雅布赖山风沙通道沙漠公路沿线复合型沙障的防风固沙效应

李晓阳[1,2], 蒙仲举[1,2], 李浩年[1,2],
孟芮冰[1,2], 邬瑞鑫[1,2], 安 花[1,2], 杨 毅[1,2], 王雨鑫[1,2]
(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 010018)

摘 要: [目的]研究沙漠公路沿线常见的"机械沙障+梭梭"复合型沙障的防风固沙效应,为沙漠公路防沙体系的材料选择与结构优化提供依据。[方法]选取雅布赖山风沙通道内沙漠公路沿线的4种复合型沙障,包括草方格沙障+梭梭,纱网沙障+梭梭,25 cm树枝沙障+梭梭,50 cm树枝沙障+梭梭,同时设置对照(单株梭梭,无沙障),利用野外实测和数值模拟分析不同配置下近地表气流场特征,并同步采集输沙颗粒开展粒径分析,测定障区蚀积形态并观测土壤含水率。[结果]①不同配置沙障的地表粗糙度与摩阻风速呈梯度差异,综合防护能力为:纱网沙障>50 cm树枝沙障>25 cm树枝沙障>草方格沙障>CK。纱网沙障地表粗糙度可达1.33 cm,摩阻风速为0.97 m/s,CK为0.01 cm和0.45 m/s。②近地表气流场总体呈现背风侧风速降低,障后形成低速区并在下游逐步恢复的空间分布特征。低速区在梭梭分布区(L=5~10,L为水平距离)仍可持续。在高20 cm,L=15处,纱网沙障风速为3.8 m/s,CK为5.0 m/s以上。③输沙颗粒粒径组成在不同配置间存在显著差异,CK粗沙占38.6%,纱网沙障细粒占61.4%。障区蚀积参数差异显著。复合型沙障下浅层水分条件得到改善,50 cm树枝沙障和纱网沙障20—30 cm土层含水率分别为3.51%和3.55%。[结论]"沙障+梭梭"复合体系显著增强了沙障的防风固沙效应,改善近地表气流并促进沉积与浅层水分维持,工程应用中须结合沙漠公路沿线风沙强度分区优化布设与维护。

关键词: 沙漠公路; 雅布赖山风沙通道; 复合型沙障; 气流场; 防风固沙
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0126-12 **中图分类号:** S719

文献参数: 李晓阳, 蒙仲举, 李浩年, 等.雅布赖山风沙通道沙漠公路沿线复合型沙障的防风固沙效应[J].水土保持通报,2026,46(4):126-137. Li Xiaoyang, Meng Zhongju, Li Haonian, et al. Windbreak and sand fixation effects of composite sand barriers along desert highway in aeolian sand corridor of Yabulai Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):126-137.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.016 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.016**

Windbreak and sand fixation effects of composite sand barriers along desert highway in aeolian sand corridor of Yabulai Mountain

Li Xiaoyang[1,2], Meng Zhongju[1,2], Li Haonian[1,2],
Meng Ruibing[1,2], Wu Ruixin[1,2], An Hua[1,2], Yang Yi[1,2], Wang Yuxin[1,2]
(1.*College of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2.*Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*)

Abstract: [Objective] The windbreak and sand fixation effects of common composite sand barriers of mechanical sand barriers + *Haloxylon ammodendron* along desert highways were investigated in order to provide a basis for

收稿日期:2026-01-16 **修回日期:**2026-02-11 **采用日期:**2026-02-13
资助项目:内蒙古自治区"揭榜挂帅"科技计划项目"雅布赖山风沙口综合治理和沙漠边缘防风固沙林草带建设技术示范"(2024JBGS0009);"蒙科聚"创新驱动平台奖励资金项目"雅布赖山风沙口上风向高大密集流动沙丘治理技术"(NDMKJ2503);内蒙古自治区直属高校基本科研业务项目"荒漠生态系统保护与修复创新团队"(BR22-13-03)
第一作者:李晓阳(2002—),男(汉族),湖北省宜昌市人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治。Email:19107125857@163.com。
通信作者:蒙仲举(1980—),男(汉族),内蒙古自治区呼和浩特市人,博士,教授,博士研究生导师,主要从事荒漠化防治研究。Email:mengzhongju@126.com。

material selection and structural optimization of sand control systems along desert highway. [Methods] Four types of composite sand barriers were selected along the desert highway in the aeolian sand corridor along Yabulai Mountain: straw checkerboard barrier + *H. ammodendron*, mesh barrier + *H. ammodendron*, 25 cm branch barrier + *H. ammodendron*, and 50 cm branch barrier + *H. ammodendron*. A single *H. ammodendron* shrub without a sand barrier was used as the control. Field measurements and numerical simulations were used to analyze the characteristics of the near-surface airflow field under different configurations. Meanwhile, transported sand particles were collected for particle size analysis, erosion-deposition morphology within barrier zones was measured, and soil moisture content was monitored. The protective effect of composite sand barriers was then analyzed and evaluated. [Results] ① The surface roughness and friction velocity exhibited gradient differences among different configurations. The overall protective capacity ranked as mesh barrier > 50 cm branch barrier > 25 cm branch barrier > straw checkerboard barrier > CK. For the mesh barrier, the surface roughness and friction velocity were 1.33 cm and 0.97 m/s. For CK, the corresponding values were 0.01 cm and 0.45 m/s. ② The near-surface airflow field generally exhibited a spatial distribution pattern characterized by reduced wind velocity on the leeward side, the formation of a low-velocity zone behind the barrier, and gradual recovery downstream. The low-velocity zone persisted within the *H. ammodendron* distribution area (L=5—10, where L is the horizontal distance). At a height of 20 cm and L=15, the wind velocity was 3.8 m/s for the mesh barrier and above 5.0 m/s for CK. ③ The particle size composition of transported sand differed significantly among different configurations. In CK, coarse sand accounted for 38.6%, whereas under the mesh barrier, fine particles accounted for 61.4%. The erosion-deposition parameters differed significantly among the barrier zones. Shallow soil moisture conditions were improved under the composite sand barriers. In the 20—30 cm soil layer, the moisture content was 3.51% under the 50 cm branch barrier and 3.55% under the mesh barrier. [Conclusion] The sand barrier + *H. ammodendron* composite system significantly enhances the windbreak and sand fixation effects, improves near-surface airflow, and promotes sand deposition and shallow soil moisture retention. In engineering applications, the layout and maintenance of this system should be optimized according to the spatial zoning of wind-sand intensity along desert highways.

Keywords: desert highway; Yabulai Mountain; aeolian sand corridor; composite sand barrier; airflow field; windbreak and sand fixation

风沙灾害长期制约沙区道路工程建设与安全运营[1-2],对沙区公路的影响主要表现为路基风蚀与道路沙埋[3],其中沙埋更为常见。沙埋会加剧路面磨蚀与附属设施损耗[4],增加清沙与养护成本,并在能见度下降与路面状况恶化时影响交通安全[5]。因此,开展风沙灾害防治是保障沙漠公路安全稳定运行的关键环节[6]。半个多世纪以来,公路沙害防治在工程实践中形成了较为成熟的技术体系[7]。草方格沙障因施工简便,材料易得,成本较低,长期用于路域防护与流动沙丘治理[8]。近年来,纱网沙障与树枝沙障等新型或改良型措施在沙区公路工程中应用增多,为路域防护提供了更多材料与结构选择。肖生春等[9]通过对雅布赖山前沙漠公路目前的沙害和防沙治沙体系进行评估,形成了针对不同区域的防风固沙林草带示范体系。崔健等[10]通过对乌兰布和沙漠公路沿线的“麦草沙障+梭梭”的输沙量和风速进行分析,提出了沙区道路防护工程的“以阻为主,阻固结合”的防护理论。马茜茜等[11]对额济纳旗S315公路沿线的高立式阻沙网进行风洞模拟,研究了不同高度的阻沙网与不同风速耦合条件下的气流场特征和防风效应。王新刚等[12]利用数值模拟与风洞试验,对比了两种结构的芦苇沙障的积沙规律,得出杆式沙障的阻沙效果优于束式沙障。

之前研究多集中于沙障材料与障高等工程参数对比[13],评价指标多停留在风速衰减或输沙量变化等单一过程量[14]。受观测点位与时段限制,结果以局部短时风况为主,难以界定阻风降速的影响距离及其下风向梯度。在相同灌木背景下,“沙障+灌木”复合配置的统一风况,统一尺度的对照不足,指标与计算口径不一,配置间增益幅度缺乏可比性。

雅布赖山前沙漠公路(G307)位于腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠交会地带的输沙主路径上,沙源补给持续,西北向大风过程频繁且持续时间长,近地表风蚀与风沙输运强度高[15]。受山前地形导向与道路线形影响,风向相对集中,风沙过程重复性强,便于在一致风况下开展对比观测。沿线沙害以覆沙、沙埋

为主，防护对象明确。因此，该路段具备开展复合型沙障对比观测的代表性现场条件。基于此，本文以雅布赖山前沙漠公路为研究区，以“沙障＋梭梭”复合型沙障为研究对象，在同一梭梭背景下设置（纱网沙障、草方格沙障、25 cm树枝沙障与50 cm树枝沙障）不同材料与结构配置，并以单株梭梭为对照。通过近地表气流场特征，结合障体近区输沙颗粒粒径、障内蚀积特征和土壤水分响应，定量描述复合型沙障的防护梯度与过程差异，为沙漠公路防沙体系的材料选择与结构优化提供依据。

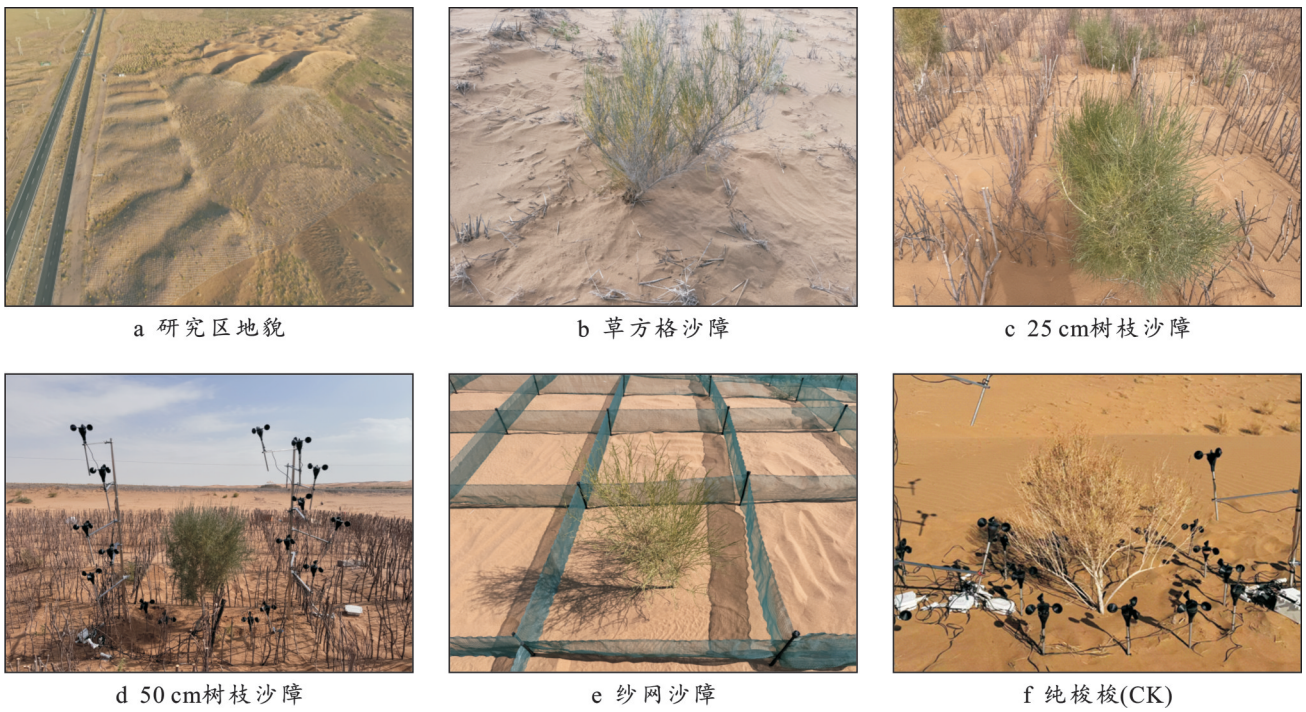
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善右旗雅布赖镇，地处雅布赖山南缘，巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠交汇区的风沙通道中部，整体属于典型荒漠-绿洲过渡带。地理坐标为39°08′—40°18′N，101°52′—103°33′E，海拔高度约1 200 m。地貌类型以风蚀台地、低平沙垄和流动-半固定沙丘相间分布为主。该区属温带大陆性干旱气候，冬寒夏热、昼夜温差大，无霜期220 d，年降水量不足150 mm，且多集中在6—9月，蒸发量远高于降水量，年均气温在8 ℃左右，大风天气和风沙过程频发，是区域性风沙输送和风蚀作用最为强烈的地段之一。土壤以灰棕漠土和风沙土为主，有机质含量低，盐分积累较为普遍。自然植被覆盖度较低，优势物种为沙蒿（*Artemisia desertorum*）、白刺（*Nitraria tangutorum*）、藏锦鸡儿（*Caragana Xizangica*）和红砂（*Reaumuria songarica*）等灌木。

1.2 样地设置

试验样地设置于雅布赖山风沙通道的山前公路沿线典型路段，选择地形起伏与下垫面条件相对一致的区段布设小区，以保证沙障间可比性。样地于2025年4月完成布设与标定，“沙障＋梭梭”为复合型沙障配置，分别为草方格沙障＋梭梭，纱网沙障＋梭梭，25 cm树枝沙障＋梭梭和50 cm树枝沙障＋梭梭，对照处理CK不设沙障，仅栽植梭梭。复合型沙障设置3个重复。样地间保持足够间距，减少相互干扰（见图1）。复合型沙障单元规格均为1 m×1 m，其中纱网沙障高20～25 cm，草方格沙障高15～20 cm，25 cm树枝沙障高25 cm，50 cm树枝沙障高50 cm。为避免灌木差异对防风固沙效应造成干扰，各沙障内梭梭的栽植方式与立地条件保持一致，株行距一致，树龄一致，植株高度与冠幅处于同一数量级范围，且小区周边地形、地表覆盖与风沙通道条件一致。各样地沿主导风向建立统一坐标体系，水平距离以L表示，$L=0$为沙障前沿，$L=15$为沙障后沿，$L<0$为上风向，$L>0$为下风向，梭梭集中分布于$L=5$～10。2025年10月在风况稳定时开展统一观测与采样，作为各指标计算与沙障间对比分析的数据来源。



a 研究区地貌　b 草方格沙障　c 25 cm树枝沙障

d 50 cm树枝沙障　e 纱网沙障　f 纯梭梭(CK)

图1 研究区地貌及沙障类型

Fig.1 Topography and sand fixation barrier types of study area

1.3　风速观测

风速观测在5种配置模式小区同步开展,为保证不同沙障间风况一致性,在试验区外上风向开阔地设置参考风速点,连续记录旷野风速并据此筛选观测时段。风速观测于10,20,30,60,100,150 cm共6个高度,沿主导风向在L=−5,0,1,2,3,5,7,9,12,16,20布设观测点同步测量,用于风速廓线、防风效能与下风向梯度分析。风速采用二维超声风速仪(Gill WindSonic, Gill Instruments,英国)测定。其量程为0~60 m/s,分辨率0.01 m/s,测量精度为读数的±2%。各测点以10 Hz频率连续采样60 s,取时间平均值作为该点风速。每点重复观测3次取均值计算,当重复测值相对差异超过10%时,在风况稳定后补测并采用稳定组数据。

1.4　样品采集与测定

输沙颗粒采样布设在沙障前后近区,检测范围为L=−5~5,沿剖面在L=−5,−4,−3,−2,−1,0,1,2,3,4,5设置采样点,采样高度为20 cm,采用水平式集沙器采集。采样在参考点旷野平均风速为8.04,9.37,11.09 m/s的3个风况下进行。每种风况各点采集1次,每点设3个平行样。在同一风况下,将L=−5~5各点样品按等质量混匀,自然风干后采用干筛法分级,计算各粒级质量百分比。取样点统一设置在梭梭分布区内(L=7),分层采集0—5,5—10,10—15,15—20,20—30,30—40 cm土样。样品密封带回,105 ℃烘干至恒重,按烘干法计算质量含水率;在各处理障区内沿主导风向布设剖面测线,两端设置固定基准点并拉设基准线。沿线按0.5 m间距测定沙面相对高程变化。正值为堆积,负值为侵蚀。提取中心最大侵蚀深度与最大堆积高度。每个沙障布设3条平行测线,取均值用于统计分析。

1.5　指标计算

为定量刻画不同复合型沙障的近地表气流结构特征,对实测风速廓线进行曲线拟合,并在此基础上反演摩阻风速与地表粗糙度。地表粗糙度与摩阻风速计算公式为

$$U_Z=\frac{U_*}{K}\ln\frac{Z}{Z_0} \tag{1}$$

式中:U_Z为Z高度的平均风速(m/s);Z为风速廓线上某点距地面的垂直高度(cm);U_*为摩阻风速(m/s);Z_0为空气动力学粗糙度(cm);K为冯卡曼常数,取值0.4。

为计算地表粗糙度与摩阻风速,本研究基于近地表风速廓线的对数函数形式,对实测风速数据进行最小二乘回归拟合,在10,20,30,60,100,150 cm共6个高度测量风速,计算公式为:

$$U_Z=b+a\ln Z \tag{2}$$

式中:a, b为回归系数。令U_Z=0,计算地表粗糙度,公式为:

$$Z_0=\exp(-b/a) \tag{3}$$

摩阻风速计算公式为

$$U_*=K_a \tag{4}$$

防风效能计算公式为

$$F=\frac{V_0-V_{sb}}{V_0}\times 100\% \tag{5}$$

式中:F为复合型沙障的防风效能(%);V_0和V_{sb}分别代表同一高度下的裸沙风速和受沙障阻挡后的风速(m/s)。

土壤含水率采用烘干法进行测定,在土壤0—40 cm各个土层用环刀进行采集,并用胶带密封好,进行称重,记为m_1,再带回实验室用烘箱烘干至恒重,记为m_2,计算公式如下:

$$\text{土壤含水率}=\frac{m_1-m_2}{m_2}\times 100\% \tag{6}$$

1.6　统计分析

数据整理与作图在Excel 2021与Origin 2025中完成。相关性分析采用Pearson相关分析方法。差异性检验采用SPSS 27进行单因素方差分析(one-way ANOVA),当p<0.05时认为差异显著;多重比较采用LSD法。

2　结果与分析

2.1　复合型沙障对近地表气流的影响

2.1.1　风速廓线

风速廓线是近地表气流结构的关键特征。复合型沙障,风速差异主要体现在近地表风沙活动层(0—100 cm),当高度升至100 cm以上,不同措施条件下的风速廓线逐渐靠拢,差异减小(图2)。为定量表征不同处理风速廓线的差异特征,并为动力参数计算提供依据,对各复合型沙障的风速廓线进行对数函数拟合分析。

在近地表(0—20 cm)范围内,复合型沙障水平风速差异最为显著,CK的风速廓线整体偏右,铺设机械沙障后风速廓线普遍左移,其中纱网沙障与50 cm树枝沙障左移幅度较大,草方格沙障与25 cm树枝沙障居中。在风速为9.37 m/s条件下,20 cm高度处CK风速为7.6 m/s,纱网沙障为5.5 m/s,差值为2.1 m/s。在中低层(40—100 cm)范围内,各沙障间差异仍较明显且曲线间距相对稳定。60 cm高度处CK为8.7 m/s,纱网沙障为7.87 m/s;在风速为11.09 m/s

条件下，60 cm高度处CK风速为9.83 m/s，纱网沙障为8.52 m/s。随风速增加，各沙障的风速廓线整体右移，但各沙障的相对位置基本保持一致。在中低层范围内CK与纱网沙障的风速差异更加显著。不同沙障类型对风速廓线的影响，主要体现在近地表降速幅度及其影响高度范围，纱网沙障与50 cm树枝沙障在0—100 cm内廓线更靠左，有效防护效果更好，25 cm树枝沙障次之，草方格沙障相对较弱但整体仍优于CK。

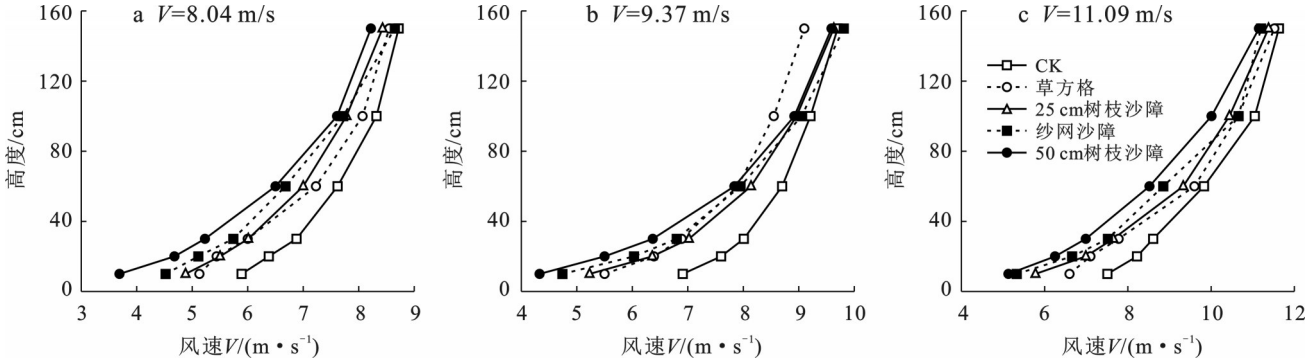


图2 不同入流风速(V)下复合型沙障的风速廓线

Fig.2 Wind velocity profiles of composite sand barriers under different inflow wind velocities (V)

2.1.2 地表粗糙度和摩阻风速

在3种入流风速条件下，各处理近地表风速廓线均可采用对数函数进行回归拟合，拟合优度R^2为0.96～0.99（表1），且u与ln(z)的回归关系达到显著相关($p<0.05$)。这表明风速廓线拟合精度较高。不同沙障类型的回归参数呈稳定梯度差异。其中纱网沙障与50 cm树枝沙障的回归斜率较大，25 cm树枝沙障与草方格沙障居中，CK最低。显示不同配置下风速廓线参数存在一致差异，且该差异在不同风速条件下保持稳定。

各沙障类型的地表粗糙度在不同风速工况下仅呈小幅波动，且各工况下粗糙度大小变化规律基本一致。

按3种风速取平均值，纱网沙障粗糙度为1.33 cm，而CK为0.01 cm，粗糙度的梯度差异与回归参数变化一致。摩阻风速随风速增强整体升高，在风速为9.37 m/s条件下，纱网沙障摩阻风速为0.95 m/s，高于CK（0.44 m/s），50 cm树枝沙障（0.84 m/s）与25 cm树枝沙障（0.72 m/s）也较高，草方格沙障（0.61 m/s）次之。4种复合型沙障均使地表粗糙度与摩阻风速提高。

表1 复合型沙障风速廓线拟合参数及地表粗糙度和摩阻风速

Table 1 Fitted parameters of wind velocity profiles and surface roughness and friction velocity for composite sand barriers

风速/(m·s^{-1})	下垫面	风速廓线回归方程	R^2	摩阻风速/(m·s^{-1})	地表粗糙度/cm
8.04	CK	U_z=1.000 ln(z)+4.605	0.99	0.41	0.01
	草方格沙障	U_z=1.375 ln(z)+2.213	0.96	0.55	0.25
	25 cm树枝沙障	U_z=1.625 ln(z)+1.489	0.97	0.65	0.41
	50 cm树枝沙障	U_z=1.875 ln(z)+0.418	0.97	0.75	0.80
	纱网沙障	U_z=2.125 ln(z)−0.861	0.96	0.83	1.50
9.37	CK	U_z=1.109 ln(z)+5.123	0.99	0.44	0.01
	草方格沙障	U_z=1.532 ln(z)+2.568	0.99	0.61	0.18
	25 cm树枝沙障	U_z=1.817 ln(z)+1.801	0.97	0.72	0.37
	50 cm树枝沙障	U_z=2.104 ln(z)+0.660	0.97	0.84	0.73
	纱网沙障	U_z=2.393 ln(z)−0.703	0.98	0.95	1.34
11.09	CK	U_z=1.298 ln(z)+6.024	0.98	0.51	0.01
	草方格沙障	U_z=1.807 ln(z)+3.186	0.98	0.72	0.17
	25 cm树枝沙障	U_z=2.153 ln(z)+2.344	0.99	0.86	0.33
	50 cm树枝沙障	U_z=2.504 ln(z)+1.083	0.96	1.00	0.64
	纱网沙障	U_z=2.860 ln(z)−0.429	0.97	1.14	1.16

注：Z为观测高度(cm)；U_z为高度z处的风速(m/s)；ln(z)为z的自然对数。

2.1.3　防风效能

防风效能是反映沙障措施在近地风沙活动层内降低风速,减弱风沙搬运并促进沙面稳定的综合指标,其值越高,说明沙障对气流的阻滞与降速作用越强,防风固沙效益越突出。根据图3可知,防风效能沿水平距离(L)表现出显著的空间分异规律,从沙障前沿进入沙障区域后防风效能迅速增加,在L=0处,纱网沙障防风效能为39.9%,显著高于CK(15.8%),高值自L=0处出现。

防风效能的峰值出现在L=1处。纱网沙障的防风效能高达53.6%,50 cm树枝沙障为48.6%。各沙障的防风效能差异最为显著,表现为:纱网沙障(53.6%)>50 cm树枝沙障(48.6%)>25 cm树枝沙障(38.8%)>草方格沙障(38.4%)>CK(31.6%)。当L>1时,防风效能随L增大逐步回落,但在梭梭分布处(L=5~10)回落趋缓,防风效能仍保持较高水平。当L=5时,纱网沙障仍为48.4%,CK为30.5%,在梭梭分布带内,“沙障+梭梭”复合型治沙措施的防风效能仍高于CK。综合来看,在高风能工况下,4种复合型沙障均可实现对近地表风速的有效调控,防风效能高值主要集中在L=0~3,并在L=5~10段仍能维持较高水平。

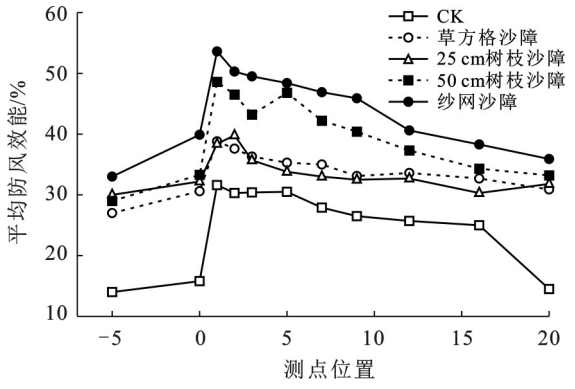


图3　入流风速为 10 m/s时复合型沙障的平均防风效能

Fig.3　Average windbreak efficiency of composite sand barriers at an inflow wind velocity of 10 m/s

2.1.4　复合型沙障气流场特征

在8,10,12 m/s入流风速条件下,复合型沙障周围气流场分布整体呈现相似格局(图4)。沿水平距离L变化,障体迎风侧近地表风速明显降低,上方形成气流抬升加速区,背风侧紧邻障后出现低速区,并随下风距离增加逐渐恢复。随着入流风速增大,流场分区的空间形态基本保持一致,但整体风速水平升高,背风侧低速区的相对减速幅度有所减弱。

不同类型沙障在近地表风速调控幅度及影响范围上存在差异。草方格沙障对贴近地表气流的降速主要集中于近地层,25 cm树枝沙障在背风侧可形成连续低速区,但其影响高度及下风向延伸距离相对较小。相比之下,50 cm树枝沙障与纱网沙障在各入流风速条件下均形成范围较大的背风侧低速区,近地表风速降低幅度更大,风速恢复过程相对缓慢。在风速为10 m/s条件下,20 cm高度处,L=0处,纱网沙障风速为3.4 m/s, CK为4.6 m/s。在L=1处,纱网沙障为3.0 m/s, CK为4.3 m/s。各沙障处理间风速差异显著。在梭梭分布区(L=5~10),各沙障的气流低速区仍保持连续。L=7处纱网沙障风速为3.2 m/s,50 cm树枝沙障为3.5 m/s, CK为4.2 m/s。至沙障后段L=15,纱网沙障风速为3.8 m/s,而CK回升至5.0 m/s以上。流场分区的空间形态基本保持一致,仅整体风速水平升高,背风侧低速区的相对减速幅度有所减弱。在梭梭分布区及其邻近下风区段,复合型沙障的近地表风速维持在较低水平,背风侧低速区沿下风方向持续存在。

2.2　风蚀输沙颗粒粒径分布特征

不同复合型沙障的风蚀输沙颗粒粒径组成差异明显(图5)。CK输沙颗粒以粗沙为主,占38.6%,中沙次之,占24.1%,细沙占8.4%。与CK相比,复合型沙障均降低了输沙颗粒中粗沙和中沙含量,提高了细粒组分比例。纱网沙障的粗沙占比降至9.3%,中沙为21.7%,细粒合计达61.4%,成为输沙颗粒的主要组成。50 cm树枝沙障的粗沙占16.8%,中沙为24.5%,细粒比例提高至54.8%,明显高于CK。相比之下,25 cm树枝沙障与草方格沙障的粒径调控幅度居中,细粒占比分别为43.6%和40.9%。复合型沙障的拦沙能力表现为:纱网沙障>50 cm树枝沙障>25 cm树枝沙障>草方格沙障>CK。总体来看,“沙障+梭梭”复合模式有效改变了风蚀输沙颗粒的粒径组成结构,使过境输沙由中粗粒级向细粒级转变。

2.3　沙障内蚀积特征

复合型沙障在中心侵蚀深度与堆积带连续性上存在差异(图6)。纱网沙障与50 cm树枝沙障侵蚀深度分别为−1.5 cm和−2.5 cm,侵蚀凹陷明显减小。在堆积强度方面,50 cm树枝沙障最大堆积高度为8.6 cm,堆积带连续且覆盖范围较广。纱网沙障堆积区更集中,蚀积形态沿主风向呈拉长不对称特征。在梭梭的影响下,背风侧形成稳定的积沙带,使蚀积形态整体趋于平缓。

2.4　复合型沙障土壤含水量

不同沙障配置间的土壤含水率随土层加深整体升高,0—15 cm深度差异更显著,30 cm以下差异趋

于减弱(图 7)。CK 在 0—5,5—10,10—15 cm 土层含水率分别为 1.57%,1.82% 和 2.60%。在梭梭影响下,沙障表层含水率整体高于 CK,其中 50 cm 树枝沙障和纱网沙障在表层与中浅层保持较高水平,在 5—10 cm 土层,含水率分别为 2.08%,2.04%。CK 在 20—30 cm 土层含水率为 3.18%,30—40 cm 分别为 4.28% 和 4.08%。其余沙障在 0—15 cm 也表现出不同程度提升,但在深层(30—40 cm)各沙障的含水率接近。总体上,复合型沙障配置对土壤含水率的影响主要体现在表层至中浅层。

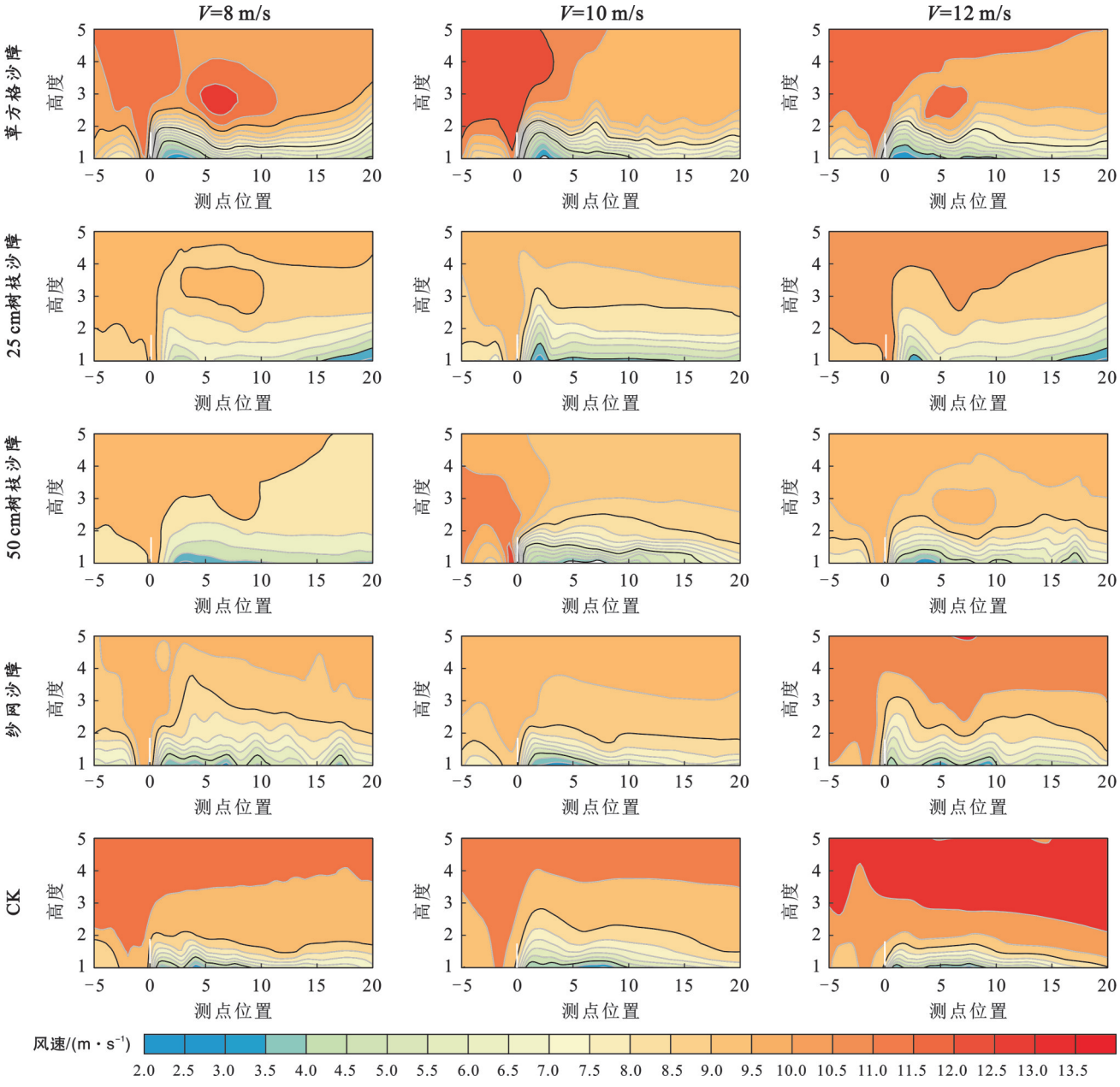


图 4 不同入流风速(V)下复合型沙障气流场分布

Fig.4 Flow field distribution of composite sand barriers under different inflow wind velocities (V)

3 讨 论

3.1 复合型沙障对近地表气流与输沙过程的调控机制

沙漠公路风沙灾害防治的对象并非单次风沙事件,而是多次连续且强度波动的风沙过程[16]。防护体系是否有效,关键在于能否在风沙活动层内持续形成近地表减速格局,并对障后风速恢复过程有稳定约束[17]。机械沙障可在短时间内削弱入流风速,在障体附近形成明显减速区,适用于承担前缘控风与快速见效的防护任务,但其影响范围主要集中在障体附近,且长期运行中受结构破损、局部开口等影

响,低速区的空间连续性易被削弱[18]。植被措施具有持续性,但在高风能背景下,粗糙元规模与空间连通性形成较慢,早期对近地表风速的削弱能力有限。实践证明,沙障+梭梭复合型沙障通过工程阻风与植被固沙的互补,提高近地层减速带的持续性,并延长防护结构的有效运行周期[19]。

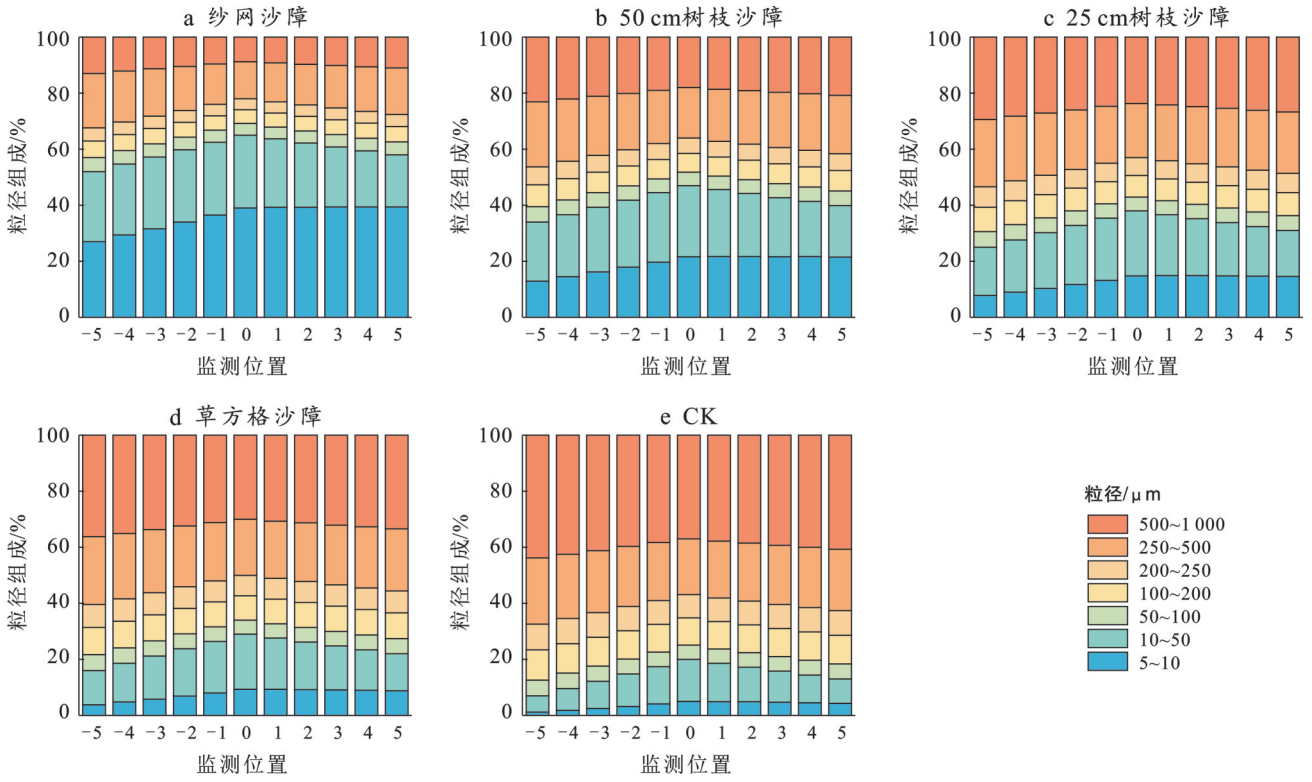


图 5　不同复合型沙障风蚀输沙颗粒粒径组成

Fig.5　Particle size composition of wind-eroded transported sand particles under different composite sand barriers

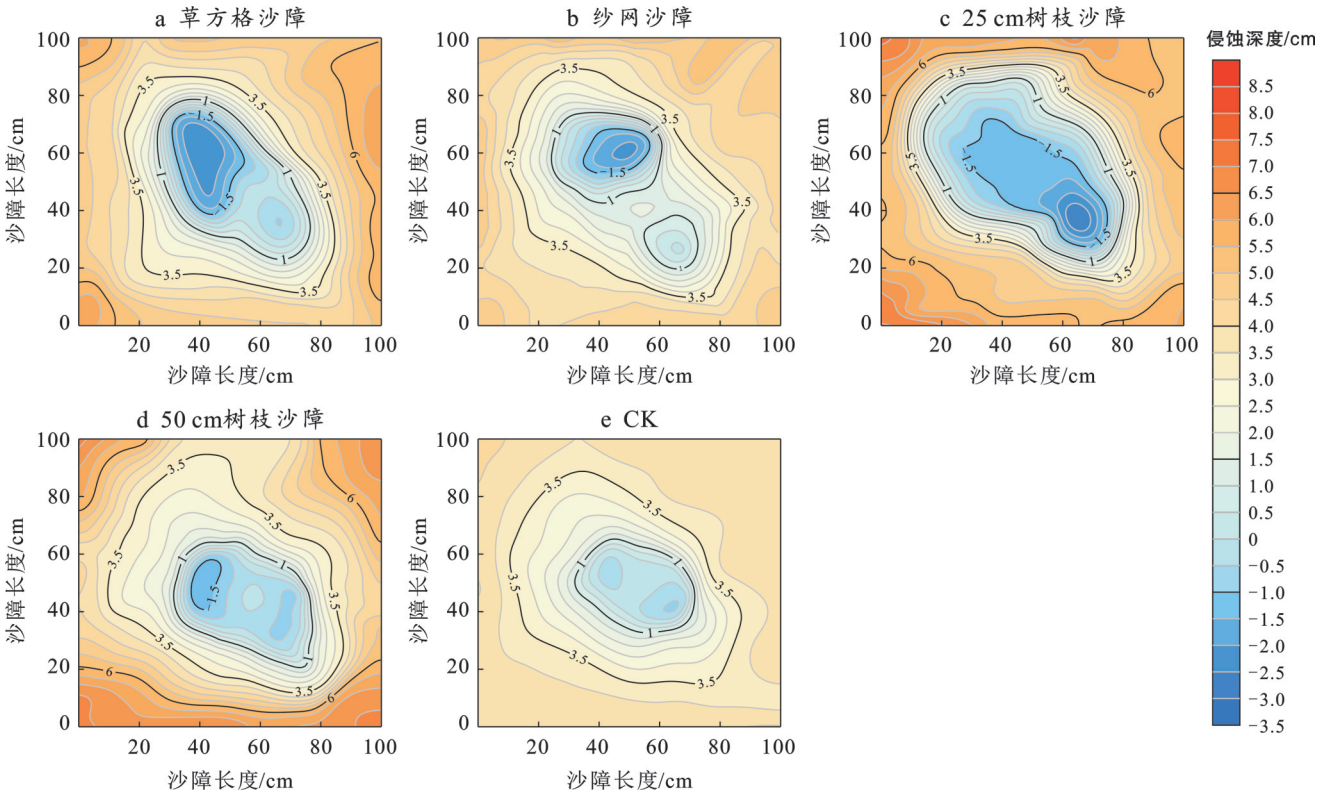


图 6　不同复合型沙障蚀积特征

Fig.6　Erosion-deposition characteristics under different composite sand barriers

本研究发现，在风速为 9.37 m/s，高度为 20 cm 的条件下，纱网沙障、50 cm 树枝沙障较 CK 的风速分别降低了 2.1 m/s 和 1.57 m/s，这与刘雅丹[20]在乌兰布和沙漠东北缘的不同防沙措施的部分研究结论一致。机械沙障作为迎风阻挡单元，使贴地风速在沙障前后出现明显差异，并在障后近区形成连续低风速带，由于梭梭的复合作用使低风速带的延续性更强，防风阻沙效应更为突出[21]。此外，本研究观察到 4 种复合型沙障均提高了地表粗糙度与摩阻风速，其中纱网沙障与 50 cm 树枝沙障提高的幅度最显著，这可能归因于纱网沙障结构致密，遮蔽强，迎风侧易形成连续阻挡界面，障后低速区更集中，近地表阻力提升幅度最大。

50 cm 树枝沙障得益于其高度较高且具有一定透风性，气流在穿透与绕流过程中持续损失动能[22]，低速区更易向下游延展，提升幅度仅次于纱网沙障。本研究发现草方格沙障的峰值防风效能虽低于纱网沙障等高立式沙障，但其在障后仍保持稳定的防风效能。在风速为 10 m/s 条件下，草方格在 L=1 处的防风效能为 38.4%，低于纱网沙障（53.6%），但在梭梭分布区（L=5～10），草方格沙障防风效能仍维持在 32.5%～33.8%，明显高于 CK。猛克[23]也在研究中得到了相似的结论。该现象清晰地揭示了草方格沙障的降速效应并非只出现在障体近端，其影响可沿近地表向下风向延伸，使贴地风速持续处于较低水平。梭梭位于障后分布区，可在下风向进一步维持减速状态，使草方格沙障的作用范围得到拉长。因此，尽管草方格不具有高立式沙障的强峰值降速特征，但在“沙障＋梭梭”复合条件下仍能保持稳定的近地表阻风降速效果，且整体优于 CK。

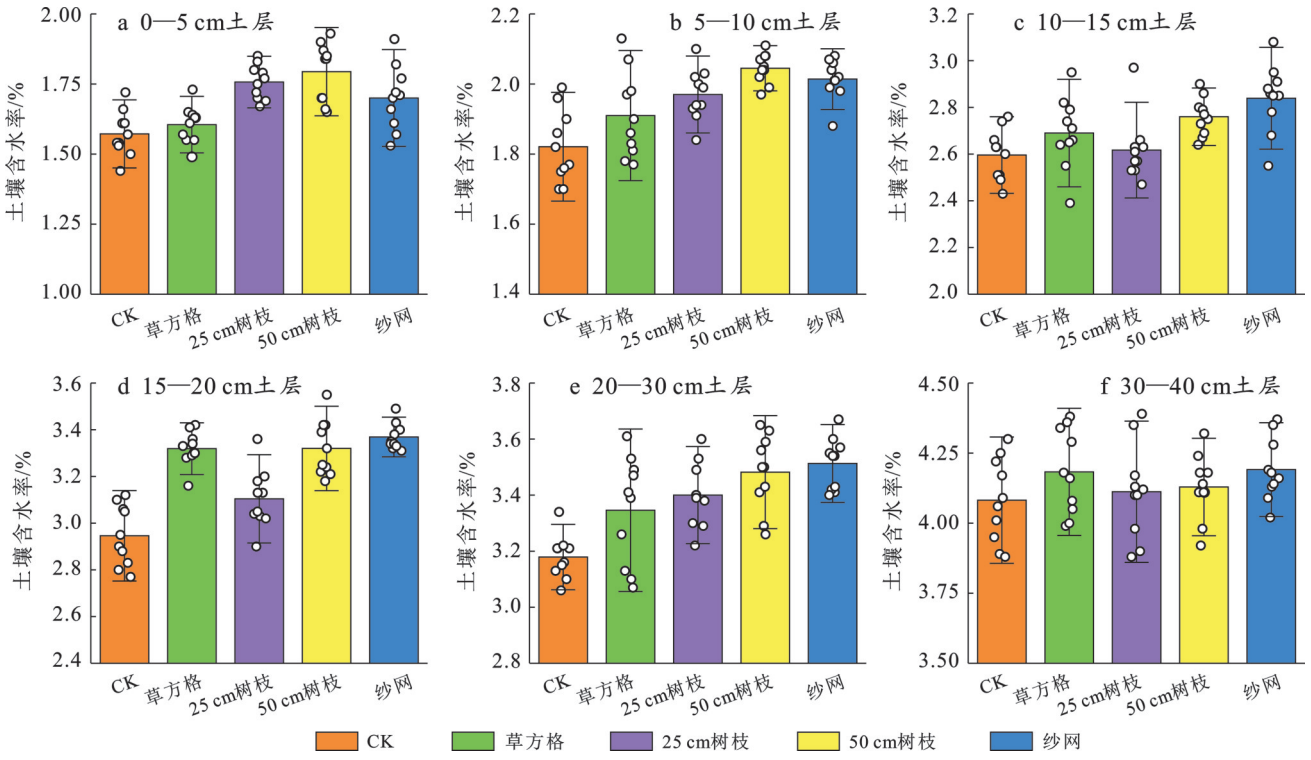


图 7 不同复合型沙障的土壤含水率分布

Fig.7 Soil moisture distribution under different composite sand barriers

风沙活动主要集中在近地表，复合型沙障通过改变下垫面特征并扰动近地表气流结构，进而影响土壤风蚀强度和沙粒粒径的分选过程[24]。复合型沙障兼具结构阻沙与植被固沙双重功能，通过降低表面风速并促进沙粒分选，实现输沙颗粒的有效细化[25]。本研究表明，CK 粗沙含量高达 38.6%，而纱网沙障细粒含量显著提高（约为 61.4%），复合防护系统可显著降低颗粒平均粒径。由于沙障首先截获风蚀粗大颗粒，而梭梭植被能够粘附并促进细小颗粒物的沉积，两者协同作用下使风蚀颗粒级配趋于均匀化，残余输沙中粗沙比例下降，细粒比例上升，这与马泽[26]对乌兰布和沙漠沿黄段格状沙障的粒径分布的研究结果相似。复合沙障通过工程与生态手段的耦合，使输沙颗粒粒径比单一沙障更趋细化，对土壤改良与植被恢复具有明显优势。

3.2 复合型沙障对障区蚀积特征与土壤含水量分布的影响

布设沙障后，沙障内沿主风向剖面发育出典型

的蚀积形态,其特征表现为中心侵蚀受限,堆积区增强[27],堆积带沿下风向更连续,空间形态较CK更趋于对称和平缓。CK凹曲面以负值为主,侵蚀最深点更集中,边缘堆积弱,蚀积形态易沿主风向拉长,局地风蚀过程仍占主导。复合型沙障形成更连续的堆积区。50 cm树枝沙障最大堆积高度为8.6 cm,沙障能够在近地表提供有效拦截界面[28],使风沙活动层颗粒更易发生沉降与再分配。这与王艺钊[29]关于PLA沙障凹曲面深度最深可达16.4 cm的研究结果不一致。这可能归因于梭梭的参与强化了障后输沙过程的持续削弱,植株在障后区持续阻风并再次拦截残余输沙,使堆积带在下风向得以延续,从而提高凹曲面形态的稳定性。复合型沙障的凹曲面由“深凹,堆积局限”向“侵蚀受限,连续堆积带”演变,体现出机械沙障与梭梭接续作用对沙物质输移过程的协同调控。

复合型沙障对土壤水分的影响主要在0—20 cm近地表,且表层响应更敏感[30]。复合型沙障的表层含水率均高于CK,说明沙障通过减弱近地表风蚀扰动,有利于表层水分的维持[31]。在0—20 cm土层,CK含水率为2.01%,草方格沙障为2.53%,表明复合型沙障对近地表水分保持具有显著提升。不同复合沙障间具有显著差异,其中草方格沙障在表层改善上更为突出。宋达成[32]认为,草方格沙障依托网格结构在地表形成较均匀的阻风降速带,削弱贴地风速并稳定沙面微形态,使表层失水过程受到持续约束。本研究中,草方格沙障虽工程阻风作用相对偏弱,但与梭梭复合后仍能在障后维持低速状态,从而降低近地表蒸发强度并增强0—20 cm浅层水分稳定性。CK更易受到风蚀扰动与干燥化影响,表层水分波动更大。水分改善与凹曲面蚀积格局并非相互独立,堆积带的连续性与中心侵蚀的削弱,有助于提高土壤浅层持水[33],梭梭株丛与根系固结进一步稳定沙面,降低反复起沙造成的水分损失。复合型沙障在近地表层形成“阻风降速—促进沉积—有利保水”的联动响应,为复合型沙障提供了水分支撑。

4　结　论

(1)“沙障+梭梭”复合配置下地表粗糙度和摩阻风速呈梯度差异,综合防护能力表现为:纱网沙障>50 cm树枝沙障>25 cm树枝沙障>草方格沙障>CK。纱网沙障地表粗糙度为1.33 cm,摩阻风速为0.97 m/s,高于CK的0.01 cm和0.45 m/s。复合配置对近地表风场约束更强。

(2)复合型沙障周围气流稳定,障后低速带在梭梭分布区(L=5~10)仍能维持并推迟下游恢复。在20 cm高度,L=15处,纱网沙障风速为3.8 m/s,而CK回升至5.0 m/s以上。复合型沙障对下风向控制范围更大。

(3)复合型沙障推动风蚀输沙颗粒粒级细粒化。CK以粗沙占优(38.6%),纱网沙障细粒提高至61.4%。复合型沙障促使障区蚀积单元向“中心侵蚀受限,边缘及下风侧堆积带更连续,形态更平缓”演化。50 cm树枝沙障最大堆积高度为8.6 cm。复合配置有利于强化连续堆积带并削弱侵蚀主导格局,有利于浅层水分条件改善。50 cm树枝沙障和纱网沙障在20—30 cm土层,含水率分别为3.51%,3.55%,为复合防护效应的持续发挥提供支撑。

(4)应针对不同风沙强度实施分区配置。强风沙段优先布设耐久型纱网沙障,复合配置并强化维护。中风沙段配套树枝沙障。弱风沙段以草方格沙障连续布设并配套梭梭带状栽植,结合风况优化障体间距与补修频次。

参考文献(References)

[1] 蔡依霏,王锋,潘绪斌,等.中国荒漠化潜在发生区域150年变迁:过去、现在和未来[J].科学通报,2024,69(31):4637-4650.
Cai Yifei, Wang Feng, Pan Xubin, et al.150-year shift of potential geographical distribution of desertification in China: Past, present and future [J]. Chinese Science Bulletin, 2024,69(31):4637-4650.

[2] 闫德仁,袁立敏,黄海广,等.直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J].中国沙漠,2020,40(2):79-85.
Yan Deren ,Yuan Limin, Huang Haiguang, et al. Influence of gauze sand barrier on sediment transport and wind speed near surface [J]. Journal of Desert Research, 2020,40(2):79-85.

[3] 邱国玉,张超,王子阳,等.100多年来中国沙漠治理与荒漠化防治的历程和大事记[J].干旱区资源与环境,2026,40(1):1-19.
Qiu Guoyu, Zhang Chao, Wang Ziyang, et al. Over 100 years efforts to control and use the desert and desertified lands in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2026,40(1):1-19.

[4] 张可盈,张娴,谢胜波.柳格高速公路沿线风沙环境特征[J].中国沙漠,2025,45(5):277-288.
Zhang Keying, Zhang Xian, Xie Shengbo. Environmental characteristics of wind-sand along the Liuyuan-Golmud expressway [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(5):277-288.

[5] 何锐,韩得军,李龙龙,等.风积沙在道路工程中的应用研究进展[J].中国公路学报,2025,38(1):1-30.

He Rui, Han Dejun, Li Longlong, et al. Application review of aeolian sand used in road engineering [J]. China Journal of Highway and Transport, 2025,38(1):1-30.

[6] 张克存,潘加朋,安志山,等.戈壁地表风沙动力过程及道路工程沙害防治研究进展[J].中国沙漠,2025,45(3):39-49.
Zhang Kecun, Pan Jiapeng, An Zhishan, et al. Research progress on aeolian dynamics and sand hazard prevention along road in Gobi regions [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(3):39-49.

[7] He Jingyu, Liu Guohua. Study on stability of highway subgrade slope in desert region [J]. Advanced Materials Research, 2013,639/640:974-977.

[8] 李良英,李琦,王旭,等.沙漠公路阻沙措施优化及防护效果研究[J].泥沙研究,2025,50(2):67-73.
Li Liangying, Li Qi, Wang Xu, et al. Study on optimization of sand blocking measures and their protection effect along desert highway [J]. Journal of Sediment Research, 2025,50(2):67-73.

[9] 肖生春,司建华,彭小梅,等.雅布赖山周边沙害现状与防风固沙林草带构建技术体系集成[J].中国沙漠,2025,45(5):209-216.
Xiao Shengchun, Si Jianhua, Peng Xiaomei, et al. Current status of sand hazards and integrated technical system construction of windbreak and sand-fixation forest-grass belts around Yabulai Mountains [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(5):209-216.

[10] 崔健,高君亮,乔靖然,等.乌兰布和沙漠公路"麦草沙障-梭梭"的防护效益[J].水土保持研究,2024,31(1):250-259.
Cui Jian, Gao Junliang, Qiao Jingran, et al. Research on the protective benefits of the 'wheat grass sand barrier *Haloxylon ammodendron*' on the ulanbuh desert highway [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):250-259.

[11] 马茜茜,肖建华,姚正毅,等.高立式阻沙网风场扰动特征的风洞模拟[J].中国沙漠,2026,46(3):32-40.
Ma Xixi, Xiao Jianhua, Yao Zhengyi, et al. Wind field disturbance induced by tall vertical sand barriers: A wind tunnel simulation [J]. Journal of Desert Research, 2026,46(3):32-40.

[12] 王新刚,尹翔,谢龙至,等.两种结构高立式芦苇沙障防沙效能探究及应用优化[J].干旱区研究,2025,42(8):1514-1524.
Wang Xingang, Yin Xiang, Xie Longzhi, et al. Exploration on sand control efficiency of two structure high vertical reed sandfences and its application optimization [J]. Arid Zone Research, 2025,42(8):1514-1524.

[13] 赵淳宇,李生宇,郑伟,等.风洞模拟"攀援植物-围栏"复合沙障不同疏透度下的防风效果[J].草业科学,2022,39(11):2273-2283.
Zhao Chunyu, Li Shengyu, Zheng Wei, et al. Wind tunnel simulation of the wind-breaking effect of "climbing plant-fence" composite sand barriers with different permeabilities[J]. Pratacultural Science, 2022,39(11):2273-2283.

[14] 张志山,赵洋,牛清河,等.机织沙障与人工结皮协同增效固沙技术体系:沙坡头模式2.0版[J].中国沙漠,2025,45(3):21-30.
Zhang Zhishan, Zhao Yang, Niu Qinghe, et al. Sand-fixing technology system of synergetic weaving sand barrier and artificial biocrusts: Shapotou Model 2.0 [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(3):21-30.

[15] 邓雅文,俎瑞平,宗玉梅,等.植物纤维网沙障防风效能的风洞试验[J].中国沙漠,2025,45(1):242-248.
Deng Yawen, Zu Ruiping, Zong Yumei, et al. Wind tunnel simulations on windbreak efficiency of sand barriers made of plant fiber nets [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(1):242-248.

[16] Cornelis W M, Gabriels D. Optimal windbreak design for wind-erosion control [J]. Journal of Arid Environments, 2005,61(2):315-332.

[17] 石麟,李红悦,赵雨兴,等.毛乌素沙地流动沙丘不同沙障组合措施的防风固沙效益评价[J].干旱区研究,2023,40(2):268-279.
Shi Lin, Li Hongyue, Zhao Yuxing, et al. Benefit evaluation of wind prevention and sand fixation under the combined measures of sand barrier in mobile dunes in Mu Us sandy land [J]. Arid Zone Research, 2023,40(2):268-279.

[18] Huang Yuan, Wang Yongdong, Zhao Ying, et al. Spatiotemporal distribution of soil moisture and salinity in the Taklimakan Desert highway shelterbelt [J]. Water, 2015,7(8):4343-4361.

[19] Mao Xuesong, Wang Fuchun, Wang Binggang. Nationwide desert highway assessment: A case study in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011,8(7):2734-2746.

[20] 刘雅丹,郭子健,卢佳雪,等.乌兰布和沙漠东北缘风况环境及不同防沙措施下沉积物粒度特征[J].中国水土保持科学,2025,23(4):142-153.
Liu Yadan, Guo Zijian, Lu Jiaxue, et al. Characteristics of sediment grain size under wind conditions and different sand control measures at the northeastern edge of Ulan Buh Desert [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(4):142-153.

[21] Li Congjuan, Wang Yongdong, Lei Jiaqiang, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert highway in China [J].

Journal of Arid Land, 2021,13(1):98-106.

[22] Dai Yujie, Dong Zhi, Li Hongli, et al. Effects of checkerboard barriers on the distribution of aeolian sandy soil particles and soil organic carbon [J]. Geomorphology, 2019,338:79-87.

[23] 猛克,蒙仲举.沙漠地区光伏电站典型格状沙障防风固沙综合效益评估[J].中国沙漠,2025,45(5):360-368.
Meng Ke, Meng Zhongju. Comprehensive benefit assessment of typical grid sand barriers for wind prevention and sand fixation in desert-area photovoltaic power stations [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(5):360-368.

[24] Dong Zhibao, Chen Guangting, He Xingdong, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert [J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(3):329-344.

[25] 李思瑶,蒙仲举.风水交互作用下乌兰布和沙漠东缘地表沉积物粒度特征[J].水土保持学报,2025,39(4):139-147.
Li Siyao, Meng Zhongju. Grain size characteristics of surface sediments at the eastern margin of Ulan Buh Desert under the interaction of wind and water [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(4):139-147.

[26] 马泽,蒙仲举,罗建国,等.乌兰布和沙漠典型沿黄段格状沙障防风固沙效应[J].水土保持通报,2024,44(2):1-10,21.
Ma Ze, Meng Zhongju, Luo Jianguo, et al. Wind-prevention and sand fixation effects of checkerboard sand barrier along typical Yellow River bank in Ulan Buh Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):1-10,21.

[27] 韦朝.芦苇方格沙障内部积沙形态演化的野外观测[J].中国农业科技导报(中英文),2024,26(11):204-209.
Wei Chao. Field observation on evolution of sand accumulation pattern in reeds checkerboard sand barrier [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024,26(11):204-209.

[28] 朱泊年,党晓宏,蒙仲举,等.乌珠穆沁沙地聚乳酸纤维沙袋沙障地表蚀积特征[J].中国农业科技导报(中英文),2024,26(8):180-188.
Zhu Bonian, Dang Xiaohong, Meng Zhongju, et al. Characteristics of surface erosion and deposition of sandbag sand barriers in Ujimqi sandy land [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024,26(8):180-188.

[29] 王艺钊,原伟杰,丁国栋,等.聚乳酸(PLA)沙障凹曲面及沉积物粒度特征研究[J].干旱区地理,2020,43(3):671-678.
Wang Yizhao, Yuan Weijie, Ding Guodong, et al. Concave surface features and grain-size characteristics in polylactic acid sand barrier [J]. Arid Land Geography, 2020,43(3):671-678.

[30] 李敏岚,屈建军,唐希明,等.高密度聚乙烯(HDPE)蜂巢式沙障对土壤水分的影响[J].中国沙漠,2020,40(1):136-144.
Li Minlan, Qu Jianjun, Tang Ximing, et al. Influence of HDPE honeycomb sand fixation on soil moisture [J]. Journal of Desert Research, 2020,40(1):136-144.

[31] 成聪聪,闫德仁,海春兴.PLA沙障对沙丘迎风坡土壤水分的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(3):176-181.
Cheng Congcong, Yan Deren, Hai Chunxing. Effect of PLA sand-barrier on soil moisture of windward slope of dunes [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016,30(3):176-181.

[32] 宋达成,马全林,刘世权,等.民勤黏土沙障-人工梭梭林物种多样性及土壤水分变化特征[J].干旱区研究,2024,41(4):618-628.
Song Dacheng, Ma Quanlin, Liu Shiquan, et al. Species diversity in Minqin clay sand barrier-artificial *Haloxylon ammodendron* plantations and the characteristics of soil moisture changes [J]. Arid Zone Research, 2024,41(4):618-628.

[33] 王安宁,蔺鑫,穆枫,等.冀北木兰围场沙荒坡地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能[J].北京林业大学学报,2018,40(1):98-107.
Wang Anning, Lin Xin, Mu Feng, et al. Water holding capacity of litter at different slope positions of sand slope in *Salix gordejevi*i sand barrier of Mulan Paddock of northern Hebei Province, northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018,40(1):98-107.