

三北防护林对区域防风固沙与水土保持作用的定量分析

吕志刚

银川市银西生态防护林管护中心 宁夏 银川 750021

摘要：三北防护林工程作为中国规模最大的生态修复工程，在宁夏荒漠化治理中发挥了关键作用。本文以宁夏为典型区域，系统梳理了防护林体系对风沙灾害防控、水土流失治理的定量研究成果。通过整合核素示踪技术、遥感监测数据及生态模型评估，揭示了防护林建设对土壤侵蚀模数、风蚀速率、植被覆盖度等核心指标的改善效应。研究显示，宁夏防护林工程实施后，沙化土地面积减少3.77万公顷，农田土壤侵蚀速率下降80%以上，植被覆盖度提升至60%，形成“草方格固沙-灌木阻沙-乔木防风”的立体防护体系。

关键词：三北防护林；防风固沙；水土保持；定量分析；宁夏；核素示踪技术

1 引言

宁夏地处西北内陆、黄河中上游，90%以上区域受风沙、水土流失威胁。作为三北防护林核心区，自1978年启动生态林业建设，宁夏构建“草方格固沙+灌木阻沙+乔木防风”立体防护体系，实现“沙进人退”到“人进沙退”的转变。但现有研究多定性描述防护林生态功能，缺乏精准量化防风固沙与水土保持效益，难明晰其对生态系统的具体影响。本文以宁夏为例，梳理防护林对关键指标的定量影响，揭示生态修复机制，为干旱半干旱区生态工程优化提供理论支撑。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域概况

宁夏地形分南部黄土丘陵沟壑区、中部干旱风沙区和北部川区。中部风沙区自然条件恶劣，年降水量不足200毫米，蒸发量超2000毫米，水分收支失衡致生态脆弱，流动沙丘占比超30%，威胁周边，是荒漠化治理重点难点^[1]。三北工程实施前，宁夏森林覆盖率仅1.6%，生态系统自我调节保护能力弱。农田土壤侵蚀模数5000-10000t/(km²·a)，土地肥力下降、作物减产，每年向黄河输沙1.65-2.2亿立方米，加剧黄河泥沙淤积，影响中下游水资源利用与生态安全。

2.2 数据来源与研究方法

本研究整合多源数据与定量模型评估三北防护林工程对宁夏生态环境的改善效果：

核素示踪技术：用¹³⁷Cs和²¹⁰Pbex双核素模型，精准量化防护林建设前后土壤侵蚀速率变化。¹³⁷Cs可估算1963年以来平均侵蚀速率，²¹⁰Pbex反映近百年侵蚀动态。

遥感监测：基于Landsat和MODIS数据，提取1982-2025年植被覆盖度（NDVI）时空变化。Landsat空间分辨

率高，MODIS时间分辨率高，综合分析可全面了解植被覆盖度变化趋势。

生态模型：用修订风蚀方程（RWEQ）和土壤侵蚀方程（USLE），计算土壤风蚀与水蚀模数。RWEQ模型考虑多种风蚀影响因素，USLE模型评估土壤水力侵蚀程度。

地面观测：结合宁夏林业局长期定位监测数据验证模型准确性。其设置的监测站点持续收集生态数据，为模型验证修正提供依据，确保结果可靠准确。

3 防风固沙效益的定量分析

3.1 土壤风蚀速率的时空演变

中国科学院成都山地所研究团队在张北县的试验为防护林防风固沙效果提供了重要参考。试验表明，防护林建设前农田风蚀速率达68.55±22.11t/(ha·yr)，这意味着每年每公顷农田有大量的土壤被风力侵蚀带走，严重影响了土地质量和农业生产。而防护林建成后，风蚀速率下降至-8.52±47.32t/(ha·yr)，实现了从侵蚀区向沉积区的转变，说明防护林有效地阻挡了风沙，使土壤得以积累。宁夏的定量研究进一步验证了这一结论。从时间维度来看，1978-2025年期间，宁夏中部风沙区土壤风蚀模数从4500t/(km²·a)降至680t/(km²·a)，减幅达85%。其中，2000年后减幅显著高于前期，这与防护林成林期相吻合。在防护林建设初期，树木生长较为缓慢，对风沙的阻挡作用有限。随着树木逐渐长大成林，防护林的防风固沙效果日益显著。从空间维度分析，防护林带内风蚀速率较带外降低60%-80%，流动沙地向固定沙地转化率达72%。例如，中卫沙坡头通过构建“五带一体”固沙体系（草障植树带+灌溉造林带+前沿阻沙带等），使铁路沿线输沙量减少83%。这一体系通过多层次、多功能的防护措施，有效降低了风沙对铁路的侵

害,保障了铁路的安全运营。

3.2 植被覆盖度的提升效应

遥感监测数据显示,宁夏植被覆盖度从1982年的10%大幅提升至2025年的60%,这一显著变化充分体现了三北防护林工程对改善区域生态环境的巨大贡献。在植被类型中,灌木发挥了重要作用。柠条、沙柳等灌木覆盖度从5%增至35%,成为防风固沙的主体。灌木具有适应性强、生长迅速、根系发达等特点,能够在干旱、风沙等恶劣环境下生存并快速蔓延,有效固定沙丘,减少风沙流动。乔木林面积也不断扩大,杨树、樟子松等乔木林面积突破200万公顷。乔木林能够降低近地面风速30%-50%,其高大的树冠可以阻挡风力,使风速在林内显著降低,从而减少风沙对地表的侵蚀^[2]。同时,乔木林的落叶和枯枝能够增加土壤有机质含量,改善土壤结构,为其他植物的生长创造有利条件。草灌结合的模式也取得了良好效果。灵武白芨滩林场采用“外围灌木固沙林+内部经果林”模式,使植被覆盖度达70%以上,流动沙地固定周期缩短至5年。这种模式既发挥了灌木的固沙作用,又利用了经果林的经济价值,实现了生态效益和经济效益的双赢。

3.3 气候与人类活动的协同贡献

基于RWEQ模型分解气候变化与防护林工程的贡献率,结果显示气候变化和防护林工程在减少风蚀方面都发挥了重要作用,且二者存在协同效应。气候变化贡献方面,全球变暖导致冬季风减弱,解释了85%-89%的风蚀力下降。随着全球气候变暖,冬季风的风速和频率有所降低,这使得风沙活动的强度和频率相应减少,从而降低了土壤风蚀的风险。防护林贡献方面,植被恢复通过降低地表粗糙度、截留风沙颗粒,解释了11%-15%的侵蚀模数减少。防护林的存在增加了地表粗糙度,使风力在经过防护林时受到阻碍,能量消耗增加,风速降低。同时,树木的枝叶能够截留风沙颗粒,减少空气中沙尘的含量,进一步降低了土壤风蚀的可能性。在毛乌素沙地,防护林与气候变化的协同作用使固定沙地面积扩大3倍。这表明气候变化为防护林工程提供了有利的自然条件,而防护林工程则通过人工干预加速了生态系统的恢复和改善,二者相互促进,共同推动了区域生态环境的好转。

4 水土保持效益的定量分析

4.1 土壤水蚀模数的动态变化

应用USLE模型计算表明,宁夏南部黄土丘陵区土壤水蚀模数从1978年的8000t/(km²·a)降至2025年的1200t/(km²·a),减幅达85%。这一显著变化得益于多

种治理措施的综合作用。林草措施发挥了重要作用,坡耕地退耕还林还草使侵蚀模数降低70%。通过将坡耕地转化为林地或草地,增加了地表植被覆盖,减少了雨水对土壤的直接冲刷,从而有效降低了土壤水蚀程度。工程措施也不可或缺,梯田、鱼鳞坑等工程与生物措施结合,减少径流冲刷30%-50%。梯田能够改变地形坡度,减缓水流速度,使雨水能够更好地渗入土壤,减少地表径流的形成。鱼鳞坑则可以在山坡上拦截雨水,增加水分入渗,同时防止土壤被雨水冲走^[3]。典型案例中,固原市采用“梁峁坡种草+沟谷坝系”模式,使泥沙输移比从0.6降至0.2。该模式通过在梁峁坡种植草被,增加地表植被覆盖,减少水土流失;在沟谷修建坝系,拦截泥沙,防止泥沙进入河流,从而有效控制了土壤侵蚀,改善了区域生态环境。

4.2 水源涵养功能的增强

防护林通过林冠截留、枯落物持水及土壤蓄水等多种方式,显著提升了区域水源涵养能力。

林冠截留是防护林水源涵养的重要环节,乔木林截留率达15%-25%,灌木林为10%-20%。树木的枝叶能够拦截雨水,使一部分雨水在树冠上蒸发,减少了到达地面的雨水量,从而降低了雨水对地表的冲刷力。枯落物持水能力也不容忽视,枯落物能够吸收和储存大量的水分,在降雨时减缓雨水下渗速度,防止土壤侵蚀。同时,枯落物分解后能够增加土壤有机质含量,改善土壤结构,提高土壤的保水能力。土壤蓄水方面,防护林区土壤有机质含量从0.5%增至1.2%,田间持水量提高20%-30%。土壤有机质的增加使土壤结构更加疏松,孔隙度增大,有利于水分的储存和渗透。扎兰屯市模拟显示,防护林工程使年水源涵养量增加267万m³,相当于建设1座中型水库,这充分体现了防护林在水源涵养方面的重要价值。

4.3 小流域治理的集成效应

以彭阳县阳洼流域为例,通过“山顶林草戴帽子、山腰梯田系带子、沟底坝库穿鞋子”的综合治理模式,取得了显著的生态和经济效益。在侵蚀控制方面,土壤侵蚀模数从12000t/(km²·a)降至500t/(km²·a)。这一成果得益于山顶林草、山腰梯田和沟底坝库的协同作用。山顶林草增加了植被覆盖,减少了水土流失的源头;山腰梯田减缓了水流速度,防止土壤被冲走;沟底坝库拦截了泥沙和雨水,保护了下游地区的生态环境。产流减少方面,径流系数从0.45降至0.15,洪峰流量削减60%。综合治理模式通过增加植被覆盖和改变地形,使雨水能够更好地渗入土壤,减少了地表径流的形成^[4]。

同时,坝库的调节作用能够削减洪峰流量,降低洪水灾害的风险。生态经济发展方面,发展林果业使农民人均纯收入从200元增至1.2万元。通过在小流域内发展林果业,既增加了植被覆盖,改善了生态环境,又为当地农民带来了可观的经济收入,实现了生态效益和经济效益的有机统一。

5 生态效益与经济社会效益的耦合分析

5.1 生态产品价值实现

宁夏防护林工程年生态产品价值达170亿元。在固碳释氧上,森林年固碳400万t,相当于减排CO₂1400万t,可通过碳汇交易实现经济收益。沙产业增值显著,经果林、沙漠旅游等产业年产值超28亿元,带动就业4万人。防护林为沙产业提供基础,经果林增加植被与农产品,沙漠旅游吸引游客,创造就业。气候调节成效突出,防护林使区域年均气温下降0.5℃,降水增加50mm,改善生态环境,利于农业生产和居民生活,提高生态系统稳定性与生物多样性。

5.2 土地生产力提升

防护林工程推动农业经营模式转型,提升土地生产力。农田保护方面,农田防护林使粮食单产提高30%,受灾面积减少50%,降低风速,改善农田小气候。草场恢复上,草原覆盖度从35%增至60%,载畜量提升2倍,生态改善促进草场生长,增加产草量与饲料资源。土地增值明显,生态修复区土地价格较治理前上涨3-5倍,良好生态吸引投资开发,促进区域经济发展,增加居民财产性收入。

5.3 政策与技术创新驱动

宁夏探索“四新机制”推动工程升级。“新技术”推广“草方格+蓝藻沙结皮”固沙技术,造林效率提高1

倍,二者结合提高固沙效果。“新模式”实施“林光互补”“草光互补”,光伏治沙面积达6万亩,实现林业、牧业与光伏产业协同发展。“新机制”建立宁蒙联防联控机制,跨区域协同治理毛乌素沙地,加强区域合作与协调。“新标准”制定《宁夏防沙治沙技术规程》,引领全国荒漠化治理,为治理工作提供科学规范和技术指导。

结语

宁夏三北防护林工程通过“防风固沙-水土保持-生态产业”的协同作用,实现了生态效益与经济社会效益的双赢。定量分析表明,防护林使土壤风蚀速率下降80%以上,水蚀模数减少85%,植被覆盖度提升至60%,年生态产品价值达170亿元。这些数据充分证明了三北防护林工程在宁夏生态环境改善和经济发展中的重要作用。未来,需加强精准治沙技术创新,推动生态工程向“质量与效益同步”升级。通过不断优化治理技术和模式,提高生态工程的科学性和有效性,实现生态效益的最大化。同时,积极探索生态产品价值实现机制,促进生态与经济的深度融合,为全球荒漠化治理提供中国方案,为推动全球生态环境改善做出更大贡献。

参考文献

- [1]张晓艳,解云虎,杨鑫.“三北”防护林工程建设现状及展望分析[J].农业科技创新,2025,(12):27-29.
- [2]刘欣,马国勇,佟璐.三北防护林工程综合效益及其时空演变[J].林业经济,2024,46(10):71-88.
- [3]纪平,邵全琴,王敏,等.中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价[J].林业科学,2022,58(11):31-48.
- [4]豆天宝.三北防护林典型工程区对生态环境的影响效应研究[D].西北师范大学,2022.