

doi: 10.12029/gc20220825004

刘函, 孙先锋, 郭镜, 张士贞, 苟正彬, 李俊, 王保弟. 2025. 西藏吉隆沟南北向构造及其工程地质安全制约[J]. 中国地质, 52(3): 1149–1164.

Liu Han, Sun Xianfeng, Guo Jing, Zhang Shizhen, Gou Zhengbin, Li Jun, Wang Baodi. 2025. North-south-trending structure in Jilong Valley, Xizang and its effect on engineering geological safety[J]. Geology in China, 52(3): 1149–1164(in Chinese with English abstract).

西藏吉隆沟南北向构造及其工程地质安全制约

刘函^{1,2}, 孙先锋³, 郭镜¹, 张士贞¹, 苟正彬¹, 李俊¹, 王保弟⁴

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西西安 710043; 4. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要:【研究目的】吉隆沟将是未来西藏穿越喜马拉雅山脉重大工程建设的重要区段, 但是对该区基础地质特征认识较为薄弱, 特别是对南北向构造的认识不足可能造成潜在的工程建设风险。【研究方法】本文通过野外地质调查、节理统计、音频大地电磁测深、地热调查及 U 系测年方法系统刻画吉隆沟南北向断层与节理构造特征, 分析与南北向构造相关的主要工程地质风险。【研究结果】吉隆沟南北向断层普遍规模较小, 少数切穿高喜马拉雅带, 同时还是吉隆盆地的控盆断层。吉隆盆地的形成及沉积演化受控于其东界与内部 4 条南北向正断层, 盆地东界断层附近震积岩及内部大量同沉积断层指示盆地具间歇性活动特征。南北向节理呈区域透入性分布, 应力分析显示受控于与南北向裂谷相似的应力场。【结论】吉隆沟南北向构造潜在的工程地质风险源包括全新世活动性及其对区域地热和崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的控制作用。提出南北向构造是吉隆沟重大工程规划建设地质安全风险评价的重点关注方向之一。

关键词: 吉隆盆地; 南北向构造; 工程地质风险; 地质调查工程; 吉隆沟; 喜马拉雅; 西藏

创新点: (1) 吉隆盆地形成与演化受多条南北向正断层间歇性活动控制; (2) 吉隆沟南北向节理呈区域透入性特征, 受控于南北向裂谷应力环境一致; (3) 吉隆沟南北向构造具有现代活动性, 且控制了区域地热和地质灾害, 是重要工程地质风险源。

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-1149-16

North-south-trending structure in Jilong Valley, Xizang and its effect on engineering geological safety

LIU Han^{1,2}, SUN Xianfeng³, GUO Jing¹, ZHANG Shizhen¹, GOU Zhengbin¹,
LI Jun¹, WANG Baodi⁴

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 4. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Jilong Valley will serve as an important segment for significant engineering construction across the Himalayas in Xizang

收稿日期: 2022-08-25; 改回日期: 2022-11-01

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221635)、国家自然科学基金(42002032、41972113)和青藏二次科考项目(2019QZKK0706)联合资助。

作者简介: 刘函, 男, 1986 年生, 高级工程师, 从事青藏高原区域地质调查及特提斯地质演化研究; E-mail: liuhan_cdcgs@163.com。

in the coming years. However, the systematic understanding of the fundamental geological characteristics of this area remains insufficient, especially the inadequate comprehension of N–S–trending structures, which may cause unexpected risks during the engineering construction. **[Methods]** This article systematically delineates the structural characteristics of the N–S–trending faults and joints in Jilong Valley through a combination of field geological surveys, joint statistics, audio–frequency magnetotellurics, geothermal investigations, and calcite U–series dating, in order to analyze the primary engineering geological risks associated with these N–S–trending structures. **[Results]** The N–S–trending faults in Jilong Valley are generally small in scale, with a few cutting through the high Himalayan belt, and are also basin–controlling faults in the Jilong Basin. The formation and sedimentary evolution of the Jilong Basin are controlled by four N–S–trending normal faults in its eastern boundary and interior. The presence of seismic rocks near the eastern boundary faults and a large number of syn–sedimentary faults indicate intermittent activity in the basin. The N–S–trending joints exhibit a regional penetrative distribution, and the stress analysis reveals that they are controlled by a stress field similar to that of the N–S–trending rift. **[Conclusions]** The potential engineering geological risk sources associated with the N–S–trending structure in Jilong Valley encompass Holocene activity, as well as the control exerted over regional geothermal activity and geological disasters, including landslide, debris flows and related hazards. It is proposed that the N–S oriented structure represents one of the key focal points for geological safety risk assessment in the planning and construction of major engineering projects in Jilong Valley.

Key words: Jilong Basin; N–S–trending structure; geological safety risk; geological survey engineering; Jilong Valley; Himalayan; Xizang

Highlights: (1) Intermittent activities of several N–S–trending normal faults control the formation and evolution of Jilong Basin; (2) The N–S–trending joints in Jilong Valley show regional permeability characteristics, controlled by a consistent north–south rift–related stress environment; (3) The north–south trending structure in Jilong Valley has Holocene activity and controls regional geothermal and geological disasters, which is an important engineering geological risk source.

About the first author: LIU Han, male, born in 1986, senior engineer, engaged in regional geological survey of Xizang Plateau and research on Tethyan geological evolution; E–mail: liuhan_cdcgs@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20221635), the National Natural Science Foundation of China (No.42002032, No.41972113) and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (No.2019QZKK0706).

1 引 言

吉隆沟自唐朝开始就是西藏与尼泊尔的交往和通商要道。新中国成立以来,1961年批准吉隆口岸开放,1972年国务院批准吉隆为国家二类陆路口岸,1987年国务院批准吉隆为国家一类陆路口岸,2014年10月吉隆口岸扩大开放,基本确定了吉隆作为西藏南亚门户的地位,2017年4月国务院批准西藏吉隆口岸扩大开放为国际性口岸,这进一步确立吉隆作为中国面向南亚的贸易大通道交通枢纽地位。

目前,吉隆沟是新的216国道的最南段,伴随吉隆口岸交通地位的不断提高,吉隆沟必将规划建设一系列大型交通及房屋工程。吉隆沟切穿喜马拉雅山脉主脊,相关工程建设将直面地形、气候、水

文、地质构造及地质灾害在内的多项“极端难题”(姚志勇等,2019;钟妍等,2020;高延超等,2024)。特别是缺乏对吉隆沟地质构造的系统性刻画,成为工程地质灾害识别与防范的薄弱环节。

一直以来,吉隆沟东西向构造最让人们记忆深刻,包括藏南拆离系(STDS)、喜马拉雅主中央逆冲断裂(MCT)等(张振利等,2006;Yin,2006;杨雄英等,2009),而南北向构造仅有吉隆东山断层或者吉隆盆地东界断层^①,但最新的地质调查揭示吉隆沟南北向构造非常发育。南北向裂谷作为现今藏南地区的重要活动构造带(吴中海等,2018),其未来地震危险性将是工程建设地质安全风险评价的不可忽视的问题(张永双等,2022)。因此,本文将报道吉隆沟南北向地质构造研究新进展及其对重大工程规划建设的影响。

2 地质背景

青藏高原南部由北往南依次为冈底斯、雅鲁藏布江结合带、喜马拉雅三个重要构造单元(图 1a), 三者分别以雅鲁藏布江北界、南界断裂为界(潘桂棠等, 2001)。喜马拉雅带由北往南依次为特提斯喜马拉雅带、高喜马拉雅带和低喜马拉雅带, 并以藏南拆离系和主中央逆冲断裂为界(Yin, 2006; 张进江, 2007; Zhang et al., 2012; Pan et al., 2012); 而特提

斯喜马拉雅带又以定日—岗巴断裂为界划分为特提斯喜马拉雅北带和南带。其中, 主中央逆冲断裂北部推覆的时代普遍早于 35 Ma (吴珍汉等, 2011), 在喜马拉雅地块产生广泛的轴面北倾的褶皱变形。

本文所言吉隆沟为吉隆藏布从吉隆县城转向南至尼泊尔国境段, 其包括特提斯喜马拉雅带南带和高喜马拉雅带中北部(图 1b)。藏南拆离系是该区最大的东西向构造, 其初始活动时限在始新世末期(约 35 Ma, 高利娥等, 2013)或者渐新世中期

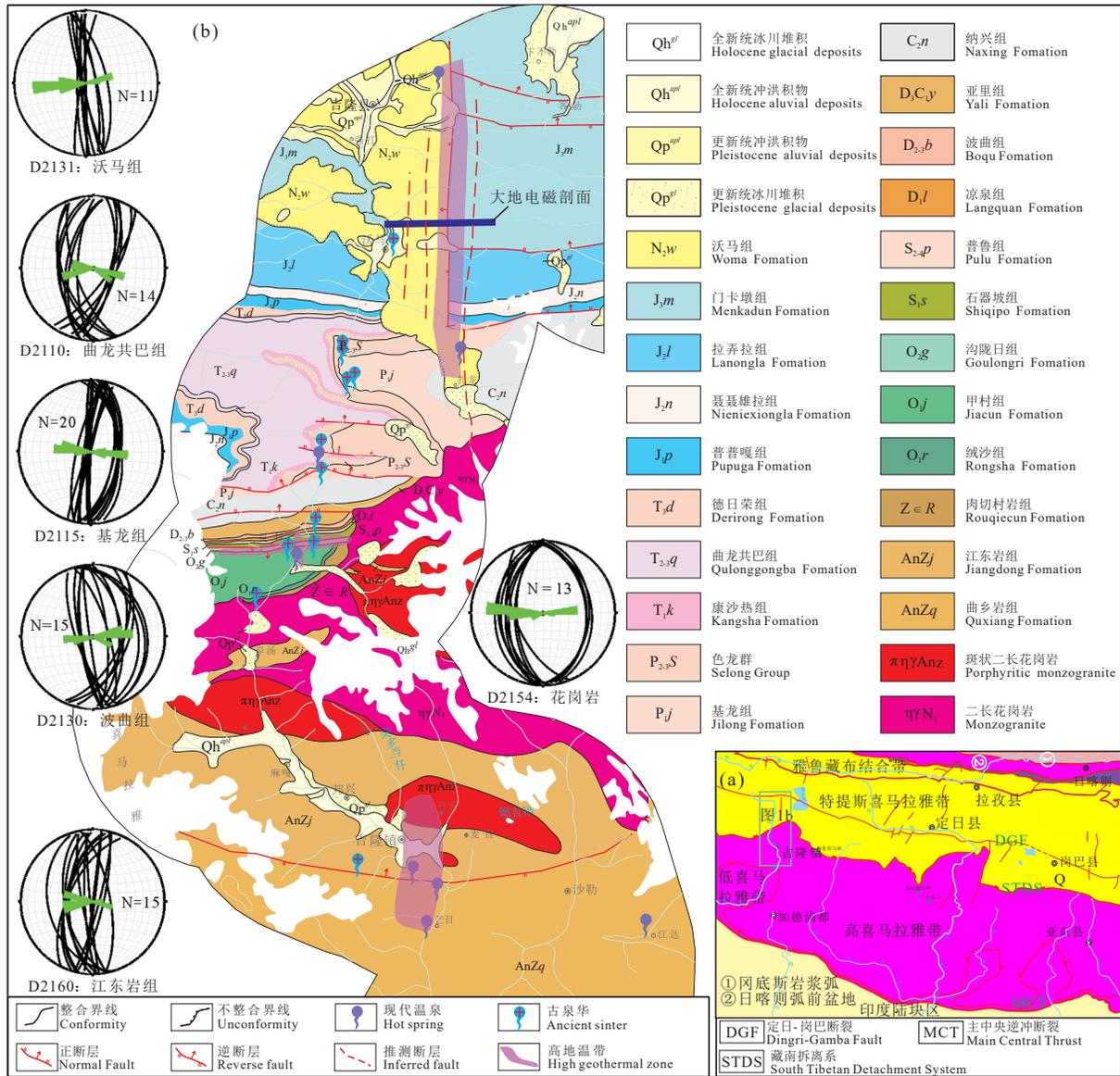


图 1 藏南构造单元划分(a)和吉隆沟地质简图(b, 标注节理极射赤平投影及玫瑰花图、钙华(温泉)位置及推测断层)
 Fig.1 Division of structural units in southern Xizang (a) and simplified geological map of Jilong Valley (b), showing the polar stereographic projection and rose diagram of joints, travertine (hot spring) locations and inferred faults

(约 26 Ma, 杨雄英等, 2009), 韧性变形一直持续到 17~16 Ma(Cottle et al., 2015), 拆离断层的脆性移动则继续活动至 14~13 Ma(刘小兵等, 2012), 而与藏南拆离系有关的变形作用则在 13~12 Ma 结束(Leloup et al., 2010), 之后构造体制转变为南北向挤压(Zhang et al., 2012)。

吉隆沟南北向构造是整个青藏高原南部中新世以来南北向构造的重要组成部分(张进江, 2007; Wu et al., 2011)。吉隆盆地东界断层是吉隆沟最重要的南北向构造, 其最显著的标志就是控制了南北向吉隆盆地的形成及演化(徐亚东等, 2010), 裂变径迹年龄揭示其最早活动时间在 13 Ma 左右(Shen et al., 2016)。新的地质调查发现吉隆沟的南北向构造不仅仅只有吉隆盆地东界断层, 还有大量小型断层, 在高喜马拉雅带同样见南北向断层, 南北向节理更是具区域透入性分布特征, 这些南北向构造共同构成吉隆沟工程建设重大风险源。

3 吉隆沟南北向断层特征及新发现

3.1 吉隆沟南北向断层切穿高喜马拉雅带

喜马拉雅地块南北向断层众多, 一部分(比如亚东沟)切穿高喜马拉雅带(Wu et al., 2011), 但是吉隆沟仅有的南北向断层并未越过藏南拆离系下部韧性剪切带^①(杨雄英等, 2009), 笔者发现一些新证据支持高喜马拉雅带存在南北向断层。最为明显的南北向正断层位于冲色—江村一线, 地貌上为一近南北向深沟, 断层呈锯齿状, 在节理面及片理面发生转折或者迁移, 但是总体显示南北向特征。在

江村附近公路壁可见多处南北向正断层露头, 破碎带宽度 10~20 cm, 见阶步及擦痕(图 2a), 指示正向滑动为主, 其中获得一处断层面产状为 $76^{\circ} \angle 73^{\circ}$ 。沿线发育 3 处温泉点, 并且江村温泉水温大于 80°C , 局部可见大面积水热蚀变带(图 1b)。

另外, 东林藏布(吉隆藏布东侧支流, 在国门汇入吉隆藏布)一带可能存在南北向正断层。尽管植被覆盖较严重, 但是在河流东侧仍可见系列线性影像(图 2b)。该河流平直并近南北向, 并且河谷两侧发育疑似断层陡崖及断层三角面, 河流两岸冲洪积物中见近南北向活动正断层, 晚更新世冲洪积物被错断近 1 m。喜马拉雅山北坡的佩枯错西活动断层的南延线正好与该断层相连, 指示南北向断层穿过喜马拉雅山脉。

3.2 吉隆盆地东界断层和内部断层间歇性活动控制吉隆盆地演化

对吉隆盆地大地电磁及野外构造调查均指示盆地并非仅仅受一条南北向的边界断层控制, 且盆地处于持续活动之中。

3.2.1 吉隆盆地受 4 条深大断层共同控制

为了查明吉隆盆地的深部结构, 笔者从盆地西部边界到吉隆东山西侧半山腰布设东西向剖面, 平均点距 200 m, 在已知断层出露点处加密点距, 共 39 点, 长 7.5 km。野外测量方式采用两台主机、两台分机同时观测, 数据处理时最低频率截取到 1 Hz(郭镜等, 2019)。剖面涉及地层简单, 剖面西侧位于吉隆盆地内部, 为沃玛组中度固结碎屑岩组合, 包括粉砂岩、细砂岩夹砂砾岩等, 并且部分地层为钙

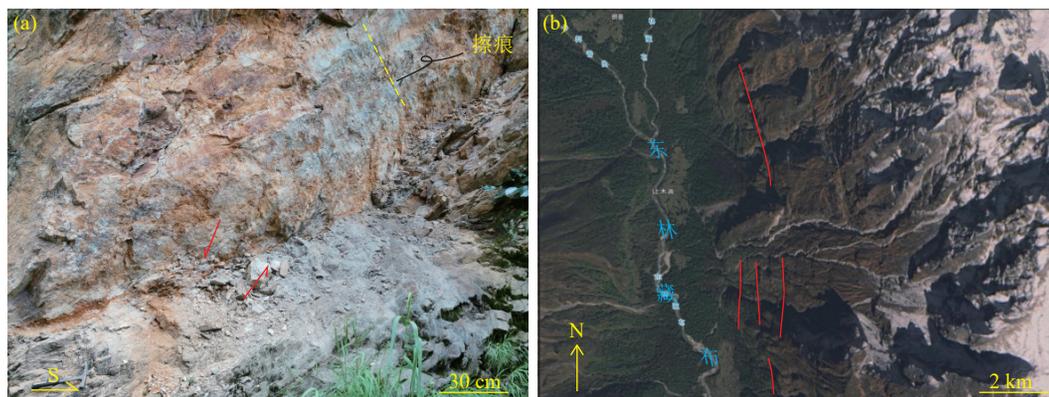


图 2 吉隆沟南北走向断层露头 (a) 及东林藏布南北走向线性影像 (b)

Fig.2 North-south-trending fault outcrop of the Jilong Valley (a), North-south-trending linear image of the Donglinzangbu River (b)

质胶结, 由于沉积物未完全压实, 含有较多的孔隙水, 电阻率较低; 剖面东侧岩石为深灰色门卡墩组泥晶灰岩、泥质灰岩组合, 电阻率最高。

剖面测得电阻率分布范围在 $100.6\sim 3.5\ \Omega\cdot\text{m}$, 电阻率分布特征见图 3a。1~17 点间 100 m 以浅存在一层中阻特征地质体, 推断为潜水面以上沃玛组的电性响应; 100~300 m 存在一中低阻特征的地质体, 推断为沃玛组的电性响应; 300 m 以下厚约 1 km 的高阻体应为门卡墩组碳酸盐岩的电性响应。18~39 点 1 km 以浅的高阻体为门卡墩组碳酸盐岩及较薄的沃玛组(厚度可能小于潜水面)的电性响应。

根据两高阻之间的低阻梯级带及层位较大错动解译出南北向断层 4 条(图 3a)。F1 显示为较陡立向西倾的低阻带, 顺低阻带往地表延伸到 37~39 点。F2 断层其实为前人划定的南北向吉隆盆地

东界断层^①, 野外调查发现较大规模的断层破碎带, 在 28~30 点见较小的低阻团, 并且形成相同电阻层较大规模错断。F3 断层西侧由下往上分别为门卡墩组和沃玛组, 东侧为门卡墩组, 二者之间显示一高角度西倾低阻带(19~20 点), 并且形成相同电阻层最大错动。F4 两侧地层由下往上均为门卡墩组和沃玛组, 低阻带(12~14 点)高角度西倾, 但是西侧代表沃玛组的低阻层较厚并略微下陷, 指示断层断距不大。

由上可知, 吉隆盆地东部至少存在 2 条南北向断层(图 3b), 控制盆地的东部边界, 西侧的边界断层更多作为基岩与沃玛组的界线, 而东侧的边界断层往往切割基岩, 仅局部作为基岩与沃玛组边界, 因此吉隆东山并不像以前认为的为一个完整的断块构造, 其内部仍被近南北向的断层切割, 隧道工

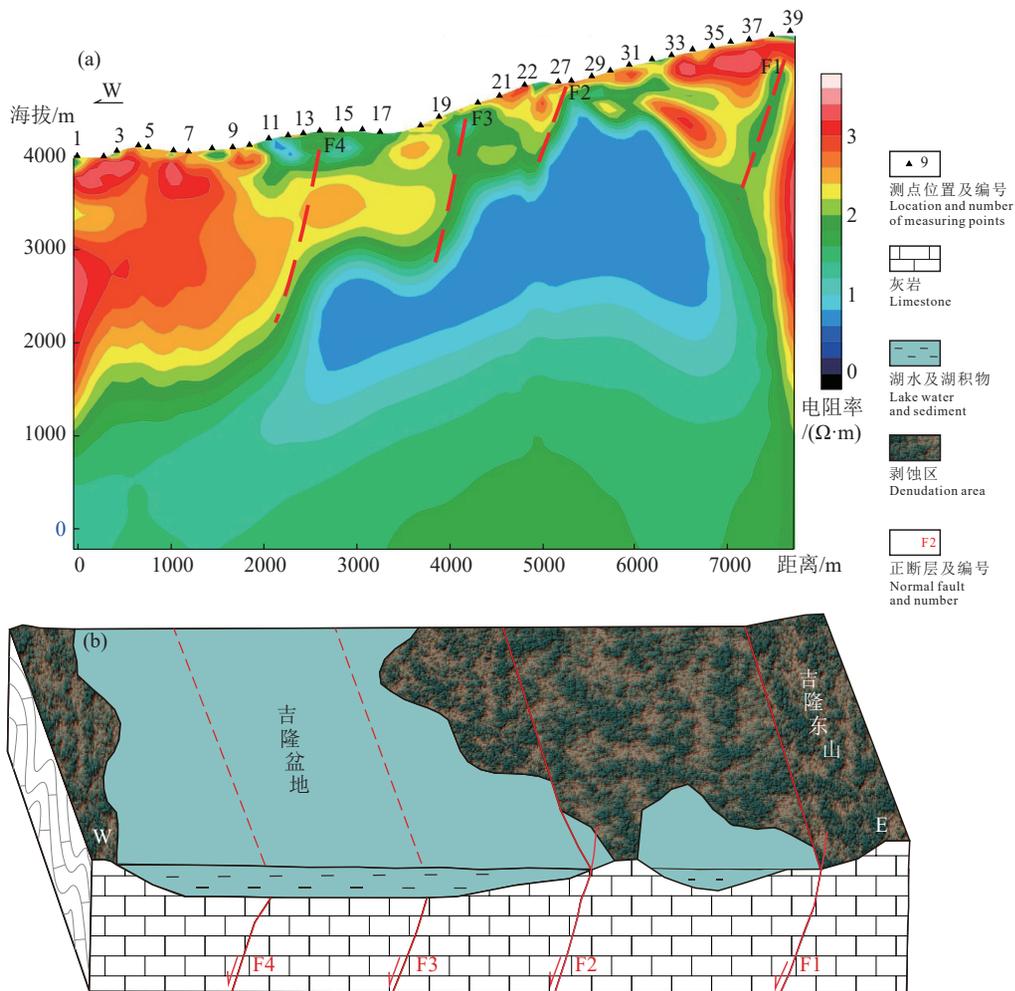


图 3 吉隆盆地东西走向大地电磁剖面 (a)、断层控盆古地理示意图 (b)

Fig.3 East-west-trending magnetotelluric cecioion of the Jilong Basin (a), paleogeographic sketch map of fault-controlled basin (b)

程将遭遇多条破碎带。盆地内部中生代基底同样被 2 条南北向断层切割(图 3b),均为高角度西倾正断层,靠东侧断层断距更大,但是盆地内部地表并没有发现较大规模的南北向正断层,可能与表层软沉积物造成应力分散有关。

3.2.2 吉隆盆地东界双断层系统

两条南北向断层在吉隆盆地东部不同部位作为盆地沉积与吉隆东山基岩的界线(图 3b)。

传统意义的吉隆盆地东界断层(F2)因其显著的地貌标志而为人们熟悉,其北至吉隆温泉,南到扎龙沟,南北长约 20 km,一直被认为是吉隆沟唯一的南北向构造^①。该断层在地貌上构成吉隆盆地北部与吉隆东山的分界线,在遥感影像上线性构造清晰,可见断层陡崖、断层三角面等地貌标志,并有现代温泉活动,指示其现今仍处于活动期。断层向西陡倾,倾角 70°~80°,带内岩石破碎,产状紊乱,断层角砾岩、断层泥发育,不同地段发育规模不等,在沃玛村北东可见宽度大于 100 m 的构造破碎带,而扎龙沟附近又仅有 3~4 m 宽的构造角砾。在断层面附近,见大量小型共轭次级断层,表现为高角度东倾或者西倾,与共轭节理产状一致。

遥感影像表明吉隆盆地南部沃玛组与基岩的界线向东迁移约 2 km,为大地电磁剖面 F1 处(图 3),并且在界线附近见极度破碎的黑色构造角砾,可见温泉从构造角砾附近流出,形成规模较大的钙华台地。温泉出露处东侧基岩为基龙组不含钙质砂岩,其泉水中的钙质成分显然通过断层破碎带从其他地方导出。另外,在断层破碎带的南延长线上,可见扎龙曲上游为平直水系,向南一直延伸到雪线附近。因此,控制吉隆盆地东界的断层至少包括两条,它们相互平行并以两条较为平直的南北向线状水系为标志,可见断层角砾及温泉。

3.2.3 吉隆盆地断层间歇性活动特征

前人认为吉隆盆地东界断层形成之后盆地进入稳定演化阶段,断层长期不活动,更新世之后才再次活动(王朝德, 2008)。但是无论宏观沉积地貌还是同沉积构造,都揭示断层间歇性活动控制或者影响了盆地的沉积演化。吉隆盆地东界断层作为一条近南北向分割中生界与中—上新统的界线,东侧为吉隆组、门卡墩组等前新生代地层,西侧为旦增竹康组、沃玛组。但是断层并不是截然将两侧地

层分割,在断层东侧可见旦增竹康组及沃玛组角度不整合在门卡墩组之上,而断层西侧同样出露大面积门卡墩组(图 1b),表明断层并非一次性作用造成了两侧明显的地貌差异,指示盆地东界断层持续活动才形成现今地貌。

在盆地东界断层附近,沃玛组上部层位见同沉积断层及各种液化变形(液化塑性角砾岩、砂岩脉、砾岩脉、负载构造)等震积岩标志(乔秀夫等, 2016; 杜远生和余文超, 2017),指示与断层作用造成地震活动有关,显示吉隆盆地东界断层的持续活动。一系列高角度西倾的同沉积小型断层位于吉隆盆地东界断层上盘,局部可见共轭次级正断层,断距大者 1~2 m,小者 10~20 cm,并见牵引构造。地震作用触发钙质砂岩发生液化,指示地震强度较大($M_s \geq 5$, Marco and Agnon, 1995);液化层厚 1~2 m,断层上盘厚度相对较大。液化砂岩向未液化的砂岩层流动,穿插、分割并包围未液化砂岩(图 4a),造成未液化砂岩呈塑性角砾分布于液化砂岩中(刘函等, 2018),不同露头未液化砂岩角砾含量不一。砾岩脉为液化层上覆砾石层顺同震节理向下灌入液化砂岩层(图 4b),宽度可达 10 cm,指示地震发生在砾岩沉积阶段或者稍后。负载构造表现为液化砂岩层上覆砾石层底部凹凸不平陷落于下伏液化层中,局部砾岩层完全掉落形成砾岩球,粉砂质火焰构造如果遭遇同震节理则液化继续上突形成砂岩脉。

另外,吉隆盆地内部南北向小型正断层零星不连续发育,造成沃玛组地层错断,但并没有造成地貌地形上的差异。断层西倾或者东倾,倾角 65°~70°,断距几十厘米到 2~3 m,多沿 X 剪节理发育。断层可分为两种类型,一种为同沉积断层,一种为准同生断层。同沉积断层断距一般小于 2 m,向东和向西两组断面共生,但是断面不平直,上盘同沉积地层厚度较下盘稍厚,随后被之后地层覆盖。准同生断层形成时代较沉积时代稍晚,上盘见地层牵引弯曲(图 4c)。由于沃玛组碎屑岩中钙质含量较高,岩石极易发生固结成岩,因此最常见的断层往往形成于岩石固结之后,两盘地层截然(图 4d)。这些小型南北向正断层表明吉隆盆地内部存在断续的不稳定性或者短暂无动荡环境,并不是持续稳定地接受沉积。



图 4 吉隆盆地沃马组典型软沉积变形露头

a—液化砂岩层; b—液化砂岩脉; c—同生共轭正断层; d—准同生正断层

Fig.4 Typical soft sedimentary deformation outcrop of Woma Formation in Jilong Basin

a—Liquefied sandstone layer; b—Liquefied sandstone vein; c—Contemporaneous conjugate normal fault; d—Penecontemporaneous normal fault

3.3 吉隆沟沿线小型南北向正断层普遍发育

小型南北向正断层作为吉隆沟重要的南北向构造异常发育,但是不易识别。这些正断层延伸往往不远,所形成的碎裂岩宽度一般小于 30 cm,断距一般小于 5 m,多数露头不见明显断距而仅有碎裂岩。

以吉隆藏布干流润达桥—夏村一带为例,由北往南可见大量南北向的小型正断层分布。温嘎洞沟口南北向断层系由多条东倾及西倾的断层组成,断面与区域性节理产状一致,每个断层间隔 10~20 m,断层面主体为铲式特征,断层面倾角由上往下角度有降低趋势(图 5a)。断层切割土龙群,每个断面切割的断距不一致,最大断距约为 5 m,造成土龙群中厚层灰岩错断,在山脊上形成错断山脊地貌。卧龙多桥北为一重要的南北向断层出露区,在南北长约 2 km 的范围内见多个南北向正断层,其切割地层为基龙组、色龙群、曲龙共巴组及第四系。断层面呈南北向,呈高角度西倾或者东倾,断层的断距一般

在 3~5 m,偶见断距大于 10 m,破碎带宽度不超过 30 cm(图 5b),并有活动断层特征。六号沟南北向正断层切割土龙群灰岩,可见向东和向西两组共轭断面,多个平行排列的小型正断层间隔 2~3 m,在断面附近见雁列脉,指示正向滑动(图 5c),断距小于 2 m。断层破碎带宽度一般 10~20 cm,内部角砾杂乱无定向性;断面上擦痕和阶步指示右行走滑正断层性质。夏村附近多条南北向断层切割甲村组、石器坡组和普鲁组,断面普遍呈高角度西倾或者东倾,破碎带宽度小于 20 cm,构造角砾无定向性(图 5d)。切割普鲁组断层中可见新生方解石,而甲村组与石器坡组断层中见古泉华、现代泉眼及水热蚀变现象。

4 吉隆沟南北向节理呈区域透入性分布

吉隆沟南北向节理几乎见于任何一个露头,并切穿所有地质单元(表 1),在区域尺度上具均匀连

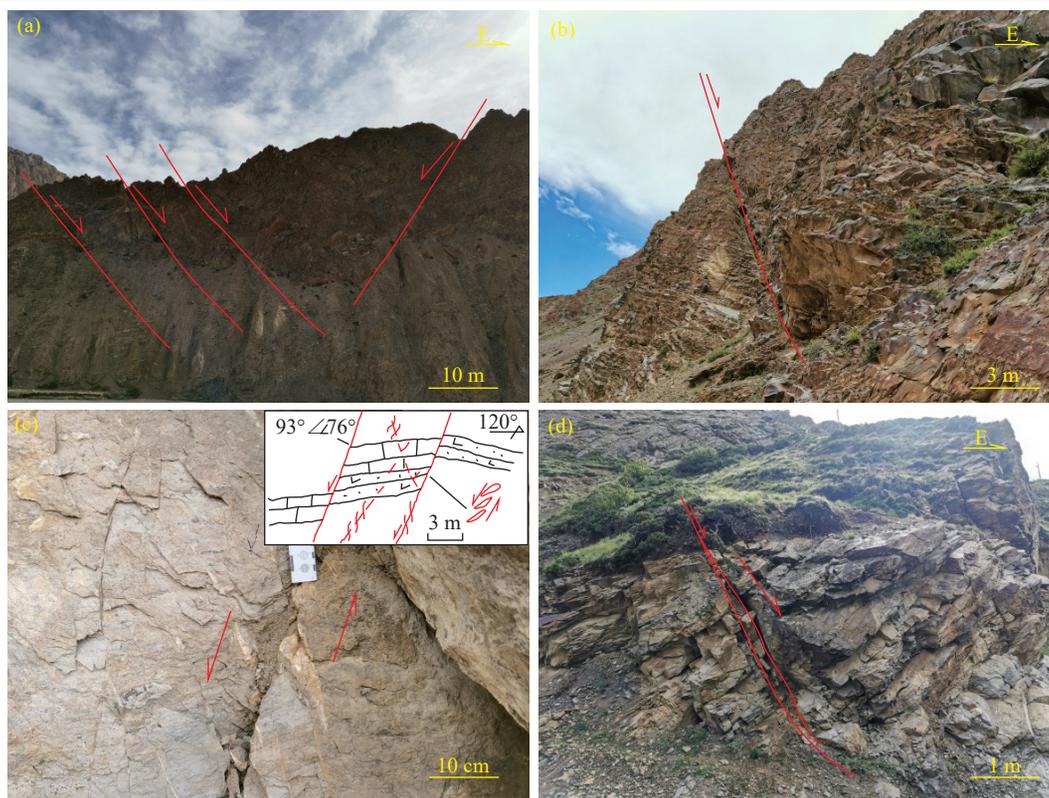


图 5 吉隆沟温嘎洞—夏村典型南北走向断层野外特征

a—土龙组铲式正断层; b—吉隆组正断层; c—土龙组正断层派生雁列脉; d—普鲁组中小型破碎带

Fig.5 Field characteristics of typical north-south trending faults from Wengadong to Xiaocun, Jilong Valley

a-Shovel-like normal fault in Tulong Formation; b-Normal fault in Jilong Formation; c-En-echelon vein related to normal fault in Tulong Formation; d-Small fracture zone in Pulu Formation

续分布的透入性特征,极易诱发与构造面相关的工程地质灾害。南北向节理构成南北向构造改造早期东西向构造的主体,但是吉隆盆地、特提斯喜马拉雅带与高喜马拉雅带南北向节理密度、延伸等略有差异。

吉隆盆地由于处于吉隆东山断层上盘,近南北向 X 型剪节理最为发育(图 6a),节理平直并偶见切穿砾石现象。沃玛组中 X 型剪节理因岩石类型差异节理密度存在差异,以较为固结的钙质泥岩、钙质粉砂岩节理密度最高,局部大于 10 条/m;固结砾岩中节理密度一般 1~2 条/m,普通的未固结的砂岩基本不含节理。另一类南北向张节理在砾岩层中最为典型,节理面呈波浪状,间隔一般 2~3 m,并且在山脚偶见沿节理裂隙的泉眼(图 6b)。

特提斯喜马拉雅带南北向节理密度相对较大,整体大于 10 条/m,节理平直且延伸较远,常见切穿山体(图 6c)。节理与岩石坚硬程度有一定关系,往

往较坚硬岩石节理较发育且延展性好,而较软弱岩石节理规律性稍差。节理发育间隔并不稳定,常见节理密集带,节理密度大于 20 条/m。顺节理面可见岩石破碎现象,宽度小于 2 cm,内部角砾无规律,伴有顺节理面的擦痕或者阶步,而节理内灌入的脉体以方解石脉为主,石英脉次之。部分区段可见节理控制小型陡崖、公路壁等微地貌形态,但对大型沟谷的控制作用不强。另外,少量近直立南北向的张性节理与剪节理伴生,呈波状或者锯齿状且不连续,常见岩脉或第四系泥砂填充。

高喜马拉雅带节理密度整体较特提斯喜马拉雅带小,南北向节理较特提斯喜马拉雅带发育程度稀疏,节理间隔往往较大,一般大于 1 m。但是,高喜马拉雅带节理更为平直,延伸更远,一条节理往往可以延伸几百米,其对山体的控制作用非常强,很多南北向的河谷两侧陡崖及岩壁都是受南北向节理控制(图 6d),并且形成平直的坡面,山脚下堆

表 1 吉隆沟内南北走向节理特征
Table 1 Characteristics of north-south trending joints of Jilong Valley

节理点位	岩石地层	岩性	节理特征	东倾节理		西倾节理		交线 (σ_2)		应力方向 (σ_1)		
				倾向	倾角	倾向	倾角	倾向	倾角	倾向	倾角	
特提斯喜马拉雅带												
D2106	拉弄拉组	中薄层状灰岩	5~20条/m, 形成共轭剪节理, 节理中见方解石脉	133	75	280	69.5	209	42	24	48	
D2107	聂聂雄拉组	中薄层灰岩	两组共轭, 并有大量方解石脉	104	73	262	59.3	186	22	346	67	
D2109	普普嘎组	灰岩夹钙质砂岩	约10条/m, 两组南北走向的剪节理发育	112	69	265	58.8	191	25	356	65	
D2110	曲龙共巴组	钙质泥岩夹钙质砂岩	10~15条/m, 两组共轭, 其中一组延伸较远, 节理中见大量方解石脉	100	83	261	64	186	28	344	60	
D2112	色龙群	泥质灰岩	10~20条/m, 两组近南北走向节理共轭, 节理面方解石脉充填	112	64	284	58.3	199	7	355	82	
D2113	土龙群	中-厚层状灰岩	8~12条/m, 两组南北走向共轭剪节理, 见次级张裂隙及近水平擦痕	288	80	251	78.4	254	78	359	3	
D2114	江东岩组	黑云斜长片麻岩	节理不甚发育, 两组南北走向节理和一组东西走向节理	110	70	280	60	196	12	3	78	
D2115	吉隆组	岩屑石英砂岩	10~15条/m, 两组共轭剪节理近南北走向, 切穿山体, 延伸较好	93.4	59	277	84.8	6.5	6	120	76	
D2116	纳兴组	岩屑石英砂岩	5~20条/m, 两组近南北走向共轭剪节理, 向东较为发育	94	63	278	71.5	6.4	4.7	144	83.6	
D2117	纳兴组	粉砂岩、砂岩	6~9条/m, 两组近南北走向节理共轭, 穿越山体, 偶见构造角砾	83.4	73	269	84.6	359	3.5	119	83.2	
D2119	波曲组	钙质砂岩	3~5条/m, 局部密集, 共轭剪节理, 一组延展较好, 见石英脉	102	70	285	48.2	13	2.3	276	79.5	
D2121	色龙群	中薄层灰岩	两组较明显南北走向节理, 见方解石脉, 一组延伸较远, 见线理	72.1	73	269	53.5	347	15.5	201	72.5	
D2122	色龙群	岩屑石英砂岩	近南北走向共轭剪节理, 局部密集, 切穿山体, 见擦痕, 偶有角砾	89.4	76	288	57.3	4.5	20	212	67.6	
D2123	吉隆组	长石石英砂岩	两组近南北走向剪节理, 其中一组与断层面平行, 方解石充填	95.6	62	283	68	9.6	7.6	168	81.8	
D2124	石器坡组	粉砂质板岩	两组近南北走向共轭剪节理, 4~8条/m, 其中一组较为密集	90.2	70	266	62.2	179	5.1	310	82.2	
D2128	色龙群	中层状灰岩	两组近南北走向共轭剪节理, 切穿山体	100	79	282	61.2	10.9	2.4	261	82.7	
D2129	色龙群	中层灰岩	两组近南北走向共轭剪节理, 5~20条/m, 局部较密集, 方解石脉充填	97	68	287	69.9	12	12.4	188	77.6	
D2130	波曲组	长石石英砂岩	两组近南北走向共轭剪节理, 5~12条/m, 切穿山体, 其中一组不甚发育	89.9	52	259	76.8	173	10.4	41.8	73.4	
D2144	甲村组	岩屑石英砂岩	10~15条/m, 两组剪节理近南北走向, 其中一组较发育	98.5	48	300	79.6	10.2	62	260	10.7	
高喜马拉雅带												
D2151	肉切村组	云母石英片岩	10~15条/m, 共见5组节理; 两组共轭剪节理近南北走向, 较平直	118	48	300	53.9	28.9	1.5	147	86.9	
D2152	中新世岩体	片麻状花岗岩	5~10条/m, 节理面平直, 两组南北走向节理充填有花岗岩脉	117	49	264	56.9	188	20.3	20	69.1	
D2153	中新世岩体	花岗岩	5~8条/m, 五组节理较明显; 南北走向共轭剪节理其中一组较为发育	101	71	263	37.5	188	10.9	309	69.5	
D2154	中新世岩体	片麻状花岗岩	节理不甚发育, 3~5条/m, 较平直, 局部较密集	86.5	37	267	50	357	0.2	267	6.5	
D2155	中新世岩体	花岗岩	节理不发育, 主体为近南北走向, 2~3条/m, 平直, 见次级节理	94.5	66	266	50.7	182	6.4	312	81.2	
D2156	中新世岩体	花岗岩	不发育, 1~2条/m, 局部5~8条/m, 南北走向共轭剪节理最明显	73.5	58	275	50.5	353	14.2	188	75.2	
D2157	江东岩组	大理岩	不发育, 1~2条/m, 偶见西倾节理			271	67					
D2158	江东岩组	黑云斜长片麻岩	不发育, 1~2条/m, 局部5~8条/m, 节理平直, 西倾较常见	80	55	284	58	2.8	17.3	178	72.6	
D2159	江东岩组	眼球状片麻岩	西倾节理3~5条/m, 东倾节理10~15条/m	84.3	74	262	64	173	3.3	297	84.9	

注: 节理产状取节理统计平均值; 倾向、倾角单位为°。



图6 吉隆沟南北走向节理野外特征

Fig.6 Field characteristics of north-south trending joints of Jilong Valley

积的碎块多为顺节理面崩塌所致。

各个地质单元节理统计显示南北向节理几乎见于每一个露头,每一个露头几乎可见两组共轭剪节理(图1b),并且总可见一组南北向节理为优势节理。两组节理的交线呈近南北向,并且倾角普遍低于 20° ,反映节理形成时期 σ_2 的方位为近南北向。假设共轭节理锐角平分线代表最大主应力方向,那么计算得出几乎所有节理的最大主应力都为高角度特征(表1),表明其为近垂直主应力方向。

上述表明,吉隆沟所有南北向节理受控于相同的应力场环境,并且常见南北向节理切割东西走向节理或者断层,表明其形成在藏南拆离系形成之后,与南北向裂谷的发育时间相匹配(张进江, 2007),与吉隆盆地内部沃玛组南北向节理普遍发育相符,表明吉隆沟南北向节理形成于南北向裂谷相似的应力场。从节理而言,区域上南北向节理较东西向节理更为发育,并且形成时代更晚。如果工程近南北向,应当加强对南北向节理及相关工程地质问题识别。

5 吉隆沟南北向构造工程地质风险

除吉隆盆地控盆断层外,吉隆沟南北向构造普遍规模较小但呈透人性产出,如果与吉隆沟的公路、铁路线工程呈小角度相交,可能诱发系列工程地质风险。因此,南北向构造是吉隆沟重大工程规划建设地质安全风险评价的重点关注方向之一,主要表现为其全新世活动性以及在地热、地质灾害的控制作用。

5.1 吉隆沟南北向断层具全新世活动性

活动构造是最为重要的工程地质问题之一(彭建兵等, 2004),并且每条活断层的活动习性并不一样(雷启云等, 2015),造成工程避让应用难度极大。尽管对活动断层的时限有不同标准(周本刚和冉洪流, 2002),本文采用全新世以来作为活动断层限定标准。吉隆沟南北向断层并不能全部准确判断其活动时代,但根据三种方式可准确判断某些南北向断层为活动断层。

第一类活动断层可根据现代串珠状温泉判定,

比如根据串珠状温泉确定冲色—江村断层与吉隆东山断层具有现代活动性。冲色—江村活动断层沿线见三处串珠状温泉, 其中一处因 2015 年尼泊尔大地震滑坡将泉眼堵塞, 指示温泉与断层的相关性。吉隆东山断层南北两端都见温泉, 并伴有钙华台地; 本次工作针对新发现的吉隆盆地东界断层 (F_1) 钙华台地方解石采用 U 系定年获得年龄 (3550 ± 21) a (表 2), 指示断层在全新世仍在活动。

第二类活动断层虽然仅有单一泉眼或者古泉华, 或者在断层角砾中有新生方解石, 可根据方解石 U 系测年获得断层活动时代。雍仲日北约 1 km 基龙组长石石英砂岩被多条南北向断层切割, 断面向东或者西倾, 倾角大于 70° , 与附近节理产状一致。其中一处断层形成宽约 30~50 cm 的破碎带, 沿断层破碎带有泉眼, 在山脚下形成多处钙华锥, 胶结山脚坡积物, 局部形成条带状纹理, 本次工作获得方解石胶结物 U 系年龄约为 57 a (表 2), 反映断层活动时代在全新世。钙华胶结之后的坡积物被再次剪切发生二次破裂, 表明断层附近在现代仍是应力作用强烈区。另外, 夏村附近与南北向断层相关的古泉华方解石 U 系年龄为 (6324 ± 623) a (表 2), 指示夏村附近全新世南北向断层活动, 与该处现代温泉及普遍热水蚀变现象相符。

第三类根据活动断层切割第四纪沉积物判断。该类断层切割第四纪冲洪积物, 如果活动断层伴随有地震作用, 则造成大量第四纪沉积物地震变形作用。这些第四纪沉积物的时代多数在晚更新世-全新世早期, 代表该类活动断层的时代稍晚。比如卧龙多桥南北向正断层为“X”型共轭特征, 其中向西倾的正断层切穿第四系河流相沉积, 形成宽约 20~30 cm 的断层滑动带, 带内砾石轻微定向指示上盘向下滑动, 而断层带两侧砾石层及砂土层发生错位, 推测断距大于 1 m。断层上盘砂土层见牵引构

造, 指示上盘下滑, 并且砂岩层发生褶皱变形。下盘可见一小型正断层, 为南北向节理进一步发展而来, 其错断厚约 30 cm 的砂土层, 断距为 10~20 cm。该处冲积物形成时代在晚更新世晚期, 因此断层活动时代极有可能为全新世。在断层附近还可见松散沉积物液化角砾岩变形, 也是地震断层活动的重要标志之一。

5.2 南北向断层与高地温关系密切

5.2.1 南北向断层控制区域地热分布

藏南拆离系在主活动期控制了其下部韧性剪切带附近的减压熔融及淡色花岗岩(脉体)的形成, 但是自从转入浅表层次脆性活动后几乎没有东西走向的地热供应。吉隆沟发现的众多的现代温泉及古泉华都显示与南北向构造更为紧密的关系, 符合西藏地区水热活动(特别是中高温地热系统)与近南北向活动构造关系密切的分布规律(牛新生等, 2023), 储热平面分布图显示吉隆沟位于措勤—搭格架地热异常区的南端(王鹏等, 2016)。

吉隆沟温泉及古泉华分布广泛, 仅在国道 216 附近就可见 20 多处(表 3)。与温泉及古泉华相关地层包括江东岩组、甲村组、石器坡组、波曲组、吉隆组、色龙群、土龙群、门卡墩组等, 显示其与地层没有明显的关系。通过对温泉及古泉华构造系统统计, 发现多数温泉及古泉华附近可见南北向断层活动痕迹, 见构造角砾, 擦痕及阶步等, 表明温泉及古泉华与南北向活动断层关系密切。比如在扎龙沟新发现的泉眼处正好是南北向断层的断层角砾岩经过部位(图 7a); 雍忠日一带钙华锥附近常见南北向构造面上擦痕(图 7b); 夏村附近见几处温泉及钙华从南北向断层或者节理流出(图 7c), 并见南北向断层附近地下热水将岩石蚀变为黄褐色(图 7d), 这些都表明南北向断层与高地温关系密切。

表 2 吉隆沟钙华 U 系测年结果

Table 2 U-series dating results for travertines of Jilong Valley

编号	样品号	位置及岩性	^{238}U / 10^{-9}	^{232}Th / 10^{-12}	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比	$g^{234}\text{U}^*$ 测量值	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 活度比	^{230}Th 年龄/ a BP
1	D2123U	雍忠日南北向断层钙华	313±0	11324±227	5.1±0.2	1044.8±3.5	0.0111±0.0003	57
2	D2146U	寺庙南北断层擦痕方解石脉	20±0	68730±1377	1.2±0.0	-492.1±8.9	0.2663±0.0088	
3	D2212U	夏村古钙华	3248±11	88765±1806	35.2±0.7	90.0±2.4	0.0583±0.0003	6324±623
4	D2221U	扎龙沟南北断层处钙华	6686±25	1127±23	4056.4±84.0	284.4±2.7	0.0415±0.0002	3550±21
5	PM24-42U	夏村南北向断层新生方解石	575±1	1430818±28740	6.6±0.1	7.5±2.7	0.9899±0.0050	310726±222714

注: ^{230}Th 年龄为校正值, BP代指Before Present, Present为2000A.D.。

表3 吉隆沟温泉(钙华)与南北走向构造关系

点号	地质单元	岩性	产状及规模	构造特征及成因	含水情况	时代
D2201	T ₁₋₃ T	白云岩、灰岩	顺北向坡; 高60 m	有东西向新断层	无水	Qp ₃
D2202	P ₂₋₃ S	钙质砂岩	顺北向坡; 高70 m, 宽10 m; 钙华呈层状	顺节理发育, 节理73°∠74°	无水	Qp ₃
D2203	P ₂₋₃ S	钙质砂岩	顺东向坡; 高60 m, 宽60 m	顺节理发育, 节理99°∠75°	含水	Qh
D2204	P _{1j}	长石石英砂岩	2处; 顺东向坡; 锥形, 前缘宽30 m, 高约15 m; 见层状钙华条带	顺南北向断层发育	含少量水	Qh
D2205	P ₂₋₃ S	岩屑长石砂岩	顺西向坡; 扇形, 宽50 m, 高50 m; 钙华为砾石胶结物	顺南北向节理发育, 265°∠67°	无水	Qp ₃
D2206	P ₂₋₃ S	砂质灰岩, 钙质砂岩	见多处, 顺西向坡; 平面状, 高30 m, 宽40 m; 主体为砾石胶结物, 可见条带状钙华	南北向节理发育	无水	Qp ₃
D2207	P ₂₋₃ S	钙质砂岩	顺西向坡; 见方解石纹层, 也作为砾石胶结物	顺节理缝冒出, 见小型断层134°∠83°	无水	Qh
D2208	T ₁₋₃ T、T _{3q}	灰岩, 钙质砂岩	顺东向坡; 高100 m, 宽10 m; 坡沟多呈条带状, 见生长条纹	附近有东西走向逆断层	含水	Qh
D2209	P ₂₋₃ S	砂岩, 粉砂岩	顺西向坡; 扇形, 高60 m, 宽30 m; 砾石钙质胶结, 局部条带状	为东西走向断层标志	无水	Qp
D2210	D ₂₋₄ b	钙质粉砂岩、砂岩	顺西向坡; 高100 m, 宽30 m; 砾石钙质胶结	节理呈波状, 含方解石, 北侧100 m内见东西走向断层	少量水	Qh
D2211	不确定	岩性不明	位于小型南向台地, 杂草覆盖, 见泉眼, 有硫磺味	旁有古钙华锥	泉眼	Qh
D2212	不确定	岩性不明	顺南向坡; 呈长条状, 高>100 m, 宽约30 m; 钙华呈层状, 局部见角砾	最上一层方解石可能形成于全新世	无水	Qp ₃ /Qh
D2213	J ₃ m	灰岩	顺南向坡; 钙华极少	覆盖于坡积物及灰岩表面, 推测为岩石溶蚀所致	无水	Qh
D2214	S ₁ s	粉砂质绢云板岩	见两处钙化; 顺西向坡; 规模小, 1~3 m ³	与南北向小型正断层相关, 见断层泥	少量水	Qh
D2216	O ₁₋₂ j	钙质砂岩夹细砂岩	顺东向坡; 从沟底冒出, 形成小型钙化台地, 现在泉水较之前变小, 并经常变换泉眼出口; 温度>50℃	见南北向断层285°∠66°, 东西走向地层不破碎	有水	Qh
D2221	N ₂ w	砂岩、砾岩	东西向沟; 钙华台地长约200 m, 宽50 m	泉水从南北走向断层破碎带附近流出	泉眼	Qh
D2105	N ₂ w	砾岩	见多处泉眼; 无钙华	泉水从南北走向张节理缝流出	泉眼	Qh

5.2.2 三个潜在高地温带

吉隆沟高地温遗迹与南北向断层密切相关, 由于全新世构造活动性相对较弱, 多数泉眼关闭或者地热降低转变为冷泉。本文将仍有现代温泉出露的断层带定义为潜在高地温带。根据该划分方案, 吉隆沟南北向构造控制3条潜在高地温带, 分别为吉隆东山高地温带、夏村高地温带及高喜马拉雅带新识别的当阡—江村高地温带(图1b)。

吉隆东山高地温带对应于吉隆盆地的东部边界断层, 在调查之前仅有吉隆县城北一处温泉点, 本次调查在扎龙沟新发现一处温泉及钙华点, 表明吉隆东山断层沿线可能存在一个近南北向的高地温异常带。该带温泉温度较低, 但是伴有大规模的构造破碎带, 容易发生高温热害、突涌水、坍塌等综合灾害效应。

夏村高地温带位于夏村附近, 呈十字形带分布特征, 系列东西向正断层和南北向断层均有古钙华显示, 见强烈水热蚀变现象, 在吉隆藏布河沟仍可见现代温泉。地质调查发现该高温异常带东西向断层与南北向断层都较为发育, 但是现代温泉及强水热蚀变带几乎呈南北向, 初步认为南北向断层为导热构造。南北向隧道如果穿越约500 m的东西向断层带可能发生高温热害。

当阡—江村高地温带与新厘定的高喜马拉雅内部南北向断层带紧密伴生。该高地温带北段与藏南拆离系底部相交, 虽然未见温泉, 但是在南北向节理中见水热蚀变。该带南段温泉非常发育, 包括冲色、吉甫、江村三处温泉点, 钙华、硅华常见, 水温在28~80℃。温泉附近南北向断层及节理发育, 水热蚀变强烈, 冲色温泉甚至因2015年尼泊尔



图 7 吉隆沟南北走向断层与地热点关系图

a—扎龙沟南北向断层控制现代温泉; b—雍忠日钙华锥位于南北构造附近; c—夏村南北向断层处古钙华; d—夏村南北向断层处水热蚀变顺

Fig.7 Relationship between north-south trending faults and geothermal spots of Jilong Valley

a-The north-south trending fault in Zhalonggou controls modern hot springs; b-The Yongzhongri travertine cone is located near the north-south trending tectonic structure; c-The ancient travertine at the north-south trending fault at Xia Village; d-The hydrothermally altered zone along the north-south striking fault at Xia Village

大地震而堵塞,指示温泉受南北向断层控制。根据南北向断层分布情况,圈定当阡—江村高地温带东西向宽度约为 3 km,推测由于全新世地下水位下降造成地表温泉从北往南(从高往低)迁移,但是隧道施工仍不能排除高温热害风险。

5.3 南北向构造是吉隆沟地质灾害的主控因素

吉隆沟地质灾害与喜马拉雅其他地区一样遭受外部和内部地质营力的共同控制(刘春玲等, 2016),地壳活动、岩石组合、构造面、地貌、气候等基础地质背景对各种灾害的控制作用不同。但是,南北向构造及其活动性与崩塌、滑坡、泥石流等斜坡岩土体的地质灾害关系更为密切,结构面的产状和空间分布对岩体的稳定性起控制作用(冯羽等, 2011),断裂活动则对地质灾害起促进或诱发效应(张永双等, 2016)。

南北向断层面呈条带状分布,除了几条区域性

大型断层之外,其他断层规模较小,存在随机分布性质。特提斯喜马拉雅带南北向吉隆盆地东界断层形成多条线性水系地貌,如果断层连接冰川,容易诱发冰川泥石流。高喜马拉雅带南北向断层带常发育崩塌及滑坡地质灾害,以南北向美日当阡沟为例,在其两侧发育断层三角面及陡崖(图 8a),沟内滑坡极为发育,可见马刀树等典型的滑坡标志(图 8b),表明该断层在全新世仍处于活动期。

特提斯喜马拉雅带南北向剪节理呈透入性产出,并切穿山体,控制了吉隆沟沿线的小型崩塌,但是由于节理较密集,所形成的崩塌规模较小。在高喜马拉雅带南北向节理尽管较为稀疏,但是节理规模较大、延伸远且平直,控制了山体的地貌特征,因此崩塌和滑坡灾害多且规模较大(刘春玲等, 2010)。在热玛村附近可见一处较为新鲜的崩塌后形成的白色未风化岩壁(图 8c),最为著名的 2015 年冲色



图 8 吉隆沟南北走向节理控制地质灾害特征

a—美日当阡沟南北走向断层三角面; b—美日当阡沟滑坡体上马刀树; c—热玛村崩塌; d—冲色特大滑坡。

Fig.8 Field outcrop of geological hazards controlled by north-south trending structures of Jilong Valley

a-The fault triangular facets along the north-south trending fault in Meiri Dangqian Gully; b-The saber-shaped trees on the landslide body in Meiri Dangqian Gully; c-The rockfall at Rema Village; d-The Chongse mega-landslide

特大滑坡就受南北向节理控制(图 8d), 并造成 216 国道中断(祝建等, 2017)。

另外, 南北向构造普遍具有现代活动性, 可促进或诱发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害。断层活动往往伴生强烈地震, 不稳定的山体受地震影响直接形成滑坡或者崩塌, 特别是滑坡启动后通常会在运移过程中对沿途山体发生铲刮和撞击作用并转化为碎屑流。即使断层以蠕滑形式活动也会通过应力场对斜坡的稳定性造成影响(张永双等, 2016), 从而控制滑坡及泥石流的形成。

6 结 论

(1) 音频大地电磁显示吉隆盆地受控于其东界与内部 4 条南北向正断层, 盆地东界断层附近震积岩及盆地内部大量小微同沉积断层指示盆地间歇性活动特征。

(2) 节理统计显示吉隆沟南北向节理呈区域透入

性发育, 受控于喜马拉雅地区南北向裂谷应力背景。

(3) 吉隆沟南北走向断层控制地热分布, 结合温泉与断层的关系识别出 3 条潜在高地温带。

(4) 吉隆沟南北向构造具有现代活动性, 还是地热及地质灾害的主控因素之一, 是工程地质安全风险评价的重要方向。

致谢: 感谢审稿专家提出建设性意见, 成文过程中得到成都地质调查中心朱同兴研究员、耿全如研究员的帮助, 在此一并感谢。

注释

① 河北省地质调查院. 2006. 中华人民共和国 1:25 万萨嘎县幅、桑桑区幅、吉隆县幅(国内部分)区域地质调查报告 [R].

References

Cottle J M, Searle M P, Jessup M J, Crowley J L, Law R D. 2015. Rongbuk re-visited: Geochronology of leucogranites in the footwall of the South Tibetan detachment system, Everest Region, Southern Tibet[J]. *Lithos*, 227: 94-106.

- Du Yuansheng, Yu Wenchao. 2017. Earthquake-caused and non-earthquake-caused soft-sediment deformations[J]. *Journal of Palaeogeography*, 19(1): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yu, Ma Fengshan, Gong Chengcheng, Guo Jie, Wang Shanfei, Liu Ziceng. 2011. Data analysis method for optimized and dominant orientations of joints in rock mass[J]. *Journal of Engineering Geology*, 19(6): 887–892 (in Chinese with English abstract).
- Gao Lie, Zeng Lingsen, Hou Kejun, Guo Chunli, Tang Suohan, Xie Kejia, Hu Guyue. 2013. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan Gneiss Dome, Southern Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(27): 2810–2822 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yanchao, Gong Linfeng, Cao Jiawen, Tie Yongbo, Lu Jiayan. 2024. The distribution and risk assessment of geo-hazards in the border areas of Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(3): 467–477.
- Guo Jing, Li Wenchang, Li Guangming, Jiao Yanjie, Liang Shengxian. 2019. Application of multi-scale integrated geophysical method in prospecting prediction of Zhaxikang Pb–Zn–Sb–Au polymetallic deposit[J]. *Earth Science*, 44(6): 2129–2142 (in Chinese with English abstract).
- Lei Qiyun, Chai Chizhang, Meng Guangkui, Du Peng. 2015. Study on active fault engineering avoidance based on tectonic activity history[J]. *Journal of Engineering Geology*, 23(1): 161–169 (in Chinese with English abstract).
- Leloup P H, Maheo G, Arnaud N, Kali E, Boutonnet, E., Liu, D Y, Liu X H, Li H B. 2010. The South Tibet Detachment shear zone in the Dinggye area: Time constraints on extrusion models of the Himalayas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 292: 1–16.
- Liu Chunling, Qi Shengwen, Tong Liqiang, An Guoying, Li Xiaohui. 2010. Great landslides in Himalaya Mountain area and their occurrence with lithology[J]. *Journal of Engineering Geology*, 18(5): 669–676 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunling, Qi Shengwen, Tong Liqiang, Zhang Shishu, Zou Yu. 2016. Development characteristics of debris flows in Himalayas using remote sensing technology[J]. *Journal of Engineering Geology*, 24(3): 435–451 (in Chinese with English abstract).
- Liu Han, Li Fenqi, Zhou Fang, Li Jun, Gou Zhengbin, Yang Yang, Wang Baodi. 2018. Late Paleozoic earthquake events in the Nixiong area and its geological significance, western Lhasa block[J]. *Earth Science*, 43(8): 2767–2779 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaobing, Liu Xiaohan, Leloup P H, Maheo G, Paquetie J L, Zhang Xingang, Zhou Xuejun. 2012. Ductile deformation within upper Himalaya crystalline sequence and geological implications, in Nyalam area, Southern Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(17): 1562–1574 (in Chinese with English abstract).
- Marco S, Agnon A. 1995. Prehistoric earthquake deformations near Masada, Dead Sea graben[J]. *Geology*, 23(8): 695–698.
- Niu Xinsheng, Liu Xifang, Lü Yuanyuan, Wu Qian. 2023. Origin mechanism of thermal springs and their supply of minerals to the salt lake(Li–Rb–Cs) in the Tangqung Co watershed of Tibet. *Geology in China*, 50(4): 1163–1175 (in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, Yuan S H, Ji W H, Yin F G, Zhang W P, Wang B D. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14.
- Pan Guitang, Wang Liquan, Li Xxingzhen, Wang Jiemin, Xu Qiang. 2001. The tectonic framework and spatial allocation of the archipelagic arc–basin systems on the Qinghai–Xizang Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3): 1–26 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jianbing, Ma Ruiyong, Shao Tiejue. 2004. Basic relation between structural geology and engineering geology[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 535–549 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Jiang Mei, Li Haibing, Guo Xianpu, Su Dechen, Xu Lehong. 2016. Soft-sediment deformation structures and their implication for tectonic evolution from Mesozoic to Cenozoic in the Longmen Shan[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 80–106 (in Chinese with English abstract).
- Shen T Y, Wang G C, Leloup P H, Van der Beek P, Bernet M, Cao K, Wang A, Liu C, Zhang K X. 2016. Controls on Cenozoic exhumation of the Tethyan Himalaya from fission-track thermochronology and detrital zircon U–Pb geochronology in the Gyirong basin area, southern Tibet [J]. *Tectonics*. 35(7): 1713–1734.
- Wang Chaode. 2008. Tectonic and Environmental Evolution of the Gyirong Basin, and its Relationship to the Uplift of Tibetan Plateau [D]. Beijing: Peking University, 1–69 (in Chinese with English abstract).
- Wang Peng, Chen Xiaohong, Shen Licheng, Xiao Qiong, Wu Xiaoping. 2016. Reservoir temperature of geothermal anomaly area and its environmental effect in Tibet[J]. *Geology in China*, 43(4): 1429–1438 (in Chinese with English abstract).
- Wu Z H, Ye P S, Barosh P J, Wu Z H. 2011. The October 6, 2008 Mw 6.3 magnitude Damxung earthquake, Yadong–Gulu rift, Tibet, and implications for present-day crustal deformation within Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 943–957.
- Wu Zhenhan, Zhao Liguang, Ye Peisheng, Hu Daogong, Zhou Chunjing. 2011. Oligocene thrust systems in central Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 38(3): 522–536 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Ha Guanghao, Zhao Genmo, He Lin. 2018. Tectonic analysis on abnormal dried up of Duoqing Co Lake of southern section of Yadong–Gulu rift in South Tibet during April, 2016[J]. *Earth Science*, 43(S2): 243–255 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yadong, Zhang Kexin, Wang Guocan, Xiang Shuyuan, Jiang Shangsong, Chen Fenning. 2010. Geological significance of Miocene–Early Pleistocene palynological zones in the Gyirong Basin, Southern Tibet [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 35(5): 759–773 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiongying, Zhang Jinjiang, Qi Guowei, Wang Chaode, Guo Lei, Li Pengyuan, Liu Jiang. 2009. Structure and deformation around the Gyirong basin, northern Himalaya, and onset of the South Tibetan detachment system[J]. *Science China: Earth Science*, 52(8): 1046–1058 (in Chinese with English abstract).
- Yao Zhiyong, Meng Xianglian, Li Xiang, Miao Xiaoli, Zhao Wen. 2019. Research on engineering geological environment characteristics and engineering geological problems of China–Nepal cross-border railway[J]. *Railway Standard Design*, 63(7): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogeny as

- constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation[J]. *Earth-Science Review*, 76(1-2): 1-131.
- Zhang J J, Santosh M, Wang X X, Guo L, Yang X Y, Zhang B. 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision[J]. *Gondwana Research*, 21(4): 939-960.
- Zhang Jinjiang. 2007. A review on the extensional structures in the northern Himalaya and southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 639-649 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, Yang Zhihua, Wu Ruian, Du Guangliang. 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 Yongshuang, Wu Ruian, Guo Changbao, Li Xiangquan, Li Xue, Ren Sanshao, Li Jinqiu. 2022. Geological safety evaluation of railway engineering construction in plateau mountainous region: Ideas and methods[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1736-1751 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenli, Sun Xiao, Li Guangdong, Zhang Jidong, Liu Hongzhang, Zhuan Shaopeng, Wei Wentong. 2006. New explanation of detachment structures in the Burang and Gyironggou regions, southern Xizang [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(2): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Yan, Liu Qiao, Liao Haijun, Liu Shiyin. 2020. Glaciers and glacial lakes status and their related geo-hazards along three main China-Nepal corridors[J]. *Mountain Reserch*, 38(2): 314-327 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Bengang, Ran Hongliu. 2002. Discussion on the time criterion for identifying engineering active faults[J]. *Journal of Engineering Geology*, 10(3): 274-278 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jian, Wu Zhenlin, Lei Shuhui. 2017. Formation process and mechanism analysis of the super large-scale landslide at K81km of the national highway G216 in Tibet Jilong port[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 45(7): 20-24 (in Chinese with English abstract).
- 杜远生, 余文超. 2017. 地震和非地震引发的软沉积物变形[J]. *古地理学报*, 19(1): 65-72.
- 冯羽, 马凤山, 巩城城, 郭捷, 王善飞, 刘自成. 2011. 节理岩体结构面优势产状确定方法研究[J]. *工程地质学报*, 19(6): 887-892.
- 高利娥, 曾令森, 侯可军, 郭春丽, 唐索寒, 谢克家, 胡古月, 王莉. 2013. 藏南马拉山穹窿佩枯复合淡色花岗岩体的多期深熔作用[J]. *科学通报*, 58(27): 2810-2822.
- 高延超, 龚凌枫, 曹佳文, 铁永波, 卢佳燕. 2024. 西藏边境地区地质灾害分布规律与危险性分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 44(3): 467-477.
- 郭镜, 李文昌, 李光明, 焦彦杰, 梁生贤. 2019. 多尺度综合地球物理方法在扎西康铅锌锡金多金属矿找矿预测中的应用[J]. *地球科学*, 44(6): 2129-2142.
- 雷启云, 柴焜章, 孟广魁, 杜鹏. 2015. 基于构造活动历史的活断层工程避让研究[J]. *工程地质学报*, 23(1): 161-169.
- 刘春玲, 祁生文, 童立强, 安国英, 李小慧. 2010. 喜马拉雅山地区重大滑坡灾害及其与地层岩性的关系研究[J]. *工程地质学报*, 18(5): 669-676.
- 刘春玲, 祁生文, 童立强, 张世殊, 邹宇. 2016. 喜马拉雅山地区泥石流发育特征研究[J]. *工程地质学报*, 24(3): 435-451.
- 刘函, 李奋其, 周放, 李俊, 苟正彬, 杨洋, 王保弟. 2018. 拉萨地块西段尼雄地区晚古生代地震事件及其地质意义[J]. *地球科学*, 43(8): 2767-2779.
- 刘小兵, 刘小汉, Leloup P H, Maheo G, Paquette J L, 张鑫刚, 周学君. 2012. 藏南聂拉木高喜马拉雅结晶岩系上部韧性变形年代学及地质意义[J]. *科学通报*, 57(17): 1562-1574.
- 牛新生, 刘喜方, 吕苑苑, 伍倩. 2023. 西藏当雄错流域热泉成因机制及其对盐湖成矿物质 (Li-Rb-Cs) 的供给[J]. *中国地质*, 50(4): 1163-1175.
- 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 王洁民, 徐强. 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J]. *沉积与特提斯地质*, 21(3): 1-26.
- 彭建兵, 马润勇, 邵铁全. 2004. 构造地质与工程地质的基本关系[J]. *地质前缘*, 11(4): 535-549.
- 乔秀夫, 姜枚, 李海兵, 郭宪璞, 苏德辰, 许乐红. 2016. 龙门山中-新生界软沉积物变形及构造演化[J]. *地质前缘*, 23(6): 80-106.
- 王朝德. 2008. 吉隆盆地构造、环境演化与青藏高原隆升[D]. 北京: 北京大学, 1-69.
- 王鹏, 陈晓宏, 沈立成, 肖琼, 吴孝情. 2016. 西藏地热异常区热储温度及其地质环境效应[J]. *中国地质*, 43(4): 1429-1438.
- 吴珍汉, 赵立国, 叶培盛, 胡道功, 周春景. 2011. 青藏高原中段渐新世逆冲推覆构造[J]. *中国地质*, 38(3): 522-536.
- 吴中海, 哈广浩, 赵根模, 何林. 2018. 西藏亚东-谷露裂谷南段多灾错 2016 年 4 月异常干涸的构造成因[J]. *地球科学*, 43(S2): 243-255.
- 徐亚东, 张克信, 王国灿, 向树元, 江尚松, 陈奋宁. 2010. 西藏南部吉隆盆地中新世-早更新世孢粉组合带及其地质意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 35(5): 759-773.
- 杨雄英, 张进江, 戚国伟, 王德朝, 郭磊, 李鹏远, 刘江. 2009. 吉隆盆地周缘构造变形特征及藏南拆离系启动年龄[J]. *中国科学: 地球科学*, 52(8): 1046-1058.
- 姚志勇, 孟祥连, 李响, 苗晓岐, 赵文. 2019. 中尼跨境铁路工程地质环境特征及主要工程地质问题研究[J]. *铁道标准设计*, 63(7): 28-34.
- 张进江. 2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述[J]. *地质通报*, 26(6): 639-649.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 杨志华, 吴瑞安, 杜国梁. 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, 吴瑞安, 郭长宝, 李向全, 李雪, 任三绍, 李金秋. 2022. 高原山区铁路工程建设地质安全评价: 思路与方法[J]. *地质学报*, 96(5): 1736-1751.
- 张振利, 孙肖, 李广栋, 张计东, 刘洪章, 专少鹏, 魏文通. 2006. 西藏普兰、吉隆沟一带藏南拆离构造新认识[J]. *沉积与特提斯地质*, 26(2): 1-6.
- 钟妍, 刘巧, 廖海军, 刘时银. 2020. 中喜马拉雅山中—尼通道沿线冰川/冰湖变化及其相关灾害初步调查[J]. *山地学报*, 38(2): 314-327.
- 周本刚, 冉洪流. 2002. 工程活动断裂鉴定的时限标准讨论[J]. *工程地质学报*, 10(3): 274-278.
- 祝建, 吴臻林, 雷曙辉. 2017. 西藏吉隆口岸 G216 国道 K81 特大型滑坡形成过程和机理分析[J]. *工程勘察*, 45(7): 20-24.

附中文参考文献