

程洋,王永,杨妍妨.川藏铁路雅安至林芝段水文地质条件初探[J].中国岩溶,2020,39(5):753-761.
DOI:10.11932/karst20200512

川藏铁路雅安至林芝段水文地质条件初探

程洋,王永,杨妍妨

(中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,
广西 桂林 541004)

摘要:以川藏铁路雅安至林芝段勘察设计和施工建设的实际需求为导向,以遥感地质学和水文地质学原理为理论指导,采用人机交互解译与遥感信息计算机自动提取相结合的技术方法,开展了路线两侧各15 km范围内的1:5万水文地质遥感解译工作,初步查明了勘察区的水文地质条件,为川藏铁路雅安至林芝段勘察设计提供基础水文地质资料,有效地支撑服务了川藏铁路的建设。

关键词:川藏铁路;水文地质;遥感

中图分类号:P627;P641.7 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)05-0753-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

规划建设川藏铁路是促进民族团结、维护国家安全、巩固边疆稳定的需要,是促进西藏经济社会发展的需要,是贯彻落实党中央治藏方略的重大举措。川藏铁路是国家干线铁路上海至拉萨快速通道的重要组成部分,其中成都至雅安已通车运营,林芝至拉萨段已开工建设。雅安至林芝段东起四川雅安市,向西经天全、泸定、康定、雅江、理塘、巴塘后跨金沙江进入西藏自治区境内,尔后经贡觉、昌都、八宿、波密至林芝,正线长度约1 000 km。横跨中国第一阶梯与第二阶梯,穿越四川盆地边缘山前丘陵区、中高山区(横断山脉)、高原区及高原高山峡谷区(青藏高原),翻越二郎山、折多山、高尔寺山、沙鲁里山、芒康山、他念他翁山、伯舒拉岭和色季拉山等众多山脉,跨越大渡河、鲜水河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江、帕隆藏布江、尼洋河等诸多河流。路段总的地势西南高东北低,路线最高海拔4 400 m,海拔落差3 000多米,地形落差极大,其中泸定至康定段,直线距离只有50 km,海拔高差达到2 000多米。复杂艰险的自然条件和落后的交通条件使得铁路勘察设计的工

作条件极差。

线路走行于印度板块与欧亚大陆板块大规模碰撞而隆升起的青藏高原及其边缘地带,地层岩性复杂多变,地质构造复杂,断裂褶皱发育,新构造运动活跃,地震活动强烈,内、外动力地质作用十分强烈,导致工程地质条件极为复杂,滑坡、错落、崩塌、岩堆、危岩落石、泥石流、溜砂坡、河岸冲刷、顺层、岩溶、采空区及瓦斯等有害气体、活动断裂与强地震、高地应力与岩爆或软岩大变形、断层破碎带突水涌泥、地震液化、高地温、放射性、风化剥落、石膏、岩溶角砾岩、蚀变岩等均有分布。复杂的地质条件和极低的地质工作程度使得勘察设计的技术难度极大。

遥感技术(RS)获取的数据记载着地物电磁辐射特征,具有视域宽广、探测手段多样、受地面条件限制小和经济高效等特点^[1],是现代地质调查不可或缺的技术手段,特别适用于获取工作条件极差、技术难度极大的地区的各类地质信息。

遥感技术在区域地质调查^[2-6]、水文地质调查^[7-10]、工程地质勘察^[11-16]的实际工作中有广泛应用,遥感解译获取的海量基础数据有效地支撑了各类地质调查和工程勘察工作。

资助项目:新建川藏铁路工程雅安至林芝段第三方工程地质遥感专题

第一作者简介:程洋(1987—),男,硕士,工程师,从事遥感地质领域的研究与应用工作。E-mail:chengyang@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期:2019-10-09

特征,又较好地反映工作区地质体的空间展布特征和接触关系,符合 GB/T15968-2008《遥感影像平面图制作规范》、DZ/T 0265-2014《遥感影像地图制作规范(1:50000/1:250000)》和 DZ/T0151-95《区域地质调查中遥感技术规定(1:50000)》的精度要求,满足 1:5 万水文地质遥感解译工作的精度要求。

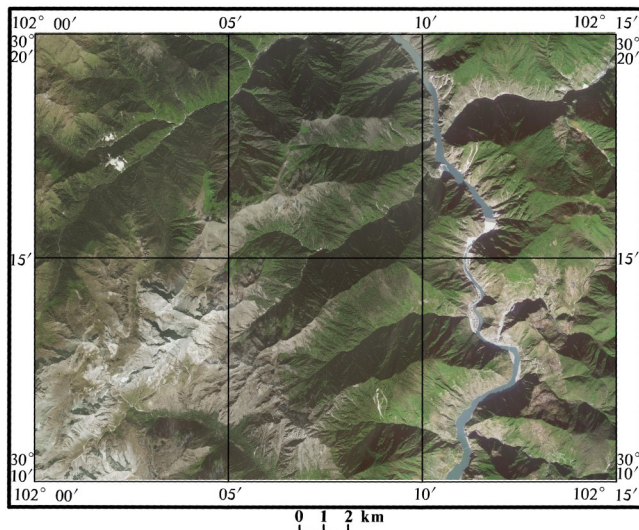


图2 H48E011001幅正射影像图(高分一号数据)

Fig. 2 H48E011001Ortho-photo image (GF-1)

2 研究思路

2.1 总体思路

以川藏铁路雅安至林芝段勘察设计和施工建设的实际需求为导向,以遥感地质学和水文地质学原理为理论指导,采用人机交互解译与遥感信息计算机自动提取相结合的技术方法,开展路线两侧各 15 km 范围内的 1:5 万水文地质遥感解译工作,查明含水岩组、泉点、地下水溢出带等水文地质要素的空间分布,明确区域水文地质条件,为川藏铁路雅安至林芝段勘察设计提供基础水文地质资料。

2.2 技术流程

根据 1:5 万水文地质遥感解译的一般步骤和技术方法,技术流程如图 3 所示。首先收集整理资料,包括研究区相关地质资料和遥感数据;其次处理遥感数据,制作遥感正射影像图;然后进行遥感解译,通过野外踏勘和以往遥感地质工作经验建立遥感解译标志,采用遥感信息计算机自动提取和人机交互解译相结合的技术方法进行解译;再后通过野外实

地调查进行补充解译,完善解译成果。前 4 步技术流程与一般的水文地质解译和遥感地质解译工作基本一致,在文献[2]、[7]中有相应的叙述。

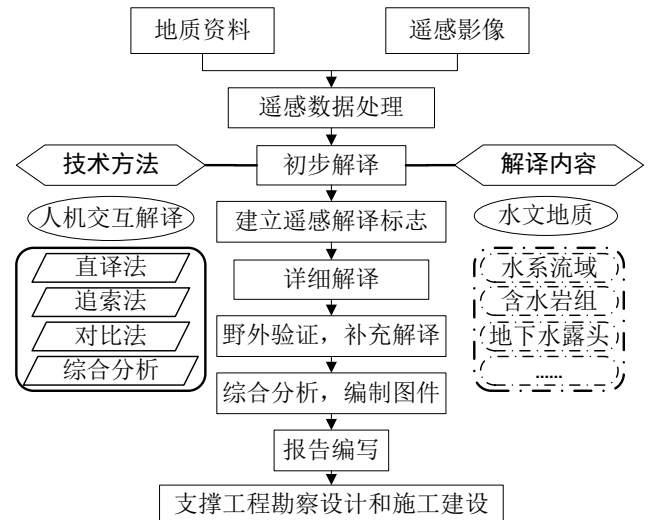


图3 技术流程图

Fig. 3 Chart of technique flow

3 水文地质遥感解译成果

3.1 地表水系解译及流域划分

工作区有金沙江和澜沧江两条太平洋的一级河流,怒江和雅鲁藏布两条印度洋的一级河流,4 条一级河流共有 11 支二级河流,再细分为 16 支三级河流。按地表水系状况将工作区分为 31 个三级流域单元,作为水文地质分区的基础依据(表 1)。

3.2 含水岩组解译

水文地质遥感解译的方法已由过去单纯的目视解译发展为能充分利用遥感图像的空间分辨率、光谱特征、时间特性的人机交互解译。遵循“面→线→点”到“点→线→面”,即从宏观到微观,再从微观到宏观的解译原则。解译方法主要有直译法、追索法、类比法及综合分析法 4 种,在实际解译过程中通常是这 4 种方法的综合应用。解译步骤:初步解译—建立解译标志—详细解译—野外验证—补充解译,完善解译成果。

3.2.1 遥感解译标志

遥感解译标志是区分不同地物的依据。工作区由 3 类岩溶水含水岩组、5 类基岩裂隙水含水岩组和 1 类孔隙水含水岩组。笔者在文献[17]中论述了各

表1 工作区流域划分表
Table 1 Watershed division in the study area

一级流域	二级流域	三级流域
金沙江	岷江	青衣江
		大渡河
	雅砻江	立启河
		雅砻江干流
		霍曲
		理塘河
		那曲
	巴塘河	巴塘河干流
	金沙江干流	金沙江干流
	雪曲	雪曲干流
澜沧江	热曲	马曲
	麦曲	麦曲干流 1
		史曲
		麦曲干流 2
	澜沧江干流	澜沧江干流
	色曲	色曲干流
怒江	玉曲	玉曲干流
	怒江干流	怒江干流
	德曲	德曲干流
		多则曲
		巴曲
		康玉曲
雅鲁藏布	帕隆藏布	曲宗藏布
		波得藏布
		帕隆藏布干流 1
		易贡藏布
		帕隆藏布干流 2
	雅鲁藏布干流	拉月曲
		雅鲁藏布干流
	尼洋河	无名河
		尼洋河干流

类含水岩组在高分一号遥感数据上的遥感解译标志,虽然有地区差异,还是可以作为本次工作中含水岩组的遥感解译标志。

3.2.2 含水岩组解译成果

采用前述的水文地质遥感解译原则和步骤,结合文献[17]中含水岩组的遥感解译标志,解译出了工作区含水岩组,其空间分布见图 14,面积统计见表2。

表2 工作区含水岩组面积统计表
Table 2 Area statistics of aquifer rock sets

	含水岩组	面积/km ²	百分比/%
岩溶水	纯碳酸盐岩类溶洞裂隙水含水岩组	1 464.74	3.26
	碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙溶洞水含水岩组	1 040.46	2.32
	碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙溶洞水含水岩组	1 921.57	4.28
	碎屑岩类基岩裂隙水含水岩组	14 992.53	33.39
	变质岩类基岩裂隙水含水岩组	1 380.23	3.07
基岩裂隙水	火山岩类基岩裂隙水含水岩组	11 904.34	26.51
	岩浆岩类网状风化裂隙水含水岩组	9 450.19	21.04
	孔隙水	2 751.58	6.13
孔隙水	松散堆积物孔隙水含水岩组	2 751.58	6.13
	合 计	44 905.64	100.00

3.2.3 典型岩溶含水岩组

在雅安市西侧和天全县西侧都有NNE向的垄状山地,部分地段在遥感影像上的形态类似于岩溶槽谷地貌,类似于碎屑岩夹碳酸盐岩的影像特征,山脊有一定的圆滑、不连续,岩层三角面基本可分辨(图4)。地质资料显示为上白垩统灌口组(K_{2g})和夹关组(K_j),岩性为泥岩、粉砂岩、厚层的灰质砾岩。类似于岩溶槽谷地貌的层位解译为厚层的灰质砾岩段。在其它地区的类似厚层的灰质砾岩^[18],因为灰岩砾石的溶解形成了溶孔、溶洞等储水空间,其富水性达到甚至超过了纯碳酸盐岩类溶洞裂隙水含水岩组的富水性,大泉地下河流量可达100~1 000 L·s⁻¹,地下径流模数大于6 L·s⁻¹·km²,水文地质意义重大。

天全县西侧的厚层灰质砾岩的补给流域超过30 km²,此外,还有北侧河流水入渗补给地下水,地下水总体由东北向西南流动,排入横切地层的青衣江,横穿该厚层灰质砾岩段的隧道极易发生突水。

3.2.4 遥感解译修订的含水岩组

在西藏自治区昌都市八宿县郭庆乡东部(经度:96°54'20.14";纬度:30°42'53.93"附近)含水岩组遥感地质解译成果与已有1:20万地质资料矛盾(图5中b区域)。

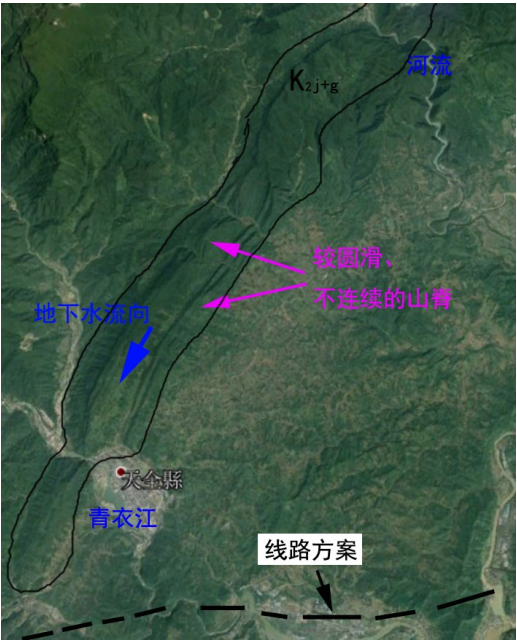


图4 灰质砾岩的典型遥感影像

Fig. 4 Typical remote sensing images of limestone conglomerate

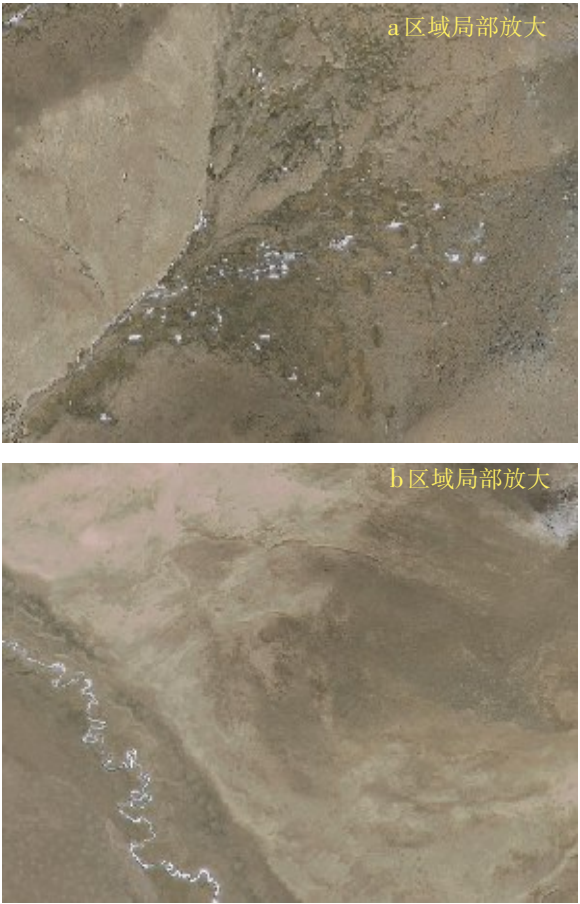


图6 花岗岩影像特征

Fig. 6 Features of images of granite

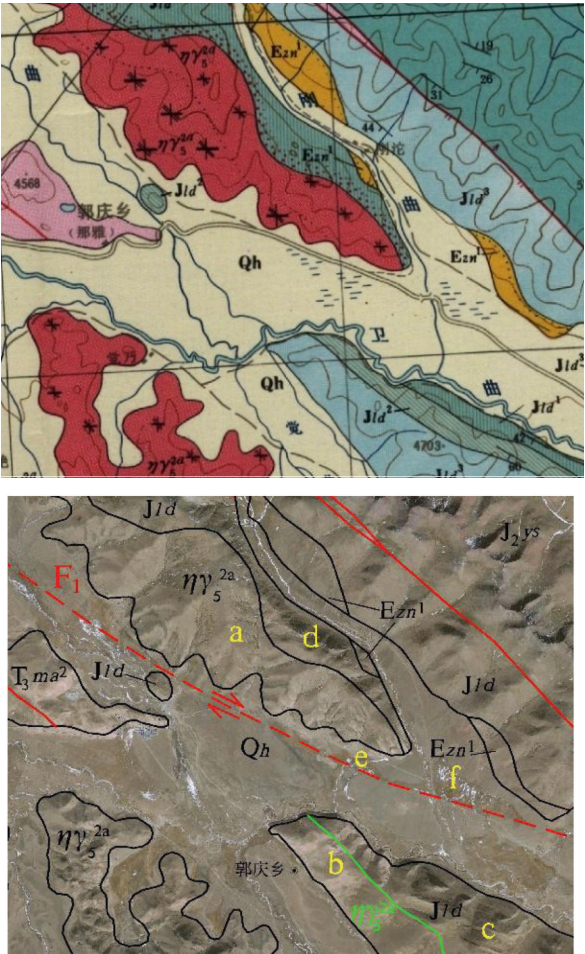


图5 已有地质资料与遥感解译成果对比图

Fig. 5 Comparison map of available geological data and remote sensing interpretation results

已有资料将该区域均划分为罗东群(Jld),但根据遥感影像,该区域无明显层理,岩层风化严重,与a区域的花岗岩($\eta\gamma_5^{2a}$)球形风化的影像特征基本一致(图6、图5中a、b区域的局部放大),与罗东群(Jld)碎屑岩、浅变质岩的密集发育直线状层理影像特征差异明显(图7、图5中c、d区域的局部放大),将b区域修订为花岗岩网状风化裂隙水含水岩组。花岗岩与碎屑岩、浅变质岩的遥感影像差异明显,解译标志清晰,解译成果可信度高,可以作为含水岩组修订的依据。

修订后罗东群(Jld)和花岗岩($\eta\gamma_5^{2a}$)地层的空间分布存在明显的地层位错现象,延伸方向可见地下水以泉点的形式呈线状排列出露(图8、图5中e区域的局部放大),地表水系发生同步扭曲(图9、图5中f区域的局部放大),基于上述三点特征解译出一条北西—南东走向的断层(图5中的 F_1);根据水系扭曲特征和松散堆积物的错位判断该断层为活动断层,结合地层错位方向和水系扭曲方向进一步确认为右旋活动断层。

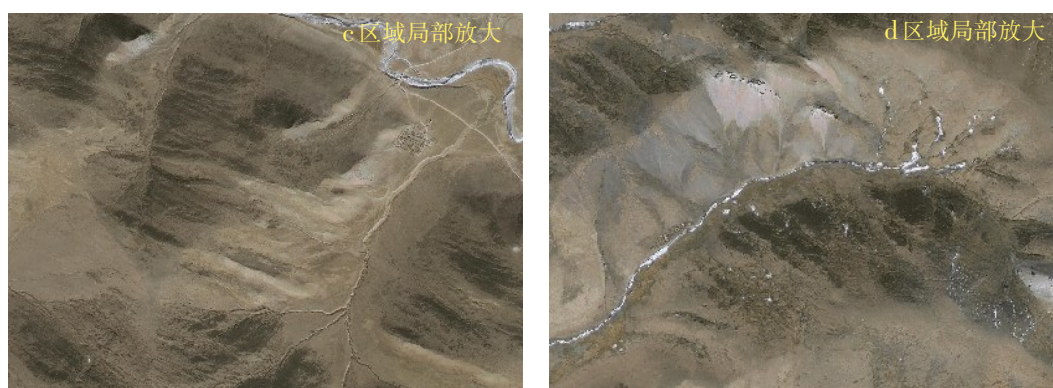


图7 碎屑岩影像特征

Fig. 7 Features of images of clastic rock

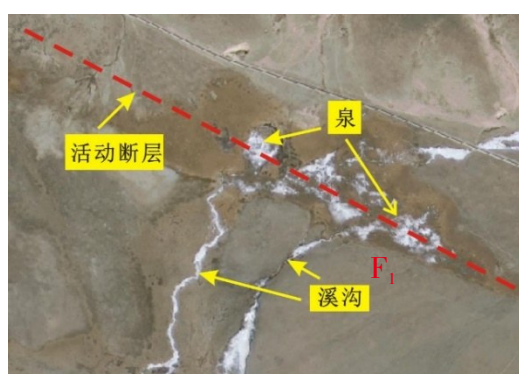


图8 呈线状分布的泉

Fig. 8 Linear distribution of springs

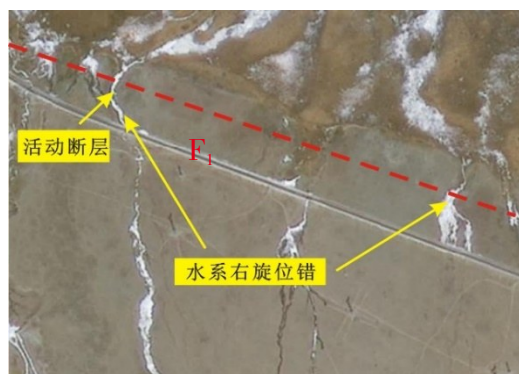


图9 水系同步右旋扭曲

Fig. 9 Right-lateral shear of drainage

3.3 泉点解译

3.3.1 遥感解译标志

笔者在文献[7]和[17]中均论述了各类泉点的遥感解译标志,虽然有地区差异,还是可以作为本次工作中泉点的遥感解译标志。

需要特别注意的是,研究区有两类“假标志”。一是溪沟源头,如果溪沟源头位于半山腰或者山脊附近,不能解译为泉(图10)。溪沟源头的相对高程

过高则缺乏地下水的补给区,难以形成常年流动的泉点;研究区内大部分是冰川覆盖区(包括常年冰川和季节性冰川),冰雪融化形成的地表径流会在坡面上侵蚀出线状的沟谷,在遥感影像上表现为直线状的负地形,类似于泉点的溪沟源头。要特别注意溪沟源头的位置,只有沟底的溪沟才有可能有泉点,可勉强作为泉点的遥感解译标志之一。



图10 易误解的泉点的典型遥感影像1

Fig. 10 Remote sensing image 1 of typical misinterpretation spring site

二是溪沟—水域组合的特征影像,通常连接水域的溪沟源头是泉点。研究区内冰湖众多,大部分冰湖的海拔较高,都是接受冰雪融水的补给。在融雪季节,遥感影像上表现为溪沟连接冰湖,与泉点的遥感影像特征很像(图11),区分二者需要注意水体的性质和海拔。

3.3.2 泉点解译成果

工作区共解译出泉点727处,其中岩溶泉72处,基岩裂隙泉473处,松散堆积物孔隙泉182处。泸定

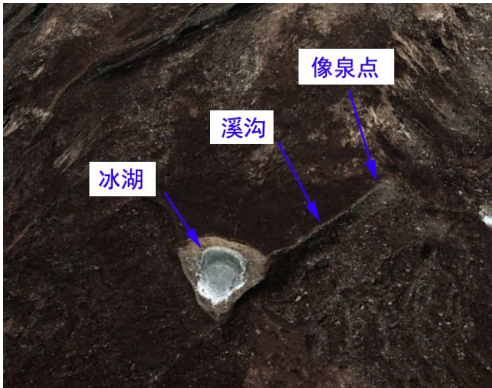


图 11 易误解的泉点的典型遥感影像 2
Fig. 11 Remote sensing image 2 of typical misinterpretation spring site

县以西的泉点除接受大气降雨入渗补给外,还接受冰雪融水的补给,春夏季流量远大于冬春季。结合其它资料,泉点解译成果中有 57 处温泉,其中,岩溶温泉 4 处,碎屑岩温泉 12 处,火山岩温泉 6 处,岩浆岩温泉 10 处,变质岩温泉 17 处,松散堆积物温泉 9 个。根据已有地质资料,大部分岩溶温泉、碎屑岩温泉、松散堆积物温泉出露于断裂附近,属于断层导热,火

山岩温泉、岩浆岩温泉、变质岩温泉推测热源为岩体残留热量。泉点的空间分布见图 14。

3.3.3 典型岩溶大泉

该泉位于四川省雅安市天全县新沟镇西南 3 km 的河流左岸的半山腰。区域地层为中下泥盆统的不纯碳酸盐岩,为裂隙溶洞水含水岩组,水量丰富;在遥感影像上(图 12)表现为以碳酸盐岩为主的不纯碳酸盐岩的影像特征,山脊不尖直,略圆滑,发育不典型的岩层三角面,近叠瓦状纹理,泉点附近发育典型的岩溶丘岭地貌;泉口出露于岩溶丘岭的半山腰,泉口朝向 100°左右;泉口处裸露的基岩呈亮白色,显示为较纯的碳酸盐岩,植被呈墨绿色,近干涸的河道呈灰白色,泉点下游的河道水量较大,呈蓝偏绿色调;泉口建有引水渠,引水发电,推测泉水流量 20 L·s⁻¹以上,为岩溶大泉。该泉受南北两侧的不纯碳酸盐岩的裂隙溶洞水补给,泉口的高程高于设计隧道口高程 100 m 以上,地下水对隧道的施工有一定影响;隧道贯通后,区域地下水流场明显改变,地下水水位将降低 50 m 左右,该泉流量将大幅度衰减甚至断流。



图 12 岩溶大泉的遥感影像
Fig. 12 Typical remote sensing image of karst spring

3.4 地下水溢出带解译

地下水溢出带是地下水的天然露头之一。区别于泉的点状排泄,地下水溢出带以线状分布。一般分布于山前的靴状地形坡度变化最大的地方,通常是基岩与松散堆积物的界线;或者出露于扇形松散堆积物的前缘或者中部,这种情况一般有断层通过,

且大概率是活动断层,是构造的解译标志之一;地下水类型为松散堆积物孔隙水,受两侧基岩裂隙水和冰雪融水的补给,直接排泄入地表河流中。在遥感影像上,地下水溢出带体现出颜色的差异,河流区为深绿色,扇形松散堆积物为灰绿色,基岩区为灰色;扇形松散堆积物的纹理细腻,河流区的纹理相对粗糙,地下水溢出带的解译标志清晰(图 13)。工作区

解译出地下水溢出带 10 处, 累计长度约 2.5 km, 主要集中分布在四川省理塘县毛亚坝和西藏自治区八宿县郭庆乡附近的玉曲谷地(图 14)。由于气候寒冷, 川藏铁路沿线的地下水溢出带会因为冻融现象出现季节性洪水, 影响铁路的施工和运营; 加之含水岩组为松散堆积物, 在寒冷条件下易出现类似于冻土的冻胀现象, 路基很不稳定。

4 结论与讨论

(1) 遥感技术是 1:5 万水文地质调查的重要技术手段。利用遥感技术能快速准确地解译出各类水文地质现象, 特别是在川藏铁路这类勘察设计技术难度极大的复杂地质条件区和极低地质工作程度区, 应用遥感解译技术既能查明区域水文地质条件, 又能明显地节省人力、物力、财力, 提高勘察设计工作的效率。

从川藏铁路雅安至林芝段勘察设计和施工建设的实际需求出发, 采用人机交互解译与遥感信息计算机自动提取相结合的技术方法, 首次系统地开展了路线两侧各 15 km 范围内的 1:5 万水文地质遥感

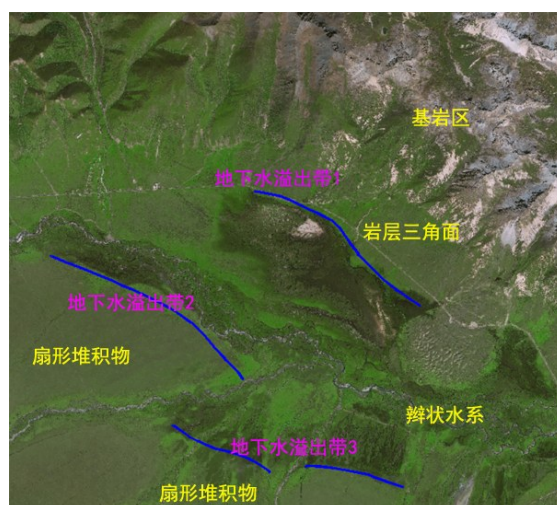


图 13 地下水溢出带的典型遥感影像

Fig. 13 Typical remote sensing image of groundwater overflow zone

解译工作, 初步查明了工作区的地表水系及流域分布、含水岩组的类型及空间分布、地下水天然露头及空间分布等水文地质信息, 为川藏铁路雅安至林芝段勘察设计提供基础水文地质资料, 有效地支撑服务川藏铁路的建设。

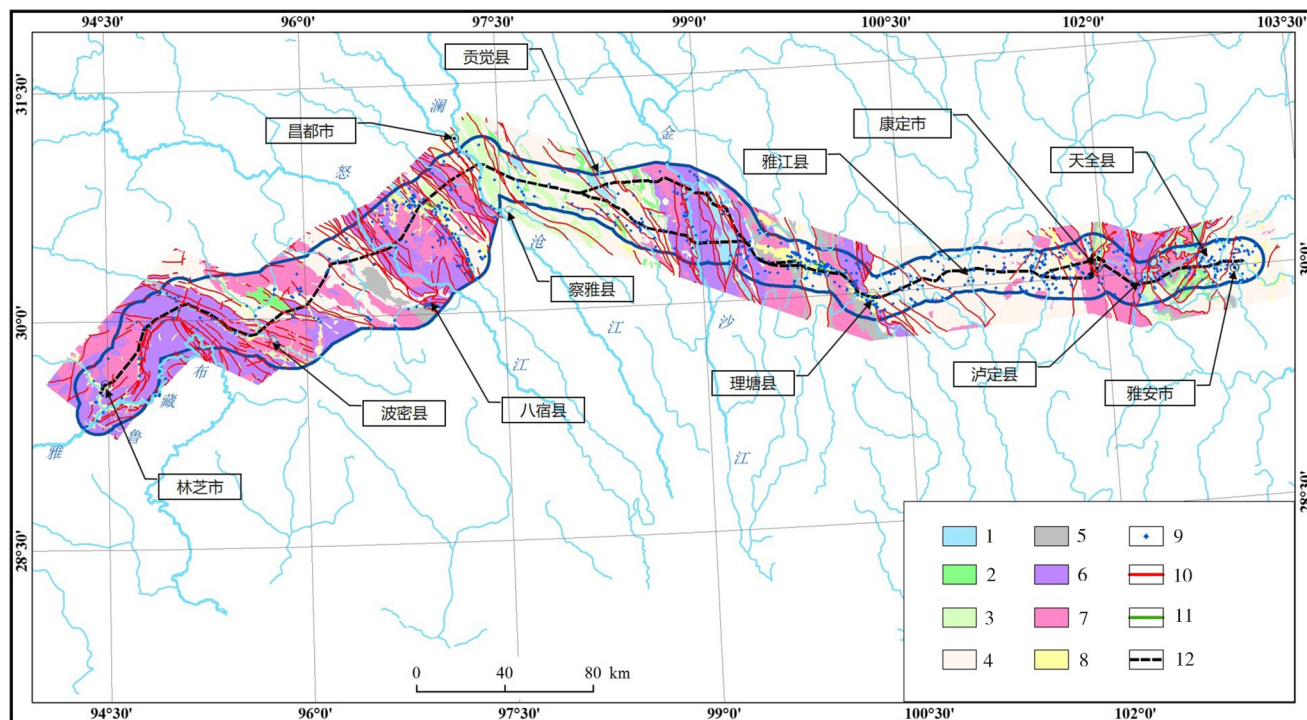


图 14 水文地质遥感解译图

Fig. 14 Remote sensing interpretation map of hydrogeology

1—纯碳酸盐岩类溶洞裂隙水含水岩组 2—碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙溶洞水含水岩组 3—碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙溶洞水含水岩组 4—碎屑岩类基岩裂隙水含水岩组 5—变质岩类基岩裂隙水含水岩组 6—火山岩类基岩裂隙水含水岩组 7—岩浆岩类网状风化裂隙水含水岩组 8—松散堆积物孔隙水含水岩组 9—泉 10—断层 11—地下水溢出带 12—铁路方案

(2)针对工程勘察的水文地质调查内容要创新。以往工程勘察中的水文地质调查内容主要针对地下水对工程施工的影响,重点解决岩溶突水等问题,而由于工程施工产生的一系列环境地质问题常常被忽略,因此可能引发轰动性的群体性事件。现在要在此基础上进一步分析工程建设和运营对地下水资源的影响,特别是分析可能造成的泉水衰减和断流等现象,提前处置相关问题或提出相应的对策,助力解决社会矛盾问题。

参考文献

- [1] 梅安新,彭望球,秦其明,等.遥感导论[M].北京:高等教育出版社,2001:5-6.
- [2] 程洋,吕勇,涂杰楠,等.遥感技术在岩溶区1:50000区域地质调查中的应用:以黔西北地区为例[J].地质力学学报,2016,22(4):921-932.
- [3] 张志平,吴勇,焦世文,等.遥感地质解译路线在西藏羌塘地区1:5万区域地质调查中的应用[J].甘肃地质,2014,23(3):82-89.
- [4] 程洋,潘星呈.基于遥感和GIS的岩溶区1:5万区域地质填图难易程度分区[J].中国岩溶,2018,37(6):910-917.
- [5] 胡官兵,刘舫,党伟,等.遥感技术在滇西南植被覆盖区地质填图中的应用[J].国土资源遥感,2019,23(2):224-230.
- [6] Mohsen Pournamdari, Mazlan Hashim, Amin Beiranvand Pour. Spectral transformation of Aster and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghan ophiolite complex, south Iran [J].Advance in Space Research,2014, 54(4):694-704.
- [7] 程洋,童立强,郭兆成,等.资源一号02C卫星数据在北京岩溶水资源勘查评价工程中的应用[J].国土资源遥感,2015,27(2):183-189.
- [8] 刘春玲,童立强,丁富海.云南九龙河流域的水文地质遥感影像特征研究[J].工程地质学报,2008,16(s1):188-192.
- [9] Taye Alemayehu, Seifu Kebede, Lanbo Liu. Basin hydrogeological characterization using remote sensing, hydrogeochemical and isotope methods (the case of Baro-Akobo, Eastern Nile, Ethiopia) [J]. Environmental Earth Sciences,2017, 76(13):466-482.
- [10] 李晓明,燕云鹏,刘刚,等.ZY-102C星数据在西藏札达地区水文地质调查中的应用[J].国土资源遥感,2016,28(4):141-148.
- [11] 童立强,郭兆成.典型滑坡遥感影像特征研究[J].国土资源遥感,2013,25(1):86-92.
- [12] 刘汉湖,杨武年,杨容浩.结合遥感和地学知识的高原机场工程地质评价[J].测绘科学,2014,39(7):94-97.
- [13] 梁京涛,王军,王猛,等.四川省绵竹至茂县公路工程地质遥感调查与评价[J].灾害学,2012,27(1):83-86.
- [14] 杨金中.遥感技术在工程地质选址工作中的应用[J].国土资源遥感,2007,19(4):90-94.
- [15] 中国铁路工程总公司.中国铁路勘测遥感50年[J].铁道工程学报,2006,23(S1):1-8.
- [16] 王智,卢建康.航测遥感技术在艰险山区铁路选线中的应用[J].铁道工程学报,2006,23(S1):76-81.
- [17] 程洋,唐建生,苏春田,等.高分一号数据在岩溶水文地质调查中的应用[J].国土资源遥感,2017,29(S1):58-66.
- [18] 刘元章,刘久荣,刘凯,等.北京“洼里砾岩”的成因及时代探讨[J].中国岩溶,2019,38(3):318-324.

Preliminary study on hydrogeological conditions of Ya'an-Linzhi section of Sichuan-Tibet railway

CHENG Yang, WANG Yong, YANG Yanfang

(Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, MNR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract This study aims at the actual needs of the survey, design and construction of the Ya'an-Linzhi section of Sichuan-Tibet railway. Based on remote sensing geology and hydrogeology, and by using the method human-computer interaction interpretation combined with automatic extraction of remote sensing information, We completed 1:5 million hydrogeological remote sensing interpretation within 15 km of both sides of the railway line and clarified the hydrogeological conditions of the survey area. The research results provide basic hydrogeological data for the investigation and design of this railway section, and effectively support the construction of the Sichuan-Tibet railway.

Key words Sichuan-Tibet railway, hydrogeology, remote sensing

(编辑 张玲)