黄土丘陵区露天煤矿排土场不同措施对土壤风蚀的影响

刘继业[1,2], 刘 静[1,2], 邢恩德[1,2], 珊 丹[1,2], 冯 秀[1,2]

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: [目的]研究矿区排土场不同配置防护措施对近地层风沙活动规律的影响,为科学制定矿区排土场风沙危害防治技术方案提供理论依据。[方法]以鄂尔多斯市准格尔旗乌兰哈达露天煤矿排土场为对象,通过风洞模拟的方法,系统分析了3种防护措施不同规格及不同覆盖度的风速及输沙率,并对比分析了3种防护措施防风效能、空气动力学粗糙度、输沙率等。[结果]不同措施内的风速廓线均符合对数函数分布形式,防风作用在0—20 cm高度范围内有效削弱风速;随着规格的增加,粗糙度增量减少,防风效果也逐渐降低;50 cm高度后,防风效能迅速衰减。相同规格下,沙柳沙障防风效果好于聚乳酸纤维(PLA)沙障,0.5 m×0.5 m规格的防风效果最好;而植物措施随着覆盖率的增加,防风效能逐渐增高。输沙率随高度的变化均符合三参数指数模型分布形式,且相关性系数(R^2)在4种函数模型中最高。综合风速与防护措施规格,阻沙效果最好者为植物措施,其次为PLA沙障,再次为沙柳沙障。[结论]输沙率随高度的变化规律均符合三参数指数模型分布形式,阻沙效果最好者为植物措施,防风效能与阻沙效能均随植被覆盖度的提高和沙障密度的增加而增大。

关键词: 沙障; 植被盖度; 风洞; 风蚀; 风速廓线; 输沙率

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0072-13 **中图分类号:** S157

文献参数: 刘继业, 刘静, 邢恩德, 等.黄土丘陵区露天煤矿排土场不同措施对土壤风蚀的影响[J].水土保持通报,2026,46(4):72-84. Liu Jiye, Liu Jing, Xing Ende, et al. Influence of different measures on soil wind erosion at spoil dump of open-pit coal mine in loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(4):72-84.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.001 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.001**

Influence of different measures on soil wind erosion at spoil dump of open-pit coal mine in loess hilly region

Liu Jiye[1,2], Liu Jing[1,2], Xing Ende[1,2], Shan Dan[1,2], Feng Xiu[1,2]

(1.*Inner Mongolia North Slope of Yinshan Grassland Ecological Hydrology National Field Scientific Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*; 2.*Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*)

Abstract: [Objective] The influences of different protective measures in a spoil dump of the mining area on the wind and sand activity patterns in the near-surface layer were investigated in order to provide a theoretical basis for the scientific formulation of the technical scheme for the prevention and control of wind-sand hazards in the mining area dump. [Methods] Taking the spoil dump of the Wulanhada open-pit coal mine in Jungar Banner, Ordos City, as the study area, wind tunnel simulation was used to systematically measure wind speed and sediment transport rate under three protective measures of different specifications and coverage levels. Their wind protection

收稿日期:2025-12-02 **修回日期:**2026-01-19 **采用日期:**2026-01-21

资助项目:内蒙古自治区科技成果转化引导项目"黄土丘陵区工矿废弃地生态修复及水土流失固阻技术研究与示范项目"(2022YFHH0125); 内蒙古自治区科技计划项目(2025YFHH0153); 内蒙古自治区水利科技项目"黄河流域覆沙丘陵区小流域水土保持生态治理提质增效技术集成与示范"(202501010303A)

第一作者:刘继业(2001—),男(汉族),内蒙古自治区乌兰察布市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email:1428615217@qq.com。

通信作者:邢恩德(1974—),男(汉族),吉林省扶余市人,硕士,正高级工程师,主要从事草地生态修复与水土保持工作。Email:mksxnd@126.com。

efficiency, aerodynamic roughness, and sediment transport rate were compared and analyzed. [Results] Wind speed profiles under different measures followed a logarithmic distribution, and wind speed was effectively weakened by wind protection within the height range of 0—20 cm. As the specification increased, the roughness increment decreased, and the wind protection effect gradually weakened. Above 50 cm, wind protection efficiency declined rapidly. Under the same specification, the wind protection effect of *Salix psammophila* sand barriers was better than that of polylactic acid (PLA) sand barriers, and the 0.5 m×0.5 m specification performed best. For plant measures, wind protection efficiency gradually increased with increasing vegetation coverage. The variation of sediment transport rate with height followed a three-parameter exponential model, and its correlation coefficient (R^2) was the highest among the four function models. Considering both wind speed and protecting measure specification, the best sand-blocking effect was achieved by plant measures, followed by PLA sand barriers and *S. psammophila* sand barriers. [Conclusion] The variation patterns of sediment transport rate with height follow a three-parameter exponential model. The plant measures show the best sand-blocking effect, and both wind protection efficiency and sand-blocking efficiency increase with higher vegetation coverage and denser specifications of different materials.

Keywords: sand barrier; vegetation coverage; wind tunnel; wind erosion; wind speed profile; sediment transport rate

能源是工业发展与国民经济的命脉,其重要性不言而喻。长期以来,中国国民经济的蓬勃发展始终与矿业的进步紧密相连。煤炭为地区经济带来高速发展的同时,一系列严峻的生态问题接踵而至[1]。露天煤矿开采过程中破坏土地资源、动植物生存环境、空气污染问题突出,对自然生态造成严重影响,矿区生态修复也逐渐成为中国生态环境的重要部分[2-3]。开采过程中形成的排土场,在堆积过程中,破坏了原有土地的地表形态,不仅如此,该结构土壤理化性质较差,肥力贫瘠,其中含有重金属等有害物质,极有可能渗透土壤及水资源,对环境造成不可估量的危害[4-5]。严重制约区域生态安全与可持续发展。因此,矿山的生态修复刻不容缓[6-7]。

内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗乌兰哈达露天煤矿区具有典型的黄土丘陵地貌特征,由于开采规模大,扰动程度深,加之该区域特殊的地貌和土质,全年多大风天气,致使排土场土壤风蚀问题突出,对生态修复工作产生了不利影响。鉴于目前只能通过布设防护措施改变地表微地形来增加粗糙度,以抑制风蚀的发生和加剧[8-9]。

植物措施和工程措施在防风固沙中被广泛应用,能够有效降低地表风速,起到防风阻沙效果,从而促进不同区域生态修复[10]。丛龙宇等[11]在草原矿区排土场对不同规格树枝沙障内风速进行观测,结果显示0.5 m×0.5 m树枝沙障防风效益最好,可有效改善近地表土壤风蚀情况;王茂林等[12]通过风洞模拟试验研究双排尼龙网与草方格沙障,研究表明输沙率随高度增加呈指数递减,且输沙率总量70%～80%均分布在近地表的高度内,当没有沙障时,近地表输沙更为集中达到90%,沙障显著抑制了近地表的输沙。白子怡等[13]在野外进行移动式风洞试验,系统研究了沙打旺、羊草群落在不同盖度下的风速廓线变化特征,均符合对数函数的分布规律,植被的构型包括侧盖度、盖度和高度以及植被的布局也分别影响风速廓线。蒙仲举等[14]在毛乌素沙地开展试验,通过对比不同规格沙柳沙障,发现沙障规格增大与障内输沙率呈正相关,而地表粗糙度则与沙障规格呈负相关。党晓宏等[15]通过对比1 m×1 m,2 m×2 m,3 m×3 m规格的聚乳酸纤维(PLA)沙障,发现PLA沙障对近地表粗糙度、风速大小和风沙流结构均有抑制效果,铺设沙障后地表粗糙度增大,近地表风速降低,沙丘不同部位近地表风沙流结构也发生不同程度的改变。尽管近年来各区域对机械沙障和植被的防风阻沙效应研究取得了显著进展[16],但在黄土丘陵区露天煤矿排土场的土壤风蚀问题上,相关研究仍显不足。

本文旨在通过风洞模拟试验,阐明不同防护措施对近地表风沙流的作用机制,从而为该矿区优选防风固沙配置方案。研究成果不仅可为当地生态修复提供直接依据,也可为黄土高原类似矿区的风蚀治理与生态恢复提供科学范式,并对接黄河流域系统治理、北方防沙带建设与“双碳”目标等国家重大战略需求,兼具生态与实践意义。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

采样地位于乌兰哈达露天煤矿排土场东部,该矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗境内,地

理坐标为东经:110°15′20″,北纬:39°42′21″。属于半干旱高原大陆性气候,气候昼夜温差较大,年均气温6.5 ℃。降水多集中在7—9月。区内多风,主要集中在4—5月及10—11月,平均风速2.3 m/s,最大风速20 m/s,在春季极易形成沙尘暴。矿区地势总体呈西高东低,地貌为高原侵蚀性丘陵地貌,土壤为栗钙土。局部地区还分布有风沙土和草甸土,土壤层厚度0.3～2.0 m。排土场平台人工植被主要为羊草(*Leymus chinensis*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、黄花草木樨(*Melilotus officinalis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设备

本研究所有风洞试验均在中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站完成。该风洞洞体、供电系统和观测室2015年建成,风速监测系统2019年安装。风洞为直流正压吹气式,由动力段、整流段、试验段和扩散段四部分组成,风洞总长29 m,试验段长12.6 m,宽2.5 m,高1.8 m。风速范围2～30 m/s连续可调。风洞的雷诺数R_e=10^5～10^6,气流处于完全湍流状态,可达到模拟要求,边界层的厚度为20 cm左右。洞体试验段内安装有可移动二维风速仪,风速数据采集器为DataTaker DT80采集器,并通过网桥技术将数据传输至观测室电脑。

1.2.2 试验设计

试验于2024年9月进行,进行风洞试验前,由于取到的土样经过雨季,土壤已经板结,形成不同规格的块状,因此将采集到的排土场覆土土样剔除大石块、杂草及植物根系等杂质,然后对土壤进行碾碎处理,使土样更符合矿区覆土情况。矿区排土场平台经过生态修复,受人工植被影响,不同高度风速存在差异。为使测定结果更加接近野外观测实际值,在风洞整流段后设置粗糙元,将风洞试验过程中风速廓线调整到与矿区排土场平台野外试验区测定的风速廓线相近似的垂直分布形式。

风洞试验中,各个措施均遵循几何相似准则,沙障不同规格的依据主要来自孙中峰[17],蒙仲举等[14]对沙障配置深入研究的结果。植被模型则根据植被调查结果,以野外典型的柠条及羊草作为原型,选用仿真植物模型作为试验材料,通过调节枝角和修剪枝叶的方式,模拟野外植物的空间构型及孔隙度。模型大小为实际植株的五分之一,模型的主干和枝条用塑料包裹的铁丝制成,细枝和叶用塑料材质,以确保其在不同风速下能够模拟实际植株随风摆动的特性。布置方式采用模仿野外随机布置,并分别按照覆盖度15%,30%,45%,60%进行布置。

在风洞实验室试验段内放置50层梯度集沙仪,鉴于集沙仪在40 cm以上高度未收集到沙物质,本次试验仅收集并分析了0—40 cm高度的沙样。集沙仪每层进沙口尺寸为2 cm×2 cm,单个进沙口面积为4 cm^2。风速仪则并列于集沙仪旁边,保证其风速不被集沙仪所影响,风速仪分别在距地高度为0.2 m,0.5 m,0.75 m,1 m 4个高度进行风速检测。二维风速传感器监测间隔为每秒一次,DataTaker DT80数据采集器则每10 s记录一次均值,风洞内铺设土层,长为2.6 m,厚度为6 cm,各措施分布范围与土层相同。分别在不同风速(7,10,13,16 m/s)下进行吹蚀,单次吹蚀时间设置为20 min。每次试验结束后,将集沙盒收集的风蚀物用精度为0.001 g的电子天平进行称重。不同类型、规格沙障及植物模型的具体参数见表1及表2。

表1 风洞试验中不同沙障配置参数

Table 1 Configuration parameters of sand barriers with different specifications in wind tunnel test

沙障材料	沙障规格	障高/cm
沙柳沙障(SL)	0.5 m×0.5 m	25
	1.0 m×1.0 m	25
	1.5 m×1.5 m	25
PLA沙障	0.5 m×0.5 m	5
	1.0 m×1.0 m	5
	1.5 m×1.5 m	5
对 照		

1.2.3 数据处理及计算

(1)风速廓线方程。风速廓线的定义为近地表自然风速在垂直方向上的分布特征,即风速随高度的分布曲线。可用普朗特-冯·卡门对数分布律描述风速廓线方程:

$$U_h = U^*/K \times \ln(h/Z_0) \quad (1)$$

(2)空气动力学粗糙度的确定。本研究采用普朗特-冯·卡门的风速对数分布规律描述风速廓线,方程为:

$$U_z = \frac{U^*}{K}\ln\frac{Z}{Z_0} \quad (2)$$

式中:U_z代表Z高度的平均风速(m/s);U^*代表摩阻风速(m/s);Z为风速廓线上某点距地面的垂直高度(cm);Z_0为空气动力学粗糙度(cm);K为卡门常数,取值0.4。

研究采用最小二乘回归得到风速廓线拟合公式。将观测点处不同高度处的风速进行模拟风速廓

线方程,进而测得观测样地的粗糙度。公式如下:

$$V_h = a + b\ln(h) \quad (3)$$

式中:a, b 均为回归系数; V_h 为 h 高度处的风速(m/s)。令 V_h=0 可求出地面粗糙度(cm)。

$$h_0 = \exp(-a/b) \quad (4)$$

由公式(2)和(3)计算可得摩阻风速计算方程:

$$U_* = Kb \quad (5)$$

(3)输沙率。

$$Q = \sum_1^n \left(\frac{q_n}{A\triangle t} \right) \quad (6)$$

式中:Q 为输沙率〔g/(cm^2·min)〕; $\triangle t$ 为观测总时长(min); A 为进沙口截面积(cm^2); q_n 为第 n 层集沙盒内收集的输沙量(g),n=1,2…20。

(4)输沙通量拟合函数模型。本研究选取以下 4 种函数模型:双/三参数指数模型、双参数幂函数及其修正函数模型,对露天煤矿排土场近地表风沙流通量展开拟合分析:

$$q(h) = ae^{-h/b} \quad (7)$$

$$q(h) = c + ae^{-h/b} \quad (8)$$

$$q(h) = ah^b \quad (9)$$

$$q(h) = a(1+h)^b \quad (10)$$

式中:q 为输沙率〔g/(cm^2·min)〕; h 为高度(cm),具体指集沙仪进沙口距离地表高度平均值; a, b 和 c 为模型拟合系数。

(5)防风效能计算。

$$E = \frac{V_{ck} - V_s}{V_{ck}} \times 100\% \quad (11)$$

式中:E 为植物措施与工程措施的防风效果(%); V_{ck}, V_s 分别代表同一高度层裸地与措施内的平均风速(m/s):

(6)阻沙效果计算。

$$D = \frac{Q_{ck} - Q_s}{Q_{ck}} \times 100\% \quad (12)$$

式中:D 为研究区域内的阻沙效果(%); Q_{ck} 与 Q_s 分别代表裸地与措施样地的输沙率〔g/(cm^2·min)〕。

2　结果与分析

2.1　不同措施近地表风速变化特征

2.1.1　不同措施风速廓线变化特征

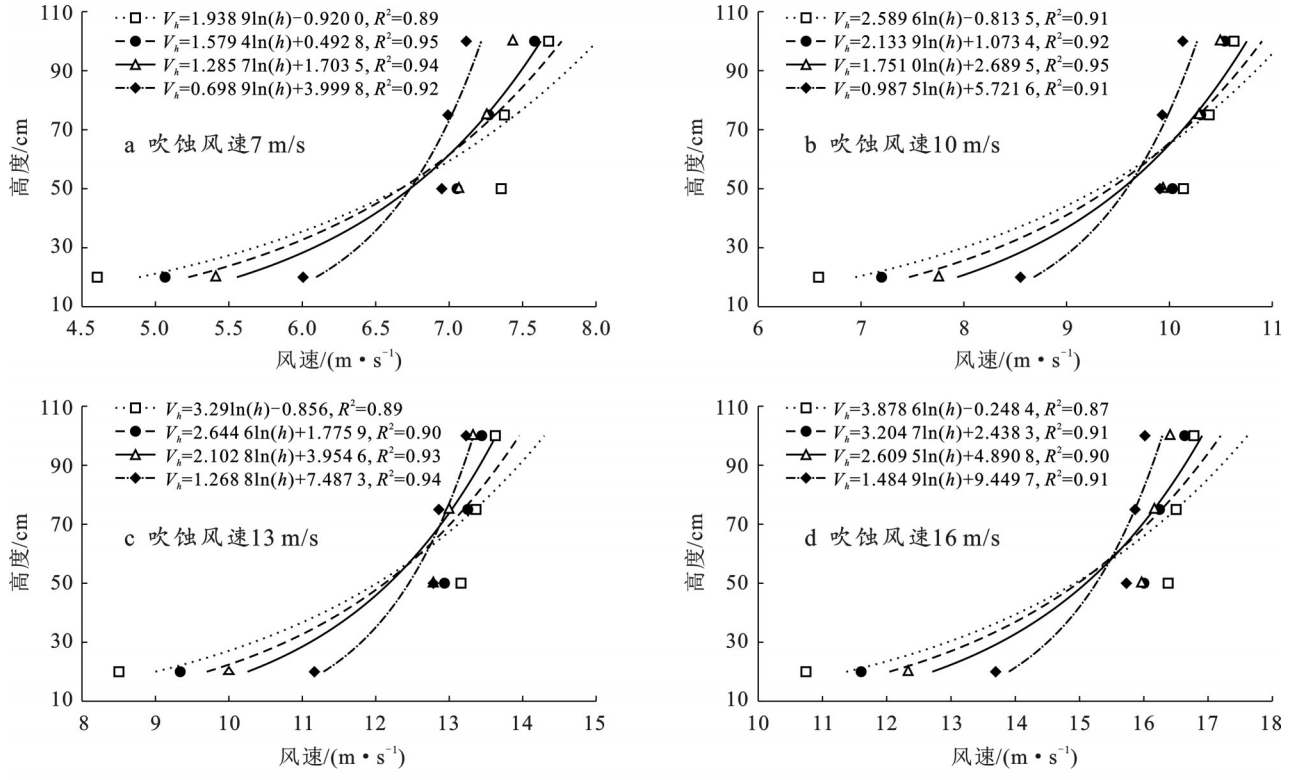
风速廓线揭示了近地表气流在垂直方向上,随高度提升而呈现出的变化规律。图 1—3 为风洞模拟试验中,在不同吹蚀风速下,10 种不同配置措施:工程措施与植物措施和裸地的风速廓线。由图 1 可知,障内风速随着垂向高度的增加而增大,且不同距地高度处风速的增幅存在差异,具体来说,当到达一定高度时,风速差异不大。研究发现 0—50 cm 距地高度范围内风速的增幅要小于 50—100 cm 的增幅,这种变化规律不随指示风速的变化而变化。并且受措施的影响,过境气流受到抬升,在措施上方形成一个加速区,50 cm 及以上高度观测风速与 CK 对照风速均值相比均有上升的趋势。50 cm 以下风速与 CK 对照相比均出现降低趋势。由此可见,不同措施的影响范围对措施自身以下高度即 25 cm 以下影响较大。

如图 1—2 所示,CK 的风速廓线呈现出明显的“J”字形变化特征,受不同措施配置影响,不同规格沙障内的风速廓线存在差异:距地 20 cm 高度处,各规格沙障内的风速均小于裸地,且沙柳沙障障内风速与裸地的风速差异越大,而 PLA 相比沙柳沙障障内风速与裸地差异较小;距地 50 cm 高度处,两种沙障障内风速与裸地均无明显差异,但整体 PLA 沙障差异更小;而在距地 75 cm,100 cm 高度处,沙障内的风速相较于 50 cm 高度存在差异,均大于裸地,且沙障配置越密集沙障内的风速与裸地的风速差异越大。由此可得,同等规格下,沙柳沙障防风效果好于 PLA 沙障,且主要防风高度范围均在沙障高度以下,即防风高度范围在 0—20 cm。

不同规格、不同类型沙障以及不同覆盖率植被内的风速廓线存在差异(图 1—3)。距地 20 cm 高度处,各沙障及植被内的风速均小于裸地,且规格越密的植被覆盖率越高,不同配置沙障内的风速与裸地的风速差异越大,规格越稀疏,沙障内的风速与裸地的风速差异越小;距地 50 cm 高度处,除规格为 1.5 mPLA 沙障外,其余配置沙障内的风速均小于裸地,规格越小,覆盖率越高,不同配置沙障内的风速与裸地的风速差异越大,规格越小,覆盖率越低,差异越小(图 3);距地 75,100 cm 高度处,各沙障内的风速均大于等于裸地,规格越密,植被覆盖率越高,不同配置措施内的风速与裸地的风速差异越大,规格越大,植被覆盖率越低,差异越小。由上可得,相同种类沙障中,规格更加密集的沙障防风效果更好。总体来说,除规格为 1.5 mPLA 沙障外,其他规格不同类型沙障对 50 cm 以下高度处的风速均有一定减弱作用。

2.1.2　不同防护措施粗糙度

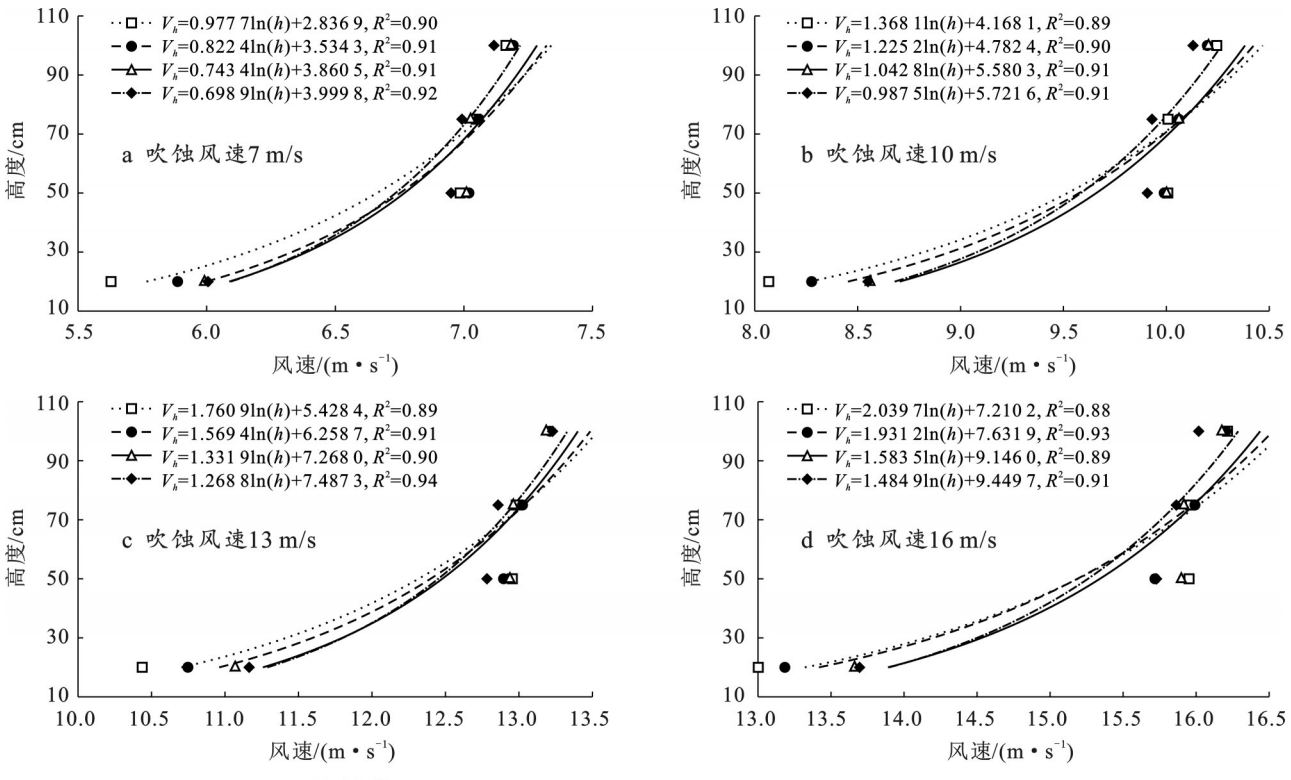
不同规格的生态修复措施重塑了地表微地形,形成的改变可通过粗糙度参数定量表征[18-19]。空气动力学粗糙度(cm)定义为风速廓线至零风速时对应的高度。其数值直接反映下垫面对气流的阻滞效应。生态修复措施通过调控地表粗糙度实现防风固沙效果,因此该参数成为评估措施成效(包括风速调控和风蚀抑制效果)的关键指标。



注:图中SL为沙柳沙障;CK为对照。下同。

图1 沙柳沙障规格对风速廓线的影响

Fig.1 Influence of *Salix psammophila* sand barrier specifications on wind speed profile



注:PLA为聚乳酸纤维沙障。下同。

图2 PLA沙障规格对风速廓线的影响

Fig.2 Influence of PLA sand barrier specifications on wind speed profile

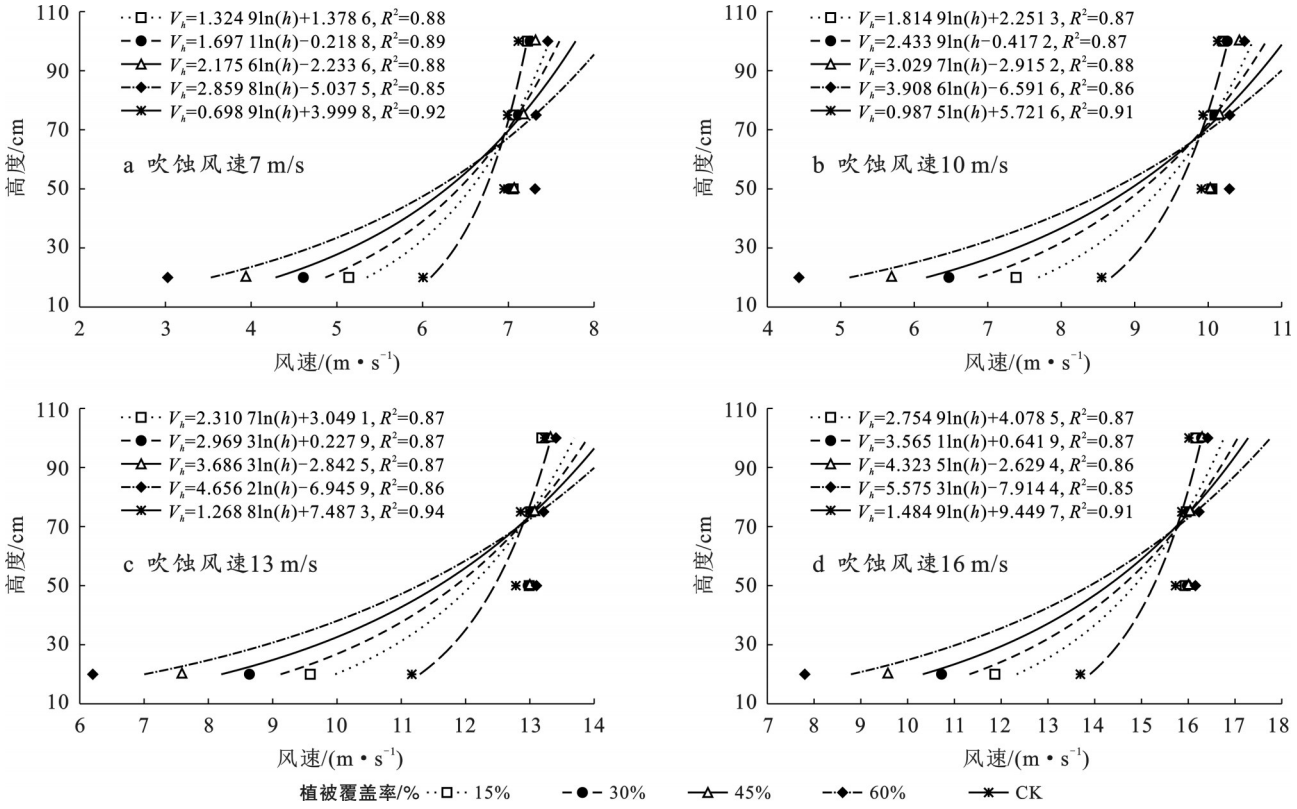


图 3　植被覆盖率对风速廓线的影响

Fig.3　Influence of vegetation coverage on wind speed profile

本研究利用Origin 2024将对数函数对风速廓线进行拟合,回归系数R^2在0.85～0.95范围内,均值也达到0.90,有较好的拟合度,不同措施均有效提高了治理区的粗糙度,其中植物措施因更高的覆盖率提升效果更明显。通过公式(1)、公式(2)计算出裸地与10种配置措施内的粗糙度。

表2为在不同风速梯度下不同规格措施的风速廓线回归方程及空气动力学粗糙度和摩阻风速。7,10,13,16 m/s风速下裸地样地的粗糙度分别为0.003,0.003,0.003,0.002 cm。各风速下防护措施内粗糙度分别在0.006～5.821 cm,0.005～5.400 cm,0.004～4.444 cm,0.003～4.135 cm范围内,对比不同规格措施可以发现,在4种风速梯度下空气动力学粗糙度表现为60%植被>45%植被>0.5 m×0.5 m沙柳>30%植被>1.0 m×1.0 m沙柳>0.5 m×0.5 m PLA>15%植被>1.5 m×1.5 m沙柳>1.0 m×1.0 m PLA>1.5 m×1.5 mPLA>裸地CK。障内粗糙度远大于裸地CK,是裸地CK的1.802～1 940倍,其中随风速的增加裸地与不同措施样地的粗糙度变化趋势整体呈现负相关。对比不同材料沙障可以发现,在不同风速梯度下,相同规格的沙柳沙障空气动力学粗糙度大于PLA沙障。

2.2　防风效果变化特征

通过有防护措施与CK的风速进行比较,来判断该措施下防风效能的大小,防风效能数值越大,其对风的削弱能力越强。不同防护措施对控制地表风速均起到了积极作用。由图1可知,防护措施对风的主要阻滞区在距地0—20 cm处,所以分析防风效果时以距地20 cm高度处为分析重点。

利用公式(5)计算防风效果(如图4所示),10种配置措施的防风效果在0.119%～49.601%之间。其中沙柳沙障的防风效果在9.287%～23.836%之间,以20 cm高度为基准,规格由1.5 m×1.5 m减小到1.0 m×1.0 m时,防风效果平均增大59.70%,规格由1.0 m×1.0 m减小到0.5 m×0.5 m时,防风效果平均增大45.31%,不同规格的防风效果存在显著差异(p<0.05)。PLA沙障的防风效果在0.119%～6.512%之间,以20 cm高度为基准,规格由1.5 m×1.5 m减小到1.0 m×1.0 m时,防风效果平均由0.360%增加到3.156%,规格由1.0 m×1.0 m减小到0.5 m×0.5 m时,防风效果平均由3.156%增加到5.872%,不同规格的防风效果存在显著差异。

而植物措施的防风效果在12.70%～49.60%之间,以20 cm高度为基准,植被覆盖率由15%增加到

30%时，不同风速下，沙障的防风效果平均由13.72%增加到22.82%，平均增大66.48%，沙障的规格由30%覆盖率增加到45%覆盖率时，不同风速下，沙障的防风效果平均由22.82%增加到32.35%，平均增大41.76%，规格由45%覆盖率增加到60%覆盖率时，不同风速下，防风效果平均由32.35%增加到46.21%，平均增大42.84%。不同规格沙障的防风效果存在差异。

表2 不同规格措施在不同风速下的粗糙度和摩阻风速

Table 2 Roughness and friction velocity of different specification measures under different wind speeds

措施编号	7/(m·s^{-1})		10/(m·s^{-1})		13/(m·s^{-1})		16/(m·s^{-1})	
	粗糙度/cm	摩阻风速/(m·s^{-1})	粗糙度/cm	摩阻风速/(m·s^{-1})	粗糙度/cm	摩阻风速/(m·s^{-1})	粗糙度/cm	摩阻风速/(m·s^{-1})
CK	0.003	0.280	0.003	0.395	0.003	0.508	0.002	0.594
0.5 m SL	1.607	0.776	1.369	1.036	1.297	1.316	1.066	1.551
1.0 m SL	0.732	0.632	0.605	0.854	0.511	1.058	0.467	1.282
1.5 m SL	0.266	0.514	0.215	0.700	0.152	0.841	0.153	1.044
0.5 m PLA	0.055	0.391	0.048	0.547	0.046	0.704	0.029	0.816
1.0 m PLA	0.026	0.329	0.020	0.490	0.019	0.628	0.019	0.772
1.5 m PLA	0.006	0.297	0.005	0.417	0.004	0.533	0.003	0.633
15%ZB	0.353	0.530	0.289	0.726	0.267	0.924	0.228	1.102
30%ZB	1.138	0.679	1.187	0.974	0.926	1.188	0.835	1.426
45%ZB	2.791	0.870	2.617	1.212	2.162	1.475	1.837	1.729
60%ZB	5.821	1.144	5.400	1.563	4.445	1.862	4.135	2.230

注：ZB为植被覆盖率。下同。

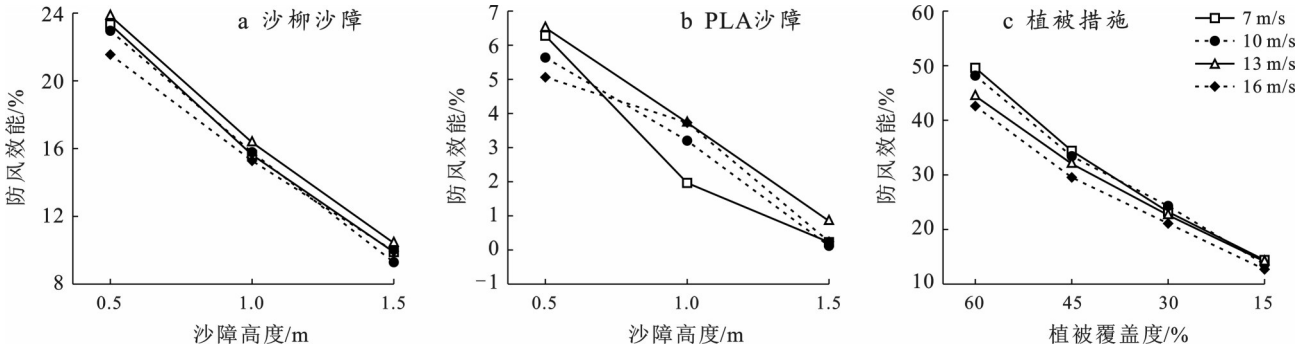
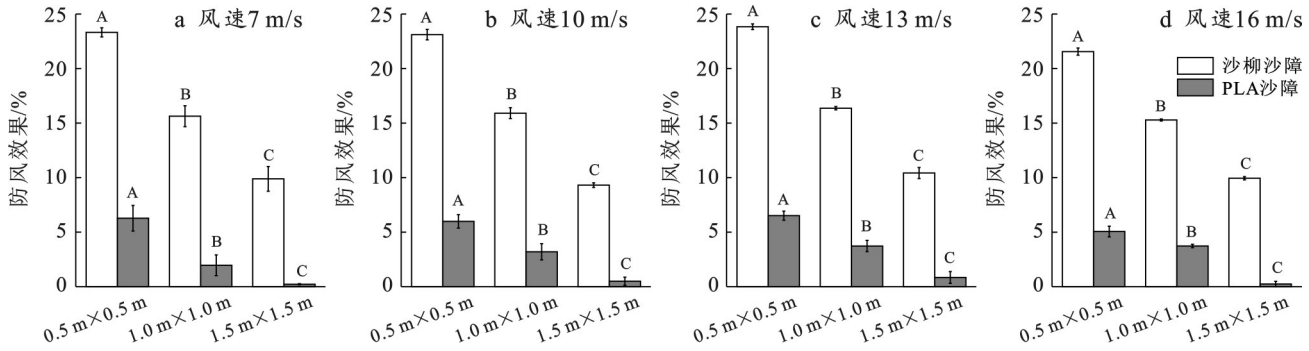


图4 不同措施防风效果随规格的变化特征

Fig.4 Variation characteristics of wind protection effect of different measures with specifications

图5为在不同风速梯度下，不同类型同规格沙障的防风效果，不同沙障的防风效能随风速的变化表现出不同的变化特征。各风速下，沙柳沙障防风效果均好于PLA沙障，且沙柳沙障的防风效能均表现为各风速下同规格差异较显著($p<0.05$)。防风效果最大值出现在规格为0.5 m×0.5 m，风速为13 m/s和7 m/s时，分别为23.836%和23.322%；最小值出现在沙障规格为1.5 m×1.5 m，风速为10 m/s和7 m/s时，分别为9.287%和9.888%；PLA沙障在不同风速下同规格均表现差异较大，且防风效果并没有类似于沙柳沙障随风速增加而递减的规律，而是均在13 m/s时达到最大值，分别为6.512%，3.731%和0.848%；最小值出现在沙障规格为1.5 m×1.5 m，风速为10 m/s和7 m/s时，防风效果分别为0.228%和0.119%。总体上看，沙柳沙障表现出随风速增加防风效果减小的趋势。PLA沙障则总体也表现为随风速增加防风效果反而减小的趋势，且差距较大。而3种不同防风措施对比，无论是在哪种风速条件下，30%覆盖率及以上的植被措施防风效果均高于所有规格的沙柳沙障及PLA沙障；而在同规格下沙柳沙障防风效果均高于PLA沙障，且差距较大。

以上分析了指示风速为7，10，13，16 m/s时，不同规格不同类型措施的防风效果及变化规律。结果显示，不同措施防风效果随密度的增加其防护效果有增加趋势，随风速的增加防护效果呈减小趋势，其中，植物措施防风效果较沙柳沙障和PLA沙障的防风效果最为明显，PLA沙障总体防风效果一般，且随密度增大防护效果提升并不明显。



注:不同大写字母表示同类型沙障不同规格措施差异显著($p<0.05$)。

图 5　不同风速下不同类型同规格沙障的防风效能变化特征

Fig.5　Variation characteristics of wind protection efficiency of different types of sand barriers with same specifications under different wind speeds

2.3　不同防护措施对输沙率的影响

图 6—8 为在不同指示风速下 10 种配置沙障的总输沙率。各风速下裸地的总输沙率分别为 0.083,0.451,1.137,1.932 g/(cm²·min),随风速增大呈增加趋势(图 8);不同规格措施的总输沙率范围分别在 0.003～0.045,0.010～0.073,0.019～0.138,0.27～0.378,0.012～0.199,0.030～0.549,0.040～1.015,0.007～0.117,0.031～0.609,0.092～1.828 g/(cm²·min),随着风速提升,裸地与各措施样地的总输沙率均上升。方差分析显示:在 7～16 m/s 风速范围内,裸地与沙障样地的输沙量差异显著($p<0.05$)。这表明沙障具有明显的阻沙效应。不同配置沙障对 40 cm 高度内总输沙率的抑制效果存在显著差异($p<0.05$)。本研究通过输沙率降低幅度来量化其阻沙效果。

如图 7 所示,沙柳沙障的输沙率随沙障规格增大呈显著增加趋势。在风速 7 m/s 条件下,0.5 m×0.5 m SL 的输沙率为 0.012 g/(cm²·min),1.0 m×1.0 m SL 和 1.5 m×1.5 m SL 分别升至 0.030,0.040 g/(cm²·min),增幅达 33.3% 和 66.7%(图 7)。这表明沙障规格密集程度的提升可有效削弱近地表风速,抑制沙粒起动。然而,当风速超过 13 m/s 时,输沙率降幅趋于平缓。例如,1.5 m×1.5 m SL 在 16 m/s 时的输沙率为 1.015 g/(cm²·min),较对照(CK)的 1.932 g/(cm²·min)仍降低 47.464%,但其防护效率较中低风速区间的 70%～80% 有所下降(图 8)。这可能与高风速条件下湍流强度增强导致沙障间局部风蚀加剧有关。PLA 沙障的输沙率变化则是在 7～10 m/s 风速范围内,0.5 m×0.5 m PLA 至 1.5 m×1.5 m PLA 的输沙率由 0.153 g/(cm²·min)降至 0.007 g/(cm²·min),降幅达 95.425%(图 8)。此外,PLA 沙障在同等密度下的输沙率普遍低于沙柳沙障,如 0.5 m×0.5 m PLA 在 10 m/s 时的输沙率仅为 0.026 g/(cm²·min),而 0.5 m×0.5 m SL 为 0.47 g/(cm²·min)。

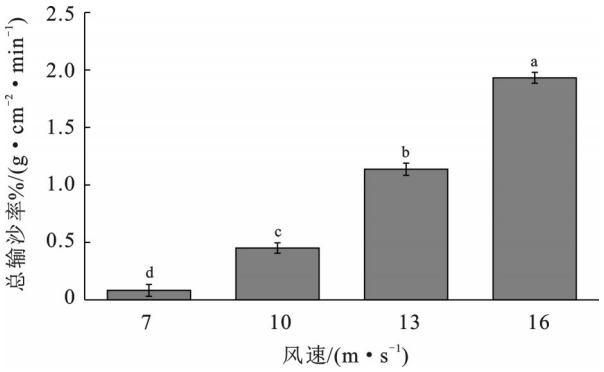


图 6　不同风速下裸地的总输沙率的变化

Fig.6　Variation of total sediment transport rate of bare land under different wind speeds

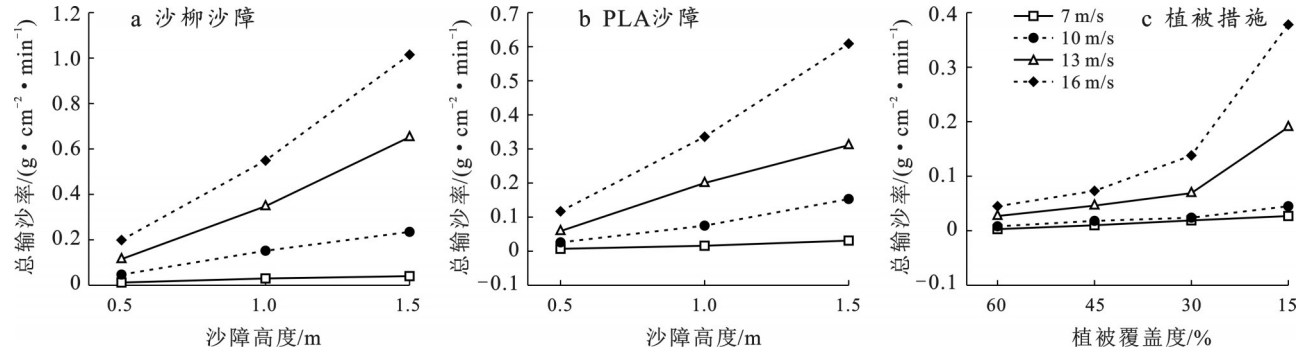


图 7　总输沙率随不同规格措施的变化

Fig.7　Variation of total sediment transport rate with measures of different specifications

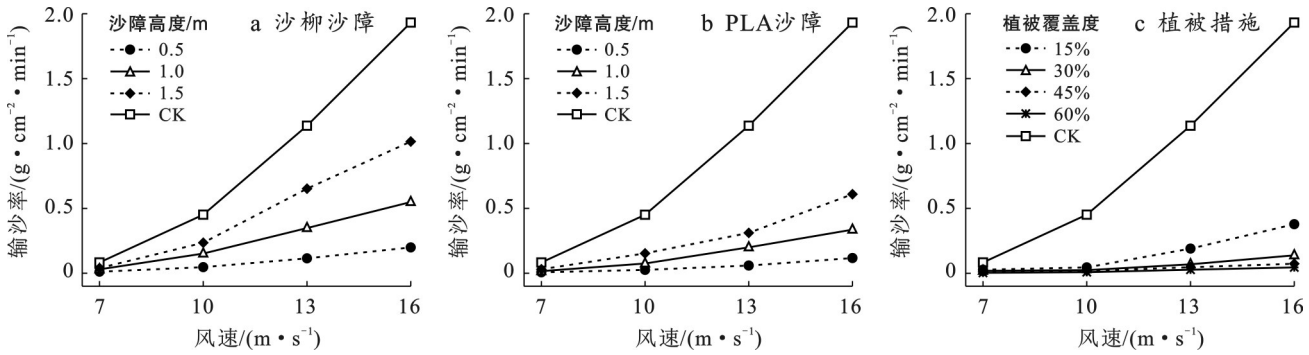


图8 总输沙率在不同风速梯度下的变化

Fig.8 Variation of total sediment transport rate under different wind speed gradients

植被覆盖率对输沙率的抑制效果显著。当覆盖率低于30%时(15%ZB,30%ZB),输沙率随风速增加呈指数增长。然而,当覆盖率提升至45%以上(45%ZB,60%ZB),输沙率显著降低,60%ZB在16 m/s时的输沙率仅为0.045 g/(cm²·min),较15%ZB降低88.095%(图8)。进一步分析表明,植被覆盖率每增加15%,输沙率平均下降28%~35%,但这一效应在覆盖率超过45%后趋于饱和。

2.4 不同防护措施输沙通量模型

为研究输沙率随高度的变化规律,通过Origin 2024软件绘制散点图(图9),并运用4种函数模型(双/三参数指数模型〔$q(h)=ae^{-h/b}$/$q(h)=c+ae^{-h/b}$〕、双参数幂函数〔$q(h)=ah^b$〕及其修正函数模型〔$q(h)=a(1+h)^b$〕对10种防护措施及对照样地(CK)在4种风速条件下40 cm高度范围内的风沙流结构进行拟合,以确定最优风沙输移模型并揭示输沙率垂直分布特征。关于模型模拟效果一般采用拟合相关度R^2来判别(表3)。

表3 4种函数模型输沙率拟合结果对比

Table 3 Comparison of fitting results of sediment transport rate of four function models

序号	拟合模型	拟合失败数/拟合次数	R^2
1	$q(h)=ae^{-h/b}$	0/44	0.946~0.999
2	$q(h)=c+ae^{-h/b}$	0/44	0.946~0.999
3	$q(h)=ah^b$	1/44	0.808~0.989
4	$q(h)=a(1+h)^b$	0/44	0.827~0.995

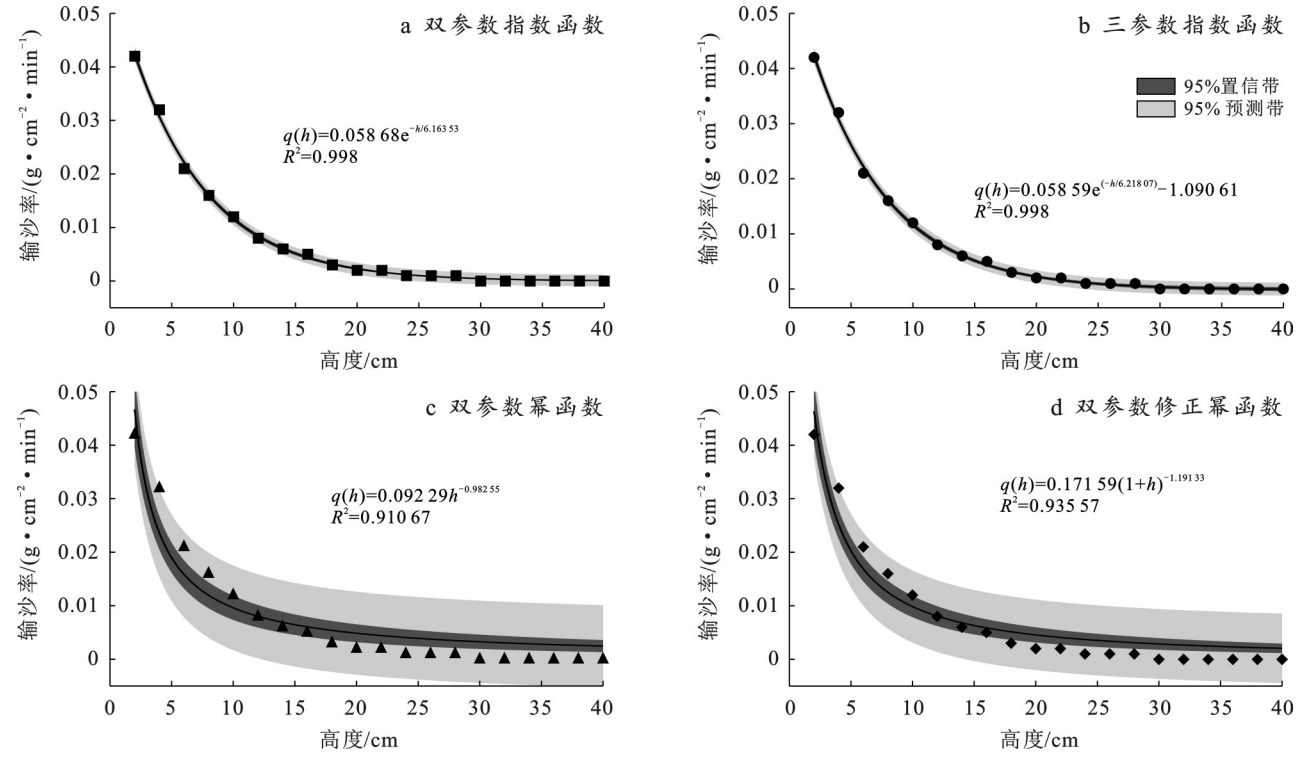


图9 不同规格措施内风沙流结构的4种函数拟合

Fig.9 Four types of function fitting of wind-sand flow structure under measures of different specifications

拟合效果通过R^2值来衡量,越接近1,拟合效果越优。拟合结果为,双参数及三参数指数模型的拟合效果较好,其R^2值更大,平均拟合R^2分别为0.980,0.985。从拟合相关度R^2来看,有超过80%的情况为三参数指数模型的拟合结果优于双参数指数函数模型,且这种差异非常小,常表现在小数点后千分位量级上,仅有11.36%的三参数指数模型与双参数指数函数模型差异大于0.01。而双参数幂函数及双参数修正幂函数模型平均R^2则分别为0.919,0.939,整体均为双参数修正幂函数模型拟合效果较双参数幂函数模型更好,且有15.91%的差异性小于0.01,其余84.09%差异性大于0.01,最大可达到0.034。综合以上分析得出,三参数指数模型可以更好地模拟不同规格措施的4种风速梯度下近地表40 cm高度范围内输沙率随高度的变化规律。

2.5　不同防护措施对风蚀的抑制效率

通过有防护措施与无防护措施的输沙率进行比较,来判断该措施下阻沙效能的大小,阻沙效能越大,其对输沙率的削弱能力越强。3种不同阻沙措施对控制输沙量均起到了积极作用。

图10为3类不同措施的随规格变化的阻沙效果。结果可得:10种不同配置措施在不同风速下,阻沙效果在42.668%～98.197%之间。其中沙柳沙障的阻沙效果在42.668%～89.856%之间,规格由1.5 m×1.5 m减小到1.0 m×1.0 m时,阻沙效果平均增大42.472%,规格由1.0 m×1.0 m减小到0.5 m×0.5 m时,阻沙效果平均增大30.681%,不同规格的阻沙效果存在显著差异($p<0.05$)(图11)。PLA沙障的阻沙效果在67.544%～93.757%之间,规格由1.5 m×1.5 m减小到1.0 m×1.0 m时,阻沙效果平均由67.544%增加到82.299%,规格由1.0 m×1.0 m减小到0.5 m×0.5 m时,阻沙效果平均由82.299%增加到93.757%,除7 m/s风速下,其他风速下不同规格的阻沙效果均存在显著差异($p<0.05$)。

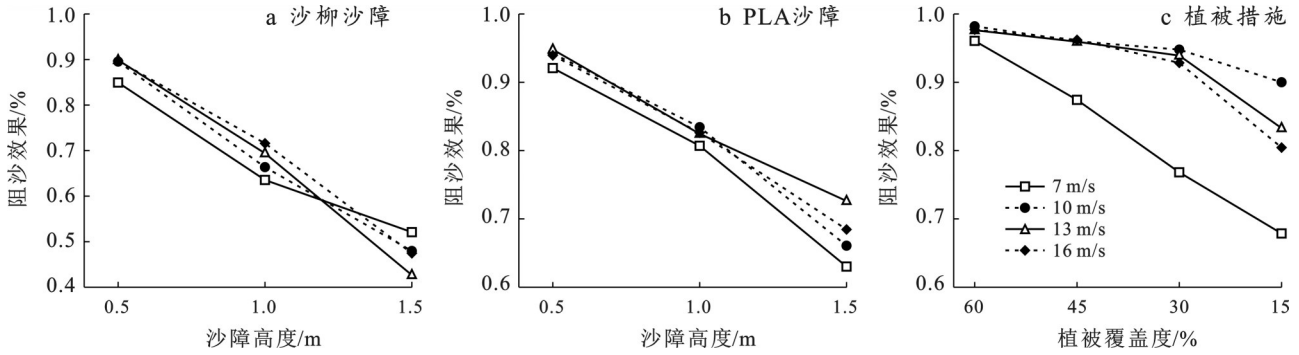


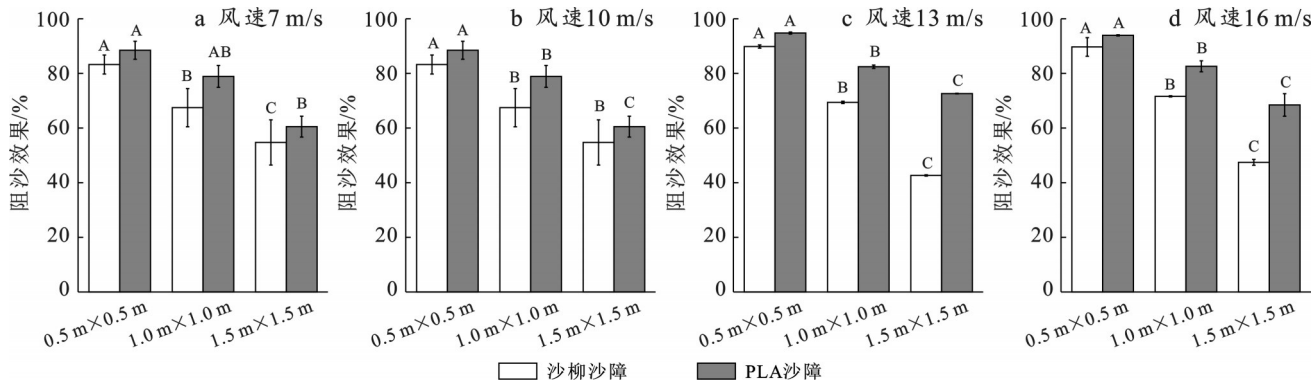
图10　不同措施阻沙效果随规格的变化特征

Fig.10　Variation characteristics of wind protection effect of same measures with different specifications

而植物措施的阻沙效果在67.869%～98.197%之间,规格由15%覆盖率增加到30%覆盖率时,阻沙效果平均由80.401%增加到89.590%,平均增大11.428%,规格由30%覆盖率增加到45%覆盖率时,阻沙效果平均由89.590%增加到93.894%,平均增大4.804%,规格由45%覆盖率增加到60%覆盖率时,阻沙效果平均由93.894%增加到97.395%,平均增大3.723%,不同规格的阻沙效果存在差异。

图11为在不同风速梯度下,不同类型同规格沙障的阻沙效果,不同沙障的阻沙效果随风速的变化也表现出不同的变化特征,各风速下,PLA沙障阻沙效果均好于沙柳沙障,除7 m/s风速,在其他风速下阻沙效果整体呈现出PLA沙障的阻沙效能随规格增大而减小的趋势,差异较显著,阻沙效果最大值出现在规格为0.5 m×0.5 m,风速为10 m/s和13 m/s,分别为94.221%和94.790%,最小值出现在规格为1.5 m×1.5 m,风速为7 m/s和10 m/s,分别为63.021%和66.073%;沙柳沙障同样也是在不同风速下同规格均表现出差异较小,具体来说,在规格为0.5 m×0.5 m和1.0 m×1.0 m时,最大值分别出现在13 m/s和16 m/s,分别为89.856%和71.601%,且0.5 m×0.5 m规格的16 m/s的阻沙效果与13 m/s差距并不大,差距仅为0.159%,为89.697%;最小值均出现在7 m/s,分别为84.942%和63.551%;但当规格为1.5 m×1.5 m时,阻沙效果整体呈现出随风速增加而减少的趋势;最大值出现在7 m/s,阻沙效果为52.083%,最小值出现在13 m/s,阻沙效果仅为42.668%。

总体上看,沙柳沙障没有出现类似于PLA沙障随着风速增加阻沙效果增加的趋势,而是在不同规格下表现出不同的阻沙效果,当规格小于1.0 m×1.0 m,阻沙效果表现为随风速增加而增加,当规格为1.5 m×1.5 m时,阻沙效果整体呈现出随风速增加而减少的趋势。



注:不同大写字母表示同一类沙障下不同规格措施差异显著($p<0.05$)。

图11 不同规格措施在不同风速下阻沙效果的变化特征

Fig.11 Variation characteristics of sand-blocking effect of same specification measures under different wind speeds

3 讨 论

3.1 风速变化特征

风速廓线能够有效表征气流随高度变化的分布特征,它能体现出不同下垫面微地形对气流的影响[20]。李映坤等[21]在乌兰布和沙漠周边开展了典型植被群落对风沙流结构影响的研究,通过测试分析得出不同植被群落内风速廓线均符合对数函数〔$V_h=a+b\ln(h)$〕分布特征。本研究中不同植被盖度与不同措施规格的风速廓线同样呈对数函数关系。各风速下,随着高度的降低,越贴近地面,风速降低的幅度越大,且这种变化在植被盖度提高和工程措施密度越密集时表现得更明显,该研究结果与殷婕等[22]、党晓宏等[23]研究结果一致。风速廓线的分布形式并没有因不同治理措施的存在以及风速的大小变化而发生明显改变。防护措施类型、材料特性和配置方式的不同均会影响其变化。不同规格的措施均能一定程度削减风速,明显增大样地内的粗糙度,可见不同措施能改变近地表空间结构,增加近地表粗糙度,影响近地表风速流场,进而避免近地表被直接吹蚀,起到防风作用。

空气动力学粗糙度的变化受风速、植被盖度及沙障规格等因素共同影响:风速升高时其数值呈下降趋势,而植被盖度提升或沙障布设密度增加时,粗糙度则会相应增大。从植被作用机制来看,盖度的增加会强化近地表对气流的摩擦效应与阻滞作用,进而使粗糙度上升,这一结论与孔玲玲等[24]的研究结果相符。刘艳萍等[25]通过风洞试验研究表明,随着植被盖度增加,粗糙度也随之增加,相关关系呈三次函数。余沛东等[26]利用可移动式风洞研究表明,粗糙度随植被盖度的增加而增大,且随盖度增大呈三次函数增长。张春来等[27]通过风洞试验研究则表明粗糙度与植被盖度呈指数函数关系。在本研究中,空气动力学粗糙度随植被盖度的增加而增大,相关关系呈对数函数,这与白子怡等研究两种植物群落盖度与空气动力学粗糙度关系的结论相同。造成这种差异的原因可能是下垫面沙粒或土质机械组成不同,导致在不同风速下,吹蚀的沙粒与附近的防治措施发生碰撞反弹,从而对气流造成复杂的扰动。

3.2 风沙运移规律

风沙流结构作为表征近地表风沙输移过程中沙粒通量垂向分布的核心指标,能够系统反映土壤颗粒运移分布规律[28]。在露天煤矿排土场地区,植被覆盖或机械沙障的设置能显著改善地表状况,进而有效抑制土壤风蚀[29]。当风沙流遇到这些障碍物时,其运移动能逐渐衰减,导致下垫面特定区域内沙粒沉积量增加,最终形成差异化的输沙量分布格局。屈建军等[10]通过野外试验和室内风洞模拟试验对刷状草方格固沙障进行观测,在裸地地表下,输沙率随高度增加呈指数递减,而在沙障内输沙率垂直分布不再遵循指数递减规律,呈现“先增后减”趋势,最大值出现在沙障顶部,这一现象是由抬升气流对沙粒的再分配作用导致。周娜等[30]通过风洞试验与野外试验对草方格沙障风沙流结构进行观测,结果表明草方格沙障输沙率呈先增大后减小的规律,这种规律称为“象鼻效应”。这与本研究风沙流结构趋势有差异,导致该现象的原因可能是下垫面土壤机械组成造成的差异以及粗糙度较高,气流使沙粒获得了更强的反弹能量,使得跃移和悬移的沙粒聚集在更高的高度,加之草方格沙障与本研究中的3种不同措施均不同,所以风沙流结构出现不同的分布规律。

本研究中植被盖度、不同措施密度直接影响下垫面粗糙度,进而对阻沙效果产生不同程度的影响。风沙流结构的变化受到下垫面微地形变化、地表气流变化等因素的影响。研究结果显示,3种不同防护措施的近地表输沙量均低于对照样地。同规格下,

PLA沙障阻沙效果均好于沙柳沙障,在不同风速、不同规格下,阻沙效果平均达到81.20%,高于沙柳沙障的67.93%。这是由于PLA沙障是一种不透风型沙障,当风沙流穿过沙障时,部分沙粒因不透风障体阻隔而下沉,其余沙粒与沙面其他颗粒发生碰撞而下沉,而沙柳沙障则具有透风性,沙粒可以穿过沙柳沙障的间隙。

本研究结果发现,随着规格密度的提升,沙柳沙障和PLA沙障的阻沙效果均呈提升趋势。关于植物措施,其他学者也有相似结论。白子怡等在黄土高原的北部通过风洞试验对两种草本植物群落进行阻沙效果对比研究,其研究表明随着植被盖度的提升,输沙率也随之减少。植物茎秆硬度大小、茎的数量均会影响植物阻沙效果。

4　结　论

通过风洞试验对比4种不同植被盖度以及2种不同措施的3种规格,计算其防风效果、输沙率、阻沙效果等,发现不同措施防风固沙效能存在差异,具体为铺设沙柳沙障后,其中0.5 m×0.5 m规格沙障使地表粗糙度最大增加了535.667倍,防风作用在0—20 cm高度范围内有效削弱风速;随着规格的增加,粗糙度增量减少,防风效果也逐渐降低;50 cm高度后,防风效能迅速衰减;1.5 m×1.5 m沙柳沙障防风效果最差。

而不同规格PLA沙障相较于CK,粗糙度提升了1.5～18.333倍,这是因为PLA沙障因材料特性限制,虽然其具有不透风性,但整体障高较低,在障高之外,距地20 cm处,防风效果较弱,且3种不同规格差距不大,防风效果均较弱。

植物措施部分风速廓线呈“S”型分布,相较于CK,距地20 cm处防风效能为12.703%～49.601%,随着覆盖率的增加,植被的防风效能逐渐增高。

输沙率随高度的变化规律均符合三参数指数模型〔$q(h)=c+ae^{-h/b}$〕分布形式,且相关性系数(R^2)在4种函数模型中最高,均大于0.946。阻沙效果最好的为植物措施,阻沙效果均值达到90.320%。防风效能与阻沙效能均随植被盖度的提高和不同材料规格密度的增大而增大。

参考文献(References)

[1] 王皓,王强民,董书宁,等.西部典型煤矿区采动水文生态效应及修复途径[J].煤炭学报,2025,50(1):610-622.
Wang Hao, Wang Qiangmin, Dong Shuning, et al. Hydroecological effects of mining and its restoration ways in coal mining areas of Western China [J]. Journal of China Coal Society, 2025,50(1):610-622.

[2] 郭建英,何京丽,李锦荣,等.矿区人工再塑地貌对锡林郭勒草原土壤侵蚀的影响及其控制效果[J].水土保持学报,2015,29(1):56-61.
Guo Jianying, He Jingli, Li Jinrong, et al. Effects of soil erosion and remodeling control of coal mine dump slope in prairie of Xilin Gol [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(1):56-61.

[3] 于昊辰,卞正富,陈浮,等.矿山土地生态系统退化诊断及其调控研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):214-223.
Yu Haochen, Bian Zhengfu, Chen Fu, et al. Diagnosis and its regulations for land ecosystem degradation in mining area [J]. Coal Science and Technology, 2020,48(12):214-223.

[4] 孙琦,白中科,曹银贵,等.特大型露天煤矿土地损毁生态风险评价[J].农业工程学报,2015,31(17):278-288.
Sun Qi, Bai Zhongke, Cao Yingui, et al. Ecological risk assessment of land destruction in large open-pit mine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(17):278-288.

[5] Fu Shuai, Bai Zhongke, Yang Boyu, et al. Study on ecological loss in coal mining area based on net primary productivity of vegetation [J]. Land, 2022,11(7):1004.

[6] 张琳,陆兆华,唐思易,等.露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价[J].生态学报,2021,41(14):5764-5774.
Zhang Lin, Lu Zhaohua, Tang Siyi, et al. Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of open-pit coal mine waste dump [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(14):5764-5774.

[7] 霍超,刘天绩,樊斌,等.双碳背景下我国煤炭资源勘查开发布局研究[J].地质论评,2022,68(3):938-944.
Huo Chao, Liu Tianji, Fan Bin, et al. Study on national coal resources exploration and exploitation layout under carbon neutrality and emission peak settings [J]. Geological Review, 2022,68(3):938-944.

[8] 王银龙,张格,许丽,等.草原矿区排土场边坡苇帘沙障防风效能研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2025,46(3):30-36.
Wang Yinlong, Zhang Ge, Xu Li, et al. Study on windbreak effectiveness of reed curtain sand barriers on slopes of a grassland mine discharge site [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2025,46(3):30-36.

[9] 屈建军,朱志昊,李启航,等.双层网盾状沙障防风固沙效益的风洞试验[J].中国沙漠,2025,45(3):141-151.
Qu Jianjun, Zhu Zhihao, Li Qihang, et al. Wind tunnel test on windbreak and sand-fixing effect of double-layer net shield sand barrier [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(3):141-151.

[10] 屈建军,王涛,牛清河,等.刷状草方格固沙障机织工艺与防沙效果研究[J].中国科学:技术科学,2024,54

(8):1601-1610.
Qu Jianjun, Wang Tao, Niu Qinghe, et al. Study on weaving technology and sand control effect of brush straw checkerboard barriers [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024,54(8):1601-1610.

[11] 丛龙宇,许丽,张春良,等.内蒙古草原煤矿区排土场不同规格树枝沙障的防风效益[J].西北林学院学报,2024,39(2):141-147.
Cong Longyu, Xu Li, Zhang Chunliang, et al. Windproof efficiency of tree branch sand barriers with different sizes at the dump area of coal mining in Inner Mongolian grassland [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(2):141-147.

[12] 王茂林,宋玲,刘杰,等.双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障的优化配置及防沙效益[J].水土保持学报,2024,38(1):368-377.
Wang Maolin, Song Ling, Liu Jie, et al. Optimized configuration and sand control benefits of double-row high vertical nylon mesh sand barrier and grass lattice sand barrier [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):368-377.

[13] 白子怡,董治宝,南维鸽,等.两种草本植物群落的防风固沙效能对比[J].地理科学,2025,45(2):438-448.
Bai Ziyi, Dong Zhibao, Nan Weige, et al. Comparison of windbreak efficiency between two herbaceous plant communities [J]. Geographical Science, 2025,45(2):438-448.

[14] 蒙仲举,任晓萌,高永.半隐蔽式沙柳沙障的防风阻沙效益[J].水土保持通报,2014,34(3):178-180.
Meng Zhongju, Ren Xiaomeng, Gao Yong. Effect of semi-buried *Salix psammophila* checkerboard on wind-preventing and sand-resisting [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(3):178-180.

[15] 党晓宏,高永,虞毅,等.可降解纤维沙障控制风蚀沙埋的作用规律[J].科技通报,2015,31(5):41-46.
Dang Xiaohong, Gao Yong, Yu Yi, et al. The affect law on the degradable fiber checkerboard control of wind erosion and sand bury [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015,31(5):41-46.

[16] 王文舒,甘晓雪,张斌武,等.不同材料沙障的防风固沙效果与成本效益分析[J].北京农学院学报,2025,40(1):5-12.
Wang Wenshu, Gan Xiaoxue, Zhang Binwu, et al. Analysis of windbreak and sand blocking effects and cost-effectiveness of sand barriers made of different materials [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2025,40(1):5-12.

[17] 孙中峰,荣建东,李英杰,等.应用沙障作用治理流动沙地的试验研究[J].黑龙江水专学报,1998(4):55-56.
Sun Zhongfeng, Rong Jiandong, Li Yingjie, et al. Experimental research of drift sand area control with the application of sand barrier [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 1998(4):55-56.

[18] 左小锋,郑粉莉,张加琼,等.典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(12):45-53.
Zuo Xiaofeng, Zheng Fenli, Zhang Jiaqiong, et al. Effect of previous sloping water erosion on soil wind erosion in typical thin layered Mollisol region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(12):45-53.

[19] 丛龙宇,许丽,张春良,等.草原矿区排土场沙障的生态保护成效[J].水土保持通报,2023,43(6):193-199.
Cong Longyu, Xu Li, Zhang Chunliang, et al. Ecological protection effects provided by sand barriers in a grassland mining area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(6):193-199.

[20] 常佳丽,陈智,陈燕,等.三种典型地表风速廓线的试验研究[J].中国水土保持,2017(3):41-44.
Chang Jiali, Chen Zhi, Chen Yan, et al. Experimental study on three typical surface wind speed profiles [J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(3):41-44.

[21] 李映坤,李锦荣,董雷,等.乌兰布和沙漠周边典型植物群落防风阻沙效果[J].中国沙漠,2022,42(6):65-73.
Li Yingkun, Li Jinrong, Dong Lei, et al. The wind and sand resistance effect of four vegetation types in Ulan Buhe Desert [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(6):65-73.

[22] 殷婕,安晶,哈斯额尔敦,等.库布齐沙漠南缘风沙-植被相互作用及其景观效应[J].生态学报,2022,42(21):8869-8880.
Yin Jie, An Jing, Hasi Eerdun, et al. Interaction between aeolian processes and vegetation and its landscape effect in the southern fringe of Hobq Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(21):8869-8880.

[23] 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.
Dang Xiaohong, Gao Yong, Yu Yi, et al. Windproof efficiency with new biodegradable PLA sand barrier and traditional straw sand barrier [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015,37(3):118-125.

[24] 孔玲玲,董治宝,白子怡,等.植被盖度和配置方式对土壤风蚀影响的风洞试验[J].中国沙漠,2024,44(1):235-243.
Kong Lingling, Dong Zhibao, Bai Ziyi, et al. Effects of vegetation cover and configuration on soil wind erosion based on wind tunnel experiments [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(1):235-243.

(下转第104页)