

民勤湖区表层土壤养分的空间异质性

张 凯^{1,2},冯 起²,吕永清³,张 勃³,司建华²,王润元¹

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃 兰州 730020;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:利用地统计学方法研究了民勤绿洲湖区表层土壤养分碱解氮、速效磷和速效钾的空间异质性。结果表明:绿洲、过渡带和荒漠三种景观下表层土壤中氮磷钾含量都呈现出“丰氮、富钾、贫磷”的特征;碱解氮与速效磷的变异系数在绿洲区最小,荒漠区最大,而速效钾在荒漠区最小,过渡带最大,但都属于中等变异;从绿洲到荒漠,碱解氮、速效磷呈 U 型分布特征,而速效钾为倒 U 型分布特征。碱解氮的最佳拟合模型为 Exponential,速效磷为 PentaspHerical,速效钾为 Tetrasherical;氮和磷的富集区位于绿洲区,而速效钾在过渡带上出现富集中心。土壤的养分元素含量除了与成土母质的元素有关外,人类活动的影响也是非常重要的因素。

关键词:表层土壤;养分;空间异质性;地统计学;民勤湖区

中图分类号: S158 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0127-06

Spatial heterogeneity of surface soil nutrients in Minqin lake area

ZHANG Kai^{1,2}, FENG Qi², LU Yong-qing³, ZHANG Bo³, SI Jian-hua², WANG Run-yuan¹

(1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration / Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province / Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China;
2. Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
3. Department of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: By using the methods of geostatistics, the spatial heterogeneity of available N, available P and available K in surface soils in Minqin lake area was studied. The results indicated that soil N and K were rich but soil P was poor over the three landscapes of oasis, desert and transitional belt. The variation coefficient of soil available N and P was the smallest in oasis area and the biggest in desert area, while that of soil available K was the smallest in desert area and the biggest in oasis-desert transitional belt. Soil nutrients in the study area wholly exhibited moderate spatial variability. The soil available N and P presented a U-shaped distribution pattern, and the soil available K presented an inverse U-shaped distribution pattern from oasis to desert. Available N, P and K fitted well to Exponential model, PentaspHerical model and Tetrasherical model, respectively. The enriched zone of available N and P was located in oasis area, whereas that of available K was located in oasis - desert transitional belt. The soil nutrient contents were related not only to the elements of parent rocks, but also to the impact of human activities.

Keywords: surface soil; nutrient; spatial heterogeneity; geostatistics; Minqin lake area

空间异质性是生态学,尤其是景观生态学的一个重要概念,是生态系统中生物因子和非生物因子的主要属性之一,也是产生空间格局的重要原因^[1-6]。土壤作为地表植物生长的载体,有着极其重要的地理意义,作为植被生长中水、热、气、肥供给

的重要媒介,是自然状态下植物生长和发育的重要保障,对于土壤特性的认识是恢复与改善荒漠区地表植被的基础。土壤并非一个匀质体,由于受气候、生物、母质、地形、成土时间等诸多成土因素的影响,具有复杂性和高度的时空变异性,土壤是一个历史

收稿日期:2012-02-27

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(3ZS061 - A25 - 009);国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806021, GYHY201106029);干旱气象科学研究基金项目(IAM201206);甘肃省气象局第二批“青年优秀人才”基金

作者简介:张 凯(1976—),男,甘肃甘谷人,博士研究生,副研究员,主要从事水文生态,农业生态等方面的研究。E-mail: lanzhouzhk@163.com。

的生命连续体,具有高度的空间异质性^[7]。主要表现为同一质地的土壤在同一平面或不同深度上并不完全均质,存在明显的差异性和多样性^[8]。作为土壤特性的重要方面,土壤养分是构成土壤肥力的物质基础^[9],是衡量土壤质量好坏的重要指标^[10],也是植物生长的必要条件,是导致植被演替的重要驱动力之一^[11]。因此,研究土壤养分空间变异性,分析它们的变异规律和变化动态,能更好地理解空间作用对土壤作物关系的重要性,为土壤的合理利用、改造、防治以及农业可持续发展和生态环境的改善提供科学依据,为研究生物植被变化、土地评价等提供理论基础^[12]。

目前国内学者已开展了许多有关土壤养分空间异质性方面的研究。但这些研究大部分以湿润、半湿润地区为主^[13-15],对于干旱内陆河流域绿洲土壤养分的空间变异研究相对较少,且主要集中于黑河流域和塔里木河流域^[16-18],而对于我国生态环境恶化问题十分突出的石羊河下游绿洲的土壤养分空间变异研究却少之又少。因此,本文将对石羊河下游民勤绿洲的土壤养分空间异质性进行研究,这将为该地区土壤的改良与合理利用提供理论基础,为抑制民勤绿洲生态退化、有效开展生态恢复与治理提供科学依据。

1 研究区域概况

民勤绿洲位于石羊河流域下游地区,地处 $102^{\circ}45' \sim 103^{\circ}55'E$, $38^{\circ}20' \sim 39^{\circ}10'N$,总面积 $1.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。绿洲南靠武威盆地,西、北、东三面被巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠包围(图 1)。根据在绿洲中的位置、作物种植方式以及输水渠系配置的不同将民勤绿洲分成湖区、坝区及泉山区 3 个灌区。

湖区位于民勤绿洲的东北部,平均海拔为 1 315 m。属典型的温带大陆性干旱气候。多年平均降水 110 mm 左右,而年蒸发量高达 2 644 mm。年平均风速 $218 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风沙危害十分严重。湖区包括东湖、收成、西渠 3 个乡镇,总面积 $5.53 \times 10^4 \text{ hm}^2$,人口为 6.66×10^4 。区内作物以春小麦、夏玉米、青稞等粮食作物为主,兼种棉花、茴香、籽瓜等经济作物,在自然因素与人为活动的叠加作用下,塑造了这里土壤生产能力较低的荒漠化土壤类型特点。由于中游武威绿洲的大量用水,进入下游湖区的水量日趋减少,地下水位下降,水质恶化,绿洲植被大面积衰退、死亡,沙漠化日益加剧,大量耕地被废弃,生态日趋恶化,已经严重影响到当地的生产发展和人类的生存^[19-20]。

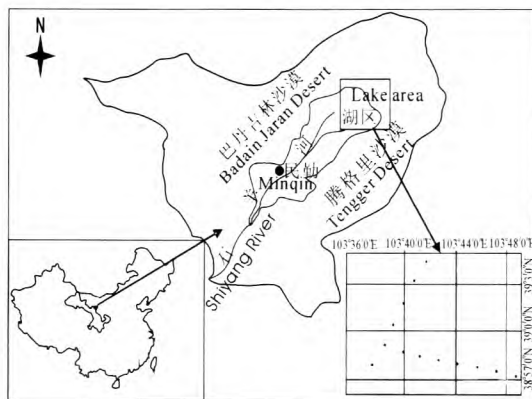


图 1 研究区及采样点

Fig. 1 The study area and distribution of sampling points

2 研究方法

2.1 野外样品采集

2008 年 8 月份,在湖区东湖镇从绿洲到荒漠共设 2 条样带进行了采样(图 1)。各样带基本选在地形平坦,荒漠绿洲景观明显的区域。在采样同时,用 GPS 记录下采样点的坐标数据以及采样点周围的地理概况。

2.2 土壤养分的测定

土壤样品首先在实验室经过 15 d 的自然风干,通过研磨、碾碎,过筛孔直径为 1 mm 和 0.25 mm 的土筛后制备成符合要求的实验样品。所有土壤的物理化学特性分析均按照常规方法进行^[21]。

土壤水解性氮用碱解法的开氏蒸馏法(KND-04 型蒸馏设备),计算公式为:

$$\text{土壤水解氮}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{C \times (V - V_0) \times 14}{W} \times 1000 \quad (1)$$

式中, C 为 H_2SO_4 标准液的浓度; V 为样品测定时用去 H_2SO_4 标准液的体积; V_0 为空白测定时用去 H_2SO_4 标准液的体积; 14 为氮的摩尔质量; 1000 为换算系数; W 为土壤重量(g)。

速效磷采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定(7230G 分光光度计),计算公式为:

$$\text{土壤速效磷}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{显色液磷数}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \times \text{显色液体积} \times \text{分取倍数}}{\text{烘干土重}(\text{g})} \quad (2)$$

速效钾测定采用醋酸铵浸提,火焰光度计测定,计算公式为:

$$\text{土壤速效钾}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{待测液}(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}) \times \text{加入浸提剂毫升数}}{\text{烘干土重}(\text{g})} \quad (3)$$

2.3 分析方法

本文主要采用地统计学方法对民勤湖区土壤养分的空间异质性进行研究。地统计方法是在传统统计学基础上发展起来的空間分析方法,此方法不仅能够有效揭示属性变量在空間上的分布变异特征,而且能够有效解释空間格局对生态过程与功能的影响。主要是通过变异函数参数,如块金值(C_0)、结构性方差(C)、总基台值 $C_0 + C$ 、变程 a 、分形维数 D 和结构方差与基台值之比 $[C/(C_0 + C)]$ 等定量分析空間异质性程度、组成、尺度与格局的特征^[22]。具体方法及公式见文献^[23]。

当定量描述变异特征时,需要通过模型的最优拟合,来建立变异函数的理论模型。并选取标准均方根预测误差 (Root - Mean - Square Standardized) 和标准平均值 (Mean Standardized) 两个指标来衡量模型的拟合程度,其中标准均方根预测误差值越接近 1,标准平均值越接近 0,模型的拟合越好。

在数据分析时采用 GS+ 7.0 软件进行半方差函数的分析,相关性分析采用 SPSS 软件。Kriging 插值利用 ArcGIS 9.2 软件分析制作。

3 结果与分析

3.1 表层土壤养分的描述性统计分析

按经典统计学方法,将不同景观类型上各层土壤养分计算结果列于表 1。从表 1 可看出,绿洲、过

渡带和荒漠 3 种景观下土壤表层(0~20 cm)中氮磷钾含量都呈现出“丰氮、富钾、贫磷”的特征。其中钾、氮、磷含量分别为 307.41、76.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 7.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从水平方向来看,绿洲中三种养分指标中的碱解氮和速效磷的平均值都高于过渡带和荒漠区,速效钾则低于过渡带和荒漠区。该地区土壤中钾的含量普遍丰富,这与北方地区的成土母质多为富含钾长石有关,因此,本区土壤中基本不存在缺失钾肥情况,而土壤中速效磷的贫乏,这就需要在土壤耕作过程中加大磷肥的使用量。

土壤表层(0~20 cm)不同养分的变异情况各不相同(表 1),其变异系数在 28%~82% 之间。从整体来看,研究区碱解氮、速效磷和速效钾的平均变异系数分别为 40%、57% 和 51%,速效磷的变异系数最高,速效钾其次,碱解氮最低。3 种营养元素变异系数均不高,变化范围不大,属于中等变异,说明各营养元素在土壤中的含量相对稳定。从不同景观类型来看,碱解氮与速效磷在绿洲区的变异系数最小,在荒漠区变异系数最大,这是因为该区域氮、磷的施用水平差别不大,耕种措施、种植制度也基本相同,而在荒漠区,由于受地下水矿化度高和土壤盐渍化等因素的影响,土壤养分有效性低,养分含量不均,差异明显,变异相对较大;速效钾在荒漠区的变异系数最小,在过渡带上的变异系数最大,这可能与采样点的数据存在极值有关。

表 1 不同景观类型的土壤表层(0~20 cm)氮磷钾的统计特征
Table 1 The statistical characteristics of soil N, P, K in different landscape types

景观类型 Landscape types	项目 Items	最小值 Minimum /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 Maximum /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	平均值 Average /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient of variation/%
绿洲 Oasis	碱解氮 Available N	79.70	149.80	109.14	29.52	0.69	-1.71	28
	速效磷 Available P	8.70	18.70	14.14	3.98	-0.32	-1.00	28
	速效钾 Available K	140.00	425.00	273.00	140.87	0.36	-3.09	52
过渡带 Transition zone	碱解氮 Available N	18.40	83.80	51.99	22.35	-0.45	-1.03	43
	速效磷 Available P	0.90	8.90	4.07	2.66	0.93	-0.40	66
	速效钾 Available K	140.00	840.00	347.50	231.17	1.51	1.21	67
荒漠 Desert	碱解氮 Available N	12.30	126.70	68.77	33.83	-0.22	-1.00	49
	速效磷 Available P	0.10	14.90	4.39	3.60	1.42	2.26	82
	速效钾 Available K	100.00	480.00	301.74	105.17	1.57	3.56	35

3.2 表层土壤养分的趋势分析

一个预测表面的变异由全局势和随机短程变异组成。全局势可以看作是确定的均值结构,是一个影响所有观测的最为重要的因素,能表征变量在空間上的整体变化格局^[24]。通过趋势分析可将研究区域的点转化为属性值为高度的三维视图。将点按

照两个方向投影到与地图平面正交的平面上,每个方向可用一个多项式来拟合。从民勤绿洲采样点土壤养分数据的趋势分析可看出,表层土壤碱解氮、速效磷和速效钾均存在二阶趋势。在东西方向(细线)和南北方向(粗线)上碱解氮、速效磷表现为两边高中间低的“U”字形特征,尤其是西面高于东面,南边

高于北边。即从绿洲到过渡带,再到荒漠区,碱解氮、速效磷含量先减后增,其中绿洲区最大,过渡带最小,其原因主要是与绿洲区生产过程中大量施用氮肥和磷肥以及过渡带上大量开采地下水有关;速效钾在东西方向(细线)和南北方向(粗线)上则是先

增后减,表现为中间高,两边低的趋势,即从绿洲到过渡带,再到荒漠区,速效钾含量是先升高后降低,其中过渡带最大,绿洲区最小,这可能与绿洲外围主要是潮土有关,潮土是在河流沉积母质基础上发育而来,母质本身含钾丰富^[25]。

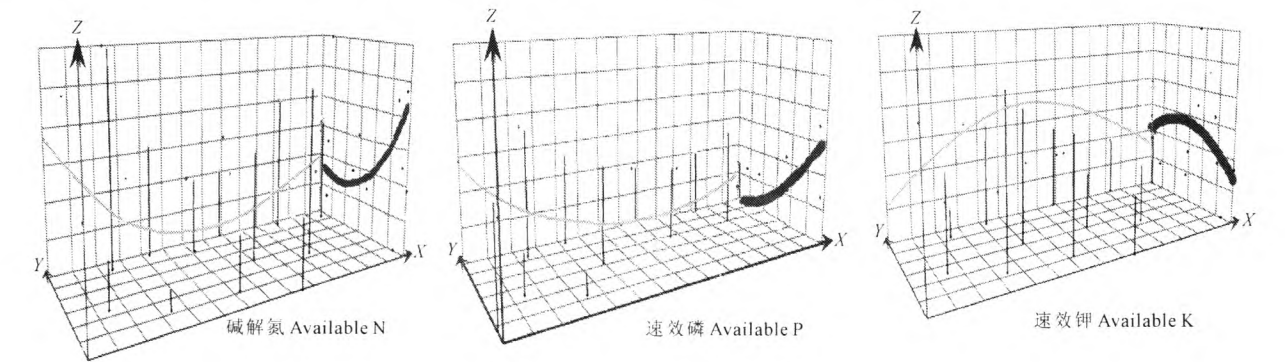


图 2 土壤养分趋势分析
Fig.2 Trend analysis of soil nutrients

3.3 表层土壤养分空间变异的半方差分析

空间变异分析中,如块金值(C_0)表示随机部分的空间性。结构性方差(C)表示系统变异的空间异质性。总基台值($C_0 + C$)反映观测变量在研究范围内总的空间变异强度。结构方差与基台值之比 $[C/(C_0 + C)]$ 反映自相关部分的异质性占总空间异质性程度,当它的值大于 75%,表明变量具有强烈的空间相关性;在 25% ~ 75%之间,变量具有中等的空间相关性;小于 25%时,变量的空间相关性很弱^[26],空间异质性程度多由随机因素引起。图 3 给出了表层土壤碱解氮、速效磷和速效钾的半方差函数。碱解氮的最佳拟合模型为 Exponential,结构方差与基台值之比 $[C/(C_0 + C)]$ 为 0.960,标准均方根预测误差 (Root - Mean - Square Standardized) 为 1.182,标准平均值 (Mean Standardized) 为 0.04796。速效磷的最佳拟合模型为 PentaspHerical, $C/(C_0 + C)$ 为 0.312,标准均方根预测误差为 0.683,标准平均值为 -0.08363。速效钾的最佳拟合模型为 Tetrash-erical, $C/(C_0 + C)$ 为 0.840,标准均方根预测误差为 1.166,标准平均值 (Mean Standardized) 为 -0.1314。从结构方差与基台值的比值来看,土壤养分特性中,碱解氮与速效钾的值都大于 75%,属于强自相关性,速效磷的值小于 75%,但大于 25%,呈中度相关性;基台值方面,速效磷的基台值要高于其它两种指标,说明该指标受随机因素影响较大,这种随机影响可能来自采样和试验之中。

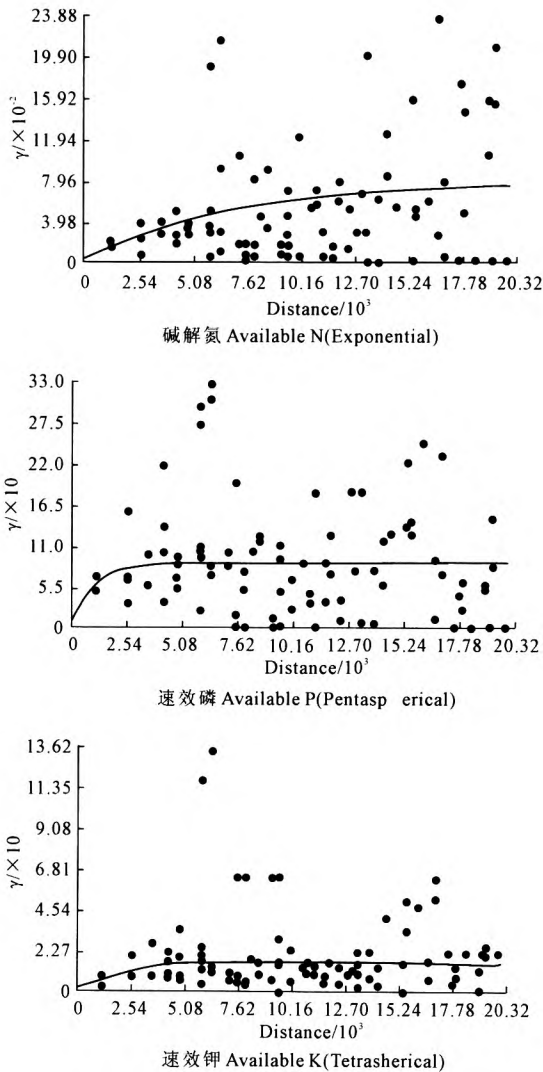


图 3 土壤养分最佳拟合模型的变异函数
Fig.3 The semi-variant function graph of the fitting models

3.4 表层土壤养分的空间分布特征分析

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,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估值的一种方法^[23],与普通的方法估计不同,它最大限度地利用了空间取样所提供的各种信息。根据这一特性,可以对研究区表层土壤养分数据进行 Kriging 插值分析。从图 4 土壤养分特性的插值趋势变化可以看出土壤 N、P、K 的分布受土地利用类型变化影响明显。碱解氮和速效磷的分布趋势为由西向东逐渐降低,呈现两边高中间低的分布格局,其中在采样区的西偏北方向分布出现了氮和磷的富集中心,在中部呈现出一个含量较低的中心。从地理位置上看采样区的西面为绿洲农田耕作区,氮和磷的富集跟人们在从事农业

生产的过程中使用了大量的肥料有关,从中部到东部为过渡带和荒漠区,出现了氮和磷的贫化趋势,这与实际生活中人们所认识到的荒漠土壤贫瘠相符;速效钾的 Kriging 插值变化情况与碱解氮和速效磷相反,呈现两边低中间高的分布格局,在采样区的中部即过渡带出现了钾的富集中心,在东西两边的绿洲农田和荒漠区钾含量相对较低。但从整体来看该地区土壤中钾的含量普遍丰富,这主要与该地区的成土母质有关。分析表明土壤的养分元素除了与成土母质的元素有关外,对其影响最大的就是人类的活动。因此,人类的活动影响着地表覆盖,而地表覆盖状况对土壤肥力及物理特性的影响又是显而易见的。

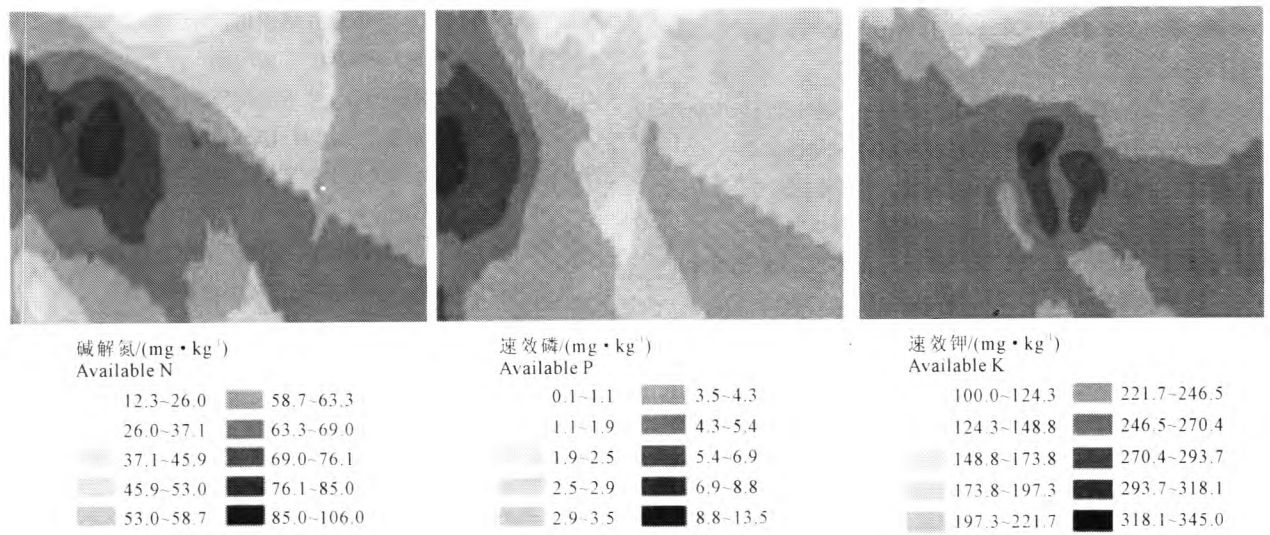


图 4 研究区土壤养分的空间分布

Fig.4 Predicted distribution of soil nutrients in the study area

4 结 论

1) 绿洲、过渡带和荒漠三种景观下土壤表层中氮磷钾含量都呈现出“丰氮、富钾、贫磷”的特征。研究区碱解氮、速效磷和速效钾的变异属于中等变异。其中速效磷的变异系数最高,速效钾其次,碱解氮最低。碱解氮与速效磷的变异系数在绿洲区最小,荒漠区最大,而速效钾的变异系数在荒漠区最小,过渡带最大。

2) 碱解氮、速效磷在东西方向和南北方向上的变化趋势为两边高中间低的“U”字形特征。速效钾在东西方向和南北方向上表现为中间高,两边低的趋势。

3) 从半方差函数来看,碱解氮的最佳拟合模型为 Exponential,速效磷的最佳拟合模型为 PentaspHerical,速效钾的最佳拟合模型为 Tetrasherical。碱解氮与速效钾的 $C/(C_0 + C)$ 值都大于 75%,属于强自相关性,速效磷呈中度相关性。

4) 表层土壤养分的空间分布特征表现为绿洲区是氮和磷的富集区,在过渡带和荒漠区,氮和磷出现贫化趋势。速效钾在过渡带上出现富集中心,在绿洲和荒漠区含量相对较低,总体来看该地区土壤中钾的含量普遍丰富。土壤的养分元素除了与成土母质的元素有关外,对其影响最大的就是人类的活动。

参考文献:

- [1] 毕华兴,李笑吟,刘鑫,等.晋西黄土区土壤水分空间异质性的地统计学分析[J].北京林业大学学报,2006,28(5):59-66.
- [2] Nielsen D R, Biggar J W, Erh K T. Spatial variability of field measured soil - water properties[J]. *Hilgardia*, 1973,42:215-259.
- [3] Gajet Y M, Warrick A W, Myres D E. Spatial dependence of physical properties of a typic torrifluent soil[J]. *Soil Science Society America Journal*, 1981,45:709-715.
- [4] Hammer R D, Brier R G, Lewis R J. Temporal and spatial soil variability on three forested land types on the mid cumber land plateau[J]. *Soil Science Society America Journal*, 1992,51:1320-1326.
- [5] Qian H, Klika K. spatial variability of humus forms in some coastal forest ecosystems of British Columbia[J]. *Annual Science Forestry*, 1995,52:653-666.
- [6] 李海滨,王政权,王庆成.空间异质性定量研究理论与方法[J].应用生态学报,2007,22(5):586-592.
- [7] 郑田,李建贵,李卫红,等.塔里木河下游绿洲荒漠过渡带土壤异质性及对植物群落的影响[J].中国沙漠,2010,30(1):128-134.
- [8] 姜秋香,付强,王子龙.空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J].水土保持研究,2008,15(1):250-253.
- [9] 石瑞香,杨小唤,王立新.伊犁新垦区土壤养分特征与土地开垦的方向探讨[J].资源科学,2009,31(12):2016-2023.
- [10] 王艳华,董元杰,张民,等.鲁中山区小流域坡面侵蚀土壤养分空间分异特征研究[J].土壤,2011,43(2):179-183.
- [11] 张劲峰,宋洪涛,耿云芬,等.滇西北高山不同退化林地植被与土壤养分特征[J].生态学杂志,2008,27(7):1064-1070.
- [12] 陈亚新,史海滨,魏占民.土壤水盐信息空间变异的预测理论与条件模拟[M].北京:科学出版社,2005:8-12.
- [13] 秦占飞,常庆瑞.县域土壤养分空间变异分析——以蒲城县为例[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):30-35.
- [14] 刘淑娟,张伟,王克林,等.桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J].生态学报,2011,31(11):3036-3043.
- [15] 汤爱坤,刘汝海,许廖奇,等.昌邑海洋生态特别保护区土壤养分的空间异质性与植物群落的分布[J].水土保持通报,2011,31(1):88-93.
- [16] 司建华,冯起,鱼腾飞,等.额济纳绿洲土壤养分的空间异质性[J].生态学杂志,2009,28(12):2600-2606.
- [17] 孟宝,张勃.绿洲—荒漠过渡带土壤特性空间变异规律初探[J].人民长江,2008,39(20):21-24.
- [18] 杨红梅,徐海量,樊自立,等.塔里木河下游表层土壤盐分空间变异和格局分析[J].中国沙漠,2010,30(3):564-570.
- [19] 宋冬梅,吴远龙,张志诚,等.基于元胞自动机民勤绿洲湖区荒漠化演化预测[J].中国沙漠,2009,29(5):802-807.
- [20] 颀耀文,袁春霞,张晓东.近 15 年来民勤湖区土地利用/覆盖动态与格局[J].干旱区地理,2009,32(3):423-429.
- [21] 中国科学院南京土壤所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:196-211.
- [22] 张凯,冯起,吕永清,等.民勤绿洲荒漠带土壤水分的空间分异研究[J].中国沙漠,2011,31(5):1149-1155.
- [23] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:74-96.
- [24] 钱静,陈曦,吕建海,等.基于 GIS 的绿洲土壤含水量空间变异性研究[J].干旱区地理,2004,21(1):49-54.
- [25] 吕晓东,马忠明,杨虎德.民勤绿洲耕作土壤养分时空变异特征及其影响因素[J].干旱区研究,2010,27(4):487-494.
- [26] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field - scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America*. 1994,58:1501-1511.