库布齐沙漠光伏电站内芦苇沙障的防风固沙效益

石 涛，蒙仲举，崔向新，党晓宏，唐国栋，贾瑞庭

（内蒙古农业大学 沙漠治理学院/内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室，；内蒙古 呼和浩特 010011）

摘　要：[目的] 研究光伏电站内芦苇沙障对风沙流的风速、输沙量及其沙粒分布的影响，为中国北方风沙区光伏电站沙害防治提供理论依据。[方法] 通过野外观测库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站铺设芦苇沙障后的风速(20，50，100，200，310 cm)和近地表 0—30 cm 高度输沙量，分析风速廓线、地表粗糙度、摩阻风速、平均跃移高度、防风作用、固沙效益等指标的变化规律。[结果] ①芦苇沙障风速廓线呈对数函数分布，相关系数在 0.99 以上，芦苇沙障相对于裸沙地表粗糙度提高了 3.47～3.79 倍，摩阻风速增加了 1.39～1.54 倍，防风作用最大值出现在 20 cm 高度处，为 21.72%。②总输沙量芦苇沙障仅为裸沙的 6.95%，总体固沙效益为 93.05%，裸沙 90%以上的输沙量集中于 0—8 cm 范围，而芦苇沙障在此高度范围内输沙量占总输沙量的 51.39%，芦苇沙障的风沙流结构有向上层移动的趋势。[结论] 铺设芦苇沙障降低了近地表风速，有效拦截了风沙流，达到了防风固沙目的，是沙区光伏电站有效的防护措施。

关键词：平铺芦苇沙障；防风固沙；光伏电站；库布齐沙漠

文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2020)05-0166-06　　**中图分类号**：P931.3

文献参数：石涛，蒙仲举，崔向新，等.库布齐沙漠光伏电站内芦苇沙障的防风固沙效益[J].水土保持通报，2020，40(5)：166-171. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.025；Shi Tao，Meng Zhongju，Cui Xiangxin，et al. Wind-prevention and sand-fixing benefits of reed-sand barrier at photovoltaic plant in Hobq Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(5)：166-171.

Wind-prevention and Sand-fixing Benefits of Reed-Sand Barrier at Photovoltaic Plant in Hobq Desert

Shi Tao，Meng Zhongju，Cui Xiangxin，Dang Xiaohong，Tang Guodong，Jia Ruiting

(1. *Desert Science and Engineering College/Key Laboratory of Aeolian Sand Physics and Sand Control Engineering in Inner Mongolia，Inner Mongolia Agricultural University，Hohhot，Inner Mongolia* 010011，*China*)

Abstract：[Objective] The benefits of a reed-sand barrier in a photovoltaic plant with regard to wind velocity，transported sand volume，and transported sand diameter were studied in order to provide a theoretical basis for the prevention and control of sand damage caused to the 200 MWp photovoltaic plant in Hobq Desert，Northern China. [Methods] The wind speed after placing reed-sand barrier (20，50，100，200，310 cm) and sediment transport (at a height of 0—30 cm) near the surface of the photovoltaic plant were measured. Then，the trend of indicators such as the wind speed profile，surface roughness，friction speed，average jump height，wind prevention，and sand fixation benefit were analyzed. [Results] ① The wind speed profile of the reed-sand barrier followed a logarithmic increase function and the goodness of fit (R^2) of the regression was $>$ 0.99. The aerodynamic roughness and shear velocity above the reed-sand barrier were 3.47—3.79 times and 1.39—1.54 times higher，respectively，than those above bare sand. The wind break function at a height of 20 cm was the maximum (21.72%). ② The total sediment transport of the reed-sand barrier was only 6.95% of that of the bare sand，and the sand-fixing benefit was 93.05%. More than 90% of the total sand transport flux above the bare sand was distributed within a height of 0—8 cm，whereas only 51.39% of the total sand transport flux above the reed-sand barrier was distributed at this height. Therefore，the sand flux above the reed-sand barrier tended to move towards the high layer. [Conclusion] The reed-sand barrier acted

收稿日期：2019-10-14　　**修回日期**：2019-12-16

资助项目：内蒙古自治区科技重大专项项目“重点区域荒漠化过程与生态修复研究与示范”(zdzx2018058-3)

第一作者：石涛(1994—)，男(汉族)，甘肃省民勤县人，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治。Email：1197905696@qq.com。

通讯作者：崔向新(1962—)，女(满族)，辽宁省本溪市人，博士，教授，硕士生导师，主要从事荒漠化防治研究。Email：cuixiangxin1962@163.com。

as an effective windbreak and provided sand fixation by reducing the near-surface wind speed and intercepting sand transport. Thus, the reed-sand barrier is an effective protective measure for photovoltaic tracks in sandy areas.

Keywords: reed sand barrier; wind prevention and sand fixation; photovoltaic plant; Hobq Desert

中国西北干旱半干旱地区辐射充足,且土地使用成本低,是建设光伏电站的理想场所[1]。近年来在国家政策扶持下,太阳能发电建设项目逐渐增多,不仅能带来显著的经济效益,还能发挥防风固沙的生态效益[2]。但沙漠地区植被稀少,地表裸露,生态脆弱,光伏电站建设过程中,机械化程度高会破坏地表形态[3],从而引发环境问题,需要人们治理和保护。由于光伏板的汇集作用在板下沿会形成风蚀坑,导致沙粒在板间堆积,支撑光伏板的基柱裸露[4],经过一个风季的风蚀,若不加以有效防治,会严重影响光伏电站的正常运营[5-6]。

现阶段沙害防治模式主要为先用机械沙障固定,再进行植被措施。机械沙障使下垫面性质发生变化,地表粗糙度增加,从而降低近地表风速、减弱风蚀强度、改善微环境及沙丘表面稳定性,进而达到防风固沙目的[7-8]。沙障设置后能使地表粗糙度增加 15～24 倍,对保持土壤水分也起到了一定作用[9],为今后植被恢复创造条件。芦苇沙障多用于沙区铁路公路沿线防护[10-11]、草原沙地等[12-13]风蚀防治,铺设方式以直立式为主,平铺芦苇沙障施工简便、见效快,适合大面积铺设。因此,本文选取库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站为研究对象,通过野外观测铺设芦苇沙障后近地表风速和输沙量,分析风速廓线、地表粗糙度、摩阻风速、平均跃移高度、防风作用、固沙效益等指标的变化,旨在探明光伏电站内平铺芦苇沙障的防风固沙效益,为采取相应的风蚀防治措施提供理论依据。

1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇工业园区,库布齐沙漠 200 WMp 光伏电站地理坐标为 37°20′—39°50′N,107°10′—111°45′E。该地区主要沙丘类型为新月型沙丘、新月型沙丘链和格状沙丘链。流动沙丘分布广泛,占 61%,沙丘高度为 10～60 m,地势南高北低,平均海拔 1 238 m。地属典型温带大陆性干旱气候,年平均气温为 5～8 ℃,年均降水量在 258.3 mm 左右,年潜在蒸发量 2 400 mm 左右,年均太阳总辐射量 597.9 kJ/cm^2。全年盛行西风、西北风,年均风速 3.5 m/s,年均大风天数为 30 d,年沙尘暴日数 27～57 d,风沙活动主要发生在 3—5 月。试验光伏电站于 2018 年底完成装机,光伏阵列东西走向,面向正南,单组光伏电板规格为 4 m×18 m,光伏电板上沿距地面 2.7 m,下沿距地面 0.3～0.5 m,阵列南北间距为 9 m,光伏板倾斜角度为 37°。

2　研究方法

2.1　野外风沙流观测

观测样点在库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站内,选择相邻的两个光伏阵列板间,一个板间铺设芦苇沙障,一个板间为裸沙作为对照(见图 1),两种下垫面地势较为平坦且均无植被,芦苇沙障铺设盖度约为 50%～60%。



图 1　200MWp 光伏电站防风固沙效益试验观测现场

(1) 风速观测。数据观测时间为 2019 年 3 月,风速观测采用三杯风速仪测定,使用 HOBO 数采仪采集数据,观测高度分别为 20,50,100,200,310 cm,数据采集频率为 1 s,每隔 3 s 记录 1 次数据,观测期

间风向主要为 W。

(2) 输沙量观测。输沙量与风速同步观测,在两种下垫面各布置 1 组集沙仪,集沙仪进沙口 15 层,每层进沙口尺寸为 2 cm×2 cm,可以观测近地表 0—30 cm高度的输沙情况。集沙仪的开口与观测期间风向正对,其底部与地面齐平,观测开始时同时打开集沙仪进沙口,观测结束后同时关闭,共收集 3 次集沙,每次测定时间为 1 h,将集沙仪收集的沙粒带回实验室,用 0.01 g 精度天平进行分层称重,粒径特征采用马尔文 2 000 激光粒度仪测定。

2.2 指标计算

(1) 空气动力学粗糙度和摩阻风速。本文采用普朗特—冯卡门的风速对数分布规律描述风速廓线方程为:

$$\mu_z=\frac{\mu_*}{K}\ln\frac{z}{z_0} \tag{1}$$

式中:μ_z 为高度 z 处的平均风速(m/s);μ_* 为摩阻风速(m/s);z 为风速廓线上的某点距地面垂直高度(m);z_0 代表空气动力学粗糙度(m);K 为卡门常数,一般取值 0.4[14]。

本研究采用对数廓线拟合的方法计算空气动力学粗糙度,测得 5 个高度(20,50,100,200 cm 和 310 cm)处风速,并运用最小二乘回归得到风速廓线拟合公式[15-16]:

$$\mu_z=a+b\ln z \tag{2}$$

式中:a,b 为回归系数。在公式(2)中,令 $\mu_z=0$ 可求出:

$$z_0=\exp(-a/b) \tag{3}$$

由公式(2)和(3)计算可得摩阻风速计算方程为:

$$\mu_*=Kb \tag{4}$$

(2) 防风作用。

$$F=\frac{V_0-V_{hw}}{V_0}\times100\% \tag{5}$$

式中:F 为芦苇沙障的防风作用;V_0,V_{hw} 分别为同一高度下裸沙和芦苇沙障的平均风速。

(3) 风速增加率。

$$R=\frac{v_2-v_1}{v_1\times h}\times100\% \tag{6}$$

式中:R 为风速增加率;v_2,v_1 分别为某两个高度层 h_2,h_1 的平均风速值($h_2>h_1$),$h=h_2-h_1$(m)。

(4) 固沙效益。

$$E=\frac{q_0-q_{hw}}{q_0}\times100\% \tag{7}$$

式中:E 为芦苇沙障的固沙效益;q_0,q_{hw} 分别代表裸沙和芦苇沙障各高度层 1 h 内总输沙量。

3 结果与分析

3.1 风速廓线

通过把高度做对数为横轴,平均风速为纵轴,绘制风速廓线图(图 2)。芦苇沙障和裸沙的风速廓线均在半对数图上呈直线分布,拟合系数均高于 0.98。这表明风速廓线分布特征并未受到芦苇沙障的影响。风速增加率在高度层次上的差异表明风速廓线对数拟合规律被破坏的程度,随着高度增加风速增加率逐渐减小,芦苇沙障 20—50 cm 高度的风速增加率最大,是裸沙的 1.71 倍,表明 20 cm 高度以上的气流迅速恢复,芦苇沙障的影响逐渐减小。芦苇沙障在各高度的风速值均小于裸沙,随高度增加防风作用最大值出现在 20 cm 高度处,越接近地表风速削减作用越明显(见表 1)。

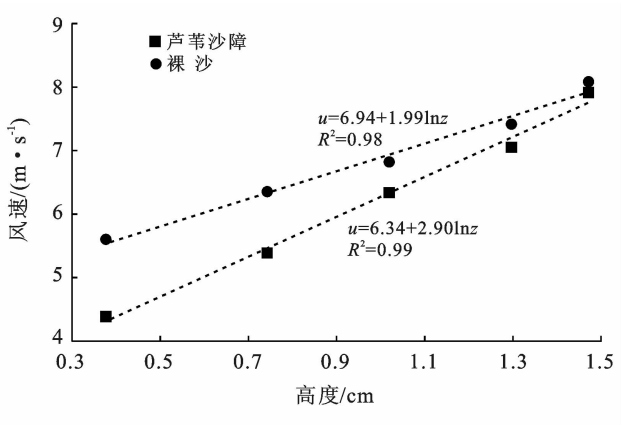


图 2 芦苇沙障与裸沙风速廓线对比

表 1 芦苇沙障与裸沙不同高度层的风速增加(*F*)和防风作用(*R*)

高 度	20 cm	50 cm	100 cm	200 cm	310 cm
芦苇沙障风速/(m·s^{-1})	4.39	5.39	6.34	7.05	7.91
裸沙对照风速/(m·s^{-1})	5.60	6.35	6.82	7.42	8.08
F/%	21.72	15.16	7.09	4.93	2.11
$R_{芦苇}$/%	76.28	35.18	11.24	11.11	—
$R_{裸沙}$/%	44.60	14.77	8.71	8.17	—

3.2 动力学粗糙度和摩阻风速

空气动力学粗糙度和摩阻风速反映了下垫面对近地表气流的摩擦阻力[17],是评价芦苇沙障防风效益的重要参数。将观测数据利用公式(3)—(4)根据最小二乘法原理进行拟合,得到芦苇沙障和裸沙的粗糙度和摩阻风速,芦苇沙障拟合系数 R^2 均大于0.97,超过 0.98 的数据占 92%,裸沙拟合系数 R^2 均大于 0.96,超过 0.98 的数据占 52%。芦苇沙障和裸沙的粗糙度和摩阻风速差异显著(见图 3),由分析结果可

见,芦苇沙障摩阻风速为 0.94～1.31 m/s,裸沙摩阻风速为 0.61～0.94 m/s,摩阻风速变化幅度均较大,由于芦苇沙障的存在,摩阻风速增大,是裸沙的 1.39～1.54 倍。芦苇沙障粗糙度为 0.52～1.29 cm,裸沙粗糙度 0.15～0.34 cm,粗糙度提高了 3.47～3.79 倍,芦苇沙障粗糙度变化幅度较大,裸沙粗糙度变化较为稳定。芦苇沙障使得地表粗糙度和摩阻风速急剧升高,大大降低了地表的风蚀能力。Oke[18]研究得出水平裸露地表的粗糙度的范围为 1～10 mm,Ishizuka等[19]计算出塔克拉玛干沙漠的粗糙度为 0.267 cm,与本文中裸沙的平均粗糙度非常接近,并且本文的结果也符合 Oke 的研究。Toure 等[20]认为空气动力学粗糙度能够反映土壤风蚀的潜力,基于本文研究结果,芦苇沙障粗糙度明显高于裸沙,风蚀潜力较小。

3.3　输沙量垂直分布特征

为研究两种下垫面输沙量随高度的变化规律,对两种下垫面采用多种函数模型进行拟合,通过对所得函数关系式的分析(见图 4),裸沙输沙量随高度增加符合指数函数关系式递减,相关系数达到 0.99,这与张正偲[21]、杨欢等[22]研究结果一致。芦苇沙障拟合效果为幂函数最佳,相关系数达到 0.86。这与张剑挥[23]、陈新闯[24]、刘芳等[25]研究结果类似,可见幂函数能够更好地反映下垫面有植被或沙障覆盖后输沙量随高度的分布规律。

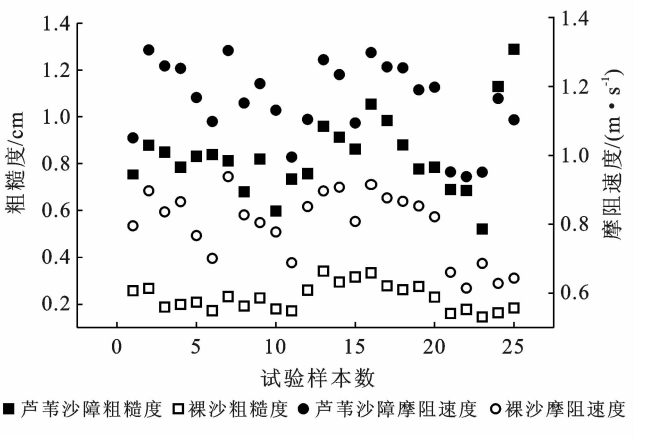


图 3　芦苇沙障与裸沙粗糙度和摩阻风速对比

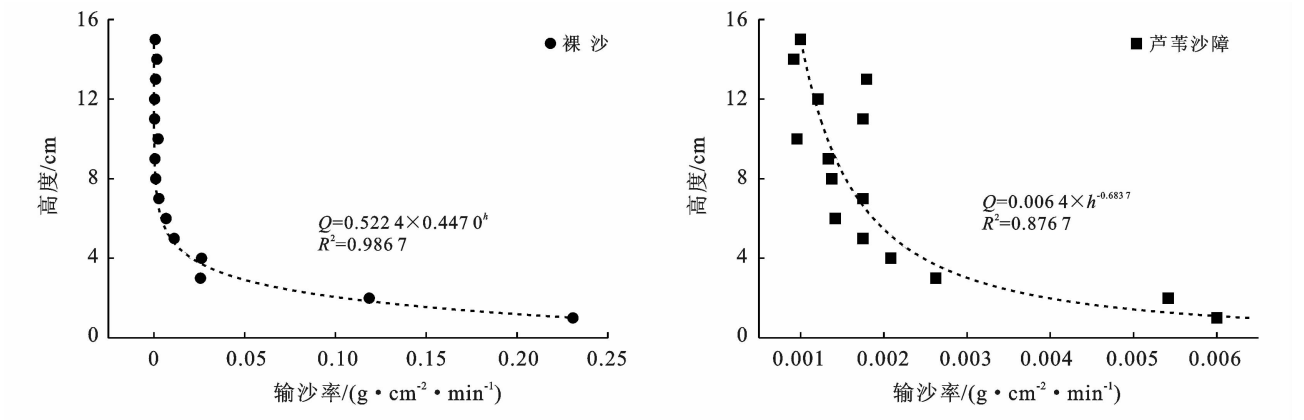


图 4　两种下垫面输沙量随高度变化拟合特征

两种下垫面输沙量均随着高度基本呈减小趋势,总输沙量裸沙〔0.451 5 g/(cm² · min)〕>芦苇沙障〔0.031 4 g/(cm² · min)〕,芦苇沙障内输沙量仅为裸沙的 6.95%,总体固沙效益为 93.05%。裸沙 0—6 cm 输沙量占总输沙量的 87.71%,且集中于 0—2 cm 高度,90%以上的输沙量集中于 0—8 cm。朱震达等[26]、Williams[27]研究得出风沙流在 0—2 cm 高度内传输且 90%沙量在 0—10 cm 内传输,这与本文观测结果一致。芦苇沙障 0—8 cm 输沙量占总输沙量的51.39%,90%以上的输沙量集中于 0—26 cm。

平均跃移高度可以反映风沙流的跃移强度,跃移高度指风沙流累积输沙量达到总输沙量 50%所对应的高度。本文通过 3 次输沙量观测数据的累计百分比平均值计算出芦苇沙障和裸沙平均跃移高度分别为 7.74,1.99 cm,平均跃移高度上升了 3.89 倍。芦苇沙障干扰了地表携沙气流的稳定性,增大了地表粗糙度,降低了来流风的携沙能力,使贴地层的输沙量减小,导致输沙量垂直分布发生变异。李锦荣[28]、袁方等[29]人研究了沙柳沙障、麦草沙障风沙流结构变化规律,均发现下层输沙量减小,上层输沙量增大,与本文研究结果类似。

3.4　风蚀物粒度特征

风沙流中沙粒粒径的垂向分布与风沙流搬运量和沙粒运动方式密切关系[30]。由于芦苇沙障收集到的沙物质较少,所以分为上层(10—30 cm)、中层(2—10 cm)、下层(0—2 cm)共 3 层,对 0—30 cm 高度范围内芦苇沙障各层沙物质的粒度分析结果见表 2。由表 2 可知,芦苇沙障主要组分由细沙和中沙构成,

细沙含量为71.99%～78.76%，中沙含量为15.98%～25.74%。芦苇沙障细沙和极细沙含量自下而上均呈现递增趋势，中沙含量自下而上则表现出相反的变化，呈现递减趋势。

芦苇沙障各层高度中沙含量均小于裸沙，极细沙含量均高于裸沙，细沙在各层高度则呈现不同的特征，上层含量低于裸沙，中层和下层含量升高。芦苇沙障降低了近地表的风速，减弱了风沙流的携沙能力，同等条件下，粒径较大的中沙由于气流向上的举力不足无法输送到更高的位置，而细沙在跃移过程中消耗的能量少，可以跃移到更高的气流层中，使得输沙量垂直分布发生变异。

表2 芦苇沙障风蚀物粒度构成

下垫面	高度/cm	中沙粒径(250～500 μm)	细沙粒径(100～250 μm)	极细沙粒径(50～100 μm)	粉粒粒径(2～50 μm)
芦苇沙障	10—30(上层)	15.98	78.76	3.69	1.18
	2—10(中层)	18.64	78.21	1.45	1.3
	0—2(下层)	25.74	71.99	0.86	1.15
裸沙(对照)	10—30(上层)	17.42	79.93	1.25	1.1
	2—10(中层)	21.07	77.07	0.68	0.91
	0—2(下层)	26.49	71.51	0.63	1.13

4 讨论与结论

4.1 讨 论

设置沙障可显著提高地表粗糙度，降低近地表风速。通过对野外实测数据的分析，得到研究区芦苇沙障风速廓线特征。结果显示，风速廓线很好地符合对数函数分布，芦苇沙障未改变风速廓线分布特征。杨伟超[31]研究了芦苇沙障对风速的减弱情况，发现10 cm高度处的防风作用高于20 cm高度处的防风作用。也有学者[32]研究发现近地表10 cm高度的防风作用最好，芦苇沙障的主要作用范围在10 cm高度内。本文芦苇沙障防风效能均小于前人研究的结果，这与铺设方式密切相关。平铺芦苇沙障属于透风式沙障，一部分气流穿过障体，使得防风效能降低，但防风效能随高度的增加逐渐减小的趋势一致，离地面越高芦苇沙障的防护作用逐步减弱，气流逐渐回归自然状态。通过计算芦苇沙障使地表粗糙度增加了3.47～3.79倍，有效降低近地表风速，抗风蚀能力增强，可见提高地表粗糙度是降低地表风蚀的有效措施。

风沙流活动主要集中在地表一定高度内，很大程度上受到下垫面类型、沙源丰富程度、沙粒粒径大小等因素的影响，输沙量垂直分布偏离拟合函数分布，使之发生变异。通过野外实测数据得知，芦苇沙障使总输沙量降低了93.05%，说明芦苇沙障对近地表风沙流起到了很好的拦截作用，但降低下层输沙量的同时增加了上层输沙量。刑恩德[33]通过研究发现输沙量随高度呈跳跃式分布，近地层输沙量减小，与本文研究结果相似。尹瑞平[34]认为在跃移中落下的沙粒和地面碰撞时，在很大的程度上是反弹多、飞溅少，沙粒在碰撞后反弹跳得更高和更远。铺设芦苇沙障后，近地表气流携沙能力下降，中沙含量减少，细沙被输送到更高的位置，造成上层输沙量无规则分布。

4.2 结 论

通过对库布齐沙漠200 MWp光伏电站内铺设芦苇沙障后风速变化和输沙状况的野外观测发现：

(1) 铺设芦苇沙障后，风速在各高度处均小于裸沙，风速廓线在半对数图上呈直线分布，拟合系数为0.99。摩阻风速为0.94～1.31 m/s，是裸沙的1.39～1.54倍，粗糙度为0.52～1.29 cm，相较于裸露沙表面提高3.47～3.79倍。防风作用最大值出现在20 cm高度处，为21.72%，且越接近地表风速削减作用越明显。

(2) 总输沙量裸沙〔0.451 5 g/(cm^2 · min)〕>芦苇沙障〔0.031 4 g/(cm^2 · min)〕，芦苇沙障内输沙量仅为裸沙的6.95%，铺设芦苇沙障的固沙效益为93.05%。芦苇沙障输沙量随高度呈幂函数分布，拟合系数为0.86。裸沙90%以上的输沙量集中于0—8 cm，而芦苇沙障0—8 cm输沙量占总输沙量的51.39%，90%以上的输沙量集中于0—26 cm。芦苇沙障主要组分有细沙和中沙构成，细沙含量为71.99%～78.76%，中沙含量为15.98%～25.74%，相较于裸沙，中沙含量减少，细沙含量增多。

铺设芦苇沙障后下垫面结构改变，有效降低了近地表风速，气流携沙能力下降，地表风蚀能力减弱，防风固沙效果显著，是光伏电站有效的风蚀防治措施。

[参 考 文 献]

[1] 崔晓东，王读双，蒋文龙. 利用太阳能光伏发电进行沙地林业综合开发的规划与实践[J]. 林业机械与木工设备，2018，46(2)：18-22，27.

[2] 常兆丰,王祺,刘世增,等. 沙漠戈壁光伏电场固沙效应初步研究:以甘肃河西走廊为例[J]. 中国水土保持,2018,39(8):18-22.

[3] 范修其,郑春明. 重点工程建设水土流失防护初探[J]. 浙江水利科技,2001,28(4):16-17.

[4] 陈曦,高永,翟波,等. 沙区光伏电场的风沙流输移特征[J]. 干旱区研究,2019,36(3):684-690.

[5] 袁方,张振师,卜崇峰,等. 毛乌素沙地光伏电站项目区风速流场及风蚀防治措施[J]. 中国沙漠,2016,36(2):287-294.

[6] 王治国,段喜明,李文银,等. 开发建设项目水土流失预测的若干问题讨论[J]. 中国水土保持,2000,21(4):38-40.

[7] 袁立敏,高永. PLA 沙障防风效益研究[J]. 内蒙古林业科技,2010,36(3):14-18,39.

[8] 张克存,屈建军,董治宝,俎瑞平,方海燕. 格状沙障内风速波动特征初步研究[J]. 干旱区研究,2006,23(1):93-97.

[9] 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.

[10] 丁录胜,程建军,陈柏羽,等. 铁路高立式芦苇沙障防风阻沙的现场测试与流场模拟计算[J]. 水土保持通报,2019,39(3):156-162.

[11] 王训明,陈广庭,韩致文,董治宝. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益分析[J]. 中国沙漠,1999,19(2):3-5.

[12] 马学喜,王海峰,李生宇,等. 两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比[J]. 水土保持通报,2015,35(3):344-349.

[13] 曲娜,杜敏,袁立敏,白文才,高石利,宝成,安顺林. 呼伦贝尔沙化风蚀坑生物工程治沙技术效果[J]. 内蒙古林业科技,2013,39(2):25-27,46.

[14] Wiggs G F S. Desert dune dynamics and the evaluation of shear velocity: An integrated approach [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1993, 72(1):37-46.

[15] Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the Southwest Kalahari Desert [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996,21(1):19-34.

[16] Sharratt B, Feng Guanglong. Friction velocity and aerodynamic roughness of conventional and undercutter tillage within the Columbia Plateau, USA [J]. Soil and Tillage Research, 2009,105(2):236-241.

[17] 周杰,雷加强,郑则浩,等. 塔里木盆地西南缘不同下垫面的摩阻风速和空气动力学粗糙度[J]. 水土保持通报,2016,36(1):1-5,10.

[18] Oke T R. Boundary layer climates [M]. London: Psychology Press, 1987.

[19] Ishizuka M, Mikami M, Yamada Y, et al. Threshold friction velocities of saltation sand particles for different soil moisture conditions in the Taklimakan desert [J]. Sola, 2009,5(5):184-187.

[20] Kang Liqiang, Guo Liejin, Gu Zhengmeng, et al. Wind tunnel experimental investigation of sand velocity in aeolian sand transport [J]. Geomorphology, 2008,97(3/4):438.

[21] 张正偲,董治宝. 腾格里沙漠东南部野外风沙流观测[J]. 中国沙漠,2013,33(4):973-980.

[22] 杨欢,李玉强,王旭洋,等. 半干旱区不同类型沙丘风沙流结构特征[J]. 中国沙漠,2018,38(6):1144-1152.

[23] 张剑挥,方峨天,杨自辉,等. 沙石质建筑垃圾不同覆盖方式防风固沙效益[J]. 中国沙漠,2016,36(5):1247-1251.

[24] 陈新闯,董智,李锦荣,等. 乌兰布和沙漠不同下垫面冬季沙尘通量[J]. 中国沙漠,2016,36(6):1527-1532.

[25] 刘芳,郝玉光,辛智鸣,等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1200-1207.

[26] 朱震达,吴正,刘恕. 中国沙漠概论[M]. 北京:科学出版社,1980:93-105.

[27] Williams G. Some aspects of the eolian saltation load [J]. Sedimentology, 1964,3(4):257-287.

[28] 李锦荣,郭建英,董智,等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同治理措施的风沙运移特征及其防护效果[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(8):113-119.

[29] 袁方. 西北风沙区光伏电站施工迹地工程措施的风蚀防治效益及其机理研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.

[30] 毛东雷,雷加强,王翠,等. 新疆策勒县沙漠绿洲过渡带风沙流结构及输沙粒度特征[J]. 水土保持通报,2015,35(1):25-33.

[31] 杨伟超. 生态修复中不同类型沙障防风固沙效应研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2017.

[32] 王文彪,党晓宏,张吉树,等. 库布齐沙漠北缘不同作物秸秆平铺式沙障的防风效能[J]. 中国沙漠,2013,33(1):65-71.

[33] 邢恩德,马少薇,郭建英,等. 植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J]. 水土保持研究,2015,22(6):331-334.

[34] 尹瑞平,郭建英,董智,等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸不同高度典型沙丘风沙特征[J]. 水土保持研究,2017,24(5):157-161.