

环洞庭湖区稻田土壤中硅分布特征及其影响因素

卢召艳, 魏晓, 李红, 龚长安

(湖南省经济地理研究所, 湖南长沙 410004)

摘要: [目的] 研究环洞庭湖区稻田土壤中有效硅的空间分布特征及其变化规律, 以期环洞庭湖区精准农业的发展、农田的保养提供科学依据和实践指导。[方法] 运用地统计学与 GIS 技术相结合的方法开展研究。[结果] 环洞庭湖区土壤中有效硅的含量与水稻产量呈显著的正相关, 硅是水稻生长所需的重要营养元素。环洞庭湖区稻田土壤有效硅平均含量为 155.1 mg/kg, 多集中于 100~200 mg/kg。有效硅含量变幅大, 最低与最高含量相差 27 倍, 在研究区域空间上呈中间高四周低, 西北最低分布格局。土壤有效硅具有较强的空间相关性, 其空间变异主要受土壤类型、土壤酸碱度、成土母质等因素影响。[结论] 硅在水稻生长发育中起着重要的作用。不同的土壤类型所处的自然地理环境不一样, 土壤有效硅含量各异, 土壤有效硅的丰缺程度受土壤成土母质的影响并与土壤 pH 值成正相关。

关键词: 稻田; 土壤有效硅; GIS; 环洞庭湖区; 地统计学方法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0027-06

中图分类号: S151.9

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.005; Lu Zhaoyan, Wei Xiao, Li Hong, 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.005

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Silicon in Paddy Soil Around Dongting Lake Region

LU Zhaoyan, WEI Xiao, LI Hong, GONG Chang'an

(Hu'nan Institute of Economic Geography, Changsha, Hu'nan 410004, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study was to explore the spatial distribution characteristics and the regularity of available silicon in the soil of Dongting Lake, and to provide scientific basis and practical guidance for the development of precision agriculture in the Dongting Lake area and the maintenance of farmland. [Methods] The geo-statistics and GIS technology were both used. [Results] There was a significantly positive correlation between the content of available silicon in the Dongting Lake area and the yield of rice. Silicon is an important nutrient element for rice growth. The average available silicon content in the paddy field around Dongting Lake was 155.1 mg/kg. Though in most cases, it varied from 100 to 200 mg/kg, the margin difference was so great as to the highest content was 27 times of the lowest. Spatially, the content of the part was found higher than the values of periphery, and in the northwest part it had the lowest silicon. Soil available silicon has a strong spatial correlation, and its spatial variation is mainly affected by soil type, soil pH value, soil parent material and other factors. [Conclusion] Silicon plays an important role in rice growth and development. Because soil types in natural geographical environment is not the same, so soil available silicon content normally varies. The abundance of soil available silicon is affected mainly by soil parent material and has significant positive correlation with soil pH value.

Keywords: paddy soil; soil available Si; GIS; around Dongting Lake; geostatistical methods

收稿日期: 2016-11-21

修回日期: 2016-12-21

资助项目: 湖南省科技重点项目“基于 GIS 环洞庭湖区稻田土壤中硅的动态变化及分布特征研究”(2014WK2031)

第一作者: 卢召艳(1988—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源与空间信息技术。E-mail: 553078611@qq.com。

通讯作者: 魏晓(1961—), 女(汉族), 湖南省长沙市人, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为经济地理和产业经济方面的研究。E-mail: xwei_193@163.com。

硅是水稻和其他农作物生长所需要的重要营养元素^[1]。硅肥已被列为氮、磷、钾后的第 4 大肥料品种。在土壤溶液中,硅主要以单硅酸即 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 的形态存在^[2]。土壤的有效硅的含量通常被用来作为衡量硅容量的一种方法^[3]。据臧惠林等研究,当有效硅低于 95 mg/kg 时,属于缺硅的土壤,施用硅肥可获得 5% 以上的增产效果^[4]。之前有许多学者对土壤中有效硅进行过研究^[5-9],明确了我国土壤施用硅肥的前景,环洞庭湖区作为全国特大型商品粮基地,准确有效的土壤中硅含量的空间分布及丰缺状况评价,不但能使作物充分利用现有的资源,而且还能指导农户合理施肥,减少因土壤化肥使用过量而导致的环境问题。GIS 是一种特定的地理空间信息系统,地统计学结合 GIS 技术已经成为目前分析土壤空间分布特征及变异规律最为有效的方式之一^[10]。综合已有研究^[11-16],通过 GIS 技术对环洞庭湖区稻田土壤中硅的含量水平进行全面调查,既能更科学地指导施肥,又可以监测单硅酸浓度情况,控制重金属污染,为相关部门合理调整农业生产布局、产业结构和治理稻田土壤污染提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与制备

按照中国地质调查局《多目标区域地球化学调查规范(DD2005-01)》的要求,设计环洞庭湖区稻田土壤试验方案,2014 年晚稻收获后,选取环洞庭湖片区具有代表性的双季稻田田块挖掘土壤剖面,在每一耕地采样单元的 0—20 cm 土层中,长方形地块采用“S”法,近似正方形地块采用 X 形法布点。用差分 GPS 确定样点空间地理位置及海拔高度,同时记录周围的景观信息、耕作制度和生产能力等情况。共采集 146 个有效土壤样品,包含环洞庭湖片区岳阳市、益阳市、常德市 3 个地级市及长沙市望城区,共 26 个区县,总面积约 $4.10 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占湖南省国土总面积的 19.2%。

1.2 土壤样品的分析

土壤有效硅采用柠檬酸提取—硅钼蓝比色法(分光光度法)测定;土壤类型参照环洞庭湖片区 1:250 万土壤类型图;土壤 pH 值采用土液比 1:2.5(电位法)测定;土壤成土母质参照环洞庭湖片区 1:250 万土壤成土母质图。

1.3 数理统计分析方法

(1) 采用经典统计学参数如最小值、最大值、平均值、标准差和变异系数等描述环洞庭湖稻田土壤中有效硅的分布特征,其中变异系数采用 Nielsen

(1985)划分标准;采用偏度、峰度和柯尔莫诺夫—斯米尔诺夫(Kolmogorov-Smirnov, K-S)检验法检验原始数据的正态分布性,对于不符合正态分布的数据,采用 Box-Cox 数据变换使其符合或近似符合正态分布^[10]。

$$Y(s) = [Z(s)^\lambda] / \lambda \quad (\lambda \neq 0) \quad (1)$$

式中: $Y(s)$ ——与正态分布一致的或符合正态分布的数据集的变换; $Z(s)$ ——有效样点数据集; λ ——拟合参数。

(2) 半方差函数也称为半变异函数,是克里格插值的基础。半方差函数中有 3 个重要参数,即块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)和变程(Range)。根据块金系数即块基比 $[C_0 / (C_0 + C)]$ 来衡量区域化变量的空间结构性。

应用目前发展较为成熟的球状、指数和高斯 3 种模型,通过预测精度评价,获取最优的半方差函数理论模型及其参数^[17]。半方差函数计算公式为:

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

式中: $r(h)$ ——半方差函数; h ——样本间距; $N(h)$ ——间距为 h 的区域化变量; $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ ——随机变量在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的取值,可以假设空间变异函数为区域变化量且满足平稳条件和本征假设的基本前提。因此,随着变异函数值的增加,其空间相关性则不断减弱。

(3) 预测精度评价选用绝对评价指标即平均预测偏差(ME)反映预测值与平均值的偏差(公式 3);标准均方根预测误差(RMSE)(公式 4)反映样点数据的估值和极值效应^[15]。

$$\text{ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i) \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i)^2} \quad (4)$$

式中: \hat{Z}_i ——第 i 个样点的预测值; Z_i ——第 i 个样点的实际观测值; n ——样点数,ME 和 RMSE 值越小,说明误差越小,拟合精度越高。

2 结果与分析

2.1 土壤有效硅的描述性统计分析

有效硅是硅酸盐矿物在风化成土作用下所产生的,能溶于水并为植物吸收利用的单硅酸及其盐类。有效硅的含量决定土壤中硅的有效性,根据环洞庭湖片区 146 个土样分析结果,土壤中有效硅(SiO_2)平均含量为 155.1 mg/kg,最低只有 21.2 mg/kg,最高有 573.6 mg/kg。就变异系数来看,属中等变异强度。

检验数据的正态分布是使用空间统计学 Kriging 方法进行土壤特性空间分析的前提。单一样本 K-S 检验发现,环洞庭湖稻田土壤有效硅数据存在正偏态效

应,当数据进行箱式定向转换 Box-Cox($p=0.35$)变换后,符合正态分布,即 $P_{K-S}=0.210$,大于 0.05,基本统计学特征详见表 1。

表 1 环洞庭湖区土壤有效硅含量数据基本统计学特征

变量	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	偏度	峰度	变异 系数/%	P_{K-S}
变换前	573.6	21.2	155.1	127.1	102.7	1.57	5.89	66	0.002
变换后	19.1	4.9	11.2	10.9	2.8	0.35	3.0	25	0.210

2.2 土壤有效硅的空间变异特征

在 ArcGIS 10.2 地统计分析模块中,分析确定研究区土壤有效硅的最优半方差理论模型。模型选择的标准:平均预测偏差(ME)最接近 0,标准均方根

预测误差(RMSE)最接近于 1^[10]。通过多次参数设置比较,最终确定的半方差函数如表 2 所示。土壤有效硅的最优半方差模型为指数模型,块金系数为 0.514 7。

表 2 环洞庭湖稻田土壤有效硅半方差模型及其参数

变量	理论模型	变程/ km	块金值 C_0	偏基台值 (C_0+C)	块金系数 [$C_0/(C_0+C)$]	预测误差	
						ME	RMSE
土壤有效硅 (SiO_2)	球状(S)	0.96	7.636 8	5.127 6	2.117 0	0.000 2	1.069 4
	高斯(G)	0.82	8.547 6	4.216 8	2.006 1	-0.003 3	1.068 1
	指数(E)	0.68	4.337 4	8.427 0	0.514 7	0.000 0	1.047 6

注:ME 是平均预测偏差;RMSE 是标准均方根预测误差。

2.3 土壤有效硅的克里格空间插值

本文基于符合正态分布的有效硅含量数据,选用其最优半方差函数理论模型及参数,结合普通 Kriging 插值方法,生成 20 m×20 m 的县域土壤有效硅含量空间分布图(图 1)。

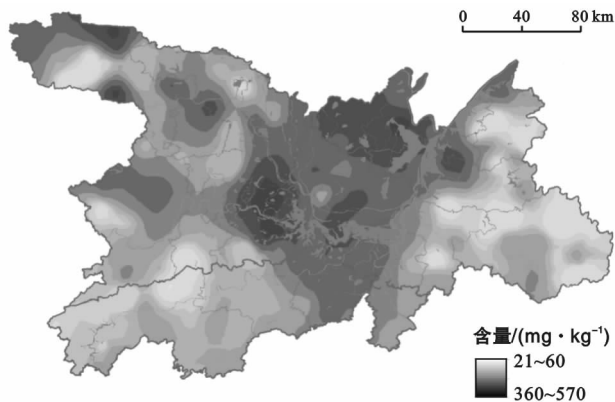


图 1 环洞庭湖区土壤有效硅空间分布

由图 1 可直观看出,在约 400 m 的采样尺度下,以 10 mg/kg 为间距划分等级,环洞庭湖片区土壤有效硅含量分数处于较丰富水平,变异系数为 66.2%,但有效硅在整个洞庭湖区的空间分布不均衡,总体上呈湖区中间高、四周低、由中间向四周递减的分布格局。有效硅含量低于 95 mg/kg 占 31.5%,主要分布在临湘市的中部、汨罗市的西北、平江县的北部及西

部、安化县的北部及东部、石门县的西北部、津市市的中部等;68.5%的稻田土壤有效硅处于中等水平,主要分布在岳阳市西北部、益阳市北部、常德市西南部等洞庭湖周边市镇。越靠近中心市区,有效硅含量相对越高,分析认为城区农户注重肥料施用和田间耕作管理,对农田在技术和资金上投入相对较多,反映出人为活动对研究区有效硅含量变化的重要影响。

3 影响土壤有效硅含量的因素

3.1 土壤类型

由于不同的土壤类型所处的自然地理环境、气候特点、成土条件及农业利用方式不同,土壤有效硅含量也有差异详见表 3。从环洞庭湖片区土壤有效硅的统计结果看,该区石灰土、潮土的土壤有效硅平均含量最高,分别为 315.5 和 256.5 mg/kg,主要分布于内环的滨湖平原;黄棕壤、紫色土、水稻土等土壤有效硅含量次之,分别为 165.1、148.8 和 170.8 mg/kg,主要分布于环洞庭湖区外环丘岗地区;红壤、黄壤有效硅含量平均值均低于缺硅临界值,分别为 90.4 和 43.3 mg/kg,主要分布于环洞庭湖区外围东西两侧的边缘山地。有效硅高低的重要原因是土壤全硅量的多寡和成土过程中淋溶淀积作用的影响。另外,山地草甸土有效硅含量也较高,如采自平江幕阜山花岗岩风化物发育的山地草甸土样本有机质含量达 11.37%,

有效硅高达 215 mg/kg。这是由于山地草甸土有机质较多,有机质本身含有一定量的硅可以溶解,同时有机质分解时造成的还原条件和有机酸的络合作用,破坏铁—硅复合体,有助于硅的释放。

表 3 环洞庭湖区不同土壤类型有效硅含量

土壤类型	样品个数	最大值/ (mg · kg ⁻¹)	最小值/ (mg · kg ⁻¹)	平均值/ (mg · kg ⁻¹)	中值/ (mg · kg ⁻¹)	标准差/ (mg · kg ⁻¹)	变异系数/ %	<临界值 频率/%
石灰土	13	520.5	185.5	315.5	310.5	114.9	36.42	0
潮土	11	459.3	88.2	256.5	231.3	111.7	43.55	19
紫色土	6	181.9	98.8	148.8	153.8	49.1	33	33
黄棕壤	4	247.2	92.4	165.1	160.4	64.2	38.89	25
黄壤	4	69.2	22.9	43.3	40.8	16.7	38.57	100
红壤	56	157.5	21.1	90.4	95.1	33.1	36.62	60
水稻土	52	573.6	40.1	170.8	157.3	86.0	50.35	17

3.2 土壤酸碱度

相关研究^[4]表明,土壤有效硅含量与土壤 pH 值呈极显著正相关($y(\text{有效硅含量})=71.63 \times (\text{pH 值}) - 286.54, \gamma=0.609 5^{**}, n=297$)。土壤中有有效硅含量随 pH 值升高而增加。从表 4 中可看出,土壤有效硅含量的高低与其 pH 值关系密切,146 个样本的统计发现 pH 值在 4.3~8.0 范围内,随 pH 值的升高,有效硅的含量也随之增加。pH 值小于 5.5 的 48 个土样中,其有效硅为 21~177 mg/kg,平均为 73.4 mg/kg,低于缺硅临界值(95 mg/kg)的样点占总样点的 71.2%,说明此土壤大部分缺硅;pH 值为 5.5~

6.5 的 41 个土样中有有效硅为 43~478 mg/kg,平均为 137.2 mg/kg,低于缺硅临界值的样点占总样点的 15.8%,只有少数样点缺硅;pH 值为 6.5~7.5 的 41 个土样中有有效硅为 80~464 mg/kg,平均为 203.1 mg/kg,低于缺硅临界值的样点占总样点的 7.9%,只有少数样点缺硅;pH 值大于 7.5 的 16 个土样中有有效硅为 150~573 mg/kg,平均为 324.5 mg/kg,调查样点全部高于缺硅临界值,土壤有效硅含量较丰富。综上所述,土壤有效硅含量与 pH 值呈正相关,因此,酸性土壤有效硅低,偏碱性的土壤有效硅高。酸性土壤连续施用石灰,pH 值提高,土壤硅的有效度也增加。

表 4 环洞庭湖区不同土壤酸碱度有效硅含量

pH 值	样品个数	最大值/ (mg · kg ⁻¹)	最小值/ (mg · kg ⁻¹)	平均值/ (mg · kg ⁻¹)	中值/ (mg · kg ⁻¹)	标准差/ (mg · kg ⁻¹)	变异 系数/%	<临界值 频率/%
<5.5	48	176.8	21.1	73.4	69.6	31.6	43.1	71.2
5.5~6.5	41	478.3	43.8	137.2	126.0	81.2	59.2	15.8
6.5~7.5	41	464.0	80.4	203.1	199.1	77.3	38.1	7.9
>7.5	16	573.6	150.6	324.5	265.3	115.08	35.5	0

3.3 成土母质

环洞庭湖区成土母质母岩类型复杂,湖区主要为河湖沉积物,山丘区有砂岩、板页岩、石灰岩、花岗岩、紫色砂岩、第四纪红土等。环洞庭湖区各主要成土母质发育的稻田土壤有效硅含量详见表 5,从各类土壤有效硅的平均含量来看,以湖积物、石灰岩、紫色砂页岩发育的 3 种土壤有效硅含量最为丰富,有效硅大于 150 mg/kg,其平均含量均高于缺硅临界值;第四纪红土发育的水稻土有效硅的平均含量接近此临界值,而红砂岩、板页岩、花岗岩发育的土壤有效硅较低,其平均值均低于临界值。7 种成土母质发育的水稻土其有效硅的平均含量顺序为:石灰岩风化物>河湖沉积物>紫色砂页岩风化物>第四纪红色黏土>砂、砾岩风化物>板页岩风化物>花岗岩风化物。研究

结果还表明,土壤有效硅的含量极明显地受到风化成土过程的影响。发育在风化淋溶程度较弱的石灰岩、石灰性紫色砂页岩及河湖沉积物上的土壤,pH 值呈碱性,脱硅作用较弱,土壤有效硅含量均较高。而风化淋溶程度较强的土壤则有效硅相对较低,例如同为石灰岩母质发育的水稻土,某些淋溶程度相对较强、呈微酸性的土壤,其有效硅可低至 45~75 mg/kg。花岗岩风化物、第四纪红色黏土、砂页岩风化物发育的土壤,脱硅富铝化作用强烈,土壤呈强酸性,有效硅含量均较低。对于发育在紫色砂页岩的水稻土,则因母岩的酸碱性而异。发育在酸性紫色砂页岩上的水稻土,其有效硅变化在 45~85 mg/kg,而发育在碱性紫色砂页岩的水稻土有效硅则高达 170~301 mg/kg。

表 5 环洞庭湖区不同成土母质土壤有效硅含量

母质(母岩)	样品 个数	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差	变异系数/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	<临界值频率/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
花岗岩风化物	7	148.2	35.9	79.8	64.5	41.7	52	74.4
板、页岩风化物	48	178.3	21.2	90.5	97.2	35.3	39	52.6
砂、砾岩风化物	5	108.3	85.2	92.5	98.1	17.1	27	40.0
石灰岩风化物	9	464.0	101.2	287.3	157.5	106.4	37	33.3
第四纪红色黏土	26	247.8	40.1	95.5	110.8	21.2	22	19.2
紫色砂页岩风化物	14	327.5	85.8	158.6	151.5	58.3	36	21.4
河湖沉积物	37	573.6	58.0	245.6	232.1	112.5	45	10.8

4 环洞庭湖区土壤有效硅与水稻产量的关系

环洞庭湖区作为湖南省特大型商品粮基地。运用 GIS 技术,得出准确有效的土壤中硅含量的空间分布特征及丰缺状况,揭示土壤有效硅与水稻产量的关系,不但能使作物充分利用现有的资源,而且还能指导农户合理施肥,减少因土壤化肥使用过量而导致的环境问题。

表 6 环洞庭湖区水稻产量与有效硅的关系

区域名称	稻谷 产量/t	有效硅平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值
望城区	351 132	116.2	4.5~5.5
湘阴县	546 221	199.1	6.5~7.5
平江县	397 430	68.7	4.5~5.5
汨罗市	454 455	126.1	5.5~6.5
桃源县	714 176	181.9	6.5~7.5
汉寿县	632 212	219.2	>7.5
武陵区	112 398	165.7	>7.5
鼎城区	653 985	361.4	>7.5
岳阳县	468 462	459.2	>7.5
临湘市	298 142	247.8	>7.5
岳阳楼区	60 939	257.1	>7.5
安乡县	289 777	232.1	6.5~7.5
君山区	127 478	150.6	>7.5
云溪区	35 477	108.2	4.5~5.5
临澧县	311 631	279.7	6.5~7.5
华容县	531 631	351.4	>7.5
石门县	142 107	206.9	6.5~7.5
津市市	135 133	63.7	4.5~5.5
澧县	462 674	339.9	6.5~7.5
安化县	185 192	127.1	6.5~7.5
资阳区	268 744	236.4	6.5~7.5
桃江县	331 913	97.3	4.5~5.5
赫山区	490 293	237.7	6.5~7.5
沅江市	464 613	265.1	>7.5
南县	560 252	261.4	6.5~7.5

由环洞庭湖区稻谷产量分布图(图 2)可以看出,稻谷产量最多的地区是益阳市赫山区、资阳区;常德市汉寿县、安乡县;岳阳市湘阴县;长沙市望城区,这些区域土壤有效硅含量丰富。而常德市石门县、津市市以及益阳的安化县,岳阳的临湘市等有效硅含量低的地区稻谷产量也低。环洞庭湖稻田土壤有效硅与水稻产量存在极显著的正相关性,显著性检验 $p = 0.037 (p < 0.05)$ (表 7)。揭示环洞庭湖稻田土壤的有效硅水平、分布特征及影响稻田土壤硅的有效性发挥的关键因素对硅肥科学施用,提高农作物产量具有重大意义。

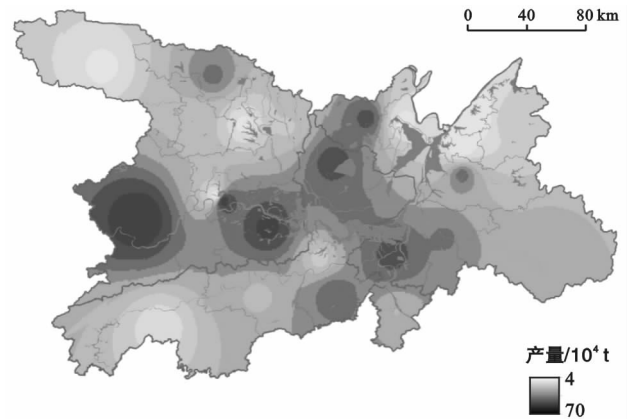


图 2 环洞庭湖区稻谷产量分布

表 7 环洞庭湖区有效硅含量与水稻产量的相关性

指标	水稻产量	有效硅
Pearson 相关性	1	0.419
显著性(双尾)	—	0.037
样本数 N	25	25

注: * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性显著。

5 结论

(1) 由于不同土壤类型所处的自然地理环境不一样,土壤有效硅含量各异。石灰土、灰潮土有效硅平均含量最高,紫色土、水稻土、潮土、黄棕壤等土壤

有效硅平均含量次之,红壤、黄壤有效硅平均含量低于缺硅临界值 95 mg/kg。

(2) 土壤有效硅的丰缺程度受土壤成土母质影响,从各类土壤有效硅的平均含量来看,以河湖沉积物、石灰岩、紫色砂页岩发育的 3 种土壤有效硅含量最为丰富,有效硅大于 150 mg/kg,其平均含量均高于缺硅临界值 95 mg/kg;第四纪红色黏土发育的水稻土有效硅的平均含量接近此临界值,而砂、砾岩风化物、板页岩风化物、花岗岩风化物发育的土壤有效硅较低,其平均值均低于临界值。

(3) 土壤有效硅含量与土壤 pH 值成极显著正相关($r=0.6095^{**}$),当土壤 pH 值 <5.5 , $5.5\sim 6.5$, $6.5\sim 7.5$, >7.5 时,土壤有效硅平均含量分别为 73.4,137.2,203.1,324.5 mg/kg。

(4) 土壤中有效硅的含量与水稻产量具有显著的正相关,硅是水稻生长所需的重要营养元素。

(5) 近年来,环洞庭湖片区普遍存在农户硅肥表施、施肥盲目等问题。环洞庭湖区应根据有效硅的丰缺程度,积极制定作物补硅措施,引导农户树立科学的施肥观念。防止土壤有效硅的进一步流失,提升环洞庭湖区经济效益和生态效益。本研究尚未提出影响硅素含量下降的具体障碍因素及应对策略,是下一步亟需实地考察、补充和探讨的方向。

[参 考 文 献]

- [1] Jones L H, Handreck K A. Silica in soils, plant, and animals[J]. *Advances in Agronomy*, 1967, 19:107-149.
- [2] Matichenkov V V, Bocharnikova E A, Pahlenko E P, et al. Reduction of Cd, Cu, Ni, and Pb mobility by active Si in a laboratory study[J]. *Mine Water and the Environment*, 2016, 51(3):1-8.
- [3] 弗拉基米尔·马基琴科夫,魏晓,刘代平,等. 硅肥的理论、实践与展望[J]. *农业科学与技术:英文版*, 2013, 14(3):498-502,506.
- [4] 张效朴,臧惠林. 土壤有效硅测定方法的研究[J]. *土壤*, 1982(5):188-192.
- [5] 马新. 石河子垦区土壤有效硅的空间分布与硅肥肥效[D]. 新疆 石河子:石河子大学,2015.
- [6] 宋刚. 剑河县土壤有效硅含量分析[J]. *耕作与栽培*, 2014(1):22-23.
- [7] 刘占军. 我国南方低产水稻土养分特征与质量评价[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- [8] 段文静,石林. 硅钼蓝分光光度法测定硅肥中有效硅[J]. *分析科学学报*, 2015, 31(3):389-392.
- [9] 向万胜,苏以荣,何电源,等. 湖南省主要成土母质(母岩)发育的水稻土有效硅的含量状况[J]. *土壤肥料*, 1993(2):38-40.
- [10] 赵业婷. 基于 GIS 的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [11] 赵业婷,常庆瑞,李志鹏,等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8):140-148.
- [12] 丁亨虎,吴家琼,刘克芝,等. 潜江市水稻土有效硅分布特征[J]. *现代农业科技*, 2015(22):204-205.
- [13] 郭鑫. 罗江县农田土壤全氮协同克里格插值和采样数量优化研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(5):2576-2760.
- [14] 刘庆,夏江宝,谢文军. 半方差函数与 Moran's I 在土壤微量元素空间分布研究中的应用:以寿光市为例[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2011, 36(9):1129-1133.
- [15] 刘伟. 洞庭湖区耕地土壤养分评价与空间变异性研究[D]. 湖南 长沙:中南林业科技大学,2013.
- [16] 杜薇,王昌全,李冰,等. 基于 GIS 和地统计学的攀枝花烟区土壤 pH 空间变异特征研究[J]. *核农学报*, 2012, 26(6):924-929.
- [17] 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.