• 自然灾害防治体系 •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0020

自然灾害工程治理体系*

胡新丽[1] 刘 镇[2**] 陈华勇[3**] 罗德轲[4] 黎 伟[1] 崔光俊[2]

1. 中国地质大学(武汉) 工程学院,武汉 430074
2. 广东工业大学 粤港澳大湾区防灾减灾研究院,广州 510006
3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地自然灾害与工程安全重点实验室,成都 610213
4. 四川大学—香港理工大学 灾后重建与管理学院,成都 610207

[**摘 要**] 我国自然灾害种类多、危害大,工程治理复杂且困难。针对自然灾害工程治理尚存在的理论碎片化、技术孤岛化与制度分散化等瓶颈,本文提出构建“理论—技术—制度”三位一体的自然灾害工程治理体系:理论体系聚焦工程结构/材料—地质体/地质环境相互作用机理、长期服役性能安全性理论多尺度评价体系构建、治理工程—生态—社会韧性评价理论;技术体系关注全生命周期监测诊断技术及智能化装备、数智化体系构建与治理效果动态评估技术、高性能绿色材料/结构与韧性补强加固技术;制度体系升级完善重大科学与技术计划、治理规划统筹方法与体系、工程法规和技术标准体系。通过构建自然灾害工程治理体系的“理论筑基—技术突破—制度保障”三维闭环框架,分阶段推进建设,强化跨部门协同,融合多源头资金,使得三者深度融合形成“基础研究—技术转化—工程应用—政策反馈”的创新链条,建成全域联动的自然灾害韧性工程屏障,跨越式提升防灾减灾综合水平。

[**关键词**] 自然灾害工程治理体系;理论体系;技术体系;制度体系;体系共建

我国自然灾害种类多、分布地域广、发生频率高、造成损失大,是受灾最为严重的国家之一。自然灾害主要包括气象水文灾害、地质地震灾害、海洋灾害、生物灾害、生态环境灾害以及山火灾害等,对人民生命财产安全、经济社会发展乃至国家安全构成严峻挑战[1-3]。仅2024年,全国自然灾害就造成856人死亡或失踪,紧急转移安置364.5万人次,直接经济损失高达4 011亿元[4],为此派出科技人员59.3万人次,排查隐患点229.6万处,紧急处置险情13 616处[5]。这些措施虽取得一定成效,但仍无法满足灾害治理的实际需求,亟需构建更完善的治理体系。其中,工程治理体系作为整个治理体系的核心支撑与物质基础,其建设具有重要意义。

许多自然灾害,如强降雨(气象水文灾害)、地震(地质地震灾害)等,其最终的直接致灾形式极易表现为崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等地质灾害,或引发山洪、溃坝等洪涝灾害。这些由其他自然灾害诱发的灾害问题,在成因机制、破坏形式和对工程治理的需求上具有高度的典型性和代表性[6]。对于上述地质灾害和洪涝灾害而言,在无法完全避让的条件下,工程治理是控制灾害体稳定性、阻断灾害链、保护承灾体的最直接、最有效的手段,是风险防控体系的物质基础和核心支柱。因此,深入探讨地质灾害及洪涝灾害的工程治理体系建设,对于整体提升自然灾害综合治理能力至关重要。然而,现有工程治理体系在理论基础、技术支撑、制度保障等方面仍存在瓶颈和挑战,亟需系统性的体系化建设与升级。

纵观国际地质灾害或洪涝灾害治理体系的发展趋势,呈现出从传统的“硬化抗灾”向“生态减灾”转变,从

收稿日期:2025-07-29; 修回日期:2025-09-15
* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。
** 通信作者,Email:liuzh8@mail.sysu.edu.cn;hychen@imde.ac.cn
本文受到国家自然科学基金项目(42020104006)的资助。

引用格式: 胡新丽,刘镇,陈华勇,等. 自然灾害工程治理体系. 中国科学基金,2025,39(6):930–938.
Hu XL,Liu Z,Chen HY,et al. The engineering governance system of natural disaster. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2025,39(6):930–938.(in Chinese)

“单一应对”向“整体治理”转变，从侧重“应急响应”向注重“长期韧性建设”转变[7,8]。我国灾害治理体系则立足国情，形成了鲜明特色：一是坚持“以防为主，防抗救相结合”的工作方针，二是秉持“人民至上、生命至上”的根本价值理念，三是构建“集中统一、协同联动”的应急管理体制[9]。2018年10月10日，习近平总书记在中央财经委员会第三次会议上提出部署实施自然灾害防治“九大工程”，旨在全面提升我国自然灾害防治能力[10]。党的二十大报告进一步强调，“提高防灾减灾救灾和重大突发公共事件处置保障能力，加强国家区域应急力量建设”[11]。这不仅是面对日益复杂的灾害风险和新发展的要求，也为新时代自然灾害治理特别是工程治理体系建设指明了方向。

因此，加快完善自然灾害工程治理体系建设，是破解当前瓶颈、应对未来挑战、响应国家重大需求的必然选择。本文围绕工程治理体系建设的瓶颈与目标，深入探讨其理论体系、技术体系和制度体系，推动构建一个理论先进、技术可靠、制度保障有力的自然灾害工程治理体系，为全面提升我国防灾减灾救灾能力、筑牢国家安全屏障提供坚实的科技支撑。

1　工程治理体系建设瓶颈与建设目标

自然灾害工程治理体系是国家安全屏障的核心构成，其系统性缺陷已严重制约我国防灾减灾能力的现代化进程。根据近年来的研究成果[12-26]和工程实践反馈，针对当前体系存在理论碎片化、技术孤岛化、制度分散化等瓶颈，亟需结合自然灾害演化规律与工程治理实践，系统诊断关键矛盾，提出分层级建设目标，通过多维度协同突破，为构建“理论—技术—制度”三位一体的治理体系提供科学路径(图1)。

1.1　工程治理理论体系瓶颈及关键科学问题

当前，自然灾害工程治理理论体系的发展滞后于复杂灾害风险防范的现实需求，其主要问题在于：(1)灾害工程治理全寿命周期中工程结构/材料—地质体/地质环境在时变荷载作用下的动态耦合作用机理认识不清[12-14]，导致工程设计参数取值与风险预估存在较大偏差[15]；(2)面向工程结构长期服役性能的安全性评价理论体系尚不完善，缺乏能够有效整合材料老化、环境侵蚀、灾害累积损伤等多因素、多尺度、多物理场的耦合分析模型，难以精准预测结构的耐久性与剩余寿命[16]；(3)治理韧性理论的跨学科整合不足，与社会生态系统韧性、气候适应型发展等新兴领域的融合明显滞后，限制了工程治理在提升区域综合韧性中的系统性贡献[17]。其中，亟待突破的关键科学问题是：(1)揭示复杂地质环境因素作用下灾害体与防治工程之间动态相互作用的力学机制、演化规律与控制原理[18,19]；(2)揭示工程结构韧性的材料—结构—工艺协同增强机理，定量表征恶劣环境与反复灾害冲击下的耐久性演化规律；(3)构建融合治理工程效能、生态系统恢复力与社会系统适应力的多尺度、多目标韧性治理理论框架与量化评估模型，以应对系统性风险[20,21]。同时，针对极端工况的工程防治，需要借鉴地震工程分等级防治理念，建立“极端灾害可防御、重大灾害可修复、一般灾害可防治”的分级治理理论框架。结合第四纪地质与地震地质研究成果，划分工程防治体未来十年、百年可能面临的极端工况，考虑灾害体的蠕变或加速滑移效应，建立相应的理论预测模型。

1.2　工程治理技术体系瓶颈及关键技术问题

支撑工程治理实践的技术体系存在明显短板，主要瓶颈包括：(1)现有监测技术在恶劣环境下可靠性低、覆盖不全、自动化智能化水平不高、成本过高，难以实现隐蔽病害的早期精准识别和结构状态实时感知[22]。(2)常规工程治理多源数据融合困难，缺乏高效的智能算法支撑灾害风险动态评估、工程安全预警和治理方案优化决策，数据的价值未充分挖掘[23]。(3)传统加固技术往往效率低、环境影响大、韧性提升有限，难以满足快速修复、强韧耐久和绿色低碳的要求[24]。为此，必须攻克以下关键技术问题：(1)研发适用于复杂恶劣环境、高可靠、长寿命、智能化的治理工程全生命周期检测监测传感技术、网络传输技术与智能诊断预警技术及装备；(2)构建基于大数据、人工智能、数字孪生的灾害工程数智化管控平台，突破多源信息融合、风险智能推演、治理效果动态可视化评估与优化决策的技术方法；(3)创新研发具有高强、轻

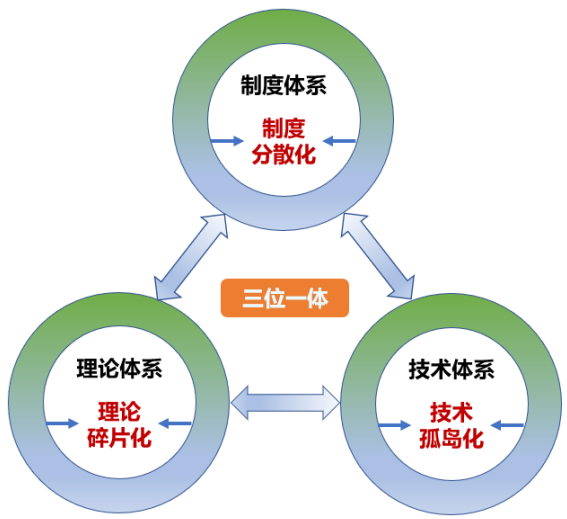


图1　三位一体的工程治理体系建设

Fig.1　Construction of a Three in One Engineering Governance System

质、耐久、环保特性的新型高性能材料，发展高效韧性加固结构体系和快速补强施工技术。同时，技术研发需要与理论突破相对应，重点发展针对不同灾害等级的技术解决方案：针对极端工况（如百年一遇灾害）研发高韧性防护技术；针对重大灾害（如十年一遇灾害）研发可快速修复技术；针对一般灾害研发经济高效的防治技术。

1.3 工程治理制度体系瓶颈

工程治理效能最大化离不开健全的制度体系支撑，而其同样面临严峻挑战：（1）专门针对自然灾害工程治理的综合性法规缺位，现有技术标准体系庞杂、交叉重复甚至冲突，导致工程规划、设计、施工、验收和管护缺乏统一、权威的依据[25]。（2）现行治理模式多聚焦单体工程、单一灾种、事后应对，对灾害链效应（如“滑坡—堰塞湖—溃决洪水”）、流域系统性和跨行政区域协同治理考虑不足，“头痛医头、脚痛医脚”现象突出。（3）工程治理涉及多部门，职责交叉与条块分割并存，统筹协调机制不畅；工程建后运维管理责任不明、投入不足、专业化水平低，常态化管理机制亟需完善[26]。因此，制度体系建设应重点聚焦：（1）系统梳理整合现有标准，制定覆盖工程全生命周期的综合性技术规范体系，不断开展应用示范与推广，验证新技术、新标准的有效性；（2）深入探索区域协同治理模式与制度安排，提出适应不同区域特点的灾害防治综合范式与区域韧性系统性提升技术路径；（3）健全覆盖规划、建设、验收、移交、运维、更新全过程的工程运行管理机制，推动完善国家层面的自然灾害防治法或相关法律法规，为体系建设提供法律保障。同时，借鉴全国地震区划与工程安评的思路，以活动构造理论与地震动响应等基础理论为依据，将全国的工程地质条件对应划分为不同区域，按照“区域—场地—城镇”等思路从空间上逐步细化，制定差异化的制度标准体系。

1.4 工程治理体系建设目标

自然灾害工程治理体系建设的总体目标为：揭示工程—地质环境互馈机理和系统韧性原理，推动专业系统重构、生态智慧融合、标准规范赋能的三重深刻变革，构建具备自适应、自诊断、自修复能力、能有效应对极端气候事件与复杂地质条件挑战的生态化、智能化地质灾害工程治理体系，显著提升国家自然灾害防御韧性和安全屏障水平。其具体目标如下：

（1）理论体系目标：揭示工程结构/材料—地质体/地质环境相互作用机理，建立多尺度、多物理场耦合的理论模型，提高工程结构长期服役性能分析与安全性评价的理论水平，构建工程结构多尺度长期服役性能与安全性评价的评价体系及灾害工程韧性治理理论框架。

（2）技术体系目标：实现治理工程全生命周期监测诊断技术的智能化、精准化、网络化升级，研发覆盖全面、响应快速、诊断精准的技术装备体系，建成国家级或区域级灾害工程治理数智化系统平台，提出多源数据深度融合的风险智能评估与治理方案优化方法，研发轻型、强度高、耐久强、环境友好型的高性能绿色材料与韧性结构体系。

（3）制度体系目标：发布国家层面的自然灾害工程防治相关办法条例及相关配套法规；建立协调、先进、高效的技术标准体系，建立健全的、覆盖工程全生命周期的、权责明晰的常态化管理机制，强化部门协同与监督评估，保障工程长效运行。

2 工程治理理论体系建设

工程治理理论体系是自然灾害防治的基石，需系统整合工程、地质、社会等多学科相关理论，构建“相互作用机理—长期性能评价—韧性治理理论”体系框架（图2），为灾害防治工程提供全周期决策依据，为建立“极端灾害可防御、重大灾害可修复、一般灾害可防治”的分级治理框架提供支持。

2.1 工程结构/材料—地质体/地质环境相互作用机理

2.1.1 荷载传递与变形协调机理

工程结构/材料的安全稳定性本质上取决于其与地质体/地质环境的动态耦合关系。在荷载传递与变形协调层面，工程结构通过地基将自身重力及外部动力荷载传递至地质介质。因此，现代治理工程需基于地质力学参数反演与材料本构模型优化，建立“结构—地基”协同变形设计准则。

2.1.2 多场演化与相互作用机理

地质环境与工程结构的多场耦合演化是灾害链生的核心驱动因素。地质体在水—热—力—化学场作用下的物理化学性质变化，会显著改变其与结构的相互作用边界条件。因此，工程治理需先构建“地质体—结构—环境”多尺度耦合数值模型，量化环境变量对工程性能的敏感度阈值。

2.1.3 能量交换与耗散机理

能量交换与耗散机理则是工程抗震抗冲击设计的理论核心。当地震波或滑坡动能通过地基向结构传递时，能量的吸收、转化与耗散效率直接决定工程损毁程度。基于此，需通过建立能量平衡方程，优化结构抗灾设计阈值，例如在泥石流冲击区设置梯度耗能结构群，逐级削减流体动能。

2.2 长期服役性能安全性理论多尺度评价体系构建

2.2.1 评价指标体系

长期服役性能安全性理论多尺度评价体系构建需

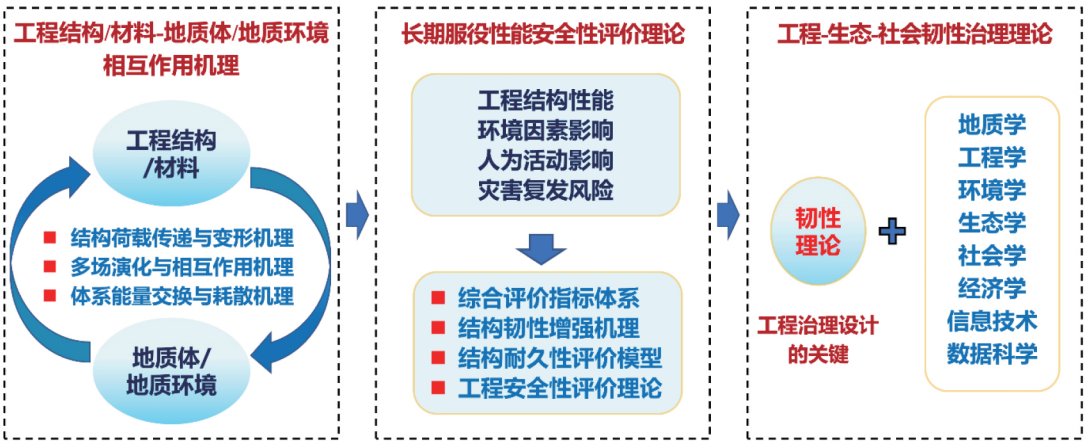


图2　工程治理理论体系建设

Fig.2　Construction of Engineering Governance Theory System

要考虑工程结构性能、环境因素影响、人为活动影响以及灾害复发风险等方面。这需从“材料—构件—工程—区域灾害链”四级尺度建立动态权重模型，构建评价指标体系：材料尺度关注微细观劣化指标，构件尺度侧重承载力衰减，工程尺度评估整体稳定性，区域尺度则需量化灾害链风险。

2.2.2　结构耐久性评价模型

结构韧性增强与耐久性评价的核心在于揭示材料劣化与性能衰减的关联。为提升工程韧性，以“主动防御型”耐久性设计理念为核心，采用微生物自修复混凝土等抑制材料劣化进程，植入传感器实时监测劣化速率，开发基于机器学习的剩余寿命预测算法，实现从“被动维修”到“主动防控”的范式转变。

2.2.3　工程安全性评价理论

工程安全性动态评价理论则依托于多源监测数据与智能算法的融合创新。通过建立基于卫星InSAR、无人机LiDAR及地面传感器网络的天—空—地一体化监测体系，可获取毫米级形变数据，构建长短期记忆(Long Short-Term Memory，LSTM)神经网络模型，提升位移加速突变点有效识别能力，并动态优化预警阈值，发展动态风险概率评价方法，推动工程管护从“经验决策”向“数据驱动”升级。

2.3　治理工程—生态—社会韧性治理理论

2.3.1　自然灾害工程韧性治理理论

现代灾害治理已超越单一工程安全范畴，需统筹生态修复与社会发展需求，形成“可适应—可恢复—可持续”的韧性治理范式，发展新型韧性结构，通过“损伤控制”理念实现功能可恢复性。

2.3.2　治理与社会韧性发展协同理论

工程与生态环境的协同治理是可持续发展的重要路径。通过揭示“工程结构稳定性—水文调节功能—生物多样性”的耦合关系，重建生物栖息地，实现灾害防治与生态修复的“双赢”的协同效应。

2.3.3　工程—生态环境治理理论

治理工程与社会韧性的协同发展则需兼顾风险规避与民生保障。基于灾害风险分区，制定差异化策略，在工程决策中纳入社会学参数，使治理方案兼具安全性与社会接受度。

2.3.4　评估与韧性治理智慧化管理理论

智慧化管理理论进一步赋能韧性治理效能。通过“数字孪生”等技术，构建虚拟治理工程系统，集成设计、环境、工程信息及舆情，形成“感知—分析—决策”闭环，推动灾害治理的智慧协同跃迁。

3　工程治理技术体系建设

工程治理技术体系建设通过材料、技术、装备研发与升级，形成“感知—决策—优化评估—长期服役”全过程工程治理闭环，推动工程治理向智能化、精准化、绿色化、韧性化方向发展(图3)。通过技术研发与理论突破结合，为不同灾害等级的技术解决方案提供技术支持。

3.1　全生命周期监测诊断技术及智能化装备

3.1.1　天空地一体化智能监测诊断技术

天空地一体化智能监测诊断技术，主要基于空天遥感监测层、地表移动监测层与地下传感网络层三个层次系统构建，实现三位一体的多维度实时动态监测[27,28]。

3.1.2　地质体结构监测探测系统

复杂地质体结构的表面形变可采用数字散斑相关法测量岩体表面位移场[29-31]。而内部结构可联合采用超声波、雷达等探测方法与建模技术，结合数值模型反演，实现对地质缺陷与灾害的超前识别。

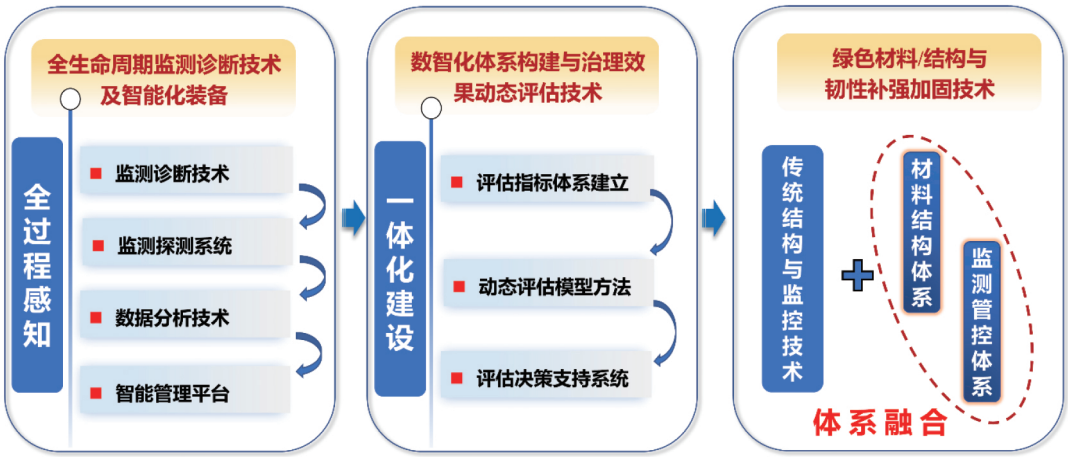


图3 工程治理技术体系建设

Fig.3 Construction of Engineering Governance Technology System

3.1.3 智能化数据处理与分析技术

智能化数据处理与分析技术通常通过开发工程案例数据库[32],构建特征提取算法,建立大数据分析引擎,并基于混合网络实现多源数据融合下的工程灾害预警。

3.1.4 全生命周期监测检测智能化管理平台

全生命周期监测检测智能化管理平台结合勘察阶段的钻孔勘探、加速度信号探测和现场观察等地质数据,建造阶段的激光扫描、摄影测量等[33]点云数据,运营阶段的形变、高敏加速度等传感数据,建立动态更新的数字孪生模型[34]。

3.2 数智化体系构建与治理效果动态评估技术

3.2.1 评估指标体系建立

评估指标包括治理工程本体安全性指标与环境适应性指标两类:本体安全性指标[35,36]主要为工程功能性指标,环境适应性指标[37,38]主要为气候响应与地震峰值加速度响应等灾害抵御指标。

3.2.2 动态评估模型方法

动态评估模型[29,32]可基于物理—数字耦合,建立实时评估模型;采用概率风险评估算法,开展病害图像识别或知识图谱推理进行智能识别,分析灾害发生的概率和可能造成的后果。

3.2.3 评估决策支持系统

利用人工智能技术,建立实时引擎预测突发荷载响应模型,综合评估治理效果,求解最优解集,建立决策支持系统,提供人工决策权衡。

3.3 绿色材料/结构与韧性补强加固技术

3.3.1 新型材料结构

新型材料结构为通过改变现有材料选配或制备工艺形成[39,40],突破材料在密度、抗侵蚀性等方面的性能;还可通过一体化浇筑、层压处理等施工方式[41]发挥新型材料的性能优势,增强工程治理效果。

3.3.2 生态—工程结构融合治理技术

生态—工程结构相融合的治理技术既要满足工程治理的绿色环保需求,还要满足工程治理的景观化需求。但值得关注的是,绿色材料虽能降低隐含碳,但其制备成本仍高于传统材料。

3.3.3 智能工程治理技术

充分考虑工程适配生态原理与人地互馈协调发展,引入基因工程材料,结合人工智能技术等,研发工程智能化治理技术方法,以提高治理效率与效果。

4 工程治理制度体系建设

工程治理制度体系建设重点从工程治理的重大科学与技术计划、治理规划统筹方法与体系和工程法规与工程标准体系进行建设(图4),为以活动构造理论与地震动响应等基础理论为依据的“区域—场地—城镇”差异化制度标准体系建设提供依据。

4.1 重大科学与技术计划

自然灾害工程治理相关的重大科学与技术计划,需重点关注基于自然灾害韧性的相关科学研究与技术突破。建议有关部门设立自然灾害韧性防治的机理和理论专项,以建立韧性理论和机理,指导实践,并针对韧性防治与装备研究设立专项,解决工科韧性防治中的装备难题,提升工程的装备建设能力,应对更加复杂和多变的自然灾害。

4.2 治理规划统筹方法与体系

4.2.1 城市自然灾害防治规划

城市自然灾害防治规划重点在于韧性城市建设。城市的韧性建设应当优化城市的空间布局,提升基础设



图4　工程治理制度体系建设

Fig.4　Construction of Engineering Governance Institutional System

施在遭受灾害时的抗打击能力，继续在灾害中发挥基本功能，让城市在遭受自然灾害时能够将灾害带来的影响降到最低，能够迅速从灾害中恢复，保持正常的社会秩序和经济秩序。

4.2.2　流域自然灾害防治规划

流域应当借助区域协同战略，流域内的各省对流域制定流域综合规划，省与省之间制定综合规划。需要注意的是，流域的汛情是自然灾害，特别关注山洪和泥石流对生态环境的损害。流域内的水库和堤坝需要根据流域水位的变化，及时开闸泄洪，避免承受过大的压力而导致溃坝。

4.3　工程法规和技术标准体系

工程法规和技术标准体系应当注重体系化、明晰化的规定，制定强制性标准，让其能够发挥作用。在工程法规方面，应当从技术规定层面完善法律法规，制定设计—施工—治理—安全性评价与调控一体化技术规范，明确责任主体和监管主体，划分责任主体的责任，明确监管主体的监管权限与责任。在技术标准方面，应当建议先制定强制性标准，特别是针对灾害发生前能够采取的措施，以预防灾害的发生，提高工程应对灾害的能力，减少灾害带来的损失。

5　理论—技术—制度体系共建

自然灾害工程治理体系的现代化建设需通过“理论筑基—技术突破—制度保障”三维闭环框架实现全域联动。理论体系揭示灾害演化规律与工程韧性机理，为技术体系和制度体系提供科学指引；技术体系驱动监测预警、材料研发与智能决策的跨越式升级；制度体系则通过政策协同与资源整合构建制度性保障。三者深度融合形成“基础研究→技术转化→工程应用→政策反馈”的创新链条，最终建成全域联动的自然灾害韧性工程屏障。

体系建设需分阶段推进，基于“近—中—远”三期目标制定阶梯式实施路径。短期目标(2025—2030年)：依托智能化监测装备与数智化评估平台，以提高灾害工程治理效率，通过标准化设计、绿色材料规模化应用降低治理成本。中期目标(2031—2035年)：在重点区域建成10个韧性城市示范项目，通过“工程—生态”协同治理技术和链式灾害防控体系，降低区域灾害风险。长期目标(2036—2050年)：形成全球引领性的自然灾害工程治理“中国方案”，输出包含理论标准、技术装备和制度范式的完整体系，支撑全球防灾减灾。

体系建设需强化跨部门协同，破解“数据孤岛”与“管理碎片化”瓶颈，构建“一平台、两协同”机制。构建国家级自然灾害工程治理云平台，实现数据共享，提升灾害案例、监测数据、工程图纸的跨部门调取效率。建立“规划—建设—运维”全周期标准化流程，明确各部门权责边界，完善资源协同机制。

体系建设需注重资金多源头融合，创新“科技投入—市场运作—保险托底”三位一体资金保障体系。进一步坚实国家灾害治理科技创新专项基金，重点支持基础理论和卡脖子技术研发。可推广“政府—社会资本合作(Public-Private-Partnership，PPP)”项目，通过特许经营、绩效付费等方式吸引社会资本。可探索建立财政补贴的强制性巨灾保险，采用“基础保费+风险附加费”分层设计，完善巨灾保险制度。

6　结　论

针对我国自然灾害工程治理体系中存在的理论碎

片化、技术孤岛化与制度分散化等瓶颈，提出了构建“理论—技术—制度”三位一体的工程治理体系框架。主要结论如下：

(1)理论体系建设需要聚焦工程结构/材料—地质体/地质环境相互作用机理、长期服役性能安全性理论多尺度评价体系构建、治理工程—生态—社会韧性评价理论，为工程治理提供科学基础。

(2)技术体系建设需要突破全生命周期监测诊断技术及智能化装备、数智化体系构建与治理效果动态评估、高性能材料结构与韧性补强加固等关键技术，实现工程治理的智能化、精准化和绿色化。

(3)制度体系建设需要完善重大科学与技术计划、治理规划统筹方法与体系、工程法规和技术标准体系，为工程治理提供制度保障。

(4)理论、技术、制度三者需要形成“基础研究—技术转化—工程应用—政策反馈”的创新链条，通过分阶段实施、跨部门协同和多源头资金融合，最终建成全域联动的自然灾害韧性工程屏障。

参 考 文 献

[1] 崔鹏，王岩，张国涛，等. 气候变化灾害风险防范：现状、挑战与科学问题. 气候变化研究进展，2025，21(4)：449—460.
Cui P，Wang Y，Zhang GT，et al. Disaster risk prevention under climate change：Current status，challenges，and scientific issues. Climate Change Research，2025，21(4)：449—460. (in Chinese)

[2] 彭建兵，马润勇，范文，等. 汶川大震的科学思考. 地球科学与环境学报，2009，31(1)：1—29.
Peng JB，Ma RY，Fan W，et al. Science contemplation for Wenchuan Earthquake of 12 May，2008. Journal of Earth Sciences and Environment，2009，31(1)：1—29. (in Chinese)

[3] 李莹，赵珊珊. 2001—2020年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究. 气候变化研究进展，2022，18(2)：154—165.
Li Y，Zhao SS. Floods losses and hazards in China from 2001 to 2020. Climate Change Research，2022，18 (2)：154—165. (in Chinese)

[4] 中华人民共和国应急管理部. 2024年全国自然灾害基本情况. (2025-01-17)/[2025-07-07]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202501/t20250117_516032.shtml.

[5] 中华人民共和国自然资源部. 2024年中国自然资源公报. (2025-03-14)/[2025-07-07]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202503/t20250314_2881925.html.

[6] 徐翔宇，周夏飞，王文松，等. 中国自然灾害次生突发环境事件特征分析. 地质灾害与环境保护，2025，36(1)：121—128.
Xu XY，Zhou XF，Wang WS，et al. Analysis of characteristics of secondary unexpected environmental occurrence induced by natural disasters in China. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation，2025，36(1)：121—128. (in Chinese)

[7] UNISDR. Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030. Geneva，Switzerland：United Nations Office for Disaster Risk Reduction，2015.

[8] 史培军，李宁，叶谦，等. 全球环境变化与综合灾害风险防范研究. 地球科学进展，2009，24(4)：428—435.
Shi PJ，Li N，Ye Q，et al. Research on global environmental change and integrated disaster risk governance research. Advances in Earth Science，2009，24(4)：428—435. (in Chinese)

[9] 张玉磊. 中国公共危机治理模式的发展演变与变革取向——基于应急管理体系发展史的考察. 江汉学术，2021，40(4)：34—43.
Zhang YL. The development and change of public crisis governance model in China：A survey based on the development history of emergency management system. Jianghan Academic，2021，40(4)：34—43. (in Chinese)

[10] 新华网. 习近平主持召开中央财经委员会第三次会议 研究提高自然灾害防治能力问题. (2018-10-10)/[2025-07-07]. https://www.xinhuanet.com/politics/2018-10/10/c_1123541018.htm.

[11] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平：高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告. (2022-10-25)/[2025-07-07]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.

[12] Wang Q，Hu XL，Zheng WB，et al. Mechanical properties and permeability evolution of red sandstone subjected to hydro-mechanical coupling：Experiment and discrete element modelling. Rock Mechanics and Rock Engineering，2021，54(5)：2405—2423.

[13] Liu C，Hu XL，Zheng HC，et al. Response of landslide deformation to flood and impoundment of the Dahuaqiao Reservoir：Characteristics and mechanisms. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2024，83(9)：350.

[14] Zhang HY，Hu XL，Li LX，et al. Multi-scale investigation on staged deterioration mechanism of sliding-zone soils induced by reservoir fluctuations. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2025，17(4)：2539—2551.

[15] Wang X，Hu XL，Xu C，et al. Probabilistic stability analyses of the landslide-stabilizing piles system considering the spatial variability of geotechnical parameters. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2024，83(9)：345.

[16] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的研究与应用. 中国科学基金，2005，19(1)：8—12.
Ou JP. Research and practice of smart sensor networks and health monitoring systems for civil infrastructures in China’s mainland. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2005，19(1)：8—12. (in Chinese)

[17] 李之尧，柴子曈. 国内韧性治理研究热点与未来展望——基于CSSCI(2015—2022)的可视化分析. 河南教育学院学报(哲学社会科学版)，2022，41(4)：77—81.
Li ZY，Chai ZT. Research hotspots and future prospects of resilience governance in China——Visual analysis based on CSSCI (2015—2022). Journal of Henan Institute of Education (Philosophy and Social Sciences Edition)，2022，41(4)：77—81. (in Chinese)

[18] Hu XL，Tan FL，Tang HM，et al. *In-situ* monitoring platform and preliminary analysis of monitoring data of Majiagou landslide with stabilizing piles. Engineering Geology，2017，228：323—336.

[19] Liu DZ，Hu XL，Zhou C，et al. Deformation mechanisms and evolution of a pile-reinforced landslide under long-term reservoir operation. Engineering Geology，2020，275：105747.

[20] 郭广彬，田婷，周忠国，等. 水库滑坡致灾机理及风险防控研究进展

与展望. 海河水利,2025(4):85—90.
Guo GB,Tian T,Zhou ZG,et al. Research progress and prospect of disaster mechanism and risk control of reservoir landslide. Haihe Water Resources,2025(4):85—90. (in Chinese)

[21] 孙东亚,刘昌军,何秉顺,等. 山洪灾害防治理论技术研究进展. 中国防汛抗旱,2022,32(1):24—33.
Sun DY,Liu CJ,He BS,et al. Research progress on flash flood disaster control theory and technology. China Flood & Drought Management,2022,32(1):24—33. (in Chinese)

[22] 雷鹰,刘丽君,郑翥鹏. 结构健康监测若干方法与技术研究进展综述. 厦门大学学报(自然科学版),2021,60(3):630—640.
Lei Y,Liu LJ,Zheng XP. Review on the developments of some methods and techniques in structural health monitoring. Xiamen Univ Nat Sei,2021,60(3):630—640. (in Chinese)

[23] 王宝恩. 强化流域治理管理 推动新阶段珠江水利高质量发展. 人民珠江,2022,43(3):1—9.
Wang BE. Strengthening river basin management and promoting high-quality development of the pearl river water conservancy in the new stage. Pearl River,2022,43(3):1—9. (in Chinese)

[24] 高佳宁,袁国柱,由婷婷,等. 提升公路交通基础设施韧性技术和策略研究. 城市道桥与防洪,2025(2):7—10.
Gao JN,Yuan GZ,You TT,et al. Research on technology and strategy of improving resilience of highway transportation infrastructures. Urban Roads Bridges & Flood Control,2025(2):7—10. (in Chinese)

[25] 孔锋,康欣蕊,王一飞. 交叉学科视角下的综合灾害风险防范凝聚力模式与优化路径. 灾害学,2024,39(3):1—8.
Kong F,Kang XR,Wang YF. Consilience mode and optimization path of comprehensive disaster risk governance from an interdisciplinary perspective. Journal of Catastrophology,2024,39(3):1—8. (in Chinese)

[26] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于印发国家综合防灾减灾规划(2016—2020年)的通知. (2017-01-13)/[2025-07-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2017-01/13/content_5159459.htm.

[27] Visser SJ,Dawood AS. Real-time natural disasters detection and monitoring from smart earth observation satellite. Journal of Aerospace Engineering,2004,17(1):10—19.

[28] Zhang H,Li QM,Wang JC,et al. Application of space–sky–earth integration technology with UAVs in risk identification of tailings ponds. Drones,2023,7(4):222.

[29] Feng Q,Fardin N,Jing L,et al. A new method for *in situ* non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces. Rock Mechanics and Rock Engineering,2003,36(1):3—25.

[30] Volk R,Stengel J,Schultmann F. Building information modeling (BIM) for existing buildings—literature review and future needs. Automation in Construction,2014,38:109—127.

[31] Yang H,Xu XY. Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure. Composite Structures,2021,276:114565.

[32] Wang JX,Tang SB,Heap MJ,et al. An auto-detection network to provide an automated real-time early warning of rock engineering hazards using microseismic monitoring. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,140:104685.

[33] Hegarty CJ. GNSS signals—an overview. 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. Baltimore,MD,USA. IEEE,2012:1—7.

[34] Gagliardi V,Tosti F,Bianchini Ciampoli L,et al. Satellite remote sensing and non-destructive testing methods for transport infrastructure monitoring:Advances,challenges and perspectives. Remote Sensing,2023,15(2):418.

[35] Atencio E,Mancini M,Bustos G. Ontology-based integration of enterprise architecture and project management:A systems thinking approach for project-based organizations in the architecture,engineering,and construction sector. Systems,2025,13(6):477.

[36] Hudson JA. Design methodology for the safety of underground rock engineering. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2012,4(3):205—214.

[37] Huang SB,Liu QS,Cheng AP,et al. A statistical damage constitutive model under freeze-thaw and loading for rock and its engineering application. Cold Regions Science and Technology,2018,145:142—150.

[38] Pan XK,Zhou XP. Creep damage properties and nonlinear creep model of red sandstone treated at high temperature based on acoustic emission. Acta Geotechnica,2023,18(8):4077—4095.

[39] Li Y,Zhang JP,He YZ,et al. A review on durability of basalt fiber reinforced concrete. Composites Science and Technology,2022,225:109519.

[40] Huang XH,Su SY,Xu ZD,et al. Advanced composite materials for structure strengthening and resilience improvement. Buildings,2023,13(10):2406.

[41] Mendoza Reales OA,Dias Toledo Filho R. A review on the chemical,mechanical and microstructural characterization of carbon nanotubes-cement based composites. Construction and Building Materials,2017,154:697—710.

The Engineering Governance System of Natural Disaster

Xinli Hu[1] Zhen Liu[2*] Huayong Chen[3*] Deke Luo[4] Wei Li[1] Guangjun Cui[2]

1. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*
2. *Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Disaster Prevention and Mitigation Academy of Sciences, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*
3. *State Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China*
4. *Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University-The Hong Kong Polytechnic University, Chengdu 610207, China*

Abstract China faces a wide range of natural disasters that pose significant threats, making engineering governance complex and challenging. Addressing the bottlenecks in natural disaster engineering governance, such as fragmented theories, isolated technologies, and decentralized systems, this paper proposes the construction of a "theory-technology-institution" three-in-one natural disaster engineering governance system. The theoretical system focuses on the interaction mechanism between engineering structures/materials and geological bodies/geological environment, the construction of a multi-scale evaluation system for long-term service performance safety theory, and the governance engineering-ecological-social resilience evaluation theory. The technological system focuses on full-life cycle monitoring and diagnostic technologies and intelligent equipment, the construction of digital and intelligent systems and dynamic evaluation technologies for governance effects, as well as high-performance green materials/structures and toughness reinforcement and strengthening technologies. The institutional system aims to upgrade and improve major science and technology plans, overall planning methods and systems for governance, and engineering regulations and technical standards systems. By constructing a three-dimensional closed-loop framework of "theoretical foundation-technological breakthrough-institutional guarantee" for the natural disaster engineering governance system, we will advance construction in stages, strengthen cross-departmental collaboration, integrating funds from multiple sources, and form an innovative chain of "basic research-technology transformation-engineering application-policy feedback". This will establish a comprehensive and interconnected natural disaster resilience engineering barrier, significantly enhancing the overall level of disaster prevention and mitigation.

Keywords natural disaster engineering governance system; theoretical system; technical system; institutional system; system co-construction

胡新丽 中国地质大学(武汉)教授,自然资源部科技领军人才。现任中国地质学会地质灾害分会副主任、工程地质专业委员会委员。主要研究方向为岩土体—防治结构相互作用与长期安全性评价。获国家科学技术进步奖二等奖3项。

刘 镇 广东工业大学教授,广东省科技创新青年拔尖人才。兼任中国岩石力学与工程学会理事,红层工程分会秘书长,软岩工程与深部灾害控制分会副理事长,工程地质专业委员会委员。主要研究方向为工程地质体界面系统与灾变防控。

陈华勇 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所研究员,四川省重大地质灾害技术支撑专家。主持国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点、面上及青年项目多项。主要从事堰塞湖溃决机理、泥石流运动机理与工程防治等方面研究。

(责任编辑 贾祖冰 张 强)

* Corresponding Authors, Email: liuzh8@mail.sysu.edu.cn; hychen@imde.ac.cn