

2 种沙障内积砂粒径特征及其空间格局观测研究

池 政¹, 徐先英^{1,2,3,4}, 刘开琳², 刘虎俊², 孟瑞玲⁴, 李亚琦⁴, 富 丽⁴, 李雪宁¹

(1.中国林业科学研究院荒漠化研究所,北京 100091;2.甘肃省治沙研究所荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地,兰州 730070;3.甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃 武威 733000;4.甘肃农业大学林学院,兰州 730070)

摘要: 土壤粒径分布是研究其沙化的重要物理指标之一,通过研究沙障方格内不同方位砂粒粒径特征对其微地貌蚀积状况进行分析,确定粒度特征对地貌形态的指示作用,为选取适宜沙障类型提供技术保障。在腾格里沙漠西缘流动沙丘布设的植物纤维网和土工编织袋沙障内不同区域取样并利用马尔文激光粒度仪测定砂粒径,对比分析障内与障间不同区域沙物质粒配组成、粒配曲线等参数特征。结果表明:土工编织袋沙障内截留砂粒作用强于纤维网沙障,即前者阻沙效果更优于后者。2 种沙障内部方格砂粒含量在西方位比其余方位多 18%~23%,表明在西方位为弱风蚀或强堆积。土工编织袋沙障方格中东和南方位砂粒含量比其余方位少 8%~26%,即东方和南方位为风蚀区。土工编织袋沙障中部砂粒含量沿主风向逐渐提高,表示沙障内砂粒沉积增多;而纤维网沙障方格中变化不明显。在纤维网沙障区砂粒组分沿主风向逐渐减少,粒度组分与自然沙丘状态差异不显著($P < 0.05$),指示其沙障阻沙作用较弱。土工编织袋沙障砂粒组分集中在中南部,且跃移质组分分选性中部相比南北部较差,表明其砂粒组分在沙障内主风向向下风区沉积较多。处于中线两侧纤维网沙障西侧比土工编织袋沙障东侧细砂和中砂含量高 24%以上,而粗砂和极粗砂含量低近 43%。

关键词: 植物纤维网;土工编织袋沙障;粒度参数;粒配曲线;风沙侵蚀

中图分类号: P941.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0113-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.016

Study on Soil Particle Size Characteristics and Spatial Pattern of Sand Deposition in Two Types of Sand Barriers

CHI Zheng¹, XU Xianying^{1,2,3,4}, LIU Kailin², LIU Hujun²,

MENG Ruiling⁴, LI Yaqi⁴, FU Li⁴, LI Xuening¹

(1.*Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;*

2.State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control

Research Institute, Lanzhou 730070; 3.Gansu Minqin National Field Observation and Research Station on Ecosystem of

Desertification Rangeland, Wuwei, Gansu 733000; 4.Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The distribution of soil particle size is one of the most important physical indicators for studying its desertification. By studying the soil particle size characteristics of sand in different azimuths in the sand barrier grid, the micro-topography erosion status was analyzed to determine the indication effect of the particle size characteristics on the landform shape, and to provide technical support for selecting suitable sand barrier types. Samples were taken from different areas within the sand barrier of plant fiber mesh and geotextile bag distributed in the flowing dunes on the western edge of Tengger Desert to measure the sand particle size with the mastersizer range of laser diffraction particle size analyzers. The parameters, such as the composition and curve of soil particle distribution in different areas between and within the barrier, were compared and analyzed. The results showed that the sand interception in geotextile bag sand barrier is more vital than that in fiber mesh sand barrier, and the former is better than the latter in sand-blocking. The content of checkerboard sand in the western position was 18%~23% higher than that in the other places, indicating weak wind erosion or substantial accumulation in the west region. The sand content in the middle

收稿日期: 2020-10-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0507102-05); 甘肃省科技重大专项(18ZD2FA009); 甘肃省林业和草原科技创新项目(KY-19-33); 甘肃省林业自列项目(KY-14-28)

第一作者: 池政(1996—), 男, 山西定襄人, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: chizheng0802@163.com

通信作者: 徐先英(1963—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 博士, 主要从事荒漠化生态及水文研究。E-mail: xyxingxu@163.com

and south directions of the square in geotextile bag sand barrier was 8%~26% less than that in the other orientations, and the east and south directions were wind erosion areas. The sand content in the middle of the geotextile bag sand barrier gradually increased along the main wind direction, indicating that the sand barrier's sand deposition increases, while the change in the fiber mesh sand barrier square was not apparent. In the fiber mesh sand barrier area, the sand particle composition decreased gradually along the main wind direction ($P < 0.05$), indicating that the sand barrier has a weak sand-blocking effect. The sand components of geotextile bag sand barrier were concentrated in the central and southern part of the sand barrier, and the sorting of the center was worse than that of the north and south part of the sand barrier, which indicates that the sand components deposit more in the downwind area of the leading wind direction. The content of fine sand and medium sand on the west side of the fiber mesh sand barrier on both sides of the middle was more than 24% higher than that on the east side of the geotextile bag sand barrier, while the content of coarse sand and very coarse sand were nearly 43% lower.

Keywords: plant fiber mesh; geotextile bag sand barrier; soil particle size parameters; soil particle distribution curve; aeolian sand erosion

荒漠化是由于气候变化和人类活动等因素所造成的干旱半干旱和亚湿润干旱区的土地退化^[1-2]。根据第五次全国荒漠化和沙化监测结果显示,截止 2014 年,我国沙化土地面积为 $1.721\ 2 \times 10^6\ \text{km}^2$,占荒漠化土地面积的 65.91%,占国土总面积的 17.93%。尽管土地荒漠化已经得到遏制并逆转^[3-4],但总体上荒漠化形式依然十分严峻,其中风蚀荒漠化是荒漠化治理中的重点也是难点,风沙危害是风蚀荒漠化防治的内容之一。刘贤万^[5]依据所用材料和动力将治沙工程分为机械沙障治沙、化学固沙、风力输沙和水力拉沙 4 种,其中机械沙障治沙^[6]成本相对较低和普适性较广,研究最多,是防沙治沙重要的措施之一。在我国北方干旱荒漠区设置有大量沙障进行防沙治沙,并有众多学者^[6-15]对纤维网沙障、黏土沙障和仿真灌木沙障等沙障防治风沙危害技术进行深入研究,其中土工编织袋沙障^[16-17]是利用砂物质填充织物袋做成的一种低成本沙障,容易在中部形成稳定凹曲面,防风固沙效果较好。王睿等^[18]对不同规格纤维网沙障的防风效应进行研究,表明,小规格沙障降低风速,减少积砂量及保水效果均优于大规格沙障。前人的研究结果表明明确沙障的治沙机理才能得以最大程度地提高其防沙效益和固沙能力。

土壤粒径分布是研究其沙化的重要物理指标之一^[19-20]。由于设置沙障造成风沙流结构紊乱,风挟沙能力减弱,使沙粒在沙障内发生沉积,阻滞沙物质移动速率和范围,同时增大地表粗糙度,减少风蚀,起到抑尘作用^[21]。研究土壤粒度特征有助于研究风沙物理运动规律,为防沙治沙提供科学依据^[19,22]。已有众多学者对不同下垫面^[23-25]、不同流动性沙丘^[22,26-27]、沙丘时间序列^[28]和不同沙障类型^[7,29-31]的粒度特征进行了研究,但鲜有对沙障内部微地貌不同

区域粒度特征的研究。

已有研究^[32-34]通过风沙流结构特征研究沙障防风固沙效果;也有研究^[35-36]通过蚀积测量对草方格沙障内方格蚀积形态进行研究,但多是基于草方格沙障的研究,在纤维网和土工编织袋沙障中通过方格内不同方位砂粒粒径特征对其蚀积状况进行研究还较少。为此,在腾格里沙漠西缘选取纤维网和土工编织袋 2 种沙障覆盖区,对障内与障间不同区域及沙障方格内不同方位土壤粒度特征分析,为沙障固沙阻沙能力研究提供科学依据。

1 材料与方法

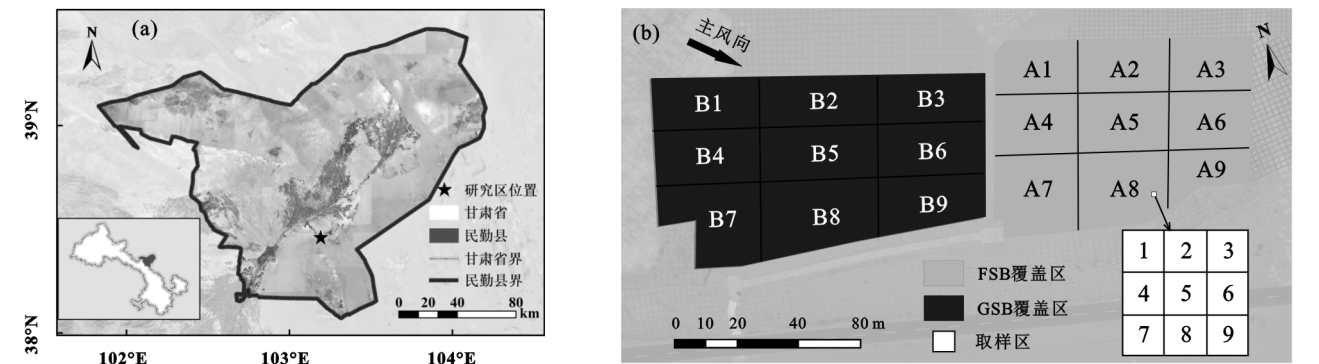
1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省民勤县时光廊道景区内的道路边,该廊道的道路全长 29.5 km,穿沙丘而过,采取“南沙北林”模式保护道路。路北侧流沙治理,南侧生态保护为主。研究地点位于廊道西向东 23.5 km 处北侧的沙丘迎风面 ($103^{\circ}12'49.51''\text{E}$, $38^{\circ}27'56.24''\text{N}$),行政区划属甘肃省武威市民勤县南湖镇。研究区地处腾格里沙漠西缘与民勤绿洲交界地带,区内以流动、半固定沙丘与丘间低地为主,人工干预区多固定、半固定沙丘。该区属于干旱荒漠区,冬冷夏热、降水稀少、光照充足,昼夜温差大,属温带大陆性沙漠气候。累年年均气温 $9.38\ ^{\circ}\text{C}$,累年年均降水量 $113.2\ \text{mm}$ 。累年年均风速 $2.6\ \text{m/s}$,近 40 年极端最大风速 $28.5\ \text{m/s}$ (2004 年 6 月 19 日),累年年均最多风向为 WNW 向,占 16 位主风向的 10.71%,其次为 NW 和 NNW 向;平均年沙尘暴日数 25.0 天,浮尘日数 29.7 天,扬沙日数 37.5 天。地带性土壤为灰棕漠土^[37],隐域性土壤为风沙土。研究区所处流动沙丘两翼指向该区主风向 NW(315° — 318°)的下风向。流动沙丘东翼长 104 m,西翼长 113 m,中线长 18 m,迎风坡

坡度为 13° , 背风坡坡度为 29° 。在后续修建沙漠公路时沙丘西翼南侧被截断, 沙丘形态遭到破坏。迎风面有多种沙障类型覆盖, 均于 2019 年春季设置完毕。根据可行性和合理性选取设置于沙丘东翼的纤维网沙障(fibermesh sand barrier, FSB)和设置于沙丘西翼的土工编织袋沙障(geotechnical woven bag sand barrier, GSB)作为研究对象。

1.2 数据采集

在每种沙障覆盖区内划分 $3(\text{NS}) \times 3(\text{WE})$ 大网格, 共 9 个区域(图 1), 由北向南、自西向东分别记为 1~9 区, 其中 FSB 区记 A1~A9 区, GSB 区记 B1~B9 区。



注: (a) 研究区图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作, 底图无修改; (b) 为样地示意。

图 1 研究区与样地示意

1.3 数据处理与分析方法

采集沙样后带回实验室进行前期处理。用 0.01 g 天平称取 2.5~3.0 g 沙样加入到 100 mL 烧杯内, 并向烧杯中注入 10 mL 过氧化氢溶液(2:1), 将烧杯放到电热板上加热, 直至溶液变清且没有细小泡沫, 去除样品中的有机质。加入 10 mL 盐酸溶液(2:1), 烧至沸腾使其充分反应, 去除碳酸钙。将烧制好的样品溶液摆放好, 并加蒸馏水到 100 mL, 静置 12 h。静置结束后, 利用皮软管将上层清液抽出至 20 mL 样品溶液后, 注入 10 mL 六偏磷酸钠溶液(250:9)作为分散剂, 并用超声波清洗机振荡 5 min 后准备进行上机测定砂样粒度。

使用英国马尔文公司生产的 MasterSizer 2000 型激光粒度分析仪进行粒度测试, 自动测试 3 次重复并生成测定结果。测试结果以美国制土壤粒级标准输出, 即 <0.002 , $0.002 \sim 0.05$, $0.05 \sim 0.1$, $0.1 \sim 0.25$, $0.25 \sim 0.5$, $0.5 \sim 1$, $1 \sim 2$ mm 共 7 个等级, 同时生成并输出 $0.002 \sim 2$ mm 的 100 个区间粒度值以便于绘制粒度频率分布曲线等; 还需输出砂颗粒体积分数为 5%, 16%, 25%, 50%, 75%, 84% 和 95% 时所对应的土壤粒径。粒度分级采用 Udden-Wentworth 粒级划分方法, 并使用 Krumbein 提出的对数转化公式, 将粒度真值转化为 Φ 值^[38], 根据公式(1)表明, Φ 值与土壤粒径的真值呈负相关。

测风仪数据采集。将可移动自记测风仪(希迈气象)预设读值频率 5 min。安装测风仪与立杆, 将固定铁片安装在立杆上距风杯 30 cm 处, 即风杯和风向标的高度为 30 cm。在每个区域内设置 1 个测风仪, 插入地下直至铁片与地面贴合。试验于 2020 年 5 月 29 日分别对 2 个试验区进行数据采集, 结束后回收测风仪并收集数据。

采集试验区沙样品。在每个试验区 9 个区域内, 每区任选 3 块方格作为实验重复, 每格内再按 3×3 网格划分 9 个小方格, 分别代表方格内八方位和中央区, 取样区编号规则见图 1。

$$\Phi = -\log_2 d \tag{1}$$

式中: d 为砂粒粒径(mm)。

故上述输出土壤颗粒体积分数为 5%, 16%, 25%, 50%, 75%, 84% 和 95% 时所对应的土壤粒径分别为 Φ_5 、 Φ_{16} 、 Φ_{25} 、 Φ_{50} 、 Φ_{75} 、 Φ_{84} 和 Φ_{95} 。

中值粒径计算公式为:

$$M_d = \Phi_{50} \tag{2}$$

粒度参数如平均粒径、标准偏差、偏态值和峰态值均采用 Krumbein 和 Folk 法^[39]计算。

平均粒径:

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

标准偏差:

$$\sigma = \frac{1}{4}(\Phi_{84} - \Phi_{16}) + \frac{1}{6.6}(\Phi_{95} - \Phi_5) \tag{4}$$

偏态值:

$$S_{K1} = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - \Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - \Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \tag{5}$$

峰态值:

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \tag{6}$$

中值粒径反映颗粒体积分数为 50% 时的粒径大小^[40]。平均粒径是砂物质粒度平均状况的表现^[41]。标准偏差表示土壤粒径分布的分散程度(表 1)。标准偏差越小, 分选越好。偏态值是用来度量粒度频率分布曲线

对称性的指标。偏态值越接近 0,粒度分选结果越好。凸起程度的参数^[40],反映土壤粒度分布的集中程度。峰态值是用来衡量频率分布曲线峰的宽窄程度和尖峰。一般来说,峰态值越高,粒度分选越好。

表 1 土壤粒度参数等级划分标准^[36]

等级划分	标准偏差 σ	偏态值 S_{K1}	峰态值 K_G
分选极好	$\sigma \leq 0.35$	极负偏度 $-1.00 < S_{K1} \leq -0.30$	很宽平 $K_G \leq 0.67$
分选好	$0.35 < \sigma \leq 0.50$	负偏度 $-0.30 < S_{K1} \leq -0.10$	宽平 $0.67 < K_G \leq 0.90$
分选较好	$0.50 < \sigma \leq 0.71$	近于对称 $-0.10 < S_{K1} \leq 0.10$	中等 $0.90 < K_G \leq 1.11$
分选中等	$0.71 < \sigma \leq 1.00$	正偏度 $0.10 < S_{K1} \leq 0.30$	尖窄 $1.11 < K_G \leq 1.56$
分选较差	$1.00 < \sigma \leq 2.00$	极正偏度 $0.30 < S_{K1} \leq 1.00$	很尖窄 $1.56 < K_G \leq 3.00$
分选差	$2.00 < \sigma \leq 4.00$	—	极尖窄 $K_G > 3.00$
分选极差	$\sigma > 4.00$	—	—

使用 Excel 2019、IBM SPSS Statistics 26 软件对试验数据进行统计分析,利用单因素方差分析法对研究区不同位置的砂粒度组成和粒度参数进行差异显著性检验,设定置信区间为 95%。利用 PolyPro 2 软件求出切线斜率和切点位置并使用 Origin Lab 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 沙障覆盖区风速状况

从图 2 可以看出,FSB 平均风速极大值出现在 SW 边缘附近,平均极大值为 6.332 m/s。平均风速极小值出现在 SSE。整体呈现西部风速高,东部风速低的特征。GSB 平均风速极大值在 SSE,为 7.496 m/s。平均风速极小值位于 W 边缘。平均风速空间格局变化总体呈自西向东风速逐渐增大的趋势。

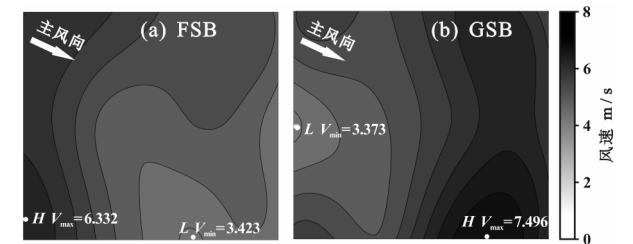


图 2 FSB 和 GSB 平均风速分布

2.2 粒配组成分析

该试验区位于腾格里沙漠西缘,地表土壤成分构成主要为砂粒,占土壤颗粒的 99%以上;其中中砂和粗砂所占比重最高,共占粒径组成的 70%以上;细砂含量达 15%~20%;极细砂含量较低,占 2%~3%;极粗砂含量<3%。粉粒、黏粒含量最少,其中粉粒含量不足 1%,黏粒含量几乎为 0(表 2)。

FSB 覆盖区不同位置粉粒含量之间大都无显著差异($P>0.05$);A5 极细砂含量显著高于其他区域($P<0.05$);A3、A6 和 A9 细砂含量明显高于 A8($P<0.05$);中砂和粗砂显著差异较大;A4、A5、A6、A7 和 A8 中砂含量显著高于 A2($P<0.05$);A7 和 A8 粗砂含量显著低于 A3 和 A6($P<0.05$)。A2 极粗砂含量显著高于其他区域,达总粒径含量的 8.33%。从沙障北部向南,粉粒、极细砂含量减少,细砂、中砂含量增

多,其中中砂含量增多最显著,增多近 20%;粗砂含量呈现先增多后减少的趋势,极粗砂含量北部较多,中南部偏少。中砂含量有明显自西向东呈先逐渐减少后增多的趋势;粗砂含量呈自西向东逐渐增多现象,其中 A9 由于背风状况,粒径含量更偏细。

GSB 内 B1 粉粒含量显著高于 B5、B6、B8 和 B9 ($P<0.05$);极细砂含量 B7 和 B8 显著低于 B6($P<0.05$),B2 和 B4 极细砂含量无显著变化($P>0.05$);B4 细砂含量显著高于 B2、B7 和 B8($P<0.05$);B3 中砂含量显著低于 B5、B7 和 B8($P<0.05$);B4 和 B7 粗砂含量显著低于 B3 和 B6($P<0.05$)。B3 极粗砂含量显著高于 B7 和 B8($P<0.05$)。GSB 内从沙障北部向南,细砂含量增多,中砂含量呈现先减少后增多的趋势,粗砂含量减少。粉粒含量自西向东先减少后增多;中砂含量自西向东逐渐减少,粗砂和极粗砂含量相反,自西向东逐渐增多,这表明自西向东粒度组成逐渐变粗。FSB 比 GSB 粉粒和极细砂含量高,但细砂、中砂和粗砂含量偏低。处于中线两侧的 FSB 西侧比 GSB 东侧细砂和中砂含量高 24%以上,而粗砂和极粗砂含量低近 43%。

2.3 粒度参数

由表 3 可知,FSB 中 M_d 在 A2、A3 和 A6 明显低于 A7 和 A8($P<0.05$); M_z 在 A3 和 A6 明显低于 A7 和 A8($P<0.05$);根据表 1 等级划分标准可以看出,PSB 中 σ 均属于分选中等,其中 A5 的 σ 显著高于 A1、A7 和 A9($P<0.05$); S_{K1} 除 A7 属于近于对称外其余区均属于正偏度,其中 A7 明显低于 A3 和 A6 ($P<0.05$); K_G 除 A3 和 A6 属于尖窄区,其余区都属于中等区,其中 A3 和 A6 明显高于 A4 和 A7($P<0.05$)。GSB 中 M_d 和 M_z 均在 B3 和 B6 明显低于 B7 ($P<0.05$);根据表 1 等级划分标准可以看出 GSB 中 σ 均属于分选中等,其中 B3 和 B6 的 σ 显著高于 B8($P<0.05$); S_{K1} 除 B4 属于近于对称外其余区均属于正偏度,其中 B4 明显低于 B3($P<0.05$),B7、B8 明显低于 B6($P<0.05$)。 K_G 除 B3 和 B6 属于尖窄区,其余都属于中等区,其中 B3 和 B6 明显高于 B4、B7 和 B8($P<0.05$)。沙粒分选性与风速大小的分布相一致。

表 2 2 种沙障区不同位置土壤粒配组成

单位: %

位置编号	黏粒 (Φ>8.97)	粉粒 (Φ8.97~4.32)	砂粒				
			极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
			(Φ4.32~3.32)	(Φ3.32~2)	(Φ2~1)	(Φ1~0)	Φ<0
A1	—	0.85±0.74bcd	3.05±1.93bc	22.73±12.19c	44.60±3.65cd	28.02±11.70a	0.76±1.07a
A2	—	0.80±0.72abcd	4.36±1.79e	15.88±6.04a	32.86±6.65a	37.76±5.45c	8.33±7.47d
A3	—	1.08±0.63d	4.00±1.12de	13.85±3.28a	38.67±4.44b	38.14±4.59c	4.24±2.92c
A4	—	0.44±0.50a	2.28±1.47ab	17.21±7.03ab	45.59±5.57d	32.76±8.38b	1.72±2.58ab
A5	—	0.91±0.73cd	6.15±1.75f	21.41±10.00bc	35.99±4.08b	32.61±8.77b	2.93±2.26bc
A6	—	0.57±0.62abc	4.53±1.04e	14.26±2.63a	37.25±2.26b	39.26±2.50c	4.12±1.57c
A7	—	0.51±0.52ab	1.48±0.85a	23.61±10.99c	48.31±4.66e	25.12±11.61a	0.97±2.48a
A8	—	0.63±0.59abc	4.32±2.13e	26.12±8.64c	42.16±6.34c	25.81±7.89a	0.96±1.56a
A9	—	0.84±0.59bcd	3.28±1.06cd	24.14±9.86c	46.17±3.99de	25.22±8.85a	0.35±0.50a
B1	—	0.74±0.59c	2.00±0.69abc	18.46±6.13bc	48.13±2.66f	30.16±6.07bc	0.52±0.49a
B2	—	0.24±0.24ab	2.06±0.60abcd	17.02±5.54b	44.60±3.20c	33.98±6.65de	2.09±2.13ab
B3	—	0.37±0.45b	3.04±1.53e	11.37±3.55a	36.52±3.29a	41.50±3.88f	7.19±3.40e
B4	—	1.02±0.54d	2.22±1.18bcd	26.84±6.13d	45.49±6.02cde	23.05±5.24a	1.35±2.38ab
B5	—	0.24±0.30ab	2.63±0.86de	17.24±5.35b	41.01±3.12b	35.09±6.08e	3.79±3.09c
B6	—	0.29±0.26ab	3.05±1.39e	12.00±4.93a	39.15±4.32b	40.06±5.68f	5.44±4.32d
B7	—	0.46±0.45b	1.69±0.74ab	21.50±5.92c	47.41±3.36ef	27.92±6.05b	1.03±1.91ab
B8	—	0.25±0.23ab	1.50±1.02a	17.71±5.36b	47.03±5.24def	31.79±6.05cde	1.71±2.71ab
B9	—	0.19±0.21a	2.48±1.03cde	18.63±6.52bc	44.82±4.63cd	31.54±7.53cd	2.32±3.77bc

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同位置差异显著(P<0.05)。下同。

表 3 2 种沙障区不同位置土壤粒度参数(Φ 值)

位置编号	中值粒径 M_d	平均粒径 M_z	标准偏差 σ	偏态值 S_{KI}	峰态值 K_G
A1	1.46±0.33cd	1.50±0.34b	0.78±0.09b	0.12±0.05b	1.01±0.06ab
A2	1.09±0.26a	1.21±0.30a	0.99±0.14ef	0.22±0.05c	1.08±0.12d
A3	1.14±0.14a	1.24±0.16a	0.92±0.09cd	0.24±0.05cd	1.19±0.06e
A4	1.29±0.21b	1.34±0.22a	0.76±0.11b	0.13±0.07b	1.02±0.07bc
A5	1.36±0.34bc	1.48±0.30b	1.00±0.08f	0.24±0.10cd	1.08±0.12d
A6	1.13±0.08a	1.24±0.11a	0.94±0.07de	0.26±0.04d	1.18±0.07e
A7	1.47±0.29cd	1.50±0.29b	0.71±0.06a	0.08±0.03a	0.97±0.03a
A8	1.53±0.27d	1.59±0.24b	0.87±0.11c	0.15±0.08b	1.00±0.07ab
A9	1.50±0.24cd	1.55±0.23b	0.80±0.07b	0.16±0.07b	1.06±0.09cd
B1	1.36±0.15cd	1.40±0.15cd	0.74±0.07a	0.12±0.04bc	1.02±0.05bc
B2	1.26±0.17b	1.31±0.17bc	0.78±0.04abc	0.13±0.04cd	1.03±0.05c
B3	1.02±0.13a	1.09±0.17a	0.87±0.10f	0.18±0.07f	1.12±0.07d
B4	1.55±0.14e	1.57±0.13e	0.82±0.12cde	0.08±0.08a	0.99±0.05ab
B5	1.22±0.18b	1.28±0.19b	0.84±0.05ef	0.15±0.04de	1.05±0.05c
B6	1.08±0.19a	1.14±0.21a	0.83±0.08def	0.18±0.07ef	1.12±0.10d
B7	1.41±0.16d	1.44±0.17d	0.76±0.07ab	0.10±0.03ab	0.99±0.03a
B8	1.31±0.16bc	1.34±0.16bc	0.74±0.09a	0.10±0.05ab	0.99±0.04ab
B9	1.31±0.21bc	1.35±0.22bcd	0.79±0.06bcd	0.14±0.05cd	1.04±0.07c

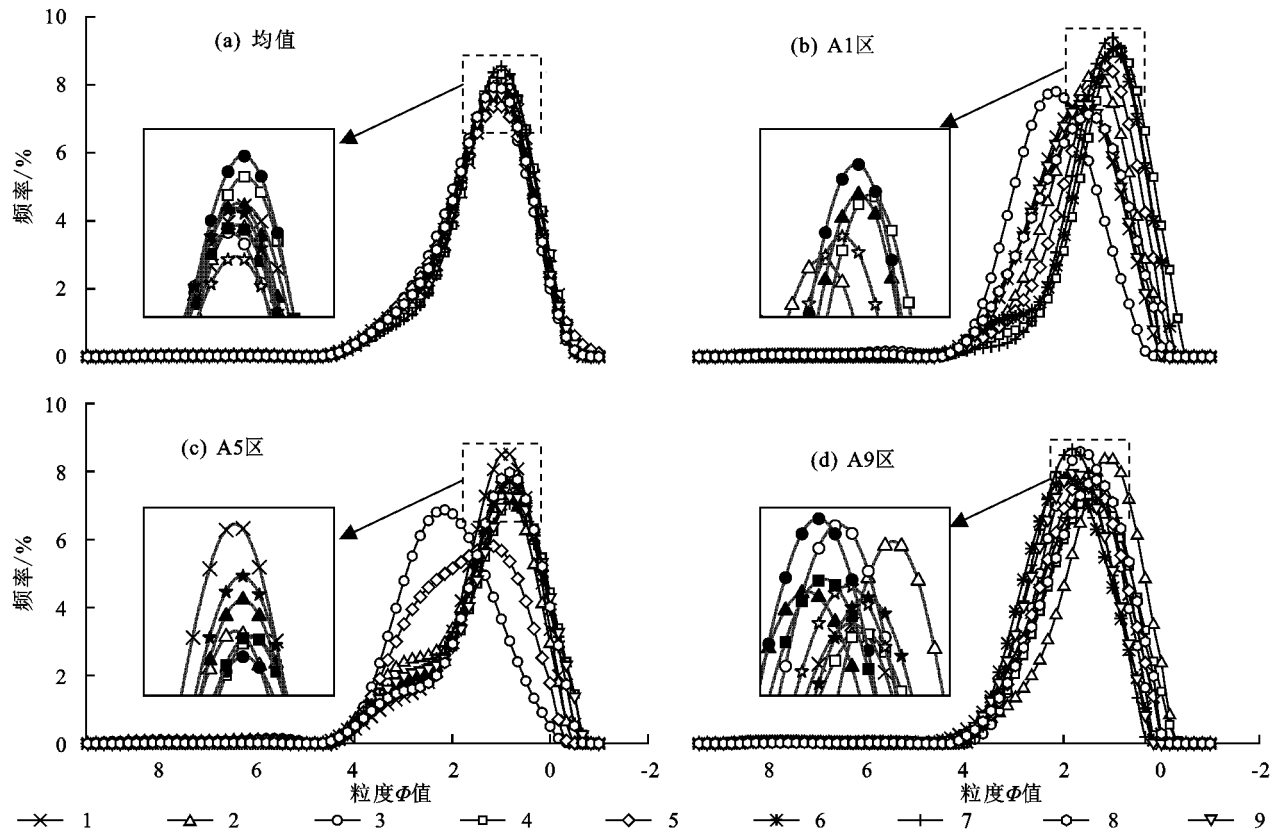
2.4 粒配曲线

FSB 粒度频率分布曲线均为单峰型,平均值分布曲线显示方格内峰值出现处基本一致,为 Φ0.99,其中西侧峰态值较高,峰值为 7.97%~8.55%;中部(center,C)峰态值偏低 7.29%~7.75%(图 3)。A1 内 W 向出现峰值最早,在 Φ2.16 处出现峰值 7.80%;C 出现峰值最晚,在 Φ0.82 处出现峰值 9.08%;SW 出现最高峰值 9.39%,SE 出现最低峰值 7.09%。方格内砂粒粒度组分

含量总体表现为 E 和 W>C>NW、NE 和 S,其中 W 砂粒含量最多。A5 分布曲线中除 NE 和 M 以外出现峰值位置基本吻合,在 Φ0.83 处出现峰值为 6.97%~8.50%;NE 向出现峰值最早,在 Φ2.32 处出现峰值为 6.81%;M 向在 Φ1.16 处出现峰值为 5.81%。方格内砂粒粒度组分含量总体表现为 W 和 S>E 和 N>NW、NE 和 C。A9 内 E 出现峰值最早,在 Φ1.99 处出现峰值为 7.72%;N 出现峰值最晚,在 Φ1.16 处出现峰值为 8.35%。方格

内砂粒粒度组分含量总体表现为:W、N 和 SE>NE、NW 和 C>S 和 SW。综上,可以表征出土壤沙粒粒

度在发生变化,由 NW 到 SE 西侧砂粒含量都较多,北侧砂粒含量增多。



注:图例 1~9 分别代表方格内 9 个位置,编号规则见图 1。下同。

图 3 FSB 不同区域及方格内不同位置土壤粒度频率分布曲线

GSB 粒度频率分布曲线均为单峰型,平均值分布曲线显示方格内峰值出现处基本一致,为 $\Phi 0.99$, 峰值为 7.99%~8.55%(图 4)。B1 内 W 出现峰值最早,在 $\Phi 2.16$ 处出现峰值 7.80%;方格内砂粒粒度组分含量总体表现为 W 和 NE>NW>S 和 C。B5 分布曲线显示,出现峰值位置差异不大,在 $\Phi 1.49 \sim 0.66$ 处出现峰值为 7.49%~8.60%。方格内砂粒粒度组分含量总体表现为 W 和 NE>C>E 和 S。B9 内 NW 出现峰值最晚且峰值最高,在 $\Phi 0.99$ 附近出现峰值为 9.66%;其余出现峰值位置为 $\Phi 1.49 \sim 1.16$ 处,峰值为 8.35%~9.55%。方格内砂粒粒度组分含量总体表现为 C 和 W>S 和 NE>E 和 NW。综上,可以表征出土壤砂粒粒度在发生变化,由 NW 到 SE 西部砂粒含量都较多且中部南部砂粒含量在增多。

土壤粒度累积频率分布曲线可以划分为细粒段代表的悬移质、中粒段代表的跃移质和粗粒段代表的蠕移质^[24]。FSB 均值、北部、中部和南部区跃移质组分所占比重分别为 98.16%,97.71%,98.11%和 97.34%,对应粒径区间分别为 $\Phi 2.36 \sim 0.29, \Phi 2.27 \sim 0.18, \Phi 2.24 \sim 0.21$ 和 $\Phi 2.46 \sim 0.48$ 。GSB 均值、北部、中部和南部区跃移质组分所占比重分别为 96.49%,95.12%,95.08%和 95.44%,对应粒径区间分别为 $\Phi 2.24 \sim 0.31, \Phi 2.14 \sim$

0.26, $\Phi 2.27 \sim 0.27$ 和 $\Phi 2.26 \sim 0.40$ (图 5)。

FSB 悬移质和跃移质组分分选性从北向南逐渐变好;蠕移质组分北部分选性最好,中部最差;GSB 悬移质组分分选性从北向南逐渐变差,跃移质组分分选性南部最好,中部最差;蠕移质组分分选性中部最好,南部最差。

3 讨论

3.1 沙障内粒配组成与粒度参数分析

从研究区风速分布图可以看出,FSB 平均风速空间分布自西向东逐渐减小;GSB 则相反。可能出现上述原因为 FSB 西侧和 GSB 东侧处于沙丘中线附近,NW 主风向受地表抬升作用,风力增强,风速增大。由于安装测风仪高度为 30 cm,高于障高,而在沙丘迎风坡面设置沙障后沙丘上部风速为下部风速的 1.18~2.01 倍^[8],而且比裸沙沙丘的风速放大率还高,因此风速值在沙丘迎风面上呈沿主风向逐渐增大趋势。

前人^[30]对民勤地区尼龙网格沙障拦截的沙物质中,细砂、极细砂和粉粒黏粒含量有所减少,而中砂及粗砂含量有所增加,这与文中中砂、粗砂含量占主体,其余砂粒组分含量较少的特点一致;宋洁等^[19]对腾格里沙漠砂粒进行粒度分析发现,主要粒度成分为细砂和中砂,平均粒径为 $\Phi 2$,但本文所采取沙样主要粒

度成分为中砂和粗砂, 平均粒径在 $\Phi 1.3 \sim 1.4$, 比前人研究值偏低, 即粒度真值偏高, 这可能与采样地位置及其基岩有关。由于风的挟沙能力有限, 迎风坡坡

底通常会有细碎砾石分布^[19, 40], 这与文中 FSB 北部极粗砂含量偏多一致; 而且沙丘粒度中线的分选性最佳, 迎风坡坡脚向坡顶砂粒由粗变细。

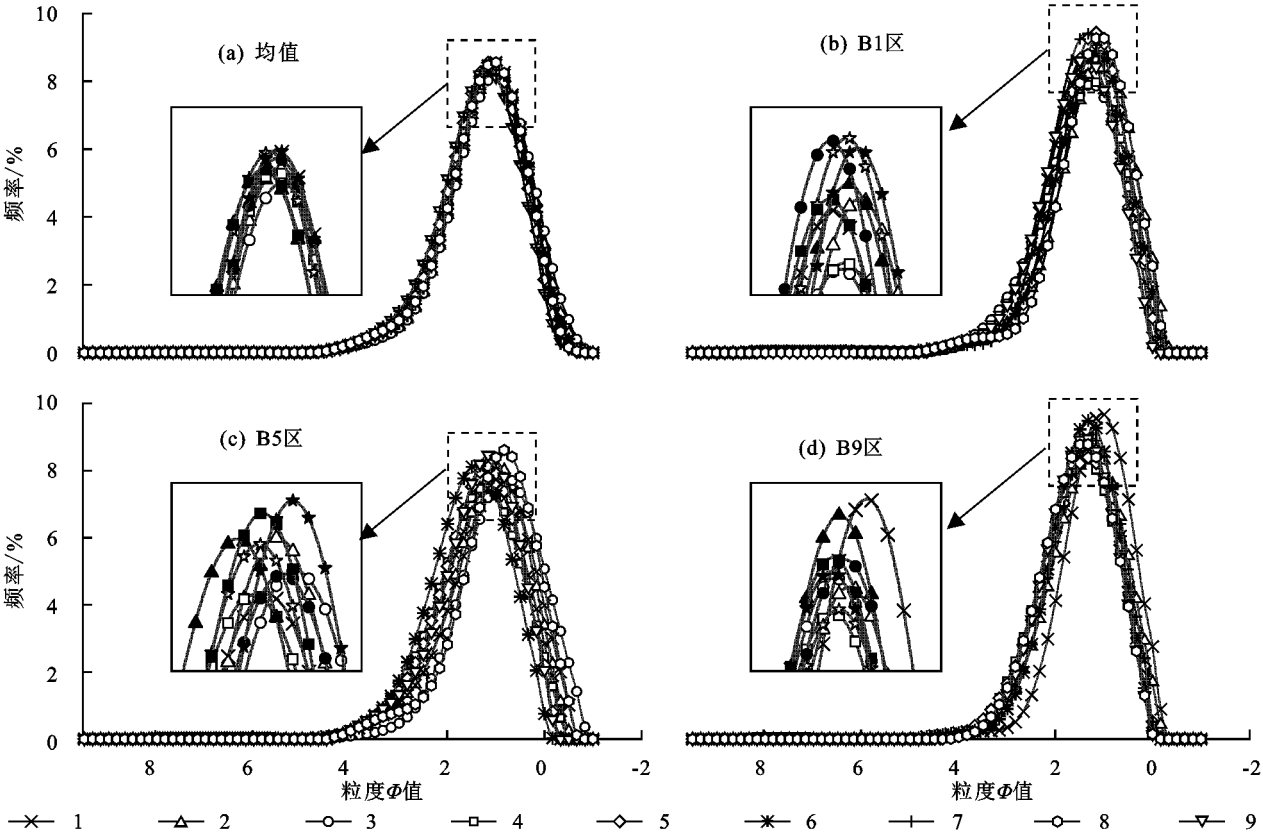


图 4 GSB 不同区域及方格内不同位置土壤粒度频率分布曲线

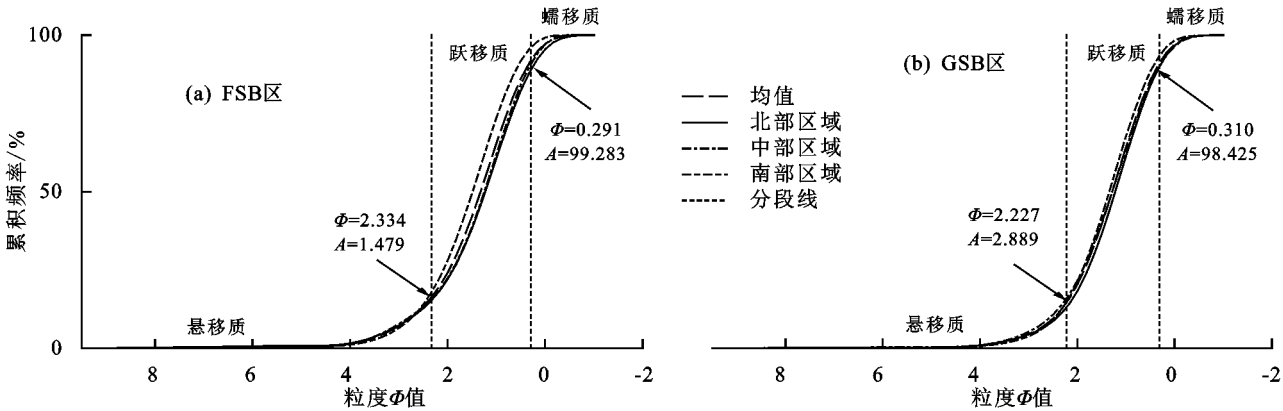


图 5 沙障覆盖区不同位置土壤粒度累积频率分布曲线

FSB 中 M_d 和 M_z 自北向南逐渐增多, 说明其真值逐渐减少; σ 呈自西向东先增加后减少趋势, 因此西侧分选最好。西侧靠近中线, 这之前学者^[22]对沙丘中线粒度成分研究相符合。 S_{K1} 和 K_G 均呈自西向东逐渐增大现象, 说明西侧粒度频率分布曲线更偏于对称, 但集中程度相比东侧不高。 GSB 中 M_d 和 M_z 自西向东呈明显减少趋势, 说明其真值逐渐增大; σ 、 S_{K1} 和 K_G 大体呈自西向东逐渐增大趋势, 说明东侧粒度频率分布曲线更偏于对称, 且集中程度更高, 但分选性较差。处于中线两侧环境要素基本一致的 FSB 西侧比 GSB 东侧细砂和中砂含量高 24% 以上, 而粗砂和极粗砂含量低近

43%。即 FSB 粒度组分偏细, 分选效果好, 同自然状态一致。 GSB 东侧中线附近分选性变差与原始沙丘状况相反, 证实沙障内部砂粒组分增多。

FSB 粒度真值由北向南逐渐减少, 粒度组分变细, 与流动沙丘自然状态粒度组分变化相吻合; GSB 粒度真值自北向南变化趋势不明显, 自西向东逐渐增大, 粒度组分变大可能存在沙障阻滞沙尘, 使粗颗粒物在沙障内滞留。 FSB 土壤砂粒粒度的变化是由 NW 到 SE 西部砂粒含量都较多, 北部砂粒含量逐渐增多。 GSB 土壤砂粒粒度由 NW 到 SE 西部砂粒含量都较多且中南部砂粒含量逐渐增多。两者都存在

西部砂粒含量多的现象,但在主风向下风区砂粒含量不同,FSB 主要集中在北部,而 GSB 主要集中在中南部,这说明 GSB 区沙粒物质在沙障内沿主风向沉积增多,表示其沙障对风力作用具有阻拦效果。

3.2 沙障内粒配曲线分析

FSB 和 GSB 中沿主风向分布的 3 个区域方格内 W 砂粒含量均比其余方位多 18%~23%。GSB 中 S 和 E 砂粒含量少 8%~26%;C 沿主风向砂粒含量较其余地区逐渐增大。FSB 中 NW 和 NE 砂粒含量沿主风向略有增加,其余方位砂粒含量变化规律不明显。

砂粒含量在 W 最多,表明在 W 弱风蚀或强堆积,张登山等^[35]对麦草方格沙障内蚀积分析得出,在沙障方格内最低蚀积深度点逐渐偏离方格中心,向迎风侵蚀侧移动,即向 E 偏离现象明显。因此,W 和 N 方位带为强堆积部位;C 和 S 方位带为弱堆积或风蚀区。本文中,砂粒含量指示的蚀积状态与该研究结果吻合。GSB 中 C 砂粒含量增多,砂粒成分在 C 沉积增多,指示沙障滞留沙尘作用。

风沙活动在悬移、跃移和蠕移 3 种运动组分中跃移质组分不仅是本研究中占比最大,而且是分选性最好的组分^[42],分选性逐渐变好是由于土壤颗粒在不断变细造成。区内跃移质组分粒径比屈建军等^[43]提出的 $\Phi 3.8 \sim 1.0$ 偏低,可能由于区内粒径组分砂粒含量偏高,在颗粒较大的组分之间,相互碰撞可能会发生近似弹性碰撞,使颗粒较大的组分也能够发生跃移。而 FSB 悬移质和跃移质组分越往南越好,表现其在自然状态下颗粒不断减小的过程,说明其遵循自然分选规则,在沙丘迎风面底部砂粒成分偏高,往坡顶砂粒成分减小,细砂成分增多。GSB 跃移质组分分选性中部相比南北部较差,这表明砂粒组分在中部最多,南北部相对减少,也证实 GSB 对砂粒组分截留作用加强。

4 结论

(1)处于中线两侧环境要素基本一致的 FSB 西侧比 GSB 东侧细砂和中砂含量高 24%以上,而粗砂和极粗砂含量低近 43%。FSB 砂粒组分沿主风向逐渐减少,指示其阻沙作用较弱。GSB 砂粒主要集中在中南部,且跃移质组分分选性中部比南北部差,表明 GSB 砂粒物质在沙障内主风向下风区沉积较多。

(2)2 种沙障内部方格砂粒含量在 W 比其余方位多 18%~23%,表明在 W 为弱风蚀或强堆积。在 GSB 方格中 S 和 E 砂粒含量少 8%~26%,即 E 和 S 方位为风蚀区;且 C 砂粒含量沿主风向逐渐增大,表示沙障内砂粒沉积增多;但 FSB 方格中变化不明显。

(3)通过对 2 种沙障粒度参数特征进行分析和比较可以看出,GSB 沙障区域内和方格内砂粒含量均高于 FSB,根据粒配分选结果判断,GSB 分选不规

则,即 GSB 砂粒含量更多,GSB 截留砂粒作用强于 FSB,即前者阻沙效果更优于后者。

参考文献:

- [1] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:315-318.
- [2] Zonn I S, Kust G S, Andreeva O V. Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts[J]. Arid Ecosystems, 2017, 7: 131-141.
- [3] 屠志方,李梦先,孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理,2016(1):1-5,13.
- [4] 于程.我国荒漠化和沙土化防治对策[J].农业工程,2012,2(2):69-71.
- [5] 刘贤万.实验风沙物理与风沙工程学[M].北京:科学出版社,1995:138-149.
- [6] 常兆丰,仲生年,韩福桂,等.粘土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J].中国沙漠,2000,20(4):455-457.
- [7] 丁爱强,谢怀慈,徐先英,等.3 种不同机械沙障设置后期对沙丘植被和土壤粒度与水分的影响[J].中国水土保持,2018(5):59-63.
- [8] 刘虎俊,王继和,李毅,等.塑料网方格沙障对新月形沙丘迎风坡的风沙流影响[J].水土保持学报,2011,25(5):26-29,34.
- [9] 马全林,王继和,詹科杰,等.塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景[J].水土保持学报,2005,19(1):36-39,58.
- [10] Cheng H, He W W, Liu C C, et al. Transition model for airflow fields from single plants to multiple plants [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 266/267:29-42.
- [11] Guo Z L, Li J F, Chang C P, et al. Logistic growth models for describing the fetch effect of aeolian sand transport[J/OL].Soil and Tillage Research, 2019, 194. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104306>.
- [12] Cheng H, Liu C C, Zou X Y, et al. Wind erosion rate for vegetated soil cover: A prediction model based on surface shear strength[J/OL].Catena, 2020, 187. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104398.
- [13] 李谦,高永,汪季,等.聚乳酸纤维沙障对表层土壤含水量的影响[J].中国水土保持科学,2012,10(3):69-74.
- [14] 孙涛,王继和,满多清,等.仿真固沙灌木防风积沙效应的风洞模拟研究[J].水土保持学报,2011,25(6):49-54.
- [15] 赵文玲.新型生物可降解 PLA 沙袋沙障降解特性及其影响因子探究[J].水土保持研究,2015,22(6):198-202.
- [16] 邵介贤,黄健,周伯明,等.土工编织袋在路基工程中应用的研究[J].公路,2005(7):82-87.
- [17] 陈赞.沙漠公路防风固沙技术应用研究[J].内蒙古公路与运输,2007(2):7-11,58.
- [18] 王睿,周立华,陈勇,等.库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J].干旱区研究,2017,34(2):330-336.
- [19] 宋洁,春喜,白雪梅,等.中国沙漠粒度分析研究综述[J].中国沙漠,2016,36(3):597-603.
- [20] 张晓晓,毛龙江,杜吉净,等.基于 MATLAB 编程的沉

积物粒度计算方法与结果对比研究[J].河南科学, 2015,33(11):1998-2004.

[21] 李宽,贾晓鹏,熊鑫,等.额济纳旗典型地表沙尘释放潜力及沙尘天气频发成因[J].中国沙漠,2019,39(3):191-198.

[22] 苏松领,毛东雷,蔡富艳,等.新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境[J].干旱区资源与环境,2020,34(8):124-132.

[23] 李毅,李敏,曹伟,等.农田土壤颗粒尺寸分布分维及颗粒体积分数的空间变异性[J].农业工程学报,2010,26(1):94-102.

[24] 陈宇轩,张飞岳,高广磊,等.科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J].干旱区地理,2020,43(4):1051-1058.

[25] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.

[26] 王陇,高广磊,张英,等.毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素[J].干旱区地理,2019,42(5):1003-1010.

[27] 陈宇轩,高广磊,张英,等.呼伦贝尔沙地风沙土粒径分布特征[J].北京林业大学学报,2019,41(8):124-130.

[28] 俞祥祥,李生宇,马学喜,等.不同发育阶段新月形沙丘表面粒度特征[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(6):111-118.

[29] 常兆丰,李淑娟,段晓峰,等.新月形沙丘粒度分布的交替过程:以甘肃省河西沙区绿洲边缘积沙带为例[J].农业工程,2019,9(4):76-82.

[30] 梁爱民,马杰,张瑾,等.民勤荒漠—绿洲过渡带不同沙障的阻沙粒度分析[J].太原师范学院学报(自然科学版),2016,15(1):87-92.

[31] 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.

[32] 党晓宏,高永,虞毅,等.新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益[J].北京林业大学学报,2015,37(3):118-125.

[33] 马瑞,刘虎俊,马彦军,等.沙源供给条件对机械沙障固沙作用的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):105-108,114.

[34] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud[J/OL]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D16). <https://doi.org/10.1029/2005JD006630>.

[35] 张登山,吴汪洋,田丽慧,等.青海湖沙地麦草方格沙障的蚀积效应与规格选取[J].地理科学,2014,34(5):627-634.

[36] 丁连刚,严平,杜建会,等.基于三维激光扫描技术的草方格沙障内蚀积形态监测[J].测绘科学,2009,34(2):90-92.

[37] 赵鹏,徐先英,屈建军,等.民勤绿洲—荒漠过渡带白刺群落空间分布及其环境解释[J].干旱区研究,2016,33(5):1003-1011.

[38] 丁国栋.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,2010.

[39] Folk R L, Word W C. Braser rivers bars: A study in the significance of grain size parameters[J].Journal of Sedimentary Petrology,1957,27(1):3-26.

[40] 刘宇胜.阿拉善北部戈壁地区新月形沙丘移动规律研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.

[41] 杨金玲,李德成,张甘霖,等.土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J].土壤学报,2008,45(3):413-419.

[42] 韩广,张桂芳,杨文斌.呼伦贝尔沙地沙丘砂来源的定量分析:逐步判别分析(SDA)在粒度分析方面的应用[J].地理学报,2004,59(2):189-196.

[43] 屈建军,黄宁,拓万全,等.戈壁风沙流结构特性及其意义[J].地球科学进展,2005,20(1):19-23.

(上接第 112 页)

[24] 赵云鹏,白一茹,陆学娥,等.宁夏不同种植年限下晒砂瓜土壤干燥化效应研究[J].水土保持研究,2019,26(1):273-279.

[25] 张忠学,陈鹏,聂堂哲,等.不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J].农业机械学报,2018,49(11):210-219.

[26] 樊军,郝明德,党廷辉.旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J].土壤与环境,2000,9(1):23-26.

[27] 党廷辉,郭胜利,郝明德.黄土旱塬长期施肥下硝态氮深层累积的定量研究[J].水土保持研究,2003,10(1):58-60,75.

[28] 沈灵凤,白玲玉,曾希柏,等.施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及 pH 的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(7):1350-1356.

[29] 姚玉霞,张雪虹,叶玮,等.我国设施土壤硝态氮累积特性及影响因素研究综述[J].绿色科技,2017(24):99-102.

[30] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.

[31] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Challenge and opportunity in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J].Agricultural Sciences in China,2002,1(7):776-785.

[32] 杨慧,谷丰,杜太生.不同年限日光温室土壤硝态氮和盐分累积特性研究[J].中国农学通报,2014,30(2):240-247.

[33] 袁丽金,巨晓棠,张丽娟,等.设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(1):14-19.

[34] 张迪,赵牧秋,牛明芬,等.有机肥对设施土壤硝态氮垂直分布的影响[J].土壤通报,2011,42(5):1148-1152.