https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.155

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

张永双[1,2],李金秋[1],任三绍[1],吴瑞安[2],毕俊擘[1]

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北石家庄 050061
2. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081

摘　要: 黏土化蚀变岩是在岩浆期后热液作用或后期水热作用下形成的具有不良工程地质性质的特殊地质体.在野外调查、黏土矿物测试和物理力学试验分析的基础上,阐述了川藏交通廊道黏土化蚀变岩的形成条件、区域分布特征、地质特征及蚀变程度的判据,以白格滑坡为例揭示了黏土化蚀变岩对大型滑坡的促滑作用.结果表明,黏土化蚀变岩的区域分布受活动断裂、热液作用和地层岩性控制,常沿侵入岩脉、断裂带、岩浆岩节理密集带、侵入岩体与其他岩层的接触带等部位发育,其蚀变程度按蚀变系数可划分为微蚀变、弱蚀变、中等蚀变和强蚀变4个等级,在干湿交替和松弛条件下极易发生崩解、软化,中等-强蚀变的岩体抗剪强度低.黏土化蚀变岩对滑坡的促滑作用主要体现在强度弱化效应、岩体结构劣化效应及失稳滞后效应3个方面,是促进构造混杂岩带深切河谷斜坡失稳、形成大型滑坡不可忽视的重要因素.

关键词: 构造混杂岩带;黏土化蚀变岩;工程地质特性;促滑作用;白格滑坡.

中图分类号: P642　　**文章编号:** 1000-2383(2022)06-1945-12　　**收稿日期:** 2021-09-15

Development Characteristics of Clayey Altered Rocks in the Sichuan-Tibet Traffic Corridor and Their Promotion to Large-Scale Landslides

Zhang Yongshuang[1,2], Li Jinqiu[1], Ren Sanshao[1], Wu Ruian[2], Bi Junbo[1]

1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Shijiazhuang* 050061, *China*
2. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*

Abstract: Clayey altered rock is a special geological body with poor engineering geological properties formed under hydrothermal action or hydrothermal action after the magmatic period. Based on field geological survey, clay mineral identification, and physical mechanics test analysis, the formation conditions, regional distribution characteristics, geological characteristics and the criterion of alteration degree of clayey altered rocks in the Sichuan-Tibet traffic corridor are described. Taking Baige landslide as an example, the sliding promotion of clayey altered rock on large-scale landslides are discussed. The results show that the regional distribution of clayey altered rocks is controlled by active faults, hydrothermal action and lithology. The clayey altered rocks often develop along intrusive dikes, fault zones, concentrated joint zones of magmatic rocks, and contact zones between intrusive rock mass and other rock formation. According to the alteration coefficient, the degree of alteration can be divided into four grades: very low alteration, low alteration, medium alteration and high alteration. In alternating wet and dry conditions and relaxation

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41941017,41731287);中央院所基本科研业务费项目(No.SK202109).

作者简介: 张永双(1968-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事工程地质与地质灾害研究.E-mail:zhys100@qq.com

引用格式: 张永双,李金秋,任三绍,吴瑞安,毕俊擘,2022.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.地球科学,47(6):1945-1956.

Citation: Zhang Yongshuang, Li Jinqiu, Ren Sanshao, Wu Ruian, Bi Junbo, 2022. Development Characteristics of Clayey Altered Rocks in the Sichuan-Tibet Traffic Corridor and Their Promotion to Large-Scale Landslides. *Earth Science*, 47(6): 1945-1956.

conditions, the altered rock is easy to disintegrate and soften. The medium-high altered rock mass usually has low shearing strength. The promoting effect of clayey altered rock on landslide is mainly reflected in three aspects: strength weakening effect, rock mass structure deterioration effect and instability hysteresis effect, which is an important factor in promoting the instability of slopes and large-scale landslides in deep-cut valley slopes in tectonic melange belts.

Key words: tectonic melange zone; clayey altered rock; engineering geological property; sliding promotion; Baige landslide.

黏土化蚀变岩是指岩石在蚀变作用下向土体转化的不同阶段的产物.通常,岩石受到热液作用,产生新的物理化学条件,使原岩的结构、构造以及矿物成分相应地发生改变,生成新的矿物组合.黏土化即是岩石和矿物向蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等黏土矿物的转变.黏土化蚀变岩常具有吸水膨胀、软化的特点,易松裂崩解,稳定性极差.目前矿床学领域对蚀变作用有较多的研究,但其更多地关注矿化蚀变(胡受奚等,2004;Xu *et al.*,2014),对黏土化蚀变作用及其引起的岩土体工程性质变化关注不多.

青藏高原东缘地质构造演化异常复杂,特别是川西和藏东南地区,曾经历多期强烈的构造岩浆作用并伴随发生岩浆热液成矿和热液蚀变作用,水电工程和铁路工程建设都面临着与黏土化蚀变岩相关的复杂工程地质问题.由于水电工程的特殊要求,以往对蚀变岩问题比较重视.酆文清(1988)、刘克远和邵宗平等(1989)曾对二滩水电站绿泥石化和蒙脱石化玄武岩开展了岩石学和岩体力学研究.杨根兰等(2006)、王旭东和付小敏(2008)对小湾水电站蚀变岩研究表明,蚀变岩具有低吸水率、弱膨胀性等特点,随着蚀变程度的增强,其强度和变形模量均降低.郭健等(2009)对雅砻江中游某水电站蚀变花岗岩进行了显微镜观察,从宏观和微观研究了蚀变岩的类型和基本特征.魏伟等(2012)、苗朝等(2014)对大岗山水电站和青龙水电站蚀变岩体研究表明,蚀变岩主要沿裂隙密集带或断层带发育,形成的软弱泥质条带不同程度降低了原岩的物理力学特性.魏伟等(2015)对雅砻江中游孟底沟水电站坝址区黏土化蚀变岩进行了试验研究,并对比分析了黏土化蚀变岩与断层泥的工程地质特性.杨成龙等(2019)对藏东南某水电站蚀变岩研究表明,蚀变对岩石物理力学特性具有削弱作用,岩石强度随蚀变程度的加深而降低,位于韧性剪切带内的蚀变岩物理力学指标最差.

与水电工程相比,铁路建设中对黏土化蚀变岩工程地质问题的研究相对较少.张永双等(2007)对滇西北蚀变软岩发育分布特征进行了分析,发现蒙脱石化蚀变软岩的发育分布主要受三江构造带的活动断裂及热液作用等影响.彭建兵等(2020)认为,在川藏交通廊道板块缝合带与活动断裂附近发育受构造应力及热液作用影响的碎裂岩、黏土化蚀变岩等软弱岩土体,具有强度低、变形量大的特点,易产生显著的流变破坏,需要格外关注.易树健等(2021)认为,川藏交通廊道受板块缝合带特殊的构造活动形式与温压条件等影响,泥岩、片岩、板岩等软弱岩石及糜棱岩、碎裂岩和损伤岩带等构造软岩主要分布在缝合带内部及其边界断裂两侧,其所研究的"软岩"主要是指"单轴抗压强度UCS<40 MPa的泥岩、页岩、各类软弱变质岩及力学性质低劣的构造损伤岩带、碎裂岩、断层破碎带等",并非本文所指黏土化蚀变岩.

国外学者对蚀变岩的研究大致可分为两类:一是通过现场调查和地球化学测试,研究岩石蚀变的过程,以及蚀变作用对母岩结构、成分和性能的影响(Simon, 1990; Fedo *et al.*, 1995; Yoshida *et al.*, 2009; Meller *et al.*, 2014);二是基于试验模拟分析岩石与热液的作用环境,探究在不同温度和应力下的矿物共生关系,分析蚀变岩中氧化物的地球化学变化,得出温度、应力和pH值等对岩石蚀变的影响(Savage *et al.*, 1987; Dolejš and Wagner, 2008; Machek *et al.*, 2013; Jamali *et al.*, 2019).以上研究都反映了黏土化蚀变作用可不同程度地弱化岩体的物理力学性能,通常具有"强度低、孔隙度大、胶结强度差、受结构面影响显著、含有大量膨胀性黏土矿物等"特征,是值得深入研究的特殊地质体.

本文针对川藏交通廊道黏土化蚀变岩工程地质问题,在野外地质调查、黏土矿物组成鉴定和物理力学试验分析的基础上,开展了黏土化蚀变岩的形成条件、区域分布特征及地质特征研究,圈定了川藏交通廊道黏土化蚀变岩易发区带.以白格滑坡为例,剖析了黏土化蚀变岩的不良工程特性及其对大型滑坡的促滑作用,对于川藏交通廊道大江大河岸坡稳定性评价和防灾减灾具有启示意义.

1　川藏交通廊道地质背景

川藏交通廊道所在的青藏高原东南缘是世界上地质条件最复杂、构造活动最强烈的地区．地层岩性的分布受地质构造控制作用显著（图 1）．潘桂棠等（2020）认为，川藏交通廊道雅安－林芝段穿越 7 条构造混杂岩带，伴随中新世以来高原强烈隆升均转化为活动构造带、地热活跃带和地质灾害频发带．印度板块向北俯冲导致青藏高原物质向东挤出旋转运动，在地壳运动不均匀部位形成不同方向的活动断裂带，如龙门山断裂带、鲜水河断裂带、理塘－德巫断裂带、澜沧江断裂带、金沙江断裂带、怒江断裂带、察隅－嘉黎断裂带等．在内外动力耦合作用下，川藏交通廊道地质环境脆弱，铁路、高速公路等重要交通工程规划建设面临的重大工程地质问题前所未有．

当前，对川藏交通廊道面临的地质安全风险有了较全面的认知（彭建兵等，2020；张永双等，2021），明确提出区域活动断裂、地质灾害与高边坡、高地应力与隧道岩爆和大变形、隧道高温热害与涌水突泥等是制约工程规划建设的关键地质问题，但对多种工程问题密切相关的黏土化蚀变岩的认识尚比较初浅，很有必要从蚀变岩形成条件、区域地质背景及其控制因素等方面进行研究．

2　黏土化蚀变岩的发育特征与蚀变程度判别

2.1　黏土化蚀变岩的形成条件

区域性大范围蚀变岩的形成，常受控于重大地质事件和地质作用，尤其是与区域深断裂的构造岩浆活动有关（叶同庆，1991；翟裕生，1999；王保弟等，2020）．因此，岩石类型、活动断裂和流体作用是产生区域蚀变的前提，具有一定规模且稳定的热源是促使岩石蚀变的动力条件．由于不同地区岩浆侵入体的规模、成分、类型和围岩成分有所差异，因而蚀变作用和蚀变岩的类型极其复杂．

从工程地质角度，黏土化蚀变对工程的危害最严重，成为工程地质研究中最受关注的对象．黏土矿物是地壳浅层和表层由原生硅铝酸盐矿物如长石、辉石、角闪石、云母等水化水解转化而成的，故常称为次生硅铝酸盐矿物．蒙脱石是含镁、含水的硅铝酸盐矿物，是在富镁的微碱性水地球化学环境下形成和赋存的；富钾的环境有利于伊利石的形成，水交替强烈的酸性介质有利于埃洛石和高岭石的形成．中、基性岩石如安山岩、闪长岩、辉绿岩、辉长岩、玄武岩等有利于蒙脱石的形成．

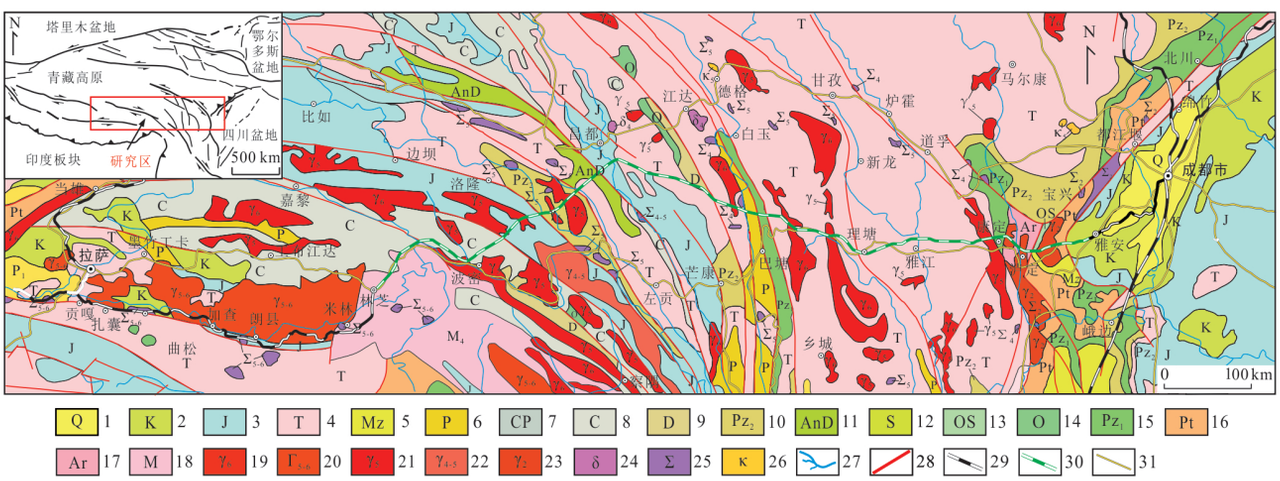


图 1　川藏交通廊道地质略图

Fig.1　Geological map of Sichuan-Tibet traffic corridor

1.第四系冲洪积、冰碛物等；2.白垩系陆相碎屑岩为主，局部海相碎屑岩及火山岩；3.侏罗系陆相碎屑岩为主，藏南海相砂页岩夹泥灰岩；4.三叠系海相砂板岩夹灰岩、砂页岩、砾岩及火山岩；5.中生界并层；6.冈瓦纳相（灰岩、砂板岩夹玄武岩、千枚岩）；7.石炭－二叠系并层；8.冈瓦纳相（砂页岩、大理岩、灰岩）；9.泥盆系（中－上统为磨拉石）；10.上古生界并层；11.前泥盆系变质砂板岩、片麻岩、大理岩；12.志留系灰岩夹千枚岩、大理岩夹基性火山岩；13.奥陶－志留系并层；14.奥陶系碎屑岩及火山岩；15.下古生界并层；16.元古宇；17.太古宇；18.中生代杂岩；19.喜山期花岗岩；20.燕山晚期－喜山期花岗岩；21.燕山期花岗岩；22.华力西期－燕山期花岗岩；23.元古宙花岗岩；24.闪长岩类；25.超铁镁质岩类；26.碱性岩类；27.水系；28.断裂；29.已建铁路；30.在建铁路；31.公路

由于蒙脱石及其混层矿物分布的广泛性，它是膨胀性粘土矿物研究的主体．大量研究表明，虽然硅酸盐岩经过热液作用都可以形成蒙脱石，但不同岩石形成蒙脱石所需要的条件不同．由于蒙脱石硅氧四面体和铝氧八面体晶层中普遍存在 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 的同晶置换作用，即 Mg^{2+} 是蒙脱石矿物晶格中不可缺少的成分，因此蒙脱石的形成必须有足够的 Mg^{2+} 参与．Mg^{2+} 的来源一般有 3 种途径：一是富含 Mg 的岩浆岩体本身，如辉绿岩、辉长岩、玄武岩等基性岩；二是富 Mg 的围岩，如白云岩、白云质灰岩、白云质大理岩；三是富含 Mg^{2+} 的地下热水作用．

一般地，在 80～110 ℃条件下蒙脱石可转化为伊利石/蒙脱石混层矿物，在 130～180 ℃条件下伊利石/蒙脱石混层矿物转化为伊利石，温度再高则形成白云母．也就是说，遭受 180 ℃以上温度长期作用的泥质岩不仅膨胀性粘土矿物消失，一般粘土矿物也消失．由于高纬度（南北纬度 60°以上）和高海拔（高程 4 000 m 以上）地区年平均气温低，化学风化作用极其微弱，在第四纪沉积物中一般不会有黏土的形成，但在地下热水和温泉发育的高纬度、高海拔地区有局部蚀变型黏土的分布．

2.2　黏土化蚀变岩带的区域分布特征

前已述及，黏土化蚀变岩是一定地质环境、一定地质作用的产物，其区域分布受活动断裂、热液作用和地层岩性的控制．作者首先在 1∶20 万地质图的基础上，提取了基性和中酸性岩浆岩的分布．然后，根据区域地热异常带和温泉的分布特征，识别热液作用活跃区．最后，结合现场调查资料综合分析，初步圈定了川藏交通廊道黏土化蚀变岩的易发区带（图 2）．

（1）康定－大渡河黏土化蚀变岩带．该带位于鲜水河断裂带控制的地热活跃带，温泉出露较多，温度多高于 60 ℃．分布较多的中酸性岩浆岩，局部有基性岩脉侵入．已在大渡河大岗山水电工程中发现了黏土化蚀变岩（魏伟等，2012）．

（2）理塘－雅砻江黏土化蚀变岩带．该带属于甘孜－理塘地热活跃带，主要受甘孜－理塘活动断裂控制，出露温泉最多，50％以上的温泉温度高于 40 ℃．该带主要为呈 NNW 向分布的长条状中酸性岩浆岩（花岗岩、花岗闪长岩）．在雅砻江孟底沟水电工程中遇到黏土化蚀变岩（赵梓彤等，2016），主要沿裂隙密集带产出，黏土化由中间向两侧逐渐提高，以伊利石、高岭土为主，蒙脱石次之．

（3）巴塘－金沙江黏土化蚀变岩带．该带属于金沙江活动构造带，受金沙江断裂和巴塘断裂联合控制，巴塘段地温高、沸泉多、水热活动强烈．沿断裂带分散发育中酸性岩浆岩以及基性岩脉．该蚀变岩带主要为岩浆期后的热液蚀变岩，少量为火山岩的热液蚀变，以母岩普遍发生蒙脱石化为主要特征．沿金沙江岸坡发现多处蚀变岩带，蚀变岩具有单体规模小、蚀变程度高、工程性质差的特点．

（4）昌都－察雅黏土化蚀变岩带．该带位于澜沧江断裂带控制的地热异常带，呈 NW-SE 向带状展布，属于中低温地热异常区，出露温泉一般低于 40 ℃．该带以基性岩为主，范围较小．

（5）八宿－怒江黏土化蚀变岩带．该带属于怒江断裂控制的怒江－八宿地热带，出露温泉温度大多在 40～60 ℃，区域上为典型的构造岩浆热液成矿

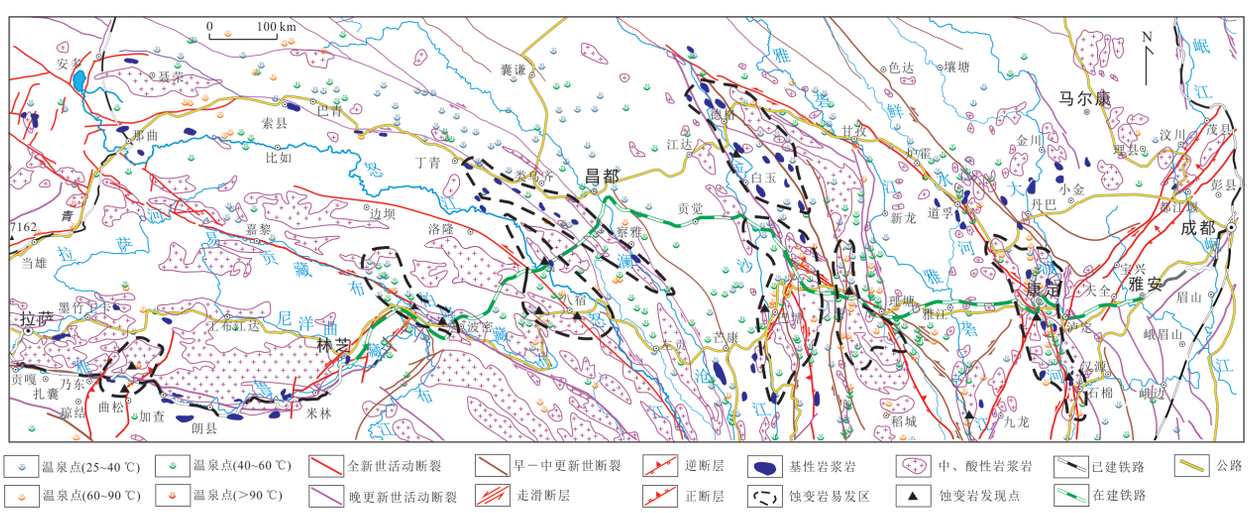


图 2　川藏交通廊道黏土化蚀变岩的区域分布特征

Fig.2　Regional distribution characteristics of clayey altered rocks in Sichuan-Tibet traffic corridor

蚀变带．黏土化蚀变岩多处于构造断裂部位或遭到构造破碎的区域．发生蚀变的母岩以中酸性岩浆岩为主，岩石的蚀变主要是斜长石→蒙脱石化；黑云母、角闪石→绿泥石化．硫化矿氧化带部位的蚀变岩，在粘土矿物组成上出现明显的高岭石化现象．

（6）波密－通麦黏土化蚀变岩带．该带主要受嘉黎－察隅断裂带控制，在断裂交汇处形成地热异常区，出露温泉温度多高于 60 ℃．沿嘉黎断裂带花岗岩发育中低温水热蚀变岩带，根据以往测试结果，粘土矿物组成多为高混层比的伊利石/蒙脱石混层矿物、少量伊利石和绿泥石．

（7）雅鲁藏布江黏土化蚀变岩带．该带主要由雅鲁藏布江构造缝合带控制，发育岩浆期后蚀变岩带和水热蚀变岩带．沿基性－超基性岩体发育的黏土化蚀变带多与岩浆分异作用有关，以罗布莎铬铁矿区为代表，矿体围岩（纯橄榄岩、辉橄岩）产生了明显的绿泥石化、蒙脱石化现象，在干湿交替作用下工程性质明显变差．沿构造缝合带发育的中酸性岩体出现高岭石化现象，但由于水热作用不均，主要沿裂隙呈面状蚀变．

2.3　黏土化蚀变岩的地质特征及蚀变程度判别

在野外地质调查过程中发现，川藏交通廊道多个地段发育工程性质很差的黏土化蚀变岩，其宏观产出特征与岩浆岩体或混杂岩带有关，蚀变程度明显受断裂、节理构造和热液活跃程度影响，蚀变岩的完整性因蚀变程度的不同而有所差异．

2.3.1　黏土化蚀变岩的出露特征　按照母岩性质，黏土化蚀变岩可分为基性蚀变岩和中酸性蚀变岩．根据蚀变岩带与围岩的交错关系和产出状态（图 3），主要有以下 4 种基本类型．

（1）沿侵入岩脉发育．黏土化蚀变岩在空间上多呈条带状或透镜状展布．

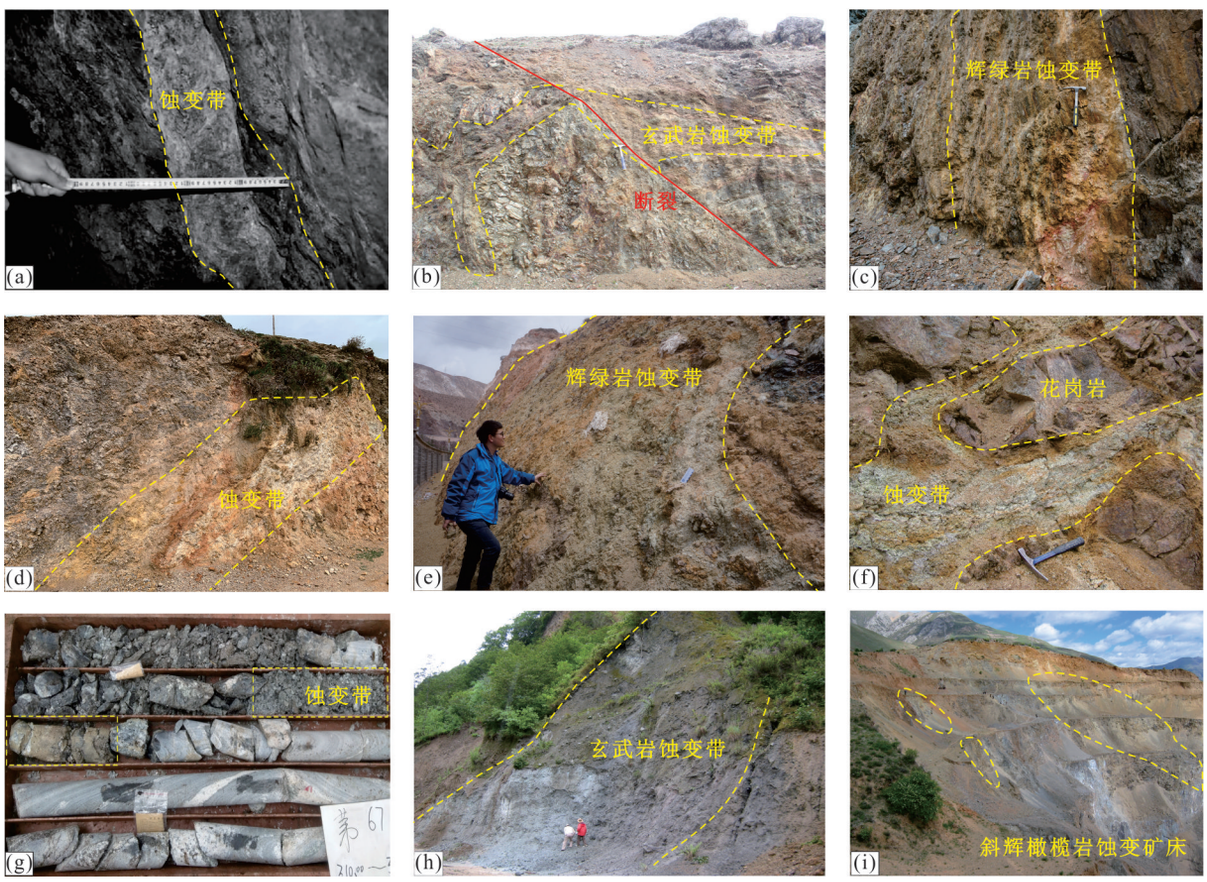


图 3　不同类型黏土化蚀变岩的宏观产出特征

Fig.3　Macroscopic characteristics of different types of clayey altered rocks

a.大渡河大岗山辉绿岩脉内的蚀变岩；b.理塘一带玄武岩蚀变带；c.巴塘一带蚀变岩带；d.芒康一带的断裂带蚀变岩特征；e.八宿县城东蚀变岩带；f.然乌北花岗岩裂隙蚀变岩；g.嘉黎断裂带蚀变岩钻孔岩心；h.鲁朗一带玄武岩蚀变带；i罗布莎铬铁矿坑边坡蚀变岩

表1　黏土化蚀变岩的粘土矿物组成及蚀变系数实验结果

Table 1　Test results of clay composition and alteration coefficient of clayey altered rocks in Sichuan-Tibet traffic corridor

编号	采样地点	蚀变岩颜色	粘土矿物相对含量(%)					I/S混层比(%)	粘粒组成(mm·%)		蚀变系数(ζ)
			S	I/S	I	K	C		<0.005	<0.002	
BGS-01	白格滑坡上游	灰色	—	—	97	3	2	—	27.8	20.8	0.71
BGS-02	白格滑坡后缘	灰色	—	4	22	—	74	90	10.0	5.9	0.65
BG01-01	白格滑坡滑带土	灰色	—	36	55	4	5	53	22.0	13.6	0.85
BG01-02	白格滑坡滑带土	灰色	—	4	22	—	74	90	8.7	5.4	0.64
BS-01	八宿县城东侧	灰绿色	—	—	96	2	2		8.4	6.4	0.68
BS-02	八宿县城东侧	土黄色	56	—	23	4	17		11.4	8.9	0.72
TMDA-01	巴塘金沙江右岸	褐黄色	9	26	46	5	14	81	20.3	15.4	0.75
NJ-01	同卡镇怒江大桥	棕黄色	67*	—	—	—	—		6.4	5.4	0.44
JSJ-01	绒盖乡金沙江左岸	灰色	—	12	76	12	—	40	—	—	—
JSJ-02	绒盖乡金沙江左岸	灰色	24	34	—	36	6	67	28.6	18.7	0.76

注:*为半定量测试结果.

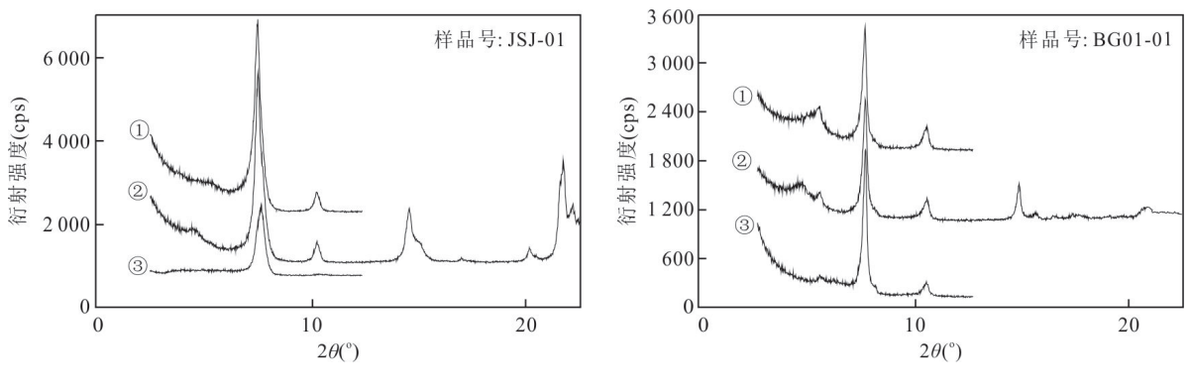


图4　黏土化蚀变岩<5 μm粘粒的XRD定量测试结果

Fig.4　Oriented X-ray diffractograms of <5 μm clay fraction in clayey altered rocks

①天然样品;②乙二醇处理样品;③550 ℃加热处理样品

(2)沿断裂带发育.黏土化蚀变岩的原岩类型多样、蚀变带宽度不一,但受构造控制比较明显,蚀变程度呈现从中间向外围逐渐减弱的分带性.

(3)沿岩浆岩节理密集带发育.单条蚀变岩带的规模不一,宽度为0.5~3.0 m;沿长大节理可形成软弱夹层或层间剪切带.

(4)沿侵入岩体与其他岩层的接触带发育.黏土化蚀变岩受接触带和热液作用控制比较明显,当超基性岩脉与大理岩接触时,蒙脱石化蚀变作用最发育.

除了上述基本类型外,在不少情况下,黏土化蚀变物与母岩交错镶嵌在一起.遭受黏土化蚀变的岩体多呈松散状,在地表附近与风化作用叠加,岩土体性质更加劣化.

2.3.2　蚀变程度及其判别　蚀变程度对黏土化蚀变岩的工程地质特性具有直接的影响,蚀变岩强度和浸水软化效应随着蚀变程度的变化而变化.采用3种方法处理的样品(悬液制成的定向片、乙二醇饱和处理的定向片、550 ℃条件下加热的定向片)进行粘土矿物X-射线衍射定量测定表明,川藏交通廊道黏土化蚀变岩的黏土矿物成分由蒙脱石、伊/蒙混层、伊利石、高岭石和绿泥石组成(表1和图4),不同区段有所差异.

目前,蚀变程度的划分尚无统一标准,魏伟等(2012)按照蚀变岩的地质特征和工程性状分为强蚀变、弱蚀变和微蚀变3级,并认为随着蚀变程度的增强,抗压强度、抗剪强度及模量值降低,峰值应变量及泊松比增加,吸水率和抗压强度存在着对应关系(图5),故可用吸水率和抗压强度的关系来分析蚀变作用对岩体物理力学特性的影响.

为了揭示蚀变作用的工程效应,张永双等(2007)依据蚀变作用、黏土矿物成分与含量及吸水

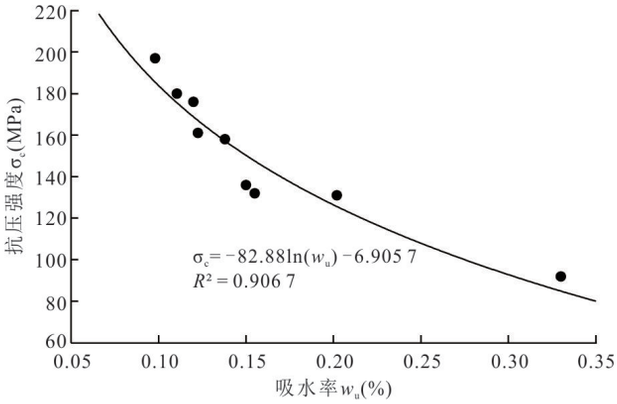


图 5　黏土化蚀变岩吸水率与抗压强度的关系曲线(据魏伟等，2012 数据编绘)

Fig.5　Relationship between water absorption and compressive strength of clayey altered rock (data from Wei *et al.*, 2012)

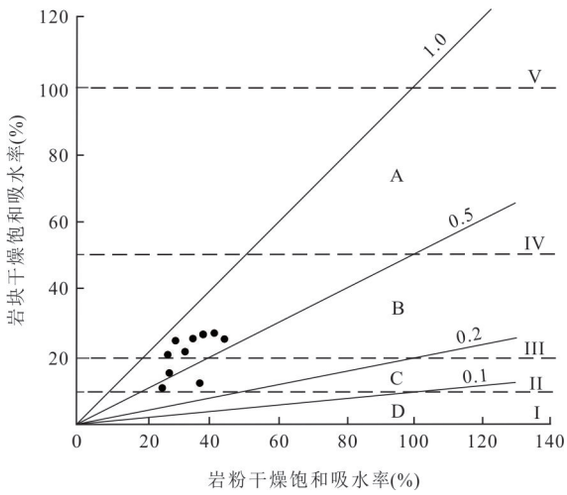


图 6　典型黏土化蚀变岩的蚀变程度判别图

Fig.6　Discrimination diagram of alteration degree of typical clayey altered rock

A. 强蚀变；B. 中等蚀变；C. 弱蚀变；D. 微蚀变；I. 非膨胀；II. 微膨胀；III. 弱膨胀；IV. 强膨胀；V. 剧膨胀

率之间的关系，把岩块干燥饱和吸水率与<0.005 mm 岩粉吸水率的比值定义为“蚀变系数 ζ”，用来进行蚀变程度的划分. $\zeta\leqslant0.1$ 为微蚀变，$0.1<\zeta\leqslant0.2$ 为弱蚀变，$0.2<\zeta\leqslant0.5$ 为中等蚀变，$0.5<\zeta\leqslant1.0$ 为强蚀变. 蚀变系数越大，蚀变程度越高，这也与黏土化蚀变岩的力学性质具有较好的对应性. 对川藏交通廊道典型黏土化蚀变岩的实验分析结果表明，黏土化蚀变岩的黏粒含量与蚀变系数呈正相关性(表 1)，不少黏土化蚀变岩的蚀变程度达到了中等－强蚀变的等级，且具有微－弱膨胀性(图 6)，对岩体工程地质特性有显著的影响.

3　黏土化蚀变岩的促滑作用——以白格滑坡为例

黏土化蚀变岩除了本身具有软弱力学性质等共同属性外，还可能因不同的发育特征或与其他地质条件耦合，诱发更加复杂的工程地质问题或地质灾害. 例如，黏土化蚀变岩与节理裂隙的叠合可大大降低节理裂隙的抗剪强度；在深切河谷岸坡区黏土化蚀变带厚度较大时，可对大型－巨型滑坡的演化起到关键的促滑作用. 现以金沙江上游白格滑坡为例简要分析其促滑机理.

3.1　白格滑坡黏土化蚀变岩的发现

白格滑坡位于中国西藏与四川交界的金沙江右岸江达县波罗乡白格村，是在金沙江构造混杂岩带发生的高位滑坡，分别于 2018 年 10 月 11 日和 2018 年 11 月 3 日发生两次大规模滑动，导致金沙江断流，形成蓄水量约 2.9×10^8 m^3 的堰塞湖，造成上游多条道路被淹；泄洪后出现较大洪峰，四川、云南等下游部分地区多座桥梁被冲毁，造成巨大的经济损失(许强等，2018). 白格滑坡所在的斜坡地层自下而上可分为 3 段，下段为绿泥石片岩、变质玄武岩夹大理岩；中段为千枚岩、板岩夹大理岩，局部含糜棱岩化花岗岩；上段为蛇纹石化辉石橄榄岩、蛇纹岩，3 个岩性段之间为断层接触. 上述斜坡特征完全具备了黏土化蚀变岩发育条件. 因此，张永双等(2020)认为，白格滑坡的形成主要由以下因素控制：(1)构造混杂岩带及断裂作用控制斜坡岩体结构；(2)蚀变软岩夹层及其与水的作用促进结构面弱化；(3)卸荷带控制滑坡规模和失稳方式. 但当时仅在地表节理密集带和个别钻孔中见到了零星的蚀变岩，未找到完整的地质露头.

2021 年 4 月，笔者再次到白格滑坡现场调查发现，滑坡左侧(上游侧)进一步发生大规模滑动，并且在滑坡后壁发现了较连续的黏土化蚀变岩滑带土，出露厚度达 15～20 cm(图 7). 宏观上表现为节理化的蛇纹石化辉石橄榄岩、玄武岩中夹黏土化条带或透镜体，蚀变的岩体呈土状或泥状夹层，在干湿交替和松弛条件下岩体性质劣化加剧，自稳能力很差. 这与距白格滑坡 10 km 左右的叶巴滩水电站坝址区斜坡探硐揭露的蒙脱石化、绿泥石化蚀变岩具有一致的成生环境(刘恋嘉，2017).

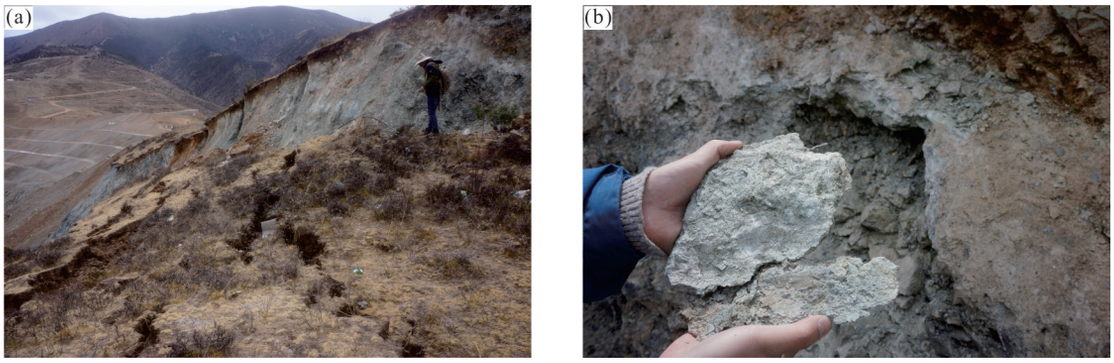


图 7　白格滑坡后壁及黏土化蚀变岩滑带土特征

Fig.7　Characteristics of back wall of Baige landslide and sliding zone soil composed of clayey altered rock

a.白格滑坡近期滑动形成的后壁(镜向 SSW);b.在滑带中采集的黏土化蚀变岩(镜向 SW)

3.2　黏土化蚀变岩的促滑作用

为了揭示黏土化蚀变岩对大型滑坡的促滑作用,我们在白格滑坡采集了典型的黏土化蚀变岩样品,分别开展了黏土矿物组成实验、崩解耐久性试验、直剪和环剪试验等.根据现场工程地质分析和室内实验测试结果,黏土化蚀变岩的不良工程地质特性是促进白格滑坡形成演化的重要因素之一,其促滑作用主要体现在强度弱化效应、岩体结构劣化效应和失稳滞后效应等方面.

(1) 强度弱化效应.尽管黏土化蚀变岩在滑带中多表现为"泥包砾",但是由于含有较多的亲水性黏土矿物(表 1),在剪应力作用下易定向排列(图 7b,图 8),其力学性质比一般的含砾土差得多.分别采集了钻孔揭露的斜坡卸荷带充填土和黏土化蚀变岩滑带土样品,制备成粒度级配、含水率等条件相近的试样,进行直剪试验.结果表明(图 9),前者的内摩擦角 31.8°、内聚力 39.1 kPa,而后者的内摩擦角 30.7°、内聚力 29.0 kPa,明显比前者的抗剪强度低,反映了黏土化蚀变岩的物质组成和黏土矿物的定向排列对滑带强度具有明显的弱化效应(图 10).

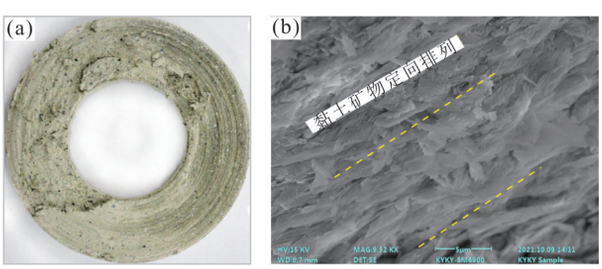


图 8　环剪试验后的试样剪切面形态和微观结构特征

Fig.8　Morphology of the shear surface and microstructure of the specimen after the ring shear test

a.试验结束后的剪切面形态;b.黏土矿物定向排列的 SEM 微观特征

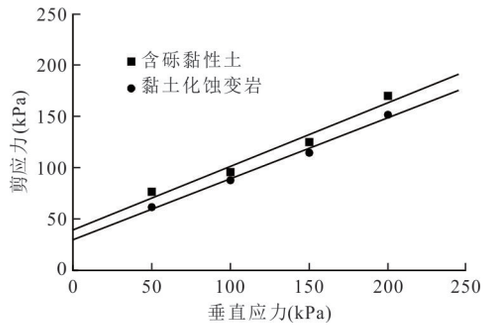


图 9　含砾黏土与黏土化蚀变岩抗剪强度对比

Fig.9　Comparison of the shearing strength between gravel-bearing clay and clayey altered rock

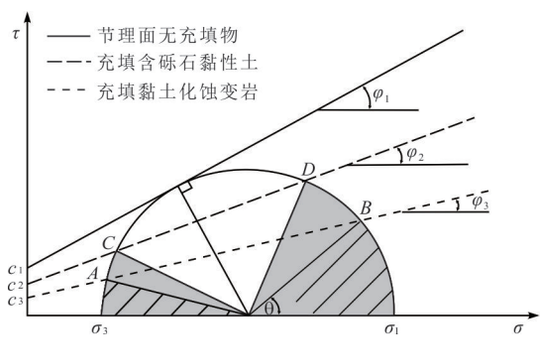
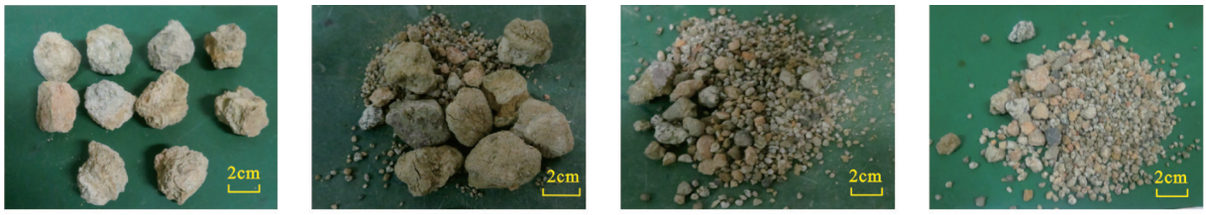


图 10　不同类型结构面的强度包络线示意

Fig.10　Schematic diagram of the strength envelopes

(2) 岩体结构劣化效应.金沙江岸坡在长期构造作用下发育 3 组优势节理,产状分别为 62°∠56°、121°∠40°和 250°∠23°,属 X 型共轭节理.其中前两组节理的倾向与滑坡主滑方向基本一致,其对白格滑坡的控制作用是毋庸置疑的.当这些节理裂隙中充填黏土化蚀变岩或碎裂岩体沿节理裂隙产生黏土化蚀变时,这些黏土化蚀变岩在干湿交替作用下可产生崩解和软化效应(图 11,图 12),促进裂隙贯通,从而导致岩体结构进一步劣化,加剧了斜坡破



试验前　　第1次循环　　第3次循环　　第5次循环

图 11　黏土化蚀变岩崩解试验照片

Fig.11　Photographs of disintegration test of clayey altered rock

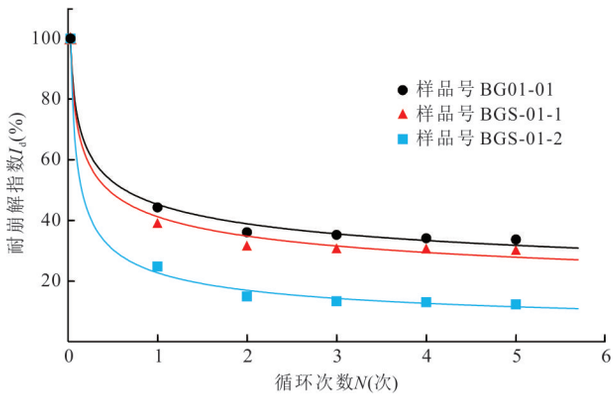


图 12　黏土化蚀变岩耐崩解指数－循环次数关系曲线

Fig.12　Relationship curve between the disintegration resistance index and the number of cycles of clayey altered rock

碎程度,相应地降低了岩体强度和斜坡稳定性.

(3) 失稳滞后效应.由于黏土化蚀变岩通常具有较高的持水性,在天然状态下可保持较高的含水量,当黏土化蚀变岩厚度较大时,具有明显的“蓄水”功能,从而导致该类深层滑坡的发生时间相对于降水作用具有滞后性.白格滑坡黏土化蚀变岩滑带土在不同含水量条件下的环剪试验表明,在剪应力达到峰值后需要较大的剪切位移才能达到残余强度(图 13),这与一般黏性土仅需要较小位移就能达到残余强度的特点具有显著差异(许成顺等,2017;Hu *et al.*,2018).这也可能是白格滑坡在 2018 年发生时间滞后于雨季约 1 个月的原因之一.

综上所述,富含亲水性黏土矿物的蚀变岩夹层及其与水的作用是导致白格滑坡发生的不可忽视的重要因素.当岩体中节理发育时,黏土化蚀变软岩往往沿节理面向两侧扩展,形成沿裂隙发育的软弱泥化层,在干湿交替作用下,因胀缩变形交替出现而进一步蜕化,成为大型滑坡的重要内因.

4　讨论

4.1　黏土化蚀变岩的区域识别

由于黏土化蚀变岩独特的成因,其与板块构造缝合带内部的泥岩、片岩、板岩等软弱岩石及糜棱岩、碎裂岩和损伤岩带等构造软岩有显著的差异(曾庆高等,2020;易树健等,2021).野外系统取样进行粒度分析表明,黏土化蚀变岩的粒度组成常因蚀变程度的不同而有所差异(张永双等,2007),蚀变程度与黏粒含量呈正相关性(表 1),这也是蚀变后的岩石极易风化的原因之一.在靠近地表时常与风化作用叠加,岩土体性质更加劣化.

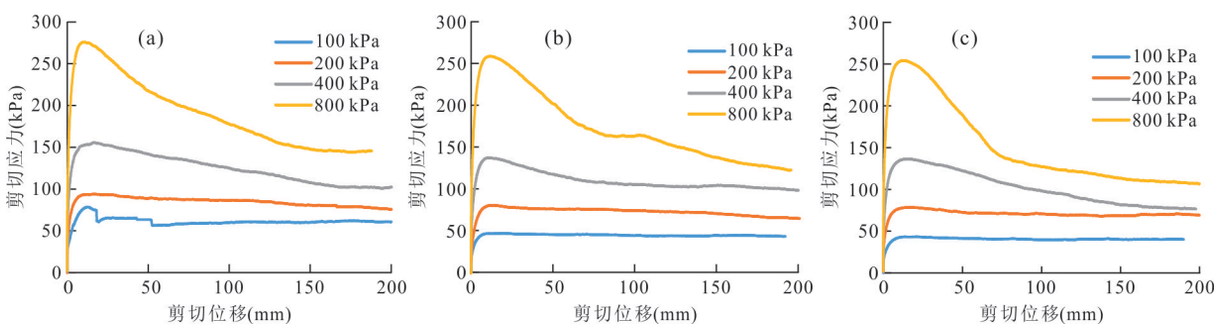


图 13　不同含水量黏土化蚀变岩滑带土的环剪试验曲线

Fig.13　Ring shear test curves of sliding zone soil composed of clayey altered rock with different water contents

a.含水率 10%;b.含水率 15%;c.含水率 20%

在野外地质调查过程中,可根据前文所述的区域形成条件、影响因素进行黏土化蚀变岩的识别,例如,蚀变岩的发育分布与区域上的热液矿床分布具有相似的规律.在黏土化蚀变岩工程地质研究中,不仅要搞清区域热液蚀变岩带的分布,还要注意温泉和地下热水的分布.此外,由于黏土化蚀变岩富含黏土矿物,在大范围的岩浆岩体分布区,常表现出高光谱异常,不同区段有较大的差别(燕守勋等,2005),因此可采用地面调查与高光谱相结合的方法进行黏土化蚀变岩分布区筛选.

4.2 黏土化蚀变岩的工程地质超前预报

较多亲水性黏土矿物的存在,导致黏土化蚀变岩干燥后在水中易崩解成泥状、碎屑泥状.说明黏土化蚀变岩通常具有较高—很高的物理化学活性,在环境变化的条件下,极易诱发工程问题.黏土化蚀变岩的"促滑"作用依然是滑坡灾害的孕育过程,而非"触发"因素,黏土化蚀变岩对斜坡岩体的强度弱化效应和结构劣化效应是关键问题,因此在黏土化蚀变岩边坡工程问题的防治工作中,要加强工程地质超前预报,为采取相应措施提供依据.

对于可能发育黏土化蚀变岩的工程区或斜坡地带,可根据蚀变作用的发育特征和分布规律,预测黏土化蚀变岩的类型、黏土矿物组成及不良工程特性.如果斜坡地带需要开挖,则必须采取快速开挖、快速支挡封闭的措施.

5 结论

本文在青藏高原东缘黏土化蚀变岩的形成条件和区域发育分布规律分析研究的基础上,结合大量野外地质调查、黏土矿物组成鉴定和物理力学试验分析资料,圈定了川藏交通廊道黏土化蚀变岩易发区带,以白格滑坡为例揭示了黏土化蚀变岩的特殊工程地质特性对大型滑坡的促滑作用.取得以下主要认识.

(1)黏土化蚀变岩的区域分布受活动断裂、热液作用和地层岩性的控制,区域性活动断裂带或构造缝合带是裂隙岩体、热液上涌的有利区带,黏土化蚀变岩可在较大范围分布.在川藏交通廊道主要发育康定—大渡河、理塘—雅砻江、巴塘—金沙江、昌都—察雅、八宿—怒江、波密—通麦、雅鲁藏布江等7个黏土化蚀变岩易发区带.黏土化蚀变岩常沿侵入岩脉、断裂带、岩浆岩节理密集带、侵入岩体与其他岩层的接触带等部位发育.

(2)黏土化蚀变岩属于工程地质性质不良的特殊地质体,在干湿交替和松弛条件下极易发生崩解、软化和胀缩变形.黏土化蚀变岩的力学性质与其蚀变程度具有较好的对应性,蚀变程度越高,力学性质越差.中等—强蚀变的岩体抗剪强度低,工程地质问题突出.

(3)由于黏土化蚀变岩的不良工程地质特性,加之常与节理化岩体伴生,导致斜坡岩体性质劣化加剧,是促进白格型斜坡失稳、形成大型滑坡不可忽视的重要因素.黏土化蚀变岩的促滑作用主要体现在强度弱化效应、岩体结构劣化效应和失稳滞后效应等方面.

References

Dolejš, D., Wagner, T., 2008. Thermodynamic Modeling of Non-Ideal Mineral-Fluid Equilibria in the System Si-Al-Fe-Mg-Ca-Na-K-H-O-Cl at Elevated Temperatures and Pressures: Implications for Hydrothermal Mass Transfer in Granitic Rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(2): 526—553. https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.10.022

Fedo, C., Nesbitt, H., Young, G.M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23(10):921—924.

Guo, J., Xu, M., Zhang, Q., 2009. Study on Characteristics and Engineering Properties of Altered Granite. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 45(9): 27—42(in Chinese with English abstract).

Hu, W., Scaringi, G., Xu, Q., et al., 2018. Suction and Rate-Dependent Behaviour of a Shear-Zone Soil from a Landslide in a Gently-Inclined Mudstone-Sandstone Sequence in the Sichuan Basin, China. *Engineering Geology*, 237: 1—11. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.005

Hu, S.X., Ye, Y., Fang, C.Q., 2004. The Significance of Petrology of Metasomatic Alteration and Prospecting. Geological Publishing Press, Beijing(in Chinese).

Jamali, S., Wittig, V., Börner, J., et al., 2019. Application of High Powered Laser Technology to Alter Hard Rock Properties towards Lower Strength Materials for more Efficient Drilling, Mining, and Geothermal Energy Production. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 20:100112. https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.01.001

Liu, L.J., 2017. Altered Mineral Petrologic Characteristics and Genetic Analysis of Saccharoidal Compresso-Crushed Zone in Dam Site of Yebatan Hydropower Station (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu

(in Chinese with English abstract).

Li, W.Q., 1988. Research on Petrology of the Dam Area of Ertan Hydropower Plant. *Design of Hydroelectric Power Station*, 4(1):55－63(in Chinese with English abstract).

Liu, K.Y., Shao, Z.P., 1989. Study on Mechanical Properties of Rock Mass of Ertan Hydroelectric Plant. *Design of Hydroelectric Power Station*, 5(1): 1－14(in Chinese with English abstract).

Machek, M., Roxerová, Z., Janoušek, V., et al., 2013. Petrophysical and Geochemical Constraints on Alteration Processes in Granites. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 57(4): 710－740. https://doi. org/10.1007/s11200 - 013 - 0923-6

Meller, C., Kontny, A., Kohl, T., 2014. Identification and Characterization of Hydrothermally Altered Zones in Granite by Combining Synthetic Clay Content Logs with Magnetic Mineralogical Investigations of Drilled Rock Cuttings. *Geophysical Journal International*, 199(1): 465－479.https://doi.org/10.1093/gji/ggu278

Miao, Z., Shen, J.H., Li, W.G., et al., 2014. Argillization and Mechanism Characteristics of Altered - Dolerite in Dagangshan Hydropower Station. *Journal of Engineering Geology*, 22(1): 130－136(in Chinese with English abstract).

Pan, G.T., Ren, F., Yin, F.G., et al., 2020. Key Zones of Oceanic Plate Geology and Sichuan - Tibet Railway Project. *Earth Science*, 45(7): 2293－2304(in Chinese with English abstract).

Peng, J.B., Cui, P., Zhuang, J.Q., 2020. Challenges to Engineering Geology of Sichuan-Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377－2389(in Chinese with English abstract).

Savage, D., Cave, M.R., Milodowski, A.E., et al., 1987. Hydrothermal Alteration of Granite by Meteoric Fluid: An Example from the Carnmenellis Granite, United Kingdom. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96(3): 391－405.https://doi.org/10.1007/bf00371257

Simon, K., 1990. Hydrothermal Alteration of Variscan Granites, Southern Schwarzwald, Federal Republic of Germany. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 105(2): 177－196.https://doi.org/10.1007/bf00678985

Wei, W., Shen, J.H., Miao, Z., et al., 2012. Influence Analysis of Weathering and Altering for Physical and Mechanical Characteristics of Granite-Porphyry. *Journal of Engineering Geology*, 20(4):599－506(in Chinese with English abstract).

Wei, W., Shen, J. H., Zhu, H. P., et al., 2015. Comparative Study on Engineering Characteristics of Clay Altered - Rock and Fault Argillaceous Materials of Mengdigou Hydropower Station. *Yangtze River*, 46(13): 29－32(in Chinese with English abstract).

Wang, B. D., Liu, H., Wang, L. Q., et al., 2020. Spatial - Temporal Framework of Shiquanhe - Laguoco - Yongzhu - Jiali Ophiolite Mélange Zone, Qinghai - Tibet Plateau and Its Tectonic Evolution. *Earth Science*, 45(8): 2764－2784(in Chinese with English abstract).

Wang, X.D., Fu, X.M., 2008. Unaxial Compressive Rheology Testing for Rheological Properties of Rotten Rock. *Journal of Engineering Geology*, 16(1): 27－31(in Chinese with English abstract).

Xu, C. S., Wang, X., Du, X. L., et al., 2017. Experimental Study on Residual Strength and Index of Shear Strength Characteristics of Different Clay Soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(3):436－443(in Chinese with English abstract).

Xu, Q., Zheng, G., Li, W.L., et al., 2018. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on Octorber 11 and November 3, 2018. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 129－146 (in Chinese with English abstract).

Xu, Y.J., Ma, H.C., Peng, S.Y., 2014. Study on Identification of Altered Rock in Hyperspectral Imagery Using Spectrum of Field Object. *Ore Geology Reviews*, 56: 584－595.https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.07.004

Yan, S.X., Li, X., Zhang, B., 2005. A Study on the Correlation Relationships between Smectite Contents and Spectral Absorption Indices of Swelling Soils. *Journal of Remote Sensing*, 9(3): 328－336(in Chinese with English abstract).

Yang, C.L., Wang, S.L., Wang, Q.Q., et al., 2019. Analysis of Rock Alteration Characteristics in Dam Site Area of a Hydropower Station in Tibet. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 17(6): 93－98(in Chinese with English abstract).

Yang, G.L., Huang, R.Q., Wang, J.Z., et al., 2006. Study on the Pore Characteristics and the Weakness of Altered - Rock for a Project. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(4):111－115(in Chinese with English abstract).

Ye, T.Q., 1991. Research on the Characteristic of Pb-Zn Mine Ore and the Metallogenesis System in Nujiang-Lancangjiang - Jinshajiang Region. Beijing Press of Science and Technology, Beijing(in Chinese).

Yi, S.J., Cui, P., Wu, C.H., et al., 2021. Control Effects of Suture Zones on Distribution of Soft Rock and Its Engineering Influence along Sichuan-Tibet Railway Corridor. *Journal of Engineering Geology*, 29(2):275－288(in Chi-

nese with English abstract).

Yoshida, H., Metcalfe, R., Seida, Y., et al., 2009. Retardation Capacity of Altered Granitic Rock Distributed along Fractured and Faulted Zones in the Orogenic Belt of Japan. *Engineering Geology*, 106(3-4): 116-122. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.008

Zeng, Q.G., Wang, B.D., Xi, L.L.J., et al., 2020. Suture Zones in Tibetan and Tethys Evolution. *Earth Science*, 45(8): 2735-2763(in Chinese with English abstract).

Zhai, Y.S., 1999. Regional Metallogeny. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).

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. *Geology in China*, 47(6): 1637-1645(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y.S., Guo, C.B., Li, X.Q., et al., 2021. Key Problems on Hydro-Engineering-Environmental Geology along the Sichuan-Tibet Railway Corridor: Current Status and Development Direction. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(5): 1-12(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y.S., Qu, Y.X., Liu, J.R., et al., 2007. Engineering Geological Research on Altered Rocks in the Area of NW Yunnan along Yunnan-Tibet Railway Line. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(4): 531-536(in Chinese with English abstract).

Zhao, Z.T., Shen, J.H., Zhu, H.P., et al., 2016. Integrated Deformation Modulus of Intensive Altered Rock Zone at Meng Digou Hydropower Station. *Journal of Engineering Geology*, 24(3): 459-464(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

郭健,许模,张强,2009.蚀变花岗岩特征及工程特性研究.甘肃水利水电技术,45(9):27-42.

胡受奚,叶瑛,方长泉,2004.交代蚀变岩岩石学及找矿意义.北京:地质出版社.

刘恋嘉,2017.叶巴滩水电站坝址区"砂糖状"挤压破碎带蚀变矿物岩石学特征及成因分析(硕士学位论文).成都:成都理工大学.

酆文清,1988.二滩水电站坝区岩石学研究.水电站设计,4(1):55-63.

刘克远,邵宗平,1989.二滩水电站岩体力学特性研究.水电站设计,5(1):1-14.

苗朝,沈军辉,李文纲,等,2014.大岗山坝区辉绿岩脉蚀变泥化特征及机理研究.工程地质学报,22(1):130-136.

潘桂棠,任飞,尹福光,等,2020.洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带.地球科学,45(7):2293-2304.

彭建兵,崔鹏,庄建琦,2020.川藏铁路对工程地质提出的挑战.岩石力学与工程学报,39(12):2377-2389.

魏伟,沈军辉,苗朝,等,2012.风化、蚀变对花岗斑岩物理力学特性影响分析.工程地质学报,20(4):599-506.

魏伟,沈军辉,祝华平,等,2015.黏土化蚀变岩与断层泥质物的工程性质对比研究:以孟底沟水电站工程为例.人民长江,46(13):29-32.

王保弟,刘函,王立全,等,2020.青藏高原狮泉河-拉果错-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带时空结构与构造演化.地球科学,45(8):2764-2784.

王旭东,付小敏,2008.蚀变岩的蠕变特性研究.工程地质学报,16(1):27-31.

许成顺,王馨,杜修力,等,2017.不同黏性土的残余强度及其抗剪强度指标特性研究.岩土工程学报,39(3):436-443.

许强,郑光,李为乐,等,2018.2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究.工程地质学报,26(6):129-146.

燕守勋,李兴,张兵,2005.蒙皂石含量与膨胀土光谱吸收参量相关关系研究.遥感学报,9(3):328-336

杨成龙,王森林,王钦权,等,2019.西藏某水电站坝址区岩石蚀变特征分析.水利与建筑工程学报,17(6):93-98.

杨根兰,黄润秋,王奖臻,等,2006.某工程蚀变岩孔隙特征及其软弱程度研究.矿物岩石学,26(4):111-115.

叶同庆,1991.怒江、澜沧江、金沙江地区铅锌矿床特征和成矿系列.北京:北京科学技术出版社.

易树健,崔鹏,伍纯昊,等,2021.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.工程地质学报,29(2):275-288.

曾庆高,王保弟,西洛郎杰,等,2020.西藏的缝合带与特提斯演化.地球科学,45(8):2735-2763.

翟裕生,1999.区域成矿学.北京:地质出版社.

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.中国地质,47(6):1637-1645.

张永双,郭长宝,李向全,等,2021.川藏铁路廊道关键水工环地质问题:现状与发展方向.水文地质工程地质,48(5):1-12.

张永双,曲永新,刘景儒,等,2007.滇藏铁路滇西北段蒙脱石化蚀变岩的工程地质研究.岩土工程学报,29(4):531-536.

赵梓彤,沈军辉,祝华平,等,2016.孟底沟水电站蚀变岩密集带综合变形模量研究.工程地质学报,24(3):459-464.