引用格式：王继明，戚帮申，2026. 青藏高原深切峡谷区边坡工程规划建设面临的问题与思考[J]. 地质力学学报，32（4）：889−898. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025061

Citation: WANG J M，QI B S，2026. Slope engineering in the deeply incised valleys of the Tibetan Plateau: key challenges and strategic considerations[J]. Journal of Geomechanics，32（4）：889−898. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025061

青藏高原深切峡谷区边坡工程规划建设面临的问题与思考

王继明[1]，戚帮申[2,3,4]

WANG Jiming[1]，QI Bangshen[2,3,4]

1. 中国联合工程有限公司，浙江 杭州 310051；
2. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
3. 自然资源部新构造与地壳稳定性科技创新团队，北京 100081；
4. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081

1. *China United Engineering Corporation Limited*, *Hangzhou* 310051, *Zhejiang*, *China*;
2. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
3. *Scientific and Technical Innovation Team of Neotectonics and Crustal Stability Assessment*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

Slope engineering in the deeply incised valleys of the Tibetan Plateau: key challenges and strategic considerations

Abstract: ［**Objective**］As human engineering activities expanded into the Tibetan Plateau and its surrounding areas, slope instabilities—particularly large-scale landslides—in deeply incised valleys have occurred with increasing frequency, posing severe threats to major infrastructure projects and public safety. This study evaluates how regional tectonic activity controls slope stability and outlines key challenges, insights, and strategic recommendations for slope engineering planning and construction in these deeply incised valleys. ［**Methods**］Based on an overview of the tectonic activity characteristics across the Tibetan Plateau, the controlling influence of tectonic activity on slope stability was systematically analyzed. Problems encountered in slope engineering planning were identified, leading to practical engineering recommendations and strategic directions for future research. ［**Results**］Tectonic activity exhibits strong spatial consistency and temporal synchronicity with slope instability across the plateau. Tectonic processes provide the essential structural and geomorphic boundaries, material sources, dynamic conditions, and triggering factors for slope failures. Key challenges include the dominant control of regional tectonic stress on valley slope stability, the need to re-evaluate reverse slope stability in deeply incised valleys, and the required paradigm shift regarding the horizontal cover depth for mountain-adjacent underground works. Analysis suggests that slope engineering should prioritize south-, west-, and southwest-facing slopes while avoiding north-, northeast-, and east-facing slopes. Furthermore, the deep-seated stability of consequent slopes is superior to that of reverse slopes, and underground structures along mountain slopes should be situated within the unperturbed in-situ stress zone. ［**Conclusions**］Future research must focus on quantitative investigations into: (1) the morphological characteristics and failure mechanisms of deeply incised valleys; (2) the evolution of in-situ stress fields under rapid tectonic uplift; and

基金项目：国家自然科学基金地质联合重点基金项目（U2244226）；中国地质调查局地质调查项目（DD20230538，DD202606201408）

This research was financially supported by the Joint Fund for Geosciences Key Project of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2244226) and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant Nos. DD20230538 and DD202606201408).

第一作者：王继明（1981—），男，硕士，正高级工程师，主要从事工程地质、地质灾害、岩土体稳定性等研究。Email：276268052@qq.com

通信作者：戚帮申（1988—），男，博士，副研究员，主要从事活动断裂地质灾害效应研究。 Email：qibangshen@126.com

收稿日期：2025−05−16；**修回日期**：2025−12−26；**录用日期**：2026−01−30；**网络出版日期**：2026−07−20；**责任编辑**：吴芳

Received：2025−05−16；Revised：2025−12−26；Accepted：2026−01−30；Available Online：2026−07−20；Handling Editor：WU Fang

(3) the spatial distribution of in-situ stress fields across the plateau. [**Significance**] The findings provide critical theoretical guidelines and engineering references for slope design, infrastructure planning, and geohazard mitigation on the Tibetan Plateau.

Keywords: Tibetan Plateau; tectonic activities; deeply incised valley; slope engineering; engineering planning and construction

摘　要：近年来，随着人类工程活动逐步向青藏高原及其周缘的不断扩展，青藏高原深切峡谷区边坡失稳（如大型滑坡）日益频发，对重大工程规划建设和人民生命财产安全构成了严重威胁。文章在青藏高原构造活动特征概述的基础上，分析了青藏高原构造活动对边坡稳定性的控制作用，进而提出了青藏高原深切峡谷区边坡工程规划建设面临的问题与认识及思考与建议。研究表明：青藏高原活动构造与边坡稳定性分布具有明显的一致性，构造活动与边坡稳定性在时间上具有显著的同步性，构造活动分别为边坡失稳发生提供了地形地貌、物质基础、动力条件和诱发因素；青藏高原面临区域构造应力作用控制深切峡谷边坡稳定性、深切峡谷区反向边坡稳定性需要重新认识、傍山边坡地下工程水平埋深需要转换观念等问题。文章提出了青藏高原深切峡谷区边坡工程优先设计在南向、西向和南西向边坡处，而避免设计在北向、北东向和东向边坡处，顺向坡深部稳定性优于反向坡，把傍山边坡地下工程应设计在应力原始区等认识；建议开展青藏高原深切峡谷形态特征及其失稳机制、青藏高原构造快速隆升背景下深切峡谷地应力场演化规律、青藏高原深切峡谷地应力场空间分布特征等定量研究。研究成果为青藏高原地区边坡工程规划建设和灾害防治提供了参考依据。

关键词：青藏高原；构造活动；深切峡谷；边坡工程；工程规划建设

中图分类号：P642; P553; P313　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)04−0889−10

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025061

0　引言

青藏高原是世界上最大、最高的高原，其强烈的构造活动和独特的地质环境对区域深切峡谷区边坡稳定性具有重要影响。近年来，随着人类工程活动逐步向青藏高原及其周缘推进，青藏高原地区日益频发边坡失稳问题，如大型滑坡（体积 $100\times10^4\sim1000\times10^4$ m^3）灾害，对重大工程规划建设和人民生命财产安全构成了严重威胁（张永双等，2021，2025）。因此，通过代表性大型滑坡案例，探索青藏高原深切峡谷区边坡工程规划建设面临的问题，并提出解决问题的思考与建议，对于科学规划建设边坡工程、有效防治地质灾害具有重要意义。

青藏高原深切峡谷区内动力地质作用和活动构造条件对边坡失稳（如滑坡等）的时空分布具有极大影响，特别是大型滑坡受活动断裂带控制作用显著，并主要分布在距断裂一定的范围内，表现为地质构造孕灾、岩土结构控灾、地震活动诱灾、断裂蠕滑促灾等（李媛茜等，2021；张永双等，2021，2025；郭长宝等，2024；王玉峰等，2024；Wang et al.，2025）。此外，青藏高原深切峡谷区边坡稳定性与高程、坡度、坡向、水系、岩性等也密切相关（李朝辉和张柯宏，2025；王玉峰等，2024）。

关于青藏高原深切峡谷区边坡稳定性及其形成机制上述学者已开展了相关研究，但仍需要从空间、时间和成因机制上进行梳理分析和规律认识，探索研究青藏高原深切峡谷区边坡稳定性对边坡工程规划建设的影响及问题，提出解决问题的思考与建议。因此，文章在青藏高原构造活动特征概述的基础上，从空间、时间和成因机制上初步分析青藏高原构造活动对区域深切峡谷区边坡稳定性的控制作用及其对边坡工程规划建设的影响与面临的问题，并提出相应的思考与建议，为青藏高原地区边坡工程规划建设和灾害防治提供理论支撑和实践指导。

1　青藏高原构造活动特征概述

青藏高原是印度板块与欧亚板块强烈俯冲碰撞的产物，其形成过程经历了复杂的地质演化（许志琴等，2011）。自新生代以来，持续的板块碰撞和挤压作用导致了高原的强烈隆升和地壳缩短，这一过程形成了高原独特的地质构造格局，包括一系列

近东西向的褶皱带和断裂系统(Yin et al., 2000; Zhang et al., 2004; Zhao et al., 2015)。

青藏高原的构造活动特征(图 1)主要表现为大规模的断裂系统和强烈的地震活动(Tapponnier et al., 2001; 邓起东等, 2014; 李海兵等, 2021; 徐锡伟等, 2023; 郑文俊等, 2025; 潘家伟等, 2026)。主要断裂带包括雅鲁藏布江缝合带、班公湖–怒江缝合带等(董汉文等, 2016)。这些断裂带不仅是地壳运动的重要边界，也是地震活动的主要场所。高原内部广泛发育的活动断层，如正断层、逆断层和走滑断层，构成了复杂的构造网络(张培震等, 2022)。

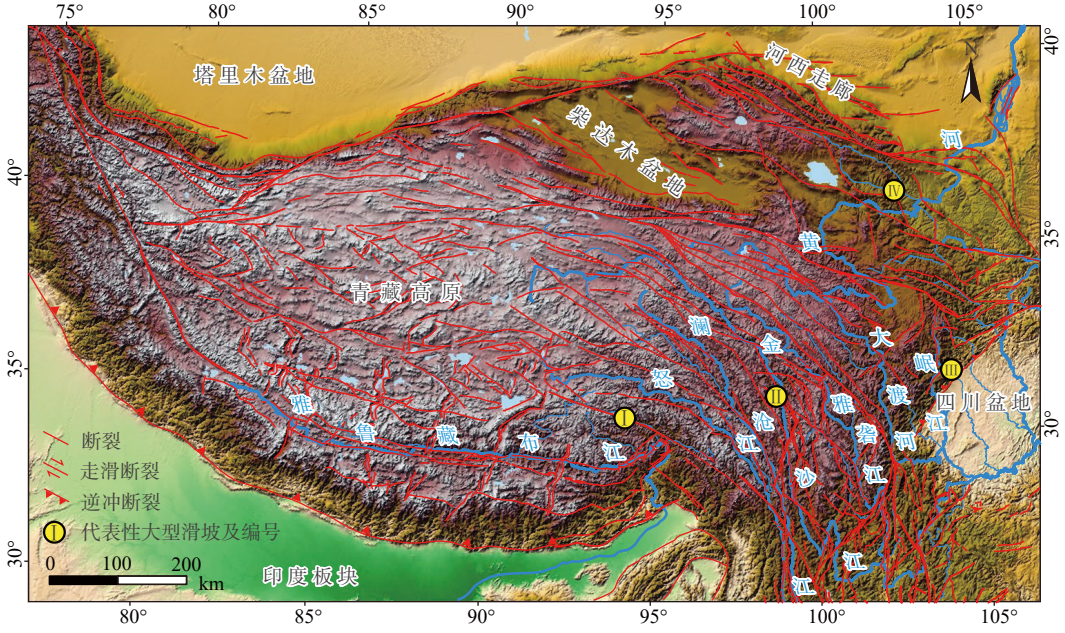
青藏高原的新构造运动具有明显的分区性和差异性，表现为高原南部强烈的挤压和隆升，而北部则以伸展和走滑为主(许志琴等, 2006, 2011)。这种差异性的构造运动导致了高原内部地形地貌的显著分异，形成了高山、深切峡谷(大江大河)、盆地等多种地貌类型。同时青藏高原无论在区域构造应力作用上(杨树新等, 2012)，还是在构造变形强度上(Zhang et al., 2004)，都显著大于其他地区。强烈的构造活动不仅塑造了青藏高原的地貌格局，也为边坡失稳提供了地形地貌、物质基础、动力条件和诱发因素(黄润秋, 2007; 张永双等, 2016; 郭长宝等, 2022, 2024; Yan et al., 2024; Guo et al., 2025)。

2　青藏高原构造活动对深切峡谷边坡稳定性控制作用分析

虽然大型滑坡表象上属于外动力地质作用，其本质上受控于内动力地质作用，青藏高原构造活动对深切河谷边坡稳定性分布规律具有控制作用，在空间、时间、成因上具有显著的相关性。

2.1　空间相关分析

青藏高原深切峡谷边坡稳定性大多呈带状分布，与活动断裂带的空间展布方向基本一致，在活动断裂带、构造交汇部位和强烈隆升区边坡稳定性更差、大型滑坡更为密集(孙东等, 2019; 刘玉国等, 2022; 郭长宝等, 2024; 王玉峰等, 2024; Wang et al., 2025)。此外，由于受到印度板块对欧亚板块俯冲碰撞作用所诱发的北向、北东向、东向的构造应力作用和区域地壳变形位移作用的影响(Zhang et al., 2004; 杨树新等, 2012; 孙玉军等, 2017; 孙炜锋等, 2024)，导致青藏高原北向、北东向、东向的边坡地



图中 DEM 数据来自 12.5 m 分辨率的 ALOS-PALSAR DEM; 活动断裂分布据 Tapponnier et al., 2001 修改

Ⅰ—笨多滑坡; Ⅱ—白格滑坡; Ⅲ—大光包滑坡; Ⅳ—张家庄滑坡

图 1　青藏高原构造活动特征

Fig. 1　Characteristics of tectonic activity on the Tibetan Plateau

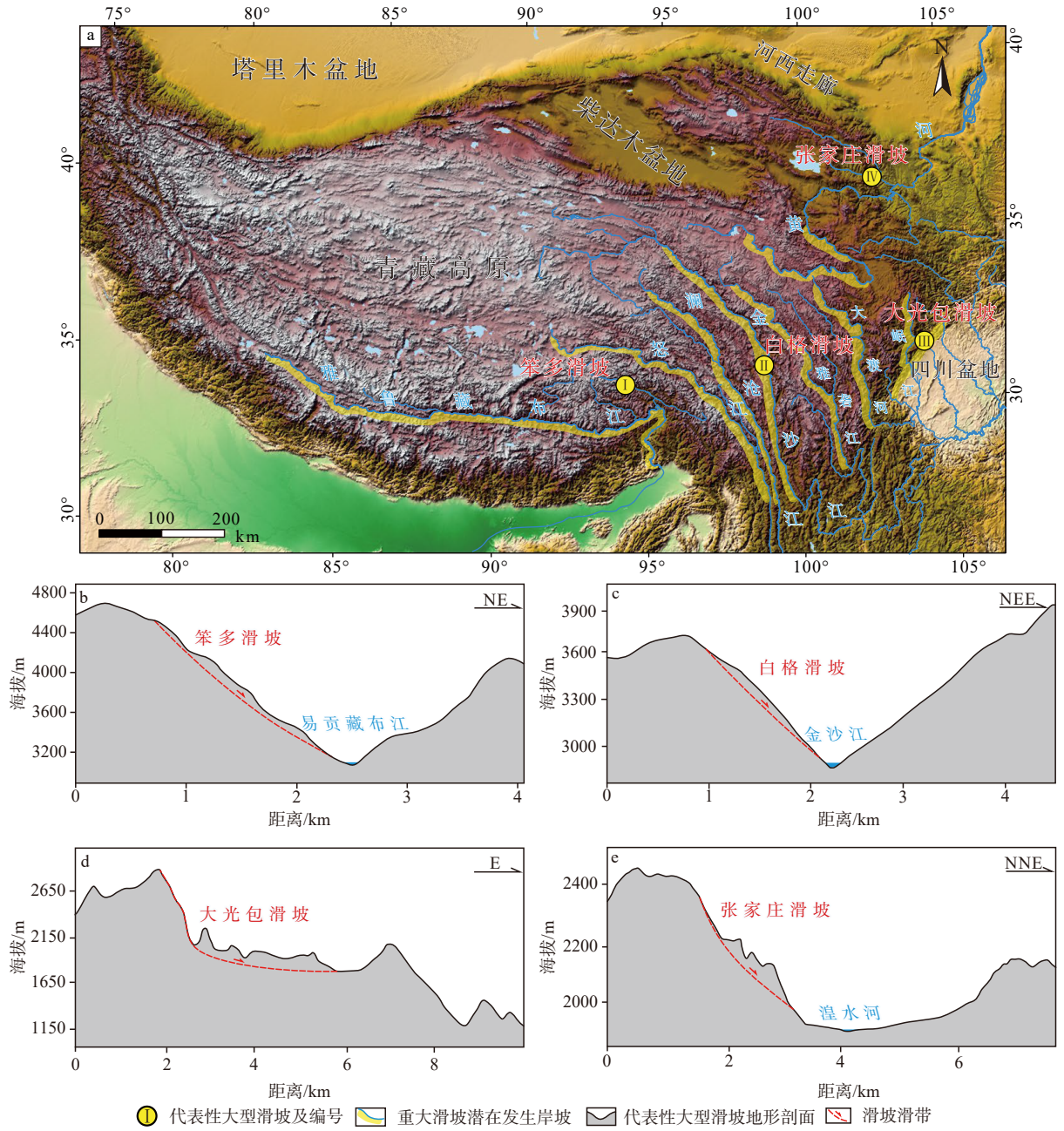
The DEM data were derived from the ALOS-PALSAR with a resolution of 12.5 m; active faults are modified from Tapponnier et al. (2001).

Ⅰ–Benduo landslide; Ⅱ–Baige landslide; Ⅲ–Daguangbao landslide; Ⅳ–Zhangjiazhuang landslide

形较陡，极易发生大型滑坡等边坡失稳现象，如易贡藏布江上游右岸北东向的笨多滑坡（卫童瑶等，2021；Zhang et al., 2025）、2018 年金沙江上游左岸北东东向的白格滑坡（张永双等，2020）、2008 年汶川地震诱发的边坡为东向的大光包滑坡（殷跃平等，2012）、湟水河右岸边坡为北北东向的张家庄滑坡（图 1，图 2）等。

2.2 时间相关分析

新构造活动表现为不同的构造期和构造幕，具体表现为地震活动的周期性，进而表现为断裂活动



图中 DEM 数据来自 12.5 m 分辨率的 ALOS-PALSAR DEM

a—青藏高原大型滑坡潜在发生岸坡分布图；b—笨多滑坡剖面图；c—白格滑坡剖面图；d—大光包滑坡剖面图；e—张家庄滑坡剖面图

图 2 青藏高原大型滑坡潜在发生岸坡示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of riverbank slopes prone to large-scale landslides on the Tibetan Plateau

(a) Distribution of riverbank slopes prone to large-scale landslides on the Tibetan Plateau; (b) Cross-section of the Benduo landslide; (c) Cross-section of the Baige landslide; (d) Cross-section of the Daguangbao landslide; (e) Cross-section of the Zhangjiazhuang landslide

DEM data were derived from the ALOS-PALSAR with a resolution of 12.5 m.

的周期性和边坡失稳发生的周期性。中国华北地区近 2000 年的地震记录表明，地震的时间分布是非均匀的，可以分成 300 年左右的地震活跃期，其间可再分出 20 年左右的地震活跃幕，地震活跃期和活跃幕之间为地震平静期和平静幕，期和幕的划分有一定的广泛性（马宗晋等，1987）。在地震活跃期和活跃幕中，中小地震与强震频发，边坡失稳发生的频率明显增大，一次大地震可能会诱发群发性边坡失稳问题。中国有历史记载的地震中约 12% 为破坏性地震，其中 8 级以上地震高达 20 余次，诱发了大量边坡失稳问题（刘玉国等，2022）。如 1920 年 12 月 26 日宁夏海原 8.5 级地震诱发了大量滑坡，在强降雨的作用下又发生了泥石流（邓龙胜等，2013）；2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震，共诱发了滑坡、崩塌、泥石流等边坡失稳地质灾害数万处，堵塞河流形成多个堰塞湖，毁坏和阻断交通，加剧了地震灾害的损失（黄润秋等，2009）。从时间上看，边坡失稳的高峰期往往与地震活动周期和降雨季节相吻合，反映了构造活动和气候变化对边坡失稳的联合诱发控制作用。同时，由于强震之后的边坡失稳滞后效应以及构造活动诱发的地质体蠕变作用，使得边坡失稳在一定时间内持续频繁发生。总体上，青藏高原构造活动和边坡稳定性无论在时间上还是空间上都具有密切的相关性（刘玉国等，2022）。

2.3　成因机制相关分析

青藏高原构造活动对边坡稳定性具有明显的控制作用，为其提供了地形地貌边界条件、物质基础、动力条件和诱发因素。

（1）地形地貌边界条件分析

青藏高原新近纪以来的新构造活动控制了其区域构造地貌格局，主要表现为地势高耸入云、崇山峻岭和大江大河密布、高原面上宽谷和盆地发育、边缘地区深切峡谷普遍（邢宇堃等，2023），为边坡失稳提供了必要的地形地貌条件，同时新构造活动产生的活动断裂带往往成为边坡失稳的后缘边界，由此决定了边坡失稳的类型和空间分布。特别是青藏高原发育的构造混杂岩带，软弱结构面发育、岩体破碎，极易成为边坡失稳的后缘边界（张永双等，2024）。

（2）物质基础分析

构造活动往往形成断裂、褶皱、节理裂隙、片理等构造，导致地质体结构受损，造成岩体强度降低，为边坡失稳提供了物质基础。此外，构造强烈隆升区，卸荷、风化剥蚀、水力侵蚀等外动力作用比较强烈，也为边坡失稳提供物质基础。

（3）动力条件分析

在印度板块对欧亚板块持续俯冲碰撞背景下，青藏高原受到显著的北向、北东向及东向的构造应力作用（杨树新等，2012），导致地壳位移变形（Zhang et al., 2004）。构造活动通过应力作用诱发断裂、褶皱等地壳形变，并驱动地震、火山等地质过程，同时塑造高山峡谷地貌，增强重力卸荷效应。在此区域动力背景下，叠加强震活动、高山峡谷区长期重力卸荷作用等（邓起东等，2014；郭长宝等，2020），最终触发笮多、白格、大光包、张家庄等大型滑坡事件。

（4）诱发因素分析

首先是青藏高原强烈的地震活动对深切峡谷陡峭坡体稳定性的直接破坏，已有研究表明，青藏高原是中国现代构造和地震活动最强烈的地区（邓起东等，2014），强烈构造蠕变作用和地震水平与垂直振动作用及其滞后灾变效应均可诱发边坡失稳。其次青藏高原岩溶水和岩溶裂隙水极为发育（郭长宝等，2020），高原岩溶空间分布和地下水补给、径流、排泄均受构造控制（马剑飞等，2022），构造岩溶高压突涌水和断裂带基岩裂隙高压突水普遍（张永双等，2021），构造活动所诱发的活动断裂往往是导水或储水构造，引起地下水运移和富集，地下水起到润滑剂的作用，成为边坡失稳发生的主要诱发因素。如果遇到强降水，地下水达到饱和的情况下，这些边坡失稳产生的松散物质就会在水的作用下形成泥石流。此外，地下水的径流使断裂带内的碎屑物质遭受潜蚀，使本来就破碎的断裂带内的碎裂岩土体强度降低，进一步加剧断裂带附近岩土体发生边坡失稳。

综上所述，强烈构造活动和地应力作用、岩土结构和物理力学性质、地质体蠕变变形和风化卸荷作用、地震活动和降雨等分别对边坡失稳具有控制、孕育、促进和诱发作用。青藏高原及其周缘的边坡失稳受复杂的内外动力控制，除了来自区域强烈构造变形、频繁强震活动、快速构造隆升等内动力作用外，还受到复杂气候环境的影响，局部暴雨、持续性降雨、人类工程活动等外动力条件亦极为活跃，为不同成因边坡失稳提供条件。因此，需加强边坡失稳规律总结研究，并深入分析内外动力耦合

作用下的边坡失稳机制，形成不同类型边坡失稳成灾模式（铁永波等，2022）。

3 青藏高原深切峡谷区边坡工程规划建设面临的问题

依据青藏高原构造活动所诱发的区域构造应力作用特征及其对边坡稳定性的控制作用分析，结合青藏高原深切峡谷地应力场分布特征研究（谭成轩等，2006，2008），认为青藏高原深切峡谷区傍山边坡工程规划面临如下3个方面问题。

（1）青藏高原区域构造应力作用控制深切峡谷边坡稳定性问题

由于青藏高原深切峡谷北向、北东向、东向等边坡临空，并且坡度较大（图2），当受到印度板块对欧亚板块俯冲挤压作用导致的北向、北东向、东向等方向的构造应力作用时，极易发生失稳（殷跃平等，2012），故建议傍山边坡工程优先设计在南向、西向和南西向的边坡处，而避免设计在北向、北东向和东向的边坡处。此外，青藏高原跨越大江大河高拱坝水电工程也需考虑区域构造应力作用影响，当青藏高原跨越大江大河高拱坝的走向与最大水平主应力平行或小角度相交时，建议在高拱坝水电工程规划设计时，考虑区域构造应力作用对深切峡谷高拱坝设计参数和安全性的影响。目前青藏高原已建成的高拱坝由于在勘察设计阶段未能充分考虑区域构造应力作用，导致蓄水高度、发电量及安全性受到一定影响（杨学超等，2018；程恒等，2020；武明鑫和赵全胜，2021）。

（2）青藏高原深切峡谷区反向边坡的稳定性问题

传统工程地质认为反向边坡稳定、顺向边坡不稳定，但在青藏高原深切峡谷区反向边坡工程地质问题严重、不稳定，而顺向边坡在一定水平深度内稳定性相对较好。例如雅砻江某水电站坝址左岸反向边坡深部卸荷裂隙水平深度达到200 m左右、岩体不稳定，而右岸顺向边坡没有深部卸荷裂隙、岩体较稳定（祁生文等，2002）。这主要是由于青藏高原深切峡谷反向边坡在河谷下切的初期相对稳定，易于形成应力集中、能量积累，当应力集中和能量积累程度超过岩体强度，最终导致岩体变形破坏，进而达到新的暂时平衡状态；随着地质过程的发展，又会形成新的边坡应力重分布、应力集中和能量积累，出现新的岩体变形破坏。这种地质作用过程的长期效应必然导致反向边坡卸荷裂隙逐步向山体深部发展，是现今构造活动强烈的深切峡谷快速下切过程中边坡重力和构造复合应力场导致的卸荷结果（谭成轩等，2008），故在青藏高原深切峡谷区反向边坡进行地下工程规划建设时需高度关注其稳定性问题。

（3）傍山边坡地下工程的水平埋深问题

已有研究成果表明，深切峡谷区，尤其是青藏高原强构造活动区，在边坡坡脚和边坡中下部一定水平深度范围内，也存在类似深切峡谷谷底的应力集中区现象。自坡面向山体水平深度具有应力卸荷区（由于岩体卸荷作用导致的应力降低区）、应力集中区（由于地形和构造耦合作用导致的应力集中区）和应力原始区（地形和卸荷影响消失的应力区）的空间分布特征（白世伟等，1982；黄润秋，2004；谭成轩等，2006，2008；孙炜锋等，2021），而边坡应力卸荷区和应力集中区分别易诱发滑坡、岩爆等地质灾害。故傍山边坡地下工程应设计在应力原始区，实现科学有效的减灾防灾，从而改变傍山地下工程水平埋深越大越不利于工程围岩稳定性的传统观念。

4 思考与建议

目前，青藏高原规划建设多项世纪性重大工程，如何保障工程顺利实施和安全运维备受关注（彭建兵等，2020）。传统的工程地质理论和工程技术标准或经验对于青藏高原强构造活动区工程建设面临的科学技术挑战和重大工程地质问题有待完善，为此，提出以下有待深入研究的关键问题思考与建议。

（1）定量研究青藏高原深切峡谷形态特征及其失稳机制

基于高精度DEM数据，采用统计分析方法，量化厘定青藏高原深切峡谷两侧岸坡坡度变化特征，研究深切峡谷两侧岸坡的不对称性，揭示印度板块对欧亚板块俯冲挤压作用导致的北向、北东向、东向的构造应力作用对深切峡谷岸坡坡度和不对称性的影响（图2），并结合典型大型滑坡（如白格滑坡等）研究，在考虑区域构造应力作用背景下，运用数值模拟方法，开展滑坡失稳的动力机制研究，以期从量化角度系统分析青藏高原构造活动对大型滑

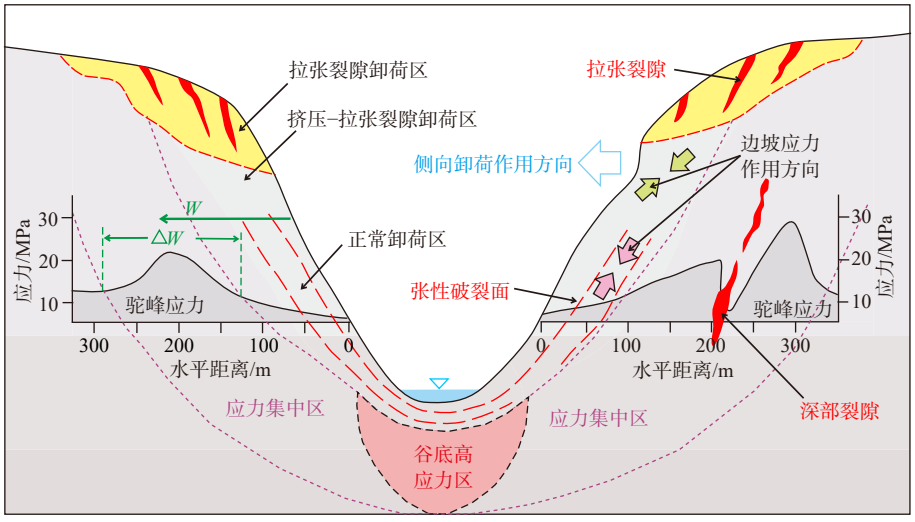
坡的控制作用，揭示青藏高原深切峡谷区边坡稳定性空间分布规律，支撑服务重大工程规划建设和减灾防灾。

（2）揭示青藏高原构造快速隆升背景下深切峡谷地应力场演化规律

通过地质建模，运用数值模拟方法，研究青藏高原快速隆升、河流快速下切过程中深切峡谷两侧不同地层结构构造条件下地应力场的演化规律，揭示深切峡谷岸坡（尤其是反向岸坡）深部卸荷裂隙形成的力学机制，同时厘定深切峡谷应力卸荷区、应力集中区和应力原始区的空间分布特征。

（3）定量分析青藏高原深切峡谷地应力场空间分布特征

根据深切峡谷地应力分布情况（图 3），通过地质建模，运用数值模拟方法，开展青藏高原深切峡谷边坡应力集中区自坡面向山体内部的水平深度（W）或范围（ΔW）与山体相对高差（H）、山体坡度（θ）、最大或最小水平侧压力系数（K_{HV} 或 K_{hV}）等参数的相关性研究，厘定其回归经验公式［$W/\Delta W = f(H, \theta, K_{HV}$ 或 $K_{hV}) + C$，C 为常数］（Tan et al., 2004），并通过典型案例进行验证分析，研究成果可用于工程设计人员较合理地规划部署傍山边坡工程的位置。



W—边坡应力集中区自坡面向山体内部的水平深度；ΔW—边坡应力集中区的范围

图 3　深切峡谷地应力分布示意图（据黄润秋，2004 修改）

Fig. 3　Schematic diagram of in-situ stress distribution in a deeply incised valley (modified from Huang, 2004)

W–horizontal depth of the slope stress concentration zone measured from the slope surface into the mountain; ΔW–extent of the slope stress concentration zone

5　结束语

文章在青藏高原构造活动特征概述的基础上，从区域构造应力作用、地形地貌、岩体结构和地下水系统等方面，探索分析了青藏高原强烈构造活动对深切峡谷区边坡稳定性分布的影响，提出了边坡工程规划建设中面临的问题。从空间、时间和成因机制上分析认为印度板块对欧亚板块持续强烈俯冲挤压构造活动是诱发青藏高原深切峡谷区边坡失稳的根源。建议下一步开展青藏高原深切峡谷形态特征及其失稳机制、青藏高原构造快速隆升背景下深切峡谷地应力场演化规律、青藏高原深切峡谷地应力场空间分布特征等定量研究，完善并佐证文中所提出的问题和认识。

但由于代表性边坡失稳案例样本、量化数据等较少，文中多为定性宏观分析和讨论，有待定量资料的补充完善。此外文章相关认识和结论主要适用于青藏高原深切峡谷区，应用于其他区域时需结合区域内构造地质特征综合调整。

作者贡献声明： 王继明负责资料收集和论文写作；戚帮申负责论文构思和研究方法确定及图件绘制。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: WANG Jiming was responsible for data collection and paper writing; QI Bangshen was responsible for paper conception, determination of

research methods and map drawing. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

BAI S W, LI G Y, 1982. Research on stress field around dam area of Ertan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1(1): 45-56. (in Chinese with English abstract)

CHENG H, ZHANG G X, LIAO J X, et al., 2020. Analysis on characteristics and influencing factors of valley deformation of high arch dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 51(5): 65-70. (in Chinese with English abstract)

DENG L S, FAN W, 2013. Deformation breakage characteristics and development mechanism of loess landslide triggered by Haiyuan M8.5 earthquake in Ningxia[J]. Journal of Catastrophology, 28(3): 30-37. (in Chinese with English abstract)

DENG Q D, CHENG S P, MA J, et al., 2014. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(7): 2025-2042. (in Chinese with English abstract)

DONG H W, XU Z Q, ZHOU X, et al., 2016. Active timing and tectonic evolution of the eastern segment of the great counter thrust in the northern margin of the Himalayan orogen belt[J]. Acta Geologica Sinica, 90(11): 3011-3022. (in Chinese with English abstract)

GUO C B, WU R A, LI X, et al., 2020. Developmental characteristics and formation mechanism of the Rizha potential giant rock landslide, western Sichuan Province, China[J]. Journal of Engineering Geology, 28(4): 772-783. (in Chinese with English abstract)

GUO C B, YAN Y Q, ZHANG Y S, et al., 2022. Research progress and prospect of failure mechanism of large deep-seated creeping landslides in Tibetan Plateau, China[J]. Earth Science, 47(10): 3677-3700. (in Chinese with English abstract)

GUO C B, WU R A, ZHONG N, et al., 2024. Large landslides along active tectonic zones of eastern Tibetan Plateau: background and mechanism of landslide formation[J]. Earth Science, 49(12): 4635-4658. (in Chinese with English abstract)

GUO C B, QIU Z D, WU R A, et al., 2025. High-altitude deformation and reactivation mechanism of large ancient landslides along the Shadingmai section of the upper Jinsha River, Tibetan Plateau[J]. Environmental Earth Sciences, 84(1): 44.

HUANG R Q, 2004. Geo-stress distribution and unloading fracturing mechanism of high rock slopes in western part of China[J]. Journal of Engineering Geology, 12(S1): 7-13. (in Chinese with English abstract)

HUANG R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)

HUANG R Q, LI W L, 2009. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 20(3): 1-7. (in Chinese with English abstract)

LI C H, ZHANG K H. 2025. Cause Analysis and Stability Evaluation of a Landslide in Southeastern Tibet[J]. Railway Investigation and Surveying, 51(1): 13-19.

LI H B, PAN J W, SUN Z M, et al., 2021. Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 95(1): 194-213. (in Chinese with English abstract)

LI Y X, ZHANG Y, MENG X M, et al., 2021. Analysis the activity characteristics of the giant landslide in active tectonic fault zone: a case study of Daxiaowan landslide in Bailong River Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 57(3): 360-368. (in Chinese with English abstract)

LIU Y G, LI H, ZHENG H, et al., 2022. Research progress and prospect of the relationship among active tectonics, earthquakes and geological disasters in China[J]. Journal of Natural Disasters, 31(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

MA J F, LI X Q, ZHANG C C, et al., 2022. Characterization of karst development and groundwater circulation in the middle part of the Jinshajiang fault zone[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 956-968. (in Chinese with English abstract)

MA Z J, JIANG M, 1987. Strong earthquake periods and episodes in China[J]. Earthquake Research in China, 3(1): 47-51. (in Chinese with English abstract)

PAN J W, LI H B, LIU F C, et al., 2026. Characteristics of surface ruptures produced by recent major earthquakes on the Tibetan Plateau and its surrounding areas, and their tectonic implications[J]. Journal of Geomechanics, 32(3): 509-527. (in Chinese with English abstract)

PENG J B, CUI P, ZHUANG J Q, 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(12): 2377-2389. (in Chinese with English abstract)

QI S W, WU F Q, LAN H X, 2002. Study on the mechanism of the deep fractures of the left abutment slope at the Jinping first stage hydropower station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 24(5): 596-599. (in Chinese with English abstract)

SUN D, YIN Z Q, LI D M, et al. , 2019. Development of the large-scale landslides controlled by geological structures in Meigu River Basin[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30(6): 49-58, 67. (in Chinese with English abstract)

SUN W F, GUO C B, ZHANG G Z, et al., 2021. In-situ stress measurement of Guodashan tunnel horizontal borehole in west Sichuan and the engineering significance[J]. Geoscience, 35(1): 126-136. (in Chinese with English abstract)

SUN W F, HUANG H L, SUN D S, et al., 2024. Present in situ stress measurement in the eastern segment of Yarlung Zangbo River fault and fault activity analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 45(4): 1129-1141. (in Chinese with English abstract)

SUN Y J, GUO C B, WU Z H, et al., 2017. Numerical study of the crustal stress, strain rate and fault activity in the eastern Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(3): 385-392. (in Chinese with English abstract)

TAN C X, WANG R J, SUN Y, et al., 2004. Numerical modelling estimation

of the ‘tectonic stress plane’ (TSP) beneath topography with quasi-U-shaped valleys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(2): 303-310.

TAN C X, SUN W F, SUN Y, et al., 2006. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1627-1632. (in Chinese with English abstract)

TAN C X, ZHANG P, ZHENG H H, et al., 2008. An analysis on in-situ crustal stress measurements and major engineering geology issues at the dam site area of Jinping first stage hydropower station[J]. Journal of Engineering Geology, 16(2): 162-168. (in Chinese with English abstract)

TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 294(5547): 1671-1677.

TIE Y B, GE H, GAO Y C, et al., 2022. The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th Century[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4): 653-665. (in Chinese with English abstract)

WANG Y F, QIAN J Z, CHENG Q G, et al. , 2024. Research on spatial distribution characteristics of major landslides hazards in the Himalayas[J]. China Railway(10): 10-20. (in Chinese with English abstract)

WANG Y F, CHEN P H, QIAN J Z, et al., 2025. Geomorphic and geologic controls on large-scale landslides in the Himalayan region of China[J]. Landslides, 22(5): 1725-1741,

WEI T Y, YIN Y P, LI B, et al., 2021. Remote sensing interpretation and risk prediction analysis of Benduo high deformation body in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 32(3): 17-24. (in Chinese with English abstract)

WU M X, ZHAO Q S, 2021. Case study and reflections on arch dams affected by valley deformation[J]. Water Power, 47(1): 68-72, 89. (in Chinese with English abstract)

XING Y K, LIU J, WANG W, et al., 2023. Longitudinal profile analysis of rivers draining edges of the Tibetan Plateau and its geomorphology implications[J]. Geological Bulletin of China, 42(1): 107-121. (in Chinese with English abstract)

XU X W, LI F, CHENG J, et al., 2023. Advances in research on active faults and exploration of relevant frontier scientific problems[J]. Coal Geology & Exploration, 51(12): 1-16. (in Chinese with English abstract)

XU Z Q, YANG J S, LI H B, et al., 2006. The Qinghai-Tibet Plateau and continental dynamics: a review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau[J]. Geology in China, 33(2): 221-238. (in Chinese with English abstract)

XU Z Q, YANG J S, LI H B, et al., 2011. On the tectonics of the India-Asia collision[J]. Acta Geologica Sinica, 85(1): 1-33. (in Chinese with English abstract)

YAN Y Q, GUO C B, ZHANG Y N, et al., 2024. Development and deformation characteristics of large ancient landslides in the intensely hazardous Xiongba-Sela section of the Jinsha River, Eastern Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Earth Science, 35(3): 980-997.

YANG S X, YAO R, CUI X F, et al., 2012. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and north-south seismic belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4207-4217. (in Chinese with English abstract)

YANG X C, GAO K J, ZHAO W G, et al., 2018. Influence of valley deformation on safety of Xiluodu arch dam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 16(1): 72-78. (in Chinese with English abstract)

YIN A, HARRISON T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280.

YIN Y P, WANG M, LI B, et al., 2012. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(10): 1969-1982. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al., 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 32(9): 809-812.

ZHANG P Z, WANG W T, GAN W J, et al., 2022. Present-day deformation and geodynamic processes of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 96(10): 3297-3313. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y F, YIN Y P, LI B, et al., 2025. Geostructural characteristics and failure mechanism of the Benduo mountain slope in the Yigong Zangbo River, Qinghai–Tibet Plateau, China[J]. Landslides, 22(6): 2005-2020,

ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, et al., 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(3): 277-286. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, BA R J, REN S S, et al., 2020. An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet[J]. Geology in China, 47(6): 1637-1645. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, DU G L, GUO C B, et al., 2021. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. Acta Geologica Sinica, 95(3): 605-617. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, WANG D B, LI X, et al., 2024. Research on hazard prone geological genes and major engineering geological problems in tectonic mélange belts of Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 98(3): 992-1005. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, REN S S, GUO C B, et al., 2025. Application of geomechanics in risk prevention and control for the geosafety of major projects on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 31(5): 926-939. (in Chinese with English abstract)

ZHAO B, HUANG Y, ZHANG C H, et al., 2015. Crustal deformation on the Chinese mainland during 1998-2014 based on GPS data[J]. Geodesy and Geodynamics, 6(1): 7-15.

ZHENG W J, SUN X, YUAN D Y, et al., 2025. Active faults, seismic activity, and seismotectonic environments in the Tibetan Plateau and its adjacent regions[J]. Journal of Geomechanics, 31(5): 1006-1029. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白世伟，李光煜，1982. 二滩水电站坝区岩体应力场研究[J]. 岩石力学与工程学报，1(1)：45-56.

程恒，张国新，廖建新，等，2020. 高拱坝谷幅变形特征及影响因素分析[J]. 水利水电技术，51(5)：65-70.

邓龙胜，范文，2013. 宁夏海原 8.5 级地震诱发黄土滑坡的变形破坏

特征及发育机理[J]. 灾害学, 28(3): 30-37.
邓起东, 程绍平, 马冀, 等, 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 57(7): 2025-2042.
董汉文, 许志琴, 周信, 等, 2016. 喜马拉雅造山带北缘大反转逆冲断层(GCT)东段的活动时限及构造演化[J]. 地质学报, 90(11): 3011-3022.
郭长宝, 吴瑞安, 李雪, 等, 2020. 川西日扎潜在巨型岩质滑坡发育特征与形成机理研究[J]. 工程地质学报, 28(4): 772-783.
郭长宝, 闫怡秋, 张永双, 等, 2022. 青藏高原大型深层蠕滑型滑坡变形机制研究进展与展望[J]. 地球科学, 47(10): 3677-3700.
郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 等, 2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制[J]. 地球科学, 49(12): 4635-4658.
黄润秋, 2004. 中国西部岩石高边坡应力场特征及其卸荷破裂机理[J]. 工程地质学报, 12(S1): 7-13.
黄润秋, 2007. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433-454.
黄润秋, 李为乐, 2009. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. 地质灾害与环境保护, 20(3): 1-7.
李朝辉, 张柯宏, 2025. 藏东南某滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 铁道勘察, 51(1): 13-19.
李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等, 2021. 大陆构造变形与地震活动: 以青藏高原为例[J]. 地质学报, 95(1): 194-213.
李媛茜, 张毅, 孟兴民, 等, 2021. 活动构造断裂带巨型滑坡活动特性研究: 以白龙江流域大小湾滑坡为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 57(3): 360-368.
刘玉国, 李欢, 郑涵, 等, 2022. 中国活动构造与地震及地质灾害的关系研究进展及展望[J]. 自然灾害学报, 31(1): 1-14.
马剑飞, 李向全, 张春潮, 等, 2022. 金沙江断裂带中段岩溶发育和地下水循环特征[J]. 地质力学学报, 28(6): 956-968.
马宗晋, 蒋铭, 1987. 中国的强震期和强震幕[J]. 中国地震, 3(1): 47-51.
潘家伟, 李海兵, 刘富财, 等, 2026. 青藏高原及周缘近年来典型强震地表破裂特征及其构造指示意义[J]. 地质力学学报, 32(3): 509-527.
彭建兵, 崔鹏, 庄建琦, 2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 39(12): 2377-2389.
祁生文, 伍法权, 兰恒星, 2002. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂缝成因的工程地质分析[J]. 岩土工程学报, 24(5): 596-599.
孙东, 殷志强, 李大猛, 等, 2019. 美姑河流域地质构造对大型滑坡孕育的控制作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 30(6): 49-58, 67.
孙炜锋, 郭长宝, 张广泽, 等, 2021. 川西郭达山隧道水平孔地应力测量与工程意义[J]. 现代地质, 35(1): 126-136.
孙炜锋, 黄火林, 孙东生, 等, 2024. 雅鲁藏布江断裂带东段现今地应力测量与断层活动性分析[J]. 岩土力学, 45(4): 1129-1141.
孙玉军, 郭长宝, 吴中海, 等, 2017. 数值模拟探讨青藏高原东部应力应变场及断裂活动性[J]. 地球学报, 38(3): 385-392.
谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 等, 2006. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. 地质学报, 80(10): 1627-1632.
谭成轩, 张鹏, 郑汉淮, 等, 2008. 雅砻江锦屏一级水电站坝址区实测地应力与重大工程地质问题分析[J]. 工程地质学报, 16(2): 162-168.
铁永波, 葛华, 高延超, 等, 2022. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 42(4): 653-665.
王玉峰, 钱嘉贞, 程谦恭, 等, 2024. 喜马拉雅山区重大滑坡灾害空间分布特征研究[J]. 中国铁路(10): 10-20.
卫童瑶, 殷跃平, 李滨, 等, 2021. 西藏笨多高位变形体遥感解译与危险性预测分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 17-24.
武明鑫, 赵全胜, 2021. 谷幅变形对拱坝工程安全影响案例分析及有关启示[J]. 水力发电, 47(1): 68-72, 89.
邢宇堃, 刘静, 王伟, 等, 2023. 青藏高原周缘的河流纵剖面特征及其对构造地貌演化的启示[J]. 地质通报, 42(1): 107-121.
徐锡伟, 李峰, 程佳, 等, 2023. 活动断层研究进展及其科学前沿问题讨论[J]. 煤田地质与勘探, 51(12): 1-16.
许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2006. 青藏高原与大陆动力学-地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质, 33(2): 221-238.
许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 85(1): 1-33.
杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等, 2012. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报, 55(12): 4207-4217.
杨学超, 高克静, 赵文光, 等, 2018. 谷幅收缩变形对溪洛渡拱坝的安全影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 16(1): 72-78.
殷跃平, 王猛, 李滨, 等, 2012. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 31(10): 1969-1982.
张培震, 王伟涛, 甘卫军, 等, 2022. 青藏高原的现今构造变形与地球动力过程[J]. 地质学报, 96(10): 3297-3313.
张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等, 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 37(3): 277-286.
张永双, 巴仁基, 任三绍, 等, 2020. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质, 47(6): 1637-1645.
张永双, 杜国梁, 郭长宝, 等, 2021. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式[J]. 地质学报, 95(3): 605-617.
张永双, 王冬兵, 李雪, 等, 2024. 青藏高原构造混杂岩带的孕灾地质基因与重大工程地质问题研究[J]. 地质学报, 98(3): 992-1005.
张永双, 任三绍, 郭长宝, 等, 2025. 地质力学在青藏高原重大工程地质安全风险防控中的应用[J]. 地质力学学报, 31(5): 926-939.
郑文俊, 孙鑫, 袁道阳, 等, 2025. 青藏高原及邻区活动断裂、地震活动及地震构造环境[J]. 地质力学学报, 31(5): 1006-1029.