



全域治沙的科学体系与实现路径

雷加强^{1,2*}, 高鑫^{1,2}, 薛杰^{1,2}, 赵永成^{1,2}, 任宏晶^{1,2}, 韩子帅^{1,2}, 郭振羽^{1,2}

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 尽管中国“三北”防护林工程建设取得了巨大成效, 但防沙治沙依然面临着长期性、艰巨性、反复性和不确定性等挑战, 诸如风沙作用的复杂性、水资源的约束性、防护工程的长效性等。因此, 从系统观念和科学治沙角度重构防沙治沙的新格局, 强化全要素协调和综合性治理, 是全力打好“三北”工程攻坚战三大标志性战役的重要基础。本文提出以“三全两可”为核心的全域治沙科学体系, 即统筹推进“全要素协同”“全链条统筹”“全流域布局”的综合治理, 全面实现“可持续运行”“可经营发展”的治理目标。全域治沙的理论基础包括风沙作用的复杂性、水资源的约束性、地理单元的完整性、生态系统的稳定性和人地关系的协调性, 其实现路径包括“要素-过程-空间”综合规划、“行政-自然-区域”系统布局、“科学-技术-工程”核心保障和“生态-生产-生活”目标导向。全域治沙为防沙治沙高质量发展和荒漠化综合防治提供了新的理论框架和实现路径。

关键词: 全域治沙; 荒漠化综合防治; 防沙治沙; “三北”工程; 系统治理; 山水林田湖草沙; 水资源约束; 可持续发展

中图分类号: P941.73;X171.4;S727.2;F323.211;S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2026)04-0427-11

引言

荒漠化与土地退化是全球生态安全、区域发展和

民生保障面临的共同挑战^[1-6]。在气候变暖、极端事件增多以及人类活动增强的共同作用下, 干旱半干旱地区的土地退化过程更趋复杂, 空间异质性也更为显

收稿日期: 2026-05-27; **修回日期:** 2026-06-16

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目: 沙漠地区节水光伏产业和治沙协调优化技术与示范 (2025ZY0135); 新疆维吾尔自治区重大专项课题: 防沙治沙新材料评估体系构建与系统化解决方案集成 (2025A03009-4)

作者简介: *雷加强 (1961—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为风沙环境与防沙治沙。E-mail: leijq@ms.xjb.ac.cn (通讯作者)

高鑫 (1984—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为风沙物理与防沙治沙。E-mail: gaixin@ms.xjb.ac.cn

薛杰 (1987—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为干旱区生态水文与植被恢复。E-mail: xuejie11@ms.xjb.ac.cn

赵永成 (1987—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为风沙地貌与防沙治沙。E-mail: zyccau@ms.xjb.ac.cn

任宏晶 (1992—), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为风沙地貌与防沙治沙。E-mail: renhj@ms.xjb.ac.cn

韩子帅 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为氮排放及其生态环境效应。E-mail: 1966586754@qq.com

郭振羽 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为极端干旱区地下水研究。E-mail: 614096265@qq.com

引用格式: 雷加强, 高鑫, 薛杰, 等. 全域治沙的科学体系与实现路径[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(4): 427-437. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260074. CSTR: 32282.14.JES.20260074

LEI J Q, GAO X, XUE J, et al. Scientific Framework and Implementation Pathways for Holistic Desertification Control[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(4): 427-437. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260074. CSTR: 32282.14.JES.20260074

著。围绕《联合国防治荒漠化公约》与联合国可持续发展目标, 国际社会逐步构建了以土地退化零增长为核心的治理框架和实施路径, 并进一步设定了到2040年将退化土地减少50%的目标^[1-2]。中国的防沙治沙实践与“三北”工程建设表明, 土地利用管理与工程治理能够显著影响区域生态系统服务的供给, 并塑造荒漠化防治的整体格局^[7-9]。

以“三北”防护林工程建设为主体的我国防沙治沙工作取得了举世瞩目的成就, 重点治理区实现了从“沙进人退”到“绿进沙退”的历史性转变, 为世界荒漠化防治贡献了“中国方案”^[10]。然而, 受异常气候变化影响和水资源刚性约束, 我国防沙治沙工作仍具有反复性与不确定性。以三大标志性战役^①为核心的新“三北”工程, 将坚持系统观念、科学治沙作为根本遵循和基本要求, 标志着“三北”防护林工程从以防风固沙、水土保持为主的任务, 转向山水林田湖草沙一体化保护与系统治理的新阶段^[11]。新“三北”工程将强化区域联防联控, 加强全要素协调与管理, 全面提升荒漠生态系统质量与稳定性。

基于上述战略背景, 为适应全球荒漠化综合治理及中国防沙治沙高质量发展的新形势与要求, 有必要强化要素、过程与空间协同, 打通科学、技术与工程间的路径, 构建覆盖全域的治沙科学架构与工程模式。这一实践是落实系统治理、综合治理、源头治理的核心环节, 也是统筹推进山水林田湖草沙一体化保护与系统治理的关键举措。

全域治沙并非简单叠加工程固沙、生物治沙、光伏治沙、引洪灌溉和沙产业等措施, 而是以资源、环境与生态约束为边界条件, 以全要素、全链条、全流域协同为方法思路, 以可持续与可经营为成效导向, 兼具跨学科理论基础与跨领域实现路径, 是面向干旱地区复杂人地系统的一种综合治理范式。本文将从理论基础、科学架构和实现路径三个维度, 系统阐释全域治沙的核心逻辑与实践框架, 为新“三北”工程防沙治沙攻坚战提供科学支撑, 助力我国荒漠化防治高质量发展。

1 全域治沙的理论基础

全域治沙是建立在地理学、生态学、水文学、风沙物理学及复杂系统科学等多学科理论基础上的综合治理框架(图1)。荒漠化综合治理既受复杂多样的要素、非线性的过程以及差异化的时空格局共同影响, 也与当地的资源、环境、社会、经济等因素紧密相关, 单一技术路径难以提供系统性的可靠解决方案。因此, 跨学科识别防沙治沙的约束条件与长效目标, 既是加强荒漠化综合治理、实现土地退化零增长目标的理论基础, 也是新时期我国以防沙治沙为主攻方向的“三北”工程建设所遵循的科学原则。

1.1 风沙作用的复杂性

风沙运动是干旱区最为活跃的陆表过程, 也是驱动土地沙化、引发风沙灾害的核心动力, 贯穿于干旱区地貌发育、生态演替与人地关系演化的整个系统。总体而言, 风沙作用的复杂性可归纳为三大核心维度: (1) 系统要素多元耦合, 即风、沙和地表(地形、水文、土壤、植被)等多要素共存, 动力、物质与下垫面相互作用、彼此制约, 形成多因子耦合体系^[12]; (2) 过程演化动态非线性, 表现为风沙侵蚀、搬运和堆积同步交替, 运动形式多样, 加之风速风向随机脉动, 过程无简单线性规律, 时空变化差异显著^[13]; (3) 系统自组织与反馈循环: 风沙作用塑造地貌, 地貌又改变近地面风场与风沙运动, 形成作用-形态-动力的双向反馈, 从而具备自组织演化特征^[14-15]。

风沙运动的复杂性决定了防沙治沙不能采用单一模式, 而应根据不同风沙环境、地貌类型和灾害特征实施差异化治理。针对流动沙丘、半固定沙丘、输沙通道及绿洲边缘等不同区域, 应坚持因地制宜、因害设防原则, 科学配置防治措施, 实现风沙危害精准防控。

1.2 水资源的约束性

在干旱地区, 水资源是决定防沙治沙上限的核心

① 三大标志性战役是2021—2030年六期工程的重点任务, 包括黄河“几字弯”攻坚战, 科尔沁、浑善达克两大沙地歼灭战, 河西走廊-塔克拉玛干沙漠边缘阻击战。



图1 全域治沙的五大理论基石（风沙作用的复杂性、水资源的约束性、地理单元的完整性、生态系统的稳定性和人地关系的协调性）

Figure 1 The five theoretical foundations of holistic desertification control (the complexity of aeolian processes, water resource constraints, integrity of geographical units, ecosystem stability, and coordination between humans and the environment)

阈值, 其约束性集中表现为“一缺两不均”, 即水资源总量匮乏和水资源的时空不均与用水不均。水资源的“一缺两不均”特征, 决定了防沙治沙的空间分异治理布局^[16-18]。

干旱地区降水稀少、蒸发强烈, 地表水与地下水补给能力弱, 水资源总量先天严重不足。同时, 水资源在年内高度集中于少数洪水期, 年际波动剧烈; 空间上仅分布于山前地带或河谷等局部区域, 而广大荒漠、绿洲边缘及沙漠腹地则极度缺水。水资源总量不足叠加时空分布不均, 决定了防沙治沙的规模及空间布局具有刚性约束。此外, 农业灌溉长期占用绝大部分可用水资源, 生态用水被严重挤占。农业与生态二者之间的用水结构性失衡, 成为制约防沙治沙的关键水资源分配因素。因此, 全域治沙必须坚持以水定绿、综合施策原则, 根据区域水资源承载能力优化植被配置和治理模式, 保障生态系统长期稳定运行。

1.3 生态系统的稳定性

生态系统稳定性的核心在于系统抵御外部扰动的

抵抗力与受扰后自我复原的恢复力^[19-21], 具体表现为结构完整、功能持续、抗扰与可恢复三位一体的特征。其核心路径是从单一优势种快速成林转向物种多样性、空间异质性与功能互补性的协同提升, 形成综合治理、系统治理模式, 最终实现防沙治沙效益的长效与可持续。从防沙治沙工程的长效性来看, 生态系统稳定性主要体现在两个方面。(1) 生态系统结构稳定性。通过构建乔-灌-草多层次复合群落, 依据物种共生与生态位分化原理, 分层利用不同深度的土壤水分并优化养分循环路径。这种结构配置使群落不易因风沙、干旱等扰动而迅速崩解。(2) 生态系统服务功能与修复能力。通过科学配置林草植被类型与密度, 优化防风固沙林网、林带及沙漠锁边林草带, 能够稳定维持并持续提升防风固沙效率、土壤水分与有机质含量、植被覆盖度, 以及应对极端干旱事件的恢复能力。

1.4 地理单元的完整性

地理学整体性原理表明, 地理环境是由相互联

系、制约、渗透的要素构成的有机整体^[22-23],单一要素的变化会通过物质循环与能量流动引发连锁反应,最终改变整个地理系统。以塔里木盆地南缘的策勒河流域为例,其上游来水变化不仅影响中游绿洲的灌溉条件和地下水补给,还会进一步作用于下游荒漠植被的维持、风沙活动强度及绿洲边缘的稳定性,体现出干旱区内陆河流域以河流为主线、山地-绿洲-荒漠系统之间高度耦合的整体关系。这一整体性特征决定了生态治理必须遵循自然地理规律,以完整的地理单元为基本实施载体。地理单元的完整性可突破行政区划的人为分割,强化对风沙侵蚀路径、河流水文通道与绿洲外围过渡带的协同治理。因此,防沙治沙需将治理区域视为完整的地貌单元和水文单元,坚持源头治理、联防联控,构建全域一体化防护体系,连通关键水文与生态节点,以提升系统的抗干扰与自我修复能力。

1.5 人地关系的协调性

人文地理学的人地关系地域系统理论指出,区域发展是自然生态子系统与人类社会子系统相互作用、动态耦合的过程^[24-27],二者的协调程度决定了区域发展的可持续性。荒漠化本质上是干旱区人地关系长期失衡、人地矛盾不断激化的集中体现。防沙治沙工作以人地关系协调性作为治理成效能否长期保持的核心支撑,强调生态治理并非单一的自然修复工程,而需深度融入区域社会经济系统,统筹协调人口分布、产业布局与生态治理空间,探索符合干旱区实际的人沙和谐共生路径。协调人地关系要求治沙工作超越单一生态目标的局限,建立生态效益与经济效益相统一的评估与共享机制。针对塔里木盆地绿洲农业用水占比过高、生态用水被严重挤占的核心矛盾,通过优化农业种植结构、推广耐旱节水作物与高效节水灌溉技术,可在缓解水资源供需矛盾、保障生态用水底线的同时,稳定农业生产收益。同时,依托沙区独特的自然资源禀赋,发展沙生林果业、中药材种植、生态旅游与光伏治沙等特色沙产业,可将生态修复过程转化为生态产品价值实现过程,构建“治沙增绿-产业增效-居民增收”的良性循环,从而从根本上激发社区参与防沙治沙的内生动力,实现生态保护与民生改善

的协同推进,促进人沙和谐共生与区域可持续发展。

2 全域治沙的科学架构

全域防沙治沙是以系统思维重构荒漠化治理的方式。其核心在于统筹山、水、林、田、湖、草、沙等自然要素,以及生产、生活、生态等人地关系,推动治沙、治水、治盐、治穷与产业发展协同推进,实现防沙治沙从“局部治理、单项治理”向“系统治理、综合治理、长效治理”转变。

“三全两可”是全域治沙的核心(图2)。其中,“三全”回答了“治理什么、如何治理、在哪里统筹”的问题,即全要素协同、全链条统筹和全流域布局;“两可”则回应了“如何长期稳定、如何持续发展”的问题,即可持续运行与可经营发展。五大模块共同构成了全域治沙的系统化治理体系,推动形成“空间全统筹、对象全覆盖、措施全贯通、发展可持续、运营可自持”的新时代防沙治沙新格局。

2.1 全要素协同：从生态系统整体出发，统筹水、土、气、生、人等关键要素，推动治沙与治水、治盐、治穷和生态保护修复协同实施

风沙活动并非孤立过程,而是与水资源约束、土地盐碱化、植被演替、气候变化和人类活动深度耦合,共同影响区域生态安全格局。因此,全域治沙不能停留在“见沙治沙”,而应在治理前开展系统本底调查和综合诊断,识别风沙输移通道、水盐动态、生态脆弱区、人类活动强度及修护治理能力等关键因素,科学确定治理边界、治理方式和治理强度。

2.2 全链条统筹：围绕“沙漠环境保护-土地沙化预防-沙化土地治理-沙漠资源开发利用”全过程开展治理，将风沙危害防控贯穿防沙治沙全周期，形成“保护、预防、治理、利用”相衔接的完整链条

沙漠是地质历史演化过程中形成的自然地理单元,防沙治沙并不意味着“消灭沙漠”,而是在尊重自然规律的基础上,对沙漠环境进行系统保护、风险预防、综合治理与合理利用。其核心在于维护原生荒漠生态系统稳定,防止不合理开发破坏生态基底;同

时, 对风蚀敏感区、绿洲边缘及工程扰动区提前开展风险防控, 遏制土地沙化扩张; 对流动沙地、退化草地、盐渍化土地及风沙危害区实施综合治理, 恢复区域生态功能; 并在生态承载力允许范围内, 适度发展新能源、特色种植、生态旅游和沙产业等。其深层逻辑在于, 将“保护-预防-治理-利用”贯穿为一个有机整体, 推动防沙治沙从被动应对已发生问题, 转向统筹生态安全、资源利用与区域发展的主动调控。

2.3 全流域布局: 以内陆河流域为基本单元, 以水资源配置和生态过程联系为主线, 统筹山区、绿洲灌区、荒漠沙区和河岸生态带, 推动上中下游协同治理、联防联控

在干旱与半干旱区, 山区草地退化、灌区土壤盐渍化、沙区风沙活动以及荒漠河岸植被退化并非孤立存在, 而是同一流域内水资源分配、生态退化与风沙过程共同作用的结果。全流域的整体布局要求打破局部治理和行政边界的限制, 以“山区-绿洲-荒漠”生态单元为整体, 协同推进山区水源涵养、绿洲盐渍化治理和荒漠风沙防控。其深层含义在于: 以水为纽带, 重建流域生态联系, 避免出现“上游治理、下游受损”或“局部改善、整体失衡”的局面, 从而实现区域生态功能的整体提升。

2.4 可持续运行: 防沙治沙应遵循自然规律和资源约束, 坚持因地制宜、因害设防、以水定绿, 做到“宜林则林、宜草则草、宜沙则沙、宜荒则荒”, 建立符合区域资源环境承载力的治理模式

干旱区生态环境脆弱, 水资源有限。若片面追求快速增绿或高强度人工治理, 易导致水资源失衡、植被退化, 并增加后期管护难度。特别是在内陆河流域, 水资源是典型的“池资源”, 若某一生态单元过度取水, 往往导致其他生态单元退化。因此, 防沙治沙不能“摁下葫芦起来瓢”, 而需更加注重生态系统的自我恢复能力和长期稳定。治理成效既要“建得成”, 更须“稳得住、管得好、可延续”。

2.5 可经营发展: 防沙治沙既是生态工程, 也是区域高质量发展的重要支撑。全域治沙需推动生态治理

与产业发展融合, 形成“生态产业化、产业生态化”路径

在保障生态安全和水资源承载力的前提下, 应结合区域资源禀赋, 发展特色林果业、节水农业、沙产业、新能源和生态旅游等适宜产业, 将生态优势转化为发展优势, 增强区域“造血能力”。同时, 应完善防沙治沙综合效益评价体系, 将生态服务功能、土地生产能力、群众增收、环境质量及基础设施安全等纳入考核, 推动评价指标从单纯追求治理面积和植被盖度“双增”, 转向“数量+质量+效益”的多目标评价。其核心在于, 让群众和产业成为治沙的参与者、受益者与维护者, 形成“治理-增收-再治理”的良性循环, 实现“治沙”与“治穷”、“生态”与“生计”协同推进。

3 全域治沙的实现路径

全域治沙的核心在于构建一套能够长期稳定运行的区域生态治理体系。其本质是将“三全两可”科学架构转化为可实施、可协同、可持续的治理路径, 通过“行政-自然-区域”“要素-过程-空间”“科学-技术-工程”以及“生态-生产-生活”四个维度的系统耦合, 实现从理论认知、治理组织到工程实施与长效发展的整体贯通(图3)。

3.1 “行政-自然-区域”综合治理

全域治沙的核心突破口, 在于解决行政治理边界与自然地理单元长期存在的错位问题。风沙输移、水文循环、绿洲演化、生态廊道连通等过程具有跨区域、跨单元的连续性特征, 而传统治理多以县域行政单元、部门分工、专项工程为基础展开, 容易导致治理碎片化、防控脱节, 使生态治理效能大打折扣。因此, 全域治沙强调应“以自然地理过程划定治理单元、以行政协同机制落实治理责任、以区域统筹格局提升治理效能”。流域上游水源涵养区、绿洲生产生活区、沙漠边缘防风固沙区、交通能源生态廊道等不同自然单元, 其生态功能、退化风险与治理需求存在显著差异, 需依托全域统一规划, 细化分区治理目



图2 全域治沙“三全两可”科学架构（全要素协同、全链条统筹、全流域布局与可持续运行、可经营发展）

Figure 2 The “three comprehensives and two viabilities” framework for holistic desertification control (coordinated integration of all elements, holistic planning across the entire chain, basin-wide layout with sustainable operation, and potential for commercial development)

标、管控标准与修复任务，并通过跨区域协同联动、生态利益补偿与责任共担机制，厘清各区域与主体的治理权责。同时，推动行政治理职能转型升级，突破传统单一工程化治理的局限，将行政治理能力转化为全域资源优化配置、差异化政策精准引导、动态监测评估与常态化长效管护的系统化治理能力，实现行政治理体系与自然生态系统、区域治理格局的精准适配，从而筑牢全域生态安全屏障。

3.2 “要素-过程-空间”系统布局

全域治沙并非简单增加工程数量，而是基于“要素识别-过程解析-空间优化”的系统布局。首先，应综合识别风场、水资源、土壤性质、植被结构、能源利用、交通网络、产业活动及居民生产生活等关键要素，构建多维耦合的治理认知体系。在此基础上，重点分析风沙输移、水盐运移、植被演替、工程退化及产业经营变化等动态过程，揭示自然演变与人为干预的耦合机制。空间布局则是将上述认知转化为具体治理路径。不同区域的生态过程、资源条件与风险类型存在明显差异，治理措施须与地貌格局、风沙过程和水资源条件相协调。在风沙活动强烈、水资源约束突出的区域，应以封育保育和稳定沙面为主；在绿洲外

围及生态过渡带，则应更注重生态缓冲、防护体系建设和节水植被恢复；在交通廊道、能源基地及居民聚落周边区域，需加强风沙灾害防控与基础设施安全保障。本质上，这是通过“过程决定空间、空间匹配措施”的治理逻辑，实现生态治理、资源利用与区域发展的协同统一。

3.3 “科学-技术-工程”核心保障

全域治沙不仅依赖工程建设，更依赖于科学基础、技术支撑与工程建设之间的持续循环。科学基础研究主要解决“为何治理”的问题，重点揭示风沙运动、水盐变化、植被恢复与生态演替等关键规律，为区域治理提供理论依据与决策基础；技术支撑体系则应对“如何治理”的挑战，通过监测感知、节水灌溉、材料研发、乡土植物筛选、智能装备与新能源利用等手段，形成适应不同区域条件的技术路径；工程建设体系最终将科学认知与技术成果转化为可实施、可运行且可维护的治理单元。在全域治沙中，工程体系不再是孤立存在的单项工程，而是区域生态治理体系中的功能模块。工程固沙能快速降低近地表风速和地表输沙强度，为植被恢复创造稳定的微环境；生物治沙依托乡土植物配置与高效节水灌溉，逐步构建稳

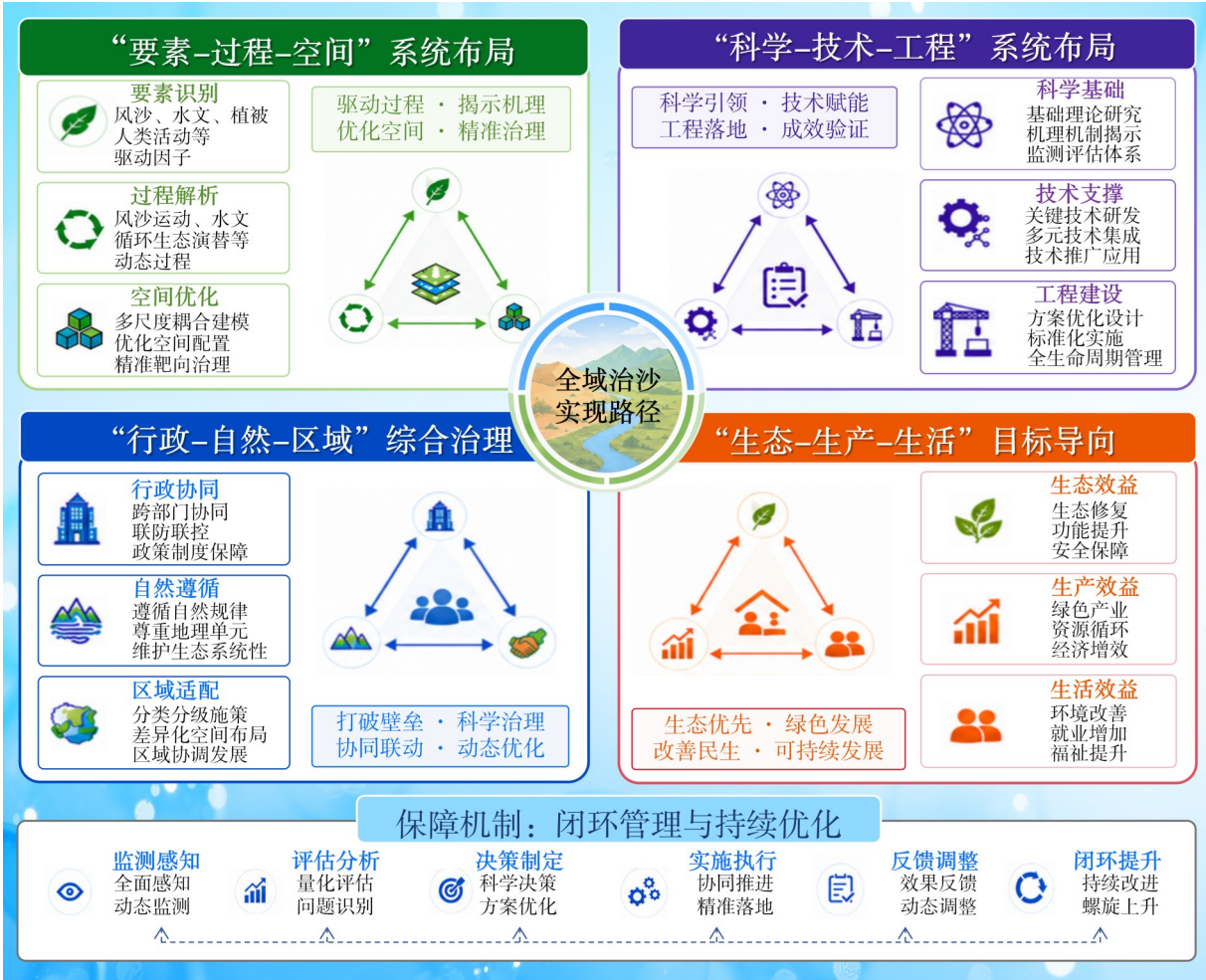


图3 全域治沙的四维实现路径与协同机制（要素-过程-空间、行政-自然-区域、科学-技术-工程、生态-生产-生活）
Figure 3 Four-dimensional approaches and collaborative mechanisms for holistic desertification control (elements-process-space; administration-nature-region; science-technology-engineering; ecology-production-living)

定持久的生态屏障；引洪灌溉、光伏治沙与交通防护工程，则分别承担生态补水、绿色能源支撑和基础设施安全保障等功能。因此，全域治沙的核心不在于单项工程规模的扩大，而在于推动不同工程模块在时间上有序衔接、在空间上协同互补、在管护上长期可持续，从而实现生态修复、资源利用与区域发展的系统协同。

3.4 “生态-生产-生活”目标导向

全域治沙的最终目标，在于实现生态、生产与生活空间的协同优化和可持续发展。

生态空间主要承担防风固沙、水源涵养、生物栖

息地保护及区域生态安全保障等功能，构成区域稳定发展的生态基础；生产空间承载着节水农业、特色沙产业、清洁能源开发以及生态经济转化等绿色发展任务；生活空间则直接关乎人居环境改善、就业稳定与公共服务供给，是区域治理成效最直观的体现。

全域治沙强调生态保护、产业发展与民生改善协同推进，通过生态修复提升区域环境承载力，以绿色产业发展增强区域“造血”功能，再通过生产生活条件改善反哺生态治理与长期管护，从而形成生态、生产与生活相互支撑、互促共进的良性循环。唯有将“三生空间”统筹纳入统一的治理框架与空间规划体系，防沙治沙才能从单一的生态修复工程，逐步转变

为支撑区域高质量发展的长效机制。

4 结论

荒漠化防治作为关乎国家生态安全与区域可持续发展的重大战略任务,正处在从“数量扩张”向“质量提升”转型的关键时期。面对全球气候变化加剧、水资源刚性约束趋紧以及生态系统退化风险依然存在的复杂形势,传统的、碎片化的治沙模式已难以满足新时代生态文明建设的需求。本文基于系统科学与跨学科治理视角,深入探讨了全域治沙的科学内涵与实现机制,得出以下主要结论:

首先,全域治沙的本质是一项深度耦合自然规律与社会经济行为的复杂系统工程。研究明确了风沙作用的复杂性、水资源的约束性、地理单元的完整性、生态系统的稳定性以及人地关系的协调性五大理论基石。这一体系强调,必须跳出“就沙治沙”的单一视角,转而从“山水林田湖草沙”生命共同体的高度,统筹考虑水、土、气、生、人等多维要素的相互作用,这是实现防沙治沙长效化的学理前提。

其次,构建以“三全两可”为核心的科学架构,是实现治理范式跃迁的关键。本文创新性地提出了

“全要素协同、全链条统筹、全流域布局”的治理逻辑,并确立了“可持续运行”与“可经营发展”的双重目标导向。这一架构不仅解决了传统治理中“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化问题,更通过打通“保护-预防-治理-利用”的完整闭环,为实现生态效益与经济社会效益的统一提供了可行的顶层设计。

再次,实现全域治沙需要多维度的路径协同与机制保障。本文系统规划了“行政-自然-区域”、“要素-过程-空间”、“科学-技术-工程”以及“生态-生产-生活”四条核心路径。通过行政边界与自然单元的适配、过程解析与空间布局的优化、科技支撑与工程落地的衔接,以及“三生空间”的统筹协调,有效解决了治理过程中的权责不清、技术脱节及动力不足等现实痛点,确保了治理体系的可操作性与长效性。

最后,全域治沙为干旱半干旱区提供了一种超越单维治理的中国实践范式。它不仅关注土地退化的修复,更致力于重塑人与自然和谐共生的关系。展望未来,随着2026年新“三北”工程攻坚战的深入推进,全域治沙理论还需在实践中不断深化,特别是在生态水文监测预警、光伏治沙全生命周期评估及跨区域利益协调机制等前沿领域开展持续探索,以期为全球干旱半干旱区的绿色高质量发展贡献更多中国智慧。

参考文献

- [1] United Nations Convention to Combat Desertification. Land degradation neutrality: Overview[EB/OL]. [2026-05-25]. <https://www.unccd.int/land-and-life/land-degradation-neutrality/overview>.
- [2] G20 Global Land Initiative. G20 Global Land Initiative: reducing land degradation[EB/OL]. [2026-05-25]. <https://g20land.org/>.
- [3] 傅伯杰, 李静海, 张军泽. 面向全球可持续发展目标的现代治理体系[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(10): 1720-1726.
Fu B J, Li J H, Zhang J Z. Modern governance system for global sustainable development goals[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(10): 1720-1726.
- [4] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development[J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851.
- [5] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166-171.
- [6] Burrell A L, Evans J P, De Kauwe M G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification [J]. Nature Communications, 2020, 11: 3853.
- [7] Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [8] Guan X C, Wang S H, Xu M, et al. Long-term ecological effectiveness of the Three-North shelterbelt program assessed by changes in ecosystem services[J]. Scientific Reports, 2026, 16: 8330.
- [9] 傅伯杰, 刘焱序, 王帅, 等. “治可治之沙、需治之沙”, 科学推进荒漠化防治[J]. 中国科学院院刊, 2026, 41(3): 490-498.

- Fu B J, Liu Y X, Wang S, et al. Combatting desertification scientifically: Where feasible, where necessary[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2026, 41(3): 490-498.
- [10] 中国政府网. 习近平在内蒙古巴彦淖尔考察并主持召开加强荒漠化综合防治和推进"三北"等重点生态工程建设座谈会[EB/OL]. (2023-06-06)[2026-06-05]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202306/content_6884930.htm.
- The State Council of the People's Republic of China. Xi Jinping inspected Bayannur in Inner Mongolia and chaired a symposium on strengthening comprehensive desertification control and advancing key ecological projects such as the Three-North Shelterbelt Program[EB/OL]. (2023-06-06)[2026-06-05]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202306/content_6884930.htm.
- [11] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发《"三北"工程总体规划》的通知[Z]. https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_12306/202509/content_7042888.html
- General Office of the State Council of the People's Republic of China. Notice on issuing the Master Plan of the Three-North Shelterbelt Program[Z]. https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_12306/202509/content_7042888.html.
- [12] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[J]. *The Geographical Journal*, 1941, 98(2): 109.
- [13] Kok J F, Parteli E J R, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(10): 106901.
- [14] Werner B T. Eolian dunes: Computer simulations and attractor interpretation[J]. *Geology*, 1995, 23(12): 1107.
- [15] Kocurek G, Ewing R C, Mohrig D. How do bedform patterns arise? New views on the role of bedform interactions within a set of boundary conditions[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(1): 51-63.
- [16] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [17] 张定海, 李新荣, 张鹏. 生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 678-688.
- Zhang D H, Li X R, Zhang P. Significance of eco-hydrological threshold in artificial vegetation ecosystem management in China desert area [J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(4): 678-688.
- [18] Falkenmark M, Rockstrom J, et al. *Balancing Water for Humans and Nature*[M]. London: Earthscan Publications, 2004.
- [19] Maestre F T, Soliveres S, Gotelli N J, et al. Response to comment on "plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands"[J]. *Science*, 2012, 337(6091): 155.
- [20] Berdugo M, Kéfi S, Soliveres S, et al. Plant spatial patterns identify alternative ecosystem multifunctionality states in global drylands[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(2): 3.
- [21] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [22] Forman R T T. *Land Mosaics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [23] Wu J G. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999-1023.
- [24] 傅伯杰, 刘焱序, 王帅, 等. 科学改善荒漠化地区人与自然关系[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(12): 2027-2036.
- Fu B J, Liu Y X, Wang S, et al. Scientifically improving human-nature relationship in desertification areas[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(12): 2027-2036.
- [25] Li C J, Fu B J, Wang S, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 858-873.
- [26] Barbier E B, Hochard J P. Land degradation and poverty[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(11): 623-631.
- [27] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.

Scientific Framework and Implementation Pathways for Holistic Desertification Control

LEI Jiaqiang^{1,2*}, GAO Xin^{1,2}, XUE Jie^{1,2}, ZHAO Yongcheng^{1,2}, REN Hongjing^{1,2}, HAN Zishuai^{1,2}, GUO Zhenyu^{1,2}

1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Highlights

Establishes a scientific framework for holistic desertification control.

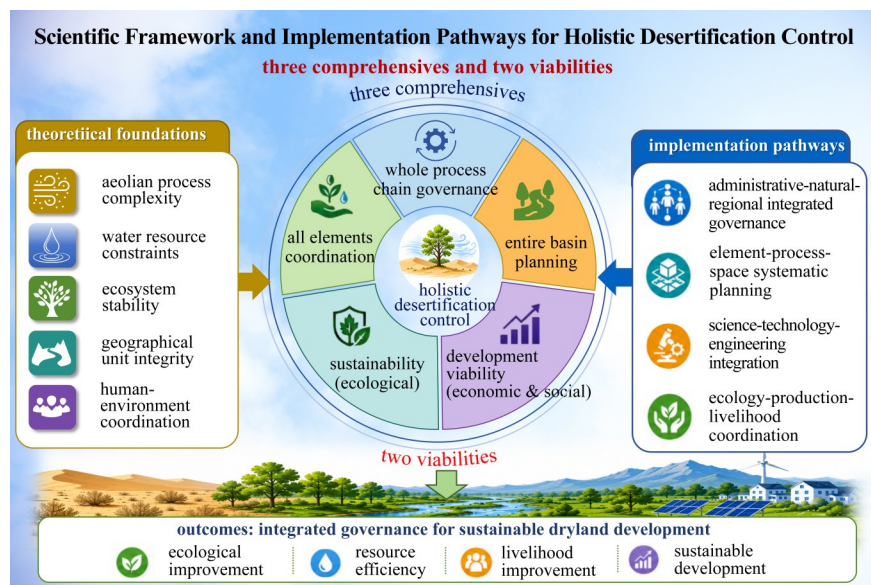
Proposes the “Three Comprehensives and Two Viabilities” governance framework.

Identifies five theoretical foundations of holistic desertification control.

Develops four implementation pathways integrating governance, science, and engineering.

Provides a systems-based paradigm for sustainable desertification governance.

Graphical Abstract



Abstract: Desertification is a major environmental challenge affecting ecological security, regional development, and human well-being in arid and semi-arid regions worldwide. Under the combined influences of climate change and human activities, land degradation processes have become increasingly complex and uncertain. In China, desertification control has gradually evolved from project-based interventions toward systematic governance. Although the Three-North Shelterbelt Program has achieved remarkable success in reducing sand hazards and improving ecological conditions, long-term challenges remain, including the complexity of aeolian processes, rigid water-resource constraints, and the sustainability of ecological engineering. These challenges highlight the need for a new governance paradigm capable of integrating ecological restoration, resource management, and regional development.

This study aims to establish a scientific framework for holistic desertification control based on systems thinking and integrated governance. The objectives are to clarify the theoretical foundations of holistic desertification control, develop a conceptual framework centered on the "Three Comprehensives and Two Viabilities", and propose implementation pathways for advancing high-quality desertification control in China.

Drawing upon theories from geography, ecology, hydrology, aeolian science, and complex systems science, this study synthesizes existing knowledge, policy requirements, and practical experiences from desertification control in China. Through theoretical analysis and conceptual framework construction, the study integrates natural processes, resource constraints, ecological functions, geographical units, and socio-economic factors into a unified governance framework.

The results indicate that holistic desertification control is supported by five theoretical foundations. First, aeolian processes are characterized by multi-factor interactions, nonlinear dynamics, and feedback mechanisms among wind, sediment transport, landforms, vegetation, and human activities. Second, water resources constitute the fundamental constraint on ecological

restoration in arid regions, where limited availability and uneven spatial-temporal distribution determine the scale and sustainability of management activities. Third, ecosystem stability provides the ecological basis for long-term restoration effectiveness through maintaining structural integrity, functional continuity, and resilience to disturbances. Fourth, the integrity of geographical units emphasizes the interconnected nature of mountains, oases, rivers, and deserts and highlights the importance of governance based on complete geographical and hydrological systems. Fifth, the coordination of human-environment relationships ensures that ecological restoration can be sustained through the integration of environmental protection, livelihoods, and regional development.

Holistic desertification control provides a systematic framework for addressing the growing complexity of desertification governance in arid regions. By integrating ecological processes, water-resource constraints, geographical integrity, ecosystem stability, and human-environment interactions, the proposed framework promotes coordinated governance across multiple elements, processes, and spatial units while ensuring sustainability and operational viability. It offers both theoretical support and practical guidance for advancing the Three-North Project and achieving sustainable desertification control in China.

Keywords: holistic desertification control; comprehensive desertification prevention; sand prevention and control; Three-North Shelterbelt Program; integrated governance; mountain-river-forest-farmland-lake-grassland-desert system; water resource constraints; sustainable development