

文章编号: 1674-7054(2018)01-0054-07

海南儋州农用地土壤速效磷和速效钾的空间变异

曾迪¹, 漆智平², 周丹¹, 魏志远², 王登峰², 高乐³, 刘磊⁴

(1. 海南大学 热带农林学院, 海南 儋州 571737; 2. 中国热带农业科学院 热带作物品种资源研究所, 海南 儋州 571737;
3. 中国热带农业科学院 橡胶研究所, 海南 儋州 571737; 4. 中国热带农业科学院 环境与植物保护研究所, 海口 571101)

摘要: 综合运用统计学和地理信息技术, 以海南省儋州市作为研究区域, 对农业用地土壤速效磷、速效钾空间变异进行分析。结果表明: 儋州农业用地土壤速效磷平均含量为 $13.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体水平中等, 变异系数达 163.99%, 属强度变异, 空间变程约为 12.03 km, $C_0 / (C_0 + C)$ 值为 66.68%; 速效钾平均含量为 $36.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体水平较低, 变异系数为 78.02%, 属中度变异, 空间变程约为 12.10 km, $C_0 / (C_0 + C)$ 值为 63.80%。两者均属中等程度的空间相关性, Kriging 插值分析得两者在空间上均呈嵌套分布, 其中, 速效磷变异较大, 以 3 级水平分布范围最广, 中北部、中东部较高, 其余区域(北部、中部、南部、中西部)逐渐降低; 速效钾变异比速效磷稍弱, 以 5 级水平分布范围最广, 南部、东部、北部集中呈大块状分布。这种空间分布可能与当地的地表形态、地质状况及土地利用、管理方式等有关。

关键词: 农业用地; 土壤速效磷; 土壤速效钾; 空间变异; 儋州

中图分类号: S 158 文献标志码: A DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.2018.01.007

土壤是人类赖以生存和发展最根本的时空连续体, 具有高度的空间异质性。20 世纪 60 年代后期, 人们开始研究土壤的空间变异性相关^[1], 土壤学家 Burgess, Warrick 等^[2-3]对土壤物理性质空间变异性规律进行了开创性研究。1951 年, 南非地质学家 Krige 率先提出地统计学的概念, 随后法国学者 Matheron 将其完善并发展形成理论^[4], 接着, 美国科学家将相关方法应用于土壤调查、制图及土壤变异性等研究^[5-7], 不仅能有效揭示属性变量在空间上的分布、变异和特征, 而且可以有效地将空间格局与生态过程联系, 进而解释空间格局对生态过程与功能的影响。目前, 将地统计学与空间内插技术和地理信息系统(GIS)技术、神经网络技术、高精度曲面建模等结合应用于不同区域土壤养分空间变异性的研究正逐步开展^[8-12]。

土壤速效磷(Soil Available Phosphorus, SAP)是表征土壤磷素营养丰缺和环境质量优劣的重要因子, 主要包括土壤中可被植物吸收利用的水溶性磷、部分有机态磷及吸附态磷、某些沉淀态磷等。土壤中磷元素缺乏将严重制约农业生产^[13]。1979 年进行第 2 次全国土壤普查^[14]时, 我国约 78% 耕地的速效磷含量低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磷素缺乏现象普遍, 不利于作物生长^[15]。此后, 我国加大了农业施肥投入, 速效磷含量年均增加显著, 但过量施用磷肥, 易导致磷素富集和流失, 从而引发水体富营养化等农业面源磷污染, 对生态环境和人类健康构成极大威胁^[16-17]。土壤速效钾(Soil Available Potassium, SAK)是表征土壤钾素营养丰缺的重要因子, 主要包括土壤中可被植物吸收利用的水溶性钾和胶体上吸附的交换性钾(占 90% 以上)。耕地土壤中钾元素缺乏将直接影响作物产量和品质, 过量施用钾肥, 也会引发水体富营养化等农业面源污染, 带来生态环境安全隐患。国外对土壤速效磷、速效钾空间异质性的研究开展较早, 国内相关研究起步较晚。Della 等^[18]研究了瑞士农业生态系统的土壤磷素空间分布模型。Stutter 等^[19]研究了不同土地利用方式和土壤因素对温带土壤磷素空间变异的影响。Seker 等^[20]分析了小麦和甜菜种植系统

收稿日期: 2017-08-17

修回日期: 2017-12-30

基金项目: 海南大学教育教学研究课题立项项目(hdjy1560); 海南大学应用科技学院科研基金项目(Hyk-1209)

作者简介: 曾迪(1983-), 女, 讲师。研究方向: 作物栽培与耕作。E-mail: zengdi316@126.com

通信作者: 刘磊(1981-), 男, 助理研究员。研究方向: 植物病理学。E-mail: liu2003.1-al@163.com

土壤速效磷、速效钾空间变异情况。Bogunovic 等^[21]研究了克罗地亚农场土壤速效磷、速效钾的空间变异。刘建玲等^[22]发现过量施用磷肥和有机肥白菜产量无显著变化,但土壤积累磷的潜在风险增加。徐剑波等^[23]利用径向基函数神经网络和克里金法等,分析了县域耕地土壤有效磷在不同采样尺度下的空间变异特征及成因。肖长明等^[24]研究了兴业县耕地土壤速效钾的空间变异特征。陈涛等^[25]发现黄土高原南麓县域耕地土壤速效钾有显著的空间相关性。曾招兵等^[26]分析了广东耕地土壤有效磷时空变化特征。王永豪等^[27]利用 GIS 和地统计学定量研究耕地土壤速效钾的空间变异特征。王永壮等^[28]发现,我国北方和南方地区农田土壤中磷素含量和有效性存在明显差别,总体上,北方地区土壤全磷和有效磷含量高于南方。

第2次土壤普查^[24]为我国农田的开发利用和产业结构调整提供了科学依据,但30多年来,耕作条件、种植制度、施肥方式等均发生了显著改变。热区气候条件得天独厚,农业用地复种指数高且尿素、过磷酸钙等化肥施用量逐年增加,土壤速效磷、速效钾等养分状况在田间或区域分布上会有明显的时空变化特点。海南人均耕地面积仅0.084 hm²,低于中国平均水平,耕地短缺背景下的过度种植和不合理施肥导致土壤质量逐年降低^[29-30]。海南岛境内土种杂多,地形、气候等因素又复杂多变,限于此,海南省省域耕地地力评价研究至今仍未完成,且尚无结合空间内插技术和 GIS 技术分析儋州市土壤速效磷、速效钾分布状况的报道,研究农业用地土壤速效磷、速效钾含量及空间变异特性对制定相关管理措施,合理施用磷、钾肥,识别、治理农业面源污染重点控制区等具有重要意义。笔者在课题组相关研究基础上^[31-33],根据近期土壤资料,对该区域土壤速效磷、速效钾的空间变异进行分析,以期对当地农户的施肥管理及农业面源污染控制提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 儋州市是海南西部的经济、交通、通信和文化中心,地处东经108°56′~109°46′,北纬19°11′~19°52′,濒临北部湾,海岸线长267 km。全市土地面积3 394 km²,居全省第1,其中,耕地面积103 562.0 hm²,占全市土地面积的31.0%;人口数为104万人,居全省第2,辖16个镇,4个市属农场。全境位于热带北部边缘,降水充足,年均气温为25.4℃,地势东南高西北低,南部属山地和丘陵地带,西南属平原阶地及火山熔岩台地,东南部为沙壤土,海拔多在100~200 m,中部为河流冲积平原,北部主要为玄武岩和第四纪的海相沉积平原,海拔在5~10 m^[34]。种植作物主要包括橡胶、水稻、甘蔗、花生、瓜菜、芒果和蜜柚等。2016年全市农林牧渔及其服务业总产值达171.83亿元,同比增长5.1%。

1.2 样品采集与理化分析 样点采用全球定位系统(GPS)定位,其布局综合考虑主要土壤类型(砖红壤、水稻土、紫色土)^[35]、地貌类型(平原、丘陵、山地)及土地利用情况(轮作地、菜地、果园),全市共布设2 597个样点,每一样点在直径100 m×100 m范围内选择15~20个点,用木铲采集0~20 cm耕层土样混合,按四分法取分析样品1 kg。将土样风干后研磨,依次通过1.0,0.25 mm孔径筛后,混匀装袋,根据《耕地地力调查与质量评价》^[36]及《耕地地力调查与质量评价技术规程》(NY/T1634-2008)分别采用盐酸—氟化铵法、乙酸铵浸提—火焰光度法分析化验土壤样品速效磷、速效钾含量^[37-38]。

1.3 地统计分析 根据Fisher传统统计学理论,把研究变量假设为纯随机变量,变异函数能描述区域化变量随机性、区域性,定义为区域化变量在抽样间隔下样本方差的数学期望^[39-40]。当区域化变量与空间位置正相关,符合内蕴假设、平稳性假设时,所得变异函数为:

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

式中, h 为步长, $N(h)$ 是间隔为 h 的观测样点成对数, $Z(x)$ 表示区域变量在位置 x 处观测值。

考虑到存在空间自相关性^[3,41-42],补充克立格法Kriging插值估计实行局部加权平均,可同时研究随机性、结构性变量空间分布^[37-38]。

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i),$$

式中, $Z(X_0)$ 是未经观测点 X_0 的内插估计值, $Z(X_i)$ 是点 X_0 附近若干观测点的实测值, λ_i 为函数半方差图分析获取权重。

本研究在总体定性分析基础上,通过拟合指数模型,得到土壤速效磷、速效钾含量的半方差函数,分析区域变量在空间尺度上的结构性、相关性,检验拟合效果,得到土壤速效磷、速效钾的插值模型参数。

1.4 数据分析 利用 Arcgis9.0、Raster2Vector5.5 等软件将相关图层矢量化,对样点养分属性数据进行统计分析,录入 Access2003 数据库,运用 ArcGIS9.0 地统计分析,结合半方差函数及其模型、Kriging 差值等生成土壤速效磷、速效钾空间分布图^[8-39]。

2 结果与分析

2.1 耕层土壤速效磷、速效钾特征 从总体来看,研究区域土壤速效磷、速效钾的平均值分别为 13.15, 36.49 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。结合土壤速效磷、速效钾等级分级标准(表 1)分析,得知速效磷总体水平中等,达到 3 级水平;速效钾总体水平较低,为 5 级水平。从养分变化范围来看,土壤速效磷、速效钾的含量变化均跨越 6 个级别,涵盖高、中、低不同养分水平。

由偏度和峰度系数可知,速效磷和速效钾经对数转换后服从正态分布。不同土壤研究项目的变异情况差异较大,统计结果表明,土壤速效磷变异系数达 163.99%,表现为强度变异;土壤速效钾变异系数为 78.02%,属中度变异。

表 1 土壤速效磷、速效钾等级分级标准

Tab. 1 Classification standard for soil available phosphorus (SAP) and soil available potassium (SAK) contents

项目 (mg/kg)	1 级 Grade 1	2 级 Grade 2	3 级 Grade 3	4 级 Grade 4	5 级 Grade 5	6 级 Grade 6
速效磷 SAP	> 40	20 ~ 40	10 ~ 20	5 ~ 10	3 ~ 5	< 3
速效钾 SAK	> 200	150 ~ 200	100 ~ 150	50 ~ 100	30 ~ 50	< 30

表 2 土壤速效磷和速效钾统计性特征

Tab. 2 Descriptive statistical results of SAP and SAK contents

项目 / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	分布类型 Distributi on type	样品数 Samples	最小值 Minimum/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值 Maximum/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	均值 Mean/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差 SD/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	变异系 数 CV/%
速效磷 SAP	lgN	2589	0.03	236.13	13.15	21.57	2.75	-0.18	163.99
速效钾 SAK	lgN	2586	1.00	277.10	36.49	28.47	3.53	-0.11	78.02

2.2 变异函数分析 若 $C_0/(C_0+C)$ 比值 < 25%, 表示系统空间相关性较强;若其比值 > 75%, 系统空间相关性弱;若其比值在 25% ~ 75% 之间, 系统空间相关性为中等。从表 3 可知,速效磷、速效钾的 $C_0/(C_0+C)$ 比值分别为 66.68%, 63.80%, 均属中等空间相关性;最佳模型变程分别约为 12.03, 12.10 km, 空间自相关性较好, 即结构变量是影响其空间变异的主因, 而随机性变量的影响次之。

表 3 半方差函数模型类型及其参数

Tab. 3 The semi-variogram model of SAP and SAK contents and its parameters

项目	最优模型 Optimized model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金效应 Nugget effect $C_0 / (C_0 + C) \%$	变程 Range/ km
速效磷 SAP	Pentaspherical (Simple Kriging)	0.007 33	0.011 00	66.68	12.03
速效钾 SAK	Gaussian (Ordinary Kriging)	0.309 68	0.485 38	63.80	12.10

2.3 Kriging 插值分析 使用空间统计学克立格 Kriging 方法进行土壤特性空间合理时要求数据服从正态分布,此时生成的表面效果最理想。根据实测数据,在半方差结构分析和指数模型套合基础上,考虑各向异性,选取一阶趋势参数,参考第 2 次土壤普查的速效磷、速效钾含量分级标准,分别建立比例尺为 1 : 50 000 的儋州农业用地土壤速效磷、速效钾分布图。由图 1 可知,整体来看,土壤速效磷分布格局涉及 6 个等级水平,中北部、中东部较高,北部、中部、南部、中西部较低,在空间上呈嵌套分布,变异较大,以 3 级水平 ($10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分布范围最广;由图 2 可知,土壤速效钾分布格局主要涉及 6 级水平 ($<30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 至 4 级水平 ($50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),4 级水平区域较少且呈分散分布,中北部、西北部较低,在空间上也呈嵌套分布,变异比速效磷稍弱,以 5 级水平 ($30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分布范围最广,南部、东部、北部集中呈大块状分布。

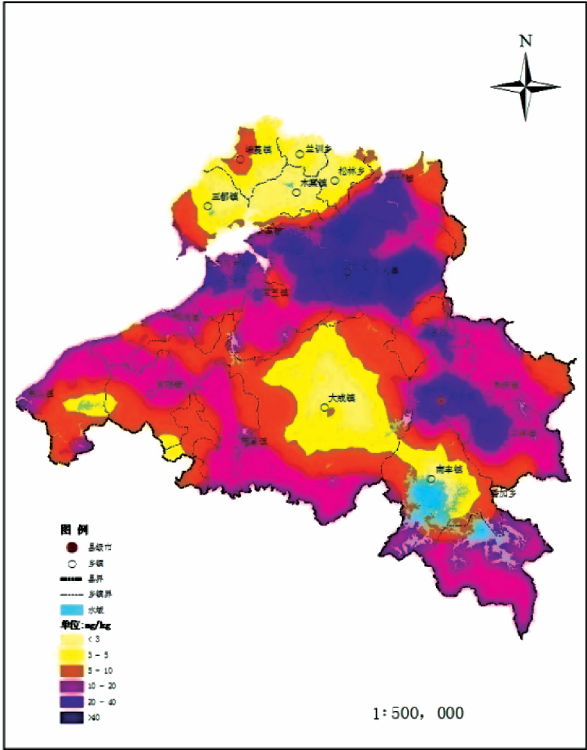


图 1 土壤速效磷含量分级图
Fig. 1 The group of SAP contents

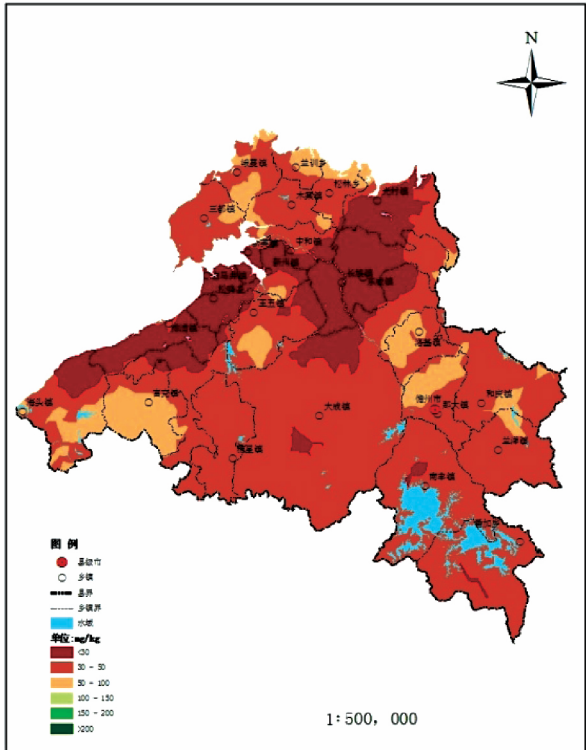


图 2 土壤速效钾含量分级图
Fig. 2 The group of SAK contents

根据模型选择标准对研究样本进行了多次模拟比较,分别得到土壤速效磷、速效钾最优模型。进行交叉校验可得,预测与实测结果平均标准误差 (MS) 小于等于 0.002 7,说明接近无偏估计;标准均方根预测误差 (RMSS) 介于 0.981 ~ 1.013 之间,说明模型的拟合度较高 (表 4)。预测误差的均值等 5 项检验参数指标综合反映预测表面的精度,表明模型可准确估计速效磷、速效钾的空间变异,适用性较强。因此,认为土壤速效磷、速效钾的 Kriging 插值结果可靠。

表 4 土壤速效磷和速效钾模型拟合的检验参数
Tab. 4 The validation data of models for SAP and SAK

项目	最优模型 Best model	预测误差 的均值 Mean prediction error	预测误差 的均方根 Mean squared prediction error	平均预测 标准差 Mean prediction SD	平均标准 误差 Mean SD	标准均方根预测误差 Root mean square standardized error
速效磷 SAP	Pentaspheical (Simple Kriging)	0.007 8	18.67	19.06	0.000 3	0.981
速效钾 SAK	Gaussian (Ordinary Kriging)	-0.005 3	25.31	28.35	-0.017 0	1.013

3 讨 论

在较大区域范围内研究空间变异时,土壤采样具有随机性,采用 GPS, GIS 技术,结合克里格法,可准确快速获得区域土壤速效养分含量时空变异特征,且能对其在某一含量水平下的概率分布进行评价,定量描述区域土壤速效养分的时空变异规律。总体来看,儋州全市土壤速效磷变异系数达到 163.99%,在空间分布上呈嵌套分布,表现为强度变异;速效钾变异系数为 78.02%,在空间分布上呈嵌套分布,属中度变异;速效磷、速效钾最佳模型的变程分别约为 12.03, 12.10 km,块金效应依次为 66.68%, 63.80%,空间相关性均属中等程度。推测本研究区域结构性因素和随机性因素共同影响速效磷、速效钾空间变异^[43-47],土壤类型、地形地貌、养分元素化学行为、作物产量的高低以及区域管理措施的差异均会影响土壤速效磷、速效钾的含量。

研究区域土壤速效磷变异较大,中北部、中东部较高,北部、中部、南部、中西部较低;土壤速效钾变异比速效磷稍弱,南部、东部、北部集中呈大块状分布($30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这可能与地域特点和施肥不平衡等有关^[29]。一方面,中北部、中东部低丘台地、低山丘陵等区域地势平缓,土层较厚,部分阶地台地区域土壤质地较粘重,对养分吸收能力较强,可提高保磷、保钾性能,减少了营养元素淋溶流失;中西部土壤砂性大,人口密集,土壤对养分吸收性能较弱,其速效养分含量则较低。另一方面,虽然化肥施用总量呈逐年上升趋势,但由于研究区域雨水较多且集中,暴雨初始冲刷特征明显^[48],农业用地土壤磷、钾素等矿质养分淋溶作用强烈,淋失量较大易导致土壤钾素总体水平较低,长期施肥会逐渐导致土壤养分不平衡。因此,建议在耕作时因地制宜,仍应坚持大力推广种植绿肥、增施有机肥、秸秆回田、合理轮作、定期改良土壤等管理措施,以稳定、提高土壤速效磷、速效钾等养分含量。

参考文献:

- [1] 沈思渊. 土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望 [J]. 土壤学进展, 1989, 17(3): 11-24.
- [2] Alemi M, Azar A B, Nielsen D R. Kriging and univariate modeling of a spatial correlated date [J]. Soil Technology, 1988, 1(2): 117-132.
- [3] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field [M]. New York: Springer, Advanced in Soil Science, 1985: 1-71.
- [4] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-19.
- [5] White J G, Welch R M, Norvell W A. Soil zinc map of the USA using Geostatistics and Geographic Information systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 61(1): 185-194.
- [6] Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas II Kriging [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(10): 1033-1037.
- [7] Gotway C A, Hergert G W. Incorporating spatial trends and anisotropy in geostatistical mapping of soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 298-309.
- [8] Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS [J]. Transactions of the Case, 2003, 19(2): 39-44.
- [9] Numata I, Soares J V, Roberts D A, et al. Relationships among soil fertility dynamics and remotely sensed measures across pasture chronosequences in Rondônia, Brazil [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(4): 446-455.
- [10] Shi W, Liu J, Du Z, et al. Surface modelling of soil pH [J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 113-119.
- [11] 崔贝, 王纪华, 杨武德, 等. 冬小麦-夏玉米轮作区土壤养分时空变化特征 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2471-2482.
- [12] 刘国顺, 常栋, 叶协锋, 等. 基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究 [J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2586-2595.
- [13] Cakmak I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways [J]. Plant and Soil, 2002, 247(1): 3-24.
- [14] 陈弈辉, 冯所钦, 云维彪, 等. 广东省儋县土壤普查报告书 [R]. 广州: 广东省土壤普查办公室, 1984: 1-21, 159-190.
- [15] 樊卫国, 王立新. 纽荷尔脐橙幼树对不同供磷水平的光合响应 [J]. 果树学报, 2012, 29(2): 166-170.
- [16] 李强, 刘晓颖, 王佩, 等. 云南陆良植烟土壤有效磷空间变异及其对烟叶质量和面源污染潜在风险的评估 [J]. 中国烟草学报, 2016, 22(3): 79-87.
- [17] Lark R M, Ferguson R B. Mapping risk of soil nutrient deficiency or excess by disjunction and indicator Kriging [J]. Geoder-

- ma, 2004, 118(1/2): 39–53.
- [8] Della P R, Keller A, Schulin R. Sensitivity analysis, calibration and validation of EPIC for modelling soil phosphorus dynamics in Swiss agro-ecosystems [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2014, 62(21): 97–111.
- [9] Stutter M I, Shand C A, George T S. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils [J]. *Geoderma*, 2015, 38(41): 29–39.
- [20] Seker C, Özyaytekin H H, Neğiş H, et al. Assessment of soil quality index for wheat and sugar beet cropping systems on an entisol in Central Anatolia [J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2017, 189(4): 135. doi: 10.1007/s10661-017-5848-z.
- [21] Bogunovic I, Pereira P, Brevik E C. Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584/585(15): 535–545.
- [22] 刘建玲, 廖文华, 张作新, 等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(5): 959–965.
- [23] 徐剑波, 宋立生, 夏振, 等. 基于 GARBF 神经网络的耕地土壤有效磷空间变异分析 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 158–165.
- [24] 肖长明. 兴业县耕层土壤速效钾含量变化分析 [J]. *资源与环境科学*, 2012, 9(3): 288–293.
- [25] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 [J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 0554–0564.
- [26] 曾招兵, 曾思坚, 汤建东, 等. 广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 444–451.
- [27] 王永豪, 王昌全, 李启权, 等. 川西南山区耕地土壤速效钾空间特征及影响因素分析 [J]. *西南农业学报*, 2016, 29(3): 651–657.
- [28] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260–268.
- [29] 漆智平, 魏志远, 李福燕, 等. 海南水稻土养分时空变异特征 [J]. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1291–1296.
- [30] 王登峰, 魏志远, 吕烈武, 等. 基于 FMT-AHP 的海南澄迈县耕地地力评价研究 [J]. *热带作物学报*, 2012, 22(11): 1966.
- [31] 曾迪, 魏志远, 刘磊, 等. 文昌市耕地土壤养分状况分析 [J]. *热带作物学报*, 2010, 31(2): 191–197.
- [32] 魏志远, 孙娟李, 松刚, 等. 海南中西部荔枝园土壤肥力的灰色关联度评价 [J]. *热带作物学报*, 2013, 34(10): 1883–1887.
- [33] 钟萍, 王登峰, 魏志远, 等. 我国热区农田土壤养分时空分布研究——以海南省东方市为例 [J]. *南方农业学报*, 2014, 45(1): 58–62.
- [34] 曾迪, 漆智平, 黄海杰, 等. 海南儋州耕地土壤有机质空间变异 [J]. *热带作物学报*, 2015, 36(1): 199–204.
- [35] 海南省农业厅土肥站. 海南土壤 [M]. 海口: 三环出版社/海南出版社, 1994.
- [36] 全国农业技术推广服务中心. 耕地地力调查与质量评价 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 235–238.
- [37] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理化学分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 132–136.
- [38] 曾迪. 三亚市耕地地力评价 [D]. 海口: 海南大学, 2010.
- [39] Matheron G. Principles of geostatistics [J]. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246–1266.
- [40] 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: 35–96.
- [41] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties [J]. *European Journal of Soil Science*, 1980, 31(2): 315–331, 333–341.
- [42] Fisher E, Thornton B, Hudson G, Edwards A C. The variability in total and extractable soil phosphorus under a grazed pasture [J]. *Plant and Soil*, 1998, 203(2): 249–255.
- [43] 李松伟, 邓烈, 何绍兰, 等. 基于小尺度的山地柑橘园土壤有效磷空间分布状况研究 [J]. *果树学报*, 2014, 31(1): 45–51.
- [44] 汪万芬, 蒋锦刚. DEM 辅助的土壤速效钾及速效磷空间分异研究——以杭埠河流域为例 [J]. *扬州大学学报*, 2014, 35(1): 81–85.
- [45] 金明清, 彭月月, 王佩, 等. 四川省盐源县植烟土壤氮磷钾空间变异特征及影响因素 [J]. *土壤*, 2016, 48(5): 984–991.
- [46] 王永豪, 王昌全, 李启权, 等. 川北烟区土壤有效磷空间变异特征及主控因素 [J]. *核农学报*, 2016, 30(12): 2425–2433.
- [47] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析 [J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 373–378.
- [48] 郭怀成, 向男, 周丰, 等. 滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 [J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1298–1307.

Spatial Variability of Soil Available Phosphorus and Soil Available Potassium Contents in Agricultural Land in Danzhou, Hainan Province

ZENG Di¹, QI Zhiping², ZHOU Dan¹, WEI Zhiyuan², WANG Dengfeng², GAO Le⁴, LIU Lei³

(1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737; 2. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou, Hainan 571737; 3. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101; 4. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: Understanding the spatial variation and distribution pattern of soil available phosphorus (SAP) and soil available potassium (SAK) contents is of great importance for sustainable development of agricultural land in a region. The spatial variation of SAP and SAK contents in agricultural land in Danzhou, Hainan was analyzed by using geostatistics and geographic information system (GIS) to provide information for preventing soil degradation. There were 2 597 soil samples (0–20 cm) collected from the agricultural land. The geostatistical characteristics, spatial trend and range of the SAP and SAK contents were analyzed using the Geostatistical Analyst, ArcGIS 9.0. For all the soil samples collected, the SAP content averaged $13.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, generally moderate in the soil, with an coefficient of variation (CV) being 163.99%. The spatial correlation distance (range) of the SAK content was 12.03 km, and the proportion of the semi-variogram model ($C_0 / (C_0 + C)$) was 66.68%, indicating a high semi-variogram value in the SAK content. The SAK content was $36.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ by average, generally low in the soil, and its CV was 78.02%. The spatial correlation distance of the SAK content was 12.10 km, and the proportion of the semi-variogram model was 63.80%, indicating a moderate semi-variogram value. These indicated that both the SAP and SAK contents had a moderate spatial correlation. The Kriging spatial interpolation showed both the SAP and SAK contents had a spatial nested distribution. The SAP content varied greatly, with the Grade 3 of the SAP content being most widely distributed in the agricultural land, higher in the central north and central east and gradually lower in the north, center, south and central west of Danzhou, while the SAK content varied less than the SAP content, and its Grade 5 was most widely distributed in the agricultural land, massively in the south, east and north of Danzhou. This spatial distribution may be related with landform, geological conditions, landuse, land management, etc.

Keywords: Agricultural land; soil available phosphorus; soil available potassium; spatial variability; Danzhou

(责任编辑: 潘学峰)