

荒漠绿洲过渡带怪柳灌丛沙堆特征及其空间异质性

刘 冰 赵文智*, 杨 荣

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站; 寒旱区流域水文及应用生态实验室, 甘肃 兰州 73000)

摘要:以甘肃金塔县和内蒙古额济纳旗的荒漠绿洲过渡带为研究区,研究了戈壁和沙漠两种生境中怪柳灌丛沙堆的形态特征,定量分析了不同生境中怪柳灌丛沙堆形态参数间的关系、空间格局以及空间异质性。结果表明:(1)大部分沙堆为独立型,在沙漠生境通常沿风向形成沙堆链(额济纳 NE 83°15', 金塔 NE 53°13')。沙堆高度、体积和植被冠幅的均值在戈壁生境均小于沙漠生境,植被高度和盖度的均值在戈壁生境均大于沙漠生境。此外,沙堆高度、体积和植被冠幅、高度、盖度的最大均值都出现在额济纳,依次为 4.47 m、1133.5 m³、534.5 m²、2.27 m 和 0.47。(2)沙堆长短轴间、体积和冠幅间均为线性关系;沙堆高度和面积间的回归曲线为抛物线;植被冠幅和高度的回归曲线在戈壁生境是抛物线,沙漠生境中却是线性关系。(3)戈壁生境中沙堆相互分隔呈斑块状格局,沙漠生境中呈沙丘链状分布。(4)空间异质性由非随机的结构原因形成的变异为主,在额济纳的空间异质性高于金塔。空间相关性在额济纳戈壁生境中较强,沙漠生境和金塔戈壁生境中属于中等程度;在金塔空间异质性存在由随机的原因形成变异为主的可能性,其环境因素对空间异质性产生大的影响。此外,结论表明高强度的风积产生较深的沙埋对怪柳灌丛生长的促进作用及灌丛与沙堆间的反馈效应是怪柳灌丛沙堆的适应性机理。

关键词:荒漠绿洲过渡带;灌丛沙堆;形态特征;空间异质性;怪柳

文章编号:1000-0933(2008)04-1446-10 中图分类号:S944 文献标识码:A

Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas* at Desert-Oasis Ecotone

LIU Bing, ZHAO Wen-Zhi*, YANG Rong

Linze Inland River Basin Research Station, Laboratory of Basin Hydrology and Ecology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1446 ~ 1455.

Abstract: We investigated the morphological characteristic of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas* in two different habitats: the Gobi desert and the desert in the desert-oasis ecotones that locate in Jinta County, Gansu Province and Ejina Banner, Inner Mongolia Autonomous Region. Also, we quantitatively analyzed the relationships between the morphological parameters, spatial pattern and spatial heterogeneity. The results indicated that: (1) Most of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas* are independent type and often form the *Nebkhas* chains along wind orientation in the desert (Ejina NE83°15', Jinta NE53°13'). The average values of *Nebkhas* height, volume and plant canopy diameter in the Gobi desert are smaller than those in the desert, whereas the average values of plant height and coverage in the Gobi desert are all larger than those in the desert.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30771767)

收稿日期:2007-01-25; 修订日期:2007-08-23

作者简介:刘冰(1977~),男,甘肃天水人,博士生,主要从事生态水文学研究. E-mail: Liubing@ns.lzb.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowzh@ns.lzb.ac.cn

致谢:衷心感谢中国科学院寒旱所李秋艳、庄艳丽等在野外调查中的帮助,以及兰州大学数学与统计学院温紫娟在论文撰写过程中的帮助与支持。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 30771767)

Received date: 2007-01-25; **Accepted date:** 2007-08-23

Biography: LIU Bing, Ph. D. candidate, mainly engaged in eco-hydrology.

The maximum values in *Nebkhas* height and volume, plant canopy diameter, height and coverage occur in Ejina, with the average value of 4.47 m, 1133.5 m³, 534.5 m², 2.27 m and 0.47, respectively. (2) There are linear relationships between the long and short axes, and between the volume and plant canopy diameter of *Nebkhas*. The regression curve of *Nebkhas* height and area is parabolic. The regression curve of plant height and canopy diameter is parabolic in the Gobi desert or linear in the desert. (3) The *Tamarix ramosissima* *Nebkhas* show a patch distribution pattern in the Gobi desert, while they form *Nebkhas* chain distribution in the desert. (4) The spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas* is mostly derived from the variation that is caused by the non-stochastic structural reason, and the extent of spatial heterogeneity in Ejina is higher than the one in Jinta. The spatial relevance is comparatively strong in Ejina's Gobi desert, and moderate in Ejina's desert and Jinta's Gobi desert. There is the possibility that the spatial heterogeneity is chiefly caused by the stochastic reason in Jinta. The spatial heterogeneity is affected by environmental factors to a great degree in Jinta. In addition, The conclusions indicated that: The adaptability mechanisms of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas* may be the stimulative function of comparative deep sand-burial as a result of wind accumulate with high-intensity to the growth of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas* and the feedback effect between the shrub and *Nebkhas*.

Key Words: desert-oasis ecotone; *Nebkhas*; morphological characteristic; spatial heterogeneity; *Tamarix ramosissima*

灌丛沙堆(*Nebkhas*)是风沙流遇到灌丛阻拦,沙物质在灌丛及周围堆积形成的一种地貌类型^[1]。在我国,灌丛沙堆主要分布于农牧交错带、荒漠草原、典型草原及沙漠边缘带^[2~5],类型有锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)、白刺(*Nitraria* L.)、蒿类(*Artemisia frigid*)等^[6]。灌丛沙堆是土壤风蚀和土地退化的标志^[1,2,7],也是沙漠化的一种表现形式^[2],在阻挡流沙入侵绿洲、干旱区生物多样性保护等方面有重要意义。

20世纪90年代以来,国内外学者对灌丛沙堆进行了系统的研究。在形成演化和形态参数方面,Andrew D.等研究表明灌丛沙堆走向与干季主风向保持一致^[8],其形成是沙物质经过搬运重新分配的结果^[1~5,9~11];Tengberg & Faso在突尼斯分析了灌丛沙堆形态参数间的关系和变化规律,提出了形态发育的趋势^[12];哈斯指出了小叶锦鸡儿灌丛沙堆的发育模式和演化阶段^[13];夏训诚等在塔克拉玛干沙漠及罗布泊地区测定了柽柳沙包的年龄^[14]。在生态意义方面,Sterk等 & Whitford等研究了灌丛沙堆沃岛效应的反馈机制^[15,16];Magdy等对西奈山北部干旱退化草场的研究表明灌丛沙堆对植物多样性保护具有重要意义^[17]。

柽柳灌丛沙堆是荒漠绿洲过渡带重要的群落类型,是阻止、延缓沙漠入侵绿洲的最后防线^[18]。近年来,黑河下游水资源短缺使柽柳灌丛沙堆产生了衰退,影响绿洲的生存。但是,关于柽柳灌丛沙堆的研究在国内外尚未见报道。因此,本文以黑河下游的金塔县和额济纳旗为研究区,针对荒漠绿洲过渡带的戈壁和沙漠两种生境下的柽柳灌丛沙堆,研究在生态梯度下柽柳灌丛沙堆的形态特征、形态参数间的关系、空间分布格局及空间异质性,为荒漠绿洲过渡带的建设及管理提供科学依据,也为灌丛沙堆的进一步研究提供基础数据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古额济纳旗八道桥外(42°02'~42°25' N;101°26'~101°11' E)以及甘肃省金塔县生地湾和大庄子(40°25' N;98°57'~99°07' E)的荒漠绿洲过渡带。额济纳属极强大陆性气候。多年平均气温 8.7℃,最低气温-37.6℃,最高气温 43.1℃;额济纳绿洲外围荒漠区年降水量 25~50mm,年蒸发量 4200 mm;盛行西北风,平均风速 2.9~5 m·s⁻¹,年均大风日数(>17 m·s⁻¹)70d左右;地下水埋深在 2.18~3.11 m之间。金塔绿洲属典型温带大陆性气候。多年平均气温 8℃,最低气温-29℃,最高气温 38.6℃;年均降雨量 59.9 mm,年蒸发量 2538.6 mm;以西北风为主,平均风速 3.0 m·s⁻¹,大风日数 32d。地下水埋深在正义峡输水干渠中游段小于 2~3m。地带性土壤均为灰棕漠土、沙壤土及沙土。典型植被有梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)和柽柳等。

1.2 调查方法

在野外踏查的基础上,距戈壁和沙漠边缘 200 m 以外的样带内,分别选择一块能代表怪柳灌丛沙堆种群特征的样地,其面积为 100 m × 100 m。在 2006 年 8 ~ 9 月中旬,调查样地内所有怪柳灌丛沙堆的坐标位置、高度、长短轴、沙堆走向以及每个沙堆植被的幅度、高度、盖冠等。

1.3 数据分析

用 Spss13.0 和 OriginPro7.0 软件进行描述统计分析和回归分析,再将服从正态分布的原始数据作为区域化变量,用 GS+ 软件进行地统计分析,建立变异函数的半方差 (Semivariance) 理论模型来研究其空间异质性特征。

半方差函数的计算公式^[19]为:

$$R(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2, i = 1, 2, \dots, h \quad (1)$$

式中, $z(x_i)$ 和 $z(x_{i+h})$ 分别为区域化随机变量 z 在空间位置 x_i 和 x_{i+h} 上的取值, $N(h)$ 是抽样间隔等于 h 时的点对数, $R(h)$ 为变异函数值 (又称为半方差)。

分形维数的计算公式为:

$$D = \frac{(4 - m)}{2} \quad (2)$$

式中, m 为双对数半方差图的斜率, D 为分形维数。

2 结果分析

2.1 灌丛沙堆形态特征

怪柳灌丛沙堆是一个凸起的近圆形或椭圆形沙包,丘顶浑圆,坡度较缓。大部分沙堆为独立型,在沙漠生境通常沿风向形成沙堆链 (额济纳 NE 83°15', 金塔 NE 53°13')。植被盖度较高,在 0.30 ~ 0.47 之间。

在戈壁生境沙堆高度、体积和植被冠幅的均值均小于沙漠生境,最大均值均在额济纳沙漠生境,分别为 4.47 m、1133.5 m³ 和 534.5 m²; 植被高度和盖度的均值在戈壁生境均大于沙漠生境,最大值均在额济纳戈壁生境,分别为 2.27 m 和 0.47。此外,沙堆高度、体积、植被冠幅、高度和盖度等最小均值都在金塔戈壁生境,分别为 1.21 m、3.38 m³、42.3 m²、1.43 m 和 0.30 (表 1)。

2.2 灌丛沙堆形态参数间的关系

沙堆长、短轴间为显著线性关系 ($R^2 > 0.814$), 即长度与宽度协调增长和变化 (图 1)。

沙堆高度随着面积的增加达到最大值,而后逐渐减小,回归曲线为抛物线。但在不同的生境和地点回归曲线的峰值各不相同。在额济纳戈壁生境峰值为 2.85 m, 沙漠生境 8.5 m; 金塔戈壁生境峰值为 1.27 m, 沙漠生境为 3.45 m (图 2)。

沙堆体积随植被冠幅的增加而增加, R^2 在 0.787 ~ 0.882 之间, 具有显著线性关系 (图 3)。

在戈壁生境,随植被冠幅的增加,高度达到峰值 (额济纳为 7.48 m, 金塔 2.45 m) 后逐渐减小,回归曲线为抛物线;在沙漠生境,植被高度和冠幅呈线性关系, R^2 为 0.725、0.685。此外,额济纳的植被高度明显大于金塔 (图 4)。

2.3 灌丛沙堆的空间格局

在荒漠绿洲过渡带,怪柳灌丛沙堆在绿洲边缘的戈壁生境相互分隔呈斑块状,而在沙漠生境呈沙丘链状,且分布都呈聚集状大斑块,格局较明显。其次,沙堆密度在戈壁生境 (1.67 堆 · 100 m⁻²) 明显大于在沙漠生境 (0.78 堆 · 100 m⁻²), 体积则相反 (图 5)。

2.4 灌丛沙堆小尺度的空间异质性

变异函数是地统计学所特有的,是区域化变量在分割距离上样本空间变异的量度。在研究中,块金值 (C_0) 的变化在额济纳小于金塔,基台值 ($C_0 + C$) 额济纳大于金塔 (表 2), 表明怪柳灌丛沙堆的空间异质性由非随机的结构原因形成的变异为主,且额济纳高于金塔。此外,在金塔沙漠生境沙堆高度的 C_0 与 $C_0 + C$ 相

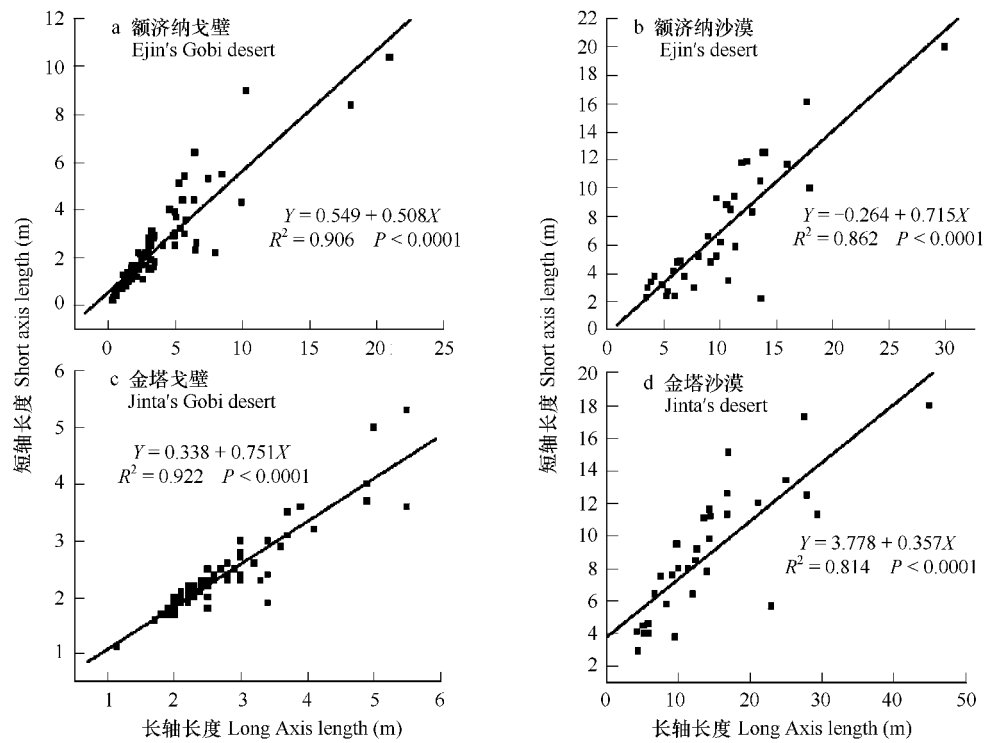


图1 沙堆长轴和短轴的关系

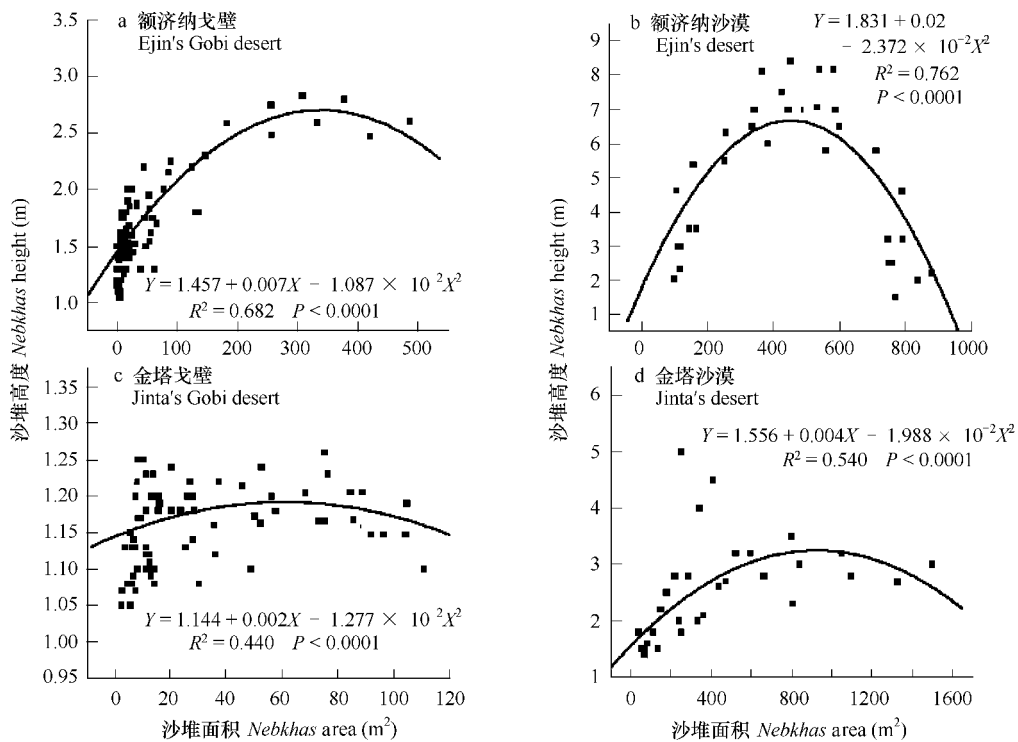
Fig. 1 Relationships between *Nebkhas* long and short axes

图2 沙堆面积和高度的关系

Fig. 2 Relationships between *Nebkhas* area and height

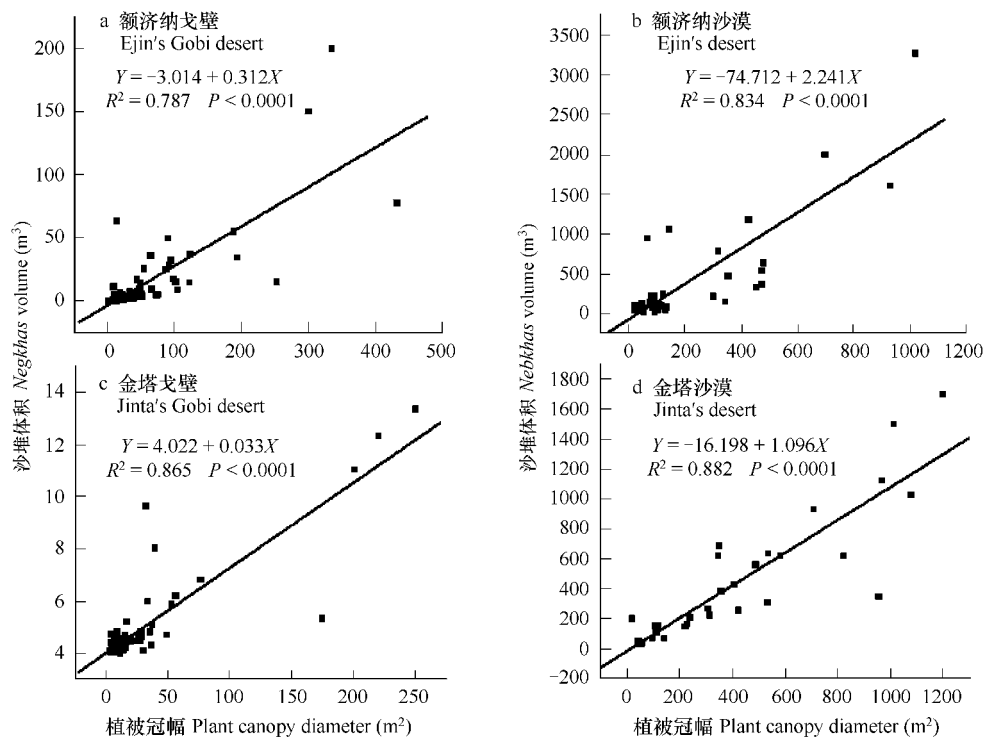


图3 植被冠幅和沙堆体积的关系

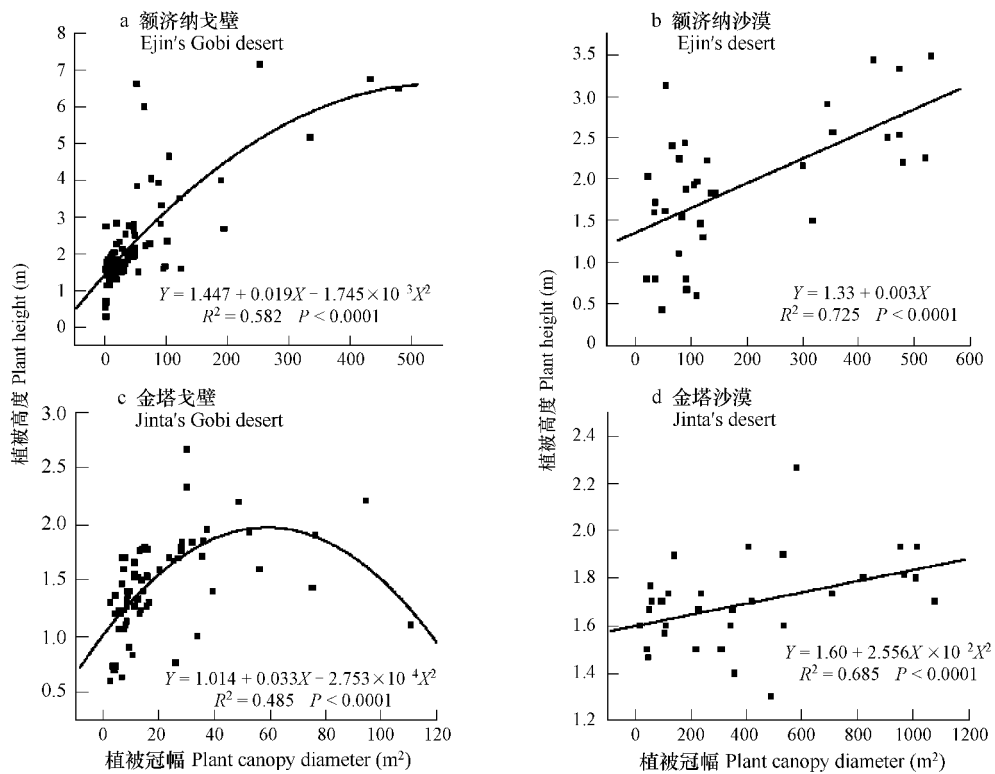
Fig. 3 Relationships between plant canopy diameter and *Nebkhas* volume

图4 植被冠幅和高度的关系

Fig. 4 Relationships between plant canopy diameter and height

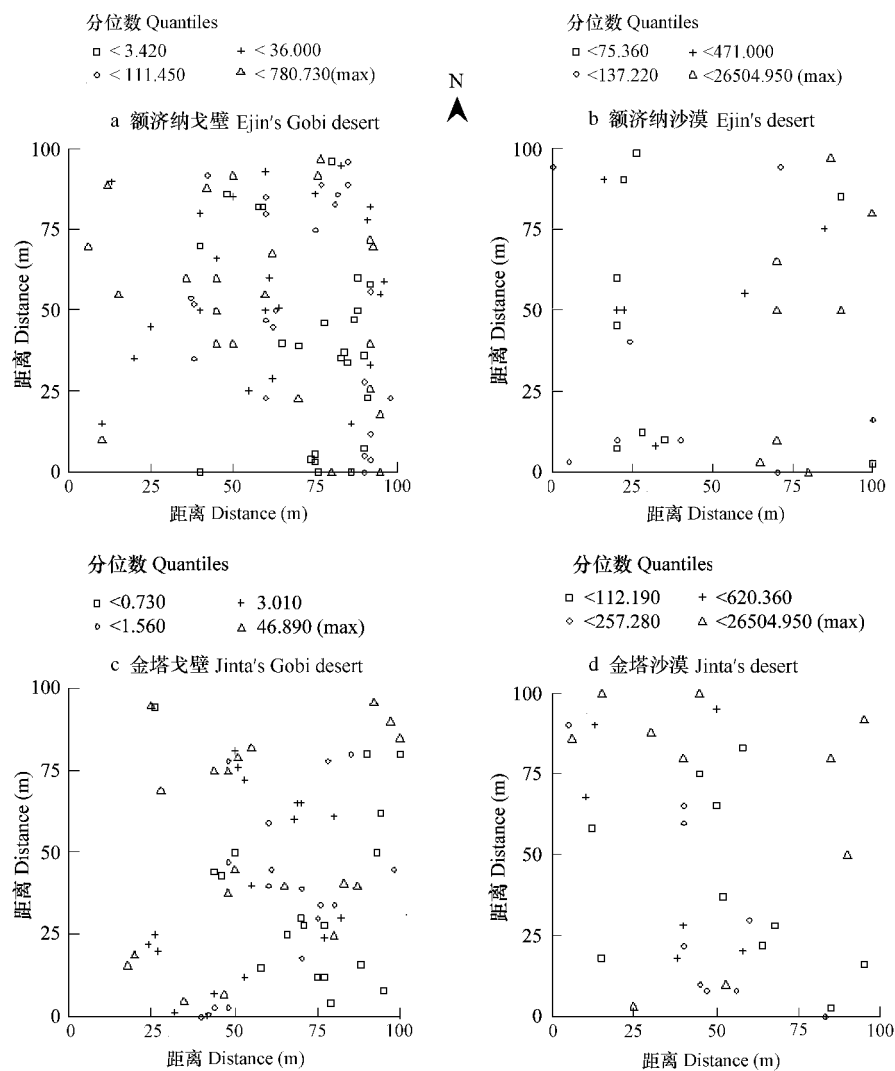


图5 柽柳灌丛沙堆体积空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of the volume of *Tamarix ramosissima* Nebkhas

等,结构比为0,半方差图为纯块金方差图,说明在此生境中沙堆高度呈随机分布。 $C/(C_0 + C)$ 值均大于60%,说明随机变异均小于结构性变异,格局具有较强的空间自相关性。但是,在金塔沙漠生境 $C/(C_0 + C)$ 值的范围在0.00~0.963之间,即由随机因素引起的空间异质性的变化在3.7%~100%之间,表明在此生境柽柳灌丛沙堆的空间异质性存在由随机的原因形成变异为主的可能性。

对最能代表柽柳灌丛沙堆特性的沙堆体积和植被冠幅两个指标进行双对数半方差分析。结果表明:双对数半方差值随样点间距离的增加反映了不同的空间异质性(图6,图7)。图6a、c和图7a的半方差值随间距的增加曲线先波浪式增加后减小,出现的一系列拐点,反映了空间相关规律发生显著变化;图6b、d和图7b、c波浪式增加,即分形维数 D 值在增大,空间相关性也逐渐增大;图7d波浪式减小,空间异质性逐渐增大。双对数半方差图的斜率 m 在沙漠生境均大于戈壁生境(图6、图7),其空间异质性在沙漠生境高于戈壁生境。在金塔沙漠生境斜率最陡,反映了空间异质性最高;而在额济纳戈壁生境最平缓,其空间异质性最低。此外,植被冠幅的 m 值除在金塔沙漠生境和戈壁的沙堆体积均为负数外(图6c、图7d),其它生境下的 m 值均为正数且值差异不大。

3 讨论

(1)柽柳灌丛沙堆是荒漠带靠地下水维系的景观类型,在额济纳和金塔观测点的数据表明,灌丛沙堆高

表 1 柽柳灌丛沙堆的形态特征描述统计

Table 1 Descriptive statistics of morphological characteristics of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas*

地点 Sites	戈壁 Gobi Desert ($n = 167$)				沙漠 Desert ($n = 78$)			
	沙堆 <i>Nebkhas</i>		植被 Plant		沙堆 <i>Nebkhas</i>		植被 Plant	
	高度(m) Height	体积(m^3) Volume	冠幅(m^2) Canopy Diameter	高度(m) Height	盖度 Coverage	高度(m) Height	冠幅(m^2) Canopy Diameter	盖度 Coverage
额济纳 Ejin	平均 Mean	36.12	53.34	2.27	0.47	4.47	534.51	0.31
	标准差 Std deviatio	98.73	83.65	1.36	0.17	3.16	1933.51	0.13
	样本方差 Sample varianc	5493.92	6990.76	1.85	0.03	10.02	3738444.51	0.02
	最小值 Minimum value	0.50	0.52	0.27	0.10	0.50	21.72	0.02
	最大值 Maximum value	3.21	792.22	7.15	0.90	18.02	11246.23	0.55
金塔 Jinta	偏斜度 Skewness	2.17(0.26)	5.09(0.26)	2.07(0.26)	-0.15(0.26)	1.20(0.41)	5.43(0.41)	0.08(0.41)
	平均 Mean	1.21	4.86	1.43	0.30	2.55	378.74	0.32
	标准差 Std deviatio	1.21	3.38	0.39	0.14	1.06	320.44	0.19
	样本方差 Sample varianc	1.04	3.91	0.15	0.02	1.13	102645.23	0.04
	最小值 Minimum value	0.32	0.35	0.60	0.05	1.40	18.75	0.10
	最大值 Maximum value	2.50	55.38	2.67	0.88	6.00	1079.46	0.70
	偏斜度 Skewness	3.82(0.28)	4.43(0.28)	0.13(0.28)	0.98(0.28)	1.38(0.28)	0.84(0.42)	0.13(0.42)

n :柽柳灌丛沙堆丛数 The amount of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas*

表 2 柽柳灌丛沙堆形态特征的变异函数理论模型及其参数

地点 Sites	戈壁 Gobi Desert ($n = 167$)				沙漠 Desert ($n = 78$)			
	沙堆 <i>Nebkhas</i>		植被 Plant		沙堆 <i>Nebkhas</i>		植被 Plant	
	高度(m) Height	体积(m^3) Volume	冠幅(m^2) Canopy Diameter	高度(m) Height	盖度 Coverage	高度(m) Height	冠幅(m^2) Canopy Diameter	盖度 Coverage
额济纳 Ejin	C_0	0.051	0.035	0.006	0.002	0.050	0.506	0.001
	$C + C_0$	1.64	1.43	0.18	0.02	0.35	1.70	0.01
	A_0	11.11	10.62	12.02	3.34	6.35	71.23	4.02
	$C/(C + C_0)$	0.969	0.976	0.965	0.851	0.860	0.703	0.878
	R^2	0.249	0.226	0.329	0.259	0.195	0.524	0.029
金塔 Jinta	D	1.979	1.990	1.976	1.962	1.953	1.834	1.974
	C_0	0.009	0.001	0.011	0.005	0.194	0.106	0.001
	$C + C_0$	0.04	0.20	0.05	0.02	0.19	1.20	0.02
	A_0	96.71	14.52	164.23	210.92	210.94	6.44	35.62
	$C/(C + C_0)$	0.771	0.913	0.780	0.794	0.857	0.912	0.963
	R^2	0.548	0.468	0.889	0.855	0.285	0.023	0.607
	D	1.826	1.934	1.814	1.845	1.904	1.857	1.823

n :柽柳灌丛沙堆丛数 The amount of *Tamarix ramosissima* *Nebkhas*

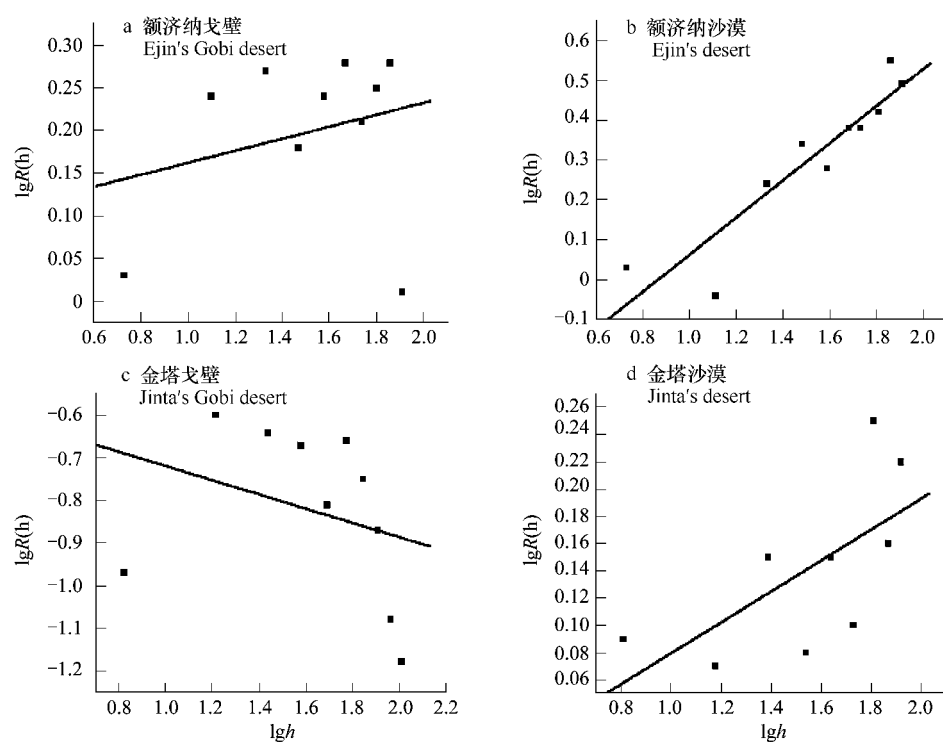


图6 沙堆体积的双对数半方差对数图

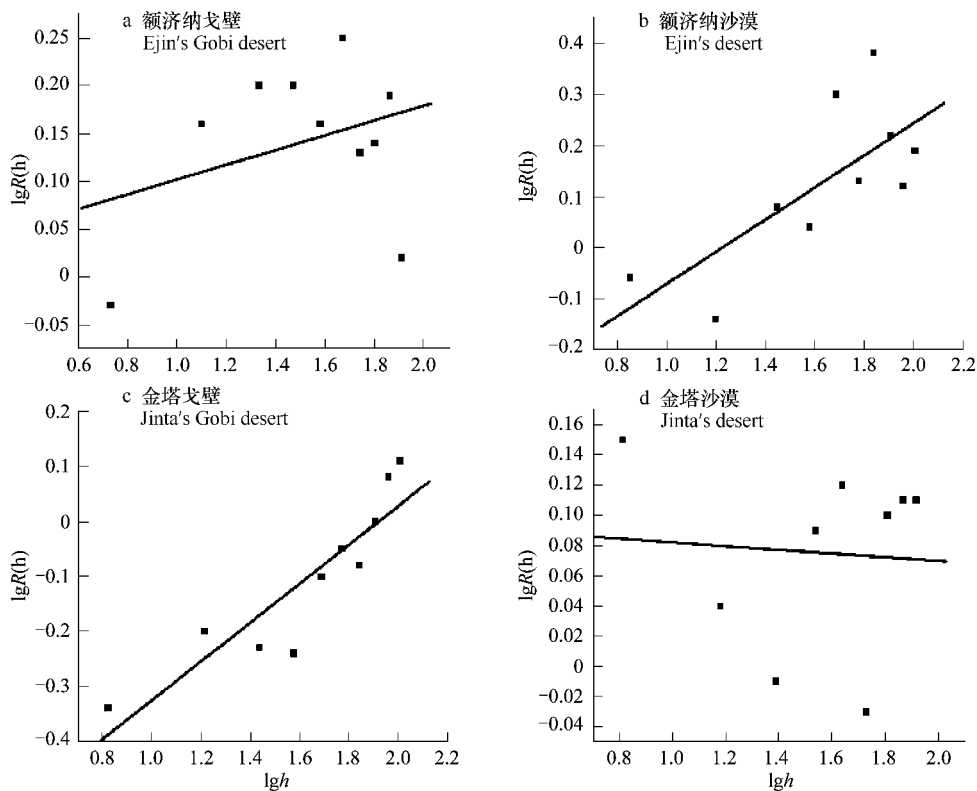
Fig. 6 The log-log Semivariograms of *Nekkhas* volume

图7 植被冠幅的双对数半方差对数图

Fig. 7 The log-log Semivariograms of plant canopy diameter

度介于 1.05 ~ 8.5 m (平均 1.76 m), 长度 0.7 ~ 46.5 m (平均 5.74 m), 宽度 0.5 ~ 20.5 m (平均 3.48 m)。Nickling & Wolfe 在非洲马里的观测表明沙堆高度在 0.35 ~ 0.72 m (平均 0.57 m), 长度 1.5 ~ 17.9 m (平均 5.45 m), 宽度 0.9 ~ 12.5 m (平均 3.45 m)^[9], 其形态参数值均比荒漠绿洲过渡带的小。在美国新墨西哥州中南部, 灌丛沙堆高度在 0.2 ~ 4.3 m 之间, 长度和宽度最大值均可达到 40 m^[10]; 此外, 在我国内蒙古河套地区灌丛沙堆最高可达 3 m (平均为 1.3 m), 长度和宽度最大值均可达 30 m (平均 10 m)^[6], 这两个研究区的灌丛沙堆比荒漠绿洲过渡带的高度小, 面积大。因此, 与以往的研究相比, 在我国极端荒漠区绿洲过渡带灌丛沙堆具有高度较大的特殊性。

(2) Tengberg & Faso 的研究指出当灌丛沙堆遭受强烈侵蚀时, 随沙堆面积增加, 高度逐渐变低, 整个沙堆逐渐趋向消亡^[12]。在我国极端干旱区荒漠绿洲过渡带, 沙堆面积和高度的回归曲线呈抛物线(图 2), 表明柽柳灌丛沙堆处于消退时期。从研究区现状看, 在额济纳存在柽柳植株大量死亡、沙堆风蚀现象。沙堆体积和植被冠幅具有显著线性相关(图 3), 与 Musick 等 & Trujillo 等提出的灌丛是灌丛沙堆形态塑造的重要影响因素^[20, 21]的结论相一致。此外, 无论是戈壁还是沙漠生境, 所有参数指标值在额济纳均大于金塔, 表明柽柳灌丛沙堆更适合在自然条件严酷的额济纳生存。灌丛沙堆是一种主要由风力作用形成的风积地貌类型。在额济纳风速大, 风积强度大, 产生较丰富的沙源供柽柳灌丛深埋。因此, 柽柳灌丛沙堆的适应机理应归于高强度的风积产生较深的沙埋对柽柳灌丛生长的促进作用及灌丛与沙堆间的反馈效应。

(3) 地统计学的变异函数能很好的描述景观格局。研究表明, 在金塔戈壁生境植被高度、盖度和沙漠生境沙堆高度的变程 $A_0 > 100\text{m}$, 空间自相关性在研究尺度范围内(100m)消失(表 2)。这将表明了样地面积太小, 样方的数据差异很大, 这种差异足以掩盖由空间位置的不同带来的差异^[22], 结果不能真实的反映柽柳灌丛沙堆空间异质性。因此, 在将来对柽柳灌丛沙堆空间异质性的研究中应将样地面积扩大到更大的尺度范围。此外, Cambardella 等研究认为: $C/(C_0 + C)$ 值 $> 75\%$ 、 $75\% \sim 25\%$ 、 $< 25\%$ 分别表明变量的空间自相关性较强、中等、较弱^[23]。所以, 在额济纳戈壁生境柽柳灌丛沙堆空间相关性较强, 沙漠生境和金塔戈壁生境其空间相关性属于中等程度(表 2)。

此外, 在小尺度的研究范围内, 双对数半方差图存在一系列拐点, 反映了空间相关性在拐点前后发生显著变化。分形维数 D 越小于 2, m 值越大, 空间相关性越大^[24]。在研究中, 金塔沙漠生境斜率最陡(图 6), 空间异质性最强, 反映了空间异质性发生了以放牧干扰为主的变异。此外, 双对数半方差的斜率 m 出现负数(图 6, 7), 空间异质性发生大的变异, 表明其环境因素对柽柳灌丛沙堆的空间异质性产生大的影响。

4 结论

(1) 沙堆高度、体积和植被冠幅的均值在戈壁生境均小于沙漠生境, 植被高度和盖度的均值在戈壁生境均大于沙漠生境。此外, 所有参数值在额济纳均大于金塔。

(2) 戈壁生境中沙堆相互分隔呈斑块状格局, 沙漠生境中呈沙丘链状分布。

(3) 空间异质性由非随机的结构原因形成的变异为主, 额济纳的空间异质性高于金塔。

(4) 高强度的风积产生较深的沙埋对柽柳灌丛生长的促进作用及灌丛与沙堆间的反馈效应是柽柳灌丛沙堆的适应性机理。

References:

- [1] Tengberg A. *Nebkhas* dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burina Faso. *Journal of Arid Environment*, 1995, 30: 265 – 282.
- [2] Wang X M, Wang T, Dong Z B, *et al.* *Nebkhas* development and its significance to wind erosion and land degradation in semi-arid northern China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65: 129 – 141.
- [3] Wang T, Wu W, Xue X, *et al.* Time space evolution of desertification land in northern China. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(3): 230 – 235.
- [4] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, *et al.* Geomorphology of sand dunes in the northeast Taklimakan Desert. *Geomorphology*, 2002, 42: 183

—195.

- [5] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, *et al.* Formation of the complex linear dunes in the central Taklimakan Sand Sea, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29: 677—686.
- [6] Yue X L, Ha S, Zhuang Y M, *et al.* Studies on sandy grassland *Nebkhas* — A review. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(5): 738—743.
- [7] Dougill A J, Thomas A D. *Nebkhas* dunes in the Molopo Basin, South Africa and Botswana: Formation controls and their validity as indicators of soil degradation. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50: 413—428.
- [8] Thomas A D, Dougill A J. Processes of *Nebkhas* dune formation and wind-blown nutrient deposition in the Molopo Basin, Southern Africa. *Soil Erosion Research for the 21st Century*, 2001, 5: 490—493.
- [9] Nickling W G, Wolfe A S. The morphology and origin of *Nabkhas*, Region of Mopti, Mali, West Africa. *Journal of Arid Environment*, 1994, 28: 13—30.
- [10] Langford R P. *Nabkha*(coppice dune) fields of south-central New Mexico, U. S. A. *Journal of Arid Environment*, 2000, 46: 25—41.
- [11] Gunatilaka A, Mwango S B. Flow separation and the internal structure of shadow dune. *Sedimentary Geology*, 1989, 61: 125—134.
- [12] Tengberg A, Faso B. A comparative analysis of *Nebkhas* in central Tunisia and northern Burkina Faso. *Geomorphology*, 1998, 22: 181—192.
- [13] Zhao X, Zhao W Z, Bao Y, *et al.* Eco-environmental fragility and rehabilitation in Bashang of Hebei Province. Beijing: China Environmental Science Press, 1997. 55—56.
- [14] Xia X C, Zhao Y J, Wang F B, *et al.* Characteristic of layers shape and significance of possible chronology of *Tamarix ramosissima* sand-hillock. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(13): 1337—1338.
- [15] Sterk G, Herrmann L, Bationo A. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land Degradation and Development*, 1996, 7: 325—335.
- [16] Whitford W G, Anderson J, Rice P M. Stemflow contribution to the fertile island effects in creosotebush, *larrea tridentata*. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35: 451—457.
- [17] Magdy I. El-Bana, Ivan Nijs, Abdel-Hamid A. Khedr. The importance of phytogenic mounds (*Nebkhas*) for restoration of arid degraded rangelands in northern Sinai. *Restoration Ecology*, 2003, 11(3): 317—324.
- [18] Zhao X, Zhang X Y, Li Q S, *et al.* Influence of sandy desertification on *Tamarix* community in Ejia oasis. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 467—472.
- [19] Zu Y G, Ma K N, Zhang X J. A fractal method for analysing spatial heterogeneity of vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(3): 333—337.
- [20] Musick H B, Trujillo S M. Wind-tunnel modeling of the influence of vegetation structure on saltation threshold. *Earth Surface Processes and Land Forms*, 1996, 21: 589—606.
- [21] Musick H B, Gillette D A. Field evaluation of relationships between a vegetation structural parameter and sheltering against wind erosion. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1990, 2: 87—94.
- [22] He Z B, Zhao W Z, Chang X L. The modifiable areal unit problem of spatial heterogeneity of plant community in the transitional zone between oasis and desert using semivariance analysis. *Landscape Ecol.*, 2006, 22: 95—104.
- [23] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci Soc Am*, 1994, 58(5): 1501—1511.
- [24] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advanced Soil Science*, 1985, 3: 1—70.

参考文献:

- [3] 王涛, 吴薇, 薛娴. 中国北方沙漠化土地时空演变分析. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 230—235.
- [6] 岳兴玲, 哈斯, 庄燕美, 等. 沙质草原灌丛沙堆研究综述. *中国沙漠*, 2005, 25(5): 738—743.
- [13] 赵雪, 赵文智, 宝音, 等. 河北坝上脆弱生态环境及其整治. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 55—56.
- [14] 夏训诚, 赵元杰, 王富葆, 等. 红柳沙包的层状特征及其可能的年代学意义. *科学通报*, 2004, 49(13): 1337—1338.
- [18] 赵雪, 张小由, 李启森, 等. 额济纳绿洲沙漠化对柽柳群落影响的研究. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 467—472.
- [19] 祖元刚, 马克明, 张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法. *生态学报*, 1997, 17(3): 333—337.