

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.

不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征

罗维成, 赵文智, 任珩, 刘冰

(中国科学院西北生态环境资源研究院 中国科学院临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 灌丛沙堆是干旱、半干旱区绿洲边缘常见景观类型, 在绿洲风沙防护及生物多样性保护方面有重要意义。本文对中国西北干旱区不同气候区常见的柽柳(*Tamarix chinensis*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)和柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)灌丛沙堆形态和养分积累特征进行了对比研究。结果表明: 柽柳灌丛沙堆高度、面积和体积显著高于泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛沙堆, 泡泡刺灌丛沙堆高度、面积和体积最小。3种灌丛的存在都显著增加了沙堆土壤有机质含量, 使灌丛沙堆成为“肥岛”, 其中柽柳灌丛沙堆“肥岛”效应最明显。柽柳灌丛沙堆土壤有机质、全碳、全氮和凋落物含量显著高于泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛沙堆。主要原因是柽柳枝条茂密, 拦截面积大且凋落物量大, 因此沙物质拦截和养分积累能力强于其他两种灌丛。另外, 不同气候区沙源和气象条件的差异也可能导致灌丛沙堆形态及养分积累特征不同。

关键词: 灌丛沙堆; 灌丛特性; 形态特征; 养分积累

文章编号: 1000-694X(2021)02-191-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00133

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

0 引言

灌丛沙堆是沙物质被植被阻拦后逐渐堆积形成的地貌类型, 在全世界干旱、半干旱区及半湿润地区的荒漠及海岸带大面积分布^[1-2]。通常, 灌丛沙堆发育主要有3个阶段: 成长阶段、稳定阶段和退化阶段^[3-4]。在成长阶段, 沙物质供应充足, 灌丛沙堆侵蚀速度低于堆积速度, 沙堆高度和宽度呈正比例增长; 随着沙物质减少, 灌丛沙堆侵蚀量和堆积量达到平衡状态, 其大小不再显著变化, 达到稳定阶段; 在发育后期, 随着沙物质和土壤水分含量的持续减少, 灌丛植被开始退化, 沙堆侵蚀速度大于堆积速度, 灌丛沙堆进入退化阶段^[4-5]。

植被是灌丛沙堆形成的必要条件, 灌丛沙堆是沉积物遇到植被拦截后沉积形成的, 当其依附的植被死亡后, 灌丛沙堆也会随之退化消失^[5]。因此, 灌丛特性对灌丛沙堆的形态特征和养分积累都有重要影响。在外界条件相同的情况下, 不同类型灌丛形成的灌丛沙堆差异很大, 通常多年生灌木形成

的灌丛沙堆较为高大; 而一年生或者矮小的植物常常形成体积较小的灌丛沙堆^[6-7]。灌丛植被盖度和高度都与灌丛沙堆体积之间存在明显的正相关关系, 灌丛沙堆体积随着灌丛植被冠幅和高度的增加显著增大^[8]。因此, 冠幅较大且呈球状的植被能形成较大的灌丛沙堆, 而冠幅较小且呈锥状的植被形成的灌丛沙堆较小^[9-10]。灌丛生长状况也和灌丛沙堆形态特征有直接关系, 灌丛生长状况越好则灌丛沙堆高度、体积和面积也随之增大; 反之, 灌丛生长状况越差则灌丛沙堆高度、体积和面积也减小^[11]。这说明, 灌丛对沙堆的形成有明显的控制作用^[12-14]。

灌丛沙堆的形成过程也是灌丛植被和风沙活动相互作用的过程, 灌丛沙堆养分来源主要有三方面: 一是沙物质中的养分被灌丛拦截后累积^[15]; 二是灌丛沙堆中灌丛凋落物的分解和积累^[16]; 三是灌丛沙堆中动物残体及排泄物分解后导致养分积累^[17-18]。灌丛特性会直接影响沙物质的拦截、凋落物堆积及沙堆中土壤动物的分布, 因此也会对灌丛

收稿日期: 2020-09-15; 改回日期: 2020-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701600); 中国科学院“西部之光”西部青年学者B类项目; 国家重点研发计划专项(2017FY100200)

作者简介: 罗维成(1987—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副研究员, 主要从事荒漠植物生态学研究。E-mail: luoweicheng@lzb.ac.cn

通信作者: 赵文智(E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn)

沙堆养分积累过程产生重要影响^[18-20]。例如,当灌丛处于不同发育阶段时,灌丛沙堆养分积累也有显著差异^[19,21]。不同类型的灌丛对土壤养分积累也有明显差异^[22],古尔班通古特沙漠边缘的怪柳灌丛沙堆养分含量显著高于丘间低地,而梭梭不明显,主要原因是怪柳冠幅较大,沙物质拦截能力强于梭梭^[22-23]。同一种植物在不同生境中土壤养分积累程度也不一样,原因在于气候条件会对植被及土壤养分循环过程产生重大影响^[24]。

灌丛沙堆在中国西北干旱、半干旱荒漠区及荒漠-绿洲过渡带大面积分布,能够形成灌丛沙堆的主要灌丛植被类型有白刺(*Nitraria*)、怪柳(*Tamarix*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)和蒿类(*Artemisia*)等^[11,25-26]。这些灌丛沙堆不仅可以提高地表粗糙度、降低风速,还可以拦截流沙,是阻挡流沙迁移的重要屏障,对于保护荒漠草原及绿洲安全有重要意

义^[26-28]。近年来,受放牧、农田开垦及大型人工固沙植被建设等人类活动影响,灌丛沙堆景观受到严重破坏,导致其退化加速,因此灌丛沙堆保育迫在眉睫^[27]。而以前的研究主要集中在单一灌丛沙堆形态特征、空间格局及其形成演化过程等^[5,11,25]。对于不同气候区不同类型灌丛沙堆形态及养分积累特征对比性分析研究较少。因此,本研究的主要目的是研究不同气候区不同类型灌丛沙堆形态和养分积累特征,以期深入理解灌丛沙堆的形成和发育,为灌丛沙堆保育提供理论依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

根据不同类型灌丛沙堆的分布区域,选定了3个研究区域(表1)。

表1 不同类型灌丛沙堆取样点概况。

Table 1 Description of the simple sites with different nebkha types.

研究区域	灌丛类型	地理位置	纬度	经度	年降水量/mm	主要干扰
额济纳旗荒漠区	怪柳	巴丹吉林沙漠西缘	42°03'20.77"N	101°14'47.87"E	35	放牧、人工植被建设
临泽县荒漠绿洲区	泡泡刺	巴丹吉林沙漠西南缘	39°24'7.65"N	100°10'58.53"E	110	放牧、人工植被建设
杭锦旗周边荒漠区	柠条锦鸡儿	库布齐沙漠东北缘	40°44'42.73"N	108°32'37.67"E	258	放牧

额济纳旗荒漠区。该区位于巴丹吉林沙漠西缘(42°02'—42°25'N, 101°11'—101°26'E),属极强大陆性气候。多年平均气温8.7℃;年降水量约35 mm,降水集中在5—9月;年蒸发量约4 200 mm。地带性土壤为沙壤土及沙土。常见灌木植被有泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和怪柳(*Tamarix chinensis*);常见草本植物以雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)和白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)为主^[5]。

临泽县荒漠绿洲区。该区域位于巴丹吉林沙漠西南缘(39°19'—39°28'N, 100°07'—100°21'E),属于典型极端干旱气候。年均温度7.6℃;年降水量约110 mm,超过80%的降水集中在5—9月;年蒸发量约2 390 mm。地带性土壤为灰棕漠土。植被以沙生灌木和一年生草本植物为主,常见灌木包括泡泡刺、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、梭梭和怪柳;常见草本植物有雾冰藜和白茎盐生草^[29]。

杭锦旗周边荒漠区。该区域位于库布齐沙漠东北缘(40°28'—40°35'N, 108°37'—108°51'E),

属温带大陆性气候。年降水量258 mm,约65%的降水集中在6—8月;年蒸发量2 450 mm;年平均气温7.6℃。地带性土壤为棕钙土。常见灌木有柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)和油蒿(*Artemisia ordosica*),草本植物主要有沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)和蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)等^[30]。

1.2 研究方法

在每个研究区域调查点分别选择3个50 m×50 m的样方,每个样方随机选择12个灌丛沙堆进行调查,每个灌丛沙堆彼此独立,每个调查点共调查36个灌丛沙堆。对每个调查点灌丛沙堆的形态特征和土壤养分含量进行了调查。

灌丛沙堆形态特征:将每个灌丛沙堆视为独立的椭球体,分别用卷尺测量灌丛沙堆高度(H)、长轴长(L)和短轴长(W)。分别用公式 $[\pi(L \times W)/4]$ 和 $[\pi(L \times W \times H)/6]$ 计算灌丛沙堆面积(A)和体积(V)^[31]。物种丰富度(R)为灌丛沙堆上植物种类总数。

灌丛投影面积:是指灌丛正视图面积。首先对灌丛正视图进行拍照,随后图像在Photoshop中进行几何校正和裁剪后,利用魔棒工具提取灌丛投影区域;最后将提取后的图像导入ArcMap中,利用Tabulate Area工具进行区域分析,统计投影面积。

土壤凋落物含量:分别采集灌丛沙堆中部和丘间低地0—20 cm土壤样品,风干后挑出枯落物,烘干称重。

土壤养分含量:分别采集灌丛沙堆和丘间低地0—10 cm和10—20 cm深度土壤样品,风干后测量土壤有机质(SOM)、全碳(TC)、全氮(TN)和全磷(TP)。

1.3 数据分析

采用相对相互作用强度(RII: relative interaction intense)^[32]比较不同类型灌丛对灌丛沙堆土壤养分含量的影响。

$$RII = (X_n - X_i) / (X_n + X_i) \quad (1)$$

式中: X_n 和 X_i 分别表示灌丛沙堆内外不同深度土壤养分含量值。本研究中养分含量有有机质、全碳、全氮和全磷。RII值在1到-1之间,正值表示灌丛对该养分含量有提高效应,负值表示灌丛对该养分含量有降低效应,距离0值越远表示效应越大。

所有数据通过方差齐性检验后进行统计分析,利用单样本T检验分析每种灌丛土壤养分含量的RII与0值差异的显著性。利用Tukey's HSD多重比较方法检验各灌丛类型灌丛沙堆土壤养分含量之间的显著性。采用One-way ANOVA方差分析检验灌丛类型对灌丛沙堆形态特征的影响, $P>0.05$ 表示各灌丛类型间无差异。数据统计分析与作图采用SPSS 18.0及Origin Pro 8.0软件。

2 结果

2.1 不同类型灌丛沙堆形态特征

不同类型灌丛沙堆形态特征差异显著(表2)。怪柳灌丛沙堆高度、面积和体积显著大于泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛沙堆,泡泡刺灌丛沙堆和柠条锦鸡儿灌丛沙堆高度差异不显著,但是柠条锦鸡儿灌丛沙堆面积和体积显著大于泡泡刺灌丛沙堆。不同灌丛沙堆植物丰富度也有明显差异,柠条锦鸡儿灌丛沙堆植物丰富度最大,怪柳灌丛沙堆次之,泡泡刺灌丛沙堆最小。

表2 不同类型灌丛沙堆形态参数特征(平均值±标准误差)

Table 2 Morphological parameters of nebkhas with different types (Mean±SE)

形态参数	怪柳	泡泡刺	柠条锦鸡儿
高度/m	2.05±0.93 ^a	1.57±0.08 ^b	1.33±0.21 ^b
长度/m	9.15±0.56 ^a	6.35±0.41 ^b	6.70±0.88 ^b
宽度/m	9.40±0.68 ^a	4.62±0.41 ^b	7.18±0.76 ^c
面积/m ²	70.53±9.76 ^a	24.07±3.68 ^b	43.02±8.88 ^c
体积/m ³	98.72±15.40 ^a	24.69±3.21 ^b	45.54±12.36 ^c
物种丰富度	4.17±0.48 ^a	2.33±0.42 ^b	6.75±0.53 ^c

不同小写字母表示不同类型灌丛沙堆形态参数差异显著($P<0.05$)。

不同类型灌丛正视图投影面积差异显著(图1,2)怪柳灌丛投影面积最大,约为0.46 m²;柠条锦鸡儿次之,约为0.38 m²;泡泡刺投影面积最小,约为0.14 m²。

2.2 不同类型灌丛沙堆土壤养分积累特征

不同类型灌丛沙堆和丘间低地不同深度土壤主要养分含量有显著差异(图3)。怪柳灌丛沙堆表层0—10 cm土壤有机质、全碳和全氮含量都显著高于沙堆10—20 cm和丘间低地,而丘间低地0—10 cm

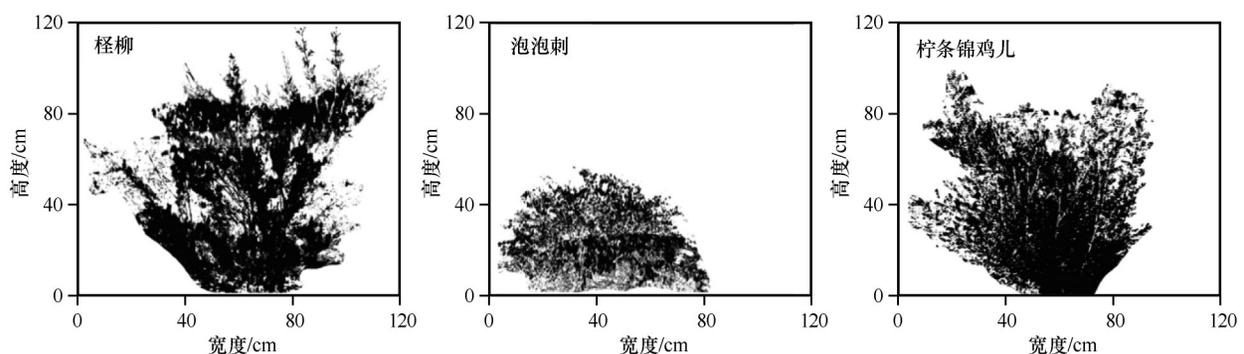
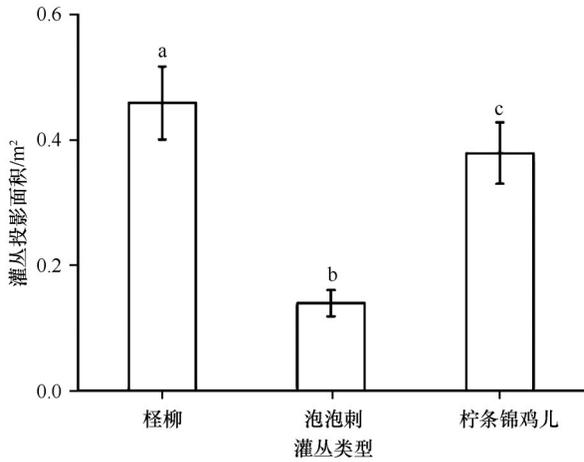


图1 不同类型灌丛投影

Fig.1 Frontal projections of different shrub types.



不同小写字母表示不同类型灌丛沙堆形态参数差异显著 ($P < 0.05$)

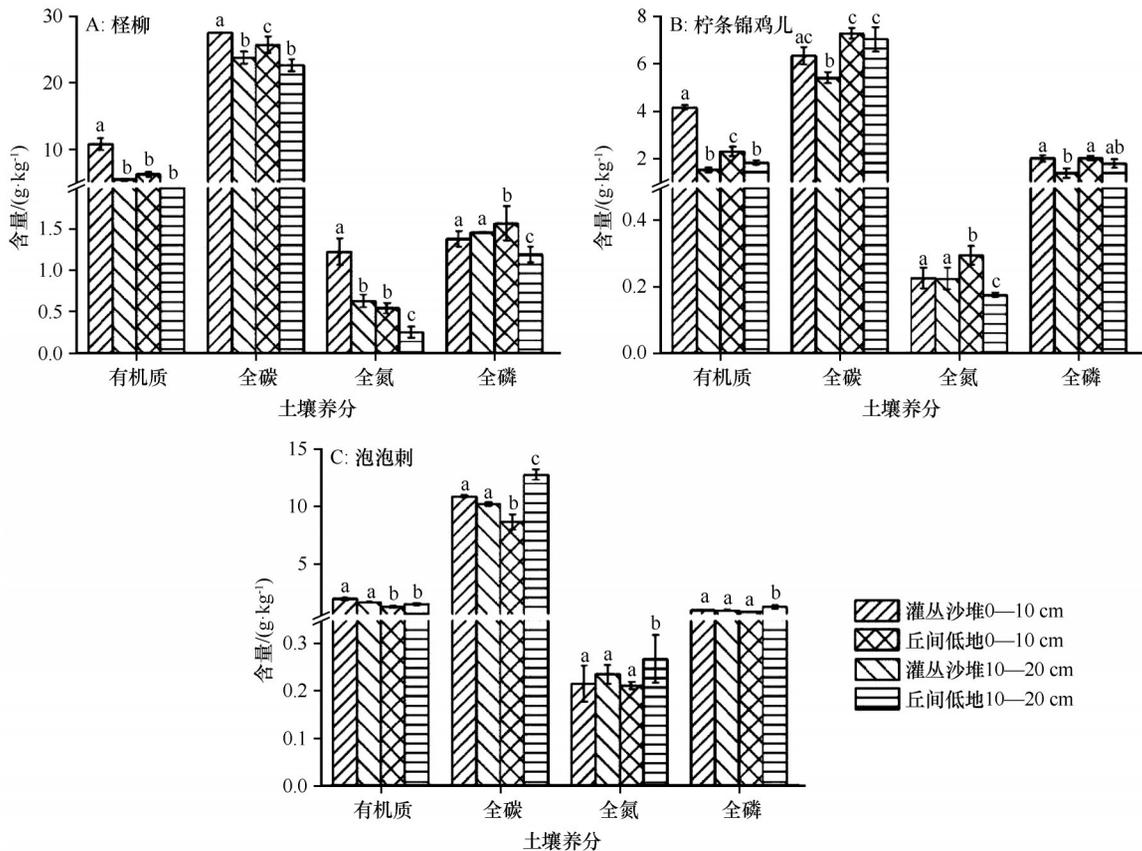
图2 不同类型灌丛投影面积

Fig.2 The frontal projections of different shrub types

土壤全磷含量最高。柠条锦鸡儿灌丛沙堆表层0—10 cm 土壤有机质含量显著高于沙堆10—20 cm 土壤有机质,而丘间低地0—10 cm 土壤全碳、全氮和

全磷含量显著高于灌丛沙堆。泡泡刺灌丛沙堆土壤有机质含量显著高于丘间低地,而全碳、全氮和全磷含量低于丘间低地。总体来看,柽柳灌丛沙堆有机质、全碳、全氮和全磷含量显著高于柠条锦鸡儿和泡泡刺沙堆。

不同灌丛对不同深度土壤养分含量有显著影响(图4)。柽柳灌丛对土壤有机质、全氮和全磷含量有显著正效应,对土壤全碳有显著负效应;泡泡刺灌丛对土壤有机质、全磷(0—10 cm)和全碳(0—10 cm)有显著正效应,对土壤全磷(10—20 cm)和全碳(10—20 cm)有显著负效应;柠条锦鸡儿灌丛对土壤有机质(10—20 cm)和全氮(10—20 cm)有显著正效应,对土壤有机质(10—20 cm)、全磷(10—20 cm)和全碳有显著负效应。从总效应来看,3种灌丛对沙堆土壤0—10 cm 土壤养分都有显著正效应,而除柽柳外,泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛对沙堆10—20 cm 土壤养分有显著负效应。



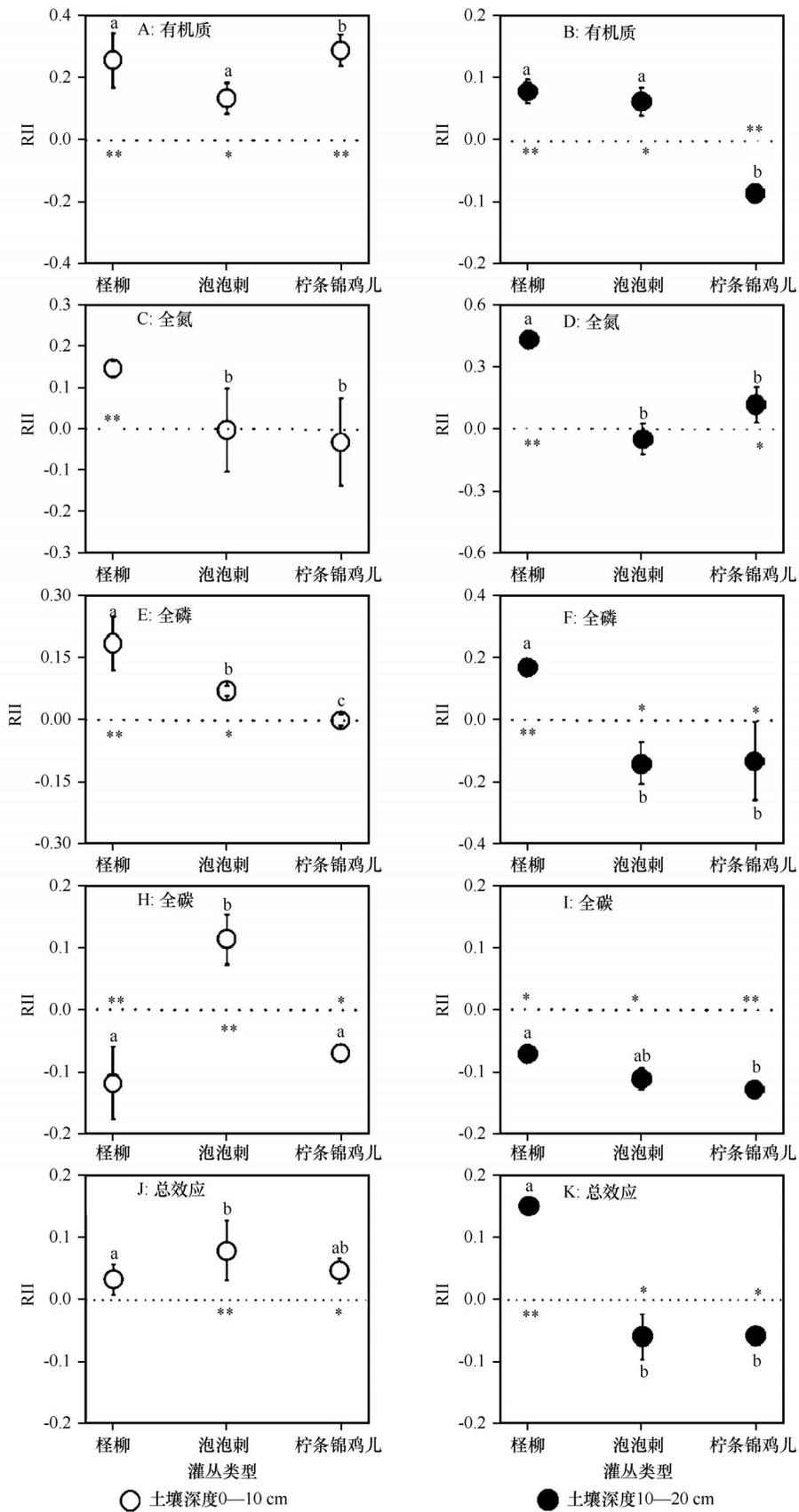
不同小写字母表示不同类型灌丛沙堆差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同类型灌丛沙堆土壤养分含量

Fig.3 Soil nutrient content of nebkha and inter-nebkha with different shrub types

不同类型灌丛沙堆土壤凋落物含量也有显著差异(图5)。3种灌丛对沙堆土壤凋落物含量均有

显著正效应,且柽柳和柠条锦鸡儿灌丛正效应明显高于泡泡刺。柽柳灌丛沙堆土壤凋落物含量显著



不同小写字母表示不同灌丛土壤养分含量差异显著, $P < 0.05$; *和**分别表示灌丛在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上显著影响不同深度土壤养分含量

图 4 不同类型灌丛对灌丛沙堆土壤养分的影响

Fig.4 Effect of shrubs on nutrient content of soil on different layers

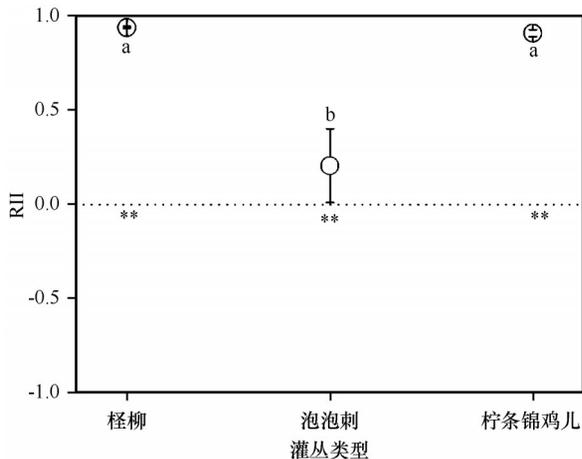


图5 不同类型灌丛对灌丛沙堆土壤凋落物含量的影响

Fig.5 Soil litter content of nebkhas with different shrub types

高于泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛沙堆,柽柳和柠条锦鸡儿灌丛沙堆土壤凋落物含量分别是泡泡刺灌丛沙堆的约14倍和11倍。

3 讨论

3.1 不同类型灌丛沙堆形态特征

灌丛沙堆基本的形态学指标被认为是用来进行区域沙漠化监测和评价的重要示量特征^[33]。沙源条件、灌丛特性及局地气象要素都对灌丛沙堆形态有重要影响^[11,34]。不同生境的灌丛沙堆形态特征差异显著,戈壁生境中白刺灌丛沙堆形态参数最小,沙漠生境次之,荒漠草地最大^[35]。灌丛特性是决定干旱半干旱区灌丛沙堆的最重要因素^[3,6]。一年生或矮小植物形成的灌丛沙堆体积通常较小,且沙堆分布连续;而大多数多年生灌木会形成体积较大且不连续分布的沙堆^[7]。锥状冠幅的植物形成的灌丛沙堆高度和体积通常小于球状冠幅的植物形成的灌丛沙堆^[36]。

本研究中,不同灌丛类型形成的灌丛沙堆形态特征差异明显,柽柳灌丛沙堆最大,柠条锦鸡儿次之,泡泡刺灌丛沙堆最小(表2)。同样,柽柳灌丛投影面积最大,柠条锦鸡儿次之,泡泡刺最小(图1,2)。这表明灌丛形态对灌丛沙堆累积过程有重要影响。主要原因是柽柳枝条主要是垂直生长,且枝条稠密,因此沙物质拦截能力强,容易形成较大的灌丛沙堆。反之,泡泡刺枝条主要是水平匍匐生长,虽然枝条也较为稠密,但拦截沙物质能力有限,形成的灌丛沙堆较小。而柠条锦鸡儿枝条虽然以垂直生长为主,但枝条较为稀疏,因此沙物质拦截

能力也有限,形成的灌丛沙堆也较小。这一结果和前人的研究结果类似,即枝条稀疏且向四周匍匐生长的 *Arctotheca populifolia* 形成的灌丛沙堆高度较低;相反枝条稠密且垂直生长的 *Gazania rigens* 形成的灌丛沙堆高度较高^[37]。同样,中国阴山北麓的小叶锦鸡儿虽然枝叶较为稠密,但是高度很小,因此即使在沙源丰富地区其所堆积形成的灌丛沙堆高度也很少超过1 m^[38]。柽柳灌丛能够形成较大灌丛沙堆的另一重要原因是柽柳落叶量大,且具有明显季节性,每年冬季和次年春季落叶,导致沙堆土壤中凋落物含量也较高。沙物质和凋落物交替堆积,沙堆堆积速度快,容易形成较大灌丛沙堆^[39]。而泡泡刺和柠条锦鸡儿落叶量少,形成的灌丛沙堆也相对较小。因此,灌丛形态是决定灌丛沙堆形态特征的关键因素。

沙源和风力条件也是影响灌丛沙堆形态特征的重要因素^[5,11]。沙漠生境的柽柳灌丛沙堆高度、体积和面积等显著小于戈壁生境,主要原因是沙漠生境沙物质比戈壁生境更丰富,使得沙漠生境中的灌丛沙堆更高大^[11]。另外,较大的风力条件会导致风积作用加强,进而促进了灌丛沙堆的发育^[11],因此风力条件较好的区域灌丛沙堆形态参数通常较大。本研究中的3个研究区域沙源和风力条件也有明显不同,额济纳旗大风日数可达100天左右,明显多于临泽的15天和杭锦旗的20天^[8,40],因此分布在额济纳旗的柽柳灌丛沙堆高度和体积等形态参数最大,而分布在临泽的泡泡刺灌丛沙堆高度和体积等最小。总之,灌丛沙堆的形态特征差异是灌丛特性、沙源特征和气象要素共同作用的结果。

3.2 不同类型灌丛沙堆土壤养分积累特征

灌丛沙堆通常被视为“肥岛”,主要原因是灌丛能够拦截沙物质、累积土壤养分^[2,41],导致灌丛沙堆土壤水分含量、土壤有机质、全氮和全磷等含量显著高于丘间低地^[14,42]。另外由于灌丛沙堆土壤养分含量较高、太阳辐射较小,且灌丛能够拦截植物种子,导致灌丛沙堆上物种丰富度显著高于丘间低地,又被视为“植被岛”^[28,41]。本研究也发现类似结果,灌丛沙堆土壤养分含量和丘间低地差异显著,即灌丛沙堆土壤有机质和碳、氮、磷等养分含量显著高于丘间低地(图3),表明3种类型灌丛都显著增加了沙堆土壤养分含量,使沙堆成为“肥岛”,且柽

柳灌丛沙堆“肥岛”效应最为明显。本研究中,3种植被灌丛“肥岛”效应形成的原因主要有两方面:一是丘间低地的土壤养分在被风力搬运的过程中被植被灌丛拦截且在灌丛周围堆积,导致灌丛沙堆土壤养分含量高于丘间低地;二是灌丛凋落物会在灌丛周围积累,导致灌丛沙堆土壤凋落物含量明显高于丘间低地(图5),凋落物分解后使沙堆土壤养分含量高于丘间低地^[16]。在调查过程中我们还发现泡泡刺灌丛沙堆是大沙鼠(*Rhombomys opimus*)和荒漠沙蜥(*Phrynocephalus przewalskii*)的重要栖息地,而它们的粪便分解可能也是导致灌丛沙堆土壤养分含量高于丘间低地的因素之一。

不同类型的植被形成的灌丛沙堆土壤养分含量也有显著差异(图4)。怪柳灌丛沙堆土壤有机质、全碳和全氮含量显著高于泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛沙堆,因此怪柳灌丛对沙堆土壤养分的促进作用要高于其他2种植物。主要原因是3种植物灌丛凋落物富集能力有明显差异,怪柳灌丛沙堆土壤凋落物含量远高于泡泡刺和柠条锦鸡儿(图5)。而前人的研究结果也表明怪柳灌丛沙堆养分含量显著高于梭梭沙堆的主要原因是怪柳灌丛下富集的凋落物含量更高,可以达到梭梭灌丛和丘间低地的5倍^[43]。另一原因是怪柳枝叶垂直生长且茂密,拦截到风沙中的土壤养分较多;反之,枝条较为稀疏的泡泡刺和柠条锦鸡儿拦截到风沙中的土壤养分较少。因此,灌丛特性是导致沙堆土壤养分含量差异的重要原因。

4 结论

不同气候区不同类型灌丛沙堆形态及养分积累特征都有显著差异。怪柳灌丛沙堆高度、面积和体积显著大于泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛沙堆。主要原因是怪柳灌丛枝条垂直生长且枝叶茂密,沙物质拦截能力强,且怪柳灌丛凋落物量大,容易发育成较大的灌丛沙堆。不同气候区3种植物沙堆土壤有机质均显著高于丘间低地,都存在“肥岛”效应,怪柳灌丛沙堆“肥岛”效应最为明显。怪柳灌丛沙堆土壤有机质、全碳和全氮含量显著高于泡泡刺和柠条锦鸡儿灌丛沙堆,主要原因是怪柳凋落物量较大,凋落物分解导致其养分累积较多。

参考文献:

[1] Tengberg A, Chen D L. A comparative analysis of nebkhas in

central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. *Geomorphology*, 1998, 22: 181-192.

- [2] El-Bana M I, Nijs I, Kockelbergh F. Microenvironmental and vegetational heterogeneity induced by phytogenic nebkhas in an arid coastal ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2002, 247: 283-293.
- [3] Quets J J, El-Bana M I, Al-Rowaily S L, et al. A mechanism of self-organization in a desert with phytogenic mounds [J]. *Ecosphere*, 2016, 7(11): e01494.
- [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: 413-428.
- [5] 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.
- [6] 谭凤翥, 王雪芹, 王海峰, 等. 怪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): 48-57.
- [7] El-Bana M I, Li Z Q, Nijs I. Role of host identity in effects of phytogenic mounds on plant assemblages and species richness on coastal arid dunes [J]. *Journal Vegetational Science*, 2007, 18: 635-644.
- [8] 刘冰, 赵文智. 荒漠绿洲过渡带泡泡刺灌丛沙堆形态特征及其空间异质性[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2814-2820.
- [9] 许文强, 罗格平, 陈曦. 干旱区绿洲荒漠过渡带灌丛土壤属性研究[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 583-586.
- [10] Okin G S, Gillette D A, Herrick J E. Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65: 253-275.
- [11] 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.
- [12] Cabrera-vega L L, Cruz-avero N, Hernández-Calvento L, et al. Morphological changes in dunes as an indicator of anthropogenic interferences in arid dune fields [J]. *Journal of Coastal Research Science*, 2013, 65(3): 1271-1276.
- [13] 王文帆, 刘任涛, 郭志霞, 等. 腾格里沙漠东南缘固沙灌丛林土壤理化性质及分形维数[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 209-218.
- [14] 冯森彦, 董治宝, 黄日辉, 等. 广东省东海岛海岸老鼠芳(*Spinifex littoreus*)草沙堆形态及沉积特征[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 167-176.
- [15] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. *应用生态学学报*, 2002, 13(7): 2461-2470.
- [16] 凌智永, 王建萍, 陈亮, 等. 柴达木盆地灌丛沙丘稀土元素地球化学特征与物源[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 963-971.
- [17] 赵哈林, 刘任涛, 周瑞莲, 等. 科尔沁沙地灌丛的“肥岛”效应及其形成机理[J]. *生态学报*, 2012, 31(12): 2990-2995.
- [18] Xu W, Liu W, Yang W, et al. *Rhombomys opimus* contribution to the “fertile island” effect of tamarisk mounds in Junggar Basin [J]. *Ecological Research*, 2012, 27(4): 775-781.

- [19] 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):763-768.
- [20] Li P X, Wang N, He W M, et al. Fertile islands under *Artemisia ordosica* in inland dunes of northern China: effects of habitats and plant developmental stages [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72: 951-960.
- [21] 杨红玲,李玉霖,宁志英,等.科尔沁沙地优势固沙灌木叶片凋落物分解的主场效应[J].中国沙漠,2019,39(5):62-70.
- [22] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44(4):383-398.
- [23] 李君,赵成义,朱宏,等.怪柳(*Tamarix* spp.)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的“肥岛”效应[J].生态学报,2007,27(12):5138-5147.
- [24] Hagos M G, Smit G N. Soil enrichment by *Acacia mellifera* subsp. detinens on nutrient poor sandy soil in a semi-arid southern African savanna [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 61: 47-59.
- [25] 武胜利,李志忠,肖晨曦,等.灌丛沙堆的研究进展与意义[J].中国沙漠,2006,26(5):734-738.
- [26] 赵洋,张志山,陈永乐,等.油蒿(*Artemisia ordosica*)退化阶段对灌丛沙堆形态的影响[J].中国沙漠,2015,35(5):1136-1140.
- [27] 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.
- [28] Luo W C, Zhao W Z. Adventitious roots are key to the development of nebkhas in extremely arid regions [J]. Plant and Soil, 2019, 442: 471-482.
- [29] 周海,赵文智.河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的稳定同位素分析[J].中国沙漠,2016,36(6):1637-1645.
- [30] 周雅聃,陈世莘,宋维民,等.不同降水条件下两种荒漠植物的水分利用策略[J].植物生态学报,2011,35(8):789-800.
- [31] Zhang P J, Yang J, Zhao L Q, 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: 79-90.
- [32] Armas C R, Ordiales, Pugnaire F I. Measuring plant interactions: a new comparative index [J]. Ecology, 2004, 85: 2682-2686.
- [33] 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):351-356.
- [34] 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):2046-2053.
- [35] 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.
- [36] 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, 2015, 25(8): 847-867.
- [37] Hesp P, McLachlan A. Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* nebkha dunes [J]. Journal of Arid Environment, 2000, 44: 155-172.
- [38] 岳兴玲,哈斯,庄燕美,等.沙质草原灌丛沙堆研究综述[J].中国沙漠,2005,25(5):738-743.
- [39] 贺俊霞.策勒绿洲边缘多枝怪柳冠下轮层的沉积特征及发育过程研究[D].北京:中国科学院研究生院,2009.
- [40] 刘普幸.额济纳旗胡杨林径向生长的水文气候因子研究[D].兰州:兰州大学,2007.
- [41] Field J P, Breshears D D, Whicker J J, et al. Sediment capture by vegetation patches: implications for desertification and increased resource redistribution [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117: 1-9.
- [42] 王国华,任亦君,缙倩倩.河西走廊荒漠绿洲过渡带封育对土壤和植被的影响[J].中国沙漠,2020,40(2):222-231.
- [43] Li J, Zhao C, Zhu H, et al. Effect of plant species on shrub fertile island at an oasis-desert ecotone in the South Junggar Basin, China [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 71: 350-361.

Nebkha morphological characteristics and soil nutrition content in three regions with different climates in North China

Luo Weicheng, Zhao Wenzhi, Ren Heng, Liu Bing

(Linze Inland River Basin Research Station / Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Nebkhas, or vegetated sand dunes, are a common landscape in the transitional zone of oasis and desert in arid and semi-arid regions. And, nebkhas are critical in preventing desertification and biodiversity protection of oasis. This paper studied the differences of nebkhas morphology characteristics and soil nutrition content among three types of nebkhas (*Tamarix chinensis*, *Nitraria sphaerocarpa* and *Caragana korshinskii*) which from different regions. The results are as follows: The height, area and volume of *T. chinensis* nebkha were significantly higher than *N. sphaerocarpa* and *C. korshinskii* nebkhas. And the height, area and volume of *N. sphaerocarpa* nebkha were the smallest. The existence of both three types of shrubs were significantly increased soil organic matter, and made nebkhas into “fertile island”. Soil organic matter, total carbon, total nitrogen and total phosphorus of *T. chinensis* nebkha were all significantly higher than *N. sphaerocarpa* and *C. korshinskii* nebkhas. The mainly reason was that soil litter content of *T. chinensis* nebkha was the highest, and the growth habit of *T. chinensis* are vertical, dense, and multi-branching. Thus, the interception and accumulation capability of *T. chinensis* nebkha is stronger than *N. sphaerocarpa* and *C. korshinskii*. In addition, the differences of sand source and meteorological condition among different regions may also lead to the differences of morphological characteristics and soil nutrition content of nebkhas.

Key words: nebkhas; shrub feature; nebkha morphology; soil nutrition content