

浙西北丘陵区农田土壤微量元素 空间变异特征及影响因子

刘永红¹, 倪中应¹, 谢国雄², 徐立军¹, 钟林炳¹, 马立强¹

(1 桐庐县农业和林业技术推广中心, 浙江桐庐 311500; 2 杭州市植保土肥总站, 杭州 310020)

摘要:【目的】采用地统计学和 GIS 技术相结合的方法能较好地综合评价土壤微量元素空间数据的结构性、空间格局变异产生原因及影响因子。本论文以生态型城市桐庐县为研究区, 研究了土壤微量元素的空间变异特征及其影响因素, 为长期耕作的浙西北丘陵区农田土壤高效施肥提供依据。【方法】在满足空间分析要求的基础上, 根据研究区主要土壤类型、土地利用类型、地形地貌和交通条件等因素布置采样点数目与密度, 在作物收获后, 选取水田区、旱地区、茶园区、果园区和桑园区等有代表性的田块采集分析土样 386 个。利用 GS + 7.0 和 ArcGIS 10.1 进行半方差分析和 Kriging 插值, 运用逐步回归分析比较各因子对微量元素含量的影响程度。【结果】铁、锰、铜、锌 4 种微量元素变异系数在 58.37%~90.22% 之间, 块金效应值在 10.9%~12.5% 之间。4 种微量元素的空间分布结构相似程度较小, 呈斑块状特点。不同土壤类型对有效 Fe 和有效 Zn 的含量有显著影响。不同土地利用方式间 4 种微量元素含量差异显著。有效 Fe 与有机质和速效钾呈极显著负相关, 与有效 Cu 呈极显著正相关。有效 Cu 与有效磷呈极显著正相关, 与速效钾呈显著负相关, 与有效 Mn 呈显著正相关。有效 Zn 与碱解氮呈极显著负相关, 与有效磷和速效钾呈极显著正相关, 与有效 Mn 呈显著正相关, 与海拔呈显著负相关。土壤类型、土地利用方式、有机质、pH、碱解氮、有效磷、速效钾和海拔等 8 个因子合计分别能够解释 4 种微量元素变异空间变异的 19.1%、2.2%、12.2% 和 12.1%, 8 个因子中土地利用方式能够独立解释空间变异的 3.1%~13.5%。【结论】研究区内铁、锰、铜、锌 4 种微量元素总体处于丰富水平, 呈中等变异。不同元素的主导影响因素不同, 除土壤类型、土地利用方式、有机质、pH、碱解氮、有效磷、速效钾和海拔等 8 个因子外还有众多其它结构性影响因子, 土地利用方式有重要影响但非主导因子。

关键词: 土壤微量元素; 空间变异; 地统计学; 影响因子

中图分类号: S506; S511

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)06-1710-09

Spatial variability and impacting factors of trace elements in hilly region of cropland in northwestern Zhejiang Province

LIU Yong-hong¹, NI Zhong-ying¹, XIE Guo-xiong², XU Li-jun¹, ZHONG Lin-bing¹, MA Li-qiang¹

(1 Agricultural and Forestry Technology Promotion Center of Tonglu County, Tonglu, Zhejiang 311500, China;

2 Hangzhou Plant Protection and Soil-fertilizer Station, Hangzhou, Zhejiang 310020, China)

Abstract: 【Objectives】Geostatistics combined with geographical information system (GIS) technique is thought well for evaluation of the spatial structure of data and the impacting factors causing the variation. In this paper, this method was used to analyze the spatial variability and main impacting factors of available soil Fe, Mn, Cu and Zn in the permanently cultivated cropland in Tonglu County, in order to provide base for the efficient application of micronutrient fertilizer. 【Methods】Soil types, land-use types, organic matter, pH, available N, available P, available K and altitude were chosen as impacting factors in the research. There were total 386 soil samples collected from paddy fields, dry lands, tea plantations, and orchard fields after crop harvest. Semi-variance analysis and Kriging interpolation were performed by GS + 7.0 and ArcGIS 10.1. 【Results】The

收稿日期: 2015-08-01 接受日期: 2015-11-27

基金项目: 2009~2012 年农业部测土配方施肥补贴项目; 桐庐县农业“两区”土壤污染防治项目资助。

作者简介: 刘永红 (1985—), 女, 甘肃渭源人, 农艺师, 硕士研究生, 主要从事土壤环境方面研究。E-mail: yhliu689@163.com

variation coefficient of four elements was between 58.37% and 90.22%. The nugget effect value was between 10.9% and 12.5%. The spatial distribution of Fe, Mn, Cu and Zn contents was patchy and their space structure had little similarity. The contents of Fe and Zn were significantly different among different soil types, and the available Fe, Mn, Cu and Zn contents were significantly different among the land-use types. Fe content has extremely significant and negative correlation with soil organic matter content and available K content, and had extremely significant positive correlation with Cu content; Cu content had extremely significant positive correlation with available P, and had significant negative correlation with available K and significant positive correlation with Mn; Zn content had highly significant negative correlation with available N, highly significant positive correlation with available P and K, had significant positive correlation with Mn and had significant negative correlation with altitude. Stepwise regression analysis indicated that soil type, land-use types, organic matter content, pH, available N, available P, available K and elevation together could explain 19.1%, 2.2%, 12.2% and 12.1% of the variability of soil available Fe, Mn, Cu and Zn in the study area. The land-use types alone could explain 3.1% - 13.5% of the variability. 【 **Conclusions** 】 The available Fe, Mn, Cu and Zn contents were generally at the rich level, and belong to medium spatial variability in the studied area. Structural factors played a dominating role and human activity factors played a secondary role. The contributions of soil type, land-use type, organic matter content, pH, available N, available P, available K and altitude were significant but only accounted for a small proportion of the variation. Among these factors land-use types play a major role, although not the dominating factor.

Key words: soil trace element; spatial variability; geostatistics; affecting factor

土壤微量元素有效性是表征土壤环境质量的重要因子, 其有效态含量水平显著影响农作物的生长、代谢、产量和品质及人类的健康^[1-3]。土壤微量元素在母质、成土过程、土壤类型、地形、土壤理化性状、气候特点及人类活动等各项环境因子共同长期作用下, 具有高度的空间异质性, 具有随机性和结构性双重特征^[4-5]。地统计学和 GIS 技术结合能较好地综合评价空间地理信息、空间数据的结构性、空间格局变异产生原因及影响因子^[6-8]。

利用地统计学和 GIS 技术相结合的方法对不同区域、尺度的土壤微量元素的空间变异特征初步研究表明, 土壤中微量元素含量分布具有随机性和结构性的空间变异性质, 研究区主要分布在东北平原、华北平原、黄土丘陵、西北干旱区、长江中下游、东南部地区^[9]。在浙江省的研究分布在温州乐清市重点工业镇乐成镇^[10], 金衢盆地河谷平原区、杭嘉湖水网平原区和杭州湾南岸滨海平原区等平原水网区^[11]。王日照等对浙东红壤丘陵区仙居县的研究主要在微量元素含量方面, 未对空间格局和变异做阐述^[12]。对长期耕作的浙西北丘陵区农田土壤中有效态微量元素空间变异特征鲜有报道。

浙江省桐庐县地形地貌特殊复杂, 86.3%的土地面积为山地丘陵, 主要水系有由南而北纵贯县境东部的富春江和自西北向东南汇入富春江的分水江,

有堆积地貌、侵蚀剥蚀地貌、侵蚀溶蚀地貌和侵蚀溶蚀构造地貌等。农作物播种面积 30 多万亩, 为杭州地区粮食生产贡献巨大, 在传统农业的基础上逐渐向现代农业和生态农业发展, 种植结构调整、规模经营和耕作管理措施优化等逐步改变着土壤环境条件。文中以桐庐县水稻、油菜、蔬菜、玉米、茶园、果园和桑园等主要作物种植地土壤为研究对象, 采用地统计学与 GIS 相结合的方法对其主要微量元素有效态含量的空间变异和分布特征以及影响因子进行了研究, 以期阐明该区域农田土壤微量元素尤其是重金属污染元素 Cu 和 Zn 的丰缺程度和空间分布规律, 为养分平衡管理、土壤环境评价、土壤污染防治和精准农业背景下的农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

桐庐县位于浙江省西北部 (N 29°35'~30°05', E 119°11'~119°58'), 地处钱塘江水系中游, 总面积 1825 km², 其中山地丘陵占 86.3%, 平原、水域占 13.7%。耕地面积 245.7 km², 园地面积 96.5 km²。全县大致可分为东南部中低山丘陵区、西南部低山丘陵区、北部低山丘陵区、富春江沿岸平原区和分

水江河谷平原区。属亚热带季风气候,年平均气温 16.5℃,年平均降水量 1552 mm,年日照时间 1991.4 h,无霜期 258 d。土壤类型主要为红壤、水稻土和紫色土,分布面积分别占研究区总面积的 69.75%、11.2% 和 5.2%,其它土壤如石灰岩土、粗骨土、黄壤和潮土等合计占 13.85%。根据研究区土地利用方式,将研究区土地分为水田区、旱地区、茶园区、果园区和桑园区,按面积从大到小排列。其中:水田区典型种植制度为水稻—油菜;旱地区典型种植制度为玉米、豆类和蔬菜;茶园区典型种植制度为茶树;果园区典型种植制度为桃树和梨树;桑园区典型种植制度为桑树。

1.2 样品采集与分析

遵循农业部统一的耕地地力调查与质量评价技术规范和要求^[13],于 2010 年根据研究区主要土壤类型、土地利用类型、地形地貌和交通条件等因素布置采样点数目与密度,在满足地统计学和 GIS 空间分析要求的基础上,使样点在研究区内分布尽量均匀。在作物收获后,选取有代表性的田块, GPS 定位,采用 S 形布点多点混合采样,取样深度 0—20 cm,共采集土样 386 个(图 1)。土壤有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu 和有效 Zn 采用 DTPA 浸提法,土壤 pH 采用电位法,土壤有机质采用重铬酸钾容量法,碱解氮采用扩散法,有效磷采用钼锑抗比色法,速效钾采用火焰分光光度法测定^[14]。

1.3 数据处理

利用 SPSS19.0 对数据进行描述性统计分析、逐步回归分析和 K-S 检验,对不符合正态分布的数据指标进行对数转化。利用 Minitab 16 对经过对数转化达不到要求的数据进行 Johnson 转换。应用

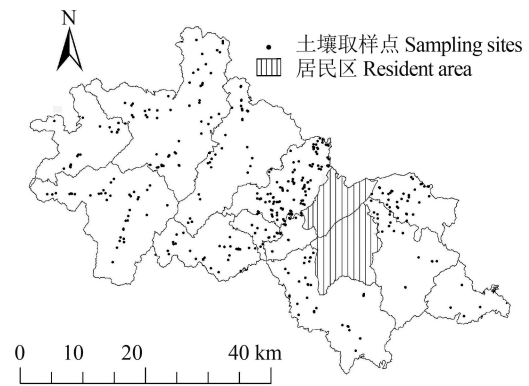


图 1 试验区农田土壤采样点分布图

Fig. 1 Diagram of sampling sites in study area

ArcGIS 10.1 将经纬度坐标投影转换成平面坐标,利用 GS + 7.0 进行各元素半方差函数模型的拟合,根据计算出的半方差函数的模型及参数,应用 ArcGIS 10.1 中的地统计模块进行 Kriging 插值和绘制空间分布图。土壤类型和土地利用方式为多分类变量,进行回归分析时采用哑变量为其赋值,假设分类变量有 K 个水平,转换为 K-1 个哑变量,哑变量具体赋值方法见文献^[15]。

2 结果与分析

2.1 土壤有效态微量元素基本统计特征

由表 1 可知,现今桐庐县耕层土壤微量元素中有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu 和有效 Zn 的平均含量分别为 126.65、18.81、1.88 和 2.64 mg/kg。与 1987 年第 2 次土壤普查数据相比,耕层土壤有效 Fe 和有效 Zn 的平均含量分别增加了 3.35 和 1.48 mg/kg,有效 Mn 和有效 Cu 的平均含量分别降低了 20.99 和 1.29 mg/kg。各微量元素含量的变异系数均较大,在

表 1 研究区土壤微量元素含量的描述性统计分析及其正态分布检验 ($n = 386$)

Table 1 Descriptive statistics and K-S test of soil trace elements in the study area

微量元素 Element	最小值 Min. (mg/kg)	最大值 Max. (mg/kg)	平均值 Mean (mg/kg)	SD	CV (%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type	1987 年均值 (mg/kg) Mean in 1987
有效态 Fe Avail. Fe	2.10	286.8	126.65	81.100	64.00	-0.076*	-0.158*	Johnson 正态 Johnson normal	123.30
有效态 Mn Avail. Mn	1.40	101.9	18.81	16.970	90.22	0.015*	-0.190*	对数正态 Log normal	39.80
有效态 Cu Avail. Cu	0.02	8.0	1.88	1.656	88.08	-0.523*	0.454*	对数正态 Log normal	3.17
有效态 Zn Avail. Zn	0.50	7.8	2.64	1.543	58.37	0.117*	-0.310*	对数正态 Log normal	1.16

注 (Note): *表示经过变换后符合正态分布的统计值 Means data showing normal distribution after transformation.

58.37%~90.22%, 平均变异程度依次为 Mn > Cu > Fe > Zn。变异系数 < 10% 时为弱变异性, > 100% 时为强变异性, 介于两者之间为中等变异性^[17], 4 种微量元素都属于中等变异性。386 个样点的单样本 K-S 检验的结果表明, 4 种微量元素均不服从正态分布(服从对数正态分布或 Johnson 正态分布)。

2.2 土壤有效态微量元素空间变异特征

由表 2 可知, 通过 GS + 7.0 拟合的 4 种微量元素的最优理论模型均为指数模型, 决定系数均较低。有效 Fe 的块金值较其他元素相对较大为 0.117, 说明有效 Fe 一些小尺度上随机因素引起的变异程度

相对较大。四种微量元素的块金效应比值均 < 25%, 具有强烈的空间相关性^[18], 说明空间变异主要是由结构性因素(气候、母质、地形地貌、成土过程和土壤类型等自然因素)引起的。变程表明土壤属性在空间上的自相关性尺度, 同时也反映了影响因子的范围^[18,19]。研究区土壤微量元素含量的变程存在一定的差异, 有效 Zn (4.14 km) 和有效 Mn (3.33 km) 的自相关尺度相对较大, 因此, 有效 Mn 和有效 Cu 的主要影响因子的空间变异尺度相对较大, 有效 Fe (2.13 km) 和有效 Cu (2.88 km) 的自相关尺度相对较小, 可能主要受到相对较小尺度因子的影响。

表 2 土壤微量元素半方差函数理论模型和参数

Table 2 Theoretical model and parameters of semi-variograms of soil trace elements

微量元素 Element	理论模型 Model	块金值(C ₀) Nugget	基台值(C ₀ + C) Sill	块金效应(C ₀ /C ₀ + C) Nugget/Sill (%)	变程(A ₀) Range (km)	R ²	残差 RSS
有效态 Fe Avail. Fe	指数模型 Exponential	0.1170	1.0630	11.0	2.13	0.065	0.0174
有效态 Mn Avail. Mn	指数模型 Exponential	0.0159	0.1268	12.5	3.33	0.289	4.217E-4
有效态 Cu Avail. Cu	指数模型 Exponential	0.0210	0.1910	10.9	2.88	0.232	7.109E-4
有效态 Zn Avail. Zn	指数模型 Exponential	0.0066	0.0564	11.7	4.14	0.404	1.059E-4

2.3 土壤有效态微量元素空间分布特征

根据所得半方差函数理论模型和参数进行克立格插值分别绘制 4 种土壤微量元素有效态含量的空间分布图(图 2)。总体来看, 4 种微量元素的斑块状特点比较明显, 空间分布结构相似程度较小。土壤有效 Fe 空间分布无明显规律, 呈块状分布特点, 东部、中部和西部含量普遍较高, 夹在这 3 块中的中东部和中西部 2 块成片区域含量较低, 最低值出现在中东部。土壤有效 Mn 空间插值图以 5~15 mg/kg 范围面积最大, > 15 mg/kg 的面积呈东北—西南方向条块状分布, 最高值分布在桐庐县西部的小片区域。土壤有效 Cu 空间变异特征总体上没有明显的规律, 分布比较零散, 高值区与有效 Mn 的分布非常相似, 最低值分布在中部一小片区域。土壤有效 Zn 空间分布总体上东高西低, 东南部的大片区域有效 Zn 含量普遍较高, 中部高值和低值分布零散, 西南部的大片区域含量低。

2.4 影响因素分析

2.4.1 土壤类型 4 种微量元素含量分析如表 3 所示, 386 个样本的数量分布为红壤 216 个、水稻土

93 个、紫色土 69 个和其它 8 个。不同土壤类型有效 Fe 含量平均值的大小顺序为紫色土 > 红壤 > 水稻土。有效 Mn 表现为紫色土 > 红壤 > 水稻土。有效 Cu 表现为水稻土 > 红壤 > 紫色土。有效 Zn 表现为水稻土 > 红壤 > 紫色土。经方差分析表明, 土壤类型对有效 Fe 和有效 Zn 的含量有显著影响。紫色土有效 Fe 含量最高, 与红壤差异不显著, 与水稻土差异显著。水稻土有效 Zn 含量最高, 与其他土类差异显著。有效 Mn 和有效 Cu 在红壤、水稻土和紫色土上的检验差异不显著, 说明研究区内土壤类型对有效 Mn 和有效 Cu 的含量影响较小。

2.4.2 土地利用方式 不同土地利用方式吸收消耗土壤微量元素的数量不同, 长此以往使土壤养分含量发生分异^[20]。4 种微量元素含量分析如表 4 所示。不同土地利用方式对研究区内土壤微量元素含量影响较大, 水田土壤有效态微量元素含量普遍较高。有效 Fe 含量极丰富, 平均值的大小顺序为水田 > 旱地 > 桑园 > 果园 > 茶园, 水田与其他土地利用的差异达到显著性。有效 Mn 含量的大小顺序为茶园 > 果园 > 水田 > 旱地 > 桑园, 桑园与其他土地利用的差

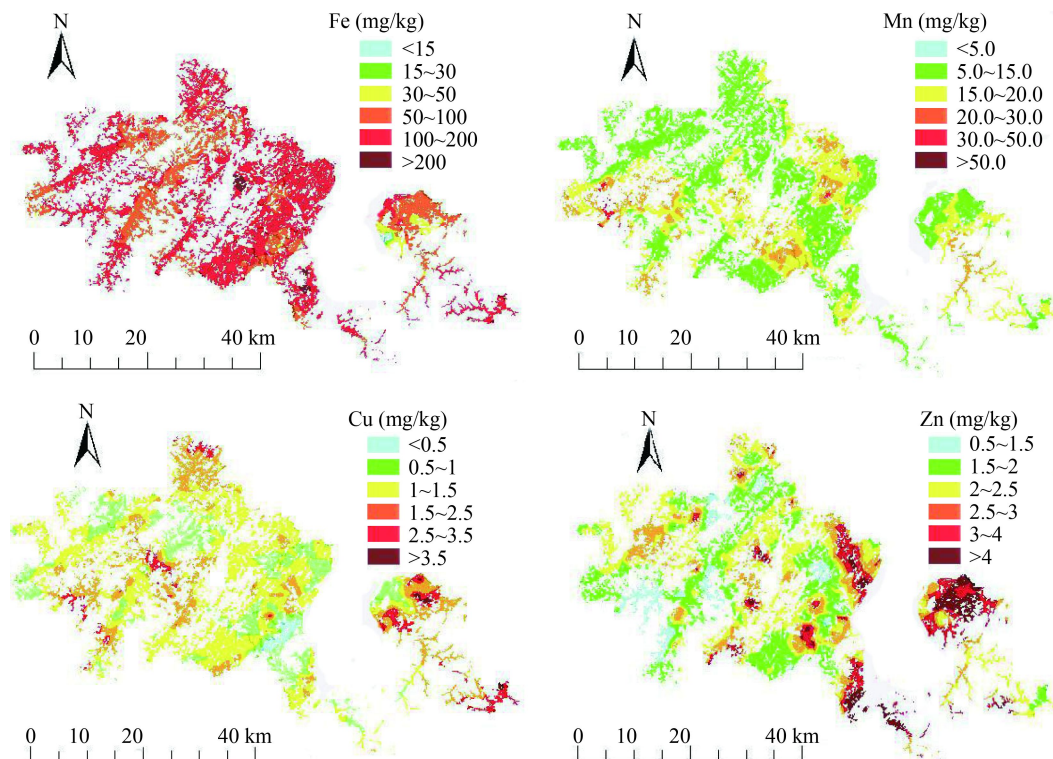


图 2 研究区土壤微量元素含量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil trace elements contents in the study area

表 3 不同土壤类型微量元素含量分析 (mg/kg)

Table 3 Analysis of the contents of soil trace elements in different soil types

统计值 Statistic value	有效态铁 Avail. Fe			有效态锰 Avail. Mn			有效态铜 Avail. Cu			有效态锌 Avail. Zn		
	红壤 Red earth	水稻土 Paddy soil	紫色土 Purple soil	红壤 Red earth	水稻土 Paddy soil	紫色土 Purple soil	红壤 Red earth	水稻土 Paddy soil	紫色土 Purple soil	红壤 Red earth	水稻土 Paddy soils	紫色土 Purple soils
最小值 Min.	2.4	2.1	4.8	2.2	1.4	2.7	0.1	0	0	0.6	0.7	0.5
最大值 Max.	284.7	286.8	272.0	101.9	97.4	85.0	8.0	7.7	5.6	7.8	7.8	7.7
SD	79.6	82.6	82.1	16.6	19.1	18.1	1.6	1.9	1.2	1.6	1.7	1.4
CV (%)	61.9	73.8	55.5	87.3	102.2	93.3	87.5	86.1	78.0	60.2	55.6	55.6
平均值 Mean	128.7±108ab	111.9±177b	148±20.8 a	19.1±2.3 a	18.7±4.1 a	19.4±4.6 a	1.7±0.2 a	2.2±0.4 a	1.6±0.3 a	2.6±0.2 b	3.0±0.4 a	2.4±0.3 b

注 (Note): 数据后不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different small letters following data represent significant difference at $P < 0.05$ level.

异显著。有效 Cu 含量的大小顺序为水田 > 桑园 > 旱地 > 果园 > 茶园, 水田、旱地、桑园与果园、茶园差异性显著。有效 Zn 含量的大小顺序为旱地 > 果园 > 水田 > 茶园 > 桑园。旱地、果园与茶园、桑园差异性显著。

2.4.3 土壤养分、pH 及海拔 4 种微量元素分别与土壤理化性质及海拔等进行相关分析, 结果见表 5。研

究区土壤有机质与微量元素的相关性分析表明, 有机质含量与有效 Fe 含量之间达到 0.01 的极显著负相关水平。4 种微量元素含量与土壤 pH 相关性较差, 均未达到显著相关的水平。碱解氮、有效磷和速效钾对有效 Fe、有效 Cu 和有效 Zn 影响较大。碱解氮与有效 Zn 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。有效磷与有效 Cu、有效 Zn 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

表 4 不同土地利用方式微量元素含量 (mg/kg)

Table 4 Contents of soil trace elements in different land-use types

土地利用类型 Land-use type	样本数 Sample number	有效态铁 Avail. Fe	有效态锰 Avail. Mn	有效态铜 Avail. Cu	有效态锌 Avail. Zn
水田 Paddy field	126	169.28 ± 13.9 a	18.63 ± 3.2 b	2.47 ± 0.3 a	2.54 ± 0.2 ab
旱地 Dry land	91	125.69 ± 16.7 b	18.00 ± 3.6 b	1.88 ± 0.3 b	3.06 ± 0.4 a
茶园 Tea plantation	77	80.38 ± 13.4 c	23.30 ± 4 a	1.22 ± 0.2 c	2.25 ± 0.3 b
果园 Orchard	61	106.88 ± 18.8 bc	18.96 ± 4.5 ab	1.40 ± 0.3 bc	3.02 ± 0.4 a
桑园 Mulberry field	31	119.61 ± 31.1 b	10.19 ± 2.4 c	2.18 ± 0.7 ab	2.15 ± 0.4 b

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at $P < 0.05$ level.

表 5 土壤微量元素与土壤养分、pH 及海拔的 Pearson 相关分析

Table 5 Pearson correlation between soil trace elements and soil nutrients, pH and altitude

变量 Variable	有效态铁 Avail. Fe	有效态锰 Avail. Mn	有效态铜 Avail. Cu	有效态锌 Avail. Zn
有机质 OM	-0.132**	-0.028	0.051	0.094
有效氮 Avail. N	-0.006	0.065	0.036	-0.281**
有效磷 Avail. P	0.051	0.068	0.142**	0.229**
有效钾 Avail. K	-0.283**	0.051	-0.120*	0.255**
有效铁 Avail. Fe	1	0.064	0.211**	0.088
有效锰 Avail. Mn		1	0.106*	0.116*
有效铜 Avail. Cu			1	0.001
有效锌 Avail. Zn				1
pH	-0.068	-0.093	0.044	0.021
海拔 Altitude	-0.014	0.071	-0.089	-0.119*

注 (Note): *和**分别表示相关程度达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$) Mean significant correlation ($P < 0.05$) and extremely significant correlation ($P < 0.01$).

速效钾与有效 Fe 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与有效 Cu 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 与有效 Zn 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。微量元素间的相关性分析表明, 有效 Cu 与有效 Fe 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与有效 Mn 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。有效 Zn 与有效 Mn 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。海拔与有效 Zn 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。

2.4.4 不同因素的影响程度 为了比较各因子对微量元素含量的影响程度, 以土壤类型、土地利用方式、有机质、pH、碱解氮、有效磷、速效钾和海拔为自变量, 分别以有效 Fe、有效 Mn、有效 Cu 和有效 Zn 为因变量进行逐步回归分析, 定量研究不同因子对微量元素空间变异的综合解释能力和相对重要性。表 6 为各因子对 4 种微量元素含量逐步回归分析结果。

表中 ΔR^2 为增加变量时回归方程判定系数的增量, R_{adj}^2 为矫正决定系数, 反映回归方程所有自变量对因变量变异性的解释比例。由表 6 可知, 8 个因子中有 5 个对有效 Fe 的空间变异影响显著, 土地利用方式影响最大, 能够独立解释空间变异的 13.5%, 其次是土壤类型、有机质、pH 和碱解氮, 5 个因子合计能够解释 19.1%; 8 个因子中有 2 个对有效 Mn 的空间变异影响显著, 土地利用方式能够解释空间变异的 4%, 土壤类型能够解释 0.2%; 8 个因子中有 3 个对有效 Cu 的空间变异影响显著, 土地利用方式影响最大, 能够独立解释空间变异的 10.7%, 其次是土壤类型和海拔, 3 个因子合计能够解释 12.2%; 8 个因子中有 5 个对有效 Zn 的空间变异影响显著, 土地利用、土壤类型、碱解氮、有效磷和海拔等 5 个因子合计能够解释 12.1%。

表 6 研究区各因子对微量元素含量逐步回归分析结果

Table 6 Stepwise regression analysis of factors contributing to the variability of trace elements contents

元素 Element	进入方程的影响因子 Variables entered										
	变量 Variable	ΔR^2	变量 Variable	ΔR^2	变量 Variable	ΔR^2	变量 Variable	ΔR^2	变量 Variable	ΔR^2	R_{adj}^2
有效铁 Avail. Fe	利用方式 Use type	0.135	土壤类型 Soil type	0.024	有机质 OM	0.034	pH	0.010	碱解氮 Avail. N	0.011	0.191
有效锰 Avail. Mn	利用方式 Use type	0.040	土壤类型 Soil type	0.002							0.022
有效铜 Avail. Cu	利用方式 Use type	0.107	土壤类型 Soil type	0.022	海拔 Hr	0.013					0.122
有效锌 Avail. Zn	利用方式 Use type	0.031	土壤类型 Soil type	0.018	碱解氮 Avail. N	0.061	有效磷 Avail. P	0.027	海拔 Altitude	0.009	0.121

3 结论与讨论

四种微量元素块金效应均小于 25%，变异系数在 10%~100% 之间，说明四种微量元素具有强烈的空间相关性，空间依赖性强，主要影响因素为自然因素（空间自相关部分），如成土母质、地形地貌、成土过程、土壤类型、海拔等。次要影响因素为人为因素，如施肥、种植业生产方式和工业活动。土壤类型、土地利用方式、有机质、pH、碱解氮、有效磷、速效钾和海拔等 8 个因子合计能够解释空间变异的 2.2%~19.1%，说明影响研究区微量元素空间变异的因子种类繁多，除了上述 8 个因子之外还有其它众多因子，这些因子合计贡献约 80%，根据 4 种微量元素块金效应比值 10.9%~12.5%，说明其它这些影响因子主要为非人为因子，母质可能是其主导因子。8 个因子中土地利用方式影响最大，能够独立解释空间变异的 3.1%~13.5%，土壤养分含量与有效 Fe、有效 Cu 和有效 Zn 显著相关，说明种植作物和施肥对微量元素含量具有很重要的影响，但非主导因子。在研究开始前认为农田土壤微量元素的影响因子主要受人为因素影响，如施肥引起的土壤养分含量及酸碱度的变化、经济效益驱动的土地利用方式的变化和水耕熟化、淹水种稻产生的土壤类型的变化，所以选择上述几种因子做研究，随着数据的深入分析，发现人为活动虽不可忽视但非主要影响因素，非人为结构因素起主要作用，所以应从成土母质、成土过程、地形、土壤物理性质、坡度、地下水位、温度等侧重于非人为影响因子的角度深入分析、探讨其主导因子。四种微量元素的变异系数较大，可能主要是与研究区的复杂地貌有关，研究区山地与河谷平原间丘陵错落

分布，南北方向的富春江平均径流量 $298.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，西北向东南方向的分水江平均径流量 $23.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，枯洪变化较大，成土母质和微气候均存在较大差异，水田土壤土质肥沃，主要有洪积、坡积物发育而来，旱地土壤以油红泥、黄红泥、黄泥土为主，主要分布在坡耕地，土壤肥力差，水土流失严重。

桐庐县耕层土壤 4 种微量元素的空间分布格局总体呈斑块状特点。有效 Fe 空间变异受到土地利用方式、有机质、土壤类型、pH 和碱解氮等的影响，紫色土和水田中有效 Fe 含量高，主要影响因子的空间变异尺度相对较小。研究区土壤有机质与有效 Fe 含量之间达到 0.01 的极显著负相关水平。这与其他学者的研究结果相反^[21-23]，其他学者研究表明有机质与有效 Fe 呈显著正相关。原因可能是由于研究区有效 Fe 含量极丰富，研究区有效 Fe 的平均含量高于极丰富水平（35 mg/kg），处于极丰富水平的样本有 327 个，占样本总数的 84.7%，> 100 mg/kg 的样本有 225 个，占样本总数的 58.3%，有机质越高土壤缓冲性能越强，因此形成负相关关系。而其他学者研究的地区有效 Fe 含量中等或缺乏，极丰富水平的样本少，有机质促进了铁的有效性，因此呈显著正相关关系。有机质与有效 Fe 和有效 Mn 负相关的原因也可能与不同土壤结合态腐殖质结合的方式及松紧度，松结合态、稳结合态和紧结合态所占比例不同有关，徐德福等^[24]研究发现，稳结合态腐殖质与氧化铁呈负相关。有效 Mn 空间变异受土地利用方式和土壤类型影响显著，2 个因子合计只能够解释空间变异的 2.2%，影响有效 Mn 的因子有待进一步深入研究。从有效 Mn 空间分布图上看，含量在 5~15 mg/kg 之间的主要分布在富春江和分水江旁的河谷平原区，> 15 mg/kg 的主要分布在地和丘陵。有效 Cu

受土地利用方式、土壤类型和海拔影响显著, 3 个因子合计能够解释空间变异的 12.2%, 与有效磷呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)。有效态 Cu 与 Fe 存在较强的空间相关性 ($R = 0.211$, $P < 0.01$), 空间分布结构也相似, 因此有效 Fe 和 Cu 存在相似的影响因子。土壤有效铜含量与铜毒害紧密相关, Cella 等^[25]研究表明, 土壤中的水溶性铜 $< 2 \text{ mg/kg}$ 安全, 3.8 mg/kg 时就会抑制氮的硝化作用。桐庐县有效铜含量丰富, $1 \sim 1.8 \text{ mg/kg}$ 的有 84 个, 占样本总数的 21.8%, $> 1.8 \text{ mg/kg}$ 极丰富的有 148 个, 占样本总数的 38.3%。建议以后农业生产中尽量少施含铜的肥料, 缺铜地区针对性补铜, 通过调整耕作制度、施肥方式、提升有机质等提高土壤缓冲性能, 降低铜含量高的地区的铜胁迫。有效 Zn 受土地利用方式、土壤类型、碱解氮、有效磷和海拔等的影响显著, 5 个因子合计能够解释空间变异的 12.1%, 水稻土中 Zn 含量高, 与其他土类差异显著。有效 Zn 含量高的东南部大片区域是桐庐县工业强镇富春江镇和江南镇, 工业生产对有效 Zn 的分布有一定程度的干扰, 块金效应值为 11.7%, 说明结构性因素是影响 Zn 空间分布的主因, 人类工业活动是次因。

多数研究^[2, 26-27]表明, 阳离子型微量元素的有效态含量随 pH 升高而降低, 两者显著相关。在该研究区域中, 因为影响有效态微量元素含量的因子较多, pH 对空间变异的解释能力较弱, 所以产生了 4 种微量元素含量与土壤 pH 相关性较差, 均未达到显著相关水平的结果。土类相同而成土母质不同的土壤, 性质和微量元素的丰缺度会有很大的差异^[28], 不同气候环境、生态环境和水环境等作用力下差异加剧。

参 考 文 献:

- [1] 崔爱华, 张东启, 郭卢. 亳州烟区农田耕作层土壤微量元素含量研究[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1164-1168.
Cui A H, Zhang D Q, Guo L, *et al.* Microelement contents in plough horizons of tobacco planting soil in Bozhou[J]. Soils, 2014, 46(6): 1164-1168.
- [2] 赵翠翠, 南忠仁, 刘晓文, 等. 绿洲农田土壤主要微量元素的影响因素及分布特征研究-以张掖甘州区和临泽县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 127-132.
Zhao C C, Nan Z R, Liu X W, *et al.* Spatial distribution and affecting factors of main trace elements in oasis crop-land-a case of Ganzhou District and Linze of Zhangye[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(10): 127-132.
- [3] 杨荣清, 黄标, 孙维侠, 等. 江苏省如皋市长寿人口分布区土壤及其微量元素特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 753-760.
Yang R Q, Huang B, Sun W X, *et al.* Soils and trace elements in the distribution area of longevous people in Rugao County of Jiangsu Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 753-760.
- [4] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667-1673.
Liu L, Zeng F P, Song T Q, *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients in Karst area's Mulun National Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [5] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 944-952.
Lü Z Z, Liu G M, Yang J S, *et al.* Spatial variability and distribution pattern of soil nutrients in Bohai coastal area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 944-952.
- [6] 白雪, 王文杰, 王维, 等. 浙江省宁波市土壤有机质的时空变异特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(2): 191-197.
Bai X, Wang W J, Wang W, *et al.* Spatio-temporal variability characteristics of soil organic matter in Ningbo City, Zhejiang Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(2): 191-197.
- [7] 李艳, 史舟, 徐建明, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178-182.
Li Y, Shi Z, Xu J M, *et al.* Utilization and perspective of geostatistics in soil science[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 178-182.
- [8] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1087-1095.
Zhang W M, Jiang X S, Wu M, *et al.* Spatial heterogeneity of soil organic carbon on the south coast of Hangzhou Bay[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 1087-1095.
- [9] 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 peakcluster depression area of South China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2133-2139.
- [10] 郭军玲, 吴士文, 金辉. 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): 145-158.
Guo J L, Wu S W, Jin H. Spatial variability and controlling factors of microelements contents in farmland soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 145-158.
- [11] 王琳. 浙江省三个主要农业地貌区土壤与稻谷微量元素空间变异规律研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2007.
Wang L. Spatial variability of trace elements in soil and rice grain in three major landforms, Zhejiang Province[D]. Hangzhou: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2007.
- [12] 王日照, 陈海生, 吴玉勇, 等. 浙东红壤丘陵区农田土壤中微量元素含量研究[J]. 江西农业学报, 2012, 24(5): 104-107.
Wang R Z, Chen H S, Wu Y Y, *et al.* Study on contents of medium and trace elements in farmland soil in red earth hilly area of eastern Zhejiang [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(5): 104-107.
- [13] 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.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1634-2008 Rules for soil quality survey and assessment[S]. Beijing:

- China Agricultural Press, 2008.
- [14] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范(第二版)[S]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
The National Agro-Tech Extension and Service Center. Soil analysis technology standard (2nd Ed)[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2009.
- [15] 李丽霞, 郜艳辉, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. 数理医学杂志, 2006, 19(1): 51–53.
Li L X, Gao Y H, Zhang Y. The application of dummy variable in statistics analysis[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2006, 19(1): 51–53.
- [16] 桐庐县土壤普查办公室. 桐庐土壤[R]. 桐庐县第二次土壤普查报告, 1987. 142–147.
Office of Soil Survey in Tonglu County. Tonglu soils[R]. The Second Soil Survey Report of Tonglu County, 1987. 142–147.
- [17] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 161–169.
Wang S Q, Zhu S L, Zhou C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China[J]. Geographical Research, 2001, 20(2): 161–169.
- [18] 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.
Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [19] 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.
- [20] 王昌全, 李冰, 龚斌. 西昌市土壤Fe、Mn、Cu、Zn有效性评价及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 447–451.
Wang C Q, Li B, Gong B, *et al.* Study on the bioavailability and impact factors of Fe, Mn, Cu and Zn in the soils of Xichang City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 447–451.
- [21] 宋丰骥, 常庆瑞, 钟德燕. 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.
Song F J, Chang Q R, Zhong D Y, *et al.* Spatial variability and controlling factors of soil trace elements in hilly and gully area of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 36–42.
- [22] 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.
- [23] Wei X R, Hao M D, Shao M G, *et al.* Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization[J]. Soil Tillage Research, 2006, 91(1): 120–130.
- [24] 徐德福, 黎成厚. 氧化铁和有机质对土壤有机无机复合状况的影响[J]. 贵州大学学报, 2002, 21(6): 397–403.
Xu D F, Li C H. Studies on the effect of iron oxide and OM on organo-mineral complexes in soils[J]. Journal of Guizhou University, 2002, 21(6): 397–403.
- [25] Cela S, Sumner M E. Critical concentrations of copper, nickel, lead, and cadmium in soils based on nitrification[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2002, 33(1/2): 19–30.
- [26] 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.
Dong G T, Zhang A J, Lu G P, *et al.* Study on contents of available trace elements in oasis soil of Sangong River watershed[J]. Soils, 2009, 41(5): 726–732.
- [27] Sharma B D, Arora H, Kumar R, *et al.* Relationships between soil characteristics and total and DTPA-extractable micronutrients in inceptisols of Punjab[J]. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(5): 799–818.
- [28] 朱先进, 宇万太. 农田生态系统微量元素循环研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 962–967.
Zhu X J, Yu W T. Review of the cycling of trace elements in agroecosystems[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 962–967.