

和田河流域灌(草)丛沙堆的形态 特征与发育过程

武胜利, 李志忠, 惠 军, 葛 琳, 何牡丹

(新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 灌(草)丛沙堆形态是由区域植物、风力和沙源相互作用塑造的一种动力平衡形态。本文在对新疆和田河流域灌(草)丛沙堆野外考察、形态测量和统计分析的基础上, 探讨了该区灌(草)丛沙堆的形态变化规律和不同发育阶段的特征。结果表明: 各种灌(草)丛沙堆的长度、宽度与高度之间存在着较好的相关性, 但不同种类灌(草)丛沙堆以及同一类型沙堆在不同发育阶段的形态特征存在一定差异; 基于沙堆形态特征的数学模型分析, 并结合区域生态环境和风沙环境特点, 可把灌(草)丛沙堆发育划分为各形态指标协同变化的增长阶段、以植物动力影响为主、长宽尺度均衡发展、坡度较大的稳定阶段, 以及沙堆长度相对缩短、各形态指标关系趋于复杂的风蚀衰退阶段。

关键词: 灌(草)丛沙堆; 形态变化; 发育阶段; 和田河流域

文章编号: 1000-0585(2008)02-0314-09

灌(草)丛沙堆是干旱半干旱地区沙漠边缘、半湿润沙地和沙质海岸带常见的一种生物风积地貌类型。近年来不少学者探讨利用灌丛沙堆对区域土地沙漠化进行监测和评价, 而灌丛沙堆的形态学指标是其中最主要的示量特征之一, 因为灌丛沙堆的几何形态是在特定发育阶段中植物、风力和沙源相互作用形成的一种动力平衡形态, 反映了特定区域的风沙环境特点和土地沙漠化的阶段性特征^[1-9]。Khalaf等^[10]研究了科威特北部海岸带平原潮上带盐滩上发育的灌(草)丛沙堆, 发现那里的灌(草)丛沙堆形态和尺度变化很大, 但大部分灌(草)丛沙堆具有拉长的圆丘状形态。Tengberg等^[2]在突尼斯对灌丛沙堆形态进行回归分析的基础上, 提出在气候和人类活动影响下区域灌丛沙堆发育阶段模式。Muhtar等^[11]认为塔里木盆地南部边缘的柽柳沙堆是风季的沙物质沉积和秋季的枯枝落叶层在柽柳(*Tamarix spp*)周围经过若干年的交替沉积发育而成。岳兴玲等^[12]在内蒙古高原东南部草原农垦区发现不同沙漠化阶段的灌(草)丛沙堆形态特征存在明显差异。穆桂金^[1,4]对塔克拉玛干沙漠各种灌草丘的成因与环境进行分析后指出, 不同类型的灌草丘在发展演变过程中有密切的联系, 反映了区域沙漠化发展趋势。贾宝全等^[13]提出了一套以地面工作为基础的绿洲沙质荒漠化评价指标体系, 认为绿洲外围沙质荒漠化的发生发展与该地带灌丛沙堆的演化过程息息相关, 通过灌丛沙堆的演化过程可以间接反映沙漠化的进程。

在新疆和田河流域, 胡杨、柽柳、芦苇、骆驼刺等沙堆发育典型, 沿着深入沙漠腹地河流两岸的老河漫滩、河流阶地以及沙漠-绿洲过渡带或洪积扇边缘地带分布, 在这里环

收稿日期: 2007-07-20; 修订日期: 2007-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40461002; 40761004)、新疆维吾尔自治区高校科研计划基金重点项目(XJEDU 2004I35) 共同资助。

作者简介: 武胜利(1977-), 男, 河南省西平县人, 博士。主要从事干旱区环境演变与风沙地貌方面的研究。

境变迁和人类活动所诱发的灌（草）丛沙堆演变过程明显，各类沙堆的地貌形态变化显著，可能反映了区域土地沙漠化或绿洲化的正逆过程。但是关于该区域各类型灌丛沙堆的研究却鲜见报道。鉴于此，本文在野外考察的基础上，通过对和田河流域各类灌（草）丛沙堆实测形态的统计分析，并结合沙堆所处的地貌环境，初步探讨灌（草）丛沙堆的形态特征及其发育阶段，这对深入了解区域土地沙漠化发生机制、预测环境变化和土地沙漠化发展趋势具有重要的现实意义。

1 区域概况与研究方法

1.1 区域自然背景

和田河自南向北纵贯塔克拉玛干沙漠汇入塔里木河，是塔里木河三大源流之一（图1）。和田河流域的沉积物主要由第四系冲积、洪泛沉积及风砂沉积组成。由于河流流经之地碎屑物质丰富，洪水期流水汇集大量的碎屑物质，从山麓地带倾泻而下，河流输沙量大，玉龙喀什河和喀拉喀什河输沙量占全年的93.5%和79.2%。这为各类灌（草）丛沙堆等风沙地貌的发育提供了必要的物质基础。

和田河流域属于典型的暖温带大陆性气候，终年干燥少雨，中游平原区的年降水量为34.7~35.2mm，沙漠区为14.1mm，河口区为42.5mm，各月分配比较均匀。冬季，塔里木盆地处在蒙古高压西南部，和田河下游及河口地带以东北风为主，而中游盛行西北风。夏季，塔里木盆地处在印度低压北侧，中游盛行西北风，下游及河口地区仍以偏东风为主^[14]。春季多风或浮尘天气，偶有沙尘暴，平均风速 2.1ms^{-1} ，多年平均沙尘天气32.9d，平均大风天数11.5d，并集中出现在4月中旬至6月上旬，主要风向西或西北，大风都伴有沙尘，破坏性较大。秋季降温较快，冬季雪少严寒，1月份平均温度-5.6℃，极端最低温度-24.6℃。

和田河流域的植物区系组成简单，植物种类少，在中下游植物种类有23科65种，其中能够阻截积聚沙尘、发育形成灌（草）丛沙堆的主要灌（草）植物有：怪柳（*Tamaricaceae*）、骆驼刺（*Alhagi sparsifolia* shap）和芦苇（*Phragmites communis* Trin）等。在和田河流域最常见的是多枝怪柳，一般高1.5~3m，最高可达6m，丛状冠幅一般多为2m×2m、4m×4m，最大可达8m×8m，茎多分枝，小枝细弱；广泛分布于和田河流域的高位河漫滩、两岸阶地、河流内部裸露河床以及流沙上。骆驼刺高0.6~1.3m，丛径0.6m~0.7m，茎枝灰绿色，有针刺，刺长1.2~2.5cm；在和田河流域，骆驼刺主要分布在河流两岸阶地、河漫滩、冲积-洪积扇扇缘地带的盐化草甸、低矮的沙丘和沙地上。芦苇茎秆直立，在荒漠中芦苇高约2~3m，平均约11节，节间长约15cm，茎粗0.3~2cm，叶片互生，叶片平均约为9片，长约23~27cm，宽约2.07cm，与茎夹角约为45°；

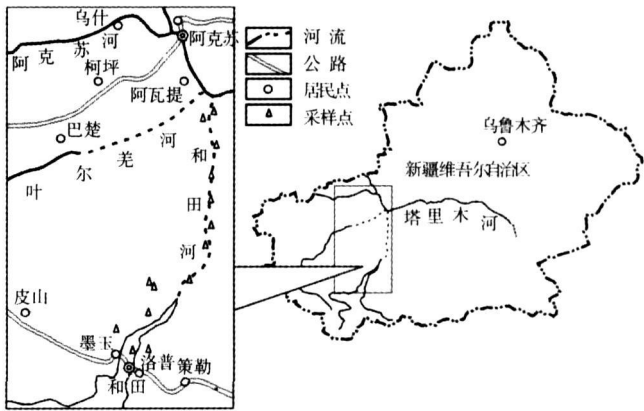


图1 项目研究区及采样点位置
Fig 1 Sketch map of the study area and sampling sites

芦苇在和田河流域则主要分布在阶地、岸边的沙丘上以及绿洲边缘的沙丘上。

1 2 形态测量与定量分析方法

我们在沙漠腹地的和田河两侧河漫滩、河流阶地以及和田绿洲与沙漠的过渡带，随机选择样方实测了 223 个怪柳沙堆、120 个芦苇沙堆和 123 个骆驼刺沙堆的形态参数。主要用皮尺测量沙堆迎风坡坡长 (L_s)、背风坡坡长 (L_l)、长轴长度 (L)、短轴长度 (W)，用罗盘测出背风坡坡角 (β)，迎风坡坡角 (α) 与长轴走向，用全站仪测出沙堆高度 (H) 和沙堆顶部植株高度 (图 2)，并描述每个沙堆表面的风蚀风积特征、周围地貌环境特征以及土地沙漠化状况，记录沙堆依托发育的植物种类、植被盖度等。在室内主要用 SPSS13.0 软件对各类灌 (草) 丛沙堆的形态参数进行相关分析和回归分析，统计分析结果见表 1。

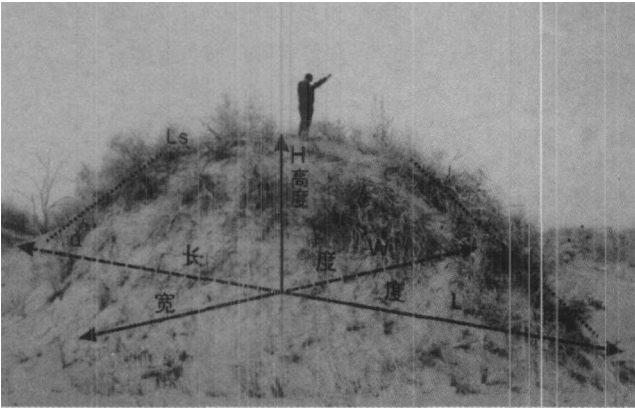


图 2 灌丛沙堆形态测量示意图

Fig. 2 Sketch of measuring shape of nabkha

表 1 新疆和田河流域不同类型灌草丛沙堆形态特征统计分析

Tab 1 The morphological characteristics of different types of nabkhas surveyed in the basin of Hotan River, Xinjiang					
类型 (样本数)	形态参数	最小值	最大值	平均值	标准差
怪柳沙堆 (223)	L (m)	1.30	25.00	8.9457	6.31065
	W (m)	1.20	25.00	8.5152	6.51630
	H (m)	0.23	9.35	3.3400	2.59100
	α (°)	17.00	45.00	31.0435	8.46102
	β (°)	16.00	46.00	31.0435	7.59472
	L_s (m)	0.80	13.45	5.8974	4.06563
芦苇沙堆 (120)	L_l (m)	0.70	16.00	5.8274	4.29793
	L (m)	2.40	12.80	5.7125	3.21820
	W (m)	1.75	9.40	4.4475	2.23486
	H (m)	0.38	2.39	1.1490	0.56438
	α (°)	14.50	36.50	25.5500	5.98881
	β (°)	13.00	30.50	22.9750	4.65797
骆驼刺沙堆 (123)	L_s (m)	0.60	6.80	2.9250	1.82465
	L_l (m)	1.00	6.30	3.0505	1.59085
	L (m)	1.10	6.35	1.9535	1.09334
	W (m)	0.58	4.70	1.3835	0.89759
	H (m)	0.11	1.12	0.3717	0.24155
	α (°)	4.00	34.00	20.1739	7.37103
	β (°)	3.00	35.00	22.2826	8.76308
	L_s (m)	0.31	3.40	1.1983	0.76763
	L_l (m)	0.48	2.60	1.1113	0.50865

2 灌(草)丛沙堆形态特征分析与讨论

2.1 灌(草)丛沙堆形态特征统计分析与讨论

从统计结果分析, 研究区柽柳沙堆的形态特征主要为: 长轴平均长 8.95m, 短轴平均长 8.52m, 沙堆的基座长短轴之比为 1.05:1; 沙堆的平均高度为 3.34m, 实测最大高度为 9.35m, 迎风坡角和背风坡角的平均值都是 31.04°, 最大坡度可达 45~46°, 远远超过干沙休止角; 沙堆的迎风坡坡长平均为 5.90m, 背风坡坡长平均为 5.83m, 迎风坡坡长略长于背风坡, 总体形态呈现近似半球形或圆锥形。从野外观察情况分析, 柽柳灌丛所形成的沙堆之所以出现半球形或圆锥形的差异, 与柽柳的生长发育阶段以及丛生群落形态有关。幼龄期的柽柳, 表现为垂向生长旺盛, 风沙依托堆积往往形成圆锥形柽柳沙堆; 如果柽柳持续发育, 沙堆中的根系不断分蘖生长、以老枝干为中心侧向扩展形成密集的簇生群落, 在风沙流长期持续稳定作用下, 常常发育形成空间尺度很大的近似半球形沙堆。由此可见即使同种植物, 因其发育阶段分枝集合特征的差异也能够影响到沙堆地貌形态。

芦苇沙堆的形态特征为: 长轴的平均长度为 5.71m, 短轴的长度平均为 4.45m, 长轴平均比短轴长 1.26m, 基座为长轴短轴之比为 1.28:1 的近似椭圆面; 沙堆的高度平均为 1.15m; 迎风坡角度平均为 25.55°, 背风坡角度平均为 22.98°, 大部分芦苇沙堆的坡度小于干沙休止角; 迎风坡坡长平均为 2.93m, 背风坡坡长平均为 3.05m。总体上看, 研究区芦苇沙堆为迎风坡短而陡、背风坡长而缓的近似半椭圆球体。野外观察发现, 多年生草本植物芦苇大多为散生分布, 由于芦苇枝干的柔韧性较强、通透性也较高, 因此对地面风沙流运行的干扰能力远远小于柽柳, 大部分散生芦苇很难发育成尺度较大的沙堆。但在水分条件较好的地段, 一些多年生的芦苇根系不断分蘖出很多新的分枝, 风沙可能依托残留茎叶丛生的芦苇丛堆积, 最终发育为空间尺度较大但坡度比较和缓的沙堆。

骆驼刺沙堆主要形态特征为: 长轴的平均长度为 1.95m, 短轴的平均长度为 1.38m, 长轴比短轴长 0.57m, 基座为长轴短轴之比为 1.41:1 的近似椭圆面; 沙堆的平均高度为 0.37m; 沙堆的迎风坡角平均为 20.17°, 背风坡角平均为 22.28°, 大部分骆驼刺沙堆的坡度也小于干沙休止角; 迎风坡坡长平均为 1.20m, 背风坡坡长平均为 1.11m。总体上看, 骆驼刺沙堆的整体形态为迎风坡长而缓、背风坡短而陡的近似半椭圆球体, 水平尺度和高度比柽柳沙堆和芦苇沙堆小得多, 是由于骆驼刺生长高度远远小于柽柳和芦苇所致。Hesp 等^[15]指出植物的冠幅越小, 其降低风速和输沙的速度就越慢, 由此造成沙堆空间尺度也较小。

从上述统计分析结合野外观察可知, 在和田河流域柽柳沙堆、芦苇沙堆和骆驼刺沙堆三者几何形态表现出明显差异, 平均坡度依次为柽柳沙堆>芦苇沙堆>骆驼刺沙堆, 这与三者枝干的刚性强度以及抗风蚀沙埋的能力依次减弱有直接的关系。因此, 在相同或相近的风动力和沙源供给条件下, 不同生态特征的植物类型必然导致不同风流场结构, 最终发育成与固沙植物生态特征相适应的沙堆形态。Hesp 等^[15,16]曾指出沙堆形态的发展主要取决于植物的密度、分布、高度和覆盖度, 并受到区域风速和输沙率的影响。垂向生长的、多分枝的、植株密度高的植物常常形成较高的几何形态近似圆锥形的沙堆, 而匍匐生长、少分枝、植株密度低的植物则形成相对低矮的几何形态近似半球形的沙堆。

2.2 灌(草)丛沙堆形态参数相关分析与讨论

在统计分析的基础上, 我们对各类灌草丛沙堆的形态参数进行了相关分析(见表2),

从相关分析结果看, 怪柳沙堆、芦苇沙堆的长轴和短轴之间的相关系数在 0.01 显著水平上均达到 0.900 以上, 可见它们的长轴和短轴长度之间存在着极强的正相关关系, 即怪柳沙堆和芦苇沙堆发育过程中, 在水平尺度上长轴和短轴可能是协同增长的。例如, 从怪柳沙堆的水平尺度和垂直高度的关系看, 不论是长轴长度还是短轴长度均与高度在 0.01 显著水平上存在着极高的线性相关关系, 其中短轴与高度的相关系数为 0.980, 略高于长轴与高度的相关系数 0.975, 即短轴的长度与沙堆高度之间的关系比长轴的长度与沙堆高度之间的关系更密切。Hesp^[7]指出沙堆的高度取决于沙堆底座的宽度和沙子的休止角, 而沙堆的长度取决于沙堆的宽度和风速。Tengberg^[17]研究 *Acacia* 沙堆和 *Balanites* 沙堆时也发现沙堆的水平尺度与沙堆的高度之间存在着明显的线性关系。岳兴玲等^[12]研究了中国内蒙古高原东南部的灌丛沙堆后也得出沙堆高度与沙堆的水平尺度之间的正相关程度较好, 认为那里的沙堆形态在增长发育阶段是协调增长的。

表 2 新疆和田河流域不同类型灌(草)丛沙堆形态参数相关分析结果

Tab 2 Pearson correlation of different types of nabkhas parameters in the basin of Hetan River, Xinjiang

类型	形态参数	L	W	H		Ls	Li
怪柳沙堆	L	1.000					
	W	0.996 (**)	1.000				
	H	0.975 (**)	0.980 (**)	1.000			
		0.542 (**)	0.580 (**)	0.649 (**)	1.000		
		0.605 (**)	0.606 (**)	0.702 (**)	0.505 (*)	1.000	
	Ls	0.961 (**)	0.966 (**)	0.974 (**)	0.619 (**)	0.630 (**)	1.000
	Li	0.985 (**)	0.985 (**)	0.984 (**)	0.602 (**)	0.606 (**)	0.964 (**)
芦苇沙堆	L	1.000					
	W	0.937 (**)	1.000				
	H	0.890 (**)	0.911 (**)	1.000			
		-0.470 (*)	-0.379	-0.336	1.000		
		-0.225	-0.053	0.068	0.335	1.000	
	Ls	0.908 (**)	0.877 (**)	0.850 (**)	-0.600 (**)	-0.244	1.000
	Li	0.944 (**)	0.858 (**)	0.877 (**)	-0.455 (*)	-0.270	0.838 (**)
骆驼刺沙堆	L	1.000					
	W	0.915 (**)	1.000				
	H	0.774 (**)	0.870 (**)	1.000			
		0.129	0.124	0.361	1.000		
		0.023	0.290	0.277	-0.308	1.000	
	Ls	0.758 (**)	0.822 (**)	0.832 (**)	0.036	0.309	1.000
	Li	0.763 (**)	0.597 (**)	0.702 (**)	0.334	-0.289	0.495 (*)

* 相关系数在 0.05 显著水平; ** 相关系数在 0.01 显著水平

从怪柳沙堆形态各参数之间的相关系数来看, 背风坡坡角与迎风坡坡角的相关系数最小, 为 0.505, 但二者之间也存在着显著的线性相关, 其余各参数之间的相关系数在 0.505~1 之间, 说明各参数之间存在着显著或高度的线性相关。值得注意的是芦苇沙堆的迎风坡坡角除了与背风坡坡角呈低度正相关外, 与其余各形态参数均为负相关, 在这些

负相关关系中迎风坡坡角与迎风坡坡长呈显著线性相关(相关系数为 -0.600),其余为低度线性相关。背风坡坡角除与迎风坡坡角呈低度正相关外(相关系数为 0.335),与其余各参数间的相关系数在 $-0.270 \sim 0.068$ 之间,相关关系不明显。

从骆驼刺沙堆各参数之间的相关分析可知,骆驼刺沙堆的水平尺度各参数之间(长轴长度和短轴长度)及其各参数与高度之间相关系数在 0.01 显著水平表现为显著线性相关或高度线性相关,相关系数值均大于 0.700 。沙堆的迎风坡坡角与沙堆的高度、背风坡坡长呈低度正线性相关,与背风坡坡角呈低度负线性相关,与其余各参数之间的相关性不明显。迎风坡坡角比背风坡坡角对沙堆高度的影响显著。迎风坡坡长和背风坡坡长分别与长轴长度、短轴长度和高度之间表现为显著或高度的线性相关,而它们之间在 0.05 显著水平表现为低度线性相关,其相关系数为 0.495 。

2.3 灌(草)丛沙堆形态特征回归分析与发育阶段讨论

鉴于上述三类灌(草)丛沙堆的高度、长轴长度与短轴长度之间存在显著的相关性,分别对它们的长轴长度与高度、短轴长度与高度、长轴与短轴长度之和的一半($D = 1/2(L + W)$)与高度进一步作了回归方程拟合分析,结果发现沙堆高度与水平尺度各参数之间拟合的二次方程优于一次方程,三个方程在 0.05 显著水平都经过 F 和 t 检验。

(1) 柽柳沙堆的拟合方程: $H = -0.005W^2 + 0.514W - 0.429$

(2) 芦苇沙堆的拟合方程: $H = -0.015L^2 + 0.384L - 0.416$

(3) 骆驼刺沙堆的拟合方程: $H = -0.065D^2 + 0.61D - 0.404$

以柽柳沙堆为例(表3,图2),拟合方程(1)在 0.05 显著水平经过 F 检验和 t 检验。其中, R^2 为 0.969 ,从方程(1)中可知,当沙堆的短轴长度为 51.4m 时,沙堆高度可达到 12.78m 的最大值。根据上述拟合方程揭示出的高度和水平尺度变化规律,并结合区域植物群落演替、沙源和风力情况,可以初步划分研究区柽柳沙堆的发育阶段(表3)。

从柽柳灌丛干扰地面风沙流运行、聚集沙尘发育雏形沙堆直到沙堆高约 6m 之前这一段时间为柽柳沙堆的增长阶段,植物垂向生长旺盛,主要表现为风沙垂向加积过程,沙堆高度和水平尺度协同增长,以坡度接近干沙休止角的处于动力平衡状态的近似圆锥形态为特征,这个阶段的沙堆主要见于胡杨幼林为背景、潜水埋藏较浅、沙源比较丰富的河漫滩和低阶地上,或为人工植树造林、植被封育、土地沙化得到初步遏制的沙漠-绿洲过渡带。

当沙堆高度接近或达到 $6 \sim 13\text{m}$ 左右时,柽柳根系不断侧向分蘖新生出很多新的分枝大量截留聚集风沙,沙堆短轴长度相对增加,长宽尺度均衡协调增长,此时柽柳沙堆发育到了相对稳定阶段。这类沙堆大部分处于土壤轻微盐渍化、沙源持续稳定的 $1 \sim 2$ 级高阶地上或远离人类活动影响的洪积扇扇缘地带,群落生物多样性较高、植被的覆盖度也较高,灌丛沙堆在稀疏交错分布的成熟胡杨林中成群成片分布,高大沙堆主要依靠密集柽柳枝叶截流毗邻流动沙漠风沙流中的粉尘物质继续发育,柽柳木质化枝干具有的较强刚性、群落季相演替产生枯枝落叶叠加沉积,使得柽柳灌丛能够维持较大的沙堆坡度,在此阶段柽柳沙堆可能处于植物作用强劲的超动力平衡状态。因此这一阶段以水平尺度很大、坡度较陡甚至超过干沙休止角的半球形沙堆为代表。

在环境变化导致河道迁移、河流水量减少、潜水持续下降的河流阶地上,或者在植被遭受人为破坏、土壤沙化盐渍化强烈的地段,则柽柳灌丛逐渐衰败枯萎,灌丛阻挡风蚀沙埋或截留聚集沙尘的能力衰减,沙堆迎风坡往往首先遭受明显风蚀,因此沙堆的短轴长度相对增加,高度开始降低、坡度也随之变缓,沙堆各形态指标之间的相关性趋于复杂。沙

表 3 新疆和田河流域灌草丛沙堆形态特征及其发育阶段

Tab 3 The morphological characteristics and development stages of nabkha in the basin of Hotan River, Xinjiang

沙堆类型	增长阶段			稳定阶段			衰退阶段		
	形态测量特征	地貌、植物特征	分布规律	形态测量特征	地貌、植物特征	分布规律	形态测量特征	地貌、植物特征	分布规律
柽柳沙堆	水平尺度: 1-15m 高度: 0.23m-6m	盾状或圆锥形, 植物垂向生长旺盛	胡杨幼林分布的高河漫滩或一级阶地, 潜水深度 1m-1.5m	水平尺度: 15-60m 高度: 6m-13m 左右	半球形或复合形态, 连续分布, 植物种类多样, 覆盖度很高	成熟胡杨林分布的河流阶地, 潜水深 2-4m	水平尺度: 5-15m 高度: 1-6m	不规则圆锥形, 或伴有弧形沙丘, 风影沙尾植物衰亡	远离现代河床的过熟衰败胡杨林地, 潜水 4-8m 或更低
芦苇沙堆	水平尺度: 0.5-10m 高度: 0.38-1.5m	席状或盾形, 植物生长旺盛	潜水较高的高河漫滩或绿洲-沙漠过渡带	水平尺度: 12-30m 高度: 1.5-3m 左右	低缓浑圆的半球形或不规则形态植物茂密, 覆盖度高	沙源较丰富, 植被茂盛的高河漫滩、河流阶地或扇缘溢出带	水平尺度: 5-10m 高度: 1-1.5m	不规则风蚀盾形	流沙活动强烈或土壤沙化盐渍化
骆驼刺沙堆	水平尺度: 0.2-0.5m 高度: 0.11-0.50m	微型沙包或沙垄, 植物生长旺盛	分布在地形比较开阔、沙源较丰富的地段。	水平尺度: 1.5-5m 高度: 0.5-1.50m 左右	椭圆形或狭长雅丹形, 与柽柳沙堆、芦苇沙堆伴生分布	沙源较丰富, 植被茂盛的河漫滩、绿洲沙漠过渡带	水平尺度: 0.5-1.0m 高度: < 1.0m	不规则风蚀形态, 植物衰亡	植被衰竭、风蚀强烈的地段

堆顶部多发育风蚀坑或者两侧风蚀凹槽发育，沙堆迎风坡前方常常发育两翼指向下风向方的反射沙弧（弧形沙丘），此时的柽柳沙堆处于衰退阶段。在近现代历史时期，在气候变化和人类活动的影响下，区域植被、风力和沙源相互作用，使得芦苇沙堆和骆驼刺沙堆也呈现与柽柳沙堆类似的阶段性发展特点（表 3）。Tengberg^[17] 在突尼斯北部研究当地的灌丛沙堆演化过程时也指出气候变化和人类活动的相互作用对区域灌丛沙堆形态变化的影响。朱震达等^[18] 指出，灌（草）丛沙堆被吹扬继而沙堆与流沙相间分布是土地沙漠化过程的重要环节，因此，灌（草）丛沙堆地表形态的变化过程可以作为沙漠化过程的景观标志和沙漠化发展程度的一个示量指征，灌（草）丛沙堆在判别土地沙漠化程度、建立土地沙漠化评价指标体系方面具有重要作用。可见区域灌丛沙堆在不同阶段所呈现出不同的形态是区域植物群落演替到不同阶段特定立地条件下的产物，对区域土地沙漠化和绿洲化正逆过程具有明显的指示作用。

3 结论

综上所述，通过对和田河流域灌（草）丛沙堆野外考察和地貌形态的统计分析，初步结论如下：

（1）研究区灌（草）丛沙堆的长轴和短轴表现出高度的线性相关，沙堆短轴与高度的相关系数大于各自长轴与高度的相关系数，即各类沙堆的短轴与高度之间的关系更密切。同时，各类沙堆的迎风坡坡长和背风坡坡长分别与沙堆长轴长度、短轴长度、沙堆高

度以及二者之间都具有较高的相关性。研究发现, 在各类沙堆的长轴和短轴在增长发育阶段中是协同增长的, 沙堆水平尺度与高度表现出显著的相关性, 其中柽柳沙堆相关性最好, 芦苇沙堆相关性次之, 骆驼刺沙堆相关性最小。

(2) 研究区增长阶段的柽柳沙堆主要呈现近似圆锥形态, 成熟稳定阶段近似半球形; 芦苇沙堆整体形态则呈现迎风坡短而陡、背风坡长而缓的近似半椭球体; 骆驼刺沙堆的整体形态呈现迎风坡长而缓、背风坡短而陡的近似半椭球体。这些植物不同发育阶段生态特征和冠幅形态差异是造成沙堆形态变化的主要原因之一。研究发现, 柽柳耐风蚀沙埋, 其枝干刚性较强、密集簇生, 常常发育成坡度较陡、高度较大的沙堆; 而芦苇和骆驼刺的生态高度较低、抗风蚀能力较弱, 或者它们的柔韧性较强、大多分散生长, 风沙依托加积多发育成形态低缓的沙堆。

(3) 根据沙堆形态的数学模拟结果, 并结合灌(草)丛所处的生态环境、沙堆表面蚀积特点分析, 可以把研究区灌(草)丛沙堆的发育过程划分为三个阶段: 植物生长旺盛、风沙垂向加积、水平尺度和高度协同变化的增长阶段, 植物动力作用强劲、长宽尺度均衡增长、坡度较大的稳定阶段, 以及植物衰败、高度和坡度递减、各形态指标相关性趋于复杂、风蚀形态发育的衰退阶段。这些不同阶段的沙堆特征与研究区土地沙漠化和绿洲化正逆过程密切相关。

参考文献:

- [1] 穆桂金 塔克拉玛干沙漠灌草丘类型、成因及演变规律 干旱区研究, 1995, 增刊: 31~ 37
- [2] Tengberg A, Deliang Cheng A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso Geomorphology, 1998, 22: 181~ 192
- [3] 朱震达, 陈广庭, 等 中国土地沙质荒漠化. 北京: 科学出版社, 1994 23~ 26
- [4] 穆桂金 塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义 干旱区研究, 1994, 11(1): 34~ 40
- [5] Nickling W G, Wolfe S A The morphology and origin of nabkhas, region of Mopti, Mali, West Africa Journal of Arid Environments, 1994, 28: 13~ 30
- [6] Bahre C J, Shelton M L Historic vegetation change, mesquite increases and climate in southeastern Arizona Journal of Biogeography, 1993, 20: 489~ 504
- [7] Hesp P Morphodynamics of incipient foredunes in New South Wales, Australia In: Brookfield M E, Ahlbrandt T S Aeolian Sediments and Processes Elsevier, Amsterdam, 1983 325~ 342
- [8] Hesp P A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes In: Gimingham C H, Ritchie W, et al Coastal Sand Dunes Edinburgh, 1989 181~ 201
- [9] 康相武, 马欣, 吴绍洪 基于景观格局的区域沙漠化程度评价模型构建 地理研究, 2007, 26(2): 297~ 305
- [10] Khalaf F I, Misak R, Al-Dousari A Sedimentological and morphological characteristics of some nabkha deposits in the northern coastal plain of Kuwait, Arabia Arid Environment, 1995, 29: 267~ 292
- [11] Muhtar Qong, Hiroki Takamura, Mijit Hudaberdi Formation and internal structure of Tamarix cones in the Taklimakan Desert Journal of Arid Environments, 2002, 50: 81~ 97
- [12] 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] 贾宝全, 慈龙骏, 高志海, 等 绿洲荒漠化及其评价指标体系的初步探讨 干旱区研究, 2001, 18(2): 19~ 24
- [14] 俎瑞平, 张克存, 屈建军 塔克拉玛干沙漠风沙活动强度特征 地理研究, 2005, 24(5): 699~ 708
- [15] Hesp P Foredunes and blow outs: Initiation, geomorphology and dynamics Geomorphology, 2002, 48: 245~ 268
- [16] Hesp P, McLachlan A Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* nabkha dunes Journal of Arid Environments, 2000, 44: 155~ 172
- [17] Tengberg A Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso

Journal of Arid Environments, 1995, 30: 265~ 282

[18] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1981. 1~ 43

The morphological characteristics and growth mode of nabkha in the basin of Hotan River, Xinjiang

WU Sheng-li, LI Zhi-zhong, HUI Jun, GE Lin, HE Mu-dan

(College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: Nabkha is a common kind of biological wind deposition geomorphy in arid and semi-humid desert, and sandy coast. The nabkha's form is a kind of dynamical balanced shape made by the interaction of regional plant, wind and sand in the specific developmental stage of nabkha. It can reflect eco-environmental characteristics and regularity of change in the region. In this paper, the change regularity and characteristics of nabkha's shape in different developmental stages have been discussed on the basis of statistical analysis on morphological data of nabkha surveyed in the basin of Hotan River, Xinjiang. Results indicate that there exist better correlations among length, width and altitude of all kinds of nabkhas, but there is difference in different developmental stages of the same typical nabkha and different typical nabkhas, and according to analysis on mathematical model of nabkha's morphological data, regional eco-environmental features and aeolian characteristics, the development of nabkha can be divided into the growing stage with all shape data covariation, the stabilizing stage with higher gradient, synergistic growth of length and width and plant being the main factor, and the declining stage with nabkha's length shortening and more complex relations among all morphological data. The long axis and short axis of all kinds of nabkhas are in synergic growth. The horizontal scale and height of nabkha show significant correlation. The geometric shape of nabkha is approximately semi-ellipsoid which has few difference in slope-length and slope-gradient between upward and leeward sides in the basin of Hotan River. At the growth stage, *Tamarix* nabkha mainly appears approximately conical, and at the mature and stable stage, it is approximately hemispherical. The shape of *Phragmites* nabkha is approximately semi-ellipsoid which has shorter and steeper upward slope and longer and lower gradient leeward slope. The shape of *Algha* nabkha presents approximately semi-ellipsoid which has longer and lower gradient upward slope and shorter and steeper leeward slope. The result can be a quantizing index for monitoring regional desertification or oasis enlarging.

Key words: nabkha; morphological change; growth stage; Hotan River basin