

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.06.01

引用格式: 郭长宝,王保弟,刘建康,等.川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果[J].中国地质调查,2020,7(6):1-12.

# 川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果

郭长宝<sup>1,2</sup>, 王保弟<sup>3</sup>, 刘建康<sup>4</sup>, 涂杰楠<sup>5</sup>, 张永双<sup>6</sup>, 马剑飞<sup>6</sup>,  
铁永波<sup>3</sup>, 韩冰<sup>7</sup>, 马鑫<sup>8</sup>, 刘峰<sup>5</sup>, 李雪<sup>1,2</sup>,  
孟文<sup>1,2</sup>, 钟宁<sup>1,2</sup>, 杨志华<sup>1,2</sup>, 吴瑞安<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 4. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 成都 611734; 5. 中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 6. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050000; 7. 中国地质环境监测院, 北京 100037; 8. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051)

**摘要:** 川藏铁路是我国正在规划建设重点工程, 由于其位于地形地貌和地质构造都极为复杂的青藏高原东部, 在铁路规划建设面临一系列迫切需要解决的关键地质问题: 区域性活动断裂与断错影响、地质灾害、高地应力及其引起的岩爆和大变形、高温热害、断裂带高压水与涌水突泥、高陡边坡稳定性等。为满足技术支撑川藏铁路规划建设、精准服务国家重大战略实施的需要, 中国地质调查局部署了“川藏铁路交通廊道地质调查工程”, 聚焦制约川藏铁路规划建设的关键问题, 充分发挥地质调查工作对国家重大工程规划建设的支撑作用。2019年主要完成铁路沿线1:5万区域地质调查1350 km<sup>2</sup>、1:5万地质灾害调查5000 km<sup>2</sup>, 建设6口大地热流地质参数井、8个地温监测站, 完成地应力测量20孔, 编制完成11份地质调查专报, 提出的大渡河大桥段、理塘车站段、毛垭坝盆地段等线路优化建议/防灾建议被采纳; 首次将1:5000大比例尺航空物探技术引入复杂山地铁路工程勘察, 创新形成千米级超长水平钻孔定向取心钻进技术, 实现500 m深的水平孔地应力测量突破等。该工程通过2019年调查研究, 全力提升了铁路沿线地质调查程度与精度, 并创新了复杂艰险山区重大工程地质问题与探测技术、地质灾害风险防控理论与减灾关键技术, 有效支撑服务了川藏铁路规划建设。

**关键词:** 川藏铁路; 区域地质; 活动断裂; 地质灾害; 高温热害与涌水突泥; 地应力

**中图分类号:** P642      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-8706(2020)06-0001-12

## 0 引言

川藏铁路位于我国乃至全球地形陡度最大、内外动力地质作用最强烈、地质灾害极端频发的青藏高原, 铁路东起四川成都, 向西经雅安、康定、昌都、波密、林芝至拉萨, 全长约1543 km, 川藏铁路采用分段规划建设的方式, 其中成都—雅安段已于2018年12月建成通车, 拉萨—林芝段于2014年开工,

计划于2021年建成, 新建川藏铁路雅安—林芝段正线长1011 km<sup>[1]</sup>, 新建车站24个(不含雅安站、林芝站), 桥隧总长965.74 km, 桥隧比95.8%<sup>[2]</sup>, 并于2020年11月8日先期开工建设康定2号隧道、色季拉山隧道和大渡河大桥<sup>[3]</sup>。

川藏铁路是我国正在规划建设重点工程, 习近平总书记在中央财经委员会第三次会议上指出“规划建设川藏铁路, 对国家长治久安和西藏经济社会发展具有重大而深远的意义”, 要求“科学规

收稿日期: 2020-11-08; 修订日期: 2020-12-22。

基金项目: 中国地质调查局“川藏铁路交通廊道地质调查工程(编号: 505)”项目资助。

第一作者简介: 郭长宝(1980—), 男, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师, 中国地质调查局工程首席专家, 自然资源部杰出青年地质人才、中国地质调查局杰出地质人才, 主要从事工程地质与地质灾害方面的研究。Email: guochangbao@163.com。

划、技术支撑、保护生态、安全可靠”“一定把这件大事办成办好”。为更好地支撑服务川藏铁路规划建设,自然资源部中国地质调查局自2018年10月起,组织地质力学所、成都地质调查中心、探矿工艺研究所、航空物探遥感中心、水文地质环境地质调查中心、水文地质环境地质研究所、中国地质环境监测院等局属相关单位,开展川藏铁路沿线地质调查研究和集中攻关研究,先后完成铁路沿线地质灾害情况分析报告、推荐线路地质咨询报告等。2019年度聚焦川藏铁路泸定—雅江、巴塘—贡觉、波密—鲁朗3个重点地段,完成1:5万区域地质调查5幅、1:5万地质灾害调查5000 km<sup>2</sup>,新建36处GPS高精度测站、6口大地热流地质参数井、8个地温监测站、4个滑坡监测站,编制完成川藏铁路雅安—林芝段1:25万地质图、活动断裂分布图和水文地质图等区域性图件,向铁路规划设计部门提交11份地质调查专报,针对大桥、隧道和路基段发现的地质安全隐患提出线路优化和防灾减灾建议被采

纳应用。此外,在大比例尺航空物探技术、千米级超长水平钻孔定向取心钻进技术、水平孔地应力测量技术方法方面取得创新性进展,精准支撑服务了川藏铁路规划建设。中国地质调查局于2020年3月设立了“川藏铁路交通廊道地质调查工程”,围绕制约川藏铁路规划建设的基础地质、活动断裂、地质灾害、地应力、水文地质、地热地质等关键地质问题开展调查研究。

## 1 研究区地质背景

### 1.1 地形地貌

川藏铁路从位于第二阶梯的四川盆地台阶式上升至第一阶梯的青藏高原(图1),地貌形态以高原盆地和深切峡谷为主,铁路横跨大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等16条大江大河,穿越横断山脉、念青唐古拉山脉等21座雪山高峰,被形象地称为“世界上技术难度最大的巨型过山车”。

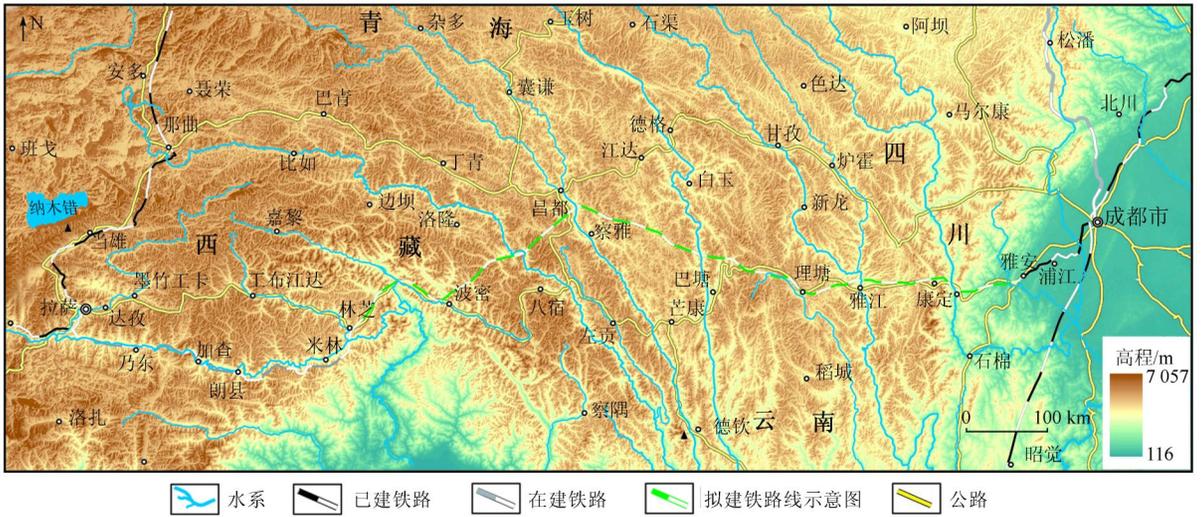


图1 川藏铁路沿线地形地貌(铁路线引自文献[4],为示意图,非实际线路,下同)

Fig. 1 Topographic diagram along Sichuan - Tibet Railway<sup>[4]</sup>

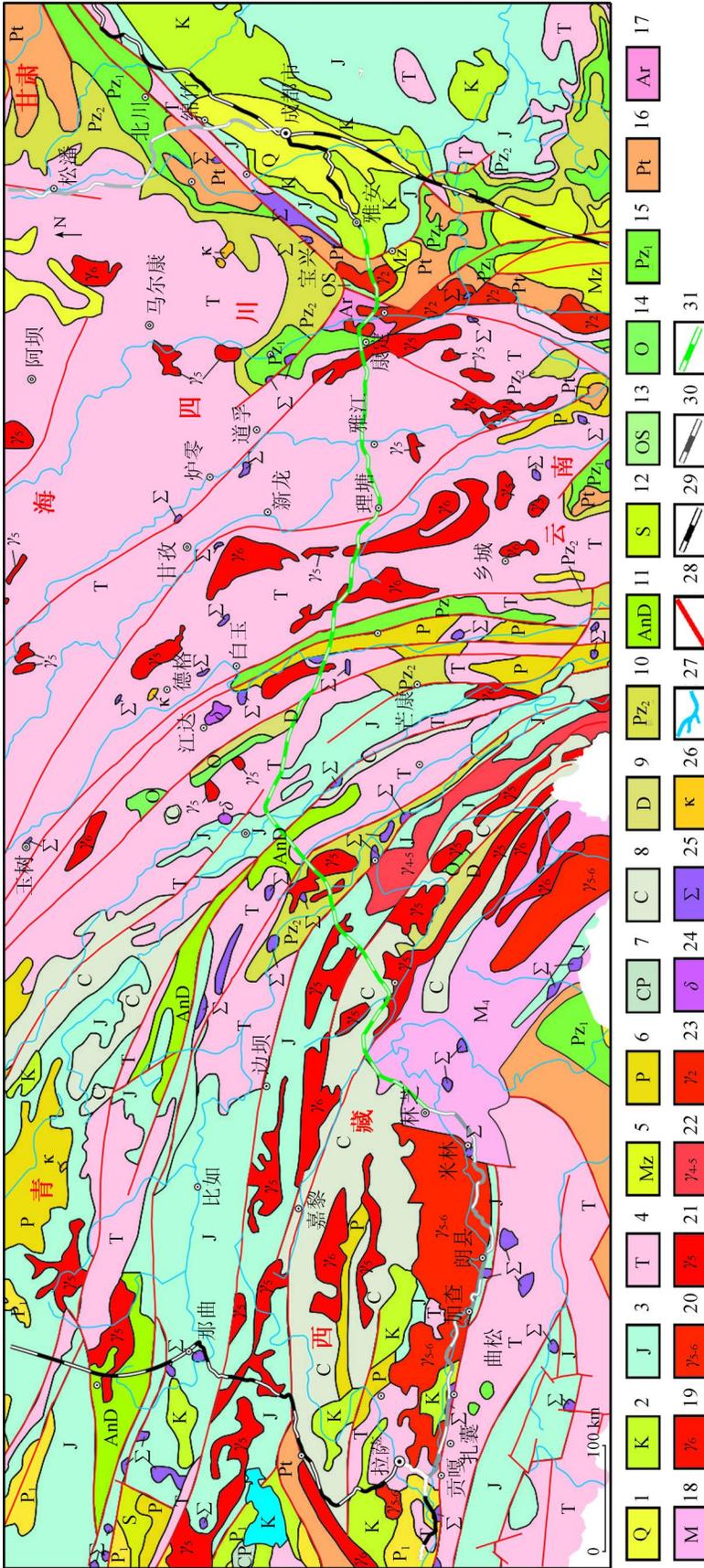
### 1.2 区域地质构造

川藏铁路从东而西穿越扬子地块、川滇块体、甘青块体、西藏块体和喜马拉雅块体<sup>[4]</sup>。

第四纪以来,印度板块向欧亚板块俯冲与挤压,致使青藏高原以9.5 mm/a的速度快速隆升<sup>[5]</sup>,形成强烈的现代地壳活动和高地应力场<sup>[5-9]</sup>,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、嘉黎—察隅断裂带等。

### 1.3 地层岩性

川藏铁路沿线及邻区地层发育齐全,地质构造对地层分布有显著的控制作用,地层走向与区域控制性断裂走向基本一致(图2)。铁路沿线除寒武系外,从震旦系至第四系均有分布,并以沉积岩为主。工程地质岩组主要为坚硬—较坚硬的中厚层状砂岩夹砾岩、泥岩、板岩岩组,软硬相间的中厚层状砂岩、泥岩夹灰岩及互层岩组,较弱—较坚硬的薄—中厚层状千枚岩、片岩夹灰岩及砂岩岩组,坚硬块状花岗岩、安山岩、闪长岩岩组,以及断裂带软弱岩体等。



1. 第四系冲洪积、冰碛物等；2. 陆相碎屑岩及火山岩；3. 海相碎屑岩及火山岩；4. 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. 并层；8. 冈瓦纳相(砂页岩、大理岩、灰岩)；9. 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. 灰岩夹千枚岩、大理岩夹基性火山岩；13. 并层；14. 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. 在建铁路；30. 在建铁路；31. 拟建铁路方案示意图

图2 川藏铁路沿线地质层岩性纲要

Fig. 2 Outline of stratigraphic lithology along Sichuan - Tibet Railway

### 1.4 地质灾害

川藏铁路沿线山高谷深,地形切割破碎强烈,多为陡峻的V型谷,近直立的岸坡或陡崖常见,成为崩塌、滑坡和泥石流等外动力地质灾害的高易发区<sup>[10-11]</sup>。在内外动力耦合作用下形成的崩塌、滑坡和泥石流等浅表层地质灾害具有发育范围广、规模大、危害大、复发频繁和形成机理复杂等特点,并发育四川理塘乱石包高位远程滑坡<sup>[12-14]</sup>、西藏江达白格滑坡—堵江—溃坝灾害链<sup>[15-19]</sup>、西藏易贡高位远程滑坡<sup>[20-23]</sup>、加查拉岗村高位远程滑坡<sup>[24]</sup>等巨型灾害,制约着川藏铁路选线规划。

## 2 工程总体目标与主要任务

围绕川藏铁路规划建设的地质需求,开展川藏铁路全线1:5万专题区域地质调查,开展活动断裂、地质灾害与高边坡、地应力深埋隧道岩爆和大变形、水文地质与高压涌水突泥、高温热害等专项地质调查,全力提升铁路沿线地质调查程度与精度;开展铁路沿线地质基础理论与孕灾机理、复杂艰险山区重大工程地质问题与探测技术、地质灾害风险防控理论与减灾关键技术研究,提升地质灾害(链)风险早期识别和监测预警能力;建设地球科学野外观测研究基地,加强川藏铁路全生命周期地质信息监测研究(图3),

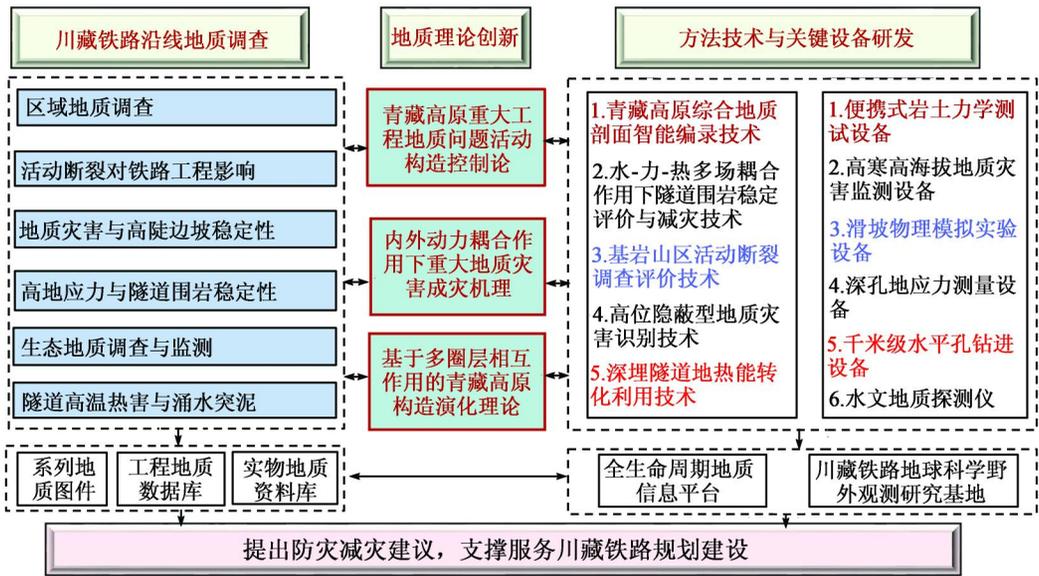


图3 川藏铁路交通廊道地质调查工程调查研究主要内容

Fig. 3 Main content of Sichuan - Tibet Railway Traffic Corridor Geological Survey Project

培养特色鲜明、优势突出的科技创新团队;协同推进“中国地质调查局支撑服务川藏铁路规划建设地质调查与科技攻坚(2019—2030年)”。

## 3 主要进展与成果

### 3.1 提升了川藏铁路沿线地质调查的程度与精度

#### 3.1.1 川藏铁路沿线基础地质调查研究进展

(1)编制完成川藏铁路雅安—林芝段1:25万地质图。2019年中国地质调查局成都地质调查中心充分利用已有的1:25万地质资料及综合集成研究成果<sup>[25-27]</sup>和近年来完成的地质调查成果,编制完成“川藏铁路交通廊带雅安—林芝段1:25万地质图”及说明书。该地质图以铁路线南北各50km作为编图范围,突出表达了岩石组合(岩性)、特殊

岩性层(煤、石膏、石灰岩等)、劈理、断裂及新构造,简化沉积相、生物地层、年代地层等地质内容,提出了川藏铁路规划、工程施工等过程中需要特别关注的炉霍—康定、甘孜—理塘、金沙江、北澜沧江、班公湖—怒江、嘉黎—察隅、雅鲁藏布江等7条规模巨大的构造(蛇绿)混杂岩带,构造混杂岩带内新构造活动强烈、岩石劈理密集、地震活动频繁、温泉地热广布、地质灾害频发,对工程区域稳定性和隧道施工影响较大,是关系到铁路工程高质量施工的关键区带<sup>[28]</sup>。

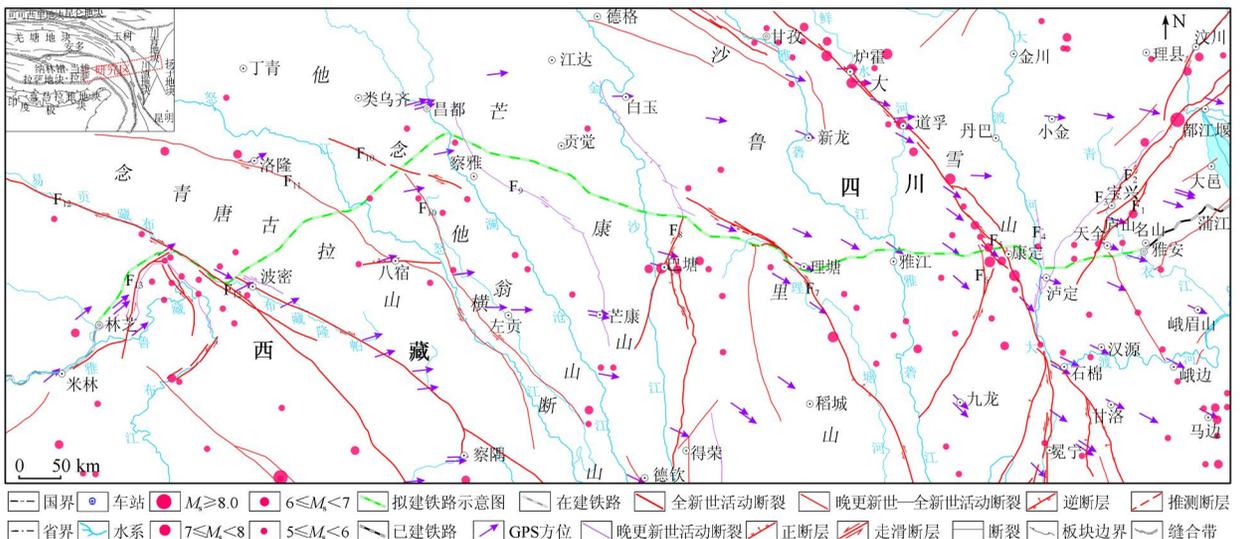
(2)开展关键段1:5万区域地质调查和1:1万填图。围绕昌都—察雅段铁路规划开展了5幅1:5万区域地质调查,查明了察雅县新卡乡—王卡乡、贡觉县则巴乡—白玉县盖玉乡沿线构造岩性等地质特征,编制

了廊带状 1:5 万专题地质图,在昌都—贡觉段贡觉隧道、昌都嘎多隧道等关键区开展 1:1 万地质填图,查明川藏铁路昌都—巴塘段不良地质体的空间展布特征,为支撑服务川藏铁路规划定测、施工提供了重要依据。发现海拔最高的昌都恐龙等动植物化石和金沙江带榴辉岩,为探索三叠纪古地理、古气候和古特提斯洋壳俯冲碰撞过程提供了新资料。

### 3.1.2 川藏铁路沿线重要活动断裂调查研究进展

(1) 编制完成川藏铁路雅安—林芝段 1:25 万活动断裂分布图。受印度板块与欧亚板块碰撞、地壳物质向东挤出位移影响,在青藏高原东南部自东向西形成了川西逆冲走滑构造带、西南三江走滑构造带及喜马拉雅东构造结弧形走滑逆冲构造带等 3

个活动构造区。系统梳理了川西—藏东交通廊道主要活动断裂发育分布特征,编制完成《川藏铁路雅安—林芝段活动断裂分布图》(图 4)。川藏铁路雅安—林芝段受 13 条区域性活动断裂带影响,并呈不同角度与铁路线相交或近距离展布;其中全新世活动断裂带 10 条(龙门山断裂带、鲜水河断裂带(F<sub>5</sub>)、玉农希断裂带(F<sub>6</sub>)、理塘—德巫断裂带(F<sub>7</sub>)、巴塘断裂带(F<sub>8</sub>)、澜沧江断裂带(巴青—类乌齐断裂)、怒江断裂带(F<sub>10</sub>) (羊达—亚许断裂、邦达断裂)、边坝—洛隆断裂带(F<sub>11</sub>)、嘉黎—察隅断裂带(F<sub>12</sub>)、鲁朗—易贡断裂带(F<sub>13</sub>)),晚更新世活动断裂带 3 条(大渡河断裂带(F<sub>4</sub>)、金沙江断裂带、香堆—洛尼断裂带(F<sub>9</sub>)),活动断裂及分支断裂多达 45 条。



F<sub>1</sub>. 双石—大川断裂; F<sub>2</sub>. 盐井—五龙断裂; F<sub>3</sub>. 耿达—陇东断裂; F<sub>4</sub>. 大渡河断裂带; F<sub>5</sub>. 鲜水河断裂带; F<sub>6</sub>. 玉农希断裂带; F<sub>7</sub>. 理塘—德巫断裂带; F<sub>8</sub>. 巴塘断裂带; F<sub>9</sub>. 香堆—洛尼断裂; F<sub>10</sub>. 怒江断裂带; F<sub>11</sub>. 边坝—洛隆断裂; F<sub>12</sub>. 嘉黎—察隅断裂; F<sub>13</sub>. 鲁朗—易贡断裂

图 4 川藏铁路雅安—林芝段活动断裂与地震分布

Fig. 4 Distribution of active faults and earthquakes in Ya'an - Nyingchi section of Sichuan - Tibet Railway

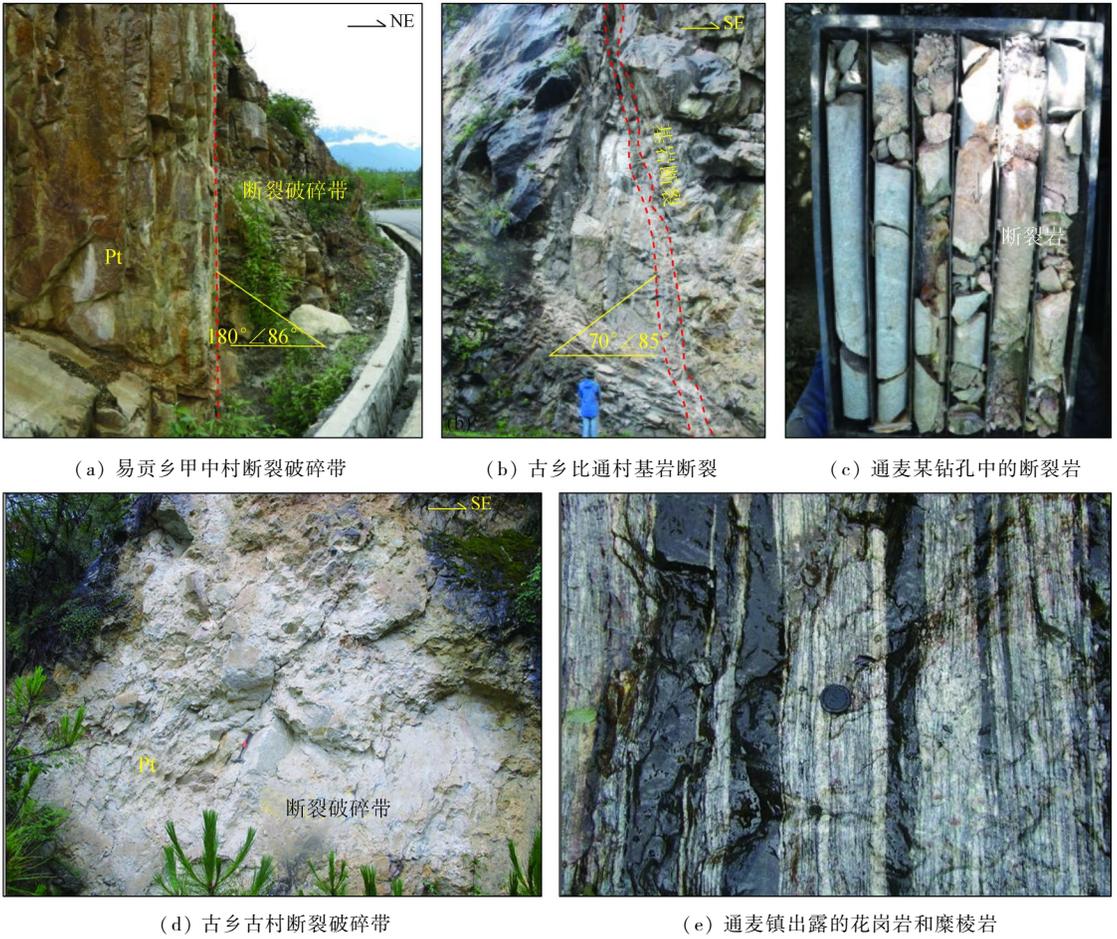
(2) 开展了关键活动断裂带空间结构特征与活动性调查。2019 年主要开展了大渡河断裂带(F<sub>4</sub>)、嘉黎—察隅断裂带(F<sub>12</sub>)和鲁朗—易贡断裂带(F<sub>13</sub>)等 3 条活动断裂的空间几何展布与活动性调查研究,分析了活动断裂对铁路工程的潜在影响。

大渡河断裂带(F<sub>4</sub>)总体呈 SN 走向,倾向西,倾角 50°~80°,断裂带宽为 500~1 000 m,具逆断特征,晚更新世以来有过活动,受断裂活动影响,桥隧区基岩通常表现为切层或顺层挤压破碎,容易引起工程边坡失稳、桥基不均匀沉降等问题。

理塘—德巫断裂带(F<sub>7</sub>)总体走向 310°~320°,倾向东北,倾角 60°~80°,第四纪以来以左旋走滑

为主,滑动速率为 3.2~4.4 mm/a,全新世活动强烈。铁路进入理塘盆地后,多以路基工程与理塘—德巫断裂主断面小角度斜交,断裂活动可对路基、桥基及车站场地等工程的稳定性造成一定影响。

嘉黎—察隅断裂带(F<sub>12</sub>)总体呈 NWW 走向,倾向东或东南,倾角 70°~86°,断裂带宽为 200~300 m,右旋走滑兼有逆冲分量,为全新世活动断裂(图 5),铁路在波密—通麦段与嘉黎—察隅断裂带近平行展布,局部线路斜交,未来可能遭遇的最大突发位错量为 5~6 m(右旋走滑)。受断裂活动影响,易贡隧道、通麦隧道等隧道可能出现断裂破碎带大变形、断裂带错断和涌水突泥等问题。



(a) 易贡乡甲中村断裂破碎带

(b) 古乡比通村基岩断裂

(c) 通麦某钻孔中的断裂岩

(d) 古乡古村断裂破碎带

(e) 通麦镇出露的花岗岩和糜棱岩

图5 沿嘉黎断裂带(波密至易贡段)发育的断层破碎带

Fig. 5 Fault fracture zone developed along Jiali fault zone (Bomi - Yigong section)

鲁朗—易贡断裂带(F<sub>13</sub>)总体呈NE走向,倾角70°~90°,为逆冲兼左旋走滑性质,垂直滑动速率为0.17~0.27 mm/a,全新世以来发生过强烈活动,断裂总体走向近SN。地貌上,断裂多表现为深切峡谷、坡中槽或沿断裂发育陡坎,受断裂活动影响,拉月、鲁朗等隧道可能出现断裂破碎带大变形、涌水突泥和高温热害等问题。

(3) 初步建成川藏铁路沿线GPS位移监测系统。2019年,成都地质调查中心沿川藏铁路新建36个GPS高精度测站,完成了48个新、老测站的观测,积累了183个时段的观测数据。对川藏铁路雅安—林芝段两侧,以及嘉黎—察隅断裂带(F<sub>12</sub>)等十几条断裂带的GPS测站进行了重点加密增设,初步建成了川藏铁路沿线GPS动态监测网,为进一步定量研究川藏铁路沿线区域现今地壳形变、活动断裂运动速率和应变参数奠定了基础。

### 3.1.3 川藏铁路重点区段地质灾害调查研究进展

川藏铁路沿线地质灾害具有分布广、类型多、

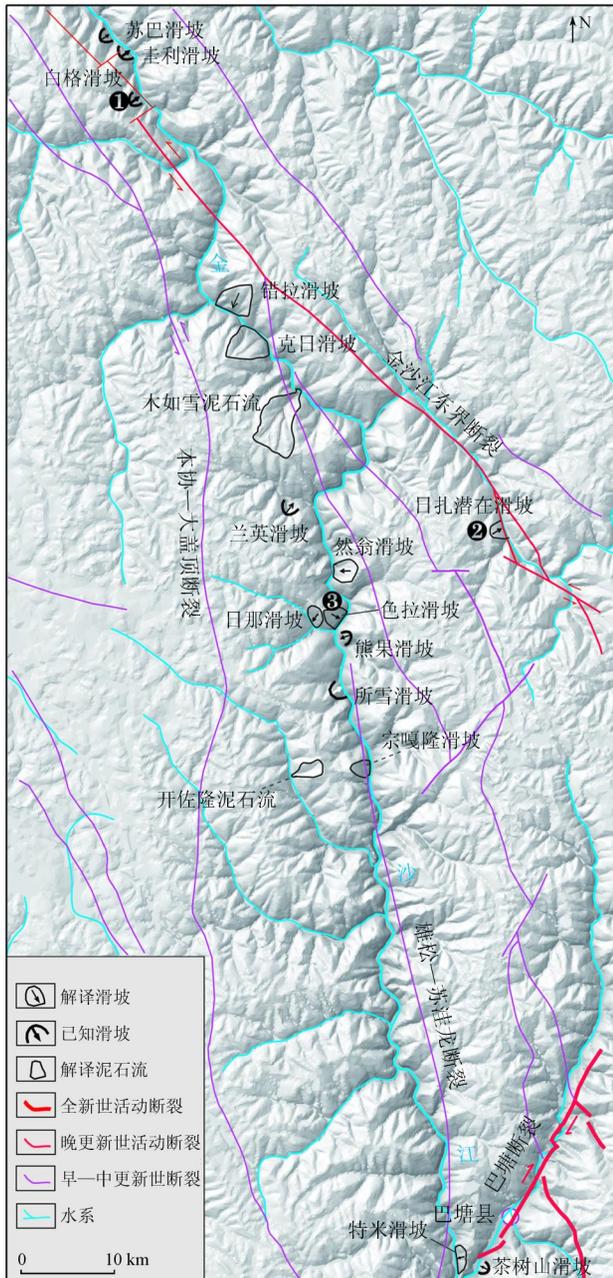
危害大、形成机理复杂等特点,尤其是高位远程滑坡、冰湖溃决型泥石流和地震滑坡灾害链等重大地质灾害对铁路建设和运营具有较大危害。

(1) 川藏铁路重点地段1:5万地质灾害调查。采用InSAR、无人机航测、钻探、物探与野外调查等手段,在川藏铁路天全—康定段、巴塘比选段、贡觉—察雅段和波密—通麦段等地质灾害高易发区开展了1:5万地质灾害调查,2019年在川藏铁路沿线长度250 km,两侧各10 km共5 000 km<sup>2</sup>范围内调查地质灾害隐患点1 423处;基于InSAR形变分析,在金沙江大桥上下游解译发现大型—巨型深层蠕滑型滑坡20余处(图6);查明直接威胁铁路工程地质灾害隐患点64余处,如洛隆某潜在高位崩塌、三道桥沟泥石流、折多塘古滑坡和多洛沟泥石流等。地质灾害具有沿深切割河谷、断裂带、公路密集发育的特征,在四川巴塘地区发育一系列百万方以上的大型—巨型古滑坡和深层蠕滑型滑坡,如列衣乡自热村大型深层蠕滑型滑坡厚15~35 m且体

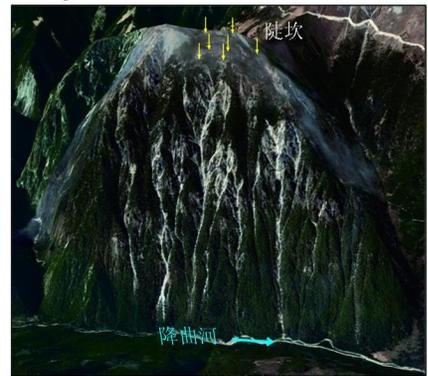
积达  $900 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 沿巴塘断裂带发育的朗多二村古地震滑坡(图 7)等, 这些滑坡的发育分布在一定程度上影响和制约了铁路的地质选线。

(2) 铁路沿线冰崩、冰川及冰湖遥感解译进展。中国自然资源航空物探遥感中心开展了川西藏东地区冰崩、冰湖溃决泥石流等典型冰崩类地质灾害遥感调查研究, 对 2018 年西藏林芝色东普沟上游冰崩岩崩 - 碎屑流 - 堰塞湖 - 溃决洪水灾害链进行研究, 结合 Landsat 等中高分辨率遥感影像, 对色东

普沟流域近 40 a 来冰川的分布和变化情况进行研究, 认为地形地貌、冰川后缘裂隙、地震和降雨等是该区 2014 年以来发生 8 次碎屑流堵塞雅鲁藏布江事件的主要影响因素。铁路雅安—林芝段两侧 50 km 范围内遥感解译出发育冰湖 2 360 个, 其中面积大于  $0.04 \text{ km}^2$  的有 600 个, 典型冰湖有加桑隆巴冰湖、郭奶隆巴冰湖、丹卡隆巴冰湖(图 8) 等。冰湖溃决灾害和堵溃链式灾害对铁路工程选址具有一定影响, 应高度关注冰川、冰湖活动变化情况。



① 白格滑坡 (2018年10月11日, 镜向290°)



② 日扎潜在滑坡 (镜向NW)



③ 色拉滑坡及前缘复活 (镜向340°)

图 6 川藏铁路巴塘段地质灾害分布

Fig. 6 Geological disaster distribution of the Batang section



图7 巴塘断裂带松多乡朗多二村古地震滑坡发育特征  
Fig.7 Seismic landslide characteristics of Batang fault zone in Langduo'er village, Songduo town

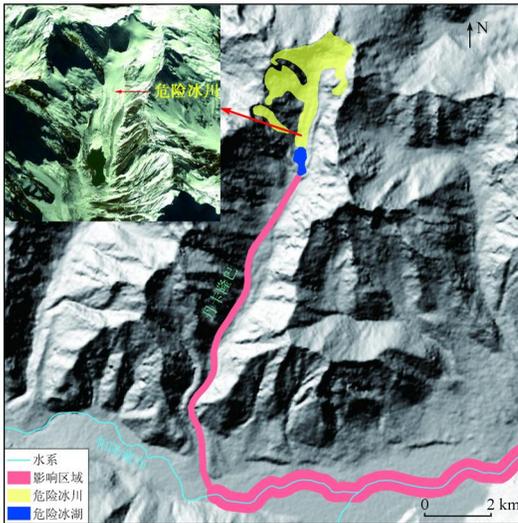


图8 波密丹卡隆巴冰湖发育特征  
Fig.8 Characteristics of Dankalongba ice lake in Bomi

(3)开展了典型滑坡和泥石流灾害监测预警示范站建设。建设了康定三道桥泥石流、江达白格滑坡、巴塘自热村滑坡和贡觉雄巴村滑坡等地质灾害监测站,建立了集 InSAR、雨量、泥位、地声和次声等为一体的空-天-地泥石流自动监测预警系统和集 InSAR、降雨量、孔内测斜和地表形变等为一体的深层蠕滑型滑坡自动监测系统,地质灾害监测预警示范站的建设为支撑服务铁路规划建设和安全运营提供了防灾减灾技术支撑。

3.1.4 川藏铁路沿线重要区段地应力调查研究进展

印度板块向欧亚板块持续挤压作用导致青藏高原强烈隆升,构造活动强烈,形成了空间非均匀性显著的复杂构造应力环境。川藏铁路自东向西穿越华南主体应力区、龙门山—松潘应力区、川滇应力区、墨脱—昌都应力区和喜马拉雅应力区等4个构造应力分区<sup>[8]</sup>。

结合中铁二院、中铁一院在铁路沿线部署的地质勘察钻孔,完成折多山隧道、郭达山隧道、高尔寺山隧道等20余处关键区段地应力测量,初步揭示了铁路沿线构造应力场分布特征,认为川藏铁路沿线构造应力作用强烈,高地应力现象显著。水平最大主应力方向大致以白玉—芒康为界,具有明显的分区特征,川藏铁路昌都至林芝段,最大水平主应力作用方向以 NE—NEE 向为主,局部区段具有差异性特征,康定至昌都段则表现为 NW 向,且部分区段如康定地区受活动构造、地震活动及深部结构等因素共同影响,局部应力场特征显著(图9)。

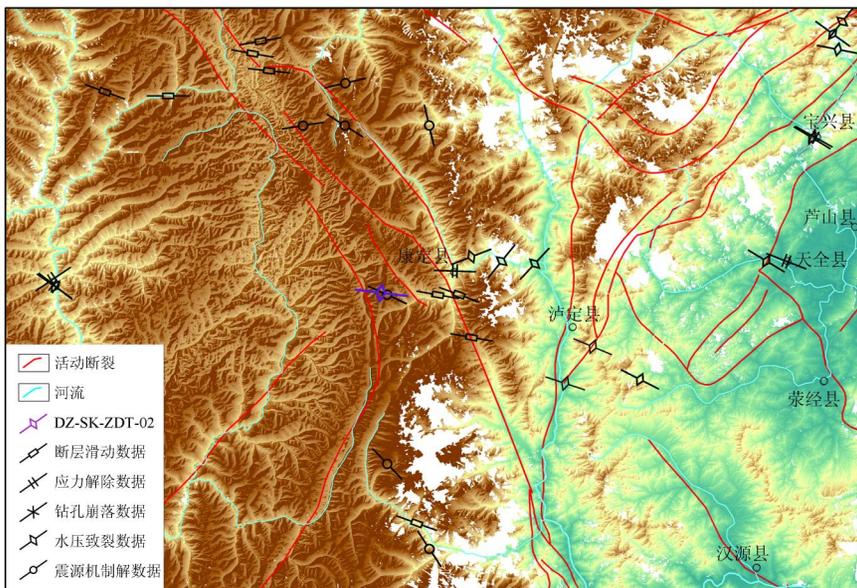


图9 川西地区地应力分布  
Fig.9 Distribution of geostress in Western Sichuan

从地应力的角度,隧道设计应主要考虑隧道轴向和隧洞断面几何形状。根据地应力实测结果,川藏铁路昌都—林芝段最大水平主应力方向大多与铁路轴向平行或小角度斜交,且该区段水平应力作用强烈,整体线路规划有利于铁路工程稳定性。隧洞断面几何形状为似椭圆状时,能够增强抗侧压能力,隧洞更易保持稳定。由于铁路穿越区地应力强度较高,且拟建隧道多为深埋长的大隧道,围岩岩爆可能性较大,实际施工需综合考虑隧道轴向、断面几何形状、工程地质条件、岩石力学条件、掘进方式、支护方式等因素。

### 3.1.5 川藏铁路沿线水文地质调查研究进展

开展了川藏铁路雅安—林芝段水文地质调查,初步查明了地下水类型及含水量富水程度,将川藏铁路沿线地下水类型划分为 7 大类,识别了金沙江东岸区段、贡觉—察雅区段和夏里—波密区段 3 个大的岩溶分布区。

完成了折多山隧道、格聂山隧道、察雅隧道和易贡隧道等重点区 1:5 万水文地质调查,完成主要地表径流和地下水排泄点的测流,以及格聂山岩溶水主径流带和排泄区等 66 处主要岩溶泉丰水、枯水 2 期统测,完成察雅、易贡 2 处构造发育区水文地质钻探和原位水文地质试验(图 10)。

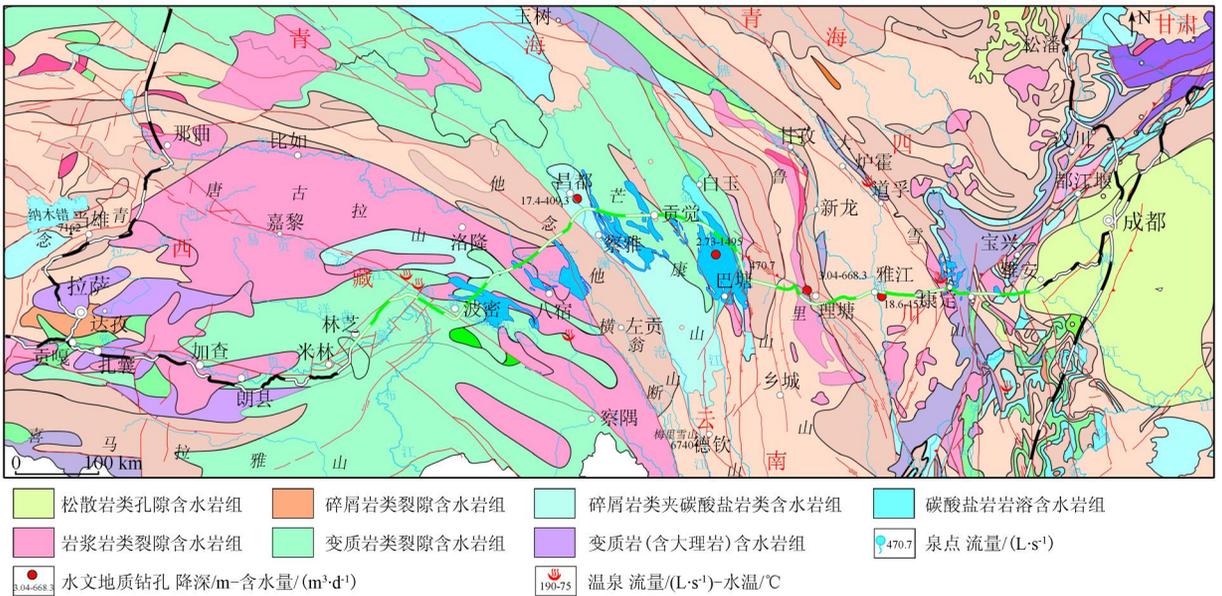


图 10 川藏铁路沿线区域水文地质简图

Fig. 10 Hydrogeological diagram of the area along Sichuan - Tibet Railway

### 3.1.6 川藏铁路地热地质调查研究进展

川藏铁路地处地中海—喜马拉雅地热带,铁路沿线及邻区已发现温泉 526 处,其中泉口温度大于 60 ℃ 的有 114 处,最高为 97 ℃ (巴塘杠日隆温泉),水热活动频繁<sup>[29]</sup>。深埋隧道施工过程中易发生高压热水(汽)、高温岩体、热水腐蚀与涌突热水等灾害。初步查明了地下热水、高温热岩分布特征和川西地区地温梯度,并初步圈定川藏铁路穿越康定(I)、理塘(II)、巴塘(III)、昌都—察雅(IV)、八

宿(V)、波密通麦(VI)等 6 个地热异常带(图 11)。铁路沿线的地热分布受构造控制作用强烈,如嘉黎—察隅地热带主要受嘉黎—察隅断裂带和雅鲁藏布江断裂带控制,在断裂交汇处形成地热异常区,通麦镇长青温泉温度高达 95 ℃,地热热源主要来自雅鲁藏布江缝合带,沿线 NW 向张扭性次级断裂对隧道高温具有控制作用;在区域地热地质调查研究基础上,建设了 6 口大地热流地质参数井、8 个地温监测站。

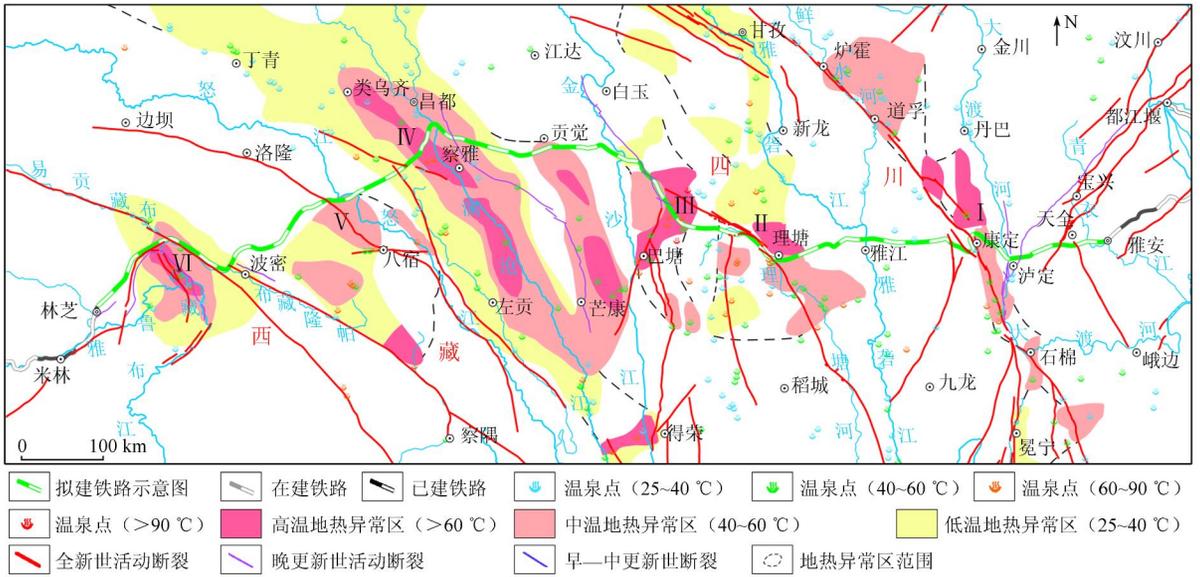


图 11 川藏铁路沿线地热带及地热异常区分布<sup>[29]</sup>

Fig. 11 Geothermal zone and geothermal anomaly distribution along Sichuan - Tibet Railway<sup>[29]</sup>

### 3.2 理论方法创新

(1) 创新形成千米级超长水平钻孔定向取心钻进技术, 可实现沿隧道掘进方向全程勘察取样; 采用一体式自动推拉阀、压裂器内部双通路设计等工艺, 创新形成基于水压致裂原理的水平孔地应力测量技术; 提出双向自动调节预应力锚索滑坡防治技术。

(2) 首次将 1:5 000 大比例尺航空物探技术引入高寒复杂山地铁路工程勘察, 应用人机交互式联合反演技术开展航空磁力综合解释, 形成三维解释成果。

(3) 形成基于“空 - 天 - 地”一体化的高位地质灾害和古滑坡识别技术, 成功识别折多塘古滑坡、格聂山潜在高位滑坡等巨型灾害点; 建立了高位冰崩启动条件下的冰川泥石流早期识别模型和基于面积、坡度、高差等要素的冰川储量估算模型。

(4) 实现了全国地质灾害数据库与四川、西藏地质灾害数据库的互联互通与动态更新, 发展了基于窄带物联网和微机电技术的地质灾害监测技术。

## 4 下一步工作部署

“川藏铁路交通廊道地质调查工程”将继续围绕川藏铁路规划建设的地质需求, 聚焦制约川藏铁路规划建设和安全运营面临的关键地质问题, 开展以下工作。

(1) 精准对接铁路定测与先期开工段地质需求, 进一步聚焦川藏铁路构造混杂岩、活动断裂、高位远程地质灾害、地应力、构造岩溶、高温热害等防灾减灾关键科学问题和技术难题, 开展专项地质调

查工作, 提升川藏铁路交通廊道地质调查程度与精度, 服务城镇规划建设与防灾减灾。

(2) 加快推进“支撑服务川藏铁路地质调查与科技攻坚(2019—2030)”, 开展川藏铁路紧迫亟需段 1:5 万专题基础地质调查、创新开展水 - 力 - 热多场耦合作用下工程地质调查研究, 建立典型高位滑坡早期识别模型与灾变机理, 建设川藏铁路大数据平台与重要岩心实物地质资料库, 联合攻关铁路水平钻探与定向取心、地应力测试等勘测技术。

**致谢:** 本工程组织实施过程中得到了中国地质调查局、中国国家铁路集团有限公司、川藏铁路有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司等单位的支持, 在此表示感谢; 中国地质调查局青藏高原及周缘区域地质调查工程、南方山地丘陵区地质灾害调查工程、全国地质灾害监测预警与信息化工程及相关项目承担单位和项目成员对本项工作做出了重要支撑, 在此一并表示感谢。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于新建川藏铁路雅安至林芝段可行性研究报告批复的主要内容[EB/OL]. (2020-09-29). [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202009/t20200930\\_1239951.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202009/t20200930_1239951.html).

[2] Lu C F, Cai C X. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan - Tibet railway project [J]. Engineering, 2019, 5(5): 833 - 838.

- [3] 中国国家铁路集团有限公司. 习近平对川藏铁路开工建设作出重要指示强调发扬“两路”精神和青藏铁路精神高质量推进工程建设[EB/OL]. (2020-11-08). [http://www.china-railway.com.cn/xwzx/ywsl/202011/t20201108\\_110244.html](http://www.china-railway.com.cn/xwzx/ywsl/202011/t20201108_110244.html).
- [4] 朱颖. 川藏铁路建设的挑战与对策[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [5] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in China[J]. *J Geophys Res*, 1977, 82(20):2905-2930.
- [6] 朱守彪,石耀霖. 青藏高原地形扩展力以及下地壳对上地壳的拖曳力的遗传有限单元法反演[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(2):225-234.
- [7] 徐纪人,赵志新. 青藏高原及其周围地区区域应力场与构造运动特征[J]. *中国地质*, 2006, 33(2):275-285.
- [8] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4):654-662.
- [9] Meng W, Guo C B, Zhang Y S, et al. In situ stress measurements in the Lhasa Terrane, Tibetan Plateau, China[J]. *Acta Geol Sin*, 2016, 90(6):2022-2035.
- [10] 宋章,张广泽,蒋良文,等. 川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析[J]. *铁道标准设计*, 2016, 60(1):14-19.
- [11] 郭长宝,张永双,蒋良文,等. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. *现代地质*, 2017, 31(5):877-889.
- [12] Guo C B, Zhang Y S, Montgomery D R, et al. How unusual is the long-runout of the earthquake-triggered giant Luanshibao landslide, Tibetan Plateau, China? [J]. *Geomorphology*, 2016, 259:145-154.
- [13] Dai Z L, Wang F W, Cheng Q G, et al. A giant historical landslide on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Bull Eng Geol Environ*, 2018, 78(3):2055-2068.
- [14] Zeng Q L, Yuan G X, Davies T, et al.  $^{10}\text{Be}$  dating and seismic origin of Luanshibao rock avalanche in SE Tibetan Plateau and implications on Litang active fault[J]. *Landslides*, 2020, 17(5):1091-1104.
- [15] 许强,郑光,李为乐,等. 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[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6):1534-1551.
- [16] 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.
- [17] Zhang S L, Yin Y P, Hu X W, et al. Initiation mechanism of the Baige landslide on the upper reaches of the Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(12):2865-2877.
- [18] Hu Y X, Yu Z Y, Zhou J W. Numerical simulation of landslide-generated waves during the 11 October 2018 Baige landslide at the Jinsha River[J]. *Landslides*, 2020, 17(10):2317-2328.
- [19] Fan X M, Yang F, Subramanian S S, et al. Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach: the Baige landslide, Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(1):147-164.
- [20] 殷跃平. 西藏波密贡嘎高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(4):8-11.
- [21] Delaney K B, Evans S G. The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: review, remote sensing analysis, and process modelling[J]. *Geomorphology*, 2015, 246:377-393.
- [22] 戴兴建,殷跃平,邢爱国. 易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5):1-8.
- [23] Guo C B, Montgomery D R, Zhang Y S, et al. Evidence for repeated failure of the giant Yigong landslide on the edge of the Tibetan Plateau[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):14371.
- [24] 吴瑞安,张永双,郭长宝,等. 西藏加查拉岗村巨型古滑坡发育特征与形成机理研究[J]. *地质学报*, 2018, 92(6):1324-1334.
- [25] 潘桂棠,徐耀荣,王培生,等. 青藏高原东部边缘新生代构造[J]. *青藏高原地质文集*, 1983(4):129-142.
- [26] 潘桂棠,刘宇平,郑来林,等. 青藏高原碰撞构造与效应[M]. 广州:广东科技出版社,2013:1-466.
- [27] 王立全,潘桂棠,丁俊,等. 青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1 500 000)[M]. 北京:地质出版社,2013:1-88.
- [28] 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.
- [29] 刘峰,马剑飞,魏帅超. 地热调查有效服务川藏铁路规划建设[J]. *中国地质调查成果快讯*, 2020, 6:6-9.

## Main progress and achievements of the geological survey project of Sichuan - Tibet Railway traffic corridor

GUO Changbao<sup>1,2</sup>, WANG Baodi<sup>3</sup>, LIU Jiankang<sup>4</sup>, TU Jienan<sup>5</sup>, ZHANG Yongshuang<sup>6</sup>, MA Jianfei<sup>6</sup>, TIE Yongbo<sup>3</sup>, HAN Bing<sup>7</sup>, MA Xin<sup>8</sup>, LIU Feng<sup>5</sup>, LI Xue<sup>1,2</sup>, MENG Wen<sup>1,2</sup>, ZHONG Ning<sup>1,2</sup>, YANG Zhihua<sup>1,2</sup>, WU Ruian<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geo-hazard, Beijing 100081, China; 3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 4. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, China; 5. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Nature Resources, Beijing 100083, China; 6. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050000, China; 7. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100037, China; 8. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

**Abstract:** Sichuan - Tibet Railway is a key project planned and constructed in China. It is located in Eastern Qing-

hai-Tibet Plateau where the terrain, geomorphology and tectonic activity are extremely complex. There are a series of serious geological problems that need to be solved urgently in its planning and construction period, such as regional active faults with their disaster effects, high geostress with resulted rockburst and large deformation, geological hazards, high temperature with heat damage, high pressure water and mud inrush in fault zone, stability of high and steep slope. In order to support the needs of technical support for the planning and construction of Sichuan-Tibet Railway and to accurately serve the implementation of major national strategies, China Geological Survey has deployed the Geological Survey Project of Sichuan-Tibet Railway Traffic Corridor, which is focused on the key issues restricting the planning and construction of Sichuan-Tibet Railway, and plays an important role in the planning and construction of major national projects. In 2019, it mainly completed 1 350 km<sup>2</sup> of 1:50 000 regional geological survey, and 5 000 km<sup>2</sup> of 1:50 000 geological hazard survey. six geothermal flow geological parameter wells and eight earth temperature monitoring stations were also constructed. Twenty geostress measurement holes and 11 special geological survey reports were completed. The route optimization suggestions and disaster prevention suggestions proposed for Dadu River Bridge, Litang Station, and Maoyaba Basin were adopted. The 1:5 000 large-scale aerial geophysical technology was introduced into the survey of complex mountain railway engineering for the first time, and the directional core drilling technology for ultra-long horizontal boreholes at a kilometer level was innovated with a major breakthrough. Besides, the measurement of geostress in horizontal boreholes with a depth of 500 meters was achieved. Overall, the project has improved the degree and accuracy of geological surveys along the railway through the survey and research in 2019. And the theoretical methods of major engineering geological problems and detection technologies in complex and difficult mountainous areas, geological disaster risk prevention, control theory, and key disaster reduction technologies were innovated, which effectively supported the planning and construction of Sichuan-Tibet Railway.

**Keywords:** Sichuan-Tibet Railway; regional geology; active fault; geological disaster; high temperature heat damage and water inrush and mud outburst; geostress

(责任编辑: 常艳)