

腾格里沙漠东南缘不同生境白刺(*Nitraria*)灌丛沙堆的空间分布格局

贾晓红, 李新荣

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究国家站, 兰州 730000)

摘要:运用地统计学和数量生态学方法,从维持天然白刺灌丛稳定性和持久生态效益角度出发,对腾格里沙漠东南缘不同生境白刺灌丛沙堆的空间异质性进行了研究,分析了不同生境白刺固沙生态效益.结果表明,生境地下水埋深和白刺植株发育状况的差异直接影响了白刺耐沙埋的能力,间接地影响了白刺沙堆的固沙效应.湖盆低地白刺种群的植株盖度、密度和生物量显著高于山前冲积扇区($p < 0.01$),植株高度则相反,且无显著差异($p > 0.05$).湖盆低地的半固定生境沙堆高度平均为 1.20 m,单个沙堆积沙体积平均为 88.19 m³,固定生境的山前冲积扇沙堆高度平均为 1.14 m,单个沙堆积沙体积平均为 33.16 m³.不同生境条件下,白刺沙堆的斑块大小和分布存在明显差异($p < 0.01$).湖盆低地的白刺灌丛沙堆趋向于大斑块、小密度,空间自相关距离较长,而山前冲积扇区相反.湖盆低地由自相关因素引起的沙堆大小和积沙体积空间异质性占主要部分,分别体现在 1.2~84 m 和 1.2~505 m 尺度;而山前冲积扇的随机因素引起的沙堆大小和积沙体积空间异质性占到 100%,在 100 m 以下尺度该区白刺灌丛沙堆大小和积沙体积具有恒定的变异,其空间分布格局在这个尺度无规律体现呈随机分布.

关键词:白刺沙堆;空间分布;固沙效应

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)07-2046-08

Spatial Pattern of Sand-Mound of *Nitraria* in Different Habitat at the Southeastern Fringe of the Tengger Desert

JIA Xiao-hong, LI Xin-rong

(Shapotou Desert Experimental Research State Key Station, Cold and Arid Regions Environmental And Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the geo-statistics and quantitative ecology method, the spatial pattern of sand-mound of *Nitraria* was been analyzed in different habitat at the southeastern fringe of the Tengger desert in order to keep the natural mounds stability and ecological efficiency. The results showed that the different groundwater level and plant growth condition resulted in difference of *Nitraria* population at capacity of withstanding sand bury and the effect of sand-binding. The coverage, density and biomass of *Nitraria* population at the lacustrine basin lowland were significant higher than those of the alluvial fan ($p < 0.01$). Although the height of *Nitraria* population at the lacustrine basin lowland was lower than that of the alluvial fan, there was no significant difference between two habitat ($p > 0.05$). The height and volume of sand-mound was 1.20 m and 88.19 m³ at the lacustrine basin lowland, 1.14 m and 33.16 m³ at the alluvial fan, respectively. The size and distribution of sand-mound was significant difference at different habitat ($p < 0.01$). The mound of the lacustrine basin lowland has the tendency of large patch and low density, developed longer scale pattern in auto-correlated distance, and those of the alluvial fan just the reverse. The spatial heterogeneity of mound size and volume of accumulation sand in the lacustrine basin lowland can be controlled by auto-correlated factors at 1.2~84 m scale, and the random factors at under 100 m controlled the spatial heterogeneity in the alluvial fan. Especially, the size and volume of sand-mound has constant variation at under the 100 m scale in the alluvial fan, and has random spatial pattern without law.

Key words: sand-mound of *Nitraria*; spatial pattern; sand-binding efficiency

种群的空间分布格局是指某一种群的个体,在其生存空间内相对静止的散布形式,是种群的重要属性之一.通过种群的格局分析,可揭示出种群个体空间分布的数量特征及与各种环境因子的相互关系,反映环境空间结构的异质性和物资中选择生境的内在特性.由于空间异质性在不同尺度上具有不同的格局,并且生物及生态学过程对空间异质性的反应发生在不同特定的尺度上^[1],而小尺度上空间分布格局研究可以为大尺度上的生态学格局与过程

提供机制方面的解释^[2].

白刺(*Nitraria*)在内蒙古阿拉善盟地区有大面积分布,是腾格里沙漠固定、半固定沙丘向流动沙丘过渡地带的建群种.白刺属超旱生植物,耐风沙,抗

收稿日期:2007-07-12;修订日期:2007-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(40471006, 40671011);国家科技支撑计划项目(2006BAD26B02, 2007BAD46B03);中国科学院留学基金项目

作者简介:贾晓红(1973~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为干旱区生态, E-mail: jiaxiaohonggs@163.com

盐碱,适应性强,适生于沙漠边缘、丘间低地及石质戈壁滩、以及轻度盐渍化潮湿地段,自然繁殖,逐年积沙,形成大小不等的白刺包^[3].其生长生境白刺优势种和伴生种反映了白刺灌丛所在地盐渍和沙地生境植物组成的特点,良好的防风固沙作用、耐盐碱、耐旱、抗旱、抗风蚀和沙埋的特性使其成为沙区植被恢复和重建的优良灌木^[4].水分条件是白刺生长的重要制约因素,白刺群落的自然消长不但受降水的影响,而且地下水位的变化也极大地制约群落的发育^[5].此外,沙埋也是沙生植物生长发育的驱动因子之一,影响着群落的发育^[6].在地形、地貌和气候等条件的控制下,腾格里沙漠东南缘的白刺受风积(沙埋)和风蚀过程的影响成为优势种群,并形成了相对独立的灌丛沙堆,使该区景观表现为单个灌丛沙堆的斑块状分布.白刺沙堆在无人破坏的情况下,将保留较长的时间,对拦截流沙的前移起到了重要的作用^[7].有关降水和地下水、盐碱等对白刺生长、发育的影响,及种子萌发、幼苗出土和生长、幼苗存活和定植等对风沙的适应性和沙堆的“资源岛效应”,白刺属植物的分类、特性、分布、现状以及保护和防风固沙生态功能等方面已经进行了研究,并针对不同生境白刺沙堆退化现状进行了一定的前期恢复试验,取得了一定的结果^[3~8],但环境条件对白刺沙堆空间分布格局方面的研究还较为缺乏.本研究从维持天然白刺灌丛稳定性和持久生态效益角度出发,探讨了沙漠边缘地带白刺种群的空间分布格局,间接分析其不同生境拦截流沙的生态效益,以期为大尺度上的生态学格局与过程提供机制方面的解释.

1 采样地概况

研究区是一个典型的草原化荒漠与沙漠的过渡带,该区年均气温 10℃,平均气温 1 月为 -6.9℃,7 月为 24.3℃,≥10℃ 年有效积温 3 000℃ 以上,年均降水量为 180.2 mm,降雨量年间变化率大,80% 集中于 6 月中旬至 9 月中旬,年蒸发量 3 200 mm 左右,年均风速 4.2 m/s,大风扬沙日数 80~90 d/a,沙暴日数 16~25 d/a,多发生于 4~6 月间,风向以西北风为主,海拔高 1 200~1 400 m,属温带大陆性干旱气候^[9].

腾格里沙漠东南缘白刺灌丛集中分布于沙漠的边缘、湖盆绿洲周围和低山冲积平原下缘地带,地下水位深约 1.5~4.0 m^[10].白刺沙堆本身是由风积沙构成,其下伏地层多为冲积、湖积成因的沙壤、粘土

并多轻度盐化.腾格里沙漠东南缘白刺优势种和伴生种生长生境反映了白刺灌丛所在地盐渍和沙地生境植物组成的特点.根据白刺分布的不同土壤类型地段,选择有代表性的 2 个地区.研究区 1(图 1)位于腾格里沙漠东缘的沙漠湖盆低地的盐湿生境,地下水位较浅,约 1~2 m,白刺沙堆本身由风积沙而成,其下伏地层为草甸盐土,地貌呈链状、格状沙丘.受腾格里沙漠的影响,部分地方有覆沙或沙丘分布.白刺包间的低地上可见到盐结皮,白刺堆上基本为覆沙.白刺沙堆间的低地上有盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等分布.由于白刺灌丛的存在,白刺沙堆呈半固定沙地.研究区 2(图 1)位于腾格里沙漠南缘山前冲积扇覆沙地段,为盐化固定沙地.土壤为洪积或淤积的粘质棕色荒漠土,地貌特征为白刺灌丛沙堆与粘质土丘间低地相间,地下水位较深(3~5 m 以下或更深)土壤脱盐而成碱性反映.地表覆沙或仅有薄层覆沙.植丛下形成隆起的沙堆,沙堆上有薄而脆的地衣状[*Collema tenax*(Sw.) Ach]结皮.沙堆间低地上有虫实(*Corispermum* spp.)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、沙蓝刺头(*Echinops gmelinii*)等分布.

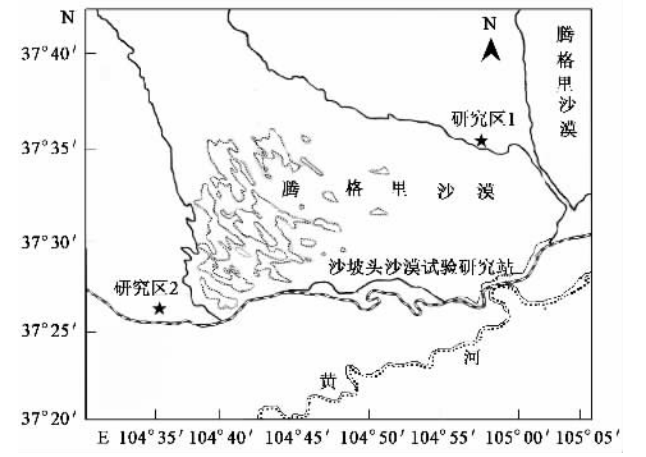


图 1 采样点位置
Fig.1 Location of the study sites

2 研究方法

在研究区 1 和 2 分别选择 100 m×100 m 的平坦地作为研究样地.8 月中旬,分别调查两样地内所有白刺沙堆的高度、冠幅(沙堆投影面积即沙堆大小)、具体位置.其中沙堆的冠幅是通过公式 $3.15xy/4$ 计算所得(x 、 y 分别为十字交叉测量沙堆大小轴)^[11];沙堆的具体位置的确定方法是以样地一个角为原点,该原

点的 x 、 y 坐标定为(0,0),然后测定样地内每个沙堆十字交叉中心点的相对于原点的坐标值^[12](图 2).在每个沙堆上又选择 3 个 1 m×1 m 的小样方,调查白刺种群的高度、盖度、密度和现存生物量,密度以地上部分的枝条数为准.白刺沙堆空间变异性通过计算变异函数 $\gamma(h)$ 来分析和进行生态解释.

其计算公式如下:

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

式中, $N(h)$ 是距离等于 h 时的点对数, $Z(x_i)$ 是在位置 x_i 处的数值, $Z(x_i + h)$ 是在距离处 $x_i + h$ 的数值.根据变异函数及变异函数曲线图可得到 4 个重要的参数:① 当变异函数随间隔距离 h 的增大,从非零值达到一个稳定常数,即基台值($C_0 + C$);② 当 $h = 0$ 时, $\gamma(0) = C_0$,即为块金值;③ 当 $\gamma(h)$ 达到基台值时的间隔距离(变程)和分维数 D , D 由 $\gamma(h)$ 和 h 之间的关系确定 $2\gamma(h) = h^{(4-2D)}$ ^[13]. D 值

越大,由随机因素引起的空间异质性比例越高. D 值是一个无量纲数,可以对不同变量的 D 值进行比较,确定空间异质性程度^[14].以空间自相关分析来研究白刺的空间格局特征,自相关系数采用 Moran 的 I 系数,其计算公式为:

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

式中, x_i 和 x_j 是变量 x 在相邻配对空间的取值; $\bar{x}$ 是变量平均值; W_{ij} 是相邻权重(通常规定,若空间单元 i 和 j 相邻; $W_{ij} = 1$,否则 $W_{ij} = 0$); n 是空间单元总数. I 系数的取值在 $-1 \sim 1$ 之间,小于 1 表示负相关,等于 1 表示不相关,大于 1 表示正相关.

数据处理由 SPSS 10.0 和地统计学软件 GS+ (Version 5, Gamma Design Software, Michigan, USA) 完成.

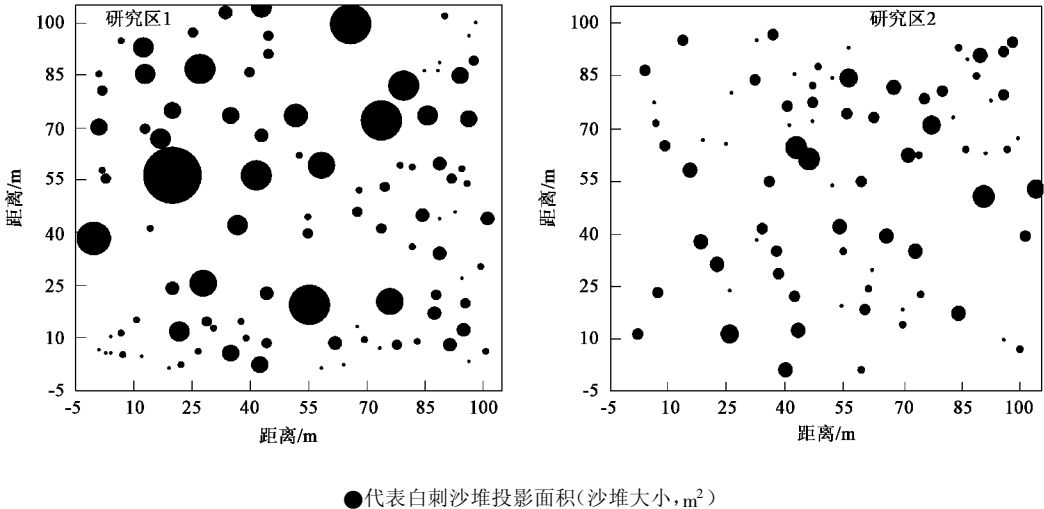


图 2 研究区白刺沙堆的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of sand-mound

3 结果与讨论

3.1 白刺灌丛沙堆统计特征

由表 1 可见,区 1 较浅的地下水位使该区白刺种群的植株盖度、密度和生物量均显著高于地下水位相对较深的区 2($p < 0.01$).尽管区 1 较浅的地下

表 1 白刺种群统计特征

Table 1 Statistical characters of *Nitraria* population

样区	性状	最小值	最大值	平均	标准偏差	变异系数
区 1	盖度/%	12.11	59.38	27.10	10.62	0.39
	密度/株·m ⁻²	1.56	132.81	30.33	25.14	0.83
	生物量/g·m ⁻²	133.59	88 968.75	7 009.64	11 114.57	1.59
	植株高/cm	14.89	76.56	31.34	9.33	0.30
区 2	盖度/%	3.52	73.83	25.75	11.87	0.46
	密度/株·m ⁻²	3.13	110.94	11.72	12.22	1.04
	生物量/g·m ⁻²	6.45	16 838.71	1 772.49	3 115.27	1.76
	植株高/cm	15.89	58.78	34.83	9.81	0.28

水位有助于白刺植物生长、繁殖和发育,但近距离丰富的沙源和频繁的沙埋、沙压导致了测定植株高度小于区 2,使两区域植株高度差异不显著($p > 0.05$).区 1 近距离丰富的沙源、较浅的地下水位和频繁的沙埋及较大沙堆的邻近沙堆兼并都会使白刺沙堆趋向于较大的斑块、小密度发育,区 2 则相反.多数学者认为植被盖度、风力强度和沙子供应量 3 个主要因素控制着灌丛沙堆的形成演化过程^[15~18].因此,从沙堆形成演化的控制条件来看,区 1 更有利于白刺生长和灌丛沙堆发育,这是白刺生理生态特性决定了沙堆发育特征,而且也与湖盆低地地下水位较浅土壤水分含量较好有利于白刺植株生长有密切关系^[5].

沙漠边缘地带随着流沙掩埋,大量萌生的白刺枝条拦截流沙,众多根茎串联交织在一起构成的”白刺包”具有重要的生态防护价值.然而受不同的地形和地貌及下伏土层的影响,其发育特征存在明显差异(表 2),发育于沙漠湖盆低地(区 1)的白刺灌丛平均沙堆高度(即沙埋深度,耐沙埋能力)、沙堆大小(即冠幅)和沙堆体积(即积沙体积,固沙效应)都明显大于山前冲积扇区(区 2).统计分析表明,两生境沙堆大小有显著差异($p = 0.007$),沙堆积沙体积也存在显著差异($p = 0.009$),但沙堆高度差异不显著($p = 0.527$).这可能与频繁的沙埋及较大沙堆的邻

近沙堆兼并使得沙堆高度发育受抑所致.丰富的沙源,频繁的沙埋,白刺萌发出大量的不定根,繁育能力增强,适量的沙埋促进了植物生长^[19].山前冲积扇白刺长势较弱,而沙漠湖盆低地的白刺生长发育较好(表 1),可能与两生境沙源的远近和风沙流活动强度有关,以及地下水埋深影响白刺种群消长^[5]有关.区 2 白刺沙堆由于聚集的沙粒对植物的掩埋以及沙堆的增长造成植物的根系不能触及地下水致使植物死亡.植物一旦死亡,植被盖度降低使灌丛沙堆更易风蚀,从而加速灌丛沙堆的衰亡^[20].另一方面区 2 沙堆上结皮的存在,土壤的抗风蚀性能虽然得到有效提高^[21],但结皮拦截了降水深层下渗,加剧了沙丘内部水分条件恶化和白刺植被退化,影响了沙堆的固沙效应.针对该论点有研究表明直接破坏结皮可影响水分的深层下渗,短期内白刺灌丛的恢复生长效果显著,但在长时间内无法遏止沙丘水分恶化和植被退化的进程^[22,23],区 1 和区 2 的白刺沙埋深度与地下水位的关系相关,以及区 1 和区 2 沙堆表面有无结皮发育特征都可以说明干旱区水分是驱动沙堆发育的重要条件之一.沙堆不同的发育阶段形态和植物表征,是水分影响下的植物生长发育和沙堆蚀积变化的一个相对过程.但土壤生物结皮的形成标志着沙堆水分条件的表层化和深层干化,预示白刺植物退化和沙堆衰退^[24].因此,区 2 的

表 2 白刺灌丛沙堆描述性特征统计参数
Table 2 Statistical characters of sand-mound

样区	性状 ¹⁾	最小值	最大值	平均	标准偏差	变异系数	分布型	转换
区 1	沙堆高度	0.20	3.60	1.20	0.74	0.62	正态	
	沙堆大小	1.43	829.16	70.08	116.90	1.67	非正态	自然对数
	沙堆体积	0.18	1 122.82	88.19	193.17	2.19	非正态	自然对数
区 2	沙堆高度	0.15	2.74	1.14	0.66	0.58	正态	
	沙堆大小	2.01	137.30	33.71	29.29	0.87	正态	
	沙堆体积	0.28	191.55	31.16	38.66	1.24	非正态	自然对数

1) 沙堆高度(即沙埋深度,耐沙埋能力),m;沙堆大小(沙堆投影面积),m²;单个沙堆体积(即固沙效应),m³

白刺沙堆固沙效应明显低于区 1.

不同生境的白刺沙堆,其沙堆大小和分布存在明显差异($p < 0.01$).两生境均以沙堆 90 m² 作为划分界线,<90 m² 沙堆频率区 1 小于区 2,>90 m² 频率则相反(图 3).由图 3 还可见,区 1 的沙堆大小频率分布极为不均匀,80%的沙堆集中分布在 90 m² 以下,20%频率则不均匀分配于冠幅>90 m²,其中>145 m² 的沙堆频率占到了约 12%.表明沙漠边缘湖盆低地白刺灌丛对风沙干扰的响应较为敏感,并且>145 m² 的沙堆主要因风沙干扰较大导致了沙堆

与临近沙堆兼并而形成.区 2 的沙堆 98%集中分布在 90 m² 以下,其中以 30 m² 以下的居多,占到 69%.2 种生境沙堆高度频率分布趋势一致,大多数沙堆高度在 0.75 m 左右,其次为 1.25 m;但>2.75 m 沙堆在区 1 还占有一定的比例,而区 2 沙堆高度基本在 2.75 m 以下.采用相同区间划分方法表明区 1 除了沙堆高度在 0.25、1.15 和 2.25 m 频率小于区 2 外,其余沙堆高度频率均大于区 2.

3.2 白刺灌丛沙堆的空间自相关性

空间自相关分析(spatial autocorrelation analysis)

是检验某一要素的观测值是否显著地与其相邻空间点上的观测值相关联^[25]. 即 Moran's I 系数可定量描述研究变量在空间上的依赖关系. I 的取值为 $-1 \sim 1$, $I > 0$ 表示变量在空间上呈现正相关, $I < 0$ 表示研究变量在空间上呈现负相关, $I = 0$ 表示研究变量在空间依赖性小或空间随机变异较大. 自相关系数可以与尺度结合起来, 以分析不同尺度下的空间相关关系. 从图 4 可见, 区 1(湖盆低地)的白刺灌丛沙堆大小、沙堆高度和沙堆体积空间自相关尺度均 < 40 m, 在 40 m 范围内单个白刺灌丛沙堆间呈空间正相关, 并且白刺沙堆间距离越小空间相关性越强; 在

> 40 m 的范围白刺沙堆特征空间依赖性较小, 随机变异较大. 区 2(山前冲积扇)在 < 10 m 范围内白刺灌丛沙堆大小和沙堆高度呈空间正相关性, 并且距离越小相关性越大; > 10 m 范围内空间自相关性较小, 随机变异较大. 总体来看, 无论何种生境的白刺灌丛沙堆空间自相关性都存在一个尺度, 沙漠湖盆低地的白刺灌丛沙堆空间自相关尺度大于山前冲积扇区的. 白刺沙堆大小、高度和沙堆体积与相邻空间点上的尺度从另一方面说明了白刺植物种耐沙埋、沙压的生理和生态特性以及沙堆发育状况, 而且表明区 1 生境适于白刺生长, 沙堆处于发育阶段, 固沙

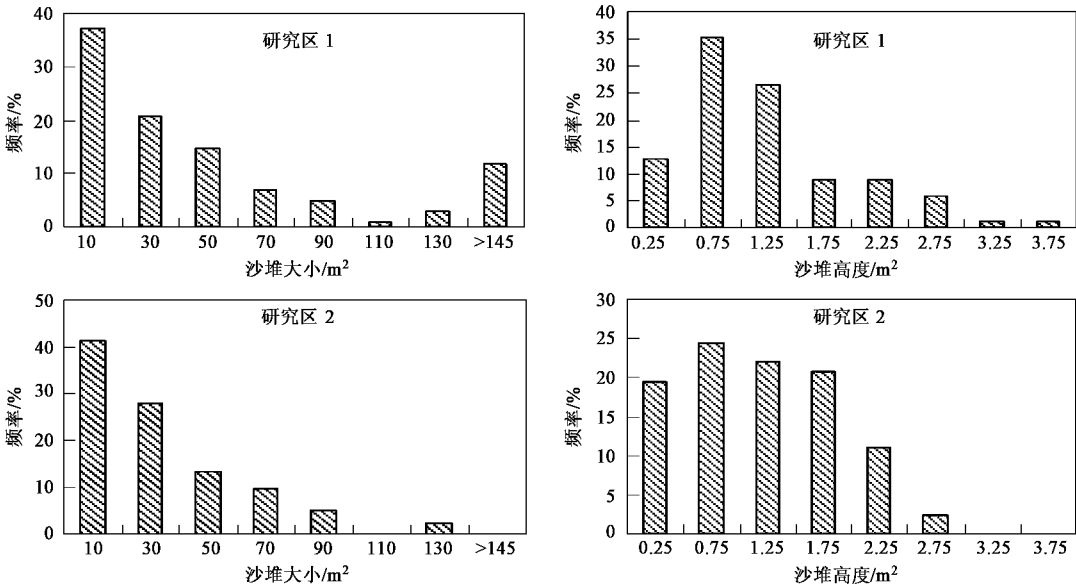


图 3 白刺沙堆大小和沙堆高度频率分布
Fig.3 Frequency distribution of sand-mound size and height

生态效益显著.

3.3 不同生境白刺沙堆的空间异质性

地统计学研究非正态分布的数据可能导致比例效应, 将导致变异函数的波动大, 从而影响分析结果的可靠性^[26]. 因此, 利用 SPSS 软件, 采用单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫 [One-sample Kolomogorov-Semimov (KS)] 对区 1 和区 2 的沙堆大小、沙堆高度和沙堆体积检验表明, 部分特征不符合正态分布(表 2), 通过转换后, 统计分析表明均符合正态分布, 满足平稳假设, 可进行地统计分析.

Li 等^[27]认为, 空间异质性主要由两部分组成: 即随机部分和自相关部分. 处于腾格里沙漠边缘的白刺沙堆, 受风沙活动的干扰和局部地形、地貌的影响, 不同生境的白刺沙堆特性空间异质性程度不同(表 3). 区 1 白刺灌丛沙堆大小和积沙体积的空间

异质性主要由自相关部分引起, 而引起沙堆高度的空间异质性随机部分和自相关部分为 50%. 区 2 沙堆大小和积沙体积空间异质性基本全部由随机因素引起, 引起沙堆高度空间异质性的随机因素仅占到 33.7%. 这样的结果表明, 处于半固定地的区 1 白刺灌丛空间差异主要是由成土母质(风成沙)、气候、地形、地下水位及下伏土层土壤类型等非人为的区域因素(空间自相关部分)导致. 在长期的吹蚀和堆积过程中, 该区主风向(西北风)和次风向(东北风及东风)以及风力强度以西北风为最强的影响下, 沙堆的冠幅和积沙体积由自相关部分引起的空间异质性强于区 2, 区 2 沙堆大小和积沙体积的空间异质性主要由随机因素引起. 尽管风沙环境中沙埋、风蚀和植株发育状况导致了植株种群演变^[28], 沙埋使生境的土壤结构趋于疏松, 土壤容重降低、孔隙度增加, 土壤水

分状况变异^[29],使沙地植物种类趋向于耐沙埋植物种发育,有利于白刺植株生长;但干旱区降水稀少,不同生境地下水位埋深的不同严重影响着白刺的生长,影响了白刺沙堆的发育;反过来,白刺沙堆的发育进一步影响了白刺植物对降水和地下水的利用,又对沙堆发育产生了重要的影响,这一点在白刺沙堆高度和

积沙体积上体现的较为明显.区 1 的沙堆高度空间异质性受邻近沙堆自相关和沙堆上植株发育的随机因素共同影响,而区 2 因为白刺沙堆基本处于固定状态,受地下水和降水在分配的影响,植株发育处于退化阶段,影响了沙堆高度,其沙堆高度空间异质性主要由地形、地下水位等空间自相关部分构成.

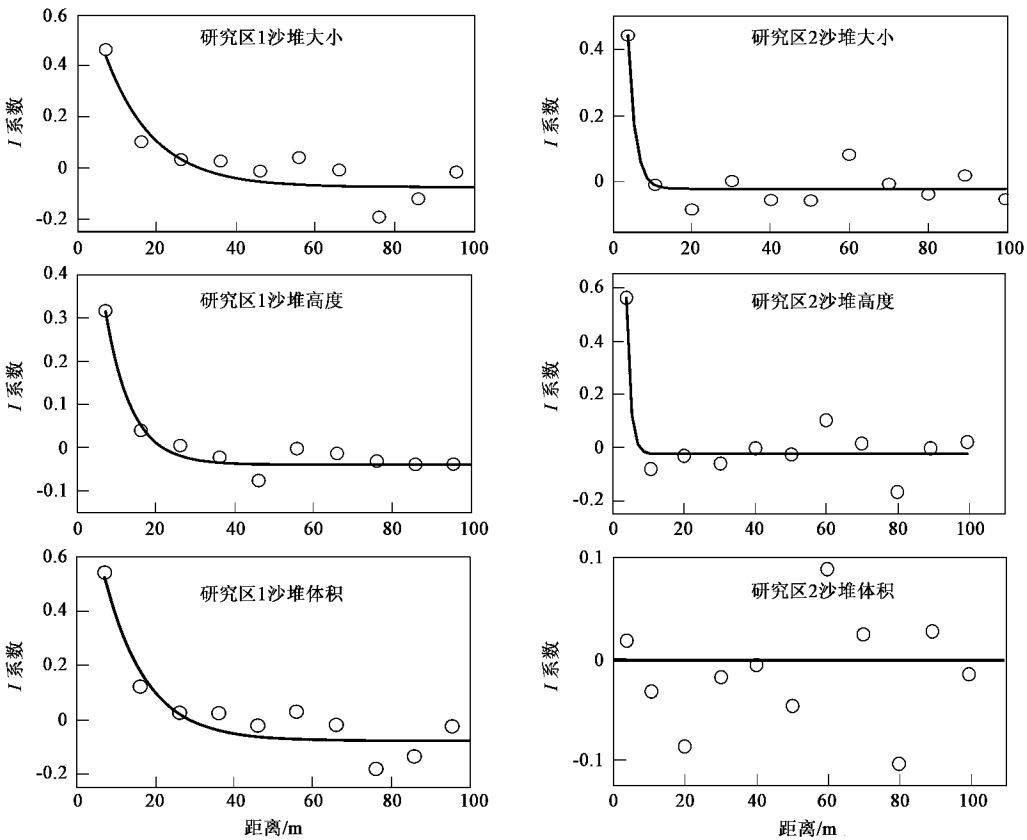


图 4 白刺灌丛沙堆的空间自相关性

Fig.4 Spatial auto-correlation of sand-mound

表 3 白刺灌丛沙堆的变异函数理论模型及其参数

Table 3 Semi-variogram model and parameters for sand-mound

样地	性状	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程/m	$C/(C_0 + C)$	决定系数 R^2	残差 RSS	分形维数 D
区 1	沙堆大小	指数	0.570	1.811	84	0.685	0.809	0.222	1.852
	沙堆体积	指数	1.950	6.902	504.6	0.717	0.815	1.120	1.846
	沙堆高度	指数	0.460	0.921	932.7	0.501	0.125	0.071	1.920
区 2	沙堆大小	线性	814.066	814.066	99.395	0	0.345	269 524	1.969
	沙堆体积	线性	2.401	2.429	99.395	0.012	0.002	0.347	1.992
	沙堆高度	指数	0.308	0.913	609.9	0.663	0.639	0.032 5	1.891

分形维数 D 由变异函数 $\gamma(h)$ 和间隔距离 h 之间的关系确定,表示变异函数 $\gamma(h)$ 曲线的曲率大小, D 值越大,由随机部分引起的空间异质性越高,而由自相关部分引起的空间异质性越低. D 值是一个无量纲数,因此,不同变量 D 值之间的比较可以

确定空间异质性程度^[30].从表 3 见,区 1 白刺沙堆大小和积沙体积的分形维数 D 均小于区 2 的,说明区 1 的沙堆大小和沙堆体积由自相关部分引起的空间异质性强于区 2;但沙堆高度区 1 的分形维数大于区 2 的,说明区 1 的沙堆高度由自相关部分引起的

空间异质性弱于区 2. 这样的结果进一步证实了前述由块金值和基台值分析的空间异质性结果.

3.4 白刺灌丛沙堆的空间异质性尺度

空间异质性是尺度的函数^[31], 不同尺度上同一种群的某一属性的空间相关程度往往相差甚大. 生态系统及其格局是在多尺度上存在的, 尺度的确定有助于区别不同格局所对应的生态学过程.

不同生境白刺沙堆大小、积沙体积和沙堆高度空间异质性程度和变异尺度有明显的不同. 区 1 的白刺沙堆大小由空间自相关因素引起的空间异质性占总空间异质性的 68.5%, 且主要体现在 1.2 ~ 84 m 的尺度上, 而由随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的 31.5%, 主要体现在 1.2 m 以下的尺度上; 积沙体积由空间自相关引起的空间异质性占 71.7%, 主要在 1.2 ~ 505 m 的尺度, 1.2 m 以下由随机因素引起的空间异质性占 28.3%; 沙堆高度的空间异质性 1.2 m 和 1.2 ~ 933 m 各占 50%(表 3). 区 2, 因沙堆处于固定状态, 地表结皮的形成和比区 1 有较深的地下水, 影响了该区土壤水分在剖面的分布, 导致了该区白刺植物在繁殖沙埋、沙压过程中生长发育较弱, 但由植株繁殖、根系分布和生物量等随机因素引起的空间异质性明显地体现在沙堆大小和积沙体积上, 基本为 100%. 区 2 白刺沙堆大小和积沙体积在整个测定尺度(100 m)具有恒定的变异, 在测定尺度白刺沙堆的大小和积沙体积没有明显的规律. 但沙埋使区 1 和区 2 的白刺种群成为优势种群, 并形成相对独立的灌丛沙堆, 沙埋和植物发育、繁殖共同形成了腾格里沙漠边缘白刺沙堆斑块状景象, 区 2 的白刺沙堆高度空间异质性由 1.3 m 以下的随机因素(占 33.7%)和 1.3 ~ 610 m 的自相关因素(66.3%)共同形成(表 3).

4 结论

(1) 在地形、地貌和气候等条件的控制下, 腾格里沙漠东南缘的白刺受风积(沙埋)和风蚀过程的影响成为优势种群, 并形成了相对独立的灌丛沙堆, 使该区景观表现为单个灌丛沙堆的斑块状分布. 但地下水的埋深和降水的再分配影响导致了两种生境白刺植株发育状况的差异, 直接影响了白刺耐沙埋的能力, 间接地影响了白刺沙堆的固沙效应.

(2) 不同生境条件下, 白刺灌丛沙堆的斑块大小和分布存在明显差异($p < 0.01$). 湖盆低地的白刺灌丛沙堆趋向于大斑块、小密度, 空间自相关距离较长, 而山前冲积扇区相反. 不同生境导致空间异质性

的因素和比例以及尺度也在发生不同程度的差异; 湖盆低地自相关因素引起的沙堆大小和积沙体积空间异质性占主要部分, 分别体现在 1.2 ~ 84 m 和 1.2 ~ 505 m 尺度; 而山前冲积扇的随机因素引起的沙堆大小和积沙体积空间异质性占到 100%, 在 100 m 以下尺度该区白刺灌丛沙堆大小和积沙体积具有恒定的变异, 其空间分布格局在这个尺度无规律体现呈随机分布.

(3) 不同生境沙堆发育状况导致了植株对降水和地下水分的利用差异, 使 2 种生境白刺植株生长、发育状况不同, 不同生境白刺生态效益差异也极显著($p < 0.01$), 直接影响了 2 种生境积沙量和沙堆高度, 湖盆低地的半固定生境沙堆高度平均为 1.2 m, 单个沙堆积沙体积平均为 88.19 m³, 而固定生境的山前冲积扇沙堆高度平均为 1.14 m, 单个沙堆积沙体积平均为 33.16 m³.

参考文献:

- [1] Kotliar N B, Wiens J A. Multiple scales of patchiness and patch structure: a hierarchical framework for the study of heterogeneity [J]. *Oikos*, 1990, **59**: 253-260.
- [2] O'Neil R V, DeAngelis D L, Waide J B, *et al.* A hierarchical concept of the ecosystem [M]. Princeton: Princeton University Press, 1986.
- [3] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 692-693.
- [4] 甘肃省民勤治沙综合试验站. 甘肃沙漠与治理[M]. 兰州: 甘肃人民出版社. 1975. 66-94.
- [5] 杨自辉, 高志海. 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(6): 923-926.
- [6] 李秋艳, 赵文智, 何志斌, 等. 不同生境条件下泡泡刺种群的空间格局及动态分析[J]. 中国沙漠, 2004, **24**(4): 484-488.
- [7] 杨自辉. 民勤沙井子地区 40 a 来荒漠植被变迁初探[J]. 中国沙漠, 1999, **19**(4): 395-398.
- [8] 贾晓红, 李新荣, 陈应武. 腾格里沙漠东南缘白刺灌丛土壤性状的特征[J]. 干旱区地理, 2007, **30**(4): 512-518.
- [9] Li X R, Zhang Z S, Zhang J G, *et al.* Association between vegetation patterns and soil properties in the southeastern Tengger Desert, China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2004, **18**: 1-15.
- [10] 高正中, 戴法和. 宁夏植被[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1988. 106-107.
- [11] El-Bana M I, Nijs I, Khedr A H A. The Importance of Phytogenic Mounds (Nebkhas) for Restoration of Arid Degraded Rangelands in Northern Sinai [J]. *Restoration Ecology*, 2003, **11**(3): 317-324.
- [12] 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. 1-197.
- [13] Palmer M W. Fractal geometry: a toll for describing spatial pattern of plant communities [J]. *Vegetatio*, 1988, **75**: 91-102.
- [14] Robertson G P. Geo-statistics in ecology: Interpolating with known variance[J]. *Ecology*, 1987, **68**: 744-748.

- [15] 朱震达. 中国西北干旱及半干旱地区沙丘分类问题[A]. 见: 中国科学院治沙队编. 治沙研究(第四号)[C]. 北京: 科学出版社, 1962. 31-47.
- [16] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003. 404-405.
- [17] McKee E D. Sediment structure in dunes of the Namib desert, south west Africa[J]. Geological Society of America Special Paper, 1982, **188**: 48-49.
- [18] Qong M, Takamura H, Hudaberdi M. Formation and internal structure of Tamarix cones in the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Environments, 2002, **50**: 81-97.
- [19] 刘慎谔. 刘慎谔文集[M]. 北京: 科学出版, 1985. 136-138.
- [20] 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义[J]. 干旱区研究, 1994, **11**(1): 34-41.
- [21] 李晓丽, 申向东. 结皮土壤的抗风蚀性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, **20**(2): 203-207.
- [22] 李昌龙, 李茂哉, 汪杰, 等. 绿洲边缘白刺林退化植被恢复与重建技术研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, **19**(1): 167-171.
- [23] 吴玉环, 高谦, 程国栋. 生物土壤结皮的生态功能[J]. 生态学杂志, 2002, **21**(4): 41-45.
- [24] 朱震达, 陈广庭, 胡孟春, 等. 中国土地沙质荒漠化[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [25] Cliff A D, Ord J K. Spatial Processes[M]. London: Pion, 1981.
- [26] Journel A G, Huijbregts C J. Mining geo-statistics[M]. London: Academic Press, 1978.
- [27] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity [J]. Oikos, 1995, **73**: 280-284.
- [28] Zhang C Y, Yu F H, Dong M. Effects of Sand Burial on the Survival, Growth and Biomass Allocation in Semi-shrub Hedysarum leave Seedlings[J]. Acta Botanica Sinica, 2002, **44**(3): 337-343.
- [29] 常学礼, 赵学勇, 赵文智. 沙埋对小叶杨水分生理状况及生长特性的影响研究[C]. 见: 刘新明, 赵哈林主编. 科尔沁沙地生态环境综合整治研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 215-219.
- [30] Carr J R, Benzer W B. On the practice of estimating fractal dimension [J]. Mathematical Geology, 1991, **23**(7): 945-958.
- [31] Cressie N A C. Statistics for spatial data [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.