



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

从化区农田耕层土壤有效硅空间分布及影响因素

渠悦, 马涛, 胡月明, 刘洛, 孙孝林

引用本文:

渠悦, 马涛, 胡月明, 等. 从化区农田耕层土壤有效硅空间分布及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 989–998.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0545>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弃耕行为对亚热带农田土壤有机质时空变化作用机理研究

张童瑶, 胡月明, 任向宁, 陈飞香, 冯雪珂

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 805–817 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0480>

山东“蓝黄”两区耕层土壤有机质的时空分异特征

李因帅, 赵庚星, 李涛, 李建伟, 窦家聪, 范瑞彬

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 891–899 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0572>

黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质时空变异及影响因素

解文艳, 周怀平, 杨振兴, 冯悦晨, 白雪, 杜艳玲

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 96–104 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0195>

健康视角下我国亚热带水田粮食产能关键限制因子识别——以广州市从化区为例

任向宁, 王璐, 胡月明, 杨颢, 谢英凯, 韦泽棉

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 793–804 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0478>

重庆农田土壤硫分布特征及其影响因素

罗曼琳, 窦添元, 向秋洁, 胡翔宇, 木志坚

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 287–297 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0306>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

渠悦, 马涛, 胡月明, 等. 从化区农田耕层土壤有效硅空间分布及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 989–998.

QU Y, MA T, HU Y M, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil available silicon in farmland cultivated layers in Conghua District[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(6): 989–998.



开放科学 OSID

从化区农田耕层土壤有效硅空间分布及影响因素

渠悦^{1,2}, 马涛^{1,3}, 胡月明^{1,2,3}, 刘洛^{1,2,3}, 孙孝林^{4*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 广东省土地信息工程技术研究中心, 广州 510642; 3. 广州市华南自然资源科学技术研究院, 广州 510642; 4. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要:为探究广州市从化区农田土壤有效硅空间分布及影响因素, 以为促进我国粮食主产区水稻产量增长提供科学依据和参考, 采用描述性统计、地统计学、相关性分析与GIS(地理信息系统)技术结合的方法对从化区土壤有效硅开展研究。结果表明, 研究区土壤有效硅平均含量为 $60.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体偏低, 并呈现中度变异; 在中心区域、粮食主产区和丘陵地带, 土壤有效硅含量较高; 有效硅含量与土壤pH、有机质含量、黏粒含量呈正相关, 土地利用方式、成土母质对其也有显著影响。研究表明, 在所考虑的影响因素中, 成土母质对从化区农田土壤有效硅的影响程度居于首位。

关键词:农田耕层; 土壤有效硅; 空间分布特征; 影响因素

中图分类号:S153;S159 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)06-0989-10 doi: 10.13254/j.jare.2021.0545

Spatial distribution and influencing factors of soil available silicon in farmland cultivated layers in Conghua District

QU Yue^{1,2}, MA Tao^{1,3}, HU Yueming^{1,2,3}, LIU Luo^{1,2,3}, SUN Xiaolin^{4*}

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Province Engineering Research Center for Land Information Technology, Guangzhou 510642, China; 3. South China Academy of Natural Resources Science and Technology, Guangzhou 510642, China; 4. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: To explore the spatial distribution and influencing factors of available silicon in agricultural soils in Conghua District, Guangzhou City, with a view of providing scientific basis and reference for promoting the growth of rice yield in the main grain-producing areas of China, descriptive statistics, geostatistics, correlation analysis and GIS technology were used to study the soil available silicon in Conghua District. The results showed that the average content of soil available silicon in the study area was $60.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was generally low and showed moderate variation; in the central area, main grain production areas and hilly areas, the soil available silicon content was relatively high; the effective silicon content was positively correlated with soil pH, organic matter content, and clay content. The land use patterns and soil parent materials also had a significant impact. The study shows that the parent material is the most important among the factors considered.

Keywords: farmland plow layer; soil available silicon; spatial distribution characteristics; influencing factors

收稿日期: 2021-08-20 录用日期: 2021-10-27

作者简介: 渠悦(1999—), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事土地利用与地理信息系统研究。E-mail: quyuecn@163.com

*通信作者: 孙孝林 E-mail: sun_xiaolin@yahoo.com

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YFD1100204); 国家自然科学基金项目(U1901601); 广东省科技兴农-农业科技创新及推广项目(2021KJ102)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2020YFD1100204); The National Natural Science Foundation of China(U1901601); Guangdong Province Science and Technology Prospering Agriculture - Agricultural Science and Technology Innovation and Promotion Project(2021KJ102)

粮食安全问题已成为人类面临的全球性问题,需要多方面的全球性战略来应对^[1]。水稻作为人类最重要的粮食作物之一,广泛种植于华南地区^[2-3]。硅作为地壳中的第二大元素,主要分布于土壤溶液或吸附在土壤胶体表面。硅虽不是植物生长发育的必需营养元素,却在植物生长过程中必不可少,尤其是水稻的生长。硅可以改善水稻的形态结构,促进水稻生长发育,并显著影响水稻的品质与产量^[4]。广州市从化区位于亚热带地区,气温高,雨量大,受气候和降水的影响,土壤淋溶作用强,多呈酸性,土壤类型主要为赤红壤、红壤、水稻土等。红壤是在脱硅富铝化和生物富集作用下发育形成的酸性铁铝土^[5],其有效硅的含量较低^[6]。因此,掌握华南地区土壤中有效硅的分布特征及影响因素,有助于提高该地区粮食产量,从而一定程度上缓解粮食问题。

目前,许多学者采用地统计学方法研究土壤元素的空间分布特征。例如,杨本漫等^[7]采用地统计学方法分析土壤水盐空间分布特征,并用半方差函数分析发现样地土壤水盐存在空间变异性;一些学者利用克里格插值法预测森林土壤中有效碳和全氮等元素的空间分布^[8-9]。地统计学方法的精度受半变异函数的权重影响不易控制,因此有学者采用贝叶斯最大熵(BME)、随机森林等机器学习算法,通过多次训练进行预测^[10-11]。

目前关于土壤有效硅空间分布特征的研究并不多,有限的研究土壤硅的学者提出,土壤pH、有机质含量、成土母质、土壤黏粒含量等为土壤硅空间分布特征的主要影响因子。然而,这些研究的尺度与方法不同,其结果和结论并不具有普遍性^[12-14]。同时,这些研究大多是对数据进行简单的空间分布描述^[15-16],且集中在田块尺度上,不适于对县域尺度的研究。

因此本研究从县域尺度上,以广泛种植水稻的广州市从化区为例,研究土壤有效硅含量的空间分布特征及变异规律,并定量分析其影响因素,为提升该地区耕地质量提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

从化区位于广州市北部,地理坐标为 $113^{\circ}17' \sim 114^{\circ}04' E$ 、 $23^{\circ}22' \sim 23^{\circ}56' N$,总面积 $1\,974.5\text{ km}^2$,下辖3个街道和5个镇,如图1所示。属于亚热带季风气候,全年气候温和,雨量充沛,年平均气温为 $19.5 \sim 21.4^{\circ}C$,年平均雨量 $1\,800 \sim 2\,200\text{ mm}$,水热资源丰富。从化区地势自东北向西南逐渐降低,海拔为 $16.30 \sim 1\,210\text{ m}$,如图2所示。山地、丘陵多分布在东北部地势较高的地区;中南部则以丘陵、谷地为主;西部地区地势较低,多分布丘陵、台地。从化区主要土壤类型有红壤、黄壤、赤红壤

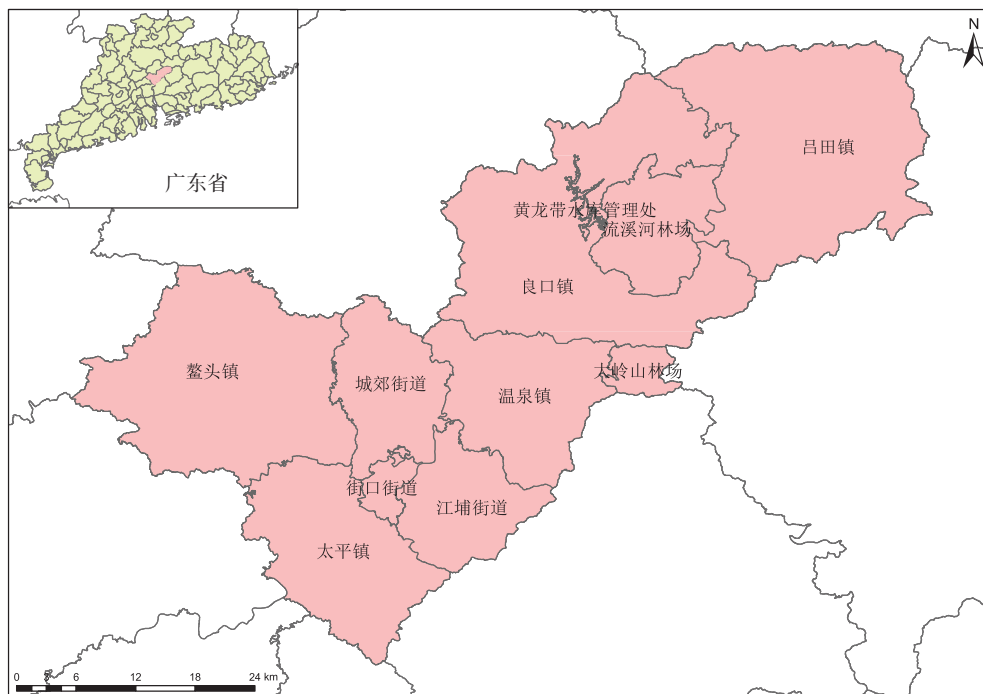


图1 从化区地理位置和行政区划

Figure 1 Geographical location and administrative division of Conghua District

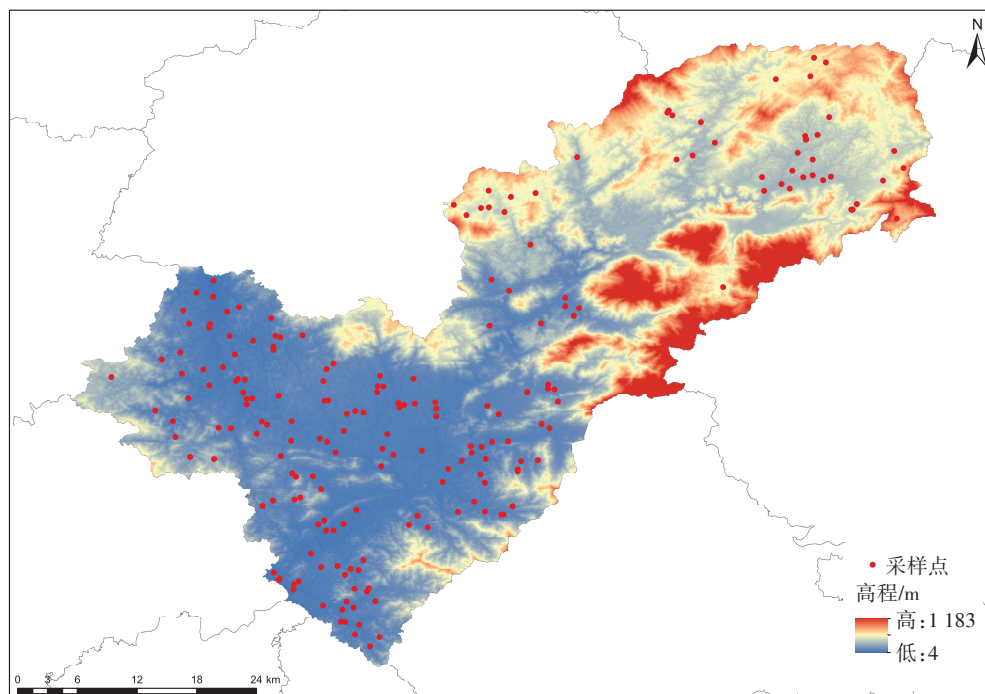


图2 从化区土壤样点分布

Figure 2 Distribution of soil samples in Conghua District

和水稻土等,农田土地利用方式主要为水田、园地和旱地;截至2018年末,常用耕地面积约为200.67 km²,耕作条件良好,适宜双季稻的种植。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集与测定

根据研究区土地利用方式、土壤类型、耕地图斑的大小及分布情况,并结合网格法与随机法,最终确定了204个样点,研究区样点分布见图2。在研究区内通过GPS定位到样点位置,确定样点中心,并在其四个对角线上分别确定与中心点距离约15 m左右的点;在中心点及对角线上的点各采集等量耕层土壤,混合即得到该点的土壤样品。

土壤有效硅含量通过柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法测定;土壤pH通过水浸提电位法测定;土壤有机质含量用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤机械组成通过土壤比重计测定,并采用国际制进行分级:砂粒(0.02~2.00 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和黏粒(<0.002 mm);土壤类型和成土母质数据来自第二次全国土地调查(2009年)。

1.2.2 数据处理

为剔除土壤有效硅含量可能会出现的异常值,采用Box-Plot图法对样点进行检测,并将7个偏离样本其他观测值的异常点剔除,剔除异常值后样点数为197个。为使数据符合正态分布,在SPSS 24.0中进行

正态分布检验并根据需要进行对数变换。

1.2.3 空间自相关分析

空间自相关可以反映观测数据之间的相关性与异质性,常用Moran's *I*指数来衡量,最早由Moran于1948年提出。本研究采用全局和局部Moran's *I*指数衡量土壤有效硅空间自相关:

全局Moran's *I*指数:

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W(i,j)} \times \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W(i,j) \times (X_i - \bar{X}) \times (X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

局部Moran's *I*指数:

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}} \sum_{j=1}^n W(i,j) (X_j - \bar{X}) \quad (2)$$

式中: N 为样点数; X_i 、 X_j 为样点有效硅含量; $\bar{X}$ 为 X_i 、 X_j 均值; $W(i,j)$ 为空间权重。全局Moran's *I*取值范围为 $[-1, 1]$, $I > 0$ 表明属性值在空间上存在正相关关系,研究对象呈集聚分布; $I < 0$ 表明属性值在空间上存在负相关关系,研究对象呈离散分布; I 趋近于0表示研究对象几乎不存在空间自相关,呈随机分布。

LISA集聚图常常用来表现局部空间自相关,在集聚图中分为H-H型、L-H型、L-L型、H-L型四种类

型,分别表明四种空间相关关系。其中H-H型表示土壤有效硅含量高集聚地区的相邻地区也高;L-H型表示土壤有效硅含量低集聚地区相邻地区集聚程度高;L-L型表示土壤有效硅含量低集聚地区的相邻地区也低;H-L型表示土壤有效硅含量高集聚地区相邻地区集聚程度低。

1.2.4 地统计分析

克里格法是以变异函数和结构分析为基础,在有限区域内对已知样点赋权重,求取未知样点值的线性无偏最优估计方法^[17-18]。变异函数公式见式(3):

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (3)$$

式中: $r(h)$ 为变异函数; $N(h)$ 为样点集合中间距为 h 的点对数量; $z(x_i + h)$ 和 $z(x_i)$ 分别为样点在 $(x_i + h)$ 和 x_i 处的观测值^[19]。由半变异函数曲线可以得到块金值(C_0)与基台值($C_0 + C$),块金值与基台值的比值越接近1说明随机性变异越强,越接近0说明空间相关性越弱。

1.2.5 相关性分析、方差分析与重要性排序

考虑到土壤有机质、pH、机械组成、土壤类型、土地利用方式等因素对土壤有效硅含量具有一定影响,因此对这些土壤属性进行相关性分析与方差分析,筛选出与土壤有效硅含量显著相关的影响因素,并在

Rstudio软件中利用随机森林算法,通过分析均方误差,对研究区土壤有效硅含量的影响因素进行影响程度的排序。

2 结果与分析

2.1 土壤有效硅空间变异规律

2.1.1 土壤有效硅含量描述性统计

研究区农田耕层土壤有效硅含量最小为 $7.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最大为 $137.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $60.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,标准差为 $29.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数为48.37%,属于中度变异。参照文献[13]中相关分级标准,土壤有效硅含量 $\geq 230 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 属丰富,115~230 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 属较丰富,70~115 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 属中等,25~70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 属较缺乏, $\leq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 属缺乏。研究区多集中在25~70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,属较缺乏状态。

2.1.2 土壤有效硅含量空间自相关分析

土壤有效硅含量的全局Moran's I 指数为0.18,且 P 值小于0.01,说明研究区样点土壤有效硅含量呈现出显著的正空间自相关。土壤有效硅LISA集聚图见图3。由LISA集聚图可以看出,H-H型表明该样点附近出现了高值集聚的情况,主要分布在从化区中部和中西部,该区域地势平坦、土壤肥沃、农业科技水平高;L-L和H-L型主要分布在从化区南部的太平

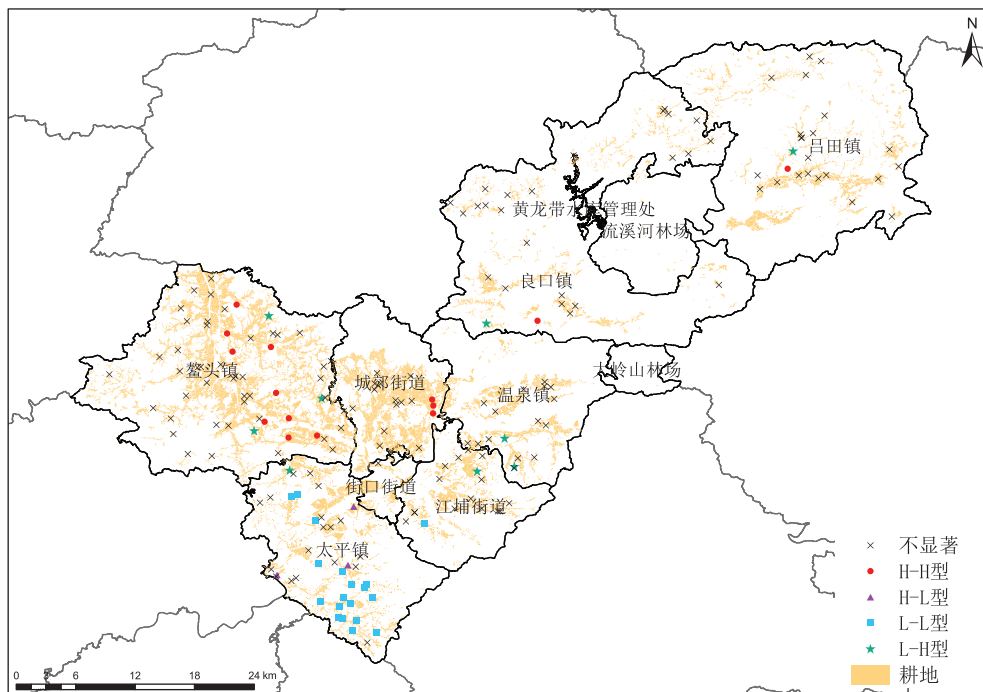


图3 从化区农田耕层土壤有效硅LISA集聚图

Figure 3 LISA accumulation map of farmland soil available silicon in Conghua District

镇,主要原因可能为太平镇耕地大多为果园,对于土壤中有效硅的需求较小。

2.1.3 土壤有效硅含量空间变异结构特征

利用GS+7.0对研究区土壤有效硅含量进行变异函数拟合得到表1。从表1可以看出,与其他模型相比,线性模型的决定系数最大,残差最小,故选择线性模型作为变异函数拟合模型。线性变异函数表明,块金值/基台值为49.84%,属于中等空间自相关,结构性和随机性因素都影响研究区农田耕层土壤有效硅含量的空间变异,说明在变程范围内,研究区土壤有效硅含量分布存在中等强度的空间自相关性。由0°、45°、90°和135°四个方向上的半方差函数图(图4)可以看出,0°和90°方向上的变异程度最大,45°方向的变异程度大于135°方向。这主要是由于东西和南北、

东北-西南方向距离较长,且研究区地势自北向南倾斜,山地、丘陵多分布在东北部地势较高的地区;中南部则以丘陵、谷地为主;西部地区地势较低,多分布丘陵、台地。

2.1.4 土壤有效硅含量预测

根据表1的半方差函数理论模型,在ArcMap10.2中选择普通克里格进行空间插值,得到研究区农田耕层土壤有效硅含量空间分布图(图5)。从图5可以看出,研究区农田耕层土壤有效硅含量整体呈现从中部向周围递减的趋势,且图5土壤有效硅含量空间分布与LISA聚类分布图相似,H-H型主要分布在土壤有效硅含量较高的区域,H-L和L-L型集中分布在土壤有效硅含量较低的区域,说明土壤有效硅含量的空间分布具有较强的空间自相关性。

表1 从化区土壤有效硅含量半方差函数理论模型

理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget(C_0)	基台值 Sill(C_0+C)	块金值/基台值 (Nugget/Sill)/%	变程 Range/m	决定系数 Coefficient of determination(R^2)	残差 Residual
指数模型 Exponential	0.25	0.32	79.47	17 010	0.33	0.01
线性模型 Linear	0.15	0.31	49.84	36 693	0.56	0.00
球形模型 Spherical	0.02	0.30	6.29	2 720	0.18	0.01
高斯模型 Gaussian	0.04	0.29	14.96	2 338	0.18	0.01

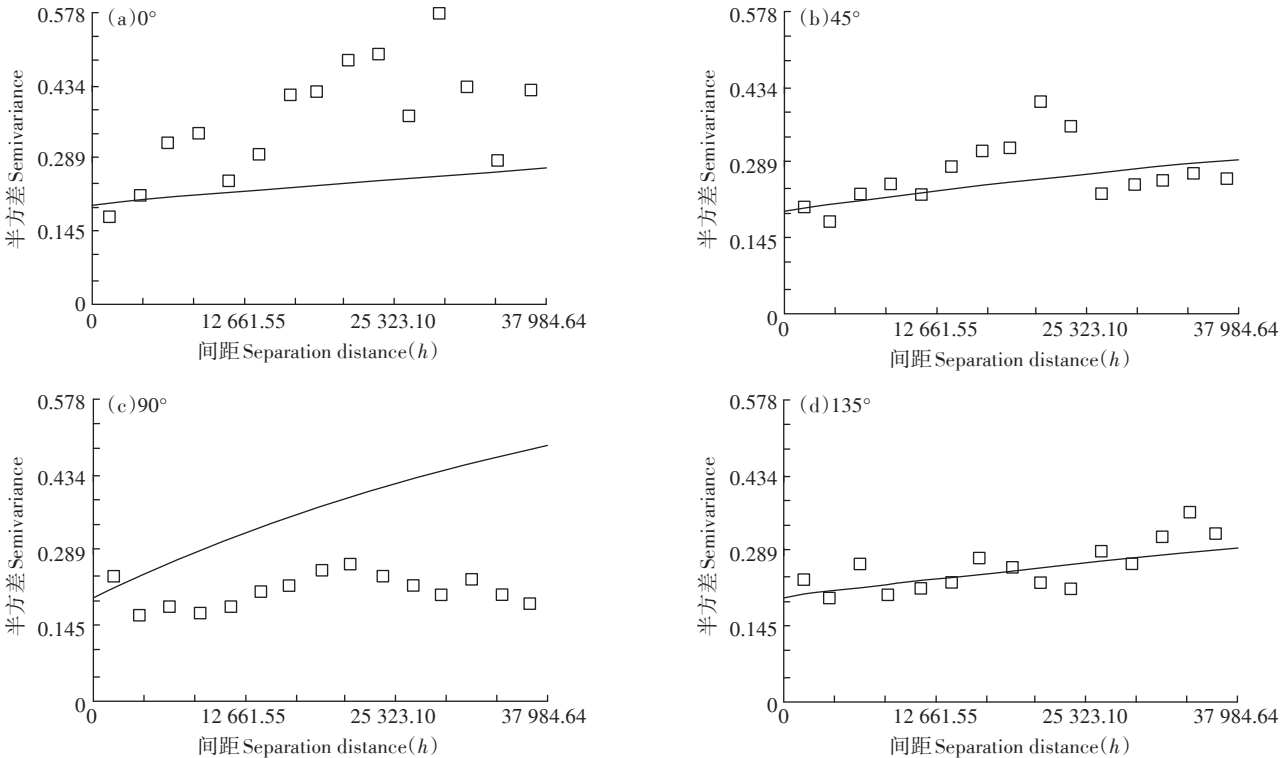


图4 从化区土壤有效硅各向异性半方差函数

Figure 4 Semivariance function of soil available silicon anisotropy in Conghua District

由克里格插值预测标准差图(图6)可以看出,良口镇的东南部、吕田镇的西南部和东北部地区插值误差较大,太平镇的大部分地区插值误差较小,这是由于采样点密集程度不同所致,预测误差随着采样点密

集程度的增加而减少。本研究采样整体分布较为均匀,未出现严重的误差。

2.2 土壤有效硅空间分布特征

表2反映出各行政区农田耕层土壤有效硅含量

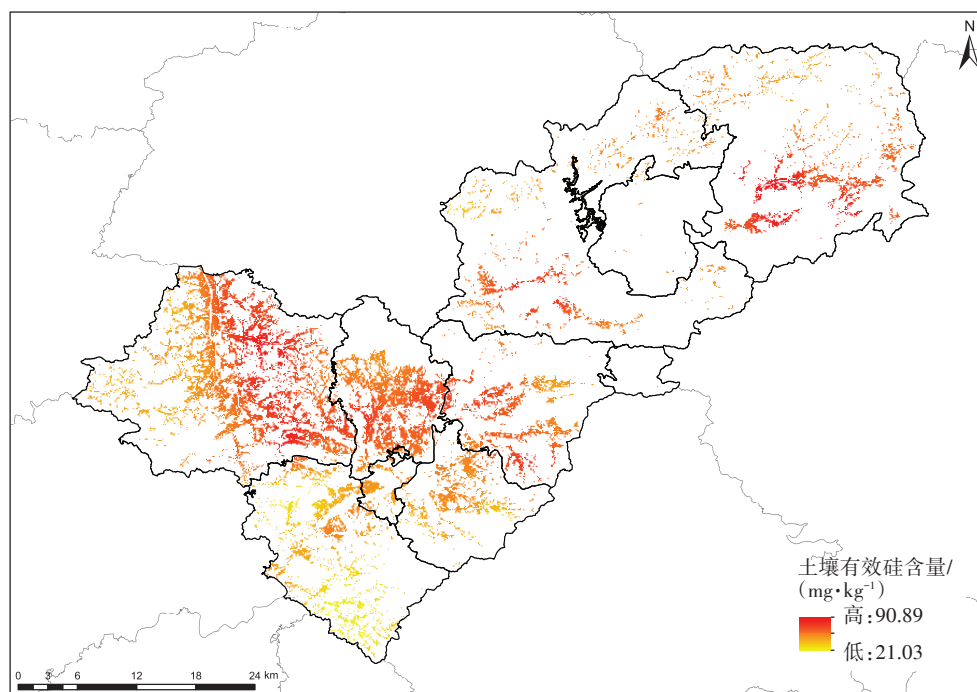


图5 从化区土壤有效硅含量空间分布

Figure 5 Spatial distribution of soil available silicon content in Conghua District

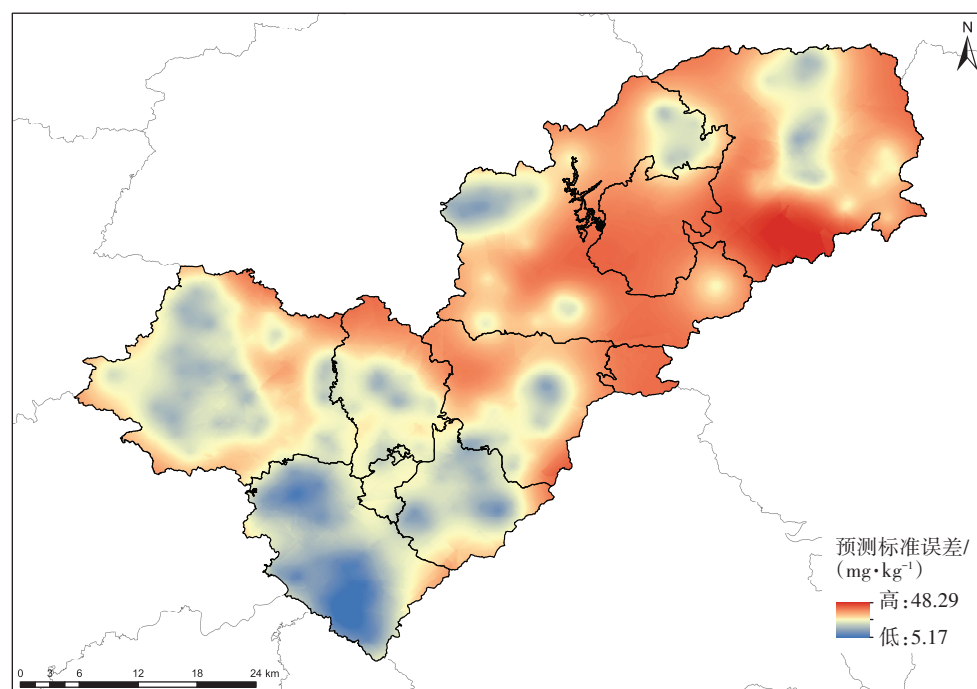


图6 从化区土壤有效硅含量预测标准误差

Figure 6 Standard error of prediction of soil available silicon content in Conghua District

存在差异。土壤有效硅平均含量最高值分布在城郊街道,其次是吕田镇和温泉镇,平均含量最低值分布在太平镇。城郊街道、江埔街道和街口街道位于中心位置,基础设施完备,田间管理水平较高;鳌头镇经济作物种类多、管理勤,故土壤有效硅含量较高;温泉镇作为著名的温泉风景区,生态环境优势突出;良口镇和吕田镇为从化区粮食主产区,土壤本底自然状况和田间管理技术显示出巨大的优势;太平镇靠近珠三角经济发展地区,随着人口的增长和经济发展,土地利用方式转换且大量使用肥料等化学用品,故该区域有效硅含量下降。

从化区地貌可以划分为流溪河平原、丘陵(西部丘陵区)和山地(西部、东部、北部和中部山地区),并将样点按照地貌区进行统计得到表3。统计发现,研究区农田耕层土壤有效硅平均含量最高值分布在西部丘陵区,其次是流溪河平原,均高于全区平均含量,平均含量最低值分布在山地区域。三种地貌区土壤

有效硅含量都集中在25~70 mg·kg⁻¹,属较缺乏状态。

2.3 土壤有效硅含量影响因素

2.3.1 土地利用方式对土壤有效硅含量的影响

土地利用方式的不同会导致管理措施、凋落物量产生差异,从而影响土壤有效硅含量。由表4可以看出,不同利用方式下土壤有效硅含量差异较大,具体表现为水田(64.74 mg·kg⁻¹)>旱地(53.55 mg·kg⁻¹)>园地(44.47 mg·kg⁻¹),变异系数为园地(70.77%)>旱地(52.29%)>水田(42.57%),由此说明研究区不同土地利用方式下土壤有效硅含量均为中等变异性,但园地的土壤有效硅含量变异较为强烈,水田的有效硅含量较为稳定,更有利于土壤有效硅含量的累积。经方差分析得知,*F*检验的*P*值小于0.001,表明土壤有效硅含量在不同土地利用方式下差异显著。

2.3.2 土壤pH对土壤有效硅含量的影响

由表5可以看出,研究区大部分样点土壤pH值为5.0~6.5,主要为酸性土壤,且有效硅最大值也出现

表2 各行政区土壤有效硅含量统计

Table 2 Statistics of soil available silicon content in each administrative district

行政区 Administrative district	样点数 Number of samples	范围 Range/(mg·kg ⁻¹)	均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	各等级土样占比 Proportion of each grade in soil sample/%				
				≥230	115~230	70~115	25~70	≤25
鳌头镇	55	23.41~131.23	67.60	0	9.09	32.73	56.36	1.82
城郊街道	17	33.03~113.83	70.26	0	0	47.06	52.94	0
江埔街道	16	18.22~116.46	54.94	0	12.50	12.50	62.50	12.50
街口街道	2	35.08~69.56	52.32	0	0	100	0	0
良口镇	26	26.05~137.72	59.72	0	7.69	19.23	73.08	0
吕田镇	24	29.00~133.17	68.58	0	8.33	29.17	62.50	0
太平镇	39	7.55~112.30	40.00	0	0	10.26	61.54	28.20
温泉镇	18	24.26~119.24	68.15	0	5.56	38.89	49.99	5.56
全区	197	7.55~137.72	60.31	0	6.60	25.89	60.41	7.10

表3 各地貌区土壤有效硅含量统计

Table 3 Statistics of soil available silicon content in various morphological areas

地貌区 Landform	样点数 Number of samples	范围 Range/(mg·kg ⁻¹)	均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	各等级土样占比 Proportion of each grade in soil sample/%				
				≥230	115~230	70~115	25~70	≤25
北部、中部、西部和东部山区	106	7.55~137.72	56.47	0	6.60	19.81	64.15	9.44
西部丘陵区	57	23.41~131.23	67.24	0	8.77	31.58	57.89	1.76
流溪河平原区	34	8.92~113.83	60.67	0	0	35.30	52.94	11.76

表4 不同土地利用方式下土壤有效硅含量

Table 4 Soil available silicon content under different land use patterns

土地利用方式	样点数	范围	均值	标准差	变异系数
Land use	Number of samples	Range/(mg·kg ⁻¹)	Mean/(mg·kg ⁻¹)	Standard deviation/(mg·kg ⁻¹)	Coefficient of variation/%
水田	145	16.66~133.17	64.74	27.56	42.57
园地	32	7.55~137.72	44.47	31.47	70.77
旱地	20	23.14~131.23	53.55	28.00	52.29

在pH为5.0~6.5的样点中。经方差分析得知, F 检验的 P 值小于0.001;经相关性分析得知,pH在5.0~6.5之间时,pH与土壤硅含量的相关系数为0.254,土壤pH与有效硅含量呈现正相关。这是由于在酸性、中性土壤中,随着土壤pH的增加,淋溶作用减弱,硅便不易被淋失^[20]。

2.3.3 土壤有机质对土壤有效硅含量的影响

根据全国第二次土壤普查耕层有机质含量数据,按 ≥ 40 、30~40、20~30、10~20、6~10、 ≤ 6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 区间将有机质划分为6级,研究区197个样点中土壤有机质含量主要分布在10~30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 这一范围内,属中等水平(表6)。不同土地利用方式下土壤有机质含量存在明显差异,水田的土壤有机质含量高于旱地,原因在于水田的淹水作用使得土壤有机质分解速率较低,有利于土壤有机质的积累。通过相关性分析得出,当土壤有机质含量 ≥ 40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,农田耕层土壤有效硅含量与土壤有机质含量呈显著正相关,相关系数为0.857;在其他土壤有机质含量分组中无明显相关性。

2.3.4 成土母质对土壤有效硅含量的影响

从表7统计分析结果可以看出,不同成土母质下土壤有效硅含量表现为:第四纪红土>花岗岩类风化物>河流冲积土>砂页岩类风化物。砂页岩类风化物发育的土壤有效硅含量最低,为36.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,第四

纪红土发育的土壤有效硅含量最高,为65.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对不同母质下土壤有效硅进行方差分析,得到 F 值为9.505,且 P 小于0.001,说明成土母质对土壤有效硅含量有显著影响。

2.3.5 土壤机械组成对土壤有效硅含量的影响

土壤机械组成包含砂粒、粉粒和黏粒,其中黏粒含量对土壤的性能影响较大,在从化区土壤机械组成中,土壤的黏粒含量最高。表8列出了研究区土壤机械组成与有效硅含量的相关系数矩阵,可以看出,土壤有效硅含量与土壤容重呈显著负相关,相关系数为-0.266;与粗砂粒、细砂粒和粉粒含量相关性不显著;与黏粒含量呈显著正相关,相关系数为0.185。

2.3.6 基于随机森林的影响因素重要性排序

通过重要性排序发现影响研究区农田耕层土壤有效硅的主要因子是成土母质,其相对重要性在20~25之间,明显高于其他影响因素;其次是土壤容重、土壤黏粒含量、土壤pH和土地利用方式,它们的相对重要性在10~20之间,是影响研究区农田耕层土壤有效硅的次要因子;土壤有机质含量对土壤有效硅的影响最小,相对重要性处于0~5之间。

3 讨论

本研究从县域尺度研究从化区土壤有效硅含量

表5 不同土壤pH值下土壤有效硅含量

Table 5 Soil available silicon content under different soil pH values

土壤pH值 Soil pH	样点数 Number of samples	极差 Range/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最小值 Min/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 Max/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	均值 Mean/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
pH<5.0	10	54.30	7.55	61.85	34.26	21.07	61.50
5.0≤pH<6.5	176	128.45	9.27	137.72	60.79	28.68	47.18
6.5≤pH<7.5	10	96.05	33.78	129.83	79.60	29.89	37.55
7.5≤pH<8.5	1	0.00	43.44	43.44	43.44	—	—
所有样点	197	69.70	23.51	93.21	54.52	20.14	36.56

表6 不同土壤有机质含量下土壤有效硅含量

Table 6 Soil available silicon content under different soil organic matter content

有机质含量 Soil organic matter content	样点数 Number of samples	极差 Range/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最小值 Min/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 Max/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	均值 Mean/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
≥ 40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	7	53.74	54.20	107.94	76.43	17.23	22.54
30~40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	27	123.68	7.55	131.23	63.71	30.69	48.17
20~30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	73	117.00	20.72	137.72	63.68	29.95	47.03
10~20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	81	109.77	16.66	126.43	56.25	27.62	49.10
6~10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	8	106.27	8.92	115.19	51.39	32.49	63.22
≤ 6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1	0.00	9.27	9.27	9.27	—	—
所有样点	197	85.08	19.55	104.63	53.46	27.60	46.01

表7 不同成土母质下土壤有效硅含量

Table 7 Soil available silicon content under different soil parent materials

成土母质 Soil parent material	样点数 Number of samples	极差 Range/(mg·kg ⁻¹)	最小值 Min/(mg·kg ⁻¹)	最大值 Max/(mg·kg ⁻¹)	均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard Deviation/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of Variation/%
第四纪红土	44	104.63	26.60	131.23	65.69	24.94	37.97
河流冲积土	19	103.03	9.27	112.30	54.19	29.90	55.18
花岗岩类风化物	106	119.50	18.22	137.72	65.59	29.41	44.84
砂页岩类风化物	28	94.28	7.55	101.83	36.02	20.78	57.69
所有样点	197	75.60	23.44	99.04	53.51	25.17	46.84

表8 土壤机械组成与土壤有效硅含量相关矩阵

Table 8 Correlation matrix between soil mechanical composition and soil available silicon content

相关系数 Correlation coefficient	有效硅含量 Available silicon content	土壤容重 Bulk density	粗砂粒 Coarse sand	细砂粒 Fine sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
有效硅含量	1	-0.266**	-0.115	-0.094	-0.043	0.185**
土壤容重		1	0.102	-0.020	-0.067	-0.067
粗砂粒			1	-0.473**	-0.434**	-0.546**
细砂粒				1	0.206**	-0.362**
粉粒					1	-0.169*
黏粒						1

注:**和*分别代表在0.01和0.05水平(双侧)上显著相关。

Notes:** and * represent the significant correlation at 0.01 and 0.05 levels, respectively(two-sided).

的分布特征及变异规律,定量分析其影响因素,并对影响因素的重要性进行了排序。本研究发现从化区农田耕层土壤有效硅含量较低,且存在中等强度的空间自相关,而且整个研究区土壤有效硅含量分布不均衡,中南部土壤有效硅含量相对较高,这可能与研究区的地形地貌、土地利用方式及区域的管理水平、经济发展水平有关。由于取得的数据资料有限,本研究只考虑了土壤要素,并未将人为活动的影响列入土壤有效硅的影响因素中,对人为施肥等活动对土壤的影响缺乏考虑,需进一步探究。

本研究发现成土母质是影响从化区土壤有效硅含量的最重要因素。这与前人的研究结果——土壤pH是最重要的影响因素不同。这可能是因为本研究为县域尺度,研究范围较广,而成土母质为土壤有效硅的最初来源,土壤是以成土母质发育而来,不同母质发育的土壤在土壤结构、养分等方面存在差异^[21],并且会保留成土母质的某些性质及特征,因此成土母质重要程度最高。

本研究也发现土壤有效硅含量与土壤pH和土壤黏粒含量均呈正相关。土壤具备一定酸度才会使硅从岩石中分离^[20],所以当土壤pH增加到一定程度时,在碱性土壤中,有效硅和土壤pH之间可能存在负相

关^[22]。土壤对硅酸的吸附主要发生在黏粒表面,黏粒含量高的土壤对硅酸吸附量大,研究区处于亚热带地区,土壤中黏粒含量偏多,因此黏粒含量与土壤有效硅含量呈正相关。从化区位于亚热带地区,具有黏粒含量较高、pH偏酸、土地利用方式为水田的特点,在淹水状态可以使营养元素和土壤有机质积累,因此土壤黏粒含量、土壤pH和土地利用方式对研究区土壤有效硅含量的影响程度也较高。

4 结论

(1)从化区土壤有效硅含量为7.55~137.72 mg·kg⁻¹,平均含量为60.31 mg·kg⁻¹,变异系数为48.37%,属中等变异。中心区域、粮食主产区和丘陵地带土壤有效硅含量相对较高,而以园地为主要土地利用类型的区域土壤有效硅含量相对较低。

(2)由于从化区地势自北向南倾斜,东北高、西南低,土壤有效硅含量在0°和90°方向变异最明显,说明土壤有效硅含量空间变异受地形地貌影响较大。

(3)从化区土地利用方式、土壤pH、土壤有机质含量、成土母质、土壤容重和黏粒含量均在一定程度上与土壤有效硅含量呈现相关性,且成土母质为最重要影响因素,土壤有机质含量的影响程度最弱。

参考文献:

- [1] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327 (5967):812-818.
- [2] 王小慧, 姜雨林, 刘洋, 等. 基于县域单元的我国水稻生产时空动态变化[J]. 作物学报, 2018, 44(11):1704-1712. WANG X H, JIANG Y L, LIU Y, et al. Spatio-temporal changes of rice production in China based on county unit[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(11):1704-1712.
- [3] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 2018年我国水稻产业形势分析及2019年展望[J]. 中国稻米, 2019(2):1-4. XU C C, JI L, CHEN Z D, et al. Analysis of China's rice industry in 2018 and the outlook for 2019[J]. *China Rice*, 2019(2):1-4.
- [4] 杨利, 马朝红, 范先鹏, 等. 硅对水稻生长发育的影响[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(4):990-992. YANG L, MA Z H, FAN X P, et al. Effect of silicon on the growth of rice plant[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(4):990-992.
- [5] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7615-7622. ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (24):7615-7622.
- [6] RAVEN J A. Cycling silicon—the role of accumulation in plants—commentary[J]. *New Phytologist*, 2003, 158(3):419-421.
- [7] 杨本漫, 王若水, 肖辉杰, 等. 黄河上游半干旱盐渍区柽柳群落土壤水盐空间变化[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2):230-238. YANG B M, WANG R S, XIAO H J, et al. Spatial variability in soil water and salinity in *Tamarix* community in semiarid saline region of the upper Yellow River[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, 24(2):230-238.
- [8] TANG X L, XIA M P, PEREZ-CRUZADO C, et al. Spatial distribution of soil organic carbon stock in Moso bamboo forests in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:42640.
- [9] WANG T, KANG F F, CHENG X Q, et al. Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China[J]. *Catena*, 2017:41-52.
- [10] HU J G, ZHOU J, ZHOU G M, et al. Improving estimations of spatial distribution of soil respiration using the bayesian maximum entropy algorithm and soil temperature as auxiliary data[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11 (1):e0146589.
- [11] HENGL T, DE JESUS J M, HEUVELINK G B M, et al. Soil-Grids250m: global gridded soil information based on machine learning [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(2):e0169748.
- [12] 卢召艳, 魏晓, 李红, 等. 环洞庭湖区稻田土壤中硅分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4):27-32. LU Z Y, WEI X, LI H, et al. Distribution characteristics and influencing factors of silicon in paddy soil around Dongting Lake region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4):27-32.
- [13] 卢志红, 周慧梅, 颜晓, 等. 江西省旱地土壤有效硅含量的分布特征及其影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4):101-106. LU Z H, ZHOU H M, YAN X, et al. The distribution characteristics and influence factors of available silicon content in upland soil in Jiangxi Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4):101-106.
- [14] 马新, 陈家杰, 褚贵新. 石河子垦区土壤有效硅空间分布及影响因素[J]. 西北农业学报, 2016, 25(2):276-282. MA X, CHEN J J, CHU G X. Spatial distribution and affecting factors of soil available Si in Shihezi region[J]. *Acta Agriculturae Boreali - Occidentalis Sinica*, 2016, 25(2):276-282.
- [15] 代革联, 端木合顺, 王铮, 等. 陕西省耕地土壤有效硅分布规律初探[J]. 水土保持学报, 2004(5):51-53. DAI G L, DUANMU H S, WANG Z, et al. Study on characteristics of available silicon content in soils in Shaanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004(5):51-53.
- [16] 杨生吉. 福建周宁县表层土壤硒含量分布及影响因素[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(1):42-45, 70. YANG S J. Distribution of soil selenium in Zhouning County of Fujian and its influencing factors[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2019, 33(1):42-45, 70.
- [17] SCHLOEDER C A, ZIMMERMAN N E, JACOBS M J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data[J]. *Soil Science Society of America*, 2001(2):470-479.
- [18] 石淑芹, 曹祺文, 李正国, 等. 区域尺度土壤养分的协同克里格与普通克里格估值研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5):109-114. SHI S Q, CAO Q W, LI Z G, et al. Cokriging and Kriging estimations on soil nutrients at regional scale[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(5):109-114.
- [19] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤铜含量的协同克里格插值及采样数量优化[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8):2828-2836. PANG S, LI T X, WANG Y D, et al. Spatial interpolation and sampling numbers of the concentration of copper in cropland soil on county scale using Cokriging[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8):2828-2836.
- [20] 史吉晨, 介冬梅, 李思琪, 等. 东北芦苇湿地土壤有效硅与pH值及物质组成的关系[J]. 天津农业科学, 2014, 20(5):64-70. SHI J C, JIE D M, LI S Q, et al. Relationship between the available silicon of the soil and pH and material composition of the soil in the reed wetland in northeast area of China[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2014, 20(5):64-70.
- [21] 彭景涛. 青海三江源地区退化草地土壤养分元素的时空分异特征[D]. 重庆:西南大学, 2012:4-5. PENG J T. Temporal-spatial variations of soil nutrient in the Three-river headwaters region in Qinghai Province[D]. Chongqing:Southwest University, 2012:4-5.
- [22] 贺立源, 王忠良. 土壤机械组成和pH与有效硅的关系研究[J]. 土壤, 1998(5):243-246. HE L Y, WANG Z L. Study on the relationship between soil mechanical composition, pH and available silicon [J]. *Soils*, 1998(5):243-246.