

四合木灌丛衰退对沙堆养分及沉积特征的影响

王言意¹, 党晓宏^{1,2,3}, 高永¹, 蒙仲举^{1,2}, 刘阳⁴

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古杭锦旗荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400;

3.包头市林业和草原局, 内蒙古 包头 014030; 4.内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 探究西鄂尔多斯国家级自然保护区四合木(*Tetraena mongolica*)灌丛衰退对其沙堆养分及沉积特征的影响, 为干旱荒漠区灌丛衰退及沙堆养分聚集效应等相关研究提供理论基础。[方法] 以四合木灌丛为研究对象, 对不同衰退程度四合木灌丛沙堆土壤样品进行采集, 通过分析其表层沉积物粒度及沙堆养分特征, 探讨灌丛衰退对沙堆的影响。[结果] ①西鄂尔多斯国家级自然保护区四合木灌丛沙堆表层沉积物主要以细砂为主, 各衰退程度四合木灌丛表层沉积物细砂含量均超60%。随着灌丛衰退程度的下降, 灌丛表层沉积物细砂及粗砂含量增加。四合木灌丛沙堆表层沉积物粒度近似为单峰, 峰值粒径介于15.07~447.95 μm ; 裸沙地出现明显双峰, 峰值为12.35~494.94 μm 和546.86~1482.94 μm 。②四合木灌丛沙堆土壤养分含量均与丘间空地显著差异($p < 0.05$), 且衰退程度>60%的四合木灌丛养分含量更高。③四合木灌丛沙堆养分显著高于丘间空地, 对养分的积累有正效应, 存在“肥岛”效应。对AN的富集能力最强, 对SOM的富集能力最弱。除60%>衰退程度>30%的四合木灌丛外, 其余衰退程度四合木灌丛对沙堆养分富集作用差异不明显。[结论] 整体上看, 研究区四合木灌丛沙堆衰退程度越大, 表层沉积物细砂与粗砂含量越小, 其下养分含量更高。

关键词: 四合木; 富集效应; 土壤养分; 灌丛沙堆

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0065-09

中图分类号: P931.3

文献参数: 王言意, 党晓宏, 高永, 等. 四合木灌丛衰退对沙堆养分及沉积特征的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 65-73. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.008; Wang Yanyi, Dang Xiaohong, Gao Yong, et al. Effects of *Tetraena mongolica* shrub degradation on nutrient and sedimentary characteristics of sand piles [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 65-73.

Effects of *Tetraena Mongolica* Shrub Degradation on Nutrient and Sedimentary Characteristics of Sand Piles

Wang Yanyi¹, Dang Xiaohong^{1,2,3}, Gao Yong¹, Meng Zhongju^{1,2}, Liu Yang⁴

(1. School of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. National Positioning and Observation

Research Station of Hangjin Desert Ecosystem, Ordos, Inner Mongolia 017400, China;

3. Baotou Forestry and Grassland Bureau, Baotou, Inner Mongolia, 014030, China; 4. Research

Institute of Water Resources of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] The effects of *Tetraena mongolica* shrub decline on the nutrient and sedimentary characteristics of nebkhas in the West Ordos National Nature Reserve were determined, in order to provide a theoretical basis for the study of shrub decline and the nutrient accumulation effect of nebkhas in arid desert areas. [Methods] Taking *Tetraena mongolica* shrubland as a study area, soil samples from *Tetraena mongolica* shrubland areas with different degrees of shrub decline were collected, and the effects of shrub decline on sand piles were determined by analyzing the grain size of surface sediments and nutrient characteristics of sand piles. [Results] ① The surface sediments of the sand piles of the *Tetraena mongolica* shrub in the Ordos National Nature Reserve were mainly fine sand. The fine sand content of the surface

收稿日期: 2023-10-27

修回日期: 2023-11-30

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: 王言意(1999—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区乌兰浩特市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: wangyanyi2021@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, 主要从事水土保持与荒漠化防治的研究。Email: dangxiaohong1986@126.com.

sediments of the *Tetraena mongolica* shrub in each decline degree exceeding 60%. With decreasing shrub decline, the content of fine sand and coarse sand in shrub surface sediments increased. The grain size of the surface sediment of the sand pile of the *Tetraena mongolica* shrub was approximately a single peak, and the peak particle size was between 15.07 and 447.95 μm . The bare sandy land showed obvious double peaks at 12.35—494.94 μm and at 546.86—1482.94 μm . ② There were significant differences ($p < 0.05$) in soil nutrient content between the sand dunes and the interdune space (areas with *Tetraena mongolica* shrub decline greater than 60% had higher nutrient content). ③ The nutrient content of sand piles in *Tetraena mongolica* shrubland was significantly higher than that in interdune open space, which had a positive effect on nutrient accumulation, and there was a “fertilizer island” effect. The enrichment ability of AN was the strongest, and the enrichment ability of SOM was the weakest. Except for *Tetraena mongolica* shrublands with decline degrees between 30% and 60%, the recession degree of other *Tetraena mongolica* shrublands on the sand nutrient enrichment effect difference was not obvious. [Conclusion] On the whole, the greater the decay degree of the sand pile in the study area, the smaller the content of fine sand and coarse sand in the surface sediment, and the higher the nutrient content under it.

Keywords: *Tetraena mongolica*; enrichment effect; soil nutrient; nebkha

灌丛沙堆是沙粒被灌木丛拦截,通过影响地表气流结构使沙物质在其周围堆积而成的一种风积地貌,主要分布在干旱半干旱区的荒漠、河湖周边地区以及半湿润区的沙质海岸^[1-3]。长时间以来,干旱半干旱区的灌丛沙堆养分特征及沉积特征的研究一直是生态学领域的热点问题。

荒漠灌丛能促进土壤养分及水分的积累^[4]。在生物与非生物的共同作用下,土壤资源向灌丛聚集的现象被称为“肥岛效应”,它揭示了灌丛对土壤养分的利用机制,并且促进灌丛生长发育、影响灌丛的沉积特征^[5]。“肥岛效应”的本质是土壤养分资源在灌丛冠幅下的聚集效应,“肥岛”的形成能够促进植物根系的生长和发育,属于干旱荒漠区植物利用养分和对环境适应的主要机制。灌丛“肥岛”的存在对于植被—土壤之间的养分循环有重要影响^[6-7]。研究发现,在科尔沁沙地广泛分布的几种灌丛下,C,N,P含量也明显高于丛间空地^[8]。阿拉善地区荒漠草原修复过程中,霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)灌丛下C,N,P聚集效应在表层0—10 cm土层尤为明显^[9]。在干旱荒漠区,灌丛的“肥岛”效应是应对贫瘠沙地的主要策略,且灌丛周围土壤资源的聚集或与灌木类型及距离灌木的位置密切相关^[10]。灌丛沙堆理化性质可以综合反映其质量,任何土壤理化指标的变化都会直接或间接对土壤质量造成不同程度的影响^[11]。粒度特征作为土壤重要的物理属性之一,粒度组成不仅对土壤其他的物理性质、化学性质以及生物性质产生作用,同时还会影响土壤的紧实度、抗蚀性、保水性等性质^[12]。土壤粒度分形维数在表征颗粒大小的同时,还能反映土壤结构的异质性及土壤肥力等,良好的分形特征能有效防止表土粗化、促进细粒物质的积累^[13]。

研究发现,灌丛特征的改变所引起的气流变化会对沙堆形态特征产生影响,因此灌丛的衰退会影响其沙堆的形成及发育^[14],同时对其沙堆土壤水、有机质等含量产生影响。在灌丛衰退过程中,枯落物作为表层土壤养分的来源,极大程度地对沙堆养分产生影响,使土壤养分表现为上层较之下层偏高的规律,产生明显的“表聚”特征^[15-16]。四合木(*Tetraena mongolica*)作为西鄂尔多斯国家级自然保护区主要保护的濒危物种,属于国家二级保护植物,其防风固沙能力及贫瘠环境下的适应能力在荒漠地区尤为重要^[17-18]。通过前期调查发现西鄂尔多斯国家级自然保护区四合木灌丛存在不同程度的衰退现象,或对灌丛沙堆表层沉积物及养分积累情况产生影响。鉴于此,本文通过对西鄂尔多斯国家自然保护区内不同衰退程度的四合木灌丛沙堆表层沉积物及沙堆养分特征进行对比分析,探究四合木灌丛下养分分布与丛间空地间的差异,及灌丛衰退对沙堆养分及沉积特征影响,为荒漠地区灌丛沙堆养分聚集效应等相关研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯高原西缘的西鄂尔多斯国家级自然保护区(106°44′32.59″—107°44′26.3″E, 39°15′2.98″—40°9′14.820″N),是保存较好的原生草原与荒漠过渡带,面积约555 849 hm^2 ,属于典型的温带大陆性气候,干燥少雨、大风多沙,年平均气温5.3~9.2 $^{\circ}\text{C}$,极端气温分别为-35.7 $^{\circ}\text{C}$ 和39.4 $^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量164~272 mm,多集中在7—9月,年平均潜在蒸散发量2 471~3 481 mm。该地区

主要以西北风为主,年平均风速约 3.2 m/s,最大可达 24.2 m/s,且昼夜温差大、太阳辐射强、日照时间长。主要的保护对象为四合木(*Tetraena mongolica*)、半日花(*Helianthemum songaricum*)等珍稀濒危植物^[19]。

1.2 研究方法

2022年8月对研究区四合木灌丛沙堆分布情况进行实地调查,选择地势平坦处设置 100 m×100 m 样方,样方以四合木灌丛为主。根据调查样方内所有四合木灌丛及沙堆形态参数,结合四合木灌丛地上部分的长势、枯枝情况等生物学特征综合判断西鄂尔多斯地区四合木灌丛的衰退情况。同时以东西、南北分别为 X 轴、Y 轴,西南为原点,沿样方对角线等距离设置 3 个 20 m×20 m 的小样方。在每个小样方内

分别选取不同衰退程度的四合木灌丛各 1 株(衰退程度 < 30%, 30% < 衰退程度 < 60%, 衰退程度 > 60%)。用卷尺对小样方内全部灌丛长轴(L_g)、短轴(W_g)、株高(H_g)及沙堆的长轴(L_d)、短轴(W_d)、高度(H_d)测量,计算灌丛冠幅(C)、沙堆底面积(S_d)和沙堆体积(V_d),选取的灌丛形态见表 1。同时,以四合木灌丛中心为圆心、冠幅为半径,在灌丛的东南西北 4 个方向挖取土壤剖面,进行分层取样,取样深度为 0—10, 10—20, 20—30 和 30—40 cm,分别将每株灌丛各土层内各方向的土壤样品均匀混合,并对灌丛沙堆表层沉积物采集的样品,进行土壤养分测定。碱解氮采用碱解扩散法、速效磷采用 NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法、速效钾 NH₄ OAc 浸提火焰光度法、有机质采用重铬酸钾容量法(外加热法)。

表 1 四合木灌丛及沙堆基本情况

Table 1 Basic situation of *Tetraena mongolica* shrub and sand pile

四合木灌丛	L_g/cm	W_g/cm	H_g/cm	L_d/cm	W_d/cm	H_d/cm	冠幅/m ²	底面积/m ²	体积/m ³	
A	1	2.05	1.63	0.473	1.87	1.69	0.34	2.62	2.48	0.56
	2	1.09	1.02	0.44	0.56	0.62	0.19	0.87	0.27	0.03
	3	1.11	1.05	0.403	0.68	0.75	0.16	0.91	0.40	0.04
B	1	1.33	1.31	0.48	0.87	1.01	0.22	1.37	0.69	0.10
	2	2.02	1.78	0.373	1.51	1.56	0.31	2.82	1.85	0.38
	3	2.04	1.68	0.32	1.37	1.93	0.35	2.69	2.08	0.48
C	1	1.62	1.44	0.38	1.05	1.46	0.25	1.83	1.20	0.20
	2	2.52	2.35	0.373	2.14	1.97	0.53	4.65	3.31	1.17
	3	2.13	2.05	0.663	1.63	1.36	0.41	3.43	1.74	0.48

注:A代表衰退程度>60%;B代表30%<衰退程度<60%;C代表衰退程度<30%。

1.3 土壤粒度参数模型

对采集的土壤样品进行自然风干过筛,采用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度分析仪进行土壤粒度测定。对测定结果采用美国制土壤粒径分级标准,即极粗砂(1~2 mm)、粗砂(0.5~1 mm)、中砂(0.25~0.5 mm)、细砂(0.1~0.25 mm)、极细砂(0.05~0.1 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)、黏粒(<0.002 mm)。依据 Folk-ward 图解法计算粒度参数:平均粒径、分选系数、偏度、峰态。

$$\Phi = -\lg d \quad (1)$$

式中: d 为土壤颗粒直径(mm)。

采用 Folk-War 的图解法计算粒度参数:平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(SK)与峰态(K_g)。

$$M_z = \frac{1}{3}(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (3)$$

$$SK = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50})}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{(\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50})}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (4)$$

$$K_g = \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

式中: $\Phi_5, \Phi_{16}, \Phi_{25}, \Phi_{50}, \Phi_{84}, \Phi_{75}, \Phi_{95}$ 分别为沉积物粒度累计曲线上累计百分含量为 5%, 16%, 25%, 50%, 84%, 75% 和 95% 所对应粒径的相应的 Φ 值。

1.4 土壤养分富集特征

采用相对作用强度(relative interaction intense, RII)^[19]表示沙堆土壤养分富集情况。

$$RII = (X_n - X_i) / (X_n + X_i) \quad (6)$$

式中: X_n 和 X_i 分别表示四合木灌丛沙堆与丘间空地不同深度土壤养分含量值。

当 RII>0 时,表示灌丛对该养分含量有富集作用,形成“肥岛效应”;当 RII<0 时,表示灌丛对该养分含量有降低作用,未形成“肥岛效应”。RII 距离 0 值越远表示效应越强。

1.5 数据分析

首先采用 Microsoft Excel 2019 对样地调查结果及试验数据进行整理,并计算土壤粒度参数等指标。利用 IBM SPSS Statistics 26 单因素方差分析(one-way

ANOVA)对灌丛沙堆表层沉积物粒度特征及沙堆养分特征进行分析,同时采用 Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 灌丛沙堆表层沉积物土壤粒级级配特征

粒级级配不仅与沙源有关,同时还与风沙活动中的搬运、堆积过程相关,可以直观地反映粒级的相对含量以及沉积物的粒径组成^[20]。相同的沙源和风能环境下,不同生长情况灌丛的沙粒级配,反映了灌丛沙堆表层沉积物搬运、堆积过程的差异。

由表 2 可知,研究区四合木灌丛沙堆表层沉积物主要以细砂为主,各衰退情况四合木灌丛沙堆表层沉积物细砂含量均超 60%,其次是极细砂、中砂,极粗砂、黏粒最少。灌丛沙堆表层沉积物粗砂、中砂含量

低于裸沙地;极细砂、粉粒、黏粒含量高于裸沙地。由于灌丛的拦截和抵抗搬运的能力,使得灌丛沙堆极细砂、粉粒、黏粒的积累能力明显强于裸沙地。随着灌丛衰退程度的减小,灌丛沙堆表层沉积物细砂含量越高,衰退程度 > 30% 的四合木灌丛细砂含量均超过 70%,同时沙堆粗砂含量分别为:2.575% (衰退程度 < 30%),1.719% (30% < 衰退程度 < 60%),0.964% (60% < 衰退程度)。衰退程度 > 60% 的四合木灌丛沙堆表层沉积物细砂含量更高,且与衰退程度 < 30% 的四合木灌丛及对照样地显著差异 ($P < 0.05$),但极细砂、粉粒、黏粒含量低。这可能是由于风沙活动过程中细粒物质更容易被搬运,导致裸地及衰退程度严重的灌丛沙堆极细砂、粉粒、黏粒明显少于衰退程度弱的灌丛。

表 2 四合木灌丛沙堆表层沉积物颗粒组成

Table 2 Grain size distribution characteristics of surface sediments in *Tetraena mongolica* shrub nebkhas

位置	粒配组成/%						
	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.050 mm)	极细砂 (0.05~0.1 mm)	细砂 (0.1~0.25 mm)	中砂 (0.25~0.5 mm)	粗砂 (0.5~1 mm)	极粗砂 (1~2 mm)
CK	0.95±1.38 ^a	4.46±5.15 ^a	10.12±6.31 ^a	68.16±3.98 ^b	10.63±5.66 ^a	4.51±4.85 ^a	1.17±1.39 ^a
A	0.4±0.23 ^a	2.32±0.77 ^a	11.36±4.52 ^a	78.2±3.85 ^a	6.23±7.14 ^a	0.96±11.53 ^a	0.52±0.49 ^a
B	1.1±0.59 ^a	6.07±5.18 ^a	12.82±5.1 ^a	70.5±4.45 ^{ab}	7.35±5.34 ^a	1.72±2.03 ^a	0.42±0.28 ^a
C	1.05±0.53 ^a	6.06±1.44 ^a	16.41±1.22 ^a	68.14±5.42 ^b	5.3±1.63 ^a	2.57±2.22 ^a	0.46±0.4 ^a

注:①CK 为对照样地;②A 表示衰退程度 > 60%,B 表示 30% < 衰退程度 < 60%,C 表示衰退程度 < 30%。③表中数据均为平均值±标准差。

2.2 灌丛沙堆表层沉积物粒度参数特征

从平均粒径来看,丘间空地平均粒径在 2.311~3.009 μm 之间,衰退程度 > 60% 的四合木灌丛沙堆表层沉积物的平均粒径在 2.416~2.796 之间;60% > 衰退程度 > 30% 的灌丛沙堆平均粒径为 2.484~3.045;30% > 衰退程度的灌丛平均粒径为 2.795~2.826。丘间空地分选系数表现为分选中等,偏度呈近对称、峰态表现为窄和极窄。而从总体上看,四合木灌丛沙堆表层沉积物分选系数处于 0.552~0.946,介于较好与中等之间;偏度介于 0.047~0.367 之间,呈极正偏、正偏、近对称分布;峰态介于 1.047~1.291 之间,以窄和中等为主。不同于丘间空地,衰退程度 > 60% 的四合木灌丛沙堆分选系数均表现为分选较好;各衰退程度四合木灌丛沙堆偏度均呈现近对称及正偏状态;同时,灌丛沙堆表层沉积物峰度表现为窄或中等状态。

2.3 灌丛沙堆表层沉积物土壤粒度频率曲线

图 1 为不同衰退程度四合木灌丛沙堆表层沉积物粒度频率曲线,由图可看出,四合木灌丛沙堆表层沉积物粒度体积百分含量曲线近似为单峰,峰值粒径介于 15.07~447.95 μm ;裸沙地出现双峰,12.35~494.94 μm 和 546.86~1 482.94 μm 。灌丛沙堆粒度频率峰值相近,但衰退程度 > 60% 的灌丛沙堆粒度频

率峰值均高于其他两种灌丛。60% > 衰退程度 > 30% 及 30% > 衰退程度的四合木灌丛沙堆表层沉积物粒度体积百分含量无明显差异。

2.4 灌丛沙堆土壤养分空间异质性

衰退程度 > 60% 的灌丛沙堆 10—20 cm 土层土壤碱解氮 (AN) 含量显著低于其他土层。60% > 衰退程度 > 30% 的灌丛各土层土壤 AN 含量显著差异,分别为 10.33 (0—10 cm),4.86 (10—20 cm),13.73 (20—30 cm),9.55 (30—40 cm)。衰退程度 < 30% 的灌丛各土层间显著差异 ($p < 0.05$)。三种衰退程度灌丛沙堆各土层土壤碱解氮 (AN) 含量均与丘间空地显著差异 ($p < 0.05$)。各灌丛沙堆 0—10 cm 土层土壤 AN 含量显著高于丘间空地,AN 含量依次为 18.34 (衰退程度 > 60%),10.33 (60% > 衰退程度 > 30%),15.55 (衰退程度 < 30%)。衰退程度 > 60% 的灌丛与衰退程度 < 30% 的灌丛 10—20 cm 土层土壤 AN 含量显著高于丘间空地,分别为 16.38,10.56,60% > 衰退程度 > 30% 的灌丛 10—20 cm 土层土壤 AN 含量为 4.86,显著低于丘间空地。灌丛沙堆 20—30 cm,30—40 cm 土层 AN 含量显著高于丘间空地,且 20—30 cm 土层 AN 含量随着灌丛衰退程度减小显著降低 (见图 2)。

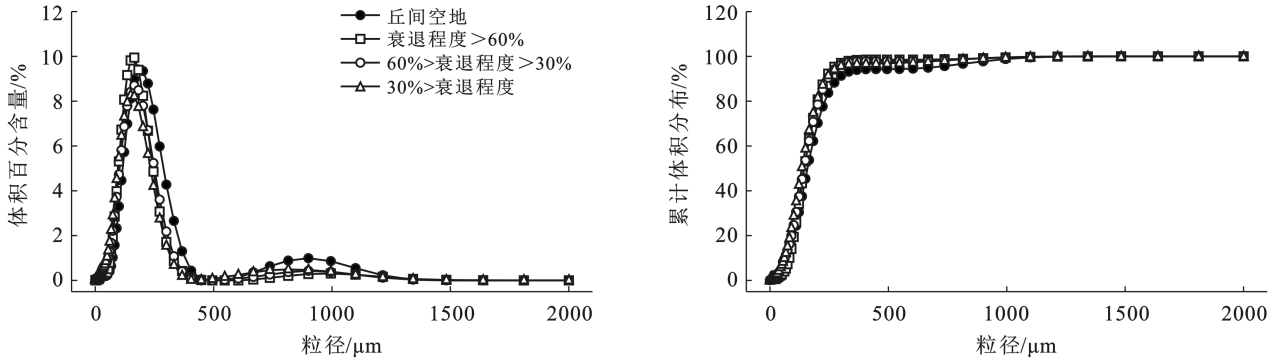
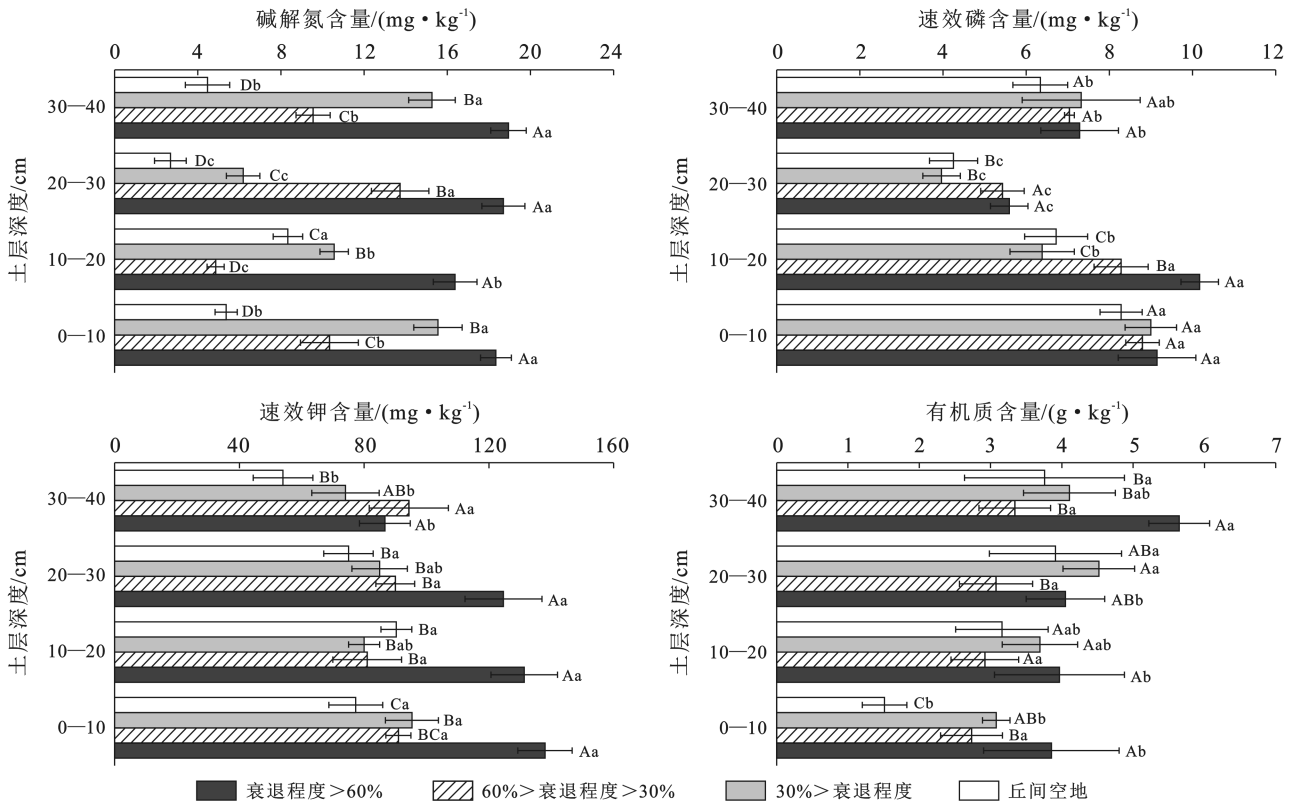


图 1 四合木灌丛沙堆表层土壤颗粒频率分布曲线

Fig.1 Frequency distribution curve of surface soil particles in *Tetraena mongolica* shrub nebkhas

衰退程度 > 60% 的灌丛沙堆 20—30, 30—40 cm 土层土壤速效磷(AP)含量分别为 5.59, 7.29 mg/kg, 显著低于 0—10, 10—20 cm 土层。60% > 衰退程度 > 30% 的灌丛与衰退程度 > 60% 的灌丛相同, 均表现为 20—30, 30—40 cm 土层 AP 含量显著低于 0—10, 10—20 cm 土层。衰退程度 < 30% 的灌丛沙堆除 30—40 cm 土层外, 其余三个土层显著差异, 且随着土层深度的增加, AP 含量越低 ($p < 0.05$)。灌丛沙堆 0—10 与 30—40 cm 土层土壤速效磷(AP)含量与丘间空地间差异不显著, 衰退程度 > 60% 与 60% > 衰

退程度 > 30% 的灌丛沙堆 10—20, 20—30 cm 土层 AP 含量与丘间空地显著差异 ($p < 0.05$)。衰退程度 > 60% 与 60% > 衰退程度 > 30% 的四合木灌丛沙堆 10—20 cm 土层土壤 AP 含量分别为 10.17, 8.28 mg/kg, 显著高于衰退程度 < 30% 的灌丛及丘间空地。衰退程度 > 60% 与 60% > 衰退程度 > 30% 的灌丛沙堆 20—30 cm 土层土壤 AP 含量显著高于衰退程度 < 30% 的灌丛及丘间空地, 但二者间无显著差异。衰退程度 < 30% 的四合木灌丛沙堆各土层 AP 含量与丘间空地无显著差异。



注: 大写表示同一土层不同衰退程度的差异性; 小写表示同一衰退程度下不同土层的差异性 ($P < 0.05$)。

图 2 不同衰退程度灌丛沙堆土壤养分分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil nutrients in shrub nebkhas with different degrees of degradation

衰退程度 $>60\%$ 的灌丛沙堆 30—40 cm 土层土壤速效钾(AK)含量显著低于 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土层, $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的灌丛各土层土壤 AK 含量无显著差异, 衰退程度 $<30\%$ 的灌丛 0—10 cm 土层土壤 AK 含量显著高于 30—40 cm 土层, 与 10—20 cm, 20—30 cm 土层无显著差异($P < 0.05$)。衰退程度 $>60\%$ 的灌丛沙堆各土层土壤速效钾(AK)含量均显著高于丘间空地($P < 0.05$), 在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土层, 灌丛沙堆各土层 AK 含量均表现为衰退程度 $>60\%$ 的灌丛最高, 其土壤 AK 含量为 138(0—10 cm), 131.33(10—20 cm), 124.67(20—30 cm)。各衰退程度灌丛沙堆 0—10 cm 土层土壤 AK 含量均显著高于丘间空地, 但 $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的灌丛与衰退程度 $<30\%$ 的灌丛沙堆无显著差异。10—20 cm 及 20—30 cm 土层中, $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的灌丛及衰退程度 $<30\%$ 的灌丛沙堆与丘间空地均无显著差异。各衰退程度灌丛沙堆 30—40 cm 土层 AK 含量均显著高于丘间空地。

衰退程度 $>60\%$ 的灌丛沙堆 30—40 cm 土层土壤有机质(SOM)含量显著高于 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土层, $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的灌丛沙堆各土层 SOM 含量无显著差异, 衰退程度 $<30\%$ 的灌丛 20—30 cm 土层 SOM 含量显著高于 0—10 cm 土层, 与

10—20 cm, 30—40 cm 土层无显著差异($P < 0.05$)。0—10 cm 土层中各衰退程度灌丛沙堆土壤有机质(SOM)含量均显著高于丘间空地, 且 $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的灌丛沙堆 SOM 含量显著低于其余两种衰退程度灌丛沙堆。10—20 cm 土层中各衰退程度灌丛沙堆与丘间空地 SOM 含量均无显著差异。 $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的灌丛沙堆 20—30 cm 土层中 SOM 含量显著低于另两种衰退程度灌丛及丘间空地。衰退程度 $>60\%$ 的灌丛沙堆 30—40 cm 土层 SOM 含量显著高于 $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的灌丛沙堆、衰退程度 $<30\%$ 的灌丛沙堆以及丘间空地($P < 0.05$)(见图 2)。

2.5 灌丛沙堆土壤养分富集特征

$60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的四合木灌丛 10—20 cm 土层土壤 AN 表现为 $RII < 0$, 衰退程度 $<30\%$ 的四合木灌丛沙堆 10—20 cm, 20—30 cm 土层土壤 AP 表现为 $RII < 0$, 衰退程度 $<60\%$ 的四合木灌丛沙堆 10—20 cm 土层 AK 表现为 $RII < 0$, $30\% <$ 衰退程度 $<60\%$ 的四合木灌丛沙堆 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 土层 SOM 表现为 $RII < 0$ 。总体上来看, 四合木灌丛对土壤养分积累有正效应(图 3), 对 AN 的富集能力最强, 对 SOM 的富集能力最弱。除 $60\% >$ 衰退程度 $>30\%$ 的四合木灌丛外, 其余衰退程度四合木灌丛对沙堆养分富集作用差异不明显(见图 3)。

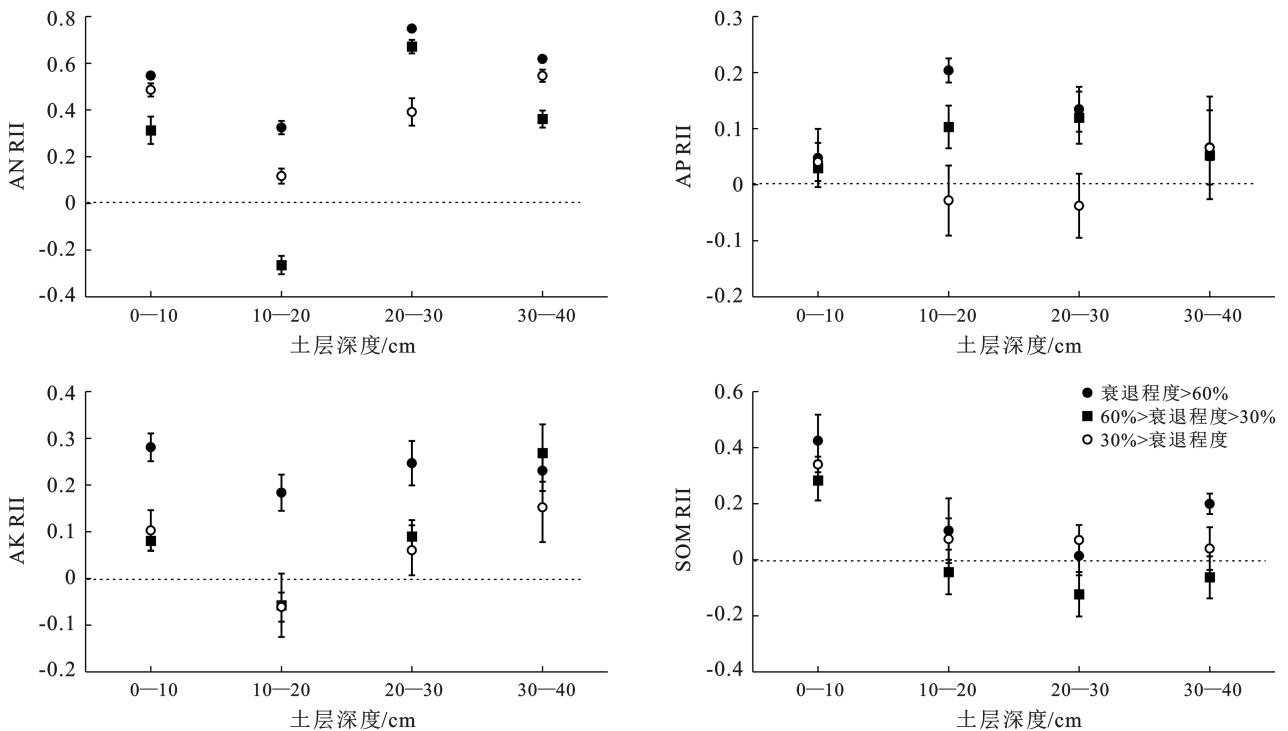


图 3 灌丛沙堆土壤养分积累特征

Fig.3 Characteristics of soil nutrient accumulation in shrub sand dunes

3 讨论

3.1 四合木灌丛沙堆表层沉积物粒度特征

灌丛沙堆表层沉积物的研究有利于探讨其在维护生态环境方面的意义,更有助于判断灌丛沙堆阻沙滞沙的能力^[2]。本研究中,西鄂尔多斯地区四合木灌丛沙堆表层沉积物颗粒较细,主要以细砂为主,这与李小乐等^[21]、魏亚娟等^[22]的研究一致。在土壤风蚀过程中,细粒物质流失较多,但灌丛的存在阻碍了部分细粒物质的风蚀搬运,使得灌丛沙堆表层沉积物细粒物质明显高于丘间空地,粗粒物质低于丘间空地。作为灌丛沙堆形成的基础,植被通过拦截风沙流,使其在灌丛周边沉积,从而形成沙堆^[1,23]。西鄂尔多斯地区四合木灌丛沙堆表层沉积物随着衰退程度的减弱,细砂含量增加、粗砂含量减小,灌丛衰退程度的增大,导致沙堆表层沉积物细砂受风沙流的影响更大,产生更大的搬运量,造成土壤颗粒粗化。研究发现,西鄂尔多斯地区四合木灌丛表层沉积物极细砂含量高于中砂含量,这与王佩等^[24]人的研究结果相悖,这可能是地域及物种间的差异造成的,研究表明不同灌丛沙堆表层沉积物颗粒大小存在差异^[25]。因其灌丛自身的高度、冠幅、枝系分枝情况均对表层沉积物粒度组分产生影响,且植被发育过程中,其阻沙滞沙能力也会随之改变^[26-27]。

3.2 四合木灌丛土壤养分特征

干旱荒漠区灌丛沙堆是灌丛有效利用养分并适应贫瘠环境的对策,主要表现为向根部聚集水分、养分等物质,即“肥岛”效应。这对土壤中的水分及养分有保护作用,与灌木生长和发展存在正反馈效应^[28]。而这一对策进一步加剧了资源的异质性,与根系分布密切相关^[29-31]。本研究中四合木灌丛沙堆 AN, AP, AK 含量均显著高于丘间空地,且灌丛对 AN 的富集能力高于 AP, AK 的富集能力,但对 SOM 的富集能力表现不明显或负效应。灌丛沙堆 0—10 cm 土层 SOM RII > 0, 但其他土层 SOM 没有产生富集效果。本研究发现衰退程度 > 60% 的四合木灌丛沙堆土壤 AN, AP, AK, SOM 含量最高,且 0—10 cm 土层 AN, AP, AK 含量高于其余土层。这可能是灌丛下土壤养分的“表聚”特征^[28],使灌丛沙堆 0—10 cm 土层 SOM 含量较高。这与前人的研究结果相同。四合木作为典型的荒漠灌丛,沙堆中养分在深土层中消耗较大。此外沙堆表层不断积累大量的枯落物,经土壤微生物的分解使表层 SOM 含量升高^[29],间接影响 N, P^[30],但随着土层深度的增加,枯落物分解对表层 SOM 产生的促进作用难以大量进入深土层,导致灌

丛沙堆产生明显“表聚”特征^[31]。灌丛衰退对土壤养分吸收减少的同时,枯枝落叶促进沙堆表层养分含量,这也证明了衰退程度 > 60% 的四合木灌丛沙堆养分含量更高且“表聚”特征明显的原因。养分在灌丛枯落物与土壤之间转化并积累,参与生态系统的养分循环,促进生态系统的演化与恢复^[32]。

4 结论

(1) 四合木灌丛沙堆表层沉积物主要以细砂为主,各衰退情况四合木灌丛表层沉积物细砂含量均超 60%,其次是极细砂、中砂,极粗砂,黏粒最少。衰退程度 > 30% 的四合木灌丛沙堆表层沉积物细砂含量更高,但极细砂、粉粒、黏粒含量更低。随着灌丛衰退程度的减弱,灌丛沙堆表层沉积物细砂、粗砂含量更高。

(2) 各灌丛沙堆土壤养分含量与丘间空地显著差异 ($P < 0.05$)。衰退程度 > 60% 的四合木灌丛养分含量显著高于另两种四合木灌丛及丘间空地; 60% > 衰退程度 > 30% 的四合木灌丛养分含量显著低于衰退程度 < 30% 的四合木灌丛,或与衰退程度 < 30% 的四合木灌丛无显著差异。

(3) 四合木灌丛沙堆养分显著高于丘间空地,对 AN, AP, AK 的积累有正效应,存在“肥岛”效应。同时,对 AN 的富集能力最强,对 SOM 的富集能力最弱,且 60% > 衰退程度 > 30% 的四合木灌丛沙堆 10—40 cm 土壤 SOM RII < 0, 未形成“肥岛”效应。除 60% > 衰退程度 > 30% 的四合木灌丛外,其余衰退程度四合木灌丛对沙堆养分富集作用差异不明显。

参考文献 (References)

- [1] 魏亚娟,党晓宏,汪季,等. 吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆形态示量特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 403-411.
Wei Yajuan, Dang Xiaohong, Wang Ji, et al. Morphological characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkhas in Jilantai desert-oasis ecotone [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 403-411.
- [2] 李向洁,李志文,杜丁丁,等. 南昌厚田沙地蔓荆 (*Vitex trifolia*) 灌丛沙堆的沉积物与空间格局特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 211-220.
Li Xiangjie, Li Zhiwen, Du Dingding, et al. Morphology and sedimentary characteristics of *Vitex trifolia* nebkhas in the Houtian sandy land of Nanchang City [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(6): 211-220.
- [3] Wang Xunming, Zhang Caixia, Zhang Jiawu, et al. Nebkha formation: Implications for reconstructing environmental changes over the past several centuries in the

- Alashan Plateau, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 29(3):697-706.
- [4] 麦尔哈巴·尼加提,戴岳,师庆东,等.准噶尔盆地东南缘荒漠灌丛盐生假木贼周围土壤理化性质研究[J].灌溉排水学报,2019,38(7):38-44.
Marhaba·Nijat, Dai Yue, Shi Qingdong, et al. Physical and chemical properties of soil at southeastern edge of *Anabasis salsa* in Junggar Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7):38-44.
- [5] Li Jinchang, Zhao Yanfang, Liu Haixia, et al. Sandy desertification cycles in the South-western Mu Us Desert in China over the past 80 years recorded based on nebkha sediments [J]. *Aeolian Research*, 2016, 20:100-107.
- [6] 彭海英,李小雁,童绍玉.干旱半干旱区草原灌丛化研究进展[J].草业学报,2014,23(2):313-322.
Peng Haiying, Li Xiaoyan, Tong Shaoyu. Advance in shrub encroachment in arid and semiarid region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2):313-322.
- [7] 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.
Liu Bing, Zhao Wenzhi, Yang Rong. Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* nebkhas at desert-oasis ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4):1446-1455.
- [8] 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].应用生态学报,2002,13(7):802-806.
Su Yongzhong, Zhao Halin, Zhang Tonghui. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7):802-806.
- [9] 裴世芳,傅华,陈亚明,等.放牧和围封下霸王灌丛对土壤肥力的影响[J].中国沙漠,2004,24(6):103-107.
Pei Shifang, Fu Hua, Chen Yaming, et al. Influence of *Z. xanthoxylum* shrubs on soil fertility in enclosure and grazing conditions [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(6):103-107.
- [10] 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,2016,31(4):26-32,92.
Liu Xuedong, Chen Lin, Yang Xinguo, et al. “Fertile island” effect of soil nutrients occurring in *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* shrubs in desert steppe [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4):26-32,92.
- [11] 李泽霞,董彦丽,马涛.黄土区梯化坡地不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):43-49.
Li Zexia, Dong Yanli, Ma Tao. Effects of land use types on soil physical and chemical properties in terraced sloping land of loess areas [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(3):43-49.
- [12] 胡广录,樊立娟,王德金,等.荒漠—绿洲过渡带斑块植被表层土壤颗粒的空间异质性[J].兰州交通大学学报,2013,32(6):159-164.
Hu Guanglu, Fan Lijuan, Wang Dejin, et al. Spatial heterogeneity of surface soil particles of patch vegetation in desert-oasis ecotone [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2013, 32(6):159-164.
- [13] 代豫杰,李锦荣,郭建英,等.乌兰布和沙漠不同灌丛土壤颗粒多重分形特征及其与有机碳分布的关系[J].环境科学研究,2017,30(7):1069-1078.
Dai Yujie, Li Jinrong, Guo Jianying, et al. Soil particle multi-fractals and soil organic carbon distributions and correlations under different shrubs in Ulan Buh Desert [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(7):1069-1078.
- [14] 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.
Zhao Yang, Zhang Zhishan, Chen Yongle, et al. Effect of degradation stage of *Artemisia ordosica* on morphology of nebkhas [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(5):1136-1140.
- [15] 丁爱强,徐先英,张雯,等.不同退化程度柽柳灌丛的土壤理化和生物学特性[J].草业学报,2019,28(2):1-11.
Ding Aiqiang, Xu Xianying, Zhang Wen, et al. Soil physicochemical and biological characteristics of *Tamarix ramosissima* nebkhas in different degradation degree [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(2):1-11.
- [16] 张劲峰,宋洪涛,耿云芬,等.滇西北亚高山不同退化林地植被与土壤养分特征[J].生态学杂志,2008,27(7):1064-1070.
Zhang Jinfeng, Song Hongtao, Geng Yunfen, et al. Characteristics of vegetations and soil nutrients on subalpine degraded forestlands in Northwest Yunnan [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7):1064-1070.
- [17] 张丽,王铁娟,郭金婷,等.西鄂尔多斯珍稀濒危植物四合木种群分布格局分析[J].草地学报,2023,31(2):551-557.
Zhang Li, Wang Tiejuan, Guo Jinting, et al. Population distribution pattern analysis of the rare and endangered plant *Tetraena mongolicain* in Western Ordos China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(2):551-557.
- [18] 党晓宏,高永,蒙仲举,等.西鄂尔多斯地区 5 种天然荒漠优势灌丛含碳率的研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(5):74-79.

- Dang Xiaohong, Gao Yong, Meng Zhongju, et al. Carbon content rates analysis of five natural desert shrub species in West Ordos region [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(5):74-79.
- [19] Armas C, Ramón Ordiales, Pugnaire F I. Measuring plant interactions: A new comparative index [J]. Ecology, 2004, 85(10):2682-2686.
- [20] 刘铮瑶,董治宝,赵杰,等.人工固沙措施对沙丘沉积物特征及土壤养分的影响[J].生态学报, 2020, 40(4):1383-1391.
- Liu Zhengyao, Dong Zhibao, Zhao Jie, et al. Effect of artificial sand fixation on sediment characteristics and soil nutrients [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4):1383-1391.
- [21] 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.
- [22] 魏亚娟,党晓宏,蒙仲举,等.吉兰泰盐湖中心盐爪爪灌丛沙堆形态及其沉积特征[J].水土保持研究, 2020, 27(3):385-390.
- Wei Yajuan, Dang Xiaohong, Meng Zhongju, et al. Morphological and sedimentary characteristics of dune covered by *Kalidium foliatum* nebkhas in the center of Jilantai saltlake [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3):385-390.
- [23] 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.
- Luo Weicheng, Zhao Wenzhi, Ren Heng, et al. Nebkha morphological characteristics and soil nutrition content in three regions with different climates in North China [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2):191-199.
- [24] 王佩,马倩,朱元璞,等.新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J].干旱区地理, 2021, 44(6):1644-1653.
- Wang Pei, Ma Qian, Zhu Yuanpu, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment of surface sediments from nebkhas and parabolic dunes in the Tukai Desert, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6):1644-1653.
- [25] 高永,丁延龙,汪季,等.不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J].农业工程学报, 2017, 33(22):135-142.
- Gao Yong, Ding Yanlong, Wang Ji, et al. Sediments particle size changes and its sand fixation ability for different shrub dunes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22):135-142.
- [26] 袁杰,曹生奎,曹广超,等.祁连山南坡不同植被类型土壤粒度特征[J].水土保持通报, 2019, 39(2):76-82.
- Yuan Jie, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Soil particle size characteristics under different vegetation types on southern slope of Qilian Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2):76-82.
- [27] 李学斌,张义凡,陈林,等.荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究[J].西北植物学报, 2017, 37(8):1635-1644.
- Li Xuebin, Zhang Yifan, Chen Lin, et al. Relationship between soil particle size distribution and soil nutrient distribution characteristics in typical communities of desert grassland [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(8):1635-1644.
- [28] 董雪,郝玉光,辛智鸣,等.浑善达克沙地3种灌木土壤分形特征与养分关系[J].草业学报, 2020, 29(6):172-181.
- Dong Xue, Hao Yuguang, Xin Zhiming, et al. Fractal features of soil land their relationship with soil fertility under three shrub species in Otindag sandy land [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(6):172-181.
- [29] 韩福贵,满多清,郑庆钟,等.青土湖典型湿地白刺灌丛沙堆群落物种多样性及土壤养分变化特征研究[J].草业学报, 2021, 30(1):36-45.
- Han Fuduo, Man Duoqing, Zheng Qingzhong, et al. Species diversity and soil nutrient changes of a *Nitraria tangutorum* shrub community in Qingtu Lake wetland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1):36-45.
- [30] 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 Pujin, Yang Jie, Song Bingyu, et al. Spatial heterogeneity of soil resources of *Caragana tibetica* community [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(2):338-346.
- [31] 黄磊,张永娥,邵芳丽,等.冀北山地天然次生林土壤生态化学计量特征及影响因素[J].生态学报, 2021, 41(15):6267-6279.
- Huang Lei, Zhang Yonge, Shao Lifang, et al. Soil ecological stoichiometry and its influencing factors in natural secondary forest, north mountain of Hebei Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15):6267-6279.
- [32] Fan Houbao, Wu Jianping, Liu Wenfei, et al. Link ages of plant and soil C : N : P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. Plant Soil, 2015, 392(1/2):127-138.