

引用格式：崔鹏, 杨永平, 王根绪, 等. 云贵川渝生态安全屏障建设的科技挑战与发展方向. 中国科学院院刊, 2025, 40(6): 980-990, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250518002.

Cui P, Yang Y P, Wang G X, et al. Technological challenges and development directions of ecological security barrier construction in Yun-Gui-Chuan-Yu region. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(6): 980-990, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250518002. (in Chinese)

云贵川渝生态安全屏障建设的科技挑战与发展方向

崔鹏^{1*} 杨永平² 王根绪³ 朱波¹ 鲁旭阳¹ 孙庚⁴ 白晓永⁵ 张思蕊⁵ 葛永刚¹ 王姣¹

1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610213

2 中国科学院西双版纳热带植物园 勐腊 666303

3 四川大学 水利水电学院 成都 610065

4 中国科学院成都生物研究所 成都 610213

5 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002

摘要 云贵川渝生态屏障区位于我国西南地区，是长江、黄河、珠江等流域的重要水源涵养地和生物多样性保护核心区，在国家生态安全格局中具有关键地位。党的十八大以来，在习近平生态文明思想指引下，该区域在生态系统修复与生态屏障建设、生物多样性保护、水土流失和山地灾害防控、水文水资源等方面取得了显著成效，环境质量和生态系统服务功能得到明显改善。然而，该区域目前仍面临气候变化背景下水环境面源污染加剧、生物多样性保护机制不完善、石漠化扩散及山地灾害风险增高等多重挑战。为实现区域生态安全和可持续发展目标，需要进一步加强科技支撑，完善空—天—地一体化监测体系，深入研究水土气生灾等多要素耦合机制，探索山水林田湖草沙矿一体化修复模式，提升区域绿色减灾能力，推动生态产品价值转化和跨区域联动，促进人与自然和谐共生及高质量发展。文章系统分析了云贵川渝生态屏障区的水文水资源、生物多样性、生态系统保护修复、环境污染防治、气候变化应对、石漠化治理和山地灾害风险防控方面的现状、问题挑战，并针对性地提出发展方向和对策建议。

关键词 生态安全，水资源保护，生物多样性，生态系统修复，环境污染防治，气候变化，石漠化治理，灾害风险防控

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20250518002

CSTR 32128.14.CASbulletin.20250518002

*通信作者

资助项目：中国科学院科技智库理事会重大咨询项目（2021-LS02-C-025）

修改稿收到日期：2025年6月7日

云贵川渝生态屏障区位于中国西南地区，包括四川、重庆、贵州和云南4个省份，总面积约 $1.139 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，约占全国陆地总面积的11.9%。云贵川渝生态屏障区是长江、黄河、珠江等河流主要水源涵养地和重要水源补给地，是我国“两屏三带”生态安全格局的重要组成部分，是青藏高原生态屏障和黄土高原—川滇生态屏障的核心交汇区，也是全国重要生态系统保护和修复重大工程区之一，在筑牢长江、珠江上游与西部生态屏障建设中具有基础性、关键性和主体性作用^[1]。党的十八大以来，在习近平生态文明思想的指引下，云贵川渝生态屏障区的建设卓有成效，生态环境质量得到明显改善，城市空气优良天数增加，主要河流水质达标率显著提高；水土流失面积和强度持续降低，喀斯特地区石漠化问题得到明显改善；生态系统服务能力持续提升，城市生态建设能力持续增强，生物多样性保护取得巨大成绩；山地灾害防治成效显著，环境治理能力明显提升。

从区域高质量发展对生态环境的新要求视角看，云贵川渝生态屏障区仍面临诸多问题和挑战，包括气候变化条件下水资源开发利用与保护的矛盾加剧，水源地湖库水资源与水环境保护治理面临新挑战；生物多样性保护机遇和挑战并存，缺乏系统解决方案和部门间协同工作机制；环境污染形势严峻，缺乏有效科技支撑，区内水土流失问题依然突出，是区域安全与高质量发展的限制性因素；对部分物种类群和生态系统的保护恢复力度不足，欠缺整体规划和统一布局，多以植被覆盖率恢复为目标，未能实现山水林田湖草沙一体化修复；气候变化条件下出现新兴灾害风险，重大基础设施与工程安全面临灾害风险巨大挑战，区域高质量发展面临多发频发的自然灾害威胁。在新时代，云南、贵州、四川、重庆需要牢固树立“绿水青山就是金山银山”的发展理念和山水林田湖草沙一体化保护治理的思想，着眼于大生态、大环境、大系统，以绿色为底，统筹发展与安全，解决西南山地生态屏

障建设面临的亟待解决的重大问题，通过联合攻关，高标准规划、设计和建设生态屏障区，巩固生态保护和修复建设成果，维护国家生态安全，推动生态屏障区高质量发展。

本文概述云贵川渝生态屏障区水文水资源利用、生物多样性保护、生态系统保护修复、环境污染防治、气候变化应对与石漠化治理、山地灾害风险防控与绿色减灾共6个方面生态安全屏障建设的现状、存在问题、科技挑战和发展方向，并在此基础上提出从5个方面提升云贵川渝生态屏障区建设的对策建议。

1 水文水资源利用现状、问题挑战与发展方向

云贵川渝地区水资源禀赋的区位优势特殊，既肩负长江、珠江和黄河三大流域上游水安全重任，也承载国家水网建设的水资源战略后备重地和清洁水能资源基地等使命^[2]。根据《2019年中国水资源公报》，云贵川渝4个省份的水资源总量为 $5.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，供水总量为 $5.9 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，水资源开发利用程度很低，约为10%。因此，该区域丰沛的水资源和巨大的可利用潜力奠定了其作为保障国家水资源安全重要基地的核心地位。基于云贵川渝屏障区水资源重要性，自21世纪以来国家和地方持续开展了强有力的水资源保护工作，特别是2021年3月1日开始实施《中华人民共和国长江保护法》，长江大保护战略得以全面贯彻。目前，云贵川滇渝屏障区已经取得了十分显著的水资源保护成效，水污染得以根本性遏制，区域水环境整体明显提升；水资源利用效率不断提升，水灾害防治能力持续改善。

水电工程开发显著改变了河流的水文情势，河道总溶解气体过饱和、水库低温水改变了鱼类产卵节律等，威胁鱼类生存。当前，从流域层面出发，仍然缺乏水电工程梯级开发对河流生态系统累积影响的评估工作，长江上游水电工程梯级开发对河流生态系统的

累积影响规律尚不清晰。尽管云贵川渝地区水资源相对丰富，但水资源分布不平衡，供需矛盾不断加剧，其中成渝地区、滇中高原、黔中地区水资源供需矛盾突出，部分大中城市还存在各种类型的缺水现象，特别是工程型和水质型缺水问题相对突出。目前，长江上游水电资源开发利用程度较高，已接近70%左右，但风光资源开发利用程度很低，仅为12%左右。因此，科学部署云贵川渝地区水风光储多能互补利用，是保障国家能源安全和应对全球气候变化亟待解决的关键科技问题。云贵高原跨境河流较多，随着流域内各国经济社会发展和人口增长对水资源的需求逐渐增加，加之全球气候变化造成的影响，跨境河流水资源的冲突和矛盾不断加剧，跨境水安全与国家水权益保障也面临一系列挑战。珠江水系位于云贵川渝地区的河流主要包括南盘江、北盘江和红水河等，这些河流也长期存在水利基础设施薄弱，水资源供需矛盾突出、水资源供给与保障能力不足、水土流失严重、洪涝灾害频繁等问题。

面对以上问题和挑战，以国家长江流域大保护战略为核心，以筑牢云贵川渝生态屏障为目标，大力推进以下领域的科技创新突破。① 近期。围绕云贵川渝区域水资源供需平衡、水生态和水环境持续改善、水源涵养功能持续优化、水资源多目标协同高效利用，优先考虑解决工程型缺水和水资源利用不合理顽疾；推进西南屏障区水生态与水环境持续优化、风光水储多能互补综合开发利用协同发展，加大水源涵养功能修复和提升、水灾害综合防治与生态治理力度；建立健全云贵川渝内外交互的流域横向生态补偿机制和成渝地区双城经济圈水资源安全保障机制。② 中远期。综合考虑南水北调西线等跨流域调水工程规划，云贵川渝国家水网规划和国家清洁能源基地建设等目标，

在流域水—粮—能—生态互馈权衡机制与适应性管理、水土流失综合治理与水灾害高效防控技术体系，以及国际河流水资源保护与可持续协作利用等方面取得突破性进展；保障重点河湖水生态修复与水环境持续优化，全面提升云贵川渝地区生态屏障的水安全保障能力和长江经济带绿色高质量发展的水资源多目标协调供给能力。

2 生物多样性保护现状、问题挑战与发展方向

云贵川渝生态屏障区拥有丰富的生物多样性，以及众多的国家重点保护野生动植物和特有物种，是全球公认的生物多样性热点地区，也是我国生物多样性保护的核心区。在全球公认的36个生物多样性热点地区中，云贵川渝生态屏障区涉及3个，即中国西南山地、东喜马拉雅和印缅地区^[3,4]。其中，四川西部和云南西北部隶属于中国西南山地生物多样性热点区，拥有我国50%的鸟类和哺乳动物，以及30%以上的高等植物，分布有大熊猫、滇金丝猴、怒江金丝猴、黑颈鹤等明星物种。云南南部和西南部隶属于印缅生物多样性热点区，拥有我国热带地区典型生物多样性和国家重点保护野生动植物，如望天树、华盖木、亚洲象、印度野牛、印支虎、绿孔雀等旗舰物种。云贵川渝拥有最多的国家生物多样性保护优先区域，范围涵盖羌塘—三江源、横断山南段、岷山—横断山北段、桂西黔南石灰岩、南岭、武陵山、大巴山、西双版纳9个生物多样性保护优先区域，是国家重点保护野生动植物和国家级自然保护区的集中分布地。

近年来，云贵川渝在生物多样性保护方面取得巨大成绩。① 云南省。在全国率先颁布了《云南省生物多样性保护条例》^①，成功举办联合国《生物多样性

① 云南省生态环境等. 云南省生物多样性保护战略与行动计划(2024—2030年). (2024-05-20)[2025-06-06]. https://sthjt.yn.gov.cn/zrst/swdyxbh/202405/t20240531_238763.html.

公约》缔约方大会第十五次会议（COP15）第一阶段会议，深度参与第二阶段会议。建成333处自然保护地和85个民族传统文化生态保护区，建成亚洲第一、全球第二的中国西南野生生物种质资源库，实施了极小种群野生动植物拯救保护项目120多个，突破了36个物种的人工繁育关键技术，珍稀濒危物种种群得到有效保护和恢复。^② ② 四川省。制定和修订《四川省大熊猫国家公园管理条例》等一系列地方性法规，正在全力推进大熊猫国家公园建设，建成自然保护区165处和各类自然公园320处，实施天然林资源保护、草原保护修复、荒漠化治理等多项工程，大熊猫从濒危降为易危，极小种群植物野外回归和攀枝花苏铁等物种迁地保护成效显著^②。③ 贵州省。建成包括自然保护区、森林公园等自然保护地314个，成功实施了武陵山区山水林田湖草沙一体化保护和修复工程，开展黔金丝猴等珍稀濒危野生动物、白花兜兰等极小种群植物的保护^③。④ 重庆市。建成自然保护地218处，有效保护了90%以上珍稀濒危野生动植物和90%以上典型的亚热带常绿阔叶林生态系统，实施三峡库区腹心地帶山水林田湖草沙一体化保护修复等重大工程，建成银杉、水杉扩繁基地7个和保护鱼类收容救护中心4个^④。

当前，云贵川渝的生物多样性保护的突出问题是部分物种栖息地（生境）被侵占或破坏，种群数量下降和生境恶化的趋势没有得到有效缓解和控制，部分极小种群野生植物和大型野生动物的灭绝风险加大。气候变化和人类活动背景下的生物多样性保护难度加大，生物资源利用和生态产品价值评价、实现路径有

待完善。科技支撑云贵川渝生态屏障区生物多样性保护的总体方向，就是要加强生物多样性空—天—地—体化监测体系和综合信息平台建设，加大气候变化和生物多样性保护协同增效的理论创新和关键技术研发力度，持续开展重要生态系统、生物物种及遗传资源有效保护研究，保障区域生物安全和生态安全。开展生物资源可持续利用和生态产品价值实现的科学研究，推动生产和生活方式的绿色低碳转型，实现生物多样性保护和高质量发展双赢，全面提升区域生物多样性治理水平，为全面落实我国《关于进一步加强生物多样性保护的意见》和“昆明—蒙特利尔全球生物多样性框架”，为建设美丽中国 and 人与自然和谐共生的中国式现代化作出贡献。

3 生态系统保护修复现状、问题挑战与发展方向

云贵川渝生态屏障区包括6个国家重点生态功能区，是国家生态安全的重要屏障。2020年，国家做出推动成渝地区双城经济圈建设、打造高质量发展重要增长极的重大决策部署；同年，国家发展和改革委员会、自然资源部关于印发《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035年）》的通知，长江重点生态区（含川滇生态屏障）和黄河重点生态区（含黄土高原生态屏障）是该规划的重点区和关键区^[5]。党的十八大以来，随着一系列政策的规划、落实，云贵川渝生态屏障区生态环境呈现历史性、转折性、全局性好转。但是，由于自然生态系统的脆弱性，以及气候变化和人类活动等多重因子的干扰，生

② 四川省林业和草原局. 保护生物多样性建设美丽四川新闻发布会. (2023-07-25)[2025-06-06]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10705/10707/2023/7/25/cd1fd8dc2b164f0e9b100e778fd29b3a.shtml?version=zzzh>.

③ 贵州省生态环境厅. 贵州省生态环境厅关于《贵州省生物多样性保护战略与行动计划(2024-2030年)(征求意见稿)》公开征求意见建议的通知. (2025-01-20)[2025-06-06]. https://sthj.guizhou.gov.cn/xwzx/tzgg/202501/t20250120_86654235.html.

④ 重庆市生态环境局. 重庆市生物多样性保护情况新闻发布会. (2024-05-21)[2025-06-06]. https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/xwfb_67131/202406/t20240626_13323554_wap.html.

态环境保护结构性、根源性、趋势性压力尚未根本缓解，退化生态系统修复工作仍然任重道远。

在美丽中国建设和高质量发展的新形势和新需求下，云贵川渝生态屏障区生态保护修复工作主要面临如下问题和挑战。① 对部分生态系统和物种栖息地的保护恢复力度不足，欠缺整体规划和统一布局。对生态系统的完整性和自然地理单元的连续性认识不足，没有在识别重要的生态功能区、敏感脆弱区、保护优先区、生态廊道等的基础上进行规划和布局。不同类型保护地空间重叠，保护地设置破碎化和孤岛化，保护地网络连通性差。对河流、湖泊、干热河谷等生态系统类型，以及重大交通和基础设施建设工程场地的生态保护修复重视不足。同时，生态保护修复工程长期处于低投入、低水平建设模式，“一阵风”式的保护修复现象没有完全避免。保护与修复的监测缺乏系统规划，交叉重复和空缺现象普遍。② 多以植被覆盖率恢复为目标，未能实现山水林田湖草沙一体化修复。片面追求数量和面积指标，仅仅关注植被覆盖率、生产力等单一生态要素，忽视群落结构的恢复和优化，水源涵养、固碳等区域重要生态系统服务功能的提升成效不明显。以单个生态系统类型修复为主，未能实现山水林田湖草沙一体化修复。对于山水林田湖草沙作为生命共同体的内在机理和规律认识不够，各类生态系统治理自行其是、各类建设工程条块分割；不同部门、不同工程、不同资金项目在同一地块相互交叉、相互重叠，不但未形成合力，有时反而相互抵消治理效果甚至形成新的破坏，权责对等的管理体制和协调联动机制尚未建立。③ 保护修复与经济发

济增长，不合理的开发利用活动大量挤占和破坏生态空间，多个地方存在“绿水青山”无法转换成“金山银山”的现实困难，保护修复与经济矛盾的矛盾没有根本缓解。

面对以上问题和挑战，按照节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针，以提高生态系统质量和功能为核心，以解决云贵川渝区域突出生态问题为重点，订立如下的发展目标和重点方向。① 短期。以保障区域生态安全、提升重点区域生态质量为目标，重点揭示云贵川渝生态屏障区典型生态系统生态功能的维持机制及其对全球气候变化的响应，研究各类生态系统多功能提升机制及其应用技术，研发碳汇调控与科学管理技术；分析生态系统服务流和网络构成，揭示区域、景观尺度和生态界面上的生态要素流动、变化规律与调控机制；系统评估区域生态工程和自然保护地的保护修复成效，升级生态保护恢复网络体系。② 中期。以全面提升生态系统质量、增强生态产品的供给能力为目标，重点研发和集成生态屏障区山水林田湖草沙（漠化区域）矿（山）一体化修复技术，实现重点区域生态系统功能明显提升；突破生态屏障建设理论和技术，在区域尺度共建共享生态屏障，大幅提升本区域对下游和全国的生态屏障贡献度和服务水平；建立区域特色的生态产品价值实现和转化典型案例，科学进行生态系统服务价值评价，完善和实施科学的生态补偿机制。③ 长期。以实现云贵川渝地区人与自然和谐相处为目标，重点结合基因编辑、人工智能、大数据等先进技术手段，探索生态保护修复领域的颠覆性技术；从根本上破解保护与发展矛盾的困局，实现川滇生态屏障区可持续发展；完全实现“绿水青山就是金山银山”的理念，在西南山地广袤土地上实践生态产品价值的转化；与世界共享“人与自然和谐共生”的理念和智慧，为全球持续发展提供优质和可借鉴的中国方案。

4 污染防治现状、问题挑战与发展方向

党的十八大以来,我国生态环境保护取得举世瞩目的巨大成就,持续推进大气、水、土壤三大污染的污染防治攻坚战。至2020年,云贵川渝环境空气质量总体优良,空气质量优良天数比例较2017年上升了5个百分点;断面水质优良(达到Ⅲ类水及以上水质类别),比例比2017年上升12个百分点,长江干流常年保持Ⅱ类水质;云贵川渝土壤环境质量总体稳定,受污染耕地安全利用率均在95%以上,污染地块安全利用率100%。

但云贵川渝地区特殊的地理位置和复杂的生态系统特征,使得云贵川渝地区生态环境比较脆弱。由于山地自然生态的脆弱性和长期不合理开发等人为因素的影响,导致部分地区生态和环境退化,大气、土壤、水环境污染治理还存在一些瓶颈问题亟待解决,成为制约地区和长江流域经济社会发展的重要因素,与高质量发展的新形势和新需求不相适应。具体表现在:云贵川渝作为“长江流域生态大保护”的主战场,农业农村面源污染已上升为流域水污染的主要矛盾,加之成渝大型城市群的流域高负荷磷与新污染物等,严重威胁长江流域水环境安全;区域内高地质背景与矿产资源开发导致的土壤污染问题依然突出;生态环境治理的整体性、系统性尚需加强。此外,系统间、流域间和区域间的联防联控还存在短板,特别是在水体、大气、土壤等跨界污染问题上,仍需持续推动建立和完善跨区域、跨流域、跨部门的环境保护协作机制,深入打好污染防治攻坚战,开展高水平实施“碧水”“蓝天”“净土”科技行动和加强新污染物管控与生态系统健康评估。这就需要进一步加强科技支撑,持续推进生态环境质量改善,促进经济社会高质量发展。

针对以上环境污染治理的瓶颈问题与科技挑战,应进行系统的科技布局:以实现减污降碳协同增效为

导向,以改善生态环境质量为核心,以高水平生态环境保护促进经济社会高质量跨越式发展为主线,考虑水、土、气、生四要素及其相互关系,突出流域水环境保护的重点方向,兼顾大气、土壤的环境保护和生态固碳等领域,以提升生态环境治理科技支撑能力为目标。①在水环境保护方向。明确重点河湖(长江、乌江、赤水河及滇池、洱海)的流域水环境治理、新污染物管控与水生态安全评估,把农业、农村面源污染防治作为重点,关注成渝大型城市群的流域治理和云贵高原湖泊的水环境保护,探索流域综合管理策略、新污染物来源、去向与预警,确保饮用水安全和水生态健康。②在大气环境保护方向。重点布局大型城市群雾霾的综合防控措施,关注跨区域联防联控机制;全面实施降污、提质增效和绿色固碳科技创新。③在土壤环境保护方向。把高背景地区重金属污染土壤的安全利用与风险管控作为重点,综合开展重金属、农药残留、有机污染物、新污染物等复杂土壤污染状况监测调查,研发高效轻简土壤污染修复技术和方法,突破西南山地土壤环境保育与特色生态高质农业关键技术。

同时,还应着力推动西南山地水土环境演变与流域综合治理、成渝大型城市群水环境安全与绿色发展协同、云贵川渝生态环境监测评估体系等重点科技任务。构建西南山地生态环境的空一天一地一体化监测体系,系统开展山地土壤—水分—植物界面过程与驱动机制、典型高原湖泊和长江上游重要水源地,以及成渝大型城市群的污染物源解析和归趋、环境生态效应与环境容量、全球变化下山地生态系统响应适应、都市—农村人地协调与功能提升机理/调控机制等方面的基础科学研究;研发流域水环境质量与水生态安全的绿色发展协同保障机制、敏感山地水土环境生态修复与生态清洁小流域建设关键技术,构建基于自然(近自然)解决方案与人工强化的“减源、增汇、截获、循环”的流域山水林田湖草沙的综合治理技术体系与

模式。**近期**，为长江上游流域水土环境治理和进一步打好蓝天、碧水、净土保卫战提供数据、技术和示范模式；**中期**，为推动云贵川渝地区大气、水土环境持续改善，实现长江干流长期维持Ⅱ类水、保障水生态安全提供强有力的科技支撑；**远期**，为推动云贵川渝地区的生态环境质量持续改善、西南秀美山地建设做出重大科技贡献，科技支撑筑牢绿色低碳高质量发展和美丽中国建设生态安全根基。

5 气候变化应对与石漠化治理现状、问题挑战与发展方向

云贵川渝生态屏障区因独特的喀斯特地貌、脆弱的生态系统和复杂的水文环境，正面临着气候变化和石漠化治理的双重挑战。这不仅对区域内的生态安全和经济社会发展构成了严重威胁，也给长江中下游地区的生态安全带来了潜在风险^[6]。近年来，中国石漠化治理依托科技支撑实现生态经济协同突破，全国石漠化土地面积持续缩减，年均缩减速率达7.72%，较上一调查周期增幅超71%，实现2005年以来连续3个调查期面积缩减幅度递增；植被覆盖总体水平提升至65.4%，生态改善型面积达退化型的12.08倍。但治理仍存在“水—岩—土—生—人”系统研究不足、监测体系碎片化、技术集成度低，以及喀斯特生物多样性与岩溶地质碳汇精准计量研究薄弱等问题。未来更面临气候变化加剧、云贵川渝协同机制缺位、人口超载与人地矛盾等挑战，亟须通过学科交叉、监测网络优化、技术攻关及区域协作，构建全链条治理体系。

在此背景下，构建以科技创新为核心的生态屏障保护体系，成为推动该区域石漠化治理提质增效与绿色发展的关键。总体目标分3个阶段推进：①**近期**，突破石漠化治理的关键技术，创建全球喀斯特地区可持续发展的模式与实践范式；②**中期**，创建系统性石漠化可持续治理技术体系，打造世界一流的喀斯特系统生态修复研究团队；③**远期**，完善喀斯特地球关键

带科学与人地系统耦合理论，形成生态保护与区域发展深度融合的中国方案。

科技支撑战略布局涵盖学科交叉创新体系、关键技术攻关方向和重大科技工程布局。通过构建跨学科交叉融合研究平台和新型科研管理体制机制，实现跨部门和跨学科交叉融合研究。重点发展喀斯特系统科学理论框架、石漠化治理应对气候变化的多维机制、重点河湖水环境治理与水生态修复、协同提升喀斯特脆弱生态系统服务功能等方向。在关键技术领域，聚焦厘清气候变化过程与趋势风险，建立石漠化地区靶向性—系统性治理措施，构建水土流失综合治理与绿色发展途径，研发岩溶地质碳汇精准计量与固碳增汇技术；揭示喀斯特生物多样性与生态系统服务形成机理，量化气候变化对喀斯特生态系统的正负影响；研发喀斯特生态脆弱和重大工程区保护修复技术，提出喀斯特脆弱生态环境保护与可持续发展的系统解决方案，从而科技支撑喀斯特地区的乡村振兴和美丽中国建设。为了实现以上科技目标，需要建设和完善高精度、高密度、长周期的监测—观测—预测—预警平台体系，建立喀斯特地理信息知识创新与可持续发展大数据中心，提供基础信息和数据支持，并实现生态安全数据的共享与利用。

依据科技支撑总体目标和战略布局，提出“四维协同”的系统性科技能力建设策略。①**学科交叉融合**。组建多学科创新团队，突破“水—岩—土—气—生—人”系统耦合研究瓶颈。②**平台体系优化**。构建空—天—地一体化监测体系与大数据平台，整合中国科学院、部委和地方现有各类监测站点和监测样地；形成跨机构跨部门之间的资源共享和协同联动监测机制，实现生态环境要素动态感知。③**技术攻关突破**。重点研发石漠化治理与动态监测、喀斯特可持续固碳增汇等核心技术，形成“基础研究—技术开发—工程示范”的全链条支持体系。④**区域协同治理**。建立云贵川渝4个省份的科技协作机制，整合云贵川渝科技

资源,建立协同创新网络,推动技术成果转化与示范应用。基于此,重点攻关喀斯特乡村振兴模式、气候变化的科学应对、生态脆弱区保护技术三大战略性重大科技问题,解决西南喀斯特地区气候变化趋势风险、石漠化治理与提质增效路径、水土流失综合治理与绿色发展途径、岩溶地质碳汇精准计量与固碳增汇、生物多样性时空变化诊断与维持提升、水源地湖泊适应性保护修复和气候变化对喀斯特生态系统的影响及优化调控等关键性科技问题。

6 山地灾害风险防控与绿色减灾现状、问题挑战与发展方向

云贵川渝地区乃至西南山地是我国自然环境条件最为复杂与特殊的区域,地震、崩塌、滑坡、山洪、泥石流、冰崩、雪崩、冰湖溃决、森林草原火灾与城市内涝等灾害相对国内其他区域发生频繁,是全国山地灾害活动最频繁、危害最严重、减灾难度最艰巨和风险挑战最大的区域^[7,8]。目前,面向区域山地灾害防治与风险防控重大需求及挑战,以中国科学院成都山地灾害与环境研究所、成都理工大学等为代表的科研院所、高校优势团队经过数十年努力,在山地灾害孕灾成灾致灾机理、风险评估、预测预报、监测预警、调控治理与应急减灾领域取得系列突破与成果。构建了山区线性工程(铁路、公路、输油输气管道等)、水电工程、山区城镇(含边境口岸)、风景区等山地灾害防治模式与技术体系,如将工程措施与生物措施的有机结合建立了泥石流综合治理的“东川模式”;结合生态修复和泥石流灾害治理的原则,九寨沟风景区创新性采用泥石流防治技术与景观修复技术,实现灾害防治与自然遗产保护的协同;贯彻绿色减灾与特色产业发展协同理念,研发生态措施—工程措施协同的绿色减灾关键技术,探索易灾山区的绿色产业发展路径与模式,建设了全国首个综合减灾与特色产业发展协同示范区,打造山区绿色发展“凉山模式”等。

尤其是2008年汶川大地震以来,以地震次生山地灾害为抓手,在突发性特大规模泥石流、高位崩塌、大规模滑坡和超大堰塞湖等山地灾害形成演化规律与防治技术方面取得重大进展,山地灾害防治技术模式进一步优化。技术成果在川藏铁路、川藏公路、中尼公路、成昆铁路、西气东输等重大交通和能源资源工程,溪洛渡、白鹤滩等大型水电工程的防灾减灾中得到广泛应用^[9]。

云贵川渝地区作为全球气候变化敏感区,极端气候事件发生的频率、强度尤为显著,与日趋活跃的人类活动共同作用,使得灾害影响、风险与损失更大。此外,21世纪以来全球进入地震活跃期,尤其是2008年汶川大地震后,我国7级以上强震全部发生在西部地区,内外动力耦合作用导致各类山地灾害群发性、突发性、复合性、链生性、非线性、新生性显著增强;且具有明显的时空拓展性和风险放大效应,造成山区城镇、旅游风景区、人口密集区和重大工程区灾害风险持续增强。尤其是巨灾和复合链生灾害风险成为山区安全保障的重中之重,跨领域灾害风险(自然灾害、生产事故等)的传递事件屡见不鲜,对跨灾种、跨区域、跨部门系统性防范化解灾害风险提出了新的挑战^[10,11]。同时,随着社会经济快速发展,山区城镇日趋扩展与人口日趋聚集居住,对国土空间安全保障提出了新的要求和挑战。区域高质量发展要求统筹安全与特色产业持续发展,要求实现绿色高水平高质量发展,对灾害风险防控、脆弱生态保护与特色产业发展协同提出前所未有的要求。为此,迫切需要实现灾害综合防治与区域发展深度融合,破解绿色减灾与可持续发展理论基础与技术瓶颈,支撑区域绿色高质量发展。

区域灾害风险防治能力代表着我国防范化解重大灾害风险的能力。面向云贵川渝地区乃至西部山区山地灾害活跃、生态环境脆弱与工程风险防控重大需求,聚焦气候变化、强震活动与人类活动强烈扰动条

件下山区巨灾与复合链生灾害突发频发、多发群发、非线性叠加放大等特点和灾害风险精准调控面临的科技难题与挑战，未来发展以下四大前沿领域方向：灾害风险超前感知与精准识别；风险模拟预测与精准预报预警；灾害全程调控与绿色减灾工程；重大工程全寿命周期风险防控。发挥防灾减灾救灾抗灾举国体制的优势，统筹协调国家、部委、地方政府与大型企业，设置重大科技专项和人才专项，推进“人才—平台—资源”一体化发展。构建“原型观测—实验测试—物理模拟—数值模拟—理论研究—技术研发科研”创新链和“理论创新—技术研发—集成示范—行业应用减灾技术”服务链融合的新型创新体系，建设野外台站与重大装置构成的科研平台支撑体系。面向山区减灾与工程安全，攻坚山地巨灾与复合链生灾害形成致灾科学问题和灾害风险感知识别、预测评估、预报预警、调控治理与应急减灾技术瓶颈，努力抢占防灾减灾科技制高点。构建山地灾害风险防控与工程安全防护技术体系，打造山区防灾减灾与工程安全融合的风险防范模式，全力推进工程减灾、生态减灾与特色产业融合的综合防灾减灾救灾模式。同时，推进产学研用创新研发中心和新型科研机构设立，努力探索创建公益性科研成果转移转化体制机制，推动科研链、创新链、业务链、价值链融通贯通；科学高效地支撑减灾实战，为筑牢西南生态安全屏障奠定坚实的安全基础，有效支撑全国生态安全，服务“平安中国”“一带一路”“人类命运共同体”建设。

7 对策建议

(1) 建立云贵川渝生态屏障建设关键核心区与灾害风险防控示范区。鉴于云贵川渝地区生态屏障建设和西南山地灾害风险防控对本地区高质量发展的根本性影响、对长江中下游经济社会发展的屏障作用，以及对构建“一带一路”和东南亚国家命运共同体的引领带动效应，建议党中央、国务院将云贵川渝生态屏

障区作为西部生态屏障建设的关键核心区和灾害风险防控示范区，将区域脆弱生态环境保护、灾害风险防控和重大工程安全防护等问题，纳入国家科技中长期规划和优先支持范围，给予持续性关注和倾斜性支持。统筹区域发展与安全，探索全过程科技创新服务新机制，构建支撑公益性科技挑战与需求问题破解的科研组织模式和成果转移转化模式，保障区域安全与高质量发展。

(2) 进一步加强生态屏障建设科技支撑能力建设。针对水安全、生物多样性、环境污染治理、生态系统保护、喀斯特环境保护和山地灾害风险防控等问题，系统推进野外观测站网、重大科研装置与科技创新平台体系建设。进行系统的顶层设计和科技布局，支撑重大基础科学问题与关键核心技术攻关，保障区域安全与发展。

(3) 建立云贵川渝地区水资源、生物多样性、气候变化、生态系统、环境污染、山地灾害科学数据库。推动建设云贵川渝地区资源环境与地球科学大数据平台，健全基础设施与科学数据动态更新维护机制。构建安全管理体系，分级管理和共享科学数据。在国家数据安全原则下最大限度扩大科学数据的服务成效，支撑科技攻关、政府决策、高等教育和公民科技素养提升。

(4) 实施和完善云贵川渝生态屏障科技资源与区域人才联合支持机制。突出高端人才与领军人才引进，建立复合型人才培养新模式，加强多学科交叉复合型人才培养。加大对优秀青年科技人才的发现、培养、使用和资助力度，尽快形成知识结构和年龄结构合理的、富于开拓创新和协同攻关精神的成建制科技队伍。

(5) 构建国际科技合作体系，支撑全球可持续发展与命运共同体建设。对标联合国可持续发展目标、巴黎气候协定和仙台减灾框架需求，建立“科教平台—科学计划—学术组织—科技论坛”国际科技合作体

系。促进高端科技“请进来”“走出去”，形成共享与协同攻关机制，支撑科技难题突破。为全球特别是“一带一路”共建国家和地区生态环境保护、自然灾害风险防控、经济社会高质量发展提供中国方案，服务人类命运共同体构建。

参考文献

- 李际. 筑牢国家西南生态安全屏障的对策建议. 林草政策研究, 2024, 4(3): 29-36.
- Li J. Suggestions on strengthening the ecological security barrier in Southwest China. Forestry and Grassland Policy Research, 2024, 4(3): 29-36. (in Chinese)
- 杨晓霖, 潘玉君, 李晓莉. 西南地区水资源生态足迹及承载力动态特征与预测分析. 西南师范大学学报(自然科学版), 2022, 47(6): 58-67.
- Yang X L, Pan Y J, Li X L. Dynamic characteristics and predictive analysis of water resource ecological footprint and carrying capacity in Southwest China. Journal of Southwest Normal University (Natural Science Edition), 2022, 47(6): 58-67. (in Chinese)
- 刘冬梅, 施济普, 李俊生, 等. 西南生态安全屏障战略视阈下云南生物多样性保护对策. 环境与可持续发展, 2017, 6: 26-29.
- Liu D M, Shi J P, Li J S, et al. Strategies for biodiversity protection in Yunnan under the strategic perspective of ecological security barrier in Southwest China. Environment and Sustainable Development, 2017, 6: 26-29. (in Chinese)
- 张纪华. 守好生物多样性宝库 筑牢西南生态安全屏障. 环境保护, 2019, 47(17): 63-66.
- Zhang J H. Protecting the biodiversity treasure and strengthening the ecological security barrier in Southwest China. Environmental Protection, 2019, 47(17): 63-66. (in Chinese)
- 刘兴良, 刘杉, 包维楷, 等. 西南地区森林生态安全屏障构建途径与对策. 陆地生态系统与保护学报, 2024, 2(5): 84-94.
- Liu X L, Liu S, Bao W K, et al. Approaches and strategies for building forest ecological security barrier in Southwest China. Journal of Terrestrial Ecosystems and Conservation, 2024, 2(5): 84-94. (in Chinese)
- 罗恒春, 魏安超. 西南地区石漠化研究概述. 热带农业科学, 2023, 43(11): 87-94.
- Luo H C, Wei A C. Overview of research on rocky desertification in Southwest China. Tropical Agricultural Science, 2023, 43(11): 87-94. (in Chinese)
- 崔鹏, 贾岩. 青藏高原山地灾害: 研究现状与展望. 国家科学评论, 2015, 2(4): 397-399.
- Cui P, Jia Y. Mountain hazards on the Qinghai-Tibet Plateau: Research status and prospects. National Science Review, 2015, 2(4): 397-399. (in Chinese)
- 崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策. 科学通报, 2015, 60(32): 3067-3077.
- Cui P, Su F H, Zou Q, et al. Risk assessment and mitigation strategies for mountain and meteorological hazards on the Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3067-3077. (in Chinese)
- 崔鹏, 葛永刚, 李建松, 等. 川藏铁路灾害风险减灾的科学挑战. 工程地质, 2022, 309: 106837.
- Cui P, Ge Y G, Li J S, et al. Scientific challenges in disaster risk reduction for the Sichuan-Tibet Railway. Engineering Geology, 2022, 309: 106837. (in Chinese)
- 崔鹏, 彭建兵, 石培基, 等. 自然灾害与灾害风险研究的科学挑战. 地理与可持续发展, 2021, 2(3): 216-223.
- Cui P, Peng J B, Shi P J, et al. Scientific challenges in natural disaster and disaster risk research. Geography and Sustainable Development, 2021, 2(3): 216-223. (in Chinese)
- 王岩, 王昊, 崔鹏, 等. 气候变化的灾害效应与科学挑战. 科学通报, 2024, 69(2): 286-300.
- Wang Y, Wang H, Cui P, et al. Disaster effects and scientific challenges of climate change. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(2): 286-300. (in Chinese)

Technological challenges and development directions of ecological security barrier construction in Yun-Gui-Chuan-Yu region

CUI Peng^{1*} YANG Yongping² WANG Genxu³ ZHU Bo¹ LU Xuyang¹ SUN Geng⁴
BAI Xiaoyong⁵ ZHANG Sirui⁵ GE Yonggang¹ WANG Jiao¹

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China;

2 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, China;

3 College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

4 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China;

5 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract The Yun-Gui-Chuan-Yu Ecological Security Barrier is situated in Southwest China, encompassing the provinces of Sichuan, Chongqing, Guizhou, and Yunnan. It serves as a vital water source conservation area and a core zone for biodiversity protection for the Yangtze, Yellow, and Pearl River basins, playing a crucial role in China's national ecological security. Since the 18th National Congress of Communist Party of China, under the guidance of Xi Jinping's Thought on Ecological Civilization, the region has made significant strides in water resource protection, soil erosion and mountain disaster control, biodiversity conservation, and ecosystem restoration, resulting in noticeable improvements in environmental quality and ecosystem services. However, the region still faces multiple challenges, including intensified non-point source pollution in the water environment under complex climate change, inadequate biodiversity protection mechanisms, the spread of rocky desertification, and increased risks of mountain disasters. To achieve the goals of regional ecological security and sustainable development, it is essential to strengthen scientific and technological support, enhance an integrated "sky-earth-space" monitoring system, delve deeply into the coupling mechanisms among water, soil, air, biology, and disasters, explore a holistic restoration model encompassing mountains, rivers, forests, farmland, lakes, grasslands, and mine ecosystems, improve the region's green disaster reduction capabilities, promote the realization of ecological product value, and foster cross-regional collaboration, thereby promoting harmony between humans and nature and high-quality development. This study systematically analyzes the current status, issues, and challenges in the Yun-Gui-Chuan-Yu Ecological Security Barrier area concerning water resources, biodiversity, ecosystem protection and restoration, environmental pollution control, climate change response, rocky desertification control, and mountain disaster risk prevention and control. It also proposes targeted development directions and strategic recommendations.

Keywords ecological security, water resources protection, biodiversity, ecosystem restoration, environmental pollution prevention, climate change, rocky desertification control, disaster risk reduction

崔鹏 中国科学院院士。中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所研究员。主要研究领域：山地灾害、防灾减灾等。
E-mail: pengcui@imde.ac.cn

CUI Peng Academician of Chinese Academy of Sciences. Professor of Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences. His research focus on geo-hazard research, specializing in debris flows, landslides, dammed lakes, and soil and water conservation. E-mail: pengcui@imde.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author