

# 农田土壤有效态微量元素空间预测方法及影响因子定量分析<sup>①</sup>

乔依娜<sup>1,2</sup>, 刘洪斌<sup>3</sup>

(1 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 3 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:**为深入研究土壤有效态微量元素的影响因素,以重庆市江津区农田土壤为研究对象,利用1265个样点数据,加入种植制度和母岩类型数据,构建土壤微量元素的虚拟变量回归预测模型,采用随机森林算法,定量分析了分类变量对土壤有效态微量元素影响的相对重要性。结果表明:加入种植制度和母岩的回归模型的拟合度高于普通线性回归模型,对土壤有效铁、锰、铜和锌变异的解释度分别提高了9.20%、38.99%、20.75%和29.96%,并且提高了对土壤有效铁的预测精度,但对提高土壤有效锰、铜和锌的预测精度作用不明显。土壤养分和种植制度是影响土壤有效态微量元素含量的重要因素,种植制度和母岩中,种植花椒、种植水稻和遂宁组发育的土壤对农田有效态微量元素含量的影响相对较大。

**关键词:**有效态微量元素;虚拟变量;随机森林;影响因素

中图分类号:S159 文献标识码:A

土壤微量元素不仅影响植物的正常生长发育,还影响到农产品的品质和产量。土壤微量元素的含量主要来源是母岩,而影响其有效性的因子主要有土壤pH<sup>[1-3]</sup>、土壤有机质含量<sup>[4-6]</sup>、土地利用方式<sup>[7-8]</sup>等。

土壤养分的准确预测有助于精准农业的实施。国内外对土壤养分的预测大多集中在大量元素(有机质、碱解氮等),方法包括地统计学<sup>[9]</sup>、多元线性回归<sup>[10-11]</sup>、神经网络<sup>[12]</sup>、支持向量机<sup>[14]</sup>等。目前对于土壤微量元素的预测大多采用地统计学方法,在土壤微量元素影响因子的研究中,对于连续性因子(地形、土壤环境、气候等)多采用相关分析反映其影响变化,对于分类变量(土壤类型、母岩、农用地利用方式等)则采用基本描述性分析和方差分析反映其变化<sup>[15]</sup>。目前,量化各影响因子,特别是分类变量的相对重要性研究比较缺乏。随机森林(random forest)是一个包含多个决策树的分类器,能够量化各因子的相对重要性,已经被应用于土壤有机碳与其影响因子的分析<sup>[16-18]</sup>。

基于目前对土壤微量元素研究的不足和新方法的优势,本文以重庆市江津区农田土壤为研究对象,采用线性回归模型,并将分类变量(母岩、种植制度)引入回归模型预测土壤微量元素的含量,同时采用随机森林方法定量分析土壤微量元素与影响因素之间

的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市西南部的江津区(105°49′~106°36′E, 28°28′~29°28′N),地处川东平行岭谷褶皱区西南端,属于丘陵低山地貌。该区属亚热带季风气候区,年均温为18.2℃,年平均降雨量为1034.7mm,年均日照时数为1207.9h。土壤由8种母岩(新冲积、老冲积、夹关组、蓬莱镇组、遂宁组、沙溪庙组、自流井组、嘉陵江组)风化发育而成。主要粮食作物有水稻、小麦、甘薯、玉米和各种豆类,经济作物主要以柑橘、花椒闻名中外。

### 1.2 数据来源

本研究土壤养分数据(有机质(OM)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、有效铁(Fe)、有效锰(Mn)、有效铜(Cu)、有效锌(Zn))采用2009—2012年江津区耕地地力评价样点和骨干样点数据,共1265个土壤样点数据(图1)。土壤有效态铁、锰、铜、锌采用DTPA浸提-原子吸收分光光度法测定,有机质采用重铬酸钾容量法测定,碱解氮采用NaOH碱解扩散法测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定,速效钾采用NH<sub>4</sub>OAc浸提-火焰光度

基金项目:重庆市研究生科研创新项目(CYB18073)和重庆市院士专项(cstc2018jcyj-yszx0013)资助。

作者简介:乔依娜(1990—),女,宁夏银川人,博士研究生,主要从事土壤景观模型、岩溶环境与水资源研究。E-mail: tmacqyn@hotmail.com

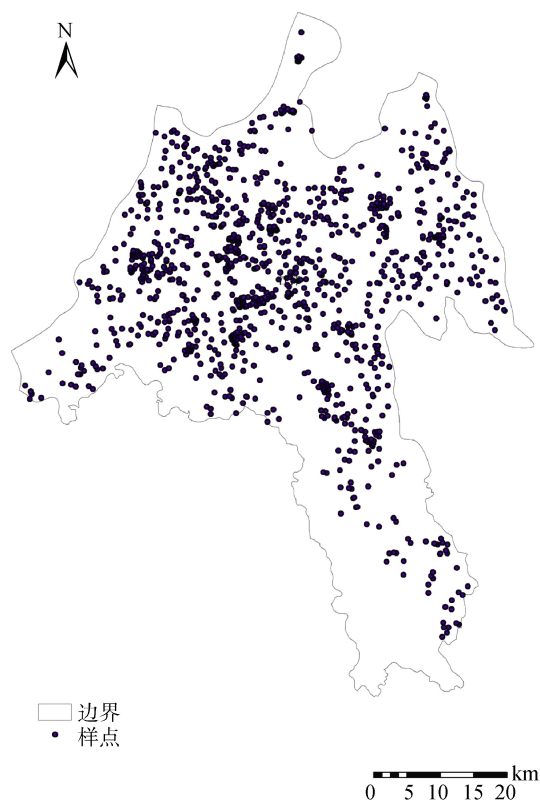


图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points in study area

法测定。

地形因子以 30 m 的数字高程模型(digital elevation model, DEM)为基础,通过秦承志等<sup>[19]</sup>学者编写的简化地形数字分析软件 Sim DTA 提取研究所需要的地形因子,包括高程(ELE)、坡度(Slope)、起伏度(Relief)、比汇水面积(SCA)、汇流动力指数(SPI)、地形湿度指数(TWI)、地形粗糙指数(TRI)、相对位置

指数(RPI),计算公式及其意义详见文献[20]。母岩类型根据全国第二次土壤普查的调查结果,由 1:50 000 的土壤图得到江津区土壤母岩图,种植制度是在样点的采集时记录所得。

### 1.3 数据处理与统计方法

方差分析用来检验土壤有效态微量元素与种植制度和母岩的关系,使用 LSD 多重比较方法,确定各组别之间土壤有效态微量元素差异的显著性。

分类变量(种植制度和母岩)使用 0, 1 编码  $j-1$  个虚拟变量来描述包含  $j$  个类别的分类变量<sup>[21-23]</sup>,该方法符合线性回归模型的要求,即自变量没有完全共线性的要求<sup>[24]</sup>。

随机森林算法(random forest)是一种基于分类树的新机器学习模型,采用分类回归树(CART)作为元分类器,有放回地随机抽取训练样本集构建回归树,并且随机地选择特征进行属性分裂,对多元共线性不敏感。本研究使用随机森林方法建模,得到各影响因子对土壤有效态微量元素的相对重要性<sup>[25]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤有效态微量元素描述性统计

研究区土壤有效铁含量范围为 1.01~299.00 mg/kg,有效锰含量范围为 1.58~300.00 mg/kg,有效铜含量范围为 0.07~9.98 mg/kg,有效锌含量范围为 0.42~17.40 mg/kg。变异系数分析表明,土壤有效铁含量具有强变异性,而有效锰、铜和锌含量则属于中等变异。对土壤有效态微量元素进行回归分析,要求其必须满足正态分布。有效铁、锰、铜、锌经对数变换后满足正态分布。

表 1 土壤微量元素描述性统计  
Table 1 Descriptive statistics of soil microelements

指标	最小值	最大值	均值	中位数	标准差	变异系数(%)	分布类型
有效铁(mg/kg)	1.01	299.00	64.40	27.00	76.38	118.61	对数正态
有效锰(mg/kg)	1.58	300.00	84.79	76.70	58.90	69.46	对数正态
有效铜(mg/kg)	0.07	9.98	1.30	1.02	1.07	82.47	对数正态
有效锌(mg/kg)	0.42	17.40	3.59	3.21	2.03	56.44	对数正态

### 2.2 土壤有效态微量元素与种植制度和母岩的关系

通过方差分析检验种植制度和母岩两个分类变量对土壤有效态微量元素含量的影响是否显著,由表 2 可知,种植制度对土壤有效铁、锰、铜和锌含量具有显著影响( $P<0.05$ )。不同作物的施肥种类和施肥量不同,

可能引起土壤质地、pH、有机质含量等理化性质和土壤微生物的变化,从而影响土壤有效态微量元素的含量<sup>[26]</sup>。在对绿洲土壤研究中同样发现,种植方式是影响土壤有机碳含量变化的重要因素,表现为油菜地>普通玉米地>制种玉米地>小麦地的趋势<sup>[27]</sup>。土壤有效态微量元素含量在水田和旱地中也表现出显著的差异<sup>[28]</sup>。

表 2 土壤微量元素在不同种植制度间的比较  
Table 2 Comparison of soil microelements between different cropping systems

种植制度	有效铁(mg/kg)	有效锰(mg/kg)	有效铜(mg/kg)	有效锌(mg/kg)
水稻 ( $n=418$ )	97.65 ± 83.35 a	93.18 ± 59.67 a	1.68 ± 1.24 a	4.06 ± 2.05 a
柑橘 ( $n=402$ )	62.60 ± 76.84 b	97.72 ± 61.85 a	1.29 ± 1.08 b	2.96 ± 1.77 b
花椒 ( $n=130$ )	14.33 ± 25.26 d	44.00 ± 48.33 c	0.66 ± 0.42 d	2.49 ± 1.32 c
玉米-甘薯 ( $n=315$ )	42.70 ± 58.09 c	72.43 ± 47.97 b	1.06 ± 0.76 c	4.21 ± 2.14 a

注：表中同列不同小写字母表示不同种植制度间土壤微量元素差异在  $P<0.05$  水平显著(LSD 法)。

由表 3 可知,母岩对土壤有效锰、铜和锌含量有显著的影响( $P<0.05$ ),而土壤有效铁含量在 3 种母岩之间的差异没有达到显著性水平( $P>0.05$ )。土壤中微量元素主要来源于母岩,母岩在分析土壤微量元素空间变异上比其他因素更为重要<sup>[29]</sup>。不同母岩发育的土壤理化性质不同<sup>[30]</sup>,可能间接影响土壤有效态微

量元素的含量。在内蒙古地区的研究也表明母岩是影响土壤中微量元素含量的重要因素<sup>[31]</sup>。

因此,构建预测土壤有效铁、锰、铜和锌含量的模型时需考虑种植制度和母岩类型的影响,构建预测土壤有效铁含量的模型时需要考虑种植制度的影响。

表 3 土壤微量元素在不同母岩间的比较  
Table 3 Comparison of soil microelements between different parent rocks

母岩	有效铁(mg/kg)	有效锰(mg/kg)	有效铜(mg/kg)	有效锌(mg/kg)
沙溪庙组 ( $n=782$ )	63.98 ± 76.19 a	90.16 ± 57.99 b	1.19 ± 1.01 c	3.66 ± 1.95 b
自流井组 ( $n=96$ )	71.17 ± 79.97 a	104.02 ± 68.73 a	1.88 ± 1.66 a	4.42 ± 2.92 a
遂宁组 ( $n=387$ )	63.60 ± 76.00 a	69.35 ± 55.27 c	1.37 ± 0.95 b	3.25 ± 1.83 c

注：表中同列不同小写字母表示不同母岩间土壤微量元素差异在  $P<0.05$  水平显著(LSD 法)。

### 2.3 土壤微量元素预测模型

本研究将种植制度和母岩两个分类变量定量化,种植制度设置 3 个虚拟变量:以(0, 0, 0)代表玉米-甘薯 CSc 作为参照组,以(1, 0, 0)代表柑橘 CSo,以(0, 1, 0)代表花椒 CSp,以(0, 0, 1)代表水稻 CSr;母岩设置两个虚拟变量:以(0, 0)代表自流井组 PMt 为参照组,以(1, 0)代表沙溪庙组 PMr,以(0, 1)代表遂宁组 PMp。采用逐步回归的方法,分别建立一般多元线性回归和基于种植制度和母岩的多元线性回归两种模型预测土壤有效态微量元素,两种预测模型的参数如表 4 所示。

对于虚拟变量,必须保证同时进入方程,当其中一个虚拟变量具有统计学意义时,整个变量才具有统计学意义<sup>[21]</sup>。母岩对土壤有效铁含量的影响不显著,因此构建其逐步回归模型中没有加入母岩的虚拟变量。

模型的拟合度采用决定系数( $R^2$ )表示, $R^2$ 表示模型对土壤有效态微量元素变异的解释程度,其值越大,表明模型的拟合度越好。在预测变量中加入虚拟变量(种植制度、母岩)后,土壤有效铁、锰、铜和锌含量的预测模型拟合度均有提高,其中有效锰含量的

预测相对于没有加入分类变量时的模型拟合度提高了 38.99%。

随机选取 400 个验证点验证模型的精度(表 5),结果发现,加入种植制度的回归模型对有效铁含量的预测精度有提高,平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)都低于普通多元线性回归模型。基于种植制度和母岩的模型对土壤有效锰、铜和锌的预测,平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)没有一致的升高或降低的趋势。说明加入种植制度和母岩对提高土壤有效锰、铜和锌含量的预测精度效果不明显。而模型的  $R^2$  都有提高,可能由于研究区内土壤有效态微量元素的变异性较大,而验证集的选择是随机的。

### 2.4 土壤微量元素主要影响因子重要性评价

总的来说,土壤养分和种植制度对土壤有效铁和有效锰的作用较大,影响土壤有效铜和有效锌含量的因素除了土壤养分和种植制度,还有地形因素(图 2)。其中,土壤 pH、种植水稻和土壤有机质含量是影响土壤有效铁含量的主要因子,土壤 pH、种植花椒和土壤有机质含量是影响土壤有效锰含量的主要因子,土壤有机质含量、海拔和土壤 pH 是影响土壤有效锰

表 4 土壤微量元素预测模型的偏回归系数  
Table 4 Partial regression coefficients of prediction models to soil microelements

自变量	一般多元线性回归				基于种植制度和母岩的多元线性回归			
	有效铁(mg/kg)	有效锰(mg/kg)	有效铜(mg/kg)	有效锌(mg/kg)	有效铁(mg/kg)	有效锰(mg/kg)	有效铜(mg/kg)	有效锌(mg/kg)
常量	5.710	5.777	-0.824	1.660	5.881	5.480	-0.382	1.946
ELE	0.001	-	-	-	0.001	-	-	-
Slope	-0.035	-	-	-	-0.015	-	-	-
TWI	-	-	0.020	-	-	-	0.017	-
TRI	-	-	-	-	-	-	-	-
lnSPI	0.082	-	-	-	0.043	-	-	-
lnSCA	-	-	-	-	-	-	-	-
RPI	-	-0.328	-	-	-	-0.278	-	-
Relief	-	-0.003	-	-	-	0.003	-	-
pH	-0.673	-0.295	-0.064	-0.177	-0.651	-0.242	-0.064	-0.169
SOM	0.027	0.140	0.360	-0.009	0.024	0.120	0.032	-0.005
AN	0.008	-	0.006	0.006	0.003	-	0.003	0.004
AP	-0.024	-	-	0.009	-0.015	-	-	0.010
AK	-	-	-0.001	-	-	-	-	-
PMr	-	-	-	-	-	-0.019	-0.343	-0.060
PMp	-	-	-	-	-	-0.279	-0.146	-0.139
CSO	-	-	-	-	0.003	0.292	0.036	-0.371
CSp	-	-	-	-	-0.671	-0.553	-0.366	-0.305
CSr	-	-	-	-	0.533	0.106	0.182	0.050
R <sup>2</sup>	0.412	0.159	0.212	0.237	0.452	0.221	0.256	0.308
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注：表中“-”表示变量未进入模型，ELE表示海拔，Slope表示坡度，TWI表示地形湿度指数，TRI表示地形粗糙指数，SPI表示汇流动力指数，SCA表示比汇水面积，RPI表示相对位置指数，Relief表示起伏度，SOM表示有机质，AN表示碱解氮，AP表示有效磷，AK表示速效钾，PMr表示沙溪庙组，PMp表示遂宁组，CSO表示种植柑橘，CSp表示种植花椒，CSr表示种植水稻；下同。

表 5 土壤微量元素预测模型的精度比较  
Table 5 Prediction precision of different models of soil microelements

微量元素	一般多元线性回归			基于种植制度和母岩的多元线性回归		
	R <sup>2</sup>	ME	RMSE	R <sup>2</sup>	ME	RMSE
有效铁	0.412	29.47	96.31	0.452	18.25	71.34
有效锰	0.159	20.37	57.23	0.221	17.41	59.53
有效铜	0.212	0.32	0.97	0.256	0.26	1.03
有效锌	0.237	0.29	1.75	0.308	0.37	1.80

含量的主要因子，土壤 pH、土壤碱解氮含量和种植柑橘是影响土壤有效锌含量的主要因子。

土壤 pH 对土壤有效铁、锰、锌含量有很明显的作用，土壤有机质对土壤有效铜的作用相对更为重要。先前的研究也表明，土壤 pH 与土壤有效态微量元素含量呈显著的负相关关系<sup>[32]</sup>，这可能是由于有效态微

量元素的溶解度随土壤 pH 的升高而降低，土壤 pH 也影响土壤对微量元素的吸附和固定。一般土壤有机质含量较高，有利于土壤微量元素的活化，并且有机质具有较强的代换能力，避免了元素的流失。研究也发现，有机质与有效锌、铁均存在正显著相关关系，说明土壤有机质与他们的关系稳定且紧密<sup>[33-34]</sup>。

量化分类变量对土壤微量元素的重要程度(图 3)，发现种植水稻和花椒对土壤有效铁含量的作用明显；种植花椒对土壤有效锰含量的作用明显；相对于其他 3 种植制度，种植花椒对土壤有效铜含量的作用较

为明显；4 种植制度对土壤有效锌含量的作用相当。产生这种变化的原因可能是花椒地的施肥以及种植年限所致，有研究发现短期花椒种植有利于土壤活性有机碳的增加，而长期种植则降低了土壤耕作层土

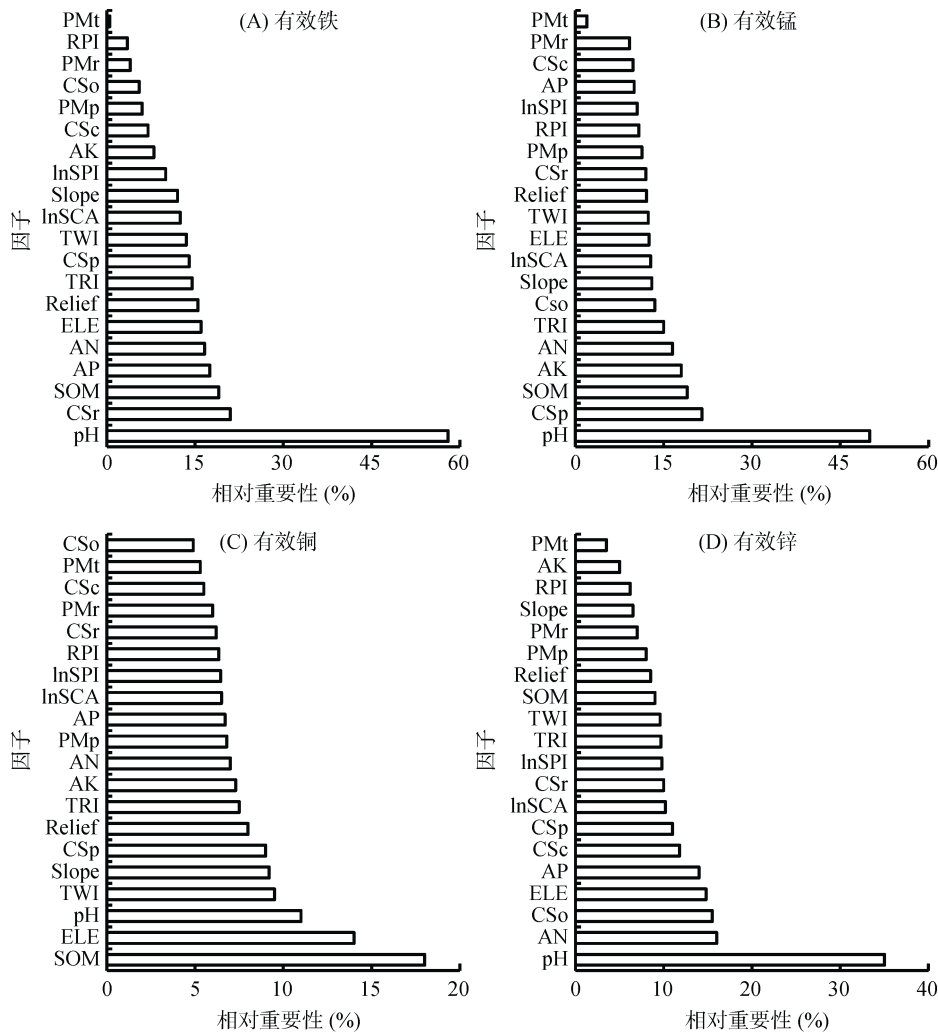


图 2 影响因子相对重要性排序

Fig.2 Rank of influential factors in relative importance of soil microelements

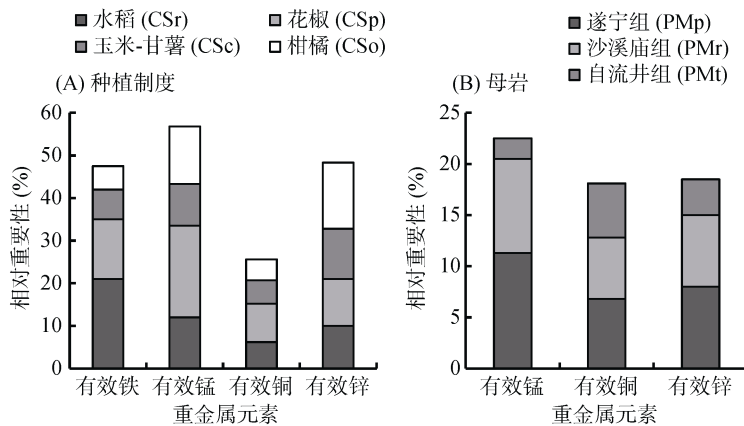


图 3 种植制度和母岩对土壤微量元素的相对重要性

Fig. 3 Relative importance of cropping systems and parent rock types in soil microelements

壤活性碳的含量<sup>[35]</sup>。水稻土长期的氧化还原交替和水耕熟化过程有利于有机质的积累以及土壤微生物群落结构的变化<sup>[36]</sup>。本研究发现母岩对土壤有效态微量元素含量的影响以遂宁组作用相对较强,自流井组作用相对较弱。

因此,江津区农田土壤有效态微量元素在花椒地、水稻田和自流井组发育的土壤中较为敏感,在田间管理时应当重视这 3 类因素。

### 3 结论

1)种植制度对土壤有效铁、锰、铜和锌的含量有显著的影响,母岩对土壤有效锰、铜和锌的含量有显著的影响。基于种植制度和母岩的土壤有效态微量元素回归模型的拟合度高于普通多元线性回归模型。

2)种植制度中,种植花椒和种植水稻对农田土壤有效态微量元素含量影响较大,母岩中,遂宁组发育的土壤对农田土壤有效态微量元素含量影响较大。

#### 参考文献:

- [1] Bang J, Hesterberg D. Dissolution of trace element contaminants from two coastal plain soils as affected by pH[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(3): 891-901
- [2] 于君宝,王金达,刘景双,等. 典型黑土 pH 值变化对微量元素有效态含量的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 93-95
- [3] 邓小,张瑶,田峰,等. 湘西州植烟土壤 pH 和中微量元素分布及其相关关系[J]. *烟草科技*, 2017, 50(5): 24-30
- [4] 李海峰,曾凡江,桂东伟,等. 不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1803-1810
- [5] Mitsimponas T. Nutrients and trace elements of arable soils rich in organic matter[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2005, 36(4/5/6): 403-414
- [6] Gangloff S, Stille P, Pierret M C, et al. Characterization and evolution of dissolved organic matter in acidic forest soil and its impact on the mobility of major and trace elements (case of the Strengbach watershed)[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2014, 130(4): 21-41
- [7] 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
- [8] 刘永红,倪中应,谢国雄,等. 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1710-1718
- [9] 张彬,杨联安,杨粉莉,等. 苹果主产区土壤养分空间分布特征及其影响因素——以陕西省礼泉县为例[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 777-784
- [10] Hengl T, Heuvelink G B M, Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging[J]. *Geoderma*, 2004, 120(2): 75-93
- [11] Kim D, Zheng Y B. Scale-dependent predictability of DEM-based landform attributes for soil spatial variability in a coastal dune system[J]. *Geoderma*, 2011, 164(4): 181-194
- [12] 张国平,郭澎湃,王正银,等. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 113-120
- [13] Mouazen A M, Kuang B, Baerdemaeker J D, et al. Comparison among principal component, partial least squares and back propagation neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2010, 158(1): 23-31
- [14] 纪文君,李曦,李成学,等. 基于全谱数据挖掘技术的土壤有机质高光谱预测建模研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2393-2398
- [15] 李珊,李启权,张浩,等. 泸州植烟土壤有效态微量元素含量空间变异及其影响因素[J]. *土壤*, 2016, 48(6): 1215-1222
- [16] Were K, Bui D T, Dick Ø B, et al. A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic carbon stocks across an afro-montane landscape[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 394-403
- [17] Wiesmeier M, Barthold F, Spörlein P, et al. Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria(southeast Germany)[J]. *Geoderma Regional*, 2014, 1: 67-78
- [18] 郭澎湃,李茂芬,罗微,等. 基于多源环境变量和随机森林的橡胶园土壤全氮含量预测[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 194-202
- [19] 秦承志,卢岩君,包黎莉,等. 简化数字地形分析软件(SimDTA)及其应用——以嫩江流域鹤山农场区的坡位模糊分类为例[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 737-743
- [20] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications[J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(1): 3-30
- [21] 梅丽莎 A 海蒂. 虚拟变量回归[M]. 上海: 格致出版社, 2012
- [22] 王苗苗,陈洪松,付同刚,等. 典型喀斯特小流域不同植被类型间土壤养分的差异性及其空间预测方法[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1789-1766
- [23] Guo P T, Li M F, Luo W, et al. Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach[J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 49-59
- [24] Mora-Vallejo A, Claessens L, Stoorvogel J, et al. Small scale digital soil mapping in Southeastern Kenya[J]. *CATENA*, 2008, 76(1): 0-53

- [25] 郭乃嘉, 史学正, 赵永存, 等. 人为与环境因子对农田土壤有机质影响的比较研究——以典型黑土区和水稻土区为例[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1097–1106
- [26] 郭荣发, 杨杰文. 成土母质和种植制度对土壤 pH 和交换性铝的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 984–990
- [27] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 耕作历史和种植制度对绿洲农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 196–203
- [28] 王昌全, 李冰, 龚斌, 等. 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
- [29] Tao S, Cao J, Li B G, et al. Distribution pattern of trace elements in soil from Shenzhen area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(2): 248–255
- [30] 徐尚平, 陶澍, 徐福留, 等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 337–345
- [31] 姜坤, 秦海龙, 卢瑛, 等. 广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 319–324
- [32] Mehdi N, Seied M H, Hossein A B, et al. Using fuzzy clustering algorithms to describe the distribution of trace elements in arable calcareous soils in northwest Iran[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2013, 59(3): 435–448
- [33] 章程, 谢运球, 吕勇, 等. 广西弄拉峰丛山区土壤有机质与微量营养元素有效态[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 63–66
- [34] 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): 990–993
- [35] 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2015(3): 1053–1059
- [36] 包丽君, 贾仲君. 模拟干湿交替对水稻土古菌群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 191–203

## Spatial Prediction of Soil Available Microelement Contents and Quantitative Analysis of Influential Factors in Farmland

QIAO Yina<sup>1,2</sup>, LIU Hongbin<sup>3</sup>

(1 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, Chongqing 400715, China; 3 College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** To further explore the influential factors of soil available microelements, the farmland soils in Jiangjin of Chongqing were taken as the study objects, the data of 1 265 sampling sites, together with cropping systems and parent rock types, were used to construct the regression model of soil microelements and random forest model (RF) was used to quantitatively analyze the relative importance of influential factors of soil available microelements. The results showed that the prediction model with the cropping system and the parent rock type was higher than the conventional regression model, the fitting degrees ( $R^2$ ) of available Fe, Mn, Cu and Zn were increased by 9.20%, 38.99%, 20.75% and 29.96%, respectively, compared with the conventional regression model. The prediction accuracy was improved for soil available Fe, but not for available Mn, Cu and Zn. Soil nutrients and cropping system were relatively important for the contents of available microelements in farmlands, and among of them, the effects of pepper and rice planting as well as soils derived from Suining Formation were relatively important. This study could provide theoretical and scientific bases for reasonable fertilization and management of Jiangjin farmlands.

**Key words:** Soil available microelements; Dummy variable; Random forest model; Influential factors