

李 岩,尚士友,王晓娟,等. 西乌珠穆沁典型草原植被盖度空间异质性研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):283-288.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.22.075

西乌珠穆沁典型草原植被盖度空间异质性研究

李 岩¹, 尚士友², 王晓娟¹, 臧 琛³, 德力格尔⁴

(1. 内蒙古电子信息职业技术学院电子工程系, 内蒙古呼和浩特 010070; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018;
3. 内蒙古工业大学工程训练中心, 内蒙古呼和浩特 010051; 4. 内蒙古西乌旗草原工作站, 内蒙古锡林郭勒盟 026200)

摘要:采用地学统计方法,以西乌珠穆沁典型草原 3 类不同地貌的 3 个试验区中植被盖度为研究对象,探讨其空间结构和异质性。经研究发现,3 类地貌试验样地的植被盖度均值较为接近,在 32.99% ~ 40.77% 之间,其变异系数值均小于 10%,属于弱变异性范围。3 个试验样地植被盖度的拟合模型决定系数在 0.60 ~ 0.71 之间,拟合度较好;根据 $C_0/(C+C_0)$ 值可知,随机因素在 3 个样地植被盖度的空间变异中所起的作用的权重顺序为低山丘陵样地 > 坡地样地 > 波状高平原样地;3 类不同地貌试验样地的结构比 $[C/(C+C_0)]$ 均大于 75%,植被盖度均表现出较强的空间相关性,且由空间自相关部分引起的空间异质性占到总空间异质性的 80% 以上;3 个试验样地中植被盖度连续性最好的是低山丘陵地貌样地,其次是坡地地貌试验样地,最后是波状高平原地貌样地。3 个试验样地均表现出明显的各向异性,空间格局差异明显。经克里金空间插值后得到 3 个样区植被盖度的空间分布图,并对植被盖度的分布做了定量研究。

关键词:典型草原;植被盖度;地统计学;空间异质性;遥感;半方差函数;草地沙漠化治理

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)22-0283-06

植被盖度是景观环境适宜程度的指示因子,是自然环境变化和人类活动所引起的景观演变过程的综合结果,因此植被盖度不仅是群落结构的一个重要参数,也是土地退化特征

的一个直接的主导性表征^[1],更是指示生态系统变化的重要指标。栗钙土层是典型草原土壤的主要组成结构,是在自然因素和人为因素的共同作用下,经过漫长的历史过程协同演化而来的,具有栗色腐殖层和明显钙积层的地带性土壤。植被盖度存在一定的空间异质性,即不同的空间位置上植被的盖度存在一定的差异,土壤与植被的空间异质性既作为一种原因也作为一种结果在植物群落中广泛存在着^[2-5]。

伴随着近几年遥感技术的飞速发展,利用该技术监测植被的相关特征数据,已经取得一定的研究成果,并已应用在实践中。但介于目前研究技术的发展水平,直接利用快捷的遥感技

收稿日期:2016-05-19

基金项目:国家自然科学基金(编号:41061023,41261050);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(编号:NJZY313)。

作者简介:李 岩(1981—),女,内蒙古赤峰人,博士,副教授,主要从事信息监控技术研究。E-mail:nmliyan@126.com。

通信作者:尚士友,教授,博士生导师,主要从事 3S 技术和环境监控与信息技术方向研究。E-mail:shangshiyu@163.com。

[41] 梁开明,章家恩,林田安,等. 一稻两鸭共作对稻田土壤养分动态的影响[J]. 生态环境学报,2014,23(5):769-776.

[42] 朱相成. 增密减氮对东北水稻产量和氮肥效率及温室气体排放的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2015.

[43] 朱利群,王春杰,陈利根,等. 长江中下游稻麦轮作农田不同施肥措施的固碳潜力分析[J]. 浙江农业学报,2016,28(7):1249-1261.

[44] Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea [J]. Field Crops Research, 2014, 169:30-38.

[45] 段智源,李玉娥,万运帆,等. 不同氮肥处理春玉米温室气体的排放[J]. 农业工程学报,2014(24):216-224.

[46] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2014.

[47] Hussain S, Peng S, Fahad S, et al. Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(5): 3342-3360.

[48] 白 朴,项 雄,王元辉,等. 超级稻的特征特性与配套栽培技术研究[J]. 种子,2006,25(4):98-101.

[49] Bai P, Pang B R. Studies on water-saving and high-yield cultivation techniques of super rice [J]. Biotechnology, 2013, 7(10):425-428.

[50] 邵美红,孙加焱,阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述 [J]. 浙江农业学报,2011,23(1):181-187.

[51] 白 朴,金瑜雪,应苗苗,等. 低碳农业发展对策探索与研究 [M]. 北京:中国农业科学出版社,2016.

[52] Lehmann J. A handful of Carbon [J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.

[53] 吕宏虹,宫艳艳,唐景春,等. 生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展[J]. 农业环境科学学报,2015,34(8):1429-1440.

[54] Zhang Z N, Chen G F, Sun H F, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost [J]. Bioresource Technology, 2016, 200:876-883.

[55] Liu X Y, Qu J J, Li L Q, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N_2O emission in rice paddies? - A cross site field experiment from South China [J]. Ecological Engineering, 2012, 42(9):168-173.

术监测栗钙土层厚度的变化,还存在一定的障碍,因而,典型草原植被与土壤空间格局协同演变的研究在某种程度上受到了制约。空间插值法是获取自然地理要素空间信息的主要方法之一^[6]。幅员辽阔的典型草原上,植被盖度数据的缺乏和不均匀,使得利用空间插值法来模拟植被盖度空间分布成为一种必然。

本研究采用地学统计方法,以典型草原不同地貌的 3 个试验区内植被盖度为研究对象,探讨其空间结构和异质性,定量揭示两者空间变异和协同演变的规律。通过空间分布图,可以方便快捷地找到有沙化趋势的区域,对这些区域加以重点保护,将有利于延缓草地的沙漠化。

1 试验设计及数据预处理

根据 Landsat5 遥感影像和西乌珠穆沁旗地形图,选取研究区位于西乌珠穆沁旗巴拉嘎尔郭勒镇南部偏西方向,范围是 117°16'~117°37'E,44°25'~44°32'N。在这个区域内踏查

选择具有坡地、低山丘陵和波状高平原地形地貌的 3 个试验样地,每个试验样地的面积约为 25 km²。研究区内植被主要有大针茅、羊草、星毛委陵菜、糙隐子草、麻花头冰草、冷蒿、褐沙蒿、多根葱、苔草、猪毛菜等,每个样地调查样方内出现植被种类在 34~45 种之间。

布点采样时间为 7 月 15 日前后,连续取样测量。为了研究草原退化区周围植被的演变规律,以及其分布是否具有各向异性,布点时选择退化较为严重的区域为中心,利用 GPS 定位,十字交叉布点,沿梯度方向等距离布点取样,东西方向采集 50 个样方点,南北方向采集 100 个样方点,每个试验样地设 150 个样方点,每 1 个植被样方的面积定为 1×1=1 m²。在每个样方均采集以下数据:样方所在位置的经纬度坐标、海波高度、植被总盖度、植被自然平均高度、地上生物量、植被类型、每种植被的分盖度、密度及相对密度,以及栗钙土层相关数据。3 个试验样区在卫星图上的分布位置及样地布点如图 1 所示。

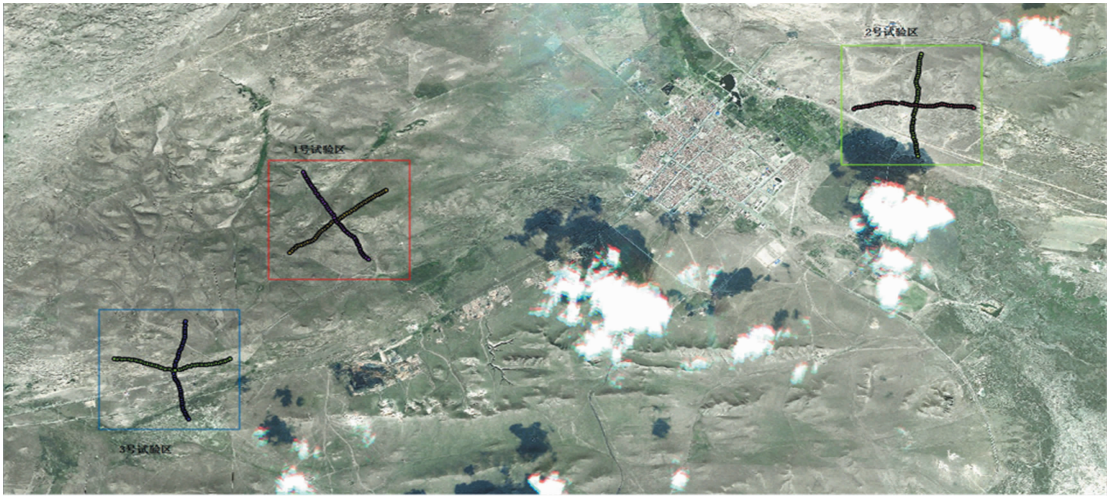


图1 3 个实验样地采样布点在卫星图上的分布位置

利用 SPSS 软件进行植被盖度的描述性统计分析。3 个样地数据均通过显著水平 $\alpha = 0.05$ 的 $K-S$ 检验,数据满足正态分布。使用 GS + 7.0 软件,进行半方差函数拟合及地统计分析^[7-13],利用 ArcGIS 10.2 地学统计分析模块进行植被盖度的变异函数建模和空间插值。

2 结果与分析

2.1 3 类地貌试验样地植被盖度的描述性统计分析
3 类试验样地的描述性统计特征如表 1 所示。

表 1 3 类试验样地植被盖度的描述性统计特征

样地类型	均值 (%)	标准差	极大值 (%)	极小值 (%)	变异系数 (%)	偏度	峰度	正态检验
坡地	40.77	1.54	70.00	0.00	3.78	-0.47	-0.39	正态
低山丘陵	32.99	1.11	70.00	10.00	3.37	0.93	1.55	正态
波状高平原	37.71	1.13	65.00	10.00	2.99	0.38	-0.30	正态

从表 1 可以看出,3 个试验样地植被盖度平均值相差不多,采样时发现,3 个样地内研究空间异质性的调查区域的植被种类都在 36 种左右,在退化较为严重的采样中心区域,植被类型均以小型草本、蒿类、葱属、委陵菜属为主,有很多一年生草本植物,且零星出现沙生灌木,如小叶锦鸡儿。这说明严重退化区域的植被类型正在发生着转变,以羊草、大针茅等为建群种的植被群落很多已被冷蒿群落所取代,典型草原正慢慢向以一年生植物和灌木为主的荒漠化草原演变。3 个样地植被盖度的变异系数均小于 10%,属于弱变异性^[14]。从表中可以看出,低山丘陵地貌样地和波状高平原地貌样地的偏度

均为正值,表明数据在右侧更为分散,坡地地貌样地的偏度为负值,表明数据在左侧更为分散^[15]。坡地地貌样地波状高平原地貌样地的峰度值均略小于零,表明植被盖度的分布略呈现平峰态,低山丘陵地貌样地的峰度值大于零,表明其植被盖度分布呈现尖峰态^[15]。利用 $K-S$ 对样本进行正态性检验, $PK-S > 0.05$,样本符合正态分布。

2.2 3 类地貌试验样地植被盖度的空间异质性分析
将 3 类地貌试验样地的植被盖度数据进行空间结构分析后得出,坡地地貌样地和低山丘陵地貌样地植被盖度变异函数曲线的变化均符合球状模型,波状高平原地貌样地可以采

用高斯模型进行拟合,如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,3 个理论模型的决定系数分别是 0.66、0.71、0.60,拟合程度较好,表明该理论变异函数模型能很好地反映植被盖度的空间结构特性。坡地地貌样地的块金值最大,较大的块金方差表明较小尺度上的某种过程不容忽视^[16],可以采取减小取样间隔的方法来增加其空间结构信息。基台值是半方差值随步长增加到一个相对稳定的水平上时对应的半方差值^[15-16],基台值越高,表示变量的空间异质性越高。坡地地貌样地的基台值最高,达到了 234.00,这说明坡地地貌样地的植被盖度的空间变异程度最大,这也验证了坡地地貌样地地块金值最大这个结果。用块金值与基台值之比 $[C_0/(C+C_0)]$ 来描述随机因素在变量空间变异过程中所起的作用的大小,低山丘陵地貌样地比值最大,值为 16.20%,波状高平原地貌样地最小,为 10.41%,坡地地貌样地的值为 11.50%。3 个试验样地的 $C_0/(C+C_0)$ 值均不高,这表明 3 个试验样地植被盖度的空异质性主要是由结构性因

素引起的,如气候、地形、土壤类型等自然因素。偏基台值与基台值的比值称之为结构比 $[C/(C+C_0)]$,从表 2 中看出,3 个试验样地的结构比均大于 75%,植被盖度均表现出较强的空间相关性,3 个试验样地内植被盖度由空间自相关引起的空间异质性占总空间异质性的 80% 以上。变程表示变量的空间相关性的作用范围,变程值的大小受到采样尺度的影响。当某采样点与已知点距离大于变程时,变量间不存在空间相关性^[17-18]。变程的大小同时也说明了植被盖度空间连续性的好坏。在本研究中,波状高平原地貌试验样地的变程最小,为 100.46 m,低山丘陵地貌试验样地变程最大,达到 604.00 m。究其原因,部分波状高平原地貌样地内盖起了大量的牛棚,虽未全部投入使用,但随着载畜量的增加,牲畜的啃食和践踏加大了对植被盖度的干扰程度,破坏了植被盖度的连续性。因此,3 个试验样地植被盖度的连续性好坏顺序为低山丘陵地貌样地优于坡地地貌试验样地,坡地地貌试验样地优于波状高平原地貌样地。

表 2 3 个试验样地植被盖度理论拟合模型及半方差分析参数

样地	理论模型	块金值 C_0	$C_0/(C+C_0)$ (%)	基台值 $C+C_0$	变程 a (m)	结构比 $C/(C+C_0)$ (%)	决定系数 r^2
坡地	球状	36.90	11.50	234.00	273.00	88.50	0.66
低山丘陵	球状	22.7	16.20	140.10	604.00	83.80	0.71
波状高平原	高斯	22.70	10.41	118.10	100.46	89.59	0.60

2.3 3 类地貌试验样地植被盖度的各向异性分析

通过空间上不同方向半方差函数图比较,可反映变量在不同方向上的变化特征。如果各个方向上的半方差图基本相同,称为各向同性,反之,则称为各向异性^[17-18]。

空间异质性不仅与观测范围有关,还与方向有着密切的联系。植被盖度由于受气候、土壤、人为等干扰因素的影响导致空间变异通常是有方向性的,用各向异性表示。为了验证植被盖度的空间变异是否具有方向性,分别研究了 3 类不同地貌试验样地的植被盖度在 0°、45°、90°、135° 4 个方向上的变异函数。不同方向的变异函数如图 2、图 3、图 4 所示。

从图 2 可以看出,坡地地貌试验样地植被盖度在 4 个方

向上的半方差函数均表现出了各向异性,各向同性不明显,这说明植被盖度的半方差值具有明显的方向性,且波动很大。其中,植被盖度在 0°(东-西向)、45°(东北-西南向)和 90°(南-北向)方向上出现了高低起伏的情况,且变化幅度较大,这说明在这 3 个方向上,植被盖度变异比较剧烈,135°(西北-东南向)方向半方差值半方差值变化相对较平缓,总体呈明显的上升趋势。经实地考察可知该试验样地内,除 135°(西北-东南向)方向大部分是打草场以外,其他方向上均有部分放牧场,有牧民居住,且东南部临近公路。因此,这些方向上的植被盖度的空间异质性可能主要受载畜量、土地利用类型等随机因素的影响。打草场内是禁牧的,草地的植被盖

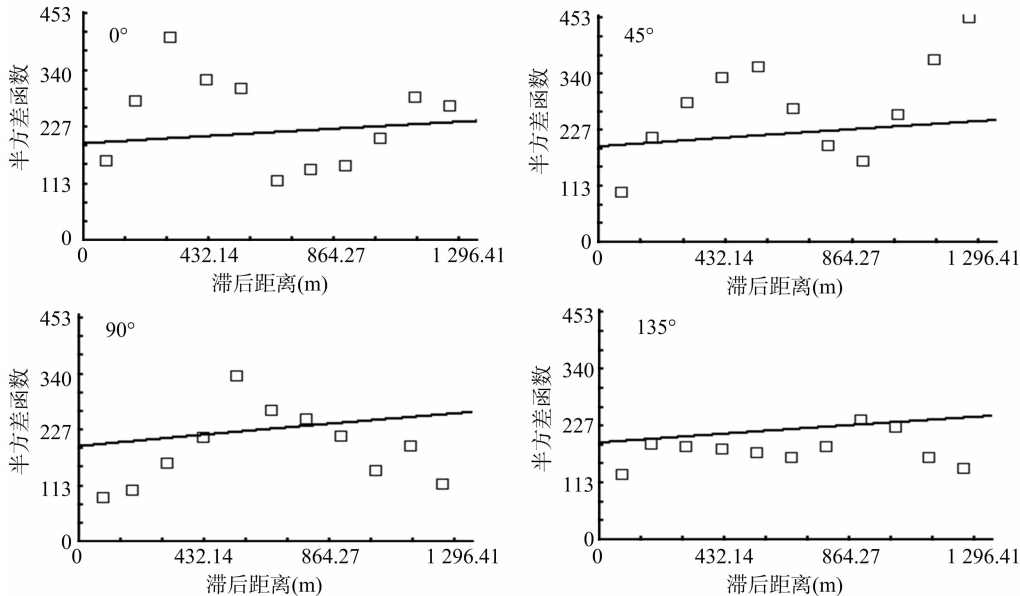


图2 坡地地貌样地植被盖度各向异性半方差函数

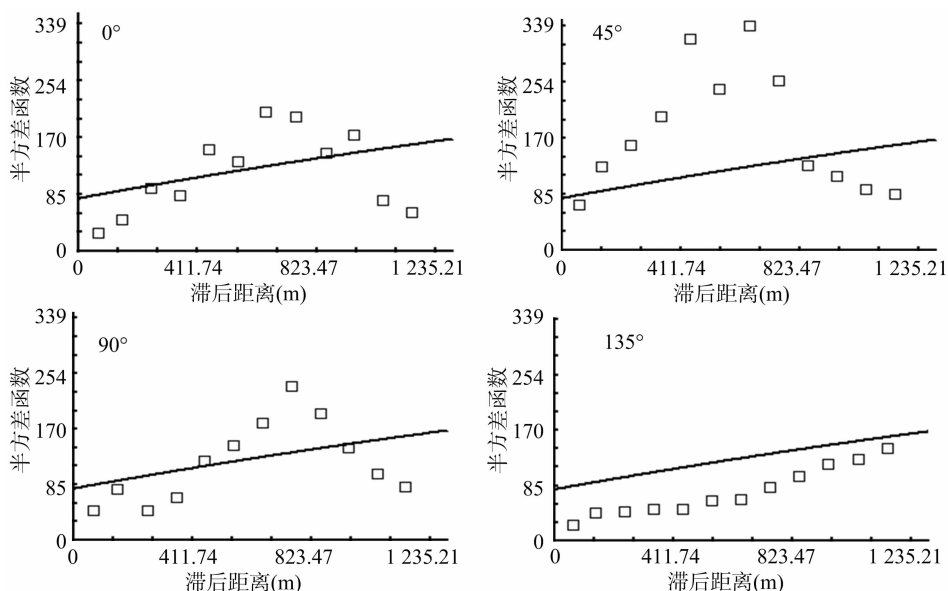


图3 低山丘陵地貌样地植被盖度各向异性半方差函数

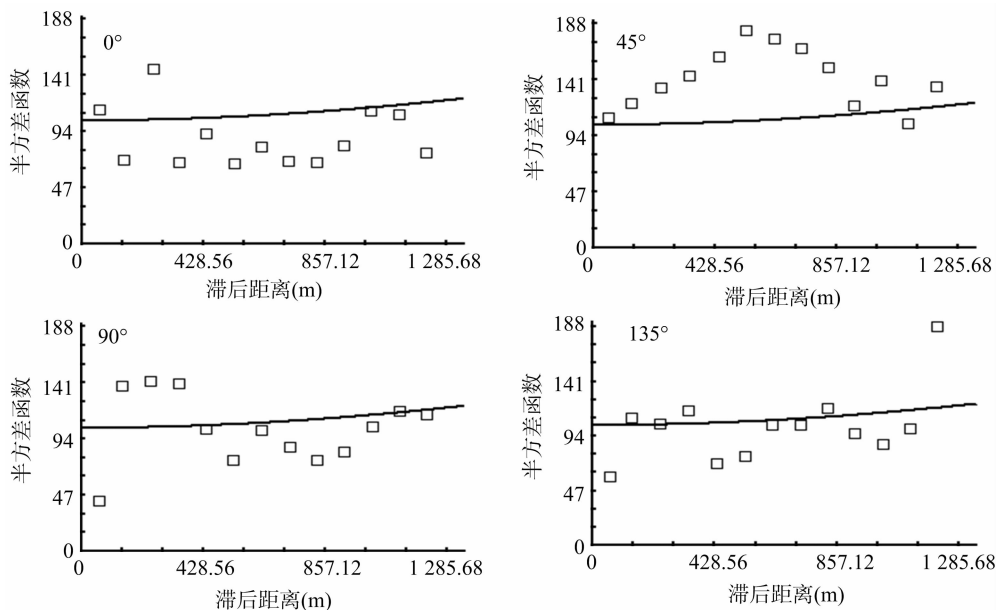


图4 波状高平原地貌样地植被盖度各向异性半方差函数

度仅仅受地形地貌、风蚀等自然因素影响,因此这个方向上植被盖度的空间变异不大。数据研究结果与实际情况相符。

从图3可以看出,低山丘陵地貌试验样地植被盖度在4个方向上的半方差函数均表现出了各向异性,各向同性不明显,这说明植被盖度的半方差值具有明显的方向性,且波动很大。其中,植被盖度在0°(东-西向)、45°(东北-西南向)和90°(南-北向)方向上出现了高低起伏的情况,且变化幅度较大,这说明在这3个方向上植被盖度变异比较剧烈;135°(西北-东南向)方向半方差值半方差值变化相对较平缓,近似一条直线,总体呈明显的上升趋势。135°(西北-东南向)方向半方差函数值与其他方向的差异性很大,这说明该方向上植被盖度的变化是独立的、随机的。经实地考察可知该试验样地内,除135°(西北-东南向)方向大部分是打草场以外,其他方向上均有部分放牧场,有牧民居住。因此,这些方

向上植被盖度的空间异质性可能主要受载畜量、土地利用类型等随机因素的影响。135°(西北-东南向)方向植被破坏较为严重,已禁牧多年,植被正处于恢复期,因此表现出来空间变异不明显。数据研究结果与实际情况相符。

从图4中可以看出,波状高平原地貌试验样地在4个方向上植被盖度的半方差函数变化趋势各不相同,表现出了各向异性,这说明该试验样地植被盖度的半方差值具有明显的方向性。0°(东-西向)和90°(南-北向)方向表现出了局部的各向同性,这说明这2个方向上的对植被盖度的干扰因素类似。45°(东北-西南向)方向上的变异程度最为突出,经实地考察可知,该方向恰巧是采石矿的位置,由此说明,人为因素对草原植被的干扰要强于其他自然因素,能够使植被盖度甚至是植被类型发生颠覆性变化,是影响植被各要素空间结构性发生变异的主导因素。

2.4 3 类地貌试验样地植被盖度的空间分布

经过前面的研究和数据分析可知,坡地样地、低山丘陵样地和波状高平原样地植被盖度的最佳变异函数拟合模型分别是球状模型、球状模型和高斯模型,3 个样地的试验数据均通过 K-S 检验,符合正态分布。对数据进行探索性分析后发

现,3 个样地的植被盖度均存在一阶或二阶趋势,不满足普通过克里金插值法和简单克里金插值法要求的二阶平稳假设理论,因此选择泛克里金插值法对 3 个试验样地内植被盖度进行空间插值。经过插值后得到 3 个试验样地植被盖度的空间分布图如图 5 所示。

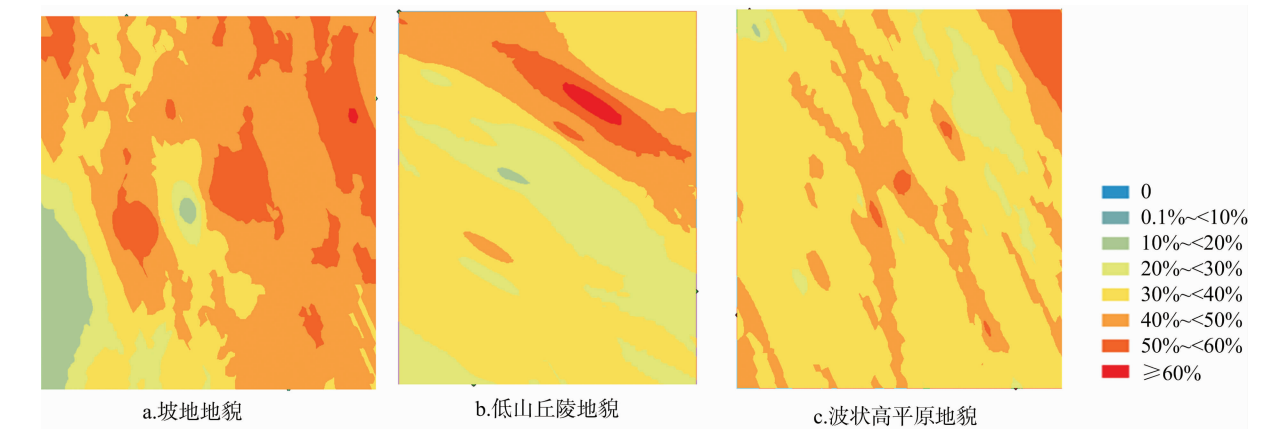


图5 3 个试验样地的植被盖度空间分布

从图 5 中可以看出,3 个样地中,植被盖度均不太高,坡地地貌样地的植被盖度最高,这与前面对植被盖度的描述性统计分析中得出的坡地地貌样地植被盖度均值最高这一结论一致;低山丘陵地貌样地内植被盖度的连续性最好,坡地和波状高平原地貌样地内植被盖度的连续性较为接近,这与前面研究中得出结论一致,即低山丘陵地貌样地的变程最大,其余 2 个样地的变程远小于低山丘陵地貌样地且其值较为接近;坡地地貌样地的空间异质性最高,这与该样地基台值最高这一结论相符。

将 3 个试验样地内植被盖度划分为 6 个等级区间,分别是 < 10%、10% ~ < 30%、30% ~ < 40%、40% ~ < 50%、50% ~ < 60%、≥60%,3 个试验样地每个等级区间面积占样地总面积的百分比如表 3 所示。

等级区间	占比(%)		
	坡地地貌样地	低山丘陵地貌样地	波状高平原地貌样地
<10%	0.066	0	0
10% ~ <30%	13.139	22.753	7.167
30% ~ <40%	15.915	54.417	67.131
40% ~ <50%	47.713	17.043	22.227
50% ~ <60%	22.749	4.914	3.443
≥60%	0.418	0.873	0.032

由表 3 可看出,3 个样地内大部分区域的植被盖度均在

30% ~ 50% 范围内,波状高平原样地占比几乎可以达到 90%;植被盖度在 60% 以上的区域面积均很小,波状高平原地貌样地中,这部分面积仅占样地总面积的 0.032%,几乎可以忽略不计;坡地地貌样地内,有接近 50% 区域的植被盖度在 40% ~ 50% 范围内;低山丘陵和波状高平原地貌样地有一半以上区域的植被盖度介于 30% ~ 40% 之间,其中,波状高平原地貌样地该范围内的面积几乎达到样地总面积的 70%;植被盖度达到 50% 以上的区域,面积最大的是坡地地貌样地,最小的是波状高平原地貌样地;植被盖度不到 30% 的区域中,面积最大的是低山丘陵地貌样地,最小的是波状高平原地貌样地。

2.5 植被盖度空间插值的精度评价

通过地学统计理论的克里金空间插值对 3 类地貌试验样地植被盖度的预测性制图的过程,就是通过对采样点植被盖度数据的计算和分析,得出各个空间位置的植被盖度的相对距离和变异量,从而完成对未知点植被盖度的预测^[19-21]。

由表 4 可知,通过对 3 个试验样地植被盖度的克里金插值预测值与实测值的对比分析发现,预测 3 个样地植被盖度最大值的相对误差介于 2.18% ~ 9.59% 之间,均远远小于预测最小值的相对误差,因此,3 个样地对植被盖度高值区的估计要好于对低值区的估计;除低山丘陵样地外,其他 2 个样地植被盖度的预测均值都低于实测值;3 个样地植被盖度均值的相对误差介于 3.48% ~ 8.49% 之间,坡地样地植被盖度均值的预测相对误差最小,为 3.48%,波状高平原样地植被盖度均值的相对误差最大,为 8.49%。

表 4 植被盖度插值结果误差分析

样地	预测植被盖度(%)			实测植被盖度(%)			相对误差(%)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
坡地	1.62	65.62	40.77	0	70.00	42.24	100.00	6.25	3.48
低山丘陵	12.02	68.47	35.43	10.00	70.00	32.99	16.77	2.18	6.89
波状高平原	11.80	63.29	34.51	10.00	70.00	37.71	15.25	9.59	8.49

本研究针对 3 类不同地貌试验样地做的植被盖度预测结果与实际情况基本相符,其相对误差可以满足本研究的要求。

3 结论

本研究采用传统统计学和地学统计相结合的方法,以典型草原 3 类典型地貌的试验样地内的植被盖度为研究对象,利用半方差函数讨论了其空间结构,研究了其空间异质性及各向异性,最后通过 ArcGIS10.2 地学统计分析模块,采用克里金插值法对植被盖度变异函数进行了建模和空间插值,讨论了其空间分布情况,并对 3 个试验样地的植被盖度空间插值的精度进行了评价。通过以上研究分析,得出以下结论:(1)3 类地貌试验样地的植被盖度均值较为接近,在 32.99%~40.77%之间,其变异系数值均小于 10%,属于弱变异性范围。(2)坡地地貌试验样地、低山丘陵地貌试验样地、波状高平原地貌试验样地植被盖度的变异函数曲线分别可用球状函数、球状函数和高斯函数来拟合,拟合系数分别是 0.66、0.60、0.71;坡地样地植被盖度的块金值和基台值均是 3 个样地中最高的,这说明了该样地植被盖度的空间变异程度最大; $C_0/(C+C_0)$ 值的大小顺序是低山丘陵样地>坡地样地>波状高平原样地,因此,随机因素在 3 个样地植被盖度的空间变异中所起的作用的大小顺序同上;3 类不同地貌试验样地的结构比 $[C/(C+C_0)]$ 均大于 75%,植被盖度均表现出较强的空间相关性,且由空间自相关部分引起的空间异质性占到总空间异质性的 80% 以上;3 个试验样地中植被盖度连续性最好的是低山丘陵地貌样地,其次是坡地地貌试验样地,最后是波状高平原地貌样地。(3)3 类地貌试验样地的植被盖度均表现出了各向异性,各向同性不显著,空间分布格局较为复杂。(4)通过对 3 个样地植被盖度的定量研究发现,3 个样地内大部分区域的植被盖度均在 30%~50% 范围内;植被盖度在 60% 以上的区域面积均很小,波状高平原地貌样地中,这部分面积仅占样地总面积的 0.032%,几乎可以忽略不计;坡地地貌样地内,有接近 50% 区域的植被盖度在 40%~50% 范围内;低山丘陵和波状高平原地貌样地有一半以上区域的植被盖度介于 30%~40% 之间,其中,波状高平原地貌样地该范围内的面积几乎达到样地总面积的 70%;植被盖度达到 50% 以上的区域,面积最大的是坡地地貌样地,最小的是波状高平原地貌样地;植被盖度不到 30% 的区域中,面积最大的是低山丘陵地貌样地,最小的是波状高平原地貌样地。(5)3 个样地中对植被盖度高值区的估计均好于对低值区的估计;对植被盖度的预测结果与实际情况基本相符,其相对误差满足本研究的要求。

参考文献:

- [1] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 沙地退化植被恢复过程中植被的空间异质性[J]. 生态环境学报,2010,19(7):1513-1518.
- [2] 李哈滨,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,1998,9(6):651-657.
- [3] Rhoton F E, Lindbo D L. A soil depth approach to soil quality assessment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 52(1):66-72.
- [4] 王庆成,程云环. 土壤养分空间异质性与植物根系的觅食反应[J]. 应用生态学报,2004,15(6):1063-1068.
- [5] 杨宝珍,董学军. 油蒿的蒸腾作用及其群落的水分状况[J]. 植物生态学报,1994,18(2):161-170.
- [6] 汤国安,杨 昕. 地理信息系统空间分析与实验教程[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2012:300-350.
- [7] Szymanowski M, Kryza M, Spallek W. Regression - based air temperature spatial prediction models; an example from Poland[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2013, 22(5):577-585.
- [8] 祝锦霞,许红卫,王 珂,等. 基于 GIS 和地统计学的低丘红壤地区三种土壤性质空间变异性研究[J]. 土壤,2008,40(6):960-965.
- [9] 颜 亮,周广胜,张 峰,等. 平晓燕内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析[J]. 生态学报,2012,32(13):4017-4023.
- [10] 尹 亮,崔 明,周金星,等. 岩溶高原地区小流域土壤厚度的空间变异特征[J]. 中国水土保持科学,2013,11(2):51-58.
- [11] 张国耀,程先富,鲍伟佳,等. 小流域土壤有机质和全磷空间变异分析——以安徽省舒城县龙潭小流域为例[J]. 应用与环境生物学报,2011,17(2):169-173.
- [12] 黄 琛,张 宇,王 静,等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被的空间变异[J]. 植物生态学报,2014,38(11):1184-1193.
- [13] 杨兆平,欧阳华,徐兴良,等. 五道梁高寒草原土壤水分和植被盖度空间异质性的地统计分析[J]. 自然资源学报,2010,25(3):426-434.
- [14] 薛正平,杨星卫,段项锁,等. 土壤养分空间变异及合理取样数研究[J]. 农业工程学报,2002,18(4):6-9.
- [15] 马风云,李新荣,张景光,等. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报,2006,17(5):789-795.
- [16] 王 军,傅伯杰,邱 扬,等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征:半变异函数[J]. 地理学报,2000,55(4):428-438.
- [17] 王学军. 空间分析技术与地理信息系统的结合[J]. 地理研究,1997,16(3):70-73.
- [18] 李洪建,高玉凤,严俊霞,等. 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征[J]. 环境科学,2014,35(11):4313-4320.
- [19] Gao T, Xu B, Yang X C, et al. Using MODIS time series data to estimate aboveground biomass and its spatio-temporal variation in Inner Mongolia's grassland between 2001 and 2011[J]. International of Journal Remote Sensing, 2013, 34(21):7796-7810.
- [20] 王志国,尚士友,闫秀芳. 典型草原植被盖度计算与试验插值对比分析[J]. 江苏农业科学,2015,43(2):310-313.
- [21] 王 珂,沈掌泉, Bailey J S, 等. 精确农业田间土壤空间变异与采样方式研究[J]. 农业工程学报,2001,17(2):33-37.