

和田河西侧胡杨沙堆的三维形态特征及空间自相关性

张展赫¹, 来风兵^{1,2}, 陈蜀江¹, 孙虎²

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710119)

摘要: 基于野外 RTK 测量数据, 利用 GIS 和统计手段进行信息提取与统计, 定量分析了和田河西侧 10 个样方内胡杨沙堆的三维形态特征及空间自相关性。结果表明: (1) 胡杨沙堆形态不规则, 各形态参数变化范围均较大, 大部分沙堆处于发育阶段; (2) 沙堆呈斑块分布, 中等面积沙堆居多。最小距离指数表明研究区内胡杨沙堆总体上呈离散分布; (3) 坡度统计结果显示沙堆坡度主要分布在 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$; (4) 胡杨沙堆的空间自相关尺度最大值为 120 m, 在各自空间尺度上, 沙堆的高度和底面积呈复杂的空间自相关关系。

关键词: 胡杨沙堆; 三维形态特征; 空间自相关性; RTK 测量; 和田河西侧

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0137-06

Three-Dimensional Shape Characteristics and Spatial Auto-Correlation of *Populus euphratica* Dune in the Sparse Forest Sandy Land on the West of Hotan River

ZHANG Zhanhe¹, LAI Fengbing^{1,2}, CHEN Shujiang¹, SUN Hu²

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the field investigation with RTK, this paper studied the *Populus euphratica* dune with shape characteristics and spatial pattern, and quantitatively analyzed the spatial auto-correlation of dune by GIS and Statistics. The results show that: (1) the dunes have irregular contour with significant spatial differences on morphological parameters, most of dunes are at the developing stage; (2) all dunes of fields distribute in patches and on the patch levels, *Populus euphratica* dunes of the study area are dispersed; (3) *Populus euphratica* dunes distribute on different slopes with gradients ranging from 0° to 50° ; (4) since the study area goes into the desert hinterland and is dispersed, the scale of spatial auto-correlation is 120 m, and at each scale of plots, the height and bottom area of dunes present the complex relationship.

Keywords: *Populus euphratica* dune; three-dimensional shape characteristics; spatial auto-correlation; RTK; the west of Hotan River

地质历史近期, 和田河曾在塔里木盆地自西向东大范围迁移^[1], 在塔克拉玛干沙漠中留下了很多古河道印记, 同时也留下了广泛分布于沙漠中的胡杨, 在风的作用下, 沙粒受干扰堆积在胡杨树下, 形成胡杨沙堆。

目前, 国内外学者研究的重点是灌丛沙堆^[2], 其次为草丛沙堆。在沙堆形态特征研究方面, Tengberg 等^[3]调查了布基纳法索和突尼斯的灌丛沙堆形态参数, 分析了各形态参数间的关系和变化规律, 阐明了灌丛沙堆形态发育的趋势及阶段; 武胜利^[4]以新疆和田河流域典型的灌(草)丛沙堆为研究对象, 阐明了沙堆发育动力机制; 王乐等^[5]对半干旱区农田灌丛

沙堆形态及沉积特征进行了研究; 王翠等^[6]通过研究花花柴草本植物与沙堆的形态发育特征及其相关关系, 估算沙堆体积; 韩磊, 张媛媛等^[7-9]以内蒙古高原狭叶锦鸡儿灌丛沙堆为对象, 了解沙堆形态特征、发育和固沙能力、灌丛土壤资源的空间异质性, 讨论了草原灌丛化机制和“沃岛”与灌丛化草原功能的维持关系; 李万娟^[10]研究了新疆艾比湖周边怪柳沙堆的个体特征及环境指示意义, 并进行探讨; 穆桂金^[11]对灌草丘的发育条件及沉积特征进行了研究。

但是, 对胡杨沙堆的研究甚少。胡杨林在和田河中段的麻扎塔格一带及和田河下游沿岸分布较多。由于群落密度降低, 风蚀作用加剧, 形成起伏沙地, 进

而形成流动沙丘,除紧贴河床的沼泽、草甸外,多数群落类型的破坏性演替有不可逆性,反映出沙漠生态环境的脆弱性^[12]。研究胡杨沙堆三维形态特征及空间自相关性,对合理利用荒漠植被,阻挡风沙侵蚀,生态环境学意义重大。藉此,本文在前人关于沙堆研究的基础上,以胡杨沙堆为研究对象,应用 RTK 技术获取胡杨沙堆三维形态数据,定量分析和田河西侧胡杨沙堆的三维形态特征和空间自相关性,以期为沙堆研究,尤其是胡杨沙堆研究积累研究资料。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于和田河西侧,麻扎塔格山以南的塔克拉玛干沙漠,地理坐标为 $37^{\circ}41'41''-38^{\circ}26'21''N$, $79^{\circ}21'58''-80^{\circ}20'12''E$ (图 1)。本区属暖温带极端干旱荒漠气候,光热资源充足,降水稀少,蒸发强烈,空气干燥,气温日较差、年较差大。全年日照时数 2 661.7 h,日照率 58%~65%,太阳总辐射量 $6\ 822.46\ MJ/m^2$, $\geq 10^{\circ}C$ 积温 $4\ 797.60^{\circ}C$,无霜期 224 d。年均降水量 39.61 mm,年均蒸发能力 $2\ 648.70\ mm$,干燥度 > 60 。沿岸各地历年极端最高气温 $43.2^{\circ}C$ (麻扎塔格),极端最低气温 $-28.40^{\circ}C$ (阿拉尔)。土壤以风沙土为主^[4],风沙活动频繁。植被物种组成单一,乔木

层以胡杨为主^[1]。

1.2 研究方法

2013 年 10 月,从和田市出发,经墨玉县至喀瓦克乡,进入石油沙漠公路,沿南北向公路两侧自南向北选择样方 1—5,沿东西向公路两侧自西向东选择样方 6—10,共 10 个样方(图 1),样方内基本情况见表 1。样方内胡杨离和田河岸较远,属荒漠化胡杨林,地下水位较深,全部为过熟植株,稀疏而分散^[12]。

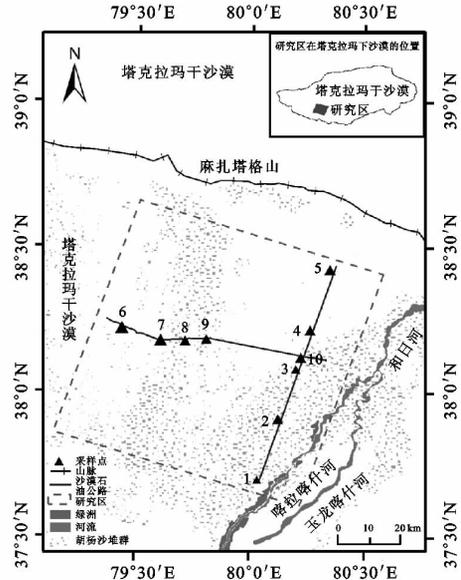


图 1 研究区位置示意和样方分布

表 1 样地基本情况

样方号	样方大小		沙堆分布密度/ (个·km ⁻²)	沙堆个数	样方中心点坐标	
	长/m	宽/m			纬度	经度
1	50	50	7.60×10^3	19	$37^{\circ}41'59''$	$80^{\circ}02'06''$
2	100	100	0.30×10^3	3	$37^{\circ}54'35''$	$80^{\circ}07'26''$
3	50	50	4.40×10^3	11	$38^{\circ}12'52''$	$80^{\circ}16'31''$
4	100	100	1.90×10^3	19	$38^{\circ}04'46''$	$80^{\circ}12'37''$
5	100	100	0.60×10^3	6	$38^{\circ}25'38''$	$80^{\circ}21'48''$
6	200	200	0.33×10^3	13	$38^{\circ}13'16''$	$79^{\circ}26'11''$
7	200	200	0.20×10^3	8	$38^{\circ}10'43''$	$79^{\circ}36'22''$
8	100	100	0.50×10^3	5	$38^{\circ}10'39''$	$79^{\circ}42'51''$
9	100	100	0.60×10^3	6	$38^{\circ}10'59''$	$79^{\circ}48'27''$
10	100	100	0.24×10^3	24	$38^{\circ}07'18''$	$80^{\circ}13'20''$

采用 RTK 技术测量样方内每个沙堆的轮廓线、脊线和顶点坐标,以及样方内地形特征点。为了提高测量精度,对每个沙堆重复测量 2 次,取平均值^[13]。胡杨沙堆的底面积(S)、高度(H)、表面积(U)、体积(V)4 种三维形态参数利用 ArcGIS 10.2 软件的面积计算功能,以及 Stack profile, Surface volume, Slope 模块进行提取和分析;沙堆斑块、坡度分布、等高线和垂向分布图均采用 3D ANALYSIS 模块绘制。沙堆轮廓面分布密度表达为沙堆面积/样方面积(%),反映胡杨沙堆分布的密集程度。

最近邻指数表征沙堆斑块分布的离散程度。

ArcGIS 10.2 软件的 Average Nearest Neighbor 模块测量每个要素与最近要素的距离,并求平均值。平均距离与假定随机分布距离比值为最邻近指数。若指数 < 1 ,胡杨沙堆为聚集分布;若指数 = 1,胡杨沙堆为随机分布;若指数 > 1 ,胡杨沙堆为离散分布。

$$\text{最近邻指数} = \frac{\text{平均距离}}{\text{随机距离}} \quad (1)$$

空间自相关是检验某一要素的观测值是否受其临近空间点上变量影响,它可以定量描述变量的空间依赖性^[14]。Moran 系数是常用的自相关系数,可以结合尺度分析。ArcGIS 10.2 软件的增量空间自相

关模块 Incremental Spatial Autocorrelation 基于 Moran 系数进行多尺度的空间自相关分析,计算不同距离下的 Moran 指数,取值为 $-1\sim 1$, >0 表示正相关, $=0$ 表示不相关, <0 表示负相关。Moran 指数计算公式如下:

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

式中: I ——Moran 指数; x_i, x_j ——变量 x 在相邻配对空间单元的取值; \bar{x} ——变量平均值; w_{ij} ——相邻权重(通常规定,若空间单元 i, j 相邻则 $w_{ij}=1$, 否则 $w_{ij}=0$); n ——空间单元总数。

2 结果与分析

2.1 胡杨沙堆三维形态特征

统计结果显示(表 2),南北向、东西向样方沙堆的形态参数变化范围均较大,说明研究区内的沙堆形态特征空间差异性很大。南北向,样方 5 沙堆的体型

较大(平均高度、底面积和体积值大于其他样方),即北面的沙源较丰富,沙堆发育好;样方 1 沙堆的体型最小,研究区南部荒漠绿洲过渡带植被的生境较好,沙源一般。东西向,样方 7 沙堆体型上优于其他样方,表明沙漠腹地环境恶劣,沙源充足;样方 10 沙堆体型最小,与样方 3 沙堆的体型相似,两个样方靠近河岸沙漠过度带,地下水源较其他样方充足,植被生长密集致使生态环境较好。样方 2 沙堆处于老河道边缘,各指标明显较高,样方里出现个别体型较大沙堆,这个现象在其他样方中并未出现,和田河大范围迁移,形成广阔的冲积平原,在其尾间地区仍然可见到河道迁移后留下的废弃河床,沙丘的高度一般随着与河床的距离增加而高度增大,但由于河床的摆动侧蚀,使部分地段的大沙丘直接与河床接触^[15],因此河流迁移而废弃的老河道会产生个别大型胡杨沙堆。总体来看,除样方 2 以外,南北向各样方沙堆的体型从大到小排序依次为样方 5,4,3,1,东西向为样方 7,8,6,9,10。

表 2 胡杨沙堆的形态特征

样方		高度/m	底面积/m ²	表面积/m ²	体积/m ³
1	极小值	0.12	0.36	0.25	0.35
	极大值	0.28	3.86	3.71	9.10
	均值±标准误差	0.16±0.01	1.32±0.23	1.21±0.23	2.26±0.63
2	极小值	0.72	10.69	10.46	27.50
	极大值	1.28	20.81	20.45	54.78
	均值±标准误差	1.07±0.18	17.04±3.19	16.73±3.15	44.61±8.61
3	极小值	0.08	0.41	0.49	0.68
	极大值	1.02	32.35	29.82	58.68
	均值±标准误差	0.30±0.08	6.61±2.76	6.57±2.58	12.20±4.99
4	极小值	0.07	0.86	1.04	1.93
	极大值	4.66	56.51	68.59	127.44
	均值±标准误差	1.21±0.30	14.68±3.66	17.82±4.45	33.10±8.26
5	极小值	0.33	3.71	4.36	7.12
	极大值	3.57	61.81	74.48	135.21
	均值±标准误差	1.69±0.47	28.08±8.49	33.77±10.24	60.84±18.71
6	p	0.000	0.000	0.000	0.000
	极小值	0.74	10.99	13.15	28.32
	极大值	2.61	44.67	53.80	119.07
7	均值±标准误差	1.54±0.16	25.48±2.83	30.63±3.41	61.96±7.78
	极小值	0.41	6.89	8.20	17.26
	极大值	3.94	68.46	82.52	183.19
8	均值±标准误差	1.81±0.38	33.78±6.99	40.65±8.44	89.73±18.84
	极小值	0.28	3.87	4.56	9.14
	极大值	2.65	55.93	67.38	149.40
9	均值±标准误差	1.32±0.42	26.69±9.23	32.10±11.14	70.63±24.88
	极小值	0.57	10.22	12.21	26.23
	极大值	1.87	38.78	46.69	103.20
10	均值±标准误差	0.94±0.20	18.32±4.39	21.99±5.30	48.06±11.84
	极小值	0.15	0.84	0.73	0.79
	极大值	4.40	83.21	100.31	222.93
	均值±标准误差	0.87±0.26	15.41±5.25	17.28±5.96	37.61±13.31
	p	0.14	0.22	0.14	0.12

注:显著性水平 $p<0.05$ 。

2.2 胡杨沙堆三维空间分析

2.2.1 胡杨沙堆的水平分布 样方共有沙堆 114 个, 针对每一个沙堆进行比较、筛选, 发现样方 4 的沙堆轮廓清晰, 地形多变, 相对更有代表性, 因此选择样方 4 里某一典型独立沙堆, 作为水平分布和三维模型展示, 以此来诠释沙堆的三维空间具体特征。由图 2 可以看出, 沙堆呈斑块分布, 形态不规则, 表面复杂。南北向, 各样方轮廓面分布密度从大到小依次为 3, 4, 5, 1, 2, 东西向为 10, 8, 9, 6, 7。

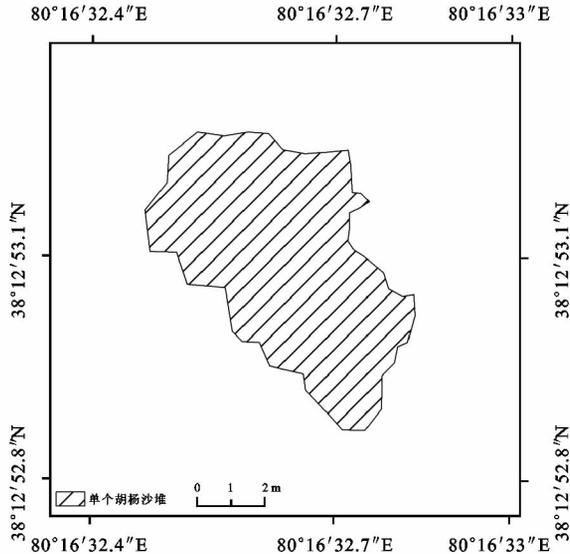


图2 沙堆斑块分布

最小距离指数计算结果表明(表 3), 研究区胡杨沙堆总体上为离散分布, 样方 1 指数最小, 为 0.81, 沙堆分布聚集程度最高, 样方 8 指数最大, 为 1.56, 沙堆分布离散程度最高。南北向, 样方 1, 2 处于南面荒漠绿洲过渡带边缘, 受过渡带影响沙堆分布呈聚集分布。东西向, 靠近东部和田河沿岸自然绿洲, 样方胡杨沙堆聚集分布, 向西深入沙漠腹地, 逐渐离散分布。除样方 1, 2, 4, 10 样方内胡杨沙堆为聚集分布外, 其余均为离散分布。总体来看, 南北向, 各样方最近邻指数从大到小排序依次为 5, 3, 2, 4, 1, 东西向为 8, 6, 9, 7, 10。

表3 最近邻指数统计

样方	平均距离	假定随机距离	最近邻指数	分布模式
1	5.07	5.74	0.88	聚集
2	28.71	28.87	0.99	聚集
3	8.04	7.54	1.07	离散
4	10.31	11.47	0.90	聚集
5	29.88	20.41	1.46	离散
6	38.77	27.74	1.40	离散
7	44.56	35.36	1.26	离散
8	34.91	22.36	1.56	离散
9	25.78	20.41	1.27	离散
10	8.29	10.21	0.81	聚集

2.2.2 胡杨沙堆的三维模型 胡杨沙堆表面上的等高线等高距为 0.30 m(图 3), 在沙堆下部分布较为密集。沙堆斜向发育, 似圆锥型(图 4), 最高点的高程为 1 160.05 m, 两端最低点高程值分别为 1 157.09, 1 159.33 m, 沙堆的高度确定为 2.96 m(图 5), 垂向上, 沙堆从底部到顶部的表面坡度逐渐变大, 并分布有不同的高程值。10 个样方的坡度统计结果表明(图 6), 研究区胡杨沙堆坡度主要分布在 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。南北向, 5 个样方的峰值对应的坡度从大到小排序依次为样方 3, 4, 5, 2, 1, 而样方 1, 2 有明显的双峰。东西向, 5 个样方峰值对应的坡度均在 35° 上下, 除样方 7 以外, 其余样方沙堆在 10° 处也有少量分布。

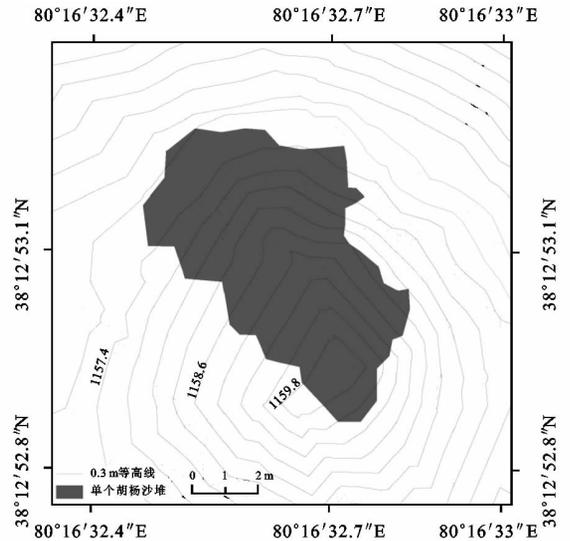


图3 沙堆 0.30 m 等高线分布

2.2.3 胡杨沙堆的空间自相关 用 SPSS 19.0 软件对胡杨沙堆高度和底面积数据进行正态分布检验, 不符合正态分布的进行数据转换(对数转换)和离散值修改。

通过对胡杨沙堆三维空间格局的构建, 分析胡杨沙堆高度和底面积的空间自相关性, 如图 7, 8 所示, 研究区胡杨沙堆的自相关尺度最大值为 120 m, 沙漠腹地的自相关尺度均大于河岸绿洲、荒漠绿洲过渡带边缘, 且在各自空间尺度上, 胡杨沙堆的高度和底面积呈复杂的空间相关性, 除南北向的样方 4, 1, 东西向的样方 6, 9 有部分尺度为正相关以外, 其余均为负相关, 每一个样方在不同尺度上均有多个峰值, 这也符合沙堆离散分布的特征。南北向, 高度方面, 样方 4 为正相关, 相关系数随距离增大呈现抛物线形态, 在 15.90 m 处有峰值 0.22; 底面积方面, 样方 4 沙堆自相关特征与高度相似, 正相关尺度为 5~37.69 m。东西向, 高度方面, 样方 6, 9 在整个尺度上均为正相关; 底面积方面, 样方 6 在 <43.34 m 尺度上呈正相关。



图 4 胡杨沙堆三维图

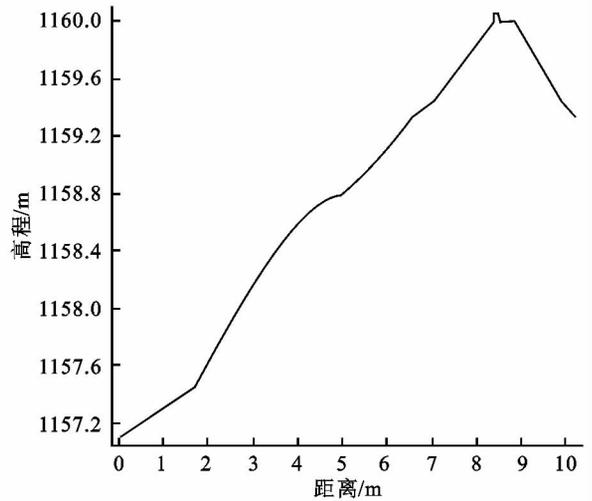


图 5 沙堆垂向剖面图

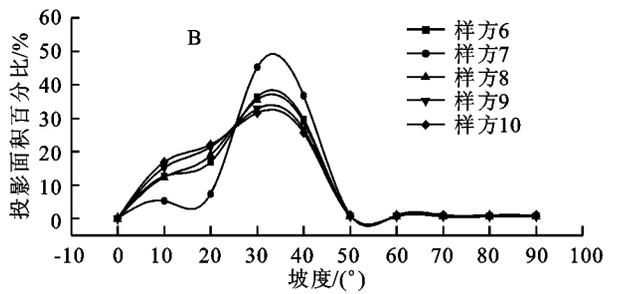
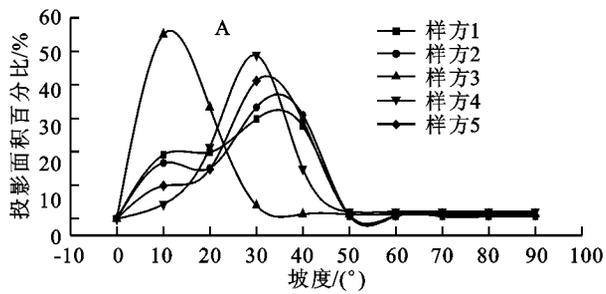


图 6 坡度分布统计

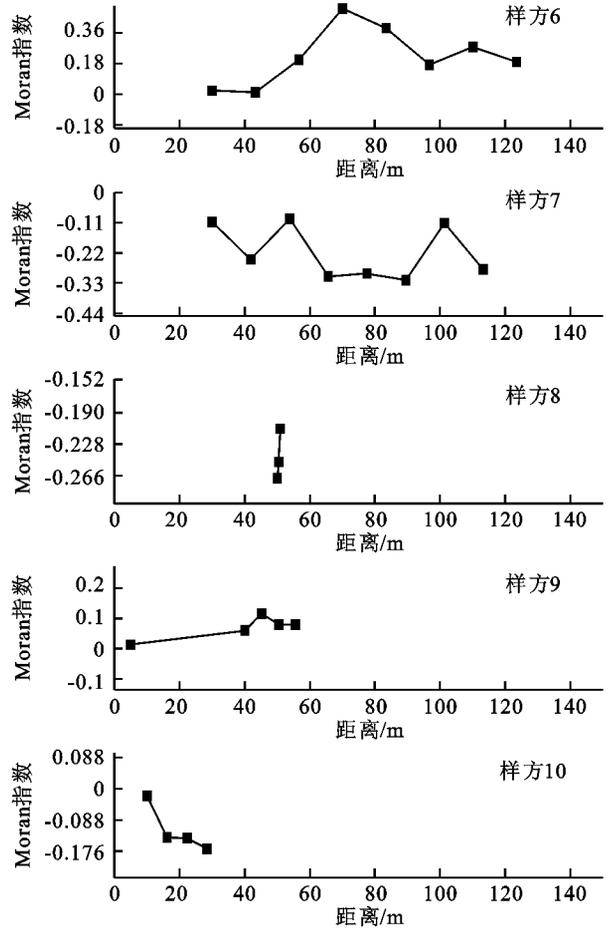
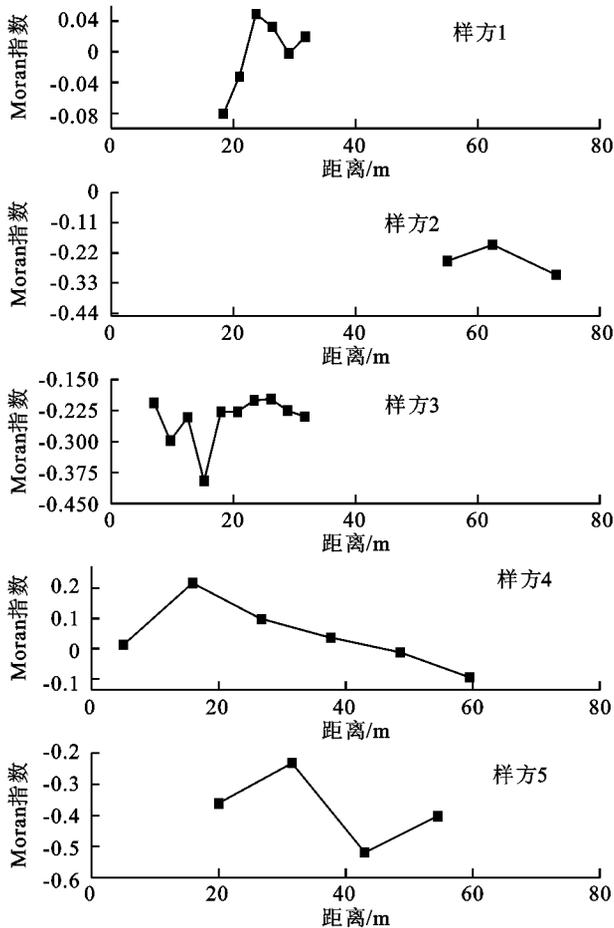


图 7 沙堆高度增量空间自相关性

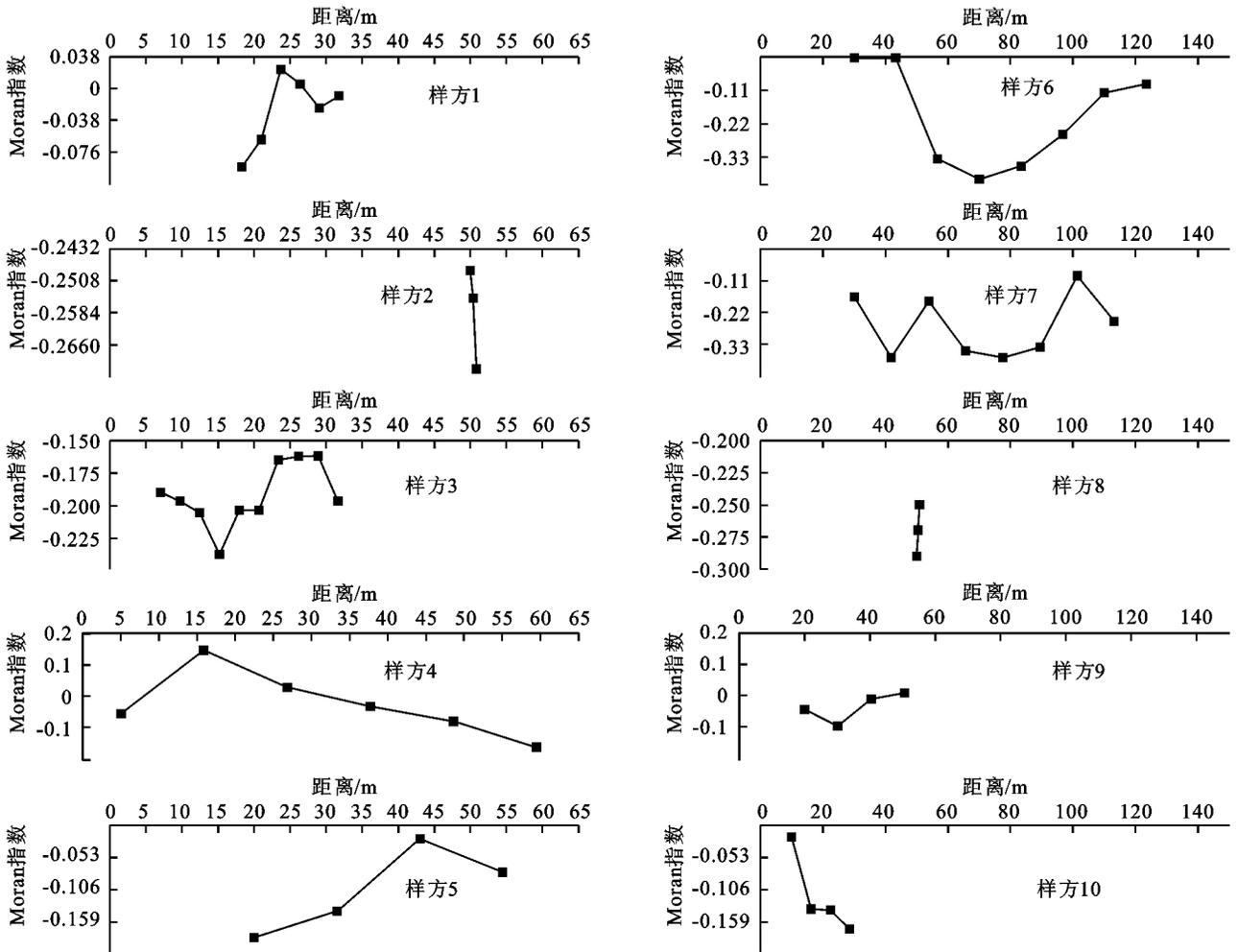


图8 沙堆底面积增量空间自相关性

3 结论与讨论

(1) 胡杨沙堆发育发展的首要条件是有夹沙气流的存在,风作为沙物质的搬运动力,沙作为沙堆形成的物质基础,由于胡杨外形结构的通透性以及植物生长和沙丘发育之间的相互作用,改变了风沙流场的结构,促使粉尘沉降堆积,形成胡杨沙堆。研究区样方内胡杨沙堆形态不规则,不同样方沙堆的形态特征差异很大,大部分沙堆处于发育阶段。南北向,由南部荒漠绿洲过渡带边缘往北,沙堆体型逐渐增大;东西向,由沙漠腹地至河岸沙漠过渡带边缘,沙堆体型逐渐减小。冬季和田河下游以东北风为主,但风沙活动比较平静,夏季以偏东风为主,多大风沙尘^[15],与沙堆体型变化趋势一致。胡杨沙堆稀疏分布,沙堆分布密集的样方为3,4,10,这3个样方处在南北、东西向沙漠公路交汇处。

(2) 沙堆为斑块分布,中等面积沙堆居多。最小距离指数说明研究区总体上为离散分布,样方1分布聚集程度最高,样方8离散程度最高。沙堆沿地表斜向发育,坡度统计显示沙堆坡度主要分布在 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$

之间,南北向,样方沙堆表面坡度从南至北逐渐增大,东西向,各样方沙堆表面坡度均集中在 35° 左右。沙堆表面复杂,与其他种类沙堆明显不同,是因为胡杨相对其他植被高度和冠幅较大,干扰风沙流堆积方式。因样方内沙堆数量过少,因此最近邻指数和空间自相关性的分析效果并不显著,结合样方沙堆的密度,以及最邻近指数计算的要求,建议后续研究应将样方尺度扩大为 $800\text{ m}\times 800\text{ m}$ 。

(3) 胡杨沙堆的自相关尺度最大值为120 m,在各自空间尺度上,胡杨沙堆的高度和底面积呈复杂的空间相关性。沙漠腹地的自相关尺度均大于河岸绿洲、荒漠绿洲过渡带边缘。

参考文献:

- [1] 程其畴. 和田河流域水文特性[J]. 水文, 1986(6): 50-57.
- [2] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. 地理学报, 2010, 65(3): 339-350.
- [3] Tengberg A, Chen D. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 181-192.

显著,时间上,生态需水定额减少,但在人类活动影响下,景观连通性下降,多样性上升。与山区的结论相反,生态需水定额的减少,将有利于植被的生长,但由于人类活动的影响,朝不平衡方向发展。

参考文献:

- [1] 冯异星,罗格平,周德成,等. 近 50 a 土地利用变化对干旱区典型流域景观格局的影响:以新疆玛纳斯河流域为例[J]. 生态学报,2010,30(16):4295-4305.
- [2] 程维明,周成虎,李建新. 新疆玛纳斯湖景观演化及其生态环境效应[J]. 第四纪研究,2001,21(6):560-565.
- [3] 姚永慧,汪小钦,周成虎,等. 新疆玛纳斯湖近 50 a 来的变迁[J]. 水科学进展,2007,18(1):17-23.
- [4] 姚永慧,励惠国. 新疆玛纳斯湖演化的地貌特征[J]. 干旱区研究,2010,27(1):57-63.
- [5] 陆晴,刘丽娟,王玉刚,等. 新疆三工河流域农业绿洲近 30 a 景观格局变化及其驱动力[J]. 生态学杂志,2013,32(3):748-754.
- [6] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等. 干旱区绿洲土地利用/覆被及景观格局变化特征:以新疆精河县为例[J]. 生态学报,2009,29(3):1251-1263.
- [7] Richter B D, Mathews R, Harrison D L, et al. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity[J]. Ecological Applications,2003,13(1):206-224.
- [8] 范文波,周宏飞,李俊峰. 玛纳斯河流域生态需水量估算[J]. 水土保持研究,2010,17(6):242-251.
- [9] 何京丽. 半干旱区草原植被建设生态需水相关问题的探讨[J]. 水土保持研究,2006,13(6):271-275.
- [10] Cai X, Rosegrant M W. Optional water development strategies for the Yellow River Basin: Balancing agricultural and ecological water demands [J]. Water Resources Research,2004,40(8):1-29.
- [11] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling[J]. BioScience,1999,49(2):119-127.
- [12] 段晋芳,郭青霞,解鸿志. 基于 GIS 的山西永定河植被生态需水管理系统的研建[J]. 水土保持研究,2011,18(1):254-258.
- [13] 刘明,王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应[J]. 生态学报,2008,28(12):5970-5979.
- [14] 刘明,王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化及其驱动力[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1317-1324.
- [15] Wang D, Hao Z, Xiong Z. Modified method for extraction of watershed boundary with digital elevation modeling[J]. Journal of Forestry Research,2004,15(4):283-286.
- [16] 吴洁珍,王莉红,王卫军,等. 生态环境建设规划中引入生态环境需水的探讨[J]. 水土保持研究,2005,12(1):59-62.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Smith M, et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2005,131(1):2-13.
- [18] 官继萍,石培基,杨雪梅,等. 干旱区内陆河流域景观格局及其与环境因子的关系研究:以石羊河流域为例[J]. 土壤,2013,45(1):143-151.

(上接第 142 页)

- [4] 武胜利. 新疆和田河流域灌(草)丛沙堆发育机制研究[D]. 上海:华东师范大学,2007.
- [5] 王乐,李改欣,王仁德,等. 半干旱区农田灌丛沙堆形态及沉积特征[J]. 水土保持研究,2014,21(1):76-80.
- [6] 王翠,雷加强,李生字,等. 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带花花柴(*Kareliniacaspica*)沙堆的形态特征[J]. 中国沙漠,2013,33(4):981-989.
- [7] 韩磊,张媛媛,马成仓,等. 狭叶锦鸡儿(*Caraganastenophylla*)灌丛沙堆形态发育特征及固沙能力[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1305-1309.
- [8] 韩磊,张媛媛,解李娜,等. 狭叶锦鸡儿和小叶锦鸡儿灌丛沙堆的形态和发育及灌丛固沙能力的比较研究[J]. 天津师范大学学报:自然科学版,2012,32(3):65-70.
- [9] 张媛媛. 内蒙古局原锦鸡儿属植物灌丛沙堆的初步研究[D]. 天津:天津师范大学,2012.
- [10] 李万娟. 新疆艾比湖周边怪柳沙堆特征初步研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2009.
- [11] 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.
- [12] 路端正. 和田河沿岸植被与生态环境[J]. 北京农学院学报,1994(2):153-160.
- [13] 白彬. 基于 GPS 与 GIS 的艾比湖流域灌丛沙堆空间格局分析[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2008.
- [14] 彭飞,王涛,刘立超,等. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J]. 中国沙漠,2012,32(3):593-599.
- [15] 孙秋梅. 和田河流域灌丛沙堆形成动力机制风洞实验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2007.