

DOI: 10.5846/stxb201601070047

赵宣, 韩霁昌, 王欢元, 张 扬, 郝起礼, 孙婴婴, 张海欧. 毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤养分空间异质性. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Zhao X, Han J C, Wang H Y, Zhang Y, Hao Q L, Sun Y Y, Zhang H O. Soil nutrientspatial heterogeneity in the Mu Us Desert-Loess Plateau Transition Zone. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤养分空间异质性

赵 宣^{1,2,3}, 韩霁昌^{1,2,3,*}, 王欢元^{1,2,3}, 张 扬^{1,2,3}, 郝起礼¹, 孙婴婴^{1,2,3}, 张海欧^{1,2,3}

1 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075

2 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075

3 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075

摘要:毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤养分的空间异质性和生态学过程,对沙荒地整治的机理研究具有重要的意义。以毛乌素沙漠-黄土过渡带为研究区,结合布点取样和室内分析,运用经典统计学和地统计学方法对其全氮、有效磷、速效钾含量的空间异质性进行分析。结果表明,(1)土壤全氮、有效磷、速效钾的平均含量分别为 0.39 g/kg、9.65 mg/kg 和 106.84 mg/kg。3 种养分的变异系数为 40.54%—84.62%,均属于中等程度变异,其中全氮变异系数最大,速效钾变异系数最小。(2)半方差分析结果显示,3 种养分空间变异性的最佳拟合模型均为高斯模型,空间自相关性均随着滞后距离的增加而呈下降趋势。3 种养分空间变异性的块金值/基台值比值在 0.09%—32.82%,全氮、有效磷具有强烈的空间相关性,结构性因素对变异起主导作用;速效钾具有中等强度的空间相关性,结构性因素和随机性因素共同对变异起主导作用。(3)克里金插值图显示 3 种养分含量均表现为随着地势的降低而逐渐升高的趋势,全氮含量整体呈斑点状分布,插值图较破碎,有效磷和速效钾含量整体呈条带状分布,连续性较好。(4)毛乌素沙漠-黄土过渡带土壤养分的空间变异性与地形、地貌、植物分布以及非自然因素都有关,但是以地形因素的影响为主。开展沙漠-黄土过渡带土壤养分空间异质性特征研究,为开展沙荒地整治工程,生态系统修复提供了理论依据。

关键词:毛乌素沙漠-黄土高原过渡带;土壤养分;空间异质性;半方差分析;克里金插值

Soil nutrientspatial heterogeneity in the Mu Us Desert-Loess Plateau Transition Zone

ZHAO Xuan^{1,2,3}, HAN Jichang^{1,2,3,*}, WANG Huanyuan^{1,2,3}, ZHANG Yang^{1,2,3}, HAO Qili¹, SUN Yingying^{1,2,3}, ZHANG Haiou^{1,2,3}

1 Shaanxi Land Construction Group Co., Ltd. Xi'an 710075, China

2 Shaanxi Land Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China

3 Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering the Ministry of Land and Resources of China, Xi'an 710075, China

Abstract: Studies on the spatial heterogeneity of soil nutrients in the Mu Us Desert-Loess Plateau Transition Zone will improve our understanding of the mechanisms driving land desertification. We investigated the spatial variability characteristics of three soil nutrients in the Mu Us Desert-Loess Plateau Transition Zone by using semivariogram analysis and the ordinary kriging method. The results indicated that the average total nitrogen (N), available phosphorus (P), and available potassium (K) contents were 0.39 g/kg, 9.65 mg/kg, and 106.84 mg/kg, respectively. Total nitrogen content had the largest variation coefficient range (40.54%—84.62%), whereas K had the smallest. The semivariogram analysis showed that the content variations for all three nutrients were the best described by a Gaussian distribution model and that the spatial

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费项目:(毛乌素沙地土地综合整治技术研究及示范应用, 201411008)

收稿日期:2016-01-07; **修订日期:**2016-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 906051333@qq.com

autocorrelations decreased as the distance increased. The (C_0/C_0+C) ratios were 0.09%—32.82% for the three soil nutrients. The N and P contents showed strong spatial autocorrelation, but the K contents only showed a modest degree of autocorrelation. The ordinary kriging method was used to estimate unmeasured points and interpolation maps were obtained. All three soil nutrient contents were more concentrated on the lower terrain. Total nitrogen had a scattered “fertile islands” distribution, whereas P and K had a banded, continuous distribution. The heterogeneity of the soil nutrients in the Mu Us Desert-Loess Plateau Transition Zone was influenced by terrain, landscape, plant distribution, and other non-natural factors, but the terrain had the highest impact. From a practical application perspective, this study provides a theoretical basis for future land engineering and ecosystem restoration programs.

Key Words: Mu Us desert-loess plateau transition zone; soil nutrients; spatial variability; semivariogram analysis; kriging interpolation;

干旱和土地荒漠化是全球面临的世纪性公害之一,改善生态环境,防治沙漠化,是西部地区开发建设的首要问题。毛乌素沙漠和黄土高原之间的沙漠-黄土过渡带地处半干旱向半湿润的过渡带,是第四纪东亚季风气候变化的敏感地带^[1],其受荒漠生态系统和黄土生态系统的双重影响,十分脆弱和敏感,也是沙漠化和土壤侵蚀问题最为突出的地区。过渡带作为沙漠和黄土高原进退消长的中间区域,过渡带的演化方向对于黄土生态系统的稳定性以及沙漠区域的进退有着重大的影响。目前对于毛乌素沙漠-黄土高原过渡带的研究主要集中在过渡带土壤物理性质区域分异特征研究,包括容重、粒度特征、表土磁化率、地层序列的磁化率特征,以及过渡带植被演替和气候变化响应的研究等,而对于过渡带土壤养分特征的研究成果较少^[2-4]。研究土地退化过程中毛乌素沙漠-黄土高原过渡带的土壤特性,不仅可以了解过渡带系统养分、盐分含量变化情况,而且可以为植被的科学管理、沙荒地整治以及生态系统恢复等提供重要的理论基础。

经典统计学和地统计学方法能够较好地揭示土壤养分变异的机理,不同研究者通过半变异函数计算、模型模拟、Kriging 插值法等从地区、研究尺度、土地利用方式、土地类型、地形因子、土地整治前后、作物种植前后、植物群落分布等方面对土壤养分的空间变异性进行了深入的研究,为生态系统修复、精准农业和合理施肥提供了理论依据^[5-12]。本文采用这种成熟的分析方法,对毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤的养分情况做初探和预测,揭示过渡带土壤的养分空间变异性,明确肥力分布状况,探讨其影响因素,为生态系统修复提供理论依据。

1 研究区域

研究区地处毛乌素沙漠与黄土丘陵区过渡地带,地势平缓开阔,地貌以低缓梁岗和波状平原为主。气候干旱,多年平均气温 7.9℃,月均最低气温 -8℃。月均最高气温 22.3℃,多年平均降水量 316.9 mm,多年平均蒸发量为 2490.2 mm,为降水量的 7.9 倍。光照充足,多年平均年日照时数为 3183.3h。平均太阳总辐射为 $55.81 \times 10^8 \text{ J m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $\geq 10^\circ\text{C}$ 以上积温平均为 31810.9℃, $\geq 15^\circ\text{C}$ 积温 2234.8℃^[13]。风沙几乎四季不断,春季尤甚,冬季次之,以偏北风居多,年平均风速值达 3.2 m/s^[14]。晚霜期 4 月底,早霜期 9 月中、上旬。无霜期 130 d 左右。土地利用类型为盐碱滩地,植被类型为中温带荒漠草原植被类型,广泛分布有沙蒿半灌丛、盐爪爪,稀少分布有紫穗槐、长芒草、针茅、冷蒿等植被。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集及测定

基于野外调查,在沙漠-黄土过渡带选择了 $107^\circ 49' 56'' \sim 107^\circ 51' 44'' \text{ E}$, $37^\circ 45' 24'' \sim 37^\circ 46' 34'' \text{ N}$ 之间的一块区域作为研究区域。此区域是在冲洪积平原的基础上,经近代淤积而成,沙化盐碱程度重,周边部分沼泽地带分布有大片的盐湖,植被分布变化较明显。地势总体西低东高,北低南高。距离研究区 1.5 km (西

北方向直线距离)处即有一个名为明水湖的盐湖。结合地表植物以及地形,对研究区 0—30 cm 土层的土壤养分进行初探,了解其养分空间变异性。

研究区面积 245 hm²,1 hm²为一个取样点,共计 245 个采样点(图 1)。取回的土样封袋带回实验室,风干、研磨后在室内进行测定。全氮含量采用半微量开氏法测定,有效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定^[15]。

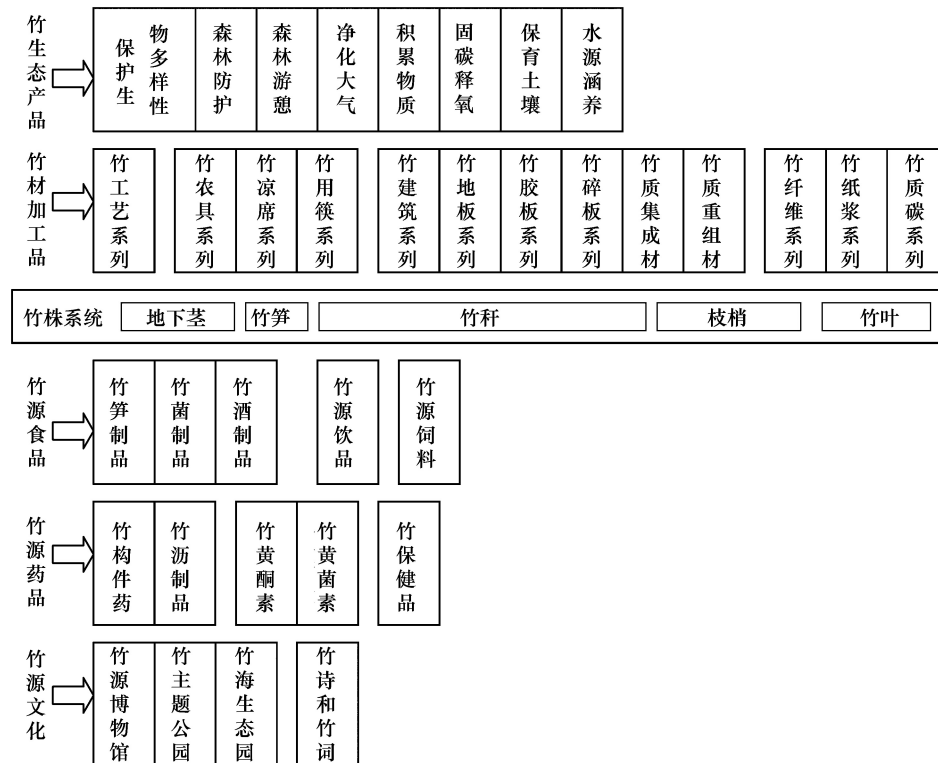


图 1 土壤采样点分布图

Fig.1 Sketch map of sample points in the study area

2.2 数据处理

2.2.1 空间自相关分析方法

表示空间自相关的指标和方法很多,其中最常用的是 Moran I 统计量。全局空间自相关 Moran I 的计算公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中, n 为参与分析的土壤样品数目; x_i 、 x_j 分别为样品 i 和样品 j 的观测值; $\bar{x}$ 为所有样品观测值的平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵值,当 $i=j$ 时表示为自权重,自权重定义为 0^[16]。

全局 Moran I 系数可定量描述研究变量在空间上的自相关程度,判断区域化变量在研究区内是否存在空间聚集区和空间孤立区。 I 值取值在-1—1,其值越大,则空间结构性越显著, $I>0$ 表示变量在空间上呈现正相关,存在空间聚集; $I<0$ 表示研究变量在空间上呈现负相关,存在空间孤立; $I=0$ 表示研究变量空间不存在空间自相关性^[16]。

2.2.2 半变异函数分析方法

地统计学是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方

法。半变异函数又称半变差函数、半变异矩,是地统计分析的特有函数。区域化变量 $Z(x)$ 在点 x 和 $x+h$ 处的值 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 差的方差的 $1/2$ 称为区域化变量 $Z(x)$ 的半变异函数,记为 $r(h)$, $2r(h)$ 称为变异函数^[17]。

根据定义有:

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

式中, h 为 2 样本点空间分隔距离; $r(h)$ 为 h 的半方差函数值; $N(h)$ 为间隔距离等于 h 的样本点的对数; $Z(x_i)$ 为空间位置点 x_i 处指标的实测值; $Z(x_i + h)$ 为空间位置点 $x_i + h$ 处指标的实测值。

2.2.3 数据处理软件

文中数据采用样本平均值加减 3 倍标准差识别特异值,在此区间外的数据均定为特异值,分别用正常的最大和最小值代替,后续计算均采用处理后的原始数据^[18]。养分的描述性统计分析在 SPSS 17.0 软件中完成,用 K-S 检验法进行非参数检验,显著性水平设定为 0.01。用手持 GPS 标记各采样点的坐标并分别导入 GS + 9.0 和 ArcGIS 10.2 中,生成具有土壤养分信息的采样点数据。采用 GS+ 9.0 完成空间自相关分析和半变异函数计算以及理论模型的拟合,并结合 ArcGIS 软件进行普通克里格插值,生成研究区土壤养分的空间分布图。

3 结果与分析

3.1 土壤养分的描述性统计分析

由表 1 可以得知,研究区内全氮含量范围为 0.02—1.18 g/kg,均值为 0.39 g/kg;有效磷含量范围为 3.08—22.28 mg/kg,均值为 9.65 mg/kg;速效钾含量范围为 35—227 mg/kg,均值为 106.84 mg/kg。根据第二次土壤普查养分分级标准,全氮含量属于第六级,为最低级别;有效磷含量属于第四级,处于中等水平;速效钾含量属于第三级,处于高水平。

偏度和峰度是反映样本正态分布特点的基本指标,偏度反映正态分布的双尾特征,峰度反映样本的集中程度,标准正态分布偏度为 0,峰度为 3。从表 1 可知,研究区土壤养分中,全氮、有效磷、速效钾的峰度均 >0 (为了便于比较,SPSS 软件中计算出的峰度值为减过 3 之后的值),说明这 3 种养分的数据分布比较集中;全氮、有效磷、速效钾的偏度均 >0 ,说明数据分布为右偏态。就变异系数而言,变异系数反映区域化变量的离散程度。变异等级划分标准为 $CV < 10\%$,为弱变异; $10\% \leq CV \leq 100\%$,为中等变异; $CV > 100\%$,为强变异^[19]。全氮、有效磷和速效钾均为中等变异。全氮的变异系数最大,为 84.62%;速效钾的变异系数最小,为 40.54%。使用非参数检验 K-S 检验,在 1% 的检验水平下,全氮、有效磷和速效钾含量均服从正态分布,可以进行普通克里金插值。

表 1 土壤养分描述性统计和 K-S 检验

Table 1 Descriptive statistics and K-S test of soil nutrients

指标 Items	极小值 Min	极大值 Max	均值 Mean	标准差 Std.	变异系数% CV	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	K-S 检验 K-S value
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.02	1.18	0.39	0.33	84.62	0.83	0.14	0.24
有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	3.08	22.28	9.65	4.93	51.09	0.90	0.23	0.35
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	35	227	106.84	43.31	40.54	0.74	0.24	0.73

3.2 空间相关性分析

由图 2 可知,全氮、有效磷、速效钾总体上的空间相关性均随着滞后距离的增加而呈下降趋势。全氮含量的 Moran I 系数在 0—595.31 m 内呈现正值,表现出较强的正相关性,说明全氮含量在这个区间内,存在明显的空间聚集性;随着滞后距离的增加,Moran I 系数在 600—1190.62 m 内呈现负值,表现出较弱的负相关性,即全氮含量在这个区间内存在空间孤立性;在 1190.62 m 以后,Moran I 系数在 0 上下浮动,说明滞后距离增加

到 1190.63 m 以后,全氮的自相关性已经表现的很弱。如图 2 所示,有效磷含量也存在相应的空间聚集区和空间孤立区。速效钾含量的 Moran I 系数在 0—892.97 m 内呈现正值,表现出较强的正相关性,说明速效钾含量在这个区间内,存在明显的空间聚集性;在 892.97—1190.62 m 内,Moran I 系数在 0 上下浮动,说明速效钾含量的自相关性已经很弱;随着滞后距离的增加,Moran I 系数在 1190.62 m 之后呈现负值,表现出较强的负相关性,即速效钾含量在这个区间内存在空间孤立性。

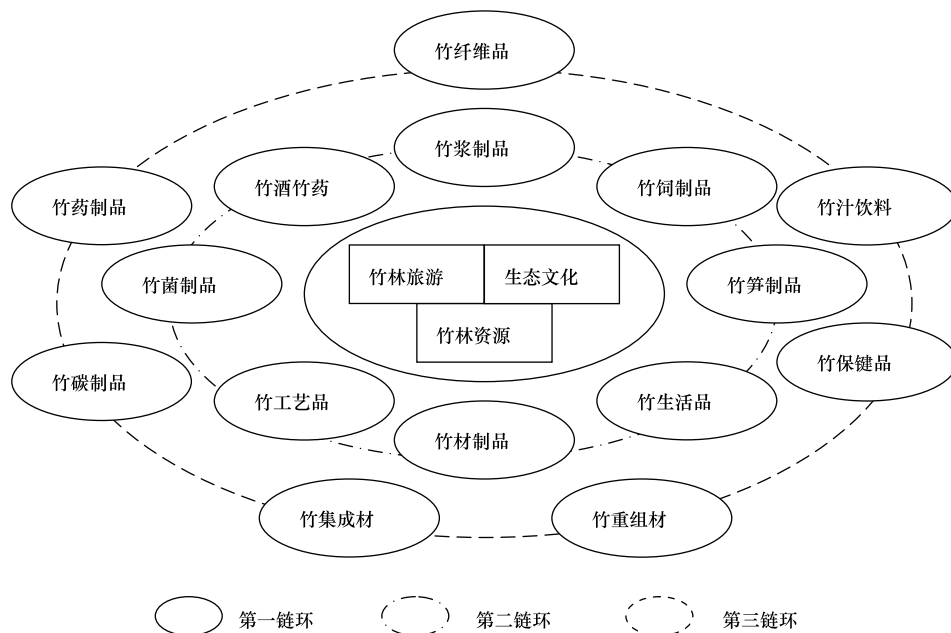


图 2 土壤养分空间自相关关系

Fig.2 Spatial correlograms of soil nutrients

3.3 地统计分析

半方差函数是地统计学中描述土壤性质空间变异的一个函数。用地统计学软件 GS+ 9.0 对土壤各指标进行半方差函数分析以及模型拟合优化,模型的选择取决于变异函数理论模型的拟合参数,以残差值最小以及决定系数最大的原则选择最佳拟合模型。全氮、有效磷、速效钾的最佳拟合模型都是高斯模型(表 2)。

表 2 土壤养分半方差函数理论模型及相关参数

Table 2 Parameters of theoretical semivariance models for soil nutrients

指标 Soil nutrients	模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 /m Range A_0	块金值/基台值/% C/C_0+C (%)	决定系数 r^2
全氮 Total nitrogen (N)	高斯	0.0001	0.12	294	0.09	0.51
有效磷 Available phosphorus (P)	高斯	0.01	27.59	303	1.00	0.77
速效钾 Available potassium (K)	高斯	941	2867	2591	32.82	0.83

块金值与基台值之比表示随机部分引起的空间变异占系统总变异的比例。从结构性因素的角度来看,若比值<25%,说明系统具有强烈的空间相关性;若比值在 25%—75%,则表明系统内有中等的空间相关性;若比值>75%,则表明系统内的空间相关性很弱^[20]。

全氮和有效磷的块金值与基台值之比分别为 0.09% 和 1.00%,均<25%,表明全氮和有效磷的空间变异主要是由结构性因素引起的,且空间相关性较为强烈。速效钾的块金值与基台值之比为 32.82%,在 25%—75%,属于中等强度的空间变异性,其空间变异是由随机性因素和结构性因素共同作用引起的。

变程是地统计学中反映区域化变量空间异质性的尺度或空间自相关尺度的重要指标。研究区 3 种养分的变程由小到大表现为全氮<有效磷<速效钾。其中速效钾的变程最大,为 2591 m,表明速效钾分布的均一性

较高,在小范围内变异弱,整体分布趋向简单,空间相关性较弱。全氮的变程最小,为 294 m,说明在研究区内全氮含量变异强,空间相关性强烈。从变程上来看,各个土壤指标的变程均大于取样间距 100 m,则表示采样点对该区域进行的无偏估计是可信的。

3.4 空间分布特征

Kriging 插值图能够直观清晰地反映出研究区土壤养分的分布特征。采用普通 Kriging 方法对全氮、有效磷和速效钾进行插值绘图(图 3)。

图 3 直观的显示,研究区内 3 种养分的空间分布规律差异较大。各个指标空间分布特征明显:全氮分布出现一个低值的带状聚集区域,其余部分呈现从北向南、由西向东逐渐减少的趋势,高值区主要分布在北部。有效磷的分布总体呈现从西北向东南逐渐减少的趋势,高值区主要分布在西北中部,低值区主要分布在东南部。速效钾含量呈条带状的梯度变化分布,均一性非常好,总体呈现从西北向东南逐渐减少的趋势,高值区主要分布在西北顶端,低值区主要分布在东南部底端。

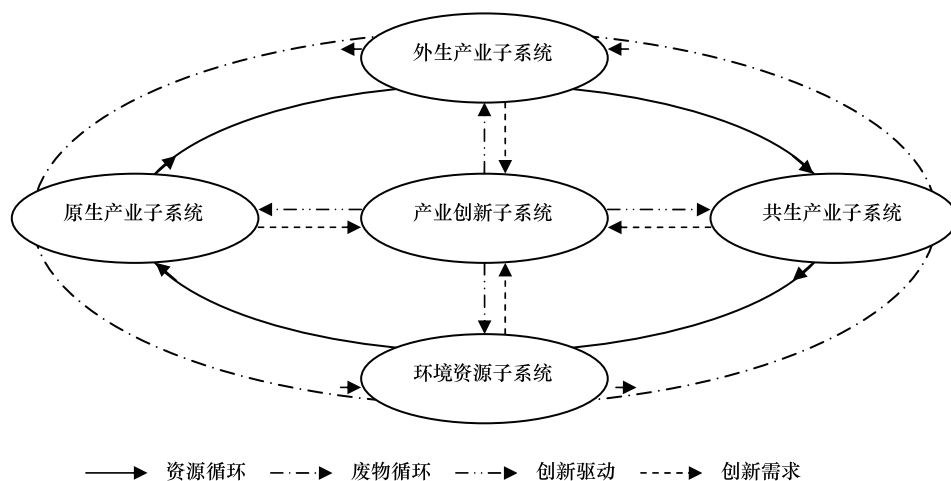


图 3 土壤养分空间插值图

Fig.3 Spatial pattern of soil nutrients

4 讨论

研究表明,沙漠-黄土高原过渡带内全氮、有效磷、速效钾含量具有强烈的空间变异性,这反映出其空间变异主要由土壤母质、地形等自然因素引起。

4.1 地形对土壤养分的影响

地形变化与土壤水分和养分的运移密切相关,故地形是影响土壤养分空间分布的重要因素,尤其是土壤速效养分含量与高程和坡度呈负相关^[7],有研究表明地形是有效磷和速效钾含量变异的重要因子^[21-22]。地势低洼处,土壤水分和养分资源显著聚集,在加上风蚀和水蚀作用以及养分淋洗作用会促进土壤养分在低洼处的聚集^[23]。研究区地势有一定的起伏,属于北低南高,西低东高,西北角海拔最低,属于最低洼区域,再加上项目区风蚀作用强烈,故有效磷和速效钾含量的高值都出现在研究区西北角,而且呈现由西北向东南递减的趋势,也印证了这点。虽然全氮含量在研究区中部区域出现一个低值区,但是总体的趋势也是呈现由西北向东南递减的趋势。全氮含量中间出现一个低值区,一方面是因为采样点在 10 m 高的梁岗上,梁岗上,土壤颗粒从上向下迁移,梁岗土壤风蚀和雨蚀作用强烈,水土流失严重;另一方面土壤质地为砂土,缺少黏粒以及微生物等来固定全氮,导致土壤全氮含量出现一个低值区。

4.2 地貌对土壤养分的影响

地貌会导致物质资源的重新分配,影响土壤中养分的分布情况。研究区域分布在低缓梁岗和沙丘之间,

是在冲洪积平原的基础上,经近代淤积而成。沙层覆盖较广,加之干旱和半干旱的气候条件的影响,形成许多封闭性的洼地。地表植被稀少,覆盖度低。土壤结构松散,沙粒含量大于粘粒含量,以沙粒为主,保水保肥力差,风蚀严重,造成土壤养分含量总体偏低。

4.3 植物对土壤养分的影响

植被的组成、分布、灌丛、群落结构等会造成土壤养分的变异^[12,24]。研究区区域面积大,植被分布从西北到东南,有明显的差异。从中间将整个研究区域分为西部(A区)和东部(B区),A区植被的覆盖度明显低于B区。根据野外调查结果,A区北部植物多为贴地植被,且呈黑褐色。A区中部植物多为高度为15 cm左右的细枝盐爪爪,A区南部散落分布有高30—40 cm的盐爪爪。B区西北部植被覆盖度与A区相似,B区东南部植被覆盖度最高,多为高约10 cm以内贴地的草本植物盐生草。植被的分布差异也会造成土壤养分含量的变异。

4.4 非自然因素对土壤养分的影响

非自然因素可以影响土壤内养分含量分布。人为放牧以及放牧的强度会显著影响土壤中养分含量的变化,尤其是全氮含量的变化,轻度放牧会显著降低土壤表层的全氮含量^[25-26]。研究区域属于原地貌,未经开发利用,在采集土样时,发现有动物粪便,说明存在放牧现象,从而导致土壤内养分含量的变异。

5 结论

(1)经典统计分析显示,研究区土壤全氮、有效磷、速效钾的平均含量分别为0.39 g/kg、9.65 mg/kg和106.84 mg/kg。3种养分的峰度均>0,数据分布比较集中;偏度也均>0,为右偏态。变异系数为40.54%—84.62%,均属于中等程度变异,其中全氮变异系数最大,速效钾变异系数最小。3种养分的数据均符合K-S正态分布,可以进行地统计学分析。

(2)地统计分析结果表明,土壤全氮、有效磷、速效钾的最佳拟合模型均为高斯模型。空间相关性分析结果显示全氮、有效磷、速效钾总体上的空间相关性均随着滞后距离的增加而呈下降趋势。3种养分的块金值/基台值比值在0.09%—32.82%,全氮、有效磷含量具有强烈空间自相关性,空间变异主要受结构性因子影响;速效钾具有中等空间相关性,说明空间变异是由随机性因素和结构性因素共同引起的。从变程上来看,3种养分的变程由小到大表现为全氮<有效磷<速效钾。

(3)全氮含量整体呈斑点状分布,插值图较破碎,有效磷和速效钾含量整体呈条带状分布,连续性较好。养分含量表现出随着地势的降低,含量升高的特点。毛乌素沙漠-黄土过渡带土壤养分的空间变异性与地形、地貌、植物分布以及非自然因素都有关,但是以地形因素的影响为主。

参考文献 (References):

- [1] 吴利杰,石建省,毕志伟,杨振京,王成敏,郭娇. 沙漠—黄土过渡带杨桥畔全新世地层及沉积环境研究. 干旱气象, 2015, 33(5): 777-782.
- [2] 杨岩岩,刘连友,曹恒武,贾振杰. 沙漠-黄土南北样带土壤物理性质区域分异特征. 中国沙漠, 2013, 33(1): 146-152.
- [3] 李平原,刘秀铭,郭雪莲,吕镔,赵国永,马明明. 西北戈壁沙漠-黄土高原区表土磁化率特征及其意义. 第四纪研究, 2013, 33(2): 360-367.
- [4] 杨青,李小强,周新郢. 末次盛冰期以来沙漠/黄土过渡带植被演替及其对气候变化的响应. 人类学学报, (2015-08-10). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1963.Q.20150810.1636.010.html>.
- [5] 方斌,吴金凤. 作物种植前后土壤有机质及养分因子的空间变异分析. 生态学报, 2014, 34(4): 983-992.
- [6] 杨阳,刘秉儒,宋乃平,杨新国. 人工柠条灌丛密度对荒漠草原土壤养分空间分布的影响. 草业学报, 2014, 23(5): 107-115.
- [7] 杨建虎,常鸿莉,魏琪. 黄土高原小流域土壤养分空间特征及其与地形因子的相关性. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(12): 85-90.
- [8] 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. 干旱区研究, 2014, 31(2): 209-215.
- [9] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云,刘京,陈涛. 县域农田土壤养分空间变异及合理样点数确定. 土壤通报, 2014, 45(3): 556-561.

- [10] 徐大兵, 邓建强, 刘冬碧, 倡国涵, 彭成林, 袁家富, 赵书军, 王瑞. 整治区植烟土壤养分空间变异及肥力适宜性等级评价. 应用生态学报, 2014, 25(3): 790-796.
- [11] 刘丽丹, 谢应忠, 邱开阳, 时项峰. 宁夏盐池沙地 3 种植物群落土壤表层养分的空间异质性. 中国沙漠, 2013, 33(3): 782-787.
- [12] 刘进辉, 王雪芹, 马洋. 沙漠绿洲过渡带怪柳灌丛沙堆-丘间地系统土壤养分空间异质性. 生态学报, 2016, 36(4): 979-990.
- [13] 陕西地情网定边县志第三编自然地理第一章自然环境.[2016-03-29].http://www.sxsdq.cn/dqzlk/dfz_sxz/dbxz/.
- [14] 鲁渊平, 杜继稳, 侯建忠, 李亚莉. 陕西省风速风向时空变化特征. 陕西气象, 2006, (1): 1-4.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005: 42-108.
- [16] 邱炳文, 王钦敏, 陈崇成, 池天河. 福建省土地利用多尺度空间自相关分析. 自然资源学报, 2007, 22(2): 311-321.
- [17] 陈肖, 张世熔, 黄丽琴, 代英, 吴若玉. 成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 1-7.
- [18] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 欧阳资文, 吴海勇. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性. 应用生态学报, 2009, 20(1): 98-104.
- [19] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 郭月峰. 赤峰市黄花甸子流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究. 环境科学学报, 2014, 34(3): 742-748.
- [20] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 138-149.
- [21] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 余海英, 吴德勇. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 114-120.
- [22] 秦松, 樊燕, 刘洪斌, 王正银. 地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究. 水土保持研究, 2007, 14(4): 275-279.
- [23] Li J R, Okin G S, Alvarez L, Epstein H. Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 317-332.
- [24] 张江平, 郭颖, 孙吉慧, 刘晓, 丁访军. 贵州主要森林植被养分含量及其分配特征. 北京林业大学学报, 2015, 37(4): 48-55.
- [25] 苏振声, 孙永芳, 付娟娟, 褚希彤, 许岳飞, 呼天明. 不同放牧强度下西藏高山嵩草草甸土壤养分的变化. 草业科学, 2015, 32(3): 322-328.
- [26] 萨仁高娃, 曹芙, 敖特根, 韩国栋, 王成杰. 短期放牧强度对典型草原土壤理化性质的影响. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2014, 35(5): 75-79.