

西鄂尔多斯地区四合木与红砂灌丛的阻沙能力对比研究

闫宇¹, 郭强², 党晓宏^{1,3}, 蒙仲举¹, 高永¹, 翟波⁴, 王紫薇¹, 刘子剑⁵

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2.呼和浩特市水资源与

河湖保护中心, 内蒙古 呼和浩特 010013; 3.内蒙古自治区包头市林业和草原局, 内蒙古 包头 014030;

4.集宁师范学院 地理科学与规划学院, 内蒙古 集宁 012000; 5.奈曼旗草原工作站, 内蒙古 通辽 028300)

摘要: [目的] 对比分析西鄂尔多斯地区四合木与红砂灌丛的阻沙能力, 为原生草原与荒漠过渡带植物的多样性保护和珍稀濒危物种保育提供理论依据与数据支持。[方法] 以西鄂尔多斯国家级自然保护区内四合木(*Tetraena mongolica*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)灌丛沙堆为研究对象, 运用典型样方法对四合木和红砂灌丛沙堆形态与生长状况进行系统测定, 探讨沙堆形态发育及阻沙能力与四合木和红砂灌丛形态的关系。[结果] ①四合木和红砂灌丛沙堆均呈半球型发育, 四合木灌丛沙堆形态参数显著大于红砂灌丛沙堆($p < 0.05$); ②四合木、红砂灌丛与沙堆形态参数间(灌丛高度除外)具有显著相关性($p < 0.01$)。四合木灌丛沙堆长轴、短轴、半径与高度之间均呈二次函数关系, 表明四合木灌丛可能进入衰退阶段, 而红砂灌丛沙堆长轴、短轴、半径与高度之间均呈线性关系, 表明红砂灌丛沙堆仍在发育; ③当冠幅面积(S_p) $\leq 1.44 \text{ m}^2$ 时, 红砂灌丛沙堆的体积大于四合木灌丛沙堆, 当 $S_p > 1.44 \text{ m}^2$ 时, 四合木灌丛沙堆的体积一直大于红砂灌丛沙堆。四合木和红砂灌丛单位冠幅面积所拦截的沙物质体积分别为 0.13 和 0.06 m^3 。[结论] 可以初步判断四合木的阻沙能力大于红砂。整体来看, 四合木对风沙环境的适应性较红砂强, 随着冠幅面积的增长四合木灌丛拦截沙物质的能力更强。

关键词: 珍稀濒危植物; 四合木; 红砂; 灌丛沙堆; 西鄂尔多斯国家自然保护区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0137-09

中图分类号: Q948

文献参数: 闫宇, 郭强, 党晓宏, 等. 西鄂尔多斯地区四合木与红砂灌丛的阻沙能力对比研究[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 137-145. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.015; Yan Yu, Guo Qiang, Dang Xiaohong, et al. Comparative study on sand-blocking ability of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* shrubs in West Ordos area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 137-145.

Comparative Study on Sand-blocking Ability of *Tetraena Mongolica* and *Reaumuria Soongorica* Shrubs in West Ordos Area

Yan Yu¹, Guo Qiang², Dang Xiaohong^{1,3}, Meng Zhongju¹, Gao Yong¹, Zhai Bo⁴, Wang Ziwei¹, Liu Zijian⁵

(1.School of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019,

China; 2.Hohhot Water Resources and River and Lake Protection Centre, Hohhot, Inner Mongolia 010013,

China; 3.Baotou Forestry and Grassland Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region Inner Mongolia, Baotou,

Inner Mongolia 014030, China; 4.School of Geography Science and Planning, Jining Normal University, Jining,

Inner Mongolia 012000, China; 5.Naiman Banner Grassland Workstation, Tongliao, Inner Mongolia 028300, China)

Abstract: [Objective] The sand-blocking ability of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* shrubs were comparative studied in the West Ordos area in order to provide a theoretical basis and data support for the protection of plant diversity and conservation of rare and endangered species in the transition zone between native grassland and desert. [Methods] Nebkhas of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* were studied in the West Ordos National Nature Reserve. The morphology and growth of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* were systematically determined by typical sampling methods to determine the relationship between the morphology and development of nebkhas, and to determine the sand-

收稿日期: 2023-12-10

修回日期: 2024-02-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“荒漠灌丛空间构型对其‘肥岛’发育的作用机制”(41967009)

第一作者: 闫宇(1998—), 女(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: yanyu199895@163.com。

通信作者: 党晓宏(1986—), 男(汉族), 陕西省合阳县人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: dangxiaohong1986@126.com。

blocking ability resulting from the specific morphology of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica*. [Results] ① Both *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* nebkhas showed a semi-ellipsoidal development strategy, and the morphological parameters of *Tetraena mongolica* nebkhas were significantly larger than those of *Reaumuria soongorica* nebkhas ($p < 0.05$). ② There was a significant correlation ($p < 0.01$) between both *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* shrubs and the morphological parameters of sand piles (except shrub height). There were quadratic relationships between the long axis and height, the short axis and height, and the radius and height of sand piles for *Tetraena mongolica*, indicating that *Tetraena mongolica* may enter the declining stage. There were linear relationships between the long axis and height, the short axis and height, and the radius and height of sand piles for *Reaumuria soongorica*, indicating that *Reaumuria soongorica* nebkhas were still developing. ③ When the crown area (S_p) was less than 1.44 m^2 , the volume of a *Reaumuria soongorica* shrub was larger than that of a *Tetraena mongolica* shrub. When $S_p > 1.44 \text{ m}^2$, the volume of a *Tetraena mongolica* shrub was always larger than that of a *Reaumuria soongorica* shrub. The sand volumes intercepted by a unit crown area of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* shrubs were 0.13 m^3 and 0.06 m^3 , respectively. [Conclusion] It can be preliminarily surmised that the sand-blocking ability of *Tetraena mongolica* is greater than that of *Reaumuria soongorica*. Overall, the adaptability of *Tetraena mongolica* to a windy-sandy environment is greater than that of *Reaumuria soongorica*, and the ability of *Tetraena mongolica* to intercept sand material increases as crown area increases.

Keywords: rare and endangered plants; *Tetraena mongolica*; *Reaumuria soongorica*; nebkha; West Ordos National Nature Reserve

灌丛沙堆是沙物质被灌丛拦截后逐渐堆积在灌丛周围形成的风积地貌^[1-2],其主要分布在荒漠草原、沙漠边缘地带等地区^[3-4]。灌丛沙堆的出现是区域土壤风蚀和土地退化的标志^[5-6],其几何形态特征能够反映时空尺度上的风沙环境特点和土地沙漠化特征^[7]。西鄂尔多斯国家级自然保护区位于原生草原与荒漠过渡带,是众多古老孑遗植物的“避难所”^[8-9]。其中四合木(*Tetraena mongolica*)和红砂(*Reaumuria soongorica*)在该区处于优势种的地位,并被列为内蒙古自治区的珍稀濒危植物。四合木是我国特有的第三纪孑遗物种,是一种根系非常发达的强旱生植物,被誉为植物界的“活化石”和“大熊猫”,其不仅可以阻挡风沙,也可做饲料^[10-11],红砂为柽柳科(Salicaceae)红砂属的一种超旱生泌盐小灌木,生态可塑性强,抗旱、耐盐、集沙能力较强^[12]。由于四合木和红砂长期在严酷、恶劣自然生境中繁衍进化,长期的适应结果使它们形成了特定的植系构型^[13]。它们的枝系能够分解风力使沙粒沉积从而形成灌丛沙堆,对维护西鄂尔多斯国家级自然保护区生态环境、减少风沙危害以及生态系统物种多样性起着十分重要的作用。

近年来,受气候和外界干扰等因素的影响,西鄂尔多斯荒漠地区生态系统并不稳定,导致该区种群的自然繁育更新能力下降,四合木和红砂的分布范围缩小、种群数量锐减,四合木已经处于极度濒危状况^[14-15]。由于沙堆的形成发育主要依附灌丛的生长,

当气候干旱和水分亏缺时,灌丛难以吸收水分来维持生存进而退化,最终导致沙堆解体,而沙堆解体会加快生态系统的退化^[16]。因此,西鄂尔多斯国家级自然保护区珍稀濒危植物研究对以四合木和红砂为建群种群落的保护显得尤为必要。目前,已有学者对四合木灌丛构型对风沙过程和沉积特征的影响^[17],以及红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累规律进行了深入的研究^[18],还有学者针对四合木的种群遗传结构^[19-20]、物种多样性^[14]、生态学^[10,21]、红砂的生物量^[22]、根系构型^[23]及生物多样性等^[24-25]方面展开大量研究,而对于两种灌丛的形态及其沙堆形态之间关系的比较未见报道。为此,本文以该区域内四合木和红砂为研究对象,运用统计学和生态学原理和方法,对样区内四合木和红砂灌丛沙堆实测形态参数进行统计学分析,并对灌丛沙堆的发育特征及灌丛生长趋势进行拟合,分析两个建群种植物生长过程中沙堆发育与灌丛生长的互馈关系,主要目的是为原生草原与荒漠过渡带植物的多样性保护和珍稀濒危物种保育提供理论依据与数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于西鄂尔多斯国家级自然保护区境内的巴拉贡样地区($107^{\circ}05'08''$ — $107^{\circ}19'34''\text{E}$, $40^{\circ}08'41''$ — $40^{\circ}23'12''\text{N}$),该样地区位于原生草原与荒漠过渡带

地区,是古老残遗濒危物种的栖息地,海拔介于 1 068 ~ 1 282 m。研究区气候环境恶劣,属中温带大陆性气候,昼夜温差大,年平均气温 5.6 °C,极端最高气温 36.5 °C,极端最低气温 -32.1 °C。当地干旱少雨,年均降水量不超过 150 mm,年平均蒸发量为 2 720 mm,年平均日照时数为 3 192.5 h。研究区风能环境较强,通常会伴随沙尘暴天气。研究区处于丘陵和平原交界处,西南方向为地势起伏较小的低山丘陵,东北方向主要为较平坦的平原地貌。土质贫瘠,肥力低下,主要土壤类型是灰漠土和风沙土。保护区内共有植物种类 326 种,古老残遗濒危植物保护区内特有种、古老孑遗植物及其他濒危植物共 58 种,其中,四合木(*Tetraena mongolica*)、半日花(*Helianthemum songaricum*)、绵刺(*Potaninia mongolica*)、沙冬青(*Ammopiyanthus mongolicus*)等植物的珍稀濒危程度最高^[26],四合木群落在保护区分布面积为 11 171.5 hm²;红砂群落 895.71 hm²。

1.2 试验设计

野外调查于 2022 年 8 月进行。选择无人破坏且能代表四合木、红砂灌丛沙堆种群特征的样地,布设 2 个 100 m×100 m 样方,对样方内四合木、红砂灌丛形态及其沙堆形态进行测量和统计。运用卷尺测定样方内每丛灌丛的高度(H_p)、长度(L_p)、宽度(W_p)、灌丛沙堆长轴(L_d)、短轴(W_d)、高度(H_d)、半径(R_d),对每个形态参数重复测量 3 次,其中灌丛和沙堆长、短轴测量均采用十字交叉法。由于四合木灌丛和红砂灌丛沙堆形态整体呈椭球形,冠幅面积(S_p)以椭圆估算,灌丛体积(V_p)以椭球体估算,沙堆底面积(S_d)以椭圆估算,沙堆体积(V_d)以半椭球体估算,单位冠幅面积所能拦截沙物质的体积(V),计算公式为^[27]。

$$S = 1/4\pi \times L \times W \quad (1)$$

$$V_p = 1/6\pi \times L_p \times W_p \times H_p \quad (2)$$

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

$$V = V_d / S \quad (4)$$

表 1 两种灌丛沙堆形态参数统计分析

Table 1 Statistical analysis of morphological parameters of two nebkhas

灌丛类型	测量指标	L_p/m	W_p/m	H_p/m	S/m^2	V/m^3	L_d/m	W_d/m	H_d/m	S_d/m^2	V_d/m^3
四合木	最大值	3.29	2.97	0.66	7.67	3.39	3.16	2.74	0.51	6.53	1.71
	最小值	0.85	0.70	0.27	0.46	0.12	0.39	0.48	0.07	0.18	0.01
	平均值	1.79	1.68	0.43	2.62	0.80	1.40	1.36	0.24	1.77	0.35
	标准差	0.62	0.58	0.09	1.73	0.67	0.66	0.58	0.10	1.48	0.38
红砂	最大值	2.16	1.77	0.43	2.47	0.71	1.77	1.47	0.35	1.57	0.37
	最小值	0.69	0.53	0.17	0.29	0.03	0.40	0.40	0.06	0.15	0.01
	平均值	1.14	1.02	0.23	0.95	0.15	0.81	0.73	0.16	0.49	0.06
	标准差	0.29	0.28	0.05	0.48	0.11	0.25	0.22	0.06	0.29	0.06

注: L_p , W_p , H_p 分别为灌丛的长度、宽度、高度; S 为灌丛冠幅面积; V 为单位冠幅面积所能拦截沙物质的体积; L_d , W_d , H_d 分别为灌丛沙堆长轴、短轴和高度; S_d 为沙堆底面积; V_d 为沙堆体积。

$$R_d = (L_d + W_d) / 2 \quad (5)$$

式中: L 为灌丛沙堆长轴(m); W 为灌丛沙堆短轴(m); H 为灌丛沙堆高度(m); S 为灌丛冠幅面积(m²); V_d 为沙堆体积(m³); V_p 为灌丛体积(m³); V 为灌丛单位冠幅面积所拦截沙物质的体积(m³); R_d 为沙堆半径(m)。

1.3 数据分析方法

采用 Excel 2016 和 SPSS 17.0 对四合木灌丛和红砂灌丛及其对应的沙堆形态特征进行描述性统计和相关性分析。根据各参数之间相关系数 $|r|$ 的大小进行分级:当 $|r| < 0.3$ 时,为微弱线性相关;当 $0.3 \leq |r| \leq 0.5$ 时,为低度线性相关;当 $0.5 < |r| \leq 0.8$ 时,为显著线性相关;当 $|r| > 0.8$ 时,为高度线性相关^[28]。相关性较好的参数用 Origin 2021 进行回归分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 两种灌丛沙堆的形态特征

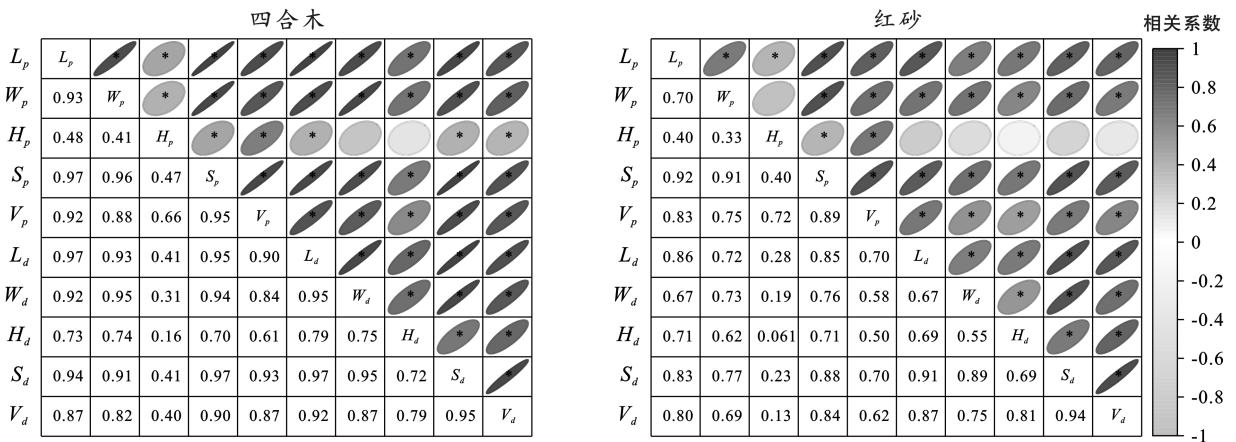
西鄂尔多斯国家级自然保护区内四合木、红砂灌丛及其沙堆的基本情况调查结果详见表 1。四合木灌丛长轴和短轴之比为 1.07,红砂灌丛长短轴之比为 1.12;四合木灌丛高度是红砂灌丛的 1.87 倍,底面积是红砂的 2.76 倍,体积是红砂的 5.33 倍。可以看出,四合木灌丛形态参数远远大于红砂灌丛的形态参数,两种灌丛相同的点在于灌丛的长度与宽度相差不大。由标准差可知,四合木灌丛形态参数的变异程度比红砂灌丛的变异程度大。从两种植物形成的沙堆形态特征来看,四合木灌丛沙堆的长短轴之比为 1.02,红砂灌丛沙堆的长短轴之比为 1.14;四合木灌丛沙堆高度是红砂灌丛的 1.5 倍。两种灌丛形成的沙堆形态均为近半椭球形,但是四合木灌丛沙堆的底面积和体积分别是红砂灌丛沙堆的近 3.7 倍和 5.5 倍,四合木灌丛沙堆底面积和体积均显著大于红砂灌丛沙堆的底面积和体积。

2.2 两种灌丛及其沙堆的发育特征

2.2.1 两种灌丛沙堆形态参数的相关性分析 对四合木和红砂灌丛沙堆形态特征进行总体相关性分析,由相关性分析热图(图 1)可知,四合木灌丛沙堆长轴、短轴、高度之间的相关系数分别为 0.95, 0.79 和 0.76, 其中四合木灌丛沙堆长轴与短轴之间表现为高度线性相关($p < 0.01$),说明四合木灌丛沙堆在水平方向上沿主风向与垂直主风向上的发展趋势是一致的;而红砂灌丛沙堆长轴、短轴、高度之间相关系数分别为 0.67, 0.69 和 0.55,均表现为显著线性相关($p < 0.01$),可以看出红砂灌丛沙堆的水平方向和垂直方向的发展趋势也是一致的。说明四合木和红砂灌丛沙堆的形成是沙堆长轴、短轴与高度之间相互协同发展的结果。四合木和红砂灌丛沙堆其余形态参数为 $0.69 \leq |r| \leq 0.97$ ($p < 0.01$)。

对两种灌丛形态特征与其沙堆形态特征进行相关性分析,可知两种植被的灌丛高度与其沙堆的形态参数之间的相关关系较弱,相关系数为 $0.13 \leq |r| \leq 0.41$ ($p < 0.01$)。两种植被灌丛其他形态参数及其沙堆形态参数之间的相关系数为 $0.62 \leq |r| \leq 0.97$ ($p < 0.01$)。

四合木灌丛的长度与沙堆长轴、底面积、体积,灌丛的宽度与沙堆短轴、底面积、体积之间相关系数均 $|r| > 0.8$ ($p < 0.01$),表现为高度线性相关;四合木灌丛的长度与沙堆高度之间的相关系数和灌丛的宽度与沙堆高度之间的相关系数相近 ($p < 0.01$),而四合木灌丛高度和沙堆高度之间的相关系数仅为 0.16 ($p < 0.01$),说明四合木灌丛沙堆垂直方向上的发育主要受灌丛的长度和宽度调控,受高度的影响较小。红砂灌丛的长度与沙堆长轴、底面积、体积之间的相关系数 $|r| > 0.8$ ($p < 0.01$),表现为高度线性相关;红砂灌丛宽度与沙堆短轴、底面积、体积之间的相关系数为 $0.5 < |r| \leq 0.8$ ($p < 0.01$),表现为显著线性相关;红砂灌丛长度与沙堆高度之间的相关系数为 0.71 ($p < 0.01$),灌丛宽度与沙堆高度之间的相关系数为 0.62 ($p < 0.01$),而灌丛高度和沙堆高度之间的相关系数为 0,两者无显著相关性。这说明红砂灌丛沙堆的垂直方向上的发育同样是由灌丛长度和宽度控制,与灌丛高度无关。由形态参数相关性分析表明,红砂灌丛沙堆形态参数间的相关系数较四合木灌丛沙堆小,但两种灌丛沙堆的发育主要由灌丛长度和宽度调控。



注: * 表示 $p < 0.01$ 。

图 1 四合木和红砂灌丛沙堆形态参数之间的相关性热图

Fig.1 Correlation heat map between *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* nebkhas morphological parameters

2.2.2 两种植被灌丛沙堆形态参数的回归分析 由相关性分析可知,四合木和红砂灌丛沙堆的长轴、短轴和高度之间存在着显著的相关性,即沙堆长轴、短轴与高度之间协同发展。通过拟合系数 R^2 选出四合木和红砂灌丛沙堆长轴、短轴与高度之间的最优回归方程,进一步分析两种灌丛沙堆形态参数间的函数关系。对两种灌丛沙堆长轴、短轴、半径与高度之间进行回归分析如图 2 所示。

由图 2 可以看出,四合木灌丛沙堆形态参数间最优拟合回归方程为二次函数关系且二次项系数均为

负数,红砂灌丛沙堆形态参数间最优拟合方程为线性函数关系。两种灌丛沙堆长轴和高度的拟合系数分别为 0.64, 0.48;沙堆短轴和高度的拟合系数分别为 0.62, 0.30;沙堆半径和高度的拟合系数分别为 0.64, 0.48。四合木灌丛沙堆参数之间回归方程拟合系数均大于红砂灌丛沙堆。由于四合木灌丛沙堆拟合曲线为开口向下的抛物线,表明四合木灌丛沙堆发育趋于稳定或者进入衰退阶段。红砂灌丛沙堆形态参数拟合函数斜率为正,表明四合木灌丛沙堆形态参数之间协同增长,仍在发育。

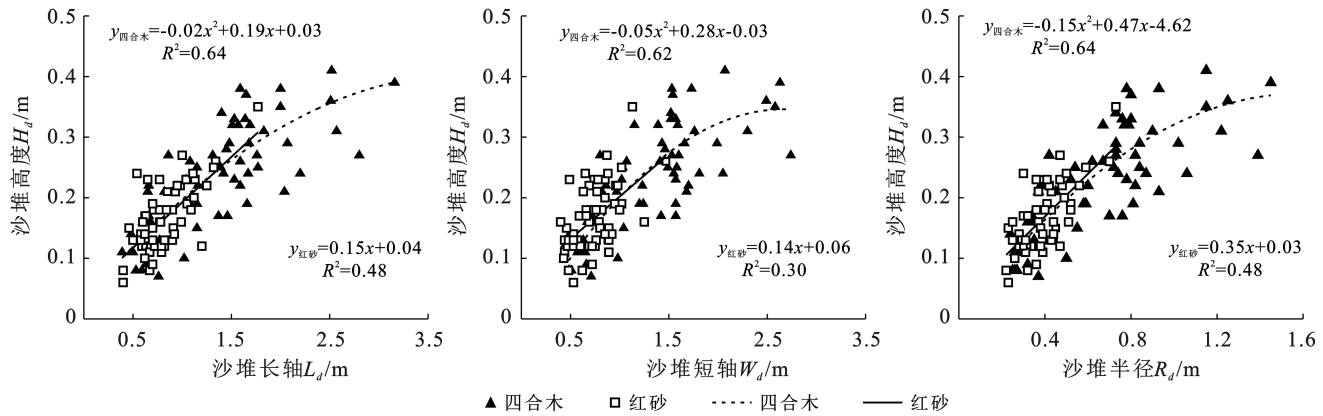


图 2 四合木和红砂灌丛沙堆形态参数之间的拟合关系

Fig.2 Fitting relationship between morphological parameters of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica nebkhas*

对两种植物灌丛和沙堆形态参数间分别进行拟合分析,如图 3 所示,四合木和红砂灌丛长度和沙堆长轴、灌丛宽度和沙堆短轴之间的最优拟合方程均为线性函数方程,拟合系数分别为 0.94,0.74,0.91 和 0.53,四合木灌丛沙堆拟合系数均大于红砂灌丛沙堆。由线性函数的斜率可知,四合木灌丛沙堆长轴、沙堆短轴随灌丛长度和宽度的增长速度比红砂灌丛沙堆的增长速度快。由相关性分析可知,四合木和红砂灌丛沙堆高度和灌丛高度不具有显著相关性,而与灌丛长度和宽度具有显著相关性,因此对两种植物灌丛沙堆高度和灌丛长度、宽度分别进行拟合分析。由图 3 可以看出,四合木灌丛的长度、宽度和沙堆高度之间呈二次函数关系,而红砂灌丛的长度、宽度和沙堆高度之间呈线性递增函数关系。由 R^2 值可知,四合木灌丛沙堆高度的发育得益于灌丛能够拦截主风向和垂直主风向的沙物质,而红砂灌丛沙堆高度的发育主要与主风向风沙流中沙物质的沉积相关。在相关分析的基础上,对两种植物灌丛沙堆底面积、体积分别与灌丛高度和冠幅面积进行回归分析。如图 3 所示,两种植物灌丛高度与其沙堆底面积、体积拟合系数均较低,可以说明两种植物灌丛的高度对其沙堆形成的作用不显著。两种灌丛冠幅面积和沙堆底面积、体积间均呈线性递增函数关系,但四合木灌丛沙堆参数间的 R^2 值均高于红砂灌丛沙堆参数间的 R^2 值。可以说明,四合木灌丛沙堆的底面积、体积的增长相比红砂灌丛沙堆随冠幅面积的增长速度更快。但不同植物生长阶段,两种灌丛植物的阻沙能力具有一定的差异。令 $0.11x - 0.04 \geq 0.2x - 0.17$,可得 $x \leq 1.44$ 。因此当冠幅面积小于等于 1.44 m^2 时,四合木灌丛沙堆体积较红砂小;令 $0.2x - 0.17 > 0.11x - 0.04$,可得 $x > 1.44$ 。因此当冠幅面积大于 1.44 m^2 时,四合木灌丛沙堆的体积较红砂而言显著增大。

随着冠幅面积的增大,四合木灌丛拦截沙物质的能力更强。

3 讨论

灌丛具有很强的捕获沙物质的能力^[29],但是不同的灌丛形成的沙堆形态和大小有很大差异^[30],且植物形态和沙堆形态的差异可以作为衡量不同植被阻沙能力的重要指标^[31-32]。一般横向生长且分枝多的灌丛会形成盾形或半椭圆形沙堆,例如白刺灌丛沙堆,而垂直生长、分枝少密度高的灌丛易形成近圆锥形或半球形沙堆,例如油蒿灌丛沙堆^[30,33]。研究表明半球形灌丛具有很强的阻沙能力^[34]。本研究中四合木和红砂均为横向生长且分枝多的半球形灌丛,低矮的形态致使拦截风沙流后沙堆向水平尺度发育,而随灌丛生长沙堆垂直方向也不断增加,两种灌丛最终形成了半椭圆形沙堆。

根据野外调查,四合木灌丛沙堆体积显著大于红砂灌丛沙堆。四合木和红砂灌丛单位冠幅面积^[32]所拦截的沙物质体积分别为 0.13 和 0.06 m^3 ,可以初步判断四合木的阻沙能力大于红砂。有研究^[35-36]表明,由于灌丛枝系疏密、树冠及枝叶展开度差异而使沙堆具有不同的发展速度和形态,当植被空间占有率越高,其形成的沙堆越大。四合木和红砂灌丛均属于密枝型灌丛^[37],而四合木灌丛高度($0.27 \sim 0.66 \text{ m}$)大于红砂灌丛高度($0.17 \sim 0.43 \text{ m}$),因此在垂直方向上四合木相比红砂能拦截更多的沙物质。四合木和红砂灌丛形态参数方面的差异还与两者的根系结构有关,四合木属于深根系植物^[38],红砂属于浅根系植物^[12]。西鄂尔多斯地区属于典型的干旱气候区,年降水量较低,且降水主要集中在夏季。这种气候条件使得地表水分难以保持,从而影响了植物的生长和发育。根系特性的差异导致两种灌丛吸收水分的能力有所差异,

四合木根系发达,能够深入土壤中吸收水分和养分,而红砂根系相对较浅,一般吸收地表水分。因此在西鄂

尔多斯地区红砂的生长和发育可能会受到一定程度的限制,这就导致了四合木灌丛形态参数大于红砂灌丛。

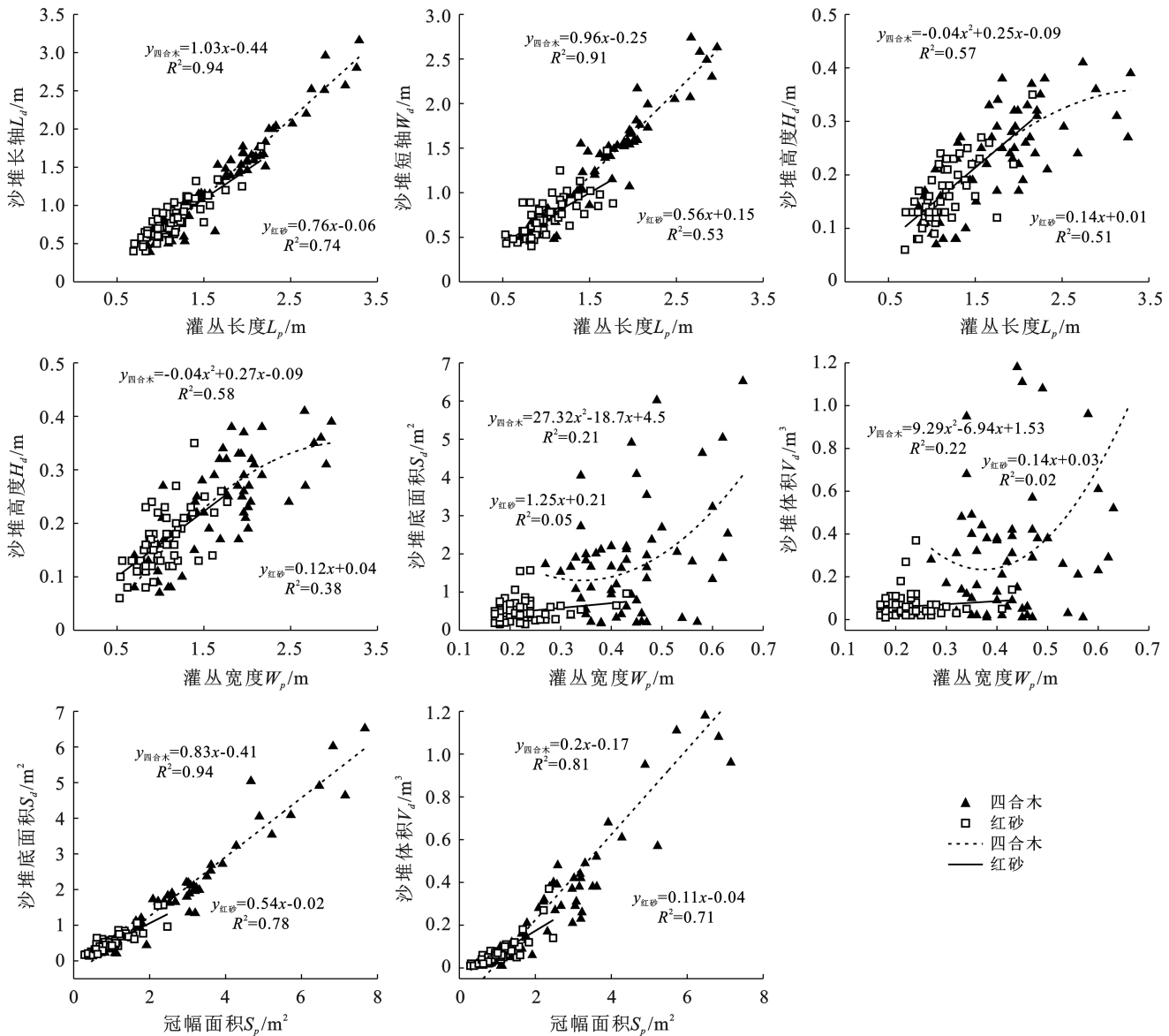


图 3 四合木和红砂灌丛与沙堆形态参数间的拟合关系

Fig.3 Fitting relationship between *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* nebkhas morphological parameters

本研究中两种灌丛沙堆形态参数之间呈现出高度相关性,说明各形态参数在沙堆发育过程中协同发展^[39],与张萍等^[40]研究结果一致。四合木和红砂灌丛与沙堆各形态参数间(灌丛高度除外)均显著相关,其中灌丛面积与沙堆长轴、短轴、高度的相关系数均较高,表明灌丛的生长控制着沙堆的整体发育。而对于灌丛高度与沙堆高度的相关性分析,毛东雷等^[41]研究表明二者存在很好的线性关系,而本研究中四合木和红砂灌丛高度与沙堆高度间没有明显的相关性,与小叶锦鸡儿灌丛沙堆的形态特征相似^[42]。本研究中两种植物灌丛沙堆底面积和体积与灌丛高度之间

均表现为无显著相关性,与谢国勋^[43]研究的结果相反。这是因为在空间范围大的情况下,靠下部的枝条会逐渐发育为承载上层枝条的支撑骨架,在扩大灌丛冠层面积的同时停止或减慢了四合木和红砂灌丛的垂直方向的生长^[44]。分别对四合木和红砂灌丛沙堆形态参数间进行回归分析,四合木灌丛沙堆参数间最优拟合方程均为二次函数,且二次项系数为负数,说明四合木灌丛沙堆发育到一定规模后会停止发育或衰退,红砂灌丛沙堆形态参数间最优拟合方程均为线性递增关系,说明红砂灌丛沙堆目前仍处于持续发育阶段,这与左合君等^[45]研究结果相似。说明此时四

合木和红砂灌丛沙堆发育阶段不一致。四合木和红砂灌丛沙堆底面积和体积随植物冠层面积呈线性函数关系,另外拟合函数的斜率越大,说明四合木灌丛沙堆底面积和体积随灌丛冠层面积的增长速率更快。因此可知,由于四合木和红砂灌丛种类及其发育阶段的不同,导致灌丛沙堆形态参数之间呈现不同的相关性关系。本研究是采用随机抽样的野外调查方法,仅考虑植被形态对沙堆形态及植被阻沙能力的影响,今后还需要大量野外观测数据的验证。四合木和红砂是西鄂尔多斯草原化荒漠区的主要建群种,它们与所在环境之间已经建立了一种相互适应的关系,对于干旱、高温以及多风沙的恶劣条件展现了出色的适应能力。在干旱和半干旱地区,水分是植物生长发育、生存中最重要的制约因素,未来可以通过对比四合木和红砂对水分的利用效率来说明四合木和红砂灌丛在此区域抗旱能力和适应性的强弱,为科学地保护四合木和红砂资源提供理论依据。

4 结论

(1) 四合木和红砂灌丛的沙堆在发育过程中呈现出水平生长速率大于垂直生长速率的半椭球型策略,两种灌丛沙堆形态参数存在显著差异,且四合木灌丛沙堆远大于红砂灌丛。

(2) 除了灌丛高度之外,四合木和红砂灌丛沙堆形态参数之间具有高度或显著相关性,并在发育过程中协同发展。四合木灌丛沙堆形态参数间为二次函数关系,表明四合木灌丛可能进入衰退阶段,而红砂灌丛沙堆形态参数间为线性关系,表明红砂灌丛沙堆仍在发育。

(3) 当 $S_p \leq 1.44 \text{ m}^2$ 时,红砂灌丛沙堆的体积大于四合木灌丛沙堆,当 $S_p > 1.44 \text{ m}^2$ 时,随冠幅的增长,四合木灌丛沙堆的体积一直大于红砂灌丛沙堆。由灌丛单位冠幅面积的拦沙量来看,四合木灌丛拦截沙物质的能力更强。

参考文献 (References)

- [1] 席军强,杨自辉,郭树江,等.不同类型白刺沙丘土壤理化性状与微生物相关性研究[J].草业学报,2015,24(6):64-74.
Xi Junqiang, Yang Zihui, Guo Shujiang, et al. The correlation between soil physical and chemical properties and soil microbes in different types of *Nitraria* dune [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015,24(6):64-74.
- [2] 杜建会,严平,丁连刚,等.民勤绿洲不同演化阶段白刺灌丛沙堆表面土壤理化性质研究[J].中国沙漠,2009,29(2):248-253.

- Du Jianhui, Yan Ping, Ding Liangang, et al. Soil physical and chemical properties of *Nitraria tangutorum* nebkhas surface at different development stages in Minqin Oasis [J]. Journal of Desert Research, 2009,29(2):248-253.
- [3] 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):265-282.
- [4] Dougill A J, Thomas A D. Nebkha dunes in the Molopo Basin, South Africa and Botswana: Formation controls and their validity as indicators of soil degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2002,50(3):413-428.
- [5] El-Bana M I, Nijs I, Khedr A H A. The importance of phytogenic mounds (nebkhas) for restoration of arid degraded rangelands in Northern Sinai [J]. Restoration Ecology, 2003,11(3):317-324.
- [6] 哈斯,杜会石,孙禹.内蒙古高原小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙丘:形态特征及表面气流[J].第四纪研究,2013,33(2):314-324.
Ha Si, Du Huishi, Sun Yu. *Caragana microphylla* nebkhas in Inner Mongolia Plateau: Morphology and surface airflow [J]. Quaternary Sciences, 2013,33(2):314-324.
- [7] Khalaf F I, Al-Awadhi J M. Sedimentological and morphological characteristics of gypseous coastal nabkhas on Bubiyan Island, Kuwait, Arabian Gulf [J]. Journal of Arid Environments, 2012,82(7):31-43.
- [8] 徐道龙.西鄂尔多斯荒漠 6 种珍稀植物菌根及共生微生物多样性研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2021.
Xu Daolong. Diversity of Mycorrhizal and Symbiotic Microorganisms of Six Rare Plants in Western Ordos Desert [D]. Inner Mongolia Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [9] 申景昕,原伟杰,虞毅,等.内蒙古西鄂尔多斯沙冬青退化种群的空间格局及其与发育阶段的关联性[J].生态学报,2019,38(1):19-26.
Shen Jingxin, Yuan Weijie, Yu Yi, et al. Spatial distribution patterns of *Ammopiptanthus mongolicus* degraded populations in relation to developmental stages in western erdos of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(1):19-26.
- [10] 智颖飙,杨持,王中生,等.孑遗植物四合木(*Tetraena mongolica*)的濒危肇因与机制[J].生态学报,2008(2):767-776.
Zhi Yingbiao, Yang Chi, Wang Zhongsheng, et al. The endangered characteristics and mechanism of the endemic relict shrub *Tetraena mongolica* Maxim [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):767-776.
- [11] 李红颖,刘果厚,韩春荣,等.四合木(*Tetraena mongolica*)

- 种子萌发出苗对水分和沙埋的响应[J].中国沙漠, 2017,37(5):910-916.
- Li Hongying, Liu Guohou, Han Chunrong, et al. Response of seed germination and seedling emergence of *Tetraena mongolicata* soil water content and sand burial depth [J]. Journal of Desert Research, 2017,37(5): 910-916.
- [12] 杨洁,单立山,苏铭,等.降水量和生长方式对红砂和珍珠根系形态特征的影响研究[J].草地学报,2021,29(5):936-945.
- Yang Jie, Shan Lishan, Su Ming, et al. Effects of precipitation and growth pattern on root morphological characteristics of two arid land plant species [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021,29(5):936-945.
- [13] 屈志强,刘连友,吕艳丽.沙生植物构型及其与抗风蚀能力关系研究综述[J].生态学杂志,2011,30(2):357-362.
- Qu Zhiqiang, Liu Lianyou, Lv Yanli. Psammophyte architecture and its relations with anti-wind erosion capability: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,30(2):357-362.
- [14] 杜忠毓,贺一鸣,房朋朋,等.孑遗濒危植物四合木群落组成、物种多样性及土壤养分含量[J].生态学杂志, 2020,39(11):3537-3548.
- Du Zhongyu, He Yiming, Fang Pengpeng, et al. Community composition, plant species diversity and soil nutrient content of endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(11):3537-3548.
- [15] 刘哲荣.内蒙古珍稀濒危植物资源及其优先保护研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- Liu Z R. Study on resources and priority conservation of rare and endangered plants in Inner Mongolia [D]. Hohhot, Inner Mongolia; Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [16] 赵长明,魏小平,尉秋实,等.民勤绿洲荒漠过渡带植物白刺和梭梭光合特性[J].生态学报,2005,25(8): 1908-1913.
- Zhao Changming, Wei Xiaoping, Yu Qiushi, et al. Photosynthetic characteristics of *Nitraria tangutorum* and *Haloxylon ammodendron* in the ecotone between oasis and desert in Minqin, Region, Country [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(8):1908-1913.
- [17] 翟波.四合木灌丛构型对风沙过程及沉积特征的影响[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- Zhai Bo. The influence of the shrub configuration features of *Tetraena Mongolica* maximon the aeolian processes and sedimentary characteristics [D]. Hohhot, Inner Mongolia; Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [18] 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.
- Li Xiaole, Wei Yajuan, Dang Xiaohong, et al. Soil mechanical composition and soil nutrient content of *Reaumuria soongorica* nebkhas [J]. Arid Zone Research, 2022,39(3):933-942.
- [19] Cheng Jin, Kao Huixia, Dong Shubin. Population genetic structure and gene flow of rare and endangered *Tetraena Mongolica* maxim. Revealed by reduced representation sequencing [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1):391.
- [20] 黄蕾.珍稀濒危植物四合木 Genic-SSR 标记的开发及种群遗传学研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2021.
- Huang Lei. Genic-SSR markers development and population genetic study of the rare and endangered plant *Tetraena mongolica* [D]. Hohhot, Inner Mongolia; Inner Mongolia University, 2021.
- [21] 王震,张利文,虞毅,等.平茬高度对四合木生长及生理特性的影响[J].生态学报,2013,33(22):7078-7087.
- Wang Zhen, Zhang Liwen, Yu Yi, et al. Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(22):7078-7087.
- [22] 陆文涛,种培芳,田艳丽,等.模拟氮沉降及降水作用下红砂和珍珠猪毛菜幼苗生物量的分配模式[J].草业科学,2021,38(11):2144-2154.
- Lu Wentao, Chong Peifang, Tian Yanli, et al. Effects of simulated precipitation changes and nitrogen deposition on biomass allocation patterns of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* seedlings under different growth modes [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(11):2144-2154.
- [23] 高天.额济纳荒漠植物红砂(*Reaumuria songarica*)根系构型、叶片生理指标变化的研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- Gao Tian. The study on the changes of root architecture and leaf physiological index of *Reaumuria songarica* in Ejina Desert [D]. Hohhot, Inner Mongolia; Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [24] 刘秉儒,李文金.荒漠植物红砂(*Reaumuria soongorica*)的保育效应及其对群落物种多样性的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(10):117-120.
- Liu Bingru, Li Wenjin. Influence of nurse effect on the diversity of desert *Reaumuria soongorica* community under arid environment in the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(10):117-120.
- [25] 宋兆斌,辛智鸣,朱雅娟.内蒙古荒漠—草原过渡带灌木群落特征[J].中国沙漠,2022,42(2):104-112.

- Song Zhaobin, Xin Zhiming, Zhu Yajuan. Characteristics of shrub communities in the desert-steppe ecotone of Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(2):104-112.
- [26] 党晓宏,蒙仲举,高永,等.西鄂尔多斯地区 5 种荒漠灌丛光合固碳能力研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(11):128-135.
- Dang Xiaohong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Photosynthetic carbon fixation capacity of five natural desert shrubs in West Ordos Region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017,31(11):128-135.
- [27] Zhang Pujin, Yang Jie, Zhao Liqing, 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.
- [28] 刘金伟,李志忠,武胜利,等.新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J].中国沙漠,2009,29(4):628-635.
- Liu Jingwei, Li Zhizhong, Wu Shengli, et al. The spatial heterogeneity of morphologic feature of *Nitraria nebkhas* around Ebinur Lake, Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 2009,29(4):628-635.
- [29] El-Bana M I, Li Zhenqing, Nijs I. Role of host identity in effects of phytogenic mounds on plant assemblages and species richness on coastal arid dunes [J]. Journal of Vegetation Science, 2007,18(5):635-644.
- [30] 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.
- Du Jianhui, Yan Ping, Dong Yuxiang. The progress and prospects of nebkhas in arid areas [J]. Acta Geographica Sinica, 2010,65(3):339-350.
- [31] 韩章勇,王雪芹,杨帆,等.策勒绿洲—沙漠过渡带两个建群种阻沙能力对比研究[J].干旱区研究,2013,30(4):659-665.
- Han Zhangyong, Wang Xueqin, Yang Fan, et al. Sand trapping capability of two dominant plant species in the Qira Qasis-desert Ecotone [J]. Arid Zone Research, 2013,30(4):659-665.
- [32] 唐艳,刘连友,屈志强,等.植物阻沙能力研究进展[J].中国沙漠,2011,31(1):43-48.
- Tang Yan, Liu Lianyou, Qu Zhiqiang, et al. Research review of capacity of plant for trapping blown sand [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(1):43-48.
- [33] Hesp P. The formation of shadow dunes [J]. Journal of Sedimentary Research, 1981,51:101-112.
- [34] Bochet E, Poesen J, Rubio J L. Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2000,25(8):847-867.
- [35] 黄富祥,王明星,王跃思.植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J].植物生态学报,2002,26(5):627-633.
- Huang Fuxiang, Wang Mingxing, Wang Yuesi. Recent progress on the research of vegetation protection in soil erosion by wind [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2002,26(5):627-633.
- [36] 魏亚娟,汪季,党晓宏,等.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):253-261.
- Wei Yajuan, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Morphological features of *Nitraria tangutorum* Nebkhas in different habitats [J]. Arid Zone Research, 2019,36(1):253-261.
- [37] 郭春秀,袁宏波,徐先英,等.石羊河下游 7 种沙生灌木的构型比较[J].西北植物学报,2015,35(5):1031-1036.
- Guo Chunxiu, Yuan Hongbo, Xu Xianying, et al. A comparison on architecture of 7 psammophyte shrubs at lower reaches of Shiyang River basin [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015,35(5):1031-1036.
- [38] 陈婕.内蒙古西鄂尔多斯荒漠珍稀濒危植物水分利用策略[D].北京:中国林业科学研究院,2016.
- Chen Jie. Water use strategies of rare and endangered plants in West Ordos Desert of Inner Mongolia in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.
- [39] 高永,党晓宏,虞毅,等.乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿(*Artemisia sphaerocphala*)灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J].中国沙漠,2015,35(1):1-7.
- Gao Yong, Dang Xiaohong, Yu Yi, et al. Nabkha morphological characteristics and sand fixing capacity of *Artemisia sphaerocphala* in the southeastern edge of the Ulan Buh Desert [J]. Journal of Desert Research, 2015,35(1):1-7.
- [40] 张萍,哈斯,岳兴玲,等.白刺灌丛沙堆形态与沉积特征[J].干旱区地理,2008,31(6):926-932.
- Zhang Ping, Ha Si, Yue Xingling, et al. *Nitaria nebkhas*: morphology and sediments [J]. Arid Land Geography, 2008,31(6):926-932.
- [41] 毛东雷,吴云霞,蔡富艳,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带灌丛沙堆与回涡沙丘的粒度分布特性[J].泥沙研究,2019,44(2):48-54.
- Mao Donglei, Wu Yunxia, Cai Fuyan, et al. Spatial distribution of sand grain size on aeolian deposition of nebkhas and back vortex dunes in oasis-desert ecotone in Cele, Xinjiang [J]. Journal of Sediment Research, 2019,44(2):48-54.

- 剪增强分析[J].水土保持研究,2020,27(3):357-363,371.
- Pan Tianhui, Du Feng, Wang Yue. Analysis of Root distributions and shear strengths of slope protection plants in the loess region of Northern Shaanxi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(3): 357-363,371.
- [23] 黄洋,陈筠,黄阳,等.草本植物在贵阳红黏土的形态分布与力学性能研究[J].中国水运(下半月),2022,22(1):45-47.
- Huang Yang, Chen Jun, Huang Yang, et al. Morphological distribution and mechanical properties of herbs in Guiyang red clay [J]. China Water Transport, 2022, 22(1):45-47.
- [24] 任树梅,刘洪禄,顾涛.人工模拟降雨技术研究综述[J].中国农村水利水电,2003(3):73-75.
- Ren Shumei, Liu Honglu, Gu Tao. Summary of research on artificial simulation of rainfall [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(3):73-75.
- [25] 张东海,段莹,周文钰,等.贵阳市暴雨强度公式推求[J].城市道桥与防洪,2016(1):95-99,11-12.
- Zhang Donghai, Duan Ying, Zhou Wenyu, et al. Study of rainstorm intensity formula in Guiyang City [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(1):95-99,11-12.
- [26] 郑启萍,徐得潜.草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(2):225-228.
- Zheng Qiping, Xu Deqian. Experimental research on the mechanism of herb ecological slope protection and the effect of roots on slope reinforcement [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2014,37(2):225-228.
- [27] 张兴玲,胡夏嵩.青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J].水土保持通报,2013,33(4):185-188.
- Zhang Xingling, Hu Xiasong. Shear characteristics of reinforced soil of herb roots in loess area of northeast Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(4):185-188.
- [28] 王文生,杨晓华,谢永利.公路边坡植物的护坡机理[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(4):26-30.
- Wang Wensheng, Yang Xiaohua, Xie Yongli. Mechanism of biotechnical protection for highway slope [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2005,25(4):26-30.
- [29] 程洪,谢涛,唐春,等.植物根系力学与固土作用机理研究综述[J].水土保持通报,2006,26(1):97-102.
- Cheng Hong, Xie Tao, Tang Chun, et al. Overview of mechanism of plant roots improving soil reinforcement and slope stabilization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(1):97-102.
- [30] Morel J L, Habib L, Plantureux S, et al. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability [J]. Plant & Soil, 1991,136(1):111-119.
- [31] Wang Yanguang, Liu Xiaoxia. Plant slope protection in highway engineering [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018,170(5):052038.
- [32] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273,298.
- Liu Junyang, Zhou Zhengchao, Su Xuemeng. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,34(3):267-273,298.

(上接第 145 页)

- [42] 张萍,哈斯额尔敦,杨一,等.小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙堆形态对沙源供给形式和丰富度的响应[J].中国沙漠,2015,35(6):1453-1460.
- Zhang Ping, Hasi Eerdun, Yang Yi, et al. Responses of nebkhas morphology to the mode and richness of sand supply [J]. Journal of Desert Research, 2015,35(6):1453-1460.
- [43] 谢国勋,罗维成,赵文智.荒漠草原带沙源及灌丛对灌丛沙堆形态的影响[J].中国沙漠,2015,35(3):573-581.
- Xie Guoxun, Luo Weicheng, Zhao Wenzhi. Effect of sand source and shrub features on nebkha morphological characteristics in desert steppe [J]. Journal of Desert Research, 2015,35(3):573-581.
- [44] 党晶晶.荒漠草地合头草枝系构型与个体大小之间关系的探讨[D].甘肃兰州:西北师范大学,2015.
- Dang Jingjing. Analysis of the relationship between branch in garchitecture and individual size of desert plants, *Sympegma regelii* [D]. Lanzhou, Gansu: Northwest Normal University, 2015.
- [45] 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.
- Zuo Hejun, Yang Yang, Zhang Hongfei, et al. Morphological characters of *Nitraria* dune in Gobi of Alxa [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1):263-269.