

DOI: 10.11766/trxb201902250030

张子璐, 左昕弘, 刘峰, 石孝均. 渝西丘陵区土壤速效钾空间异质性及影响因素[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 307-315.

ZHANG Zilu, ZUO Xinhong, LIU Feng, SHI Xiaojun. Spatial Heterogeneity of Soil Readily Available Potassium and Its Influencing Factors in Western Chongqing Hilly Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 307-315.

渝西丘陵区土壤速效钾空间异质性及影响因素*

张子璐, 左昕弘, 刘峰[†], 石孝均

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 土壤养分空间分布规律的研究对于土壤养分分区管理、基本农田建设等有重要意义。以渝西丘陵区的潼南国家农业科技园核心区为研究对象, 结合普通克里格法和聚类分析法对研究区土壤速效钾 (Readily available potassium, AK) 的水平和垂直空间异质性进行研究。结果表明, (1) 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层 AK 平均含量分别为 111.6、96.1 和 90.2 mg·kg⁻¹, 为中等-缺乏水平; 各土层变异系数均属中等变异。(2) 0~20 和 20~40 cm 土层 AK 的全局莫兰指数 (Global Moran's *I*) 均为负值, 存在空间孤立; 40~60 cm 为正值, 存在空间集聚。(3) 0~20 和 20~40 cm 土层最优模型为高斯模型, 40~60 cm 土层为球形模型。0~20 和 40~60 cm 土层 AK 空间变异以随机因素变异为主, 20~40 cm 土层是结构因素和随机因素共同造成的。(4) 0~20 cm 土层 AK 高值区集中于研究区中部, 低值区分布较为随机。20~40 和 40~60 cm 土层 AK 分布趋势相似, 高值区集中于东南部, 低值区集中于东北部。AK 垂直空间分布表现为三种类型, 其面积由大到小依次为均匀型、低钾递减型、高钾递减型。土壤类型、地形地貌和土地利用类型对 AK 含量的空间分布存在一定影响, 且在水平和垂直空间上影响程度不同。研究结果为研究区基本农田建设的土地整治选址、方案优化和整治后养分分区管理提供了科学依据。

关键词: 土壤速效钾; 空间异质性; 空间插值; 聚类分析

中图分类号: S210.50 文献标志码: A

Spatial Heterogeneity of Soil Readily Available Potassium and Its Influencing Factors in Western Chongqing Hilly Area, China

ZHANG Zilu, ZUO Xinhong, LIU Feng[†], SHI Xiaojun

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The study on rules of spatial distribution of soil nutrients is of important significance to regionalized management of soil nutrients and construction of primary farmlands. [Method] Using the common ordinary Kriging method and cluster analysis method in combination, horizontal and vertical spatial distribution of soil readily available potassium (AK) in the farmlands was studied and characterized in the core region of the Tongnan National Agricultural Science and Technology Park in Western Chongqing. [Result] (1) Results show that the AK in the soil layers of 0~20, 20~40 and 40~60 cm averaged to be

* 国家科技支撑计划项目课题 (2015BAD06B04) 资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2015BAD06B04)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fengliu@swu.edu.cn

作者简介: 张子璐 (1996—), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事农业资源信息管理研究。E-mail: 490801349@qq.com

收稿日期: 2019-02-25; 收到修改稿日期: 2019-07-22; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-08-21

111.6, 96.1 and 90.2 mg·kg⁻¹, in content respectively, and varied in a moderate degree and in the range of medium~deficiency in grade; (2) The AKs in the 0~20 and 20~40 cm soil layers were both negative in global Moran's *I* and spatially isolated, while the AK in the 40~60 cm soil layer was positive and spatially agglomerated; (3) Distribution of the AKs in the 0~20 and 20~40 cm soil layer could be best described with the Gaussian model, and in the 40~60 cm soil layer with the spherical model. The AKs in the 0~20 and 40~60 cm soil layers varied spatially mainly with random factors, and in the 20~40 cm soil layer with structural factors and random factors jointly; (4) The 0~20 cm soil layer high in AK concentrated in the center of the study area, while the layer low in AK scattered quite randomly. The AK in the 20~40 and 40~60 cm soil layers followed a similar trend in distribution. The layers high in AK concentrated in the southeast part and the layers low in AK in the northeast part of the studied region. Vertical distribution of the AK appeared to be in three forms, i.e., uniform, low AK declining and high AK declining, which exhibited a decreasing order in area. 【 Conclusion 】 Soil type, topography and land use are the important factors that have certain impacts that vary in degree either vertically or horizontally on the spatial distribution of AK contents. All the findings of the study may serve as a scientific basis for selection of land consolidation sites, program optimization and regionalized nutrient management of the consolidated land in the study area.

Key words: Soil readily available potassium; Spatial heterogeneity; Spatial interpolation analysis; Cluster analysis

掌握土壤养分的空间变异性,是实现土壤养分分区管理、作物优化施肥,指导基本农田建设,进而提高作物产量和品质的重要基础。在土壤养分空间变异研究方面,既有对区域大尺度的研究^[1-2],如通过土壤有效磷时空变异研究进行烟草施肥分区^[3];也有小尺度的研究^[4-6],如探讨果园土壤肥力空间分布与作物产量的关系^[7]。这种结合地统计学和 GIS 对土壤养分空间变异特征进行的研究已成为土壤科学研究的热点。关于土壤养分空间变异的养分指标以氮、磷、有机质等居多^[8-9],钾被誉为植物的品质元素与抗逆元素,且土壤速效钾(AK)作为植物可以直接吸收利用的元素形态,探究其在土壤中的空间变异对区域种植规划、提高作物品质等具有重要意义。目前专门对 AK 空间分布的研究主要有川西南山区^[10]、新疆艾比湖湿地^[11]、鄱阳湖平原区^[12]及秦巴中部山区^[13]等区域,各研究表明耕作层速效钾空间变异多受结构性因素与随机性因素共同影响,且其空间插值斑块大小、形状及分布等具有显著的区域差异。然而,上述研究仅选取 0~20 cm 耕作层土壤进行水平空间异质性的研究,对垂直空间异质性研究不足。

重庆潼南国家农业科技园区地处以紫色土为主的典型渝西浅丘带坝区,其基本农田建设规模大,农业综合开发强度高,是以市场为导向、以科技为支撑、以企业为主导的现代农业建设新模式。然而,基本农田建设中表土剥离与回填、深松深翻等措施将改变原有土壤养分的空间分布格局。本文选取该

园内小岭村 2017 年集中建设区,结合普通克里格法和聚类分析法对其不同土层的 AK 空间分布及影响因素进行研究,以期为园区种植规划、基本农田建设和农业综合开发等提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

潼南国家农业科技园区位于渝西丘陵区,核心区约 10 km²,涉及罐坝、鱼滩、郭坡、小岭四个行政村。小岭村 2017 年集中建设区内兼有平坝(北部及中部)和丘陵(南部),面积 97.55 hm²,海拔 250~272 m。土壤以侏罗系遂宁组泥岩发育而成的紫色土和以冲洪积砾石及砂土母质或遂宁组泥岩母质发育的水稻土为主。潼南区属亚热带湿润季风气候,年均温 17.9℃,年降水 1 006 mm。区内以水田、旱地为主,旱地多种玉米、花生。

1.2 土壤样品采集与测定

采用 S 形取样法于 2017 年春通过 GPS 定位,对 41 个采样点分 0~20、20~40 和 40~60 cm 采集 3 层土样,共获得土样 104 个(图 1)。由于部分采样点土层较薄,三层土样分别为 41、34 和 29 个。野外采回的土样经风干、过筛、混匀后,采用乙酸铵浸提—火焰光度法^[14]进行 AK 含量的测定。

1.3 数据处理

经正态检验(K-S 检验法)剔除异常值(3δ法、Grubbs 检验法)后,比较不同土壤类型、地形、土

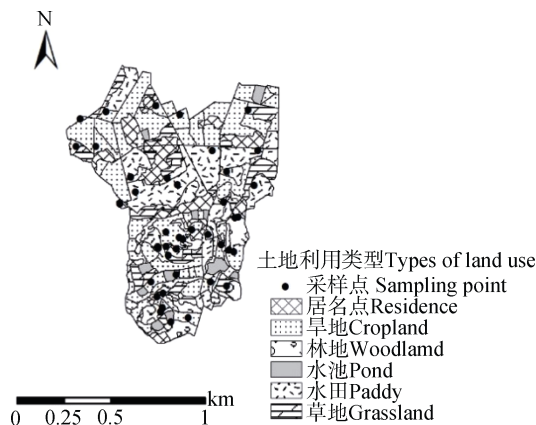


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and soil points

地利用类型及土层间土壤 AK 分布(单因素 ANOVA 分析、皮尔森 (Pearson) 相关性分析) 及 Q 型聚类分析均在 SPSS 25.0 中完成。常规统计分析均在 Excel 2016 中完成。

空间自相关分析中的全局莫兰指数 (Global Moran's I) 是在定量基础上对研究目标空间自相关程度进行衡量的一种方法, 同时也可判别区域化变量在指定区域内是否存在集聚区与孤立区^[15]。双变量空间自相关分析是利用定量指标来描述统计关系间强弱的一种方法, 其目的是分析两变量之间有无

空间相关性, 进而探究它们之间是否可以进行相互预测或者解释^[16]。本文选取基于距离的空间权重, 以最小距离阈值的空间自相关分析、地形因子与 AK 双变量空间自相关分析, 分析过程均在 GeoDa 1.10 完成。

半变异函数 (Semi variation function) 计算在 GS+ 9.0 完成, 对应最佳函数模型以决定系数 (R^2) 越大、残差平方和 (RSS) 越小为原则确定^[17]。结合 GS+ 9.0 半变异函数最优模型参数, 采用 ArcGIS 10.2 普通克里格方法进行空间插值分析与制图。采用 ArcGIS 10.2 区域统计分析得到研究区各土地利用类型斑块在不同土层深度的速效钾均值, 供后续进行聚类分析和统计分析。

2 结果

2.1 不同土层 AK 描述性统计特征

如表 1 所示, 研究区 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层 AK 平均值分别为 111.6、96.1 和 90.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。0~20 cm 土层 AK 含量显著高于其他两层 ($P<0.05$), AK 随土层深度的增加而降低。就变异系数而言, 各土层 AK 均为中等变异。

表 1 不同土层土壤速效钾 (AK) 的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of readily available potassium (AK) in soil layers

土层 Soil layers/cm	最小值 Min./ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 Max./ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	平均值 Mean/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	中值 Median/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Std. Dev/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variance/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
0~20	37.5	183.0	111.6	110.5	34.82	31.21	0.236	0.054
20~40	29.0	167.5	96.1	96.5	32.15	33.45	0.088	-0.120
40~60	29.0	139.5	90.2	95.0	27.71	30.72	-0.333	-0.110

与全国第二次土壤普查土壤养分分级标准^[18]进行对比 (图 2), 0~20 cm 土层 AK 含量大部分集中于中等水平 ($100\sim 150\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 20~40 cm 和 40~60 cm 土层 AK 含量大部分处于缺乏水平 ($50\sim 100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2.2 不同土层 AK 空间自相关特征

2.2.1 全局空间自相关性 各土层 AK 的全局莫兰指数依次为 -0.184、-0.213、0.318, 表明研究区 AK 具有显著的空间自相关性 ($P<0.05$)。图 3 表明,

0~20 和 20~40 cm 土层速效钾主要分布在第 2、4 象限且对应全局莫兰指数均为负值, 属于中等偏低的“低-高”和“高-低”孤立类型, 表明该两层 AK 较高或较低的地区交错随机分布; 40~60 cm 主要分布于第 1、3 象限且全局莫兰指数为正, 属于“高-高”和“低-低”集聚类型, 表明该层 AK 较高的地区之间相邻, 含量较低地区之间相邻。

2.2.2 空间自相关随距离的变化 如图 4 所示, 0~20 cm 土层 AK 的空间自相关随距离增大起伏较

明显，全局莫兰指数在 500~650 m 范围内为正值，表明在该范围内 AK 在结构上呈正相关，存在空间集聚。20~40 cm 土层 AK 在小于 850 m 范围内全局莫兰指数均为正值且随距离增大出现明显波动，具有一定空间集聚性；大于 850 m 范围内其指数均为负值且随距离增大逐渐减小，空间孤立性显现且逐渐明显。40~60 cm 土层 AK 的全局莫兰指数变化表现为随距离增加而减小的趋势，小于 750 m 范围内莫兰指数均为正值且随距离增大逐渐减小，表明空间集聚性极弱；大于 750 m 范围内其指数转为负值且随距离增大而逐渐减小，表明空间孤立性显现并趋于平稳。该研究结果可对土壤野外采样提供

指导^[19]，表明较合理采样点间距应设置在 500~750 m 之间。

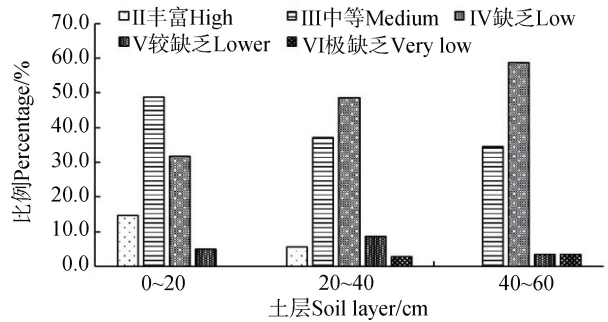


图 2 不同土层土壤速效钾等级频率分布
Fig. 2 Frequency distribution of AK levels relative to soil layer

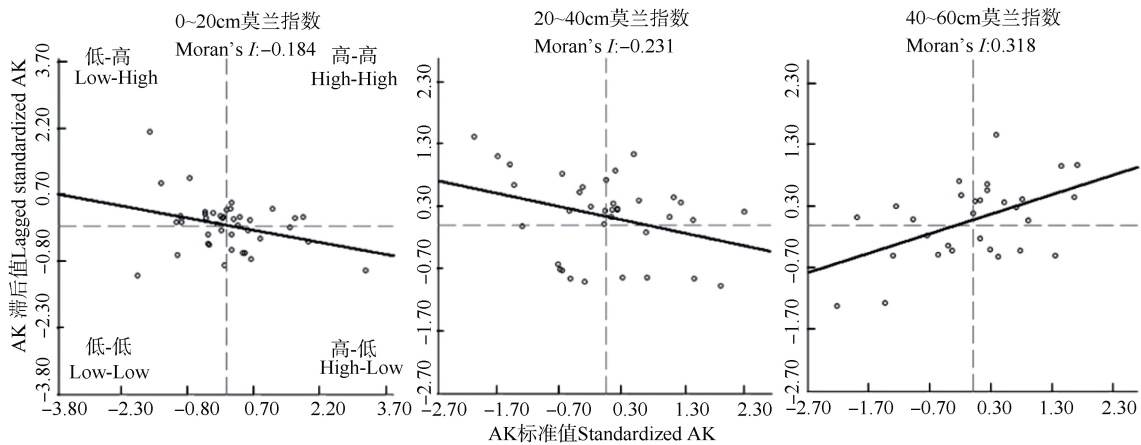


图 3 不同土层土壤速效钾全局莫兰指数散点图
Fig. 3 Global Moran's I scatter plot of AK relative to soil layer

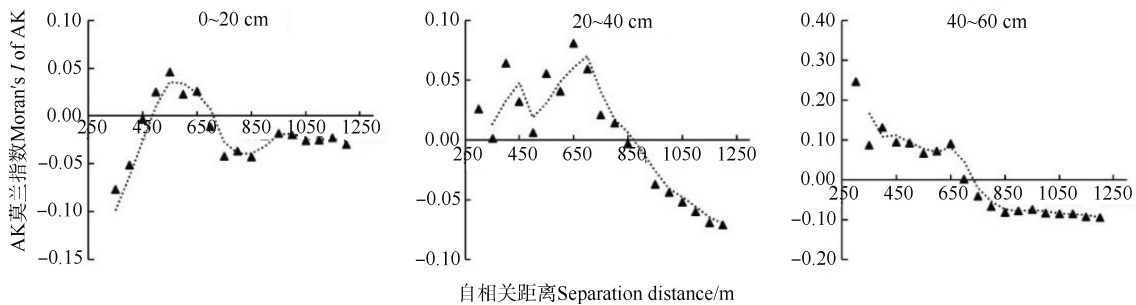


图 4 不同土层土壤速效钾空间自相关关系
Fig. 4 AK space autocorrelation relative to soil layer

2.3 不同土层 AK 空间结构特征

经检验数据符合正态分布，符合半方差函数分析要求，表 2 为最优模型的块金值、基台值等相关参数。块金值 (C_0) 是由实验误差和小于实际取样尺度引起的变异，其大小直接限制了空间内插的精度，基台值 (C_0+C) 表示系统内的总变异量，是区

域化变量的最大变异。块基比 ($C_0/(C_0+C)$) 用于判定区域化变量空间异质性的程度^[20]。0~20 和 20~40 cm 土层最优模型均为高斯模型，而 40~60 cm 土层为球型模型。其中，0~20 和 40~60 cm 土层 AK 的块基比均高于 75%，表明 AK 的空间变异以随机因素变异为主，且 0~20 cm 土层随机性更

强。而 20~40 cm 土层 AK 块基比处于 25%~75% 之间,表明其空间变异是结构因素(如土壤母质、地形因子与水文等)和随机因素(如耕作措施、施肥管理和土壤改良等人类活动^[13])共同造成的。变程是指变异函数在有限步长上达到基台值时对应的

步长,可反映出变量空间自相关范围大小。从表 2 可知,各土层 AK 的变程介于 74~452 m 之间,对应 AK 空间连续性由大到小依次为 20~40、40~60、0~20 cm。0~20 cm 变程仅为 74 m,表明随机因素占其空间变异主体。

表 2 不同土层土壤速效钾的半方差模型及其参数

Table 2 Semi-variance models and parameters of AK relative to soil layers

土层 Soil layers/cm	模型 Models	块金值 Nuggets (C_0)	基台值 Sills (C_0+C)	块基比 Nuggets/Sills ($C_0/(C_0+C)$)/%	变程 Range/m	决定系数 Coefficients of determination (R^2)	残差平方和 Residual sum of squares (RSS)
0~20	高斯 Gaussian	1 057	1 158	91.3	74	0.527	610 187
20~40	高斯 Gaussian	577	1 128	51.2	452	0.684	222 670
40~60	球型 Spherical	576	745	77.3	350	0.356	311 104

2.4 不同土层 AK 空间分布特征

2.4.1 水平空间分布特征 各土层 AK 水平空间分布主要呈现出条带状和斑块状格局(图 5)。0~20 cm 土层属于中等水平($100\sim 150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的面积占绝大部分,高值集中于研究区中部,低值分布较少且位置随机。20~40 和 40~60 cm 的 AK 分布趋势大致相同且缺乏水平($<100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)面积均超过一半。20~40 cm 土层 AK 高值集中于区域东南部,在区域西部边缘仅有少量分布;低值集中于东北部。40~60 cm 土层高值区仅表现为个别岛屿分布于中部且面积较小,低值集中于东北部且范围更广。0~20 cm 土层 AK 高低分布更为随机,这与空间自相关分析结果(图 3)一致。

2.4.2 垂直空间分布特征 整体上 0~20 cm 土

层 AK 分布较其余两层差异较大,且后两层高低分布相对均匀(图 5)。Q 型聚类分析(图 6)表明,由欧氏距离系数^[21]可将研究区各斑块土壤速效钾剖面明显分为 3 类,即均匀型、低钾递减型和高钾递减型(图 7),三者占斑块总数的比例依次为 58.7%、35.7%和 5.6%,占总面积的比例依次为 49.4%、47.9%和 2.7%。

如图 7 所示,均匀型剖面的主要特征是各土层 AK 含量差异较小,无明显递增、递减趋势。低钾递减型剖面的主要特征是整体偏低($70\sim 110\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且中下层较表层明显降低,平均减幅达 35.5%。高钾递减型剖面的主要特征是 AK 含量整体较高($120\sim 150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并随土层深度增加 AK 含量递减,平均减幅达 16.1%。

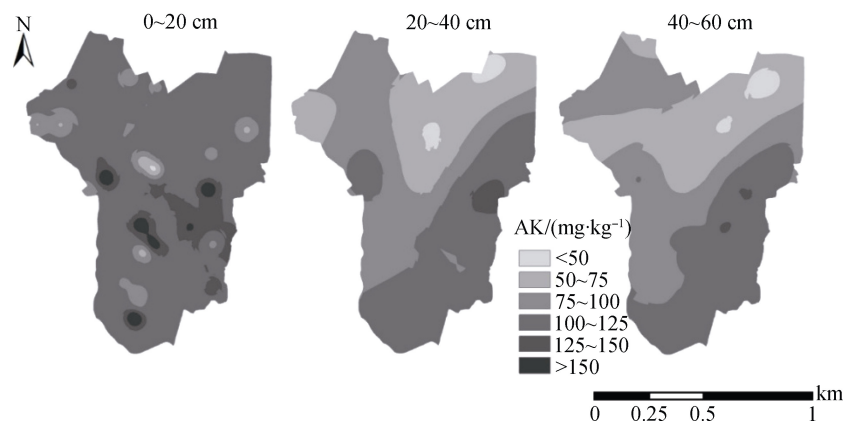


图 5 不同土层土壤速效钾空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of AK relative to soil layer

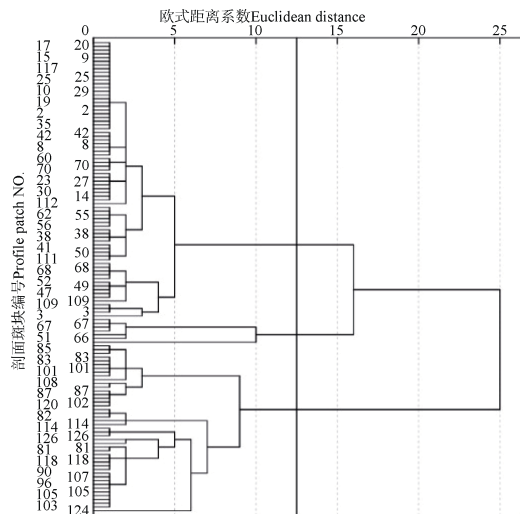


图6 土壤速效钾斑块垂直分布聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of vertical distribution of soil AK patches

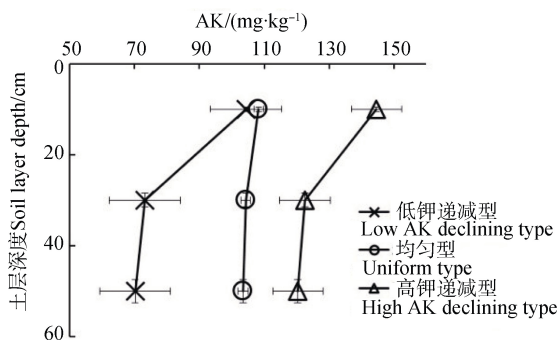


图7 土壤速效钾剖面类型

Fig. 7 Distribution of soil AK profile

3 讨论

3.1 土壤类型对 AK 的影响

研究区主要土壤类型包括由冲洪积砾石及砂土 (Q₂) 发育的黄潮田 (U34), 由遂宁组泥岩 (J_{3s}) 发育的红棕紫泥土 (N32) 和紫泥田 (U42)。研究区北部主要为紫泥田, 中部主要为黄潮田, 南部主要为红棕紫泥土。紫泥田三层 AK 含量较其他两种土壤类型均较低 (表 3), 该结果充分解释了 AK 中下层水平空间分布主体南高北低的原因, 而表层因受施肥等随机因素影响, 南高北低趋势不明显。

一般而言, 黄潮田对应母质含钾量较低^[22], 而本文中黄潮田 AK 在三层土层中均为最高 (表 3), 高钾递减型剖面类型均对应黄潮田。这可能与黄潮田对应区域为平坝, 土地利用类型变化较频繁有关。红棕紫泥土表层 AK 显著高于中下层, 这可能受作物耕作补充表层钾素有关。均匀型剖面在三种土壤类型中均有分布, 低钾递减型多对应紫泥田。

3.2 地形地貌对 AK 的影响

研究区丘陵和平坝 0~20 cm 土层 AK 分别为 117.0±38.3、108.8±31.9 mg·kg⁻¹, 该结果与杨柳等^[23]对川中丘顶、丘坡及冲沟土壤养分研究结果相似, 由于林地主要集中于丘陵, 故其 AK 较高。有研究表明, 在中小尺度区域内地形因子如海拔、坡

表 3 土壤类型对不同土层土壤速效钾的影响

Table 3 Effects of soil type on soil AK relative to soil layers

土类	亚类	土属	土层	样本数	AK/ (mg·kg ⁻¹)
Soil group	Soil subgroup	Soil genus	Soil layers/cm	Sample number	
紫色土 N	石灰性紫色土 N3	红棕紫泥土 N32	0~20	14	111.6±28.4Aa
Purple soil	Calcareous purple soil	Red brown purple soil	20~40	12	93.9±27.8Ab
			40~60	11	88.6±20.3Bb
水稻土 U	潜育水稻土 U4	紫泥田 U42	0~20	14	92.4±42.0Aa
Paddy soil	Submergic paddy soil	Purple clayey earth	20~40	11	81.4±37.9Aa
			40~60	10	70.5±25.5Ba
			渗育水稻土 U3	黄潮田 U34	0~20
	Permeability paddy soil	Yellow alluvial paddy soil	20~40	11	114.3±20.1Aa
			40~60	8	123.6±17.9Aa

注: 不同大写字母表示同土层下不同土壤类型间的差异显著 (P<0.05); 不同小写字母表示相同土壤类型下不同土层间的差异显著 (P<0.05) Note: Different uppercase letters indicate significant difference between soil types in the same soil layer (P<0.05); and different lowercase letters indicate significant difference between soil layers of the same soil type (P<0.05)

度、平面与剖面曲率等对土壤养分的空间变异影响显著^[19]。皮尔森 (Pearson) 相关性分析结果表明, 研究区土壤 AK 与海拔、坡度、剖面曲率、平面曲率及坡向均无显著性相关。为进一步明确地形地貌因子在空间上与 AK 的相关性, 本文采用双变量空间自相关分析法进一步分析 (表 4), 其中坡向由于是环形变量, 故进行余弦转化为-1~1 新变量。结果表明, 五种地形因子与各土层 AK 双变量空间自相关系数绝对值范围在 0.002~0.336 之间, 海拔和坡度与各土层 AK 含量存在极显著的双变量空间自相关性 ($P<0.01$), 即二者在局部空间上仍与 AK 含量的变化趋势一致, 坡向与底层土壤 AK 含量也存在上述现象 ($P<0.05$)。综合皮尔森相关性及相关双变量空间自相关分析, 由于本研究区为浅丘带坝地貌, 海拔变化较小 (250~272 m), 从而使得总体上各地形因子对 AK 空间变异影响均较弱, 未表现出显著相关性, 这解释了 0~20 和 40~60 cm 土层 AK 空间变异主要是由随机因素所导致; 但在空间分布上, 海拔、坡度和坡向地形因子与 AK 仍具有一定的显著双变量空间自相关性, 该结果也解释了 20~40 cm 土层 AK 空间变异是由结构性变异和随机性因素共同导致。

表 4 土壤速效钾与地形因子的双变量空间自相关系数

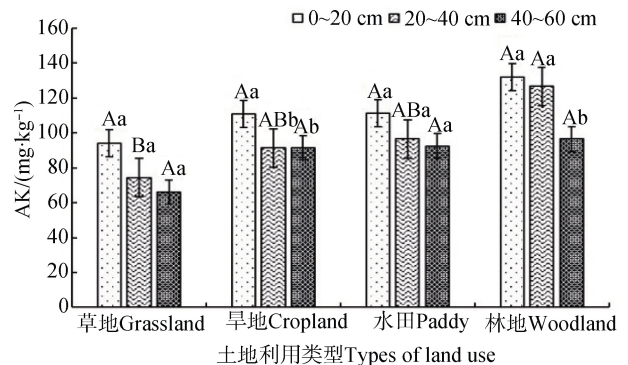
地形因子 Topographic factors	Table 4 Correlation coefficients between AK and topographic factors		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
海拔 Elevation	0.205**	0.207**	0.305**
坡度 Slope	0.166**	0.021**	0.336**
平面曲率 Plan curvature	0.035	0.002	0.066
剖面曲率 Profile curvature	-0.007	-0.014	-0.097
坡向 Aspect	0.036	0.068	0.164*

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

3.3 土地利用类型对 AK 的影响

本研究区内除建设用地和水域外主要为草地、旱地、水田和林地 4 种土地利用类型, 总体上各土地利用类型土壤 AK 均以 0~20 cm 土层最高, 各土层中均以林地最高 (图 8), 这与林地土壤养分是以

充足草木枯萎微生物分解得以补充有关^[24]。林地主要集中于研究区中部及北部少数区域 (图 1), 对应 0~20 cm 土层 AK 水平空间分布中高值斑块区域。0~20 cm 土层旱地 AK 显著高于其他两层, 这主要是由于施肥与秸秆还田^[25]等随机因素造成的; 水田由于长期处于淹水状态 AK 淋溶损失较大, 故其含量低于林地, 这与张倩等^[26]对重庆铜梁的研究结果相似。同土层旱地与水田对应 AK 含量较为相近, 且二者面积占研究区主体部分, 使得各土层空间分布中出现较大的面状斑块。



注: 图中不同大写字母表示相同土层下不同土地利用类型间有显著性差异 ($P<0.05$), 不同小写字母表示相同土地利用类型下不同土层间有显著性差异 ($P<0.05$)。Note: Different uppercase letters indicate significant difference between land uses in the same soil layer at 0.05 level; and the different lowercase letters in the figure indicate significant difference between soil layers under the same land use at 0.05 level

图 8 不同土地利用类型间各土层土壤速效钾差异

Fig. 8 AK in soil profile relative to land use types

土壤 AK 三种剖面类型中, 均匀型剖面斑块总数最多, 其中各土地利用类型斑块占该剖面类型斑块总数的比例由大到小依次为: 旱地 55.4%、水田 16.4%、草地 16.0%、林地 12.2%。表明大部分旱地由于施肥补充土壤钾素与作物吸收消耗钾素相互作用导致表层土壤与中下层 AK 含量相近。低钾递减型速效钾剖面主要包括旱地、草地及小部分水田, 表明该部分由母质风化发育而来的土壤含钾较低, 故中下层 AK 含量较低, 而表层 AK 由于施肥等随机因素影响而明显高于中下层。高钾递减型速效钾剖面仅含 6 个水田斑块与 1 个草地斑块 (水田撂荒地), 这可能由于水田施钾肥后钾素溶于水随水下渗使得所在深层土壤含钾量也较高, 同时也解释了 20~40 与 40~60 cm 空间分布中出现的少数高值岛屿。

4 结 论

渝西丘陵区潼南国家农业科技园核心区在0~60 cm土层中AK平均含量均处于中等-缺乏水平且均为中等变异, AK含量具有显著的空间自相关性, 水平和垂直空间变异明显。不同土层表现为不同的水平空间分布特征, 中上层具有明显的空间孤立性, 尤以表层更为突出, 而下层具有明显的空间集聚性; 上述特征受土壤类型、地形地貌和土地利用类型的综合影响, 其中, 土地利用类型对中层影响显著, 土壤类型对底层影响显著。垂直空间分布特征表现为均匀型、高钾递减型和低钾递减型三种剖面类型, 以均匀型为主。土壤类型中红棕紫泥土、土地利用类型中旱地和林地的各剖面AK含量均为显著递减。在基本农田建设中, 应根据AK含量空间分布特征采取相应的措施, 研究区大部分区域需重视表土剥离和回填, 东部和南部区域可适度进行深松、深翻改土, 并在整治后尤其重视低钾递减型剖面区域的钾素施用。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z, Ren Y, Lu J W, et al. Spatial distribution of micronutrients in farmland soils in the mid-reaches of the Yangtze River. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6): 1489—1496. [张智, 任意, 鲁剑巍, 等. 长江中游农田土壤微量养分空间分布特征. *土壤学报*, 2016, 53 (6): 1489—1496.]
- [2] Paterson S, Minasny B, McBratney A. Spatial variability of Australian soil texture: A multiscale analysis. *Geoderma*, 2018, 309: 60—74.
- [3] Li Q, Dai M L, Xiang D M, et al. Temporal and spatial variability risk assessment of soil phosphorous in Karst tobacco-planting region of Xiangxi, Hunan. *Soils*, 2018, 50 (1): 181—189. [李强, 戴美玲, 向德明, 等. 湘西喀斯特区植烟土壤有效磷时空变异及风险评估. *土壤*, 2018, 50 (1): 181—189.]
- [4] Wang S, Zhuang Q L, Jia S H, et al. Spatial variations of soil organic carbon stocks in a coastal hilly area of China. *Geoderma*, 2018, 314: 8—19.
- [5] Li T, Zheng W W, Zhang S R, et al. Spatial variations in soil phosphorus along a gradient of central city-suburb-exurban satellite. *Catena*, 2018, 170: 150—158.
- [6] Liu W Q, Lu F, Xu X Y, et al. Spatial variation of soil salinity and organic matter under reclamation in an abandoned salt pan. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (4): 1311—1319. [刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 废弃盐田复垦利用后土壤盐分与有机质含量空间变异特征. *生态学报*, 2018, 38 (4): 1311—1319.]
- [7] Dos Santos R O, Franco L B, Silva S A, et al. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2017, 21 (2): 88—93.
- [8] Jiang Y F, Sun K, Guo X, et al. Spatial variability of organic matter and its influencing factors in red soil with different erosion degrees in South China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33 (1): 149—160. [江叶枫, 孙凯, 郭熙, 等. 南方红壤区不同侵蚀程度下土壤有机质空间变异的影响因素研究. *自然资源学报*, 2018, 33 (1): 149—160.]
- [9] Zhang Z Y, Li Z B, Li P, et al. Spatial variability of soil nitrogen and the impact factors of land-use types in Yujiehe Watershed, Han River. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24 (4): 46—52, 58. [张泽宇, 李占斌, 李鹏, 等. 汉江小流域土壤氮素空间分布特征及影响因素. *水土保持研究*, 2017, 24 (4): 46—52, 58.]
- [10] Wang Y H, Wang C Q, Li Q Q, et al. Geostatistics and GIS analysis of soil available potassium in mountainous southwestern Sichuan. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29 (3): 651—657. [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. *西南农业学报*, 2016, 29 (3): 651—657.]
- [11] Ghayur G, Wang Y H, Hamit Y. Spatial variability of soil available K concentrations in Ebinur lake wetland. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (2): 375—381. [艾尤尔·亥热提, 王勇辉, 海米提·依米提. 艾比湖湿地土壤速效钾空间变异性分析. *土壤通报*, 2015, 46 (2): 375—381.]
- [12] Jiang Y F, Guo X. Spatial heterogeneity of available potassium in topsoil based on co-Kriging. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31 (1): 139—148. [江叶枫, 郭熙. 基于协同克里格的耕层土壤速效钾空间异质性研究. *浙江农业学报*, 2019, 31 (1): 139—148.]
- [13] Chen Y, Qi Y B, Wang Y Y, et al. Spatial variability and factors affecting soil available potassium in the central Qinling-Daba mountain area. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30 (2): 257—266. [陈洋, 齐雁冰, 王茵茵, 等. 秦巴中部山区耕地土壤速效钾空间变异及其影响因素. *环境科学研究*, 2017, 30 (2): 257—266.]
- [14] Yang J H, Wang C L, Dai H L. Analytical methods for soil, agro-chemistry and environmental monitoring. Beijing: China Land Press, 2008. [杨剑虹, 王成林, 代亨林. *土壤农化分析与环境监测*. 北京: 中国大地出版社, 2008.]
- [15] Yang Q Y, Jiang Z C, Yuan D X, et al. Spatial autocorrelation analysis of soil water content in a karst

- region of Guangxi Province. *Carsologica Sinica*, 2015, 34 (3): 260—265. [杨奇勇, 蒋忠诚, 袁道先, 等. 广西典型岩溶区土壤水分含量空间自相关分析. *中国岩溶*, 2015, 34 (3): 260—265.]
- [16] Yao X W, Zeng J, Li W J. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan urban agglomeration. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (9): 249—256. [姚小薇, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 249—256.]
- [17] Wu M, Liu S J, Ye Y Y, et al. Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slopes and abandoned lands in a Karst peak-cluster depression area. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (6): 1619—1627. [吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(6): 1619—1627.]
- [18] Department of Agriculture and Animal Husbandry of Sichuan Province, Office of Soil Survey of Sichuan Province. *Compilation of data of the second soil census in Sichuan Province*. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 1992. [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川省第二次土壤普查数据资料汇编. 成都: 成都地图出版社, 1992.]
- [19] Song X, Li L D, Kou Z L, et al. Soil nutrient distribution and its relations with topography in Huangshui River drainage basin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (12): 3163—3168. [宋轩, 李立东, 寇长林, 等. 黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系. *应用生态学报*, 2011, 22 (12): 3163—3168.]
- [20] Zhang M, He P F, Chen W Q. Spatio-temporal variability analysis of soil nutrients based on GIS and Geostatistics. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41 (3): 53—58. [张敏, 贺鹏飞, 陈伟强. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异分析. *东北农业大学学报*, 2010, 41 (3): 53—58.]
- [21] Li E H, Hu H B, Lu X Z, et al. Characteristics of soil salinity profiles and physical and chemical properties of coastal saline soil in the estuary of North Jiangsu. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23 (4): 116—119, 127. [李二焕, 胡海波, 鲁小珍, 等. 苏北滨海盐土区土壤盐分剖面特征及其理化特性. *水土保持研究*, 2016, 23 (4): 116—119, 127.]
- [22] Department of Agriculture and Animal Husbandry of Sichuan Province, Office of Soil Survey of Sichuan Province. *Soil taxonomy of Sichuan*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]
- [23] Yang L, Hu Y F, Xu Z L, et al. Temporal variation characteristics of soil nutrient in hilly region of mid-Sichuan Basin: A case study in Yuxing Town of Zhongjiang County. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 (5): 1057—1062. [杨柳, 胡玉福, 许宗林, 等. 川中丘陵区土壤养分时间变异特征研究——以中江县玉兴镇为例. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1057—1062.]
- [24] Liu Z, Wei T X, Zhu Q K, et al. Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils in forests of loess hilly region. *Soils*, 2016, 48 (4): 705—713. [刘钊, 魏天兴, 朱清科, 等. 黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征. *土壤*, 2016, 48 (4): 705—713.]
- [25] Sui P X, Zhang W K, Mei N, et al. Effects of different straw returning methods on spring maize yield, water use and root growth. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (4): 255—261. [隋鹏祥, 张文可, 梅楠, 等. 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响. *水土保持学报*, 2018, 32 (4): 255—261.]
- [26] Zhang Q, Hu S Y, Gao M, et al. Study on spatial variability of soil nutrients in purple soil hilly region—Take Tongliang in Chongqing as an example. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (20): 216—223. [张倩, 胡胜勇, 高明, 等. 紫色丘陵区土壤养分空间变异特征研究——以重庆市铜梁县为例. *中国农学通报*, 2011, 27 (20): 216—223.]

(责任编辑: 陈荣府)