

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.010

浑善达克沙地 3 种典型灌丛固沙能力的比较研究

董雪, 郝玉光*, 辛智鸣, 段瑞兵, 张冉浩, 马媛, 刘芳

(中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: [目的] 研究荒漠草原区出现灌丛化现象后, 灌丛沙堆在退化生态系统中发挥的保育功能和防风固沙作用。[方法] 该研究以浑善达克沙地 3 种典型荒漠草原灌丛长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata*)、小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 和狭叶锦鸡儿 (*Caragana stenophylla*) 为研究对象, 通过测定分析 3 种灌丛形态参数、沙堆形态参数和灌丛下土壤颗粒分形维数, 探讨其沙堆形态发育和土壤颗粒组成特征, 以及与植物灌丛形态特性和固沙能力的关系。[结果] 表明: 3 种典型灌丛沙堆均为圆锥状, 其沙堆高度随沙堆半径的增加呈对数曲线增加, 即在沙堆形态较小时, 随着沙堆半径的增大, 沙堆高度增加较快, 而随着沙堆底面积不断增大, 沙堆高度变化就会趋于稳定且增加速度降低, 整个沙堆在水平方向的延伸速度大于垂直方向; 沙堆形态参数之间以及与灌丛形态参数间表现出显著相关性, 随着灌丛地上生物量的增加, 沙堆高度、半径、底面积和体积均呈显著增加 ($P < 0.05$), 3 种灌丛沙堆体积和固沙率差异性显著 ($P < 0.05$), 表现为: 小叶锦鸡儿 > 狭叶锦鸡儿 > 长柄扁桃; 灌丛使降尘等细颗粒物拦截或聚集在灌丛下, 土壤颗粒分形维数与粒径 ($< 0.1 \text{ mm}$) 颗粒含量呈显著的线性正相关关系; 不同物种灌丛下土壤分形维数差异性显著 ($P < 0.05$), 表现为: 小叶锦鸡儿 (2.346) > 狭叶锦鸡儿 (2.259) > 长柄扁桃 (2.149) > 裸沙地 (2.057)。[结论] 灌丛越大, 沙堆体积越大, 灌丛下沉积细物质越多, 土壤分形维数越大, 植物固沙能力越强。

关键词: 草原灌丛化; 固沙能力; 土壤分形维数; 形态特征

中图分类号: S727.23

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)01-0076-08

全球气候变暖、温室气体增加以及人类过度放牧、开垦草原导致干旱、半干旱区发生草原灌丛化已成为一种普遍现象, 促使植被组成由草本向灌木转变^[1-6]。原植被生态系统的结构和功能发生改变已成为全球干旱半干旱地区面临的重要生态问题^[7-8]。草原灌丛化造成草本盖度减少, 裸地面积增加, 当有风沙流经过时, 灌丛能发挥防风固沙作用形成灌丛沙堆, 进而塑造了草原区典型的风沙堆积地貌^[9]。不同物种灌丛形态结构差异塑造的灌丛沙堆形态特征明显不同, 灌丛沙堆各形态参数之间以及与灌丛发育特征参数之间有很好的相关性^[10-12]。因此植被类型、灌丛大小^[12-14]、沙源和风力条件^[14-15]是决定

灌丛沙堆发育速度和形态特征的关键因素^[15-17]。灌丛不仅可以降低风速, 拦截风沙流中的沙物质后沉积在灌丛下, 减轻风沙侵蚀^[9], 使沙物质颗粒重新分配, 改变灌丛下土壤分形维数, 从而采用土壤分形维数也可以作为灌丛固沙能力大小的评价指标之一。总之, 在外界环境相同的条件下, 植被类型成为决定性因素, 不同植被类型固沙能力以及形成的沙堆形态不同。本研究选择内蒙古东部荒漠草原区浑善达克沙地上广泛分布的长柄扁桃、小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿 3 种典型灌木为对象, 测定了 3 种植物不同大小灌丛形态参数、沙堆形态参数及灌丛下土壤颗粒组成特征, 研究荒漠草原区出现灌丛化现

收稿日期: 2019-04-01 修回日期: 2019-06-24

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2016YFC0500904)

* 通讯作者: 郝玉光, 研究员, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究工作。E-mail: hyuguang@163.com

象后,灌丛沙堆在退化生态系统中发挥的保育功能和防风固沙作用。

1 材料和方法

1.1 研究区自然条件

研究区位于浑善达克沙地西缘苏尼特右旗境内,属于典型的干草原向荒漠草原过度地段,地理位置为 112.42° E, 42.56° N, 海拔 1 238 m。为中温带大陆性季风气候,年平均气温 4.3 °C;年平均降水量 185 mm,降水量分配不均匀,主要集中在植物生长季 6—8 月;潜在蒸发量 2 400 mm;年平均风速 5.5 m·s⁻¹,主要盛行西北风,大风日数可达 50~80 d。该区风沙活动强烈,土壤类型以覆沙的棕钙土为主,广泛形成了灌丛化荒漠草原景观,斑块状分布着长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata* Pall.)、小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla* Lam) 和狭叶锦鸡儿 (*Caragana stenophylla* Pojark) 3 种典型灌木,草本植物主要以无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica* (Roshev.) Ohwi)、小针茅 (*Stipa klemenzii* Roshev)、冷蒿 (*Artemisia frigida* Willd)、沙生冰草 (*Agropyron desertorum* (Fisch.) Schult)、蒙古葱 (*Allium mongolicum* Regel) 为主。

1.2 试验方法

试验于 2018 年 8 月,选择浑善达克沙地荒漠草原灌丛化明显的区域,植被总盖度 12% 左右,主要以长柄扁桃、小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿 3 种灌木类型为主形成的天然植被群落,每种植物分别选取大小具有梯度性且外形均匀一致的 10 个独立单株灌丛作为研究对象,所选灌丛周围 3~5 m 半径范围内均无其它灌木植被。测量每种植物灌丛的高度 (H)、冠幅 (C),沙堆高度 (H_d)、长度 (L_d)、宽度 (W_d) 并计算沙堆的半径 (R)、沙堆坡角 (α)、沙堆底面积 (S_d) 和沙堆体积 (V);依据沙堆体积 (V) 和地上生物量整丛砍掉称质量 (W) 计算灌丛单位鲜质量固沙量,即固沙率 (V_d)。以灌丛基部为中心,0.25 倍冠幅为半径的同心圆边缘分东南西北 4 个方向进行土壤分层采样,取样深度分 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 共 6 层,同时采集裸沙地土壤作对照。将相同层次土壤样品混合,带回实验室用于粒径分析。将每种植物 10 个灌丛的特性指标、沙堆的特性指标和灌丛下土壤分形维数取平均值作为

评价该种的防风固沙特性。

$$\begin{aligned} S_d &= 1/4 \times \pi \times L_d \times W_d \\ V &= 1/12 \times \pi \times L_d \times W_d \times H_d \\ V_d &= V/W \end{aligned}$$

土壤粒径分布采用土壤粒子特性分析系统 (Eyetechn, 荷兰) 测定不同粒径下土壤颗粒的体积含量,并计算各粒级范围的土壤颗粒体积百分含量。土壤颗粒分形维数按照 Tyler 等^[18] 提出的用粒径的体积分布表征的土壤分形模型来计算。即:

$$\left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} = \frac{V(r < R_i)}{V_T}$$

式中: r 表示测量土粒直径, R_{\max} 为最大粒级土粒的直径, $V(r < R_i)$ 为粒径小于 R_i 的累积土粒体积, V_T 为土壤各粒级体积的总和, D 是土壤颗粒分布分形维数。计算方法为:

首先求出土壤样品不同粒径 (R_i) 的体积比对数 $\lg \left[\frac{V(r < R_i)}{V_T} \right]$ 和粒径比对数 $\lg \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)$ 。然后以前者为纵坐标、后者为横坐标作散点图并进行线性拟合,拟合后的直线回归方程的斜率 $K=3-D$, 求出土壤颗粒的分形维数 D 。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析,对不同物种的灌丛形态指标和沙堆形态指标的平均值进行单因素方差分析,采用 LSD 多重比较进行灌木类型间和土层间土壤颗粒分形维数的差异显著性检验。通过回归曲线找出 3 种典型灌丛和沙堆发育形态的特征关系,并对 3 种典型灌丛沙堆形态特征、固沙能力与灌丛大小进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 3 种典型灌丛及其沙堆的形态特征

浑善达克沙地 3 种典型灌木形成的沙堆均为近圆锥状,沙堆底面近似圆形。沙堆上植被盖度在不同物种间无明显差异,但由于物种间灌丛形态差异,造成物种间地上生物量有明显差异 ($P < 0.05$) (见表 1)。3 种植物灌丛半径、灌丛高度、沙堆坡角、沙堆体积和固沙率各指标间存在显著差异 ($P < 0.05$)。长柄扁桃和狭叶锦鸡儿沙堆半径显著小于小叶锦鸡儿 ($P < 0.01$),但它们两者间差异不显著 ($P > 0.05$),小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿的沙堆高度显著小于长柄扁桃 ($P < 0.01$),但它们两者间差异不显

表1 3种典型灌丛及其沙堆形态特征

Table 1 Morphological parameters of three typical shrubs and nabkha

植物种 Plant species	地上生物量 Above-ground biomass/g	灌丛半径 Shrub radius/cm	灌丛高度 Shrub height/cm	沙堆高度 Nabkha height/cm	沙堆半径 Nabkha radius/cm	沙堆坡角 Nabkha slope angle/°	沙堆体积 Nabkha volume/m ³	固沙率 Rate of sand-fixation/ (cm ³ ·g ⁻¹)
长柄扁桃 <i>A. pedunculata</i>	977.67±61.80a	51.78±10.02c	43.31±9.25a	18.01±3.31a	53.246±15.02b	18.677±2.02a	0.35±0.02c	35.86±11.08c
小叶锦鸡儿 <i>C. microphylla</i>	400.67±22.31b	67.16±18.32a	35.35±5.32b	12.78±3.39b	71.606±20.39a	10.119±1.24c	0.72±0.05a	180.15±46.82a
狭叶锦鸡儿 <i>C. stenophylla</i>	467.01±39.87c	57.75±12.09b	26.54±4.98c	13.60±3.08b	56.058±13.87b	13.980±1.35b	0.65±0.03b	138.26±30.14b

注: 同列不同字母表示灌木间在0.05水平存在显著性差异。

Note: Different letters in the same column indicated that there was a significant difference between shrubs at the level of 0.05.

著 ($P>0.05$)。地上生物量和灌丛高度均表现为: 长柄扁桃>小叶锦鸡儿>狭叶锦鸡儿, 灌丛半径和沙堆半径均表现为: 小叶锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>长柄扁桃, 沙堆坡角和沙堆高度均表现为: 长柄扁桃>狭叶锦鸡儿>小叶锦鸡儿。小叶锦鸡儿、狭叶锦鸡儿和长柄扁桃沙堆体积分别为 $0.72\pm 0.05\text{ m}^3$ 、 $0.65\pm 0.03\text{ m}^3$ 和 $0.35\pm 0.02\text{ m}^3$, 固沙率分别为 $180.15\pm 46.82\text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $138.26\pm 30.14\text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $35.86\pm 11.08\text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$, 因此3个物种间固沙能力差异性显著 ($P<0.05$), 小叶锦鸡儿最大, 狭叶锦鸡儿次之, 长柄扁桃最小。

2.2 3种典型灌丛与沙堆的发育特征

从图1A可以看出, 小叶锦鸡儿和长柄扁桃的灌丛高度与灌丛半径呈极显著幂函数递增 ($P<0.01$), 狭叶锦鸡儿呈显著线性函数递增 ($P<0.05$), 3种植物灌丛水平尺度的延伸速度均大于垂直尺度的生长速度。小叶锦鸡儿灌丛半径的扩展快于长柄扁桃和狭叶锦鸡儿。由图1B可知, 3种典型灌丛沙堆高度都随沙堆半径的增大呈现对数曲线增大, 即在沙堆形态较小时, 随着沙堆半径的增大, 沙堆高度增加较快, 而随着沙堆底面积不断增大, 沙堆高度变化就会趋于稳定且增加速度降低。3种典型灌丛沙堆的水平尺度的延伸速度均大于垂直尺度的生长速度, 小叶锦鸡儿沙堆半径的扩展快于长柄扁桃和狭叶锦鸡儿。由图1C可知, 随着3种典型灌丛半径的增加, 沙堆半径呈极显著线性增加 ($P<0.01$), 说明沙堆水平尺度的发育受到灌丛水平发育的制约, 小叶锦鸡儿沙堆半径随灌丛半径增加的直线斜率大于狭叶锦鸡儿和长柄扁桃, 说明随着灌丛在水平尺度的扩展, 小叶锦鸡儿沙堆在水平方向发育速度最快, 其次为狭叶锦鸡儿, 长柄扁桃最慢。由图1D可知, 随着灌丛高度的增加, 狭叶锦鸡儿

的沙堆高度呈现显著线性增加 ($P<0.01$), 这表明灌丛高度发育决定了沙堆高度发育, 而小叶锦鸡儿和长柄扁桃的灌丛高度与沙堆高度呈极显著幂函数递增 ($P<0.01$)。

2.3 3种典型灌丛地上生物量不同决定沙堆形态特征和植物固沙能力的差异

由表2相关分析可知, 除长柄扁桃地上生物量与沙堆高度呈显著正相关 ($P<0.05$), 与固沙率呈正相关, 但未达到显著水平外 ($P>0.05$), 狭叶锦鸡儿地上生物量与固沙率呈显著正相关关系 ($P<0.05$) 外, 3种典型灌丛大小与沙堆高度、沙堆半径、沙堆底面积、沙堆体积和固沙效率均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 这表明灌丛地上生物量越大固定的沙堆越大, 固沙率越高。3种典型灌木相比, 随着灌丛增大其地上生物量增加, 小叶锦鸡儿固定沙堆体积和固沙率最大, 其次为狭叶锦鸡儿, 长柄扁桃最小。灌丛地上生物量与长柄扁桃沙堆坡角呈极显著负相关 ($P<0.05$), 与狭叶锦鸡沙堆坡角呈负相关 ($P>0.05$), 仅与小叶锦鸡儿沙堆坡角呈正相关 ($P>0.05$)。这些结果说明, 小叶锦鸡儿的固沙能力更强。

2.4 3种典型灌丛土壤颗粒分形维数变化特征

由图2可知, 土壤分形维数与各粒级土壤颗粒体积百分含量的相关分析表明: 分形维数与黏粒 ($r<0.002\text{ mm}$)、粉沙 ($0.002\text{ mm}<r<0.05\text{ mm}$) 和极细沙 ($0.05\text{ mm}<r<0.1\text{ mm}$) 百分含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与细沙 ($0.1\text{ mm}<r<0.25\text{ mm}$) 百分含量呈极显著负相关 ($P<0.01$), 但是与中沙 ($0.25\text{ mm}<r<0.5\text{ mm}$)、粗沙 ($0.5\text{ mm}<r<1\text{ mm}$) 和极粗沙 ($1\text{ mm}<r<2\text{ mm}$) 百分含量关系不显著 ($P>0.05$)。综上所述, 土壤分形维数大小主要是由粒径小于 0.25 mm 的各粒级土壤颗粒体积百分含量决定, 而 0.1 mm

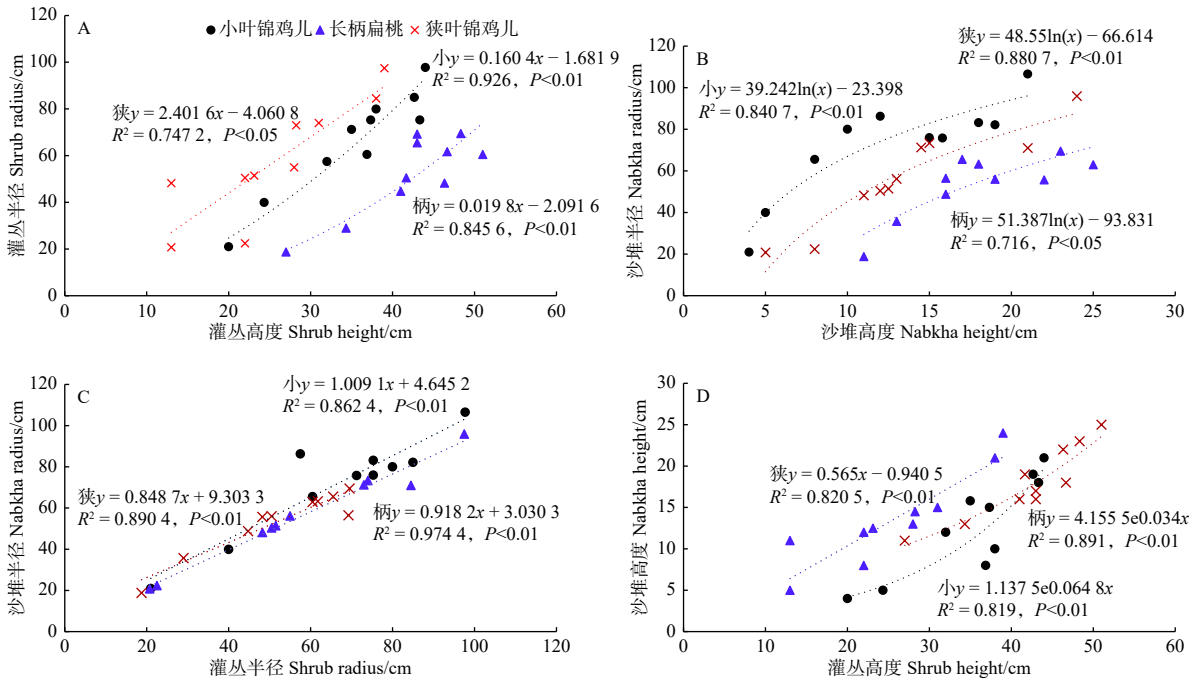


图 1 灌丛与沙堆的发育特征

Fig. 1 The developmental characteristics of shrubs and nabkhas

表 2 3 种典型灌木沙堆形态特征、固沙能力与灌丛大小的相关分析

Table 2 The correlation analysis of nabkhas morphology and sand-fixing capacity with shrubs magnitude

地上生物量 Above-ground biomass	灌丛高度 Shrub height	灌丛半径 Shrub radius	沙堆高度 Nabkha height	沙堆底面积 Nabkha basal area	沙堆体积 Nabkha volume	沙堆半径 Nabkha radius	固沙率 Rate of sand-fixation	沙堆坡角 Nabkha slope angle
长柄扁桃 <i>A. pedunculata</i>	0.862**	0.998**	0.670*	0.945**	0.808**	0.948**	0.568	-0.774 **
小叶锦鸡儿 <i>C. microphyll</i>	0.977**	0.983**	0.874**	0.856**	0.852**	0.890**	0.846**	0.409
狭叶锦鸡儿 <i>C. stenophylla</i>	0.895**	0.966**	0.933**	0.896**	0.814**	0.960**	0.737*	-0.362

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 significant difference at the level of 0.05; ** indicates a significant difference at the level of 0.01.

的颗粒是分形维数变化的分界粒径, 即土壤中小于 0.1 mm 的细颗粒物含量越多, 土壤分形维数越高。

3 种典型灌木高度不同、枝条疏密度不同, 造成对过境风速的降低程度不同, 因此沉积到灌丛下的土壤颗粒组成不同, 造成不同物种灌丛下土壤 0~60 cm 土层深度的土壤分形维数存在显著差异 ($P < 0.01$), 且各土层间差异性也显著 ($P < 0.05$)。如图 3 所示, 3 种典型灌木灌丛下 0~60 cm 土层深度土壤分形维数平均值在 2.149~2.346 之间, 显著大于裸沙地土壤分形维数 2.057。3 种植物灌丛下土壤分形维数随着土层深度的增加呈下降趋势, 由多重比较结果可知, 同一物种 0~10、10~20 和 20~30 cm 各土层间的土壤分形维数差异均显著 ($P < 0.05$), 随

着土层深度的增加, 差异性减弱表现为 30~40、40~50 和 50~60 cm 各土层间的土壤分形维数差异不显著 ($P > 0.05$)。总体上由高到低依次为小叶锦鸡儿 (2.346) > 狭叶锦鸡儿 (2.259) > 长柄扁桃 (2.149) > 裸沙地 (2.057)。

3 讨论

前期研究结果表明, 在风力作用下, 植物与沙源相互作用形成灌丛沙堆 [12-15]。影响灌丛沙堆形态发育的主要环境因子有风况、沙源、植被特性等 [19-20]。本实验研究区位于内蒙古高原荒漠草原区, 采样地为浑善达克沙地西缘, 沙源充足, 风力强劲, 因此, 灌丛种类、结构和大小是影响灌丛沙堆形态特征以及决定灌丛固沙能力的主要因子。由

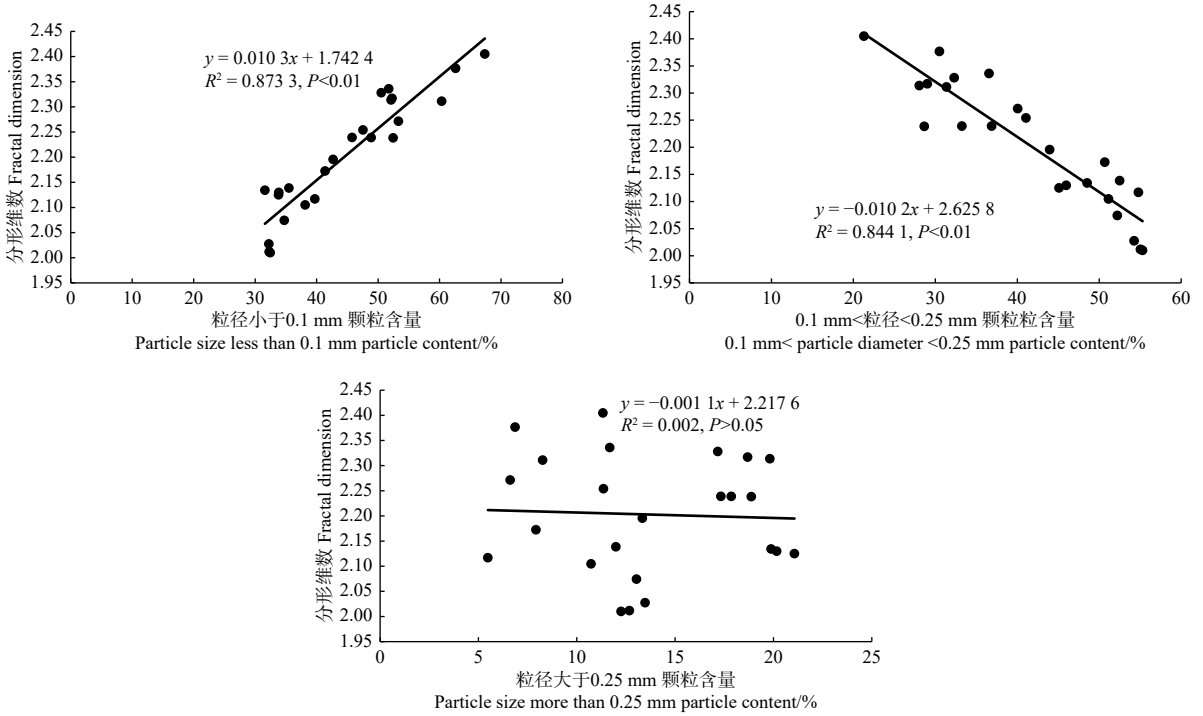
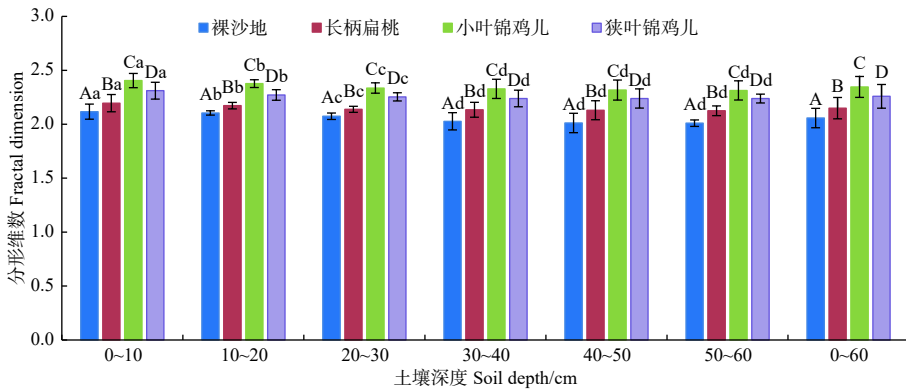


图2 土壤颗粒分形维数与土壤各粒级颗粒百分含量的关系

Fig. 2 The relationship between soil fractal dimension and soil each fraction grain percentage



不同大写字母表示同一土层不同典型灌木之间的显著性差异，而不同小写字母表示同一典型灌木不同土层之间的显著性差异 ($P < 0.05$)。

Different capital letters indicate significant differences among vegetation types in the same soil layer, while different normal letters indicate significant differences at 0.05 level among soil layers within the same vegetation type.

图3 不同灌木类型灌丛下土壤分形维数的垂直分布变化

Fig. 3 Vertical distribution of soil fractal dimension under different shrub types

于植物种类和灌丛大小的不同造成地上生物量差异性显著，灌丛沙堆的体积和灌丛固沙能力有所差异^[19-21]。本研究结果表明，3种典型灌丛沙堆均为圆锥形，沙堆半径与灌丛半径、沙堆高度与灌丛高度均呈显著正相关，因此3种植物的灌丛沙堆水平尺度由灌丛冠幅控制，垂直尺度由灌丛高度控制。在风力作用下沙源主要围绕枝条形成灌丛沙堆，地上生物量和灌丛疏密度对灌丛沙堆的建成起决定作

用。长柄扁桃枝条最长且粗壮，侧向分枝较少，风沙以老枝干为中心形成沙堆，较高的灌丛导致沙堆垂直尺度较大，沙堆高度显著大于小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿。狭叶锦鸡儿灌丛最矮小且枝条紧密，灌丛沙堆的半径和高度相关性极显著，相关系数大于其它两种植物，表明沙堆的水平尺度和垂直尺度成比例均衡发展。小叶锦鸡儿在沙埋作用下不断长出不定根后生长为新的枝条，侧向扩展形成水平尺度

较大而高度较低的灌丛沙堆,因此沙堆坡角最小且显著小于其它两种植物。随着灌丛地上生物量的增加,沙堆底面积和沙堆高度也增大,因此沙堆体积增大,同一物种大灌丛表现出的固沙能力更强。3种植物的灌丛直径均远远大于灌丛高度,其冠幅生长速率大于株高生长表现为沙堆向水平方向扩展的速度快于向垂直方向扩展速度,同种灌丛植物由小到大,灌丛沙堆更趋向于向水平方向的发育延伸^[22-24],长柄扁桃沙堆坡角与灌丛地上生物量呈显著负相关关系,即灌丛越大,坡角越小。总体来说,3种典型灌丛的沙堆体积和固沙率差异性显著,固沙能力表现为:小叶锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>长柄扁桃。

一般而言,沙物质分选性越好,其颗粒分形维数越大,反之越小,因此分形维数能很好地反映地表风蚀程度^[25-27]。由此可知,有植被覆盖的地表,分形维数较大,风蚀程度较小,因此植物措施具有很明显的防风固沙作用^[15,28-30]。土壤分形维数越大,土壤中所含的黏粉粒含量越多,而沙粒含量越少^[30]。分形维数能够很好地反映地表风蚀程度与土壤结构状况^[31-32],从而可以评价植物拦截风沙后形成灌丛沙堆的固沙能力以及对土壤结构的改良作用。本研究结果表明同一物种灌丛下土层间在一定深度范围内(30~60 cm)对土壤分形维数的影响不大,而不同物种对土壤分形维数的影响差异性显著。与裸沙地相比,3种植物灌丛下土壤分形维数显著增大,因此植物可以充分发挥防风固沙作用。不同物种由于灌丛高度和形态结构差异,对风沙拦截能力不同,因此灌丛下土壤颗粒组成不同。通过相关分析得出决定土壤分形维数大小的主要是粒径小于0.25 mm的各粒级土壤颗粒体积百分含量,而大于0.25 mm颗粒土壤体积百分含量对分形维数影响程度相对较小,其中0.1 mm粒径是决定本研究区灌丛下土壤分形维数的临界粒径,即小于0.1 mm粒径的细颗粒含量越多,土壤分形维数越高,同时植物的固沙能力越强。前期研究结果显示,土壤分形维数不仅对土壤结构和养分含量会产生影响,且与植物生长的环境条件密切相关^[28-29]。在沙源一致的小尺度研究范围内,植物形态结构的差异是影响沙堆形态和沉积物质的关键因子,本研究结果显示,小叶锦鸡儿灌丛沙堆体积和固沙率最大,当有风沙流过境时,风速显著降低,灌丛下沉降下来的

细颗粒物含量显著高于狭叶锦鸡儿和长柄扁桃。灌丛下沉积下来的细颗粒物越多,土壤颗粒之间形成的微小孔隙越多,土壤结构具有明显优势,土壤分形维数越大^[32],灌丛固沙能力越强。因此,沙生植被区地表细颗粒物质的搬运、沉积过程以及沙粒的运移过程极大地影响土壤颗粒大小分形维数,灌丛在荒漠生态系统对降尘等细颗粒物拦截或聚集在灌丛下形成的灌丛沙堆可以充分发挥防风固沙作用,所以土壤颗粒分形维数可以作为评价植物固沙的定量指标之一。

4 结论

荒漠草原区3种典型灌木沙堆高度随着沙堆半径呈对数曲线增加,由于3种植物均属于低矮灌木类型,其灌丛水平延伸速度远远大于垂直生长速度,且灌丛较小时灌丛高度增长较快,随着灌丛的生长,灌丛高生长减慢且渐趋于稳定,沙堆的高度受灌丛高度控制,沙堆的半径受灌丛冠幅的控制,因此沙堆生长发育受灌丛形态参数的影响,随着沙堆底面积的增大,沙堆高度增加的幅度减弱。3种植物地上生物量与沙堆高度、底面积、体积和固沙率(除长柄扁桃外)均呈显著正相关关系,即灌丛越大,其沙堆体积也越大,固沙率就越高。3种植物固沙能力差异性显著,表现为:小叶锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>长柄扁桃。不同植物对捕获风沙流和防风固沙的能力不同,其灌丛下土壤颗粒分形维数存在显著差异,表现为:小叶锦鸡儿(2.346)>狭叶锦鸡儿(2.259)>长柄扁桃(2.149)>裸沙地(2.057),从而验证了植物灌丛下土壤分形维数越大,其具有的防风固沙能力越强。0.1 mm粒径作为浑善达克沙地土壤分形维数变化的临界值,小于该粒径的细颗粒物体积百分含量越大,土壤颗粒的分形维数越大,反之,则越小。

参考文献:

- [1] Molelele N M, Ringrose S, Matheson W, *et al.* More woody plants? the status of bush encroachment in Botswana's grazing areas[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(1): 3-11.
- [2] Yu M, Ellis J E, Epstein H E. Regional analysis of climate, primary production, and livestock density in Inner Mongolia[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(5): 1675-1681.
- [3] Yanoff S, Esteban M. Grassland-shrubland transformation and grazing: A century-scale view of a northern Chihuahuan Desert grass-

- land[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(9): 1594-1605.
- [4] Maestre F T, Bowker M A, Puche M D, *et al.* Shrub encroachment can reverse desertification in semi-arid Mediterranean grasslands[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(9): 930-941.
- [5] Lunt I D, Winsemius L M, McDonald S P, *et al.* How widespread is woody plant encroachment in temperate Australia? Changes in woody vegetation cover in lowland woodland and coastal ecosystems in Victoria from 1989 to 2005[J]. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(4): 722-732.
- [6] Schulze E D, Harrison S P, Heimann M, *et al.* Global Biogeochemical Cycles in the Climate System[M]. San Diego: Academic Press, 2001: 115-137.
- [7] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, *et al.* Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: towards a global synthesis[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(7): 709-722.
- [8] Howard K, Eldridge D J, Soliveres S. Positive effects of shrubs on plant species diversity do not change along a gradient in grazing pressure in an arid shrubland[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2012, 13(2): 159-168.
- [9] 岳兴玲, 哈 斯, 庄严美, 等. 沙质草原灌丛沙堆研究综述[J]. *中国沙漠*, 2005, 16(4): 360-363.
- [10] El-Bana M I, Nijs I, Kockelbergh F. Microenvironmental and vegetational heterogeneity induced by phytogenic nabkhas in an arid coastal ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, 247(2): 283-293.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 武胜利, 李志忠, 惠 军, 等. 和田河流域灌(草)丛沙堆的形态特征与发育过程[J]. *地理研究*, 2008, 27(2): 314-322.
- [14] Mountney N P, Russell A J. Coastal aeolian dune development, Sólheimasandur, southern Iceland[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 192(3-4): 167-181.
- [15] Langford R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, USA[J]. *Journal of Arid Environment*, 2000, 46(1): 25-41.
- [16] Khalaf F I, Misak R, Al-Dousari A. Sedimentological and morphological characteristics of some of nabkha deposits in the northern coastal plain of Kuwait, Arabia[J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 29(3): 267-292.
- [17] Tengberg A, Faso B. A comparative analysis of nabkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. *Geomorphology*, 1998, 22(2): 181-192.
- [18] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362-369.
- [19] Hesp P A, McLachlan A. Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* nabkha dunes[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(2): 155-172.
- [20] Hesp P. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics[J]. *Geomorphology*, 2002, 48(1-3): 245-268.
- [21] 刘 冰, 赵文智, 杨 荣. 荒漠绿洲过渡带怪柳灌丛沙堆特征及其空间异质性[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1446-1455.
- [22] 韩 磊, 张媛媛, 马成仓, 等. 狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)灌丛沙堆形态发育特征及固沙能力[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1305-1309.
- [23] 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.
- [24] 高 永, 党晓宏, 虞 毅, 等. 乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 1-7.
- [25] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. *土壤学报*, 2002, 39(6): 877-881.
- [26] 齐雁冰, 常庆瑞, 惠天河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 566-569.
- [27] 王淮亮. 基于数字图像处理的风蚀地表颗粒特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [28] 高亚军. 陕北农牧交错带土地荒漠化演化机制及土壤质量评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [29] 邹 诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J]. *生态农业科学*, 2008, 24(12): 424-427.
- [30] 刘小平, 董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞试验研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 82-87.
- [31] 张世熔, 邓良基, 周 倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. *土壤学报*, 2002, 39(2): 221-226.
- [32] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 71-74.

Comparative Study on Sand-fixing Capability of Three Typical Shrubs in Otindag Sandy Land

DONG Xue, HAO Yu-guang, XIN Zhi-ming, DUAN Rui-bing, ZHANG Ran-hao, MA Yuan, LIU Fang

(Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] To study the conservation function of shrubby sand piles in the degraded ecosystem and the function of preventing wind and fixing sand in the ecological environment management of semi-arid desert steppe. [Method] *Amygdalus pedunculata* Pall. *Caragana microphylla* Lam and *Caragana stenophylla* Pojark are three kinds of typical desert nabkhas distributed in Otindag sandy land. The shrub and nabkha morphological parameters of three kinds of brush and soil fractal dimension under the bushes were measured and analyzed to explore the relationship between morphological development and soil particle composition characteristics under the bushes and shrub morphological features and sand-fixation ability. [Result] The results showed that the three kinds of typical shrubs were conical. Nabkha height increased in logarithmic curve line with the increase of nabkha radius. At the early stages the nabkha height grew fast with nabkhas radius increasing and then gradually turned to be stable when the bottom sand area increased. The speed of nabkha extension in horizontal direction was faster than that in vertical direction. There was a significant correlation between the morphological parameters of nabkha and shrub. With the increase of aboveground biomass, the height, radius, bottom area and volume of nabkhas significantly increased ($P < 0.05$). Significant differences were found in volume and sand-fixing capability among the three kinds of shrubs, which were in the order of *C. microphylla*, *C. stenophylla* and *A. pedunculata*. The roles of shrub in fertile island formation were weakened by frequent wind erosion. The distribution of soil fractal dimension showed a significant positive correlation with proportion content of < 0.1 mm diameter grains. The dustfall and other particles were intercepted or deposited under the thickets, the soil fractal dimension differed significantly among different species ($P < 0.05$), followed the order of *C. microphylla* (2.346) $>$ *C. stenophylla* (2.259) $>$ *A. pedunculata* (2.149) $>$ bare sandy (2.057). [Conclusion] The larger the thickets is, the larger the volume of nabkha and the more the fine particles deposited under the brush. The bigger the soil fractal dimension is, the stronger the sand-fixing capacity of plants is.

Keywords: shrub encroachment; sand-fixing capability; soil fractal dimension; morphology

(责任编辑: 彭南轩)