

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.031

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.031

窦婷婷,牛健植,李金源,等.防护林葡萄园复合配置防风固沙效应的风洞模拟[J].水土保持学报,2026,40(5):429-441.

Dou Tingting, Niu Jianzhi, Li Jinyuan, et al. Wind tunnel simulation of windbreak and sand fixation effect of compound configuration of shelterbelt vineyard[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 429-441.

防护林葡萄园复合配置防风固沙效应的风洞模拟

窦婷婷^{1,2}, 牛健植^{1,2,3}, 李金源^{1,2}, 豆海冬^{1,2}, 王 储^{1,2}, 左 忠^{4,5}

(1.北京林业大学水土保持学院,水土保持国家林业和草原局重点实验室,北京 100083; 2.林业生态工程教育部工程研究中心,北京 100083; 3.林木资源高效生产全国重点实验室,北京 100083; 4.宁夏农林科学院林业与草地生态研究所,银川 750002; 5.防沙治沙与水土保持宁夏重点实验室,银川 750002)

摘 要: [目的] 针对宁夏贺兰山东麓葡萄产区风蚀的问题,开展风洞模拟试验研究,比较不同防护模式的防风效能和固沙效应。[方法] 基于风洞试验数据,在 12 m/s 来流条件下设置外围防护林措施(A 组)、葡萄园内部措施(B 组)及防护林-葡萄园复合配置(C 组)3 类模式,开展不同配置下的相对风速流场、平均防风效能、近地表防风效能、输沙率、固沙效应及风沙流垂向分布的特征研究。[结果] 1) A 组外围防护林中,弱风区和极减速区的范围整体表现为乔灌型≈乔乔型>纯乔型>纯灌型; B 组在近地表保持稳定的低风速分布。2) C 组防护林-葡萄园复合措施兼具二者优势,平均防风效能和近地表防风效能整体高于 A 组和 B 组。其中, C-乔灌型的近地表防风效能优于 C-纯乔型和 C-乔乔型。3) C 组复合配置中,部分外围林带为乔灌型时,复合配置后固沙效应进一步提升。外围林带为纯乔型或乔乔型时,复合后固沙效应下降。4) A 组风蚀物集中在 8 cm 范围内的近地层, B 组中垂直型及复合型输沙峰值上移至 4~12 cm, C 组分布更均衡。[结论] 葡萄园防风固沙配置应构建多层次、结构匹配的复合体系。外围防护林优先选择乔灌复合型,园内措施优先采用葡萄/挂枝+留草组合。研究结果可为干旱区葡萄园防护体系优化提供理论依据。

关键词: 风洞试验; 防风固沙; 气流场; 输沙量; 葡萄园

中图分类号: S727.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0429-13

Wind Tunnel Simulation of Windbreak and Sand Fixation Effect of Compound Configuration of Shelterbelt Vineyard

Dou Tingting^{1,2}, Niu Jianzhi^{1,2,3}, Li Jinyuan^{1,2}, Dou Haidong^{1,2}, Wang Chu^{1,2}, Zuo Zhong^{4,5}

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of State Forestry and Grassland Bureau, Beijing, 100083, China; 2.Engineering Research Center of Ministry of Education, Forestry Ecological Engineering, Beijing, 100083, China; 3.State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing, 100083, China; 4.Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 5.Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Ningxia Yinchuan 750002, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problem of wind erosion in the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia, wind tunnel simulation tests were carried out to compare the wind protection efficiency and sand fixation effect of different protection modes. [Methods] Based on the data of wind tunnel test, three types of modes were set up under the condition of 12 m/s incoming flow, including peripheral shelterbelt measures (Group A), vineyard internal measures (Group B) and shelterbelt vineyard composite configuration (Group C). The relative wind velocity flow field, average wind protection efficiency, near surface wind protection efficiency, sediment transport rate, sand fixing effect and vertical characteristics of wind sand flow under different configurations were studied. [Results]: 1) Among the peripheral shelterbelt in Group A, the weak wind zone and extreme deceleration zone

收稿日期: 2026-04-02

修回日期: 2026-05-31

录用日期: 2026-06-05

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-31

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024BBF02007); 承德国家可持续发展议程创新示范区建设科技专项(202302F008)

第一作者: 窦婷婷(1997—), 女, 博士研究生, 主要从事森林生态保护与修复研究。E-mail: 1302667100@qq.com

通信作者: 牛健植(1974—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林水文与土壤侵蚀研究。E-mail: nexk@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

ranges followed the order arbor-shrub type $\approx$ arbor-arbor type $>$ pure arbor type $>$ pure shrub type. Group B maintained a stable low wind speed distribution near the land surface. 2) The combined shelterbelt-vineyard measures in Group C possessed the advantages of both, with the average windbreak efficiency and near-surface windbreak efficiency being overall higher than those of Group A and Group B. Among these, the near-surface windbreak efficiency of the arbor-shrub type in Group C (C-arbor-shrub type) was superior to that of the C-pure arbor type and C-arbor-arbor type. 3) In the combined configurations of Group C, when part of the peripheral shelterbelt was of the arbor-shrub type, the sand fixing effect was further enhanced after combination. When the peripheral shelterbelt was of the pure arbor type or arbor-arbor type, the sand fixing effect decreased after combination. 4) In Group A, the wind-eroded material was concentrated in the near-surface layer within 8 cm, whereas in Group B the sand transport layer expanded to 4—12 cm, and Group C exhibited a more balanced distribution. [Conclusion] The windbreak and sand-fixing configuration for vineyards should establish a multi-layered, structurally matched composite system. For peripheral shelterbelts, an arbor-shrub composite type should be prioritized, while for within-vineyard measures, the grapevine/branch-hanging plus grass-covering combination should be given priority. The research results provide a theoretical basis for optimizing vineyard protection systems in arid regions.

Keywords: wind tunnel test; windbreak and sand fixation; airflow field; sediment discharge; vineyard

Received: 2026-04-02

Revised: 2026-05-31

Accepted: 2026-06-05

Online(www.cnki.net): 2026-08-31

土壤风蚀是驱动干旱半干旱区土地退化和荒漠化发展最重要最直接的作用力,也是影响农业生态系统稳定性的重要因素之一^[1]。宁夏地处我国西北干旱区,三面被腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠和毛乌素沙漠环绕,风沙活动频繁,生态环境脆弱^[2]。贺兰山东麓位于宁夏西北部,凭借冷凉气候、昼夜温差大和沙质土壤等条件,成为我国重要的酿酒葡萄优势产区之一,酿酒葡萄种植面积持续扩大,产业集聚效应显著^[3]。但该区域土壤以砂壤土和砂砾质土为主,葡萄园多垦殖于荒漠草原区,长期面临风蚀风险^[4]。目前,相较于农田和荒漠区,针对葡萄园风蚀过程的系统研究仍相对不足,难以支撑产区防风固沙体系的精准构建。因此,构建适宜的葡萄园防风固沙体系,已成为保障产区生态安全和葡萄产业可持续发展的现实需求。

葡萄园风蚀过程受气候条件、地表覆盖状况与人为扰动共同影响,这些因素随季节更替变化,导致风蚀风险在冬春季与生长季之间出现显著差异。在生长季,葡萄枝叶覆盖地表,植被覆盖度较高,能够有效降低近地表风速,抑制风蚀发生^[5]。进入冬春季之后,埋土防寒、出土上架及修剪清园等农事活动会造成地表长期裸露,使土壤结构稳定性下降并显著增强风蚀敏感性^[6]。宁夏春季干燥多风、极端干旱事件频发,在此类干旱和热风条件下,耕作扰动不仅加剧葡萄园粉尘排放与风沙输移,还使其面临土壤流失及风沙对植株器官机械损伤的风险,从而影响葡萄产量与品质^[7-8]。由此可见,分析冬春季与生长季

之间的季节差异是理解葡萄园风蚀过程动态变化的关键。然而,大多数研究都针对生长季的植被,而风沙活动强烈的冬春季,正处于农田土壤最易遭受风蚀、葡萄园地表长期裸露的时期,该时期风蚀过程与防护体系的研究仍较为缺乏^[9]。

围绕葡萄园风沙防护问题,现有研究涉及2类措施:一类是机械沙障等工程措施;另一类是植被措施,后者可归为园内防护林(如人工风障、行间留草、挂枝等)和外围防护林2个部分^[10]。人工风障、行间留草和挂枝等园内防护措施均被证实具有抑制风蚀的效果^[8,11-12]。外围防护林的完善同样可显著减少园地风蚀量^[13]。已有治理实践^[14]表明,农田风蚀防控需将防护林建设与地表覆盖调控等措施进行协同推进。而现有研究^[15-17]多集中于单一措施的参数优化,如防护林的带距、密度、配置方式及植株形态等,或草本的高度、覆盖度等对防风固沙效应的影响。尽管已有研究^[18]同时涉及农田防护林和保护性耕作等防护措施,但仍是对不同防护措施的分别评价,对葡萄园内部防护措施与外围防护林之间的复合配置效应缺乏系统研究。

综上,尽管已有研究在葡萄园风蚀防护方面积累了一定认识,但仍存在研究空白。第一,针对葡萄园这一特定土地利用类型的系统研究仍较薄弱;第二,风蚀风险在冬春季与生长季之间差异显著,而面向不同风险季节的差异化防护策略尚未得到充分关注;第三,现有研究多聚焦于单一措施的效应评价,对园内措施与外围防护林之间的复合配置效应缺乏

进一步探讨。上述问题在宁夏贺兰山东麓均存在。该区域风沙活动频繁,葡萄园管理具有显著的季节性扰动特征,单一措施难以满足全年不同季节的防护需求,而复合配置的结构匹配规律尚不明确。

基于此,本研究以宁夏贺兰山东麓葡萄园为对象,采用风洞模拟试验,构建外围防护林措施、葡萄园内部措施及其复合配置 3 类模式,重点分析不同配置下的气流场变化、防风效能、输沙率、固沙效应及风沙流垂向分布特征。研究旨在揭示不同防护模式的作用差异,明确外围防护林、灌木层、葡萄枝蔓及行间留草等措施在葡萄园防风固沙体系中的功能,为宁夏葡萄园防风固沙配置优化提供理论依据和实践参考,对保障产区生态安全、提升葡萄产业可持续发展能力具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验设备

风洞试验于北京林业大学鹫峰试验林场风沙物理实验室的直流式风洞内完成,该风洞由驱动系统、洞体和测控系统组成,全长 24.5 m。洞体依次包括风扇段、过渡段、稳定段、收缩段和扩散段,其中主要试验段长度为 12 m,横截面尺寸为 0.6 m×0.6 m。设备可在 3~40 m/s 范围内实现连续风速调节,试验段风速脉动率控制在 1.5% 以内,雷诺数约为 10⁵~10⁶。风洞两侧壁边界层厚度约为 0.05 m,底板边界层厚度约为 0.25 m,能够保证试验模型整体处于边界层范围内,从而满足风洞模拟试验要求^[19]。

1.2 林带设计及试验材料

本研究在宁夏典型葡萄种植区开展实地调查,并结合已有资料确定试验模型参数。选取刺槐和樟子松作为乔木树种,柠条作为灌木,黑麦草作为草本植被。葡萄园内部植株参数(株行距、高度、疏透度等)通过现场测量获得。防护林参数则参考研究区内已建成葡萄园的调查结果,获取主要植被的种类组成、株行距、树高、枝下高和冠幅等指标。按照 1:100 比例缩小模型,即葡萄、樟子松、刺槐、黑麦草和柠条锦鸡儿的模型高度设置为 2.0、4.0、7.0、0.5、2.0 cm,樟子松和刺槐的枝下高分别为 1.0、2.0 cm,冠幅分别为 2.0、3.0 cm,葡萄、黑麦草和柠条锦鸡儿的宽度分别为 0.5、2.0、1.5 cm。

根据调查结果,共设置防护林措施 11 种、葡萄园措施 7 种、防护林-葡萄园复合配置 18 种,合计 36 种配置(表 1),并以裸地为对照。其中,防护林设置为 4 行品字形配置,刺槐和樟子松株行距均为 3 cm×3 cm,柠条配置于株间。葡萄株行距为 1.0 cm×3.5 cm,内部设置葡萄、挂枝、盖枝、留草及其组合等季节性措施。

其中,挂枝指冬季修剪枝条不清园并悬挂于葡萄架形成枝条风障。在宁夏葡萄园采用照相法测得挂枝疏透度为 0.58。进入生长季后,葡萄枝叶疏透度约为 0.78。盖枝指将修剪枝条覆盖于地表形成覆盖层。留草处理参考当地葡萄园行间生草模式设置。盖枝、留草及其复合处理的覆盖度均设为 0.60。

表 1 防风固沙配置类型				
Table 1 Windbreak and sand-fixation configuration types				
植被措施	序号	配置名称	结构类型	季节
防护林措施	A1	樟子松	纯乔型	全年
	A2	刺槐	纯乔型	夏秋
	A3	无叶刺槐	纯乔型	冬春
	A4	柠条	纯灌型	全年
	A5	樟子松+柠条	乔灌型	全年
	A6	樟子松+刺槐	乔乔型	夏秋
	A7	樟子松+无叶刺槐	乔乔型	冬春
	A8	刺槐+柠条	乔灌型	夏秋
	A9	无叶刺槐+柠条	乔灌型	冬春
	A10	樟子松+刺槐+柠条	乔灌型	夏秋
	A11	樟子松+无叶刺槐+柠条	乔灌型	冬春
葡萄园措施	B1	留草	平铺型	全年
	B2	葡萄	垂直型	夏秋
	B3	挂枝	垂直型	冬春
	B4	盖枝	平铺型	冬春
	B5	挂枝+留草	平铺+垂直	冬春
	B6	盖枝+留草	平铺型	冬春
	B7	葡萄+留草	平铺+垂直	夏秋
葡萄园防护林体系	C1	刺槐+樟子松+葡萄+留草	乔乔型	夏秋
	C2	无叶刺槐+樟子松+挂枝+留草	乔乔型	冬春
	C3	无叶刺槐+樟子松+盖枝+留草	乔乔型	冬春
	C4	刺槐+樟子松+柠条+葡萄+留草	乔灌型	夏秋
	C5	无叶刺槐+樟子松+柠条+挂枝+留草	乔灌型	冬春
	C6	无叶刺槐+樟子松+柠条+盖枝+留草	乔灌型	冬春
	C7	樟子松+葡萄+留草	纯乔型	夏秋
	C8	樟子松+挂枝+留草	纯乔型	冬春
	C9	樟子松+盖枝+留草	纯乔型	冬春
	C10	刺槐+葡萄+留草	纯乔型	夏秋
	C11	无叶刺槐+挂枝+留草	纯乔型	冬春
	C12	无叶刺槐+盖枝+留草	纯乔型	冬春
	C13	樟子松+柠条+葡萄+留草	乔灌型	夏秋
	C14	樟子松+柠条+挂枝+留草	乔灌型	冬春
	C15	樟子松+柠条+盖枝+留草	乔灌型	冬春
	C16	刺槐+柠条+葡萄+留草	乔灌型	夏秋
	C17	无叶刺槐+柠条+挂枝+留草	乔灌型	冬春
	C18	无叶刺槐+柠条+盖枝+留草	乔灌型	冬春

1.3 指标测定

1.3.1 风速流场测定 综合考虑宁夏风沙活动特征及风洞模拟研究中常用风速设置,最终选取 12 m/s 作为典型来流风速。在该风速条件下,风沙流能够稳定形成,且不同防护配置之间的防风固沙效果差异较为明显。以刺槐模型高度($H=7$ cm)为水平方向尺度基准,将防护林带与葡萄园交界处设为参考零点(0H)。沿主风向布设-2H、0H、1H、2H、4H、6H、8H、12H、14H、16H 和 20H 共 11 个风速测点,以表征防护林前后及葡萄园内部风速的变化过程。垂直方向设置 1、2、4、8、14、30 cm 共 6 个测点,以覆盖

近地表层、草灌层、葡萄冠层及乔木冠层以上区域。各测点风速单点记录时长为 20 s,记录频率为 2 s。

1.3.2 风沙流测定 采用固定式集沙仪测定不同配置下的输沙特征。集沙仪布设于试验段中轴线下风向,高 20 cm,入口截面为 2 cm×2 cm。试验前将筛分后的沙样均匀铺设于风洞试验段,沙床厚度为 10 cm,并于每次试验前整平沙面,以保证供沙条件一致。吹蚀时间为 3 min。吹蚀结束后取出集沙盒,采用精度为 0.001 g 的电子天平称量集沙量,裸地处理作为对照,用于比较不同植被配置的固沙效应。具体的试验布设见图 1。

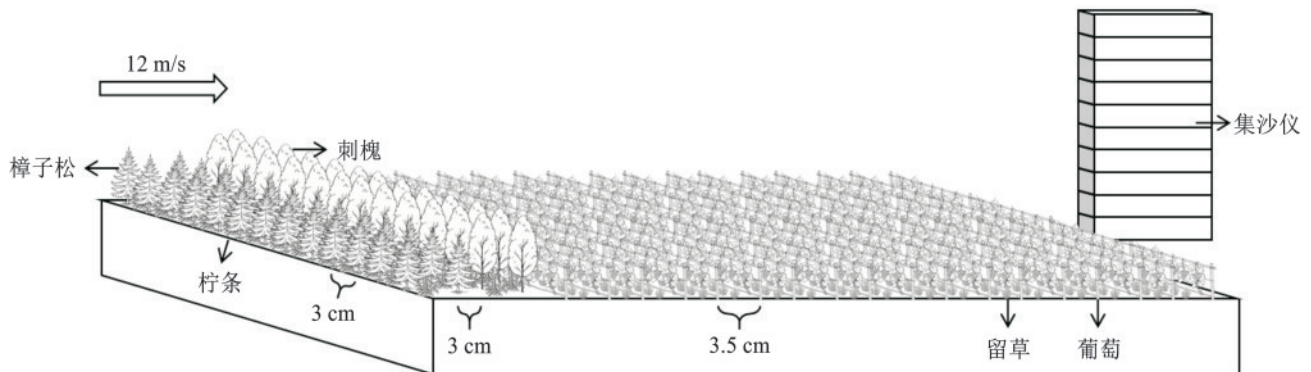


图 1 风洞试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel test

1.4 数据分析

1.4.1 防风效能 防风效能,又称防风效应或风速减弱系数,是评价林带或防护措施防风能力的基本指标,它反映防护结构对近地表气流的削弱程度,是判断防护效果最直观的参数之一^[6]。

$$E_{x,y} = \frac{U_{0,y} - U_{x,y}}{U_{0,y}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E_{x,y}$ 为坐标(x,y)处的防风效能,%; $U_{x,y}$ 为坐标(x,y)处的平均风速,m/s; $U_{0,y}$ 为无植被对照组的风速,m/s。

1.4.2 输沙率 风沙流输沙率定义为单位时间内、通过单位宽度或单位时间的风蚀物质量^[20]。

$$R = \frac{W}{S \times T} \quad (2)$$

式中: R 为输沙率,g/(cm²·min); T 为吹蚀时间,min; S 为集沙仪进沙口截面积,cm²,本研究为 4 cm²; W 为集沙仪各层收集的沙样质量,g。

1.4.3 固沙效应 固沙效应,也称风蚀抑制效率(K),为裸地的风蚀量(Z_0)和不同植被配置下的风蚀量(Z_1)的差值除以裸地的风蚀量(Z_0)的比值^[21]。

$$K = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K 为固沙效应,%; Z_0 、 Z_1 分别为对照组裸地和不同配置下的总输沙量,g。

2 结果与分析

2.1 风速流场变化

在 12 m/s 来流条件下,不同防风固沙配置风速区的水平范围和垂向分布存在显著差异。根据已有研究^[16],林带背风侧流场可划分为加速区($U/U_0 > 1$)、弱风区($U/U_0 < 0.7$)和极减速区($U/U_0 < 0.4$)。林带前风速较高,气流进入林带后风速骤降,在背风侧近林处达到最低值,随后逐渐回升,至一定距离后恢复至林前水平。

图 2 为 A 组防护林措施的风速流场,其弱风区水平范围表现为乔灌型(10~16H)≈乔乔型(12~15H)>纯乔型(12~13H)>纯灌型(约 11H)。极减速区表现为乔灌型(7~11H)≈乔乔型(8~10H)>纯乔型(6~8H)>纯灌型(约 5H)。乔乔型通过乔木组合增加冠层的垂直层次,乔灌型通过灌木填补乔木的枝下空间,二者均扩大气流受阻的范围。纯灌型因植株矮小,防护范围最为有限。从垂直方向来看,弱风区与极减速区的范围与植株高度呈正相关,此规律也适用于其他类型。含刺槐的配置风速最低的位置并不紧贴地表层,而在冠层高度。冠层枝下空间大,气流在冠层前受阻减速,部分气流从近地表穿透,导致中层风速低于地表层。

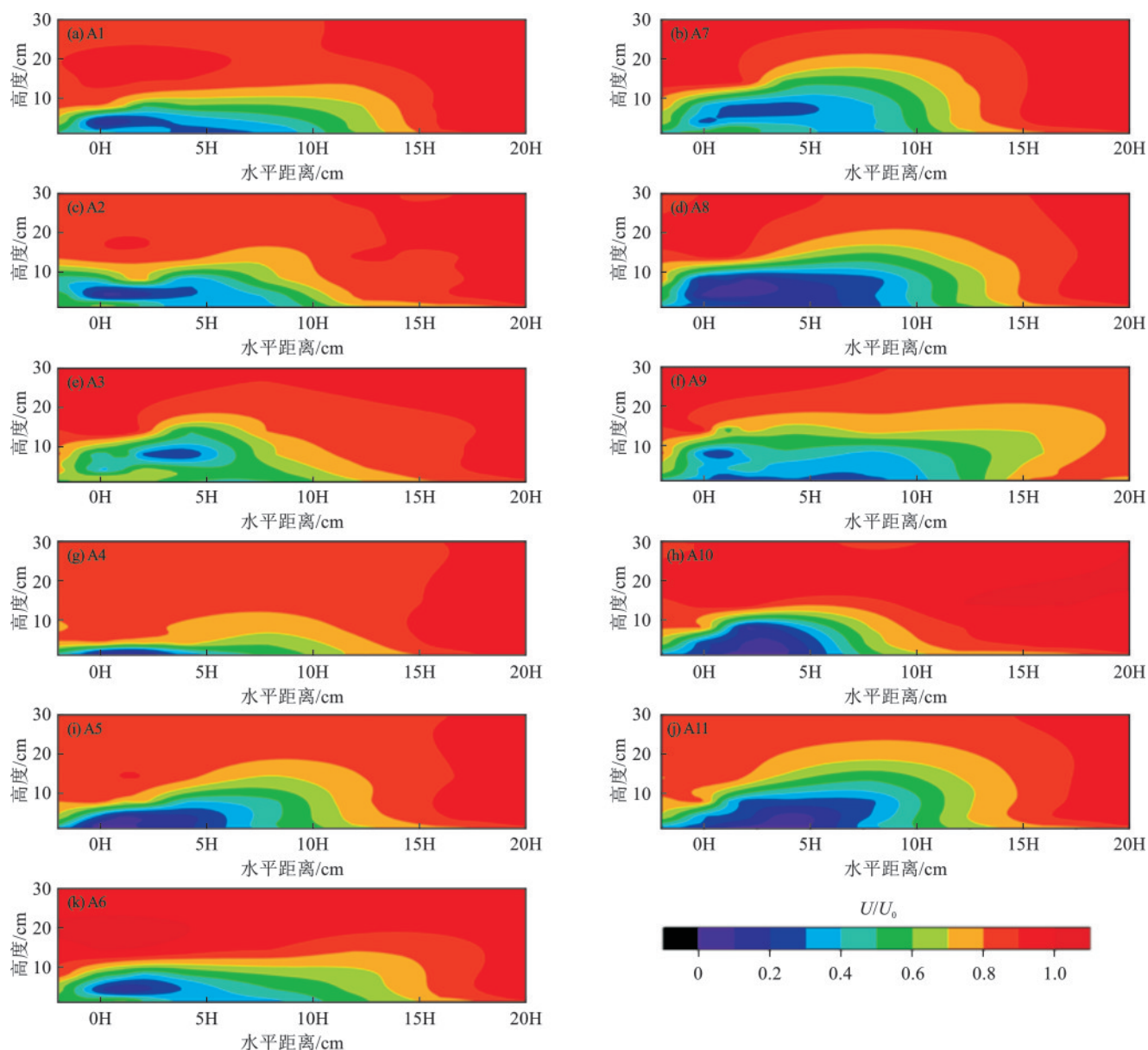


图2 防护林措施风速流场变化特征

Fig.2 Variation characteristics of wind speed and flow field in shelterbelts

B组葡萄园措施的流场特征与A组不同,从图3可以看出,因留草或盖枝连续覆盖地表,弱风区在近地表贯穿整个观测范围。平铺型弱风区最高点为3~5 cm,极减速区范围极小,影响仅限于紧贴地表的薄层。垂直型和平铺+垂直复合型中,葡萄或挂枝形成立体阻挡,气流在该层受阻减速,使减速的垂直范围向上扩展,2类配置的弱风区最高点达10 cm,极减速区最高点为4~5 cm。C组复合配置兼具外围林带与葡萄园措施的双重作用,具体见图4。所有C组配置的近地表层因葡萄园连续覆盖,弱风区和极减速区均贯穿整个观测范围,与B组近地表层特征一致。从中层来看,C组因外围林带的加入,弱风区和极减速区较A组和B组均有扩展。按外围林带结构分类,弱风区范围表现为乔乔型(刺槐+樟子松,

17.0H)>纯乔型(樟子松,16.7H;刺槐,16.0H)>乔灌型(刺槐+柠条,16.0H;刺槐+樟子松+柠条,15.3H;樟子松+柠条,14.3H)。极减速区范围表现为乔乔型(刺槐+樟子松,11.3H)>乔灌型(刺槐+樟子松+柠条,10.3H)>纯乔型(刺槐,10.0H)>乔灌型(刺槐+柠条,9.3H;樟子松+柠条,9.0H)>纯乔型(樟子松,9.0H)。与对应A组相比,C组中层弱风区范围增加1~8H,极减速区范围增加0~6H,弱风区的增益幅度大于极减速区。C组部分配置,如C-纯乔型的C8、C9、C11、C12,C-乔乔型的C3,以及C-乔灌型中的C17、C18等,出现双层减速现象,防护林配置中的A9也存在这种现象。这些配置的共同特点是存在2个不同高度的阻挡层,形成双层减速。近地层结构较完整的配置则不存在该现象。

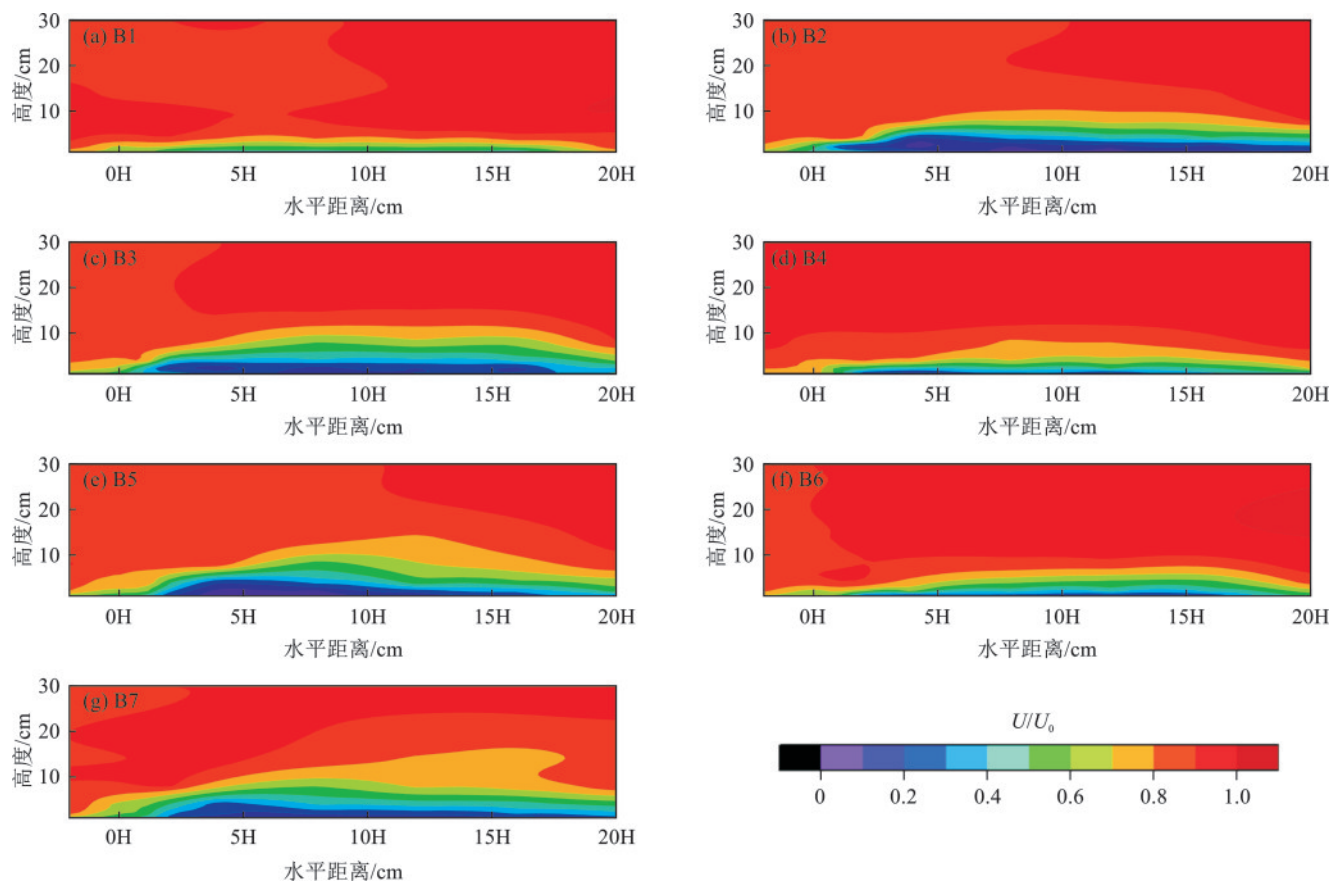


图3 葡萄园措施风速流场变化特征

Fig.3 Variation characteristics of wind velocity field in vineyard

2.2 防风效能

由表2可知, A组中平均防风效能为乔灌型(40.3%)>乔乔型(32.1%)>纯乔型(30.3%)>纯灌型(28.5%)。近地表防风效能为乔灌型(59.1%)>纯灌型(52.5%)>乔乔型(41.4%)>纯乔型(40.4%)。乔灌型的防风效能高于其他类型,且其内部最低值A10(平均35.3%,近地表56.9%),仍高于纯乔型的最高值A1(平均32.8%,近地表48.1%)。说明乔灌型在防风效能上具有一致的优势。与上节的风速流场特征一致,乔灌型中灌木填补乔木层下方的空隙,使近地表冠层连续性增强,气流在近地表已被充分减速。纯乔型中刺槐枝下空间大,气流从近地表穿透,近地表减速有限。

B组的平均防风效能中,垂直型(39.1%)≈平铺+垂直复合型(39.0%)>平铺型的平均值(25.1%)。近地表防风效能方面,垂直型(73.4%)>复合型(70.6%)>平铺型(52.1%)。垂直型和复合型的平均防风效能相近,近地表防风效能也处于同一水平,可认为2类配置的防风效果基本相当。

C组中,按外围林带结构归类,C-乔灌型平均防风效能(49.3%)>C-乔乔型(46.5%)>C-纯乔型(44.3%)。近地表防风效能方面,C-乔灌型

(82.1%)>C-纯乔型(75.7%)>C-乔乔型(73.8%)。C-乔灌型的平均值均高于其他类型,其中C14显著高于其他类型,平均防风效能为55.1%,近地表防风效能为87.7%。C组与对应的A组相比,各类型的平均防风效能和近地表防风效能均有显著提升,C-乔灌型提升幅度最大,平均防风效能较A组乔灌型提升9.8%,近地表防风效能提升23.0%。与B组相比,C组的近地表防风效能也普遍高于B组垂直型和复合型,表明外围林带与园内措施结合后防风效应进一步提升。

2.3 输沙率与固沙效应

对照组裸地的输沙率为6.21 g/(cm²·min),其他配置的输沙率与固沙效应见表3。3类处理中,A组输沙率整体最高,平均为3.16 g/(cm²·min),固沙效应约50.00%。B组输沙率平均值为0.99 g/(cm²·min),固沙效应约85.00%。C组输沙率平均值为1.03 g/(cm²·min),固沙效应约88.00%。固沙效应与近地表防风效应完全一致,均为C组>B组>A组。按全部配置排序,输沙率最低的前5个配置中,前4位均为C-乔灌型(C13、C17、C14、C5),固沙效应分别达94.99%、94.75%、94.37%和93.53%,第5位为B5,为92.75%。

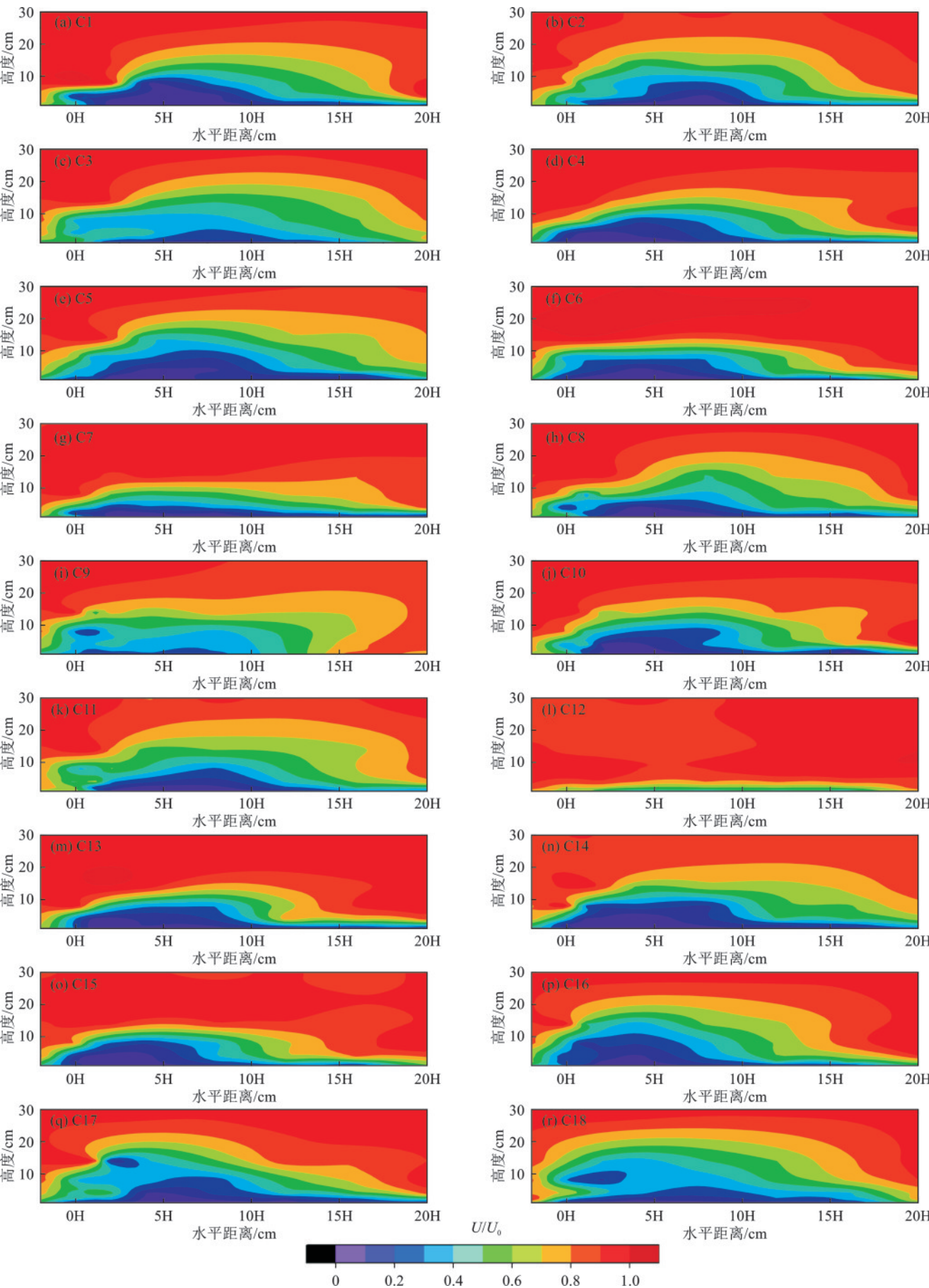


图 4 防护林-葡萄园复合措施风速流场变化特征
Fig.4 Variation characteristics of wind speed and flow field in shelterbelt vineyard compound measures

表 2 不同配置的防风效能
Table 2 Windbreak benefits of different configurations
%

序号	平均防风效能	近地表防风效能	序号	平均防风效能	近地表防风效能
A1	32.81	48.06	C1	47.45	80.63
A2	31.93	40.88	C2	47.04	75.47
A3	26.23	32.32	C3	44.87	65.32
A4	28.49	52.45	C4	50.04	84.99
A5	37.72	60.13	C5	53.34	83.72
A6	31.45	42.90	C6	46.60	80.88
A7	32.72	39.89	C7	44.28	83.65
A8	44.68	60.13	C8	46.98	76.77
A9	41.72	57.03	C9	40.48	71.00
A10	35.27	56.94	C10	46.75	77.43
A11	41.98	61.36	C11	47.04	74.41
B1	20.46	41.87	C12	40.17	64.58
B2	40.12	76.81	C13	46.11	84.34
B3	38.05	69.99	C14	55.11	87.68
B4	27.15	57.29	C15	46.70	78.73
B5	39.02	71.16	C16	51.23	78.76
B6	27.66	57.21	C17	50.48	82.70
B7	39.01	69.97	C18	51.89	78.63

表 3 不同配置的输沙率与固沙效应
Table 3 Sediment transport rate and sand fixing effect

序号	输沙率/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	固沙 效应/ %	序号	输沙率/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	固沙 效应/ %
A1	4.73	23.85	C1	1.91	69.33
A2	3.71	40.24	C2	1.05	83.16
A3	3.13	49.60	C3	1.41	77.25
A4	2.40	61.37	C4	0.93	84.98
A5	3.14	49.42	C5	0.40	93.53
A6	3.55	42.80	C6	0.69	88.84
A7	3.02	51.43	C7	1.06	82.96
A8	2.70	56.57	C8	0.90	85.55
A9	1.80	71.02	C9	1.58	74.51
A10	4.46	28.18	C10	1.76	71.69
A11	2.07	66.65	C11	1.27	79.54
B1	2.14	65.55	C12	2.52	59.44
B2	0.60	90.33	C13	0.31	94.99
B3	0.79	87.26	C14	0.35	94.37
B4	1.61	74.01	C15	1.12	81.91
B5	0.45	92.75	C16	0.51	91.83
B6	0.76	87.83	C17	0.33	94.75
B7	0.61	90.25	C18	0.49	78.63

A 组中,纯乔型、纯灌型、乔乔型和乔灌型的平均固沙效应分别为 37.9%、61.4%、47.1% 和 54.4%。乔灌型均值最高,但内部差异显著,A9(无叶刺槐+柠条)达 71.0%,A11(樟子松+无叶刺槐+柠条)为 66.7%,而同为乔灌型的 A10(樟子松+刺槐+柠条)仅 28.2%。A10 的平均防风效能和近地表防风效能虽低于 A9 和 A11,但差距并不悬殊,而固沙效应的差距却较为显著。表明防风效能与固沙效应并非完全线性相关。结合 2.1 节风速流场分析,A10 弱风区范围较小、防护距离缩短,固沙效应因而受限。相比之下,A9 和 A11 弱风区范围较大、防护距离延长,固沙效应也随之提高。由此可见,乔灌复合的固沙效应不仅取决于层次叠加,更取决于冠层疏密程度对防护距离的调控。

B 组因留草、盖枝、葡萄、挂枝的连续覆盖,近地表弱风区贯穿整个观测范围。复合型(91.5%)和垂直型(88.8%)的固沙效应明显优于平铺型(75.8%)。平铺型仅在地表层形成连续覆盖,影响高度有限,无法拦截被抬升至中层的沙粒,而垂直型在较高处形成立体阻挡,能有效拦截被抬升的沙粒,因此固沙效应显著提升。

C 组中乔灌型的固沙效应平均值为 88.8%,C-纯乔型为 75.5%,C-乔乔型为 76.6%。C-乔灌型的平均固沙效应明显高于其他 2 类。将 C 组与其对应的 A 组比较发现,并非所有复合配置在加入外围林带后都表现出更高的固沙效应,仅 C5、C6、C13、C14、C16、C17 和 C18 呈进一步提升,这些均属于 C-乔灌型。由此可知,C-纯乔型和 C-乔乔型固沙效应较低的原因在于缺乏灌木填补近地表空隙。该类配置以刺槐为主,冠层以下枝条稀疏、孔隙度大,气流在此处被压缩加速,带走更多沙粒,因此固沙效应低于 C-乔灌型。

2.4 输沙率随高度变化特征

相同风速(12 m/s)条件下,不同配置的风沙流在垂直方向上多数情况下呈现随高度增加而逐渐减弱的规律(图 5、图 6)。A 组输沙率主要集中于 0~4 cm 层,占比 52.7%~76.2%,符合经典风沙流指数衰减规律。根据结构类型分析,纯乔型占比 52.7%~69.2%,纯灌型占比 75.8%,乔乔型占比 63.6%~71.7%,乔灌型占比 64.5%~76.2%。防护林虽能降低风速,但水平防护距离有限,至后方空旷地表风速恢复,风沙流恢复为近地表跃移、蠕移主导型。B 组拟合类型出现分化。平铺型通过地表覆盖抑制近地表沙粒起动,使风沙流转变为近地表受限型,0~4 cm 层占比降至 33.9%~55.2%,其输沙率随高度变化仍

符合指数衰减关系,说明风沙流结构仍以近地表集中为主。垂直型及复合型,则在抑制近地表起动的

风沙流转变为中层扩展型,峰值上移至4~12 cm层,其输沙率随高度变化更适合二次函数拟合,能够较好地刻画“先增后减”的垂向分布特征。

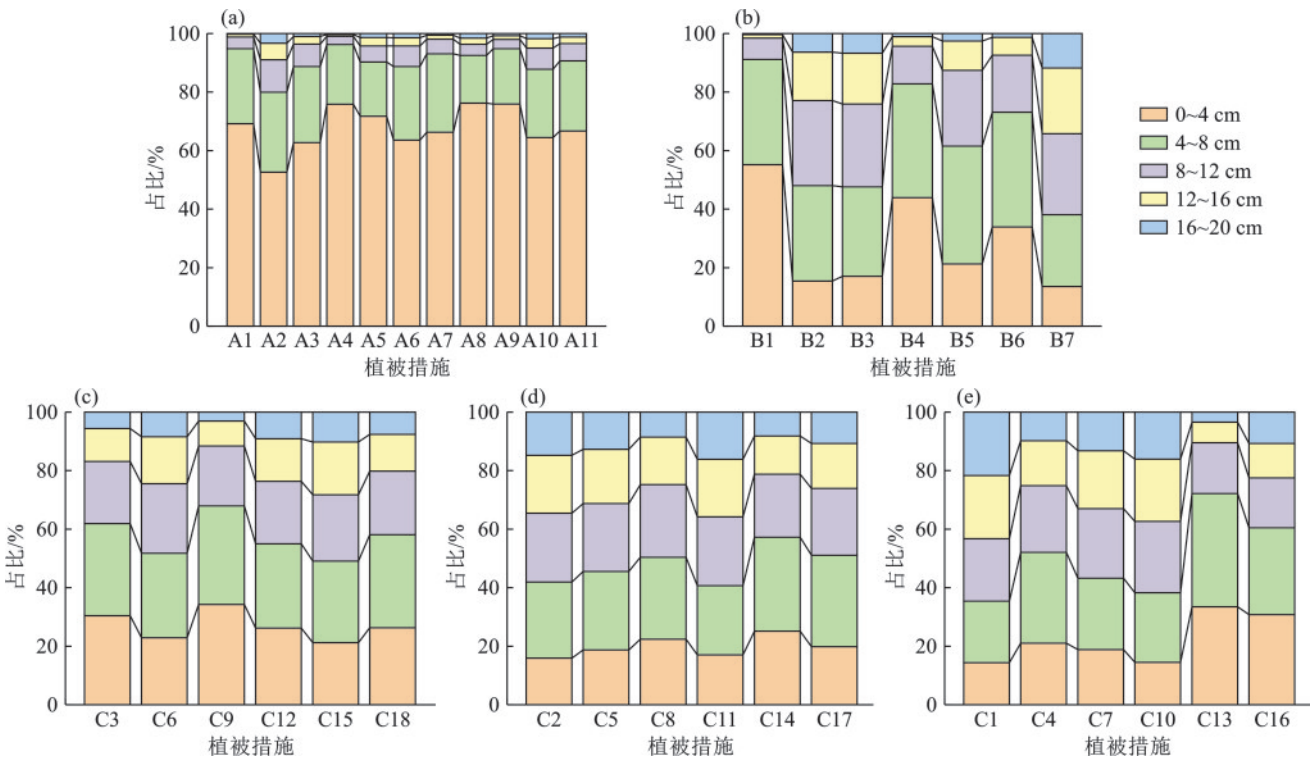


图 5 输沙率垂直分布比例
Fig. 5 Vertical distribution proportion of sediment transport rate

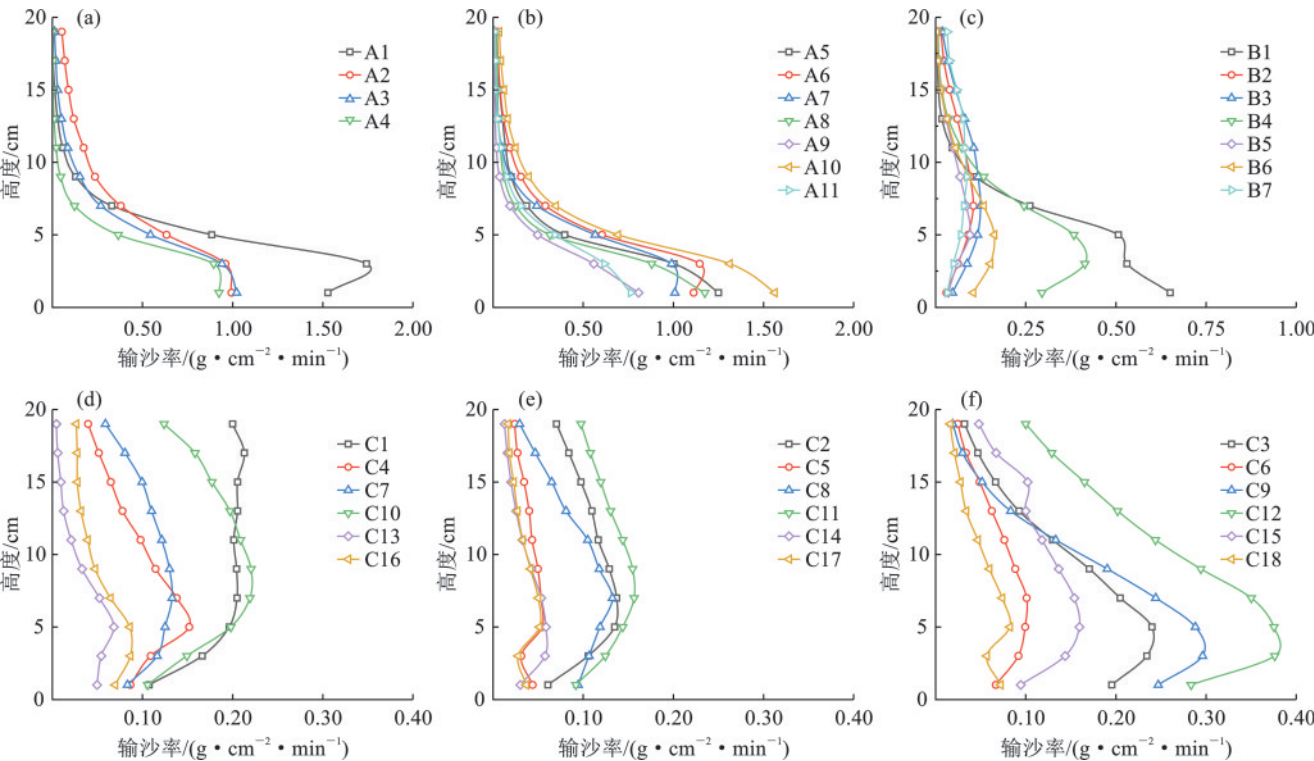


图 6 不同措施输沙率随距地表高度的变化
Fig. 6 Variation of sediment transport rate of different measures with height from the surface

C 组中,风沙流结构主要由葡萄园措施类型决定,而非外围林带结构,不同葡萄园措施的风沙流结

构分异明显。盖枝类(C3、C6、C9、C12、C15、C18)呈指数衰减型,0~4、4~8 cm 合计占比 57.3%,与 B

组平铺型规律一致。盖枝属于地表覆盖型措施,但对气流垂向结构的改变有限,因此风沙流仍保持近地表集中特征。挂枝类(C2、C5、C8、C11、C14、C17)呈象鼻型,0~4 cm 占比降至 19.8%,峰值上移至 4~12 cm 层。挂枝属于直立型障碍物,通过机械阻挡扰动气流,将近地表沙粒抬升至更高层输移,与 B 组垂直型规律一致。葡萄类(C1、C4、C7、C10、C13、C16)内部形态多样。其中 C1(樟子松+刺槐+葡萄+留草)垂向分布最为均匀,5 个高度层占比分别为 14.4%、21.1%、21.3%、21.6%、21.7%,输沙层已扩展至 20 cm 高度;C4、C7、C10 呈象鼻型,峰值位于 4~12 cm 层;C13、C16 则呈指数衰减型,0~4 cm 占比分别为 33.5% 和 30.8%,可能与柠条的低矮结构改变近地表流场有关。

3 讨论

研究表明,不同防护模式在防风固沙效果上的差异,实质上反映防护结构对近地表流场和风沙流垂向分布的不同调控。防护结构的冠层连续性和枝下空间大小,决定弱风区和极减速区的水平延伸距离和垂直高度范围,进而影响防风效能。一般而言,弱风区范围越大、垂直高度越高,防风效能(尤其是近地表防风效能)越高。然而,防风效能与固沙效应并非简单的线性关系,这是因为固沙效应不仅取决于风速降低的幅度,还取决于风速降低的持续距离,而风速的垂向分布会进一步影响输沙率的垂向分布。

外围防护林主要通过削弱来流并在背风侧形成低风速区发挥作用。已有研究^[22]表明,乔灌混交林的防护效应通常优于纯林配置。乔木林带对气流干扰有较强的抵抗力,但其保护范围主要体现在树冠层,近地表效果较差。由灌木组成的防护带在有效高度内具有良好的保护效果,与已有研究^[23]结果一致。气流受阻后易从乔木下部穿过,形成局部加速现象,从而削弱近地表防护作用^[24]。本研究中,A 组不同配置间防风效能波动较大,且输沙活动主要集中于 0~8 cm 范围内,说明单一外围林带虽然能够形成一定范围的弱风区,但其低层防护能力明显受枝下高和下层结构完整性制约。外围林带的作用不仅取决于植被高度,更与其下层结构的连续性密切相关。

与上述防护林配置相比,B 组葡萄园内部配置的优势更多体现在连续、大面积覆盖条件下对近地层风速和地表输沙的持续控制。葡萄枝蔓、挂枝及留草等措施在空间上贯穿整个葡萄园内部,其较高的近地表防风效能和固沙效应,与这种连续覆盖特征

密切相关。植被覆盖增加后,不仅总输沙通量下降,风沙流在垂向上的分布也发生变化^[25]。风沙流结构曲线也不再遵循单一的指数函数分布规律^[26]。本研究中,B 组主要输沙层由 A 组的 0~8 cm 扩展至 4~12 cm,说明连续覆盖结构不仅抑制近地表输沙,还改变沙粒在垂向上的分配方式。类似地,Zhang 等^[27]研究发现,复合植被覆盖条件下输沙垂向分布可呈“C”形特征,表明植被结构复杂度增加后,风沙流在垂向上的组织方式会被重塑。

复合配置(C 组)的结果进一步揭示防护体系中结构匹配的重要性。总体上,C 组在平均防风效能、近地表防风效能、输沙率和固沙效应方面表现较好,但并非所有外围林带+园内措施的复合组合都能进一步提高固沙效应。结果显示,仅部分组合在对应的 B 组基础上实现进一步增效,且这些优势配置(C5、C6、C13、C14、C16、C17、C18)都包含柠条等下层补充结构。说明外围防护林的加入并不必然增强园内固沙作用,关键在于林带削弱来流后形成的流场,能否与园内低层防护结构形成有效衔接。王茂林等^[28]在联合沙障研究中指出,防护效应并非简单取决于单一措施本身,而与前后结构之间的功能分工和空间叠加密切相关。由此可见,复合配置的优势并不在于简单增加一道防护结构,而在于通过合理的层次配置实现来流削弱、低层补充和园内稳沙的连续衔接,从而提高整体防风固沙效应。A 组中 A10(樟子松+刺槐+柠条)3 层结构虽层次最丰富,但其固沙效应仅 28.2%。原因是林冠过于密集,气流被完全抬升绕过,弱风区范围缩小。说明复合配置的优势并不意味着层次越多越好,层次之间需要保留适当的透风空隙,过密的结构反而削弱近地表防护效果。

从应用角度看,葡萄园防风固沙配置不宜追求单一措施,而应构建多层次、分工明确、结构匹配的复合体系。外围林带作为第一道减速屏障,其乔木层主要削弱来流并调整局部流场,灌木层则填补林带下部结构空隙,减弱近地层气流穿透,从而增强外围防护的完整性。园内的挂枝、盖枝、葡萄枝蔓等构成第二道防护结构,进一步调控风速和输沙过程。而行间留草等草本覆盖直接作用于地表,是抑制近地表输沙的重要低层防线。B 组结果表明,在葡萄、挂枝、盖枝基础上增加留草后,近地表防风效能和固沙效应均有提高,说明草本层是园内防护体系中不可缺失的组成部分。同时,由于防护林和葡萄园内

措施均为固定结构,无法随季节更换,需选择全年综合效果最优的配置。综合A、B、C3组全年及各季节数据,所有C组(防护林-葡萄园复合配置)的防风效能均高于对应的B组(仅园内配置),但固沙效应变化存在分异:部分C组固沙效应高于B组,部分则低于B组。其中,固沙效应较B组提升的C组,其外围林带均为含柠条的乔灌复合型,固沙效应下降的C组,其外围林带多为无柠条的纯乔型或乔乔型。基于这一试验结果,结合宁夏葡萄园风沙防治的实际需求,提出配置建议:1)若暂无条件设置外围防护林,园内措施推荐采用垂直+平铺型复合配置,夏季为葡萄+行间留草,冬春季为挂枝+行间留草。冬春季若无条件挂枝,可采用盖枝+行间留草作为替代,其近地表防风效能虽低于挂枝+留草,但仍较单纯留草有显著提升。挂枝形成立体阻挡层,留草在地表连续覆盖,能够在冬春大风季节持续抑制近地表沙粒起动。考虑到措施的连续性和管理便利,冬春季优先推荐挂枝+留草。2)若具备设置外围防护林的条件,推荐采用乔灌复合型结构(如刺槐+樟子松+柠条、樟子松+柠条、刺槐+柠条)。当外围防护林为无叶刺槐+樟子松+柠条时,与挂枝或盖枝配合,均可在冬春季获得显著的增益效果。尽管在生长季固沙效应较未设防护林时下降约5.27%,但宁夏风沙活动主要集中于冬春季,夏季风速较小、防护压力较低,因此,这一季节亏损在全年尺度上可以接受。当外围防护林为刺槐+柠条或樟子松+柠条时,配合葡萄+留草或挂枝+留草均可获得稳定的固沙效应提升,而与盖枝+留草配合则略有下降。因此,建议冬春季优先采用挂枝+留草。如果无条件配置乔灌复合型林带,则不建议单独配置纯乔型或乔乔型林带,以免削弱园内原有的防护效果。

以上建议基于本试验的缩比模型结果,实际应用中需根据当地气象条件、土壤特性及经济成本等因素进行适当调整,但结构类型的优化原则具有普适性和参考价值。需要说明的是,本研究存在的局限性为:第一,在参数设置方面,植被高度、株行距等参数均参照宁夏贺兰山东麓葡萄园及农田防护林现有配置的实测数据,未对株行距、种植密度等参数进行多水平对比。因此,本研究的主要目的在于揭示不同结构配置的防风固沙规律,而非确定最优工程参数。第二,在来流条件方面,本研究主要基于12 m/s单一风速开展风洞模拟试验,重点比较不同防护结构之间的相对差异。实际葡萄园风沙过程受自然

风速变化、风向波动、土壤含水量及季节性地表状态等多种因素共同影响,不同条件下防护配置的作用强度和流场响应可能存在差异。例如,风向与林带不垂直时,防护距离可能缩短。土壤湿度增加则抑制沙粒起动,使各配置间的固沙差异减小。第三,在模拟材料方面,风洞试验所使用的植被模拟材料,在柔性摆动特性、地表覆盖状态变化等方面,与自然条件之间仍存在一定差距。综上所述,本文结果更适用于不同防护结构防风固沙效应的相对比较与机制分析。未来可结合多风速条件、动态风向变化及长期田间观测,进一步验证不同复合配置在实际环境中的适用性与稳定性。

4 结论

1)防护结构的冠层连续性和枝下空间大小决定弱风区的水平范围和垂直高度。A组中,乔灌型水平防护距离整体优于其他类型。B组和C组因连续覆盖,弱风区在地表层贯穿整个观测范围。C组在中层(4~8 cm)的弱风区范围进一步向后延伸(12~18 H),以C-乔灌型为最优。乔木与灌木合理搭配可扩大水平防护距离,但过密(如A10)导致气流抬升绕过,削弱防护效果。

2)防风效能与气流场特征密切相关。平均防风效能排序为乔灌型>乔乔型>纯乔型>纯灌型;近地表防风效能排序为乔灌型>纯灌型>乔乔型>纯乔型。纯灌型虽然平均防风效能较低,但灌木贴近地表的防风效能显著高于纯乔型和乔乔型。B组中,垂直型和平铺+垂直复合型因立体阻挡,近地表防风效能显著高于平铺型。C组复合配置整体优于A组和B组,以C-乔灌型近地表防风效能最优。

3)固沙效应与近地表防风效能高度相关。A组中,乔灌型的固沙效应优于纯乔型和乔乔型。B组中,垂直型和平铺+垂直复合型的固沙效应显著高于平铺型。C组防护林-葡萄园复合配置的固沙效应的提升取决于外围林带与园内措施的结构匹配。当外围林带为纯乔型或乔乔型时,复合后固沙效应下降。当外围林带为乔灌复合型(含柠条)时,与园内措施复合后固沙效应才有可能获得进一步提升,尤其是当园内配合挂枝+留草措施。

4)有条件时推荐乔灌复合型林带(如刺槐+樟子松+柠条),配合挂枝+留草在冬春季增益显著。在无条件时,勿用纯乔型或乔乔型林带,以免削弱防护效果。留草覆盖是防护体系中不可或缺的组成部分。

参考文献:

- [1] 张越,陈思宇,毕鸿儒,等.干旱半干旱区农田土壤风蚀特征及参数化研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):105-117.
Zhang Yue, Chen Siyu, Bi Hongru, et al. Characteristics and parameterization of farmland soil wind erosion in arid and semi-arid areas of China: Progress and challenges [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42 (3) : 105-117.
- [2] 许馗,李谭宝,李占斌,等.宁夏风蚀气候侵蚀力时空演变及影响因素分析[J].水土保持研究,2023,30(4):217-227.
Xu Kui, Li Tanbao, Li Zhanbin, et al. Temporal and spatial evolution and influencing factors of wind erosion climatic erosivity in Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):217-227.
- [3] 黄婷,杨慧,左忠,等.宁夏酿酒葡萄种植区PM_{2.5}时空分布特征及其与气象因子的关系[J].中国农业气象,2025,46(12):1697-1707.
Huang Ting, Yang Hui, Zuo Zhong, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of PM_{2.5} in Ningxia wine grape planting area and its relationship with meteorological factors [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2025, 46(12):1697-1707.
- [4] 易志远,罗霄,王玉霞,等.贺兰山东麓典型葡萄园土壤有机碳库组成及其活跃度[J].水土保持通报,2024,44(3):390-398.
Yi Zhiyuan, Luo Xiao, Wang Yuxia, et al. Composition and activity of soil organic carbon pool in typical vineyards on eastern foothills of Helan Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3):390-398.
- [5] 王玉霞,杜灵通,易志远,等.宁夏贺兰山东麓葡萄产区土壤有机碳库空间变异及影响因素[J].草业学报,2025,34(7):41-53.
Wang Yuxia, Du Lingtong, Yi Zhiyuan, et al. Spatial variation and factors influencing the soil organic carbon pool in grape-producing areas at the eastern foothills of Helan Mountain in Ningxia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7):41-53.
- [6] 薛婷婷,韩星,张红娟,等.埋土防寒区葡萄不同越冬措施的防风沙效应风洞试验研究[J].泥沙研究,2018,43(5):58-64.
Xue Tingting, Han Xing, Zhang Hongjuan, et al. Study on wind erosion control of grapes by different methods in wind tunnel experiments [J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(5):58-64.
- [7] Marzen M, Porten M, Ries J B. Quantification of dust emissions during tillage operations in steep slope vineyards in the Moselle area [J]. Agriculture, 2022, 12 (1):e100.
- [8] 刘喆.贺兰山东麓酿酒葡萄产区气象灾害预警与越冬防寒技术[D].银川:宁夏大学,2023.
Liu Zhe. Meteorological disaster warning and overwintering cold prevention techniques in the wine-growing areas of the eastern Helan Mountains [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [9] 赛克,赵媛媛,包岩峰,等.干旱半干旱区落叶期农田防护林防风效果的风洞试验研究[J].农业工程学报,2021,37(5):157-165.
Sai Ke, Zhao Yuanyuan, Bao Yanfeng, et al. Wind-tunnel tests study of shelter effects of deciduous farmland shelterbelts in arid and semi-arid areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5):157-165.
- [10] 王艺钊.乌兰布和沙产业示范区葡萄园基地防护林体系优化配置研究[D].北京:中国林业科学研究院,2019.
Wang Yizhao. Optimal patterns of shelterbelt in a vineyard base of the Ulan Buh ecological sand industry demonstration region [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.
- [11] 刘俊,张东风,于伟飞,等.葡萄园风障防风固沙效果研究[J].中国农学通报,2014,30(10):251-254.
Liu Jun, Zhang Dongfeng, Yu Yifei, et al. Study on the windbreak and sand fixation effects of windbreak in the vineyard [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(10):251-254.
- [12] 李晓娜,万秀云,赵春桥,等.延怀盆地葡萄种植区条状植草覆盖模式防风蚀效果研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(5):123-129.
Li Xiaona, Wan Xiuyun, Zhao Chunqiao, et al. Wind erosion prevention effect of strip grass cover in grape planting area of Yanhuai basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(5):123-129.
- [13] 温淑红,左忠,胡毅飞,等.宁夏贺兰山东麓葡萄基地建设对土壤风蚀的影响[J].西南农业学报,2019,32(12):2862-2867.
Wen Shuhong, Zuo Zhong, Hu Yifei, et al. Effects of construction of grapevine land in Helan Mountain in Ningxia on its soil wind erosion [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(12):2862-2867.
- [14] 王宁,丛安琪,陈雪萍,等.科尔沁沙地农田面积变化特征与沙尘源治理对策[J].中国沙漠,2025,45(4):253-261.
Wang Ning, Cong Anqi, Chen Xueping, et al. The characteristics of farmland area changes and dust source control in the Horqin Sandy Land [J]. Journal of Desert

- Research, 2025, 45(4): 253-261.
- [15] 桑巴叶, 阿通古丽·买买提, 陈启民. 不同带距防护林网及林网中不同植被防风效能的风洞模拟[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3): 57-63.
- Sang Baye, Atongguli·Maimaiti, Chen Qimin. Wind tunnel simulation of windbreak efficiency of shelterbelts with different spaces and vegetations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3): 57-63.
- [16] 王湘莲, 张友焱, 韩政伟, 等. 不同密度与配置梭梭林防风效果的风洞模拟试验[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5413-5425.
- Wang Xianglian, Zhang Youyan, Han Zhengwei, et al. Wind tunnel simulation test of wind protection effect of *Haloxyylon ammodendron* forests with different density and configuration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5413-5425.
- [17] 张文, 亢力强, 张琴, 等. 植株形态对单植株前后风速变化影响的风洞实验[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(4): 573-581.
- Zhang Wen, Kang Liqiang, Zhang Qin, et al. Speed upwind and downwind of a single plant[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(4): 573-581.
- [18] 杨阳. 库布其沙漠灌溉农田沙害防治体系效益分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- Yang Yang. Analysis in benefit system of sand hazard control of Kubuqi desert irrigated farmland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [19] 莎日娜, 于明含, 丁国栋, 等. 沙质农田油沙豆保护性耕作优化模式的风洞模拟试验[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 87-94.
- Sha Rina, Yu Minghan, Ding Guodong, et al. Shelter efficiency of conservation tillage model in *Cyperus esculentus* in sandy farmland [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(4): 87-94.
- [20] 许晶晶, 杜鹏飞, 陈吟, 等. 接坝区退耕坡地风沙输沙率及粒径特征分析[J]. 泥沙研究, 2025, 50(3): 9-16.
- Xu Jingjing, Du Pengfei, Chen Yin, et al. Analysis of sand transport rate and grain size of wind-sand on withdrawing cultivated slope land in transitional area from plateau to plain [J]. Journal of Sediment Research, 2025, 50(3): 9-16.
- [21] 屈建军, 朱志昊, 彭怀午, 等. 刷状葵骨固沙障材料性能与固沙效益[J]. 中国沙漠, 2026, 46(5): 53-63.
- Qu Jianjun, Zhu Zhihao, Peng Huaiwu, et al. Material performances and sand-fixing benefits of brush Kuigu barriers[J]. Journal of Desert Research, 2026, 46(5): 53-63.
- [22] Li Feng, Yang Jianjun, Chen Rui, et al. Structural optimization of windbreak and sand-fixing forests: A wind tunnel study[J]. Forests, 2025, 16(11): e1710.
- [23] Zhang Shuai, Yuan Weijie, Yu Yi, et al. Shrubs play an important role in configuration of shelterbelt in windy and sandy areas[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2024, 12: e1347714.
- [24] 厉静文, Dosmanbetov D A, 郭浩, 等. 不同配置乔灌混交林防风效益的风洞试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 95-102.
- Li Jingwen, Dosmanbetov D A, Guo Hao, et al. Wind tunnel experiment on protection benefits of arbor-shrub mixed forest belts in different configurations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 95-102.
- [25] 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.
- [26] 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]. Scientia Geographica Sinica, 2025, 45(2): 438-448.
- [27] Zhang Jieming, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Determination of optimum vegetation type and layout for soil wind erosion control in desertified land in North China [J]. Ecological Engineering, 2021, 171: e106383.
- [28] 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.