黑龙江省西部典型防风固沙林的防风效能

方玉凤[1,2], 王力刚[1,3], 季晓慧[1,3], 韩 勤[1], 任 悦[1], 赵 影[4], 张 强[1,3]

(1.黑龙江省林业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 2.黑龙江七台河森林生态系统, 定位观测研究站, 黑龙江 七台河 154600; 3.黑龙江松嫩平原农田防护林生态系统定位观测研究站, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 4.中国科学院 沈阳应用生态研究所 森林生态与保育重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: [目的]分析不同类型灌木及小乔木林带的防风效果,为黑龙江省"三北"工程六期乔灌混交模式更新优化提供理论依据与技术支持。[方法]以黑龙江省西部土地沙化区4条防风固沙林带为研究对象,观测林带迎风面、背风面4个距地面不同高度测定点的风速变化情况,比较不同林带防风效能、土壤颗粒机械组成及分形维数的差异。[结果]榆(*Ulmus pumila*)林带在垂直高度100 cm以下、背风面5 *H*(*H*为林带株高)距离内的防风效果最佳,对风速廓线改变最明显,丁香(*Syringa oblata*)林带对背风面5 *H*处的风速阻碍作用最弱,风速基本恢复至迎风面1 *H*;胡枝子(*Lespedeza bicolor*)林带的地表粗糙度(2.83)最高,与其他林带之间存在显著差异($p<0.05$);土壤粉粒、极细砂粒、细砂粒3种粒径占全部粒径的比例达到84.42%~92.80%,灌木柳(*Salix saposhnikovii*)林带的分形维数(2.56)最低,与其他林带存在显著性差异($p<0.05$),胡枝子林带的分形维数整体高于其他林带;丁香、灌木柳林带的风速增加率随高度的增加表现为逐渐减小的趋势;丁香林带在10 cm高度的防风效能高达199.59%,与其他林带存在显著差异($p<0.05$),胡枝子林带在50 cm高度以下的防风效能较高;冗余分析(RDA)显示同一距离处的防风效能与风速降幅均存在极显著正相关性($p<0.01$);中、高层风速增加率与株高、带宽、保存率显著负相关($p<0.05$),林带宽度和保存率是重要变量,林带高度、带宽、保存率对林带的防风效果影响最大。[结论]不同植物生长特性的差异直接影响春季大风期间的防风效能。建议在黑龙江省"三北"地区,以栽植矮生丛状、枝条密集型植株的灌木林带为主(如胡枝子),并适当增加行数,以达到最佳防风效果。

关键词: 防风固沙林; 冗余分析; 防风效能; 分形维数; 风速廓线

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0010-10 **中图分类号:** S775, S793

文献参数: 方玉凤, 王力刚, 季晓慧, 等.黑龙江省西部典型防风固沙林的防风效能[J].水土保持通报, 2026,46(4):10-19. Fang Yufeng, Wang Ligang, Ji Xiaohui, et al. Windbreak efficiency of typical windbreak and sand-fixation shelterbelts in western Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(4):10-19.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.012 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.012**

Windbreak efficiency of typical windbreak and sand-fixation shelterbelts in western Heilongjiang Province

Fang Yufeng[1,2], Wang Ligang[1,3], Ji Xiaohui[1,3], Han Qin[1], Ren Yue[1], Zhao Ying[4], Zhang Qiang[1,3]

(1.*Qiqihar Branch, Heilongjiang Academy of Forestry Sciences, Qiqihar, Heilongjiang* 161005, *China*; 2.*Heilongjiang Qitaihe Forest Ecosystem Observation and Research Station, Qitaihe, Heilongjiang* 154600, *China*; 3.*Heilongjiang Songnen Plain Farmland Shelterbelt Ecosystem Observation and Research Station, Qiqihar, Heilongjiang* 161005, *China*; 4.*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Shenyang, Liaoning* 110016, *China*)

Abstract: [Objective] The windbreak effectiveness of different types of shrub and small tree shelterbelts was analyzed in order to provide a theoretical basis and technical support for updating and optimizing mixed tree-shrub models in the sixth phase of the "Three-North Shelterbelt Program" in Heilongjiang Province. [Methods] Four

收稿日期:2025-12-01 **修回日期:**2026-01-13 **采用日期:**2026-01-16

资助项目:黑龙江省省属科研院所基本科研业务费资金项目"我省西部典型防风固沙林结构优化模式研究"(CZKYF2025-1-C040); 国家重点研发计划项目(2024YFD150020204); 国家重点研发计划项目(2024YFD1500200)

第一作者:方玉凤(1988—),女(汉族),黑龙江省富裕县人,硕士,高级工程师。主要从事防护林建设研究。Email:qqhrfyf@163.com。

通信作者:张强(1970—),男(汉族),黑龙江省齐齐哈尔市人,硕士,研究员级高级工程师。主要从事防护林建设研究。Email:zhaojiashizz@163.com。

windbreak and sand-fixation shelterbelts in the sandy area of western Heilongjiang Province were selected as the research objects. Changes in wind speed were observed at four heights from the ground on the windward and leeward sides of the shelterbelts, and differences in windbreak efficiency, soil particle mechanical composition, and fractal dimension among different shelterbelts were compared. [Results] *Ulmus pumila* shelterbelts showed the best windbreak effectiveness at heights below 100 cm and within a distance of 5 *H* (*H* denotes plant height) on the leeward side, and it caused the most pronounced changes in the wind speed profile. *Syringa oblata* shelterbelts showed the weakest resistance to wind speed at 5 *H* on the leeward side, where wind speed basically recovered to the level at 1 *H* on the windward side. *Lespedeza bicolor* shelterbelts had the highest surface roughness (2.83), significantly different from that of the other shelterbelts ($p < 0.05$). Silt, very fine sand, and fine sand accounted for 84.42%—92.80% of the total soil particle size. *Salix saposhnikovii* shelterbelts had the lowest fractal dimension (2.56), significantly different from that of the other shelterbelts ($p < 0.05$), whereas the fractal dimension of *L. bicolor* shelterbelts was generally higher than that of the others. In *S. oblata* and *S. saposhnikovii* shelterbelts, the wind speed increase rate gradually decreased with increasing height. The windbreak efficiency of *S. oblata* shelterbelts reached 199.59% at 10 cm, significantly different from that of the other shelterbelts ($p < 0.05$). *L. bicolor* shelterbelts showed relatively high windbreak efficiency below 50 cm. Redundancy analysis showed that windbreak efficiency and wind speed reduction at the same distance were extremely significantly positively correlated ($p < 0.01$). The wind speed increase rate in the middle and upper layers was significantly negatively correlated with plant height, belt width, and preservation rate ($p < 0.05$). Belt width and preservation rate were important variables, and plant height, belt width, and preservation rate had the greatest effects on the windbreak effectiveness of the shelterbelts. [Conclusion] Differences in plant growth characteristics directly affect windbreak efficiency during the spring windy season. It is recommended that in the three-north region of Heilongjiang Province, shrub shelterbelts composed of low, clump-forming and densely branched species, such as *L. bicolor*, should be adopted, and the number of rows should be appropriately increased to achieve the best windbreak effectiveness.

Keywords: windbreak and sand-fixation shelterbelt; redundancy analysis; windbreak efficiency; fractal dimension; wind speed profile

干旱荒漠区的干旱、风沙危害、水土流失等问题严重影响居民正常的生产生活,制约着当地经济和社会的发展。中国自1979年开展“三北”防护林体系建设工程以来,经过几十年奋战,目前已遏制了土地沙化趋势[1],从根本上改善了沙区生态环境和生产条件。目前,针对防风固沙植物防风效益的研究较多,灌木及小乔木树种虽植被盖度较低,但具有良好的防风阻沙功能,针对灌木及小乔木树种的研究主要分为野外实地观测与风洞模拟试验。李映坤等[2]分析了乌兰布和沙漠天然灌木林的防风阻沙效果,认为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的阻沙效果最佳,植被构型参数是主要差异来源;闫鑫苒等[3]分析吐鲁番市荒漠化土地不同配置的防风固沙效益,得出草方格+柽柳(*Tamarix chinensis*)的治理模式效益最佳,治沙植物与机械沙障相比,可有效固定地表土壤,达到长期治理效果[4];丛龙宇等[5]设置不同规格树枝沙障探究其对内蒙古草原煤矿区的防风效益;风洞模拟试验主要分析包括梭梭、柠条(*Caragana korshinskii*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)防风固沙植物及机械沙障不同配置的防风效益[6-8]。这些研究可为沙区防风固沙树种的选择、配置方式提供参考。

科尔沁地区多大风天气,土地沙漠化敏感程度高,是我国北方地区主要沙源地[9]。黑龙江省西部土地沙化区又被称为嫩江沙地,毗邻科尔沁地区,是全省水土流失重点治理区域之一,同时也是全省风蚀最严重的地区[10],蒙古冷空气受大兴安岭山脉的影响,在此处形成频繁的春季大风,地质形成过程造就了深厚的沙质沉积物,是丰富的沙源[11]。正是由于特殊的地理位置,使得该区域具有许多不同于其他沙地的特点。该地区有关防护林的研究主要为树种引选[12],鲜少有针对防风效益的研究。该地区在“三北”工程建设初期主要以适生性强、生长迅速的杨树为主栽树种,杨树占比高达98%[13],目前已表现出衰退现象。为了更好地推进“三北”工程六期建设,探索乔灌混交模式,并对现有防护林进行更新优化,本研究以黑龙江省西部土地沙化区适生灌木及小乔木林带为研究对象,对比分析不同类型林带的防风效果,研究影响不同林带防风效果的关键因子,提出合理的

人工栽植建议，为黑龙江省“三北”工程六期乔灌混交模式的构建提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黑龙江省西部典型风沙区甘南县中兴乡，地理位置122°55′53.1″—123°12′24.4″E，47°40′9.6″—47°42′36.6″N，地势主要为平原及缓坡漫川漫岗，海拔270～380 m，属温带季风气候，春季多受蒙古低压东移影响，多风少雨，易发生干旱，年均温2.6 ℃，年降水量230～450 mm，无霜期130 d左右，≥10 ℃有效积温2 560 h。土壤类型主要为风沙土、暗棕壤，土地具有明显沙化趋势。

1.2 试验设计

2025年4月对中兴乡境内的防护林带进行野外调查，确定4条典型灌木与小乔木林带，该4条林带林龄、高度、带宽、疏透度基本一致，疏透度测定采用华为手机相机模式拍摄林带纵断面图像，拍摄点距林带垂直距离4 m，高度为林带平均株高的1/2处，在Photoshop软件中计算纵断面透光面积与纵断面总面积的比值，选择疏透度一致（0.40）的林带进行测定。林带均为纯林林带，周边200 m内没有高大乔木林带，生境条件基本相同，且人为干扰较少。在保证林带情况基本一致的前提下，从植株构型及生根特点导致的土壤差异角度进行防风效能分析。因该地春季干旱多风，是防风固沙林发挥其最大作用的时期，在该时期进行观测意义显著。2025年5月初选择大风天气进行风速测定，该时间4条林带的风沙环境一致、林带前后均为已翻耕待播种的农耕地，无地表植被。利用米尺（精度0.1 m）测量林带高度、宽度，记录林带走向、行数，用现有成活株数与栽植总株数的比值计算保存率，不同林带地理位置及基本情况见表1。

1.3 风速测定

在林带前插风向标，与风向标平行方向，在林带迎风面（windward side）1 H（H为林带株高）、背风面（Leeward side）1 H、背风面3 H、背风面5 H设置4个测定点，每个测定点用手持风速仪testo 410-2（精度0.1 m/s）采集距地面高度10，50，100，150 cm的迎风风速数据，设定每10 s记录一次风速值，观测时间为15 min，计算观测时段内的平均风速。以风速为横坐标，高程对数为纵坐标绘制风速廓线图[14]。

1.4 土样采集与测定

在林带上述4个点沿平行于林带方向按照“S”形取样法取0—20 cm土样，混合，土壤机械组成采用南京维百瑞检测技术有限公司的Malvern Mastersizer 3000激光粒径分析仪测定，参照NY/T 1 121.3—2006《土壤检测》，根据美国农业部（USDA）制土壤质地分级标准划分土壤质地为石砾（1 000～2 000 μm）、粗砂粒（500～1 000 μm）、中砂粒（250～500 μm）、细砂粒（100～250 μm）、极细砂粒（50～100 μm）、粉粒（2～50 μm）、黏粒（<2 μm）共7个等级[15]。取土样的同时环刀取土用于容重的测定。

1.5 数据处理与分析

根据杨培岭等[16]提出的以粒径重量分布表征土壤分形特征的公式计算分形维数：

$$\lg\left(\frac{V_r<R_i}{V_T}\right)=(3-D)\lg\left(\frac{R}{R_{\max}}\right) \tag{1}$$

式中：$V_r<R_i$为小于粒径R_i的土壤总体积（%）；V_T为测定的土壤总体积（%）；R为两筛分粒级R_i与R_{i+1}间粒径的平均值（μm）；$R_{\max}$为土壤粒径分级中最大粒径，本研究中土壤最大粒径为2 000 μm；D为粒径分布的分形维数。以上式左侧对数值为横坐标，右侧对数值为纵坐标进行线性回归拟合，得出斜率，即相关系数R。

土壤容重：

$$r_s=\frac{g(1-w)}{V} \tag{2}$$

式中：r_s为土壤容重（g/cm^3）；g为环刀内土壤鲜重（g）；w为土壤含水率（%）；V为环刀容积（cm^3）。

地表粗糙度[17-18]：

$$\lg Z_0=\frac{u_1\lg h_2-u_2\lg h_1}{u_1-u_2} \tag{3}$$

式中：Z_0为地表粗糙度，h_1=10 cm，h_2=150 cm，u_1，u_2分别对应h_1，h_2高度下的风速值（m/s）。

风速增加率[19]：

$$R=\frac{u_2-u_1}{u_1\times h}\times 100\% \tag{4}$$

式中：$h=h_2-h_1$，u_1，u_2分别对应h_1，h_2高度下的风速值，（m/s）。

防风效能[18,20]：

$$E_h=\frac{U_{h_0}-U_h}{U_h}\times 100\% \text{ 。} \tag{5}$$

式中：U_{h_0}为迎风面1 H高度h_0的风速（m/s）；U_h为背风面1 H高度h的风速（m/s）。

风速降幅[21]：

$$E=\frac{U_{kh}-U_{krh}}{U_{kh}}\times 100\% \tag{6}$$

式中：U_{kh}为k风速下高度h的迎风面1 H风速（m/s）；U_{krh}为k风速下距植株x处高度h的风速（m/s）。

利用Excel 2020软件进行数据基础分析；采用SPSS 22.0软件单因素方差分析Duncan法进行差异

性分析,按照特征向量值大于1的原则提取主成分,根据各指标主成分提取的贡献率进行重要性排序。Canoco5软件进行RDA分析;Origin 2022软件进行图片绘制。

表1　不同类型林带基本情况

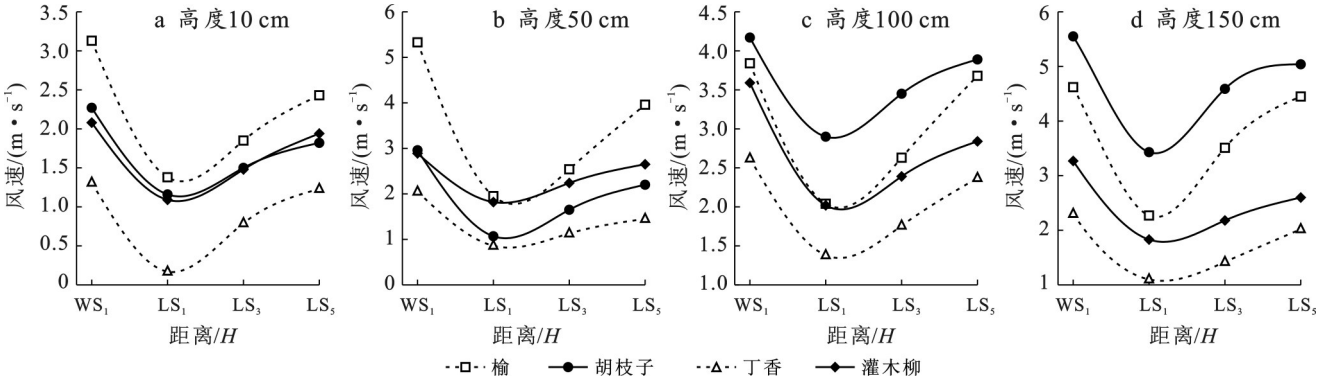
Table 1　Basic characteristics of different shelterbelt types

林带类型	经度	纬度	海拔高度/m	株高/m	带宽/m	保存率/%	走向	行数	株行距/(m×m)
榆(*Ulmus pumila*)	123°6′49.0″E	47°40′9.6″N	316.3	2.5	3.0	75	东西	3	1×1
胡枝子(*Lespedeza bicolor*)	123°12′24.4″E	47°41′1.2″N	249.5	2.0	3.0	45	东西	3	1×1
丁香(*Syringa oblata*)	123°0′47.2″E	47°42′9.7″N	269.1	2.5	4.0	90	南北	6	0.5×0.7
灌木柳(*Salix saposhnikovii*)	122°55′53.1″E	47°42′36.6″N	267.3	2.5	4.0	80	东西	2	1×2

2　结果与分析

2.1　不同防风固沙林带对风速的影响

图1表示的是不同高度下,不同林带风速的变化特征,从图中可以看出,不同林带背风面1 H的风速均为最低,高度10 cm,50 cm处,除榆林带外,其他3种林带在背风面5 H的风速基本恢复至迎风面1 H风速;高度100 cm,150 cm处,除灌木柳林带外,其他3种林带背风面5 H的风速基本恢复至迎风面1 H风速,说明在高度100 cm以上(含100 cm)、以下,分别为灌木柳林带、榆林带减弱风速的有效防护距离最大,林带背风面5 H距离内的防风效果最佳。



注:WS为迎风面,LS为背风面。

图1　不同林带风速变化特征

Fig.1　Variation characteristics of wind speed in different shelterbelts

2.2　不同林带风速廓线变化

图2表示的是在距林带不同距离处的风速廓线。迎风面1 H和背风面5 H的风速最高,风速变化范围为1.0～6.0 m/s。背风面1 H的风速最低,其次是背风面3 H,风速变化范围分别为0～4.0 m/s和0～5.0 m/s。背风面1 H,3 H,5 H处,榆林带的线性拟合系数最高,分别为0.989 1,0.911 7,0.930 4,表明榆林带对风速廓线改变最明显,对150 cm高度以下的背风面5 H距离以内的风速阻碍作用最强;背风面1 H,3 H处,胡枝子林带的线性拟合系数最小,分别为0.817 4,0.847 1,表明其对背风面3 H距离以内的风速阻碍作用最弱,背风面5 H的丁香林带拟合系数最低,为0.835 6,表明丁香林带对背风面5 H处的风速阻碍作用最弱,这也与图1风速的变化特征相吻合,丁香林带在背风面5 H处的风速基本恢复至迎风面1 H。黑龙江地区的丁香在该时期处于花期,顶生圆锥形花序,枝叶较少,枝条细而软,观测时发现起风时,丁香林带迎风面摆动幅度最大,这可能是导致丁香林带对背风面5 H处的风速阻碍作用最弱的主要原因。

2.3　地表粗糙度及机械组成的差异

地表粗糙度的影响因子较多,对于某一固定地表,用不同组合高度的风速所计算的地表粗糙度值亦不稳定,基于植株高度,结合相关文献[17-18],采用高度10,150 cm的风速计算地表粗糙度。

由表2可知,胡枝子林带的地表粗糙度最高,达到2.83,与其他3种林带存在显著差异($p<0.05$),从数值来看,胡枝子林带提升地表粗糙度的程度最好,防风固沙效果最佳。土壤容重主要受土壤类型、质地、含水率等因素影响,试验观测的4条林带位于同一区域,土壤类型一致,且在同一天内完成观测,土壤含水率等物理性质不受降雨影响,4条林带的土壤容重差异不显著。

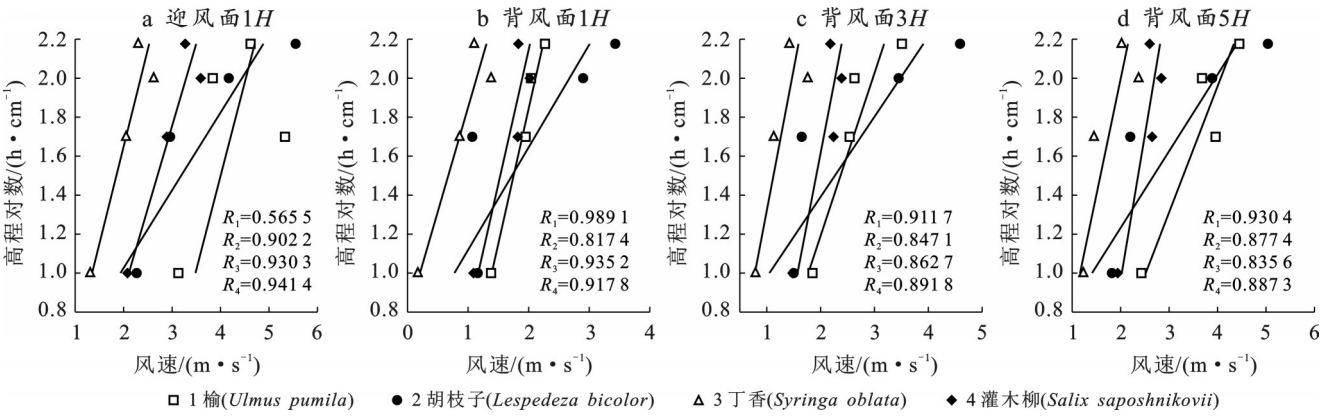


图2 不同林带风速廓线

Fig.2 Wind speed profiles of different shelterbelts

表2 不同类型林带的地表粗糙度分析

Table 2 Analysis of surface roughness of different shelterbelt types

林带类型	地表粗糙度	土壤容重/(g·cm^{-3})
榆	0.63±0.26^{b}	1.44±0.08^{a}
胡枝子	2.83±0.31^{a}	1.52±0.10^{a}
丁香	0.37±0.20^{b}	1.59±0.06^{a}
灌木柳	0.41±0.25^{b}	1.46±0.06^{a}

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

因粗砂粒(500~1 000 μm)、石砾(1 000~2 000 μm)在同一林带4个取样点中仅有个别检测出,且占比含量极低(0.00%~0.82%),故表3未列出粗砂粒与石砾的标准差、差异性。4条林带的黏粒(<2 μm)含量存在显著差异($p<0.05$)。胡枝子林带含量最高(6.42%)。粉粒(2~50 μm)含量,榆、胡枝子、丁香林带与灌木柳林带差异显著($p<0.05$)。胡枝子林带的极细砂粒(50~100 μm)含量与其他3条林带差异显著($p<0.05$)。灌木柳林带的细砂粒(100~250 μm)含量与其他三条林带差异显著($p<0.05$)。土壤粒级占比中,粉粒、极细砂粒、细砂粒3种粒径占全部粒径的比例达到84.42%~92.80%,榆、胡枝子、丁香3条林带的各级粒径占比规律基本一致,灌木柳林带极细砂粒、细砂粒占比较高。胡枝子、灌木柳林带的分形维数分别表现最高和最低,为2.73,2.56,灌木柳林带与其他3个林带存在显著性差异($p<0.05$)。以粒径重量分布表征土壤分形特征进行的线性回归分析,得到的相关系数R均在0.90以上,线性相关显著($p<0.05$)。

表3 不同类型林带土壤的机械组成分析

Table 3 Analysis of soil mechanical composition in different shelterbelt types

林带类型	各粒级占比/%							分形维数D	相关系数r
	<2 μm	2~50 μm	50~100 μm	100~250 μm	250~500 μm	500~1 000 μm	1 000~2 000 μm		
榆	4.49±0.22^{b}	30.12±1.25^{a}	35.46±1.69^{a}	21.61±1.56^{b}	8.31±1.43^{a}	0.02	0.00	2.70±0.01^{a}	0.91
胡枝子	6.42±0.18^{a}	30.99±0.61^{a}	30.08±1.23^{b}	23.35±0.62^{b}	8.30±1.59^{a}	0.05	0.81	2.73±0.01^{a}	0.92
丁香	3.44±0.34^{c}	27.57±2.25^{a}	38.55±1.64^{a}	21.95±2.17^{b}	8.03±1.39^{a}	0.23	0.24	2.68±0.02^{a}	0.92
灌木柳	1.38±0.25^{d}	14.57±3.03^{b}	40.15±1.92^{a}	38.08±3.54^{a}	5.45±1.24^{a}	0.38	0.00	2.56±0.04^{b}	0.95

图3显示的是4条林带土壤颗粒分形维数的水平变化,榆林带的变化范围为2.68~2.72,胡枝子林带的变化范围为2.71~2.74,丁香林带的变化范围为2.65~2.72,灌木柳林带的变化范围为2.44~2.62。榆、胡枝子、丁香三条林带土壤颗粒分形维数最小为背风面1 H,灌木柳林带最小为背风面3 H。榆、丁香林带分形维数最大为背风面5 H,胡枝子、灌木柳林带最大为迎风面1 H。从整体来看,榆、丁香林带表现为迎风面1 H、背风面1 H的分形维数较低,背风面3 H,5 H的分形维数较高;胡枝子、灌木柳林带表现为迎风面1 H的分形维数高于背风面3个观测点。

2.4 风速增加率的变化

由表4可知,丁香林带在低层的风速增加率最高,胡枝子林带最低,榆和灌木柳林带较为接近,4条林带之间差异不显著($p>0.05$);榆林带在中层的风速增加率为负值,表现为风速减小0.13%,与灌木柳林带差异不显著($p>0.05$),与胡枝子、丁香林带存在

显著差异($p<0.05$);丁香、灌木柳林带在高层表现为风速减弱,榆、胡枝子林带风速增加幅度较小。整体来看,丁香、灌木柳林带的风速增加率随高度的增加表现为逐渐减小的趋势,胡枝子林带在中层(50 cm$<h\leqslant$100 cm)的风速增加率最大。

2.5　不同林带的防风效能

表5显示的是不同林带不同高度下的防风效能,10 cm 高度时,丁香林带的防风效能最大,为199.59%,与其他3条林带差异显著($p<0.05$);50 cm 高度时,榆、胡枝子林带的防风效能最大,灌木柳林带最小;100,150 cm 高度时,均为胡枝子林带的防风效能最小,与其他3条林带差异显著($p<0.05$)。0~150 cm 高度内,4条林带均具有较高的防风效能,表明4条林带有效防风高度可达150 cm。榆、胡枝子林带的防风效能在50 cm高度处达到最大,丁香、灌木柳林带的防风效能在10 cm高度处达到最大。

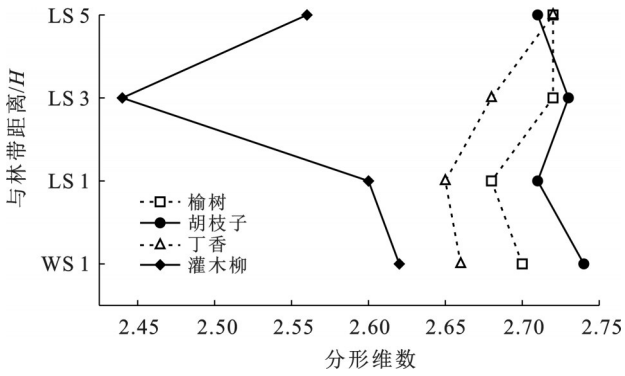


图3　不同类型林带分形维数的水平变化

Fig.3　Horizontal variation of fractal dimensions of different shelterbelt types

表4　不同林带不同高度下的风速增加率

Table 4　Wind speed increase rates at different heights in different shelterbelts

林带高度 h/cm	风速增加率/%			
	榆	胡枝子	丁香	灌木柳
低层(10≤h≤50)	1.32±0.20^{a}	0.33±0.20^{a}	3.21±2.24^{a}	1.21±0.17^{a}
中层(50<h≤100)	−0.13±0.15^{c}	1.99±0.56^{a}	1.04±0.16^{b}	0.25±0.08^{bc}
高层(100<h≤150)	0.43±0.09^{a}	0.57±0.07^{a}	−0.33±0.04^{b}	−0.18±0.01^{b}

注:表中数据为平均值±标准差,同行不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

表5　不同林带不同高度下的防风效能

Table 5　Windbreak efficiency at different heights in different shelterbelts

林带类型	防风效能(E_h)/%				
	10 cm	50 cm	100 cm	150 cm	平均
榆	138.97±10.16^{b}	205.78±15.28^{a}	100.28±11.55^{a}	111.31±11.81^{ab}	139.08±23.67^{a}
胡枝子	125.25±15.15^{b}	232.88±19.54^{a}	53.31±5.52^{b}	74.41±9.88^{c}	121.46±40.09^{a}
丁香	199.59±25.81^{a}	154.35±13.94^{b}	101.23±8.02^{a}	127.77±12.42^{a}	145.74±20.97^{a}
灌木柳	134.83±22.83^{b}	77.74±11.71^{c}	90.00±6.63^{a}	91.73±6.54^{bc}	98.57±12.48^{a}

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

表6显示的是4条林带在背风面1H,3H,5H距离处不同高度的风速降幅,同一高度下,随着背风面距离的增加,各林带均表现为风速降幅逐渐减小,同一林带类型3种背风距离的风速降幅差异显著($p<0.05$)。10 cm高度,丁香林带背风面1H风速降幅与其他3种林带差异显著($p<0.05$);在背风面5H,榆、胡枝子林带与丁香、灌木柳林带差异显著($p<0.05$)。50 cm高度,灌木柳林带背风面1H,3H,5H风速降幅均与其他3种林带差异显著($p<0.05$)。100 cm高度,胡枝子林带背风面1H风速降幅与其他3种林带差异显著($p<0.05$);榆林带背风面3H风速降幅与其他3种林带差异显著($p<0.05$);灌木柳林带背风面5H风速降幅与其他3种林带差异显著($p<0.05$)。150 cm高度,在背风面1H,榆、丁香林带与胡枝子、灌木柳林带差异显著($p<0.05$);在背风面3H,丁香、灌木柳林带与榆、胡枝子林带差异显著($p<0.05$);在背风面5H,灌木柳林带与榆、丁香林带差异显著($p<0.05$)。在背风面同一距离处,榆、胡枝子林带均表现为50 cm高度风速降幅最大,其次为10 cm高度;丁香与灌木柳林带的风速降幅规律性不明显。

2.6　防风相关指标RDA与重要性分析

RDA分析结果(图4)显示同一距离处的防风效能与风速降幅均存在极显著正相关性($p<0.01$);中、高层风速增加率与株高、带宽、保存率、极细砂粒含量显著负相关($p<0.05$),与黏粒、粉粒、石砾含量、地表粗糙度、分形维数存在显著正相关性($p<0.05$);黏

粒含量与株高、带宽、保存率极显著负相关($p<0.01$),与地表粗糙度极显著正相关($p<0.01$);粉粒含量与带宽极显著负相关($p<0.01$);极细砂粒含量与株高、带宽、保存率极显著正相关($p<0.01$),与黏粒含量、地表粗糙度极显著负相关($p<0.01$);细砂粒含量与行数、黏粒、粉粒含量显著负相关($p<0.05$);中砂粒含量与极细砂粒含量极显著负相关($p<0.01$);粗砂粒含量与粉粒含量呈显著负相关($p<0.05$),与细砂粒含量显著正相关($p<0.05$);石砾含量与极细砂粒含量显著负相关($p<0.05$);分形维数与黏粒、粉粒含量极显著正相关($p<0.01$),与林带宽度、细砂粒、粗砂粒含量极显著负相关($p<0.01$)。

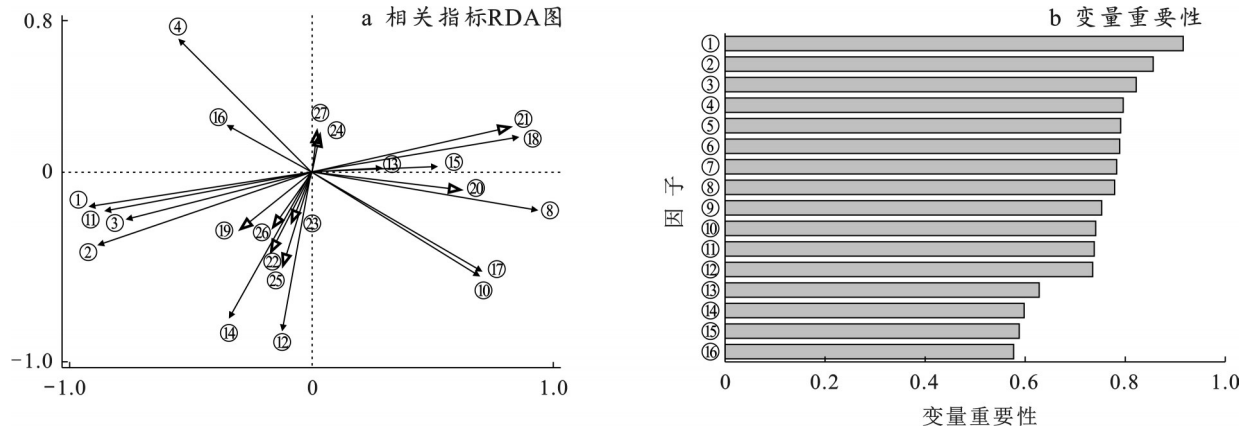
根据主成分贡献率对基本变量的重要性分析表明,林带基础性质中,林带宽度是第一重要变量,其次是林带保存率,土壤颗粒的极细砂粒、细砂粒含量处于较重要位置。

表6 防风固沙林不同距离不同高度的风速降幅

Table 6 Wind speed reduction at different distances and different heights in windbreak and sand-fixation shelterbelts

林带类型	距离	不同高度处风速降幅/%			
		10 cm	50 cm	100 cm	150 cm
榆	背风面1 H	53.46 ± 1.99^{Ab}	60.85 ± 2.28^{Aa}	44.84 ± 3.49^{Aa}	48.81 ± 2.97^{Aa}
	背风面3 H	37.61 ± 3.02^{Ba}	48.68 ± 2.87^{Ba}	30.20 ± 3.90^{Bb}	21.16 ± 4.35^{Bb}
	背风面5 H	17.45 ± 4.01^{Ca}	19.04 ± 4.12^{Ca}	1.37 ± 5.72^{Cb}	0.70 ± 5.43^{Cb}
胡枝子	背风面1 H	48.03 ± 2.92^{Ab}	63.58 ± 2.08^{Aa}	30.73 ± 2.05^{Ab}	36.59 ± 2.49^{Ab}
	背风面3 H	32.89 ± 2.71^{Ba}	43.41 ± 2.01^{Ba}	16.90 ± 1.86^{Ba}	17.00 ± 2.06^{Bb}
	背风面5 H	17.46 ± 3.73^{Ca}	23.57 ± 2.85^{Ca}	4.06 ± 2.35^{Cb}	8.70 ± 1.75^{Cab}
丁香	背风面1 H	85.17 ± 4.12^{Aa}	57.13 ± 2.31^{Aa}	45.46 ± 1.88^{Aa}	49.30 ± 2.32^{Aa}
	背风面3 H	29.35 ± 6.21^{Ba}	42.58 ± 2.20^{Ba}	29.66 ± 2.53^{Ba}	34.40 ± 3.16^{Ba}
	背风面5 H	-8.60 ± 8.92^{Cb}	26.49 ± 3.36^{Ca}	3.71 ± 4.34^{Cb}	3.13 ± 5.52^{Cb}
灌木柳	背风面1 H	46.39 ± 3.64^{Ab}	35.83 ± 2.63^{Ab}	42.76 ± 1.73^{Aa}	43.51 ± 1.75^{Aab}
	背风面3 H	26.37 ± 3.05^{Ba}	20.25 ± 3.14^{Bb}	31.89 ± 2.10^{Ba}	32.01 ± 2.01^{Ba}
	背风面5 H	5.65 ± 3.30^{Cab}	4.46 ± 3.63^{Cb}	19.03 ± 2.63^{Ca}	18.86 ± 2.33^{Ca}

注:表中数据为平均值±标准差,同列数据进行对比;大写字母ABC表示同一林带同一高度下不同背风距离的差异性;小写字母abc表示同一高度同一背风距离下不同林带的差异性。大小写字母均表示差异显著($p<0.05$)



注:①为林带宽度;②为林带保存率;③为极细砂粒(50~100 μm);④为细砂粒(100~250 μm);⑤为迎风面1 H风速;⑥为背风面3 H风速;⑦为背风面5 H风速;⑧为黏粒(<2 μm);⑨为背风面1 H风速;⑩为粉粒(2~50 μm);⑪为林带高度;⑫为林带行数;⑬为中砂粒(250~500 μm);⑭为林带走向;⑮为石砾(1 000~2 000 μm);⑯为粗砂粒(500~1 000 μm);⑰为分形维数;⑱为地表粗糙度;⑲为低层风速增加率;⑳为中层风速增加率;㉑为高层风速增加率;㉒为背风面1 H防风效能;㉓为背风面3 H防风效能;㉔为背风面5 H防风效能;㉕为背风面1 H风速降幅;㉖为背风面3 H风速降幅;㉗为背风面5 H风速降幅。

图4 防风固沙林相关指标的RDA与重要性分析

Fig.4 RDA and importance analysis of relevant indicators of sand-fixation shelterbelts

3 讨 论

风速廓线的变化表明,榆林带对风速廓线改变最明显,对150 cm高度以下的背风面5 H距离以内的风速阻碍作用最强,丁香林带最弱。本研究结果与张奕等[22]研究表明形态低矮的白刺较枝下高度大的杨柴(*Hedysarum mongolicum*)的防风阻沙作用更显著具有一致性,枝下高数值大的植株会导致近地

表流场空间产生类似“狭管”的漩涡加速区,导致风速增加,说明植物形态和枝条延展性是影响风速廓线的主要因素。

地表粗糙度与黏粒含量极显著正相关($p<0.01$),与极细砂粒含量极显著负相关($p<0.01$),胡枝子林带的地表粗糙度最高,其黏粒含量(6.42%)、极细砂粒含量(30.08%)在4条林带中分别为最高和最低。土壤颗粒具有的特性通常用分形维数来描述,分形维数能较好地表征土壤颗粒分布组成,表征土壤粒径分布的均匀程度[23]。是量化和评估土壤颗粒组成变化、土壤质量的重要方法,可作为判断土壤退化程度的指标之一[24]。胡枝子、灌木柳林带的分形维数表现最高和最低,分别为2.73,2.56,而胡枝子林带整体的分形维数较其他3条林带高。分形维数与土壤结构稳定性关系密切[25],可将分形维数作为评价不同类型防风固沙林带对土壤质地影响的指标之一。土壤细颗粒含量高,分形维数大,土壤质地好,说明胡枝子林带的土壤质地最佳。这可能是胡枝子林带固沙效果最佳的主要原因。

土壤颗粒是土壤结构基础组成单元,主要受成土母质特征及环境变化的影响,表征环境变化对土壤侵蚀的影响[26]。土壤颗粒机械组成中,黏粒含量、粉粒含量皆表现为胡枝子、榆林带高于丁香、灌木柳林带,极细砂粒、细砂粒含量则与之相反,表现为灌木柳林带最高。土壤退化在土壤物理性质上的主要表现是土壤粒径变粗,说明灌木柳林带已出现土壤退化的情况,需要及时采取一定措施,减小风蚀作用和细小颗粒的流失,促进土壤颗粒细质化。

风速增加率是反映风速廓线变化特征与气流垂向分配的重要指标[27],丁香林带(3.21%)在低层(10 cm≤h≤50 cm)的风速增加率最高,胡枝子林带(0.33%)最低,风洞模拟试验研究认为,球状株型的植株枝叶密集,迎风面透风系数小,对地表风速的削弱更强;丛状株型的植株枝条较分散、稀疏,且随风摇摆,对地表风速的削弱能力较低[28]。在同一疏透度水平下,丁香属于稀疏型植株,枝条随风摇摆剧烈,胡枝子属于枝条密集型植株,在该地区观测时期未展叶,枝条随风摇摆不明显,这应该是导致两种林带低层风速增加率相差较大的主要原因。丁香、灌木柳林带的风速增加率随高度的增加表现为逐渐减小的趋势,这与吴汪洋等[27]的研究认为风速随高度的增加而增大,但其增速在不断减小的结论具有一致性。不同植物防风效益的差异主要来自不同植物生长特性的差异[19],榆、胡枝子属于枝条偏硬的密集型植株,丁香、灌木柳属于枝条较软的稀疏型植株,这应该是导致丁香、灌木柳林带的风速降幅规律性不明显的主要原因。

丁香林带在背风面1 H的不同高度的平均防风效能(145.74%)最高,灌木柳林带(98.57%)最低,林带冠幅影响通过林带的整体风况,导致林下紊流增多,风速强度减弱,防风效能增强[18]。在丁香林带与灌木柳林带宽度均为4.0 m的前提下,防风效能相差较大的原因可能与栽植密度有关,丁香林带的行数为6行,风通过林带需穿过6行植株,林下紊流更强,灌木柳林带的行数为2行,风穿过林带更直接,导致防风效能最低。

冗余分析表明,中、高层风速增加率与株高、带宽、保存率、极细砂粒含量显著负相关($p<0.05$),重要性分析表明林带宽度和保存率是重要变量,说明林带基本性质中的株高、带宽、保存率对林带的防风效果影响最大,这与赵文智等[29]的研究结论一致。群落高度、盖度作为植物构型量化的一种形式,在林带防风效果上起到关键作用[2]。分形维数作为反映荒漠化引起的土壤环境变化指标[30],意义重大,本研究区域主要为耕地,粉粒、极细砂粒、细砂粒3种粒径占全部粒径的比例达到84.42%~92.80%,这与董智今[23]对毛乌素沙地的研究结果得出耕地、荒地以粉粒和细砂为主的结论具有一致性,在以耕地、荒地为主的三北地区,灌木型防风固沙林带的株高、带宽及保存率对于中、高层风速的增加具有决定性作用。本研究对风速采用单点测定,由于林带背风面气流复杂,在初步掌握了该地区灌木林带风速变化基本规律后,在未来的研究中将开展多点同步观测及乔灌混交林防风效能研究,以更好地获得整体风速的空间分布变化规律。

4　结　论

(1) 榆林带对背风面5 H距离以内,150 cm高度以下的风速阻碍作用最强,丁香林带最弱。胡枝子、灌木柳林带的整体分形维数分别为最高(2.73)和最低(2.56)。地表粗糙度与黏粒含量极显著正相关($p<0.01$),土壤颗粒机械组成中,黏粒含量、粉粒含量皆表现为胡枝子、榆林带高于丁香、灌木柳林带,本研究区域粉粒、极细砂粒、细砂粒3种粒径占全部粒径的比例为84.42%~92.80%。胡枝子林带在低层(10 cm≤h≤50 cm)的风速增加率最低,为0.33%。林带基本性质中的株高、带宽、保存率对林带的防风效果影响最大。

(2) 本研究认为在黑龙江省西部春季大风期间,从防风效益角度出发,应以栽植矮生丛状、枝条密集型植株的灌木林带为主,并适当增加行数。胡枝子具有耐贫瘠,强再生性等特点,可改善土壤结构,具

有较高的水土保持特性，宜作为防风固沙林主栽灌木树种。在黑龙江省西部土地沙化区乔木林带林缘栽植适生灌木及小乔木树种是既不破坏原有树种，又能达到较高防护效益的林带更新改造的重要措施。本研究对于开展沙化土地综合治理，提升现有防护林防风效能，巩固并提升建设成果，拓展“三北”工程防沙治沙效果等方面，具有重要的实践意义。

参考文献(References)

[1] 马苏，刘军会，康玉麟，等.鄂尔多斯市防风固沙功能时空变化及驱动因素分析[J].环境科学研究，2022，35(11)：2477-2485.
Ma Su, Liu Junhui, Kang Yulin, et al. Spatio-temporal changes of sand-fixing function and its driving factors in the Ordos [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(11):2477-2485.

[2] 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.

[3] 闫鑫苒，张倪斌，宋政梅，等.机械沙障与治沙植物不同配置防风固沙效益研究[J].防护林科技，2024(4)：1-6.
Yan Xinran, Zhang Nibin, Song Zhengmei, et al. Study on the benefits of windbreak and sand fixation in different configurations of mechanical sand barriers and sand control plants [J]. Protection Forest Science and Technology, 2024(4):1-6.

[4] 刘南，曲鲁平，汤行昊，等.水分条件和热浪频次对木荷苗木光合特性与生长速率的影响[J].林业科学，2023，59(3)：104-114.
Liu Nan, Qu Luping, Tang Xinghao, et al. Effects of water conditions and heat wave frequency on the photosynthetic characteristics and growth rate of *Schima superba* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(3):104-114.

[5] 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.

[6] 牛丹妮，马瑞，刘虎俊，等.不同种植点配置的梭梭林防风效应的风洞试验[J].北京林业大学学报，2023，45(7)：76-87.
Niu Danni, Ma Rui, Liu Hujun, et al. Wind tunnel test on the windproof effect of *Haloxylon ammodendron* forests with different planting site configurations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(7):76-87.

[7] 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 *Haloxylon ammodendron* forests with different density and configuration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11):5413-5425.

[8] 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.

[9] 国务院.国务院关于印发全国主体功能区规划的通知[EB/OL].(2010-12-21). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2011-06/08/content_1441.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Notice of the State Council on Issuing the National Main Functional Zone Plan [EB/OL].(2010-12-21). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2011-06/08/content_1441.htm.

[10] 齐露鹭.退化黑土区土壤侵蚀强度的遥感表征及其对耕地固碳潜力的影响[D].长春：吉林大学，2024.
Qi Lulu. Remote sensing characterization of soil erosion intensity and its impact on the spatial pattern of cropland carbon sequestration potential in the degraded black soil region [D]. Changchun, Jilin: Jilin University, 2024.

[11] 王树力，胡天然，赵雨森，等.齐齐哈尔市嫩江沙地沙化土地的成因、类型、分布及治理技术[J].林业科技，2004，29(5)：15-17.
Wang Shuli, Hu Tianran, Zhao Yusen, et al. Sand land form reason, type distribution and harness techniques of Nen River sand in Qiqihar City [J]. Forestry Science and Technology, 2004,29(5):15-17.

[12] 张玉柱，俞冬兴，毕广有，等.嫩江沙地防护林低耗水树种评价[J].防护林科技，2014(1)：4-7.
Zhang Yuzhu, Yu Dongxing, Bi Guangyou, et al. Evaluation on species with low water-consumption in Nenjiang River sandyland [J]. Protection Forest Science and Technology, 2014(1):4-7.

[13] Zheng Xiao, Zhu Jiaojun, Xing Zefeng. Assessment of the effects of shelterbelts on crop yields at the regional scale in Northeast China [J]. Agricultural Systems, 2016,143:49-60.

[14] 朱朝云，丁国栋，杨明远.风沙物理学[M].北京：中国林业出版社，1992：30-105.
Zhu Zhaoyun, Ding Guodong, Yang mingyuan. Aeolian physics [M]. Beijing: China Forestry Publishing

House, 1992:30-105.

[15] Yoshihara Y, Tatsuno Y, Miyasaka K, et al. Can complementarity in water use help explain diversity-productivity relationships in semi-arid grasslands [J]. Journal of Arid Environments, 2020,173:103994.

[16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20):1896-1899.

[17] 吴晓旭,邹学勇,王仁德,等.毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J].中国沙漠,2011,31(4):828-835.
Wu Xiaoxu, Zou Xueyong, Wang Rende, et al. Aeolian movement characteristics over different underlying surfaces in Mu Us sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(4):828-835.

[18] 李鹏,高永,赵青,等.乌兰布和沙漠东北缘人工梭梭林防风效能分析[J].水土保持通报,2017,37(5):34-39.
Li Peng, Gao Yong, Zhao Qing, et al. Windbreak effectiveness of *Haloxylon ammodendron* on northeast edge of Ulan Buh Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(5):34-39.

[19] 郑旭,张倪斌,孙桂丽,等.吐鲁番市高昌区不同固沙植物的防风固沙效益[J].东北林业大学学报,2024,52(7):44-50.
Zheng Xu, Zhang Nibin, Sun Guili, et al. Wind prevention and sand-fixation benefits of different sand-fixing plants in Gaochang District, Turpan City [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024,52(7):44-50.

[20] Zhao Wenzhi, Hu Guanglu, Zhang Zhihui, et al. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: A case study in the Hexi Corridor, northwest China [J]. Ecological Engineering, 2008,33(2):119-125.

[21] 王强强,唐进年,杨自辉,等.不同配置固沙林的防风阻沙效果[J].西北林学院学报,2020,35(3):177-184.
Wang Qiangqiang, Tang Jinnian, Yang Zihui, et al. Wind-breaking and sand-fixing effect of sand-blocking shrub with different spatial distributions [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020,35(3):177-184.

[22] 张奕,肖辉杰,辛智鸣,等.乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):87-96.
Zhang Yi, Xiao Huijie, Xin Zhiming, et al. Wind prevention and sand resistance of typical shrubs in Ulan Buh Desert [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(1):87-96.

[23] 董智今,展秀丽,丁小花.毛乌素沙地西南缘不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J].水土保持研究,2022,29(3):43-48.
Dong Zhijin, Zhan Xiuli, Ding Xiaohua. Fractal features of soil particles under different land uses in the southwestern edge of the Mu Us Sandy Land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):43-48.

[24] 苏永中,赵哈林.科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J].生态学报,2004,24(1):71-74.
Su Yongzhong, Zhao Halin. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin sandy land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(1):71-74.

[25] 杜丹丹,高瑞忠,贾德彬.吉兰泰盐湖盆地土壤颗粒分形特征与空间变异分析[J].水土保持研究,2023,30(6):93-101.
Du Dandan, Gao Ruizhong, Jia Debin. Analysis of fractal characteristics and spatial variability of soil particles in the Jilantai Salt Lake basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):93-101.

[26] 拓飞,董治宝,南维鸽,等.沙地柏人工林和天然林风沙土特性研究[J].水土保持研究,2021,28(2):80-87.
Tuo Fei, Dong Zhibao, Nan Weige, et al. Study on the characteristics of aeolian sandy soils in plantation and natural stand of *Sabina vulgaris* [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):80-87.

[27] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等.青海湖沙地人工治理沙丘的风速廓线变化特征[J].水土保持研究,2013,20(6):162-167.
Wu Wangyang, Zhang Dengshan, Tian Lihui, et al. Variable characteristics of wind profile of the artificial sand dune in sandy land around the Qinghai Lake [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(6):162-167.

[28] 程锋梅,李生宇,郑伟,等.3类典型株型草本植物对沙面风蚀抑制作用的研究[J].干旱区研究,2022,39(5):1526-1533.
Cheng Fengmei, Li Shengyu, Zheng Wei, et al. Study on wind erosion inhibition of three typical herbaceous plants on sand surface [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5):1526-1533.

[29] 赵文智,白雪莲,刘婵.巴丹吉林沙漠南缘的植物固沙问题[J].中国沙漠,2022,42(1):5-11.
Zhao Wenzhi, Bai Xuelian, Liu Chan. Research on vegetation sand control around the south edge of Badain Jaran sand sea, China [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(1):5-11.

[30] 姜海鑫,周瑶,胡科,等.不同放牧时间对荒漠草原土壤颗粒组成及分形维数的影响[J].草业学报,2024,33(6):17-28.
Jiang Haixin, Zhou Yao, Hu Ke, et al. Effects of different grazing times on soil particle composition and fractal dimension in the desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024,33(6):17-28.