

## 夏尔希里地区表层土壤养分空间异质性研究

刘西刚, 王勇辉, 焦黎\* (新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆乌鲁木齐 830054)

**摘要** 以夏尔希里地区为研究区,运用统计学和地统计学相结合的方法,研究土壤表层(0~10 cm)的有机质(OM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)养分含量以及空间变异特征。结果表明:研究区土壤表层 OM、AP、AK 含量分别为  $(3.267 \pm 2.25)\%$ 、 $(6.751 \pm 4.85) \text{ mg/kg}$ 、 $(25.82 \pm 14.72) \text{ mg/kg}$ , OM、AP、AK 含量均为中等变异;研究区土壤 OM、AK 最佳拟合模型为球状模型, AP 最佳拟合模型为指数模型, 决定系数均很高(0.738~0.994); OM、AP 为空间强烈自相关, AK 为中等空间自相关。OM、AP 变程较长(7 905.52, 5 346.75 m), 空间上连续性较好。AK 变程较短(4 325.64 m), 空间依赖性较强。土壤 OM 含量空间分布呈现山地森林区>绿洲区>荒漠区的特征, AP、AK 含量空间分布均呈现绿洲区>山地森林区>荒漠区的特征;山地森林区表层土壤空间异质性主要受坡度、海拔高度、坡面曲率的影响。夏尔希里地区表层土壤养分存在不同空间异质性和空间关联性, 这为干旱区土壤养分管理、可持续利用策略以及生态恢复提供了理论依据。

**关键词** 土壤表层养分; 山地森林区; 荒漠区; 绿洲区; 空间异质性; 夏尔希里地区

中图分类号 S 158 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)11-0075-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.11.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Spatial Heterogeneity of Surface Soil Nutrients in the Xiaerxili Area

LIU Xi-gang, WANG Yong-hui, JIAO li (School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054)

**Abstract** Taking the Xiaerxili area as the research area, the contents of organic matter (OM), AP and AK nutrients and spatial variation characteristics of soil surface layer (0-10 cm) were studied by combining statistics and geostatistics. The results showed that the content of organic matter (OM), effective phosphorus (AP), available potassium (AK) in the study area respectively  $(3.267 \pm 2.25)\%$ ,  $(6.751 \pm 4.85) \text{ mg/kg}$ ,  $(25.82 \pm 14.72) \text{ mg/kg}$ , OM, AP and AK content were the medium variation; the optimal fitting model of soil OM and AK in the study area was spherical model, while the optimal fitting model of AP was exponential model, with high determination coefficient (0.738~0.994). OM and AP spaces were strongly autocorrelation, and AK was medium spatial autocorrelation. OM and AP had a long variable range (7 905.52, 5 346.75 m), with good spatial continuity. AK variable range was short (4 325.64 m), with strong spatial dependence. The spatial distribution of soil OM content was characterized by mountain forest area > oasis area > desert area, and the spatial distribution of AP and AK content were characterized by oasis area > mountain forest area > desert area; the spatial heterogeneity of surface soil in mountain forest was mainly affected by slope, altitude and slope curvature. There were different spatial heterogeneity and spatial correlation between surface soil nutrients in Xiaerxili area, which provide theoretical basis for soil nutrient management, sustainable utilization strategy and ecological restoration in arid area.

**Key words** Soil surface nutrient; Mountain forest area; Desert area; Oasis area; Spatial heterogeneity; Xiaerxili area

土壤是一种形态和演化过程都十分复杂的自然综合体,受气候、生物、母质、地形等成土因素的影响,具有复杂性和时空变异性<sup>[1]</sup>。即使在土壤类型和质地相同的区域内,同一时刻土壤特性在空间上也有明显的差异<sup>[2]</sup>。土壤养分是植物生长发育所必需的营养元素,它也是土壤肥力的物质基础<sup>[3]</sup>,同时也是植被生活基质的必要供体<sup>[4]</sup>,土壤在形成和演化过程中受多种时空尺度环境因素(气候、土地利用、海拔、地貌地形等)的控制,因此土壤养分的空间变异特征十分复杂<sup>[5-6]</sup>。当中小尺度上的气候差异不显著时,地形地貌对土壤养分空间变异的影响更为明显<sup>[7]</sup>。深入研究土壤养分在空间的变化规律不仅有助于对土壤发育格局的探索,更有助于揭示养分在小区域的空间格局与生态过程、功能之间的关系。对于土壤养分的空间预测在当今已经有很多的研究方法,其中地统计学方法已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一<sup>[8]</sup>,在国内外都被广泛使用,如 Elbasiouny 等<sup>[9]</sup>、Glendell 等<sup>[10]</sup>、Roger 等<sup>[11]</sup>、Ye 等<sup>[12]</sup>、Dai 等<sup>[13]</sup>均采用此方法进行分析。

夏尔希里地区是新疆维吾尔自治区省级自然保护区,

到目前为止,对该地区的研究主要集中在土壤重金属、土壤盐分、土壤环境背景、地表水、植物区系及蝴蝶资源等<sup>[14-18]</sup>领域,而土壤养分方面的研究很少。笔者以夏尔希里地区为研究对象,以变异函数为工具,将地统计方法与 GIS 相结合分析夏尔希里地区表层(0~10 cm)土壤养分中的、有效磷、速效钾的空间变异与空间分布规律。该区域由山地森林区、荒漠区、绿洲区 3 种地貌类型组成,不同的地貌类型表层土壤养分呈现不同的空间分布规律。研究夏尔希里地区养分的重要意义在于填补该区域对土壤表层养分研究的空白,丰富该地区养分数据库。由于山地森林区无人干扰,生态环境较好,研究此处可为其他同类山地表层土壤养分研究比照提供样本参考,还可以作为同类山地生态系统恢复与重建的参考目标,同时也为干旱区的土壤保护、生态恢复以及土壤可持续利用提供科学参考。因此,对夏尔希里地区的土壤表层养分空间异质性研究有重要意义。

## 1 研究区概况、数据来源与研究方法

**1.1 研究区概况** 夏尔希里地区位于中哈(哈萨克斯坦)边界中方一侧,地处新疆博尔塔拉蒙古自治州境内北部阿拉套山南坡山区,地理位置为  $81^{\circ}43'09'' \sim 82^{\circ}33'18''\text{E}$ ,  $45^{\circ}07'43'' \sim 45^{\circ}23'15''\text{N}$ 。东西长度为 66 km,南北宽度为 25 km,总面积为  $314 \text{ km}^2$ 。由于研究区内地形复杂,山地垂直结构明显,由山前平原、低山区、中山区、高山区组成,其中面积为  $36 \text{ km}^2$

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41261055)。

**作者简介** 刘西刚(1993—),男,黑龙江黑河人,硕士研究生,研究方向:干旱区环境利用。\*通信作者,教授,硕士生导师,从事干旱区环境利用研究。

**收稿日期** 2019-04-02

的中低山区有完整的自然环境特征。气温在不同海拔高度下各不相同,海拔 2 000 m 平均气温 1.1 ℃,海拔 1 000 m 平均气温 3.6 ℃<sup>[19]</sup>。由于研究区远离海洋,位于干旱区,水源主要来源于阿拉套山体拦截西风环流带来的降水。降水在不同海拔表现不同,大致呈现随海拔高度升高而增加的规律,低山带降水量为 100~250 mm,中山带为 250~450 mm,高山地带可达到 450~600 mm。夏尔希里地区的土壤类型具有明显的垂直带分布特性,从高山区到山前平原依次分布着高山亚高山草甸土、灰褐色森林土、山地黑钙土、山地栗钙土、灰漠棕土等<sup>[19]</sup>。研究区内由于地貌特征不同,主要由山地森林区、荒漠区、绿洲区组成。该地区整体受人为干扰作用较小,山地森林区无人为干扰作用,绿洲区和荒漠区域有人类的农业活动。

**1.2 土壤样品采集** 根据夏尔希里地区的地貌特征,将研究区划分为山地森林区、荒漠区、绿洲区 3 种不同地貌类型进行布点,为了便于比较,采样时尽可能使采样点均匀分布。根据不同地类型的面积不同,以山地森林区、荒漠区、绿洲区之间面积比例为 13:16:12 进行布置采样点个数。于 2013 年 8 月和 2014 年 10 月,在夏尔希里地区采集土壤样品

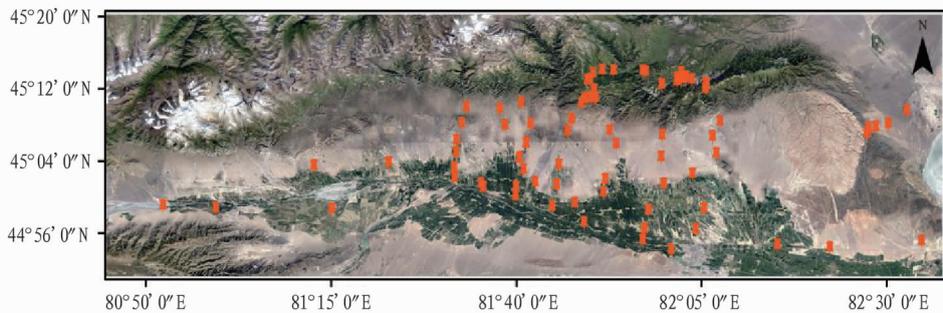


图 1 夏尔希里地区土壤样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites for test of soil in the Xiaerxili area

**1.4 数据处理** 通过 SPSS 18.0 对数据中的最大值、最小值、平均值、标准差、偏度、峰度等特征值进行计算。用 SPSS 18.0 中的 Kolmogorov-Smimov (K-S) 模块对数据进行正态分布检验。用 SPSS 18.0 作环境因子与养分的 Pearson 相关性。用 Minitab 16 软件中的 Box-Cox 法对不符合正态分布的数据进行转换。通过 GS+ 软件进行地统计学的半方差函数的模拟。并用 ArcGIS 10.3 绘制克里金插值图。运用经典统计学和地统计学相结合的方法进行分析处理。

**1.4.1 半方差函数分析。**半方差函数又称变差函数,被认为是地统计分析中特有的基本工具。它是距离的函数,主要研究各属性变量之间在空间上的差异程度,是主要的空间描述性分析工具,被研究者广泛的应用。其公式如下:

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

式中, $\gamma(h)$ 代表所求半方差函数值; $N(h)$ 代表样本间隔为  $h$  时的点对数; $Z(x_i)$ 代表的是区域化变量  $Z(x)$  在空间位置处  $x_i$  的实测值; $Z(x_i+h)$ 代表的是与  $x_i$  距离为  $h$  处的样点实测值;半方差函数揭示了空间的变异格局,一般认为,半方差函数只有在最大间隔距离的 1/2 之内才有作用。在变异函数

81 个,山地森林区布点 26 个,荒漠区布点 31 个,绿洲区布点 24 个(图 1)。每个样本点都按照表层土壤(0~10 cm)进行采样。为了避免误差对结果影响,采样时均以先期预定的样本点为中心,以 50 cm 为半径,再取 3 个(0~10 cm)土样,将 4 个(0~10 cm)土壤样本混合后作为最终样本。利用 GPS 对样本点进行定位,在采取样本时,同时记录与样点有关的立地因子如坡向、坡度、海拔高度等,将样本装入袋中并且做好标记。

**1.3 土壤样品处理与测定** 将土壤样本带回实验室风干、过 0.28 mm 筛,以备分析测定有机质(OM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)。坡向是以度(°)为单位按逆时针方向进行测量,用来识别表面上某一位置处的最陡下坡方向,可将坡向视为坡度方向或山体所面对的罗盘方向。坡面曲率代表土壤凹凸情况,该数值通过运用 Arc GIS 10.3 提取 DEM 数据中的坡面曲率得到,土壤有机质(OM)采用重铬酸钾方法进行测定,有效磷(AP)采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法进行测定,速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰原子吸收分光光度法进行测定。

中基台值(Co+C)、块金值(Co)、变程(A)是 3 个重要的参数,块金值与基台值的比即  $Co/(Co+C)$  代表样本的空间变异程度。在研究时,若块金比  $Co/(Co+C) < 25\%$ ,认为是空间变量在空间分布上有强烈自相关性,主要由土壤母质、地形、气候等非人为的结构因素所引起的变异,若  $25\% < Co/(Co+C) < 75\%$ ,认为是空间变量在空间分布上有中等相关性,由结构性因素和随机性因素(施肥、耕作措施、种植制度等人为活动)共同作用所引起的变异<sup>[20]</sup>。当  $Co/(Co+C) > 75\%$  时,为弱空间自相关。该研究中的所有半方差函数均符合有效滞后距离为最大滞后距的 1/2。

**1.4.2 克里金插值。**克里金插值法是一种被广泛应用的插值方法。该研究采用普通克里金方法进行插值。在普通克里金插值中,任意待测点(块段) $x_0$  的实测值  $Z(x_0)$ ,通过该待测点(块段)周围的  $n$  个有效采样点的  $Z(x_i)$  的线性组合的到估计值  $Z^{\#}(x_0)$ 。

$$Z^{\#}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中, $\lambda_i$ 为克里金插值中的权重系数,在满足无偏性条件下,最优性的估计方差为:

$$\sigma_E^2 = E[Z(x) - Z^\#(x)]^2 \quad (3)$$

## 2 结果与分析

**2.1 表层土壤养分特征统计** 将土壤养分的 81 个样本数据采用样本均值 $\pm 3$  倍标准差的方法对特异值进行识别,在此范围之外的值被定义为特异值,用最大值和最小值进行相应的替换。后续的计算均采用处理后的原始数据进行分析。由表 1 可知:表层土壤养分 OM 的含量为(3.267 $\pm$ 2.25)%、表层土壤养分 AP 的含量为(6.751 $\pm$ 4.85) mg/kg、表层土壤养分 AK 的含量为(25.82 $\pm$ 14.72) mg/kg。变异系数描述数据在空间的变异程度<sup>[14]</sup>,从变异系数的情况可得,变异系数

的范围为 56.99%~71.86%,变异系数最大的是 AK,为 71.86%,OM、AP、AK 的变异程度均属于中等变异,变异系数从大到小的顺序依次为 AK>OM>AP。说明研究区表层土壤养分的 AK 受外界干扰明显。通过对养分数据的峰度、偏度进行分析以及对数据进行正态分布检验。结果显示:在 5% 的 K-S 检验结果中,样本数据均不符合正态分布要求。在此情况下,用 Box-Cox 方法对样本数据进行转换,将转换结果再次通过单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验,结果表明,所有数据均符合正态分布。

表 1 土壤养分含量描述性统计分析及其正态分布检验

Table 1 Descriptive statistical analysis and K-S test of soil nutrient

土壤养分 Soil nutrients	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV//%	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	K-S 检验 K-S test	分布类型 Distribution type
有机质 OM//%	8.96	0.19	3.267	2.250 5	0.688 5	0.927	-0.334	1.538	*
有效磷 AP//mg/kg	25.70	0.60	6.751	3.851 9	0.569 9	1.085	1.874	1.253	*
速效钾 AK//mg/kg	69.09	2.06	25.82	18.721 0	0.718 6	0.951	0.433	1.047	*

注: \* 表示经 Box-Cox 转换后为正态分布

Note: \* means normal/distribution after Box-Cox conversion

**2.2 表层土壤养分半方差函数分析** 土壤特性在土壤空间异质性的经典统计分析中,常常被看作是随机分布,彼此之间相互独立的。但在实际中,土壤在空间分布上,彼此之间也存在着相互的依赖性。研究区表层土壤养分的空间相关性表明(表 2、图 2):OM 在空间的最佳拟合效果符合球面模型、AP 的最佳拟合效果符合指数模型、AK 的最佳拟合效果符合球面模型。OM、AP、AK 在空间的拟合效果均很高,决定系数  $R^2$  范围为 0.738~0.994,说明三者的拟合模型均能较好的反映表层土壤养分在空间分布特征。研究区表层土壤养分指标的块金值/基台值  $Co/(Co+C)$  从大到小依次为 AK>AP>OM,其中 OM、AP 的块金比  $Co/(Co+C)$  分别为 17.8%、22.1%,从空间上看,表现为强烈的空间自相关。AK 的块金

比  $Co/(Co+C)$  的值最大,为 67.9%,说明空间上存在中等的空间自相关。变程的大小反映了土壤特性的有效空间的自相关距离,OM、AP 的变程均较大,分别为 7 905.52 m、5 346.75 m,说明 OM、AP 在空间上的连续性较好。而 AK 的变程最小,为 4 325.64 m,表明 AK 的空间依赖性较强。

**2.3 表层土壤养分空间分布特征** 为了更加直观地反映研究区表层土壤养分有机质(OM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)含量在空间上的分布特征,通过利用 ArcGIS 10.3 软件中的 kriging,对土壤养分各要素的半方差模型进行插值分析。分别绘制了土壤有机质(OM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)3 种土壤养分空间分布图(图 3)。

表 2 研究区土壤养分半方差函数模型类型及参数

Table 2 Semivariogram theoretical models and parameters for soil nutrients in study area

土壤养分 Soil nutrients	模型 Model	块金值 $Co$ Nugget	基台值 $Co+C$ Sill	块金值/基台 值 $Co/(Co+C)$ Nugget Sill	变程 $A$ Range/m	$R^2$
OM	球面模型	0.130 4	0.730 2	0.178	7 905.52	0.738
AP	指数模型	0.153 8	0.690 3	0.221	5 346.75	0.967
AK	球面模型	0.368 7	0.542 3	0.679	4 325.64	0.994

为了更加直观地反映研究区表层土壤养分有机质、有效磷、速效钾含量在空间上的分布特征,通过利用 ArcGIS 10.3 软件中的 kriging,对土壤养分各要素的半方差模型进行插值分析。分别绘制了土壤有机质(OM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)3 种土壤养分空间分布图(图 3)。

**2.3.1 有机质空间分布特征。**通过图 3(a)显示:研究区表层土壤有机质的含量大致在 0.41%~6.71% 范围内,在分布上主要呈现岛状和条带状分布,在图中 81°45'~82°15'E 的岛状区域内出现最高值,通过观察此处为山地森林区,该处几

乎不受人为因素的影响,植物生长茂盛,植物覆盖度高,枯枝落叶多。由于该区域海拔高、温度相对较低,枯枝落叶分解速度较慢,导致植物在土壤表层聚集的有机质含量较多。在图中 81°15'~81°40'E、81°42'~82°15'E、82°0'~82°8'E 的 3 个岛状区域内,出现低值区域,此处大部分为荒漠区也有少部分的绿洲区,荒漠区地表植被稀疏,生态环境脆弱极易受到破坏,所以土壤表层有机质含量低。自中部的岛状向外扩散,逐渐形成条状分布特征。形成自中部的有机质含量向外部逐渐增多的规律,在中部的荒漠区形成有机质含量低值

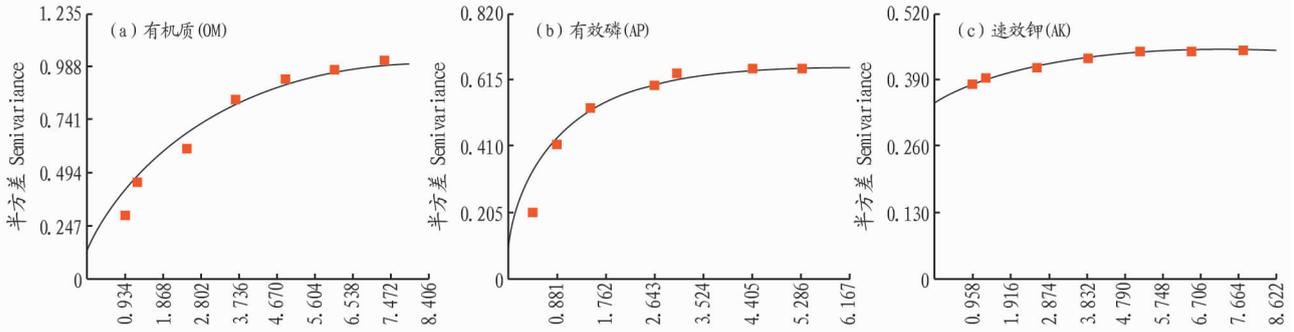


图2 研究区土壤养分半方差函数

Fig. 2 Semivariogram of soil nutrient in the study area

区,含量范围为0.41%~1.64%。山地森林区形成有机质高值区,绿洲区有机质含量处于两者之间,形成山地森林区>绿洲区>荒漠区的分布格局。

**2.3.2 有效磷空间分布特征。**从图3(b)可以看出,土壤有效磷含量在1.71~12.34 mg/kg,有效磷分布主要以岛状和条带状为主,在研究区81°30′~82°10′E和82°25′~82°35′E的岛状区域内形成低值区,含量范围为1.70~3.99 mg/kg。该区域主要为荒漠区,可能与该区域的母质本底值较低有关。自此区域向外扩散,有效磷含量逐渐增加,在研究区80°50′~81°10′E和82°5′~82°20′岛状区域内形成高值区,含量为8.92~12.34 mg/kg之间,80°50′~81°10′E区域主要以绿洲区为主,82°5′~82°20′E区域主要以山地森林区为主,但绿洲区有效磷含量明显高于山地森林区,AP在空间上整体呈现绿洲区>山地森林区>荒漠区的分布格局。

**2.3.3 速效钾空间分布特征。**图3(c)反映的是研究区表层土壤养分速效钾的空间分布特征,在分布上主要以条带状为主,并有部分斑块镶嵌其中,速效钾含量大体在10.54~38.15 mg/kg。在研究区的81°35′~81°50′E和82°5′~82°20′E岛状区域内形成速效钾的高值区,含量范围为28.73~38.15 mg/kg,该区域大部分

为绿洲区,受人为活动影响大,以农作物种植为主,种植作物为棉花,当地农民施钾肥量较大,所以导致速效钾含量高。自此区域向外逐渐扩散,土壤养分速效钾含量逐渐减少。在81°30′~82°0′E岛状区域内,出现速效钾含量的低值区,含量范围为10.54~18.77 mg/kg。该区域主要以荒漠区为主,地表植被稀疏,对钾素吸收能力弱,导致速效钾含量低。通过观察可发现,速效钾含量整体呈现绿洲区>山地森林区>荒漠区的分布格局。

**2.4 山地森林区表层土壤养分影响因子分析** 夏尔希里山地森林区不受外界干扰,是一个独立的自然区域,环境因子对土壤养分空间分布特征和变异规律起着非常重要的作用<sup>[21]</sup>。通过山地森林区土壤养分与环境因子的Pearson相关性(表3)可知:该区域OM、AP、AK均与海拔高度呈负相关关系,其中OM、AK与海拔高度呈极显著负相关,AP与海拔高度呈显著负相关;AP、AK与坡度均呈负相关关系,AP与坡度呈显著负相关,AK与坡度呈极显著负相关;OM、AK与坡面曲率呈显著负相关;说明海拔越高坡度越陡的地方表层土壤养分OM、AP、AK的含量越低。

表3 山地森林区土壤养分与环境因子Pearson相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis of soil nutrients and environment factors in mountain forest

因子 Factor	有机质 OM	有效磷 AP	速效钾 AK	海拔 Elevation	坡度 Slope	坡向 Slope	坡面曲率 curvature
有机质 OM	1						
有效磷 AP	0.204	1					
速效钾 AK	0.343 *	0.286 *	1				
海拔 Elevation	-0.354 **	-0.281 **	-0.374 **	1			
坡度 Slope	0.063	-0.192 *	-0.257 **	0.368 *	1		
坡向 Aspect	-0.056	0.443 **	-0.174	0.138	0.102	1	
坡面曲率 Curvature	-0.128 *	0.051	-0.235 *	0.125	0.088	0.222 *	1

注: \*\*、\* 分别代表在0.01、0.05水平(双侧)上显著相关

Note: \*\*、\* respectively represent significant correlation (both sides) at the 0.01, 0.05 level

**2.5 典型山地森林区表层土壤养分对比分析** 由于夏尔希里山地森林区与祁连山青海云杉区的地貌特征与水热条件均较为一致,因此,将两地的土壤养分进行对比研究(表4、5),说明二者养分的差异性以及可能原因。通过表3、4可知:夏尔希里山地森林区的表层土壤OM的含量在(5.97±1.78)%、AP的含量在(7.27±6.46) mg/kg、AK的含量在(22.95±14.99) mg/kg,祁连山青海云杉区的表层土壤OM的

含量为(10.95±3.64)%、AP的含量为(17.86±3.46) mg/kg、AK的含量为(211.49±62.77) mg/kg,祁连山青海云杉区表层土壤养分的均值均较夏尔希里森林区的高,其中AK的均值含量相差最大,为188.54 mg/kg。从变异系数上看,夏尔希里山地森林区养分的变异系数范围为29.88%~88.86%,OM、AP、AK的变异程度均属于中等变异。祁连山青海云杉林区养分的变异系数范围19.37%~32.87%,OM、AP、AK的变异

程度均属于中等变异。但夏尔希里山地森林区的 AP、AK 的变异程度明显高于祁连山青海云杉区。在这 2 个区域内，

AK 的变化规律具有一致性，含量所占比重最大，均明显高于 OM、AP 含量。

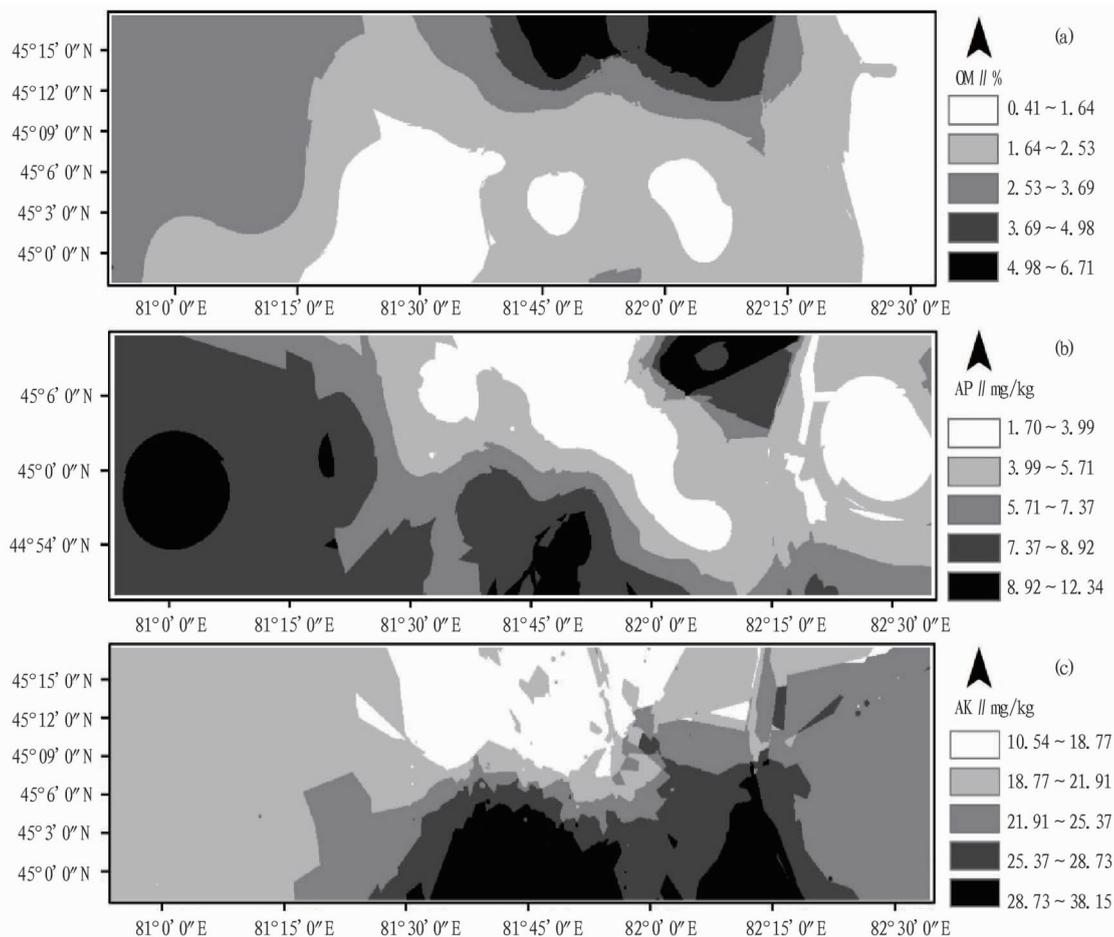


图 3 土壤养分空间分布——克里格插值

Fig. 3 Spatial distribution diagram of soil nutrients—Kriging maps

表 4 山地森林区表层土壤养分特征描述

Table 4 Description of soil nutrient characteristics in mountain forest

土壤养分 Soil nutrients	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV//%
有机质 OM//%	8.96	2.04	5.97	1.78	29.88
有效磷 AP//mg/kg	25.70	0.60	7.27	6.46	88.86
速效钾 AK//mg/kg	58.30	2.06	22.95	14.99	65.30

表 5 祁连山区表层土壤养分特征描述

Table 5 Description of surface soil nutrient characteristics in Qilian mountain area

土壤养分 Soil nutrients	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV//%
有机质 OM//%	17.92	4.38	10.95	3.64	32.87
有效磷 AP//mg/kg	32.78	9.72	17.86	3.46	19.37
速效钾 AK//mg/kg	407.66	132.55	211.49	62.77	29.68

注：祁连山区养分含量数据来源于参考文献<sup>[22]</sup>

Note: Nutrient content data in Qilian Mountain was derived from reference<sup>[22]</sup>

### 3 讨论

对于土壤中的养分的含量变化、空间分布特征以及养分之间的迁移转化，不仅受结构性因素（成土母质、气候、成土过程）还受耕作制度、施用化肥和种植作物类型等人为因素的随机性因素的共同作用<sup>[23-25]</sup>。夏尔希里地区地形复杂，地

貌类型多样，由山地森林区、绿洲区、荒漠区组成。山地森林区土壤以森林土为主，荒漠区土壤以灰棕漠土为主，土壤类型和植被种类各不相同，农业种植主要分布在绿洲区域。通过对当地的农户种植施肥情况观察可知：农民种植作物主要为棉花，施肥以重施钾肥为主，形成连年耕种、不倒茬的种植

模式。因此,造成夏尔希里地区表层养分空间变异受多种因素影响,主要因素有土壤质地、地貌特征、地形以及施肥管理和种植结构。

夏尔希里山地森林区的养分与环境因子的相关性特征与王华等<sup>[26]</sup>对喀斯特常绿落叶阔叶混交林土壤磷钾受环境因子影响的结果较一致。但引起该现象产生的原因可能不同,喀斯特地区温度高、降雨量大,淋溶作用强烈,可能淋溶作用是主要因素,而夏尔希里山地森林区该季节降雨较少、温度较低,出现此结果可能是因为植物的表聚作用以及凋落物的影响。夏尔希里山地森林区 OM、AP、AK 养分含量明显低于赵维俊等<sup>[22]</sup>对祁连山青海云杉区研究的养分含量,产生这种现象的主要原因可能与淋溶作用的强度有关,虽然两地的降水量大致相同,但对于夏尔希里山地森林区而言,该地区降水频率高,但降水强度小。加之林冠截留和地被植物渗吸作用,地表径流发育较弱,导致淋溶作用弱,各养分含量相对较低。

限于人力和物力条件要求,该研究只对夏尔希里地区表层土壤的空间异质性以及影响山地森林区表层土壤养分的环境因子和与同类山地森林区表层土壤养分对比进行了分析,未对夏尔希里地区表层土壤养分做出系统评价。如何很好地阐释在夏尔希里地区不同的地貌类型下采取何种方式对表层土壤养分的保护及合理利用,有待进一步研究。

#### 4 结论

(1) 夏尔希里地区表层土壤养分 OM、AP、AK 含量变化幅度不同,变异程度均为中等变异。

(2) OM、AK 的空间变异函数值的最佳拟合模型为球状模型,AP 的最佳拟合模型为指数模型,三者的决定系数均很高;OM、AP 表现为强烈的空间自相关,AK 为中等空间自相关。

(3) 表层土壤 OM 含量在空间上表现为现山地森林区>绿洲区>荒漠区;AP、AK 含量在空间上均表现为绿洲区>山地森林区>荒漠区。

(4) 山地森林区表层土壤养分分布主要受海拔、坡度、坡面曲率等因子影响。

#### 参考文献

- [1] 王精明. 基于 GIS 的地统计学方法在土壤科学中的应用[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 404-408.
- [2] 高艳霞, 徐东瑞. 石家庄市边缘带土壤养分空间分布特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1063-1068.

(上接第 74 页)

#### 参考文献

- [1] 辛芸娜, 范树印, 孔祥斌, 等. 四重质量维度下的县域耕地质量评价方法研究[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 737-747.
- [2] 王洪波, 程锋, 张中帆, 等. 中国耕地等别分异特性及其对耕地保护的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 1-8.
- [3] 马瑞明, 马仁会, 韩冬梅, 等. 基于多层次指标的省域耕地质量评价体系构建[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 249-257.
- [4] 张超, 乔敏, 郎文聚, 等. 耕地数量、质量、生态三位一体综合监管体系研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 1-6.

- [3] 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[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3163-3168.
- [4] 邵方丽, 余新晓, 杨志坚, 等. 北京山区典型森林土壤的养分空间变异与环境因子的关系[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 581-591.
- [5] FISHER R F, BINKLET D. Ecology and management of forest soils[M]. 3rd Edition. New York: John Wiley and Sons, 2000: 282-284.
- [6] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 93-101.
- [7] 岳跃民, 王克林, 张伟, 等. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤-环境关系研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1400-1405.
- [8] 李艳, 史舟, 徐建明, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178-182.
- [9] ELBASIOUNY H, ABOWALY M, ABU-ALKHEIR A, et al. Spatial variation of soil carbon and nitrogen pools by using ordinary Kriging method in an area of north Nile Delta, Egypt[J]. Catena, 2014, 113: 70-78.
- [10] GLENDELL M, GRANGER S J, BOL R, et al. Quantifying the spatial variability of soil physical and chemical properties in relation to mitigation of diffuse water pollution[J]. Geoderma, 2014, 214/215: 25-41.
- [11] ROGER A, LIBOHOVA Z, ROSSIER N, et al. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton Switzerland[J]. Geoderma, 2014, 217/218: 26-36.
- [12] YE H C, SHEN C Y, HUANG Y F, et al. Spatial variability of available soil microelements in an ecological functional zone of Beijing[J]. Environmental monitoring and assessment, 2015, 187: 1-2.
- [13] DAI F Q, ZHOU Q G, LÜ Z Q, et al. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau[J]. Ecological indicators, 2014, 45: 184-194.
- [14] 王勇辉, 钟巧, 焦黎. 夏尔希里地区土壤重金属特征及空间变异分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1043-1050.
- [15] 王勇辉, 王瑞霞, 焦黎. 夏尔希里地区土壤盐分特征分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 138-145.
- [16] 王勇辉, 焦黎. 中国夏尔希里土壤环境背景值特征及评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 754-761.
- [17] 罗晓琴, 陈蜀江, 阿布都艾力·喀尤木, 等. 新疆夏尔希里地表水资源调查[J]. 科技创新导报, 2012(2): 130-131.
- [18] 海鹰, 姚建保, 兵布加甫, 等. 新疆夏尔希里自然保护区植物区系研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 98-103.
- [19] 陈蜀江, 海鹰, 金海龙, 等. 新疆夏尔西里自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006: 1-25.
- [20] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征: 变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 555-564.
- [21] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地土壤物理性质的时空分异及成因[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2249-2256.
- [22] 赵维俊, 刘贤德, 徐丽恒, 等. 祁连山青海云杉林动态监测样地土壤 pH 和养分的空间异质性[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1179-1189.
- [23] 王岩, 陈永金, 刘加珍. 黄河三角洲湿地土壤养分空间分布特征[J]. 人民黄河, 2013, 35(2): 72-74.
- [24] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区撂荒农耕地土壤有效态微量元素演变特征[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3809-3817.
- [25] 罗新宁, 朱友娟, 张宏勇, 等. 塔里木绿洲种植制度对棉田土壤养分性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 114-118.
- [26] 王华, 陈莉, 宋敏, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林土壤磷钾养分空间异质性[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8285-8293.

- [5] 宇振荣, 郎文聚. “山水林田湖”共治共管“三位一体”同护同建[J]. 中国土地, 2017(7): 8-11.
- [6] 程锋, 王洪波, 郎文聚. 中国耕地质量等级调查与评定[J]. 中国土地科学, 2014, 28(2): 75-82.
- [7] 郎文聚, 程锋. 农用地分等定级的四个应用[J]. 中国土地, 2005(1): 44.
- [8] 鲁明星, 贺立源, 吴礼树. 我国耕地地力评价研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 866-871.
- [9] 王瑞燕, 赵庚星, 李涛, 等. GIS 支持下的耕地地力等级评价[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 307-310.
- [10] 马建辉, 吴克宁, 赵华甫, 等. 我国耕地质量监测指标体系的构建[J]. 广东农业科学, 2012(21): 74-78.