https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.054

西部山区大型交通工程弃渣场多因素耦合层次递阶区域选址方法

罗 璟[1],裴向军[1*],白占雄[2],杨沛璋[1],张春晖[2],朱正清[2],姬翠翠[1],王斯蒙[2],李郭兵[1],孙文洋[1]

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川成都 610059
2. 中国铁路设计集团,天津 300142

摘 要: 西部山区构造活跃、地形高陡、灾害频发、气候多变、生态环境敏感脆弱.在多因素耦合作用下,适宜弃渣场选址的场地稀缺,选址难度大.针对西部山区大型交通工程弃渣量大且分散、弃渣场选址困难的实际问题,本文系统梳理弃渣场选址痛点,全面筛选关键影响因素,提出"范围拟定-场址筛选-评估分区"的多因素耦合层次递阶区域选址方法.基于风险理论构建安全适宜性评估模型,量化弃渣场场地安全性及其次生灾害的潜在损失;以运输成本为核心,综合运输距离与运输条件建立经济适宜性评估模型;以生态系统脆弱性为表征,从格局、质量与服务功能三个维度建立生态适宜性评估模型.采用熵权法与层次分析法组合赋权,形成综合适宜性分区与候选场址优先序列.研究成果为复杂山区交通工程弃渣场选址提供了高效、定量、通用的方法体系,显著提升了选址科学性,从源头最大限度降低弃渣场安全风险、处置成本与生态恢复难度.

关键词: 西部山区;弃渣场;选址;交通工程;多因素耦合;生态系统.

中图分类号: P237 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3274-16 **收稿日期:** 2025-08-31

A Hierarchical Multi-Factor Coupled Regional Preliminary Site Selection Method for Transportation-Project Spoil Disposal in Western Mountainous Areas

Luo Jing[1], Pei Xiangjun[1*], Bai Zhanxiong[2], Yang Peizhang[1], Zhang Chunhui[2], Zhu Zhengqing[2], Ji Cuicui[1], Wang Simeng[2], Li Guobing[1], Sun Wenyang[1]

1. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *China Railway Design Corporation, Tianjin* 300142, *China*

Abstract: In western mountainous regions, factors involving active tectonics, steep terrain, frequent hazards, variable climate, and fragile ecosystems render suitable spoil disposal sites scarce under multi-factor coupling, making site selection highly challenging. To address the practical challenges of large-scale transportation projects in western mountainous areas characterized by

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007101);四川省自然科学基金项目(No. 2025ZNSFSC0318).

作者简介: 罗璟(1990-),男,研究员,长期从事工程地质与生态地质的教学与科研工作. ORCID:0000-0001-6746-1520. E-mail:luoj@cdut.edu.cn
* **通讯作者:** 裴向军,ORCID:0009-0007-6529-2605. E-mail:pxj@cdut.edu.cn

引用格式: 罗璟,裴向军,白占雄,杨沛璋,张春晖,朱正清,姬翠翠,王斯蒙,李郭兵,孙文洋,2026.西部山区大型交通工程弃渣场多因素耦合层次递阶区域选址方法.地球科学,51(9):3274-3289.

Citation: Luo Jing, Pei Xiangjun, Bai Zhanxiong, Yang Peizhang, Zhang Chunhui, Zhu Zhengqing, Ji Cuicui, Wang Simeng, Li Guobing, Sun Wenyang, 2026. A Hierarchical Multi-Factor Coupled Regional Preliminary Site Selection Method for Transportation-Project Spoil Disposal in Western Mountainous Areas. *Earth Science*, 51(9): 3274-3289.

substantial and spatially dispersed spoil volumes and difficult site selection, this study systematically identifies key siting challenges and screens critical influencing factors, proposing a hierarchical multi-factor coupled siting framework comprising extent delineation, site screening, and suitability zoning. A risk-based safety suitability model is developed to quantify the site safety of spoil disposal areas and the potential losses from secondary hazards; an economic suitability model centered on transport costs integrates haul distance and access conditions; and an ecological suitability model uses ecosystem vulnerability as a proxy, assesses three dimensions of the pattern, quality, and service . Entropy weighting and the Analytic Hierarchy Process (AHP) are combined to derive composite weights, yielding integrated suitability zoning and prioritized candidate site lists. This research provides an efficient, quantitative, and generalizable methodological framework for spoil disposal siting in complex mountainous transportation projects, substantially enhancing siting rigor while minimizing safety risks, disposal costs, and ecological restoration complexity at the source.

Key words: western mountainous area; spoil disposal; site selection; transport engineering; multi-factor coupling; ecosystems.

0　引言

随着国民经济持续发展以及“西部大开发”与“一带一路”等国家战略的推进,西部山区已成为铁路、公路、梯级水电、油气管线等重大基础设施的集中走廊.该地区地形地质条件复杂、生态环境敏感脆弱,工程建设呈现高比重的隧道化趋势,由此产生的弃渣处置问题日益突出.以单线隧道为例,开挖直径 9 m、长度 1.5 km 的隧道理论开挖体积约 9.5×10^4 m^3(Tokgöz, 2013).同时,隧道弃渣颗粒级配与洁净度波动大、分散性强,对运输、消纳与资源化利用均提出更高要求.然而,西部山区普遍稀缺适宜消纳场址,亟须构建定量化、标准化的弃渣场选址与适宜性评估技术体系,实现源头预控,优选近距低扰动场址.

选址研究源于物流领域,核心是最小化场址到需求点的距离或成本总和(Weber, 1929).随后研究由单设施扩展到多设施协同布局(Hakimi, 1964),评价指标也由“距离”拓展为包含运输、管理与延误等在内的综合成本(Kuehn and Hamburger, 1963).随着应用延伸至医院、学校、消防等公共服务设施,选址方法也由单因素定性判断转向多因素定量评估(张浩文, 2010; Tugba *et al.*, 2011; Kabir and Sumi, 2014).在多源数据与空间分析条件下,地理信息系统(GIS)凭借数据集成、叠加分析与可视化优势,被广泛用于场址初筛与适宜性评价(马锦和张浩生, 2021;何尧等, 2021;王君燕, 2022),并通过递阶层次结构在简化模型的同时保持评估精度,降低指标冗余(朱庆等, 2019).总体而言,选址研究已由“单目标、单成本”的离散模型,演进为“多目标、多维度、数据驱动”的综合框架.

然而,弃渣场选址需在地质、生态、经济与工程等多因素之间统筹权衡,具有显著特殊性与复杂性,现有模型适用性普遍不足.安全上需综合评估外界触发因素对弃渣场稳定性的影响及失稳后对下游承灾体的威胁(钟兴荣, 2024);工程上运输条件与施工组织对可实施性构成刚性约束(张帅和韩立鹤, 2023);生态上必须严格遵循生态保护红线与各类保护地管控要求,并评估生态影响与修复可行性(殷泉花, 2022).当前虽已形成“图上初筛-地方推荐-比选评估-场址勘查”的选址流程(图 1),并从安全稳定性、经济合理性、生态适宜性等维度开展比选,但普遍效率低、主观性强、系统性不足,易遗漏更优场址.安全评估偏重经验定性研判,缺乏风险量化评估;生态评估多停留在敏感区避让与占地控制,缺少对生态影响、风险与恢复潜力的系统评价;经济评估常以直线距离估计运输成本,未能充分考虑道路建设、施工组织、场地容量与处置难易等实际因素.总体而言,尚缺少安全-工程-生态多因素耦合的定量化选址方法,选址影响因素梳理不系统、指标口径不统一、权重设定主观且缺乏一致性与敏感性检验,制约了选址结论的客观性以及方法的可复现性与可推广性.

基于此,本文面向西部山区大型交通工程弃渣量大且分散、选址困难(受复杂地质背景、高陡地形、敏感生态等多因素约束)的实际问题,系统梳理弃渣场选址的关键影响因素,综合考虑可行性、可复现性与可推广性,运用遥感、GIS、机器学习、模拟分析与权重确定等方法手段,构建多因素耦合层次递阶区域选址方法,从安全、工程、生态三个维度开展适宜性评估分区,统一指标口径,形成高效、定量、通用的复杂山区弃渣场选址体系,为复杂山区重大工程弃渣的源头管控与科学消纳提供决策支撑,助力实现弃渣场“安全稳定、经济合理、生态适宜”的统筹优化.

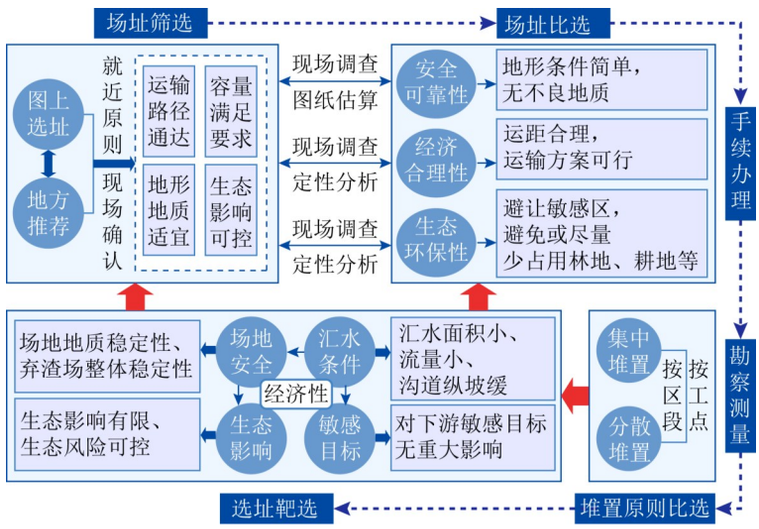

图 1 现行弃渣场选址流程

Fig. 1 Flowchart of the current spoil disposal site selection process

1 弃渣场选址影响因素筛选

弃渣场选址应以出渣点的空间分布与出渣量为基本约束，在符合法律法规与空间管控要求的前提下，优先选择容量充足、地形有利、地质稳定、生态适宜、运输组织可行的场地．选址工作不仅需在法律法规、管理制度、审批流程上形成合规闭环，还需耦合安全、工程、生态等关键维度，构建多因素耦合的选址方法，统一指标口径、强化定量评估．为此，在系统吸纳了 60 余条山区铁路、公路项目弃渣场选址与位置变更的经验及教训的基础上，开展选址关键影响因素的系统识别与科学筛选．依据影响形式与程度，将影响因素归纳为安全稳定性、工程可行性、生态适宜性三大类，据此指导选址评价指标筛选与方法构建（图 2）．

1.1 安全稳定性

弃渣场选址的安全稳定性评估应关注两个方面：一是在外界不利因素（地震、降雨、地质灾害等）作用下渣体自身的失稳概率，即场地安全性评估；二是失稳后引发次生灾害对下游承灾体的威胁程度，即承灾体易损性评估．据此，从外界不利因素影响下的场地安全性与次生灾害影响范围内的承灾体易损性两个维度开展安全稳定性评估．

1.1.1 场地安全性评估 山区构造复杂、活动断裂密集且地震频发，弃渣场往往难以完全避开中高烈度区．地震作用下，挡护结构易受损，导致渣体局部或整体失稳，进而形成滑坡、泥石流等次生灾害（黄维等，2026）．因此，应结合区域发震构造分布格局、地震活动性、场地类别与放大效应等因素，开展概率地震危险性评价（张奕哲等，2025）．

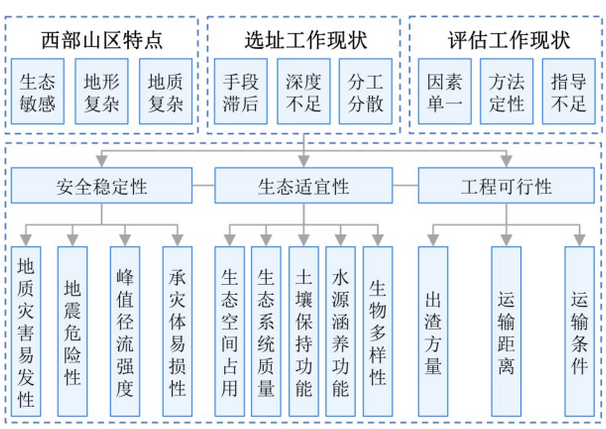

图 2 弃渣场选址影响因素筛选

Fig.2 Screening of influencing factors for spoil disposal site selection

山区弃渣场多位于沟谷地带，上游汇水面积大、汇流路径短，易形成短时强径流．渣体属散体介质，对降雨入渗与动水冲刷极为敏感，易发生坡面冲刷、坡脚淘蚀与渗透破坏（刘向东等，2023）．因此，应综合降雨/融雪、汇水面积、地形与土壤条件，采用分布式水文模型（梁志承等，2017；Meresa，2019）与运动学模拟定量估算峰值径流强度．

同时，在高陡复杂山区，滑坡、崩塌、泥石流难以完全规避，其刮蚀与冲击作用会显著削弱渣体稳定性（刘菲和唐红梅，2010；Chang *et al.*，2020；Xiao and Tian，2024）．国家相关标准明确要求弃渣场应避开滑坡体等不良地质条件地段，不宜在泥石

流易发区设置弃渣场.因此,应综合考虑地形坡度、地层岩性、地质构造、植被覆盖度、气象水文、历史灾害发育情况,采用数据驱动(韩用顺等,2021;吴润泽等,2021)或机理驱动(常志璐等,2023;贾卓等,2025)模型开展地质灾害易发性评价,量化场址区地质灾害发育程度.

1.1.2　承灾体易损性评估　弃渣场失稳后果的严重程度直接取决于下游承灾体的易损性.泥石流冲积扇等区域往往为聚落密集区,而弃渣场可能位于其上游.国家相关标准明确要求,严禁在对重要基础设施、人民群众生命财产安全及行洪安全有重大影响的区域布设弃渣场,应预留足够的安全距离(袁普金等,2018).因此,应将承灾体易损性(曾韬睿等,2023)作为选址安全稳定性的核心指标,综合承灾体发育程度及其与场址的空间关系进行评估.

1.2　工程可行性

工程可行性主要考虑弃渣处置的技术经济合理性,核心是在满足规范要求与环境约束的前提下最大限度降低处置成本.针对大量交通工程已有弃渣场的统计表明,绝大多数弃渣场与出渣点之间的距离不超过 15 km,且 80%～90% 集中在 10 km 范围内,反映出运输距离对选址的强约束作用.处置成本分解显示,运输费用通常占总处置成本的 40%～50%,远高于圬工防护费、征地拆迁费、生态修复费等.鉴于区域选址阶段具体场址未定、设计方案尚未形成,渣场容量、场内运输条件、防护与生态修复费用等难以量化,且权属协调、跨行政区等非空间因素亦难以纳入空间分析模型.因此,基于可量化性与重要性原则,以运输成本为核心因素开展经济适宜性评估,综合考虑道路通达性、便道修建成本、上下坡运渣成本差异等因素.

1.3　生态适宜性

生态适宜性主要评估场址所在区域生态系统对工程扰动的承受能力及受损后的恢复潜力.生态系统脆弱性作为系统的固有属性,指其易受外部扰动且难以应对由此产生的不利影响(Beroya-Eitner, 2016),相关评价体系已成为诊断区域生态状态的重要工具(Gonzalez *et al.*, 2010),弃渣场作为强烈的工程扰动源,其对生态系统的影响在格局、质量与功能三个维度上均有显著表现.在格局维度,弃渣压占直接破坏景观格局,加剧景观破碎度,降低生态空间连通性(连喜红等,2019);在质量维度,弃渣压占会导致地表裸露增加、林草覆盖率下降,加速土壤侵蚀与退化(Huck *et al.*, 2011);在功能维度,格局破碎与质量下降的叠加效应进一步削弱生态系统稳定性,易引发水土流失、地质灾害等次生问题,导致土壤保持、生物多样性保护等生态服务功能显著退化.因此,本文从生态系统格局、质量与功能三个维度对场址的生态系统脆弱性进行定量评估(李子辉等,2024),以刻画场址抵御工程扰动的固有能力,并将其作为场址生态适宜性的核心表征.生态系统脆弱性越低,表明该场址生态适宜性越高.

2　多因素耦合层次递阶区域选址方法

2.1　选址框架

在充分认识弃渣场特征与各指标相互作用机理的基础上,优选相关性强、差异性大且可量化的关键指标,按其重要性与约束强度进行分层组织并赋权,构建弃渣场多因素耦合层次递阶区域选址框架(图 3),包括范围拟定、场址筛选、综合分区三个阶段.

选址框架按“范围拟定-场址筛选-评估分区”三阶段递阶推进.在范围拟定阶段,综合考虑运输距离与运输条件,以出渣点为中心确定水平半径与相对高差约束带,并结合分水岭进行边界修正,初步确定选址范围.在场址筛选阶段,首先在明确各类场址的判别标准与提取特征基础上,按优先级依次识别提取;然后,依据法律法规、生态管控与工程可行性要求,设定硬性约束并剔除不可布设区域,

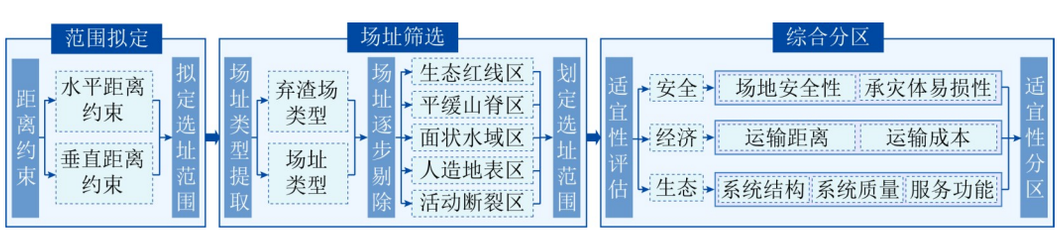

图 3　弃渣场多因素耦合层次递阶区域选址框架

Fig.3　Hierarchical, multi-factor-coupled siting framework for spoil disposal sites

最终圈定可用场址范围.在评估分区阶段,在可选范围内,从安全、经济、生态三个维度开展适宜性定量评估,采用熵权法和层次分析法组合赋权,生成综合适宜性分区图与候选场址优先序列.其中,安全适宜性基于风险理论,综合考虑地质灾害易发性、地表峰值径流强度、地震危险性、承灾体易损性,量化评估弃渣场场地安全性及其次生灾害的潜在损失;经济适宜性以运输成本为核心,统筹运输距离与运输条件;生态适宜性采用生态系统脆弱性作为表征,从生态系统格局、质量与服务功能三个维度综合评估场址对工程扰动的承受能力.

2.2 范围拟定与场址筛选

2.2.1 范围拟定 弃渣处置成本随着运输距离增加显著上升.在工程设计方案未定时,缩短运输距离是控制成本最直接且有效的途径.以各出渣点为圆心绘制15 km半径的圆形区域,并取并集得到初选水平范围;随后开展水文分析,按分水岭进行修正.基于大量工程案例统计,本文初步设定15 km的范围阈值,这既能覆盖绝大多数经济合理的场址范围,又避免了搜索范围过大导致的计算负担.在具体应用中可根据工程规模、地形条件、场址资源丰富程度等因素,适度调整该阈值.同时,山区地形起伏大,海拔差同样显著影响能耗与组织成本.为避免垂直运距过大,结合工程统计,建议将相对高差控制在−400～400 m,超出部分视为经济不合理区予以剔除(±400 m为推荐阈值,场址充足时可收紧、稀缺时可放宽).最终,综合水平距离与相对高差两项约束,并经分水岭修正,拟定研究区选址范围.

2.2.2 场址筛选 现行国家标准按照地形条件、与河(沟)的相对位置及洪水影响,将弃渣场分为平地型、坡地型、沟道型、临河型与库区型(线性交通工程一般不涉及).平地型和坡地型弃渣场多见于宽阔平原、高山丘原及U形河谷,一般不受设计洪水影响;而狭窄的深切峡谷更适宜布设临河型与沟道型弃渣场.临河型受洪水作用,但不挤占常时径流通道;沟道型则会占压径流通道,需要配置专门的排洪工程.

表1 弃渣场场址分类及其提取特征

Table 1 Classification of spoil disposal sites and extraction criteria

场址类型	提取特征
Ⅰ型	位于设计洪水淹没影响范围外,坡度0°～3°
Ⅱ型	位于设计洪水淹没影响范围外,坡度3°～25°
Ⅲ型	位于设计洪水淹没影响范围内,不挤压侵占地表径流通道
Ⅳ型	位于设计洪水淹没影响范围内,挤压侵占沟道地表径流通道

在选址阶段尚无具体堆渣设计,因此需要以场址为研究对象,提出Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型、Ⅳ型四类可自动提取的场址类型及判别特征(表1).其中,Ⅰ型场址通常为宽缓平地或河(沟)两侧较高台地;Ⅱ型场址通常为缓坡地或河(沟)两侧较高台地;Ⅲ型场址通常为河(沟)两岸较低位阶地/河滩地;Ⅳ型场址通常为河网等级相对较低支流(沟)的常时径流通道.根据河道等级划分,笔者建议在完善排洪措施前提下,三级及以下河网的常时径流通道可作为Ⅳ型场址,三级以上河网通道不适宜用于堆渣.

为进一步区分场址类型与弃渣场类型,本研究依据下伏场址的组合特征建立二者之间的空间映射关系(图4).不同弃渣场类型对应多种下伏场址组合(表2).场址提取以坡度和洪水相对位置关系为主.Ⅰ、Ⅱ型场址主要区别为坡度,可直接通过DEM坡度计算结果对其进行快速识别与划分;Ⅲ、Ⅳ型场址需结合洪水影响范围与强度综合判别.由于坡度0°～25°的区域也可能受洪水影响,因此遵循“先洪水、后坡度”的原则,先识别提取Ⅲ、Ⅳ型场址,再在剩余区域按坡度阈值识别提取Ⅰ、Ⅱ型场址.

场址类型的提取主要依赖地形与水文要素,可逐步识别满足规范安全条件的可选场址,但未充分考虑法律合规与工程可行性.现行国家标准明确禁止在对重要基础设施、人民群众生命财产安全及行

表2 弃渣场类型和场址类型关系映射

Table 2 Relationship between spoil-disposal site types and underlying site categories

弃渣场类型	下伏场址类型	
	必要下伏场址及判定条件	或包含场址
平地型	Ⅰ型,且整体平均坡度≤3°	Ⅱ型
坡地型	Ⅱ型,且整体平均坡度>3°	Ⅰ型
临河型	Ⅲ型,且不含有Ⅳ型场址,受设计洪水影响,但不挤占常时径流通道	Ⅰ型、Ⅱ型
沟道型	Ⅳ型,部分或全部挤占常时径流通道	Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型

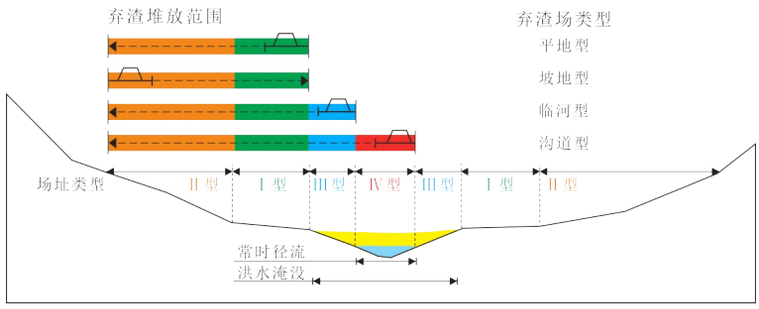

图 4　弃渣场类型与场址类型关系剖面示意

Fig.4　Schematic cross-section between spoil disposal types and underlying site categories

表 3　场址逐步剔除范围及依据

Table 3　Scope and criteria for stepwise elimination of candidate sites

剔除范围	剔除依据
生态保护红线区	属于国家法定严格保护的生态功能区,承担重要生态服务功能,为维护生态安全的底线区域,严禁堆渣作业.
面状水体区	包括三级及以上河道与湖泊等区域,但存在径流入渗与冲刷风险,易诱发弃渣场失稳,且工程可实施性差.
平缓山脊区	山脊为地形分水岭,两侧坡度大、地势高,施工安全性与可行性差;基于 DEM 提取山脊线,并设置双侧各约 50 m 缓冲带予以剔除.
人造地表区	包括居民建筑、重要基础设施及耕地等,虽地形条件较为理想,但受法律法规严格限制,拆迁补偿与生态修复成本高昂.
活动断裂及其形变影响区	活动断裂可能引发地表不均匀变形与错位,直接影响弃渣场稳定性. 依据断裂空间分布并参照相关规范设定安全避让范围予以剔除.

洪安全有重大影响的区域布置弃渣场.为提升筛选结果的合规性与可实施性,本研究进一步从法律法规、工程实施、生态管控三维度,剔除不可布设区域(表3).

2.3　综合分区

首先分别开展安全、经济、生态适宜性评估,并对评估结果进行同向化与标准化处理,以消除量纲与取值范围差异.在此基础上,采用熵权法与层次分析法(AHP)分别确定权重并进行加权叠加.熵权法基于指标离散程度(信息熵)客观确定权重,能反映数据的内在信息量,适用于数据质量高、指标间差异明显的情况,但忽略了指标的实际工程意义和决策者经验(Zhu *et al.*, 2020);AHP通过构造判断矩阵进行两两比较,突出工程实践意义与决策偏好,便于处理定性指标,但存在一定主观性(Saaty, 1987).综合适宜性指数按加权叠加获取后,采用自然断点法划分出五级,生成综合分区图,用于候选区对比与优先序列判定.两种赋权结果可相互对照与交叉验证,从而兼顾客观差异与工程经验,提高分区结论的稳健性.

2.3.1　安全适宜性分区　首先,定量评估地震危险性、峰值径流强度、地质灾害易发性,并加权叠加构建表征场地安全性的相对指数.该指数为负向指标,数值越大,表明外界不利因素越显著,渣体失稳概率越高,场地安全性越差,场址越不适宜.按前文界定,场址类型本质上刻画了地形与水文背景的差异,因而对上述三类因子的敏感性存在显著差异.Ⅰ型场址通常为宽缓平地或河(沟)两侧较高台地,平缓开阔且远离水系,对三个因子整体敏感性低,场地安全性较高.Ⅱ型场址通常为缓坡地或河(沟)两侧较高台地,受坡度与一定汇水条件叠加影响,对降水径流与地震的敏感性升高.Ⅲ型场址通常为河(沟)两岸较低阶地/河滩地,位于汛期洪水淹没范围内,邻近常时径流带,对降水径流敏感性进一步升高.Ⅳ型场址通常为河网等级相对较低的支流(沟)的常时径流通道,受洪水淹没影响,对降水径流敏感性最高.据此,构建针对不同场址渣体稳定性的多元评估指标敏感性分级体系(表4).

在此基础上,采用层次分析法对三因子权重进行求解.针对每一类场址,按表中敏感性评分构建两两比较判别矩阵,求解最大特征值及其特征向量,并归一化获得权重,同时进行一致性检验,权重结果见表5.从权重结果可知,受特定地形与水文条件影响,降水径流对Ⅲ、Ⅳ型场址的影响权重显著高于其他因子;而Ⅰ、Ⅱ型场址基本不受常时径流

表4 各指标对不同场址类型渣体稳定性的敏感性等级

Table 4 Sensitivity levels of indicators affecting spoil disposal stability by site type

场址类型	降水径流	地质灾害	地震
Ⅰ型场址	1	1	1
Ⅱ型场址	2	2	2
Ⅲ型场址	3	2	1
Ⅳ型场址	3	1	2

注:1为低;2为中;3为高.

表5 各评估指标权重计算结果

Table 5 Results of weight calculation for evaluation indicators

场址类型	峰值径流强度 W_1	地质灾害易发性 W_2	地震危险性 W_3
Ⅰ型场址	0.32	0.41	0.27
Ⅱ型场址	0.37	0.47	0.16
Ⅲ型场址	0.47	0.40	0.13
Ⅳ型场址	0.50	0.21	0.29

约束,地质灾害对其稳定性发挥主导作用,权重更高.按所求权重对地震危险性、峰值径流强度、地质灾害易发性进行加权,即可得到各区域场址的安全适宜性指数,用于后续分区与比选.

然后,综合考虑场址区周边承灾体(建筑物、道路、水体、耕地)的空间分布格局及其与场址的空间位置关系,量化承灾体的潜在受损程度.选取人口、建筑、道路、耕地、水体、GDP共6项指标,结合层次分析法和模糊综合评价法,建立承灾体易损性评价指标体系与模型,得到空间连续的易损性栅格.承灾体易损性越高,潜在损失越大;场址距承灾体越近,失稳后次生灾害影响越大,安全风险越高.然而,在复杂地形条件下,仅以欧式距离度量场址与承灾体关系易产生偏差.若承灾体位于上游或与场址之间有山脊阻隔,即便直线距离很近,实际影响也有限.为此,借鉴GIS空间分析中路径距离的计算方法(Douglas, 1994),引入受地形约束的传播路径,以便准确刻画"弃渣场失稳→次生灾害传播→承灾体受损"的可达性与作用强度.弃渣场失稳后,次生灾害由场址传至承灾体的难易主要受距离与地形共同控制.为表征地形效应,引入水平修正系数(HF,度量灾害传播方向与坡向夹角的影响)与垂直修正系数(VF,度量上/下坡条件对传播的阻/助作用),构建基于承灾体易损性的安全适宜性评估公式:

$$D=\sum_{i=1}^{n} SC_i \times SD_i \times HF_i \times VF_i, \quad (1)$$

其中,D为基于承灾体易损性的安全适宜性指数(正向指标,值越大表示场址距承灾体越远或承灾体易损性越低,安全适宜性越高,后续风险计算时需反向转换为负向指标以统一方向);SC_i为承灾体易损性值(已进行反向处理,即$SC_i=1-V_i$,其中V_i为归一化后的原始易损性值);SD_i为承灾体与场址间实际水平距离;HF_i为水平修正系数;VF_i为垂直修正系数.

最后,基于风险理论将场地安全性与承灾体易损性进行耦合,使综合指标能够同时反映不同场址堆渣形成次生灾害的发生概率与损失后果(图5),其定量表达式为:

$$R=P(H)\times P(S/H)\times P(T/S)\times P(L/T)\times C, \quad (2)$$

其中,R为灾害风险值(负向指标,值越大表示安全风险越高、安全适宜性越低);$P(H)$为弃渣场在给定重现期内以某规模失稳的概率;$P(S/H)$为弃渣场形成次生灾害以某一运动强度到达某位置的概率;$P(T/S)$为承灾体出现在该位置的概率;$P(L/T)$为承灾体损坏或人员伤亡的概率,即易损性;C为承灾体的价值或人口数量.$P(H)$对应基于场地安全性的安全适宜性评估结果,$P(S/H)\times P(T/S)\times P(L/T)\times C$对应经反向转换后基于承灾体易损性的安全适宜性评估结果.

2.3.2 经济适宜性分区 本研究基于最小累积阻力模型,采用ArcGIS中的路径距离算法,计算场址与出渣点之间的最优运输路径及其对应的最小累积成本.运输距离通过DEM来提取运渣过程中产生的真实表面距离.运输条件则主要考虑两方面:其一是既有道路的通达性及便道修建的成本,该部分可通过不同地表覆盖类型建立成本栅格来反映;其二是运渣时上坡和下坡的耗费差异,这可以通过引入水平系数和垂直系数来实现.综上所述,运输成本累积计算公式为:

$$S_{\min}=\sum_{i=1}^{n} SD_i \times PC_i \times HF_i \times VF_i, \quad (3)$$

其中,$S_{\min}$为点源到研究区域内任意一点的最小累积成本(负向指标,值越大表示成本越高,越不适宜);SD_i为两个栅格像元之间的实际表面距离,可基于DEM计算得到;PC_i为经过栅格单元时弃渣移动单位距离所带来的成本值;HF_i为像元移动方向与像元坡向之间的水平相对移动角度HRMA所带来的水平修正系数;VF_i为起始像元与目标像元中心之间垂直相对移动角度VRMA所带来的垂直修正系数.

此外,还需要确定在不同地表类型单元开展运

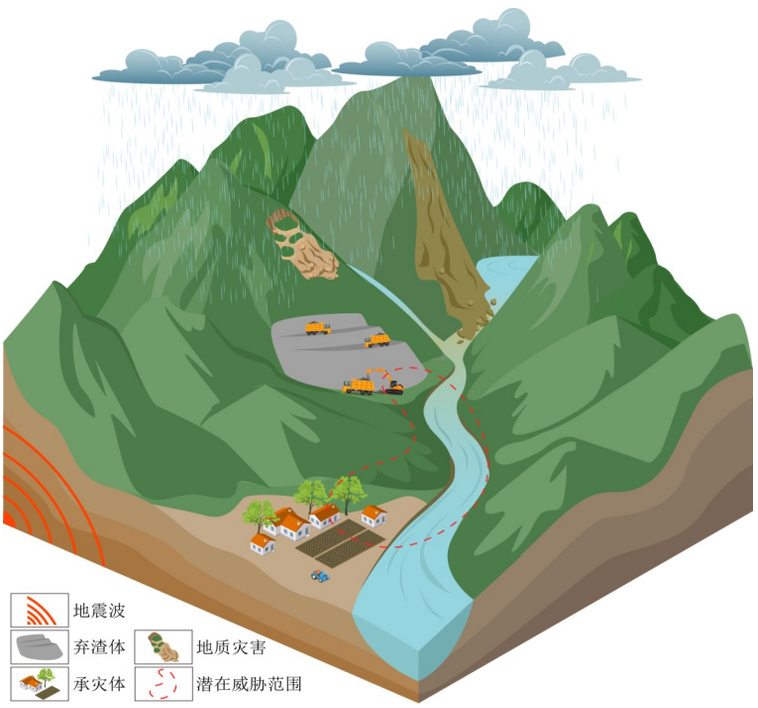

图 5　基于风险理论的弃渣场安全适宜性评估概念图

Fig.5　Conceptual diagram of risk-based safety suitability assessment for spoil disposal sites

输作业时,产生的运输成本差异.在无既有道路或者既有道路通达性较差的地区,需额外投入经费用于修建运渣临时便道,而在草地、树林等不同覆盖类型地表上修建临时便道的费用有所差异,因此通过层次分析法(AHP)计算各地表覆盖类型的运输成本权重,赋予栅格单元不同运输成本值,以反映在不同地表覆盖类型栅格单元弃渣移动单位距离所产生的运输成本.

2.3.3　生态适宜性分区　生态适宜性以生态系统脆弱性来进行表征,其指生态系统在内外部压力作用下易受不利影响的内在属性,与其格局、质量与功能密切相关.本文综合多源生态信息,从生态系统格局、质量与功能三个维度对脆弱性进行度量.其中,生态系统质量体现生态系统正常运转的基础状态,受植被条件与人类活动等生态地理因子的共同影响;生态系统格局与功能主要体现在景观尺度,可通过景观格局指数与生态系统服务功能指标加以刻画.最终构建了包含生态用地面积比指数、植被覆盖度、土壤保持等在内的评估指标体系.各指标含义与计算方法见表 6.一般而言,生境条件越优越,生态系统结构与功能越完善,其稳定性和抗扰动能力越强,生态脆弱性越低,场址生态适宜性越高.为定量刻画场址生态适宜性,构建了生态系统脆弱性指数(EVI),其计算公式为:

$$EVI = EPI \times w_{EPI} + ESI \times w_{ESI} + EFI \times w_{EFI}, \quad (4)$$

其中,EVI为生态系统脆弱性指数(负向指标,值越大表示生态系统越脆弱,越不适宜);EPI、ESI和EFI分别为生态系统格局指数、质量指数和功能指数(各维度指标归一化后取平均);w_{EPI}、w_{EPI}和w_{EPI}为相应权重,采用熵权法依据指标值离散度客观确定.

3　案例分析

3.1　研究区概况

选取康定折多山地区作为多因素耦合层次递阶区域选址方法的应用研究区.区内某交通工程正在实施两座隧道,共布设 12 个出渣点,包括隧道进出口、支洞、斜井等(图 6).各出渣点海拔与出渣量差异显著(表 7).

研究区位于四川盆地西部向青藏高原的过渡带,地势自东向西急剧抬升.折多山以东为高山峡谷地貌,海拔在 1 300～5 900 m,地形陡峻.折多山以西为丘状高原地貌,海拔约 3 400～5 200 m,起伏度相对较小.区内气候属高原温带半湿润-湿润型,冬季晴朗干冷,夏季温暖湿润,降雨季节性集中.折多山以东干湿季分明,夏季降雨丰沛、径流冲刷强烈.折多山以西海拔较高,积雪覆盖季节性显著,部分海拔超过 4 800 m 的山顶常年积雪,整体呈现暴雨-

表 6 生态适宜性评估指标体系

Table 6 Indicator system for ecological suitability assessment

评估维度	评估指标	指标含义	计算方法
生态系统格局	生态用地面积比指数	林地、草地、湿地、农田等生态用地的面积占比	生态用地分类统计
	区域状况质量指数	不同生态系统类型所体现的综合质量差异	林地、草地、湿地等质量指数加权计算
	重要生态空间连通度指数	重要生态空间斑块之间的整体连通程度	依据斑块面积与间距，计算连通性指数（McGarigal, 2015）
生态系统质量	植被覆盖度	地表被植被覆盖的程度	基于NDVI的像元二分模型反演（Gutman and Ignatov, 1998）
	叶面积指数	单位地表的叶面积倍数	MODIS成品数据（Running *et al.*, 2004）
	净初级生产力	单位时间固定的净能量	
生态系统功能	水源涵养	对降水的截留、渗透、蓄积与蒸散调控能力	InVEST产水、泥沙输移、生境质量模块（Sharp *et al.*, 2020）
	土壤保持	防止土壤流失与泥沙固存能力	
	生物多样性	维持物种生存与繁衍的能力	

表 7 研究区出渣点特征

Table 7 Characteristics of spoil discharge points in the study area

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
渣量（万方）	30.13	30.12	30.11	30.1	30.05	30.03	53	57.7	99.5	80.3	90.1	116.6
海拔（m）	2 679	2 671	2 684	2 531	2 899	3 027	3 150	3 206	3 243	3 812	3 780	3 691

融雪并存的多样产流过程（图 7a）. 大渡河自北向西穿行其间，主要支流折多河发源于折多山，南北向贯穿康定主城区，干流长约 33 km（图 7c）. 高速、国道、省道等多等级道路纵横交错，承灾体类型丰富. 区内发育多条次级剪切断裂，构造格局复杂，地震活动频繁且强烈，属于高烈度区（图 7b）. 综合 DInSAR 形变分析、遥感目视解译与现场复核，共识别出地质灾害点 254 处，包括滑坡 45 处，崩塌 125 处，泥石流 84 处（图 7d）. 生态方面，区内分布有高寒草甸与亚高山冷湿森林等植被类型，生态系统服务功能空间差异显著，涉及大雪山生物多样性保护-水土保持生态保护红线，属于四川贡嘎山国家自然保护区.

3.2 选址范围拟定

以 12 个出渣点为圆心，15 km 为半径构建初选水平范围（图 6）. 考虑地形地貌与流域分界对运输与施工组织的实际约束，采用 GIS 进行水文分析，并根据分水岭对上述范围进行修正，拟定考虑水系分割的水平选址范围，总面积 1 916.67 km^2. 垂直方向以出渣点为基准按相对位差分为过低海拔区（＜－400 m）、适宜海拔区（－400～400 m）与过高海拔区（＞400 m）. 将－400～400 m 作为垂直距离约束，超出±400 m 的区域视为经济不合理区并予以剔除. 最终叠加水平与垂直距离约束，得到拟定选址范围，面积为 813.02 km^2（图 8）.

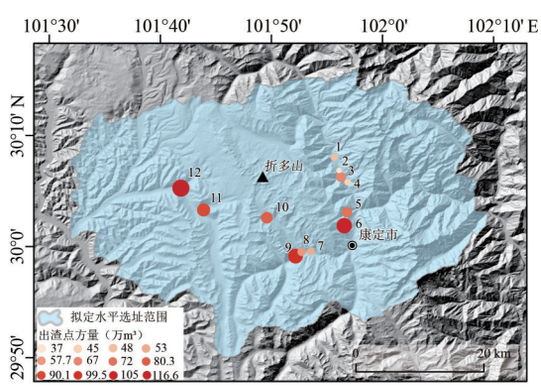

图 6 研究区出渣点分布与基于水平约束的选址范围

Fig.6 Distribution of slag discharge points and the siting range based on horizontal constraints

根据场址定义、提取特征以及优先级，剔除不符合判定条件的区域（坡度大于 25°以及三级以上的河道），分类提取场址共 406.25 km^2（图 9a）. 结果显示，研究区以Ⅱ型场址为主，主要分布于西部高原丘陵区. Ⅰ型场址多位于沟（河）道两侧的平坦地带. Ⅲ型场址分布在各沟（河）道两侧. Ⅳ型对应三级及以下河（沟）道的常时径流通道. 在此基础上，按照

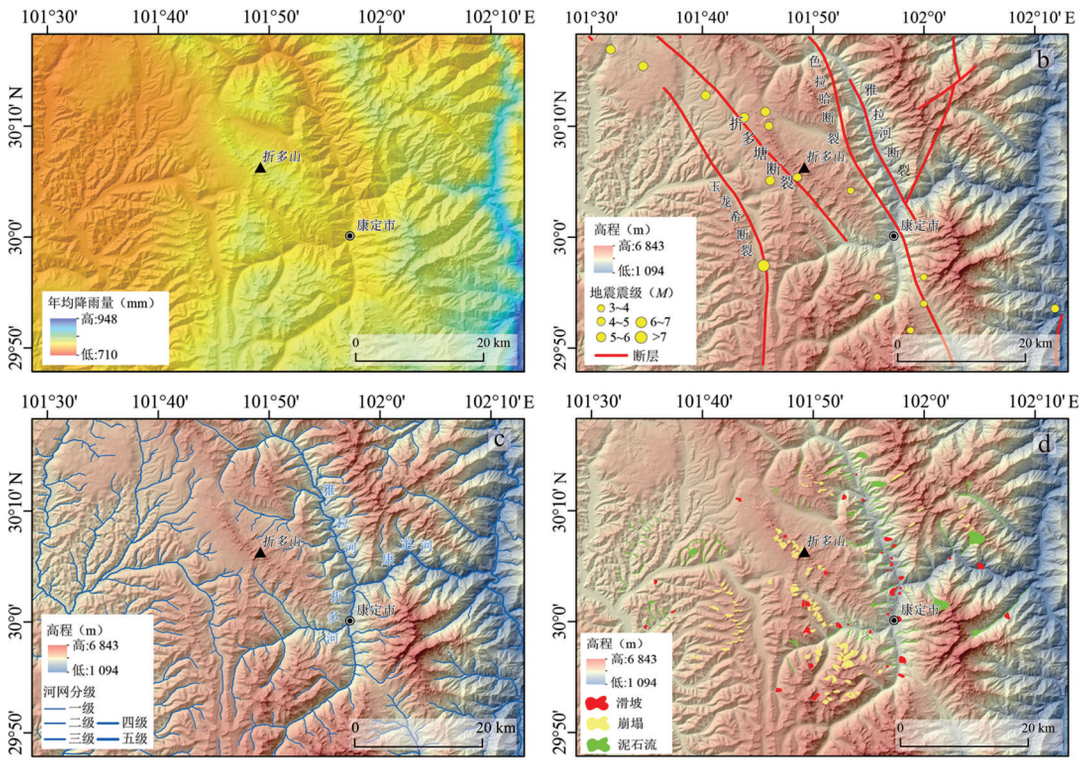

图 7　研究区背景特征

Fig.7　Background of the study area

a. 年均降雨量;b. 断层及历史地震;c. 河流水系;d. 地质灾害

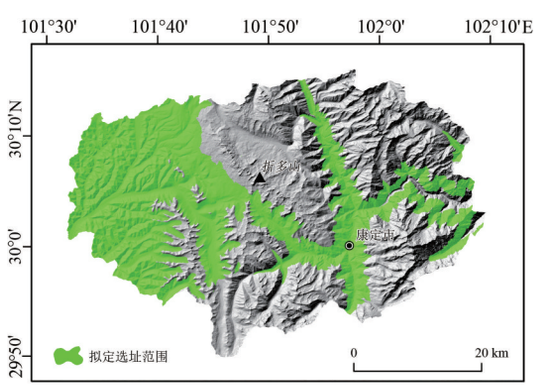

图 8　综合水平与垂直约束拟定的选址范围

Fig.8　The siting range based on comprehensive horizontal and vertical constraints

表 3 所列剔除范围,进一步从合规性与工程可实施性两个方面进行筛选,对涉及法定管控区域以及不满足环保与安全管理要求的场址予以剔除,最终圈定可用场址范围,总面积 281 km^2,占拟定选址范围的 34.56%(图 9b),其中仍以Ⅱ型场址为主(表 8).

3.3　适宜性分区

3.3.1　安全适宜性分区　首先对研究区地震危险性、峰值径流强度、地质灾害易发性进行计算,并开展共线性诊断.相关系数最高的是地震危险性与地质灾害易发性,但仍仅为 0.409 2(<0.5,属弱相关),表明三者之间不存在显著共线性,均可并行纳入模型.随后对三项指标进行线性归一化并按前述权重加权叠加,得到基于场地安全性的安全适宜性指数,再采用自然断点法将其划分为五个等级(图 10a).在获取研究区人口、建筑、道路、耕地、水体、GDP 等承灾要素后,按构建的“距离-地形-易损性”耦合模型计算基于承灾体易损性的安全适宜性指数,并采用自然断点法划分为五个等级(图 10b).将两类安全适宜性指数逐像元相乘,得到综合安全适宜性评估结果,并以自然断点法分级(图 10c),同时反映不同场址堆渣形成次生灾害的发生概率与损失后果.该综合安全适宜性指数反映了不同场址堆渣形成次生灾害的发生概率与损失后果,叠加后评价更趋保守,从源头上提高了弃渣场安全准入门槛(表 9).

3.3.2　经济适宜性分区　依据运输成本累积计算模型,计算可选范围内运输累积成本,采用自然断点法将经济适宜性划分为五个等级(图 11).结果表明:距出渣点越近,运输累积成本越低,经济适宜性越高.由于模型已纳入既有道路通达性,因而沿(或邻近)既有道路呈现带状低成本走廊、成本增长更

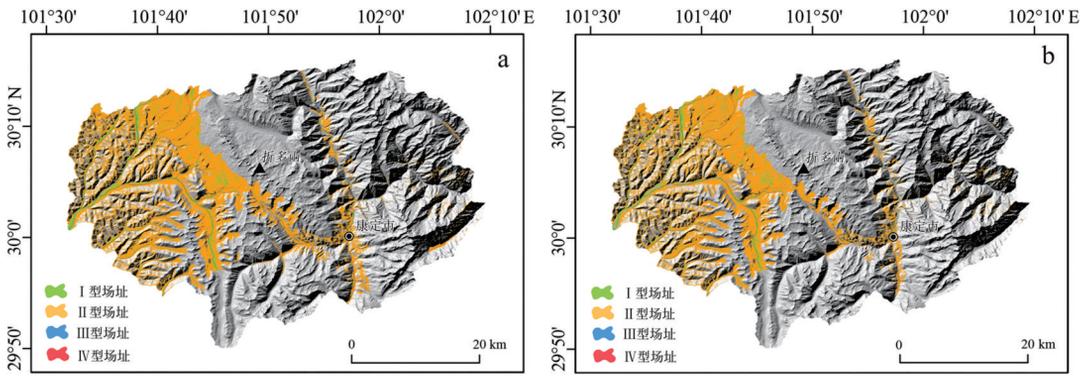

图 9 研究区弃渣场场址类型分布图

Fig.9 Spatial distribution of spoil-disposal site types in the study area

a. 场址类型提取;b. 场址逐步剔除

表 8 研究区弃渣场场址类型提取与剔除统计

Table 8 Extraction and exclusion statistics for spoil-disposal site types in the study area

场址类型	Ⅰ型场址		Ⅱ型场址		Ⅲ型场址		Ⅳ型场址	
场址筛选阶段	类型提取	逐步剔除	类型提取	逐步剔除	类型提取	逐步剔除	类型提取	逐步剔除
面积(km^2)	19.25	12.66	373.31	259.28	9.87	6.52	3.83	2.54
占比(%)	4.74	4.51	91.89	92.27	2.43	2.32	0.94	0.90

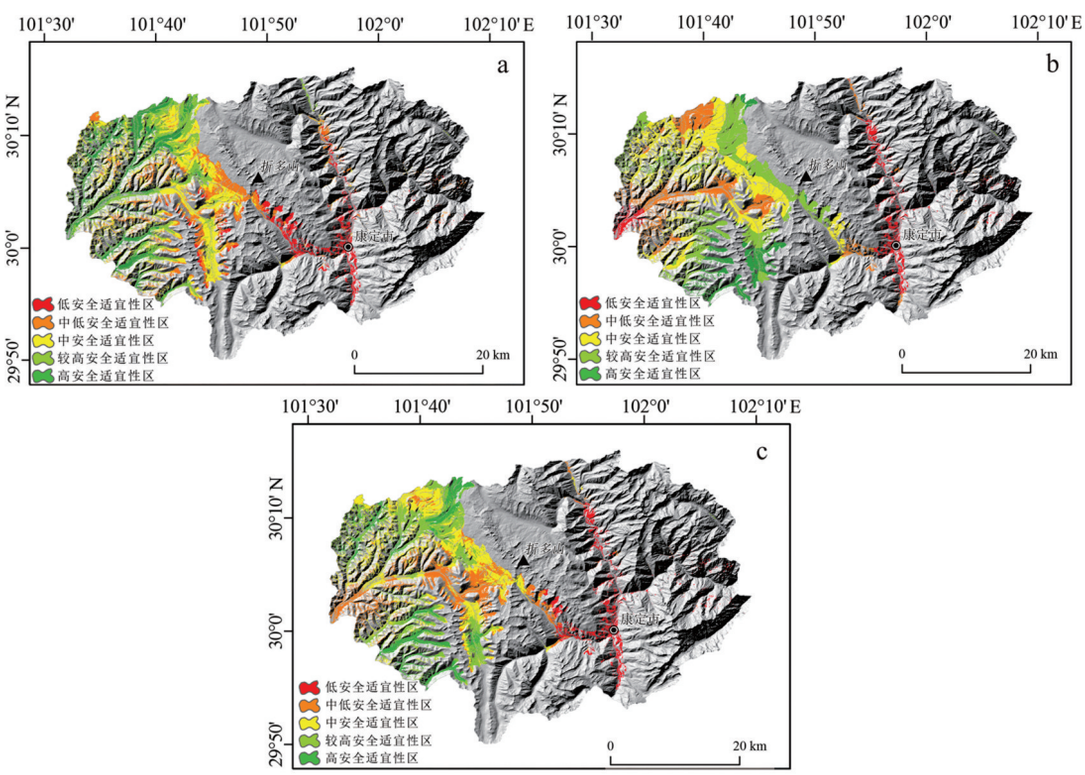

图 10 场址安全适宜性分区

Fig.10 Site safety suitability zoning map

a. 基于场地安全性;b. 基于承灾体易损性;c. 基于风险理论

为缓慢.高经济适宜性区面积 64.61 km^2,占比 22.99%;较高经济适宜性区面积 88.50 km^2,占比 31.49%;中经济适宜性区面积 81.84 km^2,占比 29.12%;较低经济适宜性区面积 44.11 km^2,占比

表 9　场址安全适宜性统计对比

Table 9　Comparative statistics of site safety suitability

适宜性等级	基于场地安全性		基于承灾体易损性		基于风险理论	
	面积(km²)	占比(%)	面积(km²)	占比(%)	面积(km²)	占比(%)
高安全适宜区	44.60	15.87	30.88	10.99	39.42	14.03
较高安全适宜区	65.43	23.29	82.08	29.21	73.42	26.13
中安全适宜区	88.48	31.49	94.59	33.66	86.36	30.73
中低安全适宜区	60.03	21.36	51.65	18.38	58.58	20.85
低安全适宜区	22.46	7.99	21.80	7.76	23.22	8.26

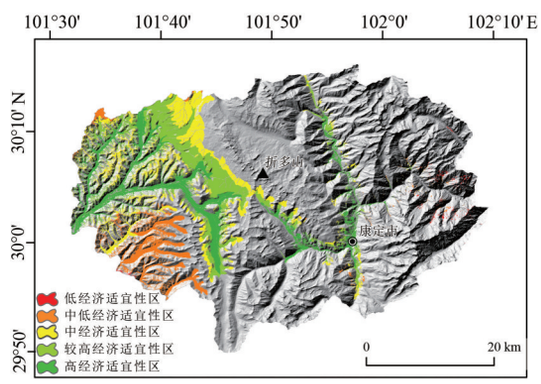

图 11　场址经济适宜性分区

Fig.11　Site economic suitability zoning map

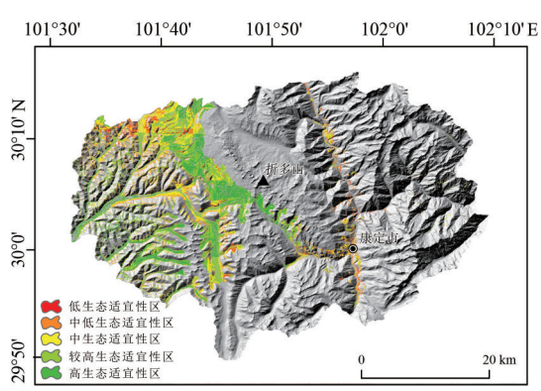

图 12　场址生态适宜性分区

Fig.12　Site ecological suitability zoning map

15.70%;低经济适宜性区面积 1.94 km²,占比 0.69%.

3.3.3　生态适宜性分区　从生态系统格局、质量与功能三个维度对场址脆弱性进行度量,开展生态适宜性评价,并采用自然断点法对结果进行分区(图 12). 其中高生态适宜性区面积 70.38 km²,占比 25.05%;较高生态适宜性区面积 89.36 km²,占比 31.80%;中生态适宜性区面积 73.88 km²,占比 26.29%;较低生态适宜性区面积 41 km²,占比 14.59%;低生态适宜性区面积 6.38 km²,占比 2.37%.

3.3.4　综合适宜性分区　熵权法基于指标数据的离散程度(信息熵)客观确定权重,计算得到安全、经济、生态的权重分别为 0.51、0.32 和 0.17. 按此权重赋权叠加后,采用自然断点法划分为五个等级(图 13a). 其中,高适宜性区面积 43.84 km²,占比 15.6%;较高适宜性区面积 85.99 km²,占比 30.6%;中适宜性区面积 90.40 km²,占比 32.17%;较低适宜性区面积 42.43 km²,占比 15.1%;低适宜性区面积 18.35 km²,占比 6.53%.

AHP 通过构造判断矩阵并基于专家两两比较确定安全、生态、经济权重分别为 0.41、0.33、0.26. 加权叠加后采用自然断点法划分为五个等级(图 13b). 其中,高适宜性区面积 45.13 km²,占比 16.05%;较高适宜性区面积 90.82 km²,占比 32.32%;中适宜性区面积 85.48 km²,占比 30.41%;较低适宜性区面积 43.51 km²,占比 15.48%;低适宜性区面积 16.15 km²,占比 5.74%.

两种方法的分区结果总体具有较好一致性(图 13). 熵权法赋予安全适宜性更高权重(0.51),反映了安全因素数据的高变异性;AHP 则将安全适宜性权重降低为 0.41,生态适宜性权重提高至 0.33,体现了专家对生态保护的重视. 将二者结合可兼顾客观性与工程实践,为决策提供更全面的参考.

3.3.5　分区结果可靠性验证　在评估区随机选取 9 个验证点(图 13,表 10). 熵权法和层次分析法在 1、2、3、4、5、7、9 号点的综合分区判定结果完全一致. 仅有 6 号和 8 号两个点存在差异,其中 6 号点熵权法评估为“中适宜”(指数 0.55),层次分析法为“较高适宜”(指数 0.58);8 号点熵权法评估为“较高适宜”(指数 0.65),层次分析法为“高适宜”(指数 0.69). 两个差异点均仅相差一个等级且评估指数差距很小(<0.05). 总体来看,结果一致性良好,评价具有可靠性.

1~5 号点沿雅拉河分布,受洪水影响显著,安全适宜性较低,且越往下游适宜性越差(图 10a),与下游水量更大、洪水风险更高的实际情况相符. 6 号

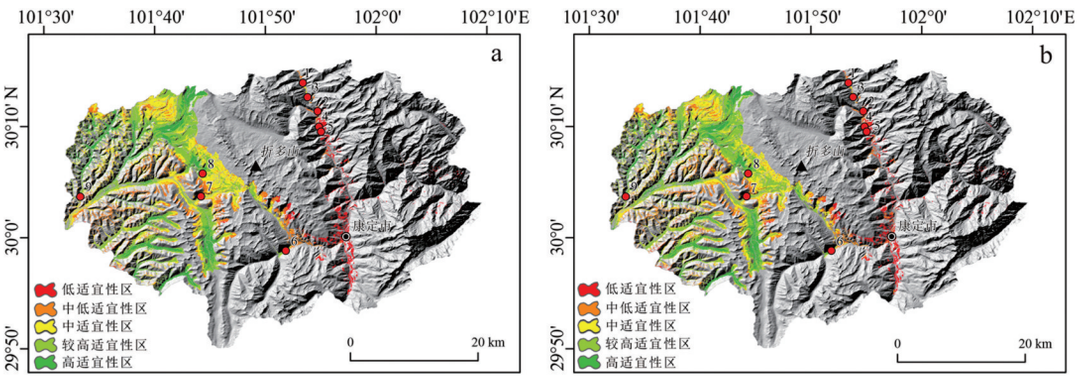

图 13 场址综合适宜性分区

Fig.13 Site comprehensive suitability zoning map

a. 熵权法;b. 层次分析法

表 10 研究区场址综合适宜性抽样统计

Table 10 Sampling statistics of comprehensive site suitability in the study area

点位	熵权法		层次分析法	
	评估指数	分区结果	评估指数	分区结果
1	0.39	较低适宜性	0.38	较低适宜性
2	0.41	较低适宜性	0.44	较低适宜性
3	0.42	较低适宜性	0.45	较低适宜性
4	0.54	中适宜性	0.56	中适宜性
5	0.51	中适宜性	0.55	中适宜性
6	0.55	中适宜性	0.58	较高适宜性
7	0.58	较高适宜性	0.62	较高适宜性
8	0.65	较高适宜性	0.69	高适宜性
9	0.6	较高适宜性	0.66	较高适宜性

点临近 7、8、9 号出渣点(图 6),上游汇水面积超过 100 km^2且水系发育(图 7c),沟内地质灾害较多(图 7d),且位于贡嘎山国家级自然保护区;评估结果为高经济适宜性(图 11)、较低安全适宜性(图 10a)、中生态适宜性(图 12),与实际情况相符.7 号点毗邻 10 号出渣点(图 6),区内地质灾害不发育(图 7d),地形平缓且水系缺乏(图 7c),并无环境敏感区分布;评估结果为高经济适宜性(图 11)、较高安全适宜性(图 10a)、高生态适宜性(图 12),与实际情况也高度吻合.

4 结论

针对西部山区大型交通工程出渣量大、分布分散、弃渣场选址难等问题,在系统梳理选址痛点、全面筛选关键影响因素的基础上,提出了多因素耦合层次递阶区域选址方法,从安全、工程、生态三个维度开展适宜性评估分区,实现“安全稳定、经济合理、生态适宜”的统筹优化.主要结论如下:

(1)以安全稳定性、工程可行性、生态适宜性为核心,按“范围拟定-场址筛选-评估分区”三阶段层次递阶推进,构建了多因素耦合层次递阶区域选址方法,显著提升了复杂地质、高陡地形、敏感生态等因素约束下的弃渣场选址科学性与效率,从源头降低弃渣场安全风险、处置成本与生态恢复难度.

(2)在既有弃渣场类型划分框架下,提出了Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四类场址类型及其与下伏场址的组合关系.场址提取以坡度和与洪水相对位置关系作为主控因素,遵循“先洪水、后坡度”的原则,先识别提取Ⅲ、Ⅳ型场址,再按坡度阈值识别提取Ⅰ、Ⅱ型场址.

(3)以地震危险性、峰值径流强度、地质灾害易发性三个指标的作用强度及组合权重定量表征场地安全性;结合承灾体与场址空间位置关系量化潜在受损程度,并基于风险理论耦合两者,综合反映不同场址堆渣形成次生灾害的发生概率与损失后果.

(4)以运输成本为核心,综合运输距离与运输条件建立经济适宜性评估模型;以生态系统脆弱性为表征,从生态系统格局、质量与服务功能三个维度建立生态适宜性评估模型.

References

Beroya-Eitner, M. A., 2016. Ecological Vulnerability Indicators. *Ecological Indicators*, 60: 329−334. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.001

Chang, M., Liu, Y., Zhou, C., et al., 2020. Hazard Assessment of a Catastrophic Mine Waste Debris Flow of Hou Gully, Shimian, China. *Engineering Geology*, 275: 105733. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105733

Chang, Z. L., Huang, F. M., Jiang, S. H., et al., 2023.

Slope Unit Extraction and Landslide Susceptibility Prediction Using Multi-Scale Segmentation Method. *Advanced Engineering Sciences*, 55(1): 184－195 (in Chinese with English abstract).

Douglas, D. H., 1994. Least-Cost Path in GIS Using an Accumulated Cost Surface and Slopelines. *Cartographica*, 31(3): 37－51. https://doi.org/10.3138/d327-0323-2jut-016m

Gonzalez, P., Neilson, R. P., Lenihan, J. M., et al., 2010. Global Patterns in the Vulnerability of Ecosystems to Vegetation Shifts Due to Climate Change. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6): 755－768. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x

Gutman, G., Ignatov, A., 1998. The Derivation of the Green Vegetation Fraction from NOAA/AVHRR Data for Use in Numerical Weather Prediction Models. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8): 1533－1543. https://doi.org/10.1080/014311698215333

Hakimi, S. L., 1964. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*, 12(3): 450－459. https://doi.org/10.1287/opre.12.3.450

Han, Y. S., Sun, X. Y., Liu, T., et al., 2021. Susceptibility Evaluation of Geological Hazards Based on Evidence Weight-Projection Pursuit Model in Southeast Tibet, China. *Mountain Research*, 39(5): 672－686 (in Chinese with English abstract).

He, Y., Shu, F. M., Zheng, H. W., 2021. Site Selection Method of Airport Location Based on GIS Multi-Factor Weighted Superposition. *Journal of Civil Aviation University of China*, 39(4): 42－47 (in Chinese with English abstract).

Huang, W., Cui, S. H., Lü, J., et al., 2026. Vibration Response and Instability Mechanism of Excavation Waste Dumps: Large Shaking Table Test and Numerical Simulations. *Journal of Chengdu University of Technology* (*Science & Technology Edition*), 53(1): 34－50 (in Chinese with English abstract).

Huck, M., Jędrzejewski, W., Borowik, T., et al., 2011. Analyses of Least Cost Paths for Determining Effects of Habitat Types on Landscape Permeability: Wolves in Poland. *Acta Theriologica*, 56(1): 91－101. https://doi.org/10.1007/s13364-010-0006-9

Jia, Z., Cheng, Z. J., Chang, Z. L., et al., 2025. Modeling and Uncertainty in Landslide Susceptibility Prediction Considering Coupling Mode of Landslide Types. *Earth Science*, 50(6): 2311－2329 (in Chinese with English abstract).

Kabir, G., Sumi, R. S., 2014. Power Substation Location Selection Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and PROMETHEE: A Case Study from Bangladesh. *Energy*, 72: 717－730. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.098

Kuehn, A. A., Hamburger, M. J., 1963. A Heuristic Program for Locating Warehouses. *Management Science*, 9(4): 643－666. https://doi.org/10.1287/mnsc.9.4.643

Li, Z. H., Su, X. Y., Tian, T., et al., 2024. Ecological Vulnerability Analysis of Alpine Meadow Area Based on Pattern-Quality-Function Ratio: Take Diqing in Yunnan as an Example. *China Environmental Science*, 44(4): 2273－2285 (in Chinese with English abstract).

Lian, X. H., Qi, Y., Wang, H. W., et al., 2019. Spatial Pattern of Ecosystem Services under the Influence of Human Activities in Qinghai Lake Watershed. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41(5): 1254－1263 (in Chinese with English abstract).

Liang, Z. C., Zhao, Y. L., Fu, Y. C., 2017. Optimization of Spatial Pattern of Urban Imperviousness Based on the Integration of SCS-CN Hydrological Model and the Ant Colony Algorithm. *Journal of Geo-Information Science*, 19(10): 1315－1326 (in Chinese with English abstract).

Liu, F., Tang, H. M., 2010. Formation Mechanism of Construction Spoil Debris Flow in Chongqing Reservoir. *Journal of Chongqing Jiaotong University* (*Natural Sciences*), 29(4): 620－623, 640 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. D., Huang, H. L., Sun, J. W., et al., 2023. Analysis of the Formation Conditions of Slag Debris Flow and the Study of Its Main Provenance Characteristics: Taking Kangshan Gold Mine in Luanchuan County as an Example. *China Mining Magazine*, 32(7): 72－78 (in Chinese with English abstract).

Ma, J., Zhang, H. S., 2021. Studies on the Site Selection of Waste Soil in Mountainous City Based on GIS Spatial Analysis. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (S2): 214－217 (in Chinese with English abstract).

McGarigal, K., 2015. FRAGSTATS Help. University of Massachusetts, Amherst.

Meresa, H., 2019. Modelling of River Flow in Ungauged Catchment Using Remote Sensing Data: Application of the Empirical (SCS-CN), Artificial Neural Network (ANN) and Hydrological Model (HEC-HMS). *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(1): 257－273. https://doi.org/10.1007/s40808-018-0532-z

Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., et al., 2004. A Continuous Satellite-Derived Measure of Glob-

al Terrestrial Primary Production. *BioScience*, 54(6): 547. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:acsmog]2.0.co;2

Saaty, R. W., 1987. The Analytic Hierarchy Process-What It Is and how It Is Used. *Mathematical Modelling*, 9(3—5): 161—176. https://doi. org/10.1016/0270 - 0255(87)90473-8

Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., et al., 2020. InVEST 3.8.7. User's Guide. The Natural Capital Project, Standford University, University of Minnesota, The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. https://storage.googleapis. com/releases. naturalcapitalproject. org/invest - userguide/latest/index.html

Tokgöz, N., 2013. Use of TBM Excavated Materials as Rock Filling Material in an Abandoned Quarry Pit Designed for Water Storage. *Engineering Geology*, 153: 152—162. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2012.11.007

Tugba, B. T., Tas, G., Herekoglu, A., et al., 2011. A Fuzzy AHP Based Decision Support System for Disaster Center Location Selection and A Case Study for Istanbul. *Disaster Prevention and Management*, 20(5): 499—520. https://doi.org/10.1108/09653561111178943

Wang, J. Y., 2022. Study on Site Selection Optimization of Construction Waste Landfill Based on GIS (Dissertation). Yangzhou University, Yangzhou (in Chinese with English abstract).

Weber, A., 1929. Theory of the Location of Industries. University of Chicago Press, Chicago.

Wu, R. Z., Hu, X. D., Mei, H. B., et al., 2021. Spatial Susceptibility Assessment of Landslides Based on Random Forest: A Case Study from Hubei Section in the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, (1): 321—330 (in Chinese with English abstract).

Xiao, W., Tian, W. P., 2024. Remote Sensing Identification and Hazard Assessment Methods for Spoil Sites. *Scientific Reports*, 14: 22121. https://doi. org/10.1038/s41598-024-72942-7

Yin, Q. H., 2022. Study on the Ecological Environment Impact Assessment of Railway Engineering Slag Dump Based on the PSR Model (Dissertation). Central South University, Changsha (in Chinese with English abstract).

Yuan, P. J., Yao, H., Zhang, Y., et al., 2018. Investigation of Site Selection for Slag Abandonment Yard of Production and Construction Projects. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(6): 132—137, 143 (in Chinese with English abstract).

Zeng, T. R., Yin, K. L., Gui, L., et al., 2023. Quantitative Vulnerability Analysis of Buildings Based on Landslide Intensity Prediction. *Earth Science*, 48(5): 1807—1824 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. W., 2010. Study on Site Selection of Treatment Plant of Kitchen Waste in Chengdu (Dissertation). Southwest Jiaotong University, Chengdu (in Chinese with English abstract).

Zhang, S., Han, L. H., 2023. Research on Cause Analysis and Prevention Countermeasures of Abandoned Dreg Field Change of Railway Construction Projects. *Railway Standard Design*, 67(4): 175—179 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. Z., Mao, W. W., Huang, Y., et al., 2025. Refined Seismic Hazard Assessment of Fault Intersection Zones in Sichuan-Yunnan Region Based on OpenQuake. *Earth Science*, 50(10): 3997—4008 (in Chinese with English abstract).

Zhong, X. R., 2024. Study on Sudden Departure Mechanism of Low - Potential Energy Landslides on Account of Massing Energy by Spoon - Shape Terrain: Taking the Landslide of Hong'ao Village Construction Solid Waste Landfill in Guangming New District of Shenzhen, Guangdong, China as An Example. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 43(10): 2485—2496 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Q., Chen, K. Z., Xie, X., et al., 2019. Site Selection Method of Booster Substations by Integrating Fuzzy Analytic Hierarchy Process with 3D Geographic Information System. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(5): 980—988 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y. X., Tian, D. Z., Yan, F., 2020. Effectiveness of Entropy Weight Method in Decision-Making. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020: 3564835. https://doi.org/10.1155/2020/3564835

中文参考文献

常志璐, 黄发明, 蒋水华, 等, 2023. 基于多尺度分割方法的斜坡单元划分及滑坡易发性预测. 工程科学与技术, 55(1): 184—195.

韩用顺, 孙湘艳, 刘通, 等, 2021. 基于证据权-投影寻踪模型的藏东南地质灾害易发性评价. 山地学报, 39(5): 672—686.

何尧, 舒富民, 郑皓文, 2021. 基于GIS多因素加权叠加的机场选址方法. 中国民航大学学报, 39(4): 42—47.

黄维, 崔圣华, 吕建, 等, 2026. 弃渣场地震动响应及失稳机制: 大型振动台试验与数值模拟. 成都理工大学学报

(自然科学版), 53(1): 34－50.

贾卓, 程志金, 常志璐, 等, 2025. 考虑滑坡类型耦合方式的滑坡易发性预测建模与不确定性分析. 地球科学, 50(6): 2311－2329.

李子辉, 苏湘媛, 田甜, 等, 2024. 基于格局-质量-功能的高寒草甸区生态脆弱性分析: 以云南迪庆为例. 中国环境科学, 44(4): 2273－2285.

连喜红, 祁元, 王宏伟, 等, 2019. 人类活动影响下的青海湖流域生态系统服务空间格局. 冰川冻土, 41(5): 1254－1263.

梁志承, 赵耀龙, 付迎春, 2017. 耦合蚁群算法和SCS-CN水文模型的城市不透水面空间格局优化. 地球信息科学学报, 19(10): 1315－1326.

刘菲, 唐红梅, 2010. 重庆库区工程弃渣泥石流形成机理. 重庆交通大学学报(自然科学版), 29(4): 620－623, 640.

刘向东, 黄虹霖, 孙建伟, 等, 2023. 矿渣型泥石流形成条件分析及主要物源特征研究: 以栾川县康山金矿区为例. 中国矿业, 32(7): 72－78.

马锦, 张浩生, 2021. 基于GIS空间分析的山地城市弃土场选址研究. 测绘通报, (S2): 214－217.

王君燕, 2022. 基于GIS的建筑垃圾填埋场选址优化研究(硕士学位论文). 扬州: 扬州大学.

吴润泽, 胡旭东, 梅红波, 等, 2021. 基于随机森林的滑坡空间易发性评价: 以三峡库区湖北段为例. 地球科学, (1): 321－330.

殷泉花, 2022. 基于PSR模型的铁路工程弃渣场生态环境影响评价研究(硕士学位论文). 长沙: 中南大学.

袁普金, 姚赫, 张勇, 等, 2018. 生产建设项目弃渣场安全选址方案研究. 水土保持通报, 38(6): 132－137, 143.

曾韬睿, 殷坤龙, 桂蕾, 等, 2023. 基于滑坡致灾强度预测的建筑物易损性定量评价. 地球科学, 48(5): 1807－1824.

张浩文, 2010. 成都市餐厨垃圾处理厂厂址选择研究(硕士学位论文). 成都: 西南交通大学.

张帅, 韩立鹤, 2023. 铁路建设项目弃渣场变更原因分析及防治对策研究. 铁道标准设计, 67(4): 175－179.

张奕哲, 毛无卫, 黄雨, 等, 2025. 基于OpenQuake的川滇断层交汇带精细化地震危险性评估. 地球科学, 50(10): 3997－4008.

钟兴荣, 2024. 低势能滑坡束口聚能启程剧动机制研究——以深圳光明新区红坳建筑弃渣场滑坡为例. 岩石力学与工程学报, 43(10): 2485－2496.

朱庆, 陈凯峥, 谢潇, 等, 2019. 模糊层次分析与三维GIS集成的升压站选址方法. 西南交通大学学报, 54(5): 980－988.