

\*\*\*\*\*  
\* 试 \*  
\* 验 \*  
\* 研 \*  
\* 究 \*  
\*\*\*\*\*

# 高寒沙区人工沙棘对风沙危害的生态响应

吴汪洋<sup>1</sup>, 张登山<sup>1,2</sup>, 田丽慧<sup>3</sup>, 张明远<sup>1</sup>, 周鑫<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学  
地理科学学部, 北京 100875; 2. 青海大学 农林科学院, 青海 西宁 810016;

3. 青海大学 省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:** [目的] 沙棘(*Hippophae rhamnoides*)是高寒沙区典型的优良治沙物种,其风沙危害的抗逆性研究对沙棘生态适应性机理及高寒沙区生物治沙工作具有重大的探究与指导意义。[方法] 对不同类型沙丘不同林龄的人工沙棘林进行了样方调查和风沙活动监测。[结果] 沙棘群落特征与地表风蚀强度变化具有时空同步性。轻度风蚀与中轻度沙埋现象有助于沙棘的生长与群落的发展,固定与半固定沙丘人工沙棘的株高冠幅均为流动型沙丘沙棘的 3~6 倍;沙棘各生长指标与株下蚀积深度具有显著的二次函数拟合关系,8 年生沙棘生长的最佳沙埋深度在 30—40 cm。2008—2016 年,各沙丘沙棘群落特征与局地输沙率、粗糙度、蚀积深度等风沙活动特征分别表现出显著的指数递减、多函数递增和二次函数先增后加减的变化规律。[结论] 高寒沙区沙棘对风沙危害的响应特征反映了沙棘良好的风沙适应能力,也指示沙棘造林技术需要注重立地条件选取、造林结构改进与多物种配置,保障沙棘的稳定生长势态与良好的生态修复效益。

**关键词:** 沙棘; 沙丘类型; 群落特征; 风沙危害; 生态响应

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2018)03-0001-07

**中图分类号:** S725.7, U418.5<sup>+</sup>6

**文献参数:** 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 等. 高寒沙区人工沙棘对风沙危害的生态响应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 1-7. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2018. 03. 001. Wu Wangyang, Zhang Dengshan, Tian Lihui, et al. Ecological responses of *Hippophae rhamnoides* to wind-sand hazard in alpine sand land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 1-7.

## Ecological Responses of *Hippophae Rhamnoides* to Wind-sand Hazard in Alpine Sand Land

WU Wangyang<sup>1</sup>, ZHANG Dengshan<sup>1,2</sup>, TIAN Lihui<sup>3</sup>, ZHANG Mingyuan<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Changes and Natural Disaster, Ministry of Education, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Qinghai Academy of Agricultural Forestry Sciences, Qinghai University, Xi'ning, Qinghai 810016, China; 3. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xi'ning, Qinghai 810016, China)

**Abstract:** [Objective] *Hippophae rhamnoides* is a typical species that controlling alpine desertification. Study on the responses of this artificial plant to wind-sand hazard is of great importance in exploring the vegetation adaptive mechanism and directing the sand-control work. [Methods] The annual vegetation quadrat survey and the sand surface erosion monitoring. [Results] The *H. rhamnoides* community features have been found changed temporally and spatially with the sand surface erosion intensity. Firstly, patterns of light wind erosion and medium sand accumulation contributed to the plant growth and community development of *H. rhamnoides*. Comparatively, the average vegetation height and canopy in fixed or semi-fixed sand dunes were 3~6 times larger than that in mobile sand dunes. Secondly, significant parabolic relationships were found between the community features and the erosion/deposition depth with the optimal sand deposition depth of 30—40 cm for eight-years-old *H. rhamnoides* forest. Thirdly, the *H. rhamnoides* community features changed with the sand transport rate, surface roughness and annual erosion depth as significant fitting curve of exponential decline, multiple functions increase and quadratic increase, respectively. [Conclusion]

收稿日期: 2017-11-27

修回日期: 2017-12-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“青海高寒沙区工程和植物集成技术治沙生态效益评析”(41661001), “青海湖东岸高大流动沙山移动特性及其危害研究”(41461002); 青海省高端千人计划

第一作者: 吴汪洋(1988—), 男(汉族), 湖北省通城县人, 博士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化。E-mail: bnuwyy@yeah.net。

通讯作者: 田丽慧(1988—), 女(汉族), 甘肃省静宁县人, 博士, 讲师, 研究方向为沙地植被修复。E-mail: tianlihui1988@sina.com。

*H. rhamnoides* showed a strong resistance to wind erosion and sand-burial. A number of influential factors, including afforesting sites, forest structure optimizations and enrichment of other vegetation species, should be taken into accounts in protecting community succession and ecology restoration.

**Keywords:** *Hippophae rhamnoides*; sand dune types; community features; wind-sand hazard; ecological responses

风沙—植被生态系统是沙地生态与荒漠化防治研究的重点<sup>[1-2]</sup>。风沙活动的强弱变化直接影响沙地植被生长及其群落演替。植物茎叶遭受风吹沙打,根茎遭遇风蚀沙埋时,均会出现不同程度的生长生理响应<sup>[3-4]</sup>。强风使植株发生茎干机械倾倒与折毁。茎叶脱水、光合减弱和表层细胞死亡等现象加剧株下地表风蚀而使根系暴露枯亡。强风携带的沙粒运动一方面对植物茎叶进行击打和沙尘附着,影响植物呼吸作用,另一方面在株下产生不同程度的沙埋作用,影响地下根茎的存活与生长<sup>[5]</sup>。风沙活动对荒漠植物的生长具有双重作用。强烈的风沙活动会直接降低植物的幼苗存活率、繁殖率、生长势态和群落的稳定性,中轻度的风蚀沙埋则会促进地下根茎的新生、植株的高生长和提高生殖力,促进群落的更新演替。对于风沙活动的危害,荒漠植物通常通过形态改造,繁殖策略,呼吸调节,水分养分分配等方法进行适应<sup>[6-8]</sup>。近年来,广大学者加强植物对风蚀沙埋危害的生长与生理响应研究。通过人为设置不同强度的吹风与埋沙条件,观测沙柳(*Salix mongolica*)、锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、蒿类(*Artemisia*)等荒漠植物的幼苗存活率、生长特征(株高、枝条数及其长度、地径、生物量等)和生理特征(叶片水势,光合速率,细胞膜透性, RWC, MDA 和抗氧化酶活力),研究结果均反映重度的风蚀沙埋作用对植物的生长具有直接毁灭性的危害,而中轻度的风蚀沙埋有利于植物不定根的新生、茎叶光合速率的增强、种子萌蘖和群落多样性的增加<sup>[9-12]</sup>。因而植物对风沙胁迫的抗逆性是反映植物荒漠生态环境适应能力与改良效益的重要指征。然而,目前的研究仍然存在以下不足,前人研究以单一的环境控制试验为主,缺乏野外实地验证和特殊环境的考虑;同时研究对象多以单株植物短期的生态响应为主,对于植物的群落响应和长期变化响应研究不足。此外,关于沙生植物对风沙危害的响应机理研究缺乏对植物治沙工作的实际指导,需要野外实地的观测试验指导人工固沙植物适宜的立地条件、造林结构与方法或者物种配置<sup>[13-14]</sup>。

沙棘(*Hippophae rhamnoides*)作为中国多年试验观测与治沙推广以来优良的治沙物种,其生长习性与生理特征、沙地生态适应与治沙效益均得到了广泛的研究<sup>[15-16]</sup>。但关于沙棘对不同风沙危害条件的生长响应研究匮乏,尤其在风沙活动强烈的高寒沙区。

高寒沙区沙棘对风沙危害的适应性与抗逆性直接关系到其生长势态与治沙效益。根据前人对沙棘的防风固沙机制与效益的研究,适宜的立地条件下,沙棘具有存活率高,生长快,固沙效果显著等特征,其抗旱抗寒与耐盐碱性能已得到有效的试验论证,对风沙危害的响应研究也主要体现在不同类型沙丘沙棘林地的风沙流结构差异与防风固沙效益的年内变化方面<sup>[17]</sup>。在高寒沙区,沙棘在不同风沙条件下(不同沙丘类型或沙丘部位)表现出显著的生长差异和群落演替差异单一的沙棘造林方式缺乏对立地风沙条件的考虑,造林结构与方法均缺乏改进,致使人工沙棘林内部出现大面积的风蚀地块或沙埋地块,沙棘的存活率与固沙效益也随之骤减<sup>[18]</sup>。本文将青海湖东克土沙地的人工沙棘林为研究对象,分析不同风沙危害条件下,不同类型沙棘沙丘的蚀积强度和沙棘生长指标的相互关系,并探究 8 年生的沙棘群落特征与同期风沙活动特征的年变化规律,从时空角度认识沙棘对风沙危害的生长响应,并指导当地沙棘治沙工作。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

克土沙地位于青海湖海晏湾东部,西靠日月山,位于湖泊—沼泽—草地向山地变化的过渡地带,沙区以 W-E 向的新月形沙丘和沙垄为主。受青藏高原东北边缘季风与青海湖湖泊效应的影响,沙区年均温度为 0.7 ℃,年均降水量达到 370 mm,冬季盛行 W-NW 风,年均风速约为 4.5 m/s;全年 N-NE 方位风频最高,约占全年 35%。2008 年开始,沙区开展了大面积的机械沙障铺设与生物造林工程,截至 2016 年,沙区造林面积达到 100 hm<sup>2</sup>,以沙棘、乌柳(*Salix cheilophila*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、小叶杨(*Populus simonii*)为主的造林物种被引进试验,并发挥了良好的生态改良效益。

### 1.2 样地布设

2008 年 8 月,在克土沙地样地选取 5 处无植被覆盖的流动沙丘丘顶进行沙棘实生苗造林,造林密度均为 1 株/2.25 m<sup>2</sup>(以 1.5 m × 1.5 m 麦草方格为参考)。2008—2016 年,5 处沙棘沙丘样地得到围封保护。由于样地沙丘高度、坡度等地形条件差异,各样地的风沙活动差异逐年增大,沙棘的生长也随之出现年变化差异(表 1)。

表1 沙棘林样地特征与林分特征

样地编号	2008年沙丘特征			2016年春季林分特征		
	海拔/m	坡度/(°)	沙丘高度/m	林相	覆盖度/%	沙丘类型
P <sub>1</sub>	3 185.53	8.52	3.78	灌草混交林	58.48	自然固定沙丘
P <sub>2</sub>	3 186.68	6.49	6.43	灌草混交林	40.25	人工固定沙丘
P <sub>3</sub>	3 187.52	10.74	5.49	灌木纯林	35.13	堆积型人工半固定沙丘
P <sub>4</sub>	3 188.01	15.11	6.48	灌木纯林	22.50	风蚀型人工半固定沙丘
P <sub>5</sub>	3 188.49	11.36	7.46	灌木纯林	27.33	流动沙丘
CK	3 190.63	12.71	7.43	—	0.00	纯流沙地

### 1.3 观测方法

2008—2016年,针对沙棘沙丘样地进行全年蚀积监测、春季植物样方调查与风沙观测、探究沙棘植物生长与地表蚀积强度、风沙活动强度间的关系。

(1) 蚀积监测。2008年,在P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>,P<sub>3</sub>,P<sub>4</sub>样地沙棘林内选取一条N-S走向的蚀积监测带,每隔5m选取一株沙棘,并在株下埋设一根钢钎(埋藏与出露深度均为15cm,共20根),在P<sub>5</sub>,CK样地则埋设10根长约60cmPVC管(出露30cm)。所有蚀积监测点每隔1—2月进行测量1次,统计样地每年内总蚀积深度S(S>0表示堆积,S<0表示侵蚀)。

(2) 风沙观测。2008—2016年每年春季对各沙棘样地进行风速廓线与输沙率观测,分别采用梯度式风速仪与平口式集沙仪进行同步观测,并计算不同年份地表粗糙度z<sub>0</sub>(cm)与8~9m/s旷野风速下的地表输沙率T[g/(cm<sup>2</sup>·min)]。

$$\lg z_0 = \frac{\lg z_2 - \lg z_1}{1 - A} \quad (A = u_2 - u_1) \quad (1)$$

式中:u<sub>2</sub>,u<sub>1</sub>——z<sub>2</sub>和z<sub>1</sub>高度下的风速值。

(3) 样方调查。2008—2016年春季期间,在各沙丘样地固定选取3个5m×5m植物样方,测量样方内植株平均高度(H:植株最高点距离地表的垂直距离,cm)、平均冠幅(C:冠盖的垂直投影面积,m<sup>2</sup>)、地径(B:距离沙面约10cm的枝干直径)、群落盖度(P:%)、群落均匀度(CEI)和多样性(SDI)等群落生长特征指标。

$$P_i = N_i / N \quad (2)$$

$$SDI = - \sum_i^n P_i \times \lg P_i \quad (3)$$

$$M = (n - 1) / \log_2 N \quad (4)$$

$$CEI = SDI / \ln S \quad (5)$$

式中:SDI——Shannon-Wiener多样性指数;CEI——Pielou均匀度指数;M——Margalef丰富度指数;N<sub>i</sub>——一种i的个体数;N——所在群落的所有物种的个体数之和;n——物种数。

采用SPSS软件中单因素方差分析、Pearson相关性分析与回归性方法,统计分析各指标间的响应关系。

## 2 结果与方法

### 2.1 沙棘生长特征对风沙危害的空间响应

2.1.1 沙棘样地的风沙蚀积特征 2008—2016年各样地随着沙棘生长的差异,林内的地表蚀积深度与风沙危害强度表现出具有显著的样地空间差异(p<0.05)。图1显示,除P<sub>4</sub>样地表现出轻度至中度(S<-5)的风蚀现象外,其余沙棘样地均以堆积为主,P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>和P<sub>3</sub>样地以中度堆积为主(15<S<35),而P<sub>5</sub>样地出现重度沙棘沙埋现象(S>60)。各沙棘样地内部差异性较小(p>0.05),P<sub>5</sub>样地由于风沙活动强烈,沙棘对风沙阻滞作用显著,大量沙物质在植物周边堆积,掩埋植物基体;而P<sub>4</sub>样地由于受“风廊”地形影响,样地遭遇强劲风力侵蚀,形成椭圆形风蚀坑,坑内不稳定涡流则会反复掏蚀植株基径,加剧地表风蚀。

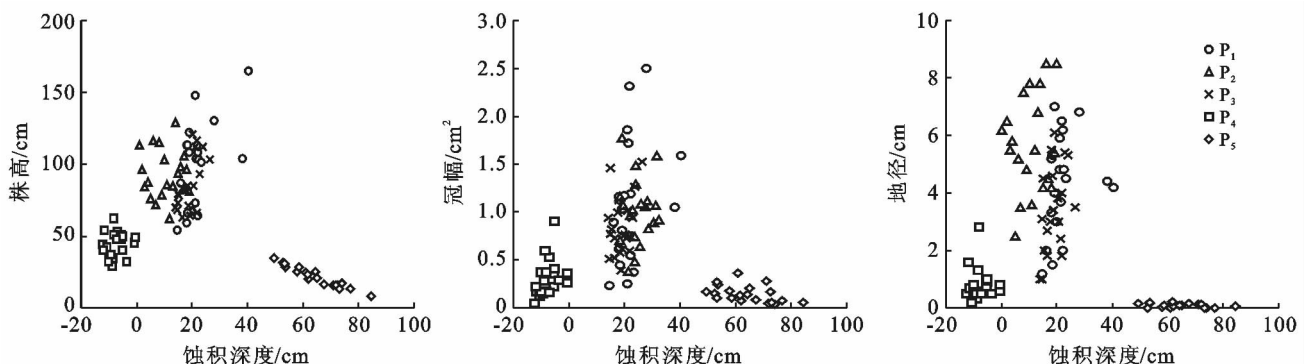


图1 不同沙棘样地调查植株的蚀积深度与生长特征关系

2.1.2 沙棘样地的植株生长特征 沙棘的生长特征具有显著的样地差异,固定型沙丘的沙棘在株高、冠幅和地径指标上均强于其他半固定型和流动型沙丘的沙棘(图 1)。8 a 林龄左右的沙棘株高在  $P_1$  和  $P_2$  样地上达到 1 m,最高达到 1.6 m;单株冠幅面积约为  $1 \text{ m}^2$ ,地径为 4.3~8.0 cm。堆积型( $P_3$ )与侵蚀型( $P_4$ )的半固定沙丘沙棘株高分别约为固定沙丘沙棘株高的 85%和 45%,冠幅分别为 85%和 30%,地径则分别为 68%和 15%。 $P_5$  样地沙棘株高普遍低于 35 cm,冠幅约为  $0.15 \text{ m}^2$ ,而地径由于枝干沙埋,出露地表的枝径均小于 0.5 cm。由此可知,风蚀沙埋强烈的沙棘样地,沙棘各生长指标较差。

2.1.3 沙棘生长对蚀积深度的响应 根据不同蚀积深度样地的植株生长指标变化统计,沙棘株高、冠幅与地径均与株下平均蚀积深度存在较为显著的二次函数拟合关系(图 2 与表 2),拟合系数为 0.7~0.8,而简单的线性递减规律并不显著( $p>0.05$ )。总体而言,沙棘的各项生长指标先随风蚀深度的减小而增大,后随沙埋深度的增加而减小,在一定蚀积深度范围内,沙棘的生长势态达到最佳。由二次函数拟合系数表可知,沙棘的最大株高、冠幅与地径的最大值分别出现在 35—40,40—45 和 30—35 cm 的沙埋深度范围间。3 项指标的高值区域集中在 30—40 cm 的蚀积深度范围内。

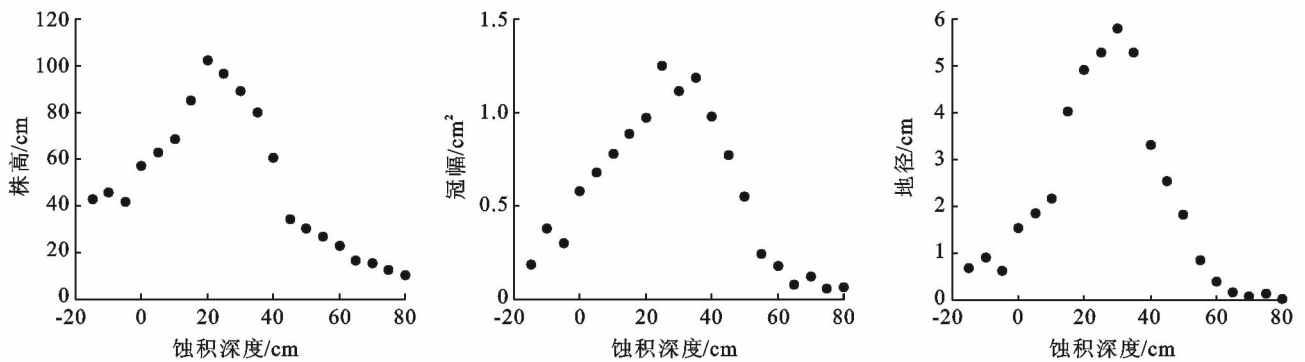


图 2 沙棘各生长指标与蚀积深度的关系

表 2 不同沙棘生长指标与蚀积深度的函数拟合参数与  $F$  检验

生长指标	模型	模型检验			参数估计值		
		$R^2$	$F$	sig.	$b_0$	$b_1$	$b_2$
$H$	线性	0.172	3.731	0.069	69.14	-0.439 3	—
	二次	0.793	32.484	0.000	61.82	1.674 5	-0.032 5
$C$	线性	0.066	1.273	0.274	0.70	-0.003 8	—
	二次	0.741	24.348	0.000	0.60	0.026 8	-0.000 5
$B$	线性	0.041	0.775	0.390	2.51	-0.013 3	—
	二次	0.668	17.100	0.000	2.06	0.117 8	-0.002 0

注: \* 线性模型:  $y=b_0+b_1x$ ; 二次模型:  $y=b_0+b_1x+b_2x^2$ ;  $x$  为沙棘株样地下蚀积深度  $S$ ,  $y$  为沙棘各生长特征指标。

## 2.2 沙棘生长对风沙活动的时间响应

从 2008 年沙棘实生苗定植开始,沙丘地表风蚀作用不断减弱,流动沙丘逐渐向半固定固定沙丘类型转变。与此同时,受不同年份风沙环境的变化,沙棘株下风蚀或沙埋程度各异,植株成活率/保存率、株高、冠幅等基本生长特征表现出相应的年际变化。

2.2.1 风沙活动年变化 根据各样地近 8 a 的冬春季的蚀积监测与风沙观测结果(表 3),沙棘沙丘地表的风蚀深度与输沙率逐年减小,沙棘固沙作用的加强促使沙棘沙丘地表堆积深度逐年增大。

$P_1$  样地近年来处于弱侵蚀与弱堆积的稳定平衡状态,地表的高覆盖度致使地面起沙困难,9 m/s 左

右的旷野风速条件下,输沙率常年小于  $0.000 1 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。 $P_2$  样地在 2014 年前处于半固定状态,地表由轻度风蚀向中度堆积状态转变,输沙率降幅较大。2014 年后,沙丘基本处于年均 1 cm 左右的弱堆积状态。 $P_3$  样地在 2014 年前沙丘始终处于中度—轻度侵蚀的半固定状态。风蚀样地  $P_4$  近 8 a 来一直处于中度—轻度侵蚀状态,同风速条件下的输沙率较  $P_4$  样地高  $0.000 2\sim 0.002 0 \text{ g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{min})$ 。 $P_5$  样地输沙率虽然不足无植被流沙地区的 10%,却是其他样地的 40~200 倍,较强的风沙运动使丘顶至背风坡的沙棘林出现严重的沙埋现象,冬季堆积深度达到 8~12 cm。对比年均侵蚀深度约为 8 cm 的流动沙丘

地区,不同类型的沙棘沙丘的固沙作用非常显著,尤其在沙棘定植后的前两年,沙棘沙丘的风蚀速率降速为 10~13.5 cm/a,固沙效果达到 90%~98%。2012 年由于当年年均风速较小,沙棘沙丘起沙困难,固沙

效果近似 100%。综合分析,沙棘林内的平均风速随沙棘冠幅株高的增大而减小,地表的风蚀强度与输沙率随之降低;反之,林内沙棘长势较差的区域容易产生较大风蚀坑。

表 3 不同年份各沙棘样地的风沙活动特征

风沙特征	年份	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	CK
T (风速 8~9 m/s)	2010	0.000 1	0.000 8	0.005 1	0.007 1	0.026 6	0.066 3
	2012	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 1	0.006 0	0.063 6
	2014	0.000 1	0.000 5	0.000 9	0.001 0	0.041 9	0.414 8
	2016	0.000 2	0.000 2	0.000 5	0.000 7	0.030 0	0.318 0
S	2010	-1.150 0	-2.270 0	-4.520 0	-3.180 0	-5.870 0	-14.600 0
	2012	-0.280 0	1.630 0	-0.830 0	-1.400 0	-0.990 0	-10.500 0
	2014	1.100 0	2.730 0	1.300 0	-1.100 0	6.280 0	-7.100 0
	2016	0.550 0	1.820 0	1.120 0	-0.960 0	6.420 0	-6.100 0
Z <sub>0</sub>	2010	0.332 1	0.296 3	0.290 6	0.090 1	0.082 1	0.038 6
	2012	0.257 7	0.226 8	0.123 1	0.050 4	0.003 0	0.035 1
	2014	0.312 8	0.339 3	0.360 1	0.006 4	0.023 2	0.018 1
	2016	0.325 5	0.455 6	0.362 5	0.032 6	0.004 6	0.002 5

注: T 为地表输沙率; S 为每年总蚀积深度; Z<sub>0</sub> 为地表粗糙度。下同。

2.2.2 沙棘群落特征的年变化 2008—2016 年,各沙棘样地的群落生长具有显著的年变化(图 3)。沙棘平均高度与冠幅均表现为: P<sub>2</sub>>P<sub>3</sub>>P<sub>1</sub>>P<sub>4</sub>>P<sub>5</sub>,年增速则为: P<sub>2</sub>>P<sub>3</sub>>P<sub>4</sub>>P<sub>5</sub>>P<sub>1</sub>;在 8 a 间各样地沙棘株高的增幅上, P<sub>2</sub> (6.43 cm/a) 与 P<sub>3</sub> (4.45 cm/a) 样地约为 P<sub>4</sub> (1.97 cm/a) 样地的 2.6~3.3 倍,为 P<sub>5</sub> (1.01 cm/a) 样地的 4.4~6.4 倍;冠幅增速上, P<sub>2</sub> 与 P<sub>3</sub> 样地均为 0.08~0.09 m<sup>2</sup>/a, 约为 P<sub>4</sub> 与 P<sub>5</sub> 样地的 3~9 倍。P<sub>1</sub> 样地由于群落其他自然物种的竞争,沙棘株高与冠幅则出现缓慢下降与稳定波动趋势。以沙棘为建群种的群落特征同样表现出显著的样地差异和年变化,群落盖度 P<sub>1</sub>>P<sub>2</sub>>P<sub>3</sub>>P<sub>4</sub>>P<sub>5</sub>,且后期增速约为前期的 5~10 倍,堆积固定型的沙棘样地(C>50%)约为风蚀型沙棘样地(C<20%)的 2.5~4 倍。群落多样性指数 P<sub>4</sub>>P<sub>1</sub>>P<sub>3</sub>>P<sub>2</sub>>P<sub>5</sub>,2014 年为增速最大年份;均匀度指数的样地差异性较小(P<sub>5</sub> 除外),但人工沙棘沙丘(P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> 和 P<sub>4</sub>)均表现出递减的年变化。

2.2.3 风沙活动与沙棘群落特征的相关性 根据近 8 a 各沙棘样地的群落特征与对应风沙活动特征的变化相关性分析(图 4),沙棘沙丘的植株均高、冠幅和群落盖度、多样性均与输沙率呈现不同程度的负相关性(-0.8<R<-0.4),且这种负相关性的强弱表现为: P<sub>3</sub>>P<sub>4</sub>>P<sub>5</sub>>P<sub>2</sub>>P<sub>1</sub>。在沙棘群落的均匀度上,各样地均表现出与输沙率较强的正相关性(0.45<R<0.92)。地表蚀积深度的变化同时受当年输沙率的强度与沙棘固沙强度的影响,除了 P<sub>1</sub> 样地之外,沙棘的

株高与冠幅均与蚀积深度表现出较强的正相关性(0.47<R<0.8),即适度的堆积沙埋有助于沙棘植株的生长。P<sub>2</sub> 与 P<sub>3</sub> 样地沙棘沙丘的群落盖度与多样性与积沙厚度呈显著的正相关性(0.75<R<0.95),而群落均匀度上则显示较强的反相关性(R<-0.63)。地表粗糙度通常与地表输沙率和风蚀深度存在反相关性,与沙棘植被株高、冠幅等生长特征具有正相关性,在 P<sub>4</sub> 和 P<sub>5</sub> 样地,粗糙度的增加致使沙棘附近出现严重的沙埋现象,植株株高、冠幅、盖度和多样性等群落特征不断减弱。综合分析,人工固定和流动沙丘的群落特征(均匀度除外)主要随不同年份输沙率的增加而减弱,随堆积深度的增加而增强,自然固定沙丘的群落特征对输沙率和蚀积深度的正反馈响应显著。

从各沙棘样地近 8 a 来的风沙活动与沙棘群落特征变化的回归分析(表 4),地表输沙率与各沙棘群落特征指标存在较为显著的指数递减关系,蚀积深度则与各群落指标存在较为显著的二次函数关系,即沙棘群落生长态势随林内堆积深度的增加而增强,达到一定堆积强度后则迅速减弱,这与样地风蚀沙埋深度与沙棘生长特征的变化规律相似。沙棘群落内部的地表粗糙度是反映林内风况特征与沙棘防风效益的体现,不同群落生长指标与粗糙度变化规律各异,群落盖度与多样性和地表粗糙度存在指数递增关系,而株高、冠幅和群落均匀度分别表现出显著的线性、二次和对数函数变化规律。由此可知,地表粗糙度对群落的演变具有三维空间差异,林下的群落生长状况相对冠顶更加稳定。

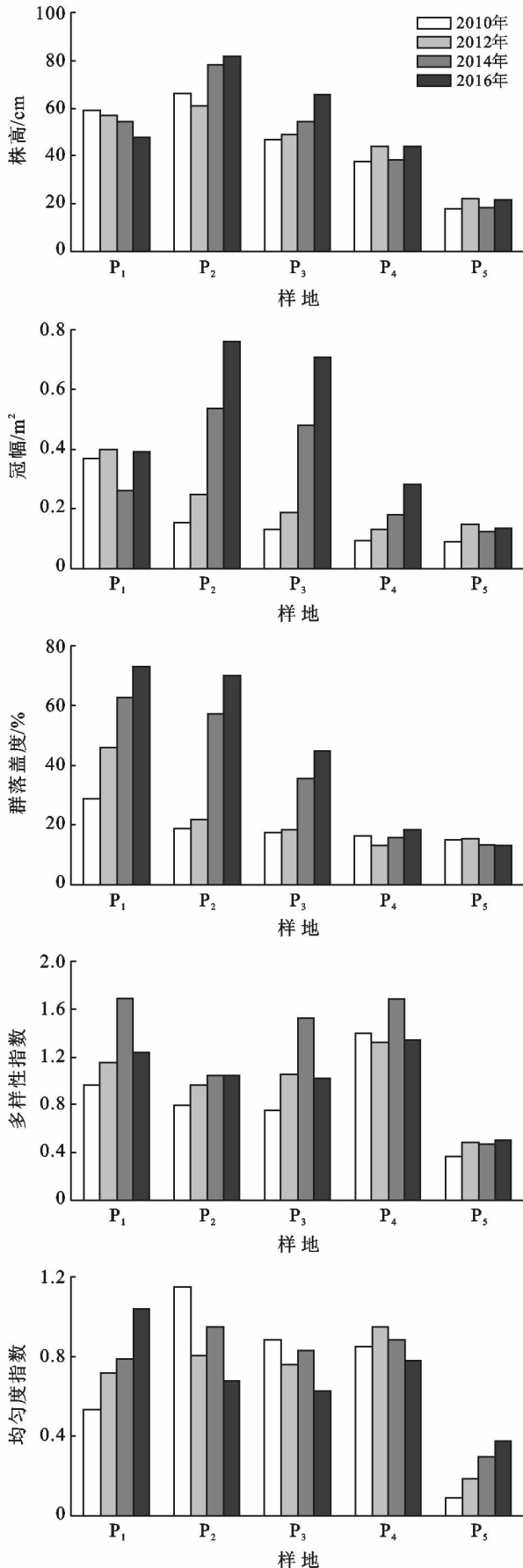
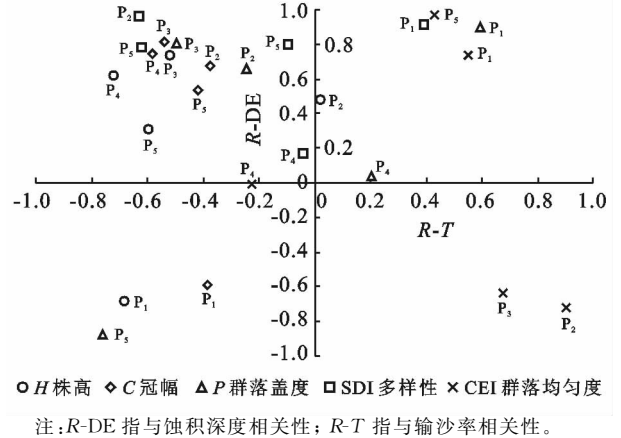


图 3 2010—2016 年不同样地沙棘林群落特征的化



注:  $R-DE$  指与蚀积深度相关性;  $R-T$  指与输沙率相关性。

图 4 各样地沙棘群落特征年变化与冬季输沙率和蚀积深度的相关性分析

### 3 讨论

植物与风沙环境的互馈机制是改善沙地生态、改进治沙技术的理论基础,沙棘对风沙阻滞作用在减弱地表风蚀,固定沙丘的同时也为沙棘自身的生长营造良好的立地条件<sup>[19-20]</sup>。对于高寒沙区风沙强度大,频率高的危害,沙棘一方面通过根系的根蘖能力,加强水平不定向的侧根繁殖来扎根土壤,抵御风击沙打;一方面利用沙棘生长的可塑性,加强地下生物量的生长与能量转移,减少地上部分的能量损耗<sup>[21-22]</sup>。同时发展地上圆形冠幅形态,减弱垂向高生长速度,分散风沙流方向,强化防风固沙作用。对于强风吹蚀和沙尘附着下造成的植物呼吸困难,沙棘叶片栅栏组织和螺旋状毛器官能调整气孔导度、减少风沙侵入。对于地表风蚀形成的动摇株体与寒旱胁迫,沙棘根系的不定根萌蘖和幼根木质化均能有效保障沙棘的稳固与防御<sup>[23-24]</sup>。在遭遇沙埋危害时,沙棘主根与侧根的萌蘖与水平延伸能力会加强,适度的沙埋具有保温增湿和促进微生物形成的作用,沙棘容易形成根瘤菌和生物结皮,从而强化地表风蚀能力。

虽然沙棘的防风固沙效益显著,对风蚀沙埋危害具有一定的适应能力,但在植株生长初期遭受强烈的风沙危害,直接影响沙棘群落的存活率与保存率,而随后的长期风沙胁迫,必然危害植株的生长繁殖,两者均会导致沙丘沙棘密度与盖度的降低,并反过来加强当地的风沙活动。这种循环式的负反馈作用是该沙区流动沙丘与半固定沙丘风蚀地块沙棘高死亡、低增长的主要原因。由于沙棘移栽时集中于较高沙丘丘顶强风地段和背风坡强堆积地区( $P_4, P_5$ ),麦草沙障的机械防护期限短,沙棘在生长初期遭遇丘顶强烈风蚀,植株基部被掏蚀而发生倒伏枯亡,而背风坡的强烈沙埋完全覆盖株体与芽位,使植株无法进行正常的光合生长。固定、半固定沙丘的沙棘( $P_1, P_2, P_3$ )

由于移植初期有麦草方格沙障的长期保护、合理的造林密度与灌溉措施,沙棘的成活率与保存率始终保持在90%之上,株高冠幅年均增长快,2~3 a将流动沙丘改造成固定沙丘。成片的沙棘景观林的风沙防护效益显著,林内每年的输沙率、堆积深度较其他样地小,也促进了沙地草本和灌木植物的定居,增加了群落多样

性。因而,沙棘初生时的地形条件和风沙环境是该区沙棘样地长势差异较大的主要原因。为保障沙棘的存活、生长与群落演替,营造适度的风沙环境,沙棘移植前需要注重不同规格与形态的机械沙障的铺设,移植时落实“三踩一埋”程序和浇水施肥管理工作,移植后加强匀沙与补植工作,以及与其他人工物种的混交。

表4 风沙活动特征与群落生长特征的回归分析

风沙活动特征	群落特征	拟合模型	模型检验			参数估计值		
			R <sup>2</sup>	F	sig.	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
T	株高(H)	指数	0.465	15.625	0.001	0.772	-35.898	—
	冠幅(C)	指数	0.284	7.133	0.016	0.282	-29.191	—
	群落盖度(P)	指数	0.240	5.686	0.028	29.624	-24.988	—
	多样性(SDI)	指数	0.567	23.560	0.000	1.135	-27.982	—
	群落均匀度(CEI)	指数	0.465	15.625	0.001	0.772	-35.898	—
S	株高(H)	二次	0.429	6.382	0.009	56.269	1.323	-0.916
	冠幅(C)	二次	0.357	4.717	0.023	0.359	0.028	-0.008
	群落盖度(P)	二次	0.286	3.413	0.057	37.239	2.474	-0.745
	多样性(SDI)	二次	0.467	7.458	0.005	1.218	0.012	-0.020
	群落均匀度(CEI)	二次	0.326	4.120	0.035	0.813	0.001	-0.012
Z <sub>0</sub>	株高(H)	线性	0.706	43.166	0.000	27.773	103.007	—
	冠幅(C)	二次	0.757	26.483	0.000	0.181	-1.136	5.477
	群落盖度(P)	指数	0.691	40.248	0.000	13.017	3.370	—
	多样性(SDI)	指数	0.613	2.303	0.046	0.785	0.995	—
	群落均匀度(CEI)	对数	0.639	5.655	0.029	0.907	0.086	—

注:指数模型为  $y=b_0e^{b_1x}$ ; 对数模型为  $y=b_0+b_1\ln x$ ;  $x$  为沙棘群落生长特征指标,  $y$  为沙棘沙丘风沙活动特征指标。

## 4 结论

不同类型沙丘沙棘林地蚀积深度差异性大,植株株高、冠幅等生长特征对风蚀沙埋危害的响应趋势各异。强堆积型的流动沙丘与中轻度风蚀型的半固定沙丘的沙棘株高约为固定型沙丘沙棘的1/4~1/3,冠幅的1/6~1/3,对比初期的保存率均不足40%。通过回归检验,沙棘株高、冠幅与地径均与蚀积深度存在较为显著的二次函数拟合关系( $0.6 < R^2 < 0.8$ ),沙棘生长的适宜沙埋深度在30—40 cm,对中度风蚀和重度沙埋的危害的衰亡响应明显。

2008—2016年,沙棘样地群落发展态势征总体随立地的输沙率的增加而减弱,随地表粗糙度与堆积深度的增大而加强,且各群落特征指标与输沙率存在较为显著的指数递减关系,与蚀积深度存在较为显著的二次函数关系,与粗糙度则存在多样变化的函数递增关系。这些沙棘的年变化特征均反映了沙棘较强的风沙抗逆性。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] Zuazo V H D, Pleguezuelo C R R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review[J]. Agronomy

of Sustainable Development, 2008,28:65-86.

- [2] 王礼先.我国荒漠化土地成因及其防治[J].世界林业研究,2000,13(6):32-37.
- [3] Li Xinrong, Zhang Zhishan, Huang Lei, et al. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013,58 (13):1483-1496.
- [4] Brown J F. Effects of experimental burial on survival, growth and resource allocation of three species of dune plants[J]. Journal of Ecology, 1997,85(2):151-158.
- [5] 于云江,史培军,贺丽萍.风沙流对植物生长影响的研究[J].地球科学进展,2002,17(2):262-267.
- [6] 赵哈林,何玉惠,岳广阳,等.风吹、沙埋对沙地植物幼苗生长和光合蒸腾特性的影响[J].生态学杂志,2010,29(3):413-419.
- [7] Maun M A, Lapierre J. The effects of burial by sand on *Ammophila breviligulata* [J]. Journal of Ecology, 1984,72(3):827-839.
- [8] Zhang Junhui, Maun M A. Effects of sand burial on seed germination, seedling emergence, survival, and growth of *Agropyron psammophilum* [J]. Canadian Journal of Botany, 1990,68(2):304-310.

(下转第13页)

- [5] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [6] Zhang Qiang, Liu Jianyu, Singh V P, et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(14):2562-2576.
- [7] 李雪,李运刚,何娇楠,等. 1956—2013 年元江—红河流域径流变化及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2016,38(6):1149-1159.
- [8] 孙悦,李栋梁. 1975—2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J]. *冰川冻土*, 2014,36(2):413-423.
- [9] 张晓晓,张钰,徐浩杰. 1961—2010 年白龙江上游水文气象要素变化规律分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015,29(2):172-178.
- [10] 严栋飞,解建仓,姜仁贵,等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016,27(6):13-19.
- [11] 郝婷婷,钟平安,魏蓬. 淮河流域近 50 a 天然径流演变规律分析[J]. *水电能源科学*, 2011,29(9):4-7.
- [12] 唐为安,田红,卢燕宇,等. 1961—2010 年降水和土地利用变化对淮河干流上中游径流的影响[J]. *生态环境学报*, 2015,24(10):1647-1653.
- [13] 刘睿,夏军. 气候变化和人类活动对淮河上游径流影响分析[J]. *人民黄河*, 2013,35(9):30-33.
- [14] 郑仕强. 长台关水文站同级水位洪峰流量偏大原因分析[J]. *河南水利与南水北调*, 2012(12):11-12.
- [15] 高月,卞健民,宋超,等. 基于小波分析的抚松县降水量变化对矿泉水资源量的响应研究[J]. *水文*, 2016,36(2):35-40.
- [16] 张洪波,俞奇骏,陈克宇,等. 基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J]. *华北水利水电大学学报:自然科学版*, 2016,37(4):59-66.
- [17] Schaake J, Waggoner P E. From climate to flow[C]// Waggoner P E, *Climate Change and U. S. Water Resources*. New York: John Wiley and Sons, 1990: 177-206.
- [18] 徐光来. 太湖平原水系结构与连通变化及其对水文过程影响研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- [19] 赖天程,张强,张正浩,等. 人类活动与气候变化对东江流域径流变化贡献率定量分析[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2016,55(4):136-145.
- [20] 党素珍,董国涛,蒋晓辉,等. 气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2014,12(4):30-34.
- [21] 刘永婷,徐光来,李鹏,等. 淮河上游径流年内分配均匀度及变化规律[J]. *水土保持研究*, 2017,24(5):99-104.
- [22] 蒋冲,王飞,刘思洁,等. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J]. *生态学报*, 2013,33(3):605-613.
- [23] 张树磊,杨大文,杨汉波,等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015,26(5):605-613.
- [24] 朱丽,秦富仓,姚云峰,等. 北京市红门川流域森林植被/土地覆被变化的水文响应[J]. *生态学报*, 2010,30(16):4287-4294.
- [25] 肖幼. 对淮河流域水土保持工作的思考[J]. *中国水利*, 2000,21(5):32-33.

(上接第 7 页)

- [9] 米志英,周丹丹,吴亚东. 风蚀沙埋对沙柳形态特征的影响[J]. *内蒙古林业科技*, 2005(1):10-13.
- [10] 刘海江,郭柯. 沙埋对中间锦鸡儿幼苗生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2005,25(10):2550-2556.
- [11] 聂春雷,郑元润. 鄂尔多斯高原 4 种主要沙生植物种子萌发与出苗对水分和沙埋的响应[J]. *植物生态学报*, 2005,29(1):32-41.
- [12] 周瑞莲,杨淑琴,黄清荣,等. 小叶锦鸡儿抗沙埋生长与抗氧化酶及同工酶变化的关系[J]. *生态学报*, 2015,35(9):3014-3022.
- [13] 刘福全. 植物枝叶与根系固土抗蚀差异性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [14] 张军红,吴波,雷雅凯,等. 毛乌素沙地油蒿植株形态与结构特征分析[J]. *西南林业科技大学*, 2011,31(5):5-9.
- [15] 廉永善,陈学林. 沙棘的生态地理分布及其植物地理学意义[J]. *植物分类学报*, 1992,30(4):349-355.
- [16] 李根前,唐德瑞,赵一庆. 沙棘的生物学与生态学特性[J]. *西北植物学报*, 2000,20(5):892-897.
- [17] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等. 青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益[J]. *干旱区地理*, 2014(4):777-785.
- [18] 张登山,高尚玉,石蒙沂,等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [19] 刘增文,高国雄,吕月玲,等. 不同立地条件下沙棘种群生物量的比较与预估[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2007,31(1):37-41.
- [20] 赵彩霞,郑大伟,何文清. 植被盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. *植物生态学报*, 2005,29(1):68-73.
- [21] 高志义,张玉胜. 沙棘根系特性的观察与研究[J]. *北京林业大学学报*, 1989,11(4):53-59.
- [22] 胡建忠,王愿昌,张鉴,等. 影响沙棘生长主要生态因子的灰色优势分析[J]. *中国水土保持*, 1995(4):28-32.
- [23] 张吉科,张小民,张国伟. 中国沙棘表皮毛的形态分布和类群研究[J]. *林业科学*, 1995,31(5):408-413.
- [24] 李丽霞,梁宗锁,王俊峰. 土壤水分和风速对沙棘苗木水分状况和成活率影响的试验研究[J]. *沙棘*, 1999,12(4):18-21.