

新疆察布查尔县农耕层土壤养分空间特征及其与地形因子的关系

徐莉^{1,2,3,4}, 闫俊杰¹, 陈晨¹, 崔东¹

(1. 伊犁师范学院 生物与地理科学学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 研究土壤养分的空间变异程度、分布规律以及其与地形因子间的相关关系, 为干旱区绿洲农业的施肥区划、土壤资源的可持续利用及精准农业的推广等提供理论依据。[方法] 以新疆伊犁河谷典型绿洲区察布查尔县为研究区, 应用 GIS 技术与地统计学相结合的方法, 研究伊犁河谷典型绿洲区农耕层土壤养分的空间分布特征及变异规律, 并进一步应用典范对应分析(CCA)技术, 对土壤养分空间变异与地形因子的关系进行分析。[结果] ①有机质、碱解氮、速效钾含量的变异系数介于 24.22%~46.76%, 属于中等变异, 而速效磷的变异系数为 107.51%, 属于强变异; 区域内存在中等和较强程度的空间自相关性, 且速效钾的空间自相关性稍强, 碱解氮的空间自相关性稍弱; ②土壤养分在空间分布上多呈斑块状。有机质在东部相对含量较低; 碱解氮中部含量相对较低且在东西方向上变异较强烈; 速效磷在东北和西南方向上相对较低; 速效钾在中部偏北和东南方向上相对较低且在东部变异较强烈。③碱解氮与高程和地形起伏度呈极显著正相关($p < 0.01$), 有机质与坡度、地形起伏度呈显著负相关($p < 0.05$), 速效钾与平面曲率、剖面曲率呈正相关关系。④高程、坡度、地形起伏度、剖面曲率是影响该区域土壤养分空间分布的主要地形因子。[结论] 在今后的农业施肥过程中, 适当增加东部有机肥的投入, 应适当增加中部氮素的输入, 应适当增加东北方向上磷钾元素的注入。

关键词: 土壤养分; 地统计学; 空间变异; 地形因子; 绿洲农业

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)04-0038-08

中图分类号: S153.61

文献参数: 徐莉, 闫俊杰, 陈晨, 等. 新疆察布查尔县农耕层土壤养分空间特征及其与地形因子的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 38-45. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.007. Xu Li, Yan Junjie, Chen Chen, et al. Relationship between terrain factors and spatial distribution characteristics of soil nutrients in plow layer soil of Chabuchar County, Xinjiang Wei Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 38-45.

Relationship Between Terrain Factors and Spatial Distribution Characteristics of Soil Nutrients in Plow Layer Soil of Chabuchar County, Xinjiang Wei Autonomous Region

XU Li^{1,2,3,4}, YAN Junjie¹, CHEN Chen¹, CUI Dong¹

(1. College of Biological and Geographical Sciences, Yili Normal University, Yining,

Xinjiang 835000, China; 2. College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University,

Urumqi, Xinjiang 830046, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of

Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Studying the spatial distribution characteristics of soil nutrients and analyzing its relationship with topographical factors in order to provide theoretical bases for fertilizer regionalization of oasis agriculture in arid areas, and for sustainable utilization of soil resources and promotion of precision agriculture. [Methods] Chabchar County, Xinjiang Wei Autonomous Region in Ili river valley's typical oasis was taken as a study region, and GIS and Geo-statistics were used to analyze the characteristics of soil nutrients' spatial distribution and its variation of plow layer soil in Ili River Valley's typical oasis. The

收稿日期: 2018-01-24

修回日期: 2018-02-24

资助项目: 新疆维吾尔自治区教育厅高校科研计划青年教师科研培育基金项目“磁化水滴灌盐渍化农田抑盐效果研究”(自然科学类)(XJEDU2016S078)

第一作者: 徐莉(1986—), 女(汉族), 新疆自治区博乐市人, 博士研究生, 讲师, 主要从事干旱区气候与环境方面的研究。E-mail: xuli1986317@126.com.

relationships between soil nutrients and topographical factors were analyzed using CCA ordination (canonical correspondence analysis). [Results] ① The coefficients of variation of soil organic matter, available nitrogen and available potassium ranged from 24.22% to 46.76%, belonging to moderate level of variation. The coefficient of variation of soil available phosphorus content was 107.51%, which showed a strong variation. Geo-statistical analysis suggested that there were moderate and strong spatial auto-correlation among soil nutrient items. Spatial correlation of available potassium was stronger than that of available nitrogen. ② Spatially, soil nutrient were distributed in patchy pattern. Soil organic matter of the west was higher than that of the east. Available nitrogen of the central region was lower and the variation of available nitrogen was severe in east and west regions. Available phosphorus of the northeast and the southwest were lower. Available potassium of the north-central and the southeast were lower and the variation of available potassium was severe in the east. ③ Available nitrogen was extremely positively correlated with elevation and roughness of the terrain ($p < 0.01$), while soil organic matter was significantly and negatively correlated with the slope and the roughness of the terrain ($p < 0.05$). Available potassium was positively correlated with the horizontal curvature and the profile curvature. ④ Elevation, slope, roughness of the terrain and profile curvature were the major topographical factors that affect the soil nutrients' spatial distribution in this area. [Conclusion] The organic fertilizer should be properly increased in the east, the nitrogen fertilizer should be increased appropriately in the central, phosphate and the potash fertilizer should be properly increased in northeast of the region.

Keywords: soil nutrient; Geo-statistics; spatial variability; terrain factors; oasis agriculture

土壤养分含量是表征土壤肥力的重要指标,尤其对于旱区绿洲农业来说,土壤肥力状况更是关乎绿洲农业可持续发展的关键因素。土壤养分的空间变异状态在一定程度上反映了土壤耕作层内土壤养分的丰缺程度和状态,掌握其变异性与分布规律对提高农业土肥利用效率、土壤分区管理及保持土壤肥力等具有重要意义^[1-2]。

近年来,土壤养分空间变异研究不断取得进展,多数研究表明土壤养分空间变异受自然因素(气候、母质、土壤类型、地形等)和人为因素(施肥、耕作措施、种植结构等)共同控制,且研究涵盖了平原^[3]、丘陵^[4]、山地^[5]、灌区^[6]、旱地^[7]等多种用地类型。Mzuku 等^[8]认为农田土壤养分空间分布特征研究有利于划分特定的农田小区进行施肥管理;Antwi 等^[9]采用地理空间分析法绘制了加纳北部 16 个地区 120 个玉米农场的土壤养分分布图,据此探究了其土壤 N、P、K 含量的分布特征,表明土壤养分空间分布格局对特定地点的施肥量具有一定的指引作用;张兆永等^[10]研究了新疆艾比湖流域小尺度农田土壤养分的空间分布及影响因素,认为土壤养分含量的空间异质性是影响区域农业生产的重要因素。在气候、母质等条件较为一致的区域,地形是间接引起土壤中物质、能量的再分配的重要条件,不同地形条件对土壤养分空间变异的影响作用会存在明显差异^[11-12]。因此,不少学者探究了土壤养分空间变异与地形因子之间的相关关系。陈桂香等^[13]分析了福州市农田土壤养分的空间分布特征及与地形因子的相关关系,表明有机

质、碱解氮与地形起伏度、高程、坡度等呈显著正相关,而有效磷和速效钾呈显著负相关;邓欧平等^[14]研究了川中紫色丘区地形因子与土壤养分空间分异的相关关系,表明坡向、坡度及坡位对土壤养分分布有强烈影响;朱洪芬等^[15]探究了黄土高原盆地土壤有机质与高程、坡度、地形湿度指数等地形因子间的相关关系,表明坡度、地形湿度指数与土壤有机质关系较为显著。

在西北干旱、半干旱地区,绿洲是其社会经济的核心区域,而农业是其经济发展的基础和主体,因此,绿洲农业的可持续发展对区域经济的稳定发展具有重要意义。伊犁河谷地势东高西低,东窄西宽,三面环山,地形复杂,是中国西部干旱区水热条件最佳的区域,是新疆最重要的粮食主产基地,地形因素常常是制约其农业发展的主要限制性因素,因此,研究伊犁河谷典型绿洲区农耕层土壤养分空间变异特征及与地形因子的相关关系对维持绿洲农业生产、养分管理及区域稳定等具有重要意义。而且,目前关于土壤养分与地形因子的相关关系研究多集中在东部、中部地区,而针对西北干旱、半干旱地区的研究相对较少。

基于此,本研究以伊犁河谷典型绿洲区察布查尔县为研究靶区,应用 GIS 和地统计学相结合的方法,研究了土壤养分的空间变异程度、分布规律以及与地形因子间的相关关系,以期为干旱区绿洲农业的施肥区划、土壤资源的可持续利用及精准农业的推广等提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概 况

研究区位于新疆伊犁河南岸典型绿洲区,地理位置为 $43^{\circ}17' - 43^{\circ}57'N$, $80^{\circ}31' - 81^{\circ}43'E$ 。该区域属于典型的大陆性北温带温和干旱气候,热量丰富,光照充足,四季分明,年均气温 $5.0 \sim 8.4^{\circ}C$,年降水量南部中低山区为 $300 \sim 400$ mm,北部平原为 $150 \sim 250$ mm,年蒸发量为 $1\,400 \sim 2\,200$ mm。地势自南向北形成多级阶梯,东窄西宽,南高北低;地形分为南部山区、山麓、丘陵、中部倾斜平原、北部河流阶地和河漫滩等五个地貌类型;有伊犁河、察布查尔河等水系;主要发育的土壤类型是灰钙土;土壤质地多以黏土和壤土为主,约占总面积的 89.2% [16]。主要农作物有玉米、小麦、水稻、油料作物、棉花、甜菜、蔬菜,是新疆典型的优质粮、棉、油及特色农业基地。

1.2 样品采集

2015 年 10 月,在伊犁河南岸察布查尔锡伯自治县(简称察县)境内,对其 2 个镇(爱新舍里镇、察布查尔镇)、12 个乡(琼博乐乡、加格斯台乡、海努克乡、纳达齐牛录乡、扎库齐牛录乡、孙扎齐牛录乡、绰霍尔乡、堆依齐牛录乡、阔洪齐乡、米粮泉乡、坎乡及良繁场)进行了野外实地调查。样点的布设采用随机采样方式,共设置了 104 个取样点。样点设置时,因考虑了地形地貌、土壤类型、肥力高低、作物种类等因素和空间分布的均匀性,因此,选择在每个乡镇平均取 4~5 个代表性条田。用 GPS 定位并记录每个采样点的海拔和经纬度。采样间距约为 $1 \sim 2$ km,采样深度为 $0 \sim 20$ cm,同一田块按 S 形线路采样,每块田取 5 点,并将各点的土样进行混合,四分法保留土样干重 1 kg 左右。之后,将取好的土样装入样品袋,并进行统一编号用于室内指标测定。所有土壤样品是在均一的气候条件下采集的。

1.3 测定方法

土壤样品带回实验室,在实验室内去除杂质,自然风干,磨碎后过 2 mm 孔筛,并放置在阴凉干燥处贮存备用。土壤养分测定参照《土壤农化分析(第 3 版)》[17]。土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,上机仪器是 UV-2550 型紫外分光光度计;土壤速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度计法测定。

地形因子主要包括高程(elevation, Ele)、坡度(slope, Slo)、坡向(aspect, Asp)、平面曲率(horizontal curvature, Hc)、剖面曲率(profile curvature,

Pc)、地形起伏度(Roughness of terrain, Qfd),由 30 m 分辨率的 DEM 数据在 ArcGIS 10.2 空间分析模块提取出来 [18]。其中,高程由 ArcGIS 10.2 中的 Spatial Analysis Tools 提取出来,坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率及地形起伏度等由 3D Analysis 计算工具实现。坡度、坡向通过 reclassify 命令分为平缓坡 (-1),阴坡 ($0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, $315^{\circ} \sim 360^{\circ}$),半阳坡 ($45^{\circ} \sim 135^{\circ}$),阳坡 ($135^{\circ} \sim 275^{\circ}$),半阴坡 ($275^{\circ} \sim 315^{\circ}$);高程介于 $575 \sim 2\,400$ m,平均约为 843 m。

1.4 数据分析处理

所有试验数据使用 Excel 2010 整理后,分析土壤养分的均值、最大值、最小值、标准差和变异系数 (C_v) 等统计性特征,并使用方差分析的 F 值进行显著性检验。为了消除比例效应,土壤变量在半方差计算时要求数据必须符合正态分布,因此,对所有数据通过 K-S 法进行正态检验 ($p < 0.05$),并将不服从正态分布的数据经对数转化后呈正态分布,变异函数计算采用的数据均为对数转化后的数据 [19-20]。变异系数 (C_v) 是描述土壤特性参数空间变异性程度的指标,依据 Nielsen 分级标准 [21],当 $C_v \leq 10\%$ 时为弱变异性,当 $10\% \leq C_v \leq 100\%$ 时为中等变异性,当 $C_v \geq 100\%$ 时为强变异性。采用地统计学方法对土壤养分的空间变异程度进行分析。半方差函数是地统计学的基本工具,是研究土壤变异性的关键函数,包括块金值 (C_0)、基台值 ($C_0 + C_1$)、块基比 $C_0 / (C_0 + C_1)$ 及变程 (A_0) 等重要参数,可用于揭示土壤性质的空间相关性程度 [4],其估算公式为

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

式中: $\gamma(h)$ ——半方差函数; h ——分隔 2 样点的矢量,称为步长; $N(h)$ ——被向量 h 间隔的试验数据点对的数目。 $Z(\chi_i)$ 和 $Z(\chi_i + h)$ ——区域变量 $Z(\chi)$ 在位置 χ_i 的数值和在距离 $\chi_i + h$ 处的数值。Kriging 插值法是利用区域化变量的原始数据和半方差函数的结构特点,对未采样地的区域化变量的取值进行无偏最优估值的一种方法 [19],且广泛的应用于土壤养分的空间变异性研究 [3-7]。因此,土壤养分的空间分布格局采用 Kriging 插值法。

使用 SPSS 17.0 对土壤养分的统计性特征以及土壤养分与地形因子的相关性进行分析,借助 GS+ 9.0 进行土壤养分元素的 Kriging 插值和半方差函数模型的计算,运用 ArcGIS 10.2 软件中 Geostatistical Analyst 模块进行 Kriging 插值分析,得到土壤养分的空间分布图,并采用交叉检验方法对插值结果进行评估,借助 CANOCO 5.0 软件运用典范对应分析

(CCA)技术进一步探究土壤养分空间变异与地形因子间的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量的统计特征

对土壤养分含量进行统计分析(表1)。研究区土壤中有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的平均含量分别为2.15%, 134.04 mg/kg, 13.26 mg/kg, 291.79 mg/kg, 其中,速效磷和速效钾的变化范围较大。从变异系数来看,有机质、碱解氮及速效钾的变

异系数分别为24.22%, 39.27%和46.76%,均表现为中等变异性,其中有机质的变异系数相对较小;速效磷的变异系数为107.51% > 100%,表现为强变异性。从分布类型来看,有机质、碱解氮和速效钾变化服从于正态分布,速效磷变化服从于自然对数正态分布。通过对土壤养分含量的方差分析,表明4种土壤养分含量具有显著差异,且方差分析的 F 检验值大小依次为:速效磷 > 速效钾 > 碱解氮 > 有机质,其中,速效磷变异最大,有机质变异最小,这与变异系数的规律一致。

表1 土壤养分的基本统计值

土壤养分	均值	最大值	最小值	标准差	变异系数(C_v)/%	分布类型	F
有机质/%	2.15	3.33	0.90	0.52	24.22	N	6.614*
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	134.04	333.33	45.74	52.63	39.27	N	7.072*
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	13.26	65.39	1.44	14.26	107.51	n	36.224*
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	291.79	654.90	49.39	136.45	46.76	N	10.155*

注:*表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关; N 表示服从正态分布; n 表示服从自然对数正态分布。

2.2 土壤养分的空间变异结构特征

根据半方差函数理论及计算模型,得出土壤养分含量的半方差变异函数拟合模型及参数(表2,图1)。研究区土壤中有机质和速效磷最优拟合的模型为指数模型,碱解氮为高斯模型,速效钾为球状模型。块金值(C_0)表示由随机性因素引起的变异,即由试验误差或小于试验取样尺度所引起的变异^[16]。有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的 C_0 分别为0.098, 0.065, 0.016 3和0.054 7,说明在采样尺度范围内存在采样的误差、短距离的变异、施肥耕作措施及种植制度等随机性因素引起的变异^[4,22]。块基比 $C_0/(C_0+C_1)$ 用来表明土壤性质空间相关性的程度。当 $C_0/(C_0+C_1) < 25%$,表现为强烈的空间相关性,其变异性主要受结构因素影响;25% < $C_0/(C_0+C_1) < 75%$ 时,表现为具有中等的空间相关性,受结构和随机因素的共同影响; $C_0/(C_0+C_1) > 75%$,说明其空间相关性很弱,受随机性因素影响较大;若比值接近于1,说明在整个尺度上具有恒定的变异^[16]。由此可知,有机质、碱解

氮和速效磷表现为中等强度的自相关性,其块基比分别为27.92%, 36.51%和27.35%,表明农田土壤中有机质、碱解氮和速效磷的空间变异是由结构因素(气候、母质、地形或土壤类型等)和随机因素(耕作方式、施肥或灌溉等)共同作用^[4]。速效钾的块基比为18.09% < 25%,在区域内表现为较强的空间自相关性,表明速效钾的空间分布受气候、成土母质、地形及土壤类型等结构性因素引起的空间变异为主^[5]。这主要与地形起伏度、坡度及高程等相关,在地形起伏度变化较大的地方,钾元素极易流失^[13]。因此,虽然经过长期的农业栽培管理,速效钾在空间分布上仍受结构性因素影响较大。变程 A_0 是为研究区域提供了某种属性相似范围的一种尺度,可以用来表明土壤特性的空间自相关范围的大小^[7]。研究区土壤养分变异程度相差较大,从大到小依次为:速效钾 > 速效磷 > 碱解氮 > 有机质,其中,速效钾变程距离最大为16 360 m,有机质最小为410 m,说明其影响因素会在不同尺度上起作用^[13]。

表2 土壤养分含量空间变异的半方差参数

土壤养分	理论模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C_1)	块基比 $C_0/(C_0+C_1)$	变程 A_0 (m)	决定系数 R^2	残差
有机质/%	Exponential	0.098 0	0.351 0	0.279 2	410	0.005	0.101
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	Gaussian	0.065 0	0.178 0	0.365 1	1 220	0.104	0.061
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	Exponential	0.016 3	0.059 6	0.273 5	1 630	0.042	8.947×10 ⁻³
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	Spherical	0.054 7	0.302 4	0.180 9	16 360	0.401	0.115

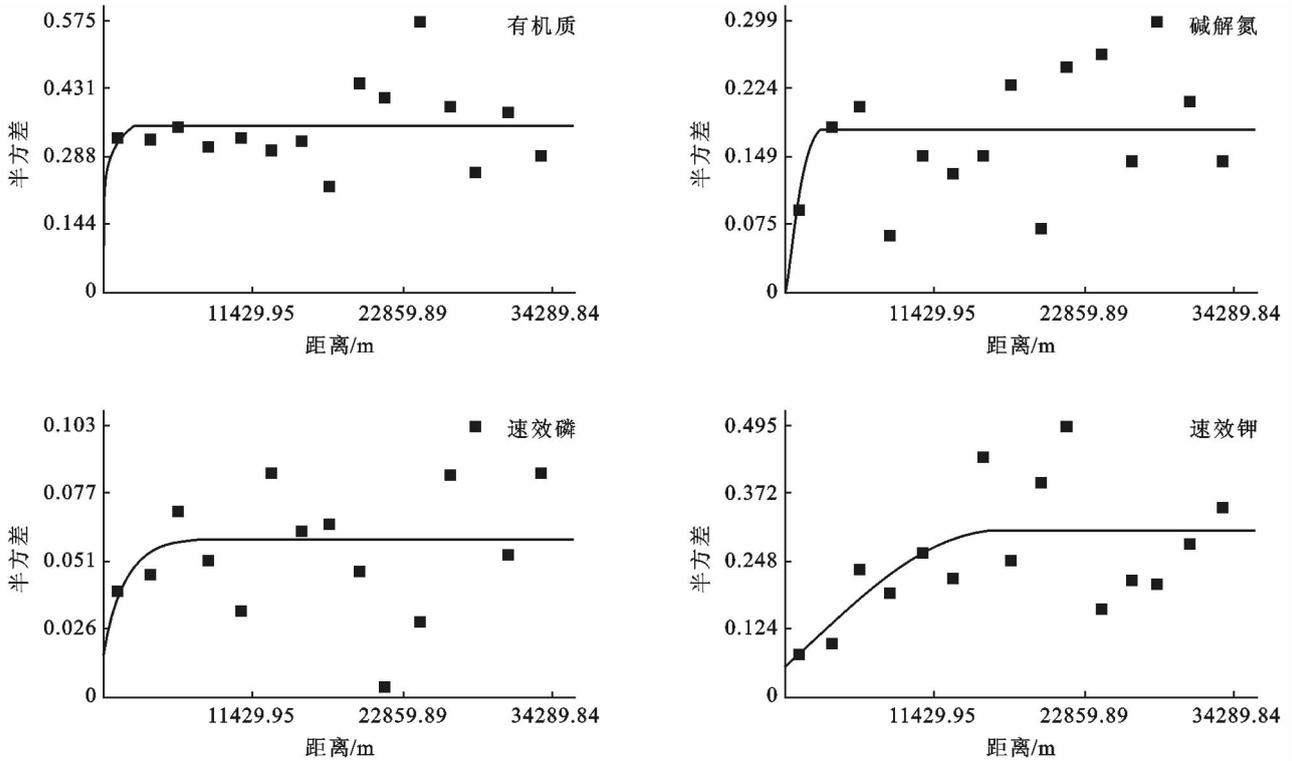


图 1 土壤养分的半方差函数

2.3 土壤养分的空间格局

基于符合正态分布的各土壤养分含量数据,选择上述最优半方差函数理论模型及相关参数运用 Kriging 插值法绘制出土壤养分含量的空间分布图(图 2),并采用交叉检验方法进行评估(表 3)。由表 3 可知,土壤养分的 ME 和 MSE 均接近于 0, RMSE 和 ASE 值之间较为接近, RMSSE 在 0.955 0~1.064 6 之间,接近于 1,可知土壤养分指标的插值精度较高,理论模型能较好其空间结构。由图 2 可知,土壤养分含量在空间分布上多呈出斑块状格局。式中:有机质在研究区中部略偏东地区出现了一个小面积斑块状

的聚集区,主要在海努克乡和纳达齐牛录乡等区域,总体表现为东部相对较低,中西部相对较高;碱解氮在中部偏北地区相对较低,主要在孙扎齐牛录乡和绰霍尔乡等区域,总体表现出中部相对较低,且自西向东呈现先减少再增加;速效磷在中部偏北相对较高,主要在孙扎齐牛录乡和堆依齐牛录乡等区域,总体表现为东北和西南方向上相对较低,中部偏北相对较高;速效钾在东北、西南地区均出现一个连续的高值中心,主要在海努克乡、扎库齐牛录乡、爱新舍里镇、纳达齐牛录乡等区域,总体表现为中部偏北和东南方向较小范围内较低,西部较大范围和东北方向上相对较高。

表 3 交叉检验结果

土壤养分	平均误差 ME	均方根误 RMSE	平均标准误 ASE	标准化平均 误差 MSE	标准化均方根 误差 RMSE
有机质/%	0.003 8	0.441 7	0.429 6	0.014 5	1.013 2
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	-0.141 1	0.631 6	0.642 3	-0.005 2	0.955 0
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	0.306 1	9.791 4	10.435 1	0.001 2	1.016 3
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	-0.479 9	0.759 5	0.196 4	-0.008 1	1.064 6

2.4 土壤养分与地形因子的相关关系

如表 4 所示,土壤有机质与碱解氮呈极显著正相关关系($p < 0.01$),与速效钾呈显著正相关关系($p < 0.05$),速效钾与速效磷呈极显著负相关关系($p <$

0.01);土壤有机质与高程、坡度、坡向、剖面曲率、地形起伏度呈负相关关系。

其中,与坡度、地形起伏度呈显著负相关关系($p < 0.05$);碱解氮与高程、坡向、平面曲率、剖面曲率、

地形起伏度呈正相关关系,其中,与高程、地形起伏度呈极显著正相关关系($p < 0.01$);速效磷与坡度、地形起伏度呈正相关关系,与平面曲率、剖面曲率呈负相

关系;速效钾与坡度、地形起伏度呈负相关关系。综上所述,地形因子对土壤养分含量的分布具有一定的影响。

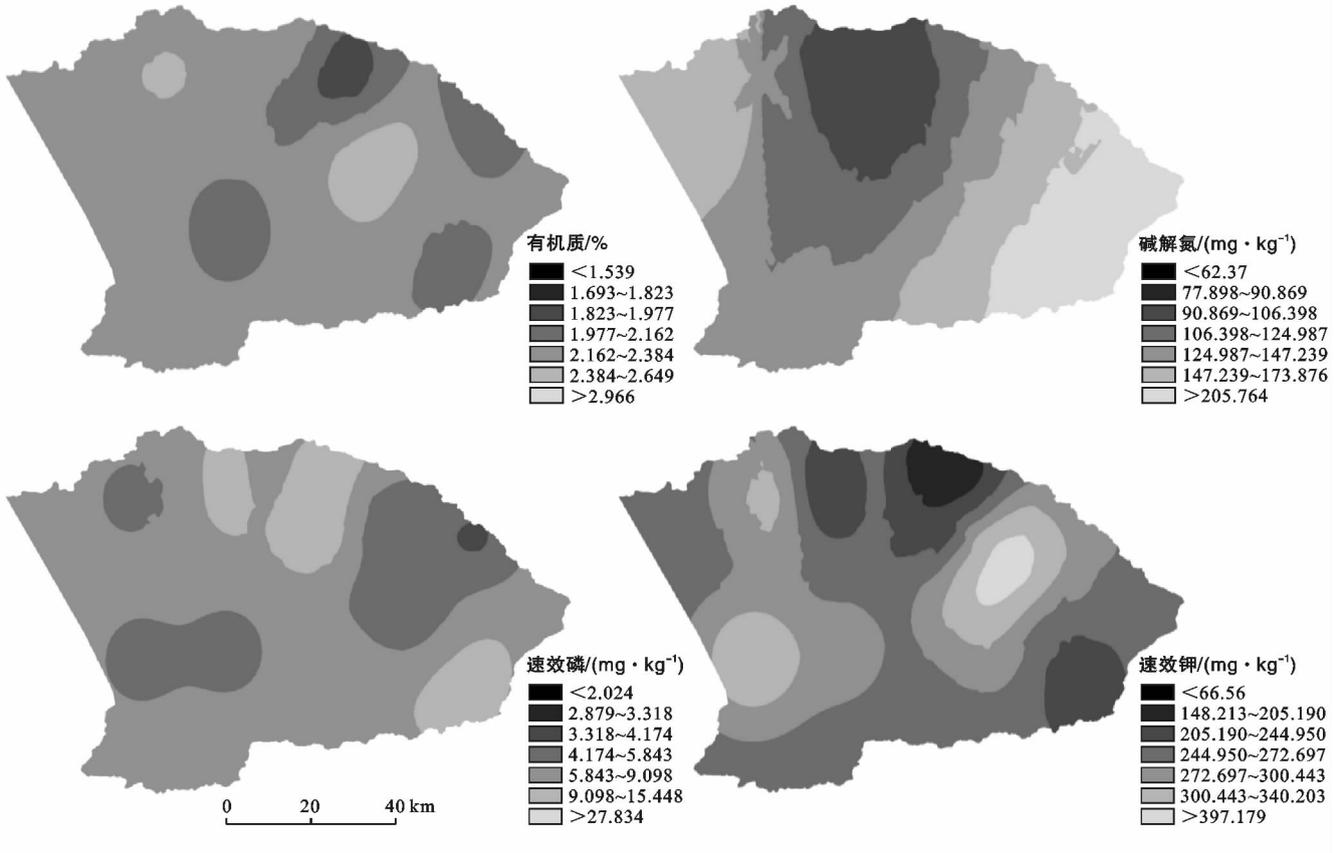


图 2 研究区土壤养分的空间分布

表 4 土壤养分与地形因子相关性分析

项目	有机质	碱解氮	速效磷	速效钾	高程	坡度	坡向	平面曲率	剖面曲率	地形起伏度
有机质	1									
碱解氮	0.796**	1								
速效磷	-0.245	-0.163	1							
速效钾	0.368*	0.225	-0.429**	1						
高程	-0.047	0.447**	-0.046	0.047	1					
坡度	-0.332*	-0.135	0.225	-0.295	-0.017	1				
坡向	-0.081	0.084	0.015	0.007	-0.082	0.159	1			
平面曲率	0.255	0.050	-0.137	0.187	0.157	-0.02	-0.261	1		
剖面曲率	-0.047	0.269	-0.214	0.257	0.063	-0.341*	-0.016	-0.095	1	
地形起伏度	-0.101*	0.444**	0.087	-0.133	0.839**	0.075	0.149	0.215	-0.076	1

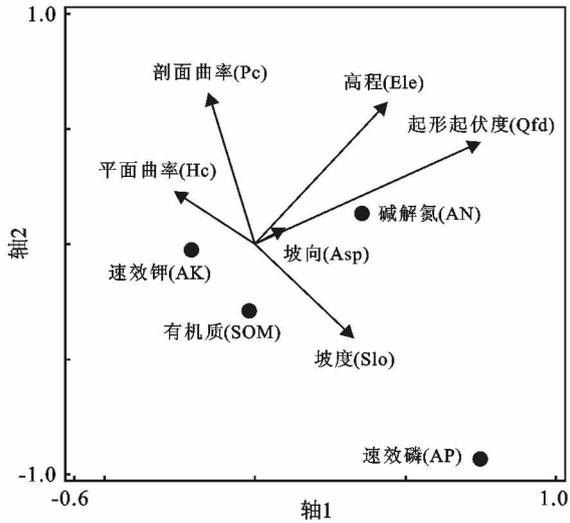
注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

2.5 土壤养分与地形因子的 CCA 分析

为了进一步了解地形因子对土壤养分空间变异程度的影响,采用 CCA 二维排序(图 3)对其进行分析。排序图中矢量箭头代表各地形因子,箭头连线长度代表土壤养分空间变异与某个地形因子之间的相关程度的大小,连线越长,相关性越大,反之越小。箭

头连线和排序轴的夹角代表着某个地形因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越大^[23]。从第 1, 2 排序轴平面上可以看出,坡向(Asp)、地形起伏度(Qfd)、高程(El)及剖面曲率(Pc)等对土壤养分空间变异影响较大,相关性较大,坡度(Slo)对土壤养分空间变异影响相对较小,相关性较小;有机质(SOM)、碱

解氮(AN)及速效钾(AK)距离质心较近,速效磷(AP)相对距离较远,表明地形因子对土壤养分变异具有一定的制约性。其中,速效钾距离质心最近,表明其空间变异会受多个地形因素的共同影响,碱解氮主要受地形起伏度影响较为显著。由此可以看出,高程、坡度、地形起伏度、剖面曲率等地形因子是影响土壤养分空间变异的主要因素。



注:有机质(SOM),碱解氮(AN),速效磷(AP),速效钾(AK);高程(Ele),坡度(Slo),坡向(Asp),平面曲率(Hc),剖面曲率(Pc),地形起伏度(Qfd)。

图 3 土壤养分与地形因子的 CCA 排序

3 讨论与结论

(1) 研究区土壤中有机质含量相对较低,碱解氮、速效磷和速效钾含量相对较高。不同土壤类型其养分含量变化的影响因素存在显著性差异^[3,7]。灰钙土是新疆伊犁河流域重要的土壤资源,是伊犁河谷典型地带性土壤,这种土壤类型的原始肥力相对较低,易受地形和耕作方式的影响,多数地区的有效土层薄,因而,有机质含量相对较低。而土壤中碱解氮、速效磷和速效钾平均含量相对较高,通过实地调查得知,与近年来该区大力推广实施“2+x”田间肥料试验(包括常规施肥、优化施肥和小区施肥等多种方式)有关,因而,在一定范围内提高了速效养分含量。此外,有机质、碱解氮和速效钾属于中等变异,而速效磷属于强变异,说明速效磷较其他养分元素变异程度较大。

(2) 地统计分析表明,有机质、碱解氮和速效磷含量的空间变异受地形、成土母质及土壤类型等结构性因素以及农业生产中施肥和灌溉方式等随机性因素的共同作用;而速效钾含量的空间分布主要受气

候、成土母质、地形及土壤类型等结构性因素影响。从空间分布来看,土壤养分含量在空间分布上多呈现出斑块状格局。有机质在东部相对含量较低;碱解氮中部含量相对较低,且在东西方向上变异较强烈;速效磷在东北和西南方向上相对较低;速效钾在中部偏北和东南方向上相对较低,且在东部变异较强烈。因此,在今后的农业施肥过程中,可以适当增加东部有机肥的投入,在中部适当增加氮素的输入,在东北方向上适当增加磷钾元素的注入。

(3) 伊犁河谷典型绿洲区察布查尔县农业发展虽具有优越的光热水土资源条件,但由于地形复杂,存在较为显著的区域差异。从土壤养分地形因子的相关分析可以看出,土壤碱解氮与高程和地形起伏度呈极显著正相关,表明其空间变异受高程和地形起伏度影响较为显著。前人研究表明,当海拔增加时,碱解氮更易于积累,因而其含量相对会较高^[13,24];有机质与坡度、地形起伏度呈显著负相关,其中,与坡度的相关系数较大,表明随着坡度的增加会造成有机质的流失,因而,在坡度较大区域,有机质含量相对较低,这与傅涛等^[25]人的研究结果较为一致;速效钾与平面曲率、剖面曲率呈正相关关系,且距质心最近,说明其空间变异受地形因子影响较为显著,在弯曲度形成的凹形地形会利于钾元素的积累^[17]。因此,可以得出高程、坡度、地形起伏度、剖面曲率等是影响该区土壤养分空间变异的主要地形因子。此外,人为长期重视大量施用氮磷钾肥^[26],轻有机肥的施用,部分地区大水漫灌现象突出,使得土壤养分在空间分布上呈现出明显的差异。综上所述,影响该区土壤养分空间变异是地形、土壤类型、施肥及灌溉方式等共同作用而引起的。

综上所述,本文仅初步分析了察布查尔县农耕层土壤养分空间变异特征及其与地形因子的相关关系,对于如何改进和调整区域施肥的合理比例、施肥小区的划定以及土肥合理利用的有效途径等还有待于进一步研究。此外,不同尺度下土壤养分空间变异与地形因子间的相关关系亦不相同,本研究的研究区域较小,仅从小尺度区域上分析了土壤养分空间变异与地形因子之间的相关性,未来还需对大尺度区域内土壤养分空间变异与地形因子的相关关系进行更深地研究和思考。

[参 考 文 献]

- [1] Haefele S M, Wopereis M C S. Spatial variability of indigenous supplies for N,P and K and its impact on fertilizer strategies for irrigated rice in West Africa[J]. Plant and Soil, 2005,270(1):57-72.

- [2] 张婵婵,张瑞芳,张建恒,等.高阳县农田土壤速效养分空间变异特征研究[J].中国生态农业学报,2013,21(6):758-764.
- [3] 赵明松,李德成,张文凯,等.淮北平原农田土壤养分空间变异特征:以安徽省蒙城县为例[J].土壤通报,2016,47(3):611-617.
- [4] 赵明松,李德成,张甘霖,等.江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征:以安徽省定远县为例[J].土壤,2016,48(4):762-768.
- [5] 楚万林,齐雁冰,常庆瑞,等.秦巴山地县域土壤碱解氮空间变异与合理采样数的确定[J].水土保持通报,2015,35(2):141-146.
- [6] 王幼奇,白一茹,展秀丽.在不同尺度下宁夏引黄灌区农田土壤养分空间变异分析[J].干旱区研究,2014,31(2):209-215.
- [7] 刘祖香,陈效民,靖彦,等.基于地统计学的农田尺度旱地红壤养分空间变异性研究[J].土壤通报,2013,44(2):392-397.
- [8] Mzuku M, Khosla R, Reich R, et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(5):1572-1579.
- [9] Antwi M, Duker A A, Fosu M, et al. Geospatial approach to study the spatial distribution of major soil nutrients in the Northern region of Ghana[J]. Cogent Geoscience, 2016,2(1):1201906-1201918.
- [10] 张兆永,李菊英,祖皮艳木·买买提,等.艾比湖流域小尺度农田土壤养分的空间分布和盐渍化风险评价[J].生态学报,2017,37(3):819-828.
- [11] 秦松,樊燕,刘洪斌,等.地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J].水土保持研究,2008,15(1):275-279.
- [12] 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.
- [13] 陈桂香,高灯州,曾从盛,等.福州市农田土壤养分空间变异特征[J].地球信息科学学报,2017,19(2):216-224.
- [14] 邓欧平,周稀,黄萍萍,等.川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J].资源科学,2013,35(12):2434-2443.
- [15] 朱洪芬,南锋,徐占军,等.黄土高原盆地土壤有机质与影响因子的空间多尺度关系[J].生态学报,2017,37(24):1-14.
- [16] 杨玉海,陈亚宁,李卫红,等.伊犁河谷不同植被带下土壤有机碳分布[J].地理学报,2010,65(5):605-612.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 张素梅,王宗明,张柏,等.利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J].农业工程学报,2010,26(5):188-184.
- [19] 王政权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:162-192.
- [20] 徐莉,李艳红,海米提·依米提,等.艾比湖湿地不同植物群落下土壤水盐空间变异性研究[J].水土保持通报,2013,33(6):279-284.
- [21] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability[M]. Pudoc Wageningen: Handbook of Soil Science, 1985.
- [22] 杨帆,章光新,尹雄锐,等.松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与微地形关系研究[J].地理科学,2009,29(6):869-873.
- [23] 吴昊.秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J].自然资源学报,2015,30(5):858-869.
- [24] 德科加,张德罡,王伟,等.不同海拔下高寒草甸土壤养分分异趋势及其与地上植物量间的相关性研究[J].草地学报,2013,21(1):5-29.
- [25] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74.
- [26] 杨生茂,李凤民,索东让,等.长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响[J].中国农业科学,2005,38(10):2043-2052.

(上接第37页)

- [4] 柳金峰,游勇,陈兴长.震后堵溃泥石流的特征及防治对策研究:以四川省平武县唐房沟为例[J].四川大学学报,2010,42(5):68-75.
- [5] 游勇,陈兴长,柳金峰.汶川地震后四川安县甘沟堵溃泥石流及其对策[J].山地学报,2011,29(3):320-327.
- [6] 刘传正.汶川地震区文家沟泥石流成因模式分析[J].地质评论,2012,58(4):709-716.
- [7] 张健楠,马煜,张惠惠,等.四川省都江堰市大干沟地震泥石流[J].山地学报,2010,28(5):623-627.
- [8] 胡卸文,韩玫,梁敬轩,等.汶川震区桃关沟2013-07-10泥石流成灾机理[J].西南交通大学学报,2015,50(2):286-293.
- [9] 游勇,柳金峰,陈兴长.“5·12”汶川地震后北川苏保河流域泥石流危害及特征[J].山地学报,2010,28(3):358-366.
- [10] 崔鹏.中国泥石流的区域特征[M].北京:商务印书馆,2000:60-63.
- [11] 陈宁生.泥石流勘察技术[M].北京:科学出版社,2011:92-93.
- [12] 周必凡,李德基,罗德富,等.泥石流防治指南[M].北京:科学出版社,1991:80-81.