



风沙区柠条沙堆土壤有机质及酶活性特征研究

牛宋芳^{1,2}, 刘秉儒^{1,2*}, 王利娟^{1,2}

(1 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 2 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要: 为探索柠条(*Caragana korshinskii*)沙堆土壤有机质及土壤酶活性的空间异质性, 选取不同大小的柠条沙堆, 对其顶部、中部及底部的有机质含量、土壤酶活性变化情况进行分析研究。结果显示: (1) 土壤 pH 值及含水量与柠条灌丛沙堆的大小没有明显的规律, 在沙堆不同部位之间差异不显著; 土壤有机质随沙堆的增大而减少, 且 10~20 cm 土层沙堆顶部的有机质含量显著高于中部和底部。(2) 土壤脲酶与蔗糖酶活性随沙堆的增大而降低, 磷酸酶与过氧化氢酶活性随沙堆的增大表现为先升高后降低, 4 种土壤酶活性基本上由沙堆的顶部向底部递减, 随着土壤深度的增加, 土壤酶活性显著降低。(3) 沙堆的大小、土壤 pH 值及土壤含水量与蔗糖酶活性均存在显著负相关关系, 与磷酸酶活性之间存在极显著负相关关系; 土壤有机质含量与过氧化氢酶活性之间无明显相关性, 与其他 3 种酶活性之间呈极显著正相关关系。研究表明, 柠条能够改善沙堆上的土壤养分, 提高土壤酶活性, 对荒漠区退化土壤具有改善作用, 但随着沙堆的发育这种作用逐渐降低。

关键词: 柠条; 灌丛沙堆; 土壤有机质; 土壤酶活性

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

Studies on Organic Matter and Soil Enzyme Activity Characteristics of *Caragana korshinskii* Nebkhas

NIU Songfang^{1,2}, LIU Bingru^{1,2*}, WANG Lijuan^{1,2}

(1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration of North-western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Key Lab. for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To study the spatial heterogeneity of soil organic matter (SOM) and soil enzyme of *Caragana korshinskii* shrub nebkhas, we evaluated the content of SOM and enzyme activities (urease, saccharase, phosphatase, catalase) of different size *C. korshinskii* shrub nebkhas in three positions (the top, the middle and the bottom of nebkhas). The results indicated that: (1) the different sizes of nebkhas had no significantly effect on content of soil water moisture and pH value and it had little different among top, middle and bottom positions. The content of SOM decreased with the nebkhas development. The SOM content of top is higher than that of others obviously. (2) The activity of urease and saccharase decreased with the nebkhas development, while phosphatase and catalase first increased and then decreased. The soil en-

收稿日期: 2017-04-09; 修改稿收到日期: 2017-06-01

基金项目: 宁夏自然科学基金(No. NZ15001)

作者简介: 牛宋芳(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事生态恢复理论与技术研究。E-mail: 983557664@qq.com.

* 通信作者: 刘秉儒, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事生态恢复理论与技术研究。E-mail: bingru.liu@163.com

zyme activities decreased from top to bottom of nebkhas. The soil enzyme activities decreased with soil depth. The soil pH value, nebkhas size and soil water moisture were shown significant negative relation to soil saccharase enzyme activities ($P < 0.05$), while had very significant negative to phosphatase. The SOM content had no correlation with catalase, while had very significant positive to others. These results suggested that *C. korshinskii* could increase soil nutrient and enhance soil enzyme activities. *Caragana* could play a vital role in soil recovery in a graded area of a desert zone and gradually reduced with the development of the nebkhas.

Key words: *Caragana korshinskii*; nebkhas; soil organic matter; soil enzyme activity

灌丛沙堆是干旱、半干旱区常见的风沙地貌类型^[1],主要组成物质为沙和植物凋落物^[2],由于沙堆上与沙堆间土壤在有机质、全氮等养分间存在着极大的空间异质性,又将灌丛沙堆称为“肥岛”、“资源岛”^[3]。近年来,灌丛沙堆已成为国内外研究的热点,尤其在沙堆的形态特征^[4-5]、固沙能力^[6-7]、“肥岛”效应^[8-9]等方面展开了大量研究。柠条是豆科锦鸡儿属灌木,因具有较强的固沙抗旱能力,在荒漠风沙区被广泛种植^[10]。柠条灌丛生态特征的研究一度成为荒漠区固沙植物研究热点,主要集中于柠条灌丛的群落特征、土壤养分分布、固沙能力等方面,如徐荣等^[11]对宁夏盐池县沙地中不同种植密度下柠条灌丛群落结构特征进行研究;潘军等^[12]发现柠条灌丛对周围土壤养分具有显著的改善作用;虎瑞等^[13]通过比较不同季节柠条灌丛根际、灌丛外及灌丛间酶活性发现,柠条的生长能够提高土壤养分及酶活性。随着研究的不断深入,贺学礼等^[14]研究发现柠条根际 AM 真菌多样性也存在明显的空间异质性。大多数报道均得出柠条灌丛能够改善其生长的微环境、提高土壤养分的结论,却很少关注柠条灌丛及灌丛沙堆在不同生长过程、发育阶段中土壤养分及土壤酶活性特征。

土壤酶是土壤重要的组成部分,它与土壤中有机的分解及微生物的组成类型密切相关^[15],土壤酶及微生物参与了沙堆发育的整个过程,包括凋谢物的降解、养分的循环等过程并能够改变土壤的物理化学性质^[16-17]。柠条灌丛的土壤养分、微生物分布的空间异质性已有很多报道,但对沙堆形成过程中土壤酶活性特征差异及其空间异质性规律的研究还有所欠缺。因此,本试验对沙堆不同部位的土壤有机质及土壤酶活性的分布规律进行研究,探讨不同大小柠条沙堆有机质及土壤酶活性是否存在空间异质性,以及其在沙堆上不同位置分布的特点,可为风沙区灌丛沙堆发育阶段的划分提供一定的依据,并为荒漠化的生态恢复提供基础数据及参考。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

研究区位于盐池县大水坑镇,地处宁夏东部,在黄土高原向鄂尔多斯台地的过渡带上,平均海拔在 1 560 m 左右,该镇气候属于典型的大陆性季风气候,年降水量不足 300 mm,年平均气温 8 ℃,常年盛行西风、西北风,主要土壤类型为风沙土和灰钙土,植被类型以荒漠草原、沙生植被为主,常见的植物有沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等。柠条沙堆在该研究区呈散乱的岛屿状分布,沙堆上的柠条为 2001 年人工栽植,用以防风固沙。

1.2 沙堆的选择及取样方法

采样时间为 2016 年 8 月初,根据沙堆的形态特征,将沙堆划分为小沙堆、中沙堆、大沙堆,每一类沙堆各选取 5 个外形相近、生长状况相似、植被覆盖度相差不大的沙堆作为研究对象,同时以沙堆外的空地上随机选取 5 个点作为沙堆外的对照,沙堆的形态特征如表 1 所示。在每类沙堆的顶部、中部及底部(顶部为灌丛的根部,中部为灌丛下、沙堆中间的部位,底部为灌丛边缘、与平地交接的部位)分别取 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土样,每个部位均在沙堆的东西南北各取一份混合后作为 1 份样品,沙堆外的采样点各取 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土样,将所有采集的样品装入已编号的自封袋中带回室内。样品室内风干,挑出植物的碎屑、细根,过 2 mm 筛后用于测定。

1.3 测定方法

土壤 pH 采用 PHSJ-4 实验室 pH 计测定;土壤含水量采用烘干法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾容量-外加热法测定;土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,以 1 h 内消耗的 0.1 mol/L 高锰酸钾体积数表示;土壤脲酶活性采用苯酚钠一次氯酸钠比色法,以 24 h 每克土中产生的铵态氮毫克数表示;土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法,以

24 h 每克土中释放的酚毫克数表示;土壤蔗糖酶活性采用 3,5- 二硝基水杨酸比色法,以 24 h 每克土中产生的还原糖毫克数表示^[18]。

1.4 数据处理方法

试验数据采用 Excel 2010 进行存储和初步处理;用 SPSS 17.0 进行统计分析,单因素 ANOVA 最小显著差异法(LSD)分析差异性,用配对 t 检验分析 3 种沙堆的 4 种酶活性在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层间的差异性,Pearson 相关系数表示各变量之间的相关性;Origin 9.1 制图。

2 结果与分析

2.1 柠条沙堆土壤 pH、含水量和有机质特征

研究区土壤的 pH 值在 8.5 左右,随着灌丛沙

堆的增大,同一层土壤的 pH 值呈先减小后增大的趋势,中沙堆土壤 pH 值最小,小沙堆最大;同一沙堆的不同深度和沙堆外的土壤 pH 值均表现为 10~20 cm 土层显著高于 0~10 cm 土层;而在沙堆的不同部位之间,土壤 pH 值无显著性差异($P>0.05$);沙堆外的土壤 pH 值与中沙堆 pH 值相近(表 2)。

沙堆之间的土壤含水量在水平方向的差异不明显,即沙堆的顶部、中部以及底部在同一层中土壤含水量差异不大;而垂直方向,10~20 cm 土层含水量高于 0~10 cm,且差异显著($P<0.05$),这可能是由于 0~10 cm 土壤表面的水分受到蒸腾作用而使土壤表层含水量急剧下降;随着沙堆的不断增大,0~10 cm 土层中含水量在中沙堆中最大,10~20 cm 土

表 1 灌丛及沙堆的形态特征
Table 1 Morphological characteristic of different size shrub and nebkhas

沙堆 Nebkhas	形态特征 Morphological characteristic	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Average value	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
SN	灌丛水平尺度 Shrub horizontal scale /cm	40	55	47.25	4.87	10.3
	灌丛高度 Shrub height /cm	60	41	48.4	8.02	16.57
	沙堆底面积 Nebkha bottom area /m ²	0.18	0.28	0.23	0.05	21.74
	沙堆高度 Nebkhas height /cm	16	23	20	2.55	12.75
MN	灌丛水平尺度 Shrub horizontal scale /cm	70	110	87.45	10.15	11.6
	灌丛高度 Shrub height /cm	66	92	75.6	10.53	13.93
	沙堆底面积 Nebkha bottom area /m ²	2.26	2.8	2.53	0.25	9.88
	沙堆高度 Nebkhas height /cm	34	40	35.4	2.61	7.37
LN	灌丛水平尺度 Shrub horizontal scale /cm	146	220	183	24.8	13.55
	灌丛水平尺度 Shrub horizontal scale /cm	83	178	125.4	33.92	27.05
	沙堆底面积 Nebkha bottom area /m ²	4.84	8.29	7	1.34	19.14
	灌丛高度 Shrub height /cm	58	80	68.6	8.79	12.81

注:SN. 小沙堆;MN. 中沙堆;LN. 大沙堆;下同
Note: SN. Small nabkhas, MN. Middle nabkhas, LN. Large nabkhas. The same applies bellow

表 2 灌丛沙堆不同位置的土壤 pH 值
Table 2 The soil pH in different spatial positions of nebkhas

沙堆类型 Nebkhas type	0~10 cm			10~20 cm		
	TP	MP	BP	TP	MP	BP
SN	8.32±0.2b	8.55±0.15a	8.55±0.15a	8.69±0.02a	8.76±0.04a	8.74±0.02a
MN	8.38±0.04a	8.35±0.04a	8.35±0.04a	8.45±0.08a	8.5±0.15a	8.53±0.02a
LN	8.65±0.11a	8.54±0.31a	8.54±0.31a	8.75±0.19a	8.58±0.05a	8.65±0.15a
ON		8.38±0.11b			8.59±0.05a	

注:ON. 沙堆外;TP. 沙堆的顶部;MP. 沙堆的中部;BP. 沙堆的底部。同行不同小写字母表示同一土层位置之间有显著性差异($P<0.05$);下同

Note: ON. Out of nebkhas; TP. Top position, MP. Medium position, BP. Bottom position. Means in row followed by the different letter are significantly different ($P<0.05$); The same applies bellow

表 3 沙堆不同位置的土壤含水量

Table 3 The content of soil water in different positions of nebkhas

沙堆类型 Nebkhas type	0~10 cm			10~20 cm		
	TP	MP	BP	TP	MP	BP
SN	0.51±0.08Ba	0.36±0.08Bab	0.40±0.15Ba	2.00±0.70Aa	1.87±0.30Ba	1.40±0.14Ba
MN	0.97±0.43Aa	0.70±0.32Aa	0.55±0.11ABa	1.43±0.64Aa	1.68±0.35BCa	1.66±0.36Ba
LN	0.56±0.14Ba	0.50±0.09ABa	0.61±0.14Aa	1.31±0.50Aa	1.48±0.22Ca	1.53±0.37Ba
ON	0.45±0.14Ba	0.45±0.14Ba	0.45±0.14Ba	2.10±0.83Aa	2.10±0.83Aa	2.10±0.83Aa

注:同列不同大写字母表示不同大小沙堆的土壤含水量差异显著($P<0.05$)。下同
Note: Means in column follow by the different capital letters are significantly different ($P<0.05$). The same applies bellow

表 4 沙堆不同位置的土壤有机质含量

Table 4 Content of soil organic matter in different position of nebkhas

沙堆类型 Nebkhas type	0~10 cm			10~20 cm		
	TP	MP	BP	TP	MP	BP
SN	8.01±1.34Aa	7.81±1.48Aa	7.27±1.71Aa	7.61±1.3Aa	3.91±0.84ABc	6.00±0.95Ab
MN	7.16±1.79Aa	6.54±1.01ABa	5.87±0.79Aa	6.72±1.75Aa	4.66±1.03Ab	3.63±1.02Bb
LN	4.36±1.24Bab	6.05±1.49Ba	3.68±1.04Bb	4.43±1.16Ba	2.84±1.43Bab	2.25±1.66Bb
ON	2.36±1.17Ca	2.36±1.17Ca	2.36±1.17Ba	3.78±1.10Ba	3.78±1.10ABa	3.78±1.10Ba

层含水量以小沙堆最大(表 3)。同时,沙堆外 0~10 cm 的土壤含水量小于沙堆,这可能是由于沙堆上有灌丛的遮挡以及凋落物的覆盖导致的;而 10~20 cm 土壤含水量却高于沙堆,说明在沙堆上由于柠条根部的吸收使含水量较沙堆外低。

不同大小的沙堆土壤有机质含量不同(表 4)。随着灌丛沙堆的增大,土壤有机质含量呈递减的趋势,小沙堆与大沙堆的土壤有机质含量在不同部位均存在显著性差异($P<0.05$),沙堆上 0~10 cm 土层有机质含量高于沙堆外,且差异显著($P<0.05$);在不同土层土壤中,0~10 cm 土壤有机质含量高于 10~20 cm,但没有显著性差异($P>0.05$),沙堆外却相反;就单个沙堆而言,有机质含量从沙堆的顶部到底部基本呈递减趋势,但差异不显著($P>0.05$)。

2.2 不同大小灌丛沙堆中 4 种土壤酶活性的差异

不同大小柠条沙堆的不同部位、不同土层深度的土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶及磷酸酶活性大小见表 5。4 种土壤酶活性因沙堆的大小不同存在差异,在 0~10 cm 土层,随着沙堆的增大,土壤蔗糖酶活性递减,磷酸酶和过氧化氢酶的活性表现为先升高后降低,除沙堆外脲酶活性高于每个沙堆 3 个部位的平均值外,其他 3 种酶活性均低于沙堆的平均值;在 10~20 cm 土层中,沙堆外土壤脲酶和磷酸酶活性高于大沙堆和小沙堆,而过氧化氢酶活性显著

低于沙堆上($P<0.05$)。由此可见,中沙堆的 4 种土壤酶活性在 3 类沙堆中平均酶活性最高。不同土层之间土壤酶活性差异较大,随着土层深度的增加,3 类沙堆中蔗糖酶和磷酸酶活性 10~20 cm 土层高于 0~10 cm 土层;在沙堆的同一土层不同部位之间,脲酶、过氧化氢酶及磷酸酶活性均由顶部向底部递减,在 0~10 cm 土层中沙堆顶部与底部的 4 种酶活性存在显著性差异($P<0.05$),最大值出现在各个沙堆的顶部,这可能是植物的枯落物、根系分泌物等影响微生物的活动造成的;在 10~20 cm 土层中除蔗糖酶活性在小沙堆和大沙堆表现为沙堆中部大于沙堆顶部外,脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性均由顶部至底部递减。

2.3 相关性分析

沙堆大小与土壤理化性质之间的相关性分析(表 6)表明,沙堆底面积与高之间存在极显著的正相关($P<0.01$),沙堆的大小与有机质、脲酶及蔗糖酶之间存在极显著的负相关($P<0.01$);土壤 pH 值与土壤有机质之间存在显著的负相关($P<0.05$),而与 4 种土壤酶活性之间均呈极显著的负相关($P<0.01$),与土壤含水量之间的相关关系不明显;土壤含水量仅与蔗糖酶及磷酸酶呈显著的负相关($P<0.05$);土壤有机质与除过氧化氢酶外的其他 3 种土壤酶活性之间呈极显著的正相关($P<0.01$)。

表 5 不同大小灌丛沙堆不同位置的土壤酶活性差异

Table 5 The difference of soil enzyme activities in different positions of different nebkhas sizes

酶活性 Enzyme activity	深度 Depth /cm	SN			MN			LN			ON
		TP	MP	BP	TP	MP	BP	TP	MP	BP	
UA /[mg/(g·24 h)]	0~10	0.59a	0.51ab	0.41b	0.49a	0.55a	0.47a	0.42a	0.35a	0.29ab	0.52
	10~20	0.43a	0.40a	0.33a	0.75a	0.72a	0.53a	0.29a	0.25ab	0.21b	0.45
	平均 Mean	0.51a	0.46a	0.37a	0.62ab	0.64a	0.5a	0.31a	0.30a	0.25a	0.48
SA /[mg/(g·24 h)]	0~10	223.24a	225.11a	144.03b	212.46a	202.93ab	141.77b	153.29a	151.22a	135.32a	119.4
	10~20	157.31a	179.77a	142.17a	166.57a	119.51ab	100.29b	120.01a	93.81a	100.37a	108.7
	平均 Mean	190.28a	202.44a	143.10b	189.52a	161.22ab	121.03b	136.65a	122.52a	190.28a	114.1
PHA /[mg/(g·24h)]	0~10	5.6a	5.13a	3.24b	5.83a	4.52ab	3.48b	4.19a	4.15a	3.85b	4.03
	10~20	3.05a	2.80a	2.60a	5.21a	4.26a	3.76a	2.86a	2.45b	2.2c	3.02
	平均 Mean	4.33a	3.97ab	2.92b	5.52a	4.39a	3.57b	3.53a	3.30b	3.03c	3.53
CA /[mL/(g·h)]	0~10	0.42a	0.38ab	0.28b	0.75b	0.66a	0.52c	0.48b	0.39a	0.39b	0.21
	10~20	0.26a	0.25a	0.20a	0.49a	0.3b	0.27b	0.37b	0.32a	0.28a	0.07
	平均 Mean	0.34a	0.32a	0.24a	0.51a	0.48a	0.40a	0.43a	0.36a	0.34b	0.14

注:UA.脲酶;SA.蔗糖酶;PHA.磷酸酶;CA.过氧化氢酶;下同
Note: UA. Urease; SA. Saccharase; PHA. Phosphatase; CA. Catalase. The same applies below

表 6 沙堆大小与土壤理化性质之间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between the sizes of nebkhas and soil physical and chemical properties

指标 Index	沙堆底面积 Shrub bottom area	沙堆高 Shrub height	pH	土壤含水量 Soil moisture	SOM	CA	UA	SA
沙堆高 Shrub height	0.976**							
pH	0.107	0.116						
土壤含水量 Soil moisture	−0.096	−0.076	0.207					
SOM	−0.537**	−0.550**	−0.244*	−0.295**				
CA	−0.004	−0.021	−0.324**	0.077	0.002			
UA	−0.448**	−0.449**	−0.348**	0.107	0.329**	0.256*		
SA	−0.425**	−0.423**	−0.275**	−0.231*	0.576**	0.013	0.285**	
PHA	−0.206	−0.217*	−0.456**	−0.287**	0.446**	0.192	0.315**	0.560**

注: * 和 ** 分别表示相关性在 0.05 和 0.01 水平显著
Note: * and ** represent significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively

3 讨 论

3.1 不同大小沙堆养分的变化与发育阶段的关系

通常根据沙堆水平尺度与高度的差异,将沙堆的发育阶段划分为发展、稳定及衰退 3 个阶段^[19],也有学者将发育阶段之前的阶段称为雏形阶段^[20]。李志忠等^[21]在研究每一发育阶段沙堆形态后,提出在每一发育阶段,沙堆都有其特定的形态特征。杜建会等^[22]研究不同发育阶段的白刺沙堆表面土壤理化性质后发现沙堆土壤养分之间也存在差异,即在稳定期养分含量最大,但也有研究表明不同发育阶段沙堆的养分没有显著性差异^[23]。本研究中不同大小柠条沙堆的形态之间存在显著差异,将沙堆

由小到大依次划分为沙堆的雏形期、发育期及稳定期,随着沙堆的不断发育,有机碳含量递减,在稳定期达到最低,这与之前的研究结论^[24]并不一致。综合分析,可能是由于风沙区的沙堆上植物的覆盖、凋落物影响及风力差异造成的。灌丛沙堆的形成及发育主要受植被、风力及沙源 3 个因素的影响^[25],植物凋落物的差异影响着微生物的活动及土壤有机质含量,沙源及风力的作用会影响沙堆的形态结构。本研究中沙堆上植被覆盖度随着沙堆的增大逐渐降低,植物种类尤其是一年生植物不断减少,土壤中有有机碳的含量是由植物每年的归还量和微生物的分解速率影响的^[26],因此,植被的凋落物减少,会造成有机碳含量减少。土壤酶活性可以表征土壤微生物活

动的强弱。本研究中,随着沙堆的增大,土壤中 4 种酶活性有 3 种表现为中沙堆最大,即发育阶段酶活性最高,相对大沙堆有机碳含量较高。研究区位于风沙区,风向主要为西风、西北风,沙源丰富,沙堆越大,与风的接触面越多,凋落物不易固定,有机物质不易在沙堆上累积,可能会造成发育阶段的沙堆有机质含量不及小沙堆高。

3.2 沙堆上有机质与酶活性的空间异质性

灌丛能够控制土壤养分的分布、土壤生物的活动及土壤理化性质的演变^[27]。在荒漠草原区,灌丛沙堆“肥岛”效应的存在,沙堆内外之间的异质性随发育阶段的增加逐渐加大^[28],而在沙堆上不同位置的土壤养分也具有空间差异^[27]。张璞进等^[29]认为沙堆内有机质、全磷等养分含量均大于沙堆间,随着沙堆的增大,异质性增强,在单个沙堆中,养分从沙堆的顶部、中部到沙堆间依次递减;Cao 等^[27]对三种锦鸡儿的研究表明,随着土层的增加,土壤酶活性降低,且随着离灌丛的距离增加而递减。本研究证实灌丛沙堆的形成会对土壤理化性质产生影响,同沙堆外相比,柠条沙堆内外之间的异质性随沙堆的增大逐渐减少,且沙堆的有机质含量在顶部最高,土壤酶活性由灌丛顶部到底部呈现逐渐减少的趋势。

这可能是由于在沙堆的顶部,枝条根茎较多,对风沙的遮挡效果好,并能富集更多的有机物质,而在沙堆的中部和底部,大部分裸露在外,凋落物无法长时间停留分解。有研究表明,植物根际分泌物会影响微生物的活动,并会造成土壤有机质的差异。对于根际分泌物及沙堆上植物的截留作用对沙堆有机质及酶活性的具体影响,有待于进一步研究。

4 结 论

柠条灌丛沙堆内外养分及酶活性之间具有显著差异性,空间异质性较明显,小沙堆对土壤有机质的富集作用最强;不同大小柠条沙堆上土壤有机质及酶活性具有一定的差异,小沙堆的土壤有机质含量与脲酶、蔗糖酶活性最高,中沙堆磷酸酶和过氧化氢酶活性最高;同一沙堆不同部位之间也具有异质性,由沙堆的顶部、中部到底部,4 种土壤酶活性依次减少;4 种土壤酶活性与 pH 值之间具有极显著的负相关;土壤有机质与除过氧化氢酶活性外的其他 3 种酶活性具有极显著正相关。柠条能够改善沙堆上的土壤养分,提高土壤酶活性,对荒漠区退化土壤具有改善作用,但随着沙堆的不断发育这种作用逐渐降低。

参考文献:

[1] ARDON K, TSOAR H, BLUMBERG D G. Dynamics of nebkhas superimposed on a parabolic dune and their effect on the dune dynamics [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, **73** (11): 1 014-1 022.

[2] KHALAF F I, ALAWADHI J M. Sedimentological and morphological characteristics of gypseous coastal nabkhas on Bubiyan Island, Kuwait, Arabian Gulf[J]. *Journal of Arid Environments*, 2012,**82**(246): 31-43.

[3] CARRERA A L, BERTILLER M B, SAIN C L, *et al.* Relationship between plant nitrogen conservation strategies and the dynamics of soil nitrogen in the arid Patagonian Monte Argentina[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255: 595-604.

[4] AHMED M M, AL-DOUSARI A M, BABY S. Chemical and morphological characteristics of phytogenic mounds (Nabkhas) in Kuwait[J]. *Arab Gulf Journal of Scientific Research*, 2009,**27**(3):114-123.

[5] ALAWADHI J M. The effect of a single shrub on wind speed and nebkhas dune development: a case study in Kuwait[J]. *International Journal of Geosciences*, 2013,**5**(1):20-26.

[6] 尚河英, 尹忠东, 张 鹏. 盐爪爪沙堆形态特征及其固沙能力分析——以卡拉贝利工程区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2016, (4): 79-84.

SHANG H Y, YIN Z D, ZHANG P. An analysis on *Kalidium foliatum* morphology and the sand fixation ability of nebkha[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, (4): 79-84.

[7] 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, (1): 1-7.

GAO Y, DANG X H, YU Y, *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, (1): 1-7.

[8] 刘学东, 陈 林, 杨新国, 等. 荒漠草原 2 种柠条 (*Caragana korshinskii*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 灌丛土壤养分“肥岛”效应[J]. 西北林学院学报, 2016, (4): 26-32, 92.

LIU X D, CHEN L, YANG X G, *et al.* “Fertile land” effect of soil nutrients occurring in *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* shrubs in desert steppe[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, (4): 26-32, 92.

[9] 涂锦娜, 熊友才, 张 霞, 等. 玛河流域扇缘带盐穗木土壤速效养分的“肥岛”特征[J]. 生态学报, 2011, (9): 2 461-2 470.

TU J N, XIONG Y C, ZHANG X, *et al.* “Fertile island” features of soil available nutrients around *halostachys caspica* shrub in the alluvial fan area of Manas River watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, (9): 2 461-2 470.

[10] 高 函, 吴 斌, 张宇清, 等. 行带式配置柠条林防风效益风洞试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 44-47.
GAO H, WU B, ZHANG Y Q, *et al.* Wind tunnel test of wind speed reduction of *Caragana korshinskii* coppice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(4): 44-47.

[11] 徐 荣. 宁夏河东沙地不同密度柠条灌丛草地水分与群落特征的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.

[12] 潘 军, 安超平, 吴旭东, 等. 荒漠草原 2 种锦鸡儿灌丛化过程中土壤养分分布规律[J]. 水土保持学报, 2015, (6): 131-136.
PAN J, AN C P, WU X D, *et al.* Distribution pattern of soil nutrients in the thicketization of 2 type of *Caragana* in desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, (6): 131-136.

[13] 虎 瑞, 王新平, 张亚峰, 等. 沙坡头地区固沙植被对土壤酶活性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, (5): 676-682.
HU R, WANG X P, ZHANG Y F, *et al.* Impact of sand-stabilizing shrubs on soil enzyme activities in Shapou area[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 2015, (5): 676-682.

[14] 贺学礼, 陈 燕, 郭辉娟, 等. 荒漠柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性[J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3 041- 3 049.
HE X L, CHEN Z, GUO H J, *et al.* Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Caragana korshinskii* Kom. in desert zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(10): 3 041-3 049.

[15] 吴旭东, 张晓娟, 谢应忠, 等. 不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J]. 草业学报, 2013, **22**(1): 245-251.
WU X D, ZHANG X J, XIE Y Z, *et al.* Vertical distribution characters of soil organic carbon and soil enzyme activity in alfalfa filed with different growing years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, **22**(1): 245-251.

[16] NOGUEIRA M A, ALBINO U B, BRANDAOJUNIOR O, *et al.* Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, **115**(1/4): 237-247.

[17] VASCONCELLOS R L F, BONFIM J A, ANDREOTE F D, *et al.* Microbiological indicators of soil quality in a riparian forest recovery gradient[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **53**(3): 313-320.

[18] 邵文山, 李国旗, 陈科元, 等. 荒漠草原 4 种常见植物群落土壤酶活性比较[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(3): 579-587.
SHAO W S, LI G Q, CHEN K Y, *et al.* Comparative studies on soil enzyme activities of four kinds of common plant communities in desert steppe[J]. *Acta Botanica Boreail-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(3): 579-587.

[19] TENGBERG A, CHEN D. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. *Geomorphology*, 1998, **22**(2): 181-192.

[20] 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.
SUN T, TANG J N, HAN F G, *et al.* Progress and prospects of desert nebkhas research in arid areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, **36**(4): 351-356.

[21] 李志忠, 武胜利, 王晓峰, 等. 新疆和田河流域怪柳沙堆的生物地貌发育过程[J]. 地理学报, 2007, **62**(5): 462-470.
LI Z Z, WU S L, WANG X F, *et al.* Bio-geomorphologic growth process of *Tamarix nabkha* in the Hotan River Basin of Xinjiang [J]. *Acta Geographica Sinia*, 2007, **62**(5): 462-470.

[22] 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 J H, YAN P, DING L G, *et al.* Soil physical and chemical properties of *Nitraria tangutorun* nebkhas surface at different development stages in Minqin Oasis[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, **29**(2): 248-253.

[23] 陈鸿洋, 尚振艳, 傅 华, 等. 荒漠区不同大小灌丛周围土壤微生物生物量及活性特征[J]. 草业学报, 2015, **24**(2): 70-76.
CHEN H Y, SHANG Z Y, FU H, *et al.* Soil microbial biomass and activity under desert shrub canopies[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(2): 70-76.

[24] 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 J H, YAN P, DONG Y X. The progress and prospects of nebkhas in arid areas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(3): 339-350.

[25] LI S L, ZUIDEMA A P, YU F H, *et al.* Effects of denudation and burial on growth and reproduction of *Artemisia ordosica* in Mu Us sand land[J]. *Ecological Research*, 2010, **25**(3): 655-661.

[26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[27] CAO C, ABULAJIANG Y, ZHANG Y, *et al.* Assessment of the effects of phytogenic nebkhas on soil nutrient accumulation and soil microbiological property improvement in semi-arid sandy land [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 582-589.

[28] 熊小刚, 韩兴国. 内蒙古半干旱草原灌丛化过程中小叶锦鸡儿引起的土壤碳、氮资源空间异质性分布[J]. 生态学报, 2005, **25**(7): 1 678-1 683.
XIONG X G, HAN X G. Spatial heterogeneity in soil carbon and nitrogen resources, caused by *Caragana microphylla*, in the thicketization of semiarid grassland, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1 678-1 683.

[29] 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.
ZHANG P J, YANG J, SONG B Y, *et al.* Spatial heterogeneity of soil resources of *Caragana tibetica* community[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**(2): 338-346.

(编辑: 潘新社)