

长距离输水管道与生态环境的协同发展研究

陈振军

622425*****3812

摘要:长距离输水管道作为重要的水资源配置基础设施，在缓解区域水资源分布不均的同时，对沿线生态环境产生复杂而深远的影响。当前输水管道建设中普遍存在生态保护与工程建设协调不足的问题，缺乏系统性的协同发展理论指导和实践路径。本研究旨在构建长距离输水管道与生态环境协同发展的理论框架，探索实现工程建设与生态保护双赢的有效策略。研究采用理论分析与实证研究相结合的方法，构建输水管道生态系统影响的概念框架和协同发展理论模型，系统分析管道建设对土壤、植被、水文等生态要素的影响路径，通过国内外典型案例深入剖析生态环境影响的特征规律。基于理论分析和实证研究，提出管道路由优化、生态修复技术、生态廊道建设等技术创新路径，并构建包括法律法规、政策机制、评估体系在内的制度保障体系。研究表明，通过技术创新与制度保障的双重驱动，能够有效实现长距离输水管道与生态环境的协同发展，为类似工程项目的生态环境保护提供理论依据和实践指导。

关键词:长距离输水管道；生态环境；协同发展；生态保护；技术创新；制度保障

DOI: 10.69979/3060-8767.25.10.034

1 长距离输水管道生态环境影响的理论基础

1.1 输水管道生态系统影响的概念框架

随着经济社会发展对水资源需求的持续增长，长距离输水管道作为重要的水利基础设施，在解决区域水资源配置不均衡问题中发挥着关键作用。然而，这类大型线性工程在建设和运营过程中不可避免地会对沿线生态环境产生复杂而深远的影响。当前学术界和工程实践中对于输水管道生态环境影响的认识仍存在系统性不足，缺乏统一的理论分析框架来全面评估和预测这种影响的机制与程度。

长距离输水管道对生态系统的影响呈现出明显的多维度特征。在空间维度上，管道工程形成连续的线性干扰带，直接改变沿线土地利用格局，造成生境破碎化和生态连通性中断。在时间维度上，这种影响贯穿于工程的全生命周期，从前期规划设计到施工建设，再到长期运营维护，每个阶段都会产生不同性质和强度的生态扰动。在功能维度上，管道建设会显著影响生态系统的的关键服务功能，包括水源涵养能力的改变、生物多样性维持功能的削弱、土壤保持和养分循环的干扰等。

基于生态系统服务功能评估理论，输水管道工程对自然生态系统的影响可以量化为对各项生态服务价值的损益变化。管道施工过程中的土壤扰动和植被清除会直接降低区域碳储存和气候调节功能，而地表硬化则会影响雨水渗透和地下水补给过程。同时，管道走廊的建设会改变野生动物的迁移路径，对生物多样性保护产生

长期影响。这种系统性的生态服务功能变化需要建立综合性的评估框架来准确测度其生态经济价值。

生命周期理论为分析输水管道生态影响提供了重要的时间序列分析工具。在规划阶段，路由选择和工程设计决策将决定生态影响的基本格局和强度分布。施工阶段是生态扰动最为集中和剧烈的时期，大规模的土方开挖、材料运输和设备作业会对沿线生态环境造成直接冲击。运营阶段虽然扰动强度相对较低，但持续时间长，需要关注管道维护和检修活动的累积性生态影响。废弃阶段的生态修复和土地恢复则为减缓工程负面影响提供了重要机遇。通过构建这一系统性的概念框架，为后续建立科学的协同发展理论模型提供了坚实的理论支撑。

1.2 生态环境协同发展的理论模型

生态环境与基础设施协同发展的理论逻辑建立在系统论和可持续发展理念基础之上，强调工程建设与生态保护之间的动态平衡关系。在长距离输水管道建设过程中，传统的单向开发模式往往忽视生态系统的复杂性和脆弱性，导致工程效益与生态效益难以兼顾。协同发展理论模型旨在构建一种多元互动的发展框架，通过优化资源配置和技术创新，实现工程建设与生态保护的有机统一。

“压力-状态-响应”模型为理解输水管道工程活动与生态环境之间的复杂关系提供了科学的分析框架。在该模型中，压力要素包括管道施工、土地占用、水文改

变等人为活动；状态要素反映生态系统的结构和功能变化，如植被覆盖度、土壤质量、生物多样性等指标；响应要素则体现为生态修复措施、环境管理政策等主动干预行为。这种动态关联机制揭示了工程活动对生态环境影响的传导路径，为制定针对性的保护策略提供了理论支撑。

水资源开发与生态保护的动态平衡路径体现了现代水利工程的发展趋势。高效节水灌溉技术的协同发展模式表明，通过技术创新和管理优化，可以在满足用水需求的同时减少对生态环境的扰动。输水管道建设应借鉴这种协同发展思路，在规划设计阶段充分考虑生态环境容量，通过生态廊道设计、分段施工、生态补偿等措施，建立工程建设与生态保护的良性循环机制。这种动态平衡不是静态的妥协，而是在发展中寻求最优解的过程，需要根据不同地区的生态特征和工程需求进行动态调整和优化。

2 长距离输水管道生态环境影响的现状分析

2.1 输水管道对区域生态环境的影响路径

长距离输水管道作为线性基础设施，对区域生态环境产生多层次、多维度的复杂影响。管道建设及运营过程中的直接影响主要体现在施工期间的土壤扰动和植被清除，以及永久性占地对原有生态系统的物理性破坏。这种直接影响导致沿线土壤结构发生改变，表层土壤压实程度增加，土壤透气性和保水能力下降，进而影响植物根系的正常生长和土壤微生物群落的稳定性。

间接影响路径更为复杂且具有长期性特征。管道渗漏问题对地下水环境构成潜在威胁，特别是在输送过程中可能携带的重金属污染物质会通过渗透作用进入地下水系统。镉等重金属离子一旦进入地下水环境，其清除难度极大，需要采用专门的控制技术进行处理，这凸显了突发污染防控机制建设的重要性。管道沿线的水文循环模式也会发生显著变化，地表径流路径被改变，局部区域的水分平衡状态受到干扰。

此外，管道建设过程中的材料运输和机械作业会引发扬尘污染，对大气环境质量构成短期扰动，增加区域颗粒物浓度，进而影响植物光合作用和微生物活性。在运营阶段，管道压力波动可能诱发次生地质灾害，如边坡失稳或土壤液化，加速地表侵蚀过程，特别是在地质脆弱区域。同时，输水管道的水量调度变化会干扰自然水文节律，导致下游湿地萎缩和河岸带退化，影响水生生物繁殖周期和食物链结构。这些影响路径不仅局限于物理层面，还会通过生态链式反应放大，例如土壤扰动

引发的微生物群落失衡可能导致养分循环受阻，进一步抑制植被恢复能力。在生物多样性维度，管道廊道还成为外来物种入侵的潜在通道，破坏本地生态平衡，增加病虫害传播风险。这些多维影响路径的综合作用凸显了输水管道工程对区域生态环境的系统性挑战，为后续评估和调控提供更全面的分析基础。

2.2 生态环境影响的典型案例研究

通过对国内外典型长距离输水管道项目的深入调研，可以更直观地认识管道建设对生态环境的实际影响特征。“引江济淮”工程作为我国重要的跨流域调水项目，其数字骨干网建设在巢湖水生态改善方面取得了显著成效^[3]。该工程通过构建智能化监测网络，实现了对水质、水量、生态指标的实时动态监控，有效提升了巢湖流域水生态环境的整体质量。工程实施过程中采用的河道生态修复技术，包括生态护坡、人工湿地、生物栖息地恢复等措施，为河道生态系统的自然恢复创造了有利条件。

相比之下，新疆在将输水管道应用于生态治理方面积累了更为显著且具体的实践经验。以阿克苏地区阿瓦提县艾西曼区域生态修复及荒漠化治理工程为例，该工程创新性地通过新建专用输水管道和配套引水渠系统，每年可将阿克苏市和温宿县污水处理厂生产的5000万立方米达标再生水（中水）引至生态治理区。此举精准、高效地解决了大规模生态防护林建设及植被恢复所面临的严峻缺水瓶颈问题。截至2025年，得益于该输水工程的稳定水源保障，整个项目区已完成生态修复面积达78.85万亩，成效显著。其成功模式因此在2024年被新疆维吾尔自治区列为塔克拉玛干沙漠边缘阻击战的重点生物治沙示范项目。这一实践不仅为艾西曼区域荒漠化防治提供了关键支撑，更重要的是，为整个干旱、半干旱地区探索出了一条通过科学规划和建设输水管道网络，有效利用非常规水源（如再生水），从而大规模、可持续推进生态修复和沙漠治理的创新路径，积累了宝贵的可复制、可推广的经验。

3 长距离输水管道生态环境协同发展的策略

3.1 生态保护的技术创新路径

长距离输水管道生态保护的技术创新是实现工程建设与环境保护协调发展的核心驱动力。管道路由优化技术通过精准识别生态敏感区域，运用地理信息系统和遥感技术构建多层次的生态适宜性评价模型，实现管道线路对重要生态功能区的科学避让。基于数字高程模型和土地利用现状数据的空间分析方法，能够有效降低管

道建设对珍稀动植物栖息地和生态廊道的干扰程度。

生态修复技术的创新应用为管道沿线生态系统的快速恢复提供了有效途径。模块化生态驳岸技术通过预制生态模块的标准化设计，在管道穿越河道和湿地区域建立多功能生态缓冲系统，既保障了管道结构安全又维护了水生生态系统的完整性。植被恢复技术采用本土化植物配置方案，结合微地形改造和土壤改良措施，促进管道沿线植被群落的自然演替和生态功能重建。

智慧监测与预警技术是提升管道生态风险管理效能的关键支撑。通过构建覆盖管道全生命周期的智能监测网络，在关键生态敏感区部署高精度传感器网络，实现对土壤湿度、地表位移、水质参数、生物活动等生态指标的实时在线监控。结合物联网（IoT）传输技术和边缘计算能力，构建基于人工智能算法的生态风险预警模型，能够对管道渗漏、边坡失稳、生物通道受阻等潜在生态风险进行早期识别与精准定位。这种主动式的监测预警体系，为及时采取干预措施、最大限度降低生态损害提供了科学依据。

水资源高效利用与水质保障技术是缓解区域水资源压力的重要途径。在管道设计阶段，集成先进的节水技术，如采用低摩阻管材、优化水力设计以减少输水损失。在运营阶段，探索利用管道沿线受水区的再生水（中水）资源，通过建设专用回用管网或利用现有管道混合输送（在技术可行且保障水质安全的前提下），将其定向用于管道沿线的生态补水、植被灌溉或荒漠化治理，如新疆艾西曼区域的成功实践所示。同时，开发适用于管道输水特点的原位水质净化与稳定技术，例如在特定管段采用缓释生态修复剂或设置生态滤床接口，以减轻因水质波动对受纳水体的生态冲击。

此外，数字孪生技术为生态保护技术创新提供了强大的模拟与决策支持平台。通过融合地理信息系统（GIS）、建筑信息模型（BIM）与实时监测数据，构建高精度的管道工程及周边生态环境的数字孪生体。该平台能够模拟不同工程方案（如路由变更、施工工艺选择）、运营情景（如调度方案、检修活动）及外部干扰（如极端气候）下对生态环境的潜在影响，进行多方案比选与优化。基于点云建模和虚拟现实（VR）技术，可对生态修复措施的效果进行预演和评估，显著提升生态保护决策的科学性与前瞻性。这些创新技术的系统整合，为构建智能化、精细化的管道生态保护体系奠定了坚实的技术基础，并与后续探讨的制度保障体系形成有效耦合。

3.2 生态环境协同发展的制度保障

长距离输水管道生态环境协同发展需要完善的制度体系作为根本保障，通过构建系统性的法律法规、政策机制和评估体系，确保技术创新路径的有效实施和可持续运行。制度保障体系的核心在于建立健全生态风险预警机制、跨区域协同监管框架和生态补偿政策体系。

建立管道工程生态影响后评估制度是制度保障的重要基础。该制度应涵盖管道建设全生命周期的生态环境监测与评估，通过构建包括土壤质量、植被覆盖度、水文变化、生物多样性等核心指标在内的综合评价体系，实现对生态影响的动态监测和及时预警^[6]。评估制度需要明确评估主体、评估程序、评估标准和结果应用等关键环节，确保评估工作的科学性和权威性。

完善生态补偿横向转移支付政策是实现区域协调发展的关键举措。借鉴大湾区水安全治理的成功经验，建立跨区域协同监管框架，统筹协调不同行政区域间的生态保护责任和利益分配^[4]。该框架应包括生态补偿标准制定、资金筹措机制、补偿方式选择和绩效考核体系等核心要素，通过市场化手段和政府调控相结合的方式，激发各方参与生态保护的积极性。

法律法规体系的完善是制度保障的根本支撑。应加快制定专门针对长距离输水管道生态环境保护的法规条例，明确建设单位、管理部门和地方政府的生态保护责任，建立严格的生态损害责任追究机制。政策机制方面需要强化规划统筹、资金保障和技术支持，形成政府主导、企业参与、社会监督的多元治理格局。随着制度体系的不断完善和实践经验的持续积累，长距离输水管道与生态环境的协同发展将迈向更加成熟和可持续的发展阶段。

参考文献

- [1] 谢崇宝. 地埋式自动伸缩高效节水灌溉关键产品创制及集成应用模式[J]. 中国水利.
- [2] 曲建华. 微波辅助稻壳基吸附剂制备及应对水源地镉污染控制研究[D]. 哈尔滨工业大学.
- [3] 王希亮."数字引江济淮"骨干网建设思路[J]. 通信电源技术.
- [4] 吉红香, 黄本胜, 邱静, 等. 大湾区水安全治理策略探讨[J]. 长江科学院院报.
- [5] 刘晓琳, 谭春晓. 引淡济雄安的可行性研究——天津滨海新区向雄安新区输送海水淡化水[C]//2017城市发展与规划论文集. 2017.
- [6] 刘海星. 给水排水管网系统耐受度指标体系的研究与应用[D]. 哈尔滨工业大学.