DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.004 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.004
林平, 赵永亮, 王来平, 等. 河套灌区防护林林龄对土壤抗风蚀性能的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):12-19.
Lin Ping, Zhao Yongliang, Wang Laiping, et al. Effects of shelterbelt age on soil wind-erosion resistance in Hetao Irrigation District[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):12-19.

河套灌区防护林林龄对土壤抗风蚀性能的影响

林 平[1], 赵永亮[1], 王来平[1], 席建军[1], 罗 玮[1], 薄 涛[1],
贾利红[2], 王 煜[2], 张 强[3], 张庆玮[3], 王 浩[3], 张风宝[3]
(1.内蒙古河套灌区水利发展中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015000; 2.黄河水利委员会晋陕蒙接壤地区水土保持监督局, 陕西 榆林 719000; 3.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:[目的]阐明防护林林龄影响土壤抗风蚀性能演变的规律及其驱动机制,为干旱半干旱区防护林经营管理与风蚀防控提供科学依据。[方法]选取1,4,12,25,32 a生防护林及未造林对照地,测定生物结皮厚度、根系质量密度、土壤容重等近地表特征指标;结合土壤可蚀性因子、土壤结皮因子、紧实度等指标,从多维角度量化土壤抗风蚀性能的演变特征,并通过加权法构建土壤抗风蚀性能综合指数,系统揭示了林龄演变对土壤抗风蚀性能的影响机制。[结果]防护林近地表特征随林龄增加呈显著变化趋势。生物结皮厚度、根系质量密度、容重、土壤质地在12 a或25 a后稳定。土壤抗风蚀性能综合指数在造林后持续增强,至25 a较对照地提高约98.6%,此后,增速明显放缓。其提升主要受生物结皮厚度和盖度以及根系质量密度和枯落物质量密度的直接和间接影响。[结论]防护林林龄是影响土壤抗风蚀性能的重要因素,土壤抗风蚀能力随林龄增加持续增强,但约25 a后趋于稳定。

关键词:风蚀; 土壤抗风蚀性能综合指数; 加权求和法; 防护林林龄; 河套灌区
中图分类号:S157.3; S727.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0012-08

Effects of shelterbelt age on soil wind-erosion resistance in Hetao Irrigation District

Lin Ping[1], Zhao Yongliang[1], Wang Laiping[1], Xi Jianjun[1], Luo Wei[1], Bo Tao[1], Jia Lihong[2], Wang Yu[2], Zhang Qiang[3], Zhang Qingwei[3], Wang Hao[3], Zhang Fengbao[3]
(1.*Inner Mongolia Hetao Irrigation District Water Conservancy Development Center, Bayannur, Inner Mongolia* 015000, *China*; 2.*Soil Conservation Supervision Bureau for Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia Contiguous Areas, YRCC, Yulin, Shaanxi* 719000, *China*; 3.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to elucidate the patterns and driving mechanisms by which shelterbelt age influences the evolution of soil wind-erosion resistance, thereby providing a scientific basis for shelterbelt management and wind-erosion control in arid and semi-arid regions. [**Methods**] Shelterbelts with ages of 1, 4, 12, 25, and 32 years, together with a non-forested control site, were selected. Near-surface soil characteristics, including biological soil crust thickness, root mass density, and soil bulk density, were measured. Combined with indicators such as soil erodibility factor, soil crust factor, and soil compaction, the evolution characteristics of soil wind-erosion resistance were quantified from multiple dimensions. A comprehensive soil wind-erosion resistance index was constructed using a weighted method to systematically elucidate the mechanisms by which shelterbelt age influences soil wind-erosion resistance. [**Results**] Near-surface characteristics of shelterbelt soils

收稿日期:2025-12-29 **修回日期:**2026-01-25 **接受日期:**2026-02-11
资助项目:内蒙古河套灌区水利发展中心"河套灌区现代化改造工程的水土保持效益评估"科技专项;西北农林科技大学"黄河流域生态保护和高质量发展"科技专项(2023HHZX001)
第一作者:林平(1973—),男,内蒙古五原人,学士,工程师,主要从事水土保持科研和技术管理工作。E-mail:675472089@qq.com
通信作者:赵永亮(1966—),男,内蒙古五原人,学士,高级工程师,主要从事水土保持科研和技术管理工作。E-mail:cyqs999@163.com

exhibited significant changes with increasing shelterbelt age. Biological soil crust thickness, root mass density, soil bulk density, and soil texture stabilized after 12 or 25 years. The comprehensive soil wind-erosion resistance index increased continuously after shelterbelt establishment, reaching an approximately 98.6% increase relative to the control at 25 years, after which the rate of increase markedly slowed. This enhancement was mainly driven by the direct and indirect effects of biological soil crust thickness and cover, as well as root mass density and litter mass density. [**Conclusion**] Shelterbelt age is a key factor affecting soil wind-erosion resistance performance. Soil wind-erosion resistance increases continuously with increasing shelterbelt age but gradually stabilizes after approximately 25 years.

Keywords: wind erosion; comprehensive soil wind-erosion resistance index; weighted summation method; shelterbelt age; Hetao Irrigation District

土壤是维系生态系统结构和功能的关键介质,其稳定性直接关系到区域生态安全。在干旱半干旱区,风蚀是土壤退化的主要驱动力之一,不仅导致表层土壤颗粒和有机质流失,还削弱土体结构稳定性,进而制约防护林生态系统的持续发育与防护功能发挥[1]。作为干旱半干旱区典型的生态防护工程单元,防护林自身土壤抗风蚀性能是维持植被稳定、生物结皮演替及防护结构完整性的基础[2]。我国北方干旱半干旱区约占国土面积的40%以上,其中内蒙古河套灌区风蚀活动频繁、防护林体系分布集中,其防护林土壤在长期风蚀胁迫下的稳定性问题具有较强的区域代表性和研究价值[2]。

防护林通过减弱风速、固定流沙、改善微气候与促进地表结构稳定,在防控风蚀中发挥关键作用[3]。已有研究表明,防护林的林龄演变过程会显著改变地表植被格局与土壤性质:幼龄林阶段地表扰动较强,根系尚未发育,风蚀风险高;中龄林阶段根系密度、枯落物积累和生物结皮发育共同增强土壤抗风蚀性;而成熟林阶段,土壤结构趋稳、孔隙度增加,生态系统达到相对平衡[4]。因此,系统分析不同林龄下防护林土壤抗风蚀性能的变化规律,对揭示防护林生态效益形成机制、指导干旱半干旱区生态防护体系建设具有重要意义。

土壤抗风蚀性能的变化受生物结皮、根系系统、枯落物层以及土壤结构与有机质含量等多因子共同控制[5]。其中,生物结皮通过胞外聚合物和藻丝网络增强颗粒间黏结力,提高表层稳定性[6-7];根系通过物理缠绕和生理活动促进团聚体形成并改善孔隙结构,从而显著增强抗风蚀能力[8];枯落物层可降低近地表风速、阻滞流沙运动,并为土壤持续输入有机质[9];同时,土壤容重和黏粒含量通过影响土体紧实度和表面粗糙度,间接调控土壤抗风蚀性能[9]。在干旱半干旱区防护林生态系统中,随着林龄增长,地表生物结皮由藻类向苔藓演替,根系与枯落物逐步累积,有机质含量增加、土壤容重下降,上述变化可能协同推动土壤结构改善并增强抗风蚀性能。然而,现有研究多集中于防护林地上结构对风速的削减效应,对林龄演变过程中近地表土壤理化特征及其对风蚀过程的反馈机制关注不足,尤其是在河套灌区这一典型风蚀区,不同林龄防护林土壤抗风蚀性能的时间演变规律尚不清晰。基于此,本研究以内蒙古河套灌区典型农田防护林为对象,选取1~32 a不同林龄样地,系统测定近地表特性与土壤抗风蚀性能指标,构建土壤抗风蚀性能综合指数,旨在揭示防护林林龄演变下土壤抗风蚀性能的时序变化特征及其驱动机制,为干旱区防护林建设与经营管理及风蚀过程模拟提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古河套灌区中部的临河区境内(40°40′—41°02′N,107°05′—107°45′E),属典型的干旱半干旱过渡带,地势平坦,平均海拔为1 010~1 050 m[2,5]。区内属温带大陆性气候,年平均气温约7.8 ℃,年降水量150~250 mm,而年潜在蒸发量高达2 200 mm,降水主要集中于7—9月,风力较强,年平均风速3.6 m/s,春季风蚀强烈,主导风向为西北风。

区域土壤类型以砂壤质潮土为主,质地疏松、保水性差,极易受风蚀破坏。农田、防护林和荒地是研究区的主要土地利用类型。其中,防护林以杨树为优势树种,柳树次之,局部区域伴生沙枣和柠条等灌木[2-3]。防护林主要分布在农田边界或渠道两侧,呈带状或片状分布。自20世纪70年代以来,灌区陆续开展农田防护林建设,形成了林龄梯度明显的典型体系,为本研究提供了理想的时空替代对象[9-11]。

1.2　样地设置

根据河套灌区防护林建设资料与实地调查,于2025年9月选取林龄1,4,12,25,32 a及未造林对照

地为研究对象，每个林龄各3个重复。各防护林样地建设规格相似（即每排间距接近2 m）、林带宽度一致（均为5排）、林带大致均为东西走向、林带长度略有差异（即20～35 m）；同时，各样地的原地形、母质条件及土地利用历史相似，均为平坦农田区。每种样地设3个重复小区（1 m×1 m），沿林带中部布设“S”型采样路线，采样深度为5 cm。为避免边界效应，各样地采样点距林带边缘至少1 m。对照样地选取长期裸露荒地地块，无明显植被覆盖。所有样地均未受机械扰动与放牧干扰。

1.3 近地表特性测定

近地表特性指标包括生物结皮厚度和盖度、根系质量密度、枯落物质量密度、土壤容重、质地及有机质含量。生物结皮厚度采用喷雾湿润后用游标卡尺从4个方向测量，精度0.03 mm，每样地测定20块样品取均值[10]。生物结皮类型通过样方法进行判定[10]。采用已分为100个网格的20 cm×20 cm塑料样框，按网格记录生物结皮类型；若记录中藻类或苔藓结皮占据网格数超过90个，则分别判定为藻结皮或苔藓结皮；若两者占比接近，则判定为混合结皮；每个样地重复5次。根系质量密度与枯落物质量密度均使用直径10 cm、高5 cm环刀取样，并通过水洗-烘干法进行测定[10]；每样地5个重复。土壤容重用直径5 cm、高5 cm环刀取原状土样，105 ℃烘干24 h后称重求均值[10]。采集0—5 cm混合土样，经自然风干，去除植物残体和石砾，轻轻研磨并充分混匀后分样备用。用于土壤质地测定的样品取风干土过2 mm筛的细土部分；用于土壤碳酸钙和有机质含量的样品取风干土进一步研磨并过0.25 mm筛。土壤质地、碳酸钙含量、有机质含量分别采用激光粒度仪法[10]、EDTA滴定法[11]和重铬酸钾比色法[10]测定，各重复3次。

1.4 土壤抗风蚀性能指标确定

为综合反映土壤抗风蚀能力，分别选取土壤紧实度、土壤黏结力、土壤平均重量直径，以及修正土壤风蚀方程模型（Revised Wind Erosion Equation，RWEQ）中的土壤可蚀性因子（Erodibility Factor，EF）和土壤结皮因子（Soil Crust Factor，SCF）5项关键指标[12]。土壤紧实度和黏结力使用Eijkelkamp袖珍贯入仪和黏结力仪现场测定，每样地各重复15次[10]。土壤团聚体平均重量直径（Mean Weight Diameter，MWD）采用干筛法测定[13]，代表土壤团聚体稳定性。称取500 g自然风干且粒径大于2 mm的土样，置于一组直径为20 cm的套筛中，套筛孔径依次为10，5，2，1，0.5，0.25 mm，并安装于振筛机上进行筛分。振筛过程中，套筛以每分钟200次振动的频率振荡5 min，随后分别称量滞留在各筛层上的团聚体质量及通过最小孔径筛孔的颗粒质量，进而计算土壤团聚体平均重量直径〔公式（1）〕[13]。土壤可蚀性因子（EF）和土壤结皮因子（SCF）依据实测土壤质地、碳酸钙含量及有机质含量，采用修正的风蚀模型经验公式〔公式（2）和公式（3）〕计算[12]；数值越大表示越易被风蚀。

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}(x_i w_i) \tag{1}$$

式中：x_i为两个相邻筛子的平均孔径（mm）；w_i为残留在第i个筛子上的团聚体比例。

$$\mathrm{EF}=\frac{29.9+0.31\mathrm{Sa}+0.17\mathrm{Si}+0.33\dfrac{\mathrm{Sa}}{\mathrm{Cl}}-2.59\mathrm{OM}-0.95\mathrm{Ca}}{100} \tag{2}$$

$$\mathrm{SCF}=\frac{1}{1+0.0066(\mathrm{Cl})^2+0.021(\mathrm{OM})^2} \tag{3}$$

式中：Sa为土壤粗砂含量（%）；Si为土壤粉粒含量（%）；Cl为土壤黏粒含量（%）；OM为土壤有机质含量（%）；Ca为土壤碳酸钙含量（%）。

为系统评价不同林龄防护林土壤抗风蚀性能，采用加权综合指数法构建土壤抗风蚀性能综合指数[10]。首先通过因子分析确定各指标权重（表1），再依据指标的正负相关关系选取“S型”或“反S型”隶属函数，并确定隶属度函数的上下限（表2）。所有指标标准化后，利用下式计算土壤抗风蚀性能综合指数（Comprehensive Soil-Wind Erosion Resistance Index，CSRI）：

$$\mathrm{CSRI}=\sum_{j=1}^{n}A_j B_j \tag{4}$$

式中：A_j为第j个土壤抗风蚀性能指标的权重；B_j为第j个土壤抗风蚀性能指标的隶属度。

表1 不同林龄防护林土壤抗风蚀性能指标的公因子方差和权重

Table 1 Common factor variance and weights of soil wind-erosion resistance indicators in shelterbelts of different ages

指标	土壤可蚀性因子/%	土壤结皮因子	土壤紧实度/kPa	土壤平均重量直径/mm	土壤黏结力/kPa
公因子方差	0.952	0.915	0.945	0.932	0.95
权重	0.203	0.195	0.201	0.199	0.202

1.5 统计分析

在对试验数据进行正态性和方差齐性检验的基础上，采用单因素方差分析（Analysis of Variance，ANOVA）对不同林龄农田防护林的近地表特性、各项

土壤抗风蚀性能指标及土壤抗风蚀性能综合指数进行显著性检验,并通过 Tukey's HSD 进行事后比较。借助 R 软件中的"linkET"包开展 Spearman 秩相关分析,以探讨土壤抗风蚀性能各指标与近地表特性间的相关模式。采用偏最小二乘路径模型(Partial Least Squares Path Modeling, PLS-PM)构建土壤抗风蚀性能预测模型,以解释度(R^2)评估模型优劣(本研究中 R^2 为 0.95),进而明确驱动土壤抗风蚀性能综合指数提升的机制。

表 2　不同林龄防护林各土壤抗风蚀性能指标在隶属函数中的临界值

Table 2　Critical values for different soil wind-erosion resistance indicators in membership functions for shelterbelts of different ages

指标	反"S"型			"S"型	
	土壤可蚀性因子/%	土壤结皮因子	土壤紧实度/kPa	土壤平均重量直径/mm	土壤黏结力/kPa
a	34.11	0.52	240	0.89	5.88
b	8.3	0.18	180	2.47	12.35

2　结　果

2.1　近地表特性随林龄的变化

防护林近地表特征随林龄增加呈显著变化趋势。统计分析显示,防护林生物结皮厚度、根系质量密度、容重、黏粒含量、砂粒含量在 12 a 或 25 a 后稳定(表 3)。与对照相比,当生物结皮厚度、根系质量密度、黏粒含量及粉粒含量趋于稳定后(12 a 或 25 a),其分别增加了 64.5%,51.9%,29.4% 及 3.7%;而土壤容重和砂粒含量分别减小了 5.0% 和 18.5%。防护林枯落物质量密度整体随林龄变化幅度较小,但在林龄 32 a 的防护林中显著高于其他样地。

表 3　农田防护林近地表特性随林龄的变化特征

Table 3　Variation characteristics of near-surface properties of farmland shelterbelts of different ages

林龄/a	0—1 cm		0—5 cm						
	结皮类型	结皮厚度/mm	枯落物质量密度/($kg \cdot m^{-2}$)	根系质量密度/($kg \cdot m^{-3}$)	容重/($kg \cdot m^{-3}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	有机质/($g \cdot kg^{-1}$)
对照	藻	6.59d	0.13a	0.54c	1234.7a	10.93d	59.86d	29.21b	3.05f
1	藻	6.54d	0.14a	0.53c	1279.21a	10.52d	56.39e	33.09a	7.06e
4	藻	8.92c	0.11a	0.65b	1217.61b	12.48c	58.28d	29.23b	8.86d
12	苔藓	10.84ab	0.12a	0.82a	1172.81c	13.60b	60.52c	25.88c	9.85c
25	苔藓	11.73a	0.14a	0.86a	1157.22c	14.14a	62.06a	23.80d	10.97b
32	苔藓	11.71a	0.17b	0.86a	1159.51c	14.01a	61.24ab	24.75d	12.39a

注:每一列中,不同的字母表示该近地表特性在两个或多个年限之间有显著差异($p<0.05$)。

2.2　土壤抗风蚀性能指标随林龄的变化

对各林龄农田防护林地的所有土壤抗风蚀性能指标均进行了统计分析,其变异系数范围为 4.2%~47.3%,表明其时间变异性均较强。统计分析显示,林龄对土壤抗风蚀性能各指标均产生了显著影响($p<0.05$)。防护林地的土壤可蚀性因子、土壤结皮因子及土壤紧实度均随林龄的增加大致呈现先快速下降,然后下降速率减缓或达到稳定,而土壤平均重量直径和土壤黏结力的变异趋势则与其相反($p<0.05$)(图 1A—1E)。

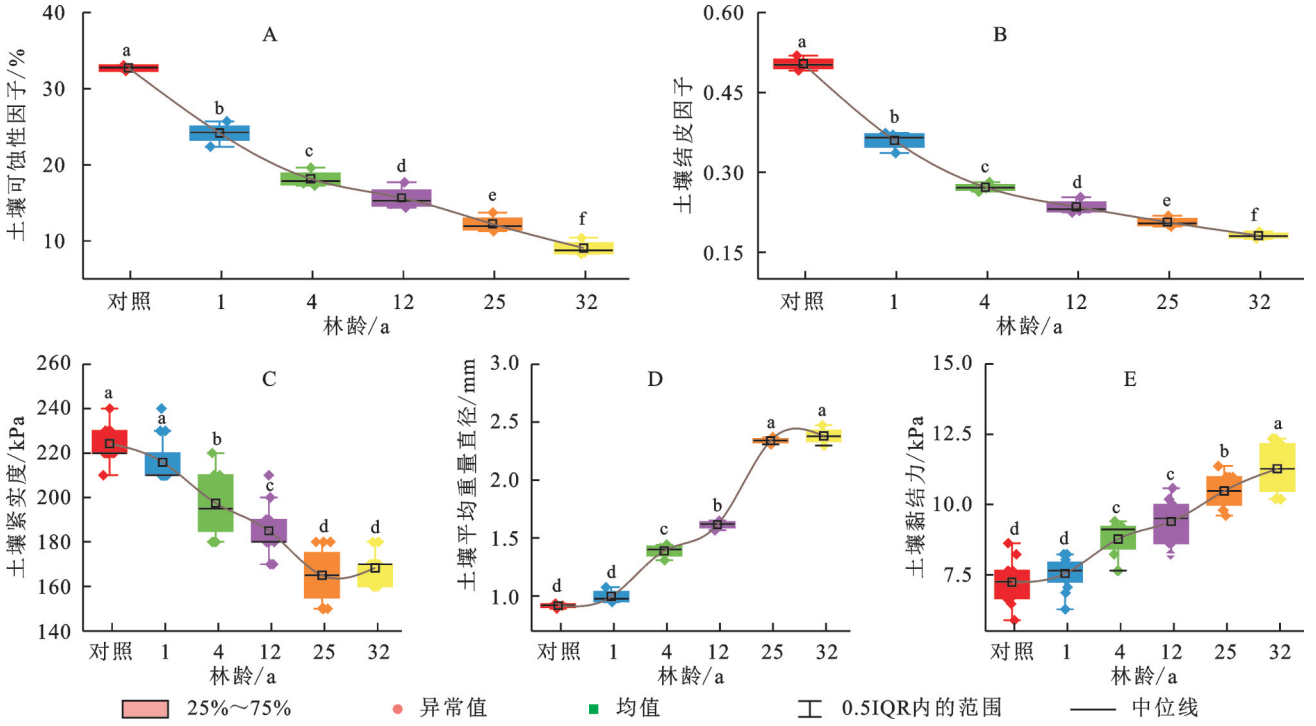
在林龄小于 25 a 时,土壤可蚀性因子由对照的约 33.1% 迅速下降至 12.2%,之后下降速率明显减缓(图 1A)。土壤结皮因子的变化趋势与土壤可蚀性因子相似,在 1~12 a 阶段显著下降,其值由 0.36 降至约 0.23(图 1B)。土壤紧实度与上述两个指标的变化相似,由对照地的约 224 kPa 降至 168 kPa,降幅约 30.4%,且在 25 a 后趋于平稳(图 1C)。

与之相反,土壤平均重量直径随林龄增加显著增大,由对照地的 0.9 mm 上升至 32 a 时的约 2.4 mm,增加幅度为 1.67 倍,25 a 后达到稳定(图 1D)。土壤黏结力的变化趋势与平均重量直径相似,由对照地的 7.2 kPa 快速上升至 11.3 kPa,升幅约 56.9%,25 a 后增加速率明显减缓(图 1E)。

总体来看,不同年龄的防护林均能显著提升土壤抗风蚀性能。随着林龄的增加,土壤抗风蚀性能逐渐增强,当林龄达到 25 a 后增幅明显减小,部分指标甚至趋于稳定。

2.3　土壤抗风蚀性能综合指数随林龄的变化

不同林龄防护林的土壤抗风蚀性能综合指数均显著大于对照(图 2)。随林龄增加,在 1~25 a 期间土壤抗风蚀性能综合指数呈快速上升趋势,而后增加速率骤减。与对照相比,经过 25 a 的恢复,防护林的土壤抗风蚀性能综合指数提高 98.6%。



注：对于误差线上方标注的小写字母，重复的字母表示该抗风蚀性能指标在两个或多个林龄（或与对照组）之间无显著差异（$p>0.05$），反之，表明有显著差异（$p<0.05$），下图同。

图 1 农田防护林土壤可蚀性因子、土壤结皮因子、土壤紧实度、土壤平均重量直径及土壤黏结力随林龄的变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of soil erodibility factor, soil crust factor, soil compaction, mean weight diameter, and soil cohesion with farmland shelterbelt age

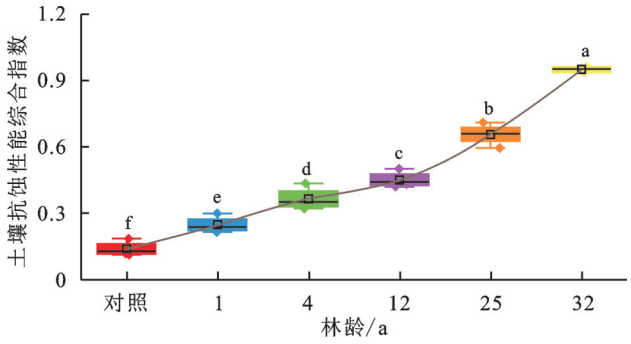


图 2 防护林土壤抗风蚀性能综合指数随林龄的变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of comprehensive soil wind-erosion resistance index with shelterbelt age

2.4 土壤抗风蚀性能与近地表特性的关系

相关分析表明，土壤可蚀性因子、结皮因子和土壤紧实度均与生物结皮厚度和盖度、根系质量密度、有机质含量、黏粒含量呈显著负相关关系，与土壤容重呈显著正相关关系；与之相反，土壤平均重量直径和土壤黏结力与生物结皮厚度和盖度、根系质量密度、有机质含量、黏粒含量呈显著正相关关系，而与土壤容重呈显著负相关关系（图 3）。偏最小二乘路径模型分析表明，生物结皮因子（即结皮盖度和厚度）和植被因子（根系质量密度和枯落物质量密度）均能直接提升土壤抗风蚀性能综合指数，也均能通过土壤因子（黏粒含量、砂粒含量、容重）间接提升土壤抗风蚀性能综合指数（图 4）。

3 讨 论

3.1 防护林近地表特性随林龄演变的驱动机制

防护林林龄较小时（<4 a），地表以藻结皮为主，结皮厚度为 6.5～8.9 mm；而后结皮类型转变为苔藓结皮，结皮厚度增加至 10.8～11.7 mm，整体增幅>60%。类似的由藻结皮向苔藓结皮演替的过程，已在多个干旱半干旱风蚀区的防护林体系中被报道，普遍被认为是地表微生境改善和风蚀扰动减弱的结果[6-7]。同时，本研究区结皮厚度的增加幅度处于上述风蚀区报道范围内。

根系质量密度随林龄持续增加（表 3），并在林龄达到 12 a 及以上时显著高于低林龄样地，反映了防护林系统在风蚀区环境条件下地下生物结构随恢复时间逐步累积的特征。已有大量研究指出，在风蚀敏感区，根系密度的提升有助于增强土体内部结构稳定性，从而减弱风蚀扰动对地表结构的破坏[2,8,14]。与自然降水主导的风蚀区防护林相比，本研究区根系质量密度的增加幅度相对较快，这可能与河套灌区防护林在人工灌溉条件下水分供应较为稳定有关，从而在一定程度上促进了地下生物量的持续累积。

枯落物质量密度在多数林龄阶段差异较小，而在 32 a 林龄防护林中显著高于其他样地（表 3），表明枯落物的显著累积仅在防护林长期发育后才表现出

来。这一特征可能与枯落物“产生—分解—再迁移”过程在风蚀区长期处于动态平衡状态有关[5]。在防护林早中期阶段,尽管枯落物输入逐步增加,但受强风扰动和地表再分配作用影响,其实际滞留量有限;而在高林龄阶段,随着林分郁闭度提高、近地表风速降低,同时林下植被逐渐发育,枯落物的物理迁移受到抑制,其地表滞留能力显著增强,从而表现出明显的净累积[2]。

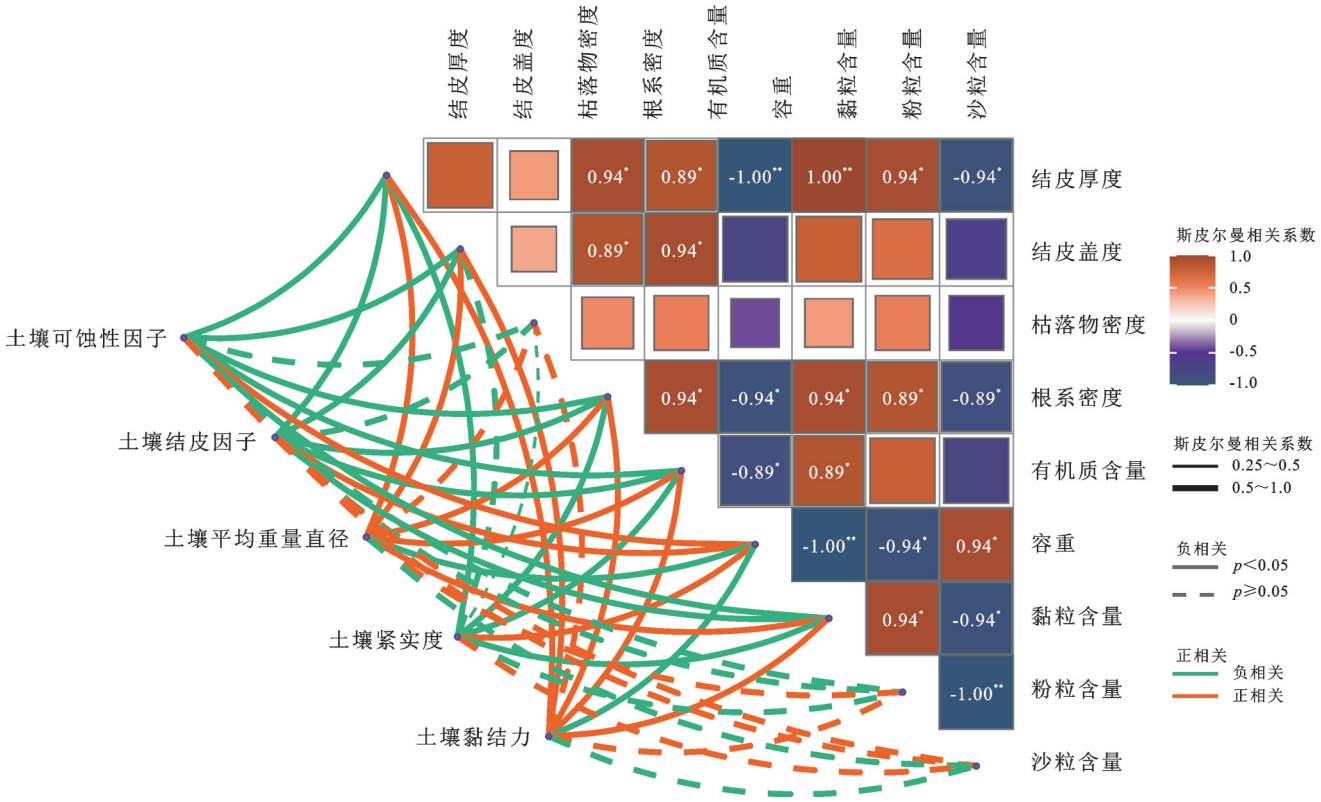


图 3　防护林土壤可蚀性因子、土壤结皮因子、土壤平均重量直径、土壤黏结力及土壤紧实度 Mantel test 分析,以及近地表特性之间关联的 Spearman 相关性分析

Fig. 3　Mantel test analysis of soil erodibility factor, soil crust factor, mean weight diameter, soil cohesion, and soil compaction in shelterbelts, and Spearman correlation analysis among near-surface properties

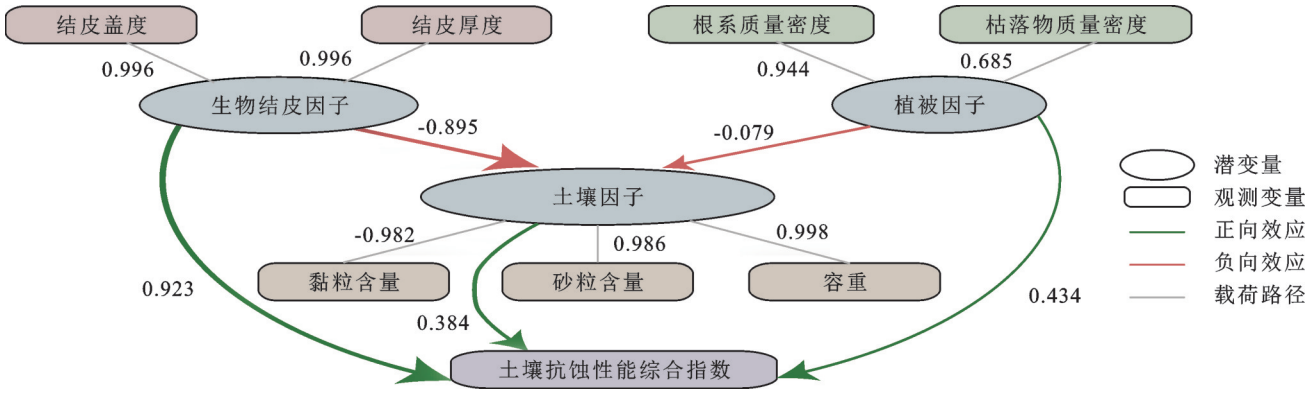


图 4　生物结皮因子、植被因子及土壤因子对防护林土壤抗风蚀性能综合指数的影响

Fig. 4　Effects of biocrust, vegetation, and soil factors on comprehensive soil wind-erosion resistance index of shelterbelts

防护林土壤容重随林龄显著下降,而有机质含量稳步上升,黏粒含量增加(表 3)。这与 Wang 等[10]的研究结论一致,即随植被发育与生物输入增强,土壤结构趋向稳定、有机质积累显著。这种演变一方面源于根系活动、结皮形成与枯落物混入共同降低了压实度;另一方面,生物过程增加了土壤团聚体比例,使得土体抵抗风蚀破坏的能力持续增强[14]。

3.2　防护林近地表特性对土壤抗风蚀性能的影响

土壤可蚀性因子是评估地表抗风蚀能力的关键指标。本研究结果表明,该因子与生物结皮厚度、根系质量密度、有机质含量呈显著负相关,而与砂粒含量呈显著正相关(图 3)。这与随着防护林林龄增加,生物结皮逐步向高等级演替,促进土壤黏化,减少黏粒流失,并显著提升土壤有机质含量有关[7,10]。这也是根系系统

通过“加筋锚固”作用增加地表稳定性,减小黏粒流失,并通过根系活动提升有机质含量的结果[8,10]。该结果与张珂[7]和Wang[10]等的结论一致,均说明生物结构改良在提升防护林地表层稳定性中的重要作用。

土壤结皮因子反映结皮发育对土壤潜在可蚀性的抑制作用。本研究中,土壤结皮因子随林龄显著下降(图3),表明防护林恢复促进了结皮的形成与稳定,显著增强了土壤抗蚀性能[2-3]。相关分析表明,土壤结皮因子与生物结皮盖度和厚度、根系质量密度、有机质含量、黏粒含量显著相关。这表明,生物结皮可能通过微生物代谢产物的黏结作用,并协同黏粒和有机质的胶结效应,增强土壤表层结构稳定性,从而提高起动阈值风速并减少土壤流失[10,15]。同时,根系发育增加了表层有机质储量,促进结皮有机质累积与矿物结合,进一步降低土壤结皮因子值[6-7,10]。

土壤平均重量直径是衡量团聚体稳定性的核心指标,与生物结皮盖度和厚度、有机质含量、根系质量密度及黏粒含量显著正相关(图3)。一方面,生物结皮可通过菌丝网络的缠结与黏结作用促进土壤团聚体的形成与稳定,并且这种作用会随着生物结皮的演替而加强[6-7,10]。另一方面,有机质作为持久性胶结剂,通过形成有机-矿物复合体提高了团聚体的稳定性[10,16],并且该效应随着防护林林龄的提升而加强。根系可以通过其“加筋锚固”作用促进团聚体形成,也可以通过其分泌物促进微生物活动并增加有机碳输入,从而加快团聚体形成[8,10,17]。防护林林龄增加使根系发育与碳输入增强,土壤平均重量直径也因此显著提升[14]。

土壤紧实度对地表抗风蚀稳定性同样具有重要意义。图3显示,紧实度与结皮厚度、根系密度、有机质含量、黏粒含量均呈显著负相关关系,而与容重呈显著正相关关系($p<0.05$)。这表明,随着防护林林龄增长,生物结皮和根系发育及有机物累积协同作用,促进土壤紧实度降低并优化孔隙分布,从而推动土壤结构由相对致密状态向更为疏松、有序的状态转变[6-7,10,16-17]。

土壤黏结力是反映防护林地抗风蚀性能强弱的重要指标,其变化受生物结皮盖度和厚度、根系质量密度、有机质含量及黏粒含量等因素的综合调控(图3)。生物结皮层能够通过微生物多糖和胞外聚合物在表层形成稳定的胶结膜,增强细颗粒之间的黏结力[6-7,18]。根系除通过“加筋效应”直接提高土壤抗剪强度外,还可通过分泌物与根残体分解持续输入有机质,进一步强化胶结作用[16]。土壤黏粒和有机质因其较大的比表面积和较强的吸附力,有利于形成稳定的胶结体[17]。土壤容重在适中范围内有助于提升抗剪强度,但若过度压实则会破坏孔隙结构和团聚体胶结,对黏结力维持不利[10]。

3.3 防护林土壤抗风蚀性能变异的驱动机制

防护林土壤抗风蚀性能综合指数随林龄呈先快速提升,25 a后增加速率明显减缓的趋势(图2)。这表明防护林在25 a左右可基本恢复至稳定的抗风蚀水平。这与Wang等[10]在黄土高原弃耕地研究中的结论一致,说明在半干旱生态系统中,土壤结构稳定性与生物输入达到平衡需约20~30 a。

偏最小二乘路径模型分析表明,生物结皮因子(即结皮盖度和厚度)和植被因子(根系质量密度和枯落物质量密度)均能直接提升土壤抗风蚀性能综合指数,也均能通过提升土壤黏粒含量,或降低砂粒含量和容重,进而提升土壤抗风蚀性能综合指数(图4)。但在上述过程中,生物结皮因子的效应比植被因子更显著。这表明防护林生态系统的抗蚀性能主要受正向生物输入驱动,是地表生物结皮、根系和土壤物理结构的相互作用过程。生物结皮形成与有机质积累共同降低了土壤结皮因子值,根系活动与团聚体发育增强了黏结力与土壤平均重量直径,而容重与紧实度的下降进一步优化了表层结构。这些综合效应最终表现为防护林长期恢复下土壤抗风蚀性能综合指数的显著提升,验证了“生物-物理-结构”多因子耦合控制的抗蚀机制。

4 结 论

(1) 防护林近地表特征随林龄系统演变。防护林生物结皮厚度、根系质量密度、枯落物质量密度、有机质含量、黏粒含量均随林龄增加显著上升,而土壤容重则下降。12 a或25 a后多数近地表特征逐渐趋于稳定。

(2) 防护林土壤抗风蚀性能大致呈先显著上升后趋于稳定的趋势。防护林土壤黏结力和平均重量直径随林龄增长显著上升,而土壤可蚀性因子、土壤结皮因子与土壤紧实度下降,25 a后多数指标增加速率明显减缓或者趋于稳定。综合来看,土壤抗风蚀性能综合指数在造林后持续增强,至25 a较对照地提高约98.6%,此后,增速明显放缓。

(3) 生物与土壤因子协同调控抗风蚀过程。生物结皮因子(即结皮盖度和厚度)和植被因子(根系质量密度和枯落物质量密度)均能直接提升土壤抗风蚀性能综合指数,也均能通过土壤因子(黏粒含量、砂粒含量、容重)间接提升土壤抗风蚀性能综合指数。总之,防护林土壤抗风蚀性能的提升是“生物输入—结构改良—稳定增强”的协同过程。

参考文献(References):

[1] 李金梦,祝宏辉,胡芳榕,等."退耕还林还草"工程对干旱区生态系统服务的影响[J].水土保持研究,2025,32(5):298-307.
Li J M, Zhu H H, Hu F R, et al. Effects of Grain for Green Program on ecosystem services in arid regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(5):298-307.

[2] 吴盈盈,王振亭.河套平原土壤风蚀风险评估[J].干旱区地理,2023,46(3):418-427.
Wu Y Y, Wang Z T. Risk assessment of soil wind erosion in Hetao Plain[J]. Arid Land Geography, 2023,46(3):418-427.

[3] 张扬,田美荣,陈艳梅,等.基于RWEQ模型的磴口县沙地与耕地风蚀评价及验证[J].干旱区资源与环境,2021,35(9):95-102.
Zhang Y, Tian M R, Chen Y M, et al. Evaluation and verification of wind erosion of sandy land and cultivated land in Dengkou County based on RWEQ model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(9):95-102.

[4] 刘珺,郭中领,常春平,等.基于RWEQ和WEPS模型的中国北方农牧交错带潜在风蚀模拟[J].中国沙漠,2021,41(2):27-37.
Liu J, Guo Z L, Chang C P, et al. Potential wind erosion simulation in the agro-pastoral ecotone of Northern China using RWEQ and WEPS models[J]. Journal of Desert Research, 2021,41(2):27-37.

[5] 邢丽珠,张方敏,邢开成,等.基于RWEQ模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J].中国沙漠,2021,41(5):111-119.
Xing L Z, Zhang F M, Xing K C, et al. Change of soil wind erosion and attribution in Bayannur, Inner Mongolia based on the Revised Wind Erosion Equation[J]. Journal of Desert Research, 2021,41(5):111-119.

[6] 贺郝钰,刘蔚,常宗强,等.沙区生物土壤结皮演替对表层土壤养分和微生物群落组成的影响[J].干旱区地理,2024,47(10):1724-1734.
He H Y, Liu W, Chang Z Q, et al. Effects of biological soil crust succession on soil nutrients, microbial community composition in desert regions[J]. Arid Land Geography, 2024,47(10):1724-1734.

[7] 张珂,刘德汉,杨家宝,等.生物结皮演替对荒漠土壤功能恢复的影响[J].应用与环境生物学报,2026,32(5):814-824.
Zhang K, Liu D H, Yang J B, et al. Impact of biocrust succession on the restoration of desert soil functions[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2026,32(5)::814-824.

[8] 志辉,格日乐,卢亚慧,等.沙棘根土复合体抗剪特性及其影响因素研究[J].水土保持研究,2025,32(6):184-191.
Zhi H, Ge R L, Lu Y H, et al. Research on shear characteristics and influencing factors of *Hippophae rhamnoides* root-soil composites[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(6):184-191.

[9] Gong G L, Liu J Y, Shao Q Q, et al. Sand-fixing function under the change of vegetation coverage in a wind erosion area in Northern China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014,5(2):105-114.

[10] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2018,325:18-27.

[11] 张小瑾.河套地区(内蒙古磴口)晚冰期以来古气候演化初步研究[D].北京:中国地质大学,2011.
Zhang X J. Preliminary study of paleoclimate changes in Hetao Area since Late Glacial: a case study in Dengkou County of Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences,2011.

[12] 姜雅琼,王添,李占斌,等.西柳沟流域土壤风蚀时空变化及其对景观格局的响应[J].水土保持研究,2025,32(2):14-23.
Jiang Y Q, Wang T, Li Z B, et al. Spatiotemporal changes of soil wind erosion and its response to landscape pattern in Xiliuogou watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(2):14-23.

[13] Sainju U M. Carbon and nitrogen pools in soil aggregates separated by dry and wet sieving methods[J]. Soil Science, 171(12):937-949.

[14] 韩金丹,毕华兴,赵丹阳,等.刺槐人工林林龄对土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2025,32(5):1-10.
Han J D, Bi H X, Zhao D Y, et al. Effects of the age of *Robinia pseudoacacia* on soil aggregate stability and soil erodibility[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(5):1-10.

[15] Belnap J, Gillette D A. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance[J]. Journal of Arid Environments, 1998,39(2):133-142.

[16] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004,79(1):7-31.

[17] Yu Z H, Zhang J B, Zhang C Z, et al. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability[J]. Soil and Tillage Research, 2017,174:251-260.

[18] 马小凤,张文芳,高丽倩.土壤质地对人工藓结皮发育及结构体稳定性的影响[J].水土保持研究,2025,32(6):177-183.
Ma X F, Zhang W F, Gao L Q. Effects of soil texture on development and structural stability of artificially cultivated moss crusts[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(6):177-183.