

水蚀风蚀交错带灌丛沙堆形态演替及水养特征变化

路荣¹, 贾超¹, 郝红敏¹, 黄泽¹, 刘玉^{1,2}, 苗海涛^{1,2}, 武高林^{1,2}

(1. 西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 灌丛沙堆是水蚀风蚀交错带典型的风积地貌景观。在黄土高原典型水蚀风蚀交错带, 选择 4 种常见不同大小级的灌丛沙堆(小、中、大型和枯死灌丛沙堆), 对灌丛沙堆的基本形态、土壤特性、差异性及相关性进行定量分析。结果表明:(1)灌丛演替变化显著影响沙堆发育, 随着灌丛生物量的增加, 沙堆体积也增大, 当灌丛演替到稳定阶段时灌丛沙堆的发育也趋于稳定($P < 0.05$)。(2)灌丛沙堆的固沙量、高度及土壤容重因位置而异, 灌丛沙堆主根处的固沙量和高度均为最大, 边缘处相对较小, 土壤容重反之。(3)枯死、大、中和小型灌丛沙堆土壤的有机质含量分别是裸地的 1.54, 1.92, 1.46, 1.30 倍; 土壤湿度分别是裸地的 2.05, 1.93, 1.79, 1.52 倍。(4)灌丛沙堆边缘与主根 3/4 处水分、养分含量高于灌丛内其他位置。

关键词: 灌丛沙堆; 水蚀风蚀交错作用; 沙堆演替形态; 水养特征

中图分类号: Q948.11 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)03-0074-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.012

Changes in Morphological Succession and Moisture-nutrient Characteristics of Mound Under Shrub Patch in Water-wind Erosion Crisscross Region

LU Rong¹, JIA Chao¹, HAO Hongmin¹, HUANG Ze¹, LIU Yu^{1,2}, MIAO Haitao^{1,2}, WU Gaolin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shannxi 712100)

Abstract: The shrub mound is a typical aeolian landform in the cross areas of wind-water erosion on Loess Plateau in China. Four sizes scale shrub mounds were selected to analyze the mound basic form, soil properties and correlations. The results showed: (1) The shrub succession significantly affected the development of mound. The mound volume was increased as the shrub biomass expansion. Until the shrubs succeeds in the stabilization phase, the mound volume tends to be stable ($P < 0.05$). (2) The amount, height and soil bulk density of the mound varied in the different position: the binding-sand quantity and height of the mound were the largest at the trap root, but were lowest in the edge. The soil bulk density showed the opposite characteristics. (3) The soil organic matter content of mound under the death, large, medium and small shrub patches were 1.54, 1.92, 1.46 and 1.30 times than the bare land, respectively; the soil moisture were 2.05, 1.93, 1.79 and 1.52 times than that of the bare land, respectively. (4) The soil moisture and soil organic matter content in the edge of the mound to three quarters of the trap root were higher than those in other positions of the mound.

Keywords: shrub patch; water-wind erosion interlacing; mound morphological succession; moisture and nutrient characteristics

干旱半干旱区生态承载能力低, 植被以沙堆状的微观结构存在^[1-2]。灌丛沙堆作为干旱半干旱区典型的植被类型, 对防风固沙有着重要的作用^[3]。已有研究^[4-5]表明, 植被凋落物、沙源和风蚀是影响灌丛沙堆演替的主要因素, 风蚀作用发生时, 坡面上的灌丛会削弱风速, 导致上风向风沙流所携带的部分沙土沉积在灌丛下, 从而形成沙堆。随着风沙地貌学和荒漠化

过程研究的深化, 灌丛沙堆作为指示土壤风蚀和土地退化的标志, 已受到广泛关注。刘冰等^[5-6]研究发现, 因风积而产生的大沙埋现象对灌丛沙堆生长和沙堆间的反馈十分重要。杜建会等^[7]发现植被、表层土壤含水量以及风力三者之间的作用是引起白刺沙堆灌丛在不同演替阶段形态不同的原因。干旱半干旱区的土壤异质性是决定植被分布格局的重要因素, 而植

收稿日期: 2018-02-22

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41371282, 41722107)

第一作者: 路荣(1992—), 女, 甘肃庆阳人, 在读硕士研究生, 主要从事植被格局与侵蚀研究。E-mail: lurong_eco@126.com

通信作者: 武高林(1981—), 男, 山西文水人, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复与水土保持研究。E-mail: gaolinwu@gmail.com

被对土壤的改良作用对生态系统群落结构及植物种间竞争均有重要意义^[8]。目前,关于灌丛沙堆土壤特性^[9-10]、空间格局^[11-12]、灌丛沙堆生物量模拟^[13]、生理生态特性^[14]、对极端气候的响应^[15]、群落特征和多样性^[16]及风蚀影响^[17]研究较多,但是关于灌丛沙堆在水蚀风蚀交错作用下对灌丛结构特征以及沙地生境特征的响应鲜有报道。

黄土高原水蚀风蚀交错带,每年11月到翌年4月为风蚀现象的高发时段,且大多数风蚀都是从坡底发生,通过搬离土壤小颗粒对坡面土壤造成严重侵蚀,水蚀现象主要集中在每年的4—10月,该时段内降雨事件是诱发水蚀的主要因素,尤其是雨水在坡面尺度上的冲刷,进一步加剧水蚀作用^[18],但灌丛斑块的存在对侵蚀有良好的抵御作用。Wu等^[19]的研究认为,在坡面尺度上,不同类型的灌丛沙堆对于水蚀和风蚀拦截作用各不相同。

沙蒿灌丛是黄土高原水蚀风蚀交错带典型灌丛之一,常以斑块状结构存在,沙蒿属菊科蒿属草本半灌木,沙蒿的枝条在风蚀严重的地区被沙埋后易生长出不定根,从而在恶劣的干旱半干旱区起到良好的固沙能力。在发生水蚀风蚀较严重的毛乌素沙漠中,沙蒿是优良的固沙灌木,对维护和稳定当地环境中起着十分重要的作用^[20],探究沙蒿灌丛的沙堆形态及其对微生境的改良作用对水蚀风蚀交错带生态环境恢复和治理具有重要意义。基于此,本研究通过野外调查黄土高原水蚀风蚀交错带灌丛沙堆形态参数和灌丛下土壤性质,探讨不同大小级灌丛沙堆结构特征和土壤生境特征,有助于定量分析水蚀风蚀交错带灌丛固沙效应及水养情况。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市的中国科学院水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站,是典型的水蚀风蚀交错带^[20]。该试验站地处毛乌素沙地的东南缘,小流域主沟道南北走向,为窟野河的二级支流,地理坐标为东经 $110^{\circ}21' - 110^{\circ}23'$,北纬 $38^{\circ}46' - 38^{\circ}51'$,海拔 $1\ 081.0 \sim 1\ 273.7$ m,位于黄土高原水蚀风蚀交错带的中心地带,遭受侵蚀最为强烈。该流域面积 6.89 km²,年蒸发量 785 mm^[21-22]。研究区土壤为风沙土,土壤颗粒组成以粉砂粒为主,风蚀易发生于春季和冬季,水蚀易发生于夏季和秋季^[23-24]。研究区属于中温带半干旱气候,冬春季干旱少雨、多风沙,夏秋多雨,年降水量 437.4 mm,70%以上的降水多集中在7—9月,年平均气温 8.4 °C,≥10 °C的积温为 $3\ 248$ °C,无霜期 153 d,年日照时间 $2\ 836$ h,年总太阳辐射 $5\ 922$ MJ/m²^[25]。流域内的植被为沙生植物和黄土区植物,主要有柠条(*Caragana Korshinskii*)、紫花棘豆(*Dxytropis coerulea*)、沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、长芒草

(*Stipa bungeana*)、冰草(*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.)、和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、远志(*Polygala tenuifolia* Willd.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查方法 试验野外观测定于风沙活动频繁的2017年3—4月。选取当地典型先锋演替植被—沙蒿灌丛(*Artemisia ordosica*)为研究对象,在坡度为 10° (大小 75 m× 100 m,无其他高大植被)的试验地以灌丛大小级为依据对样地进行分组:小灌丛沙堆(< 80 cm),中灌丛沙堆($80 \sim 160$ cm),大灌丛沙堆(> 160 cm),枯死灌丛沙堆(>大灌丛沙堆)(每个灌丛沙堆类型5个重复)。灌丛斑块大小级利用灌丛个体体积 V 的立方根 CV 来判断;即: $V = \pi r^2 H$ ($r = D/2$)。式中: V 为灌丛个体体积(m³); H 为灌丛高度(m); D 为灌丛冠幅的平均直径(m)^[26]。调查样地内所有沙蒿灌丛沙堆的高度、长度、宽度、固沙量及每株灌丛的冠幅和高度。

在水蚀和风蚀交错作用明显的坡面上,沿着上坡位—灌丛主根—下坡位的方向测量灌丛沙堆长度,利用十字交叉法测量灌丛沙堆宽度。灌丛沙堆高度测量和土壤样品采样点设计为:灌丛沙堆上坡位边缘、上坡位边缘与灌丛主根之间 $1/2$ 处、上坡位边缘与灌丛主根之间 $3/4$ 处、灌丛主根位置、下坡位边缘与灌丛主根之间 $1/2$ 处、下坡位边缘与灌丛主根之间 $3/4$ 处、下坡位边缘(图1)。灌丛沙堆固沙量利用称重法。沙堆底面积计算为 $A_d = 1/2 \times \pi \times (1/4 \times (L_d + W_d))$;沙堆体积计算公式为 $V_d = 1/3 \times \pi \times (3 \times (1/4 \times (L_d + W_d) - H_d)) \times H_d$ 。式中: A_d 、 V_d 、 L_d 、 W_d 、 H_d 分别为沙堆底面积(m²)、沙堆体积(m³)、沙堆长度(m)、沙堆宽度(m)和沙堆高度(m)^[27]。



注:图中7个数字标识分别为试验中的不同采样点;①为灌丛沙堆上坡位边缘;②为上坡位边缘与灌丛主根之间 $1/2$ 处;③为上坡位边缘与灌丛主根之间 $3/4$ 处;④为灌丛主根位置;⑤为下坡位边缘与灌丛主根之间 $1/2$ 处;⑥为下坡位边缘与灌丛主根之间 $3/4$ 处;⑦为下坡位边缘。下同。

图1 试验采样位点

利用直尺测量沙蒿灌丛冠幅和自然生长高度。测量完成后齐地面剪去灌丛,装在信封袋中带回实验

室用来测定其地上生物量,然后收集凋落物用来测定其凋落物质量;利用全挖法测量地下生物量,最后带回实验室在(75℃)烘 24 h 至恒重。

1.2.2 土壤采集与测定 根据 Mc Claran 等^[28]的研究,灌丛沙堆下方 5 厘米处土壤特性变化最为明显,故收集该深度土壤(0—5 cm)作为样品,每个大小级灌丛沙堆下土壤样品采集均按图 1 所示位置进行取样。利用环刀法测定灌丛沙堆土壤容重,利用仪器—flowerpower 测定土壤湿度。于 2017 年 5 月对土壤有机质进行室内分析,灌丛下土壤的有机质含量采用重铬酸钾容量法中油浴外加热法测定。灌丛沙堆土壤养分和水分含量与裸地进行对照。

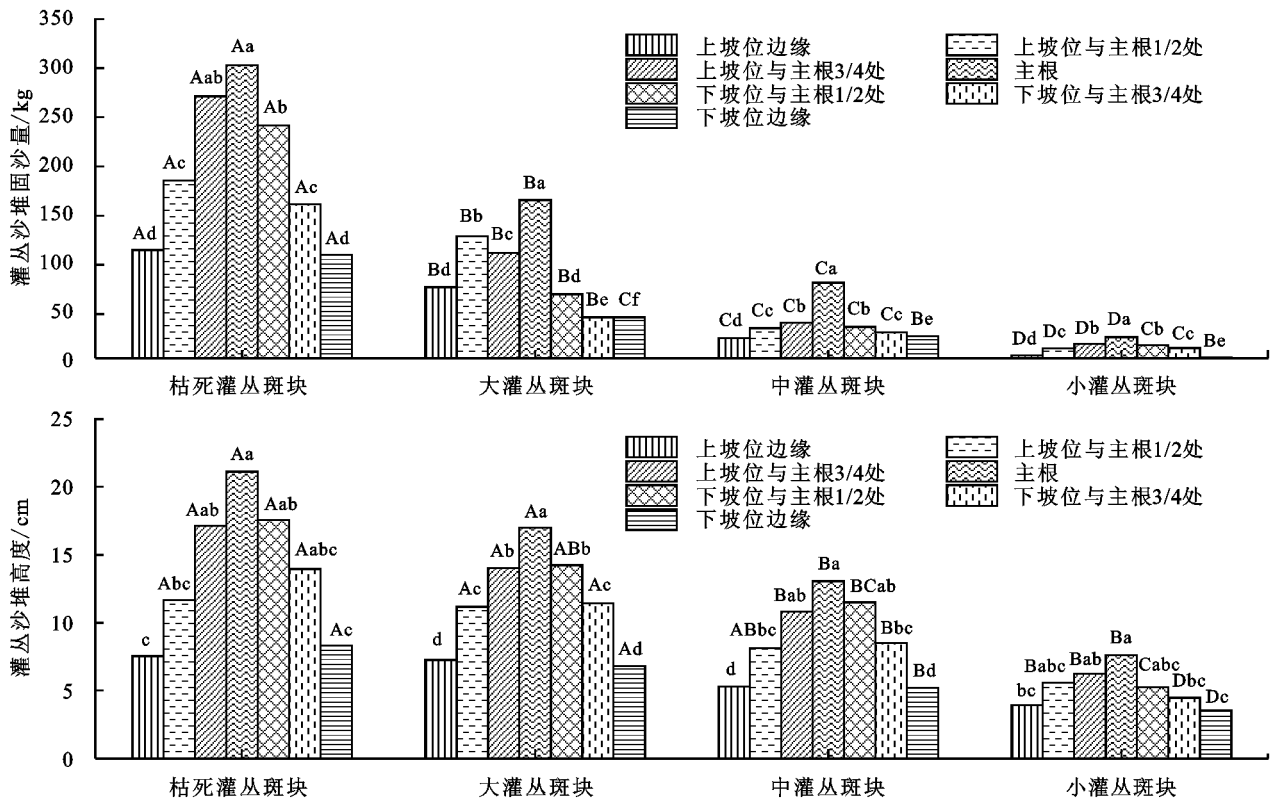
1.2.3 数据处理 本文中的数据表示为平均值±标准误差。单因素方差分析用于检测不同大小级灌丛沙堆下各个取样点位的固沙量、固沙高度、土壤容重、土壤孔隙度、土壤湿度和土壤有机质含量的差异,用回归曲线表示灌丛沙堆底面积与灌丛高度、灌丛沙堆

高度以及灌丛生物量等之间的关系。试验数据的统计采用 Excel 2010 软件,利用 SPSS 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 软件进行统计分析,将服从正态分布的原始数据作为区域化变量,统计分析后数据作图用 Origin 9.0 (OriginLab, USA) 软件。

2 结果与分析

2.1 灌丛沙堆形态演替特征

由图 2 可知,灌丛沙堆固沙量大小为枯死灌丛沙堆>大灌丛沙堆>中灌丛沙堆>小灌丛沙堆。枯死灌丛沙堆和大灌丛沙堆固沙量在上坡位大于下坡位,中和小灌丛沙堆固沙量在不同位置差异不显著。枯死、大和中灌丛沙堆高度在上坡位小于下坡位,而小灌丛沙堆相反。各灌丛沙堆高度在主根处达到最高。灌丛沙堆的长度和宽度均大于灌丛冠幅的长度和宽度(表 1)。灌丛的冠幅面积随着灌丛发育逐渐增大。各大小级灌丛沙堆根冠比之间未达到显著差异水平,而凋落物之间差异显著。



注:大写字母表示组间差异显著性($P < 0.05$);小写字母表示组内差异显著性($P < 0.05$)。

图 2 灌丛沙堆固沙量和高度

表 1 沙蒿灌丛沙堆形态特征

沙堆类型	沙堆		沙堆高度/m	灌丛高度/m	灌丛冠幅面积/m ²	根冠比	凋落物/(g·m ⁻²)
	长度/m	宽度/m					
枯死	3.28±0.47a	3.09±0.64a	0.21±0.03a	0.47±0.08b	8.52±3.69a	0.79±0.08	187.08±26.47b
大	3.07±0.27a	2.7±0.14ab	0.17±0.003a	0.99±0.14a	6.31±0.63ab	0.82±0.04	273.68±7.22a
中	1.65±0.05b	1.62±0.58bc	0.09±0.02b	0.63±0.01b	1.96±0.13b	0.80±0.06	95.54±14.51c
小	0.99±0.09b	0.87±0.07c	0.08±0.01b	0.47±0.05b	0.36±0.002b	0.83±0.03	9.00±0.95d

注:表中沙堆类型枯死、大、中、小分别表示枯死灌丛沙堆、大灌丛沙堆、中灌丛沙堆和小灌丛沙堆;同列数据后的不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

在灌丛演替发育过程中,随着灌丛生物量的增加,灌丛沙堆体积与灌丛地上、地下生物量呈显著幂函数关系($R^2_{\text{地上}}=0.70, P<0.01; R^2_{\text{地下}}=0.73, P<0.05$)。灌丛高度随着灌丛体积的增大而增大,且达到极显著水平($R^2=0.89, P<0.001$)。随着灌丛沙堆底面积增大,灌

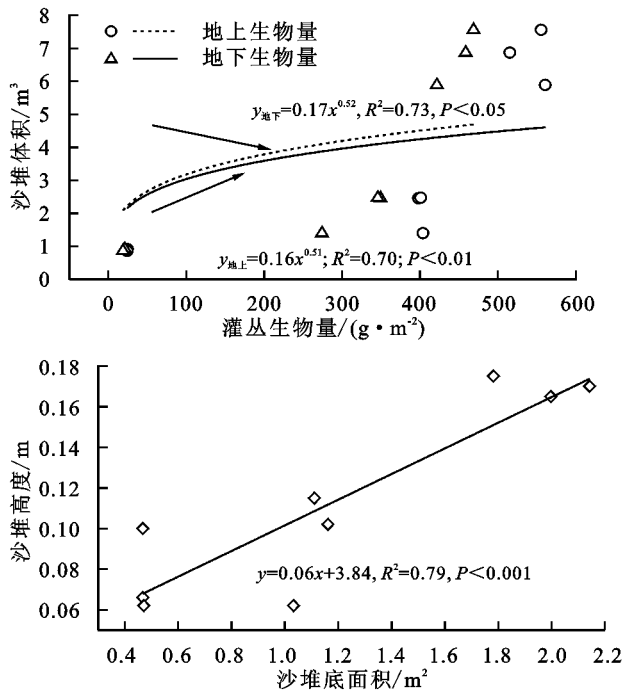


图3 灌丛生物量与沙堆体积、沙堆高度与沙堆底面积和灌丛高度、灌丛高度与灌丛体积之间关系

2.2 灌丛沙堆土壤理化性质

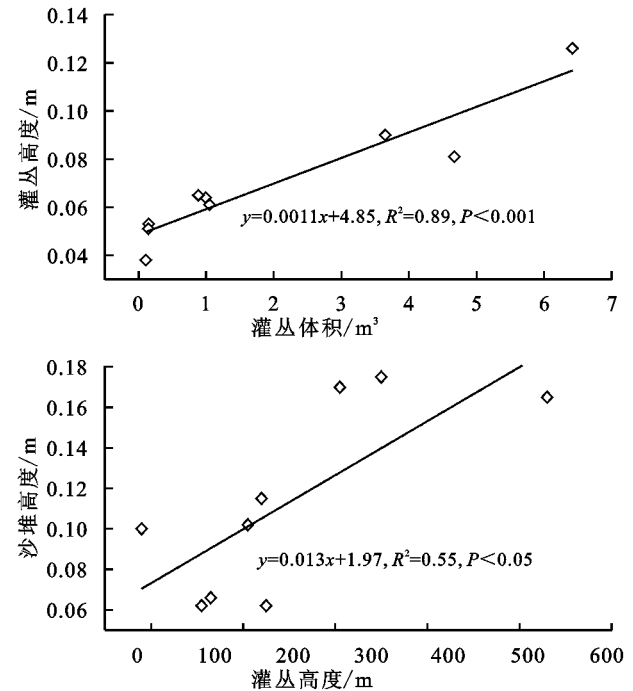
由图4可知,灌丛沙堆土壤容重沿着上坡位到下坡位呈现出先增大再减小后增大的趋势。灌丛沙堆主根处、上坡位与主根3/4处和下坡位与主根3/4处的土壤容重最小。就不同类型的灌丛沙堆来说,土壤容重由小到大依次为枯死、大、中和小灌丛沙堆。各个灌丛沙堆土壤孔隙度之间差异不显著,而枯死灌丛沙堆、大灌丛沙堆大于中、小灌丛沙堆。这是因为灌丛在演替过程中,土壤与愈加发展的根系之间相互作用,导致枯死、大灌丛沙堆土壤孔隙度变大。

由表2可知,枯死、大灌丛沙堆土壤有机质含量表现为上坡位小于下坡位,而中、小灌丛沙堆土壤有机质含量表现为上坡位大于下坡位。相较于裸地,枯死、大、中、小型灌丛沙堆土壤有机质含量分别是裸地的1.54,1.92,1.46,1.30倍;枯死、大、中和小型灌丛沙堆的土壤湿度分别是裸地的2.05,1.93,1.79,1.52倍。灌丛沙堆的不同位点的土壤湿度变化量表现为上坡位大于下坡位,主根处最小。

3 讨论

在干旱半干旱地区,灌丛通常以典型沙堆形式存在^[19],这与当地土地资源,降水时空分布,气候环境异质性等有关。本试验研究区是典型的水蚀风蚀交错带,灌丛沙堆对当地的地表径流和风沙活动起到很好的拦截作用。Du等^[29]对黄土高原4种典型灌丛

丛沙堆高度呈线性增加,且达到极显著水平($R^2=0.79, P<0.001$)。灌丛高度增加时沙堆高度也在增大,且呈显著线性增加($R^2=0.55, P<0.05$)。随着沙蒿灌丛演替到稳定阶段(大灌丛沙堆)其固沙能力最强,固沙量最多,对风沙的固积作用愈加稳定(图3)。



在坡面尺度上的研究发现,由于环境异质性,灌丛沙堆的形成有利于减弱侵蚀作用,并且促进植被幼苗建立。樊瑞霞等^[30]研究发现,灌丛沙堆水平尺度的大小与灌丛高度显著相关。本研究中影响灌丛沙堆形态的主要因素是灌丛大小。灌丛沙堆长度和宽度随灌丛斑块的发育逐渐增大。灌丛沙堆的大小与灌丛冠幅大小呈线性极显著相关,在灌丛发育的过程中,地上枝条密度大,侧向分支少的灌丛沙堆更易于垂向固沙^[31],这与本研究结果一致。通过灌丛生物量与灌丛沙堆体积拟合发现,灌丛生物量的增加使得灌丛沙堆体积增大,且地上生物量尤为明显。灌丛沙堆发育受沙源丰富度、植被类型、灌丛沙堆水量供需等影响,灌丛沙堆发育雏形阶段受沙源影响,风力持续增大,随着灌丛盖度逐渐增大达到灌丛沙堆发育阶段,之后沙源枯竭,风力侵蚀减弱,植被盖度达到最大,灌丛沙堆达到稳定阶段,最后达到活化阶段^[32]。郝红敏等^[33]、陈东等^[34]研究表明,在空间分布上,灌丛斑块演替初期,小灌丛斑块表现为聚集分布,到演替后期聚集程度减弱,大灌丛斑块主要表现为均匀分布,演替末期逐渐发展为空间随机分布。本研究中小灌丛斑块演替初期抵御水蚀和风蚀的能力较弱,固沙量较少,其上坡位和下坡位的固沙量未表现出显著差异。而随着灌丛演替到稳定阶段,灌丛斑块抵御风蚀和水蚀的作用逐渐增强,固沙量也随之增大,当水蚀作用发生

时,泥沙在大、枯死灌丛沙堆上坡位的侵蚀强度被大幅削弱,从而使上坡位的固沙量大于下坡位。灌丛生物量

积累,增加了灌丛沙堆对沙土和其他碎屑等的拦截^[35],为灌丛演替和微生物境的改善具有促进作用。

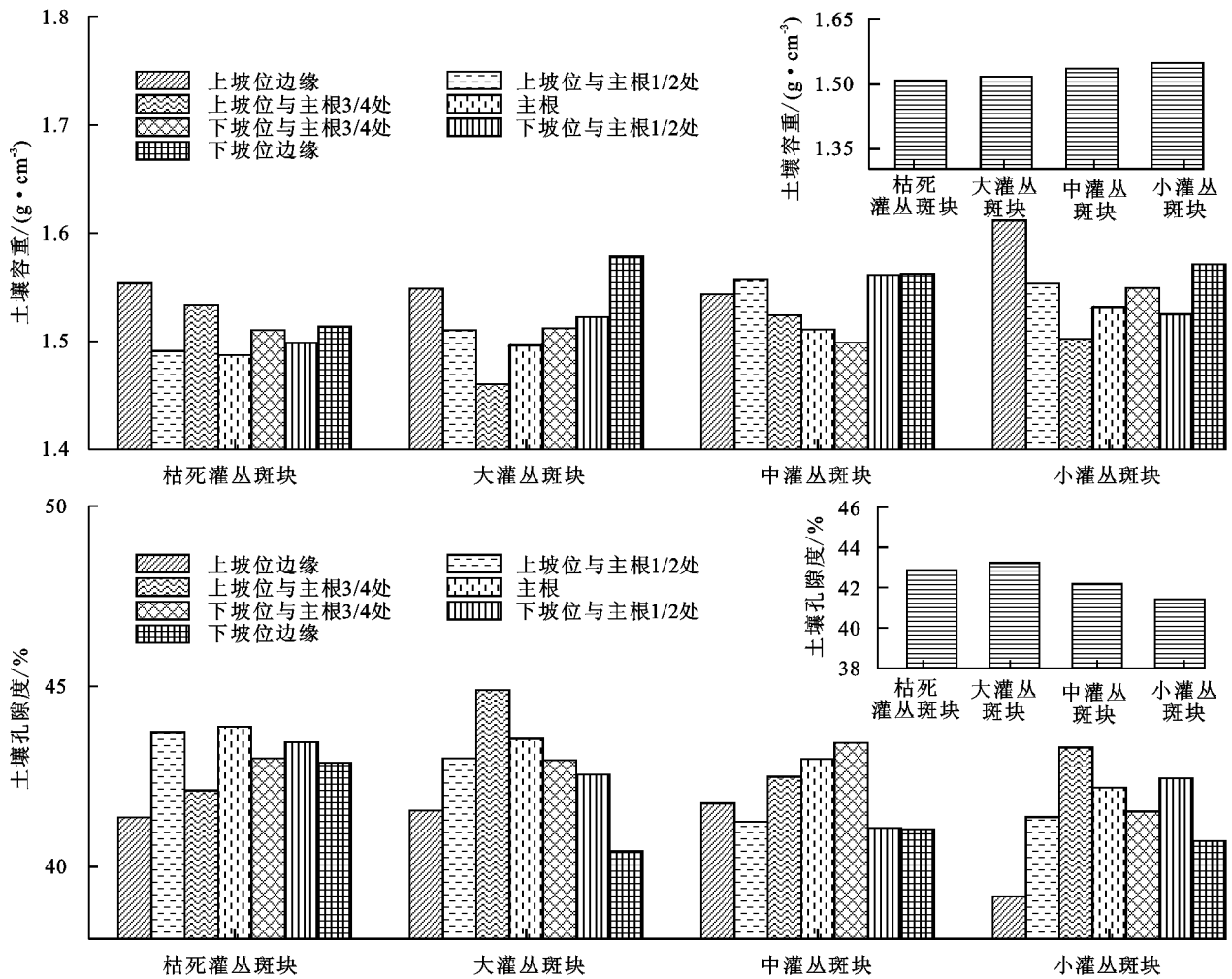


图 4 灌丛沙堆土壤物理性质

表 2 灌丛沙堆土壤有机质含量、土壤湿度和 1 次降雨土壤湿度变化量

沙堆类型	因子	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	平均值
枯死	SOC/(g·kg ⁻¹)	0.17±0.03	0.18±0.02	0.18±0.01	0.18±0.02	0.21±0.05	0.24±0.09	0.27±0.01	0.20±0.03
	SM/%	11.00±0.57	14.67±2.03	16.67±0.88	18.66±0.67	17.67±1.21	15.33±0.67	11.67±1.33	15.73±1.36
	ΔSM/%	10.00±0.00	7.33±1.45	6.66±0.33	3.66±0.66	3.00±1.00	6.33±0.33	10.00±1.00	6.28±0.68
大	SOC/(g·kg ⁻¹)	0.21±0.03	0.19±0.02	0.17±0.03	0.28±0.02	0.31±0.07	0.35±0.04	0.29±0.02	0.25±0.03
	SM/%	14.33±2.91	13.67±1.33	16.00±0.00	18.00±0.58	14.67±1.33	16.00±2.52	13.00±1.73	14.81±0.74
	ΔSM/%	5.00±1.73	8.66±1.76	5.00±1.73	1.33±0.01	4.00±2.08	2.66±0.33	5.33±2.60	4.57±1.60
中	SOC/(g·kg ⁻¹)	0.25±0.05	0.24±0.10	0.24±0.06	0.29±0.05	0.26±0.04	0.18±0.02	0.16±0.02	0.19±0.05
	SM/%	13.00±2.08	11.67±2.18	14.33±1.85	15.00±0.58	13.33±0.33	12.67±1.76	9.33±1.30	13.76±0.55
	ΔSM/%	7.33±1.85	6.33±1.33	7.33±1.45	5.66±0.66	6.00±1.00	5.33±0.88	11.33±1.66	8.66±1.26
小	SOC/(g·kg ⁻¹)	0.26±0.10	0.18±0.02	0.24±0.06	0.15±0.01	0.14±0.02	0.13±0.02	0.14±0.02	0.17±0.03
	SM/%	8.67±0.33	11.67±1.21	15.33±1.85	13.00±0.58	11.00±0.57	10.67±0.33	8.00±0.00	11.67±0.86
	ΔSM/%	11.33±1.85	8.66±1.45	5.00±0.57	4.33±0.33	6.66±0.88	8.00±1.52	10.33±0.33	7.75±0.99
裸地	SOC/(g·kg ⁻¹)								0.13±0.01
	SM/%								7.67±0.33
	ΔSM/%								15.33±0.88

注:SM表示降雨前土壤湿度(%);ΔSM(降雨6.8mm)表示1次降雨事件土壤湿度变化量(mm);SOC表示土壤有机质含量(g/kg)。

通过对灌丛下沙堆理化性质调查,发现灌丛下沙堆的土壤理化性质的差异性与灌丛大小级有关。具体表现在 3 方面:(1)小灌丛沙堆土壤容重最大,中、大和枯死灌丛沙堆土壤容重相对较小。这是因为在灌丛沙堆发育过程中,冠幅下植物凋落物等碎屑积累程度的差异

性,加之水蚀和风积,二者共同作用使得冠幅下的土壤颗粒组成发生变化^[36]。(2)小灌丛沙堆和枯死灌丛沙堆的土壤湿度变化量最大。在遮阴较少环境下,小灌丛沙堆对水分的需求相对较大;枯死灌丛沙堆相较于大、中型灌丛沙堆蒸散量较大。本研究中,与小灌丛沙堆相

比,大灌丛沙堆的土壤孔隙度和土壤湿度较高,与刘金伟等^[35]研究相一致。(3)大、枯死灌丛沙堆的有机质含量高于中、小型灌丛沙堆。已有研究^[35]发现,不同灌丛下富集的凋落物量存在差异,气候、灌丛分布的土壤微环境、灌丛高度和冠幅都影响灌丛养分的富集程度。随着灌丛演替,灌丛下凋落物在风季不易被吹走,因而得到大量积累,土壤有机质含量增加,土壤性质得到改善。本研究野外调查发现,在枯死沙堆的周围,存在大量小灌丛沙堆,这一现象被 Ravi 等^[37-38]称为“肥沃岛”,已有研究^[21]证明,大量小灌丛沙堆的存在是维持群落发展的根本,由此形成的“肥沃岛”有助于灌丛沙堆自身的生存。总体来说,灌丛沙堆演替和对水沙迁移的拦截能力不同是导致灌丛沙堆土壤理化性质存在差异的根本原因。

4 结论

(1)灌丛发育特征显著影响沙堆发育。随着灌丛的演替,灌丛生物量增加,沙堆体积增大,当灌丛演替到稳定阶段时,灌丛沙堆的发育也趋于稳定。灌丛沙堆固沙量大小为枯死灌丛沙堆>大灌丛沙堆>中灌丛沙堆>小灌丛沙堆。

(2)灌丛沙堆土壤湿度高于裸地,且灌丛沙堆土壤湿度变化量小于裸地,说明在降水过程中灌丛沙堆对水分具有较好的截留、保蓄能力,灌丛沙堆边缘与主根 3/4 处水分、养分含量高于灌丛内其他位置。与中和小灌丛沙堆相比较,灌丛沙堆演替到大灌丛沙堆时土壤湿度达到最大。不同大小级灌丛沙堆与裸地相比较,灌丛沙堆土壤养分含量高于裸地,随着灌丛斑块的发育,灌丛沙堆土壤有机质含量增加。

参考文献:

[1] Yizhaq H, Sela S, Svoray T, et al. Effects of heterogeneous soil-water diffusivity on vegetation pattern formation [J]. *Water Resources Research*, 2015, 50(7): 5743-5758.

[2] Buis E, Temme A J A M, Veldkamp A, et al. Shrub mound formation and stability on semi-arid slopes in the Northern Negev Desert of Israel: A field and simulation study [J]. *Geoderma*, 2010, 156(3/4): 363-371.

[3] 王利兵,胡小龙,余伟莅,等.沙粒粒径组成的空间异质性及其与灌丛大小和土壤风蚀相关性分析[J].*干旱区地理*,2006,29(5):688-693.

[4] 杨帆,王雪芹,何清,等.绿洲—沙漠过渡带柽柳灌丛沙堆形态特征及空间分布格[J].*干旱区研究*,2014,31(3):556-563.

[5] 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.

[6] 刘冰,赵文智,杨荣.荒漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆特征及其空间异质性[J].*生态学报*,2008,28(4):1446-1455.

[7] 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.

- [8] 杨帆,王雪芹,杨东亮,等.不同沙源供给条件下柽柳灌丛与沙堆形态的互馈关系:以策勒绿洲沙漠过渡带为例[J].*生态学报*,2012,32(9):2707-2719.
- [9] 杨帆,王雪芹,杨东亮,等.不同沙源供给条件下柽柳灌丛与沙堆形态的互馈关系-以策勒绿洲沙漠过渡带为例[J].*生态学报*,2012,32(9):2707-2719.
- [10] 马瑞,王继和,屈建军,等.民勤绿洲—荒漠过渡带植被梯度特征及其土壤水环境[J].*生态学杂志*,2010,29(6):1075-1080.
- [11] 于春堂,慈龙骏,杨晓晖,等.基于样带的唐古特白刺灌丛沙包空间格局尺度研究[J].*生态科学*,2007,26(5):394-400.
- [12] 何志斌,赵文智.黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征[J].*应用生态学报*,2004,15(6):947-952.
- [13] 贾宝全,蔡体久,高志海,等.白刺灌丛沙包生物量的预测模型[J].*干旱区资源与环境*,2002,16(1):96-99.
- [14] 崔向慧,冯强,王学全.荒漠—绿洲过渡区灌丛沙包的蒸散特征及模拟[J].*中国水土保持科学*,2007,5(1):44-48.
- [15] 赵娟,赵元杰,夏训诚.罗布泊红柳沙包记录的极端气候事件及影响因素[J].*干旱区研究*,2012,29(6):1094-1099.
- [16] 张媛媛,马成仓,韩磊,等.内蒙古高原荒漠区4种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较[J].*生态学报*,2012,32(11):3343-3351.
- [17] Yang Y S, Bu C F, Mu X M, et al. Interactive effects of moss-dominated crusts and *Artemisia ordosica* on wind erosion and soil moisture in Mu Us sandland, China[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(4): 649816.
- [18] 霍竹.黄土高原水蚀风蚀交错带土壤—灌木系统水分运动试验研究[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2006.
- [19] Wu G L, Wang D, Liu Y, et al. Mosaic-pattern vegetation formation and dynamics driven by the water-wind crisscross erosion [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 355-362.
- [20] Yang H X, Zhang J T, Li Z D, et al. Comparative study on spatial patterns of the *Artemisia ordosica* population in the Mu Us sandy land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 1901-1910.
- [21] 郝红敏,路荣,贾超,等.水蚀风蚀交错带黑沙蒿灌丛沙堆种群结构及动态特征研究[J].*西北植物学报*,2017,37(4):773-781.
- [22] 傅子洵,王云强,安芷生.黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征[J].*农业工程学报*,2015,31(13):128-134.
- [23] 唐克丽,候庆春,王斌科,等.黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向[J].*中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*,1993,18:1-15.

(下转第85页)

- (6):1357-1368.
- [6] Dong J Z, Zhang K L, Guo Z L. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17: 8-14.
- [7] 郭明明,王文龙,李建明,等. 神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5):1044-1057.
- [8] 李宏伟,王文龙,黄鹏飞,等. 土石混合堆积体土质可蚀性 K 因子研究[J]. *泥沙研究*, 2014(2):49-54.
- [9] 史倩华,王文龙,郭明明,等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(9):2673-2680.
- [10] 史倩华,李焱林,王文龙,等. 不同植被措施对露天煤矿排土场边坡径流产沙影响[J]. *草地学报*, 2016, 24(6):1263-1271.
- [11] Peng X D, Shi D M, Jiang D, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2014, 123: 215-224.
- [12] 丁文斌,史东梅,何文健,等. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18):153-161.
- [13] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等. 2 种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3):558-569.
- [14] 刘瑞顺,王文龙,廖超英,等. 露天煤矿排土场边坡防护措施减水减沙效益分析[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(4):59-64.
- [15] 山东省水利厅(鲁水保字[2016]1号). 山东省水利厅关于发布省级水土流失重点预防区和重点治理区的通告[Z]. 2016-01-25.
- [16] 刘震. 水土保持监测技术[M]. 北京:中国大地出版社, 2004.
- [17] 张光辉,梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(3):78-83.
- [18] 吴发启,范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2):97-101.
- [19] 耿晓东,郑粉莉,张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4):36-43.
- [20] 吴冰,朱元骏,邵明安. 含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1):99-103.
- [21] 符素华,路炳军,叶芝菡. 地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2):15-18, 34.
- [22] Wilcox B P, Wood M K, Tromble J M. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes [J]. *Journal of Range Management*, 1988, 41: 197-206.
- (上接第 79 页)
- [24] She D L, Liu D D, Xia Y Q, et al. Modeling effects of land use and vegetation density on soil water dynamics: Implications on water resource management [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28:2063-2076.
- [25] 樊军,邵明安,王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. *草地学报*, 2006, 14(3):261-264.
- [26] Shaltout K H, Sheded M G, El-Kady H F, et al. Phytosociology and size structure of *Nitraria retusa* along the Egyptian Red Sea coast [J]. *Journal of Arid Environment*, 2003, 53: 331-345.
- [27] 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.
- [28] Mc Claran M P, Moore-Kucera J, Martens D A, et al. Soil carbon and nitrogen in relation to shrub size and death in a semi-arid grassland [J]. *Geoderma*, 2008, 145(1/2): 60-68.
- [29] Du H D, Jiao J Y, Jia Y F, et al. Phytogenic mounds of four typical shoot architecture species at different slope gradients on the Loess Plateau of China [J]. *Geomorphology*, 2013, 193: 57-64.
- [30] 樊瑞霞,李学斌,陈林,等. 荒漠草原油蒿 (*Artemisia ordosica*) 种群的空间分布格局特征[J]. *北方园艺*, 2016(1):45-50.
- [31] 韩磊,张媛媛,解李娜,等. 狭叶锦鸡儿和小叶锦鸡儿灌丛沙堆的形态和发育及灌丛固沙能力的比较研究[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(3):65-70.
- [32] 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.
- [33] 郝红敏. 水蚀风蚀交错带灌丛斑块结构及动态特征研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [34] 陈东,张宇清,吴斌,等. 毛乌素沙地南缘油蒿 (*Artemisia ordosica*) 灌丛沙堆形态特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(3):565-572.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Ravi S, Breshears D D, Huxman T E, et al. Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic-aeolian erosion and vegetation dynamics [J]. *Geomorphology*, 2010, 116(3/4): 236-245.
- [38] Ravi S, D'Odorico P, Okin G S. Hydrologic and aeolian controls on vegetation patterns in arid landscapes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): 1061-1064.