

滇西大理至瑞丽铁路沿线地温场特征及其工程地质意义

周春景, 吴中海

ZHOU Chun-jing, WU Zhong-hai

中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

摘要:在整理、分析云南大理至瑞丽拟建铁路沿线及其邻区现今地温场分布特征的基础上,进一步总结前人的资料,综合研究、探讨了该区地温场与岩浆活动、活动构造、地震活动、区域深部构造的关系。结果表明,该区中高温温泉(中高地温场)的空间分布与地表岩浆岩的出露、地表主要活动断裂带的分布都具有较好的对应关系。综合研究后认为,该区的中高温温泉可归结为岩浆热源型、断裂深循环型和岩浆热源叠加断裂深循环作用型 3 种基本成因类型。同时还发现,该区的温泉分布与区域地震活动空间上也存在密切的关系,并据此将区内划分为 4 个地震区带。研究结果表明,本区地表温泉分布所反映出的地温场特征对本区的工程稳定性评价具有重要的指示意义。

关键词:滇西大理—瑞丽铁路;地温场;岩浆活动;温泉成因类型;工程稳定性评价

中图分类号:P314

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2012)02/03-0326-11

Zhou C J, Wu Z H. The characteristics of geothermal field along the Dali-Ruili railway in western Yunnan Province and their implications for geo-engineering. *Geological Bulletin of China*, 2012,31(2/3):326-336

Abstract: The available hot-spring data show that the geothermal field along the Dali-Ruili railway in western Yunnan Province has different subareas. The authors studied the distribution characteristics of igneous rocks, active faults, earthquakes in history and other related geophysical fields, such as MT and P wave velocity in the crust in this area. The results show that the distribution of the middle/high geothermal subareas is spatially well consistent with that of the igneous rocks and the active fault system. It is also concluded that there are three types of hot springs based on the caloric origin in this area, i.e., magma type, deep circle through deep-cut fault type and magma-deep circle type. Studies also show that there is spatial correlation between the distribution of the hot springs and that of the earthquakes in history. An integrated analysis of all the data obtained has led the authors to believe that the geo-thermal field in this area can act as an index for the estimation of the geo-engineering stability.

Key words: Dali-Ruili railway in western Yunnan Province; geothermal field; magmatic activity; hot-springs type; estimation of the geo-engineering stability

国家拟建的泛亚铁路西段云南大理—瑞丽段(以下简称“大瑞铁路”),从北东向西南,由下关,经

漾濞、保山、蒲缥、遮放,至瑞丽,全长约 300km,区域上横穿了三江造山带南段,跨越扬子、兰坪—思茅、

收稿日期:2011-05-10;修订日期:2011-11-24

资助项目:中国地质调查局地质调查项目《泛亚铁路大理至瑞丽沿线地质构造综合研究》(编号:1212010814054)、《青藏高原东南缘重要活动断裂厘定与活动构造体系综合研究》(编号:1212011120163)、《云南 1:5 万马厂幅、道街坝幅区域地质调查》(编号:1212010784004)、《西南地区活动构造域应力场模拟》(编号:1212010911049)和基本科研业务费项目《成果集成与战略研究》(编号:DZLXJK201113)

作者简介:周春景(1974-),女,在读博士,助理研究员,从事地震地质与数值模拟研究。E-mail:zhouchunjing01@yahoo.com.cn

保山、泸水—龙陵、腾冲地块等多个不同的地质构造单元。铁路沿线地区工程地质场地条件复杂,高山峻岭,河流湍急,铁路将大量地隧道穿山、跨桥越河。铁路沿线及其邻区的晚新生代火山活动最晚发生在全新世^[1],第四纪活动断层较多且强震活动性显著,强烈的地壳活动背景使得该区成为滇西著名的温泉与热泉活动频繁的地带。那么,地表热泉活动究竟与岩浆活动、断裂活动、区域地震活动之间具有怎样的内在关系,温泉活动对工程地质条件有何影响,一直是地质学家,尤其是工程地质学家所关注的重要问题。

本文选取大瑞铁路沿线及其邻区,大致为北纬24°~26.2°、东经97.4°~100.6°的范围,以该区温泉温度场为主线,通过分析地温场的特征,结合该区地壳电性、波速等地球物理场的特征,进一步深入探讨地温场与新生代火成岩、活动断层、地震活动的关系,最后讨论该地区地温场对工程地质场地稳定性评价的影响,希望能为科学认识该区的温泉成因和正确处理相关的工程地质问题提供有益的帮助。

1 区域背景

研究区位于云南省西部地区,在大地构造上属于北西向的红河断裂以西的三江造山带南段,是典型的断块—褶皱区^[2]。按板块构造理论,该区隶属于特提斯构造域的东缘,处于冈瓦纳超级古陆块中印度板块和欧亚超级古陆块中扬子板块之间的汇聚带上^[3~4],其中包含了腾冲、泸水—龙陵、保山、兰坪—思茅、扬子等多个演化历史不同的构造块体^[4],地质构造极为复杂。在地球物理场方面,研究区位于中国东部第一台阶的高区域重力区与第二台阶的中部弧形区域重力场之间,属于横断山重力梯度带南部边缘,布格重力异常值为 $-260\sim-160(\times 10^{-5}\text{m/s}^2)$,重力梯度不大^[5~6]。中国航空磁力异常图显示^[5],该区整体属于低缓正磁异常带,局部具较高的正异常。地壳厚度在38~46km之间^[5],并由大理向瑞丽方向逐渐减薄。

2 地温场分布特征

区域地质概况显示,研究区的断裂构造非常发育,新构造运动显著,大地热流背景值普遍较高,温泉分布广泛、数量众多,云南省的600多处温泉中,研究区内占了360多个^[7]。前人研究指出^[8],中国境内目前存在四大高温热泉区,研究区处于其中的“藏南—滇西南热泉区”东南部。汪缉安等^[9]根据云南地

区的大地热流测试数据,将云南划分为4个明显不同的热流区:①滇西腾冲断块高热流区;②三江海西—印支断褶带中—低热流区;③川滇块陷高热流区;④滇东南右江块隆低热流区。大瑞铁路沿线主要穿越了前3个“两高一低”的热流区。

本文通过系统收集、整理该区地表温泉的资料,并进行统计、分析后,对大瑞铁路沿线地区的地温场进行了详细划分。研究区内分布有368个温泉^[10~11],温泉的最低温度为15℃,最高温度为105℃。其中低于40℃的低温热水泉110个,40~60℃的中温热水泉161个,60~80℃的中高温热水泉52个,高于80℃的高温热水泉45个。从水化学成分类型看,大部分温泉为重碳酸盐型,个别属于硫酸盐型、重碳酸盐—硫酸盐型或重碳酸盐—硫酸盐—氯化物型。笔者采用地质统计方法——克里格法对地表温泉的泉眼温度进行了统计分析,并绘制了地表温泉温度等值线(图1)。根据统计分析结果,并参考前人的热流区划分方案^[9,12],大致以45℃和75℃为界,将研究区进一步划分为7个次级地热活动区带:点苍山中高温地热活动带(Ⅰ)、永平—保山低温地热活动区(Ⅱ)、漕涧中高温地热活动带(Ⅲ)、柯街—云县中高温地热活动区(Ⅳ)、高黎贡中高温地热活动带(Ⅴ)、腾冲高温地热活动区(Ⅵ)和潞西—瑞丽中低温地热活动区(Ⅶ)。大瑞铁路线工程场地主要涉及其中5个地热活动强度存在明显差异的地热活动区带,从东北向西南依次为:点苍山中高温地热活动带(Ⅰ)、永平—保山低温地热活动区(Ⅱ)、高黎贡中高温地热活动带(Ⅴ)、腾冲高温地热活动区(Ⅵ)和潞西—瑞丽中低温地热活动区(Ⅶ)。各地热活动区带的特征如下。

(1)点苍山中高温地热活动带:该地热活动带呈北西向展布,地表温泉显示主要以中温温泉为主、高温温泉为辅。温泉温度在45~75℃之间,个别超过80℃。区域上属于川滇块陷高热流区的一部分。

(2)永平—保山低温地热活动区:该区温泉温度绝大多数低于45℃,属于三江海西—印支断褶带中—低热流区的一部分。区内热流值总体小于 70.8mW/m^2 ,其中保山地区热流测值为 67mW/m^2 ^[9],永平地区的热流值较高,为 70.8mW/m^2 ^[12],基本属于低热流区。

(3)高黎贡中高温地热活动带:该区位于滇西腾冲断块高热流区与三江海西—印支断褶带中低热流区的交接部位,区内温泉温度集中在40~75℃之间,

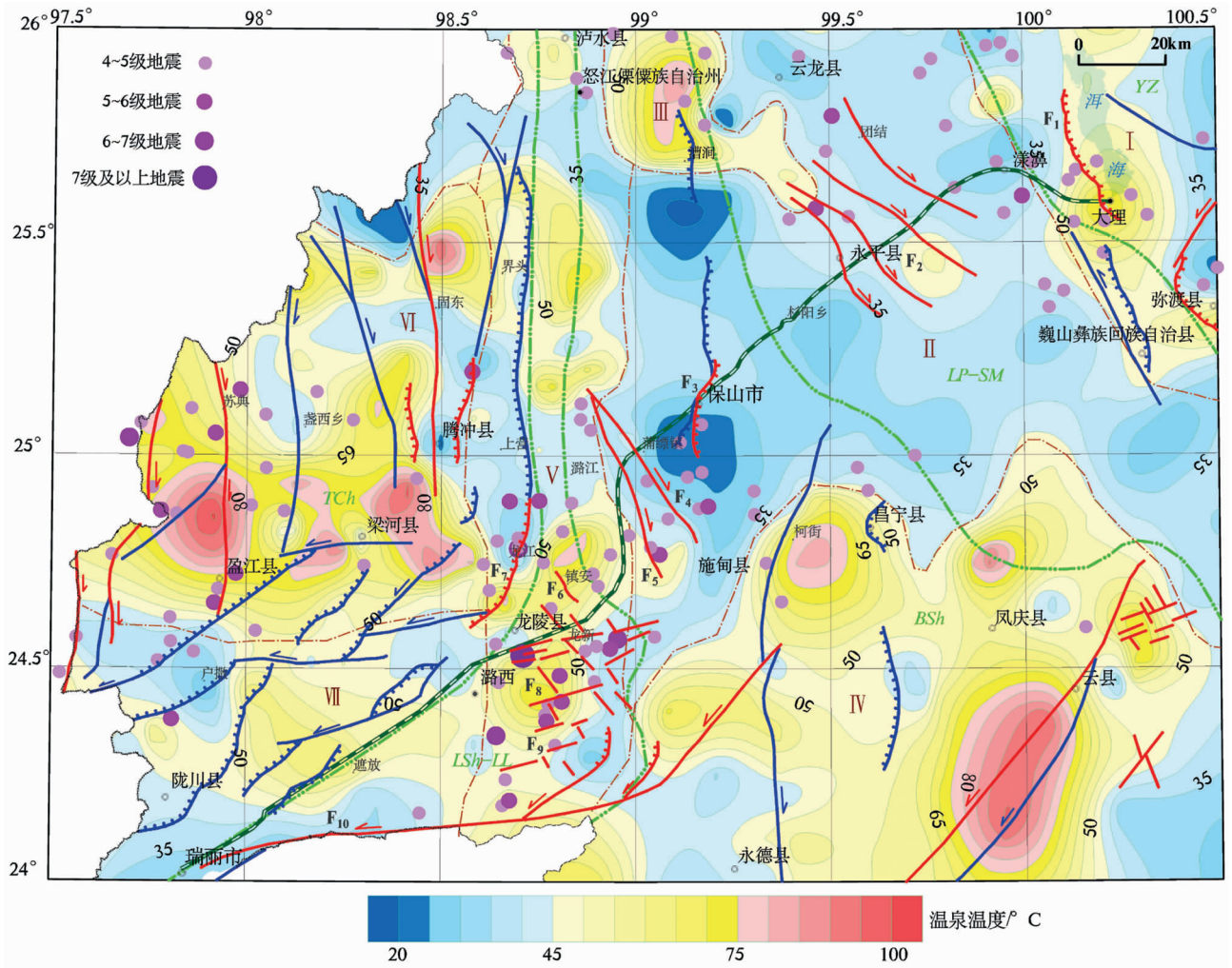


图 1 大理—瑞丽铁路沿线的温泉温度等值线图

Fig. 1 Temperature contour diagram of hot springs along the Dali-Ruili railway

咖啡色点虚线为温泉温度分区线,相应的阿拉伯数字为地热分区,Ⅰ:点苍山中高温地热活动带,Ⅱ:永平—保山低温地热活动区,Ⅲ:漕涧中高温地热活动带,Ⅳ:柯街—云县中高温地热活动区,Ⅴ:高黎贡中高温地热活动带,Ⅵ:腾冲高温地热活动区,Ⅶ:潞西—瑞丽中低温地热活动区;红色粗线为区域主要第四纪活动断裂,蓝色粗线为新近纪活动断裂,其中红色或蓝色锯齿状粗线为正断层,锯齿所指方向为断层倾向,红色或蓝色粗线上的半箭头方向线代表走滑断层相对运动方向^[9];浅绿色双点虚线为不同地块的边界线,其中 YZ:扬子地块,LP-SM:兰坪—思茅地块,BSh:保山地块,LSH-LL:泸水—龙陵地块,TCh:腾冲地块;绿白线为拟建的大理—瑞丽铁路线

少数高达 75~80℃,构成滇西腾冲断块高热流区的东部边界带。其中龙陵一带的热流值达 77mW/m²左右^[12],明显高于全球均值(61.6mW/m²)。

(4)腾冲高温地热活动区:该地热活动区的温泉温度主要集中在 65~100℃之间,个别超过 100℃,隶属于滇西腾冲断块高热流区,是喜马拉雅高地热带的组成部分。该区是云南最高的热流区,地表热泉尤为集中,多处出露沸泉、热泉、间隙喷泉、喷气孔、喷气穴、水热爆炸等。热流极大值可达 120.5mW/m²^[12],

约为全球均值(61.6mW/m²)的 2 倍。

(5)潞西—瑞丽中低温地热活动带:区域内主要分布中温和低温温泉,温泉温度在 35~65℃之间,大致以北东向的龙陵—瑞丽断裂带为界,北东侧的地热活动强度略高于南西侧。该区带位于高黎贡山西南,构成腾冲高温地热区的南部边界,大地热流值与腾冲、高黎贡山地区带相比较低。潞西一带的实测大地热流值为 73~77mW/m²^[12],属于中等热流区。

3 地温场与岩浆分布、地震活动、活动断裂之间的内在关系

前人对全国地热场进行的前期研究结果显示出^[8,13],中国不同地块的物质热状态和热过程都存在着明显的差异。这种地热场的差异主要与所处的构造位置、结晶基底形成时代、近期地壳活动性、上地幔顶面的埋深等因素有关;而局部热异常往往是由断裂性质、构造部位和壳内各处生热能力不同等因素所引起的。笔者对研究区进行的地表温泉分布统计结果表明,该区虽然整体属于中国境内地热状态最高的四大温泉区之一“藏南-滇西南温泉区”^[9],但区内的地热场差异还是很明显的。这种差异与区内的岩浆活动、断裂分布、地震活动等是否存在密切关系,有什么样的关系,无疑是进一步深入认识该区地热场差异的成因机制和分析其工程影响的关键所在。为了进一步研究该区地热场与岩浆、断裂、地震等的内在联系,首先要了解该区的岩浆活动、断裂分布、地震活动等方面的基本特征。

3.1 断裂分布、火成岩分布和地震活动的特征

3.1.1 活动断裂分布特征

云南大理至瑞丽地区由于处于三江造山带南段,古近纪—新近纪期间曾经历了强烈的压扭构造变形过程,第四纪期间该区转为张扭性构造环境,活动断层较多,且活动性较强烈。最新的地表调查结果表明^①,研究区内发育的古近纪—新近纪呈强烈活动的区域断裂带,由东向西主要有红河断裂带北西段、怒江断裂带、澜沧江断裂带、龙川江断裂带等。对大瑞铁路工程设计施工和今后的安全运营可能产生显著影响的第四纪和晚第四纪活动断裂带主要有 10 条,从东到西分别为:北北西向的点苍山东麓正断层(F_1)、北西向右旋走滑的云龙—永平断裂带(F_2)、近南北向的保山盆地主边界正断层(F_3)、北西向右旋走滑的蒲缥—施甸断裂带(F_4)、北北西向右旋走滑的太平—罗明坝断裂带(F_5)、北西向张扭性的镇安盆地边界断裂带(F_6)、北北东向左旋张扭性的龙川江断裂带(F_7)、龙新共轭断裂系(F_8)、黄连河共轭破裂系(F_9)和北东东向左旋走滑的畹町断裂带(F_{10})(图 1)。

3.1.2 火成岩分布特征

研究区主体隶属于西藏—三江造山系,位于藏滇地层大区与华南地层大区的交接部位^[14],二者以澜沧江断裂为界,以西属藏滇地层大区,以东为华南

地层大区。藏滇地层大区在工作区内以怒江断裂为界可进一步划分为腾冲地层分区和保山地层分区,而华南地层大区在研究区内主要涉及兰坪—思茅地层分区。根据最新完成的 4 幅 1:25 万地质图^②,对研究区地层进行简化归并。将沉积岩按时代分出中新世(N_1)以前的老沉积岩及中新世(N_1)以来的沉积岩,其中中新世以来的沉积岩又细分出中新世(N_1)沉积岩、上新世(N_2)沉积岩及第四系(Q)沉积岩。火成岩则根据时代分出古近纪(E)以前的火成岩和古近纪(E)以来的火成岩,其中古近纪以来的火成岩再细分出 4 个时代的火成岩:古近纪(E)火成岩、新近纪(N)火成岩、更新世(Q_p)火成岩及全新世(Q_h)火成岩(图 2)。

仔细分析研究区火成岩的分布可以发现,该区岩浆活动存在明显的时空差异。时间上,从元古宙、中生代到新生代,甚至全新世均有岩浆活动。空间上,最显著的岩浆活动带位于怒江以西地区,即著名的腾冲火山岩区。该区除了广泛分布有近南北—北东向的古近纪—新近纪以前的侵入岩体和近南北向的古近纪侵入岩之外,还常见新近纪基性火山岩,腾冲县及其周边还广泛分布有更新世基性火山岩及全新世中性—基性火山岩。其次是高黎贡山岩浆岩带和澜沧江岩浆岩带,前者是在早古生代岩浆岩带上,叠加发育了较多的中生代和古近纪岩浆侵入岩,后者是在印支期岩浆岩带上叠加了部分白垩纪至古近纪—新近纪的岩浆侵入岩。点苍山—红河构造变形带上发育北西向—南北向的元古宙酸性侵入岩体及零星分布的一些古近纪中基性和酸性侵入岩体。在上述各岩浆岩带或变质岩带之间主要是以广泛分布沉积岩盖层为特征的沉积台地区。

3.1.3 地震活动分布特征

统计研究区 1973 年以来 4.0 级及以上的地震共 150 多个(图 1),结果显示,该区地震活动的频度和强度总体较高。其中,1973 年以来共发生 $5.0 \leq M < 6.0$ 级地震 23 次, $6.0 \leq M < 7.0$ 级地震 5 次, $M \geq 7.0$ 级地震 1 次。从地震平面分布看,该区具有地震活跃区与相对稳定区交替出现的特点,其中大瑞铁路从东向西分别穿过 2 个非常显著的地震活跃区:点苍山地震活动区和保山—潞西地震活动区(或高黎贡地震活动区)。现今的地震活动,特别是 $M \geq 5.0$ 级地震,主要集中在上述 2 个区域内。其中后者的地震活动更为密集,1973 年以来的 $M \geq 6.0$ 级地震都

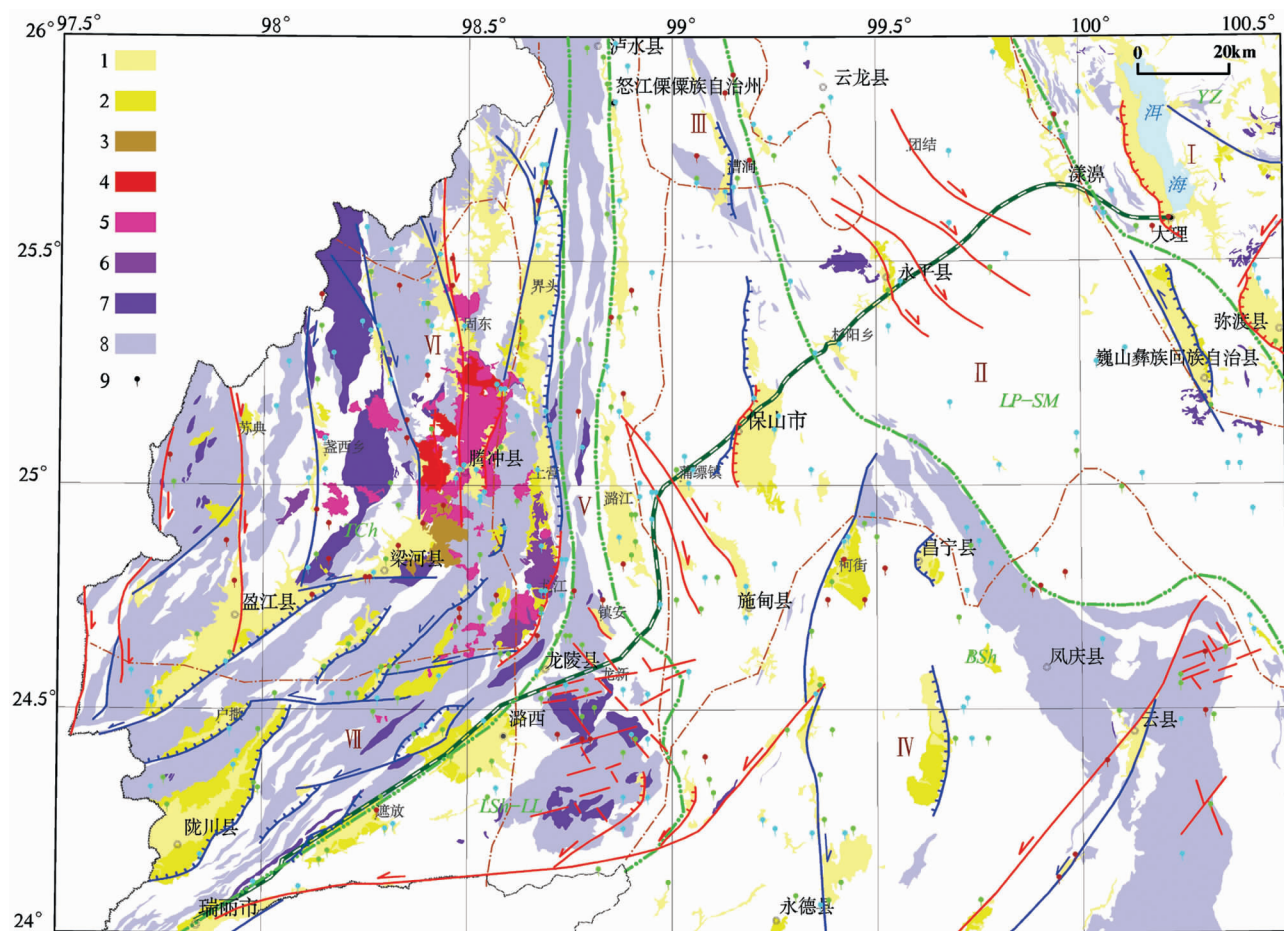


图 2 研究区火成岩地表分布图(地质内容根据参考文献②简化)

Fig. 2 Surface distribution of igneous rocks in the study area

1—第四纪(Q)沉积岩;2—上新世(N₂)沉积岩;3—中新世(N₁)沉积岩;4—全新世(Qh)火成岩;5—更新世(Qp)火成岩;6—新近纪(N)火成岩;7—古近纪(E)火成岩;8—古近纪(E)以前的火成岩;9—温泉出露点,温泉符号中,蓝色代表泉眼温度低于45℃,浅绿色代表泉眼温度介于45~75℃之间,红色代表泉眼温度高于75℃;白色区域代表中新世(N₁)以前的老沉积岩。其它符号的含义同图1

集中在该区。进一步统计震源分布深度还可以发现(图3),在瑞丽以西、腾冲—漾濞之间的大部分地区,震源深度都明显显示出带状分布的特征,主要集中在10km左右和33~34km两个深度范围内。其中瑞丽—腾冲之间的震源深度分布较分散,10~55km范围内均有分布。漾濞—下关及以东地区的震源深度分布相对较深,部分可达32~60km的深度。

3.2 地温场与火成岩分布、活动断裂、地震活动之间的内在关系

由于地表温泉的形成必须具备水源、热源和地下水运移通道3个必要因素,因此地表温泉活动的分布主要受近地表水系分布,地下热源的温度、深度,地下构造,地形地貌等多种因素的控制。关于地

表温泉热源问题,前人做过很多探讨,归结起来主要包括3种来源^[12,15-18]:①地幔软流圈局部上穹形成热点,为上覆水热系统提供强大热源;②地下岩浆房或地壳内高温侵入体或地表喷出体冷却过程中散热,为近地表水热系统提供热源;③地壳内断裂活动产生的磨擦热为水热系统提供热源。地壳近地表水系运移的通道包括岩层孔隙和岩层内的裂隙、断裂等。因此,火成岩的余热可以为温泉提供热源,而活动性明显的断裂带往往既可以提供热源,又可充当运移通道的角色。

关于地震与温泉的关系,滕德贞^[19]在研究云南地震与温泉的关系时认为,两者是伴生的相关关系。笔者认为,由于地震和温泉属于地球能量释放的2

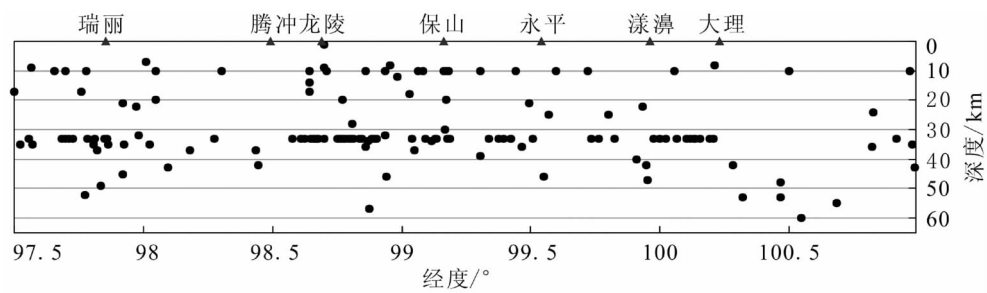


图 3 瑞丽—大理地区 1973 年以来 4 级以上地震深度分布图

Fig. 3 Depth distribution of $M \geq 4.0$ earthquakes in Ruili-Dali area since 1973

种不同形式,对于“热点”提供热源的温泉区,这两者可能是相互消长的关系。在活动构造带,地震、磨擦热和地层破碎错动消耗的机械能是地球能量释放同时伴生的 3 种形式,因此在这种情况下,地震与温泉可能具有正相关的关系。这里综合研究区的地温场、火成岩、活动断裂与地震活动特征,并结合该区的地壳电阻率、波速结构特征等相关的地球物理资料,进一步探讨地温场与火成岩、活动断裂和地震活动之间可能存在的内在关系。

从地球物理角度,大地电磁测深所显示的地下高导异常体通常反映了地下的热异常状况^[20-21]。因此,根据研究区的地壳、上地幔电性结构特征,并结合研究区地表火成岩的分布、地表断裂的分布、地表水热的分布、地震活动特征等资料的相互约束与印证,可对大理—瑞丽铁路沿线主要涉及的 5 个差异明显的地表地热活动区的成因及其地质构造与深部

背景进行更深入的探讨。分析腾冲—大理—下关剖面的地壳、上地幔电性结构(图 4)可以看出,腾冲至下关上地幔高导层顶面埋深变化较大,总体由腾冲向大理—下关方向倾;上部地壳内普遍存在低阻层。其中腾冲下面存在 2 个低阻层:地表附近的薄层低阻层和 17~20km 深度的低阻层,电阻率仅为 6.37~8.3 $\Omega \cdot m$ 。在永平—保山一带地壳 7km 内出现高阻薄层,下部 7~15km 为低阻厚层,电阻率为 3.27~6.02 $\Omega \cdot m$ 。在漾濞—大理—下关 25~40km 深处存在一低阻层,电阻率为 19.94~59.2 $\Omega \cdot m$ (图 4)。大理—下关一带靠近地表尚存在一薄层低阻层。上述地区地壳低阻层分布的差异性既反映了地块性质的差异,同时也与该区现今地热状况的不同存在密切的联系。

(1)点苍山中高温地热活动带:点苍山中高温地热活动带区域上与红河断裂带的北西段对应,位于现今活动强烈的滇西北裂隙带的南端。该区

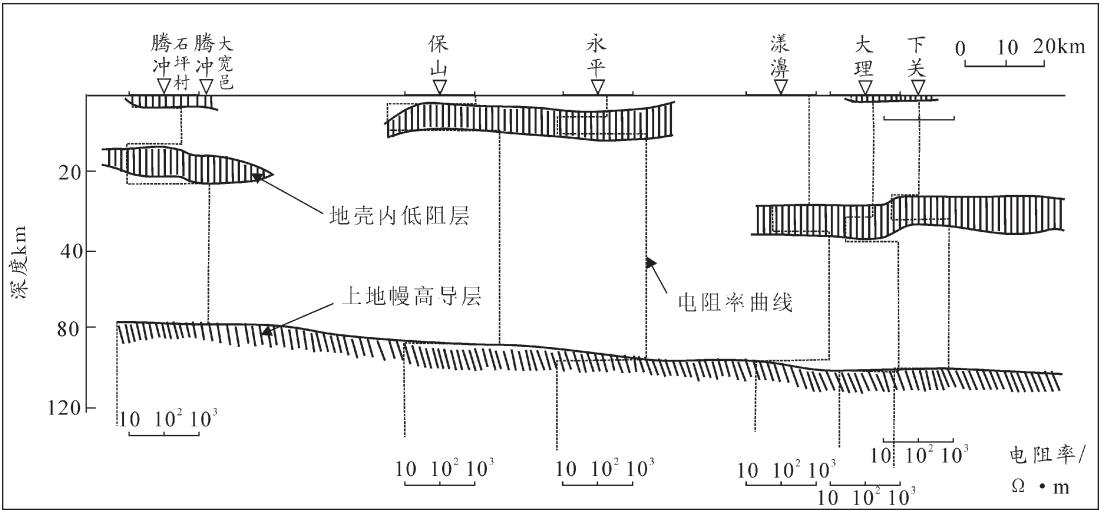


图 4 腾冲—大理—下关地区地壳、上地幔电性结构剖面(据文献[23]修改)

Fig. 4 Crust and upper mantle electric character structural profile in Tengchong-Dali-Xiaguan area

带内古近纪—新近纪期间构造变形强烈,并沿构造带发生过较强的岩浆活动,第四纪期间的地壳活动仍十分活跃(图1)。

区内地震主要沿地热活动带西部边界分布,大致与红河断裂带方向一致,地震震源深度分布较散,从10~60km均有分布,但以32~60km深度为主,与研究区其它地区比,震源深度总体较深(图1、图3)。结合该区段的地震波速异常资料^[17,22],推测红河断裂带在研究区内的切割深度可能达到40~60km。区域上,与红河断裂北西段大致平行还分布有北西向中元古代花岗岩;东侧由北向南依次零星分布有古近纪苦橄玢岩、古近纪花岗岩斑岩及古近纪正长斑岩;该区的裂陷盆地中充填有第四纪与新近纪沉积物,周围山地则以分布古生代—中生代沉积盖层为特征(图2)。

从漾濞—大理—下关MT图(图4)上看^[23],该区段25~40km深处厚层高导异常体可能代表了下地壳—上地幔顶部的深部热异常体。而大理—下关的近地表薄层低阻层可能为近地表的水热系统造成的局部高导异常。除了25~40km深处地下深部的高导热异常体外,大致沿红河断裂带分布的高温温泉似乎没有更多的其它热源。因此可以推测,第四纪以来活动不强烈的红河深切断裂带起到了连接深部热源与近地表水系的作用,近地表水通过深循环获得热量,并在地形地貌合适的位置出露地表形成温泉,这应该是该区中高温地热活动的主要成因。因此,点苍山中高温地热活动带的高温温泉与深切断裂带分布关系密切,高温温泉周边的元古宙酸性侵入岩体由于时代太老,不会有余热对温泉的发育产生贡献,而红河断裂主要为古近纪—新近纪活动断裂,第四纪以来活动相对较弱,因此断裂活动摩擦产生的热量也应该比较有限,唯有下地壳—上地幔的高导热异常体成为潜在的地表热泉的主要热量来源。因此,点苍山中高温地热活动带的形成最有可能通过深切断裂与壳幔深部高温热异常体相联系。

(2)永平—保山低温地热活动区:永平—保山低温地热活动区大体位于红河断裂带与怒江断裂带之间,区域上主要对应兰坪—思茅地块(以中生代红色盆地为主)和保山地块(主要分布古生代—中生代沉积盖层),区内地表地热活动较弱。该区除保山盆地广泛分布有第四纪沉积物、永平县西北分布有古近纪正长斑岩外,其余地区主要为古生代—中生代

沉积盖层。

电性剖面揭示,永平—保山一带地壳7km内为高阻薄层,之下的7~15km为低阻厚层;P波速度在8km和12km深度亦显示为低速异常区^[24]。该区的东、西边缘地带,地震震源主要集中分布在10km和33~34km深度范围。活动断裂分布显示,永平县至蒲缥镇之间,依次分布云龙—永平断裂带(F₂)、保山盆地主边界正断层(F₃)、蒲缥—施甸断裂带(F₄)等第四纪活动断裂(图1)。而区内温泉分布少且温度很低,因此,该区7~15km深度的低阻高导厚层(或低速异常体)不太可能是岩浆囊,最可能与沉积盖层底部存在的滑脱面有关。如此,该区水热活动则缺乏充足的浅层或深层热源,故而地表的水热活动较弱。另外,该区内部也很少有4级及以上的地震活动,但在与中高或高温温泉活动带的过渡带内存在地震活动区带(图1),这应该是热状态不同的地块之间差异活动的反映。

(3)高黎贡中高温地热活动带:高黎贡中高温地热活动带东、西边界分别为怒江断裂带和龙川江断裂带,区域上对应高黎贡变质—岩浆岩带(图1)。该区不仅广泛分布元古宙、奥陶纪和白垩纪中—酸性侵入岩体,而且古近纪和新近纪岩浆活动显著,同时西部具有零星的更新世岩浆活动。因此,古近纪—更新世岩浆活动的残余潜热可能是该区现今地表地热活动的主要热源。同时,该区第四纪地壳活动强烈,第四纪断裂活动明显,南部形成密集的共轭断裂系;区内地震活动频繁,地震震源分布主要集中在10km和33~34km深度范围内,个别达到或超过50km。可以推测该区断裂切割可能深达中下地壳。

从该区的波速特性看^[24],在4km、8km、12km深度上,该区表现出明显的低速异常。这些低速异常体可能为一些高热异常体。但在17~30km的深度范围内,除个别小范围表现为低速异常外,大部为明显的高速异常。综上可以推断,该区古近纪酸性侵入岩的冷却余热、放射性生热、局部残余岩浆囊的余热等可共同为区内的中高温温泉提供热源。同时,该区切割较深、密集发育的活动断裂既为近地表水热循环提供了良好的通道,亦可为水热深循环提供运移通道。因此,相对充足的地表水热活动热源和良好的地下水运移通道造就了该区较为显著的地热活动状态。另外,该区地震活动分布的特点是,高黎贡中高温地热活动带南半部地震活动异常频繁,地震震级较大,

4~7级(及以上)的地震时有发生,1976年5月29日龙陵7.4级地震就发生在龙陵县南部,并且地震主要围绕70~75℃中高温区中心分布于40~65℃中低温外围过渡带区域内。

(4)腾冲高温地热活动区:腾冲高温地热活动区大致与腾冲地块(主体为近南北向至北东向的岩浆岩带)对应,东部以龙川江断裂为界,晚新生代期间该区经历过广泛而强烈的火山活动(图1、图2)。区内广泛分布有中元古代片麻状花岗闪长岩、三叠纪—白垩纪中酸性侵入岩、古近纪酸性侵入岩、新近纪玄武岩和更新世—全新世中基性火山岩。因此,该区广泛分布的火成岩,尤其是古近纪以来的新生代侵入岩和火山岩的冷却过程散热可为地表水热活动提供丰富的热源。

地壳波速结构显示^[24],腾冲地区4km深处的P波低速异常区分布与本文地表温泉高温分布和新生代火成岩的分布相当一致,暗示该深度上的低速异常应该反映了近地表高温水热活动及可能存在近地表岩浆囊的高热异常特性。在深部,该区不同深度不同部位的低速异常分布很不相同。在8~12km深处,腾冲县及其南部为高速异常区,而在腾冲西边的盈江县东北和东南分别形成2个局部的低速异常区。在17~30km深度内,腾冲及其南北为明显的低速异常区,而盈江东北则为高速异常区,盈江东南的低速异常范围逐渐缩小,至23~30km深处,盈江东南成为高速异常区。结合腾冲地区的MT电性结构特征与地表岩体分布情况推测,腾冲17~30km深度低速异常体可能为新生代,尤其是晚新生代的岩浆囊;而8~12km深度盈江东北、东南2处低速异常区可能反映了该深度上大量存在有古近纪—新近纪残余岩浆囊及小范围的更新世岩浆囊。这些新生代的岩体及深部岩浆囊,使该区热流值远高于世界热流均值,也为近地表水热活动提供了充足的热源。因此,与新生代岩浆活动,尤其晚新生代火山活动密切相关的地下岩浆囊应该是腾冲高温地热活动区现今地热活动极为活跃的主要原因。另外,区带内温泉除了沿古近纪—新近纪或第四纪断裂分布外,更主要的表现为沿岩体与围岩的接触带呈环带状分布。这可能说明除了断裂是水热运移的通道外,不同岩性的过渡部位也是良好的水热活动通道。

腾冲高温地热活动区地震活动虽然较频繁,但震级较小,主要为4~5级的地震,并且地震主要围绕

地热异常高温区(75℃以上)外围成环带状分布,即腾冲高温地热活动区在温泉温度75℃以上的温度范围内没有地震分布,地震集中分布于温泉温度为45~75℃区间的区带内。这种地震分布特征显然对进一步认识该区的地震活动规律具有重要意义。

(5)潞西—瑞丽中低温地热活动带:潞西—瑞丽中低温地热活动带位于腾冲高温地热活动区南侧,该区北东侧曾局部发生古近纪岩浆活动,因此深部可能仍有古岩浆冷却产生的潜热,而西南侧主要分布中—古生代沉积盖层。虽然该区上地幔高导层的埋藏深度较浅,但由于断裂切割可能有限,并且深部热源的热能也有限,因此该区地表水热活动相对较弱。另外,该区的地震活动也相对较少,仅在与腾冲高温地热活动区相邻的西北侧有4~5级地震活动。

综合研究区所涉及5个地热活动区的特征可以看出,该区火成岩的分布与温泉温度的分布之间具有较好的空间对应关系。在新生代岩浆活动强烈的地区,地表水热活动往往较强烈(如腾冲、高黎贡地区);同时,区内深切割断裂与中高温温泉的分布亦有较好的空间对应关系,在新生代岩浆活动较弱的地区,由于深切割断裂的存在,沿断裂带会局部发育高温温泉(如点苍山地区)。根据以上分析结果可知,地震活动与地热活动强弱的关系很复杂,但如果仅从其空间分布关系看,两者仍具有较密切的关系,表现为区内地震活动基本分布在中高温地热活动带的边缘地带或中高/高温区域与中低温/低温区域的过渡地带(图1)。从这个意义上讲,区内的地震活动可以分为4个较为明显的地震带,从东向西分别为:①点苍山中高温地热活动带外围地震带;②漕涧中高温地热活动带外围地震带;③高黎贡中高温地热活动带外围地震带;④腾冲高温地热活动区外围地震带。关于这种地震活动带与地热活动带之间存在密切空间关系的内在机制,是一个需要今后深入探讨的很有意义的研究内容。

4 温泉的成因

以上分析表明,研究区的温泉分布、地温场特征与地表火成岩分布、活动断裂分布、地震活动、地壳深部地球物理性质等都具有很大的相关性。同时可以发现,地表热水活动可以由地表附近新生代,尤其第四纪火成岩的余热提供热源,在地形地貌、水系分布、地下构造等条件下形成地表热泉。地表热水活动

亦可以通过深切割断裂进行地下水的深循环,与地壳深部热源相互作用形成地表高温泉水。而有些情况下,这2种情形可能同时存在。据此,可以把该区的温泉成因归为3种基本成因类型,即岩浆热源型、断裂深循环型2种极端情况和岩浆热源叠加断裂深循环作用型。

岩浆热源型温泉主要表现为温泉分布与新生代,尤其是晚新生代岩浆活动分布关系密切,温泉常环火成岩体带呈环带状分布,地壳深处岩浆囊/部分熔融体提供的热源主要通过岩体传导向地表传热,温泉区大地热流值普遍高。区内断裂切割较浅,在近地表的水热循环中,与岩层内裂隙、孔隙等一起充当水循环通道。腾冲高温地热活动区内新生代岩浆活动强烈,在腾冲县及其周边地区,第四纪岩浆活动强烈,广泛分布有更新世—全新世中基性火山岩,区内的中高温温泉基本环新生代,尤其晚新生代的岩体边缘大致呈环带状分布。地壳深部存在大范围的厚层高热异常体,断裂不很发育,断裂切割深度有限。区内大地热流值高,极大值达 120.5mW/m^2 (全球均值为 61.6mW/m^2)。因此,可以推断腾冲高温地热活动区的深部热源主要通过岩体传导向地表近处的水热系统输送热源,区内发育的高温温泉属于比较典型的岩浆热源型温泉。

断裂深循环型温泉主要指温泉区内新生代岩浆活动较弱,但深部存在高温异常体,并有深切割断裂切割至地壳深部的高温异常体,通过水热深循环,沿断裂走向出现一些线性分布的中/高温温泉。点苍山中高温地热活动带内沿区域上的红河断裂带线性分布的中高温温泉,在温泉分布范围内为元古宙的花岗岩体,地壳较浅部位未见高热异常体,但在壳幔部位有厚层高热异常体存在,同时红河断裂切割深达壳幔深度,因此通过断裂的深循环,在断裂附近形成局部中/高温温泉,为较典型的断裂深循环型温泉。

岩浆热源叠加断裂深循环作用型温泉主要指温泉区内新生代岩浆活动较强,大地热流值较高,断裂切割也较深,地壳深部热异常体除了通过岩体热传导传向地表外,深切割断裂也参与了热水的水热深循环热交换作用形成的温泉。如高黎贡中高温地热活动带,该区内古近纪和新近纪岩浆活动显著,西侧与腾冲高温地热活动区交接处存在更新世岩浆活动。并且区内大地热流值较高,龙陵一带热流值达 77mW/m^2 左右。龙陵及其北部在 $8\sim 12\text{km}$ 深度存在

大面积的可能为高热异常体的低速异常体。同时,该区第四纪断裂活动较明显,在龙陵一带形成密集的共轭断裂系,个别断裂切割较深。因此,该区内岩浆冷却余热与中地壳高热异常体构成的热源,通过岩体热传导和较深切割断裂的地下水深循环热交换,可为地表水热系统提供较为丰富的热源。这种丰富的热源和通畅的运移通道,使得区内地表水热活动较活跃,形成大致环新生代岩体外围、沿断裂分布的中高温温泉,属于较典型的岩浆热源叠加断裂深循环作用型温泉。

5 工程地质意义

大瑞铁路穿越现今内、外动力作用都极为活跃的青藏高原东南缘横断山脉地区,是地形—地貌与地质构造条件极为复杂的区域。其中大瑞铁路西段的高黎贡山越岭段位于怒江缝合带上,地质构造最为复杂,新构造运动强烈,地热活动强度较大,大瑞铁路高黎贡山越岭段以隧道为主,该段隧道设计线路为全线最长(约 34km)、埋深最大(最大埋深 1.25km)的,因此,隧道工程可能面临强震与高地震烈度、高地温与高温热害、断裂、岩溶突水与涌水突泥等多种工程地质难题,特别是隧道的高温热害问题是大瑞铁路的工程难点。下面在以上区域地热场特征与成因分析的基础上,根据该区地表水热活动的特征、水热活动与地震的关系,探讨大瑞铁路沿线,重点是高黎贡山隧道工程的工程地质问题和相关的高地温、高温热害问题,为工程设计与施工提供参考。

根据前面的分析结果可知,大瑞铁路自东向西直接穿越了点苍山中高温地热活动带、永平—保山低温地热活动区、高黎贡中高温地热活动带和潞西—瑞丽中低温地热活动带4个水热活动强度不同的区域。同时,还横穿了点苍山中高温地热活动带外围地震带和高黎贡中高温地热活动带外围地震带2个主要地震活动带。因此,大瑞铁路东端(下关—漾濞段),主要面临的工程地质问题是地热活动、地震活动、断裂活动及其引起的各类次生地质灾害。漾濞以西的永平—保山段,地表温泉活动极弱,少见新生代岩浆活动,尤其是晚新生代岩浆活动,沿线1970年以来少有4级以上的地震记录,是全线地壳相对稳定的地区。大瑞铁路高黎贡山越岭段(怒江—潞西段)横穿了近南北向的高黎贡中高温地热活动带南

部及相应的地震带,铁路线经过区为 2 个局部中高温地带的过渡带,地表温泉温度相对较低,但却未能避开地震带,因此,该段除了考虑地热活动灾害问题,更要考虑铁路运营期间的活动断裂、地震等可能引起的工程地质问题。大瑞铁路的潞西-瑞丽段穿过了潞西-瑞丽中低温地热活动带,第四纪以来的构造活动不明显,主要为局部的中温地热活动地质问题。总体来看,大瑞铁路的高黎贡山越岭段由于受地形等条件所限,线路将以隧道为主,但该段穿越了中高/中低温地热活动带、地震活动带和活动断裂区段,因此工程地质问题整体较为突出。下面具体分析该段的工程地质问题。

根据最新的调查研究结果^①,高黎贡山越岭段的地温带主要围绕龙新岩穹呈环状分布。该区的共轭断裂系构成了地下水深循环较好的导水通道系统,其中的中高温温泉主要沿岩穹中的共轭断裂系、岩穹外缘及外侧围岩接触带或交切部位分布。高黎贡山越岭段近地表温泉活动机制如图 5 所示,龙新岩穹及其周缘围岩(沉积盖层)构成的高地貌山体,接受大气降水,大气降水沿岩穹区共轭断裂系下行,接受古近纪-新近纪岩浆房余热的不断加热,在特定的构造、地貌位置,热/温水出漏地表形成温泉。龙新岩穹及其边缘地带为区域上的地下水补给区和径流区,岩穹与围岩接触带、外围放射状断裂带与周边断裂交会处为地下热水溢出区。大瑞铁路优选线所穿越的龙新岩穹区及其边缘地带主要属于地下水补给区和径流区,因此铁路隧道施工中容易遭遇透水问题,特别是断裂透水问题不容忽视;而线路穿越岩穹

外围的环状地热水溢出带时最可能遇到热害问题。热害最容易出现的部位是其中的断裂导水带和构成阻水构造的岩穹与围岩接触带。当然,由于不同部位的地热活动强度不同,并且不同岩石和断裂的热导率有所差异,因此,隧道具体部位的热害程度还必须进一步结合更详细的工程勘查资料和工程地质、地质构造条件进行综合评价。

6 结 论

通过系统分析云南大理至瑞丽铁路沿线的地温场特征及其与区域岩浆活动、地震活动、活动断裂分布、深部背景等之间的内在联系,可初步获得以下主要结论。

(1)根据地表温泉的温度分布特征,研究区可以划分出 7 个次级地热活动区带。本文比较详细地分析了大瑞铁路线工程场地主要涉及的点苍山中高温地热活动带(Ⅰ)、永平-保山低温地热活动区(Ⅱ)、高黎贡中高温地热活动带(Ⅴ)、腾冲高温地热活动区(Ⅵ)和潞西-瑞丽中低温地热活动区(Ⅶ)5 个地热活动强度存在明显差异的地热活动区带的特征。

(2)通过研究温泉的分布与地表火成岩分布、活动断裂分布、地震活动和地壳深部地球物理性质的关系,对研究区铁路线涉及的地热活动区带,按热源补给和循环通道将区内温泉分布区归为岩浆热源型、断裂深循环型(2 种极端情况)和岩浆热源叠加断裂深循环作用型 3 种基本成因类型。其中高黎贡山中高温地热活动带属于岩浆热源叠加断裂深循环作用型。

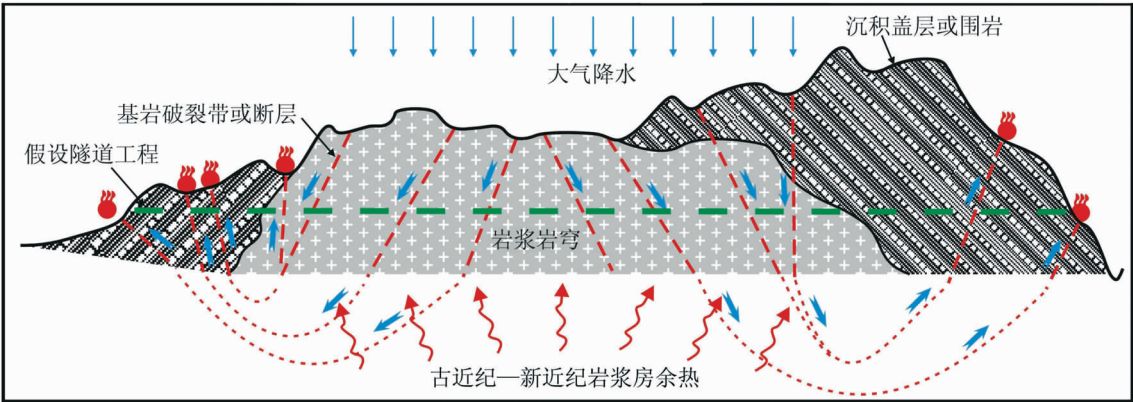


图 5 高黎贡山越岭段近地表温泉活动机制及其与假设铁路隧道工程关系示意图

Fig. 5 Diagrammatic map showing near-surface hot-spring activity mechanism of Yueling sector of the Gaoligong Mountain and its relationship with presumed railway tunnel engineering

(3)通过分析地震与温泉温度分布空间上的相关性,发现区内地震均分布在中高温地热活动带的边缘地带或中高/高温区域与中低温/低温区域的过渡地带。据此,研究区内可大致圈出4个环中高温地热活动带边缘地带或中高/高温区域与中低温/低温区域之间过渡地带分布的地震带,即:点苍山中高温地热活动带外围地震带、漕涧中高温地热活动带外围地震带、高黎贡中高温地热活动带外围地震带和腾冲高温地热活动区外围地震带。

(4)根据高黎贡山越岭段的地热活动特点与成因机制,认为大瑞线所穿越的龙新岩穹区及其边缘地带主要属于地热活动区中的地下水补给区和径流区,隧道施工中容易遭遇透水问题,特别是断裂透水问题;而线路在穿越岩穹外围的环状地热水溢出带时最可能遇到热害问题,其中最容易出现热害的部位是断裂导水带和构成阻水构造的岩穹与围岩的接触带。

参考文献

- [1]尹功明,李盛华.云南腾冲马鞍山最后一次喷发的热释光年龄[J].地震研究,2000,23(4):389-391.
- [2]常承法.滇西大地构造性质和发展历史[M].北京:中国地质学会,1965.
- [3]何科皓,赵崇有,何浩坡,等.滇西陆内裂谷与造山作用——滇西地区印支期后的构造演化[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [4]胡斌,戴塔根,胡瑞忠,等.滇西地区壳体大地构造单元的划分及其演化与运动特征[J].大地构造与成矿学,2005,29(4):537-544.
- [5]袁学诚.中国地球物理图集[M].北京:地质出版社,1996.
- [6]马杏垣.中国岩石圈动力学地图集[M].北京:中国地图出版社,1989.
- [7]吴乾藩,祖金华,谢毅真,等.云南地区地热基本特征[J].地震地质,1988,10(4):177-183.
- [8]丁国瑜.中国岩石圈动力学概论[M].北京:地震出版社,1991.
- [9]汪缉安,徐青,张文仁.云南大地热流及地热地质问题[J].地震地质,1990,12(4):367-377.
- [10]佟伟,章铭陶(中国科学院青藏高原综合科学考察队).腾冲地热[M].北京:科学出版社,1989.
- [11]佟伟,章铭陶.横断山区温泉志[M].北京:科学出版社,1994.
- [12]周真恒,向才英,覃玉玺,等.云南深部热流研究[J].西北地震学报,1997,19(4):51-57.
- [13]陈墨香.新编中国温泉图及其说明[J].地质科学,1992,12(增刊):322-332.
- [14]云南省地勘局.云南省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [15]白登海,廖志杰,赵国泽,等.从MT探测结果推论腾冲热海热田的岩浆热源[J].科学通报,1994,36(4):344-347.
- [16]赵慈平,冉华,陈坤华.由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存岩浆囊[J].岩石学报,2006,22(6):1517-1528.
- [17]王椿镛,Mooney W D,王溪莉,等.川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J].地震学报,2002,24(1):1-16.
- [18]姜朝松,周真恒,赵慈平.腾冲火山区地壳及上地幔结构特征[J].地震研究,2004,27(增刊):1-6.
- [19]滕德贞.云南温泉与地震[J].地震研究,1982,(5):23-29.
- [20]魏文博,陈乐寿,谭捍东,等.西藏中、南部壳内高导体与热结构特点——INDEPTH-MT提供的证据[J].现代地质,1997,11(3):387-392.
- [21]Wei W B, Unsworth M, Jin S, et al. Conductivity structure of crust and upper mantle beneath the northern Tibetan Plateau: results of super-wide band magnetotelluric sounding[J]. China J. Geophys., 2006, 49(4): 1098-1110.
- [22]胡鸿翔,陆涵行,王椿镛,等.滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J].地球物理学报,1986,29(2):133-144.
- [23]孙洁,徐常芳,江钊,等.滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造活动的关系[J].地震地质,1989,11(1):35-45.
- [24]杨晓涛,胥颐,刘建华,等.腾冲火山区的地震层析成像及其构造意义[J].地球物理学报,2011,54(8):2050-2059.
- ① 吴中海,李贵书,张绪教,等.云南大理至瑞丽铁路优选线1:25000综合地质调查成果报告.2010.
- ② 云南省地质调查院.1:25万腾冲县幅、潞西市幅、滚龙幅、凤庆县幅和大理市幅地质图.2006.