https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.106

地质灾害生态化治理工程耐久性评估指标研究

吕雅兰[1],崔圣华[1,2*],裴向军[1,2],蒋卓君[1],杨人杰[1],张晓超[1],雷泞菲[1],李 琪[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. 天府永兴实验室,四川成都 610213

摘 要: 随着国家生态文明建设的深入推进,传统地质灾害治理工程侧重刚性防护,在生态保护与修复、生态环境质量提升、景观恢复方面的局限日益凸显,生态功能耐久性严重不足.本研究以减轻地质灾害风险、提升生态效益为核心目标,在地质灾害生态化治理规划设计及生态化治理技术有机配置分析基础上,阐明生态环境与治理工程之间的耦合关系.综合考量工程体耐久性、治理效果耐久性及景观恢复耐久性3个层面,筛选能够客观反映生态耐久性的具体指标.建立地质灾害生态化治理工程耐久性评估指标体系,并提出明确量化方法,评估指标体系包括7个一级指标,以及13类二级指标和17个三级指标.可推进地质灾害防治生态效益提升和推动生态减灾实践,为地质灾害生态化治理工程方案制定、效果评估提供科学参数和理论支撑.

关键词: 地质灾害;生态化治理技术;耐久性评估;压力-状态-响应模型;生态修复.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3422-11 **收稿日期:** 2025-04-26

Durability Evaluation Indicators for Ecological Remediation Engineering in Geological Hazard Governance

Lü Yalan[1], Cui Shenghua[1,2*], Pei Xiangjun[1,2], Jiang Zhuojun[1], Yang Renjie[1], Zhang Xiaochao[1], Lei Ningfei[1], Li Qi[1]

1. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu* 610213, *China*

Abstract: With further advancement of national ecological civilization construction, traditional geological hazard control projects focusing on rigid protection, have presented increasingly prominent limitations in ecological protection and restoration, ecological environment quality improvement, and landscape restoration. The ecological functionality and durability of such projects are severely inadequate. Taking geological hazard risk mitigation and ecological benefit enhancement as core objectives, this study elucidates the coupling relationship between the ecological environment and control projects, based on the analysis of planning and design for ecological geological hazard control and the organic configuration of ecological control technologies. By comprehensively evaluating three dimensions - structural durability, control effectiveness durability, and landscape restoration durability - the study identifies specific indicators that objectively reflect ecological durability and establishes an assessment index system for the durability of eco-friendly geological hazard control projects. The proposed system includes 7 primary indicators, 13 secondary indicators, and 17 tertiary indicators, along with a clear quantification methodology. This research can promote the improvement of ecological benefits

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007100).

作者简介: 吕雅兰(2001-),女,硕士研究生,主要从事生态修复评价工作. ORCID:0009-0000-8841-132X. E-mail:17398185268@163.com

* **通讯作者:** 崔圣华, ORCID:0000-0002-6638-230X. E-mail:cuishenghua18@cdut.edu.cn

引用格式: 吕雅兰,崔圣华,裴向军,蒋卓君,杨人杰,张晓超,雷泞菲,李琪,2026.地质灾害生态化治理工程耐久性评估指标研究.地球科学,51(9):3422-3432.

Citation: Lü Yalan, Cui Shenghua, Pei Xiangjun, Jiang Zhuojun, Yang Renjie, Zhang Xiaochao, Lei Ningfei, Li Qi, 2026. Durability Evaluation Indicators for Ecological Remediation Engineering in Geological Hazard Governance. *Earth Science*, 51(9): 3422-3432.

in geological hazard prevention and control and advance ecological disaster mitigation practices, providing scientific parameters and theoretical support for scheme formulation and effectiveness evaluation of ecological geological hazard control projects.

Key words: geological hazards; ecological restoration technology; durability evaluation; pressure-state-response model; ecological restoration.

0　引言

随着全球气候变化和人类工程活动加剧,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发,严重威胁人民生命财产安全和区域生态安全(刘传正,2015).传统地质灾害治理工程多采用刚性结构,如混凝土挡墙、抗滑桩等支挡结构,以及格构梁、喷锚支护等防护结构,虽能快速稳固灾害体,但存在生态破坏性强、景观割裂、环境融合度低等问题.近年来,生态化治理理念逐渐兴起,通过植被恢复、土壤改良、支护结构生态化等自然解决方案,将防灾减灾与生态修复相结合,成为地质灾害治理领域的重要发展方向(吴丹丹和蔡运龙,2009).受植被演替、材料降解与工程体易损性等因素动态演化和综合作用影响,生态化治理工程治理效能评估呈现出动态性和复杂性.

生态评估最早被应用于工程建设中的环境评估领域,而早期对生态修复评估的研究多集中于单要素评估,如植被恢复潜力评估(Vegetation Restoration Potential Assessment,简称VRPA),通过植被覆盖度、生物量指标评估生态恢复潜力(Xu *et al.*,2020),但其受季节性和短期气候波动影响难以反映生态恢复状况;水源涵养评估(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs,简称InVEST)通过量化生态系统(如森林、湿地等)的水源调节能力,可直观评估不同土地利用方式对水资源的影响(Li *et al.*,2021;张馨怡等,2022).近年来,随着国家生态保护政策的深化,生态修复评估逐渐向系统性、整体性方向拓展.如生态承载力评估模型(Ecosystem Carrying Capacity,简称ECC)(王思远,2018)等,依托"压力-状态-响应"框架集成多指标,可有效识别关键生态风险区域、量化系统脆弱性,但对于长期动态变化的评估有限;生态恢复力模型(孟凡迪,2023)用于评估气候变化或人为活动下的长期生态适应性,通过历史数据预测未来趋势,以此量化生态系统抵抗干扰和恢复稳定的能力;综合效益评价模型(李国强,2024)系统考虑了生态修复工程的植被恢复、水土保持、生物多样性提升等核心效益,但对长期生态演替规律方面的评估有限.可以看出,现有生态评估模型虽能有效识别关键生态要素和风险,但在时间效应分析、多尺度整合和动态过程评估方面仍存在明显局限,难以全面刻画生态系统从短期修复到长期稳定的完整演变过程.

随着国家生态文明建设的深入推进,提升地质灾害治理生态效益的需求日益增加,治理工程效益评估需关注生态耐久性(刘如珍,2003).目前工程后评估通常因仅采用植被指标而产生误判,需要从"以绿定效"深入到土壤质量、植物多样性等多方面,实施"修建完成后的维持稳定-适应周围环境-恢复原生生境"的全过程综合考量.本文以地质灾害生态化治理为目标,以生态化治理工程为研究对象,从生态效益提升需求出发,遵循治理工程子系统和生态环境子系统交互适应原则,综合考量工程体耐久性、治理效果耐久性及景观恢复耐久性3个层面,构建地质灾害生态化治理耐久性评估指标体系.

1　地质灾害生态化治理技术

1.1　地质灾害成因与分类

地质灾害形成演变因素包括内因和外因,内因(控制性因素)包括岩性及其组合、坡体结构等,外因(诱(触)发因素)包括地震、降雨、冰雪融水等.除自然诱发因素外,不合理的人类工程活动也是主要诱发因素,主要包括:(1)开挖:修建公路、铁路等;(2)堆填:在斜坡上大量兴建楼房,大量堆填土石、矿渣等;(3)蓄排水:水渠和水池的漫溢和漏水,工业生产用水和废水排放,农业灌溉等.

地质灾害可按成因分为自然地质灾害和人为地质灾害;按地质灾害所处的地质环境或地质体变化的速度差异,可分为突发性地质灾害,包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝,以及缓变性地质灾害,包括水土流失、土地沙漠化等环境地质灾害;按地质灾害发生区的地理或地貌特征,可分为山地地质灾害(斜坡类)及平原地质灾害(非斜坡类);按生成空间可分为地下地质灾害和地上地质灾害.斜坡类地质灾害包括滑坡、崩塌、泥石流等,非斜坡类地质灾害包括地裂缝、地面沉降等(简文彬和吴振祥,2015).

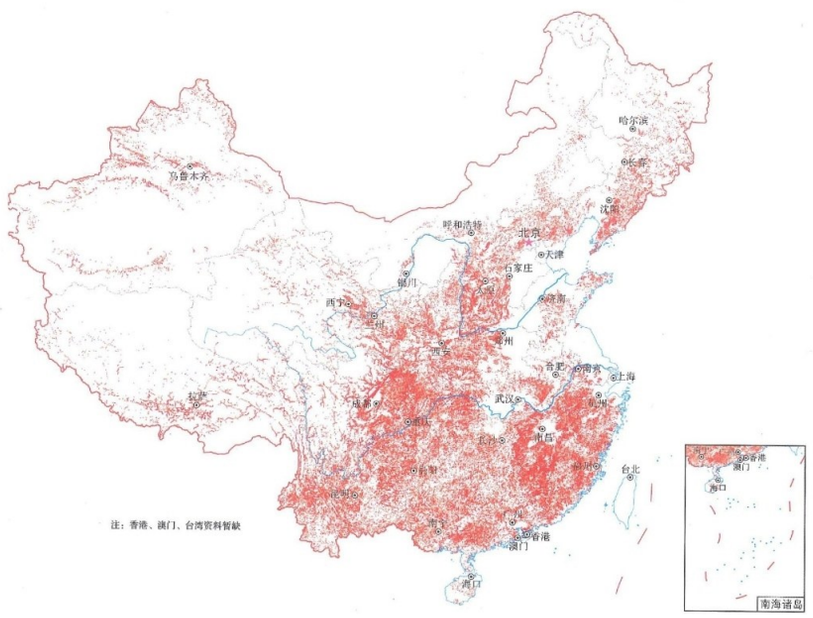

图 1 中国地质灾害分布

Fig.1 Distribution of geological hazards in China

据李媛等(2020)；审图号：GS(2020)5641号

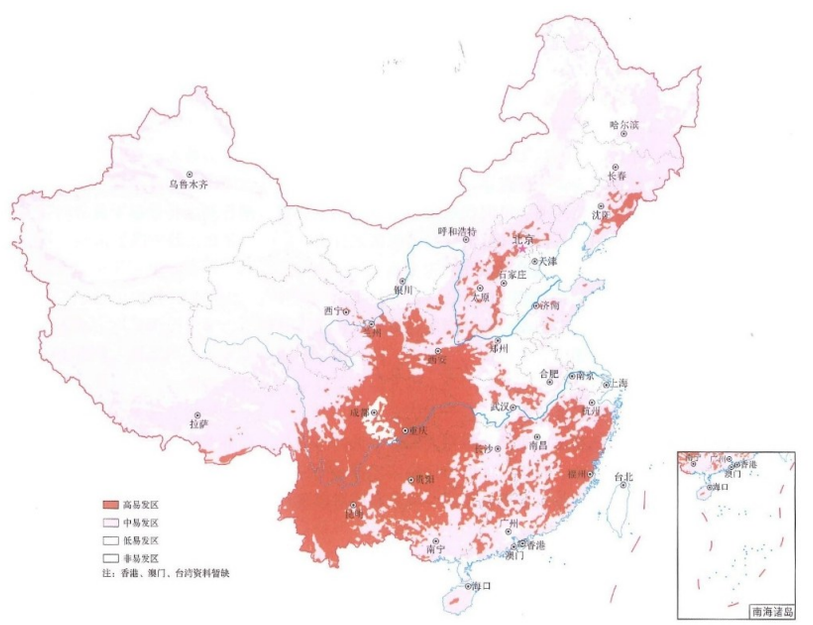

图 2 全国崩塌、滑坡、泥石流易发程度评价图

Fig.2 Susceptibility assessment map of rockfalls, landslides and debris flows in China

据李媛等(2020)；审图号：GS(2020)5641号

我国是世界上地质灾害最为发育、受威胁人口最多的国家之一(图 1).我国的山区，包括山地、丘陵和高原，总面积为 6.636×10^6 km^2，占全国陆地国土总面积的 69.1%.山区的地质环境复杂，崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等灾害频发.据自然资源部统计，全国现有地质灾害隐患点 28.8 万余处，潜在受威胁人口达 1 600 万(李媛等，2020).

我国崩塌、滑坡、泥石流高易发区面积 1.26×10^6 km^2，中易发区面积 2.77×10^6 km^2，低易发区面积 2.90×10^6 km^2(图 2).高、中易发区主要分布在川东、渝南、鄂西、湘西山地、青藏高原东缘、云贵高原、秦巴山地、黄土高原、汾渭盆地周缘、东南丘陵

山地、新疆伊犁、燕山等地区(李东林和宋彬,2013).

1.2　地质灾害生态化治理规划设计

随着国家生态文明建设向纵深推进,地质灾害治理更加注重生态环境质量提升,在降低地质灾害带来的直接经济损失和人员伤亡之外,需要进一步提高治理工程生态效益.

1.2.1　流域尺度的地质灾害生态化治理规划　应充分考虑区域(流域)各生态系统之间的关联性,将其纳入整体框架中,确保工程实施与生态保护修复总体目标相协调,以提升区域生态系统的稳定性和可持续性(周妍等,2024).在进行流域生态化治理规划时,应以恢复改善河道的生态系统功能与健康,治理地质灾害,减少泥沙淤积,提升水体景观品质,提高生物多样性,提升生态系统服务功能,并促进可持续发展为总体思路.

在流域尺度上,生态系统服务功能提升包括恢复植物多样性、增强防治工程景观融合度和连通性.

1.2.2　单元(小流域)尺度的地质灾害生态化治理规划　遵循生态系统整体性原则,将不同地质灾害类型的空间治理单元视为一个有机整体,注重各生态要素之间的相互联系,具体包括土地、水资源、生物多样性等多个方面(周妍等,2024).从小流域坡沟单元要素上,充分考虑工程与周围环境的融合度,通过生态廊道、植被恢复等措施,加强生态系统各部分之间的连通性,提升系统稳定性和服务功能;采用绿色、自然基础设施和生态工程技术,进行多层次、多目标的规划设计.

单元尺度上从坡沟要素出发,综合考虑坡体地质灾害治理、坡面水土保持、河道泥沙输移、水体质量改善、植物多样性恢复、景观融合等方面.地质灾害治理包括坡面支挡、锚固、护坡及沟头固源、拦挡等;水土保持包括减小坡面土壤侵蚀模数、增强抗蚀能力等;主沟泥沙输移包括对泥沙输入量、泥沙淤积的管控等;水体质量提升包括生物停滤等措施,以减小水体浊度.

1.2.3　场地(工程)尺度的地质灾害生态化治理规划　将规划设计的理念和目标转化为具体的工程措施和技术方案,充分考虑工程实施的可行性和技术要求,同时确保工程设计符合生态保护的原则(周妍等,2024).针对场地尺度,按地质灾害扰损区的地形地貌、岩土性质、土壤第四纪成因、物质组成等进行分区,对不同区域进行治理规划.

(1)地质灾害减损区陡立裸岩面:根据岩面粗糙程度,清除松动岩块、平整断面,结合挂网喷播、土壤重构、植被配置技术,达到生态环境重构效果,解决地质灾害减损区陡立面植生层难附着、易脱落问题;(2)地质灾害加积区松散堆积体:利用土壤重构优化植物生境,结合生态固土、阻渗技术,增强土体抗蚀性能,采用“乔-灌-草”立体配置植物群落,促进植被多样性恢复、植物演替与景观协调;(3)地质灾害滞水区:采用微地貌重塑和土壤重构技术,同时选择沼生植物群落构建长效安全的微湿地环境,以期达到因地制宜,生态景观协调的效果;(4)地质灾害治理工程结构硬质创面:如挡墙、抗滑桩等硬质立面,采用植筋挂网、植生层重构、植物配置技术,在硬质陡立面构建表层基质,完成草本植物覆绿、藤本植物定植生长及乡土植物演替,有效提升工程景观美学价值.

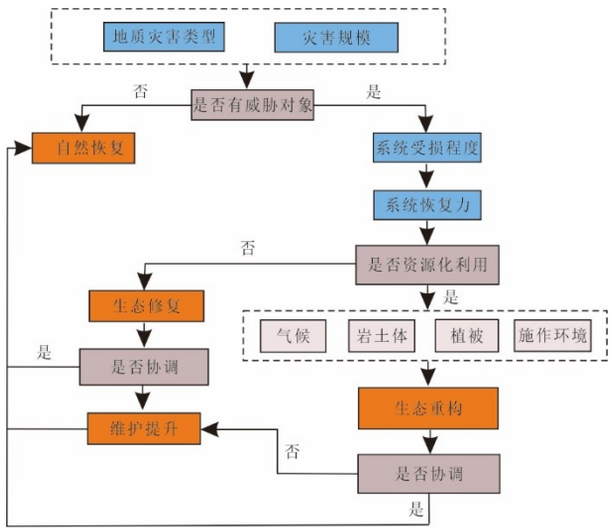

图3　地质灾害生态化治理设计策略

Fig.3　Planning and design strategies for eco-geological hazard mitigation

1.3　地质灾害生态化治理技术及有机配置

生态化治理需综合应用生态学、土木工程学和环境科学,针对地质灾害生态修复系统性、整体性与适配性较差导致的灾害链、生态退化及工程失效问题,统筹考虑灾害类型与规模、生态地质环境受损程度、生态系统恢复力、灾害体资源化利用等要素,以及工程治理措施对生态地质环境融入度和协调性的影响,遵循“自然恢复、适度干预”的生态重构递进选择策略(图3).依据气候、岩土体、植被及施作环境需求,组配具低碳、有机等特性的岩土体加固材料,以及具熟化、抗蚀、阻渗、抗冻等特性的土壤修复材料,形成地质灾害生态治理的材料与技术优化配置;优

选“苔-藻-草”生物结皮、“乔-灌-草”植物配置、乡土物种快繁技术,形成不同场景生态修复“方案组合-设计优化-生物适配-耐久提升”有机配置技术方法.

以地质灾害防治生态问题识别为起点,通过对生态问题精准诊断明确生态功能障碍与干扰机制,从区域尺度到场地尺度统筹制定差异化治理规划,确保治理目标的系统化与空间精准性;在技术配置环节将生态化治理技术有机整合,推动工程措施从物理加固向生态减灾转型,最终通过耐久性评估实现对生态化治理长期效能的系统判定与优化反馈,形成从治理介入到生态演替的全过程支撑闭环.

2 地质灾害生态化治理工程耐久性评估框架

2.1 耐久性评估理论基础

将治理对象分为治理工程子系统和生态环境子系统,以联合国经济合作开发署提出的“压力-状态-响应”框架为基础,分析工程防护措施与生态环境间的协同效应.在工程子系统中,外部压力(如降雨侵蚀、水力冲刷)通过改变岩土体力学性质等,驱动工程结构状态参数(如位移量增大)的临界变化,从而触发加固措施(如支护结构、排水系统)的适应性响应(朱贺等,2025).生态子系统中压力源(如植被破坏、生物扰动)会削弱生态系统的稳态调节能力,导致生态状态指标(如植被覆盖率下降、土壤侵蚀速率上升)的连锁退化,进而引发修复技术(如植被重建、土壤改良)的干预需求(查轩和黄少燕,2001).子系统间通过地表过程实现深层交互,工程结构的耐久性衰减可能加剧周边生态系统的胁迫压力,而生态退化又会增加工程系统的失稳风险.考虑上述子系统间交互协同作用,将“治理工程外界压力-治理工程性能状态-地质灾害发生响应”和“生态风险压力-生态连通度状态-生态环境响应”两方面,作为后续研究分析的基础(裴向军,2024).

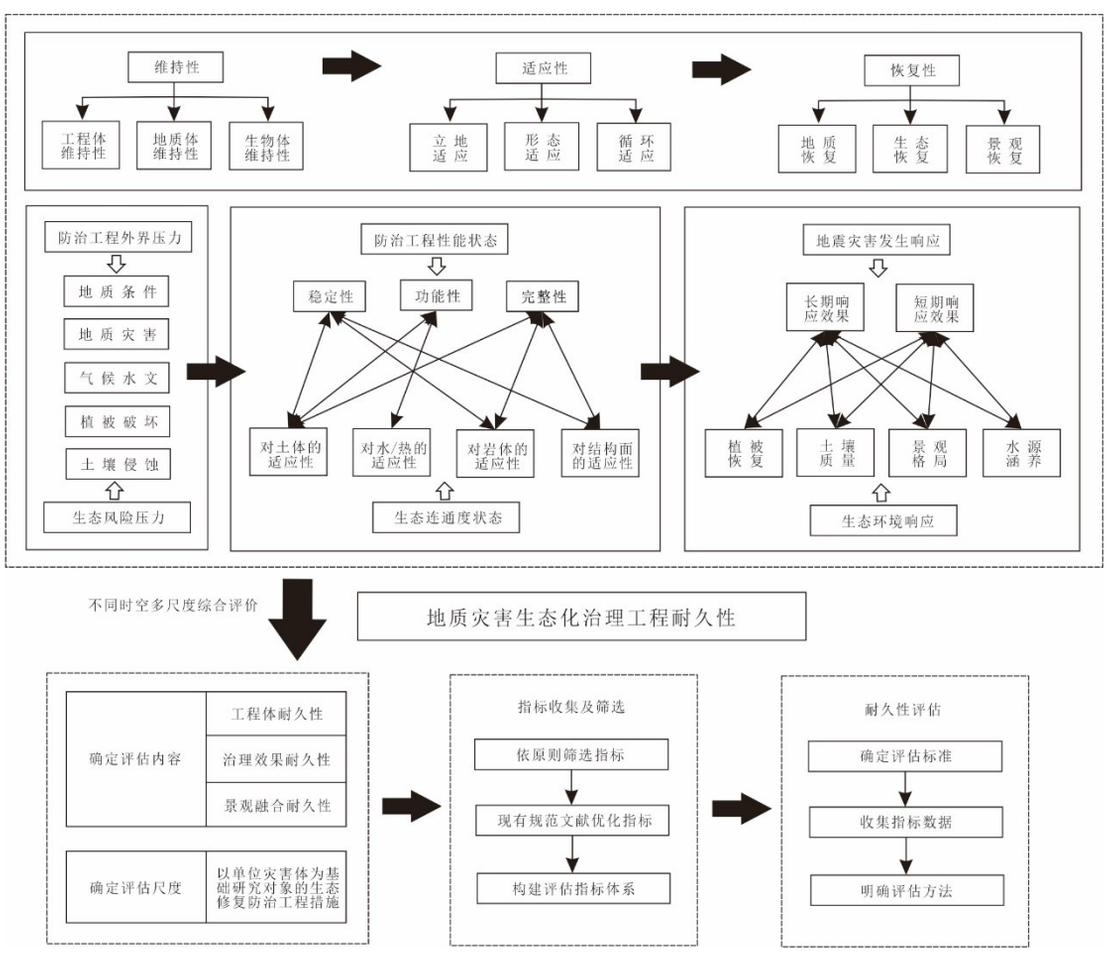

图4 地质灾害治理工程生态修复耐久性评估技术框架

Fig.4 Framework for durability assessment of eco-restoration in geological hazard mitigation engineering

2.1.1　治理工程评价子系统　该子系统包含治理工程外界压力(如自然条件和人为因素)、治理工程性能状态(稳定性、完整性、维持性)和地质灾害发生响应(如灾害响应频次、影响范围及程度)三个方面.这三方面既能表现防灾体对外界扰动的抵御能力,又能体现其在生态化治理工程完成后的韧性,为系统评估工程体稳定耐久程度提供科学框架.

2.1.2　生态环境评价子系统　该子系统包含生态风险压力(如土壤侵蚀、植被破坏、生物多样性减少)、生态连通度状态(创面区域与周边生态系统的连通性)、生态环境响应(生态系统各要素的恢复和适应情况)三个方面.这三方面既能表现受损区域生态问题的根源和演变趋势,又能体现治理工程实施后生态系统适应恢复的情况,并以此为后续指标体系构建提供理论支撑.

2.2　耐久性评估内涵界定

传统意义上耐久性指材料或工程结构在自然环境(如风化、侵蚀和生物作用)及自身老化(如疲劳、蠕变等)长期影响下,保持物理性能、化学性质的能力.对地质灾害生态化治理工程耐久性评估而言,在考虑表面生态修复效果的同时,也要关注生态系统内部的循环演替.完成失衡到再平衡的演化才能实现真正耐久,因此进行耐久性评价目的在于验证生态治理工程在长期自然营力作用下能否保持设计强度和功能;生态修复措施(如水土保持、土壤质量提升、水源涵养提升、植被多样性恢复)是否由内至外具备持续效能.

韧性即应变能力,反映扰损区在治理修复后应对次生灾害的能力,可体现治理工程是否能持续发挥作用.耐久性作为系统性能长期存续的基础能力,既为韧性(动态恢复能力)提供了物理载体(如抗老化、抗疲劳损伤),又为可持续性(如生态地质环境系统平衡)设定了时间边界,如材料寿命决定生态工程的持续作用周期,从而在时间维度上实现对两者的整合,故本文将耐久性界定为包含韧性、可持续性的内涵关系.

3　地质灾害生态化治理工程耐久性评估指标体系

近年来,针对包含植被、水源涵养、土壤等要素的生态修复评价研究日渐丰富(表1).植被方面,Xu *et al.*(2020)认为生态恢复的基础是植被恢复,利用生境理论和空间滑动窗模型,提出了植被恢复潜力评估(VRPA)概念,并评估了生态工程效果;水源涵养方面,Li *et al.*(2021)基于InVEST水量模型,通过参数局部化,定量评价丹江流域近20年的产水量和保水功能,并分析保水对各因素的响应;但上述生态修复评估通常仅关注某方面(如植被或水源涵养),不重视生态系数要素之间的关联性和时间变

表1　生态修复评估主要模型及指标

Table 1　Recent comparison of ecological restoration assessment models employing geoecological terminology

评估角度	评估体系或模型及其指标
植被恢复潜力评价:利用生境理论和空间滑动窗模型,提出了植被恢复潜力实现(VRPA)的概念(Xu *et al.*, 2020).	从植被指数和VRPA方面评估生态工程的影响.考虑环境变量(气象、植被及社会经济等),采用空间滑动窗模型构建植被恢复力模型.公式表示为:$\mathrm{VRPI}_{ij}(V_1,V_2,\ldots,V_N)=\mathrm{MAX}(U_{ijk},R)\mathrm{EVI}(V_1,V_2,\ldots,V_N)-\mathrm{EVI}_{ij}(V_1,V_2,\ldots,V_N)$
水源涵养功能评价:采用基于InVEST水量模型,分析2000—2019年流域水土保持的时空动态,以及水土保持对气候、土地和土壤的响应(Li *et al.*, 2021).	采用年总水量(Y)、流域年总降雨量(P)及流域年实际蒸散量(AET).构建InVEST水量模型,公式表示为:$Y_{(X)}=(1-\frac{\mathrm{AET}(x)}{P(x)})\times P(X)$
生态承载力(ECC)与生态安全(ES)评价:以三江源地区为研究对象,构建了一套包含29个指标的评价体系(Zhang *et al.*, 2020).	生态承载力(ECC)评价指标包含气候(年降水、年温度、年辐射量等)、地表(DEM模型、坡度、土壤类型等)、生物(植被覆盖度、植被类型等)及水体(水质、节水量)指标;生态安全(ES)评价指标基于"压力-状态-响应"框架(PSR),包含压力(GDP、肥料用量、受威胁植物物种数量等)、状态(生态承载力)及响应(人均居住面积、产业比重、人口密度等)指标.
生态廊道修复成效评估指标体系:包含4个项目层,以及15类准则层和41个指标项(郭玉佳等, 2023).	评估指标体系包含景观格局优化、生物多样性保护、栖息地保护与构建和生态系统服务提升4个项目层.
青藏高原重大建设工程综合生态修复效益评价体系:主要分为生态系统结构、质量和服务3大指标类别,10个指标主题,21个具体指标(胡一帆等, 2022).	生态系统评价指标体系包含生态系统结构(宏观生态状况、物种丰富度、景观格局)、质量(土壤状况、植被状况、生态系统质量变化指数)、服务功能(碳固存、水源涵养、水土保持)三类.

表2 地质灾害治理工程生态修复耐久性评估指标体系

Table 2 Durability assessment indicator system for ecological restoration in geological hazard mitigation engineering

评价内容	一级指标	二级指标	三级指标
A工程体耐久性	A_1工程体维持性	A_{1-1}稳定性维持	A_{1-1-1}稳定性系数
		A_{1-2}完整性维持	A_{1-2-1}形态完整性系数
	A_2工程体易损性	A_{2-2}疲劳寿命	A_{2-2-1}疲劳寿命
		A_{2-3}老化速率	A_{2-3-2}老化速率
B治理效果耐久性	B_1水土保持	B_{1-1}水土侵蚀	B_{1-1-1}土壤侵蚀模数
			B_{2-1-1}土壤有机质含量
	B_2土壤质量	B_{2-1}有机质	B_{2-2-1}土壤养分含量
		B_{2-2}养分	B_{2-3-1}土壤生物量
	B_3生物多样	B_{2-3}微生物	B_{2-3-2}土壤酶活性
		B_{3-1}植物多样性	B_{3-1-1}植被盖度
	B_4水源涵养	B_{4-1}水源涵养	B_{3-1-2}植物多样性指数
			B_{4-1-1}水源涵养量
C景观融合耐久性	C_1景观格局	C_{1-1}景观多样性	C_{1-1-1}景观多样性
		C_{1-2}景观连通性	C_{1-2-1}景观连通性
		C_{1-3}季节变化性	C_{1-3-1}色彩丰富度
			C_{1-3-2}季节变化性

化.后来研究者提出生态承载力及生态安全力评价,Zhang *et al.*(2020)为评价中国生态工区生态承载力与生态安全的时空变化,建立了生态承载力与生态安全指标体系,该体系涵盖气候、水源等层面29个指标,旨在反映工程区生态承载力与生态安全的关系;郭玉佳等(2023)选择景观格局、生物多样性、栖息地质量和生态系统服务4个维度、41个指标,构建了能全面评估生态廊道修复成效的指标体系;胡一帆等(2022)以生态修复后的生态系统结构、质量和服务为核心架构,面向解决青藏高原重大建设工程宏观空间布局尺度上的生态修复成效评估问题,构建了一套生态修复综合效益评估指标体系.现有指标涵盖了生态表观效果,但忽略了如土壤微生物、生物多样性等反映生态系统内部功能平衡与稳定的因素;再者,生态效益评估对时间动态性考虑有限,多聚焦于工程验收期,忽略了生态演替的波动性、脆弱性.由于治理工程稳定性是后续生态正向演替的前置条件,本文将其定为考虑的第一要素,进一步考虑治理工程子系统与生态环境子系统间的融合适应情况,最终从景观格局角度考察地质灾害受损区与原生生态系统耦合程度.

3.1 耐久性评估指标体系构建原则

指标体系构建原则包括:(1)科学性与系统性:以生态学、地质学等理论为基础,全面涵盖生态修复耐久性各方面,确保科学合理且避免片面或缺失;(2)可操作性与可量化性:优先选择易获取、可操作的指标,采用量化数据客观评估;(3)动态性与适应性:随技术和社会进步动态调整、保持时效性,并灵活适应区域特点,避免"一刀切";(4)层次性与独立性:分层构建体系确保结构清晰,指标间减少交叉重复以保持独立性和代表性.

3.2 耐久性评估指标体系构建方法

通过系统搜集国内外地质灾害治理工程生态修复相关文献,梳理滑坡、泥石流、崩塌等灾害类型的生态修复措施及其效果,提取植被恢复、土壤改良、水文调节、生物多样性保护等方面的潜在评估指标,初步筛选后形成指标池.基于现有指标体系根据不同地区的区域特点,动态调整评估指标.

3.3 耐久性评估指标体系

基于地质灾害治理工程生态修复的综合性特征,其耐久性评估指标体系需从多维度考量长期效能,主要包括工程体耐久性、治理效果耐久性、景观融合耐久性3类评价内容,采用三个层次对评价内容进行分级评价(表2).

3.4 耐久性评估指标分项描述

3.4.1 工程体耐久性 包括工程体维持性和工程体易损性两方面,前者包含稳定性和完整性,其中稳定性维持体现工程体能否在其使用寿命期间内保持结构稳定,完整性维持考虑工程体是否能够持续保持其物理和功能上的完整,避免因材料老化、外部侵蚀等因素导致的损坏或失效.工程体易损性体现工程体在环境压力或人为扰动下发生破坏的概率(刘洪

表 3　工程体耐久性指标分项释义

Table 3　Itemized interpretation of durability indicators for engineering structures with geoecological terminology

一级指标	二级指标	三级指标	指标含义及计算公式
工程体维持性	稳定性维持	稳定性系数	采用极限平衡法(如Bishop法、Janbu法)分析边坡、挡土墙的抗滑安全系数(FS).
	完整性维持	形态完整性系数	对工程体表面和内部的裂缝、剥落、腐蚀等损伤形态进行综合量化: $C_i=1-A_{缺陷}/A_{总}$ 其中,$A_{缺陷}$为工程体受损面积;$A_{总}$为工程体总面积.
工程体易损性	疲劳	疲劳寿命	$P(D\geqslant d\|\mathrm{IM})$为给定强度IM指标下,工程体发生破坏程度$D\geqslant d$的概率; $P(D\geqslant d\,\big\vert\,\mathrm{IM})=\Phi((\ln(\mathrm{IM})-\ln(\theta))/\beta)$ 其中,Φ为标准正态分布的累积分布函数;θ为中位值,表示破坏概率为50%时对应的IM值;β为总对数标准差.
	老化	老化速率	

表 4　治理效果耐久性指标分项释义

Table 4　Interpretation of sub-indicators for durability assessment of governance effects-from the perspective of geoecological expertise

一级指标	二级指标	三级指标	含义及获取方式
水土保持	水力侵蚀	土壤侵蚀模数	衡量土壤侵蚀强度的核心指标;常采用通用土壤流失方程(USLE)进行计算: $A=R\times K\times L\times S\times C$ 其中,R为降雨侵蚀因子;K为土壤可蚀因子;L为坡长因子;S为坡度因子;C为植被覆盖因子.
土壤质量	有机质	土壤有机质含量	土壤中动植物残体、微生物及其代谢产物的混合物.
	养分	土壤养分含量	土壤中可供植物吸收利用的必需营养元素的总量及其有效态比例.
	微生物	土壤生物量	单位面积或单位体积土壤中活体生物(包括微生物、植物根系等)的总质量或碳含量.
		土壤酶活性	土壤中由微生物、植物根系和动物分泌的酶催化生化反应的能力.
生物多样	植物多样性	植被盖度	某一区域内植被(包括乔木、灌木、草本等)的垂直投影面积占该区域总面积的百分比,一般以下述公式进行计算: $\mathrm{FVI}=\dfrac{\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI}_{soil}}{\mathrm{NDVI}_{veg}-\mathrm{NDVI}_{soil}}$ 其中,NDVI为归一化植被指数;NDVI_{soil}为纯植被像元的NDVI值;NDVI_{veg}为完全无植被覆盖像元的NDVI值.
	植物多样性	植物多样性指数	某一区域内植物群落物种组成、丰富度: $\mathrm{SHDI}=-\sum_{i=1}^{m}(q_i\ln q_i)$ 其中,q_i为斑块类型占景观面积的比例;m为景观中斑块类型的总数.
水源涵养	水源涵养	水源涵养量	生态系统(如森林、湿地等)通过植被截留、土壤蓄水、地下水补给等方式,调节和储存降水资源的能力.采用下述公式计算: $Q_{wr}=\sum_{i=1}^{n}A_i\times(P_i-R_i-ET_i)\times10^{-3}$ 其中,A_i为i类生态系统面积;P_i为产流降雨量;R_i为地表径流量;ET_i为蒸散量.

注:相关计算参考《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估》(HJ-1173-2021)(生态环境部,2021b).

波等,2020),以疲劳寿命和老化速率体现(表3).

3.4.2　治理效果耐久性　治理效果耐久性旨在全面考虑受损区域经治理修复后的效果可持续性,其中水土保持采用土壤侵蚀模数评估,旨在量化不同时间段内土壤流失的具体程度,反映治理修复后其是否得以有效控制(李新宇等,2007).土壤质量是维系生态平衡、生物多样性的基础,其通过调节水循环、碳储存等影响环境健康与可持续发展;生物多样性有助于促进物质循环、增强生态系统的抗干扰能力与气候调节功能;水源涵养通过调节径流、补给地下水和净化水质,维持水量稳定与生态平衡,支撑生物多样性并减少灾害(表4).

3.4.3　景观融合耐久性　景观格局通过决定生态网络的结构与连通性,直接影响生态韧性,从而塑造生态系统对环境变化的抵抗力、适应力和恢复力(霍海鹰等,2025).多样性体现景观中不同生态系统

表5 景观融合耐久性指标分项释义

Table 5 Interpretation of Sub-indicators for landscape compatibility and long-term performance metrics in geological and ecological contexts

一级指标	二级指标	三级指标	含义及获取方式
景观格局	景观多样性	景观多样性	景观多样性指数的大小反映组成景观的组分数量和各组分所占的比例(马彪等,2025): $SHDI=-\sum_{i=1}^{m}(q_i \ln q_i)$ 其中,q_i为斑块类型占景观面积的比例;m为景观中斑块类型的总数.
	景观连通性	景观连通性	评估区内所有类型生态系统斑块的相邻概率,反映各类生态系统斑块的非随机性或聚集程度: $C=C_{max}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}P_{ij}\ln(P_{ij})$ 其中,C_{max}为P_{ij}参数的最大值;P_{ij}为板块类型i与j相邻的概率;n为各类生态系统斑块总数.
	季节变化性	色彩丰富度	某一系统或对象中颜色的种类、分布、强度及动态变化的综合表现.
		季节变化性	生态系统、气候或生物活动在一年内不同季节表现出的周期性差异.

注:下表相关计算参考《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统格局评估》(HJ1171—2021)(生态环境部,2021a).

的结构复杂性,景观连通性评估斑块间的功能联系,形态连通性关注景观空间形态的连续性与完整性,色彩丰富度量化景观色彩的季节性变化特征,季节变化性则动态反映景观随时间变化的规律(表5).

4 讨论

耐久性评估体系所选指标可反映生态修复脆弱性(恢复初期不稳定性)、恢复性(生境质量逐渐恢复)及可靠性(生境质量恢复到与原始生境状态相近的程度),旨在揭示治理工程与生态系统的协同演进规律,突破传统评估方法的静态局限.指标数据获取可结合多源遥感解译、标准化样带监测和过程模型模拟等技术手段,在保证科学性的同时兼具实践可操作性,能够较为容易地开展评估工作.

地质灾害类型众多,生态化治理措施和过程复杂且具有多样性和综合性,所以本研究提出构建一套全面、系统的评估指标体系,将评价内容划分为三个时序递进阶段,可有效提升评估体系的适用性和灵活性.需要指出的是,在对地质灾害生态化治理工程进行评估时,科学合理地确定指标权重是客观反映生态化治理耐久性成效的关键环节.本研究仅完成耐久性评估指标体系的构建以及确定指标的量化方法和评估标准,后续将在此研究基础上,对地质灾害生态化防治工程项目进行实地调查和样本数据采集,引入权重自适应模型以确定各指标的权重,进一步验证和改进评估指标体系.

5 结论

本研究聚焦于地质灾害生态化治理工程的持续耐久评估,围绕这一核心目标,完成了以下工作:

(1)在流域、单元与场地等多尺度空间上,系统梳理了生态化治理规划设计要点,阐述了生态化治理技术及其有机配置理念.

(2)在此基础上,以地质灾害生态化治理工程为研究对象,依托“压力-状态-响应”理论模型,深入分析生态环境与治理工程间的协同效应,建立以“维持-适应-恢复”模型为基础的地质灾害生态化治理工程耐久性评估体系.

(3)所构建的评估指标体系综合考量工程体、治理效果及景观恢复耐久性三大核心维度,包含7个一级指标,以及13个二级指标和17个三级指标,并提出了指标的具体量化方法.

References

Guo, Y. J., Liu, S. L., Dong, Y. H., et al., 2023. An Indicator System for Effectiveness Evaluation of Ecological Corridor Restoration Based on Landscape Patterns and Ecosystem Services. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(10): 1525—1538 (in Chinese with English abstract).

Hu, Y. F., Wang, H., Jiao, L., et al., 2022. Evaluation Index System of Comprehensive Benefits of Ecological Restoration of Major Construction Projects on the Qinghai - Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 42(18): 7565—7576 (in Chinese with English abstract).

Huo, H. Y., Hou, Z., Peng, K. P., et al., 2025. Evaluation and Optimization of Ecological Resilience of Resource-Based Cities under the Perspective of Landscape Pat-

tern. *Coal Engineering*, 57(1): 203－211 (in Chinese with English abstract).

Jian, W. B., Wu, Z. X., 2015. Geological Hazard and Control. China Communications Press, Beijing (in Chinese).

Li, D. L., Song, B., 2013. Geological Hazard Investigation and Assessment. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).

Li, G. Q., 2024. Study on Ecological Function Enhancement and Ecological Benefit Evaluation of Comprehensive Soil and Water Conservation Management in Nanchagou Small Watershed (Dissertation). Shandong Agricultural University, Tai'an (in Chinese with English abstract).

Li, M. Y., Liang, D., Xia, J., et al., 2021. Evaluation of Water Conservation Function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China Based on InVEST Model. *Journal of Environmental Management*, 286: 112212. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112212.

Li, X. Y., Tang, H. P., Zhang, X. S., et al., 2007. Potential Soil Erosion Assessment Based on the USLE and Multi-Factor Hierarchical Cover Model: A Case Study of Linxi County in Inner Mongolia. *Research of Soil and Water Conservation*, 14(A4): 154－159, 167 (in Chinese with English abstract).

Li, Y., Yang, X. D., Yin, C. R., et al., 2020. Spatio-Temporal Distribution and Disaster Prevention and Mitigation of Geological Hazards in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Liu, C. Z., 2015. Epistemology and Methodology on Geo-Hazard Research. *Journal of Engineering Geology*, 23 (5): 809－820 (in Chinese with English abstract).

Liu, H. B., Tong, Y., Jiang, Y. J., et al., 2020. Recent Development of Seismic Fragility Analysis Methods for RC Frame Structures. *World Earthquake Engineering*, 36 (3): 141－150 (in Chinese with English abstract).

Liu, R. Z., Jin, L. Y., Zhang, Y. J., et al., 2003. Evaluation of the Risk of Geological Disaster and Analysis of the Benefit of Project. *Journal of Gansu Sciences*, 15 (S1): 84－86 (in Chinese with English abstract).

Ma, B., Mao, Z. X., Li, Q. X., et al., 2025. Multi-Scale Landscape Diversity Analysis and Threshold Discussion. *Territory & Natural Resources Study*, (3): 63－69 (in Chinese with English abstract).

Meng, F. D., Zhou, Z., Zhang, G. J., et al., 2023. Land Space Ecological Restoration Zoning Based on Ecosystem Service Supply and De-Mand and Ecological Resilience: A Case Study in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(9): 1496－1510 (in Chinese with English abstract).

Ministry of Ecology and Environment, 2021a. Technical Specifications for National Ecological Condition Survey and Assessment: Ecosystem Pattern Evaluation (HJ 1171－2021). China Environmental Science Press, Beijing (in Chinese).

Ministry of Ecology and Environment, 2021b. Technical Specifications for National Ecological Condition Survey and Assessment: Ecosystem Services Function Evaluation (HJ 1173－2021). China Environmental Science Press, Beijing (in Chinese).

Pei, X. J., 2024. Mechanisms of Geological Environment Disturbance and Ecological Restoration Technical Systems for Major Engineering Projects on the Tibetan Plateau. *Journal of Engineering Geology*, 32(5): 1737－1758 (in Chinese with English abstract).

Wang, S. Y., 2018. Study on Evaluation and Early Warningn of Ecological Carrying Capacity of Jilin Province under New Normal Conditions (Dissertation). Northeast Dianli University. Jilin (in Chinese with English abstract).

Wu, D. D., Cai, Y. L., 2009. Evaluation of Ecological Restoration Effects in China: A Review. *Progress in Geography*, 28(4): 622－628 (in Chinese with English abstract).

Xu, X., Zhang, D. J., Zhang, Y., et al., 2020. Evaluating the Vegetation Restoration Potential Achievement of Ecological Projects: A Case Study of Yan'an, China. *Land Use Policy*, 90: 104293.

Zha, X., Huang, S. Y., 2001. Effects of Vegetation Destruction on Accelecated Erosion andSoil Degradation Processes on Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 19(2): 109－114 (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. Y., Wei, D. B., Du, Y. G., 2022. Evaluation Indicators and System for Water Quality Stability of Reclaimed Water. *Environmental Science*, 43(2): 586－596 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. X., Fan, J. W., Wang, S. Z., 2020. Assessment of Ecological Carrying Capacity and Ecological Security in China's Typical Eco-Engineering Areas. *Sustainability*, 12(9): 3923. https://doi.org/10.3390/su12093923

Zhou, Y., Wang, J. M., Chen, Y., et al., 2024. Technological Path Exploration for Application of Nature-Based Solutions to Integrated Ecological Conservation and Restoration Project of Mountains, Rivers, Forests, Farmland, Lakes, Grassland and Deserts. *China Land Science*, 38(6): 40－49 (in Chinese with English abstract).

Zhu, H., Zhang, Y. S., Ren, S. S., et al., 2025. Characteristics and Chain-Generated Processes of Extreme Rainfall-Induced Geohazards in the Upper Reaches of the Juma River. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 52

(3): 186－196 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

查轩, 黄少燕, 2001. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响. 山地学报, 19(2): 109－114.

郭玉佳, 刘世梁, 董玉红, 等, 2023. 基于景观格局和生态系统服务的生态廊道修复成效评估指标体系. 中国生态农业学报(中英文), 31(10): 1525－1538.

胡一帆, 王浩, 焦磊, 等, 2022. 青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系. 生态学报, 42(18): 7565－7576.

霍海鹰,侯卓,彭可平,等,2025.景观格局视角下资源型城市生态韧性评估与优化研究.煤炭工程,57(1),203－211.

简文彬, 吴振祥, 2015. 地质灾害及其防治. 北京: 人民交通出版社.

李东林,宋彬,2013.地质灾害调查与评价.武汉:中国地质大学出版社.

李国强,2024.南岔沟小流域水土保持综合治理生态功能提升及生态效益评价研究(硕士学位论文). 泰安: 山东农业大学.

李新宇, 唐海萍, 张新时, 等, 2007. 基于多因子层次覆盖模型的潜在土壤侵蚀等级评价: 以内蒙古林西县为例. 水土保持研究, 14(A4): 154－159, 167.

李媛,杨旭东,尹春荣,等,2020.中国地质灾害时空分布及防灾减灾.北京:地质出版社.

刘传正, 2015. 地质灾害防治研究的认识论与方法论. 工程地质学报, 23(5): 809－820.

刘洪波, 佟瑶, 蒋垚俊, 等, 2020. RC 框架结构地震易损性分析方法研究进展. 世界地震工程, 36(3): 141－150.

刘如珍, 金凌燕, 张永军, 等, 2003. 地质灾害危险性评估和防治工程效益分析评价. 甘肃科学学报, 15(S1): 84－86.

马彪, 毛子玄, 李权玺, 等, 2025. 多尺度景观多样性分析及阈值探讨. 国土与自然资源研究, (3): 63－69.

孟凡迪, 周智, 张贵军, 等, 2023. 基于生态系统服务供需与生态恢复力的国土空间生态修复分区: 以京津冀为例. 中国生态农业学报(中英文), 31(9): 1496－1510.

生态环境部,2021a. 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统格局评估(HJ 1171－2021). 北京:中国环境科学出版社.

生态环境部,2021b. 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估(HJ 1173－2021). 北京:中国环境科学出版社.

裴向军, 2024. 青藏高原重大工程地质环境扰损机制及生态修复技术体系. 工程地质学报, 32(5): 1737－1758.

王思远, 2018. 新常态下吉林省生态承载力评价及预警研究(硕士学位论文). 吉林: 东北电力大学.

吴丹丹, 蔡运龙, 2009. 中国生态恢复效果评价研究综述. 地理科学进展, 28(4): 622－628.

张馨怡,魏东斌,杜宇国,2022.再生水水质稳定性评价指标与体系,环境科学.43(2),586－596.

周妍, 王金满, 陈妍, 等, 2024. 基于自然的山水林田湖草沙一体化保护和修复技术路径探索. 中国土地科学, 38(6): 40－49.

朱贺, 张永双, 任三绍, 等, 2025. 拒马河上游极端降雨引发的地质灾害特征与链生演化过程. 水文地质工程地质, 52(3): 186－196.