



第一章 |

区域环境特征及其对铁路的影响 |

川藏铁路板块碰撞结合带地质建造特征的 工程地质研究

蒋良文¹ 李渝生² 易树健² 毛邦燕¹ 黄超² 刘凯²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司劳模(专家)地质创新工作室, 成都 610031;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 本文通过对结合带地质建造、构造动力学特征及地壳岩体应力形变的深入分析, 论证了结合带对川藏铁路区域工程地质环境的控制作用, 分析由此产生的若干工程效应问题。①金沙江结合带由不同时代、性质的岩块和基质混杂而成, 其岩体 NE 向压缩变形、西侧岩浆岩体的高地应力及东侧三叠系的软岩大变形, 是制约铁道工程的主要工程地质问题; ②澜沧江结合带对区域沉积建造、火山活动、构造变质变形等具有明显的控制作用, 结合带表现为强烈的挤压逆冲及压缩变形, 西侧地块表现出较为活跃的构造动力学特点, 东侧则处于相对的稳定状态, 对铁道工程的影响主要是岩体压缩变形及西侧岩浆岩体的高地应力问题; ③怒江结合带控制着区域工程地质条件的形成与发展, 南西侧表现为沉积建造和陆缘火山岛弧建造, 北东侧则为陆相碎屑岩沉积建造, 结合带岩体的工程问题主要为兼具右旋剪切的强压缩变形、南西侧高地应力以及北东侧软岩隧道的大变形问题; ④雅鲁藏布结合带现已基本“焊接愈合”, 地壳岩体发生南北向压缩变形, 地应力积累和断裂活动主要发生在结合带的南边界断裂, 结合带关键工程地质问题是高地应力效应、北侧花岗岩体的地热异常问题、南侧边坡岩体稳定及地下工程塑性围岩的大变形问题。

关键词: 板块结合带; 地质建造; 川藏铁路; 工程地质

Engineering Geological Research in Formations-structural Features of the Sichuan-Tibet Railway Plate Collision Junction

Jiang Liangwen¹ Li Yusheng² Yi Shujian² Mao Bangyan¹ Huang Chao² Liu Kai²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Through in-depth analysis of the structure combined with the dynamic characteristics of rock mass stress and crustal deformation effect, demonstrating in conjunction with geological formations-tectonic control of the Sichuan-Tibet Railway regional engineering geological environment, the article analyzed a number of engineering problems which junction zone caused. ① The Jinshajiang combination zone mixed together by different times, different nature of the rock matrix. The junction

作者简介: 蒋良文(1965—), 男, 教授级高级工程师。

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2014G004-A)。

NE compression deformation, the west side of magma rock mass high stress and the soft rock on the eastern side of the Triassic rocks area large deformation are the main engineering geological problems restricting tunnel project. ②Lancangjiang junction zone obviously controlled regional sedimentary formations, volcanic activity, tectonic metamorphism and deformation. Belt rock mass is mainly for strong thrust and compression deformation. The west side of plots show that the active tectonic dynamics characteristics, the east of continental blocks, on the other hand, in a relatively stable state. Influence on railway engineering is mainly compressive deformation of rock mass, the west side of magmatic rock and high ground stress problem. ③Nujiang junction zone controlled the formation and development of regional engineering geological conditions. In the southwest side, the land is composed of sedimentary formation and continental margin volcanic arc construction. Northeast South land mass is mainly continental clastic sedimentary formation. The main problems of junction zone rock engineering are for the strong effect of both dextral shear and compression, high stress of the southwest side and north east side soft rock tunnel big deformation. ④The Yarlung Zangbo combination zone has been basically “weld healing”. The crust rock performance for the north-south compression, and the accumulation of stress and faulting occurred in conjunction with the southern boundary fault. The key engineering geological problems of tectonic melange are high stress and rock mechanical effects, geothermal unusual problem of the north granite and large deformation of rock slope stability and underground engineering plastic rock in the south.

Keywords: plate junction; geological formation; Sichuan-Tibet railway

川藏铁路是我国西南一条极为重要的战略性运输通道。工程区将穿越青藏高原东部金沙江结合带、澜沧江结合带、怒江结合带以及雅鲁藏布结合带等大规模板块结合带。印度和欧亚板块碰撞是最为壮观的地质事件之一,这导致区域地质环境及地壳结构都发生了深刻变化,也必然会对铁道工程建设产生重大影响。多数学者认为,金沙江结合带是一条切割深度达上地幔的超岩石圈断裂,具有右旋走滑兼逆冲性质^[1];对于澜沧江断裂带的属性,目前分歧较大,存在两种不同看法^[2,3];怒江结合带规模巨大,地质建造较复杂,各段构造变形表现出显著不同的特点,总体以挤压变形为主兼具右行剪切位移^[4];以蛇绿岩带为主要标志的雅鲁藏布结合带代表印度板块与欧亚板块之间的新生代碰撞缝合带,带内存在较完整的古洋壳^[5]。本文以各结合带的地质建造、构造岩石学及构造变形为研究核心,探讨由此产生的工程效应问题,为川藏铁路的规划和设计提供科学依据。

■ 1 金沙江结合带

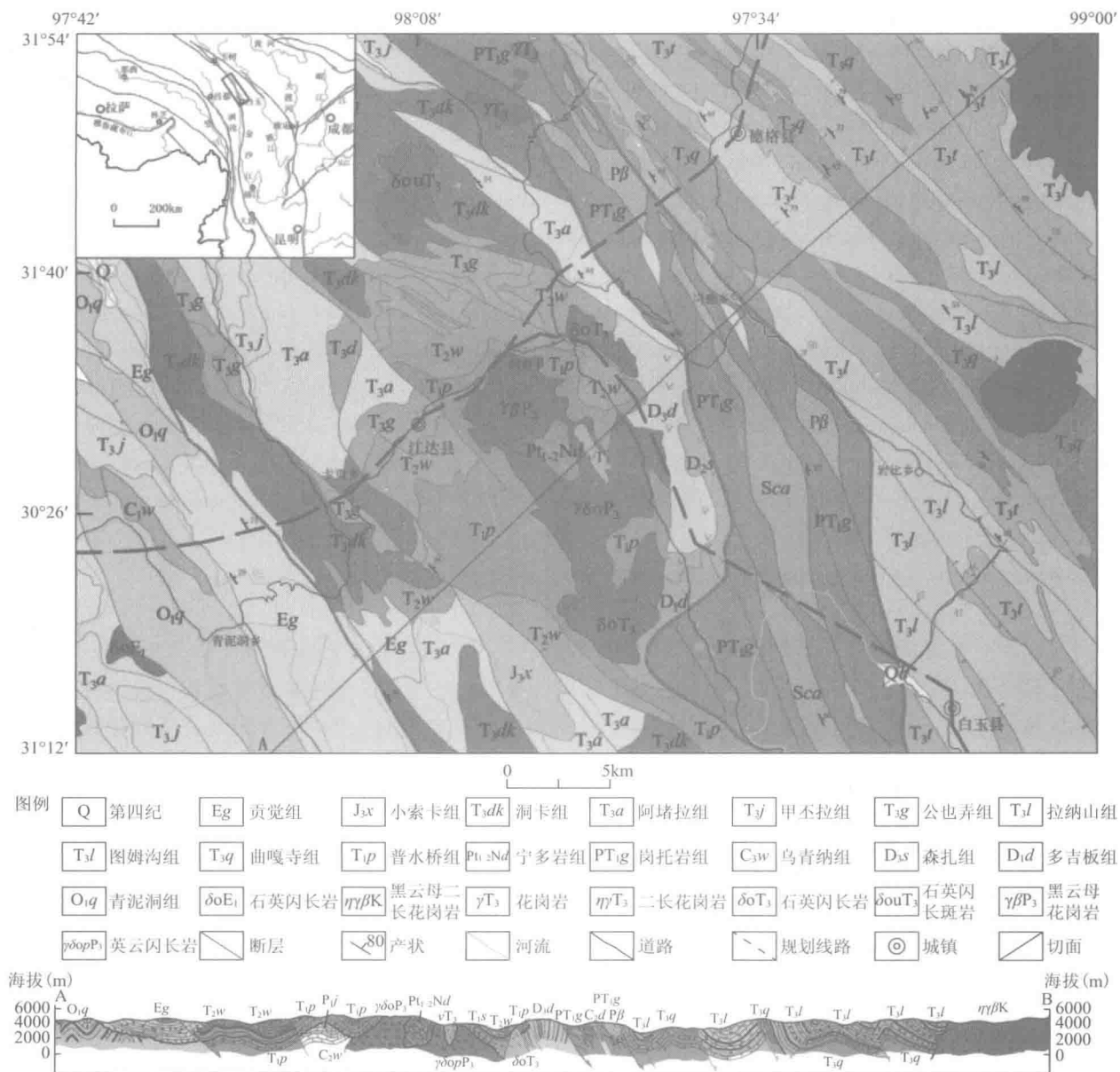
1.1 地质建造与构造特征

金沙江结合带处于昌都—思茅陆块和川滇地块的碰撞结合部位,总体走向近SN,其西为昌都—思茅陆块东缘江达构造岩浆岩带,东侧为川滇地块西缘甘孜变质褶皱系(图1)。

结合带(JSJS)构造混杂岩建造主要为岗托岩组(PT_{1g})构造岩片。地壳岩体构造变形极为强烈。构造变形以逆冲断裂及紧闭型褶皱为主:

结合带西界祝尼玛—波罗断裂(F_2)分隔了构造混杂岩带与江达构造岩浆岩带,构造破碎带规模较大,具有明显的碳化现象(图2),带内构造岩强烈揉皱、次级断面发育,断裂面倾向北东、倾角 $50^\circ \sim 63^\circ$;

结合带东界汪布堆—麦拉断裂(F_3)北东侧为构成甘孜变质褶皱系的晚三叠世变质岩地层。断裂带整体由紧密片状构造岩组成、石英岩脉被压扁拉伸,并具有强烈的“烘烤”高碳化特征(图2)。断面倾向北东,倾角 $45^\circ \sim 55^\circ$ 。



I₁- 昌都—兰坪地块; I₂- 江达构造岩浆岩带; JSJS- 金沙江结合带; II₁- 甘孜地块; F₁- 贡觉涌—热拥断裂; F₂- 结合带西边界(祝尼玛—波罗断裂); F₃- 结合带东边界(汪布堆—麦拉断裂)



图2 金沙江结合带西(左)、东(右)边界断裂

1.2 活动性与地震

金沙江断裂经历过不同时期、不同性质的构造运动:印支期前主要表现为挤压缝合特征,印支期后向走滑拉分转变,喜山期遭受强烈压扭变形。工程所在的断裂带中段(德格—白玉—巴塘)控制着老第三系,从始新世开始活动,晚新生代以来则表现为以近EW向的缩短变形,吸收藏东向东运动势速率为 $2 \sim 3\text{mm/a}$,仅在断裂走向转折时,才表现为左旋及右旋水平滑动,历史平均速率分别为 $2.6 \sim 4.4\text{mm/a}$ 及 $1.3 \sim 2.7\text{mm/a}$ ^[6]。目前,断裂带活动形式主要表现出强烈挤压性质的右旋走滑,扰动地表全新统(Q_4)。但断裂北段处于拉张状态,这可能与川滇地块沿红河断裂向东南方向发生右旋走滑,使得该断裂后延的北段形成大范围的拉张应力区有关。

金沙江结合带地震活动主要集中在北段与巴塘断裂、中段德钦—中甸—大具断裂以及南段北汉场断裂交错部位三个区段。研究区所在的北段地震活动相对较弱。有地震史料记载以来,发生不小于6级地震共7次。最大震级是1870年7.5级巴塘地震。

1.3 工程效应

在特定的地壳岩体力学环境下,金沙江结合带对铁道工程的影响主要为:

(1)西侧昌都—左贡陆块在NNE向强力推挤下向东侧川滇地块俯冲,导致SW侧构造岩浆岩带,在推挤力源作用下发生较高的应力积累,岩浆岩区段隧道工程将面临突出的高地应力问题。

(2)结合带岩体处于强烈挤压状态,地壳岩体的应力和位移易出现沿断裂带和地壳软硬界面的集中效应。 F_3 断层作为结合带的东界断裂,分隔川滇地块与结合带,表现出极强的“高碳化”。

(3)东侧变质岩地段软岩大变形是制约隧道工程的主要工程地质问题。

2 澜沧江结合带

2.1 地质建造与构造特征

(1) 蛇绿混杂岩与构造混杂岩带

过去由于未发现较完整的蛇绿岩剖面 and 典型的基性岩群,从而否定了澜沧江结合带的存在。近年在羌塘中部发现了二叠纪蛇绿岩和洋岛型玄武岩以及大量含放射虫的硅质岩,证实了二叠纪之前存在一定规模的古特提斯洋盆。

澜沧江结合带自双湖至昌都吉塘附近主要为高温变质构造混杂岩;沿结合带北界则分布着以晚三叠世沉积岩为基质沉积构造混杂岩。结合带夹持于毕扎弄断裂与据拉断裂之间(图3),总体走向NW向,构造混杂岩带由日阿泽弄岩组(C_{1r})和卡贡岩组(C_{1k})构成(图4)。带内大尺度褶皱和断裂不发育,在强烈挤压推覆作用下形成一系列同斜倒转褶皱、逆冲推覆断裂。

(2) 结合带对区域地质环境的控制作用

结合带明显控制着区域构造变质作用,越靠近断裂带,地层变质程度越深,褶皱也更加强烈。结合带西侧左贡—保山陆块构造杂岩带有不同程度变质现象,岩浆活动十分强烈,其构造变形具有多层次、多机制的特点,吉塘岩群($Pt_{1-2}J$)、西西群(Pt_3Y)及岩浆岩中发育早期深部变形相;东侧昌都—芒康盆地主要由中生界三叠系、侏罗系陆相碎屑岩沉积地层组成,地层一般未变质,构造形式则表现为复向斜和背斜相间排列,断裂构造不甚发育。

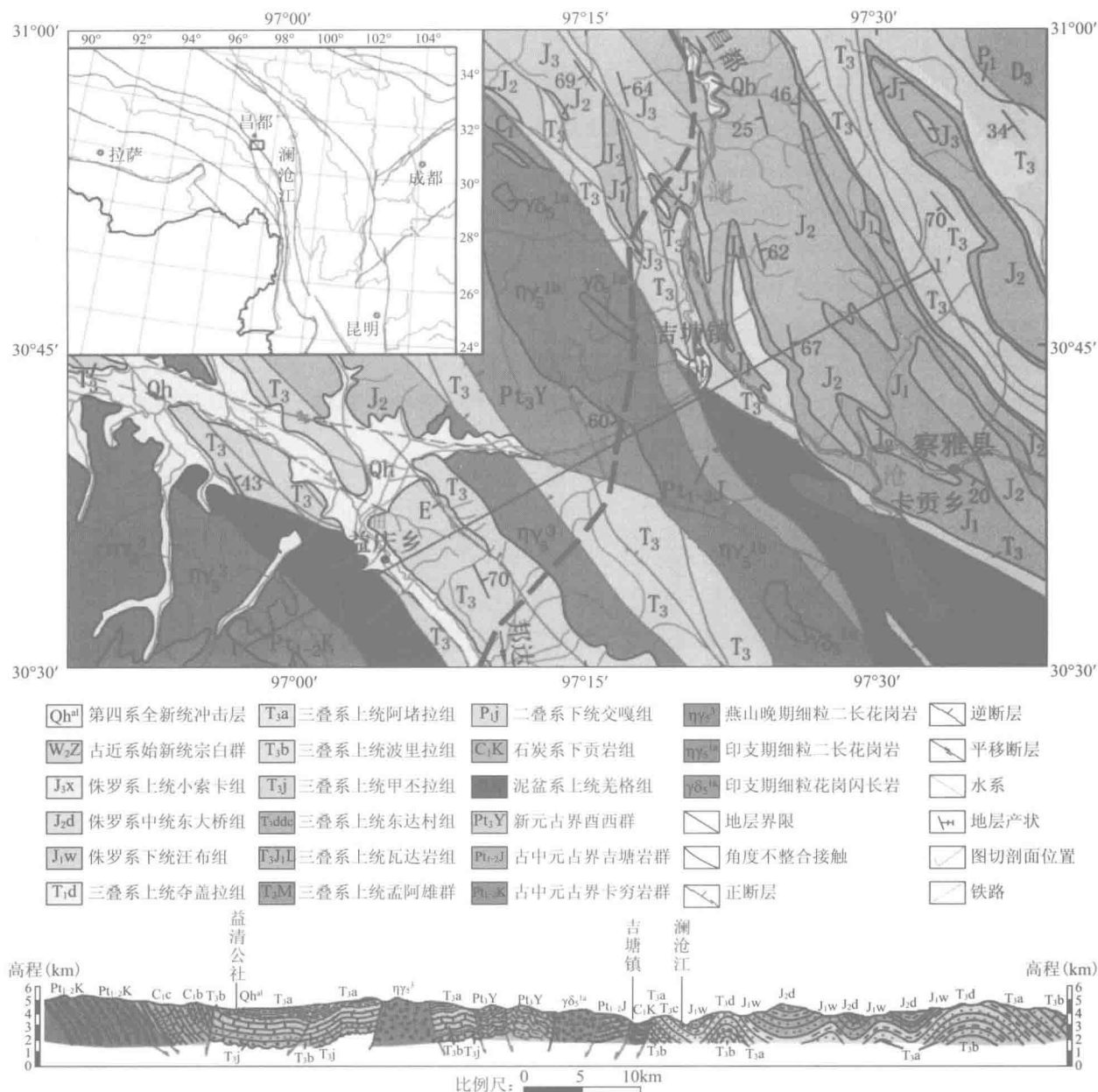


图3 澜沧江结合带区域地质图(据 1:20 万与 1:25 万昌都幅改)

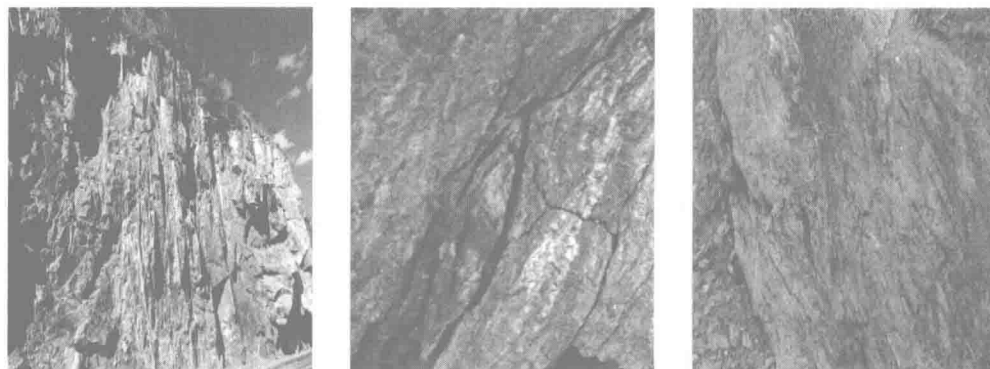


图4 构造混杂岩片(片理化石英杂砂岩、片理化基性火山岩、绢云板岩)

2.2 活动性与地震

工程区所在的断裂带北段,普遍具有早期左旋走滑-逆冲,晚期右旋走滑-逆冲的活动特征。测年数据显示,断裂北段至少在燕山晚期已开始左旋走滑运动,大致为燕山晚期至渐新世末的早一中喜马拉雅期;随后才开始右行走滑,主要发生在晚喜马拉雅期的新近纪。根据近期 GPS 数据反演获得的澜沧江断裂北段左旋剪切走滑速率为 (5.1 ± 2.1) mm/a,南段平均右旋剪切走滑速率为 (2.4 ± 1.2) mm/a,无量山一带则为 (4.3 ± 1.1) mm/a^[7]。

根据历史和现代地震记录,澜沧江断裂带地震活动并不太强,断裂带北段未记录到 7.0 级以上地震,历史上仅南段临沧附近发生过两次(1941 年耿马 7.0 级与 1988 年澜沧—耿马 7.3 级),但是沿断裂带却频繁发生 $M_s \geq 3.0$ 级的低强度地震。地震活动最频繁地段在云南临沧—普洱附近。藏东察雅—芒康地区也是地震频发区域,但强度及频度均显著低于上述区段。

2.3 工程效应

澜沧江结合带作为地质体的非连续性界面,在该特定的地壳构造动力学环境下,对于川藏铁路建设而言,工程效应的基本问题在于:

(1) 结合带不同区段的变形强度虽有所差异,但总体显压性,构造变形主要为逆冲推覆,由此导致的工程效应主要是岩体的 NE 向压缩变形。

(2) 结合带及其西侧的岩浆岩区段地应力积累相对较高,这极有可能对该地段内隧道工程的围岩稳定造成一定的影响。

(3) 西侧左贡—保山地块处于地壳运动的力源部位,地震活动也相对频繁,属于相对的构造活动区。东侧昌都—思茅地块,地壳岩体的应力-应变积累处于相对较低的状态,表现出稳定地块的工程地质特征。

3 怒江结合带

3.1 地质建造与构造特征

怒江结合带两侧地质建造-构造特征差异显著。南西侧冈底斯—念青唐古拉陆块为大陆边缘沉积建造和陆缘火山岛弧建造,消减型花岗岩及碰撞型花岗岩十分发育。北东侧南羌塘—左贡陆块出露晚三叠世地层,为碎屑岩—碳酸盐岩—海陆交互相碎屑岩建造,大中型构造形迹以北西向宽缓褶皱及脆性断裂为主(图 5、图 6)。

工程区处于结合带中段,构造线总体方向为 NW。混杂岩带中卷入了马里组(J_2m)山间磨拉石建造,反映结合带最终闭合于中侏罗世。带内主要断裂具有强烈的逆冲挤压性质,断面倾向 NE,在强烈的挤压背景下,南西盘向北东俯冲(图 6)。

结合带南西边界洛隆—八宿断裂由一系列小型逆冲推覆断裂(F_1-F_3)组成,构造岩结构致密、具明显压性。其下盘为宗白群(E_2z)紫红色砾岩、砂岩及泥岩,上盘为瓦达岩组(T_3J_1w)含轻微蛇绿岩化的基性岩(图 7)。

北东边界卡玛多—碧土断裂总体具逆断层性质,发育较宽的构造破碎带(图 8),岩石强烈挤压,揉皱发育(图 9)。根据破碎带片理产状、断层及交切关系分析,东边界断裂具有右旋扭错性质。

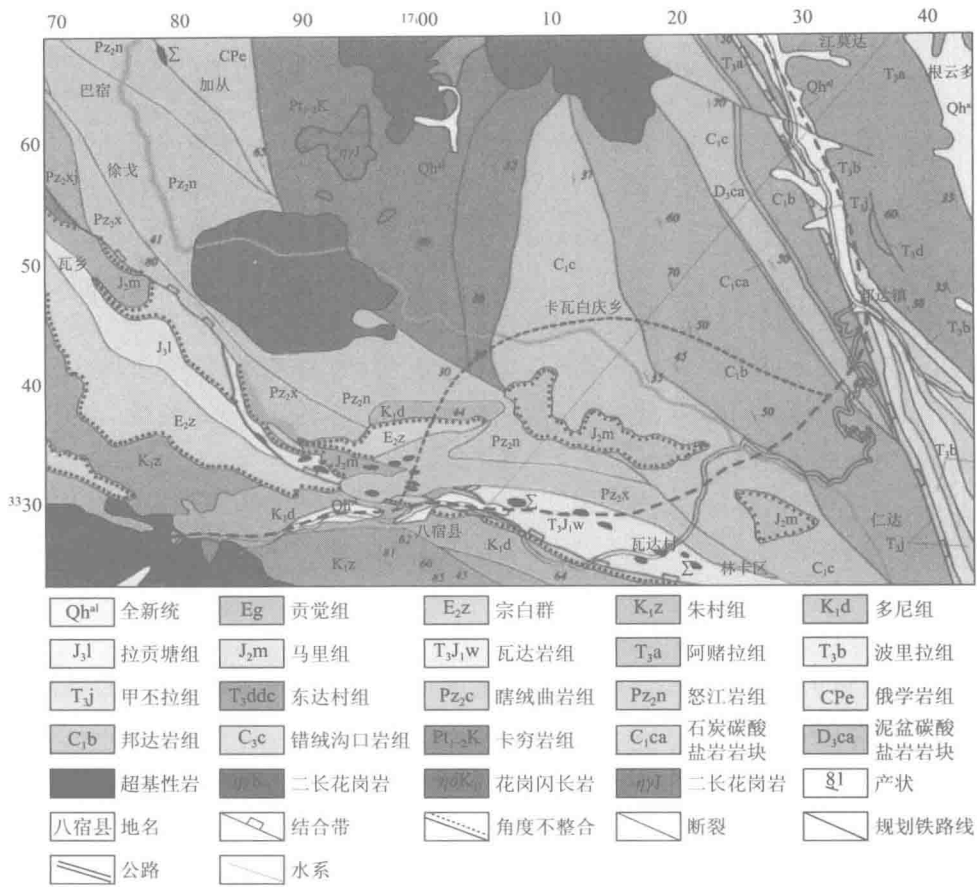


图5 怒江结合带区域地质图(据八宿县幅1:25万区域地质图,有修改)

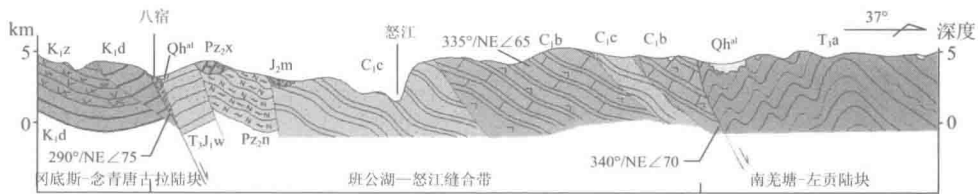


图6 班公湖—怒江结合带地质剖面图

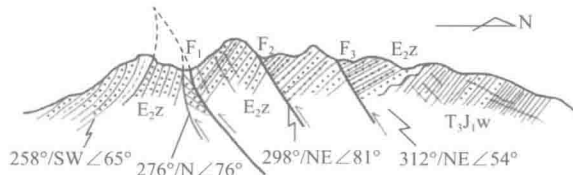


图 7 洛隆—八宿断裂瓦达剖面

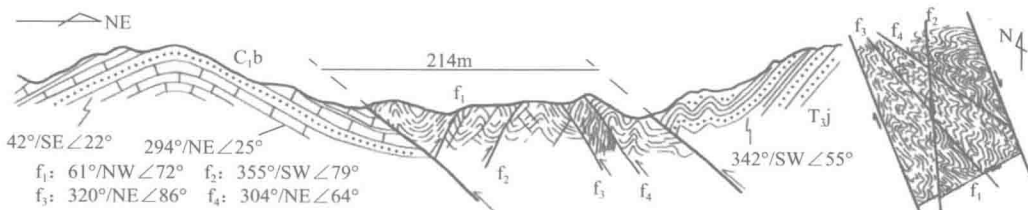


图8 卡玛多一碧土断裂剖面(左)及带内次级断层交切关系平面示意图(右)

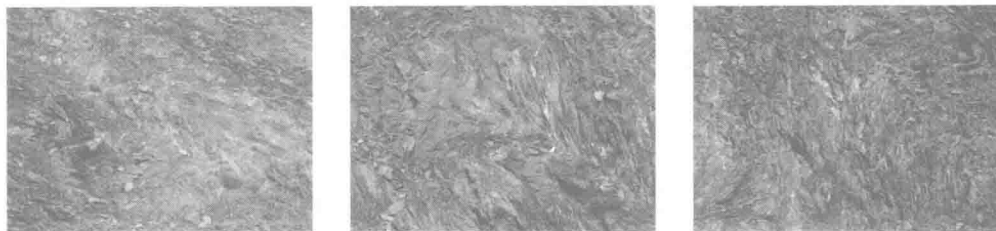


图9 卡玛多—碧土断裂内部次级断裂及揉皱

3.2 活动性与地震

近期 GPS 监测显示,怒江结合带西段主要为挤压运动,挤压速率 $1.2 \sim 2.0\text{mm/a}$,兼具右旋走滑性质;中段表现为右旋走滑运动,走滑速率 2.1mm/a ;南段右旋走滑增强,速率约 3.2mm/a ^[8]。总体上结合带自西向东由 EW 转至 SN 向,右旋滑移速率逐渐增大,动力学性质由挤压逐渐转为右旋挤压。

据地震记录,断裂带历史地震 7~7.9 级地震 4 次,6~6.9 级地震 23 次,5~5.9 级地震 99 次,最大震级 7.4 级,以 SN 向的龙陵地震区地震活动最为强烈。大于 5 级地震震源深度一般集中在 $15 \sim 35\text{km}$,小于 5 级地震震源深度为 $10 \sim 35\text{km}$;仅有极少的 5~6 级强震地震震源深度大于 50km 。工程区地震活动相对较弱,仅发生过 5~5.9 级地震 6 次,震源深度 $15 \sim 30\text{km}$ 。

3.3 工程效应

怒江结合带对铁道工程地质条件有显著的控制作用:

(1)在 NE 向构造动力作用下,结合带南西盘向北东俯冲推移,地壳岩体总体处于压缩状态。结合带内软硬岩差异较大,主要工程效应为岩体的强压缩变形。

(2)结合带南西边界断裂活动性较弱,南西侧冈底斯—念青唐古拉陆块处于力源部位,地壳岩体完整性好,地壳岩体应力水平相对较高、地热异常明显,主要的工程效应是岩浆岩段隧道的高地应力和高地热问题。

(3)结合带北东边界挤压变形强烈兼具右旋剪切性质。北东侧南羌塘—左贡陆块总体为碎屑岩建造,地壳岩体应力水平相对较低,工程效应主要是软弱隧道围岩的大变形问题。

■ 4 雅鲁藏布结合带

4.1 地质建造与构造特征

雅鲁藏布结合带处于喜马拉雅造山带与冈底斯—念青唐古拉陆块碰撞接触区,大致呈 EW 向夹持于南、北两条巨大的边界断层之间。

(1)“双变质构造变形带”

结合带两侧发育与板块构造相关的沉积—变质建造、火山—岩浆带以及复杂的“双变质构造变形带”(图 10)。南侧为北喜马拉雅构造带北缘高压低温变质带,包括蓝片岩和绿片岩二个变质带;北侧为以冈底斯构造岩浆岩带为主的中低变质及含红柱石的高温低压变质岩带。

(2)构造混杂岩带

雅鲁藏布结合带的岩石建造包括由原地复理石系统和超基性—基性岩组分构成的米林混杂岩带(图 11);由构造混杂成因的灰岩块体、原地复理石系统和部分超基性—基性岩组成的朗县混杂岩(图 12);罗布莎蛇绿岩群(JKL)、泽当岩群(JKZ)及嘎学岩群(JKG)组成的泽当—罗布莎混杂岩(图 13)。

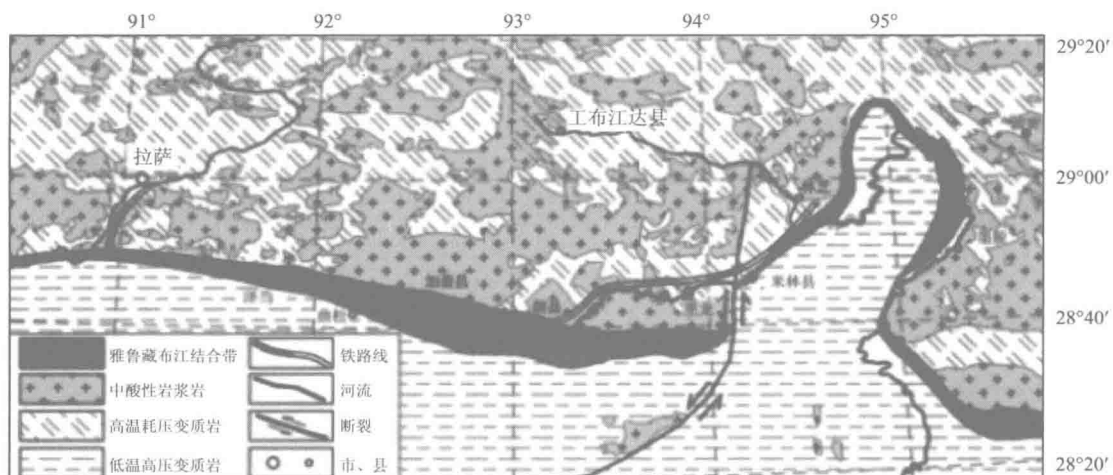


图 10 雅鲁藏布结合带及“双变质构造变形带”

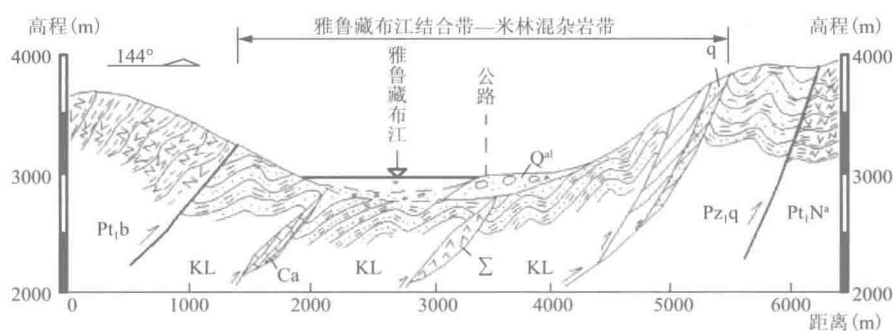


图 11 米林混杂岩带地质剖面图

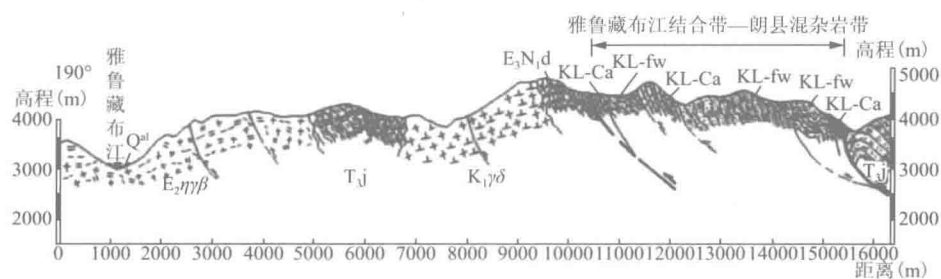


图 12 朗县混杂岩带地质剖面图

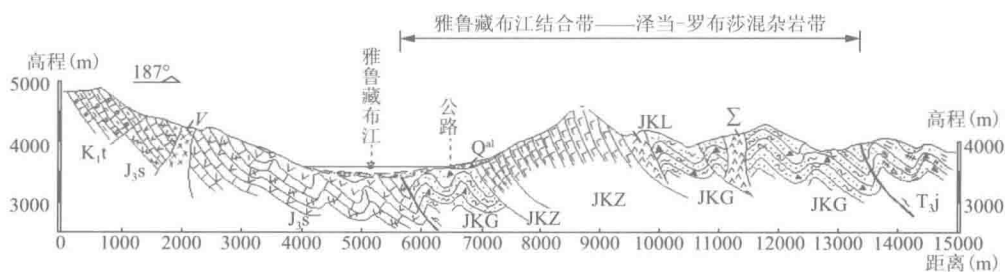


图 13 泽当-罗布莎蛇绿混杂岩带地质剖面图

(3) 构造变形特征

结合带构造变形包括两类：一是脆韧性断片的挤压叠覆变形，表现为由一系列小型脆韧性断裂与其

所夹持的岩片构成的强烈挤压逆冲叠覆构造(图 14);二是韧性剪切,蛇绿混杂岩片早期变形即具韧性剪切特征,构造岩片与白垩纪基质一起揉皱变形(图 15)。

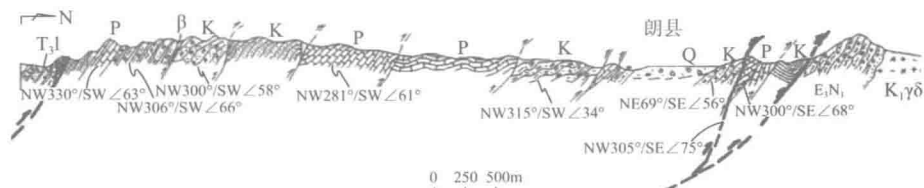


图 14 混杂岩带的高角度逆冲叠覆构造剖面图(朗县)

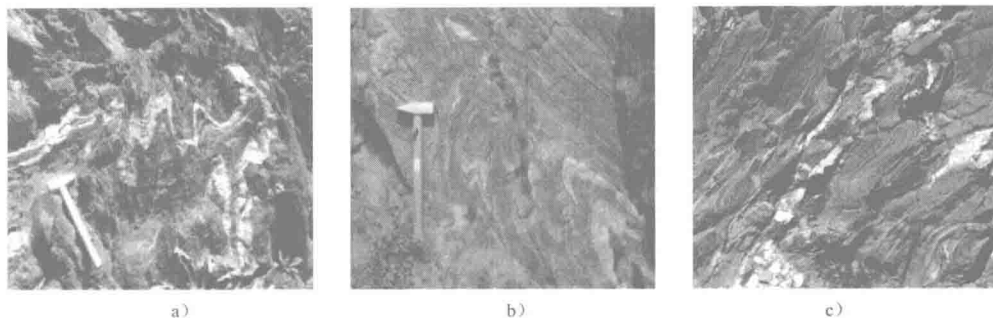


图 15 构造混杂岩的塑性流变及揉皱

4.2 活动性与地震

近 EW 向展布的结合带处于 NNE 向强烈挤压状态,沿带 SN-NNE 向“纵张”破裂较发育,这显示结合带强烈的压密变形几乎接近极限。结合带内部的构造岩片因强力挤压而相互紧密嵌合,现已基本“焊接愈合”,总体上不具有明显的活动性。

新构造活动主要发生在南边界断裂以及两条切错构造岩带的 NE 向断裂。里龙断裂错动晚更新世(Q_3)冲洪积砾石—湖积粉土层,清晰可见地震楔及震积岩(图 16)等近代地震活动遗迹,最新强烈活动年代为 (1.8 ± 0.2) 万年(ESR 测年)。夺松—比丁断裂为 NNE-NE 向延展型韧性剪切断裂带,左旋切错雅鲁藏布结合带达 23km,正断错动洪积粉砂及卵砾石层(图 17)。



图 16 里龙断裂错动冲洪积层及地震楔

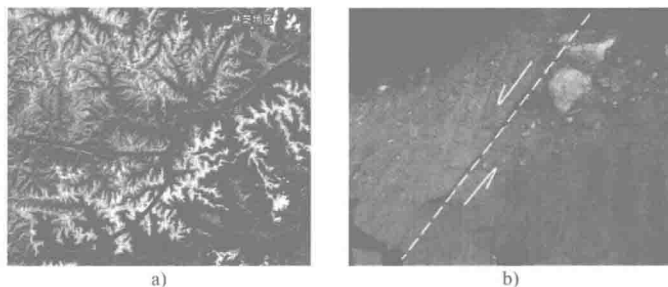


图 17 夺松—比丁断裂(左—左旋切错雅鲁藏布结合带;右—正断扰动洪积层)

4.3 工程效应

雅鲁藏布结合带对铁道工程的影响主要有:

(1) 北侧冈底斯地块由花岗岩、石英板岩等硬性块状岩构成,地壳岩体的完整性相对较好,工程地质条件相对较好。但因其处于高温低压变质状态,花岗岩体的地热异常及强风化问题较为突出。

(2) 南侧北喜马拉雅构造带处于高压低温变质状态,岩石建造以片麻岩、结晶—糜棱岩化—绿泥绿帘片岩等软质变质岩系为主,褶皱及断裂十分复杂,地壳岩体具有软—塑性特征,崩塌、滑坡及泥石流等地质灾害甚为发育。

(3) 结合带内部总体上处于应力平稳分布状态,地应力集中主要发生在南边界断裂及其南侧喜马拉雅构造带地块内。结合带南侧构造变形明显强于结合带内部及北侧岩体,消减的变形则转为结合带内部岩体的压缩变形和南边界断裂的逆推位移。

■ 5 结语

川藏铁路交通廊道涉及的板块碰撞结合带,对区域地质建造与构造特征有着较为显著的控制作用,这势必会对铁道工程的建设产生重大影响。研究成果表明:

(1) 金沙江结合带是昌都—思茅陆块与川滇地块结合部位,由不同时代、不同性质的岩块和基质混杂而成。结合带因强烈挤压而产生 NE 向压缩变形,其西侧岩浆岩高地应力问题和东侧三叠系变质岩地段的软岩大变形及抗滑稳定,是制约铁道工程的主要工程地质问题。

(2) 澜沧江结合带作为昌都—思茅陆块与左贡—保山陆块的分界构造,对区域沉积建造、岩浆活动及构造变质变形等具有明显的控制作用。结合带岩体主要表现为强烈的挤压逆冲及压缩变形,结合带两侧岩体的应力—形变强度有所差异。西侧地块表现出较活跃的构造动力学特点,东侧陆块则处于相对稳定状态。结合带对铁道工程的影响主要是岩体压缩变形、西侧岩浆岩体的高地应力问题。

(3) 怒江结合带岩体总体处于相对稳定的压缩状态。南西边界断裂活动性较弱,北东边界挤压变形强烈兼具右旋剪切活动性质。结合带南西侧冈底斯陆块主要为沉积建造和陆缘火山岛弧建造,北东侧南羌塘—左贡陆块则为陆相碎屑岩沉积建造。与结合带有关的工程地质问题主要包括:兼有右旋剪切作用的强压缩变形,南西侧的高地应力岩体力学效应问题,北东侧的软岩隧道的大变形。

(4) 雅鲁藏布结合带是一条由构造岩片相互紧密嵌合的构造混杂岩带,现已基本“焊接愈合”。结合带岩体总体上表现为近 SN 向压缩变形,地应力积累和断裂活动主要发生在结合带的南边界断裂。雅鲁藏布结合带的关键工程地质问题有:结合带构造混杂岩的高地应力及其岩体力学效应;北侧冈底斯地块的地热异常及花岗岩的风化问题;南侧北喜马拉雅构造带较严重的边坡岩体稳定及地下工程塑性围岩的大变形问题。

参考文献

- [1] 刘宇平,唐文清,赵济湘. 青藏高原东部及邻区现代地壳运动 GPS 监测 [M]. 北京:地质出版社, 2010: 122-123.
Liu Yuping, Tang Wenqing, Zhao Jixiang. Modern crustal movement GPS monitoring of Eastern Qinghai-Tibet plateau and its adjacent areas [M]. Bei Jing: Geological Publishing House, 2010: 122-123.
- [2] 王新忠,强巴扎西,彭兴阶. 藏东滇西澜沧江断裂带地质属性讨论 [J]. 云南地质, 2008 (03): 362-370.
Wang Xinzhong, Qiangba Zhaxi, Peng Xingjie. A Discussion about the Geological Nature of Lancangjiang Fault[J]. Yunnan Geology, 2008(03): 362-370.

- [3] 李才, 谢尧武, 董永胜, 等. 北澜沧江带的性质——是冈瓦纳板块与扬子板块的界线吗?[J]. 地质通报, 2009 (12): 1711-1719.
- Li Cai, Xie Yaowu, Dong Yongsheng, etc. The North Lancangjiang Suture: The Boundary between Gondwana and Yangtze?[J]. Geological Bulletin of China, 2009(12): 1711-1719.
- [4] 王保弟, 王立全, 许继峰, 等. 班公湖—怒江结合带洞错地区舍拉玛高压麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2015, 34 (9): 1605-1616.
- Wang B D, Wang L Q, Xu J F, etc. The discovery of high-pressure granulite at Shelama in Dongco area along the Bangong Co-Nujiang River suture zone and its tectonic significance. Gical Bulletin of China, 2015, 34(9): 1605-1616
- [5] 肖序常, 万子益, 李光岑, 等. 雅鲁藏布江结合带及其邻区构造演化[J]. 地质学报, 1983 (2).
- Xiao Xuchang, Wan Ziyi, Li Guangchen, etc. On the Tectonic Evolution of the YARLUNG ZANOBO Suture Zone and its Adjacent Areas[J]. Acta Geologica Sinica, 1983(02).
- [6] 周荣军, 陈国星, 李勇, 等. 四川西部理塘—巴塘地区的活动断裂与 1989 年巴塘 6.7 级震群发震构造研究[J]. 地震地质, 2005, 27 (1): 31-43.
- Zhou Rongjun, Chen Guoxing, Li Yong, etc. Research on active faults in Litang-Batang region, western Sichuan province, and the seismogenic structures of the 1989 Batang M6.7 earthquake swarm[J]. Seismology and geology, 2005, 27(1): 31-43.
- [7] 王阆昭, 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: 地球科学), 2008 (05): 582-597.
- Wang Yanzhao, Wang Enning, Shen Zheng kang, etc. GPS-constrained Inversion of Present-day Slip Rates along Major Faults of the Sichuan-Yunnan Region, China[J]. Science in China. Series D: Earth Sciences, 2008(05): 582-597.
- [8] 唐方头, 宋键, 曹忠权, 等. 最新 GPS 数据揭示的东构造结周边主要断裂带的运动特征. 地球物理学报, 2010, 33 (9): 2119-2128.
- Tang F T, Song J, Cao Z Q, et al. The movement characters of main faults around Eastern Himalayan Syntaxis revealed by the latest GPS data. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(9): 2119-2128.

高寒山区铁路沟谷灾害链危险性评估 与风险调控

魏永幸¹ 姚令侃² 邱燕玲¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 冰湖溃决、冰川泥石流堵河是帕隆藏布流域高寒山区的沟谷灾害链, 是川藏铁路不可避免的危害风险。针对冰湖溃决、冰川泥石流堵河两类灾害, 采用遥感解译和现场考察的方法, 查明了两类灾害的分布; 利用模糊综合评价法, 选取冰湖面积等 9 个指标, 综合评估冰湖溃决危险性; 提出支沟溃决洪水入汇主河的流量、水深、流速的近似计算方法; 建立了泥石流在主河中运移距离公式, 综合其他影响因素, 评价冰川泥石流堵河危险性; 最后, 根据冰湖溃决、冰川泥石流堵河影响范围, 提出了线位高程约束条件。

关键词: 冰湖溃决; 溃决洪水; 冰川泥石流; 堵江; 危险性评估

Risk Evaluation and Control of Valley Hazards Chain for Railway in Alpine Region

Wei Yongxing¹ Yao Lingkan² Qiu Yanling¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co.LTD, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Glacial lake outburst and glacial debris flow blocking river are valley hazards chain in alpine region of Palongzangbu Basin. They are unavoidable hazards for Sichuan-Tibet railway. For the two types of hazards, remote sensing interpretation and field investigation are used to ascertain the distribution. By using Fuzzy Comprehensive Evaluation method, 9 indicators such as lake area are selected to assess the risk of glacial lake outburst. Approximate calculation method of flow, water depth and flow rate are proposed for the outburst flood of tributary into mainstream. The formula of the migration distance of debris flow in the main river is established, and the other factors are combined to evaluate the risk of the glacial debris flow blocking river. Finally, according to the influence of glacial lake outburst and glacial debris flow blocking the river, line elevation constraints are put forward.

Keywords: glacial lake outburst; outburst flood; glacial debris flow; blocking river; risk evaluation

作者简介: 魏永幸(1964—), 男, 教授级高级工程师。

基金项目: 中国铁路总公司科技开发计划“高寒山区铁路沟谷灾害链危险性评估与风险调控研究”(2013G014-A)。

帕隆藏布江位于西藏东部林芝地区,是雅鲁藏布江下游左岸的Ⅰ级支流,流域面积2.8631万km²。从青藏高原东缘进藏的川藏铁路,必经帕隆藏布流域,流域内地形陡峻,绝对高度和相对高差都很大。帕隆藏布江,是流域内唯一的铁路交通廊道。

由于受印度洋孟加拉湾暖湿气流的影响,帕隆藏布流域气候温暖湿润,降水丰富,是我国最大的季风海洋性冰川分布区。海洋性冰川活动性强、冰川积累消融量都很大,冰湖发育。近年来,我国发生了多起支沟冰湖溃决引发的主河超常洪水灾害,造成了巨大的生命财产损失。例如1981年西藏波曲河东支支沟内次仁玛错两次发生冰湖溃决,洪水冲毁中尼公路50km^[1];2013年尼都藏布江的支沟中然则日阿错冰湖溃决,导致下游桥梁、道路等基础设施遭到严重破坏,直接经济损失高达2.7亿元^[2]。

受多期冰川作用,帕隆藏布流域内发育有相当规模和厚度的冰碛物松散堆积体,如培龙沟中下游右岸古冰碛层厚达310m^[3],为泥石流的发生提供了主要物质来源。丰富的冰雪消融洪水与松散冰碛堆积物,相互作用形成大规模的冰川泥石流。冰川泥石流规模大,历史上曾多次发生堵河事件,例如位于波密县古乡沟村西,川藏公路K4035~K4028的古乡沟泥石流已爆发大型、特大型泥石流数百次,堵塞帕隆藏布江成湖扇体面积达4.3km²,目前川藏公路只能以便道方式在扇体上通行^[4]。

综上所述,这类由冰湖溃决、冰川泥石流等方式形成的冰川长程威胁是我国铁路尚未遇到的新问题,属于高寒山区特有的灾害防治问题。随着全球性气候的趋于变暖,帕隆藏布流域海洋性气候趋于湿暖性变化,降水量随着气温的升高趋于增加,冰川积累量增加,活动量相应增大,导致冰湖溃决、冰川泥石流频率增加,可能造成大型灾害事件,成为铁路设计不可忽略的特大灾害风险。因此,查明帕隆藏布流域川藏交通廊道内冰湖溃决、冰川泥石流灾害的分布、活动特征,研究对铁路的危害范围、成灾模式,为川藏铁路确定线路方案和空间定线提供科学依据和减灾技术措施,具有重要意义。

■ 1 冰湖溃决危险性分析

1.1 帕隆藏布流域冰湖概况

冰湖是冰川退缩或消失后形成的湖泊,帕隆藏布流域冰湖均分布在高海拔地区,道路交通难以到达。帕隆藏布流域冰湖概况主要依据遥感影像,参考地形图等其他相关资料获取。帕隆藏布流域的冰川属于典型海洋性冰川,冰川活动性强,冰川积累和消融年内变化比较剧烈,冰湖面积随着季节的不同而变化。帕隆藏布流域冰湖面积在夏季季风期一般比其他时期的面积大,因此,选取9月夏末秋初的TM影像进行冰湖的解译识别。为了获知帕隆藏布流域冰湖多年来的变化情况,收集了多时相遥感影像TM,对比分析了1990年前后、2000年前后、2005年前后、2010年前后的Landsat TM、Landsat ETM遥感影像数据。

通过遥感影像解译,初步判定流域内共有大小冰湖131个,其中面积大于0.01km²的有99个,面积大于0.1km²的有23个,面积最大的为莫如弄巴的错下,面积为0.976km²。从数量上看,冰碛湖(终碛湖、侧碛湖)的数量最多,其次为冰川堵塞湖,冰斗湖的数量最少。从冰湖的面积上来看,有66.7%的冰湖面积都小于0.1km²,超过半数的都小于0.05km²,明显小于西藏其他的冰湖分布区^[5,6]。从不同类型冰湖的面积来看,冰碛湖较大,最大面积接近于1km²。

分析多年冰湖数据表明,流域内单个冰湖的面积有增有减。海拔4500m以下,冰湖面积以减小为主;海拔4500m以上,冰湖面积主要在增大。但总面积变化不大,如1988年总面积为7.03km²,2005年为7.21km²,总面积增加幅度为2.56%。此外,面积较小的冰湖较面积大的冰湖更倾向于萎缩,面积小于0.05km²的冰湖中,处于萎缩状态的冰湖占64.1%;而面积在0.05~0.5km²的冰湖中,处于萎缩状态的仅占38%。

以冰碛松散堆积体为主要成分的冰碛堰塞坝,坝体稳定性一般较差,较其他类型的冰湖更易溃决^[7]。冰湖总面积的增加主要来自于大型冰湖,单个冰湖面积、水量的增加也加大了冰湖溃决的危害和风险。从帕隆藏布流域冰湖的分布及冰湖变化的研究结果来看,冰湖溃决危害主要集中于中坝以上大型冰湖分布较为密集的地区。

1.2 冰湖溃决危险性评价

影响冰湖溃决的因素有很多,致溃机理至今没有统一论。总结文献资料^[8-10],历史上发生溃决和具有潜在溃决危险性的冰湖,一般具有以下特点:①冰碛物形成的终碛堤封闭性良好,成一湖盆地形,且规模较大;②冰湖距冰川较近甚至直接相连,冰川规模大、活动频繁;③气候湿热,冰川融水、降水充沛,冰湖补给水量大。

模糊综合评价法是对受多种因素影响的事物做出全面评价的一种十分有效的多因素评价方法,在处理不确定性的事物时具有较大的优势。考虑指标获取和量化的难易度,从影响冰湖溃决灾害的冰川特征、湖盆规模、气象参数、终碛坝参数、下游沟道特征 5 个方面选取了冰湖的面积 F_1 (km^2)、下游沟道纵比降 F_2 ($\%$)、冰川前端距冰湖距离 F_3 (m)、冰川的面积 F_4 (km^2)、冰川积雪区平均坡度 F_5 ($^\circ$)、2000—2014 年间 6~9 月的平均地表温度 F_6 ($^\circ\text{C}$)、地表温度变化率 F_7 ($^\circ\text{C}/\text{a}$)、年降雨量 F_8 (mm) 以及终碛坝坝顶宽 F_9 (m) 共 9 个指标。采用层次分析法计算各影响因子权重,对选取的 9 个因子,两两比较建立判别矩阵(表 1),通过随机一致性检验 $\text{C.R.}=\text{CI}/\text{RI}=0.029673 < 0.1$,最终计算得到各因子的指标权重见表 2。

判 断 矩 阵

表 1

评价指标	冰湖面积 F_1	下游沟道 纵比降 F_2	冰川前端距 冰湖距离 F_3	冰川的面积 F_4	冰川平均 坡度 F_5	年间(6~9 月)平均地 表温度 F_6	地表温度 变化率 F_7	年降雨量 F_8	终碛坝坝 顶宽 F_9
冰湖面积 F_1	1	3	1/2	1	3	1	1/2	2	1/3
下游沟道纵 比降 F_2	1/3	1	1/2	1/3	1	1/2	1/4	1/2	1/3
冰川前端距 冰湖距离 F_3	2	2	1	2	2	1	1/2	2	1
冰川的面积 F_4	1	3	1/2	1	1	1	1/2	2	1/2
冰川平均坡 度 F_5	1/3	1	1/2	1	1	1/2	1/3	1	1/3
年间(6~9 月)平均地表 温度 F_6	1	2	1	1	2	1	1/2	2	1/2
地表温度变 化率 F_7	2	4	2	2	3	2	1	2	2
年降雨量 F_8	1/2	2	1/2	1/2	1	1/2	1/2	1	1/2
终碛坝坝顶 宽 F_9	3	3	1	2	3	2	1/2	2	1

评价指标权重值 表 2

评价指标	冰湖面积 F_1	下游沟道 纵比降 F_2	冰川前端距 冰湖距离 F_3	冰川的面积 F_4	冰川平均 坡度 F_5	年间(6~9 月) 平均地 表温度 F_6	地表温度 变化率 F_7	年降雨量 F_8	终碛坝坝 顶宽 F_9
权重	0.1173	0.0565	0.1303	0.1009	0.0682	0.1103	0.1672	0.0893	0.1600

将冰湖危险性等级划分为极低危险、低度危险、中度危险、高度危险四个等级。对于极低危险冰湖的划分,主要依据学者们对冰湖溃决灾害的研究,取历史已溃决冰湖的最小面积(10^5m^2)以及冰舌与冰湖距离(1000 m)作为下限阈值,其他冰湖则运用模糊综合评价法进行评价。在模糊综合评价计算时,除去极低危险性等级的冰湖,将其他冰湖划分为低度危险(I)、中度危险(II)、高度危险(III)三个等级。用类似于升岭形隶属函数分布,计算各因素对评价等级的隶属度,并依据当 x 位于两界限值的中间时隶属度为 1 的原则,当 x 离开中间值增大或减少时,该变量对该等级的隶属度从 1 开始减少,当取边界值(a, b, c)时,隶属度为 1/2。划分的区间及对应隶属函数见表 3,根据隶属函数求得判断矩阵 R 值,在判断矩阵 R 和权重 W 的基础上,根据公式 $B=W\times R$ 得到隶属矩阵 B ,最后按最大隶属度原则判断所评判对象的危险度等级。

各区间值对应的隶属函数 表 3

区 间	I	II	III
$a \leq x \leq (a+b)/2$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} (x - \frac{a+b}{2})$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} (x - \frac{a+b}{2})$	0
$(a+b)/2 < x \leq b$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} (\frac{a+b}{2} - x)$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} (\frac{a+b}{2} - x)$	0
$b < x \leq (b+c)/2$	0	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{c-b} (x - \frac{c+b}{2})$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{c-b} (x - \frac{c+b}{2})$
$(b+c)/2 < x \leq c$	0	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{c-b} (x - \frac{c+b}{2})$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{c-b} (x - \frac{c+b}{2})$
$x > c$	0	$\frac{1}{2} \sin \frac{c\pi}{2x}$	$1 - \frac{1}{2} \sin \frac{c\pi}{2x}$

图 1 为评估结语,区域内高度危险的冰湖有 10 个,分布在雪茹弄巴、拉普弄巴、多依弄巴、曲都弄巴、敦奶弄巴、米堆弄巴、扎拉弄巴、莫如弄巴 8 个小流域内,区域内曾经溃决的冰湖有郭奶弄巴流域的康窄错、莫如弄巴流域的错下湖、多依弄巴的多依错和米堆弄巴的光谢错。中度危险的冰湖有 8 个,低度危险的冰湖有 2 个。

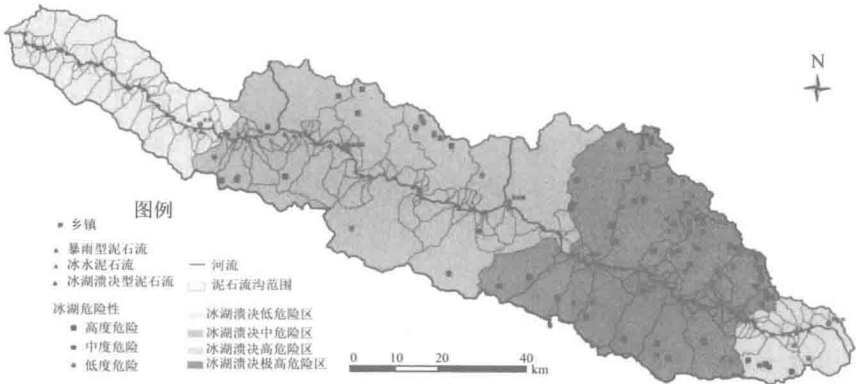


图 1 冰湖溃决危险度分布图