

干旱风沙区防护林结构特征及生态防护功能研究

陈 伟

新疆岳途工程咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年6月21日; 录用日期: 2026年7月14日; 发布日期: 2026年7月23日

摘 要

干旱风沙区生态环境脆弱, 风蚀、沙尘暴和土地退化等问题较为突出, 对区域生态安全和农业生产造成严重影响。防护林作为重要的生态工程措施, 能够通过降低近地表风速、阻滞风沙输移、改善土壤结构和调节农田小气候等方式发挥生态防护功能。本文以干旱风沙区防护林为研究对象, 围绕防护林空间分布识别、结构特征分析、防风固沙与土壤保护功能、退化监测及优化管理等方面进行系统论述。研究认为, 防护林生态功能的发挥与林带高度、宽度、冠层密度、孔隙度、垂直结构、根系性状和林带连续性密切相关。遥感、无人机和LiDAR技术的发展, 为防护林空间识别、三维结构测定和健康状态监测提供了重要技术支撑。未来应加强乔灌草复合配置、结构优化、退化林带修复和长期动态监测, 以提升干旱风沙区防护林的防风固沙能力和生态稳定性。在此基础上, 本文进一步强调, 防护林研究不应停留在防风固沙效应的单向评价, 而应将区域耗水、小气候调节、土壤稳定性与管理反馈纳入同一分析框架, 以识别不同生态功能之间的协同效应和潜在权衡关系。

关键词

防护林, 干旱风沙区, 结构特征, 防风固沙, 生态防护功能

Structural Characteristics and Ecological Protection Functions of Shelterbelts in Arid Sandy Region

Wei Chen

Xinjiang Yuetu Engineering Consulting Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: June 21, 2026; accepted: July 14, 2026; published: July 23, 2026

Abstract

Arid sandy regions are characterized by fragile ecological environments, where wind erosion, dust storms, and land degradation pose serious threats to regional ecological security and agricultural production. Shelterbelts, as important ecological engineering measures, play a protective role by reducing near-surface wind speed, blocking sand transport, improving soil structure, and regulating farmland microclimates. Taking shelterbelts in arid wind-sand regions as the research object, this paper systematically discusses their spatial distribution identification, structural characteristics, windbreak and sand-fixation functions, soil protection effects, degradation monitoring, and optimization management. The study indicates that the ecological protective functions of shelterbelts are closely related to belt height, width, canopy density, porosity, vertical structure, root traits, and belt continuity. The development of remote sensing, unmanned aerial vehicles, and LiDAR technologies provides important technical support for spatial identification, three-dimensional structural measurement, and health monitoring of shelterbelts. In the future, more attention should be paid to mixed configurations of trees, shrubs, and grasses, structural optimization, restoration of degraded shelterbelts, and long-term dynamic monitoring, so as to enhance the windbreak and sand-fixation capacity and ecological stability of shelterbelts in arid wind-sand regions. Furthermore, this paper argues that shelterbelt evaluation should move beyond a one-dimensional assessment of windbreak benefits and incorporate water consumption, microclimate regulation, soil stabilization, and management feedback into an integrated framework, so that synergies and trade-offs among ecological functions can be identified more clearly.

Keywords

Shelterbelt, Arid Sandy Region, Structural Characteristics, Windbreak and Sand Fixation, Ecological Protective Function

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱风沙区是我国生态环境较为脆弱、风沙灾害频发的典型区域。该类地区降水稀少、蒸发强烈、植被覆盖度低，地表土壤颗粒松散，在大风天气作用下极易发生土壤风蚀、沙尘输移和农田退化等问题。长期以来，风沙活动不仅影响区域生态安全，也对农业生产、交通运输和居民生活造成不利影响。特别是在绿洲边缘、农牧交错带和荒漠-农田过渡区，沙尘暴和风蚀现象常常表现出突发性强、影响范围广和治理难度大的特点。因此，如何通过生态工程手段降低风沙危害、稳定农田生态系统，成为干旱区生态建设和土地资源保护的重要任务。

防护林作为一种人工生态屏障，在干旱风沙区治理中具有不可替代的作用[1] [2]。防护林通常由乔木、灌木或乔灌草复合群落组成，呈线状、带状或网格状分布于农田、道路、居民点和绿洲边缘。其主要功能是降低近地表风速、削弱风沙流强度、减少土壤颗粒起动和输移，同时改善农田小气候、增加空气湿度、调节土壤水热条件，并在一定程度上提升区域生态系统稳定性。与单纯工程固沙措施相比，防护林具有持续性强、生态效益综合、景观协调性好等优势，是干旱区防沙治沙和农田保护体系中的重要组成部分。

近年来,随着遥感、无人机、LiDAR、深度学习和数值模拟等技术的发展,防护林研究逐渐从传统的样地调查和经验评价转向空间化、精细化和量化[3]-[5]。过去的研究多关注防护林是否具有防风固沙作用,而当前研究更加重视防护林的结构特征、健康状态、空间连续性及其与生态功能之间的关系。例如,林带高度、宽度、冠层密度、孔隙度、枝叶分布和根系性状等因素,都会影响防护林的防风效率和土壤保护能力。如果防护林结构不合理,可能出现过密导致水分消耗过大,或过疏导致防风效果不足等问题。因此,系统分析防护林结构特征及其生态防护功能,对于优化干旱风沙区防护林建设具有重要意义。

需要指出的是,现有研究仍存在较明显的知识空白和技术瓶颈。第一,已有成果多以防风效率、输沙通量和土壤风蚀抑制率为核心指标,对防护林的水文生态效应关注不足,特别是林带蒸腾耗水、地下水消耗、小气候调节及其与防风效益之间的协同与权衡关系尚未得到充分解释。第二,防护林结构与功能之间的关系仍多停留在相关性描述层面,林带孔隙度、垂直冠层结构、根系分布和土壤水分状态如何共同影响近地表风场、沙粒输移和植被衰退,仍缺乏统一的机制模型。第三,遥感、无人机和 LiDAR 虽然提高了空间识别能力,但不同数据源在空间尺度、时间频率和指标含义上存在不一致,深度学习模型也面临样本依赖强、跨区域迁移性不足和长期验证缺乏等问题。

因此,防护林研究需要从简单的信息陈述转向面向机制和权衡关系的批判性分析。尤其在干旱风沙区,高密度林带可能短期增强阻风效果,但也可能加剧土壤水分亏缺和林木衰退;低密度林带虽然减轻水分压力,却可能削弱近地层阻沙能力。如何在防风固沙效益、水分承载力、植被健康和农田小气候改善之间寻找适宜结构阈值,是当前防护林研究和管理中的核心学术争议。

本文以干旱风沙区防护林为研究对象,围绕防护林空间分布识别、结构特征分析、防风固沙与土壤保护功能、退化监测和优化管理等方面展开论述。文章旨在阐明防护林结构与生态功能之间的内在联系,分析现代技术在防护林监测与评价中的应用价值,并提出防护林生态功能提升的相关建议。通过该研究,可为干旱风沙区防护林建设、退化林带修复和生态屏障功能提升提供一定理论参考。基于上述认识,本文构建“空间识别-结构评价-功能监测-精准管理”的闭环研究思路:首先利用遥感、无人机和 LiDAR 识别防护林空间格局及断带问题;其次从高度、宽度、孔隙度、冠层垂直分层和根系性状等方面评价结构合理性;随后综合监测防风固沙、土壤保护、水分消耗和小气候调节等功能;最后将监测结果反馈到补植修复、密度调控、树种配置和分区管理中。其框架图,如图 1 所示。



Figure 1. Closed-loop conceptual framework of shelterbelt in arid sandy region
图 1. 干旱风沙区防护林的闭环概念框架

2. 防护林空间分布识别与结构特征分析

2.1. 防护林空间分布特征

在干旱风沙区,防护林的空间分布通常与农田格局、主导风向、地形条件、水源分布和绿洲边界密切相关。农田防护林多分布于耕地边缘、道路两侧、灌渠沿线和居民点周边,形成线状或网格状结构;绿洲边缘防护林则常呈带状分布,主要用于阻挡荒漠沙源向绿洲内部扩展。由于干旱区土地利用类型复杂,防护林常与农田、果园、天然灌丛、道路和水渠交错分布,表现出明显的景观镶嵌特征。

从空间形态上看,防护林可分为线性防护林、斑块状防护林和复合型防护林。其中,线性防护林是农田生态系统中最常见的形式,具有宽度窄、长度大、方向性明显的特点。其防护效果不仅取决于林带本身的结构,也取决于林带与主导风向之间的夹角、林带连续性以及不同林带之间的间距。如果林带发生断裂或破碎化,风沙容易从缺口处进入农田,从而降低整体防护效果[6]。因此,准确识别防护林空间分布及其连续性,是开展防护功能评价的基础。

2.2. 防护林遥感识别方法

传统防护林调查主要依赖人工实地踏查和目视解译,虽然精度较高,但耗时长、成本高,难以满足大范围动态监测需求。遥感技术的发展为防护林空间识别提供了有效手段[3][5]。中高分辨率卫星影像可以快速获取大范围地表信息,通过植被指数、纹理特征、形状特征和空间位置关系等指标,能够区分防护林与周围农田、道路、水体及建筑用地。

目前,防护林遥感识别方法主要包括传统分类方法、机器学习方法和深度学习方法。传统方法如最大似然分类、阈值分割和面向对象分类,操作相对简单,但对复杂背景的适应性有限。机器学习方法如随机森林、支持向量机等,可以综合利用光谱、纹理和几何特征,提高分类精度。近年来,U-Net、ResU-Net、Attention U-Net等深度学习模型在高分辨率影像解译中应用增多,能够自动学习防护林的空间形态和边界特征,尤其适合提取狭长线状林带。不过,深度学习方法对样本质量、模型训练和计算资源要求较高,在不同区域之间的迁移能力仍需进一步提高。

2.3. 防护林结构指标

防护林结构是影响其生态防护功能的核心因素[7]。一般而言,防护林结构指标可分为外部结构指标和内部结构指标。外部结构指标主要包括林带高度、宽度、长度、株行距、林带走向、林带连续性和林带与主导风向的夹角等。内部结构指标主要包括冠层密度、叶面积指数、光学孔隙度、体积孔隙度、枝叶面积密度、树干密度、垂直分层结构和林下植被覆盖度等。

其中,孔隙度是评价防护林结构合理性的重要指标。过低的孔隙度会使林带近似“墙体”,容易在林带前后形成强烈湍流,缩短有效防护距离;过高的孔隙度则会导致气流直接穿过林带,削弱风速降低效果。因此,适宜的孔隙度有利于形成稳定的风速梯度,提高林带下风向的防护范围。冠层垂直分层也十分重要,枝叶在不同高度上的分布会影响不同高度气流的阻滞效果。对于干旱风沙区而言,理想的防护林结构应兼顾近地层阻沙能力和中上层降风能力,形成乔灌木结合、疏密适宜、结构稳定的复合防护体系。

2.4. LiDAR 技术在防护林结构测定中的应用

LiDAR 即激光雷达,是近年来防护林结构精细化测定中的重要技术。与传统二维遥感影像相比,LiDAR 能够获取植被的三维点云数据,从而反映树高、冠幅、枝条分布、冠层厚度、林带宽度和垂直结构等信息。地面 LiDAR 可用于精细测量单株树木和林带内部结构,无人机 LiDAR 则适合较大范围的防护林监

测,二者结合可以提高防护林结构测定的空间精度和立体表达能力。

在防护林研究中,LiDAR 技术可用于提取树高、胸径、冠层高度模型、冠层空隙、枝叶密度和体积孔隙度等指标。通过点云分割和三维重建,还可以区分树干、枝条和叶片,进一步分析防护林结构的垂直变化和水平异质性。这对于理解林带结构与防风效能之间的关系具有重要意义。特别是在干旱风沙区,防护林常存在退化、断带、枯梢和冠层稀疏等问题,LiDAR 可及时识别结构缺陷,为精准修复和结构优化提供数据支持。

3. 防护林防风固沙与土壤保护功能

3.1. 防护林防风效应机理

防护林防风效应主要通过改变近地表气流运动实现[8]。当气流遇到防护林时,部分气流被枝叶和树干阻挡,部分气流从林冠上方绕流,还有一部分气流穿过林带孔隙。由于林带增加了地表粗糙度和空气动力阻力,风速在林带迎风面和背风面均会发生变化,并在下风向形成一定范围的低风速区。该低风速区能够减弱风对地表土壤颗粒的剪切作用,从而减少沙粒起动和输移。

防护林的防风效果与林带高度密切相关。通常情况下,林带越高,其影响范围越大,但并不是高度越大效果越好,还需要考虑林带密度、宽度和孔隙度等因素。合理结构的防护林可以形成较长的有效防护距离,使农田、道路和居民点处于相对稳定的低风速环境中。同时,林带还可以改变局地风向和湍流强度,促进沙尘沉降。因此,防护林并不是简单地“挡风”,而是通过阻滞、分流、减速和沉降等综合作用实现风沙灾害缓解。

3.2. 冠层结构对防风效能的影响

冠层结构是决定防护林防风效能的关键因素之一[9]。不同高度上的枝叶密度和孔隙度会影响气流在垂直方向上的分布。如果冠层中部枝叶较密,近地层和中层气流会受到较强阻滞;如果冠层下部空隙过大,风沙流可能从林下穿过,导致近地面阻沙效果下降。因此,防护林评价不能只看整体郁闭度,还应分析冠层的垂直分布。

在实际防护林中,冠层并非均匀结构。树冠直径、叶片密度、枝条排列和林下空隙会随高度发生变化。若在模型评价中将防护林简化为均匀矩形阻力带,可能会造成防风效果估计偏差。例如,中冠层叶密度较高时,模型可能低估其阻风能力;而冠层顶部枝叶稀疏时,模型又可能高估其阻风能力。因此,在防护林结构评价中,应将冠层垂直分层、光学孔隙度和体积孔隙度纳入指标体系。对于干旱风沙区,合理的冠层结构应在近地层保持一定灌草覆盖,在中层形成稳定阻风层,在上层保持适度通透性,从而提高整体防风效能。

3.3. 防护林对土壤风蚀的抑制作用

土壤风蚀是干旱风沙区土地退化的重要表现。当地表风速超过土壤颗粒起动阈值时,细颗粒物和沙粒会发生跃移、蠕移或悬移,造成表土流失、养分下降和空气颗粒物增加。防护林通过降低近地表风速,减少风对土壤的直接冲刷,从而有效抑制土壤风蚀。其评价指标通常包括风速降低率、输沙通量、风蚀抑制率、颗粒物浓度降低率、PM10 减少率和沙尘沉降量等。

不同类型防护林对风蚀的抑制效果存在差异。乔木林冠层面积较大,能够降低较高层气流速度,并为颗粒物沉降提供较大表面积;灌木林则更接近地表,对沙粒起动和近地面风沙流具有直接拦截作用。因此,在干旱风沙区,乔灌结合往往比单一乔木或单一灌木具有更稳定的防护效果。林带结构越完整、连续性越好,对风沙流的削弱越明显;若出现断带、缺株或冠层稀疏,则风沙容易从薄弱区域穿透,导

致防护功能下降。

3.4. 防护林根系与土壤稳定性

防护林的生态防护功能不仅来自地上部分,也来自地下根系系统[10][11]。根系能够穿插于土壤颗粒之间,对土体产生物理固结作用,同时根系分泌物和凋落物分解还可促进土壤团聚体形成,提高土壤有机质含量和抗蚀能力。根系越发达,土壤颗粒之间的结合越紧密,土壤被风力剥离的可能性越低。

不同树种和灌木种类的根系性状存在差异,其固土能力也不同。细根长度、比根长、根表面积、根系分枝强度和根径等指标,都会影响土壤团聚体稳定性和土壤抗剪强度。通常情况下,较高的细根密度和较大的根表面积有利于增强土壤结构稳定性;较合理的根系分布可以提高表层土壤抗风蚀能力。对于干旱风沙区而言,选择耐旱、根系发达、固土能力强的树种和灌木种类,是提升防护林长期生态功能的重要途径。

4. 防护林退化监测与优化管理

4.1. 防护林退化问题

干旱风沙区防护林长期处于水分不足、土壤贫瘠、风沙胁迫和极端气候影响之下,容易出现生长衰退和结构退化问题[12]。常见表现包括林带缺株断带、冠层稀疏、树木枯梢、枝干病虫害、林下植被减少、林带孔隙度增大以及防护范围缩小等。防护林一旦发生退化,其降低风速、阻挡沙尘和保护农田的能力都会明显下降。

造成防护林退化的原因较为复杂。一方面,干旱区降水不足、蒸发强烈,部分树种长期处于水分亏缺状态,容易出现生理衰退。另一方面,一些早期建设的防护林树种结构单一、林龄偏大、更新不足,抗逆能力下降。此外,病虫害、人为砍伐、管理粗放和灌溉不足也会加速防护林退化。防护林退化不仅是林木个体健康问题,更会影响整个绿洲或农田生态屏障的完整性,因此需要开展持续监测与及时修复。

4.2. 防护林健康监测方法

防护林健康监测是防护林管理的重要基础。传统监测方式主要依靠人工样地调查,内容包括树高、胸径、冠幅、枯枝率、病虫害程度和缺株情况等。该方法结果可靠,但效率较低,难以满足大范围和高频次监测需求。随着无人机、多光谱影像、LiDAR 和人工智能技术的发展,防护林健康监测逐渐向快速化和精准化方向发展。

无人机 RGB 影像可以直观识别枯死木、断带和冠层颜色变化;多光谱影像能够通过近红外、红边波段和植被指数反映叶片活力和冠层健康状态;LiDAR 数据可以获取树高、冠层厚度和空间结构变化。将多光谱信息与 LiDAR 高程信息融合,可同时识别植被生理状态和空间结构状态,提高受损冠层识别精度。结合随机森林、支持向量机和 U-Net 等模型,还可以实现防护林健康状态自动分类,为林带补植、病虫害防治和退化修复提供技术支持。

4.3. 防护林水分平衡与干旱限制

水分是限制干旱风沙区防护林生长和稳定性的关键因子。防护林在发挥生态功能的同时,也会通过蒸腾、冠层截留和林下蒸发消耗水分。如果林分密度过高或树种耗水量过大,可能造成土壤水分持续下降,进而引发林木衰退。因此,在干旱区建设防护林时,必须处理好生态防护功能与水分承载力之间的关系。

防护林水分平衡主要受降水、灌溉、土壤水储量、地下水埋深、林木蒸腾、林下蒸发和冠层截留等

因素影响。合理的防护林结构应与区域水资源条件相适应。对于水分条件较差的区域，应优先选择耐旱、低耗水、根系适应性强的树种或灌木；对于已有退化林带，应通过降低过密林分密度、改善灌溉方式、增加地表覆盖和保护林下植被等措施缓解水分胁迫。只有在水分收支相对平衡的条件下，防护林才能长期稳定发挥生态防护功能。

4.4. 护林结构优化策略

防护林结构优化应坚持因地制宜、功能导向和长期稳定原则。首先，应根据主导风向合理布设林带，使防护林尽量垂直于主要风沙方向，提高阻风效率。其次，应优化林带宽度、高度和孔隙度，避免过密或过疏。过密林带虽然短期阻风能力强，但容易造成水分竞争和林木衰退；过疏林带则难以形成有效防护屏障。因此，应通过合理株行距、乔灌搭配和林带更新维持适宜结构。

其次，应重视乔灌草复合配置。乔木可提供较大防护高度，灌木可拦截近地面风沙，草本可覆盖裸露地表，三者结合能够提高不同高度层次的防护效果。再次，应加强退化林带修复，对缺株断带区域及时补植，对病虫害严重和枯死木进行清理，对结构单一林带进行混交改造。最后，应建立遥感监测和地面调查相结合的长期管理机制，定期评估防护林空间连续性、冠层健康状况和生态功能变化，实现从经验管理向精准管理转变。

4.5. 防护效益与水文生态效应的协同权衡

从批判性视角看，防护林并非只有正向生态效应。现有研究通常将防护林视为防风固沙工程，评价重点集中在风速降低率、输沙通量和土壤抗蚀性等直接指标上。这种评价路径有利于说明防护林的工程防护价值，但容易弱化其作为人工植被系统对区域水循环、能量交换和小气候过程的影响。特别是在降水少、蒸发强、地下水补给有限的干旱风沙区，防护林的蒸腾耗水和冠层截留可能改变土壤水分分配，进而影响林带稳定性和农田水分利用。

因此，防护林结构优化不能简单理解为“越高、越宽、越密越好”。过密林带可能形成较强阻风屏障，却会增加林木间水分竞争，导致土壤干层发育、枯梢和退化风险上升；过疏林带虽然降低耗水压力，却可能造成近地层漏风和阻沙能力下降。这一矛盾说明，防护林生态功能存在“防风效益-水分消耗-植被健康”之间的权衡关系。未来评价体系应从单一防风功能扩展为多目标综合评价，并通过长期观测确定不同水分条件下的结构阈值。

在技术层面，当前研究还面临三类瓶颈：一是遥感影像能够识别林带空间形态，但对林下结构、根系和土壤水分过程表达不足；二是 LiDAR 能够提供三维结构信息，但其成本、数据处理复杂度和区域推广能力仍有限；三是深度学习模型虽然提高了识别精度，却常依赖特定训练样本，跨区域、跨年份和跨树种应用时稳定性不足。因此，有必要将多源遥感、地面微气象观测、土壤水分监测、生态水文模型和风沙动力模型结合起来，形成可解释、可迁移、可验证的综合研究框架。

5. 结论与建议

防护林是干旱风沙区重要的生态防护体系，在降低风速、减少土壤风蚀、阻滞沙尘扩散和维护农田生态安全方面具有显著作用。其生态功能的发挥不是由单一因素决定的，而是受空间分布、林带结构、树种组成、冠层孔隙度、根系特征和健康状态等多因素共同影响。防护林空间分布决定了其防护范围和屏障完整性，林带连续性越好，整体防护功能越稳定。防护林结构特征则直接影响气流运动和风沙输移过程，合理的高度、宽度、孔隙度和垂直分层结构有利于形成稳定的低风速区，提高防风固沙效果。

同时，防护林对土壤保护具有地上和地下双重作用。地上冠层通过降低风速和拦截颗粒物减少风蚀，

地下根系通过增强土壤团聚体稳定性和抗剪强度提高土壤抗蚀能力。随着遥感、LiDAR、无人机和深度学习技术的发展,防护林识别、结构测定和健康监测逐渐实现精细化和定量化,为干旱风沙区防护林科学管理提供了新的技术支撑。然而,防护林也面临水分不足、病虫害、林龄老化和结构退化等问题,若缺乏持续管理,其生态防护功能将逐渐减弱。

为提升干旱风沙区防护林生态功能,首先应加强防护林空间格局优化。在防护林规划中,应充分考虑主导风向、沙源分布、农田格局和水资源条件,合理确定林带走向、间距和防护范围,保持林带连续性,减少断带和破碎化现象。其次,应构建乔灌草结合的复合防护体系。乔木负责提高防护高度,灌木增强近地表阻沙能力,草本覆盖裸露地表,三者协同可提高防护林整体稳定性和多层次防护效果。

第三,应加强结构优化和树种选择。干旱区防护林不宜盲目追求高密度,应根据水分承载力控制林分密度,选择耐旱、抗风沙、根系发达、病虫害抗性强的乡土树种和灌木种类。第四,应建立长期动态监测体系,将卫星遥感、无人机多光谱、LiDAR 点云和地面样地调查结合起来,定期评估防护林分布、结构、健康状态和生态功能。第五,应重视退化防护林修复,对缺株断带、冠层稀疏和病虫害严重区域及时开展补植、更新和综合治理。未来防护林建设应从单纯造林转向“空间识别-结构评价-功能监测-精准管理”的综合模式,从而持续提升干旱风沙区防风固沙、土壤保护和生态安全维护能力。

进一步而言,未来研究应从管理建议提升为可检验的科学问题设计:一是识别不同树种、密度和孔隙度组合下的最优结构阈值,明确何种结构能够同时维持防风固沙效率和水分平衡;二是建立防风过程与生态水文过程耦合模型,定量模拟林带高度、宽度、根系分布和土壤水分变化对风场、输沙和植被衰退的共同影响;三是开展跨区域、跨年份的长期定位观测,检验遥感和深度学习模型在不同绿洲、农田和荒漠边缘场景中的迁移能力。

此外,应将防护林研究拓展到多功能生态服务权衡层面,重点比较防风固沙、区域耗水、小气候调节、碳汇、生物多样性和农业生产收益之间的协同或冲突关系。只有把空间识别、结构评价、功能监测和精准管理连接成动态反馈闭环,才能从“是否有效”的经验判断转向“在什么条件下、以何种结构实现综合效益最大化”的机制性解释。

参考文献

- [1] 黄麟,祝萍,肖桐,曹巍,巩国丽.近35年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应[J].地理科学,2018,38(4):600-609.
- [2] 朱玉伟,桑巴叶,王永红,刘康,陈启民,褚奋飞.新疆农田防护林防风固沙服务功能价值核算[J].中国农学通报,2015,31(22):7-12.
- [3] 于颖,杨曦光,范文义.农田防护林防风效能的遥感评价[J].农业工程学报,2016,32(24):177-182.
- [4] Jia, X., Xiao, H., Xin, Z., Li, J. and Fan, G. (2025) Determining the Structural Characteristics of Farmland Shelterbelts in a Desert Oasis Using LiDAR. *Forests*, **16**, Article No. 1221. <https://doi.org/10.3390/fl6081221>
- [5] Xiang, Z., Li, T., Lv, Y., Wang, R., Sun, T., Gao, Y., *et al.* (2024) Identification of Damaged Canopies in Farmland Artificial Shelterbelts Based on Fusion of Unmanned Aerial Vehicle LiDAR and Multispectral Features. *Forests*, **15**, Article No. 891. <https://doi.org/10.3390/fl5050891>
- [6] 张永平,王永东,周智彬,单继东.新疆北部农田防护林健康评价——以莫索湾150团为例[J].干旱区研究,2025,42(12):2343-2354.
- [7] 汪立韬,肖辉杰,辛智鸣,贾肖肖,杨玉丽.乌兰布和沙漠绿洲区典型农田防护林带风速流场数值模拟[J].中国水土保持科学,2023,21(4):11-19.
- [8] 王佳丽,贾肖肖,肖辉杰,等.乌兰布和沙漠绿洲农田防护林风场模拟[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(5):90-100.
- [9] Liu, Y., Wang, J., Chen, W., Xu, M., Zhang, Y., Patruno, L., *et al.* (2026) Impacts of Vertical Variation in Canopy Structures on Shelterbelt Windbreak Effectiveness: A Large-Eddy Simulation Study. *Forests*, **17**, Article No. 498. <https://doi.org/10.3390/fl7040498>

-
- [10] 沈晗悦, 王敏敏, 梁潇瑜, 信忠保, 闫腾飞. 河北坝上地区防护林土壤性质特征[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(5): 63-71.
- [11] Liu, Q., Li, J., Guo, Z., Chang, C. and Wang, H. (2023) The Relationships between Root Traits and the Soil Erodibility of Farmland Shelterbelts in the Bashang Region of China. *Forests*, **14**, Article No. 1827.
<https://doi.org/10.3390/f14091827>
- [12] 马彬, 王帅, 吴依衍, 姜艳. 干旱荒漠区农田防护林正负效应及其影响机制[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(9): 2232-2239.