



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405462

引用格式:李洪梁,田尤,张佳佳.北澜沧江结合带构造混杂岩构造岩石学、物理力学特性及地质灾害效应[J].科学技术与工程,2025,25(15):6238-6251.

Li Hongliang, Tian You, Zhang Jiajia. Structural petrology, physical and mechanical properties and its geohazard effect of tectonic mélange in north Lancang River suture zone[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6238-6251.

北澜沧江结合带构造混杂岩构造岩石学、 物理力学特性及地质灾害效应

李洪梁¹, 田尤^{2,3}, 张佳佳^{2,3}

(1. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 成都 610036; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 成都 611734; 3. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 成都 611734)

摘要 为进一步丰富和完善构造混杂岩孕灾机制研究,以北澜沧江结合带为例,通过野外地质调查和室内测试分析,精细解剖构造混杂岩构造岩石学特征,查明物理力学特性,揭示其地质灾害效应。结果表明:北澜沧江结合带构造混杂岩作为非能干层夹持于西南侧花岗岩、花岗片麻岩和北东侧火山-沉积岩之间,主要岩石类型为千枚岩、板岩夹少量玄武岩、灰岩和硅质岩岩块,具明显“混杂堆积”特征,在构造隆升-差异风化-河流侵蚀的耦合作用下,逐渐演化为高山深切峡谷地貌,为地质灾害发育提供了地形地貌条件;在构造岩石学方面,北澜沧江结合带构造混杂岩表现出“一弱三强”的特点,即弱变质、强变形、强蚀变和强定向,导致岩石严重劣化,是地质灾害发育的物源条件;在物理力学特性方面,北澜沧江结合带构造混杂岩表现为一套易滑软岩“地层”,富含黏土矿物,具高孔隙度和吸水率、低抗压和抗剪强度,在斜坡内易形成软弱层或软弱带,进而长期蠕变演化为滑带,为地质灾害发育提供了结构构造条件;北澜沧江结合带区域构造运动和构造应力作用强烈,为地质灾害发育提供了动力学条件。研究结果有利于进一步丰富和完善构造混杂岩的孕灾机制。

关键词 北澜沧江结合带; 构造混杂岩; 构造岩石学; 物理力学性质; 地质灾害效应

中图法分类号 P694 P542 P56; 文献标志码 A

Structural Petrology, Physical and Mechanical Properties and Its Geohazard Effect of Tectonic Mélange in North Lancang River Suture Zone

LI Hong-liang¹, TIAN You^{2,3}, ZHANG Jia-jia^{2,3}

(1. Civil-Military Integration Center of China Geological Survey, Chengdu 610036, China;

2. Institute of Prospecting Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, China;

3. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611734, China)

[Abstract] In order to enrich and improve the geohazard-pregnant mechanism of structural mélange, taking the North Lancang River suture zone as an example, the structural petrology characteristics of the structural mélange were dissected, then the physical and mechanical characteristics were identified through field geological investigation and laboratory test analysis, and finally its geohazard effect were revealed. The results show that the tectonic mélange in the northern Lancang River suture zone is sandwiched between granite and granite gneiss on the southwest and volcano-sedimentary rocks on the northeast as a non-abutment layer. The main rock types are phyllite and slate with a small amount of basalt, limestone and siliceous rock blocks, showing obvious “hybrid accumulation” characteristics. Under the coupling process of tectonic uplift, differential weathering and river erosion, it gradually evolved into a mountain deep canyon landform, which is the topographic basis for the development of geohazard. In terms of structural petrology, the structural mélange in the North Lancang River suture zone shows the characteristics of “one weak and three strong”, that is, weak metamorphism, strong deformation, strong alteration and strong orientation, which leads to serious deterioration of rocks and is the source basis of geohazard. In terms of physical and mechanical properties, the tectonic mélange appears as a set of easy to slip soft rock “formation”, rich in clay minerals, with high porosity and water absorption, low compressive and shear strength, which provides structural conditions for the development of geohazards. Tectonic activity and tectonic stress are strong in the North Lancang River suture zone, which provides dynamic conditions for the development of geohazards. The research results are conducive to further enriching and improving the geohazard breeding mechanism of tectonic mélange.

收稿日期: 2024-07-20 修订日期: 2024-10-29

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20243086, DD20240014, DD20230449); 国家科技重大专项 (2019QZKK0902)

第一作者: 李洪梁 (1990—), 男, 汉族, 四川简阳人, 博士, 高级工程师。研究方向: 矿产及灾害地质。E-mail: amsep@qq.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

[**Keywords**] North Lancang River Suture zone; tectonic mélange; structural petrology; physical and mechanical properties; geohazard effect

构造混杂岩是一套由不同时代、构造环境、变形样式和变质程度岩石组合体混杂堆积组成的构造地层^[1],是大洋板块在俯冲过程中被刮削下来的板块残片、远洋沉积物和海沟沉积物等经构造搬运并堆叠在上覆板块前端形成的以逆冲断层为边界的狭长条带状楔形地质体,代表了地块碰撞边界及俯冲消减带中洋盆消亡的痕迹^[2-5]。尽管构造混杂岩分布局限,但因其所处区域地质构造复杂而活跃,内外动力地质作用过程强烈,地貌演化过程特殊,构造混杂岩对地质灾害的发育具有明显的控制作用^[6-7]。

青藏高原及其东缘因特提斯洋特殊而复杂的构造演化制约,形成了七条构造混杂岩带,并以此为界限,分割次级地体,控制了区域构造格架^[7]。中新世以来,伴随高原的强烈隆升,这些构造混杂岩带转化为构造活动带、地震带和高温地热带^[8],是地质灾害的高频活动区。一方面,传统的浅层崩塌、滑坡和泥石流灾害等主要受构造混杂岩带及其次级断裂控制,且构造混杂岩带地震频发,可直接诱发地质灾害(链),并在震后较长时间内仍具有高风险。另一方面,构造混杂岩带作为超壳断层,是流体运移的主要通道,对于隧道等地下工程,还存在高地应力、高渗压、高地温、软岩大变形等工程地质问题^[9]。伴随川藏铁路和雅下水电开发等国家重大工程的实施,沿线构造混杂岩带已成为制约川藏交通建设工程的关键区带^[8],对其地质灾害效应的研究具有重大理论与现实意义。同时,近年来色东普、白格等与构造混杂岩相关的重大地质灾害(链)的相继爆发导致了严重的生命和财产损失,引起了国内外学者对构造混杂岩地质灾害效应的广泛思考^[10-21]。然而,目前已有的地质灾害效应研究主要聚焦活动断裂^[9,22-39]和红层碎屑岩^[40-41]等,对构造混杂岩的研究主要以孕灾机制为主^[10,13,21,38,42],在地质灾害效应方面却鲜有涉及。

张永双等^[36]、薛翊国等^[9]对青藏高原东缘部分已转化为活动断裂的构造混杂岩带的调查研究认为,其地质灾害效应表现为影响地形地貌和岩体、诱发地质灾害等;张永双等^[11]通过对金沙江结合带白格滑坡的现场调查发现,构造混杂岩带对滑坡发育的效应体现在断裂控制斜坡结构、水岩交互软化岩石结构面、卸荷作用制约滑坡规模和失稳方式;易树健等^[43]对金沙江、澜沧江和怒江结合带的调查研究认为,结合带控制了软岩(实为构造混杂岩)分

布;李洪梁等^[7]通过现场调查发现,川藏铁路沿线板块结合带地质灾害效应表现为塑造地貌、创造地形条件,劣化岩体、提供物质来源,控制地质灾害分布和诱发地质灾害(链);张永双等^[37]采用现场调查和岩土力学试验对怒江结合带多拉寺滑坡的分析认为,构造混杂岩内部的蚀变黏土化带是滑坡发育的易滑地质结构,李金秋等^[21]对白格滑坡的分析亦得出了相似结论;张永双等^[38]进一步总结了青藏高原构造混杂岩带的孕灾地质基因,包括地质构造、水热因素、岩性组合、蚀变软岩和导水通道等,是诱发地质灾害的根源。由上可知,已有的研究主要基于野外地质调查,侧重从宏观视角揭示构造混杂岩地质灾害效应,或在此基础上,结合岩土力学试验从灾害或工程地质角度进行分析,但地质灾害的形成是内外动力地质作用耦合的结果,尤其内动力地质作用是灾害发育的根本原因^[7,11]。为此,结合近年来的工作积累,以北澜沧江结合带构造混杂岩为例,在野外地质调查的基础上,以构造混杂岩构造岩石学为切入点,精细解剖构造混杂岩显微岩石组构特征,结合室内物理力学试验,剖析其物理性质和力学性能,揭示构造混杂岩的地质灾害效应,以期进一步丰富和完善构造混杂岩的孕灾机制研究。

1 区域地质环境概况

北澜沧江缝合带位于青藏高原东缘,是高原中北部龙木措—双湖结合带的东延部分^[44]。该结合带最早由李才^[45]提出,代表了龙木措—双湖—澜沧江洋的残留,被认为是原-古特提斯连续演化的产物。最新研究结果证实,北澜沧江结合带向南沿澜沧江西岸延伸,与滇西南澜沧江结合带相接(图1),是南、北羌塘地体的地质分界线^[46]。区域构造线呈北西—南东向(图2),主要构造样式为大型逆冲断层及相关斜歪褶皱。区域地层受构造扰动影像,经历了强烈改造作用,尤其以石炭系、二叠系地层最为显著,主要岩性为板岩、千枚岩、片岩及以岩块形式夹杂在其中的玄武岩、灰岩和硅质岩等,是北澜沧江结合带构造混杂岩的主要组成部分。三叠系、侏罗系和白垩系地层主要分布在北澜沧江结合带东北侧和西南侧,地层内主要发育复式褶皱,主要岩性为中-细粒碎屑岩及火山-沉积岩。除此之外,则为沿北澜沧江结合带分布的新元古代片麻岩和印支期花岗质岩石^[47],由于两者强度高,在后期构造运

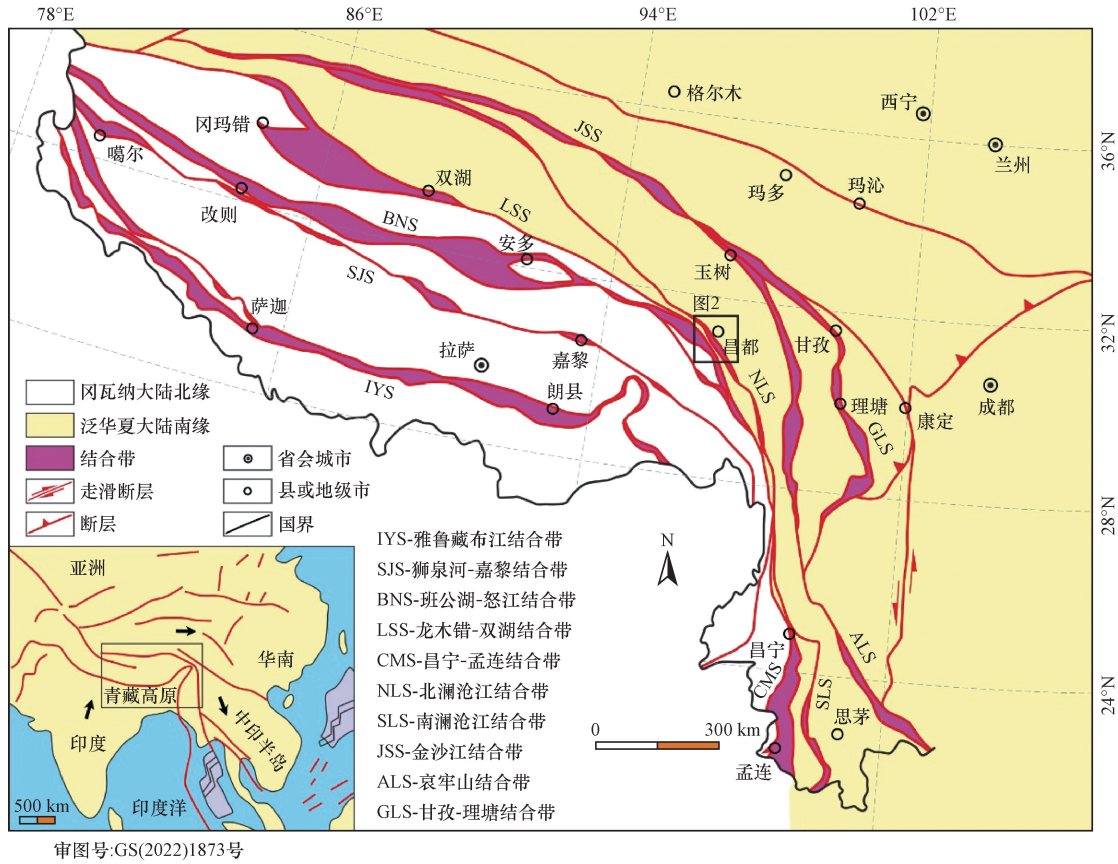


图1 青藏高原大地构造单元划分简图^[46]

Fig. 1 Simplified geotectonic units map of Qinghai-Tibet Plateau^[46]

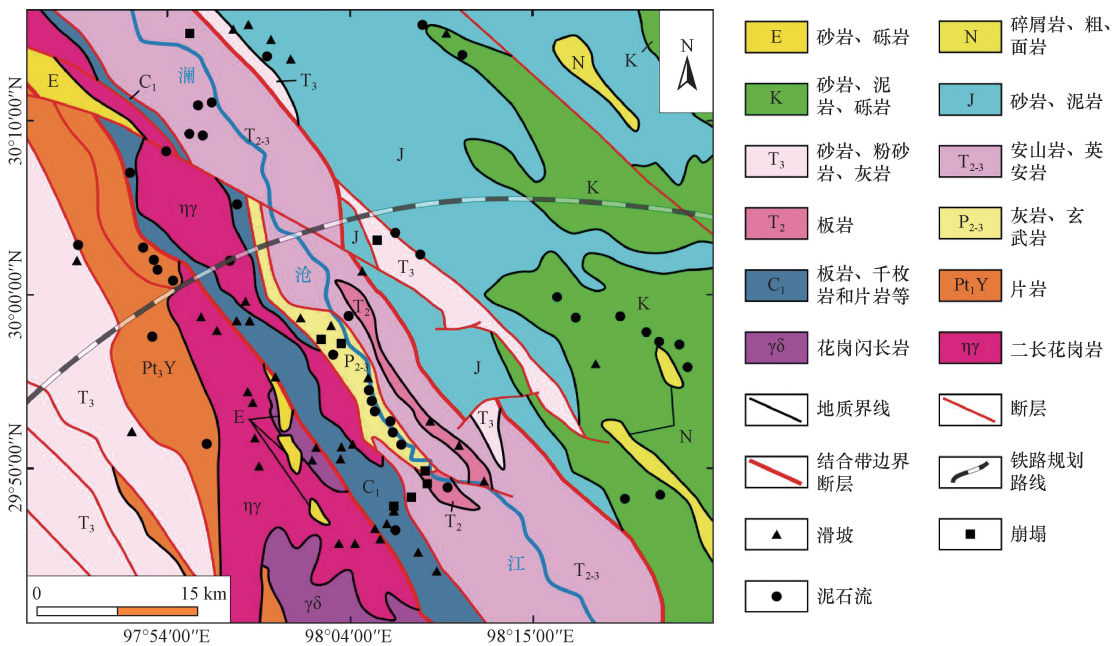


图2 北澜沧江结合带地质灾害分布

Fig. 2 Geohazards distribution of North Lancang River suture zone

动中主要以矿物之间的塑性变形为主,发育片麻状构造。新生代以来,青藏高原东缘出现显著的断块差异抬升,北澜沧江结合带持续活动,逐渐转化为右行平

移断层,现今走滑速率 $(5.1 \pm 2.1) \text{ mm/a}$ ^[48]。

北澜沧江结合带所在的藏东昌都地区夹持于芒康山与他念他翁山之间,地势北高南低,最低海

拔 2 800 m,最高海拔 5 752 m,平均海拔约 4 250 m;区内地势险要,切割深,起伏大,表现为高原高山峡谷地貌。海拔在 5 600 m 以上的山峰或山脊地带基本是终年积雪,空气极为稀薄,气候十分寒冷,表现为山岳冰川地貌。受海拔差异的影响,气候垂直分带明显,昼夜温差大;降雨量时空分布差异明显,小气候极为发育,风化作用强烈。

2 区域地质灾害发育与分布特征

遥感解译及现场调查结果显示,北澜沧江结合带区域地质灾害及隐患点共计发育 183 处,其中滑坡 89 处,崩塌 48 处,泥石流 46 处。在分布高程上,北澜沧江结合带地质灾害主要分布于 3 000 ~ 5 580 m 的主河两侧斜坡及其支沟中,其中又以 4 000 ~ 4 500 m 最为密集,显示高位特征;缓冲区分析表明,距断层距离小于 100 m 范围内地质灾害占比 19.7%,100 ~ 300 m 范围内占比 33.9%,300 ~ 500 m 范围内占比 23.1%,500 ~ 800 m 范围内地质灾害占比 19.1%,表明断层的发育对地质灾害的分布具有控制作用。

在空间分布上,地质灾害显示出明显的带状展布特征(图 2),具体表现为沿澜沧江河谷右岸密集分布,且以滑坡为主,泥石流次之。进一步梳理发现,滑坡主要分布在石炭系构造混杂岩中,指示构造混杂岩是滑坡发育的主控因素。由于地处深切河谷,滑坡前缘多抵近澜沧江河道,因此总体

表现为高位但不远程的发育特点;泥石流以小型规模为主,沟道高陡、狭窄,物源以上部构造混杂岩的风化产物为主,虽冲出方量较小,但在夏季雨水充沛季节,爆发频率极高,常常堵塞道路,影响正常通行。

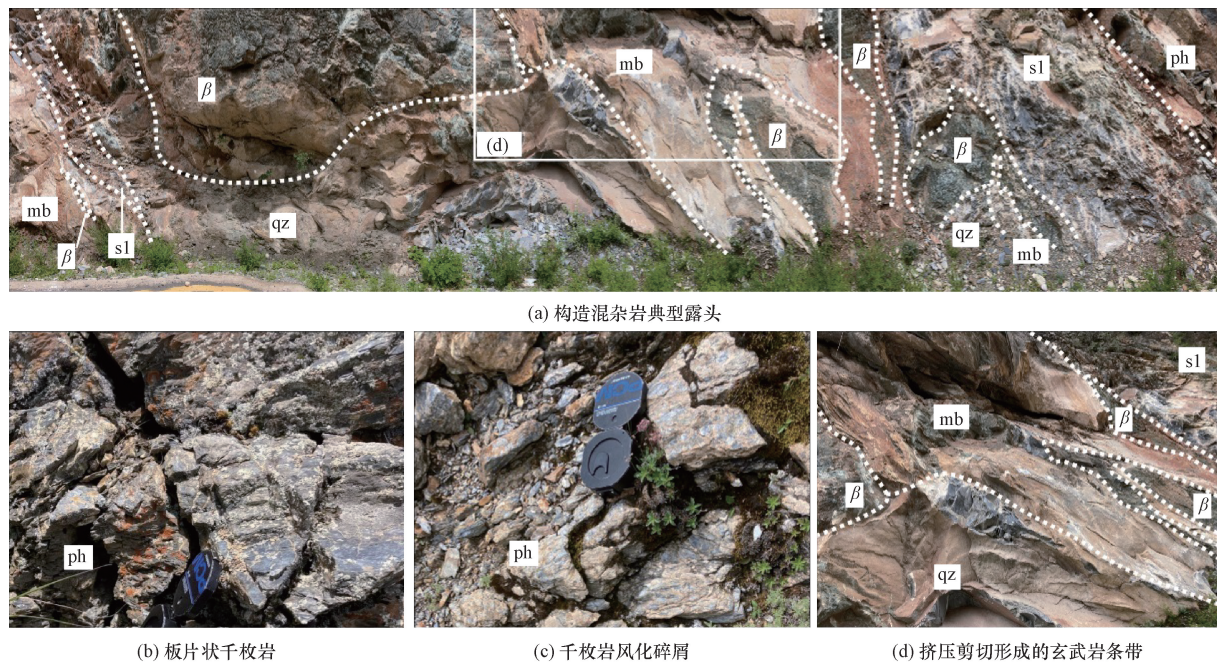
3 构造混杂岩构造岩石学与物理力学特性

3.1 构造混杂岩发育特征

作为分割南、北羌塘地体的区域性特殊超壳“断层”,北澜沧江结合带宽度介于 2 ~ 19 km,“断层”带内以构造混杂堆积为主,受后期构造—热事件影响,内部还侵入了大量印支期花岗岩体(图 2),在规模和岩石组合上明显不同于一般区域性脆性断层碎裂岩系和韧性断层糜棱岩系。

典型野外露头解剖发现,北澜沧江结合带构造混杂岩主要由基质和岩块两部分组成,具明显“混杂堆积”特征[图 3(a)]。其中,基质主要为相对塑性的板岩、千枚岩和片岩等,整体以千枚岩、板岩为主,由泥、砂质岩石变质形成,是构造混杂岩的主要组成部分。岩石经历了强烈的挤压剪切变形作用,原生层理已被置换,内部密集发育片理、千枚理和板理等结构面,将岩石切割为松散的板片状、碎屑状[图 3(b) ~ 图 3(c)],是地质灾害发育的主要物质来源。

外来岩块主要来自俯冲板片,成分较为复杂,可



ph 为千枚岩;sl 为板岩;β 为玄武岩;mb 为大理岩化灰岩;qz 为硅质岩

图 3 北澜沧江缝合带构造混杂岩发育特征

Fig. 3 Development characteristics of tectonic mélangé in North Lancang River suture zone

见玄武岩、大理岩或大理岩化灰岩、硅质岩等。岩石呈透镜状或板条状夹杂在基质中,均已不同程度变质、蚀变,受后期构造活动影响,相对塑性的玄武岩和大理岩化灰岩多被挤压剪切形成长透镜、条带状,或组合形成紧闭无根褶皱[图3(d)]。岩块与基质之间接触界线清晰,多为结合带内部发育的次级剪切带,是蚀变热液及流体活动的重要通道。

3.2 构造岩石学特征

北澜沧江结合带构造混杂岩以基质为主,其中又以千枚岩和板岩占比最高,两者均为弱变质的低绿片岩相岩石,原岩为泥质岩和砂泥质岩,变质新生矿物含量少。野外可见板岩和千枚岩互层产出[图4(a)],代表了变质之前的泥岩和粉砂质泥岩、粉砂岩之间的互层。尽管岩石变质程度低,但因北澜沧江结合带地处青藏高原东西向构造带和滇西南北向三江构造带的结合部,构造应力集中,且经历了后续班公湖—怒江结合带、雅鲁藏布江结合带闭合及高原隆升的改造,构造混杂岩变形强烈^[49-51],变形样式可分为塑性和脆性变形两类,其中塑性变形主要表现为平行面理的挤压剪切,形成各类膝折、弯折或无根褶皱[图4(b)]。脆性变形可细分为早期与千枚理近于垂直的剪节理和晚期平行千枚理或与千枚理斜交的张性裂隙,裂隙内部充填热液蚀变绢云母。此外,在千枚岩及千枚岩和板岩的接触边界,因结构面密集发育,千枚理及两侧多发育厚度不等的绢云母化带,岩石松散,呈细小鳞片状[图4(c)],表面可见明显的丝绢光泽,表明岩石经历了强烈的热液蚀变。

千枚岩和板岩作为构造混杂岩的主要组成部分和地质灾害发育的主要物质来源,本次研究重点对其进行了精细解剖。镜下可见千枚岩内部呈条带状构造,鳞片粒状变晶结构,矿物定向明显,主要由石英、长石和绢云母及少量绿泥石组成[图5(a)和图5(b)]。石英及长石颗粒沿长轴定向排列,绢云母呈细小鳞片状连续充填在长英质矿物颗粒之间,形成千枚理,将岩石分割为薄片状。在千枚理内发育剪切带[图5(b)],剪切带内主要为鳞片状的绢云母和绿泥石矿物,为低温热液蚀变的典型代表;板岩内部矿物组合、分布特征与千枚岩近于一致,区别在于板岩原岩为粉砂岩、泥质粉砂岩等,内部长石、石英颗粒粒径更大,绢云母含量更低[图5(c)和图5(d)],在较大的石英、长石颗粒边部可见挤压剪切形成的虚脱空间,内部充填绢云母及黏土矿物[图5(c)]。岩石发育平行板理的次生结构面,结构面内部以绢云母为主,边部发育长英质矿物细颗粒边[图5(d)],显示张性特征,应为后期脆性变形的产物。

为获取千枚岩的微观破裂特征,本次研究针对性的开展了扫描电镜试验。在电镜视角下,千枚岩可见单个矿物颗粒,主要包括绢云母和长石、石英颗粒,显示原岩为极细粒的碎屑岩。其中,绢云母主要呈鳞片状,定向排列显著,均已发生不同程度伊利石化,局部层间微缝隙被钙质物质充填,但无明显胶结,属方解石脉填充后层间裂隙二次破碎造成,无明显固结,因此整体较为松散,发育定向或阶梯状微裂隙[图6(a)]。石英颗粒整体特征较为破

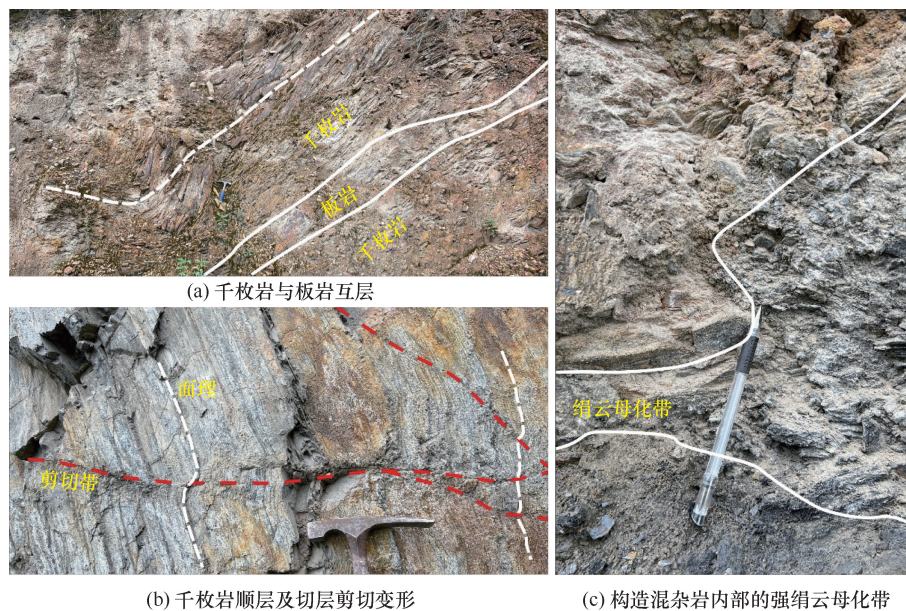
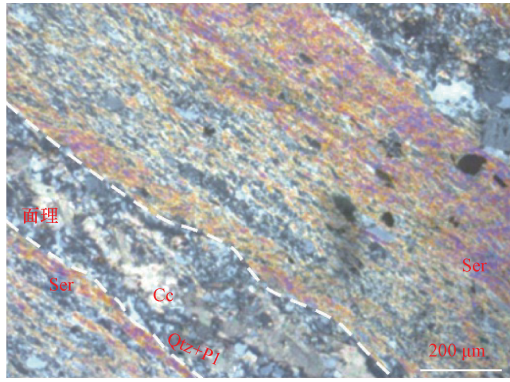
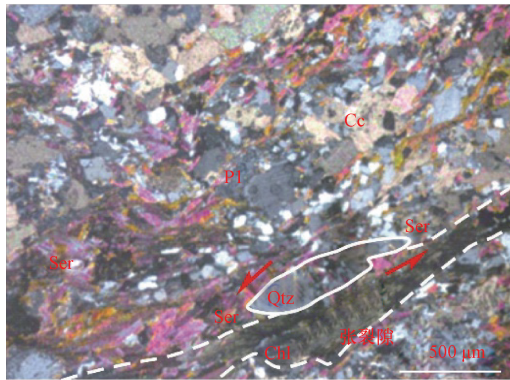


图4 北澜沧江结合带构造混杂岩宏观变质、变形及蚀变特征

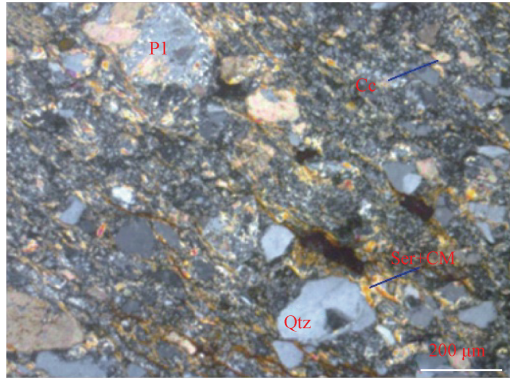
Fig. 4 Macro metamorphic, deformation and alteration characteristics of tectonic melange in North Lancang River suture zone



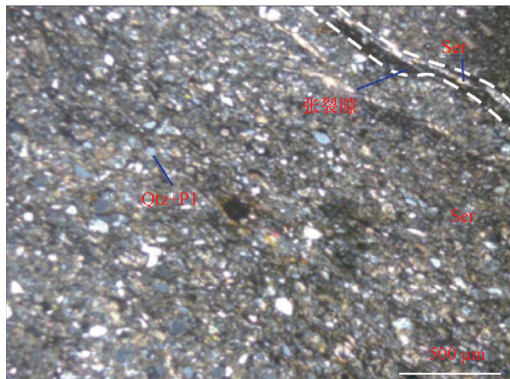
(a) 千枚岩中的条带状构造



(b) 沿千枚理发育的剪切带



(c) 板岩矿物组合特征

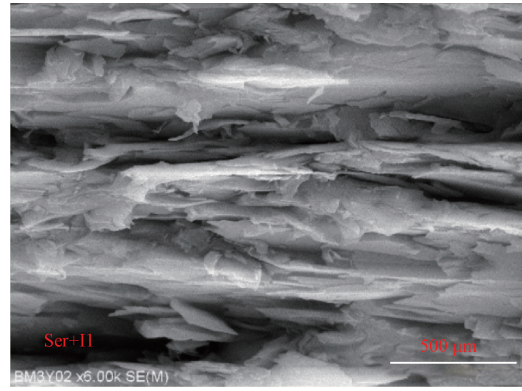


(d) 沿板理面发育的张性结构面

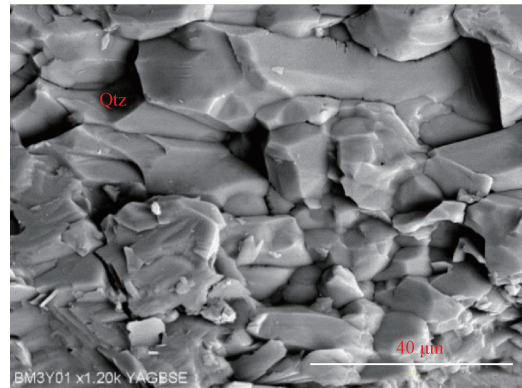
Qtz 为石英;Pl 为长石;Ser 为绢云母;Cc 为方解石;Chl 为绿泥石;
CM 为黏土矿物

图 5 构造混杂岩镜下照片

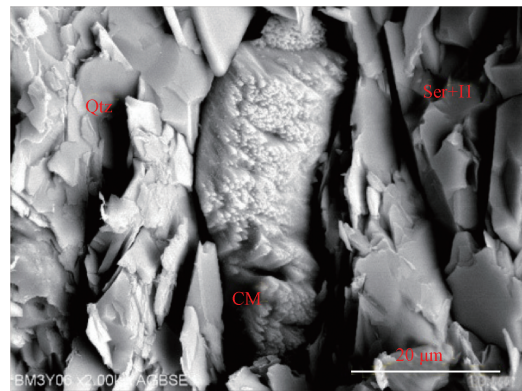
Fig. 5 Spectroscopic photos of tectonic mélange



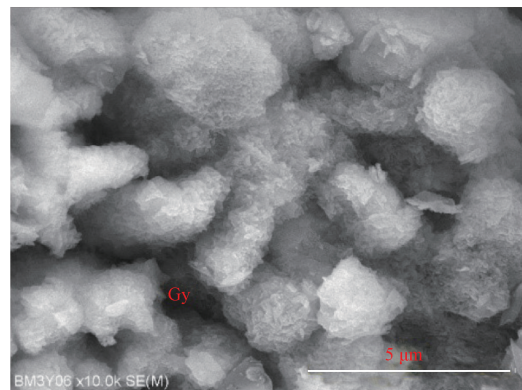
(a) 鳞片状绢云母定向排列,发育微裂隙



(b) 石英颗粒间发育的网状裂隙



(c) 千枚理间包裹的鳞片状、纤状黏土矿物



(d) 绢云母矿物层间发育的簇状石膏

Ser 为绢云母;II 为伊利石;Qtz 为石英;CM 为黏土矿物;Gy 为石膏

图 6 绢云千枚岩矿物发育特征

Fig. 6 Mineral development characteristics of sericite phyllite

碎,裂隙极为发育,完整性较差,微观下为不规则的网状裂隙,但裂隙展现出二维延展,延展方向与千枚理展布一致[图 6(b)],指示同期构造的产物,但因矿物颗粒固有的物理性质差异而表现出不同的破裂特征。石英颗粒在颗粒破裂面上发育晶体粉末,石英单晶松动,晶体间具有明显的剪切位移或错动。

值得一提的是,千枚岩中除具有显著的千枚理及未固结的破裂裂隙外,千枚理间充填了大量微细鳞片状、纤状黏土矿物,黏土矿物晶格可见显著优势生长方向,但因放大级别有限,未能从多角度观测,但可以肯定的是,单矿物晶体具有明显的定向斜列[图 6(c)],显示出同剪切构造变形特征,指示构造裂隙为张剪性。除定向排列的纤状黏土矿物外,在局部千枚理间还可见簇状石膏,晶型发散而完整,应为张性空间生长[图 6(d)]。因此,从裂隙发育期次来看,构造混杂岩至少经历了 2 期构造活动,第一期次为挤压剪切,第二期次为伸展拉张。

综上,北澜沧江结合带构造混杂岩由弱变质的低绿片岩相岩石组成,受后期构造—热液活动影,岩石发育多期次塑性和脆性变形,且原生层理面已被后期千枚理和板理面置换,内部矿物颗粒呈定向排布,层间发育强烈的绢云母化、绿泥石化等低温热液蚀变,体现出弱变质、强变形、强蚀变和强定向的特征。

3.3 物理力学特性

3.3.1 物理性质

选取板岩和千枚岩分进行了简要的物性分析,分析结果如表 1 所示。可见,岩石天然吸水率为 0.10% ~ 0.49%,平均 0.30%,饱和吸水率为 0.29% ~ 1.43%,平均 0.83%;岩石块体密度在天然和饱和状态下分别为 2.62 ~ 2.88 g/cm³、2.64 ~ 2.89 g/cm³,平均 2.71 g/cm³和 2.73 g/cm³;岩石孔隙度相差较大,天然状态下为 0.70% ~ 3.31%,平均 1.91%,而饱和状态下为 0.53% ~ 2.37%,平均 1.40%。总体而言,北澜沧江结合带构造混杂岩具有较大的孔隙度和吸水率,这与岩石千枚理、板理等

结构面的透入性发育有着密切关联,预示着岩体一般具有较低的强度。

岩体内部矿物组分类型及含量是影响岩石物性特征的重要影响因素^[52],因此本次研究利用射线衍射对构造混杂岩进行了细致的矿物组分分析,分析结果如表 2 所示。测试结果表明,构造混杂岩中典型的千枚岩、板岩岩石矿物组分主要由石英、斜长石、方解石和白云石、石膏、黏土矿物组成,偶见少量绿泥石存在,指示低温蚀变的存在。值得注意的是,不同岩石类型内部黏土矿物含量均达到了 20% 左右。从上面微观构造岩石学分析可见,构造混杂岩内部黏土矿物主要是蚀变而形成,且分布在面理之间,大大降低了岩石层系之间的抗滑力,对滑坡的发育具有促进作用。

进一步分析发现,黏土矿物主要由绢云母、伊利石(绢云母蚀变而成)和绿泥石混层组成(图 7),而这类矿物属于典型的层状硅酸盐矿物,具有遇水膨胀的特点,有着较大的比表面积,且物理化学活动性强。结合试验参数估算,北澜沧江结合带构造混杂岩内蒙脱石含量约为 13.2% ~ 19.5%,比表面积可达 276 m²/g,属于膨胀性黏土,在高原强物理风化作用的循环影响下,对构造混杂岩的物理力学性能具有严重弱化作用。

表 2 构造混杂岩矿物组分含量 X 射线衍射分析结果
Table 2 Analysis of mineral component content of tectonic mélange by X-ray diffraction

组分	含量/%			
	千枚岩 (BM3T01)	千枚岩 (BM3T02)	板岩 (BM3T03)	千枚岩 (BM3T07)
石英	45	36.2	38.6	35.8
长石	18	9.2	15	21.7
方解石	17.6	20	20.3	3.3
白云石		10.3	5.4	
石膏				2.5
硬石膏				15.9
黏土矿物	19.4	24.3	20.7	20.8
总含量	100	100	100	100

表 1 构造混杂岩基本物性指标

Table 1 Basic physical properties of tectonic mélange

编号	岩性	吸水率/%		块体密度/(g·cm ⁻³)		孔隙度/%	
		天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
BM3T01	千枚岩	0.45	1.43	2.63	2.66	3.31	2.37
BM3T02	千枚岩	0.47	1.14	2.66	2.68	2.56	1.91
BM3T03	板岩	0.10	0.59	2.68	2.69	1.47	0.99
BM3T04	千枚岩	0.49	0.72	2.70	2.71	1.46	1.23
BM3T05	板岩	0.13	0.72	2.70	2.72	1.82	1.24
BM3T06	千枚岩	0.46	1.31	2.62	2.64	2.96	2.15
BM2M01	千枚岩	0.11	0.29	2.82	2.83	0.70	0.53
BM1J04	千枚岩	0.18	0.42	2.88	2.89	1.03	0.79

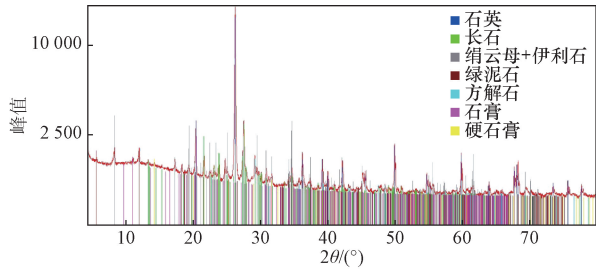


图7 千枚岩 XRD 能谱分析曲线
Fig.7 XRD analysis curve of phyllite

3.3.2 力学性能

北澜沧江构造混杂岩主要为一套弱变质、强变形、强蚀变和强定向的板岩、千枚岩基质夹玄武岩、灰岩(大理岩)岩块,局部见火山岩条带,基质沉积于由深海-斜坡-前海陆棚组成的大陆边缘环境。受早期构造应力的影响,岩石发育极为明显的透入性板理、千枚理,以及与之相交的结构面,加上高原强风化作用,岩体极为破碎,力学性能发生了极大变化,为区内典型的易滑地层,是区域滑坡分布的主要层位。

对北澜沧江结合带构造混杂岩主要岩性单元进行了系统的力学测试,测试结果如表3所示。从分析结果可见,构造混杂岩中板岩单轴抗压强度在天然和饱和状态下分别为 25 ~ 74 MPa,18 ~ 56 MPa,平均值为 50 MPa 和 35 MPa,而千枚岩的单轴抗压强度在天然和饱和状态下分别为 14 ~ 28 Ma,10 ~ 22 Ma,平均值为 21 Ma 和 15 Ma,均表现出饱和状态下大幅降低的趋势;构造混杂岩内部玄武岩、大理岩化灰岩及穿插的花岗岩等岩体及其他力学参数也表现出类似的特征,不过衰减幅度有所收窄。在抗剪强度方面,构造混杂岩中板岩的凝聚力(C)和内摩擦角(φ)分别为 1.83 ~ 4.18 MPa,40.9° ~ 43.2°,平均值为 2.96 MPa 和 42.1°,而千枚岩的凝聚力(C)和内摩擦角(φ)分别为 1.17 ~ 1.82 MPa,39.7° ~ 40.9°。

受蓝晶石莫氏硬度各项异性的启发,千枚岩、板岩的岩体结构在宏观上与蓝晶石的矿物结构类似,即蓝晶石发育 1 组[100]完全解理,在完全解理面硬度为 4 ~ 5,而在垂直解理面上为 5 ~ 7。板岩、千枚岩呈板状、板片状,发育 1 组透入性结构面(板

表3 北澜沧江结合带主要岩石类型力学指标

Table 3 Mechanical indexes of main rock types in North Lancang River suture zone

编号	岩性	受力方向	单轴抗压强度 R/MPa		天然抗剪强度		天然变形试验		
			天然	饱和	凝聚力 C/MPa	内摩擦角 φ /(°)	变形模量 $E_{50}/10^4$ MPa	弹性模量 $E_{av}/10^4$ MPa	泊松比 μ_{50}
Y58	千枚岩	平行	24.0	13.8	1.82	40.9	1.61	1.96	0.22
Y58	千枚岩	垂直	28.9	22.6					
Y57	灰岩	平行	23.7	16.8	1.79	40.8	1.58	2.04	0.22
Y56	灰岩	平行	45.4	40.1	2.96	42.2	2.75	3.50	0.19
Y55	花岗岩	平行	65.2	53.9	3.85	43.0	3.64	4.60	0.18
Y54	花岗岩	平行	94.4	71.0	5.11	43.8	4.71	6.12	0.18
Y53	板岩	平行	37.0	21.7	2.51	41.8	2.35	2.84	0.21
Y53	板岩	垂直	54.2	33.5					
Y52	板岩	平行	43.7	33.2	2.84	42.2	2.68	3.23	0.20
Y52	板岩	垂直	48.6	37.5					
Y51	板岩	平行	49.6	24.0	3.14	42.4	2.95	3.72	0.20
Y51	板岩	垂直	53.6	41.5					
Y50	板岩	平行	66.1	40.4	3.90	43.0	3.67	4.61	0.19
Y50	板岩	垂直	73.3	52.7					
Y49	灰岩	平行	67.7	44.4	3.98	43.1	3.73	4.69	0.18
Y13	玄武岩		29.3	25.6	2.13	41.3	1.73	2.10	0.21
Y12	钙质板岩		22.0	18.9	1.69	40.7	1.16	2.05	0.23
Y11	板岩		24.8	18.0	1.87	40.9	1.22	2.08	0.23
Y10	硅化板岩		20.2	16.2	1.59	40.5	1.18	1.98	0.22
Y09	千枚岩		18.5	16.1	1.48	40.3	0.95	1.63	0.23
Y08	板岩		24.7	17.8	1.83	40.9	1.25	2.03	0.22
Y07	千枚岩		13.7	10.5	1.17	39.7	0.72	1.25	0.24
Y06	灰岩		32.2	26.3	2.28	41.5	1.76	2.89	0.21
Y05	花岗岩		53.6	39.8	3.32	42.6	2.80	3.31	0.20
Y04	板岩		34.7	27.0	2.39	41.7	1.88	2.98	0.22
Y03	花岗岩		55.9	43.3	3.46	42.7	2.76	3.40	0.20
Y02	板岩		71.9	56.2	4.18	43.2	3.80	4.71	0.19
Y01	板岩		69.7	56.0	4.09	43.1	4.86	5.54	0.19

理、千枚理),是否具有与蓝晶石类似的各项异性呢?测试结果发现,板岩、千枚岩在平行结构面方向的天然抗压强度低于垂直结构面的抗压强度10%~15%,而在饱和状态下,两者差距更是达到了30%~50%,具显著各向异性。

综合对比不同岩性单元的力学性能参数,千枚岩在抗压强度、抗剪强度和天然弹性模量等各项指标均最低,表现为极弱的力学性能,其次为板岩(图8)。花岗岩为后期侵入,且与大理岩化灰岩等岩组单元经历了青藏高原隆升过程的深变质作用^[53],岩石具不同程度重结晶,从而导致其力学性能有所增强。

北澜沧江结合带内分布的滑坡主要受到构造混杂岩的控制,而滑坡主要沿混杂岩内部不同岩片

之间界线或在重力作用下形成的蠕滑面下滑。滑坡区岩体主要岩性为千枚岩和板岩,但以千枚岩为主。因此,本次研究选取滑坡区发育的千枚岩进行了剪切变形试验,剪切变形特征如图9所示,测试结果如表4所示。

从变形特征来看,千枚岩在天然状态下进行剪切试验后,剪切面出现了明显矿物粒度细化和矿物定向排列[图9(a)],显示出塑性岩石的属性。而在饱和状态下,除表现出与天然状态下相似的变形特征外,在剪切面前缘、两侧挤出更多的黏土物质[图9(b)],表明在剪切应力作用下,分布于千枚理中的蚀变黏土矿物被挤压、排泄至剪切面。同时,对天然和饱和状态下千枚岩的抗剪强度试验显示,饱和状态下的千枚岩抗剪强度相比于天然状态下降

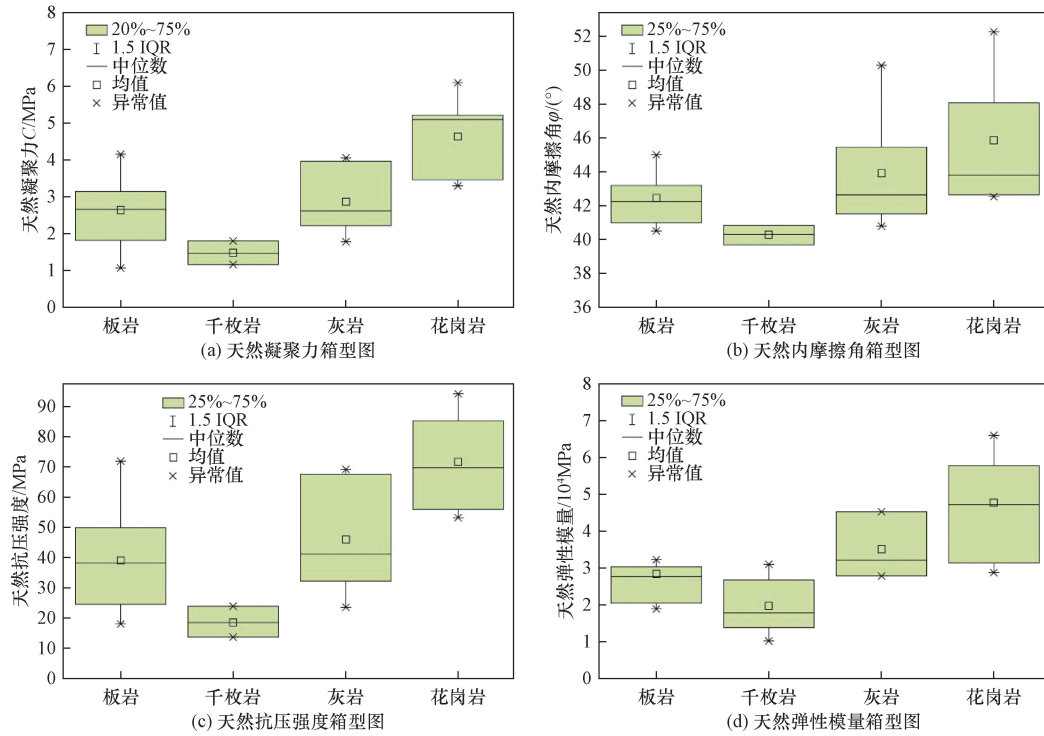


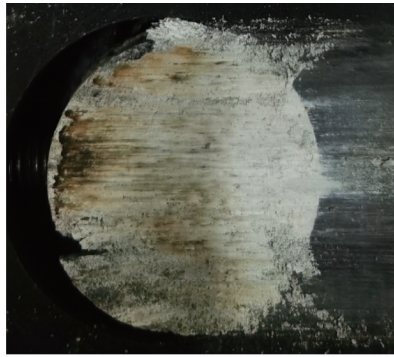
图8 北澜沧江结合带主要岩石类型力学指标箱型图

Fig. 8 Box diagram of mechanical index of main rock types in North Lancang River suture zone

表4 构造混杂岩主要岩石类型力学指标对比

Table 4 Comparison of mechanical indexes of major rock types in tectonic mélange

编号	岩性	天然抗剪强度		饱和抗剪强度		天然变形试验		饱和变形试验	
		凝聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	凝聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 $E_{50}/10^4 \text{MPa}$	泊松比 μ_{50}	弹性模量 $E_{50}/10^4 \text{MPa}$	泊松比 μ_{50}
BM3T01	千枚岩	2.54	41.8	2.10	41.3	3.94	0.20	3.18	0.22
BM3T02	千枚岩	3.07	41.9	2.13	41.3	4.04	0.21	3.24	0.24
BM3T03	板岩	2.81	42.1	2.19	41.4	4.39	0.20	3.31	0.23
BM3T04	千枚岩	1.72	40.8	1.07	39.4	2.51	0.22	1.38	0.25
BM3T05	板岩	2.25	40.9	1.24	39.8	2.78	0.22	1.67	0.24
BM3T06	千枚岩	1.68	41.0	0.96	39.1	2.84	0.21	1.24	0.25
BM2M01	千枚岩	1.97	41.2	1.13	39.5	2.97	0.21	1.49	0.23
BM1J04	千枚岩	2.91	42.2	2.45	41.7	4.57	0.18	3.77	0.20



(a) 天然状态



(b) 饱和状态

图9 千枚岩剪切变形特征

Fig. 9 Shear deformation characteristics of phyllite

了21%~76%。由此可见,构造混杂岩在饱和状态下,力学性能严重弱化,岩体破碎加剧,而沿剪切面析出的黏土矿物更是会大大降低滑坡启动的抗滑力,对滑坡等灾害的发育具有促进作用。

综上所述,构造混杂岩整体表现为一套软岩,其抗剪、抗压、弹性模量等力学参数明显弱于侵入于其中的花岗岩和经变质作用的硅质岩、大理岩化灰岩等,其中力学特性最弱的为千枚岩,分析其原因主要是由于岩石本身的矿物组成、排列特征、微观构造岩石学特征所决定的,而岩石的蚀变及饱水状态下黏土矿物的物理性质变化进一步弱化了岩体的物理力学性能,在斜坡内易形成软弱层或软弱带,进而长期蠕变演化为滑带,是地质灾害发育的结构构造条件。

4 地质灾害效应

北澜沧江结合带构造混杂岩主体沿澜沧江西岸延伸(图2),区域地形地貌为典型的高山深切峡谷,现场实测两岸坡度多在 30° ~ 50° (图10)。从宏观视角看,构造混杂岩夹持于西南侧花岗岩、花岗片麻岩和北东侧火山-沉积岩之间(图2),属于典型的非能干层,类似于“夹心饼干”中的“夹心”,在后期构造运动中表型为软弱层,一方面其原生结构、构造极易被破坏,如形成大量千枚理、板理等透入性

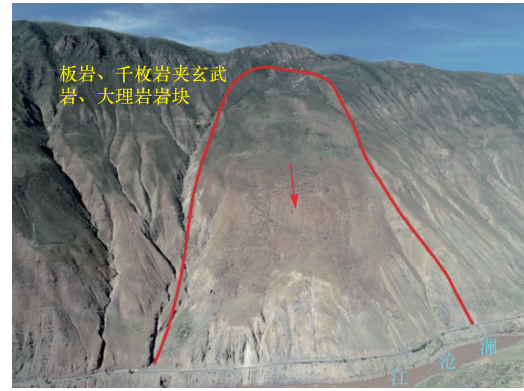


图10 北澜沧江结合带鲁岗喀滑坡全景

Fig. 10 Panoramic view of Lugangka landslide in North Lancang River suture zone

结构面和张性裂隙等,导致岩体破碎;另一方面,构造混杂岩与两侧岩体抗风化作用具有显著差别,差异风化作用极为强烈,尤其在高原强物理、化学风化作用影响下,构造混杂岩更易被剥蚀殆尽,形成负地形,伴随与高原隆升的耦合,进一步发展为高山深切峡谷(图10),这一地质过程同样适用于澜沧江两侧的雅鲁藏布江、(班公湖—)怒江、帕隆藏布和金沙江^[54-55]等大江大河。

张永双等^[36]、高杨等^[56]、熊德清等^[57]研究认为高山深切峡谷落差大,是滑坡发育的理想场所;杨志华等^[35]对青藏高原东缘地质灾害的研究发现, 25° ~ 40° 的斜坡具有最高的地质灾害敏感度;李洪梁等^[7,58]对川藏铁路沿线板块结合带的研究认为,板块结合带就位的构造运动是区域地形地貌演化的内生动力,是地质灾害发育的重要前置条件。北澜沧江结合带区域地质灾害主要分布在澜沧江河谷两岸斜坡,更确切地说是分布在构造混杂岩所在的斜坡(图2),地质灾害运动方向与北澜沧江结合带走向垂直或大角度相交(图10、图11),表明构造混杂岩在经历构造隆升—差异风化—河流侵蚀的耦合过程下,形成高山深切峡谷,为区域地质灾害的发育创造了地形条件,进而控制着灾害的发育与分布。

在构造岩石学方面,北澜沧江结合带构造混杂岩表现出“一弱三强”的特点,即弱变质、强变形、强蚀变和强定向,这一特点是导致构造混杂岩岩体严重破碎内在原因。构造混杂岩以千枚岩为主,板岩次之,原岩为砂泥质细碎屑岩,经历了低绿片岩相变质,岩石内部石英、长石等碎屑颗粒基本无重结晶,新生绿泥石呈鳞片状分布于碎屑颗粒之间,改变了岩石初始结构,是岩体劣化的诱因之一。更主要的是,受印度—欧亚板块碰撞造山影响,构造混杂岩在北东—南西向应力场改造下,岩石内部矿物

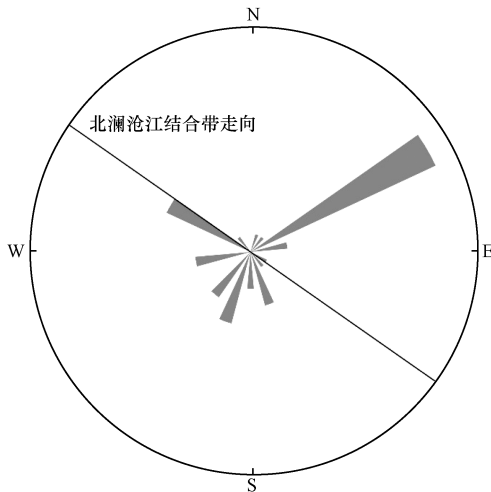


图 11 北澜沧江缝合带滑坡主滑方向玫瑰花图
Fig. 11 Rosette plot of main sliding direction of landslide in North Lancang River suture zone

强烈分异,定向排列,置换原生沉积层理,形成透入性千枚理、板理等面状构造,为低温热液提供了运移通道,加剧了对岩石的蚀变。叠加新生代以来脆性拉张构造扰动,造成岩石破碎为松散的薄板、薄片状,为地质灾害的发育提供了物质来源。

在物理力学特性方面,北澜沧江结合带构造混杂岩表现为一套易滑软岩“地层”,具高孔隙度和吸水率、低抗压和抗剪强度,富含绢云母、伊利石和绿泥石等黏土矿物,且黏土矿物主要赋存在千枚理之间,在与流体或大气降水相互作用下,水化、膨胀,在扩展结构面的同时,大大降低了斜坡上构造混杂岩的力学性能。由于片状矿物的定向排列使得“地层”滑动性增强,而千枚理间蚀变黏土矿物的出现进一步降低了构造混杂岩的抗滑力,对滑坡的发育具有显著促进作用,这也表明构造混杂岩具有天然易于孕灾的属性。

在构造动力学方面,已有研究显示,结合带就位的构造运动是藏东地区地质灾害发育的内生动力^[7]。北澜沧江结合带所代表的古洋盆经历了中-晚寒武世开启、晚泥盆世—早三叠世俯冲、中三叠世洋板片断离、晚三叠世洋盆闭合及南、北美塘地体碰撞造山的演化过程^[46,59-61]。进入新生代,北澜沧江结合带区域开启了幕式褶皱造山运动,形成了区内广泛分布的逆冲退覆断层及相关斜歪褶皱,而在中新世—更新世,以区域差异性抬升、断块掀斜为典型特征^[62-63],表明区域构造演化由早期挤压剪切转换为晚期伸展拉张,进而奠定了区域构造格架。

前已述及,北澜沧江结合带呈北西—南东向展布,是古生代—中生代原—古特提斯连续演化的产物^[46]。区域宏观构造线及北澜沧江结合带构造混

杂岩内部发育的微观千枚理、板理等面理均与北澜沧江结合带延伸一致,表明现今构造格架受控于区域大地构造演化。同时,构造混杂岩内部发育的早期挤压剪切面理与晚期纤状黏土矿物、簇状石膏等亦是区域构造演化的微观佐证。

现代构造应力场分析表明,青藏高原东缘区域最大主应力方向为北东向,向南沿喜马拉雅东构造结顺时针旋转,具明显右行走滑分量^[64]。北澜沧江结合带西接龙木措—双湖结合带,南连南澜沧江结合带,地处青藏高原腹地东西向构造和滇西南北向三江构造带结合部,属于典型的应力集中区和强震活动区,对地质灾害的发育具有显著促进作用^[7]。高精度全球定位系统(global positioning system, GPS)监测显示,印度—欧亚大陆碰撞造山导致青藏高原东缘地壳物质向南、南东挤出,现今北澜沧江结合带区域走滑速率最大为7.2 mm/a,拉张速率可达7.5 mm/a^[48],但因受到了结合带内部断续分布的碰撞型花岗岩和地壳深部结晶基底和盖层之间的近水平软弱带影响,逐渐转换为震源断裂,控制了区域应力—形变场,曾诱发 M_s 4.0级以上地震6次,如2007年妥坝 M_s 5.6级地震,诱发地质灾害40余处^[47,65]。因此,北澜沧江结合带就位的构造运动促进岩体劣化,发育大量压性、张性等透入性面理,导致岩体破碎瓦解,为地质灾害发育提供了物源来源;而区域强烈的构造应力场可直接诱发地质灾害,是地质灾害发育的动力学条件。

5 结论

以北澜沧江结合带为例,通过野外地质调查和室内测试分析,解剖构造混杂岩构造岩石学特征,分析物理力学特性,揭示了地质灾害效应,主要结论如下。

(1)北澜沧江结合带构造混杂岩主要由基质组成,主要岩石类型为千枚岩,板岩次之,夹少量玄武岩、大理岩化灰岩和硅质岩岩块,具明显“混杂堆积”特征。

(2)北澜沧江结合带构造混杂岩作为非能干层夹持于西南侧花岗岩、花岗片麻岩和北东侧火山-沉积岩之间,在构造隆升-差异风化-河流侵蚀的耦合过程下,演化为高山深切峡谷地貌,为区域地质灾害的发育创造了地形条件。

(3)北澜沧江结合带构造混杂岩经历了多期构造活动,表现出“一弱三强”的特点,即岩石弱变质、强变形、强蚀变和矿物强定向,导致岩石破碎,是地质灾害发育的物质基础。

(4)北澜沧江结合带构造混杂岩为一套易滑软岩“地层”,富含绢云母、伊利石和绿泥石等黏土矿

物,具高孔隙度和吸水率、低抗压和抗剪强度,在斜坡内易形成软弱层或软弱带,是地质灾害发育的结构构造条件。

(5)北澜沧江结合带就位的强烈构造运动及伴生的区域构造应力场是地质灾害发育的动力学基础。

参 考 文 献

- [1] 潘桂棠,肖庆辉,张克信,等. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1544-1561.
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, et al. Recognition of the oceanic subduction-accretion zones from the orogenic belt in continents and its important scientific significance[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1544-1561.
- [2] Silver E A, Beutner E C. Mélanges[J]. Geology, 1980, 8(1): 32-34.
- [3] Wakabayashi J, Dilek Y. Mélanges—processes of formation and societal significance[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2012, 18(4): 404-406.
- [4] Kusky T M, Windley B F, Safonova I, et al. Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through earth history: a record of 3. 8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion[J]. Gondwana Research, 2013, 24(2): 501-547.
- [5] Xiao W J, Santosh M. The western central asian orogenic belt: a window to accretionary orogenesis and continental growth [J]. Gondwana Research, 2014, 25(4): 1429-1444.
- [6] 李洪梁,高波,张佳佳,等. 内外动力地质作用耦合的崩塌形成机理研究:以藏东昌都地区上三叠统石灰石矿山采场崩塌为例[J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 995-1011.
Li Hongliang, Gao Bo, Zhang Jiajia, et al. Mechanism of rockfall coupled with endogenic and exogenic geological processes: a case study in the upper Triassic limestone mines in the Qamdo area, eastern Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 995-1011.
- [7] 李洪梁,黄海,李元灵,等. 川藏交通廊道沿线板块缝合带地质灾害效应[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4523-4545.
Li Hongliang, Huang Hai, Li Yuanling, et al. Geohazard effect of plate suture zone along Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4523-4545.
- [8] 潘桂棠,任飞,尹福光,等. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2293-2304.
Pan Guitang, Ren Fei, Yin Fuguang, et al. Key zones of oceanic plate geology and Sichuan-Tibet railway project[J]. Earth Science, 2020, 45(7): 2293-2304.
- [9] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445-468.
Xue Yiguo, Kong Fanmeng, Yang Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445-468.
- [10] 王立朝,温铭生,冯振,等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 1-9.
Wang Lichao, Wen Mingsheng, Feng Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 1-9.
- [11] 张永双,巴仁基,任三绍,等. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1637-1645.
Zhang Yongshuang, Ba Renji, Ren Sanshao, et al. An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1637-1645.
- [12] 张永双,杜国梁,郭长宝,等. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式[J]. 地质学报, 2021, 95(3): 605-617.
Zhang Yongshuang, Du Guoliang, Guo Changbao, et al. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(3): 605-617.
- [13] 张永双,李金秋,任三绍,等. 川藏交通廊道黏土化蚀变岩发育特征及其对大型滑坡的促滑作用[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 1945-1956.
Zhang Yongshuang, Li Jinqiu, Ren Sanshao, et al. Development characteristics of clayey altered rocks in the Sichuan-Tibet traffic corridor and their promotion to large-scale landslides [J]. Earth Science, 2022, 47(6): 1945-1956.
- [14] Chen Z, Zhou H, Ye F, et al. The characteristics, induced factors, and formation mechanism of the 2018 Baige Landslide in Jinsha River, Southwest China[J]. Catena, 2021, 203: 105337.
- [15] 李洪梁,施富强,王立娟,等. 基于三维激光扫描技术的金沙江“11·03”白格堰塞湖应急测绘研究[J]. 金属矿山, 2021, 50(4): 154-159.
Li Hongliang, Shi Fuqiang, Wang Lijuan, et al. Emergency surveying and mapping of the Jinsha River “11·03” Baige dammed lake based on 3D laser scanning technology [J]. Metal Mine, 2021, 50(4): 154-159.
- [16] Li J, Cao Z, Cui Y, et al. Hydro-sediment-morphodynamic processes of the baige landslide-induced barrier lake, Jinsha River, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126134.
- [17] Zhao B, Wang Y, Li W, et al. Insights into the geohazards triggered by the 2017 Ms 6. 9 Nyingchi earthquake in the East Himalayan Syntaxis, China[J]. Catena, 2021, 205: 105467.
- [18] Zhao B, Su L, Wang Y, et al. Insights into some large-scale landslides in southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(8): 1960-1985.
- [19] Li D, Nian T, Tiong R L K, et al. River blockage and impulse wave evolution of the Baige Landslide in October 2018: insights from coupled DEM-CFD analyses [J]. Engineering Geology, 2023, 321: 107169.
- [20] Zhang T, Gao Y, Li B, et al. Characteristics of rock-ice avalanches and geohazard-chains in the Parlung Zangbo Basin, Tibet, China[J]. Geomorphology, 2023, 422: 108549.
- [21] 李金秋,张永双,任三绍,等. 金沙江上游白格滑坡黏土化蚀变岩的灾变力学行为研究[J]. 工程科学与技术, 2023, 56(3): 72-82.
Li Jinqiu, Zhang Yongshuang, Ren Sanshao, et al. Study on catastrophic mechanical behavior of clay altered rock in Baige landslide on the upstream of Jinsha River[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 56(3): 72-82.
- [22] Ashford S A, Sitar N. Analysis of topographic amplification of in-

- clined shear waves in a steep coastal bluff [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(3): 692-700.
- [23] 吴珍汉, 吴中海, 张永双, 等. 青海西南部乌丽活动断裂系的地质特征及灾害效应[J]. *地质通报*, 2003, 22(6): 437-444. Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Zang Yongshuang, et al. Geological features and hazard effects of the Wuli active fault system on the northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(6): 437-444.
- [24] 吴珍汉, 叶培盛, 吴中海, 等. 青藏铁路沿线断裂活动的灾害效应[J]. *现代地质*, 2003, 17(1): 1-7. Wu Zhenhan, Ye Peisheng, Wu Zhonghai, et al. Hazard effects of active faulting along the Golmud-Lhasa railway across the Tibetan plateau[J]. *Geoscience*, 2003, 17(1): 1-7.
- [25] Martel S J. Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon[J]. *Marine Geology*, 2004, 203(3): 319-339.
- [26] 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(3): 457-466. Peng Jianbing, Ma Runyong, Lu Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(3): 457-466.
- [27] 彭建兵. 中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(1): 5-12. Peng Jianbing. Some important problems to be addressed in research of active tectonics and environmental disasters in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(1): 5-12.
- [28] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2377-2389. Peng Jianbing, Cui Peng, Zhuang Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [29] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 19-28. Huang Runqiu, Li Weile. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 19-28.
- [30] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(6): 818-826. Xu Qiang, Li Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 818-826.
- [31] Scheingross J S, Minchew B M, Mackey B H, et al. Fault-zone controls on the spatial distribution of slow-moving landslides[J]. *GSA Bulletin*, 2013, 125(3/4): 473-489.
- [32] 张磊, 张晓亮, 白凌燕, 等. 北京地区黄庄—高丽营断裂北段活动性研究与灾害效应分析[J]. *地质力学学报*, 2017, 23(4): 548-557. Zhang Lei, Zhang Xiaoliang, Bai Lingyan, et al. Activity study and disaster effect analysis of the north section of Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing[J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(4): 548-557.
- [33] 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 川藏铁路沿线及邻区环境地质问题概论[J]. *现代地质*, 2017, 31(5): 877-889. Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Jiang Liangwen, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet Railway and its adjacent area[J]. *Geoscience*, 2017, 31(5): 877-889.
- [34] 白永健, 倪化勇, 葛华. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(6): 1116-1128. Bai Yongjian, Ni Huayong, Ge Hua. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(6): 1116-1128.
- [35] 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 355-368. Yang Zhihua, Wu Ruian, Guo Changbao, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 355-368.
- [36] 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. *地球学报*, 2016, 37(3): 277-286. Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2016, 37(3): 277-286.
- [37] 张永双, 任三绍, 李金秋, 等. 怒江构造混杂岩带多拉寺滑坡的易滑地质结构及高位启滑运动机制[J]. *地球科学*, 2023, 48(12): 4668-4679. Zhang Yongshuang, Ren Sanshao, Li Jinqiu, et al. Prone sliding geo-structure and high-position initiating mechanism of Duolasi Landslide in Nu River Tectonic Mélange Belt[J]. *Earth Science*, 2023, 48(12): 4668-4679.
- [38] 张永双, 王冬兵, 李雪, 等. 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*, 2024, 98(3): 992-1005. Zhang Yongshuang, Wang Dongbing, Li Xue, et al. Research on hazard prone geological genes and major engineering geological problems in tectonic mélange belts of Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(3): 992-1005.
- [39] 刘道胜, 李蒙. 日喀则—吉隆铁路活动断裂特征及其工程影响[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(17): 7327-7333. Liu Daosheng, Li Meng. Characteristics of active faults and their engineering influence analysis in Domestic Section of Shigatse-Jilong Railway[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(17): 7327-7333.
- [40] 熊探宇, 张永双, 曲永新, 等. 滇西北红粘土的工程地质特性及其灾害效应[J]. *地质通报*, 2008, 27(11): 1894-1899. Xiong Tanyu, Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, et al. Engineering geological characteristic and geohazard effects of red clay in northwestern Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(11): 1894-1899.
- [41] 李滨, 吴树仁, 石菊松, 等. 陕西宝鸡市三趾马红土工程地质特性及灾害效应[J]. *地质通报*, 2013, 32(12): 1918-1924. Li Bin, Wu Shuren, Shi Jusong, et al. Engineering geological properties and hazard effects of Hipparion laterite in Baoji, Shaanxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12): 1918-1924.
- [42] 刘伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2002, 13(3): 11-20. Liu Wei. Study on the characteristics of huge scale-super high-speed-long distance landslide chain in Yigong, Tibet[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(3): 11-20.

- [43] 易树健, 崔鹏, 伍纯昊, 等. 川藏铁路廊道板块缝合带对软岩分布的控制效应及其工程影响[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 275-288.
Yi Shujian, Cui Peng, Wu Chunhao, et al. Control effects of suture zones on distribution of soft rock and its engineering influence along Sichuan-Tibet railway corridor[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 275-288.
- [44] 李才. 青藏高原龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带研究二十年[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 105-119.
Li Cai. A review on 20 years' study of the Longmu co-Shuanghu-Lancang River Suture Zone in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 105-119.
- [45] 李才. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, 1987, 17(2): 155-166.
Li Cai. The longmuco-shuanghu-lancangjiang plate suture and the north boundary of distribution of gondwana facies Permo-Carboniferous system in northern Xizang, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 1987, 17(2): 155-166.
- [46] 王保弟, 王立全, 周道卿, 等. 龙木错-双湖-昌宁-孟连结合带: 冈瓦纳大陆与泛华夏大陆的界线[J]. 地质通报, 2021, 40(11): 1783-1798.
Wang Baodi, Wang Liquan, Zhou Daoqing, et al. Longmu Co-Shuanghu-Changning-Menglian suture zone: the boundary between Gondwanaland and Pan-Cathaysia mainland in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(11): 1783-1798.
- [47] 李洪梁, 杨东旭, 田尤, 等. 北澜沧江结合带晚白垩世花岗岩成因及其地球动力学意义[J]. 地球科学, 2023, 48(4): 1330-1350.
Li Hongliang, Yang Dongxu, Tian You, et al. Genesis and its geodynamic significance of late cretaceous granites in North Lancang River Suture[J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1330-1350.
- [48] 王闯昭, 王恩宁, 沈正康, 等. 基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(5): 582-597.
Wang Yanzhao, Wang Enning, Shen Zhengkang, et al. Inversion of current activity rates of major faults in Sichuan-Yunnan region based on GPS data constraints[J]. Science in China (Series D), 2008, 38(5): 582-597.
- [49] Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the Early Mesozoic Blueschist-Bearing Qiangtang Metamorphic Belt, Central Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22(4): 1043.
- [50] Wang C, Zhao X, Liu Z, et al. Constraints on early uplift history of the Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105: 4987-4992.
- [51] Metcalfe I. Multiple tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia[J]. Gondwana Research, 2021, 100: 87-130.
- [52] 付俊, 蔡君, 郁华嘉, 等. 地应力影响下钠长岩-片岩物理力学特征随赋存深度变化规律研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(16): 6674-6680.
Fu Jun, Cai Jun, Yu Huajia, et al. Study on the variation of physical and mechanical characteristics of albitite and schist with occurrence depth based on *in-situ* stress[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6674-6680.
- [53] Xu Z Q, Dilek Y, Cao H, et al. Paleo-Tethyan evolution of Tibet as recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 105: 320-337.
- [54] He X, Zhao L F, Xie X B, et al. Weak crust in Southeast Tibetan Plateau revealed by Lg-wave attenuation tomography: implications for crustal material escape[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(3): 1-17.
- [55] Kirkpatrick H M, Moon S, Yin A, et al. Impact of fault damage on Eastern Tibet topography[J]. Geology, 2020, 49(1): 30-34.
- [56] 高杨, 李滨, 高浩源, 等. 高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 510-519.
Gao Yang, Li Bin, Gao Haoyuan, et al. Progress and issues in the research of impact and scraping effect of high-elevation and long-runout landslide[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 510-519.
- [57] 熊德清, 崔笑烽. 喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系——以西藏日喀则地区为例[J]. 地质通报, 2021, 40(11): 1967-1980.
Xiong Deqing, Cui Xiaofeng. The relationship between main geological hazard and topography in the Himalayan seismic belt: a case study in the Xigaze area, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(11): 1967-1980.
- [58] 李洪梁, 陈龙, 杨栋, 等. 藏东昌都觉学红层滑坡的地质成因分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 684-695.
Li Hongliang, Chen Long, Yang Dong, et al. Geological genesis of the Juexue red strata landslide in Qamdo, eastern Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4): 684-695.
- [59] 李洪梁, 黄海, 张勇, 等. 藏东昌都红层滑坡的地质成因模式[J]. 沉积与特提斯地质, 2024, 44(3): 493-509.
Li Hongliang, Huang Hai, Zhang Yong, et al. Geological genesis model of red strata landslide in Qamdo, eastern Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44(3): 493-509.
- [60] Fan J J, Li C, Xie C M, et al. Remnants of Late Permian-Middle Triassic Ocean Islands in Northern Tibet: implications for the late-stage evolution of the Paleo-Tethys Ocean [J]. Gondwana Research, 2017, 44: 7-21.
- [61] Zhai Q G, Chung S L, Tang Y, et al. Late carboniferous ophiolites from the Southern Lancangjiang Belt, SW China: implication for the arc - back-arc system in the Eastern Paleo-Tethys [J]. Lithos, 2019, 344/345: 134-146.
- [62] Tapponnier P. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau[J]. Science, 2001, 294(5547): 1671-1677.
- [63] Royden L, Burchfiel B, Van D H R. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. Science, 2008, 321(5892): 1054-1058.
- [64] 郝平, 吕晓健, 田勤俭, 等. 中国西部及邻区活动地块边界带现代构造应力场[J]. 地震学报, 2012, 34(4): 439-450.
Hao Ping, Lü Xiaojian, Tian Qinjian, et al. Contemporary tectonic stress field on boundaries of active tectonic blocks in and around western China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(4): 439-450.
- [65] 李渝生, 易树健, 蒋良文, 等. 川藏铁路澜沧江断裂应力形变及工程效应研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(5): 6-10.
Li Yusheng, Yi Shujian, Jiang Liangwen, et al. Research on the stress deformation and engineering effect of the Lancangjiang Fault in Sichuan-Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(5): 6-10.