

DOI: 10.5846/stxb201812212780

刘铮瑶,董治宝,赵杰,李露露,肖巍强.人工固沙措施对沙丘沉积物特征及土壤养分的影响.生态学报,2020,40(4):1383-1391.

Liu Z Y, Dong Z B, Zhao J, Li L L, Xiao W Q. Effects of artificial sand fixation on sediment characteristics and soil nutrients. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4):1383-1391.

人工固沙措施对沙丘沉积物特征及土壤养分的影响

刘铮瑶,董治宝*,赵杰,李露露,肖巍强

陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要:为探明人工铺设尼龙网状固沙措施对风沙危害的影响,以腾格里沙漠东南部人工固定沙丘、两类自然流动沙丘以及防护林的地表沉积物和结皮为研究对象,研究沙丘不同位置、不同深度沉积物的颗粒组成、土壤有机质、有效氮、有效磷、有效钾含量等养分特征。结果表明:(1)人工固定沙丘和自然流动沙丘颗粒组成和土壤养分含量都存在显著差异($P<0.5$),沙障的防风、固沙和土壤改良作用明显。(2)人工固定沙丘各个地貌位置沉积物粒度频率曲线均出现三峰,反映了沙障对粉尘沉积物的拦截作用,体现了沙障对土壤理化性质的改良过程;分选性随风向逐渐变差,随着粒径变细而好;偏度和峰度明显高于其他。(3)整个研究区沉积物偏碱性,影响着土壤养分含量。人工固定沙丘养分含量最高,有效氮和有机质含量均为最大,有效磷和有效钾含量略低于对比林,其粉沙物质含量与养分含量成正比。(4)人工固定沙丘的沙丘迎、背风坡均有植被分布,并覆有土壤物理结皮,沉积物粒级分配较自然发育的流动沙丘分散,养分含量增加。由此可见,沙障对沙区的土壤环境和生态环境改善具有重要的影响。

关键词:沙丘;粒度;结皮;养分

Effects of artificial sand fixation on sediment characteristics and soil nutrients

LIU Zhengyao, DONG Zhibao*, ZHAO Jie, LI Lulu, XIAO Weiqiang

School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: This paper aims to figure out the influence of paving artificial nylon netted stabilization of sands on the function of the field blown sand hazard. We selected sediments and crusty nutrients characteristics of sand-fixing dune of south Tengger Desert, two kinds of natural flowing sand dune, protective forest as research objects. We studied sediments and crusty nutrients characteristics including components of sand grain, content of soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium at different position and depth. The results showed that the grain size characteristics of artificial sand dune and natural sand dune were different at different locations and depths. The function of sand barrier is obvious. There are three peaks in frequency curves of each geomorphologic position of artificial sand fixation dunes. σ_1 becomes worse with the wind direction and better with the particle size becoming finer. S_{k1} and K_g are significantly higher than other sand seas. Sediments in throughout the study area were slightly alkaline. The nutrient content of artificial sand-fixing dune was the highest. The content of available nitrogen and organic matter was the largest, while the content of available phosphorus and available potassium was slightly lower than that of artificial forest. The artificial sand barrier develops into dunes with vegetation on both windward and leeward slopes, and is covered with soil crust. Compared with the natural sand dunes, the distribution of grain-size fractions in artificial barrier area were more dispersive with higher content of organic matters. It can be seen that the sand barrier in the desert area has an important impact on the improvement of the

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201704012)(2018TS071);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BFH03004);国家自然科学基金面上项目(41871008)

收稿日期:2018-12-21; 网络出版日期:2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zbdong@snnu.edu.cn

regional soil environment and ecological environment.

Key Words: sand dunes; grain size; soil crust; nutrient

沙丘沉积物特征是近地层气流对地表沉积物长期风力搬运、沉积作用下所具有的独特属性,是风沙地貌形成与发育的物质基础,对反映风沙地貌与风沙流的相互作用具有重要的指示作用^[1]。在风沙活动中,除风力作用外^[2],其他自然因素,如地貌、沙源和植被等都影响地表的沉积物特征(粒度、分选、峰度和偏度等)^[3-4]。同样,人为因素,如人工固沙措施,也能够改变近地层气流结构,影响沉积过程,从而改变沉积物特征。因此,沉积物特征包含了丰富的区域环境变化信息^[5-6],成为研究干旱区环境及其演化的理想载体。

腾格里沙漠东南缘自 20 世纪 50 年代起陆续实施固沙造林和封沙育林育草等措施^[7]。人工铺设的沙障有效减缓沙区地表风蚀和沙丘移动速度,增加沙土养分^[8-9];沙面发育土壤生物物理结皮,并伴随流动沙丘向固定沙丘演化^[4]。目前,对该区域土壤的理化性质变化规律^[10-11]、人工固沙植被演替和结皮盖度^[12]、土壤生物物理结皮及其对固沙植被的影响^[13],生物结皮防治土壤风蚀机理^[14]等都进行了大量研究,但对于自然发育的流动沙丘与人工固定沙丘沉积物特征的对比研究还相对较少。人工固沙措施对揭示风沙灾害防治作用机制、评价不同措施防护效果、以及土壤形成过程等具有重要的意义。

为此,本文通过对腾格里沙漠东南部不同沙丘各部位沉积物的粒度与养分进行分析,探究人工固沙措施对沙丘沉积物粒度特征和养分影响的环境意义,为全面合理的开展防沙治沙、风沙危害区生态修复和管理、保护生态环境提供科学参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

腾格里沙漠位于中国西部干旱荒漠区、东部半干旱草原区与西南部高原寒冷区交合部位,属于典型大陆性干燥气候,盛行西北风,为低风能环境^[2]。沙丘类型主要为格状沙丘、横向沙丘和灌丛沙丘^[3]。天然植被有中亚紫菀木(*Asterothamnus centrali-asiaticus*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)等常见沙生植物^[12],人工种植多为沙枣树。研究区位于腾格里沙漠东南缘,地貌特征以流动沙丘为主,并有始建于 2008 年的中国科学院风沙观测场(37°33'N,105°01'E,设有人工生物固沙林和人工物理固沙区等)^[14]。

1.2 数据采集与分析

沉积物样品采集于流动沙丘(横向沙丘、灌丛沙丘)、人工固定沙丘和防护林三个典型地表,在沙丘的不同部位(迎风坡和背风坡的底部、中部与顶部)的表层(0—1cm)与下层(1—2cm)共采集了 50 个样点,100 袋沙样。每袋样品约重 100g。横向沙丘高度为 5.1 ± 0.1 m,沙丘总体走向垂直于 NW 盛行风向;灌丛沙丘背风坡有芦苇分布,盖度约为 70%,沙丘高度为 6.5 ± 0.1 m;人工固定沙丘的沙障于 2012 年铺设,固沙面积约为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的区域,尼龙网规格为 $1\text{m} \times 1\text{m}$,沙丘高度为 2.5 ± 0.1 m,沙丘顶部背风侧 0.20m 左右有一个面积约为 6m^2 的风蚀坑。为了说明防沙措施对沉积物粒度的影响,本文同时选择了公路边的防护林为对照区(以下简称对比林)。三种典型地表皆为流沙,但人工固定沙丘上流沙厚度不一,植被盖度约 3%,大面积分布土壤生物物理结皮,迎风坡结皮厚度约 1cm,沙丘顶端

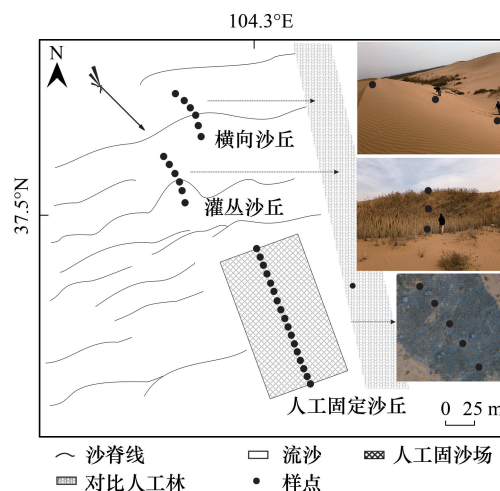


图 1 研究区地理位置和样点布置

Fig.1 Location of study area and plot of sample

有较大风蚀坑,背风坡结皮厚度约 2cm,在背风坡底部,除去表层结皮,在地表以下 2cm 处有一层薄沙,然后又分布一层结皮。具体采样层次部位及沙丘形态信息如图 2 所示。

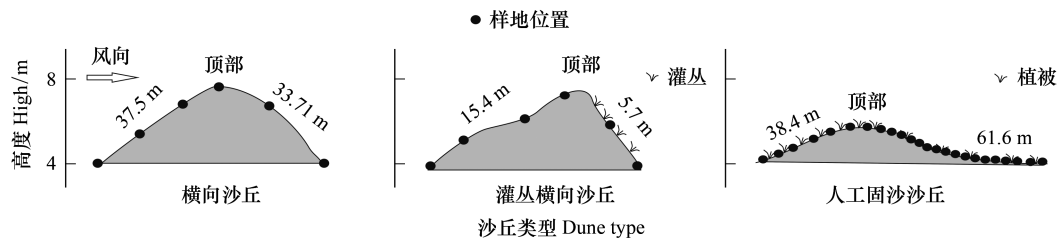


图 2 采样位置分布

Fig.2 Distribution of sampling locations

沉积物粒度采用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪测试。粒度分级根据 Udden-Wentworth^[15] 粒度划分方法,并采用 Krumbein 公式进行对数转化为 Φ 值来表示^[4],同时,粒度参数(平均粒径 M_z ,分选系数 σ ,偏度 S_k ,峰度 K_g)计算采用 Folk 和 Ward 图解法^[16],具体公式如下:

$$\Phi = -\log_2 d \quad (1)$$

$$M_z = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})/3$$

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

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

$$K_g = (\Phi_{95} - \Phi_5)/2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})$$

沉积物养分主要测定有效氮、有效磷、有效钾、有机质和 pH,其中有效氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用 Olsen 法测定、有效钾采用火焰光度法测定,有机质和 pH 值分别采用重铬酸钾氧化法和电位法^[17]。

2 结果与分析

2.1 粒度特征

2.1.1 沙粒级配特征

粒级级配可以直观地反映沉积物的粒径组成以及粒级相对含量^[18]。粒度的分异规律主要受当地风力作用影响,但在特定的沙源和风能环境,不同沙丘类型,不同地貌位置以及不同深度的沙粒级配,反映了沉积物的搬运与堆积过程的差异性(表 1)。

由表 1 可知,研究区内地表沉积物以细沙为主,平均含量超过 50%;中沙含量次之,约占 36.2%;其余依次为极细沙(7.1%)、粗沙(3.9%)、极粗沙(2.5%)和粉砂粘土(0.8%)。仅有人工固定沙丘和对比林包含极粗沙(2.5%)和粉砂粘土(0.8%)。在人工固沙防护措施实施前,由于迎风坡坡脚至丘顶风速逐渐增大,侵蚀作用不断增强,细沙被风力侵蚀搬运,导致粗沙含量增加。随着防护措施的实施,有效增加地表粗糙度,使空气中的粉尘物质降落在地表,从而导致粉沙含量增加。

从各类沙丘的地貌部位上看,粒径级配差异较大。首先,横向沙丘和灌丛沙丘的背风坡细沙和极细沙含量均高于迎风坡,中沙和粗沙含量相反,除中沙外其余粒级的沙粒变化较小。这种不同粒级沙粒的变化,一方面反映了近地层气流的变化过程,另一方面反映了地表沉积物的输送过程:迎风坡发生风蚀,造成较粗粒径的沙物质含量增加,在背风坡处由于风速降低,细颗粒物沉降,所以细颗粒物含量可能增加。其次,人工固定沙丘不同部位沉积物含量变化幅度较高,中沙含量在迎风坡脚、顶部和背风坡中部有三次峰值;极细沙含量在各类沙丘的顶部都偏低,其余粒级的沙粒含量较低,且各地貌位置上差异不大。同样,不同深度物质组成也有差异。从不同深度来看,在沙丘中表层中沙含量均低于下层,而在对比林中层细沙含量远高于其他粒级

含量;灌丛横向沙丘的各深度极细沙含量相似,而横向沙丘和人工固定沙丘表层含量高于下层;其余差异较小。由此可以看出,人工固沙防护措施实行后,沙丘黏土含量增加,加快了表层土壤成土过程,同时土壤养分增加,较好的起到固沙和成土作用。

表 1 不同类型沙丘不同深度的粒配组成

Table 1 Grain composition at different depth in different types

部位 Position	沙丘类型 Dune types	位置 Location	粒配组成 Grain composition/%						
			中粉沙 >5(Φ)	粗粉沙 4—5(Φ)	极细沙 3—4(Φ)	细沙 2—3(Φ)	中沙 1—2(Φ)	粗沙 0—1(Φ)	极粗沙 <0(Φ)
表层 Surface	横向沙丘	迎风坡	0	0	2.36	51.88	45.05	0.71	0
		顶部	0	0	3.81	56.20	39.93	0.06	0
		背风坡	0	0	5.014	56.73	38.19	0.06	0
	灌丛横向沙丘	迎风坡	0	0	4.05	53.89	41.64	0.42	0
		顶部	0	0	5.19	57.68	37.07	0.06	0
		背风坡	0	0.01	15.19	64.98	19.82	0	0
	人工固定沙丘	迎风坡	2.06	2.57	18.06	49.55	26.77	0.60	0.38
		顶部	2.88	1.78	6.74	45.30	41.34	1.96	0
		背风坡	5.42	5.49	17.50	42.72	25.82	1.94	1.12
	对比林		0	0	0.15	29.67	35.95	26.65	0
下层 Sublayer	横向沙丘	迎风坡	0	0	2.53	54.54	42.58	0.35	0
		顶部	0	0	4.37	54.42	40.83	0.38	0
		背风坡	0	0	6.74	58.91	34.31	0.04	0
	灌丛横向沙丘	迎风坡	0	0	5.73	54.54	39.28	0.45	0
		顶部	0	0	3.82	55.55	40.57	0.06	0
		背风坡	0	0.01	16.32	63.06	20.62	0	0
	人工固定沙丘	迎风坡	1.36	1.20	11.37	49.12	36.14	0.80	0
		顶部	0.38	0.51	5.40	48.67	43.74	1.31	0
		背风坡	1.08	1.03	8.78	50.07	37.73	1.31	0
	对比林		1.19	0.73	8.56	52.12	36.84	0.56	0

2.1.2 众数特征

图 3 为不同沙丘粒度频率曲线,由图可以看出,横向沙丘和灌丛沙丘沙粒表面多表现为单峰,峰值粒径介于 0.88—3.51 Φ ;对比林出现明显双峰,峰值粒径分别为 0.31—0.92(Φ)、1.21—2.98(Φ);人工固定沙丘较为特殊,在各个地貌位置都出现三峰,众数分别介于 0.75—3.89(Φ)、4.42—5.88(Φ)和 7.68—9.50(Φ)之间,说明人工固定沙丘沙粒明显变小,再次证明人工固沙措施能够加速沙丘表层成土过程。与此同时,各类沙丘顶部峰值频率最高,其次是背风坡处,迎风坡峰值所占频率最低,表明迎风坡风蚀作用仍然较强,风沙危害严重,需要进一步实施防风固沙措施。

2.1.3 粒度参数特征

沉积物的粒度分布模式可以通过平均粒径和分选系数来反映,而频率曲线的对称性与尖窄程度可以使用偏度和峰度来表现^[19]。从不同类型沙丘不同位置、不同深度沉积物平均粒径来看(图 4),各类沙丘沉积物的平均粒径介于极细沙到细沙之间 1.89—2.93(Φ),但对比林为中沙 1.40(Φ)。分选性较好至中等 0.40—1.61(Φ);偏度值总体呈近对称和偏正分布;峰度以中等为主(0.93—1.64)。

从不同沙丘类型来看,对比林平均粒径值最小(1.34(Φ)),沙粒最粗;人工固定沙丘平均粒径值稍大(2.45(Φ)),其余沙丘在迎风坡相差不大,但在背风坡有明显差异。不同地貌部位,人工固定沙丘各项参数变化最大,灌丛沙丘变化最小。横向沙丘和人工固定沙丘的背风坡比迎风坡细,顶部沙粒偏粗,人工固定沙丘顶部风蚀坑位置最细(1.87(Φ)),迎风坡和背风坡沙粒沿主风向逐渐变细;灌丛沙丘沙粒随风向逐渐变细,但是顶部风蚀坑处同样相对偏粗(2.18(Φ))。从分选系数可以看出,人工固定沙丘沿主风向方向逐渐变差,其余

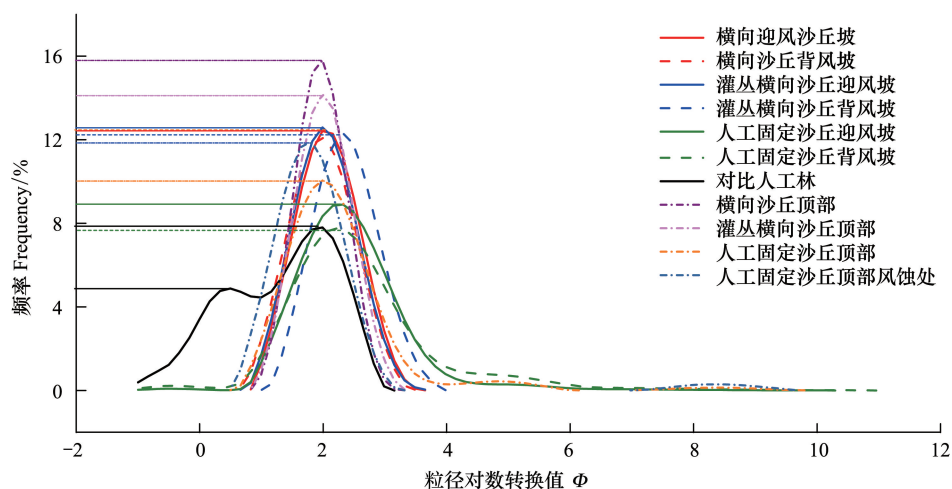


图 3 典型沙丘形态的粒度频率曲线特征

Fig.3 Grain size frequency curves for typical dunes

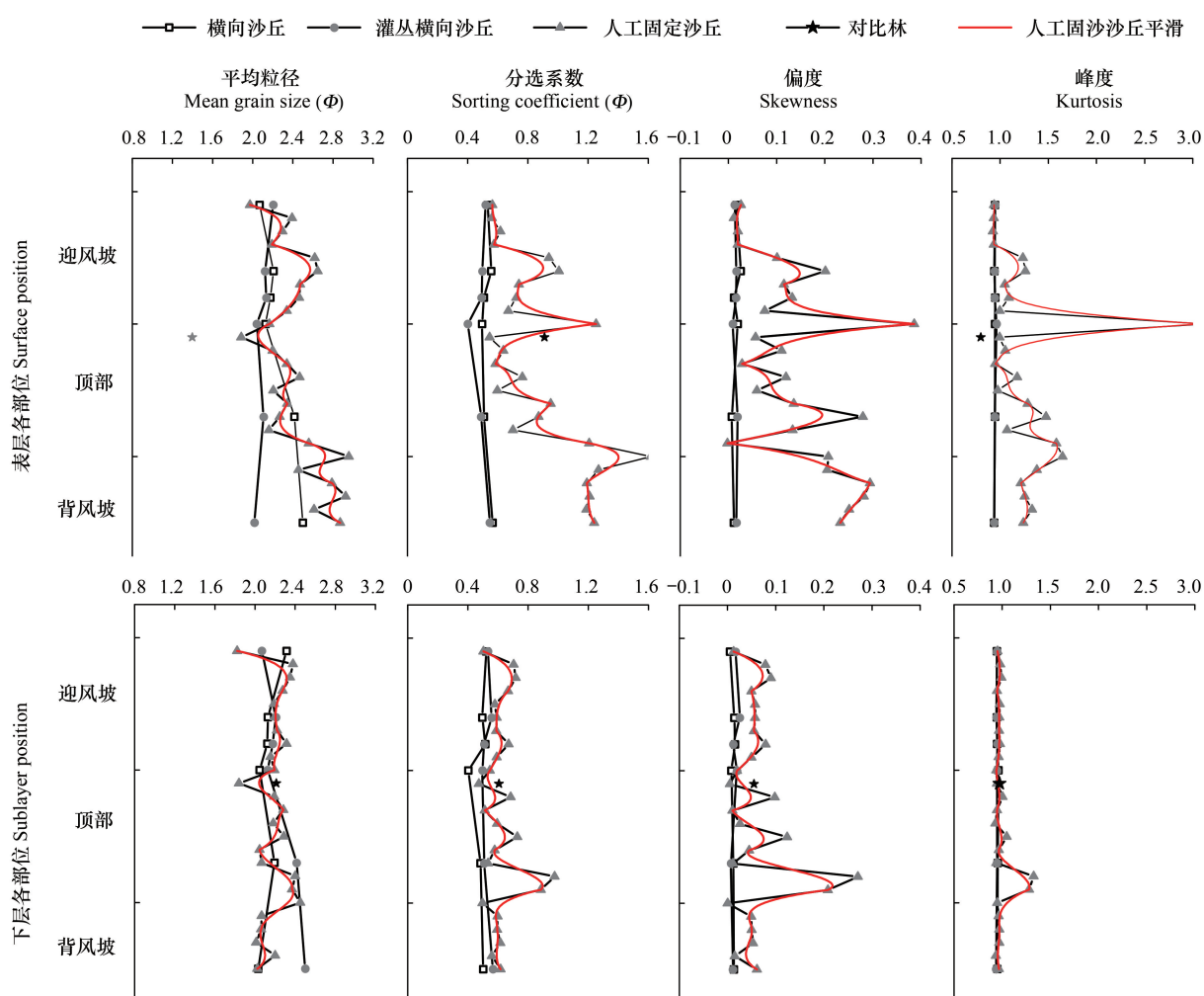


图 4 不同类型沙丘、不同地貌部位和不同深度的粒度参数

Fig.4 The particle size parameter of various types of dunes and at different geomorphological positions and at different depth

沙丘顶部偏好,迎、背风坡相差不大;横向沙丘和灌丛沙丘各个地貌位置的偏度和峰度值相差不大(图4),但在人工固定沙丘顶部风蚀坑处高值显著,且背风坡大于迎风坡。沉积物各项参数的表层差异均大于下层,顶部差异在下层并不显著。由于人工固沙形成的沙丘的背风坡的表层和下层分选型均变劣,表明固沙后背风坡的风速降低较其他沙丘更加明显,从而各粒径沉积物在此混合聚集。

2.1.4 粒度参数关系

在粒度分析中,研究者们通常用粒度参数之间的关系来反映不同沙丘类型的物质分选差异^[4]。人工固定沙丘表面沉积物的分选性随着粒径变细而好,同前文图4一致,横向沙丘沉积物的分选性是随着沙粒变细而变差,而灌丛沙丘的参数关系比较离散(表2,图5)。横向沙丘迎风坡和人工固定沙丘的背风坡沉积物分选性随着沙粒变细明显变好。人工固定沙丘的迎、背风坡的偏度与平均粒径都具有正相关关系。在峰度与平均粒径之间,人工固定沙丘迎风坡表现出正相关关系。但是,其他沙丘类型的各个地貌位置参数之间无明显变化规律。

表 2 不同类型沙丘分选系数与平均粒径之间的关系

沙丘类型 Dune types	分选系数与平均粒径关系 Fitting formula	<i>R</i> ²
横向沙丘 Transversal dune	$\sigma_I = -0.1747M_Z + 0.8792$	0.2346
灌丛横向沙丘 Vegetation transverse dune	$\sigma_I = 0.076M_Z + 0.334$	0.0783
人工固定沙丘 Artificial sand fixation dunes	$\sigma_I = 0.8631M_Z - 1.2572$	0.6124

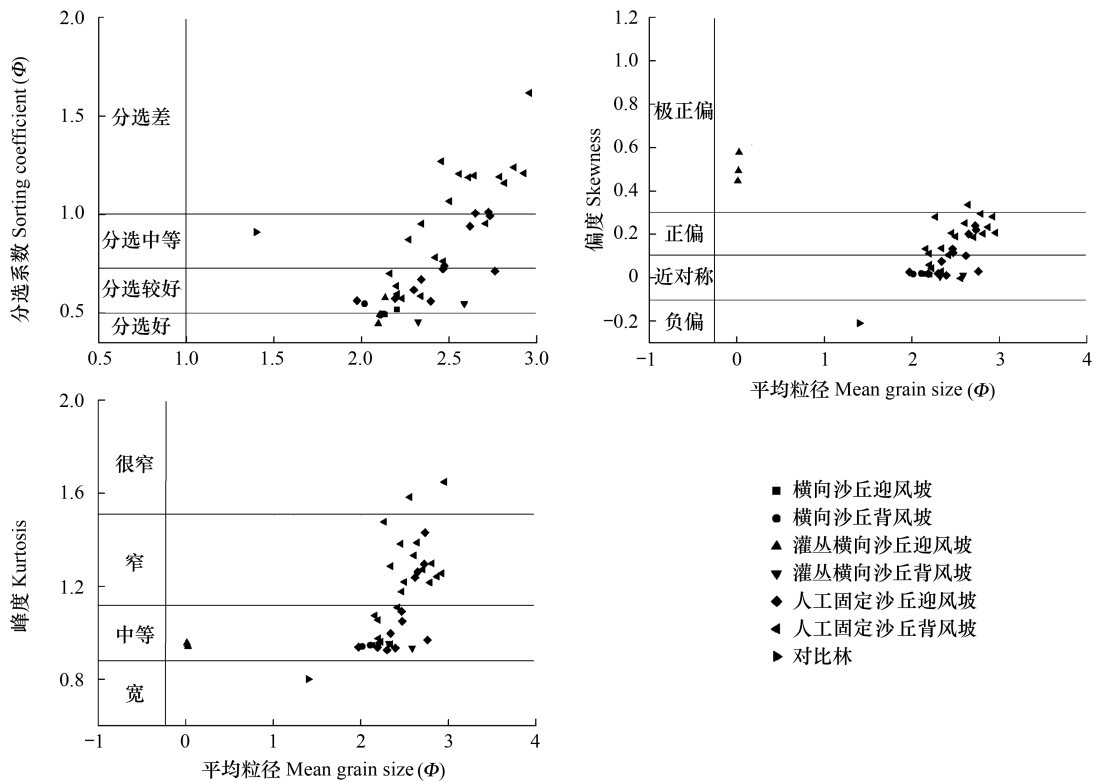


图 5 粒度参数之间的关系

Fig.5 Relationship between grain size parameters

2.2 养分特征

2.2.1 养分空间分布格局

沙丘表层养分含量低,无法发育成土壤,但受人为因素和地形的影响,沙丘表层也容易形成土壤生物物理

结皮。其由活的有机物及其代谢物组成,是土壤颗粒与有机物紧密结合形成的一种壳状体。土壤结皮内部的微环境能够为养分贫瘠的生态系统提供丰富的养分物质,尤其是有效氮、有效磷、有效钾和有机质,是土壤肥力中最活跃的因素,也是生态发展中最重要限制因子之一。所以,沙丘表层养分的空间分布格局与结皮分布密切相关。

由图 6 可知,人工固定沙丘有效氮含量最高(平均 1.11 g/kg),其次是对比林(平均 0.63 g/kg),横向沙丘(平均 0.25 g/kg),灌丛横向沙丘最低(平均 0.22 g/kg)。但是,在不同地貌位置上,人工固定沙丘迎风坡有效氮含量相似,背风坡明显增多。横向沙丘迎风坡有效氮含量虽然低于灌丛横向沙丘,但是在背风坡上横向沙丘的有效氮含量异常升高。各类型沙丘有效磷含量除对比林最高外其余差距不大(图 6),尤其是在迎风坡十分相近。但在人工固定沙丘上可以看出含量明显增加,在横向沙丘的背风坡上也有增加,而灌丛横向沙丘的背风坡含量呈下降趋势。从有效钾含量来看(图 6),也是对比林最高(59.57 g/kg),其次是人工固定沙丘(55.2 g/kg)、横线沙丘(20.79 g/kg)和灌丛横向沙丘(18.1 g/kg)。各类沙丘顶部的有效钾含量均偏低,在两坡上,人工固定沙丘的有效钾含量在迎风坡高于背风坡,灌丛横向沙丘背风坡高于迎风坡,而横向沙丘近乎持平。由图 6d 可见,不同类型沙丘有机质含量均小于 6g/kg。根据全国第二次土壤普查肥力状况分级标准^[20],研究区有机质含量较低(6 级)。具体来看,人工固定沙丘有机质含量最高(平均 0.12 g/kg),其次是灌丛横向沙丘(平均 0.76 g/kg),横向沙丘(平均 0.59 g/kg),最后公路旁的对比林(平均 0.03 g/kg)。就不同沙丘部位土壤有机质含量而言,各类沙丘背风坡有机质均优于迎风坡,顶部适中。不同类型沙丘沙土和结皮的 pH 值为 7.27—8.47,偏碱性。人工固沙使得土壤有机质含量增加,土壤肥力保持能力加强,有利于土壤结皮的发育从而影响荒漠植物种子的散布、萌发和生长。

2.2.2 粒度与养分的关系

沉积物颗粒组成的改变是土壤微生物量及养分变化的主要驱动因子^[21]。从相关性分析可以看出(表 3),不同类型沙丘的养分因子含量与粒度之间存在明显差异。横向沙丘中,有效氮、磷和有机质与中沙、粗沙含量存在明显负相关关系,与极细沙含量存在较强正相关关系;有效钾与中沙和粗沙含量存在明显正相关关系,与极细沙和细沙含量存在负相关关系。灌丛横向沙丘中,有效钾与极细沙和细沙含量具有明显正相关性,与中沙和粗沙含量存在负相关关系;其余相关性不明显,正负均有。人工固定沙丘中,有效氮与粉沙黏土和极细沙含量呈显著正相关,与中沙含量呈显著负相关;有效磷与粗粉沙含量呈显著正相关关系,与细沙和

表 3 土壤养分与粒度组成的相关性

Table 3 The relationship between soil nutrition and soil grain size composition

土壤养分 Soil nutrition	土壤粒度组成 Soil grain size composition					
	粉沙黏土	粗粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙
横向沙丘 Transverse dune	有效氮		0.929 *	0.306	-0.816	-0.364
	有效磷		0.591	0.146	-0.470	-0.666
	有效钾		-0.427	-0.722	0.655	0.630
	有机质		0.621	0.025	-0.429	-0.737
灌丛沙丘 Vegetation transverse dune	有效氮		-0.203	0.098	0.033	-0.154
	有效磷		-0.022	0.342	-0.202	-0.427
	有效钾		0.746	0.632	-0.801	-0.342
	有机质		-0.129	-0.043	0.112	-0.093
人工固定沙丘 Artificial sand fixation dunes	有效氮	0.617 *	0.692 **	0.526 *	-0.412	-0.549 *
	有效磷	0.244	0.437 *	0.362	-0.262	-0.327
	有效钾	-0.244	-0.157	0.080	0.404	-0.150
	有机质	-0.069	0.013	-0.096	0.197	0.076

“*”表示显著相关($P < 0.05$),“**”表示极显著相关($P < 0.01$)

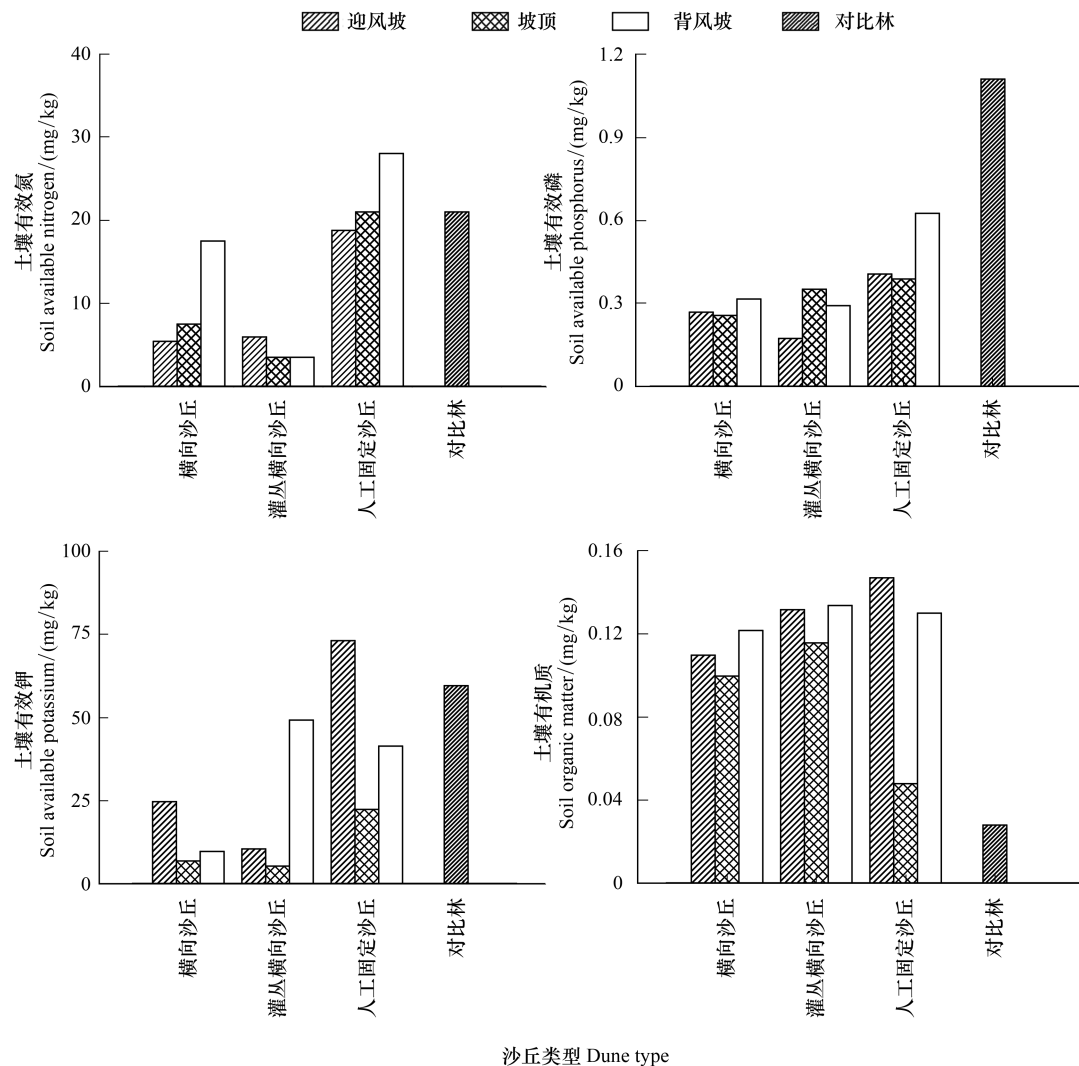


图6 不同类型沙丘、不同地貌部位的土壤养分分布

Fig.6 Soil nutrients content of various types of dunes and at different geomorphological positions

中沙含量呈负相关关系;有效钾与极细沙和细沙含量呈相关关系,与其他均为负相关关系;有机质含量影响较小。综上所述,人工固定沙丘各部位养分含量较流动沙丘更高,养分含量与细粒物质大多呈正相关关系。研究区地区粉沙物质含量的增加对土壤养分的增加贡献明显,是沙土质量提高的主要因素。

3 讨论

我国干旱沙漠区面积广阔,生态环境脆弱,长期遭受风沙危害。腾格里沙漠位于我国中部,有丰富的光能资源,在此铺设了大面积光伏发电板,修建了贯穿南北的沙漠公路。但是,强劲的风力作用和大面积的沙源使得风沙危害防治十分关键。尼龙网沙障作为一种常用的机械防沙工程措施,具有疏透、通风和导沙等优良性质^[23]。造价相对低廉,可工业化生产并快速投放应用,起到立竿见影的效果^[24],在风沙区使用较多。沙丘表面沉积物粒度和养分的空间分布特征反映了沙丘表面风沙活动的空间差异。研究区为低风能环境,所以风沙活动相对较弱,同时近地层气流的变异为背风坡养分的积累提供条件。沙丘背风坡及沙障后更易堆积养分从而生长植被,所以除对比林外,灌丛沙丘和人工固定沙丘背风坡植被盖度相对较大,人工固定沙丘养分含量最高。随着沙障的实施,地表粗糙度增加^[25],更能降低地表风速,减缓风蚀作用,沙丘高度增加缓慢,且背风坡

长度约为迎风坡 3 倍长。受沙障影响,人工固定沙丘近地层气流速度降低,导致人工固定沙丘表面沉积物粒配组成出现差异。其中,人工固定沙丘粒级分配更加均匀,粉沙物质和养分较流动沙丘更多,形成生物结皮,促进植被生长,同时拦截降水^[26],降低风蚀和水蚀作用^[27],固定养分,形成降低风沙灾害-土壤养分增加-植被生长的良性循环过程。因此,人工固沙措施有效地改善了沙丘浅层沙土质量,提高了沙土肥力,对该区域沙漠生态系统改善及生态环境保护具有重要的意义。

4 结论

(1) 人工固定沙丘与自然流动沙丘在不同部位和不同深度粒度特征存在差异。人工防沙沙障对沙丘表面沉积物粒度分布具有明显的影响,促进成土过程。

(2) 人工固沙作用的沙丘和其结皮的形成与发育有效提高了土壤 0—2 cm 有效氮、有效磷、有效钾及有机质的含量,有利于土壤物理结皮的形成和植物生长,对恢复土壤养分起着关键作用。

(3) 随着沉积物粒径变细,人工固定沙丘养分含量逐渐增加,土壤养分受粒径影响显著。其中,极细砂、粗粉沙、粉沙黏土与有效氮以及粗粉沙与有效磷之间呈显著正相关关系。

参考文献 (References):

- [1] 吴正.风沙地貌与治沙工程学.北京:科学出版社,2003:196.
- [2] 张正偲,董治宝,钱广强,罗万银.腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌.中国沙漠,2012,32(6):1528-1533.
- [3] 哈斯,董光荣.腾格里沙漠东南缘格状沙丘的形态—动力学研究.中国科学:D辑,1999,29(5):466-471.
- [4] 董治宝,苏志珠,钱广强,罗万银,张正偲,吴晋峰.库姆塔格沙漠风沙地貌.北京:科学出版社,2011:1-67.
- [5] Wang X M, Zhang C X, Zhang J W, Hua T, Lang L L, Zhang X Y, Wang L. Nebkha formation; Implications for reconstructing environmental changes over the past several centuries in the Ala Shan Plateau, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2010, 297(3): 697-706.
- [6] 赵元杰,宋艳,夏训诚,王晓毅,李雪峰.近 150 年来罗布泊红柳沙包沉积纹层沙物质粒度特征.干旱区资源与环境,2009,23(12): 103-107.
- [7] 靳虎甲,王继和,李毅,马全林,张德魁,刘有军,陈芳,徐丽恒.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤化学性质变化特征.水土保持学报,2008,22(5):119-124.
- [8] 朱震达.中国沙漠 沙漠化 荒漠化及其治理对策.北京:中国环境科学出版社,1999.
- [9] 李新荣,赵洋,回嵘,苏洁琼,高艳红.中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述.地理科学进展,2014,33(11):1435-1443.
- [10] Li X R, Zhang J G, Wang X P, Liu L C, Xiao H L. Study on Soil Microbiotic Crust and Its Influences on Sand-fixing Vegetation in Arid Desert Region. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(9):965-970.
- [11] 徐丽恒,王继和,李毅,马全林,张德魁,刘有军,陈芳.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征.中国沙漠,2008,28(4):690-695.
- [12] 赵芸,贾荣嘉,滕嘉玲,贾文雄,高艳红.腾格里沙漠人工固沙植被演替生物土壤结皮盖度对沙埋的响应.生态学报,2017,37(18): 6138-6148.
- [13] 徐杰,白学良,田桂泉,黄洁,张镒,冯晓慧.腾格里沙漠固定沙丘结皮层藓类植物的生态功能及与土壤环境因子的关系.中国沙漠,2005,25(2):234-242.
- [14] 张正偲,赵爱国,董治宝,李宏.藻类结皮自然恢复后抗风蚀特性研究.中国沙漠,2007,27(4):558-562.
- [15] 张正偲,董治宝,赵爱国,韩兰英,钱广强,罗万银.沙漠地区风沙活动特征——以中国科学院风沙观测场为例.干旱区研究,2007,24(4):550-555.
- [16] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1):3-26.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析,第三版.北京:中国农业出版社,2007.
- [18] 钱广强,董治宝,罗万银,张正偲,肖生春,赵爱国.巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异.中国沙漠,2011,31(6): 1357-1364.
- [19] 张正偲,董治宝.腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征.中国环境科学,2011,31(11):1789-1794.
- [20] 全国土壤普查办公室.中国土壤.北京:中国农业出版社,1998:1-1252.
- [21] 李海东,沈渭寿,邹长新,袁磊,纪迪.雅鲁藏布江西南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征.生态学报,2012,32(16):4981-4992.
- [22] 何芳兰,郭春秀,吴昊,刘左军,徐文,金红喜.民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响.生态学报,2017,37(18):606-6073.
- [23] 屈建军,刘贤万,雷加强,李芳,于志勇.尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验.中国沙漠,2001,21(3):276-280.
- [24] 马学喜,李生宇,王海峰,徐新文,孙娜.流动沙漠地形起伏区尼龙网方格沙障破损程度的空间分异.自然灾害学报,2015,24(2): 81-88.
- [25] Belnap J, Miller D M, Bedford D R, Phillips S L. Pedological and geological relationships with soil lichen and moss distribution in the eastern Mojave Desert, CA, USA. *Journal of Arid Environments*, 2014, 106:45-57.
- [26] 李守中,肖洪浪,宋耀选,李金贵,刘立超.腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用.中国沙漠,2002,22(6): 612-616.
- [27] Wang X M, Dong Z B, Yan P, Zhang J W, Qian G Q. Wind energy environments and dunefield activity in the Chinese deserts. *Geomorphology*, 2005, 65(1/2):33-48.