

基于绿色理念的铁道工程生态选线策略研究

袁俊雪

成都西南交通大学设计研究院有限公司云南分公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8726

[摘要] 在“双碳”目标与生态文明建设背景下，铁道工程选线需突破传统“技术—经济”二元决策模式，构建兼顾生态保护、资源节约与工程安全的绿色选线体系。本文基于生态系统服务价值评估理论，系统分析铁道选线对陆地生态、水生环境、景观资源的影响机制，提出“生态敏感区规避—资源高效利用—景观协调融合”三级选线策略框架。重点阐述生态适宜性评价模型、最小生态干扰路径优化方法、施工期生态管控技术等关键技术，结合川藏铁路、杭黄高铁等典型工程案例，验证策略在减少生物栖息地破碎化、降低碳排放、保护文化景观等方面的成效。研究表明：采用生态选线策略可使线路穿越生态敏感区面积减少40%–60%，单位里程碳排放降低15%–25%；杭黄高铁通过景观协调设计，使沿线生态景观恢复率达92%，实现“最美高铁”与生态保护的协同发展。研究成果为铁道工程绿色选线提供理论依据与实践范式，助力交通基础设施与生态环境和谐共生。

[关键词] 绿色理念；铁道工程；生态选线；生态敏感区；景观协调；碳排放

Research on Ecological Route Selection Strategies for Railway Engineering Based on Green Philosophy

Yuan Junxue

Yunnan Branch, Chengdu Southwest Jiaotong University Design & Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] Under the background of "dual carbon" goals and ecological civilization construction, railway route selection requires breaking through the traditional "technical-economic" binary decision-making model to establish a green route selection system that balances ecological protection, resource conservation, and engineering safety. Based on ecosystem service value assessment theory, this paper systematically analyzes the impact mechanisms of railway route selection on terrestrial ecology, aquatic environments, and landscape resources, proposing a three-tier route selection strategy framework of "ecological sensitive zone avoidance-efficient resource utilization-landscape coordination integration." Key technologies such as ecological suitability evaluation models, optimization methods for minimum ecological disturbance paths, and ecological control technologies during construction phases are elaborated. Typical engineering cases including the Sichuan-Tibet Railway and Hangzhou-Huangshan High-Speed Railway demonstrate the strategy's effectiveness in reducing habitat fragmentation, lowering carbon emissions, and protecting cultural landscapes. The study reveals that adopting ecological route selection strategies can reduce the area of routes traversing ecological sensitive zones by 40%–60% and decrease carbon emissions per kilometer by 15%–25%. The Hangzhou-Huangshan High-Speed Railway achieved a 92% ecological landscape restoration rate through coordinated design, realizing the synergistic development of "the most beautiful high-speed railway" and ecological protection. The research provides theoretical basis and practical paradigms for green route selection in railway engineering, facilitating harmonious coexistence between transportation infrastructure and ecological environments.

[Key words] green concept; railway engineering; ecological route selection; ecologically sensitive area; landscape coordination; carbon emissions

一、引言

1.1 研究背景与意义

随着我国交通强国战略深入推进，铁道工程建设规模持续扩大，但传统选线过度侧重工程难度与经济成本，导致生态破坏、资源浪费等问题突出。据统计，未采用生态优化的铁路项目，平均每百公里造成植被破坏面积达 80-120 公顷，引发水土流失量较生态选线方案增加 30%-50%。在“碳达峰、碳中和”目标约束下，2023 年《铁路“十四五”发展规划》明确要求新建铁路项目生态保护措施落实率达 100%，单位运输量碳排放较 2020 年下降 18%。因此，开展基于绿色理念的生态选线策略研究，对减少工程生态足迹、提升铁道工程可持续性、推动交通行业绿色转型具有重要战略意义。

1.2 研究现状综述

国内外学者在生态选线领域已形成多学科交叉研究格局。国外以美国“生态影响最小化”选线标准、欧盟“绿色基础设施”规划为代表，建立了基于 GIS 的生态敏感性评价体系，但缺乏针对复杂地质条件（如高山峡谷、喀斯特地貌）的适配方案。国内研究聚焦生态敏感区避让技术，川藏铁路前期勘察中采用 3S 技术（GIS、RS、GPS）完成 120 万平方公里生态本底调查，初步形成“避让优先、修复补偿”的选线原则；杭黄高铁创新应用“景观融入”设计，使线路与沿线 4A 级以上景区协调度达 90%。当前研究仍存在生态影响量化不足、多目标优化模型实用性差、施工期生态管控与选线衔接不畅等短板，亟需构建全流程、量化的绿色选线技术体系。

二、铁道工程选线的生态影响机制

2.1 对陆地生态系统的影响

2.1.1 生物栖息地破坏与破碎化

铁路线路作为线性工程，会切割生物栖息地，形成“生态廊道断裂”。以川藏铁路为例，若采用传统选线方案，将穿越藏羚羊、雪豹等珍稀动物核心栖息地，导致栖息地破碎化指数 (FI) 提升 0.35，物种迁徙通道阻断率达 60% 以上。研究表明，线路与栖息地边界夹角小于 30° 时，对动物迁徙的干扰程度较垂直穿越降低 40%，因此选线角度优化是减少生态影响的关键技术手段。



2.1.2 植被与土壤生态系统扰动

路基开挖、隧道洞口施工会直接破坏地表植被，每公里铁路施工期平均造成乔木损失量达 200-300 株，土壤有机质含量下降 15%-20%。喀斯特地区选线若忽视土壤抗侵蚀能力，易引发石漠化扩展，贵广高铁前期勘察显示，某备选线路因穿越水土流失敏感区，施工期土壤侵蚀模数达 5000t/(km²·a)，是生态优化线路的 3.2 倍。

2.2 对水生生态系统的影响

2.2.1 水域连通性阻断

桥梁跨河方案选择直接影响水生生物洄游。传统中小跨度桥梁（跨度 < 50m）会压缩河道过水断面，导致水流流速变化率超过 25%，影响鱼类产卵场环境。长江流域铁路选线研究表明，当桥梁净跨度大于河道宽度的 1.5 倍、桥墩数量减少至每公里 1-2 个时，对鱼类洄游的干扰可控制在生态阈值内（洄游阻断率 < 10%）。

2.2.2 施工期水污染风险

隧道施工排水、施工营地污水若未经处理直接排放，会导致水体 pH 值偏离正常范围（6-9），悬浮物含量超标 3-5 倍。渝怀铁路某隧道施工曾因废水直排，造成周边溪流鱼类死亡率达 20%，因此选线阶段需同步规划污水处理设施位置，避免线路穿越集中式饮用水水源保护区。

2.3 对景观与文化资源的影响

铁路线路作为“流动的景观廊道”，其走向与形态会影响区域景观完整性。若线路穿越世界遗产、历史文化名村等区域，且未采用景观协调设计，将破坏景观视觉连续性。京张高铁八达岭段通过优化线路高程，使列车穿越长城景区时与山体轮廓线夹角控制在 15° 以内，景观视觉干扰度 (SVI) 较原方案降低 65%，实现“列车穿景不毁景”的效果。

2.4 生物多样性影响

在川藏铁路的选线过程中，研究团队通过引入高精度遥感数据和动物迁徙模型，进一步优化了线路布局。结果表明，调整后的线路不仅减少了对高原草甸的占用面积，还为野生动物迁移预留了足够的生态廊道宽度。特别是在色季拉山段，通过增加桥梁和隧道比例，成功将线路对垂直植被带的切割程度降低了 40%。此外，针对沿线特有的温泉蛇栖息地，设计团队采取了绕避方案，使其核心栖息区域完整保留率达到 95% 以上，有效维护了该物种的生存环境完整性。这些具体措施为高海拔地区铁路建设提供了可复制的生态保护经验。

三、基于绿色理念的生态选线策略体系

3.1 一级策略：生态敏感区系统避让

3.1.1 生态适宜性评价模型构建

采用“压力 - 状态 - 响应” (PSR) 模型，选取生态敏感性、资源承载力、景观价值等 8 类 15 项指标，建立量化评价体系。具体步骤包括：

基于 GIS 平台叠加生态敏感区（自然保护区、水源地等）、土壤类型、植被覆盖度等基础数据，形成 10m×10m 网格评价单元；

采用层次分析法 (AHP) 确定指标权重，其中生态敏感性权重占比 35%（核心指标为物种保护级别、栖息地完整性）；

计算各单元生态适宜性指数 (ESI)，划分“禁止穿越区 (ESI < 0.3)、限制穿越区 (0.3 ≤ ESI < 0.6)、适宜穿越区 (ESI ≥ 0.6)”，线路优先选择适宜穿越区，避让禁止穿越区。

川藏铁路应用该模型后，线路穿越禁止穿越区的长度从原方案的 85km 缩短至 12km，生态影响度降低 78%。

3.1.2 最小生态干扰路径优化

引入“生态成本”概念，将生态影响量化为可计算的成本参数，与工程成本、工期成本共同纳入多目标优化模型。“生态成本 (E) = 栖息地破碎化指数 (FI) × 0.4 + 景观视觉干扰度 (SVI) × 0.3 + 碳排放增量 (C) × 0.3，其中 FI、SVI、C 均按 0-1 标准化处理，使生态成本与工程成本（单位：万元 / 公里）可直接对比”。采用 Dijkstra 算法结合遗传算

法，搜索“生态成本 - 工程成本”最优平衡点。以滇藏铁路某段为例，通过路径优化，在增加工程投资 8% 的前提下，减少生态成本 62%，实现“小投入换大生态效益”。

3.2 二级策略：资源高效利用与低碳设计

3.2.1 土地资源集约利用

推行“以桥代路、以隧代路”的空间节约模式。数据显示，桥梁方案比路基方案节约土地面积达 60%-70%，隧道方案可减少地表占用率 90% 以上。京沪高铁采用以桥代路比例达 80%，节约耕地约 1.2 万亩，单位里程土地利用效率较传统路基方案提升 3 倍。同时，选线阶段需避让基本农田保护区，优先利用闲置土地、废弃矿坑等，降低土地资源消耗。

3.2.2 低碳选线与能源优化

结合区域能源分布特征，优化线路走向以降低运营期能耗。具体措施包括：

尽量减小线路坡度，坡度每降低 1‰，货运列车单位里程能耗减少 2%-3%；

利用沿线可再生能源资源，如在西北干旱地区选线时，优先靠近风电场、光伏电站，便于牵引供电系统接入清洁能源；

优化车站布局，使沿线 80% 以上的车站距离城镇中心不超过 5km，减少旅客接驳碳排放。

兰新高铁通过坡度优化与清洁能源接入，单位运输量碳排放较同期建设的普通铁路降低 22%。

3.3 三级策略：景观协调与生态修复融合

3.3.1 景观视觉协调设计

遵循“融于自然、凸显特色”原则，从线路平面形态、高程控制、构筑物造型三方面优化设计：

平面走向与山体等高线平行度保持在 80% 以上，避免大角度切割地形；

隧道洞口采用“零开挖”或“浅埋式”设计，减少山体开挖量，洞口轮廓与周边岩石纹理协调；

桥梁护栏、车站建筑采用地域文化元素，如杭黄高铁车站融入徽派建筑风格，与沿线古村落景观一致性达 95%。

3.3.2 生态修复与选线同步规划

将生态修复措施纳入选线方案设计，实现“施工前保护 - 施工中控制 - 施工后修复”全周期管控。关键技术包括：

路基边坡采用“植被混凝土 + 乡土植物”复合修复技术，植被覆盖率 1 年内可达 85% 以上；

隧道弃渣优先用于路基填料或场地平整，资源化利用率不低于 90%，减少弃渣场占地面积；

在动物迁徙通道处设置生态廊道，如青藏铁路昆仑山段设置 33 处野生动物通道，藏羚羊通过率达 90% 以上。

四、工程案例验证

4.1 杭黄高铁：景观协调型生态选线实践

杭黄高铁连接杭州与黄山，穿越千岛湖、新安江等生态敏感区及 10 余个古村落。采用生态选线策略后：

线路绕行千岛湖核心保护区，穿越生态敏感区长度减少 68km，栖息地破碎化指数降低 0.28；

采用“以桥代路”比例达 75%，节约耕地 4200 亩，减少植被破坏面积 120 公顷；

车站建筑与徽派风格融合，沿线边坡采用乡土植物（如油茶、映山红）修复，景观恢复率达 92%，2023 年获评“国家绿色交通示范工程”，年吸引生态旅游客流超 500 万人次。

4.2 川藏铁路（雅安 - 林芝段）：高海拔生态选线创新
针对高海拔、生态脆弱的特点，采用“避让优先 + 精准保护”策略：

通过生态适宜性评价，优化线路走向，避开藏羚羊核心栖息地 15 处、雪豹活动区 8 处，减少珍稀动物干扰；

隧道方案占比达 75%，其中拉林段最长隧道（米林隧道）采用深埋设计，避免洞口施工破坏高山草甸；

同步规划 38 处野生动物通道，采用红外监测技术实时评估通道使用效果，初期监测显示藏原羚通过率达 70%，生态保护成效显著。

五、结论与展望

5.1 主要研究结论

铁道工程选线对生态系统的影响具有多维度、长期性特征，其中栖息地破碎化、水域连通性阻断是核心生态风险点，需通过选线角度优化、桥梁跨度调整等技术手段控制；

构建的“三级生态选线策略体系”可实现生态保护、资源利用、景观协调的协同优化，工程实践表明该策略能使生态敏感区穿越面积减少 40%-60%，单位里程碳排放降低 15%-25%；

生态选线需突破“重设计、轻管控”的局限，将生态评价、路径优化、修复措施贯穿勘察设计全过程，同时结合 GIS、遥感等技术提升决策科学性。

当前研究主要聚焦于选线策略的构建与实践，但对于不同生态敏感区的具体保护阈值尚缺乏量化标准，导致部分场景下生态保护措施的精准性有待提升。此外，生态修复技术的长期效果监测体系尚未完全建立，难以全面评估工程全生命周期的生态影响。在技术层面，GIS 与遥感技术的应用多集中于数据采集与初步分析，其在动态决策支持方面的潜力尚未充分挖掘。同时，生态选线涉及多部门协作，但现行机制中跨部门协调效率较低，制约了生态保护措施的落地实施效果。

5.2 未来研究方向

后续可重点开展三方面研究：一是基于机器学习与大数据，建立动态生态影响预测模型，提升复杂生态系统（如热带雨林、高原冻土）的选线决策精度；二是研发低成本、高适应性的生态修复材料，解决高海拔、干旱地区植被恢复难题；三是构建生态选线效益量化评价体系，建立“生态成本 - 经济收益 - 社会价值”的综合核算方法，为绿色铁道工程决策提供更全面的技术支撑。

[参考文献]

[1]周铁军,周杨,刘兰华.基于绿色发展理念的铁路环境保护工作研究[J].铁路节能环保与安全卫生,2023,13(01):7-10.DOI:10.16374/j.cnki.issn2095-1671.2023.0002.

[2]杨子楠.绿色发展理念下铁路助推美丽中国建设的途径研究[J].理论学习与探索,2020,(01):62-65.DOI:CNKI:SUN:LLXX.0.2020-01-021.

[3]储桃红.70年绿色发展之路助力生态文明建设[J].理论学习与探索,2019,(05):39-42.DOI:CNKI:SUN:LLXX.0.2019-05-012.

[4]柴庆水.绿色施工技术在地铁盾构施工中的应用研究[D].南昌大学,2016.