

民勤荒漠—绿洲过渡带不同发育阶段白刺灌丛 沙堆的防风固沙功能分析*

孙 涛^{1,2,3}, 贾志清^{1**}, 钱雅玲³, 刘虎俊², 唐进年²

(1. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 甘肃省治沙研究所,
甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 甘肃 兰州 730070;
3. 科罗拉多州立大学 农业科学学院, 柯林斯堡 80523)

摘要:【目的】民勤荒漠—绿洲过渡带从沙漠边缘到绿洲外围依次形成了雏形阶段、发育阶段、稳定阶段和活化阶段 4 种不同发育阶段的天然白刺灌丛沙堆, 各发育阶段沙堆的防风功能、固沙功能和综合功能如何变化并不清楚。本研究期望通过对它们的研究, 为中国干旱区荒漠化防治和绿洲生态安全保障提供科技支撑。

【方法】在对各发育阶段白刺灌丛沙堆的植被特征、形态特征、分布特征野外调查和观测的基础上, 采用统计分析和数值计算, 对各发育阶段灌丛沙堆的防风功能、固沙功能以及综合功能值进行了分析阐述。

【结果】(1) 白刺灌丛沙堆的整体生长状况和植被覆盖度均随发育过程的进行呈先升高后降低的态势, 发育阶段植被生长状况最好, 而活化阶段生长状况最差 ($P<0.01$); 稳定阶段植被覆盖度显著高于其他阶段 ($P<0.01$), 而雏形阶段最低 ($P<0.01$); 沙堆体积大小随底面积的增加而逐渐增加; (2) 不同发育阶段单株白刺灌丛的防风、固沙功能值变化趋势相似, 大小排序为活化阶段>发育阶段>稳定阶段>雏形阶段; 而样地内纵断面单位面积上防风功能为稳定阶段>活化阶段>发育阶段>雏形阶段, 固沙功能为活化阶段>发育阶段>稳定阶段>雏形阶段, 因此, 其防风固沙综合功能发生了变化, 功能值大小分别为稳定阶段>活化阶段>发育阶段>雏形阶段。

【结论】民勤荒漠—绿洲过渡带白刺沙堆防风固沙综合功能值总体上随发育过程的进行而呈增加的趋势, 表明从雏形阶段到活化阶段防风固沙功能逐渐增强。虽然活化阶段沙堆表现出退化现象, 但是仍旧具有很好的防风固沙功效, 对维护绿洲边缘生态安全具有重要的防护作用, 应进一步加强退化沙堆的保护和抚育更新工作。

关键词:白刺灌丛沙堆; 发育; 防风功能; 固沙功能; 荒漠—绿洲过渡带

中图分类号: S 714.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X (2019) 04-0713-12

Comparison on Functions of Wind-Break and Sand-Fixation of *Nitraria Tangutorun* Nebkhas at Different Developmental Stages in Minqin Desert-oasis Transition Zone

SUN Tao^{1,2,3}, JIA Zhiqing¹, QIAN Yaling³, LIU Hujun², TANG Jinnian²

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China;
2. Gansu Desert Control and Research Institute, State Key Laboratory Breeding Base of
Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Lanzhou 730070, China;
3. College of Agricultural Sciences, Colorado State University, Fort Collins 80523, USA)

收稿日期: 2019-04-14 修回日期: 2019-04-25 网络首发时间: 2019-07-25 09:54:28

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660237, 31300595); 国家留学基金委西部地区人才培养特别项目 (201708625016); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504305-02); 甘肃省基础研究创新群体计划项目 (1506RJIA155)。

作者简介: 孙涛 (1978—), 男, 甘肃永昌人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事荒漠生态、荒漠植被恢复及荒漠化防治。E-mail: suntaosuny@163.com

**通信作者 Corresponding author: 贾志清 (1968—), 女, 北京人, 博士研究员, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治与水土保持研究。E-mail: jiazq@caf.ac.cn

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20190725.0839.001.html>



Abstract: [Purpose] A large area of natural vegetation dominated by *Nitraria tangutorun* nebkhas is widely distributed in Minqin desert-oasis transition zone. The communities of *N. tangutorun* nebkhas in 4 developmental stages are formed from the edge of the desert to the periphery of the oasis of Minqin, including the embryonic stage, the development stage, the stable stage and the activating stage, respectively. While, there were different functions of wind prevention and sand-fixing in each developmental stage. Through this study and experiment, to clarify the change of functions of wind prevention, fixing sand and the differences among those stages along with the process of development. [Method] The vegetation characteristics, morphological characteristics and distribution characteristics had been investigated in the field to examine the functions of wind prevention and sand-fixing by using statistical analysis and numerical calculations, to compare the wind-break function, sand-fixing function and the comprehensive function of nebkhas in different developmental stages. [Result] (1) The growth status and vegetation coverage of nebkhas increased at first then decreased with the processing developmental stages, the vegetation growth status was the best at the developing stage and worst in the activating stage ($P<0.01$); while, the vegetation coverage was the highest at the stable stage ($P<0.01$) and the lowest at the embryonic stage ($P<0.01$); also, the volume of nebkhas gradually increased with the increasing of the bottom area. (2) The function of wind prevention of a single nebkhas was decreased in the following order: activating>development>stable>embryonic stages, the trend of the function of sand-fixing of a single nebkhas was the same order as that of wind-break function. The function of wind prevention per unit area at vertical section in different developmental stages was decreased from high to low as following order: activating>development>stable>embryonic stages; while, the comprehensive function of wind-break and sand-fixing per unit area at vertical section of plots in different developmental stages was declined from high to low as order: stable >activating>development>embryonic stages. [Conclusion] The comprehensive function of wind-break and sand-fixation increased with the process of developmental stages, indicating that the function of wind-break and sand-fixation gradually increased from the embryonic stage to the activating stage. Although the nebkhas of *N. tangutorun* in the activating stage shows degradation, it still has a good function of wind-break and sand-fixation and plays an important role in protecting the ecological security of the desert-oasis transition zone, and should further strengthen the protection and renewable cultivation of degraded vegetations.

Keywords: *Nitraria tangutorun* Nebkhas; development; wind-prevention function; sand-fixation function; desert-oasis transition zone

绿洲—荒漠过渡带是绿洲和荒漠相互转化活动最剧烈、最突出的地区，其生境极其脆弱、敏感性强，易受到人类活动的干扰而很难恢复，也是绿洲生态系统与荒漠生态系统间物质循环、能量转换及信息传递最频繁的界面区域。民勤绿洲—荒漠过渡带是干旱区典型的荒漠交错带，在此区域灌丛沙堆与丘间地相间分布，以白刺 (*Nitraria tangutorun*) 灌丛为主的植被是民勤沙区目前存活面积最大的天然植被类型，在民勤绿洲外围形成了大量灌丛沙包与丘间地相间分布的景观格局，

对维护民勤绿洲生态环境和绿洲化过程，减少风沙危害，遏制流沙前移、稳定绿洲环境起到了重要的生态作用^[1]。灌丛植物地上和地下部分对其阻固流沙能力有所不同，地上部分主要影响植物周围的风速流场和空气动力特征，这是引起沙面流动的主要因素^[2]，而地下部分则主要是通过根系对沙粒的盘结作用来固定流沙。在荒漠—绿洲过渡带，由于风沙流中的沙粒主要集中在近地表0~30 cm 高度内流动，因此，植被侧影面积大小对植被能否积沙成丘起着重要的作用。研究表明

白刺相比其他植被具有很高的固沙功能^[3], 而由白刺灌丛构成的灌丛群落则具有明显的保护和改善沙地生态环境的良好功效。

近年来对白刺灌丛沙堆的防风固沙功能以及效益研究开展了大量的研究工作: 詹科杰^[4]、杜建会等^[5]对白刺灌丛沙堆的流场特征、表面抗风蚀性以及相关影响因素做了分析; 杨婷婷等^[6]对天然分布的不同灌丛植被防风阻沙效益进行分析发现: 白刺灌丛相比沙蒿更具有阻滞作用。这些研究主要从单个沙堆的角度出发做了相关的探讨和研究, 而有关不同发育阶段白刺灌丛沙堆防风固沙功能研究则很少见到。当前民勤绿洲地下水位持续下降, 水资源严重短缺, 环境生态承载力降低, 绿洲边缘荒漠植被大面积衰退、枯死现象尤为严重, 有些区域原有的白刺灌丛沙堆由于水分的缺失逐渐衰败、解体, 一些沙堆随着风蚀活动加剧活化成为新的风沙源地。不同发育阶段白刺灌丛沙堆在物种发育过程及防风固沙中发挥重要作用, 但是在各发育阶段中又有着明显的不同, 这取决于它们各自在不同的发育阶段其生理、生态上的特征不同。不同发育阶段的白刺灌丛沙堆防风、固沙效益如何? 随着发育阶段的逐渐变化, 白刺灌丛的防风和固沙功能又发生了怎样的变化? 处于活化阶段的灌丛沙堆是否具有一定防风固沙功效? 其生态效益又如何呢? 本研究从不同发育阶段白刺灌丛沙堆的空间分布和种群结构特征出发分析它们在各自的发育阶段其防风和固沙效益, 从而更深入的了解荒漠—绿洲过渡带白刺灌丛沙堆的生态系统功能价值。这对该区域以及干旱区的天然植被保护和恢复、荒漠化防治以及对白刺属植物研究、灌丛植被恢复、保育具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择位于巴丹吉林沙漠东南缘甘肃省民勤治沙综合试验站(N 38°34', E 102°58', 海拔1 380 m)附近的荒漠—绿洲过渡带开展野外观测研究, 属典型大陆性气候。年均降水量118 mm, 降水年内分配不均, 多集中于6—9月份, 占全年总降水量的74.7%以上; 年均气温7.6 °C, 最冷月和最热月的平均温度分别为-9.6 °C和23.2 °C; 全年>10 °C的有效积温为3 036.4 °C, 无霜期为175 d,

多年平均冻土深度约为53 cm; 研究区蒸发强烈, 年均蒸发量为2 604.3 mm; 年均日照时间为2 799.4 h, 全年太阳直接辐射平均为573 kJ/cm², 光合有效辐射年均287 kJ/cm²; 研究区常年盛行西北风, 多年平均风速2.45 m/s, 全年平均风速>17 m/s的大风日数约有26.3 d。土壤多为风沙土, 养分贫瘠且风蚀严重, 地貌多为半固定沙地, 植被主要有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*N. tangutorum*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等。

1.2 野外调查及研究方法

试验样地设置在民勤治沙站附近。民勤治沙站3号塔、2号塔区域广泛分布着典型的雨养型荒漠—绿洲过渡带白刺灌丛植被景观, 土壤水分入渗过程和分布存在明显的时空动态变化, 并随水分梯度的逐渐减少^[7], 依次分布着不同发育阶段的白刺灌丛沙堆。研究样地位置见示意图1。参考TENGBERG等^[8-9]提出的对灌丛沙堆不同演化阶段划分依据和相关研究成果^[10], 同时依据灌丛沙堆的形态特征、土壤以及植被状况, 并结合实地调查结果, 从3号塔附近广泛分布的雏形阶段沙堆开始, 平均每隔1 000~1 500 m选择调查样地, 依次设置雏形阶段(ES)、发育阶段(DS)、稳定阶段(SS)、活化阶段(AS)4种不同发育阶段白刺灌丛沙堆群落样地。于生长旺盛季节8月份进行各样地沙堆具体位置和植被特征等的调查。

样地设置大小60 m×60 m, 符合样地空间格局调查的基本要求^[11]。以东西向为x轴、南北向为y轴, 沙堆具体位置的确定方法是以样地1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坐标值^[11-12]。每个沙堆的相对位置坐标测定好之后, 对各个沙堆依次进行植被和形态特征的调查。

采用目估法对沙堆的生长状况(GS)进行总体的评估: 对各个灌丛沙堆植被总体的生长旺盛程度、生长情况进行现场评分。评分标准从0.1到1, 分为10级, 分数越高代表灌丛沙堆整体的生长状况越好。其次, 采用样方法, 测定每个沙堆的植被特征指标。方法为: 在每个沙堆上设置1 m×1 m的小样方调查白刺的植被盖度(C)、枯枝率(DR), 同时在每个沙堆上随机选择5个植株, 测量白刺植株的自然高度, 计算均值作为该灌丛沙堆的植被高度(HV)。沙堆侧影面积即沙堆

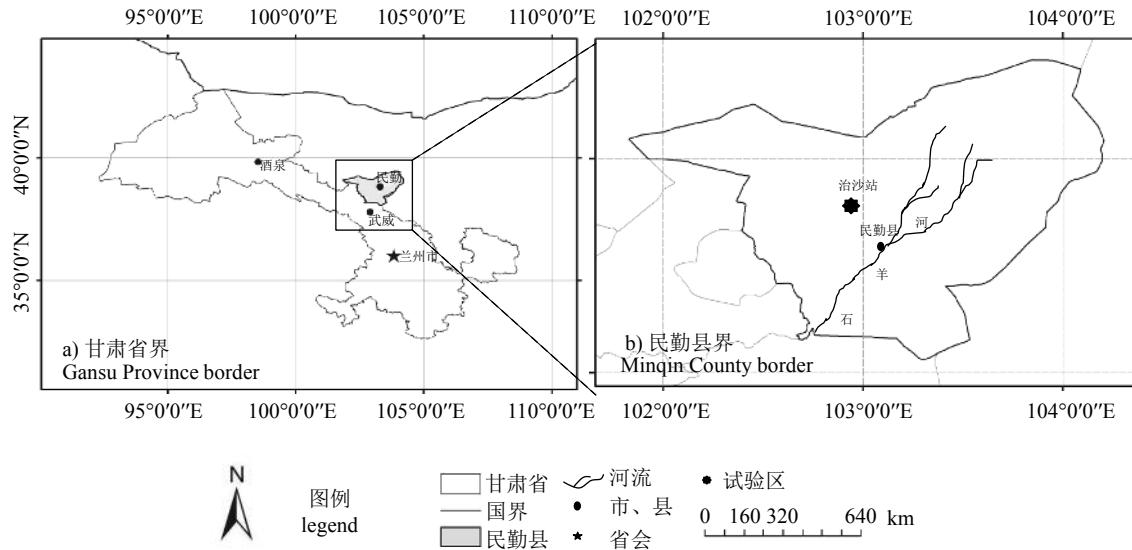


图1 本研究区样地所处的地理位置示意图

Fig. 1 Geographic location and map of study area

纵断面积, 测算方法为沿白刺灌丛沙堆主风向迎风面自地表处垂直向上竖立一直尺, 测量沙堆短轴长度(W , 即垂直于沙堆长轴方向的长度)和沙堆整体高度(H) (图2)。并计算灌丛沙堆侧影面积大小(A), 即垂直于沙堆长轴的包括灌丛植物在内的最大横断面积。采用目估法得到疏透度(S), 即植物枝条所占侧影轮廓面积的百分比。最后, 对各个沙堆进行形态特征调查, 包括: 长轴长度(L)、短轴长度(W)和沙堆整体高度(H)等指标。白刺沙堆底面积近似于椭圆, 因此可利用沙堆的长轴和短轴作为椭圆的长短轴来计算椭圆面积作为沙堆垂直投影底面积(S)。沙堆的体积大小则是将沙堆看作较为理想的椭圆锥体, 利用沙堆的高度和底面积计算体积大小(V)^[13]。

1.3 数据分析

本研究中, 将沿主风方向白刺灌丛沙堆长轴

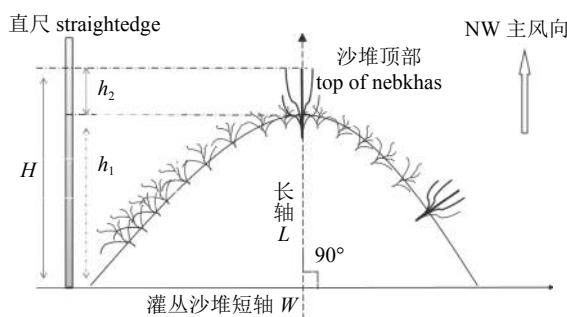


图2 白刺灌丛沙堆侧影面积观测示意图

Fig. 2 The profile of side view of *N. tangutorum* nebhaks in the study area

方向定义为横轴方向(横断面), 垂直于沙堆长轴的方向定义为纵轴方向(纵断面)(图2)。将白刺灌丛沙堆的防风固沙功能分解为防风功能和固沙功能。防风功能定义为灌丛植株侧影面积(A 纵断面积)与断面疏透度(S)的乘积, 用 P 表示功能值。纵断面单位面积总防风功能值即为防风功能平均值与单位面积上灌丛沙堆数量(N_i)的乘积。本研究中, 在所调查样地内垂直于横轴方向每隔10 m设置样线, 将每个样线内所有沙堆作为1个纵断面进行计算分析, 计算各样地单位面积总防风功能和固沙功能值。

$$P_{\text{单株防风功能}} = S_{\text{纵断面疏透度}} \cdot A_{\text{侧影面积}} \quad (1)$$

$$P_{\text{纵断面}} = \bar{P} \cdot N_i \quad (2)$$

植株的固沙功能定义为阻截和固定流沙形成的沙堆体积大小, 用 V 表示其功能值。纵断面单位面积的固沙功能值即为固沙功能平均值与单位面积上沙堆数量的乘积。

$$V = H \cdot \text{沙丘底面积}/3 \quad (3)$$

$$V_{\text{纵断面}} = \bar{V} \cdot N_i \quad (4)$$

由于植物纵断面积和固沙沙堆大小的量纲不同, 故在计算防风固沙综合功能值时分别以每种植物的纵断面积和固沙沙堆大小进行正规化处理:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(j)}{\max(j) - \min(j)} \quad (5)$$

式中, X_{ij} 为 x_{ij} 人为正规化值, $\max(j)$ 和 $\min(j)$ 分别为第 j 列观测值的最大值和最小值^[14-15]。防风固沙综合功能值 (F') 定义为通过公式 (5) 所得标准化 P 值 (P') 和 V 值 (V') 之和, 即:

$$F' = P' + V' \quad (6)$$

采用 Excel 2010 对原始数据进行初步处理, 采用 SAS 9.0 统计分析软件进行白刺沙堆的形态特征等的描述性统计分析。对白刺灌丛沙堆的高度、水平尺度等特征值进行数据检验, 评价是否符合正态分布, 满足平稳假设, 对不满足的变量进行平方或者三次方转换直到符合正态分布。研究各个发育阶段白刺灌丛沙堆大小的分布情况, 按照每 5 m^2 大小将沙堆底面积划分为不同面积大小的若干小组, 并统计各组内沙堆个数与样地内沙堆总数量的比值, 做出不同发育阶段沙堆投影面积频率分布图和累积频率分布图。由于各发育阶段白刺灌丛沙堆数量非均衡, 因此, 调取 PROC GLM 命令对各形态参数之间进行最小二乘均数及其差异显著性检验; 调取 PROC CORR 进行多种指标间的相关性分析等。采用 OriginPro 8.5 进行数值

可视化制图, 比较研究各发育阶段白刺灌丛沙堆形态特征的差异性和防风固沙功能特征的趋势变化。

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段白刺灌丛沙堆空间分布及形态特征

4 个样地的白刺灌丛沙堆均为斑块分布 (图 3), 但是分布密度、斑块面积大小和均匀度均表现出差异 (表 1)。雏形阶段内样方有 62 个灌丛沙堆, 沙堆高度均值为 0.39 m, 面积均值为 7 m^2 , 沙堆以流沙为主。发育阶段沙堆共有 45 个, 平均高度约 0.60 m, 沙堆底面积大小差异大, 变异系数为 116.84%, 大小沙堆之间的差异明显; 稳定阶段样地内有 87 个沙堆, 斑块分布较为密集, 大部分独立分散分布, 相互间联系少, 沙堆平均高度为 0.55 m, 但是变异性大, 从 0.3~2.2 m 高度均有分布, 底面积均值 8.9 m^2 ; 稳定阶段沙堆表层均有结皮, 较为完整, 面积在 80% 以上, 甚至有些沙堆结皮全部覆盖。活化阶段样地内共

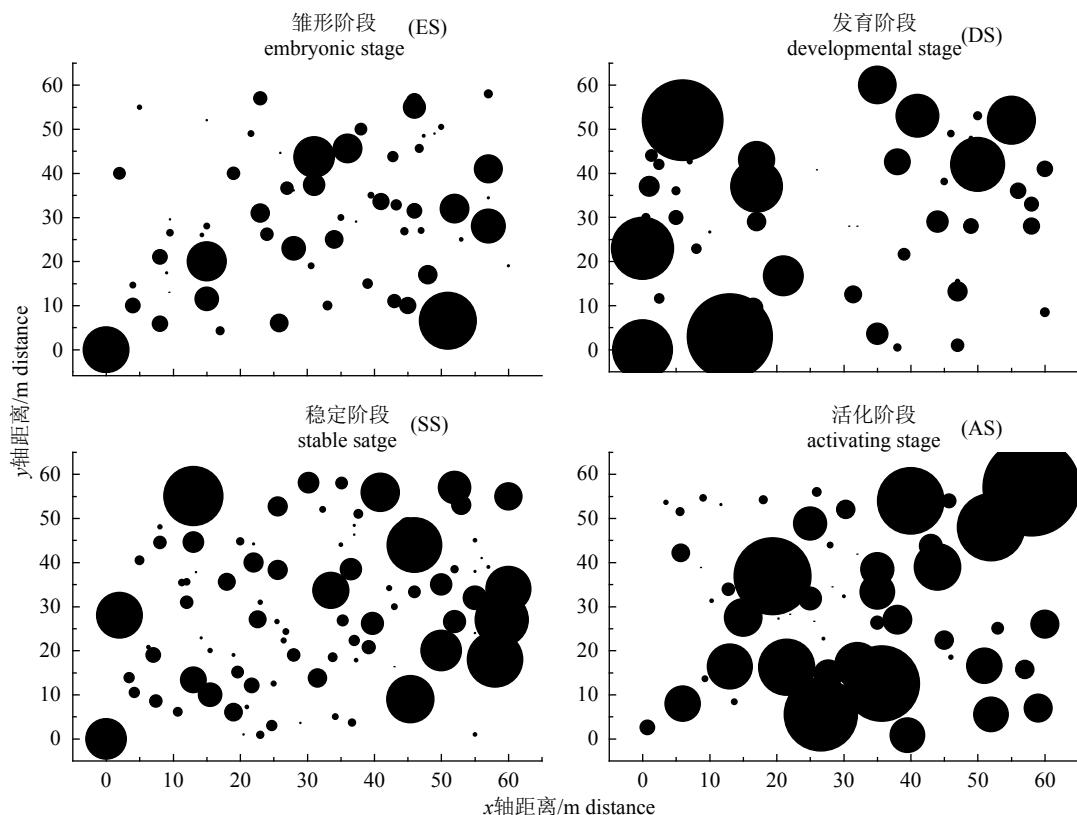


图 3 研究区白刺灌丛沙堆的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of *N. tangutorum* nebehaks in the study area

表1 白刺灌丛沙堆描述性特征统计参数

Tab. 1 Statistical parameters of descriptive characteristics of *N. tangutorum*

发育阶段 developmental stages	性状指标 items	平均值 average	最大值 maximum	最小值 minimum	标准差 standard deviation	变异系数 coefficient of variation	沙堆数量 number	分布型 distribution type
雏形阶段 embryonic stage	沙堆高度/m height	0.39	0.8	0.15	0.16	41.9	62	非正态
	投影底面积/m ² bottom area	7.79	33.7	0.44	7.06	90.8		非正态
	沙堆体积/m ³ volume	136.0	282	49	56.1	41.3		非正态
	结皮面积比例/% percentage of crust area	0	0	0	0	0		
发育阶段 developmental stage	沙堆高度/m height	0.59	1.3	0.10	0.34	56.9	45	非正态
	投影底面积/m ² bottom area	17.89	116	0.30	21.3	116.8		非正态
	沙堆体积/m ³ volume	221.1	533	55	110	49.9		非正态
	结皮面积比例/% percentage of crust area	10	30	6	12	35		
稳定阶段 stable stage	沙堆高度/m height	0.55	1.50	0.30	0.32	63.4	87	非正态
	投影底面积/m ² bottom area	8.92	35.2	0.44	8.62	96.7		非正态
	沙堆体积/m ³ volume	160.2	390	40.0	82.1	51.2		非正态
	结皮面积比例/% percentage of crust area	82.1	96.0	74.0	14.2	13.6		
活化阶段 activating stage	沙堆高度/m height	0.90	1.80	0.20	0.43	47.1	55	正态
	投影底面积/m ² bottom area	19.9	82.5	0.28	19.3	97.1		非正态
	沙堆体积/m ³ volume	278	511	78.0	121.9	43.8		非正态
	结皮面积比例/% percentage of crust area	35.7	65.0	23.0	29	46.4		

有 55 个沙堆, 斑块分布面积大, 相互间有重叠, 彼此间联系紧密, 斑块最大面积可达 83 m², 最小为 0.28 m², 大小相差可达 300 倍, 沙堆外部形态差别大。此阶段沙堆大部分结皮有破损和风蚀现象, 结皮面积下降, 在 30%~50% 之间, 结皮破损主要发生在沙堆两侧面和迎风坡中上部, 部分沙堆中上部结皮全部消失, 顶部掏蚀严重(表1)。

从图4可知: 每个发育阶段白刺灌丛样地内大小沙堆出现次数的多少均不相同。雏形阶段样方内沙堆为小斑块、分散分布, 频率分布为单峰曲线, 偏度 1.59, 峰度 2.77, 累积分布频率中值对应的面积小于 6.15 m²。发育阶段样方内斑块大小差异较大, 为多峰曲线, 偏度 2.81, 主峰度 10.14 m², 次峰分别为 45 m² 和 60 m², 累积分布

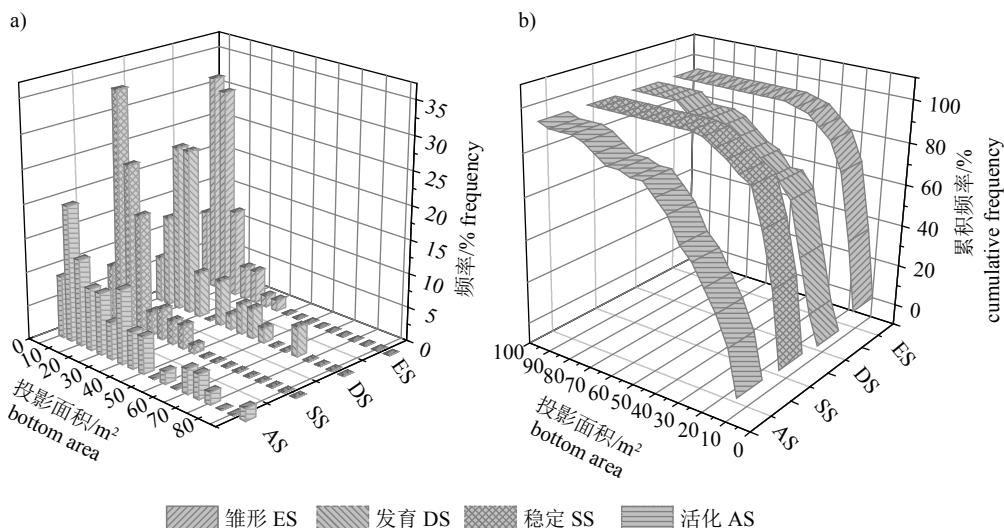


图4 不同发育阶段白刺灌丛沙堆频率和累积频率分布图

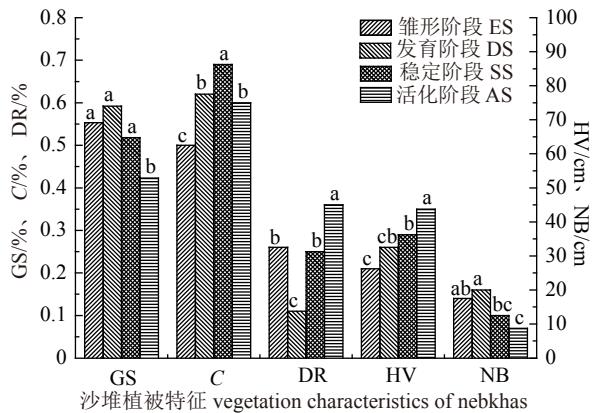
Fig. 4 The distribution of frequency and accumulate frequency of *N. tangutorum* at different developmental stages

频率中值对应的面积小于 10.75 m^2 。稳定阶段样地内沙堆数量分布多, 呈双峰曲线, 偏度 1.47, 主峰值为 2.5 m^2 , 次峰值为 25 m^2 , 累积分布频率中值对应的面积小于 39 m^2 。活化阶段样地内沙堆斑块分布面积大, 相互间有重叠, 沙堆外部形态差别大, 频率分布为多峰曲线, 偏度 1.28, 有 4 个峰值, 主峰度对应灌丛面积为 10 m^2 , 累积分布频率中值对应的面积小于 42 m^2 。

方差分析表明: 雏形阶段沙堆平均高度最低 ($P<0.01$), 活化阶段平均高度最高 ($P<0.01$), 发育和稳定阶段高度相近, 两者间差异不显著 ($P>0.05$), 大小排序为活化阶段>发育阶段>稳定阶段>雏形阶段; 活化和发育阶段沙堆底面积和体积大小彼此间不显著 ($P>0.05$), 但二者均显著大于稳定和雏形阶段底面积 ($P<0.01$); 各发育阶段结皮面积大小分布差异显著 ($P<0.01$), 稳定阶段面积最大, 其次为活化阶段和发育阶段。

2.2 不同发育阶段白刺灌丛植被特征

白刺灌丛的整体生长状况、植被盖度随发育过程的进行, 呈先升高后降低的态势, 如图 5 所示: 雏形、发育和稳定阶段生长状况逐渐变好, 相互间差异不显著 ($P>0.05$), 但是活化阶段生长状态最差, 显著低于其他 3 个阶段 ($P<0.05$); 植被盖度稳定阶段最高, 显著高于其他 3 个阶段 ($P<0.05$), 雏形阶段盖度最低, 显著低于其他 3 个阶段 ($P<0.05$), 发育和活化阶段盖度两者间相差



注: GS. 生长状态; C. 植被盖度; DR. 枯枝率; HV. 植被高度; NB. 新生枝长度。不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: GS. growth situation; C. plant coverage; DR. dead branch rate; HV. vegetation height; NB. length of new branch. Different lowercases mean significant difference ($P<0.05$).

图 5 不同发育阶段白刺灌丛植被特征

Fig. 5 Statistical vegetation characteristics of *N. tangutorum* at different developmental stages

不大, 但是显著低于稳定阶段 ($P<0.05$), 而又高于活化阶段 ($P<0.05$); 植被枯枝率正好与之呈相反的变化趋势: 发育阶段植被整体生长状况最好, 而此阶段枯枝率相比其他 3 个阶段显著降低 ($P<0.01$), 活化阶段枯枝率显著升高 ($P<0.05$), 发育和稳定阶段枯枝率大小相当, 两者间差异不显著 ($P>0.05$)。白刺灌丛植被平均高度随发育的进行从雏形阶段的 22.6 cm 显著增加到活化阶段的 34.7 cm , 发育和稳定阶段高度相互间差异不显著, 但是均显著高于雏形阶段 ($P<0.05$)。雏形与发育阶段中白刺当年新生枝条长度显著 ($P<0.05$), 长于稳定阶段和活化阶段, 其中, 发育阶段枝条最长为 16.1 cm , 活化阶段最短 6.8 cm , 新生枝长短排序为发育阶段>雏形阶段>稳定阶段>活化阶段, 这表明白刺灌丛植被的自我更新能力逐渐减弱。

2.3 各发育阶段灌丛沙堆防风和固沙功能分析

2.3.1 防风功能

单株白刺灌丛沙堆防风纵断面积雏形阶段最小, 其次是稳定阶段和发育阶段, 活化阶段沙堆防风功能值最大, 大小排序为活化阶段>发育阶段>稳定阶段>雏形阶段 (图 6a)。在各发育阶段样地内单位面积纵断面防风功能值则是随着发育不断地进行, 功能值不断增加, 雏形阶段最小, 之后为发育阶段、稳定阶段防风功能最大, 活化阶段防风功能降低, 大小排序为稳定阶段>活化阶段>发育阶段>雏形阶段 (图 6b)。各发育阶段单株白刺灌丛沙堆的防风性差异极显著 ($P<0.01$) (表 2)。雏形阶段和稳定阶段差异不显著, 但与发育和活化阶段差异极显著, 发育阶段防风功能性与稳定阶段差异不显著, 与活化阶段差异极显著, 活化阶段沙堆防风功能性同其他阶段均表现为极显著 ($P<0.01$)。发育阶段单株白刺灌丛沙堆的防风性能要高于稳定阶段的, 但是由于稳定阶段沙堆生长状况良好, 植被覆盖度大, 沙堆数量密集, 因此导致稳定阶段样地内单位面积沙堆纵断面面积最大。活化阶段白刺灌丛生长状态最差, 枯枝率最高, 但是由于沙堆相对高大, 是其他阶段沙堆的 1.5~2 倍以上, 导致此阶段白刺沙堆纵断面面积大, 这也是导致防风功能值较大的主要原因。

2.3.2 固沙功能

白刺植物基部的积沙是该植株长期阻截流沙逐渐堆积而形成的结果, 白刺灌丛沙堆是植被、

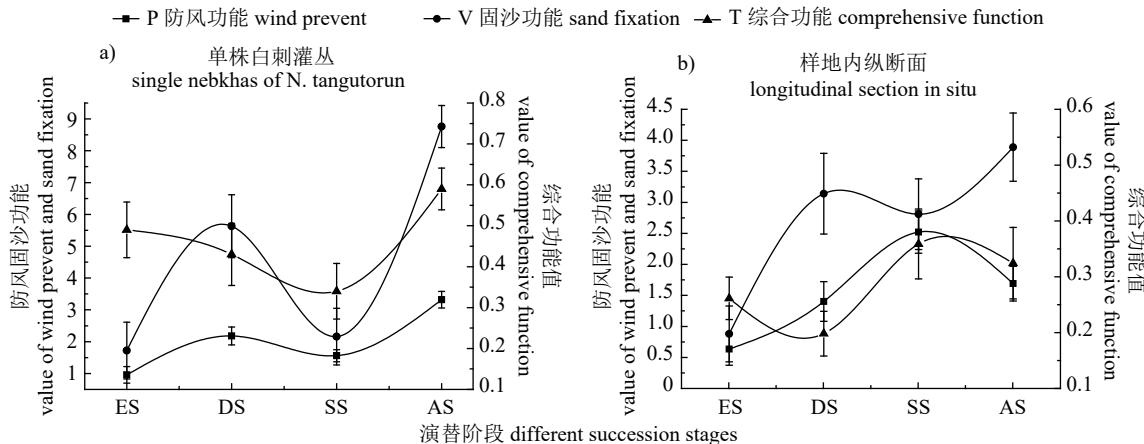


图 6 各发育阶段白刺灌丛沙堆的防风固沙功能值趋势变化

Fig. 6 The trend of function of wind prevention and sand fixation of *N. tangutorum* at different developmental stages

表 2 各发育阶段白刺灌丛沙堆防风固沙功能差异性分析

Tab. 2 Significant difference of function of wind prevent and sand fixation at different developmental stages

各项功能值 functions	单株白刺灌丛沙堆 a single of nebkhlas			样地内纵断面灌丛沙堆 longitudinal section of nebkhlas in plots		
	发育阶段 DS	稳定阶段 SS	活化阶段 AS	发育阶段 DS	稳定阶段 SS	活化阶段 AS
防风功能 wind prevent	ES	0.001**	0.064	<0.00**	0.170	0.044*
	DS		0.068	0.003**		0.612
	SS			<0.00**		0.149
固沙功能 sand fixation	ES	0.004**	0.70	<0.00**	0.127	0.262
	DS		0.004**	0.02*		0.626
	SS			<0.00		0.309
防风固沙综合功能 comprehensive function	ES	0.311	0.342	0.216	0.775	0.617
	DS		0.804	0.030*		0.467
	SS			0.019*		0.601

注: “*”表示 0.05 水平上差异显著; “**”表示 0.01 水平上差异显著。

Note: “*” indicates a significant difference at the 0.05 level; “**” indicates a significant difference at the 0.01 level.

沙源和风力 3 个因素共同作用的结果^[16]。沙堆越大表明该植株阻截流沙的功能越强。不同发育阶段单株白刺灌丛沙堆的固沙功能值大小随着发育的进行呈先增后减的变化, 变化趋势与单株白刺灌丛的防风功能趋势变化相似, 呈“S”变化。雏形阶段单株白刺体积最小, 所以固沙功能值最低, 活化阶段样地内单株白刺灌丛植株体积最大, 固沙功能值也最高, 单株白刺灌丛沙堆固沙功能从大到小排序为活化阶段>发育阶段>稳定阶段>雏形阶段(图 4)。方差分析表明: 雏形阶段与发育阶段、活化阶段沙堆呈极显著差异($P<0.01$), 与稳定阶段沙堆差异不显著; 发育阶段沙堆与稳定阶段呈极显著差异、与活化阶段呈显著差异, 稳定阶段和活化阶段沙堆相互差异显著($P<0.001$)。

各样地纵断面单株白刺灌丛沙堆固沙功能值

的变化趋势相似, 但是大小发生了变化。雏形阶段纵断面沙堆数量少, 体积小, 固沙功能值也最小, 发育阶段和稳定阶段固沙功能值大小相近, 活化阶段固沙功能值最高(图 4)。方差分析表明: 雏形阶段固沙功能同活化阶段差异显著($P<0.05$), 与其他阶段沙堆相比较均未表现出差异性($P>0.05$)。发育阶段单株白刺灌丛固沙功能值大于稳定阶段固沙功能值, 方差分析极显著($P<0.01$), 但是由于稳定阶段样地内沙堆数量多密度大, 因此在样地纵断面单位面积上发育阶段和稳定阶段沙堆固沙功能值相近, 方差分析不显著($P>0.05$)(表 2)。

2.3.3 防风固沙综合功能

单株白刺灌丛沙堆防风固沙综合功能值在 0.3~0.6 之间, 随发育的不断进行, 呈“V”形趋势

变化。从图6可知:单株白刺灌丛沙堆防风固沙综合功能值大小排序为活化阶段>雏形阶段>发育阶段>稳定阶段。发育阶段、稳定阶段分别同活化阶段白刺灌丛差异性显著($P<0.05$),其他沙堆之间相关性不显著。4种发育阶段中白刺灌丛沙堆群落纵断面的防风固沙综合功能值相比单株白刺发生了变化,呈“S”形趋势变化,功能值大小在0.2~0.5之间。从图6可知:稳定阶段防风固沙综合功能值最大,其次为活化阶段>雏形阶段>发育阶段,表明稳定阶段的单位面积纵断面防风固沙综合功能最好,其次为活化阶段,发育阶

段的综合功能相对最低。方差分析表明:各发育阶段防风固沙综合功能值各有不同,但是差异性均不显著($P>0.05$)。

对白刺灌丛沙堆的防风、固沙功能分别进行曲线拟合,发现不同发育阶段防风和固沙功能均呈幂函数方程变化趋势。如图7a所示:各方程的决定系数 R^2 在不同发育阶段表现不同,其中,稳定阶段最大为0.95,发育阶段最小为0.57,从大到小排序为稳定阶段>活化阶段>雏形阶段>发育阶段,表明防风和固沙两种功能在稳定阶段均发挥出良好的作用,其次是活化阶段,而发育阶

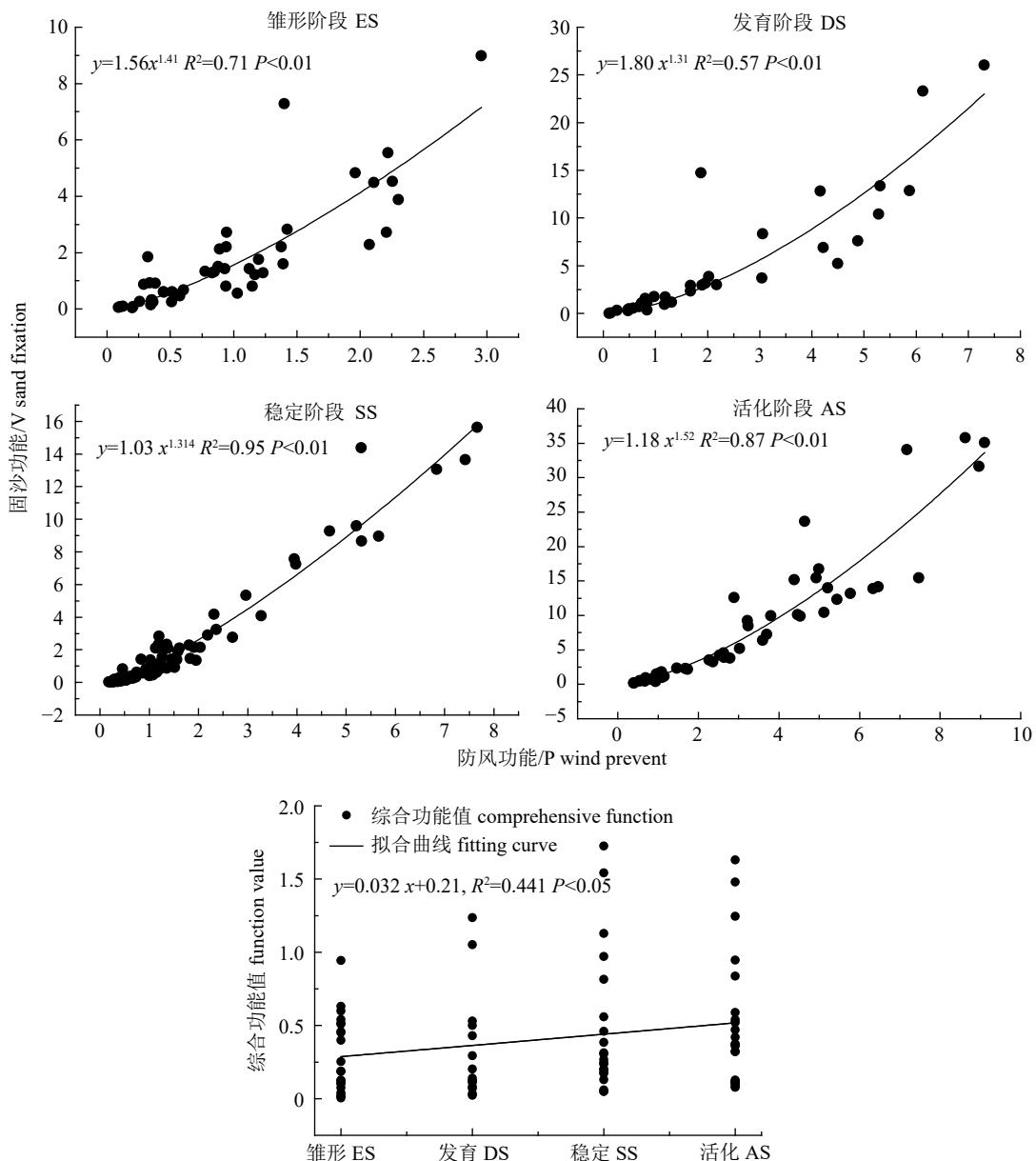


图7 不同发育阶段白刺灌丛沙堆防风固沙功能值拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of wind prevent and sand fixation function of nebkhlas at different developmental stages

段其纵断面的防风和固沙两者间的拟合度最低。对各发育阶段的防风固沙综合功能值进行方程拟合(图7b),从雏形阶段到活化阶段综合功能值呈线性方程缓慢增加($y=0.032x+0.21$, $R^2=0.4414$, $P<0.05$),表明从风沙前沿地带的雏形阶段到绿洲边缘的活化阶段,防风固沙综合功能总体上呈逐渐增加的趋势。

3 讨论

3.1 白刺灌丛沙堆防风固沙功能的影响因素

荒漠生态系统是陆地生态系统的一个重要组成部分。对于旱荒漠区植被的研究主要集中在对植被防风功能和固沙性能的研究上。植被防风固沙功能主要受两方面的影响:一是单株的纵断面和枝条密集程度,即断面郁闭度;二是研究区域内植株密度构成,单位面积内植株密度越大,则防风固沙功能就越强^[14]。白刺灌丛沙堆的分布范围、密度和空间结构将决定整个区域内的沙堆群落总盖度及空间结构,进而影响过渡带的防风固沙效果。由于荒漠—绿洲过渡带地貌和土壤特征差异大,水分异质性高,受风沙活动的干扰和局部地形、地貌以及土壤水分等因素的影响,从沙漠边缘向绿洲地带逐渐推进的过程中形成的雏形、发育、稳定和活化等不同阶段的白刺灌丛沙堆,其植被特征、沙堆形态特性以及空间异质程度等均不相同(图3、表1、2)。雏形阶段的白刺灌丛正处于沙堆的形成时期,相比于其他阶段的白刺沙堆,此阶段植株小,沙堆低矮,分布密度小,因此单个的沙堆在防风性能和固沙性能上均最小,但是此阶段由于植被生长良好,植被冠幅、高度同沙堆大小相似,因此此阶段单株灌丛的综合功能值并不是最低的。发育阶段沙堆位于流动沙地边缘地带(图1),因此,该阶段白刺灌丛沙堆具有丰富的沙源条件,频繁的沙埋活动,以及流动沙地良好的水分条件^[17],导致此阶段沙堆特征分异明显,沙堆高度、体积均快速增长,植被生长状态在4个发育阶段中最好,但是此阶段沙堆大小分异明显,沙堆总体数量少,因此综合功能相对值较低(表2、图5)。稳定阶段沙堆上有大量结皮存在,虽然能够提高土壤的抗风蚀性能^[18],但结皮拦截了部分天然降水进一步深层次入渗,沙丘内部水分不能及时补充,而白刺根系在不断的吸收水分,因此灌丛沙堆内部水分条

件逐渐恶化,白刺植被生长受限,部分植被出现退化^[19],枯枝率上升(表1)。本研究中处于稳定阶段的白刺灌丛沙堆在沙堆体积上并不是最高大的,这与所处的立地条件有关。该样地位于2号塔附近的固定沙地上(图1),丘间地表层基本没有流沙,而是裸露了大面积较为坚硬的干涸黏土。因此处于稳定阶段的白刺灌丛沙堆缺少丰富而连续的沙源。研究表明:对于大致相同的植被条件和风力条件而言,沙源丰富则沙堆体积较大,反之则沙堆体积发育较小^[20]。因此,处于稳定阶段的白刺灌丛沙堆从单株灌丛角度看,其体积大小、底面积大小并不是最大,但是从样地整体效应看,此样地内沙堆密集度高,侧影面积大,因此在样地纵断面上整体的防风固沙综合功能值最高。活化阶段沙堆表层结皮吹蚀破损,部分沙堆迎风坡顶部和侧面解体,有些相邻沙堆相互结合为新的沙丘(图3),沙粒流动性增强,这是导致活化阶段沙堆体积、底面积增大的主要原因。高大的沙堆和巨大的侧影面积使得该阶段单株白刺灌丛沙堆的防风、固沙功能最高。

3.2 防风固沙功能与地表粗糙度间的关系

灌丛沙堆改变了沙地表面地貌特征,增加了下垫面粗糙度,对气流的运动产生了障碍^[4],相关研究表明民勤绿洲过渡带灌丛沙丘区域可使风速连续的降低。本研究中白刺灌丛沙堆也可认为是一种植被粗糙元,在相同的风速及沙粒起动风速下,输沙率与植被粗糙元密集度成反比的量化关系,即植被粗糙元密集度越大,风蚀输沙率越小,植被种群的固沙效益越好。本研究中涉及的不同发育阶段的白刺灌丛沙堆防风功能与沙堆侧影面积间的关系基本符合上述关系。因此,受个体空间结构、生物量分配模式及种群整体特征的共同影响,在生存环境相同或相似的情况下,如果单一追求个体的高冠幅或个体数目都不利于种群综合固沙效益的发挥^[21-22]。因此,这就可以解释本研究中稳定阶段白刺灌丛沙堆具有较高的防风固沙综合效益。沙漠周边地带典型的灌丛沙堆植物物种在减少、控制和捕获沙尘尘埃方面起着重要作用, AHMED 和 AL-DOUSARI 等^[23-24]发现高于 15~20 cm 的荒漠灌丛植物影响了近地表气流分布特征,进而在控制和减少沙尘方面起着重要作用。CHANG 等^[25]对河西走廊绿洲边缘的灌丛沙堆积沙带研究认为:虽然单个灌丛沙堆各有差

异, 但是灌丛沙堆群体效应对绿洲边缘的防风固沙功能具有重要的作用; 同时, 广泛分布的白刺随着灌丛沙堆的规模越大, 灌丛与沙堆参数间相关性越好^[20]。本研究结果同上述研究结果相近, 表明在绿洲荒漠过渡带从雏形阶段到活化阶段, 白刺灌丛沙堆防风固沙综合功能呈逐渐增加的趋势, 虽然活化阶段的灌丛沙堆植被枯枝率高, 衰退现象严重, 表层结皮破损, 部分沙堆解体, 但是沙堆的群体效应依然显著, 仍然具有良好的防风、固沙的综合功效, 因此进一步开展不同发育阶段活化阶段植被抚育和保护工作对维护绿洲边缘的生态具有重要的现实意义。

4 结论

(1) 白刺灌丛沙堆的整体生长状况和植被覆盖度均随发育过程的进行, 呈先升高后降低的态势, 发育阶段植被生长状况最好, 而活化阶段生长状况最差; 稳定阶段植被覆盖度显著最高, 而雏形阶段最低; 沙堆体积大小随底面积的增加而增加, 各发育阶段沙堆体积大小排序为活化>发育>稳定>雏形。

(2) 不同发育阶段单株白刺灌丛沙堆的防风功能和固沙功能均不相同, 但是变化趋势相似, 功能大小排序为活化阶段>发育阶段>稳定阶段>雏形阶段。不同发育阶段样地内纵断面单位面积上防风固沙功能相比单株的白刺灌丛沙堆均发生了变化。防风功能大小排序为稳定阶段>活化阶段>发育阶段>雏形阶段, 固沙功能大小排序为活化阶段>发育阶段>稳定阶段>雏形阶段, 而综合功能值大小分别为稳定阶段>活化阶段>雏形阶段>发育阶段。

(3) 白刺灌丛沙堆从雏形阶段到活化阶段防风固沙综合功能值虽然各有不同, 但是随着发育阶段的进行总体上呈逐渐增加的趋势, 表明从雏形阶段到活化阶段防风固沙功能逐渐增强。虽然活化阶段沙堆表现出一定的退化现象, 但是该阶段的灌丛沙堆仍然具有很好的防风固沙功效, 整体功效明显, 对维护绿洲边缘生态安全具有重要的防护作用。因此, 加大对活化灌丛沙堆的生态保护和恢复更新研究对维护当前绿洲生态安全工作具有现实而又重要的意义。

[参考文献]

[1] 赵文智, 杨荣, 刘冰, 等. 中国绿洲化及其研究进展[J].

中国沙漠, 2016, 36(1): 1. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00057](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00057).

[2] 谭凤翥, 王雪芹, 王海峰, 等. 桤柳灌丛沙堆三维流场随背景植被变化的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 48. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00158](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00158).

[3] 常兆丰, 张进虎, 石学刚, 等. 沙漠植物分层侧影与积沙成丘的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7351. DOI: [10.5846/stxb201608161680](https://doi.org/10.5846/stxb201608161680).

[4] 詹科杰. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆表面风沙输送特征与沙堆形成发育的关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.

[5] 杜建会, 严平, 展秀丽, 等. 民勤绿洲白刺灌丛沙堆不同演化阶段表面抗蚀性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 763. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2008.0191](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2008.0191).

[6] 杨婷婷, 姚国征, 王满才, 等. 乌兰布和沙漠天然灌丛防风阻沙效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(1): 194. DOI: [10.3969/j.issn.1003-7578.2008.01.038](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7578.2008.01.038).

[7] 张吨明, 唐进年, 徐先英, 等. 河西沙漠绿洲边缘固沙造林与水分动态研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2008, 23(S1): 144.

[8] TENGBERG A, CHEN D L. A comparative analysis of nebkhlas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 181. DOI: [10.1016/s0169-555x\(97\)00068-8](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(97)00068-8).

[9] TENGBERG A. Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso[J]. Journal of Arid Environments, 1995, 30(3): 265. DOI: [10.1016/S0140-1963\(05\)80002-3](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80002-3).

[10] 杜建会, 严平, 俄有浩. 甘肃民勤不同演化阶段白刺灌丛沙堆分布格局及特征[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1165. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2007.0208](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2007.0208).

[11] 冯益明. 空间统计学理论及其在林业中的应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.

[12] 贾晓红, 李新荣. 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[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 2046. DOI: [10.3321/j.issn:0250-3301.2008.07.048](https://doi.org/10.3321/j.issn:0250-3301.2008.07.048).

[13] EL-BANA M I, NIJS I, KHEDR A A. The importance of phytogenic mounds (nebkhlas) for restoration of arid degraded rangelands in northern Sinai[J]. Restoration Ecology, 2003, 11(3): 317. DOI: [10.1046/j.1526-100X.2003.00222.x](https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2003.00222.x).

[14] 常兆丰, 李易珺, 张剑挥, 等. 民勤荒漠区4种植植物的防风固沙功能对比分析[J]. 草业科学, 2012, 29(3): 358.

[15] 曹燕丽, 崔向慧, 卢琦, 等. 荒漠生态系统定位观测方法与指标体系探讨[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 619. DOI: [10.3321/j.issn:1000-694X.2006.04.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-694X.2006.04.022).

[16] 孙涛, 唐进年, 韩福贵, 等. 旱区荒漠灌丛沙堆研究进展及展望[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 351. DOI: [10.13961/j.cnki.stcbtb.2016.04.060](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stcbtb.2016.04.060).

[17] 王月, 李程, 李爱德, 等. 白刺沙堆退化与土壤水分的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1407. DOI: [10.5846/stxb201310242571](https://doi.org/10.5846/stxb201310242571).

[18] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1003-7578.2006.02.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7578.2006.02.039).

[19] 杨东东, 赵伟, 陈林, 等. 人工柠条林生物土壤结皮地表水文效应的季节转换[J]. 西北植物学报, 2018, 38(7): 1349. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2018.07.1349](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2018.07.1349).

[20] 左合君, 杨阳, 张宏飞, 等. 阿拉善戈壁区白刺灌丛沙堆形态特征研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 263. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2018.01.043](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2018.01.043).

[21] LANCASTER N, BAAS A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(1): 69. DOI: [10.1002/\(sici\)1096-9837\(199801\)23:1<69::aid-esp823>3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9837(199801)23:1<69::aid-esp823>3.0.co;2-g).

[22] MILLINGTON J A, BOOTH C A, FULLEN M A, et al. The role of long-term landscape photography as a tool in dune management[J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2009, 17(4): 253. DOI: [10.3846/1648-6897.2009.17.Ia-Ih](https://doi.org/10.3846/1648-6897.2009.17.Ia-Ih).

[23] AHMED M, AL-DOUSARI N, AL-DOUSARI A. The role of dominant perennial native plant species in controlling the mobile sand encroachment and fallen dust problem in Kuwait[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(2): 134. DOI: [10.1007/s12517-015-2216-6](https://doi.org/10.1007/s12517-015-2216-6).

[24] AL-DOUSARI A, AHMED M, AL-DOUSARI N, et al. Nabkha morphometry and properties of aeolian sediments around native plants in Kuwait[M]//CHEN-CHOUNI H, ERRAMI E, ROCHA F, et al. Exploring the nexus of geoecology, geography, geoarcheology and geotourism: advances and applications for sustainable development in environmental sciences and agroforestry research. Springer, 2019.

[25] CHANG Z F, WANG Q Q, ZHANG J H, et al. Accumulated sand-belt along the oasis fringe and its ecological significance in Hexi of Gansu[M]//Environmental science and information application technology: proceedings of the 2014 5th international conference on environmental science and information application technology (ESIAT 2014), Hong Kong, November 7-8, 2014.

责任编辑: 何承刚