

韩敏,高永,贺明辉,等.藏锦鸡儿(*Caragana tibetica*)灌丛沙堆的形态与沉积物特征[J].中国沙漠,2024,44(2):185-195.

藏锦鸡儿(*Caragana tibetica*)灌丛沙堆的 形态与沉积物特征

韩敏¹,高永¹,贺明辉¹,燕如²,白芳²,杨文源¹,
李小乐^{3,4},袁晓满¹,杨娟¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018; 2.达尔罕茂明安联合旗林业和草原工作站,内蒙古 达尔罕茂明安联合旗 014500; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 研究各演化阶段藏锦鸡儿(*caragana tibetica*)沙堆沉积特征与灌丛形态之间的耦合关系,分析演化过程中藏锦鸡儿灌丛沙堆随时间的变化,阐明各演化阶段藏锦鸡儿灌丛与沙堆的关联性以及沙堆表层沉积物特征,可揭示藏锦鸡儿灌丛发育过程中沙堆的变化及其灌丛阻沙能力的变化。基于野外调查,在样地选取3个演化阶段(发育阶段、稳定阶段和活化阶段)的藏锦鸡儿灌丛沙堆,测量灌丛和沙堆的形态参数,研究沙堆与藏锦鸡儿灌丛之间的相关关系,然后对不同部位的沉积物进行采样,分析沉积物特征。结果表明:藏锦鸡儿灌丛沙堆形态以椭圆形为主,各演化阶段藏锦鸡儿灌丛沙堆长轴、短轴、沙堆高、水平尺度、底面积和体积都呈现活化阶段>稳定阶段>发育阶段。沙堆沉积物发育阶段整体粒级含量居中;稳定阶段灌丛顶部细砂和粉粒含量较大,呈现逐渐增加的趋势;活化阶段颗粒含量高,沿迎风坡底一坡顶一背风坡底,峰值呈先增大后减少的趋势,间接体现了灌丛沙堆对沙粒的拦截作用。灌丛形态与沙堆沉积物各参数相关性在稳定阶段最大,说明灌丛与沉积物之间由于灌丛呈现椭圆形,灌丛在稳定阶段固沙能力最强。藏锦鸡儿在发育阶段由于灌丛较小,形态与沙堆沉积物各参数相关性不强。藏锦鸡儿灌丛与沉积物之间随演化过程的进行越来越不稳定。

关键词: 藏锦鸡儿(*Caragana tibetica*); 灌丛沙堆; 演化阶段; 形态特征; 土壤粒度组成

文章编号: 1000-694X(2024)02-185-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00097

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

在沙源充足和一定风力条件下,沙粒受到灌丛拦截而形成灌丛沙堆^[1],该现象主要发生在干旱-半干旱荒漠地区^[2]。藏锦鸡儿(*Caragana tibetica*)是豆科旱生垫状矮灌木,在荒漠草原生态系统中,藏锦鸡儿灌丛常呈地带性分布,对薄层覆沙的生境适应能力较强^[3]。在达尔罕茂明安联合旗(简称达茂旗)西北部边缘荒漠地区,典型的环境特征是风蚀力较大、水分较少,藏锦鸡儿灌丛对该生境适应性较强,其形态特征表现为分枝茂密,构型近似椭球状。因此,藏锦鸡儿灌丛在该研究区内能够降低风

速,聚集风沙,减少水土流失,形成斑块灌丛沙堆^[4]。参考杜建会等^[5]提出的灌丛沙堆不同演化阶段的划分标准,在野外调查的基础上测量灌丛沙堆的形态参数,再依据灌丛沙堆的形态特征将灌丛沙堆定性地划分为发育阶段、稳定阶段和活化阶段。

沙堆的形成依附于灌丛,灌丛死亡后沙堆也逐渐消亡,灌丛沙堆的土壤颗粒组成特征随着沙堆的增大而变化,灌丛下沉积细物质越多,植物阻沙能力越强^[6];另一方面,不同程度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆形态发生变化,演化到成熟阶段后,易因根系供水不足等原因导致灌丛向死亡发展^[7]。灌丛对干旱区环境起到了防护作用,沙堆对环境稳

收稿日期:2023-08-07; 改回日期:2023-11-14

资助项目:国家自然科学基金项目(42267073)

作者简介:韩敏(1998—),女,内蒙古包头人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治与水土保持。E-mail: 13314729077@163.com;

通信作者:高永(E-mail: 13948815709@163.com)

定性起作用,但关于不同演化阶段藏锦鸡儿灌丛形态与沙堆表层沉积物的土壤粒径分布的相关关系研究较少。基于此,通过对各演化阶段藏锦鸡儿灌丛沙堆的形态特征、沉积物特征等研究,分析灌丛沙堆在演化阶段递进过程中,沙堆沉积物土壤颗粒是如何变化的,以期荒漠化草原恢复提供理论依据和数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于包头市中部达茂旗百灵庙镇西北向白彦花嘎查($41^{\circ}01'29''$ — $41^{\circ}01'43''$ N, $110^{\circ}05'20''$ — $110^{\circ}06'54''$ E),属于中温带半干旱大陆性气候的典型荒漠草原。年均气温 4.4°C ,年均降水量 259.3 mm ,且多发生于7—8月^[8],风向以北风和西北风为主,年均风速 $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[9]。植被类型为温带干旱、半干旱气候条件下多年生旱生草本,以藏锦鸡儿、克氏针茅(*Stipa capillata*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、羊草(*Leymus chinensis*)等为主^[10],草原群落结构简单、草层低矮稀疏,植被覆盖度为30%。土壤类型主要为栗钙土、棕钙土,土壤肥力普遍较低。

1.2 野外植被调查与测量

在研究区先设置大样方,把大样方内所有灌丛形态统计完,再随机设置9个小样方,依据统计结果

对灌丛阶段进行划分,在每个小样方内选出对应演化阶段的藏锦鸡儿灌丛作为重复,对其灌丛及其沙堆形态指标进行测量,包括沙堆长轴(L_d)、沙堆短轴(W_d)、沙堆高(H_d)、灌丛长轴(L_g)、灌丛短轴(W_g)、灌丛高(H_g)、迎风坡坡长(L_y)、背风坡坡长(L_b),并对其进行统计。计算沙堆的水平尺度(HC)、底面积(S_d)、体积(V_d)和植被覆盖面积(S_g)。对上述指标进行相关和回归分析并计算判定系数 R^2 最大时的回归曲线方程。计算公式如下:

$$HC = 1/2(L_d + W_d) \quad (1)$$

$$S_d = 1/2(L_d \cdot W_d) \quad (2)$$

$$V_d = 1/6(W_d \cdot L_d \cdot H_d) \quad (3)$$

$$S_g = 1/2(L_g \cdot W_g) \quad (4)$$

利用变异系数表示各阶段类型藏锦鸡儿灌丛沙堆形态特征的变异情况,变异系数计算方法见文献^[11]。

1.3 样品采集与数据分析

分别在沙堆迎风坡底、迎风坡中、坡顶、背风坡中、背风坡底和丘间空地采样(图1),采集表层约 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 范围内的沉积物样品;采用英国Malvern Mastersizer 2000M型激光粒度分析仪(测试范围为 $0.02 \sim 2\,000\text{ }\mu\text{m}$)进行粒度分析,每个样品重复测试5次,之后求取平均值。采用Folk等^[12]的公式计算平均粒径 M_z 、分选系数 σ 、偏度 SK 和峰度 K_g ,粒度单位采用 Φ 值;粒度分级依据Udden-Wentworth土壤粒度分级标准^[13]划分为7个粒径。

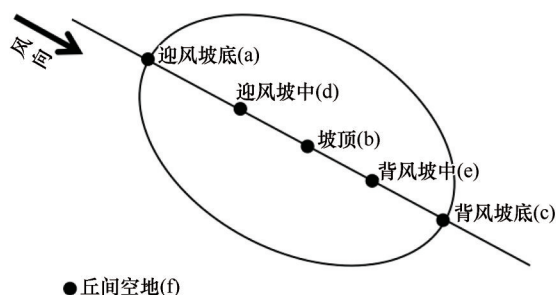
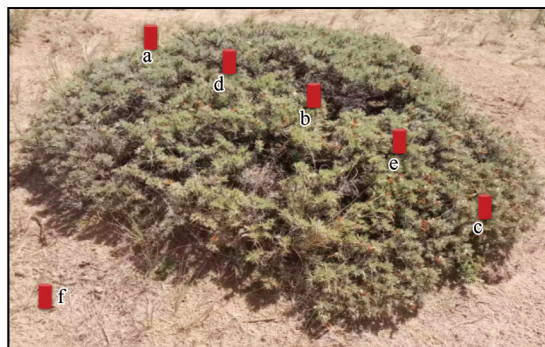


图1 藏锦鸡儿灌丛沙堆沉积物采样点

Fig.1 Sampling map of *Caragana tibetica* scrub and nebkhas sites



1.4 数据处理

利用Excel 2016对测定数据进行整理,用SPSS 26.0软件对试验数据进行统计与分析。采用单因

素分析法(One-way ANOVA)比较不同演化阶段灌丛与沙堆间形态特征的差异和表层沉积物粒径特征。再利用Origin 2022对灌丛形态参数与沙堆形态参数进行拟合分析。

2 结果与分析

2.1 各演化阶段灌丛沙堆形态参数特征及其相关关系

2.1.1 灌丛沙堆形态参数特征

达茂旗白彦花嘎查藏锦鸡儿灌丛沙堆形态多为椭球形、半椭球形,坡度较缓。表 1 显示,藏锦鸡儿灌丛沙堆上覆盖的藏锦鸡儿灌丛长势良好,在活化阶段灌丛长轴为 31.9~202.6 cm(平均值为 82.2 cm),宽度为 29.6~231.5 cm(平均值为 84.9 cm),藏

锦鸡儿灌丛沙堆 L_g 、 W_g 和 H_g 活化阶段>稳定阶段>发育阶段($P<0.05$)。灌丛高 H_g 在发育阶段的变异系数最大,说明灌丛高在各演化阶段波动较大,其他形态参数变化相对较稳定,灌丛长轴、短轴变异系数为 2.4~2.8,灌丛植被覆盖面积变异系数均为 1.2。沙堆 L_d 和 H_d ,活化阶段和稳定阶段显著高于发展阶段($P<0.05$); W_d 藏锦鸡儿灌丛 3 个发育阶段之间差异不显著($P>0.05$), W_d 均值发展阶段<稳定阶段<活化阶段; 3 个演化阶段 L_d 、 W_d 和 H_d 变异系数较小,为 0.1~0.3; 而 S_d 、 V_d 的变异系数较大,为 0.7~1.2。

表 1 灌丛沙堆相关形态参数统计
Table 1 Statistics on morphological parameters related to scrub and nebkhas

演化阶段	项目	形态参数											
		L_g /cm	W_g /cm	H_g /cm	L_d /cm	W_d /cm	H_d /cm	L_y /cm	L_b /cm	HC /cm	S_d /cm ²	V_d /cm ³	S_g /cm ²
发育阶段 $n=150$ 株	最大值	118.5	117.3	19.9	86.3	70.5	13.2	47.3	39.5	78.2	3 010.8	10 033.3	337.5
	最小值	23.7	25.3	4.8	10.7	8.4	3.2	5.4	4.7	10.4	50.6	50.3	333.5
	均值±标准	51.9±	51.4±	16.2±	39.3±	51.5±	8.1±	28.7±	20.4±	35.9±	702.1±	2 073.4±	1 500.8±
	误差	19.1 ^c	19.6 ^c	2.7 ^c	7.6 ^b	17.3 ^a	0.8 ^b	9.5 ^c	6.3 ^c	11.9 ^c	481.4 ^c	1 770.1 ^c	1 257.1 ^c
	变异系数	2.7	2.6	6.1	0.2	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.7	0.9	1.2
稳定阶段 $n=112$ 株	最大值	177.6	176.4	24.8	110.3	95.7	17.5	56.1	50.7	96.5	4 565.5	16 738.3	13 186.5
	最小值	25.4	30.6	20.1	15.6	15.3	5.8	8.5	7.1	18.5	157.5	472.5	375.5
	均值±标准	71.8±	70.1±	22.1±	67.4	71.7±	10.8±	32.4±	27.9±	46.2±	1 153.5±	4 661.7±3	2 835.6±
	误差	28.2 ^b	25.6 ^b	3.7 ^b	±24.3 ^a	24.8 ^a	0.5 ^a	11.8 ^b	8.7 ^b	14.8 ^b	760.9 ^b	247.8 ^b	2 320.4 ^b
	变异系数	2.5	2.8	5.9	0.4	0.4	0.1	0.4	0.3	0.3	0.7	0.7	1.2
活化阶段 $n=100$ 株	最大值	202.6	231.5	89.2	174.2	178.1	47.5	90.3	83.2	190.2	17 922.5	179 220.1	23 331.5
	最小值	31.9	29.6	25.4	20.7	16.3	13.4	10.6	5.6	24.6	283.5	1 228.5	449.5
	均值±标准	82.2±	84.9±	31.1±	82.1±	84.8±	11.1±	50.2±	42.8±	72.7±	3 031.1±	21 814.9±	3 992.7±
	误差	32.7 ^a	34.7 ^a	8.4 ^a	7.4 ^a	8.5 ^a	1.1 ^a	23.2 ^a	16.4 ^a	29.5 ^a	2 815.9 ^a	26 636.1 ^a	3 452.8 ^a
	变异系数	2.5	2.4	3.7	0.1	0.1	0.1	0.5	0.4	0.4	0.9	1.2	1.2

注: L_g 为灌丛长轴, W_g 为灌丛短轴, H_g 为灌丛高, L_d 为沙堆长轴, W_d 为沙堆短轴, H_d 为沙堆高, HC 为沙堆水平尺度, S_d 为沙堆底面积, V_d 为沙堆体积, S_g 为植被覆盖面积。

2.1.2 灌丛沙堆形态参数的关系

各演化阶段藏锦鸡儿灌丛与沙堆的各形态参数具有一定的相关性^[14](表 2), 不同演化阶段灌丛参数与沙堆参数间相关性存在差异, 灌丛规模较小时, 二者间参数相关性较小, 随着发育时间的增长, 灌丛和沙堆的相关系数变大, 表明灌丛植被覆盖度越高, 所形成的沙堆也越大^[15]。本研究发现, 发育阶段、活化阶段灌丛和沙堆的高与其他灌丛沙堆形态参数不相关, 而处于稳定阶段灌丛与沙堆之间相关性显著。另外, 受地理环境和人为破坏的影响,

藏锦鸡儿灌丛生长状况较差, 从而影响了灌丛沙堆的堆积, 最终导致灌丛和沙堆形态参数关系逐渐变差, 因此藏锦鸡儿灌丛发展到稳定阶段后, 由原来的椭球体开始向上生长, 到衰退阶段就不再生长。
3 个演化阶段的藏锦鸡儿灌丛和沙堆高度的相关系数均较高(0.76~1.00, $P<0.01$), 表明沙堆的形态特征受到灌丛生长发育的影响。其中灌丛覆盖面积与沙堆体积的相关系数在稳定阶段最大(0.95, $P<0.01$), 表明在稳定阶段其控制沙堆整体的发育。随着藏锦鸡儿灌丛演化阶段的递进, 其灌丛覆盖面

表 2 藏锦鸡儿灌丛与沙堆形态参数相关性

Table 2 Correlation analysis of morphological parameters between *Caragana tibetica* and nebkhas

		L_d	W_d	H_d	L_g	W_g	H_g	HC	S_d	V_d	S_g
发育阶段	L_d	1									
	W_d	0.697**	1								
	H_d	0.444**	0.484**	1							
	L_g	0.471**	0.433**	0.103	1						
	W_g	0.380**	0.420**	0.048	0.892**	1					
	H_g	0.480**	0.561**	0.761**	0.236**	0.263**	1				
	HC	0.922**	0.921**	0.504**	0.491**	0.434**	0.559**	1			
	S_d	0.913**	0.884**	0.440**	0.463**	0.420**	0.493**	0.975**	1		
	V_d	0.866**	0.828**	0.649**	0.388**	0.338**	0.555**	0.919**	0.943**	1	
	S_g	0.377**	0.400**	0.034	0.944**	0.959**	0.188*	0.422**	0.418**	0.341**	1
稳定阶段	L_d	1									
	W_d	0.667**	1								
	H_d	0.198*	0.351**	1							
	L_g	0.300**	0.088	-0.372**	1						
	W_g	0.166*	0.098	-0.394**	0.861**	1					
	H_g	0.198*	0.351**	1.000**	-0.372**	-0.394**	1				
	HC	0.076	0.147	0.296**	0.065	0.105	0.296**	1			
	S_d	0.921**	0.905**	0.297**	0.218*	0.146	0.297**	0.120	1		
	V_d	0.931**	0.843**	0.233**	0.272**	0.184*	0.233**	0.084	0.974**	1	
	S_g	0.889**	0.838**	0.471**	0.145	0.059	0.471**	0.164*	0.947**	0.954**	1
活化阶段	L_d	1									
	W_d	0.837**	1								
	H_d	0.182*	0.139	1							
	L_g	0.580**	0.505**	0.056	1						
	W_g	0.528**	0.559**	0.029	0.899**	1					
	H_g	0.206*	0.151	0.961**	0.199*	0.167*	1				
	HC	0.956**	0.961**	0.167*	0.565**	0.567**	0.186*	1			
	S_d	0.922**	0.937**	0.198*	0.577**	0.599**	0.228*	0.970**	1		
	V_d	0.869**	0.893**	0.342**	0.546**	0.583**	0.367**	0.920**	0.974**	1	
	S_g	0.592**	0.599**	0.080	0.935**	0.948**	0.218*	0.622**	0.679**	0.674**	1

注:**在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*在 0.05 级别(双尾)相关性显著; L_g 为灌丛长轴, W_g 为灌丛短轴, H_g 为灌丛高, L_d 为沙堆长轴, W_d 为沙堆短轴, H_d 为沙堆高, HC 为沙堆水平尺度, S_d 为沙堆底面积, V_d 为沙堆体积, S_g 为植被覆盖面积。

积先增加后减少,沙堆在其影响下持续堆积沉积物,沙堆长轴、短轴逐渐增大在减少,高度也随之变化,导致其滞沙固沙能力也将持续变大。因此得出,灌丛演化阶段的逐渐递进,各演化阶段所形成沙堆的方式也不同,导致灌丛与沙堆的形态参数之间也有所不同。

沙堆形态与灌丛生长状况的关系十分密切(图 2),植被覆盖面积与沙堆体积的关系为稳定阶段>发育阶段>活化阶段, R^2 分别为 0.67、0.64、0.53,表明随着灌丛发育越稳定,沙堆体积的增长速率越大。沙堆的长轴和短轴与灌丛覆盖长轴和短轴增长较为一致,且在稳定阶段 R^2 最大,表明沙堆增长的变

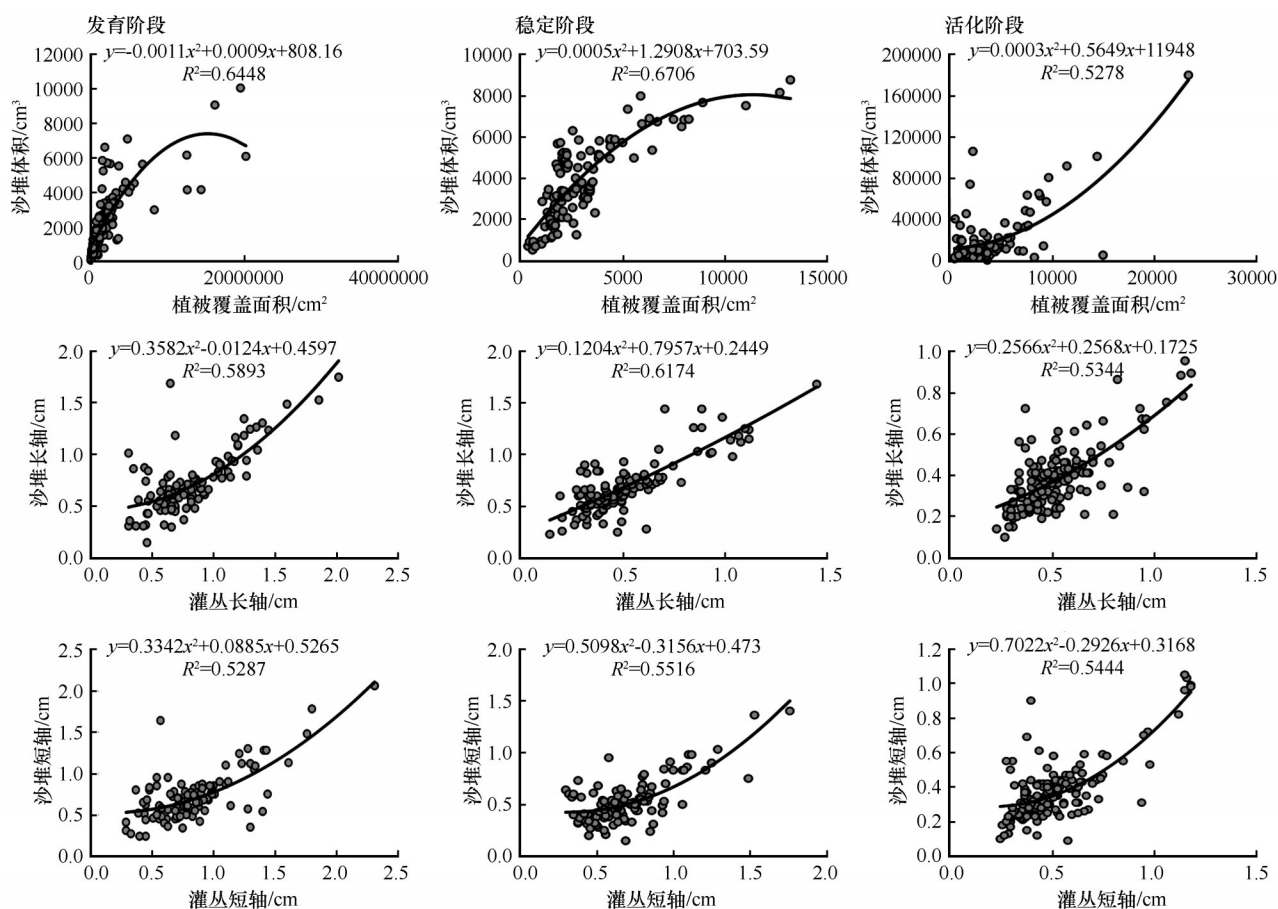


图2 灌丛与沙堆形态参数间的回归关系

Fig.2 Relationships between morphological parameters of scrub and nebkhas

化在很大程度上取决于灌丛覆盖形态参数的变化。二者呈协同增长关系。

2.2 各演化阶段灌丛沙堆表层沉积物粒度特征

2.2.1 沉积物沙粒级配

藏锦鸡儿灌丛沙堆在演化过程中,表面粒度组成以粉粒为主,不同演化阶段粒级组成差异很大,灌丛沙堆从发育阶段到稳定阶段粒度组成变化最大(图3)。发育阶段到活化阶段灌丛沙堆黏粒百分含量变化差异均显著($P < 0.01$),稳定阶段到活化阶段细砂变化显著($P < 0.01$),灌丛沙堆在稳定后,粉粒百分含量下降幅度很大,而细砂、中砂和粗砂含量增加。从沙堆不同位置整体来看,灌丛沙堆从发育阶段到活化阶段,迎风坡侧的黏粒、粉粒含量均大于背风坡侧,而细砂、中砂含量则相反,灌丛沙堆活化后,不同位置的土壤粒级出现了相反的变化趋势。

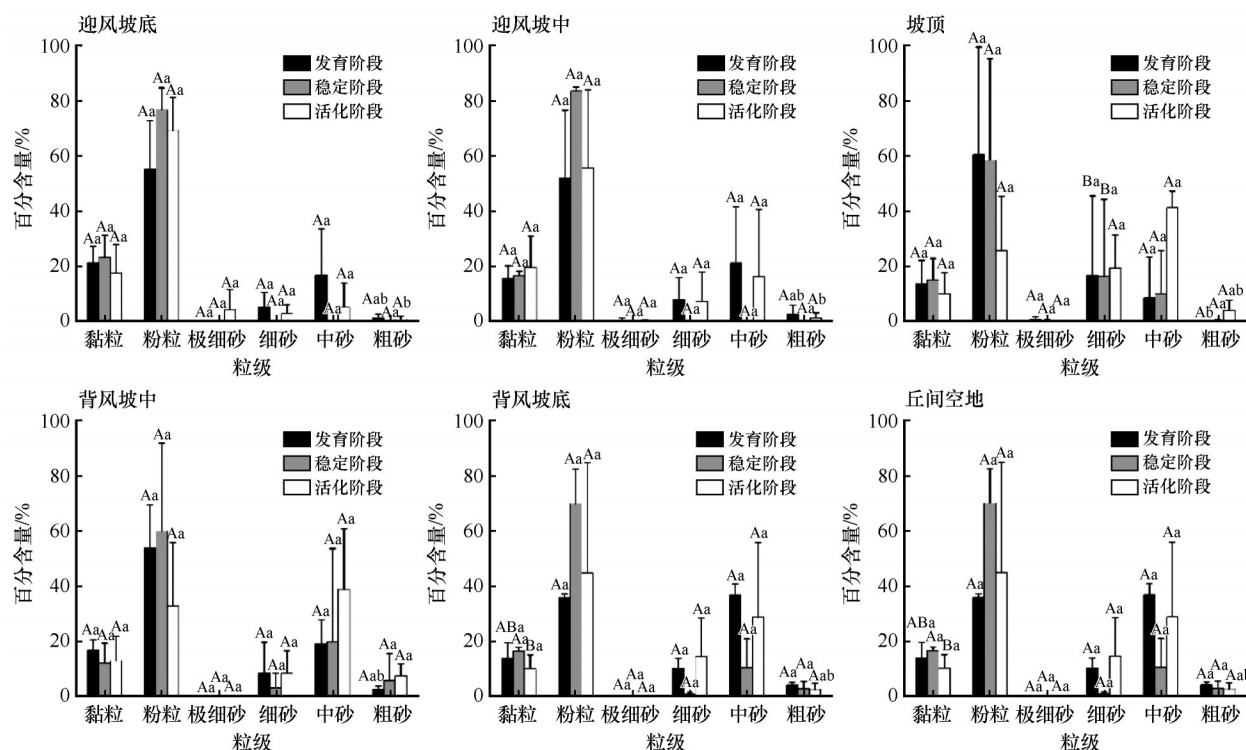
2.2.2 沉积物粒度频率分布曲线

土壤颗粒频率分布曲线可表征土壤粒径分布情况(图4),各演化阶段土壤粒度体积百分含量均

为双峰曲线,波峰于5 μm 和900 μm 处,5 μm 处陡峻程度稳定阶段>活化阶段>发育阶段,900 μm 处陡峻程度大约一致。土壤累积体积分布曲线均表现为前期平缓,10 μm 后趋于陡峻。稳定阶段灌丛沙堆土壤累积体积百分含量曲线在各位置表现的曲线具有一致性,活化阶段背风侧曲线相对平缓;而发育阶段在10 μm 前相对陡峻。

2.2.3 沉积物粒度参数

灌丛沙堆表层沉积物的平均粒径 M_z 活化阶段(5.90 Φ)和发育阶段(6.02 Φ)小于稳定阶段(6.53 Φ ,图5)。稳定阶段与活化阶段表层沉积物的平均粒径在迎风坡底到背风坡底呈先减少再增加,发展阶段在迎风坡侧逐渐减少,在坡顶位置增加后在背风坡侧再减少;分选系数 σ 为1.17~3.18 Φ (2.15 Φ),分选性较差,各发展阶段中发育阶段相对优于其他两个阶段,稳定阶段最差,体现了灌丛沙堆发育越稳定对风沙流的截留作用越好;偏度SK值为-0.20~0.51(0.16),稳定阶段偏度呈现增加后逐渐减少的趋势,相对于发育阶段和活化阶段偏度变化较稳



注:不同大写字母表示同一位置不同演化阶段之间的粒级差异显著($P<0.01$);不同小写字母表示同一演化阶段不同位置之间的粒级差异显著($P<0.01$)

图3 各演化阶段沙堆不同部位沉积物颗粒组成

Fig.3 Particle composition of sediments from different parts of the nebkhas at various evolutionary stages

定。各发展阶段在坡顶呈最大趋势,表明相对其他坡位沉积物的频率分布曲线更趋向于正偏; K_g 值为0.52~2.44(1.26),3个发展阶段呈现相同的趋势,峰度呈先增加后减少的趋势,坡顶值最大,表明沉积物颗粒分布相对集中,间接体现了灌丛沙堆对沙粒的拦截作用。

2.3 各演化阶段沙堆沉积特征与灌丛形态特征的耦合关系

从表3可以看出,在发育阶段与细砂、中砂体积百分含量呈正相关,活化阶段则与粉粒和细砂成正相关;稳定阶段的藏锦鸡儿灌丛 L_g 、 H_g 和 S_g 与土壤粉砂、中砂和粗砂存在显著正相关($P<0.01$),同时也与黏粒存在正相关($P<0.05$),而与其他颗粒机械组成均未达到显著水平($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 藏锦鸡儿灌丛沙堆形态特征

灌丛沙堆形态参数是评价区域荒漠化监测的重要指标,灌丛沙堆的形态特征受植被、沙源和风力等

多方面因素的影响^[16],其中灌丛的形态是决定沙堆形态的重要因素,灌丛生长状况影响着灌丛沙堆的大小^[17],不同演化阶段灌丛所形成的沙堆形态不一^[18]。本研究中,藏锦鸡儿灌丛在活化阶段呈现最大,长轴31.9~202.6 cm,短轴29.6~231.5 cm,灌丛沙堆高度25.4~89.3 cm,与他人对西鄂尔多斯藏锦鸡儿灌丛沙堆的研究结果相似^[3,19]。藏锦鸡儿灌丛沙堆的规模小于以往研究测量的藏锦鸡儿灌丛,以往灌丛测量多位于草原向荒漠过渡带,本研究样地位于达茂旗荒漠草原地带,环境恶劣,风蚀力较强,降水量少,导致灌丛沙堆的规模小于以往研究的藏锦鸡儿灌丛。另外,藏锦鸡儿灌丛沙堆在稳定阶段的 L_g 与 L_d 、 W_g 与 W_d 的相关系数分别为0.62、0.55,说明藏锦鸡儿灌丛沙堆水平增长速率大于垂直增长速率。迟旭等^[20]对比了不同大小灌丛沙堆差异,认为灌丛长轴和短轴是影响前期沙堆形成的主要因素。因此,即使同一种灌丛形成的沙堆也存在较大的差异。

3.2 藏锦鸡儿灌丛沙堆沉积物特征及沉积规律

藏锦鸡儿灌丛沙堆各演化阶段表层沉积物的

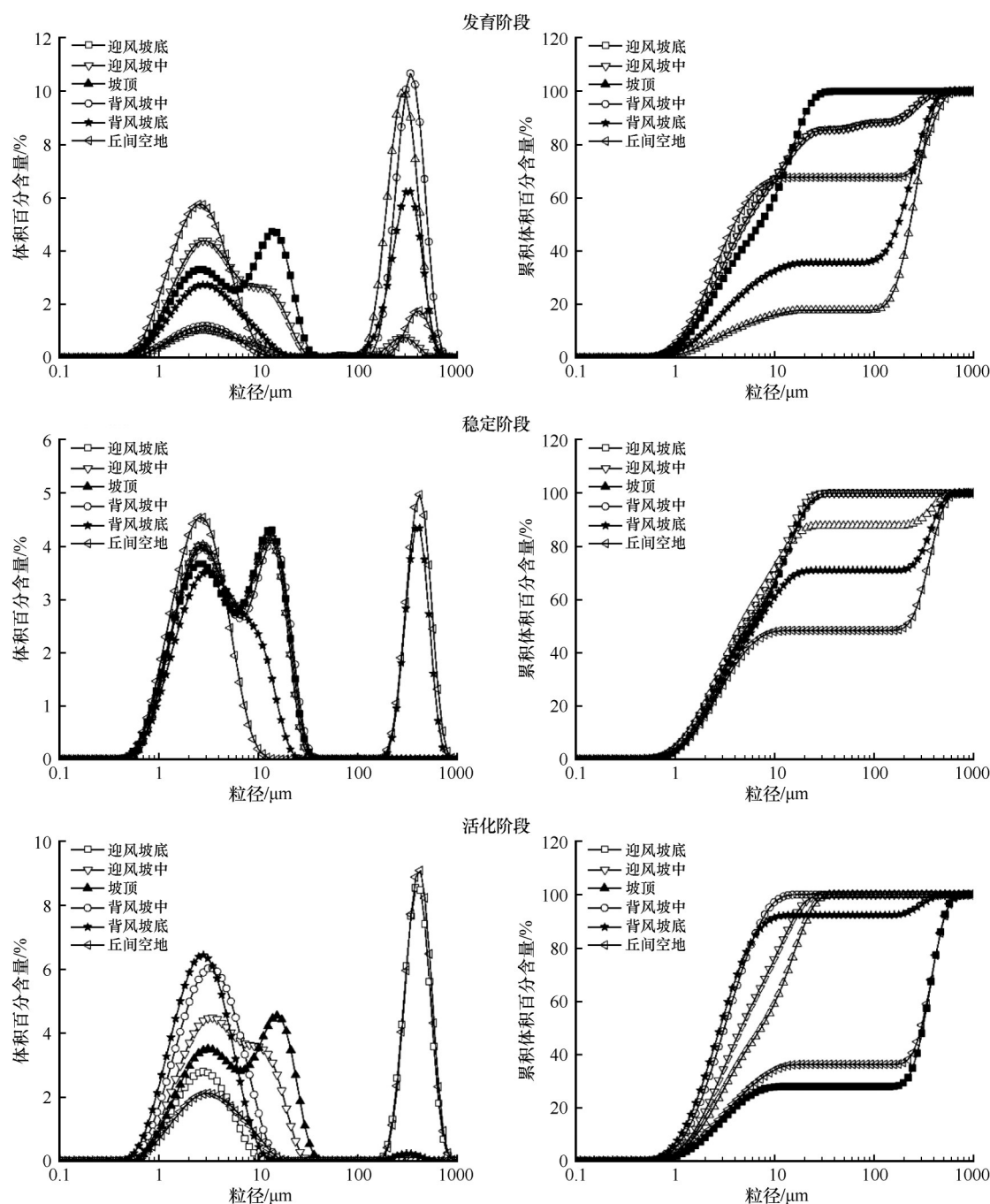


图4 各演化阶段土壤颗粒频率分布曲线

Fig.4 Frequency distribution curves of soil particles at various stages of evolution

各粒级含量,发展阶段居中,极细砂颗粒较低;稳定阶段细颗粒百分含量较高,粗颗粒较低;活化阶段各粒径含量较高。因此可判断出,在初始的灌丛发育阶段,灌丛生长状况不好,植被稀疏,拦截风沙能力较弱,沙堆形态较小,粗颗粒被风搬运到沙堆表层,导致沉积物以粗颗粒为主;随着灌丛沙堆的发展到稳定阶段时,因植被覆盖度较高,风沙流过时拦截沙粒并使其堆积,使沙堆表面沉积物的细颗粒

增多;沙堆发展到活化阶段时会出现退化,但是防沙固沙能力强于其他发展阶段^[14],因此会出现整体粒径含量较高。

对不同发展阶段灌丛沙堆各坡位的沉积物进行描述,发育阶段的沙堆背风坡侧中砂和粗砂含量明显较高,表明风沙在运动的过程中由于灌丛发展初期灌丛枝条稀疏和形态较小等,沙堆的阻沙能力较弱导致从迎风坡侧到背风坡无明显的规律性。

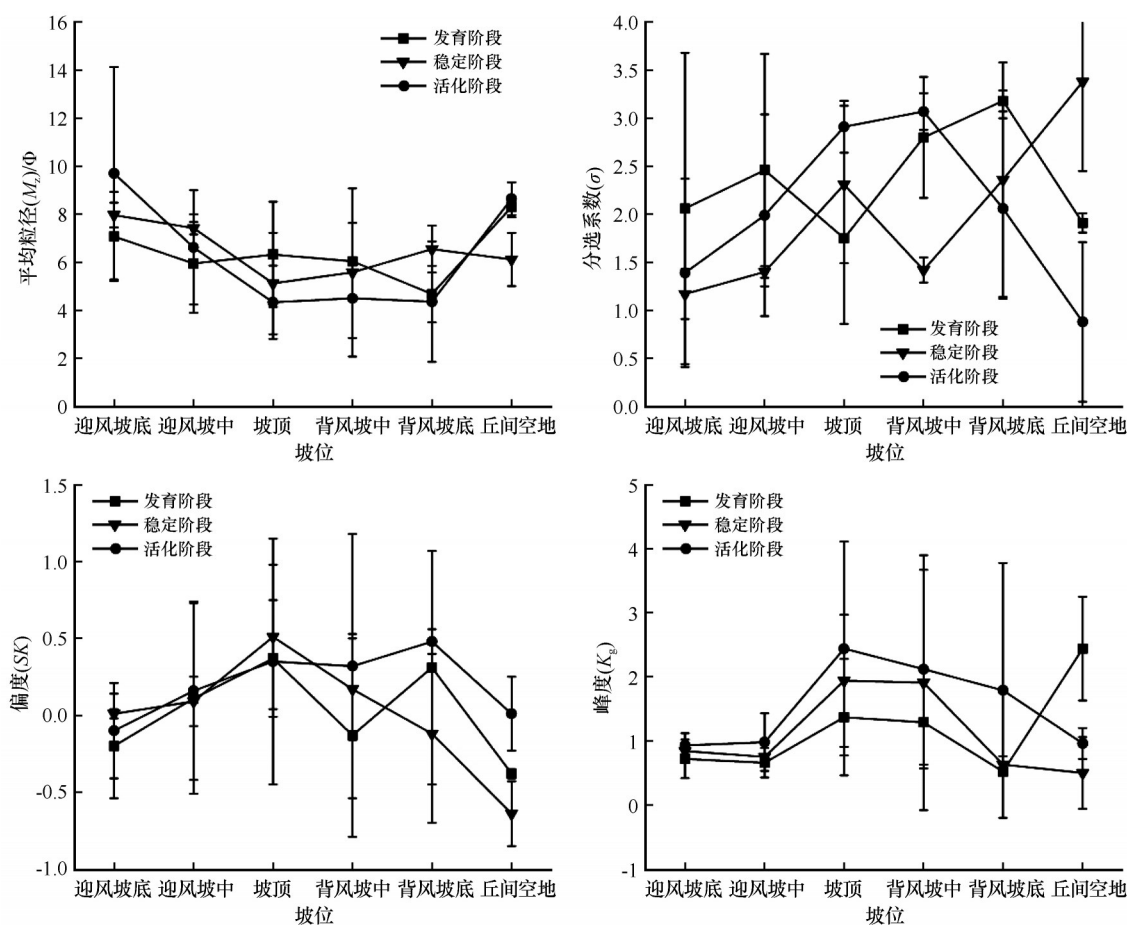


图5 各演化阶段沙堆不同部位土壤粒度参数

Fig.5 Soil particle size parameters in different parts of the scrub and nebkhas at various stages of evolution

表3 各演化阶段灌丛形态参数与沙堆沉积物粒径的相关关系

Table 3 Correlation between morphological parameters of scrub and grain size of nebkhas sediments at various stages of evolution

演化阶段		黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂
发育阶段	L_g	0.057	-0.227	-0.179	-0.086	0.310*	0.176
	W_g	-0.034	-0.201	-0.159	-0.084	0.296*	0.207
	H_g	-0.175	-0.242	0.102	0.237*	0.165	0.127
	S_g	-0.018	-0.223	-0.168	-0.057	0.301*	0.208
稳定阶段	L_g	-0.287	-0.421	0.007	0.121	0.490**	0.357**
	W_g	-0.153	-0.049	-0.198	-0.159	0.169	0.125
	H_g	0.099*	0.392**	-0.215	-0.295	-0.337	-0.206
	S_g	-0.252	-0.233	-0.151	-0.069	0.360**	0.263
活化阶段	L_g	-0.028	0.096*	0.026	0.061	-0.103	-0.194
	W_g	-0.135	-0.069	0.034	0.182*	0.050	-0.043
	H_g	-0.032	0.081	0.018	0.093*	-0.090	-0.236
	S_g	-0.044	0.102*	-0.002	0.044	-0.098	-0.172

注:**在 0.01 级别(双尾)相关性显著;*在 0.05 级别(双尾)相关性显著; L_g 为灌丛长轴, W_g 为灌丛短轴, H_g 为灌丛高, S_g 为植被覆盖面积。

稳定阶段迎风坡侧粉粒含量明显高于其他坡位,表明稳定阶段的沙堆因灌丛长势良好、植被覆盖度

高,可以有效地拦截沙源中的颗粒物^[21]。因此较细的颗粒由于灌丛的拦截沉积于顶部,较粗的颗粒因

灌丛形态高而无法进行位移,可能滞留在没有长灌丛的空地,导致沙堆平均粒径逐渐变小。活化阶段的灌丛沙堆,沙堆边缘受到一定程度的破坏,导致背风坡底沉积物颗粒较粗,其他部位的粒级百分含量在3个发展阶段里大多居中,平均粒径的变化趋势与稳定阶段一致。

3.3 藏锦鸡儿灌丛生长发育对其沙堆沉积的影响

干旱-半干旱地区的相关研究表明,灌丛沙堆是沙物质受到灌丛阻拦后,在灌丛周围沉积、重新分选形成的^[22]。分析藏锦鸡儿灌丛沙堆不同演化阶段的沉积物粒度特征发现,从发育阶段到活化阶段沉积物颗粒逐渐变粗,这与藏锦鸡儿灌丛形态变化有关。灌丛通过覆盖地表以及阻挡输沙的形式改变土壤颗粒的分布,由于发育阶段和稳定阶段的藏锦鸡儿灌丛风速较小,细颗粒极易随着风沙流上升,并且在灌丛迎风坡侧沉积。这与对白刺^[23]、红砂^[24]等灌丛沙堆的研究结果一致,因此可知不同类型灌丛虽生长方式不同,但作为灌丛沙堆阻挡沙物质的运移机制是相同的。

本研究中各演化阶段藏锦鸡儿灌丛沙堆在不同坡位表层沉积物的粒径所呈现出的差别,原因是由于灌丛演化时间的递进所呈现的灌丛形态不同,拦截沙物质不同。在稳定阶段由于灌丛演化时间长所形成的灌丛较大,表层所沉积的土壤颗粒与灌丛相关性更高,且多与中砂和粗砂相关($P<0.01$)。发育阶段是因为灌丛形态较小,所拦截沙物质较少,与中砂存在相关性($P<0.05$),且与灌丛长轴、短轴以及灌丛覆盖面积相关性较高。活化阶段由于灌丛枯枝率较高,因此拦截风沙能力变弱,灌丛与沉积物之间存在相关性较少。

4 结论

各演化阶段藏锦鸡儿灌丛与沙堆长轴、短轴和高的参数具有较强的相关性,相关系数稳定阶段>发育阶段>活化阶段,可知灌丛发育越好,沙堆规模越大。稳定阶段和活化阶段,灌丛高对沙堆的高度影响最大;稳定阶段,灌丛长轴、短轴与沙堆的短轴无相关性,与其他参数都存在显著相关。

藏锦鸡儿灌丛沙堆发育阶段整体粒级百分含量整体居中,稳定阶段细颗粒含量高,粗颗粒含量

低,而在活化阶段整体含量高。迎风坡中和坡顶黏粒、粉粒含量多,背风坡粗粒含量高;顶部—中部—底部的表层沉积物中,稳定阶段平均粒径大于发育、活化阶段;其他3个土壤粒度参数在稳定阶段和活化阶段呈相同趋势,在发育阶段变化相较不同。

藏锦鸡儿灌丛形态与沙堆表层沉积物在稳定阶段相关性更高,在发育阶段相关较少,只与中砂存在相关性($P<0.05$),活化阶段与黏粒和细砂存在相关性。灌丛形态参数的变化与沙堆沉积物特征存在相关关系,各要素之间协调发展。

参考文献:

- [1] Wang X, Zhang C, Zhang J, et al. Nebkha formation: implications for reconstructing environmental changes over the past several centuries in the Ala Shan Plateau, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 297 (3): 697-706.
- [2] Lang L, Wang X, Hasi E, et al. Nebkha (coppice dune) formation and significance to environmental change reconstructions in arid and semiarid areas[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 344-358.
- [3] 张梅. 毛乌素沙地藏锦鸡儿灌丛沙堆形态特征[J]. 长春师范大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 72-78.
- [4] Zhang P, Yang J, Zhao L, et al. Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2): 79-90.
- [5] 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): 1165-1170.
- [6] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 浑善达克沙地3种典型灌丛固沙能力的比较研究[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 76-83.
- [7] 支莹, 刘树林, 康文平, 等. 浑善达克沙地锦鸡儿属(*Caragana*)灌丛沙堆形态特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1438-1448.
- [8] 樊婷, 张存厚, 张德广, 等. 内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤水分对降水的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 72-77.
- [9] 张存厚, 崔崑, 越昆, 等. 干旱半干旱区土壤水分对降水的脉动响应: 以荒漠草原达茂旗为例[J]. 干旱气象, 2023, 41(2): 260-267.
- [10] 党晓宏, 魏亚娟, 汪季. 不同生境白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆形态特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 1-9.
- [11] Li Z Z, Wu S L, Chen S J, et al. Biogeomorphologic features and growth process of *Tamarix nabkhas* in Hotan River Basin, Xinjiang [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010 (2): 205-218.

- [12] Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Search*, 1957, 27(1): 3–26.
- [13] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377–392.
- [14] 孙涛, 贾志清, 钱雅玲, 等. 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 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2019, 34(4): 713–724.
- [15] 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): 263–269.
- [16] 罗维成, 赵文智, 任珩, 等. 不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 191–199.
- [17] Cabrera-Vega L L, Cruz-Avero N, Hernández-Calvento L H A I, et al. Morphological changes in dunes as an indicator of anthropogenic interferences in arid dune fields [J]. *Coastal Education and Research Foundation*, 2013(8): 1–12.
- [18] 张海娜, 鲁向晖, 黄国敏, 等. 鄱阳湖沙地蔓荆灌丛沙堆形态特征及空间分布格局 [J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5252–5260.
- [19] 张璞进, 杨劼, 宋炳煜, 等. 藏锦鸡儿群落土壤资源空间异质性 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 338–346.
- [20] 迟旭, 崔向新, 党晓宏, 等. 吉兰泰盐湖绿洲柽柳灌丛生长与沙堆形态特征的关系 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2022, 50(3): 49–58.
- [21] 高永, 丁延龙, 汪季, 等. 不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 135–142.
- [22] 谭凤翥, 王雪芹, 王海峰, 等. 柽柳灌丛沙堆及丘间地蚀积分布随背景植被变化的风洞实验 [J]. *干旱区地理*, 2018, 41(1): 56–65.
- [23] 丁延龙. 白刺灌丛沙堆演化对地表蚀积的影响及其作用机制 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [24] 李小乐, 魏亚娟, 党晓宏, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(3): 933–942.

Morphology and sediment characterization of a scrub sandpile in *Caragana tibetica*

Han Min¹, Gao Yong¹, He Minghui¹, Yan Ru², Bai Fang², Yang Wenyan¹,
Li Xiaole^{3,4}, Yuan Xiaoman¹, Yang Juan¹

(1. College of Desert Governance, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Darhan Muminggan Joint Banner Forestry and Grassland Workstation, Darhan Muminggan Joint Banner 014500, Inner Mongolia, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study the coupling relationship between the sedimentary characteristics of the sand pile and the morphology of the thicket of *Caragana tibetica* at each stage of evolution, to analyze the changes of the sand pile of the thicket of *Caragana tibetica* over time, to elucidate the correlation between the thicket and the sand pile as well as the characteristics of the sand pile surface sediment at each stage of evolution, and to reveal the changes of the sand pile and its sand-blocking ability of the thicket in the course of the development of the thicket of *Caragana tibetica*. The sandpile changes during the development of the Tibetan mallow scrub and its ability to block the sand. Based on the field survey, three typical thickets of the sandpile of Tibetan mallow scrub at different stages of evolution (developmental stage, stabilization stage and activation stage) were selected from the sample site, and the morphometric parameters of the thickets and the sandpile were measured to study the correlation between the sandpile and the Tibetan mallow scrub, and then the sediment characteristics were analyzed through the sampling of different parts of the sediments. The results showed that the morphology of the sandpile of the Tibetan Jindjir scrub was mostly oval, and the long axis (L_d), short axis (W_d), height (H_d), horizontal scale (HC), bottom area (S_d) and volume (V_d) of the sandpile of the Tibetan Jindjir scrub at each stage of the evolution showed the stage of activation>stabilization>development. The overall grain size content of the sand pile sediments in the development stage was intermediate; the fine sand and powder grain content at the top of the scrub slope in the stabilization stage was higher, showing a gradual increase; the particle content in the activation stage was high, and the peak value from the bottom of the windward slope - the top of the slope - the bottom of the leeward slope was showing a trend of increasing and then decreasing, which indirectly reflected the interception effect of the scrub sandpile on the sand particles. The correlation between scrub morphology and each parameter of the sand pile sediment was greatest in the stabilization stage, indicating that between scrub and sediment due to the oval shape of the scrub, the surface sediment indicated that with the evolutionary stage, its scrub had the strongest sand fixation capacity in the stabilization stage. The morphology of Tibetan brook trout is not strongly correlated with each parameter of sand pile sediments during the developmental stage due to the small size of the scrub. The correlation between the scrub and the sediments became more and more unstable as the evolutionary process progressed.

Key words: *Caragana tibetica*; scrub and nebkhas; evolutionary stage; morphological characteristics; soil grain size composition