

遥感反演风沙流参数支撑下公路智能预警与动态清沙技术应用

席磊

新疆公路建设（集团）有限责任公司，中国·新疆 昌吉 831100

摘要：我国西部广袤的沙区公路是国家战略通道与区域经济发展的生命线，但长期遭受风沙流侵蚀、掩埋等灾害威胁，传统“被动响应、人工巡查、定时清沙”的养护模式存在时效滞后、资源浪费及安全风险高等突出问题。随着对地观测技术与人工智能的深度融合，基于遥感反演风沙流参数的公路智能预警与动态清沙技术应运而生，成为破解沙害防治难题的新范式。本文系统综述了该领域的研究进展与应用现状，涵盖多源遥感风沙流参数反演机理、智能预警模型构建、动态清沙决策机制及系统集成验证等核心环节。

关键词：遥感反演；风沙流参数；公路智能预警；动态清沙；沙害防治；多源数据融合；数字孪生

Intelligent Early Warning and Dynamic Sand Removal Technology for Highways Based on Remote Sensing Inversion of Wind-Blown Sand Parameters

Xi Lei

Xinjiang Highway Construction (Group) Co., Ltd., China Xinjiang Changji 831100

Abstract: Extensive sandy highway networks in western China serve as vital national strategic corridors and lifelines for regional economic development. However, they face persistent threats from wind-blown sand erosion and burial. Traditional maintenance practices—characterized by passive response, manual inspection, and scheduled sand removal—are plagued by significant delays, resource inefficiency, and high safety risks. With the deep integration of Earth observation technologies and artificial intelligence, intelligent early warning and dynamic sand removal systems based on remote sensing inversion of wind-blown sand parameters have emerged as a new paradigm for addressing challenges in sand hazard mitigation. This paper systematically reviews research progress and current applications in this field, covering key aspects including the mechanisms of multi-source remote sensing parameter inversion for wind-blown sand, construction of intelligent early warning models, decision-making frameworks for dynamic sand removal, and system integration and validation.

Keywords: Remote sensing inversion; Wind-blown sand parameters; Highway intelligent early warning; Dynamic sand removal; Sand hazard mitigation; Multi-source data fusion; Digital twin

0 引言

我国沙漠与戈壁面积占国土总面积的 13% 以上，穿越其中的公路网承担着能源运输、边疆稳定与民族团结的重任。然而，风沙流作为沙区最活跃的地表过程，其挟沙运动具有突发性强、空间异质性大、时间变率快等特点，极易造成路面掩埋、能见度骤降、设施损毁等灾害，严重威胁行车安全与路网韧性。长期以来，沙害防治主要依赖人工巡道、固定气象站观测及定期机械清沙，这种“人海战术 + 经验判断”的模式不仅成本高昂、效率低下，更难以应对极端天气下的突发沙情，常因响应滞后导致交通中断甚至安全事故^[1]。近年来，随着遥感技术的飞速发展，尤其是高分辨率光学、热红外、微波雷达及激光雷达等多源

传感器的协同应用，为大范围、高频次、量化的风沙流参数获取提供了前所未有的技术手段。与此同时，人工智能、物联网与自动控制技术的成熟，使得基于遥感数据的智能预警与动态清沙成为可能。这一技术路径的核心在于：通过遥感反演实时获取风速、输沙率、沙丘移动速度、地表粗糙度等关键风沙流参数，驱动预警模型精准识别高风险路段与时段，并自动生成差异化清沙指令，引导装备高效作业。这标志着沙害防治正从“事后处置”转向“事前预判、事中干预”的主动防控新阶段。然而，该技术体系仍处于探索期，反演算法在复杂下垫面的适用性、预警模型的物理可解释性、清沙调度的实时性及系统集成度等方面尚存诸多挑战。因此，亟需系统梳理遥感反演支撑下

公路智能预警与动态清沙的技术脉络与现实障碍,探索面向实战的创新路径。这不仅是工程技术问题,更是关乎国家边疆安全、交通韧性 with 生态文明建设的战略性命题。

1 现实审视: 遥感反演支撑下智能预警与动态清沙的成效与瓶颈

要推动该技术从示范走向普及,必须客观评估其在真实场景中的价值贡献与应用局限。

1.1 多源遥感反演显著提升风沙流参数获取能力与预警时效

近年来,遥感反演技术在风沙流参数提取方面取得突破性进展,为智能预警奠定了数据基础。在风速与风向反演上,结合 fy-4a/himawari-8 静止气象卫星高频云导风产品与 era5 再分析资料,实现了沙区 15 分钟级、5km 分辨率的近地面风场重构,较传统气象站插值精度提升 30% 以上;在输沙率估算上,利用 modis/landsat 地表温度与植被指数构建热力-动力耦合模型,结合地面集沙仪标定,实现了日尺度区域输沙通量的定量反演;在沙丘动态监测上,通过 sentinel-1 sar 影像相干性与后向散射变化检测,成功捕捉到月尺度沙丘前移速率与形态演变,弥补了光学遥感易受云层干扰的短板。更重要的是,这些参数已被初步应用于预警实践:某国道 g7 京新高速沙害段部署“遥感+地面传感器”融合预警系统后,沙害事件提前预警时间由平均 2 小时延长至 6-8 小时,误报率降低 40%,清沙作业响应速度提升 50%。这些成果证明,遥感反演能够有效克服地面站点稀疏、代表性差的缺陷,实现对风沙流过程的宏观、动态、定量刻画,使预警从“点状经验”升级为“面状科学”。这种从“看不见”到“看得清、算得准”的转变,为动态清沙提供了可靠依据^[1]。

1.2 反演精度受限与预警-清沙脱节制约实战效能

尽管数据获取能力大幅提升,但技术落地仍受多重制约。首要问题是复杂地表背景下反演精度不稳定:沙区地表覆盖类型多样(裸沙、砾质戈壁、稀疏植被、盐碱地等),其光谱、热辐射与微波特性差异显著,现有反演模型多基于理想均质下垫面假设,在非均匀地表易产生系统性偏差;例如,在植被斑块区,ndvi 对输沙率的抑制效应被高估,导致输沙量低估 20%-35%。其次,多源数据融合时效性不足:光学、热红外、sar 等数据重访周期、处理流程各异,难以实现分钟级同步;而风沙流演变常在数十分钟内发生剧变,数据延迟直接削弱预警价值。更深层的是,预警与清沙执行严重脱节:多数预警系统仅输出风险等级或概率,未转化为具体的清沙位置、强度、优先级及

装备调度方案;清沙队伍仍依赖电话通知或纸质工单,信息传递慢、误差大;装备本身缺乏与预警系统的接口,无法接收动态指令。这种“有预警无行动、有行动不精准”的断层,使得遥感反演的潜力未能充分释放。此外,预警阈值设定多基于统计相关性,缺乏风沙力学与公路工程交叉的物理机制支撑,导致在极端工况下失效^[1]。

1.3 标准缺失与系统集成弱阻碍规模化应用

技术推广的深度取决于标准化水平与系统集成度。目前,遥感反演风沙流参数尚无统一技术规范:不同机构采用的数据源、预处理方法、反演算法、验证标准各异,结果不可比、难互认;预警指标体系混乱,有的用风速,有的用输沙率,有的用能见度,缺乏面向公路安全的综合风险表征;动态清沙调度无算法标准,全靠人工经验分配资源,难以优化。系统集成方面,遥感平台、预警模型、通信网络、清沙装备、管理平台多为独立建设,数据格式不兼容、接口不开放、时序不对齐,形成“信息孤岛”;边缘计算能力薄弱,海量遥感数据需回传中心处理,延迟高、带宽压力大。运维保障亦显不足:基层养护单位缺乏遥感数据处理与模型维护能力,系统一旦故障即瘫痪;设备厂商各自为政,装备智能化改造成本高、周期长。部分地区虽建有示范项目,但因缺乏可复制的技术包与培训体系,难以推广。这种“有技术无标准、有系统无集成、有示范无推广”的局面,使得该技术多停留在科研或试点层面。若不通标准、集成与运维堵点,再先进的反演算法也难逃“实验室精品、现场废品”的命运^[4]。

2 路径探索: 面向实战的遥感反演-预警-清沙一体化创新策略

破解上述难题,需以“感知-决策-执行”闭环为核心,重构技术体系与应用逻辑。

2.1 构建“星-空-地”一体化高时空分辨率风沙流参数反演体系

应超越单一遥感手段局限,建立多源协同、动静结合的反演新范式。首先,强化“星-空-地”立体观测网络:统筹高分系列、风云气象星、商业小卫星星座(如吉林一号、珠海一号)提供小时级光学/热红外数据;利用无人机搭载 lidar 与多光谱相机,在重点路段开展米级分辨率巡检,填补卫星盲区;布设地面微气象站、超声风速仪、集沙器及视频 ai 摄像头,提供秒级真值用于反演校正。其次,发展面向沙区复杂地表的专用反演算法:引入深度学习(如 u-net、transformer)融合多模态遥感数据,自动识别下垫面类型并动态调整反演参数;建立风沙流物理约

束的损失函数, 确保反演结果符合质量守恒与动量平衡; 开发在线学习机制, 利用地面实测数据持续优化模型。特别要提升近实时处理能力: 在路侧部署边缘计算节点, 对无人机与地面数据进行本地化处理, 仅将关键参数上传云端; 优化卫星数据预处理流水线, 实现从接收到产品生成的自动化、分钟级交付。通过“立体感知 + 智能反演 + 边缘计算”三位一体, 使风沙流参数获取真正满足公路预警的时效与精度需求^[5]。

2.2 发展物理机制与数据驱动耦合的智能预警与动态清沙决策模型

必须重建预警与清沙的科学决策逻辑, 摆脱纯数据黑箱。在预警层面, 构建“风沙动力学 + 路面工程 + 交通安全”耦合的风险评估模型: 将遥感反演的风速、输沙率、沙丘移动等参数输入风沙流数值模拟(如 cfd-dem 耦合模型), 预测特定路段的沙粒沉积速率与能见度衰减曲线; 结合路面抗滑性能、纵坡、曲率等工程属性, 量化沙害对行车安全的影响阈值; 最终生成包含风险等级、预计持续时间、影响范围及置信度的结构化预警产品。在清沙决策层面, 开发基于实时风险分级的动态调度算法: 将预警结果转化为清沙任务单元(位置、长度、优先级、预估工作量); 结合清沙装备位置、状态、作业能力及路网通行条件, 利用强化学习或混合整数规划求解最优调度方案; 支持人机交互调整, 兼顾算法效率与现场经验。特别要建立反馈学习机制: 将清沙效果(如清沙后能见度恢复时间、二次积沙速率)作为标签, 反向优化预警阈值与调度策略, 形成“预警 - 执行 - 评估 - 优化”闭环。通过“机理可解释 + 数据自适应 + 决策可执行”的深度融合, 使智能系统真正成为养护人员的“数字参谋”^[6]。

2.3 健全技术标准、系统集成与能力建设长效机制

技术落地需制度、平台与人才三重保障。应由交通运输部牵头, 联合科研院所与企业, 制定《公路风沙流遥感反演技术规范》《沙害智能预警系统建设指南》《动态清沙调度数据接口标准》等系列标准, 统一数据格式、算法接口、性能指标与验收要求, 打破壁垒。推动建设国家级或区域级沙区公路智能防控云平台, 集成多源遥感数据接入、反演引擎、预警模型、调度算法、装备管控与效果评估模块, 提供 saas 化服务, 降低基层使用门槛; 开放 api 接口, 鼓励第三方开发者丰富应用场景。加强装备智能化改造: 推动清沙车加装北斗定位、作业传感器与车载终端, 实现状态实时上报与指令自动接收; 研发小型化、模块化无人清沙机器人, 适用于狭窄或高危路段。在能力建设上, 设

立专项培训与认证体系, 培养既懂遥感、又通公路养护、还会操作智能系统的复合型人才; 建立技术支援热线与远程诊断机制, 保障系统稳定运行。更重要的是, 完善政策激励: 将智能预警与动态清沙纳入公路养护绩效考核与绿色公路评价, 给予资金倾斜; 推行“效果付费”合同模式, 按清沙效率与安全改善程度结算费用, 激发市场活力。唯有将技术嵌入标准、平台与制度之中, 方能实现从项目式探索到常态化应用的跨越。

3 结语

遥感反演风沙流参数支撑下的公路智能预警与动态清沙, 绝非简单的技术叠加, 而是一场涉及地球科学、交通工程、人工智能与装备制造的跨界融合革命。它要求我们超越“遥感只是看图工具”的狭隘认知, 重新定义其角色——不是被动的数据提供者, 而是主动的环境解译者与行动触发器。在这一漫长而艰巨的进程中, 既要追求反演算法的精巧与数据的丰沛, 也要敬畏风沙运动的混沌本质与公路安全的底线要求; 既要相信机器的学习能力, 也要珍视一线养护人员的风沙直觉与现场智慧; 既要打造炫目的数字平台, 更要夯实标准、装备与人才的平凡基石。真正的突破, 诞生于对沙粒运动规律的深刻理解, 成型于对预警 - 清沙链条的无缝衔接, 升华于对边疆公路守护者需求的真切回应。我们应当以谦卑之心对待每一帧遥感影像, 它们承载着风与沙的密语, 也寄托着万千旅人的平安期盼。这不仅是科技的进步, 更是对“人民至上、生命至上”理念在荒漠深处的无声践行。当卫星凝视大地, 当算法解读风沙, 当清沙车循令而动, 那便是对人类智慧与自然力量和谐共处的最新注解。这条通往智能防控的道路注定充满未知与挑战, 但每一步基于科学、实证与人文关怀的探索, 都在为中国沙区公路的安全、畅通与可持续注入更加坚韧、更加温暖的力量。

参考文献:

- [1] 马奔腾. 38 团一塔中沙漠公路沿线风沙输移规律及沙害防治研究[D]. 石河子大学, 2023. DOI:10.27332/d.cnki.gshzu.2023.000732.
- [2] 赵宏胜. 西柳沟流域中段风沙运动特征及入黄沙量研究[D]. 内蒙古农业大学, 2024. DOI:10.27229/d.cnki.gnmnu.2024.000051.
- [3] 王茂林. 流动沙漠高大沙丘复杂地形条件下沙漠公路路线方案设计及防沙技术研究[D]. 石河子大学, 2024. DOI:10.27332/d.cnki.gshzu.2024.001349.
- [4] 郑智鹏, 马奔腾, 程建军等. 尉犁 - 且末沙漠公

路沿线风沙环境特征及沙害防治对策研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(10): 1680-1691.

[5] 高鑫. 塔克拉玛干沙漠典型区域沙丘发育机理及致灾规律研究. 新疆维吾尔自治区, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2020-05-01.

[6] 肖思滢, 况蓝锋, 马子鹏等. 基于 RUSLE-IC-SDR 的植被覆盖和降雨对泥沙连通性的影响——以无定河流域为例[J/OL]. 中国农村水利水电, 1-17[2026-06-07].<https://link.cnki.net/urlid/42.1419.tv.20260508.1547.002>.