系数范围在 47.87%~105.26%之间，B 表现为强变异程度，其他元素均呈中等变异性。数据正态性检验结果表明有效 Zn 为正态分布，B、Cu 和 Mn 呈偏正态分布，Fe 符合近似正态分布。

表 2 研究区土壤有效态微量元素含量的描述性统计特征

名称	样本数	最小值 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)	偏度	峰度	分布类型
B	16 066	0.01	2.28	0.38	0.40	105.26	1.88	0.04	对数正态
Cu	16 396	0.42	8.02	3.05	1.46	47.87	0.56	-0.01	对数正态
Fe	16 522	0.85	30.49	11.34	6.21	54.76	0.15	-0.86	近似正态

Mn	16 234	8.10	82.20	25.16	12.69	50.44	1.72	0.04	对数正态
Zn	16 518	0.01	6.10	2.20	1.28	58.18	0.53	0.04	正态

2.2 空间结构分析

描述性统计分析结果表明 5 种微量元素均呈现出不同的变异程度，但其只能描述其含量变化的总体趋势，不能较好地揭示其空间结构特征^[29]。运用 GS+软件对研究区土壤有效态微量元素数据进行空间结构分析。5 种微量元素的半变异函数拟合模型及其相关参数见表 3。从表 3 可以看出，B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 分别为指数、指数、线性、线性和球状模型，其拟合度范围为 0.334～0.905，这说明最佳理论模型能较好地揭示 5 种微量元素的空间结构特征。B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 的块金效应值依次为 15.68%、12.09%、87.63%、77.98%和 25.27%，表明 B 和 Cu 具有强烈的空间相关性，Zn 呈中等空间相关性，而 Fe 和 Mn 的空间相关性较弱。块金效应值为随机性部分引起的空间变异占系统总变异的比例^[21, 30]，这表明 B、Cu 和 Zn 主要受随机性因素影响，而 Fe 和 Mn 主要受结构性因素影响。从变程可以看出，B、Cu 和 Zn 的空间自相关范围较小，Fe 和 Mn 的空间自相关范围较大。

表 3 土壤有效态微量元素的半变异函数参数

名称	模型	块金值	基台值	块金效应(%)	变程(km)	拟合度	残差
B	指数	0.274	1.748	15.68	33.000	0.730	0.005
Cu	指数	0.320	2.646	12.09	32.100	0.772	0.009
Fe	线性	0.326	0.372	87.63	314.886	0.334	5.337E-03
Mn	线性	281.126	360.497	77.98	314.886	0.640	44.130
Zn	球状	102.360	405.000	25.27	78.500	0.905	49.455

2.3 土壤有效态微量元素与影响因素的 Spearman 相关性分析

对研究区 5 中土壤有效态微量元素与影响因素进行 Spearman 相关性分析。从表 4 可以看出，高程与 B、Cu、Fe、Mn 和 Zn 相关性不显著，这说明同一阶段的高程土壤有效态微量元素含量变异较小，未达到显著水平。坡度与 Fe 呈显著负相关外，这是因为在具有一定坡度的地形上，植被覆盖率较低，坡度越大，土壤有效 Fe 含量越容易流失^[31]。与其他微量元素相关性均不显著，这与以往研究有所不同^[4, 13]，其原因可能是土壤中有效态微量元素的影响因素较多，而坡度对其有效性并不能起到主导作用，其相关性被主导因素所掩盖，因此其相关性未达到显著水平。pH 与 Mn 相关性未达到显著水平，与 B 和 Fe 呈显著的负向相关性，在 pH 较低处，有效 B 容易被土壤固定，Fe 最主要的形态为 Fe(OH)3，而 Fe(OH)3 是难溶性化合物，pH 越高，Fe 的溶度越低^[31]；与 Cu 和 Zn 呈显著的正向相关性，这与张会民等^[32]研究结果一致。土壤有机质与 B 和 Fe 正向相关关系显著，大量研究表明^[4, 7, 9]，土壤有机质对提高微量元素有效性具有良好的促进作用，但与 Cu 和 Mn 表现为负向相关性，这表明局部范围内土壤有机质增加对微量元素的增加具有促进作用，但大幅度提高土壤有机质含量有可能对微量元素有一定的负作用。秸秆还田方式与全氮对微量元素与土壤有机质类似，这主要是因为全氮与土壤有机质在耕地土壤中具有很强的相关性^[33, 34]，而秸秆还田方式也主要是通过增加土壤中碳元素含量来影响微量元素的有效性。成土母质与 Fe、Cu 和 Mn 相关系数均大于 0(P<0.05)，表明 Fe、Cu 和 Mn 含量高低依次为:紫色岩类风化物>下蜀系黄土状物>碳酸岩类风化物>酸性结晶岩类风化物>石英岩类风化物>

泥质岩类风化物>红砂岩类风化物>河湖沉积物>第四纪红色黏土。成土母质与 B 相关系数小于 0 ($P<0.01$), 含量大小顺序与 Fe、Cu 和 Mn 相反。土壤类型对 5 种微量元素含量相关性均显著 ($P<0.05$), 不同土壤类型反映土壤的不同发育程度, 决定着微量元素起始含量, 因此对微量元素影响显著^[35]。灌溉能力与 B、Fe、Cu、Zn 呈显著地正向相关关系, 表明灌溉条件越好, 微量元素含量越高, 与 Mn 相关性未达到显著水平。常年耕作制度 B、Fe 和 Mn 相关性达到 $\alpha=0.05$ 置信区间的显著水平, 常年耕作制度主要通过施肥、耕作强度和水分含量等影响微量元素的有效性。地貌类型与 B、Fe 和 Cu 相关性显著, 与 Zn 和 Mn 相关性不显著。

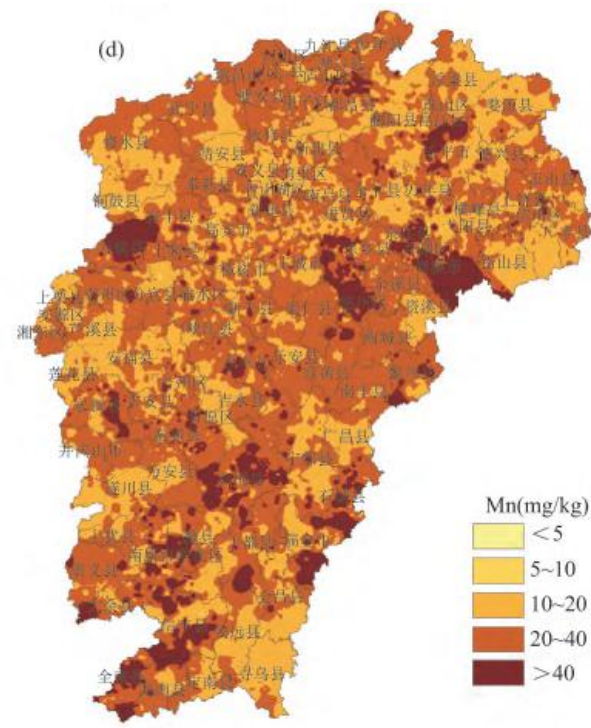
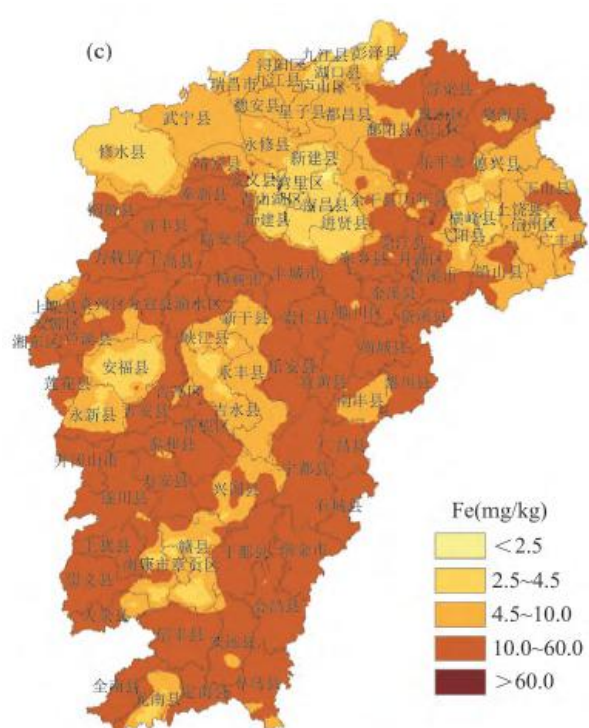
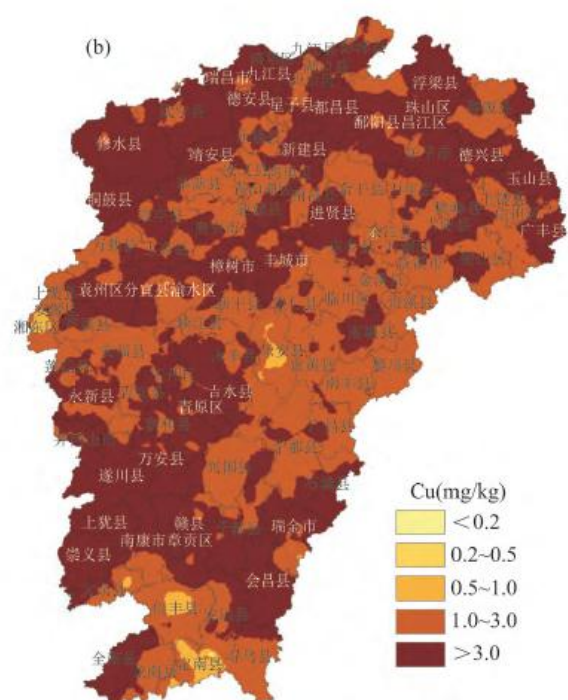
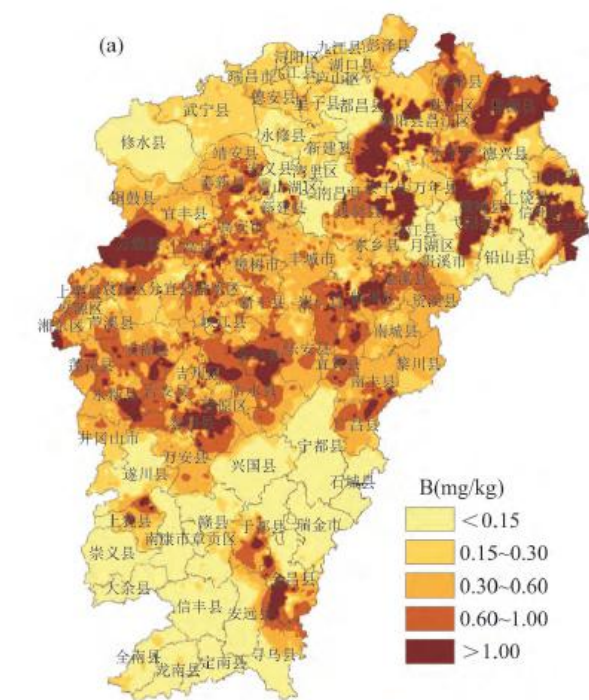
表 4 土壤有效态微量元素与影响因素 Spearman 相关性分析

因子类型	影响因子	B	Cu	Fe	Mn	Zn
地形因素	高程	-0.013	-0.015	-0.006	0.006	-0.002
	坡度	-0.006	0.014	-0.020 **	-0.001	-0.007
	pH	-0.044 **	0.055 **	-0.076 **	-0.003	0.027 **
土壤化学因素	有机质	0.119**	-0.020 **	0.081 **	-0.042 **	0.013
	全氮	0.131 **	-0.021 **	0.077 **	-0.045 **	0.010
	成土母质	-0.063 **	0.018*	0.059 **	0.029 **	-0.001
成土因素	地貌类型	-0.039 **	0.015*	0.085 **	0.007	-0.002
	土壤类型	0.020*	-0.060 **	0.140 **	-0.036**	0.017*
	灌溉能力	0.015*	0.042 **	0.042 **	-0.009	0.018*
随机性因素	桔杆还田方式	0.061 **	-0.021 **	0.085 **	-0.052**	-0.002
	常年耕作制度	0.030 **	-0.010	-0.043 **	0.065 ”	-0.014

注:*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$.

2.4 空间分布格局分析

在空间结构分析的基础上, 为了更加直观地描述土壤有效态微量元素含量的空间分布状况, 运用 ArcGIS 地统计模块中普通克里格法对研究区土壤有效态元素进行空间插值。从图 2(a) 可以看出, 土壤有效 B 空间分布的总体分布趋势“两边低、中间高”的总体趋势。其高值区域主要分布在宜春市万载县, 上饶市广丰县、弋阳县、婺源县和余干县, 表明这些区域 B 元素含量丰富; 低值区域主要分布在赣州市、九江市和上饶市铅山县与上饶县, 说明这些区域存在潜在缺 B 的可能。有效 Cu 总体没有明显的规律(图 2(b)), 高值区域主要分布在赣州市中部、上饶市南部以及九江市西北部, 其含量分布在较高水平(1.0~3.0mg/kg)与极高水平(>3.0mg/kg), 存在富集趋势。有效 Fe 空间分布较为平滑(图 2(c)), 大部分区域有效 Fe 含量为中等水平(4.5~10.0mg/kg)或较高水平(10.0~60.0mg/kg)。有效 Mn 空间分布异质性较为明显(图 2(d)), 空间分布为突变而非渐变, 高值区域主要分布在贵溪市、万载县和临川区, 绝大多数区域有效 Mn 处于中等偏上水平(10~40mg/kg)。有效 Zn(图 2(e))与有效 Fe 空间分布有一定的相似, 存在平滑效应, 绝大部分区域分布在较低水平(0.5~1.0mg/kg)或中等水平(1.0~2.0mg/kg), 低值区域主要分布在宜春市。



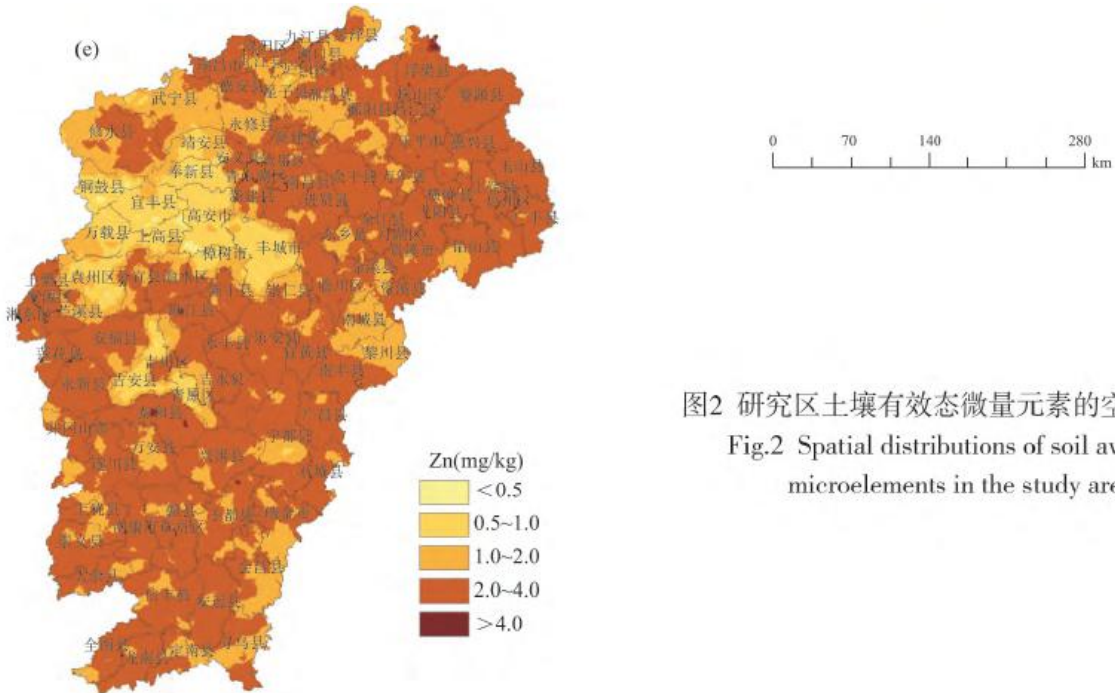


图2 研究区土壤有效态微量元素的空间分布
Fig.2 Spatial distributions of soil available microelements in the study area

从 Pearson 相关性分析可以看出(表 5)，除有效 Cu 与 Fe、Cu 与 Zn 之间无显著相关外，其他微量元素之间两两相关性均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验，达到极显著水平，但相关系数相对较小，这可能与本文研究尺度与采样数量有关，同时也说明不同元素之间的关系存在差别，这与元素的性质及其在地质体中元素的共生等因素关系较为密切，这与其他研究学者一致^[36]。但从空间分布可以看出，5 种微量元素在空间分布上并没有表现出较大相关性，仅 Cu、Fe 和 Zn 三者之间空间分布有一定的相似性。为了进一步揭示 5 中微量元素之间的相关与否，对 5 中微量元素进行偏相关分析(在分析两个单独元素的相关性时，控制其他 3 个元素)。从偏相关性分析结果可以看出(表 5)，5 中微量元素相关系数较小，且相关性未达到显著性水平，与空间分布结果较为一致。

表 5 土壤有效态微量元素之间的相关性分析

相关性	指标	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Pearson	B	1.000				
	Cu	-0.017*	1.000			
	Fe	0.084 **	-0.002	1.000		
	Mn	-0.025 **	-0.041 **	0.055 **	1.000	
	Zn	0.030**	-0.014	-0.078**	0.043 **	1.000
偏相关	B	1.000				
	Cu	-0.018	1.000			
	Fe	0.088	0.001	1.000		
	Mn	-0.033	-0.041	0.061	1.000	
	Zn	0.038	-0.012	-0.084	0.048	1.000

注：* 表示 $P<0.05$ ；**表示 $P<0.01$ 。

2.5 土壤有效态微量元素空间变异的影响因素

结合前人研究结果与本文相关性分析结果, 本文主要就地形因素(高程和坡度)、土壤化学因素(pH、有机质和全氮)、成土因素(成土母质、地貌类型和土壤类型)以及随机性因素(灌溉能力、秸秆还田方式和常年耕作制度)对土壤有效态空间变异的影响进行分析。

从地形因素的方差分析概率水平可以看出(表 6), 高程对土壤有效 B、Fe 和 Zn 空间变异影响显著($P < 0.01$), 这是因为不同高程主要通过影响水热条件的再分配过程影响土壤微量元素的空间分布^[37], 与 Spearman 相关性分析结果不一致, 其原因可能是方差分析的重分组扩大了局部范围的影响程度, 在整体上揭示了 B、Fe 和 Zn 的空间变异状况。坡度对土壤有效 B、Cu、Zn 和 Mn 空间变异影响不显著, 这可能与江西省绝大部分耕地分布在零坡度或平原地区有关。从土壤化学因素的方差分析结果可以看出(表 6), pH 对 5 种微量元素空间变异影响均达到显著水平($P < 0.05$), 与前人研究结果一致^[7, 9]; 大量研究表明^[4, 31], pH 会明显影响微量元素有效性、存在形态与迁移转化。有机质对 5 种微量元素空间变异影响也达到显著水平($P < 0.05$), 这是因为在有机质分解的过程中会产生有机酸, 从而加大了微量元素的溶解性, 使得微量元素含量上升^[38]; 另一方面, 有机质过多的分解会使得土壤中溶液酸性增大, 会限制微生物活性, 也直接影响土壤酶参与的生化反应速度和酶的离解状态, 甚至会降低微量元素的溶解性(表 4)。有机质转化与氮素循环关系密切, 江叶枫等^[21]研究表明, 江西省全氮与有机质的相关系数达到 0.779($P < 0.01$), 因此二者方差分析结果基本一致。

表 6 各影响因子组间土壤有效态微量元素含量方差分析概率水平

因子类型	影响因子	B	Cu	Fe	Mn	Zn
地形因素	高程	0.000	0.252	0.000	0.052	0.006
	坡度	0.139	0.160	0.036	0.965	0.559
土壤化学因素	pH	0.011	0.000	0.000	0.048	0.000
	有机质	0.000	0.017	0.000	0.000	0.021
	全氮	0.000	0.031	0.000	0.000	0.010
	成土母质	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
成土因素	地貌类型	0.000	0.005	0.000	0.001	0.008
	土壤类型	0.000	0.000	0.000	0.206	0.066
随机性因素	灌溉能力	0.547	0.000	0.000	0.001	0.000
	秸秆还田方式	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028
	常年耕作制度	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

成土因素的方差分析结果表明(表 6),成土母质对 5 种微量元素空间变异影响达到极显著水平($P<0.001$)。前人研究结果均表明^[6, 7, 9, 39]:微量元素在土壤中的含量主要取决于成土母质类型。地貌类型对 5 种微量元素空间变异影响也达到显著水平($P<0.05$),这可能与研究尺度有关。省域尺度下地貌类型多样,平原丘陵山区交替,沟壑纵横,耕地图斑破碎程度较高。土壤类型对土壤有效 B、Cu 和 Fe 空间变异影响极其显著($P<0.001$),研究表明,即使是同一土壤类型因发育于不同母质的微量元素含量也存在明显差异^[7];对 Mn 和 Zn 影响不显著。从随机性因素的方差分析结果可以看出(表 6),灌溉能力、秸秆还田方式和常年耕作制度均对微量元素空间变异影响显著。灌溉能力通过影响土壤含水量来影响微量元素空间变异,灌溉能力越好,土壤中能溶解的微量元素含量越高,反之越低。秸秆还田方式一方面增加了土壤有机质含量;另一方面也改变了微生物活性与土壤结构。常年耕作制度通过影响土地利用强度、复种指数、有机质累积与迁移和土壤管理条件的不同使得微量元素含量空间变异。

3 讨论

自然状态下,微量元素具有空间变异性,主要受结构性因素影响^[35]。研究区土壤有效态微量元素均属于较高水平,与第二次土壤普查时期均值^[39](B:7.3mg/kg, Cu:2.03mg/kg, Fe:73.3mg/kg, Mn:30.4mg/kg, Zn:6.67mg/kg)相比较, B、Cu 和 Zn 均值上升, Fe 和 Mn 均值下降。相似的结果也记录在有关其他区域的研究中^[35]。从表 3 可以看出,有效 B、Cu 和 Zn 主要受结构性因素影响,这与秦建成等^[6]研究结果一致。这是因为 B 是亲硅的, Cu 主要分布在黄铜矿中,而 Zn 主要以闪锌矿的形式存在于含锌矿物中,因此这三者必须在成土过程中被分解活化后才有可能被种植物吸收。而 Fe 和 Mn 主要受随机性因素影响, Fe 和 Mn 在耕地表面腐殖化有机表层的形成中具有不可或缺的作用,二者具有十分相似的作用,在大气中极易发生氧化还原反应,均属于敏感元素,这与植烟区和林地土壤等研究结果不一致^[11, 12],而与耕地土壤等研究结果一致^[9]。这在一定程度上反映出土壤微量元素对不同土地利用方式下敏感性存在差异性。

由于受随机性因素与结构性因素的共同影响,土壤有效态微量元素在空间分布上表现出一定地异质性。半方差分析结果显示(表 3):研究区 Fe 和 Mn 主要受随机性因素影响,而 B、Cu 和 Zn 主要受结构性因素影响。而廖琴等^[9]和高鹏等^[10]研究结果均表明,土壤微量元素空间变异受结构性因素影响,这与本研究结果有所不同。这是因为在长期的人为耕作活动中,耕地土壤微量元素的空间分布除了自然状态下的成土母质、土壤类型与地貌类型等结构性因素影响外,外源输入包括大气干湿沉降、种植物的残体分解与叶面淋洗、土壤施肥甚至是杀虫剂等随机性因素也会对微量元素的空间分布产生较大影响,进而使得土壤微量元素含量存在差异性^[40]。从表 6 可以看出,不同元素空间变异程度有所不同,但影响因素大致相同,这说明微量元素的累积与迁移存在着某种程度上的紧密联系。从 Pearson 相关分析与偏相关分析的结果(表 5)可以初步了解到:虽然 5 种微量元素之间无显著相关性,但存在着一种耦合关系,即两者的关系往往是通过第三种、第四种甚至是某两种元素作为介质从而建立关系。这与湖南烟区土壤微量元素偏相关分析结果有所不同^[41],该区大部分地区属于烟—稻轮作制,耕作制度较为单一;同时植烟区由于长期的实践已经形成了较为科学成熟的微肥施肥技术。而据江叶枫等^[21]研究结果表明,江西省耕地常年耕作制度相对复杂,化肥施用情况虽有所改善但不容乐观,耕地土壤人为因素干扰相对较大,这也在一定程度上削弱了微量元素间的相关性。

土壤微量元素在种植物生长发育、作物产量和品质方面已经引起了社会的广泛关注。如缺 B 会引起叶片粗糙、缺 Cu 会形成空穗、缺 Fe 使得幼叶失绿、缺 Mn 会导致叶片卷曲枯黄;而微量元素过量会导致生长期的改变,不利于种植物产量与品质的提升^[35, 42]。从表 2 和图 2 可知,江西省耕地土壤 5 种有效态微量元素均达到了中等以上甚至是极高水平,这可能与江西省近十年来土地利用与管理的优化、测土配方与秸秆还田技术的推广和农户科学施肥认知水平的提高密切相关;但与干旱区耕地土壤微量元素存在潜在缺乏的情况有所不同^[9, 14],该区呈现出表层富集现象,这反映出在自然条件一定的情况下,外源输入(主要是化肥投入水平)是影响微量元素空间变异的关键手段。针对该区的微量元素处于较高水平,目前实现微量元素循环的思路主要是弄清楚微量元素的来源、转化、有效性及其影响因素。一方面,精准施肥,在实践中针对江西省不同地区、不同种植物与不同产量水平合理使用肥料,努力实现发挥微肥增产效应,促进农业可持续发展。另一方面,由于江西省不同地区土壤有效态微量元素含量均达到较高水平,为防止种植物产量与品质的下降,应及时做好种植物的田间灌溉和排水工作。

4 结论

江西省耕地表层土壤有效态 B、Cu、Fe、Zn、Mn 含量处于中等以上水平, 存在一定的富集。有效态 B 高值区域主要分布在宜春市万载县, 上饶市广丰县、弋阳县、婺源县和余干县; 有效态 Fe、Cu 和 Zn 大部分区域处于中等或较高甚至是极高水平; 有效态 Mn 高值区域主要分布高值区域主要分布在贵溪市、万载县和临川区。高程、坡度、pH、有机质、全氮、成土母质、地貌类型、土壤类型、灌溉能力、秸秆还田方式和常年耕作制度对 5 种微量元素空间变异均有显著影响 ($P < 0.05$)。针对江西省耕地土壤有效态微量元素含量的具体情况, 为防止种植物微量元素过剩导致低质减产, 应该及时做好田间整治的工作和注意施用化肥的形态。

参考文献:

- [1] YE H, SHEN C, HUANG Y, et al. Spatial variability of available soil microelements in an ecological functional zone of Beijing [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(2) :1—12.
- [2] 刘洪来, 杨丰, 黄顶, 等. 农牧交错带草地开垦对土壤有效态微量元素的影响及评价 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(7) : 155—160.
- LIU H L, YANG F, HUANG D, et al. Effect and evaluation of soil trace elements after grassland converted into cropland in agropasturage ecotone of northern China [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7) : 155—160.
- [3] 张晓霞, 李占斌, 李鹏. 黄土高原草地土壤微量元素分布特征研究 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(5) : 45—48.
- ZHANG X X, LI Z B, LI P. Study on distribution characteristics soil trace elements of grass land in the loess plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5) : 45—48.
- [4] 姜悦, 常庆瑞, 赵业婷, 等. 秦巴山区耕层土壤微量元素空间特征及影响因子——以镇巴县为例 [J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(6) : 50—57.
- JIANG Y, CHANG Q R, ZHAO Y T, et al. Spatial characteristics and factors affecting topsoil trace elements in Qinling—Bashan Mountainous area: a case study of Zhenba County [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(6) : 50—57.
- [5] LI Q, ZHOU J, ZHANG Y, et al. Study on spatial distribution of soil available microelement in Qujing tobacco farming area, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(1) :185—191.
- [6] 秦建成, 罗云云, 魏朝富, 等. 基于 ArcGIS 的彭水县烟区土壤有效态微量元素丰缺评价 [J]. 土壤学报, 2006, 43(6) : 892—897.
- QIN J C, LUO Y Y, WEI C F, et al. ArcGIS-based abundance evaluation of available microelements in tobacco soil in Pengshui County [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6) : 892—897.
- [7] 史文娇, 汪景宽, 魏丹, 等. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例 [J]. 土壤学报, 2009, 46(2) : 342—347.
- SHI W J, WANG J K, WEI D, et al. Spatial variability of soil trace elements in black soil region of south Heilongjiang

Province and its affecting factors: a case study of Shuangcheng city [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2) : 342—347.

[8] BURGOS P, MADEJON E, PEREZ-DE-MORA A, et al. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element contaminated soil before and after remediation [J]. *Geoderma*, 2006, 130(1—2) : 157—175.

[9] 廖琴, 南忠仁, 王胜利, 等. 干旱区绿洲农田土壤微量元素有效态含量空间分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2011, 24(3) : 273—280.

LIAO Q, NAN Z R, WANG S L, et al. Spatial distribution characteristics of available microelement contents in oasis cropland soils of arid areas [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(3) : 273—280.

[10] 高鹏, 付同刚, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地小流域表层土壤微量元素的空间异质性 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8) : 2133—2139.

GAO P, FU T G, WANG K L, et al. Spatial heterogeneity of surface soil trace elements in a small catchment in Karst peak cluster depression area of South China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8) : 2133—2139.

[11] 陶晓秋. 四川西南烟区土壤有效态微量元素含量评价 [J]. *土壤*, 2004, 36(4) : 438—441.

TAO X Q. Evaluation of microelement contents of tobacco soils in southwest Sichuan [J]. *Soils*, 2004, 36(4) : 438—441.

[12] 吴彩霞, 傅华, 裴世芳, 等. 不同草地类型土壤有效态微量元素含量特征 [J]. *干旱区研究*, 2008, 25(1) : 137—144.

WU C X, FU H, PEI S F, et al. Study on the contents of available trace elements in different grassland soils on the western slope of the Helan Mountain [J]. *Arid Zone Research*, 2008, 25(1) : 137—144.

[13] 尹川, 季宏兵, 魏晓, 等. 黔北坡面林地土壤侵蚀与微量元素迁移研究 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6) : 24—29.

YIN C, JI H B, WEI X, et al. Study on the relationships between soil erosion and trace elements migration on sloping land in Zunyi region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6) : 24—29.

[14] 臧振峰, 南忠仁, 王胜利, 等. 黑河中游绿洲农田土壤微量元素含量的空间分布特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(5) : 190—195.

ZANG Z F, NAN Z R, WANG S L, et al. Spatial distribution characteristics of trace elements contents in oasis cropland soil in middle reaches of Heihe river [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(5) : 190—195.

[15] 郭军玲, 吴士文, 金辉, 等. 农田土壤微量元素含量的空间变异特征和影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2010,

24(1) :145—149.

GUO J L, WU S W, JIN H, et al. Spatial variability and controlling factors of microelements contents in farmland soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1) : 145—149.

[16] 蔡海生, 赵建宁, 曾珩, 等. 江西省土地开发整理工程类型区划分研究 [J]. 中国土地科学, 2011, 25(3) : 38—44.

CAI H S, ZHAO J N, ZENG H, et al. Categorizing the land reconsolidation zones in Jiangxi Province [J]. China Land Science, 2011, 25(3) : 38—44.

[17] 周玉伟. 损毁土地复垦潜力及效益评价研究 [D]. 江西财经大学, 2012.

[18] 刘苑秋, 王芳, 柯国庆, 等. 江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(4) : 885—890.

LIU Y Q, WANG F, KE G Q, et al. Effects of converting cultivated land into forest land on the characteristics of soil organic carbon in limestone mountain area in Ruichang, Jiangxi [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4) : 885—890.

[19] 江叶枫, 孙凯, 郭熙, 等. 基于环境因子和邻近信息的土壤属性空间分布预测 [J]. 环境科学研究, 2017, 30(7) : 1059—1068.

JIANG Y F, SUN K, GUO X, et al. Prediction of spatial distribution of soil properties based on environmental factors and neighbor information [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(7) : 1059—1068.

[20] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局 [J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1) : 64—67.

CHENG X F, SHI X Z, YU D S, et al. Spatial variance and distribution of total nitrogen and organic matter of soil in Xingguo county of Jiangxi, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(1) : 64—67.

[21] 江叶枫, 郭熙, 孙凯, 等. 江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 [J]. 环境科学, 2017, 38(9) : 3840—3850.

JIANG Y F, GUO X, SUN K, et al. Spatial variability of farmland soil C /N ratio of Jiangxi Province and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2017, 38(9) : 3840—3850.

[22] 鲁如坤. 土壤农化分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

LU R K. Analysis method of Soil Agricultural Chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 1999.

[23] 张小桐, 张瑞芳, 王红, 等. 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 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1) : 74—80.

ZHANG X T, ZHANG R F, WANG H, et al. Spatial variability and contributing factors of soil available micronutrients at county level—A case study at Xushui County [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1) : 74—80.

[24] KUMPIENE J, BERT V, DIMITRIOU I, et al. Selecting chemical and ecotoxicological test batteries for risk assessment of trace element-contaminated soils (phyto) managed by gentle remediation options (GRO) [J]. Science of the Total Environment, 2014, 496: 510—522.

[25] 魏向文, 温永煌, 翁善兰, 等. 江西土壤微量元素丰缺状况的研究 [J]. 江西农业科技, 1983, 12: 12—15.

WEI X W, WEN Y H, WENG S L, et al. Study on the status of soil trace element abundance in Jiangxi Province [J]. Jiangxi Agricultural Science & Technology, 1983, 12: 12—15.

[26] 王丹丹, 史学正, 于东升, 等. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(3) : 1049—1053.

WANG D D, SHI X Z, YU D S, et al. Main natural factors controlling soil organic carbon density in the uplands of Northeast China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3) : 1049—1053.

[27] 韩丹, 程先富, 谢金红, 等. 大别山区江子河流域土壤有机质的空间变异及其影响因素 [J]. 土壤学报, 2012, 49(2) : 403—408.

HAN D, CHENG X F, XIE J H, et al. Spatial variability of soil organic matter in Jiangzihe watershed of Dabie mountainous area and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2) : 403—408.

[28] ROWE J A, OBIERO J, MARSH K, et al. Short report: Positive correlation between rosetting and parasitemia in Plasmodium falciparum clinical isolates [J]. American Journal of Tropical Medicine & Hygiene, 2002, 66(5) : 458—460.

[29] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 等. 甘肃省河西灌漠土微量元素的空间变异特征 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(5) : 27—30.

ZHAO L J, XIE H L, GUO T W, et al. Spatial variability of trace elements of irrigated desert soil in Zhangye and Wuwei, Gansu Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5) : 27—30.

[30] ZHU Q, LIN H S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes [J]. Pedosphere, 2010, 20(5) : 594—606.

[31] 徐小逊, 张世熔, 余妮娜, 等. 沱江中游土壤有效铁空间分布及其影响因素分析 [J]. 西南农业学报, 2012, 25(3) : 977—981.

XU X X, ZHANG S R, YU N N, et al. Soil available iron spatial distribution and influencing factors analysis based on GIS in Middle reaches of Tuojiang [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(3) : 977—981.

[32] 张会民, 吕家珑, 徐明岗, 等. 土壤性质对锌吸附影响的研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5) : 114—118.

ZHANG H M, LU J L, XU M G, et al. Advances in soil properties' effect on zinc absorption [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition) , 2006, 34 (5) : 114 —118.

[33] HU S, FIRESTONE M K, FIELD C B, et al. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂ [J]. Nature, 2001, 409: 188—191.

[34] SCHLESINGER W H, LICHTER J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂ [J]. Nature, 2001, 411: 466—468.

[35] 李珊, 张浩, 李启权, 等. 广元植烟土壤有效态微量元素的空间变异特征及影响因素 [J]. 核农学报, 2017, 31(8) : 1618—1625.

LI S, ZHANG H, LI Q Q, et al. Spatial variability of soil available microelement contents and their influencing factors in tobacco growing area in Guangyuan city [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(8) : 1618—1625.

[36] 臧振峰. 黑河中下游区域绿洲农田土壤中主要微量元素的空间分布特征及其环境影响研究 [D]. 兰州大学, 2013.

[37] MOMTAZ H R, JAFARZADEH A A, Torabi H, et al. An assessment of the variation in soil properties within and between land-form in the Amol region, Iran [J]. Geoderma, 2009, 149(1—2) : 10—18.

[38] 田国成, 孙路, 施明新, 等. 小麦秸秆焚烧对土壤有机质积累和微生物活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4) : 1081—1087.

TIAN G C, SUN L, SHI M X, et al. Effect of wheat straw burning on soil organic matter accumulation and microbial activity [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4) :1081—1087.

[39] 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室编. 江西土壤 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.

Administration Bureau of Land, Soil Survey Staff Office of Jiangxi Province. eds. Soils of Jiangxi Province [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 1991.

[40] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 199—200.

HUANG C Y. Soil Science [M]. Beijing: China agriculture press, 2000: 199—200.

[41] 李卫, 周冀衡, 赵松义, 等. 湖南烟区土壤有效态微量元素分布特征及评价 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(4): 373—377.

LI W, ZHOU J H, ZHAO S Y, et al. Distribution and evaluation of soil microelements in Hunan tobacco-growing areas [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2009, 35(4): 373—377.

[42] 董梅, 艾民, 寇永春, 等. 农作物缺少微量元素的症状及防治措施 [J]. 吉林蔬菜, 2008, 1: 44—44.

DONG M, AI M, KOU Y C, et al. Symptoms and prevention of trace elements in crops [J]. Jilin Vegetables, 2008, 1: 44—44.