

李 岩,尚士友,柳智鑫,等. 典型草原植被盖度与栗钙土层厚度空间异质性的相关性研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):411-418.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.120

典型草原植被盖度与栗钙土层厚度空间异质性的相关性研究

李 岩¹, 尚士友², 柳智鑫¹, 德力格尔³

(1. 内蒙古电子信息职业技术学院电子工程系, 内蒙古呼和浩特市 010070; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 内蒙古呼和浩特市 010018;
3. 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 个试验区内栗钙土层厚度和植被盖度为研究对象,探讨了其空间结构和异质性,讨论了植被盖度与栗钙土层厚度在空间分布上的相关关系,定量揭示了两者空间变异和协同演变的规律。通过空间分布图的对比,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,更为通过高光谱影像解译代表性植被的光谱数据、实现对栗钙土层厚度的监测提供了科学依据和基础数据。

关键词:典型草原;植被盖度;栗钙土层厚度;空间异质性;相关性

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)11-0411-08

栗钙土层是典型草原土壤的主要组成结构,栗钙土层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,其厚度在 10~40 cm 之间。植被盖度指示着景观环境因子的适宜程度,是自然环境变化和人类活动所引起的景观过程的综合结果,因而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主导性表征^[1],更是指示生态系统变化的重要指标。

土壤厚度和植被盖度都存在一定的空间异质性,即不同的空间位置上土壤厚度和植被的盖度存在一定的差异。尽管土壤的各类特征与植物的格局不一定是完全对应的,但它们都呈现出明显的异质性,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]。

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^[6-7]。幅员辽阔的典型草原上,植被盖度和栗钙土层厚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和栗钙土层厚度的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 3 类不同地貌的 3 个试验区内栗钙土层厚度和植被盖度为研究对象,探讨了其空间结构和异质性,讨论了植被盖度与栗钙土层厚度在空间分布上的相关关系,定量揭示了两者空间变异和协同演变的规律。通过空间分布图的对比,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。

收稿日期:2015-11-21

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研究。E-mail:shangshiyu@163.com。

1 试验设计与数据预处理

选择内蒙古锡林郭勒盟巴彥高勒镇南部典型草原的坡地、低山丘陵、波状高原 3 类地貌的试验样地为研究对象,以退化较为严重的区域为中心,沿梯度方向十字交叉布点,间隔距离为 50 m,每个方向踏查距离为 2 500 m,即每个方向设试验样方 50 个,每个样地参与数据分析的样方数为 100 个。

利用 SPSS 软件进行植被盖度和栗钙土层层厚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学统计分析^[8-13],利用 ArcGIS 10.2 地学统计分析模块进行植被盖度和栗钙土层厚度的变异函数建模和空间插值。

2 植被盖度及栗钙土层厚度的空间异质性研究

2.1 植被盖度的空间异质性研究

2.1.1 3 类地貌试验样地植被盖度的描述性统计分析 3 个试验样地的描述性统计特征如表 1 所示。

从表 1 中看出 3 个试验样地植被盖度平均值相差不多,坡地地貌样地的植被盖度的平均值高,是 40.77%,波状高原地貌样地植被盖度的平均值居中,低山丘陵地貌样地的植被盖度最低,是 32.99%。采样时发现,虽然 3 个试验样地的地貌不同,但在 3 个样地内取样时,均是以退化较为严重的区域为采样中心点,这些区域大多是已经沙化的风蚀洼地,栗钙土层厚度已经消失,取而代之的是已经沙化的沙土。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,且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。变异系

数(CV)表示随机变量的离散程度,查阅相关研究资料,认为 $CV \leq 10\%$ 为弱变异性, $10\% < CV < 30\%$ 为中等变异性, $CV \geq 30\%$ 为强变异性^[14]。经数据处理结果可看出,3个样地植被盖度的变异系数均小于10%,属于弱变异性。偏度^[15]表示数据的左右对称性,从表1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。

表 1 3 个试验样地植被盖度的描述性统计特征

样地	盖度(%)				变异系数 CV (%)	偏度	峰度	正态检验
	均值	标准差	极大值	极小值				
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

2.1.2 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。

3 类地貌样地的决定系数分别是 0.66、0.71、0.60,拟合

程度较好,表明该理论变异函数模型均能很好地反映植被盖度的空间结构特性。3 类地貌试验样地半方差值理论拟合模型如图1所示。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,变异函数曲线变化不平稳,这表明影响这3个样地植被盖度的各种生态过程在整个变程范围之内所起作用的重要程度大不相同。

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	基台值 $C + C_0$	$C_0 / (C + C_0)$ (%)	变程 (m)	结构比 $C / (C + C_0)$ (%)	决定系数 r^2	RSS
坡地	球状	36.90	234.00	11.50	273.00	88.50	0.66	9 363.00
低山丘陵	球状	22.70	140.10	16.20	604.00	83.80	0.71	1 346.00
波状高平原	高斯	22.70	118.10	10.41	100.46	89.59	0.60	8 180.00

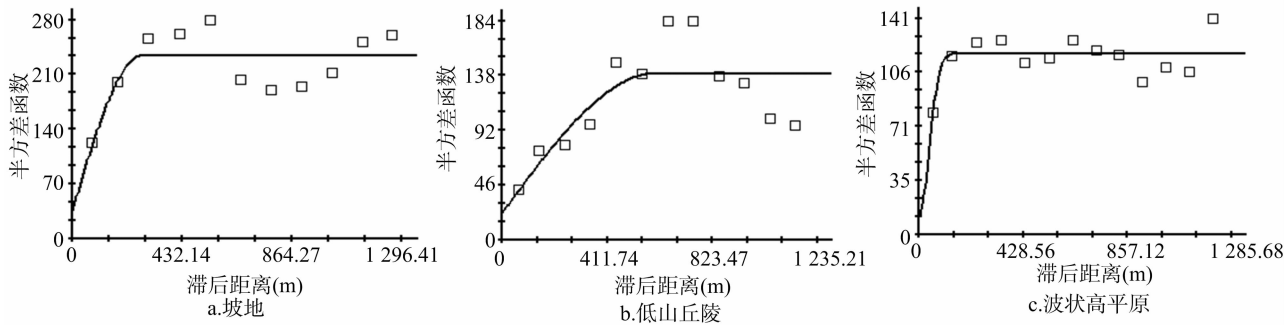


图1 不同地貌样地植被盖度半方差值球状拟合模型

从表2中可以看出,坡地地貌样地的块金值最大,较大的块金方差表明在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块金值最大这个结果。用块金值与基台值之比来描述随机因素在变量空间变异过程中所起的作用大小。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,值为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间异质性主要是由于结构性因素引起的,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。

变程表示了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],该点的数据值无论用于内插还是外推均是无效的,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 m。究其原因,部分波状高平原地貌样地内盖了大量的牛棚,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要优于坡地地貌试验样地,坡地地貌试验样地要优于波状高平原地貌样地。

2.1.3 3 类地貌试验样地植被盖度的空间分布 在植被盖度空间变异理论及结构分析的基础上,利用克里金法对3个

试验研究区内的植被盖度进行空间插值分析。克里金插值法在利用已知点赋予权重后求得未知点植被盖度的同时,不仅考虑了实测点与预测点的距离,而且通过半变异函数的空间分析功能,充分考虑了实测点的空间分布与预测点的空间方位关系。

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,不满足普通克里金插值法和简单克里金插值法要求二阶平稳假设理论,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见图 2。

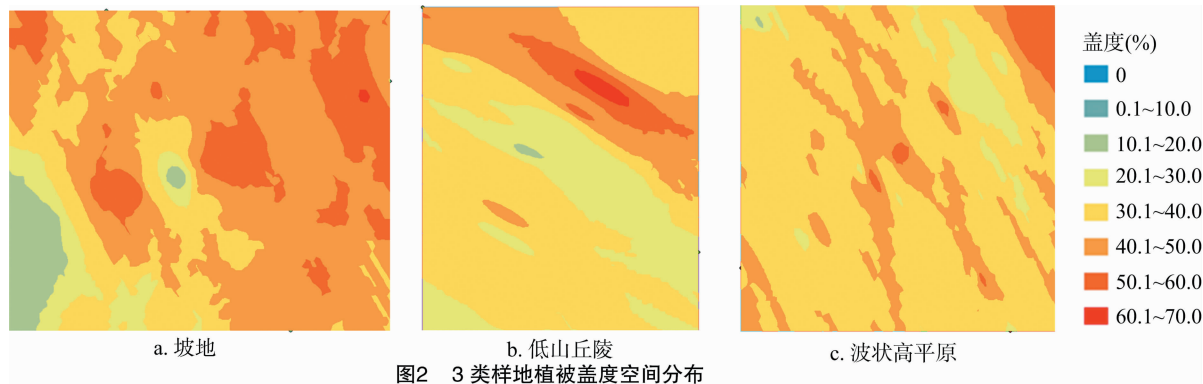


图2 3 类样地植被盖度空间分布

从图 2 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的结论一致,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。

对于坡地地貌样地而言,东部区植被盖度要明显好于西部区,且整个样地内植被盖度达到 40% 以上的区域在整个样地内占大部分范围;植被盖度在 10% 以下的区域主要集中在样地的西部偏南一点,经实地勘察后得知,该区域内有很多沙斑,植株低矮、盖度较低,甚至出现沙生植被。

对于低山丘陵地貌样地而言,整个样地内植被盖度主要

在 30% ~ 40% 范围内。样区北部 1 个东南向带状区域的植被盖度要明显好于其他区域。经实地勘察后得知,样区的南部几乎均为放牧场,牲畜对植被的干扰程度较大,北面大部分区域有蒙古柳生长,栗钙土层较厚,少有风蚀沙斑,植被盖度较好。

对于波状高平原地貌样地而言,样地内大部分区域的植被盖度在 30% ~ 40%。该样地整体受到人为干扰程度较大,样地东部有采石矿,西部有铁路,样地中北部盖起大量牛棚,牲畜的啃食和踩踏对植被的破坏作用不可小觑,采样时发现,样地南部除风蚀坑外还有个垃圾场。因此,波状高平原地貌样地在人为和自然等多种干扰因素影响下,样地内植被总盖度不高。

为了更清晰地展示每个样地内植被盖度在各个等级区间的面积分配情况,特制作饼图见图 3。

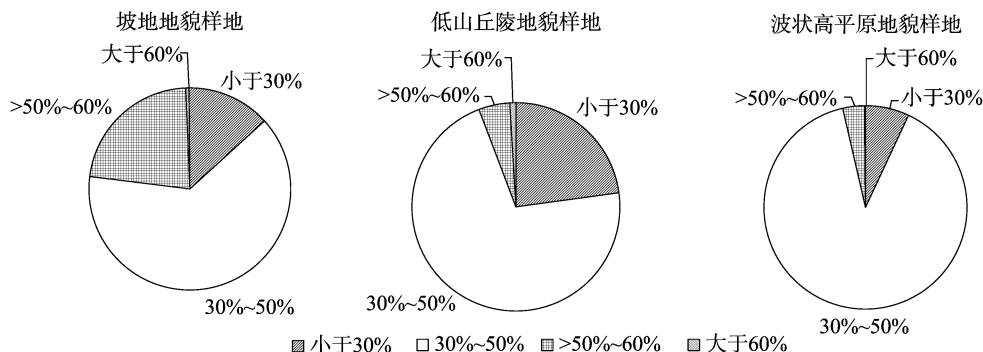


图3 3 类地貌试验样地植被盖度各等级区间面积百分比

由图 3 可知,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 30% ~

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% ~ 50% 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,最小的是波状高原地貌样地。
2.1.4 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]。

3 个样地植被盖度克里金空间插值结果误差分析见表 3。

表 3 植被盖度插值结果误差分析表

样地编号	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	最小值间	最大值间	平均值间
样地 1	1.62	65.62	40.77	0.00	70.00	42.24	100.00	6.25	3.48
样地 2	12.02	68.47	35.43	10.00	70.00	32.99	16.77	2.18	6.89
样地 2	11.80	63.29	34.51	10.00	70.00	37.71	15.25	9.59	8.49

注:样地 1 为坡地地貌样地;样地 2 为低山丘陵地貌样地;样地 3 为波状高原样地。

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 个样地中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%,波状高原样地植被盖度均值的相对误差最大,为 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。

2.2 栗钙土层厚度的空间异质性研究

2.2.1 3 类地貌试验样地栗钙土层厚度的描述性统计分析 3 个试验样地栗钙土层厚度的描述性统计特征如表 4 所示。从表 4 可看出,3 个试验样地的栗钙土层厚度的均值都不高,最高的坡地试验样地的栗钙土层厚度均值也只有 10.93 cm,最薄的是低山丘陵试验样地,只有 5.91 cm。3 个试验样地的变异系数分别为 85.32%、144.50%和 9.58%,坡

地试验样地和低山丘陵试验样地的栗钙土层厚度达到强变异程度,波状高原试验样地的栗钙土层厚度的变异属于弱变异范围。采样时发现,3 个试验样地内,均有栗钙土层厚度为 0 的区域存在,这些区域已经完全被沙化,如果得不到有效控制,风蚀沙坑的面积将会继续扩大。坡地样地的坡顶多为裸露的地表,没有栗钙土层,只有沙土和大小不一的碎石,但坡中段及坡底段栗钙土土层较厚,局部地区可达到 50~60 cm。低山丘陵地貌试验样地内,多年前有大量牧民居住地,因此对栗钙土层和植被的干扰较大。结合前面植被盖度的分析研究也可以看出,经过多年的禁牧,植被可以慢慢得到恢复,但遭到破坏的栗钙土层却很难在短时间内恢复。3 类不同地貌试验样地栗钙土层厚度试验数据的偏度均为正值,表明试验数据在右侧更为分散。坡地试验样地和低山丘陵试验样地的峰度值均大于 0,表明其栗钙土层厚度分布均呈现尖峰态,波状高原试验样地的峰度值小于 0,表明其栗钙土层厚度分布均呈现平峰态,利用 K-S 对样本进行正态性检验,坡地地貌试验样地数据为近似正态,其他 2 个试验样地为偏态。

表 4 3 个试验样地栗钙土层厚度的描述性统计特征

样地	栗钙土层厚度(cm)				变异系数 CV(%)	偏度	峰度	正态检验
	均值	标准差	极大值	极小值				
坡地	10.93	9.33	30.00	0.00	85.32	0.43	0.48	近正态
低山丘陵	5.91	8.54	30.00	0.00	144.50	1.57	1.37	偏态
波状高原	10.47	1.00	30.00	0.00	9.58	0.50	-1.10	偏态

2.2.2 3 类地貌试验样地栗钙土层厚度的空间异质性分析 通过对 3 类不同地貌试验样地的栗钙土层厚度数据进行空间结构分析后得出(表 5),坡地地貌样地和低山丘陵地貌样地栗钙土层厚度变异函数曲线的变化符合球状模型,波状高原地貌样地栗钙土层厚度变异函数曲线的变化符合指数模

型。决定系数分别是 0.78、0.87、0.93,拟合程度较高,表明该理论变异函数模型能很好地反映栗钙土层厚度的空间结构特性。3 类地貌试验样地栗钙土层厚度的半方差值理论拟合模型如图 4 所示。

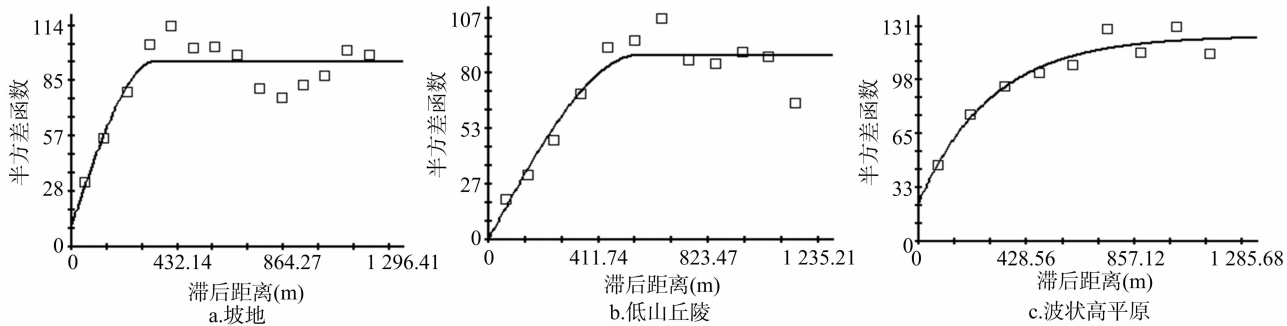


图4 不同地貌样地栗钙土层厚度半方差值球状拟合模型

从图 4 中可以看出,3 类不同地貌类型试验样地中,波状高原试验样地栗钙土层厚度的变异函数曲线变化幅度不大,较为平缓,说明在整个尺度上各种生态过程所起作用均不可忽视;坡地地貌样地和低山丘陵地貌样地的栗钙土层厚度的变异函数曲线起伏较大,表明影响这 2 个样地栗钙土层厚度的各种生态过程在整个变程范围之内所起的作用重要程度大不相同。

表 5 中列出了 3 个试验样地栗钙土层厚度的理论拟合模型和半方差分析的各个参数。可以看出,波状高原地貌样地的块金值最大,低山丘陵地貌样地的块金值最小;块金值与基台值的比值用来描述随机因素在变量空间变异中所起作用的大小,波状高原地貌样地比值最大,值为 19.25%,低山

丘陵地貌样地最小,值为 0.79%,坡地地貌样地的值居中;3 类地貌试验样地的结构比 $[C/(C+C_0)]$ 均大于 75%,栗钙土层厚度均表现出较强的空间相关性。低山丘陵地貌样地内栗钙土层厚度的空间相关性最强,其空间异质性绝大部分来自自相关部分,比值已高达 99.21%。以上 3 个参数同时说明了一个问题,在波状高原地貌样地内,随机因素在栗钙土层厚度的变化过程中起到了重要作用;低山丘陵地貌样地的栗钙土层虽然已遭到居民、牲畜等因素的干扰,但经过多年的远离居民和牲畜的休养生息,结构因素(如气候、风蚀、土壤类型等)的干扰在其异质化过程中已经起主要作用。较大的块金方差表明:在 50 m 的采样间距上,某种过程不容忽视,可以采用缩小取样间隔距离的方法以丰富其空间结构信息。

表 5 3 个试验样地栗钙土层厚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	基台值 $C+C_0$	$C_0/(C+C_0)$ (%)	变程 (m)	结构比 $C/(C+C_0)$ (%)	决定系数 r^2	RSS
坡地地貌	球状	11.70	95.20	12.29	341.00	87.71	0.78	1 330.00
低山丘陵	球状	0.70	88.90	0.79	565.00	99.21	0.87	1 085.00
波状高原	指数	24.00	124.70	19.25	864.00	80.75	0.93	378.00

波状高原地貌样地的基台值最高,达到了 124.70,这说明波状高原地貌样地的栗钙土层厚度的空间变异程度最大,这也验证了波状高原地貌样地块金值最大这个结果。

变程的大小不仅给出了变量的空间相关性有效范围,同时也说明了栗钙土层厚度空间连续性的好坏。在本研究中,波状高原地貌试验样地的变程最大,达到 864.00 m,坡地地貌试验样地变程最小,为 341.00 m。因此,3 类地貌试验样地栗钙土层厚度的连续性好坏顺序为波状高原地貌样地>低山丘陵地貌样地>坡地地貌试验样地。变程可以用来指导采样间距设计是否有效,一般的研究认为在块金效应不大时,可以将变异函数变程的 1/2 作为采样间距的上限^[20]。因此,对于低山丘陵地貌样地,块金值仅为 0.70,可以将采样距离放大至 282.5 m,作为采集栗钙土层厚度数据时取样间隔的上限值。

2.2.3 3 类地貌试验样地栗钙土层厚度的空间分布 在栗钙土层厚度空间变异理论及结构分析的基础上,利用克里金法对 3 个试验研究区内的栗钙土层厚度进行空间插值分析。

经过前面的研究和数据分析可知,坡地、低山丘陵和波状高原 3 个试验样地内栗钙土层厚度的最佳变异函数拟合模型分别是球状模型、球状模型和指数模型,数据经变换后通过 K-S 检验,符合正态分布,对数据进行探索性分析后发现,3 个样地的栗钙土层厚度亦均存在一阶或二阶趋势,不满足普通克里金插值法和简单克里金插值法要求二阶平稳假设理论,因此选择泛克里金插值法对 3 个试验样地内栗钙土层厚度进行空间插值。

经过插值后得到 3 个试验样地栗钙土层厚度的空间分布如图 5 所示。

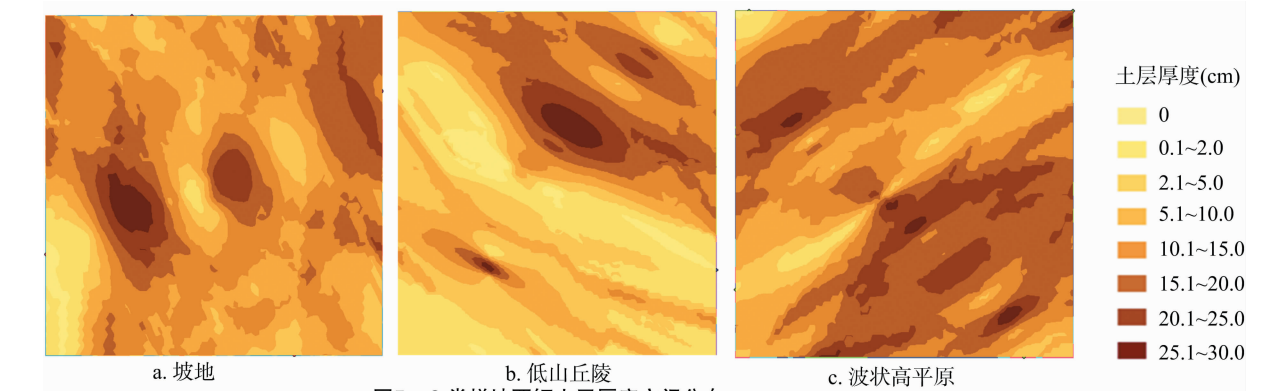


图5 3 类样地栗钙土层厚度空间分布

从图 5 可以看出,3 个样地中,栗钙土层厚度均较薄,低山丘陵地貌样地的栗钙土层厚度最薄,这与前面对栗钙土层厚度的描述性统计分析中得出的低山丘陵地貌样地栗钙土层厚度均值最小这一结论一致;波状高原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。

对于坡地地貌样地而言,东北-西南走向带状分布的栗钙土层较其他区域略厚,整个样地内栗钙土层厚度在 10~

20 cm 范围内的区域约占整个样地的 50% 左右;栗钙土层厚度在 5 cm 以下的区域主要集中在样地的西部偏南一点。

低山丘陵地貌样地内栗钙土层较厚的区域位于试验样地的东北部,呈带状分布,而中部和西南部的栗钙土层厚度较薄。

波状高原地貌样地内有 50% 以上区域的栗钙土层厚度在 10~20 cm 范围内。样地东部的采石矿,西部的铁路运

输线、中北部大量的牛棚和日益增加的载畜量等因素均对该样地的栗钙土厚度产生了较大的干扰。

为了更清晰展示每个样地内栗钙土厚度在各个等级区间的面积分配情况,特制作饼图见图 6。

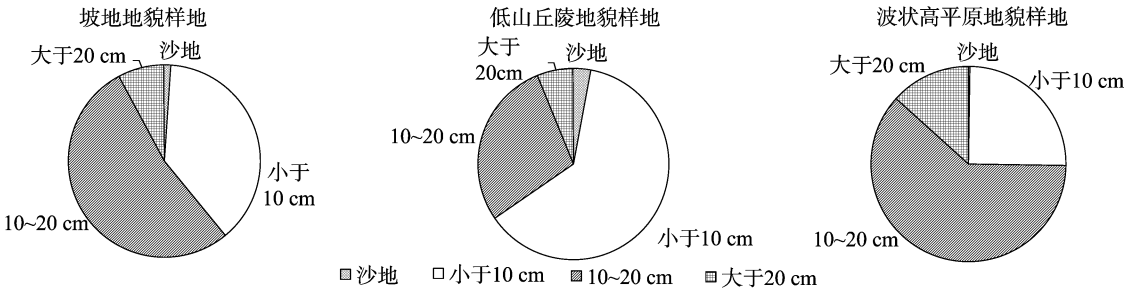


图6 3类地貌试验样地栗钙土厚度各等级区间面积分布

由图 6 可以看出,3 个样地栗钙土厚度均很薄;3 个样地内沙地面积比例均不太大,最小的是波状高平原样地,仅为 0.227%,最大的是低山丘陵样地,也只有 3.158%;坡地地貌试验样地内栗钙土厚度主要集中在 10~20 cm,这部分面积占到样地总面积的 53.055%;低山丘陵地貌试验样地内,除了沙地和栗钙土厚度大于 20 cm 这 2 部分面积外,其他各等级区间多占的面积比例差距不大;波状高平原地貌试验

样地内大部分区域内栗钙土厚度在 10 cm 以上,约占到总面积的 75%,其中在 10~20 cm 范围内的面积比例占该样地总面积的 61.421%。3 个样地中,栗钙土厚度大于 20 cm 的面积比例均很小,最大的是波状高平原地貌试验样地,也仅占样地总面积的 13.200%。

2.2.4 栗钙土厚度空间插值的精度评价 3 个试验样地栗钙土厚度克里金空间插值结果误差分析如表 6 所示。

表 6 栗钙土厚度插值结果误差分析

样地编号	预测栗钙土厚度 (cm)			实测栗钙土厚度 (cm)			相对误差 (%)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值间	最大值间	平均值间
样地 1	0.01	29.69	11.65	0.00	30.00	10.93	100.00	1.02	6.20
样地 2	2.06	30.01	6.91	0.00	30.00	5.91	100.00	0.03	14.48
样地 2	0.15	29.96	12.53	0.00	30.00	10.47	100.00	0.13	16.44

注:样地 1 为坡地地貌样地;样地 2 为低山丘陵地貌样地;样地 3 为波状高平原样地。

通过对 3 个试验样地栗钙土厚度的克里金插值预测值与实测值的对比分析发现,预测 3 个样地栗钙土厚度最小值的相对误差虽均为 100%,但由于其实测值均为 0,因此该相对误差对结果不产生影响,但对低山丘陵样地栗钙土厚度的预测中丢失的低值区信息较多;预测 3 个样地栗钙土厚度最大值的相对误差介于 0.03%~1.02%之间,与实测值非常接近,因此,3 个样地中对植被盖度高值区的估计要远远好于对低值区的估计;3 个样地栗钙土厚度的预测均值都高于实测值;3 个样地栗钙土厚度均值的相对误差介于 6.20%~16.44%之间,坡地样地栗钙土厚度均值的预测相对误差最小为 6.20%,波状高平原样地植被盖度均值的相对误差最大为 16.44%。

采样点与预测点间距离的大小、采样点数目多少以及采样点的分布情况之间都影响其预测值的大小,采样点与预测点的距离越近,采样点数目越多,则预测结果的相对误差越小,精度就越高^[20~21]。不论是植被盖度还是栗钙土厚度,波状高平原样地的预测相对误差均大于其他 2 个样地,在以后的研究过程中,应适当的增加采样点的数目,并尽可能使其均匀分布,可以减少预测的相对误差^[20~21]。

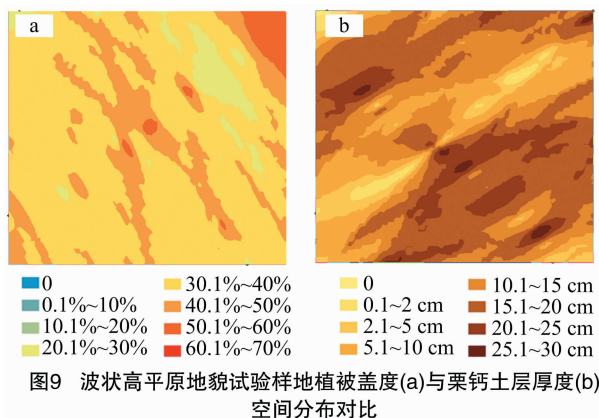
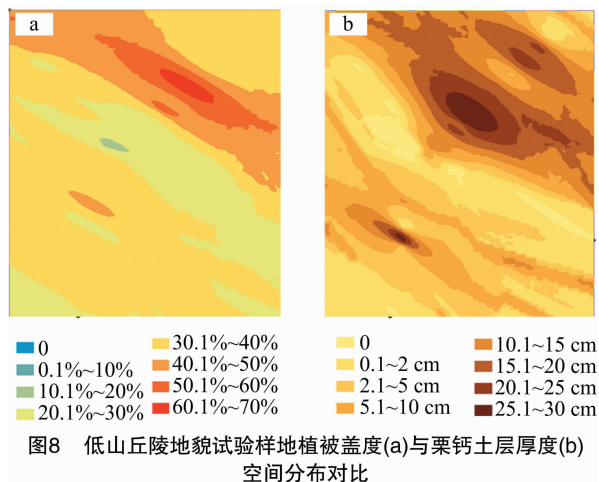
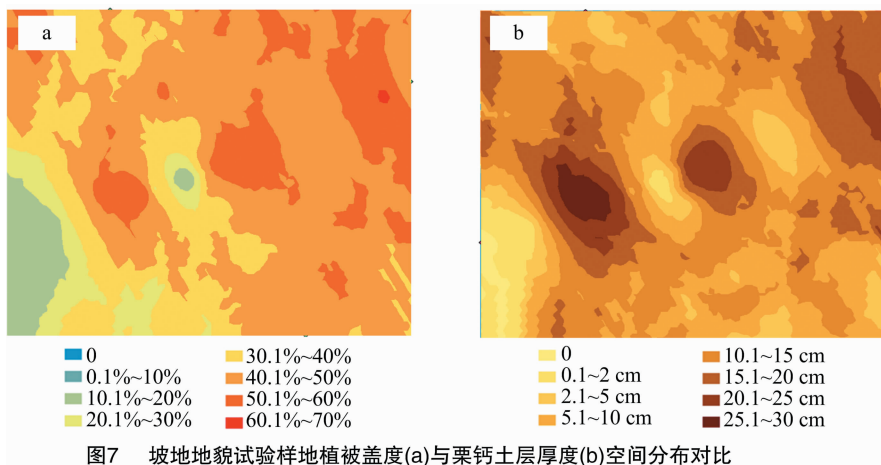
本研究针对 3 类不同地貌试验样地做的栗钙土厚度预测结果与实际情况基本相符,其相对误差可以满足本研究的要求。

2.3 植被盖度与栗钙土厚度空间分布对比研究

为了更直观地了解植被盖度与栗钙土厚度的相关性,将 3 个试验样地植被盖度与栗钙土厚度空间分布进行对比。

从图 7 至图 9 中可以看出,坡地样地和低山丘陵样地内植被盖度与该样地栗钙土厚度间的相关性是比较显著的,植被盖度较大区域栗钙土厚度也较厚。坡地样地栗钙土厚度在 5 cm 以下的区域主要集中在样地的西部偏南一点,与该样地内植被盖度在 10% 以下的区域位置一致,东北部植被盖度在 50% 的区域内,栗钙土厚度也较深,可以达到 20 cm;低山丘陵地貌样地内栗钙土较厚的区域位于试验样地的东北部,呈带状分布,这与该样地内植被盖度在 40% 以上区域位置一致,中西部植被盖度和栗钙土厚度均较薄。植被盖度与该样地栗钙土厚度的空间分布表现出了较强的一致性。这是因为较大的植被覆盖度不仅可以为土壤保留较多的水分,同时也减少了下面土壤水分的蒸发,减缓甚至是防止了植被下土壤的风蚀风化。采样时发现,坡地样地西南部几乎均为放牧地,区域内有很多小型沙斑,土壤已完全沙化,植株低矮,盖度较低,沙生植被已经出现。低山丘陵样地中南部牲畜对植被的干扰程度较大,北面大部分区域有蒙古柳生长,栗钙土较厚,少有风蚀沙斑,植被盖度亦较好。

对比波状高平原样地植被盖度克里金插值图像,可发现该区域内植被盖度和栗钙土厚度分布间除极小范围内略显一致性外,几乎没有表现出两者间的相关性,大部分区域的栗钙土厚度介于 10~20 cm 之间,植被盖度却主要集中在 30%~40% 之内。这个结果与该样地内植被受到较大人为干扰密不可分。该样地的中北部盖起大量的牛棚,随着载畜量的增加,牲畜对植被的践踏和啃食强度随之增强,植被遭到破坏。西面铁路线和东北的采石矿也对周边的植被和栗钙土层



空间异质性及各向异性,最后通过 ArcGIS 10.2 地学统计分析模块,采用克里金插值法对植被盖度和栗钙土层厚度的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和栗钙土层厚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 cm 之间。其变异系数 CV 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,决定系数分别是 0.66、0.71 和 0.60;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,可以采取减小取样间隔的方法来增加其空间结构信息; $C_0/(C+C_0)$ 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) 坡地地貌试验样地和波状高平原地貌试验样地栗钙土层厚度的均值较为接近,分别是 10.93 cm 和 10.47 cm,低山丘陵地貌试验样地的栗钙土层厚度均值最小,仅为 5.91 cm。坡地地貌试验样地和低山丘陵地貌试验样地栗钙土层厚度的变异系数 CV 均大于 75%,属于强变异范围,波状高平原地貌试验样地栗钙土层厚度的变异系数 CV 小于 10%,属于弱变异范围。

(4) 坡地和低山丘陵地貌试验样地栗钙土层厚度的变异函数曲线可用球状函数来拟合,波状高平原地貌试验样地栗钙土层厚度的变异函数曲线的最佳拟合模型是指数函数,决定系数分别是 0.78、0.87 和 0.93;波状高平原地貌栗钙土层厚度的块金值和基台值均是 3 个样地中最高的,这说明了该样地栗钙土层厚度的空间变异程度最大,可以采用降低取样间隔距离的方法以丰富其空间结构信息; $C_0/(C+C_0)$ 值的大小顺序是:波状高平原样地 > 坡地样地 > 低山丘陵样地,因

造成了较大程度的影响。但由此也可以看出,植被是探测草原环境改变中最敏感的因素,在同样的干扰因素影响下,植被盖度对环境作用的反应速度要快于栗钙土层厚度。因此,在周边干扰因素的持续作用下,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,更是指示生态系统变化的重要指标。

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和栗钙土层厚度为研究对象,利用半方差函数讨论了其空间结构,研究了其

此,随机因素在3个样地栗钙土层厚度的空间变异中所起的作用的大小顺序同上;3类不同地貌的试验样地的结构比 $[C/(C+C_0)]$ 均大于75%,栗钙土层厚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个试验样地中栗钙土层厚度连续性最好的是波状高平原地貌样地,其次是低山丘陵地貌试验样地,最后是坡地地貌样地。

(5)3类地貌试验样地的植被盖度和栗钙土层厚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。

(6)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,波状高平原样地几乎可以达到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30%~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%~50%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。

(7)通过对3个样地栗钙土层厚度的定量研究发现,3个样地内沙地所占面积比例均不大,最小的是波状高平原样地,仅为0.227%,最大的是低山丘陵样地,也只有3.158%;坡地地貌试验样地内栗钙土层厚度主要集中在10~20 cm,这部分面积占到样地总面积的53.055%;低山丘陵地貌试验样地内,除了沙地和栗钙土层厚度大于20 cm这2部分面积外,其他各等级区间占的面积比例差距不大;波状高平原地貌试验样地内大部分区域内栗钙土层厚度在10 cm以上,约占到总面积的75%,其中在10~20 cm范围内的面积比例占该样地总面积的61.421%;3个样地中,栗钙土层厚度大于20 cm的面积比例均很小,最大的是波状高平原地貌试验样地,也仅占样地总面积的13.200%。

(8)3个样地中对植被盖度和栗钙土层厚度高值区的估计均好于对低值区的估计;对植被盖度和栗钙土层厚度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。

(9)对比3个样地植被盖度和栗钙土层厚度的克里金空间插值结果,可发现坡地地貌样地和低山丘陵地貌样地植被盖度和栗钙土层厚度的分布较为一致,相关性较高;在波状高平原地貌样地上,几乎看不出两者在空间分布上的相关性。同时,这表明在同样的干扰因素影响下,植被盖度对环境作用的反应速度要快于栗钙土层厚度。因此,植被盖度不仅是群落结构的一个重要参数,更是土地退化特征的一个直接的主导性表征。

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(*Artemisia ordosica*)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试验教程[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3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.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):4017-4024.
- [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(1):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):70-74.
- [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]王苛.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):33-36.
- [21]叶尔江·拜克吐尔汉,李海燕,朱小虎,等.北疆荒漠优势灌木种群空间异质性分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(8):71-76.