DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2021. 03. 02

# 超城高海拔宇宙射线观测站场区水文地质条件 及截排水方案对比

尚彦军<sup>1,2</sup>,金维浚<sup>1</sup>,肖刚<sup>3</sup>,何万通<sup>4</sup>,杨朋<sup>5</sup>,白云翔<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国科学院高能物理研究所,北京 100049; 4. 水电水利规划设计总院,北京 100120; 5. 中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170)

摘 要: 针对高海拔区花岗岩弱透水和松散堆积层厚度及地下水位变化较大等特征,采用过水断面测量、高密度电法物探、钻探等技术手段,对稻城海子山高海拔宇宙射线观测站(LHAASO)场区进行水文地质研究,分析河水流量、地下水位变化及其与覆盖层厚度和基岩面埋深等关系。结果表明:盆地中地下水埋深基本在5 m以内,水位高程与地面高程呈线性关系,基岩面埋深小的部位往往地下水位较低,说明基岩面起伏对地下水位影响较大;地表水质属矿化度低、硬度低的 I 型水(HCO<sub>3</sub> - Na + K - Ca 型水),显示花岗岩岩性对水质影响明显;基于上述认识提出既保护 LHAASO 场区安全同时又便于利用优质水源的地表截排水方案。研究结果已被场区排水工程设计和施工采纳,并取得了较好的工程和环保效果。

关键词:水文地质条件;地下水位;水质;地表截排水;高海拔宇宙射线观测站;稻城

中图分类号:P641.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0006-12

## Hydrogeological conditions of the LHAASO site in the plateau area of Daocheng County and comparison of its water interception and drainage schemes

SHANG Yanjun<sup>1,2</sup>, JIN Weijun<sup>1</sup>, XIAO Gang<sup>3</sup>, HE Wantong<sup>4</sup>, YANG Peng<sup>5</sup>, BAI Yunxiang<sup>3</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 5. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** In view of the complex hydrogeological conditions in high altitude area, the Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) site in Daocheng Haizishan was studied by means of stream outflow measurement, high-density electrical geophysical prospecting, drilling and other technical approaches. The variation of stream flow and groundwater level of different zones and their relationship with the overburden thickness and buried depth of the moderately weathered bedrock surface were obtained. The results show that the groundwater level, generally 5 m under the surface, has a good linear relationship with the ground elevation, and the groundwater level is often low in places with small buried depth of the bedrock surface, which indicates that the fluctuation of bedrock surface has a great impact on the groundwater level. The surface water is classified as grade I (water type: HCO<sub>3</sub> – Na + K – Ca) with low mineralization and hardness, indicating that the granite lithology has a great impact on the water quality. Based on the above, the water interception and drainage scheme which can protect the safety of LHAASO site and take advantage of high quality water resources was put forward. The scheme was then adopted in the project and produced good results.

**Key words:** hydrogeological condition; groundwater level; water quality; surface water interception and drainage; Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO); Daocheng County

收稿日期:2020-03-14; 修回日期:2020-10-25

## 1 研究背景

稻城县以高海拔亚丁和海子山为主的香格里拉 文化生态旅游而闻名,对其水文地质研究主要在温 泉的水文地球化学<sup>[1]</sup>、同位素组成及其冰雪消融来 源<sup>[2]</sup>、旅游经济开发<sup>[3]</sup>等方面。作为世界海拔最高 的民用机场,亚丁机场设立了气象站开展了多年的 观测,得到该地多年降水变化特征<sup>[4]</sup>。为更好地开 发利用水资源而建设的水电站多集中在稻城河下游 地区<sup>[5-6]</sup>。不同于受断裂构造控制而流量大、动态 变化小的温泉,河谷上游地区大片花岗岩分布区受 古冰川作用而发育众多海子,堆积了大量第四纪冰 碛物。受控于大气降水、冰雪融水及地表径流补给, 地下水赋存和转化形式多样,显示出高原花岗岩区 独特的水质和水量变化特点。

高海拔宇宙射线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO) 观测基地位于四川省 甘孜州稻城县桑堆乡的稻城 - 理塘公路 100 km 道 班附近、亚丁机场东偏北约 10 km 处。LHAASO 占 地面积 135.96 hm²,分布在直径 1 270 m 的大圆范 围内,场地平均海拔4410 m。项目核心科学目标是 探索高能宇宙线起源以及宇宙演化、高能天体演化 和暗物质研究<sup>[7]</sup>。中部布置3个净深5 m 的大型水 池(水切伦科夫探测器阵列(water Cherenkov detector array, WCDA)),有效总面积78 000 m<sup>2</sup>。周边有 装配大厅(水池西 473 m)、变配电室、净水站、超纯 水站、净水循环站(4个)、标定室(2个)等一层建 筑,总建筑面积 4 204.76 m<sup>2</sup>。工程要求场地开阔平 整以减少工程开挖量,但保有一定量天然水源供给 以满足水池充注需求,同时考虑防洪需要合理截排 水。影响场区工程条件优劣、对设计和施工有重要 影响的是广布的地表水、尺寸大而分布广的冰碛块 石和湿地沼泽等3类对象。主要工程地质问题为河 道岸坡冲刷和地下水潜蚀、表层土冻融以及盆地内 不同成因和结构地质体接触带、不同埋深基岩面起 伏所产生的地基差异沉降变形等问题。

2014 年选定巴隆曲上游的场地<sup>[8]</sup>,2016 年开展工程地质详勘,范围为上述水池及建筑物区域<sup>[9]</sup>。勘察结果表明其水文地质条件基本满足工程需求。2020 年 2 月以来该观测站科学观测数据获取稳定,LHAASO工程设计和施工取得成功,说明对观测基地的水文地质条件勘察结果和建议科学可行。因此,有必要对其进行分析总结,以便为高海拔区类似工程建设和水资源科学利用提供参考。

## 2 研究区域气象地理条件

## 2.1 气候和气象特征

稻城县 6-9 月处于雨季,10-次年 5 月处于干季,干雨季节分明,具有典型高原干-雨季气候特征<sup>[10]</sup>,亚丁机场气象站 2009-2011 年及 2012 年1-10 月气象参数统计见图 1。根据图 1 中的2009-2011 年气象数据可知,场址区年均降水量为652.8 mm,月均最大降水量为204.4 mm,出现在 7月,占年均降水量的31.3%,月均最小降水量为0.1 mm,出现在 12 月(图 1(a));降水集中在 5-9 月,此间降水量占全年总量的93%以上,10-次年 4 月降水量极少,仅占全年总量的7%,6-9 月降水量为575.0 mm,占全年总量的88.1%,2-5 月春季降水量不大,但蒸发量较大(图 1(a));全年日降雨量≥5.0 mm的平均降水日数为41 d,其中35 d集中在6-8 月,其天数占全年降水日数的85.4%,6-9 月天数占90.2%(图 1(c))。

全年平均降雪日数(含雨夹雪)为42 d,主要集中在3-5月上旬。全年积雪日为28 d,集中在1-4月和11-12月。全年最大积雪深度为35 cm。10-次年1月为寒冷而干旱的冬季。

亚丁机场新气象站仅记录了 2012 年 305 d (2012 年 1 月 1 日至 10 月 31 日)的气象数据。由图 1(d)可知,2012 年降水集中在 6 - 9 月,该期间降水强度大、天数多,大雨(24 h 降水量≥25.0 mm)数为 5 次,分别出现在 6、7、8 月,其中最大日降水量为 48.3 mm,出现在 8 月。从 2012 年不完全气象记录结果来看,年降水量大于等于 663.8 mm,年蒸发量大于等于 1 083.8 mm。

## 2.2 湖泊和河流

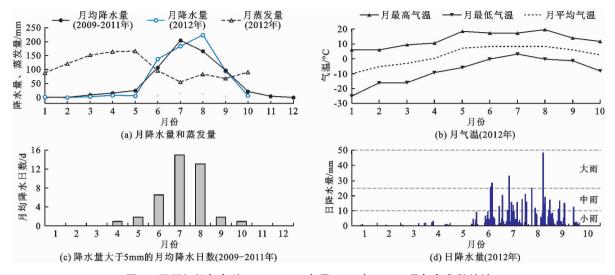
稻城河为水洛河上游段,后者又名冲天河、无量河,是金沙江左岸一级支流,全长321 km,流域面积13720 km<sup>2</sup>。本研究区河流主要为稻城河上游的巴隆曲,发源于稻城县北部海子山,源头海拔高程在4600 m以上。

图 2 显示了巴隆曲上游海子山花岗岩区地形地质状况及水系和冰蚀湖盆(海子)分布。第四纪冰川作用塑造了稻城古冰帽区 1 145 个冰蚀盆地,密度为 0.3 个/km²,以面积 2~3 km²的为数最多<sup>[11]</sup>,较大的有兴伊错等冰蚀-冰碛湖。冰川作用形成多条冰碛垄和 2 个古堰塞湖,呈小盆地状。

图 3 为 LHAASO 场区地质条件、河流分布及测流点位置。由图 3 可见,穿过场区的西小河和东小

河在场地内呈曲流状,与场地外部南小河在西南处 汇合形成巴隆曲河;河流两侧河曲洼地发育有季节 性湖泊和沼泽地,河流冲刷及湖沼沉积作用改变了

场地多条冰碛垄:在低洼汇水盆地或河溪交汇处发 育有河曲型沼泽,可见河流在洪水期改道而形成的 大量牛轭湖。



亚丁机场气象站 2009 - 2011 年及 2012 年 1 - 10 月气象参数统计 图 1

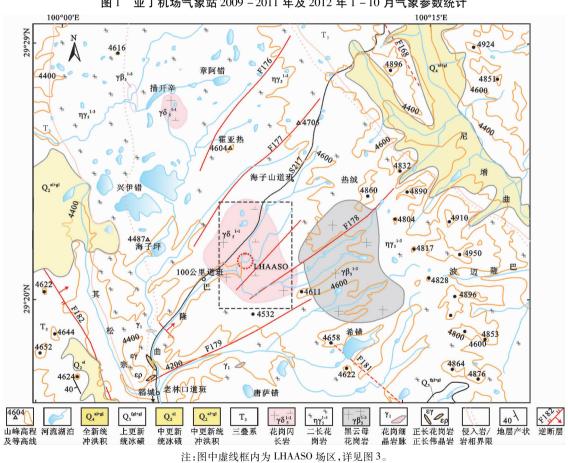


图 2 巴隆曲上游海子山花岗岩区地形地质状况及水系和冰蚀湖盆(海子)分布

## 2.3 地形地貌

LHAASO 场址地处稻城县城北部高原台地,属 青藏高原东南缘丘状高原向高原峡谷过渡的山原地 带。川西山地西北高、东南低,据切割深度可分为高

山原和高山峡谷区,主要山脉为沙鲁里山。沙鲁里 山平面海子山高度最高,中心部位是夷平面上残留 的蚀余山,曾为冰川作用中心。受区域构造和第四 纪冰期冰川、间冰期湖泊和河流作用影响,形成了典 型的冰川侵蚀和堆积地貌,成为青藏高原最大的古冰体遗迹,有稻城"古冰帽"之称,覆盖于海子山海拔高程 4 500~4 700 m 的山顶夷平面之上,冰碛末端基本分布在海拔高程 3 750~3 800 m<sup>[12]</sup>。稻城冰帽以中更新世倒数第 3 次冰期规模最大,冰川厚度超过 500 m。全新世高温时期稻城古冰帽绝大部分消失,在海子山道班附近发现底碛表面的黑褐色古土壤层<sup>[13]</sup>。

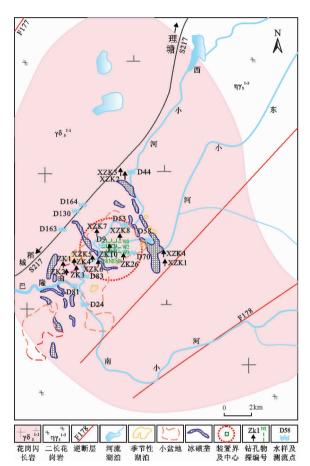


图 3 LHAASO 场区地质条件、河流分布及测流点位置

海子山为典型的丘状高原,向南渐变为山原和高山峡谷地貌。海拔高程多在 4 400~4 500 m,高出场区河流 120~400 m。山顶面波状起伏,高差 20~30 m,为中等强度侵蚀和堆积带,发育冰蚀丘陵和冰蚀盆地以及冰碛垄和鼓丘。低洼地常见含巨大漂砾和厚度不等的底碛。在地形低洼带以堆积作用为主,属于冰川中等侵蚀和堆积带,发育大片冰蚀岩盆、羊背岩群和宽浅的水下槽谷,在出口处停积了大片低矮终碛垄<sup>[13]</sup>。在低洼盆地中发育海子和沼泽(图 2)。

LHAASO 场区规模巨大的冰碛垄后期遭受河流 侵蚀状况见图 4。S217 省道 0 + 100 km 桩号附近可 见与 NE 向河流走向近垂直的多条冰碛垄。垄长 200~300 m,宽30~40 m,可见高度5~20 m。现场调查发现约8 km² 范围内曾发育有7条冰碛垄、4个堰塞湖盆(图3),中间2个面积较大的盆地为现代草场,它们之间被冰川作用而残留的横穿侧碛垄所分隔,后期河水突破这些冰碛垄堵塞而从某豁口处流出(图4(a))。部分冰碛垄断续延伸很长,形状上或呈弧形终碛,或呈长条形侧碛变化。

场地处在 NE 走向的狭长沟谷中间,平均海拔高程约 4 400 m,平均高差约 20 m,地势较为开阔。整体地形为南北高中间低,东高西低。场地中心点与 WC-DA 所处区域地形较平缓,整体为一小型低平平台(岩盆)。据现场地质调查分区,场地中部以受河流冲积形成的砂砾区、湿地沼泽区为主,场地周边及外围主要为冰川堆积的大孤石区。其中沼泽湿地区面积约占19%,砂砾区约33%,大孤石区约占48%<sup>[8]</sup>。

现代河流冲刷和堆积作用塑造着当今地貌。河流纵坡降较缓,以侧蚀作用为主,留下了巨石分布的河流切穿的豁口,在地形低洼地带以堆积作用为主。场地西部近 S217 公路停车场曾发育大弧形终碛垄。测流断面 DC44 西面的大冰碛垄在场地东部,该垄豁口即为西小河穿越而形成(图3)。

## 3 水文地质条件

#### 3.1 含水层与隔水层

从地震构造看,场地位于两条第四纪活动断裂,即西部德格 – 乡城活动断裂和东部理塘 – 德巫活动断裂之间,场地避开了活动断层和区域性大断裂。稳定的构造地块使得场地区域花岗岩较完整,只有规模不大的 NE 向老断层发育<sup>[14]</sup>。

场地区域位于义敦岛弧带,出露大片印支期到 燕山期花岗岩<sup>[15]</sup>,可划分为四期六幕。印支期花岗 岩呈北西 - 南东展布、略向西弧形凸出的岩基状,局 部夹有细晶花岗岩脉、花岗正长岩脉等。与本工程 密切相关的是侵入于早期冬措黑云二长花岗岩体中 的海子山花岗闪长岩<sup>[14]</sup>。海子山场区出露主要为 印支晚期中粒黑云母花岗闪长岩(γδ<sub>5</sub><sup>1-1</sup>)(图 2)。 海子山花岗岩呈浅肉红色,为中粗粒结构、块状构 造。零星发育细晶岩脉、石英脉等中酸性岩脉,与原 岩呈熔融接触,结合紧密。

厚几米至数百米的第四系主要分布在河谷、山麓等地带,包括冰碛层、冰水堆积及河流冲洪积等松散堆积物。冰碛层主要由厚薄不均的含碎石砂土及漂砾组成,总体呈垄岗薄、坳地厚的变化特征。冰川冰水堆积为漂块石、含碎石砂土。河流冲洪积堆积

物为砂卵石等。

场区水文地质条件较简单,主要为覆盖层孔隙潜水和基岩裂隙水两类,其受大气降水和冰雪融水的补给,向西小河、东小河、巴隆曲河和低洼地带排泄。巴隆曲河为场区最低侵蚀基准面。第四系松散堆积物发育,致使孔隙水发育而接受邻近河水补给。完整坚硬的花岗岩为隔水层,基岩裂隙水不发育。覆盖层孔隙潜水和基岩裂隙水特征分述如下:

(1)湖滨相细碎屑(砂)大孔隙含水层。在间冰期发育一定规模冰碛湖,或冰碛垄围限而成堰塞湖,发育湖相地层。现多见残留在河谷盆地边缘高处的成片裸露粗砂,分选相对好而级配差,多为2~4 mm细砾和大部分粗砂,其内摩擦角一般为25°~35°,内

聚力基本为零。在湖滨或河流洼地,浅表发育厚约 10 cm 的黑色高原草甸,其后缘高处分布环带片状、环绕盆地的草场或"砂滩"。在表层草甸破坏后,其下松散粗砂易出现流沙或水土流失(图 4(c))。

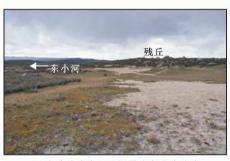
(2)沼泽相粉砂小孔隙含水层。在几个盆地中河曲发育的邻近低洼部位多为灌木和水草发育的沼泽湿地。草甸多为孤立分布,其间多细流和滞留清水。在局部残留的牛轭湖中多见粉黏粒物质,少有泥碳沉积(图4(d))。卫星影像显示沼泽地冬季多为结冰的积水洼地,曲流河岸呈常年性积滞水,是高原面上自然的蓄水和调水池。沼泽下面多为粉砂组,黏粒组份较少。沼泽洼地中一些小型牛轭湖发育反映出雨季洪水冲刷的改道作用。



(a) 场地南侧的侧碛垄被东西小河汇合后穿越而过 (2014-09-17, 镜头向W, 该处也是河水样采集点)



(b) 西小河遇冰碛垄后流向由向南改为向东 (2014-09-23, 镜头向S, 该处也是流量现场测量点)



(c) 在盆地边缘环形裸露分布成片砂地 (2014-09-17, 于场地南侧丘状山北坡, 镜头向E)



(d) 曲流河岸的沼泽湿地带和牛轭湖 (2014-09-28, 镜头向S)



(e) 场地中心处在河流I级阶地呈现的低平岗地 (2014-09-17, 镜头向S)



(f) 场地中间狭长阶地东端的季节性湖泊 (2014-09-20, 镜头向W)

图 4 LHAASO 场区规模巨大的冰碛垄后期遭受河流侵蚀状况

(3)花岗岩裂隙水。浅表风化裂隙水发育,向深部一般为隔水岩层,只有在节理密集带或断层带才呈现导水特性。完整的微风化花岗岩构成孔隙含

水层之下大范围的隔水层。地下水埋深一般较浅, 浅部富水性好。在夷平面高地形成的冰蚀岩盆构成 了储水而底部隔水的小型湖泊(海子)和水体,在低 洼盆地中易形成曲流河沼泽。

钻孔揭示花岗岩多呈中、弱风化,部分呈强风 化。强风化花岗岩厚为 1.0~7.8 m,进入中风化深 度5.9~20.3 m,未揭穿中风化花岗岩。场区基岩顶 面起伏变化较大,埋深为4.6~25.4 m不等,顶面高 程为 4 368.1~4 395.1 m, 总体呈北高南低、东高西 低[9]分布。

#### 3.2 汇水补给条件

本区属于高原夷平面(4 400 m)上的多样微地 貌(盆垄沟岗)区。场地中发育有近南东走向的7 条冰碛垄和呈串珠状排列的4个椭圆形盆地。场地 处于区域分水岭中间,北东走向的河流洼地系多处 被冰碛垄和冰蚀鼓丘分割的盆地,河流汇水主要来 自北东和南东方向。盆地中水力坡度小,曲流河侧 蚀作用明显,发育 I 级堆积阶地和河流冲洪积以及 沼泽淤积。

场区微地貌主要为冰碛垄岗、冰碛台地、河流阶 地、残留湖盆、堰塞湖、刨蚀沟、鼓丘和高台岗地等。 场地内部北东方向为两条近平行的小河,即西小河 和东小河,呈蜿蜒曲流,而南东方向为第3条河流, 即南小河,其流向由近平行于前两条河流的 NE 向 急转为近南北向,在场地外围汇合形成巴隆曲河。 上游被冲沟深切割,高差 30~70 m。在架空石块山 坡分布地带,常见地下水溢出和漫流。盆地中部河 曲在低洼处形成湖沼,在高台地支沟上部呈现水流 滞缓的湿地或储汇水洼地(图 4(e))。在高出河面 约4 m 的范围较大的 I 级阶地中,发育有浅水湖泊, 多为季节性过水湖泊,湖水清澈而水深一般小于0.5 m(图 4(f))。其上游接纳高处浅谷或湿地汇水,下 游出口为漫流回返河道。场地区域地表为现代河曲 发育的残留冰碛湖盆地形,从地表水和地下水循环 系统来看属于地下水溢出带和地表水局部储汇水 -总体径流带,具有较好的汇水补给条件(图2、3)。

据地质勘察时(2016年8月)的实测地表水位, 中心场地区域东、西小河水深 0.3~0.8 m,一般为 0.5~0.6 m,水位高程4393~4396 m,水位最低高 程 4 393 m 位于场地东南部西小河与东小河交汇 处,最高高程 4 396 m 位于场地北部的东小河入场 地处。据调查,东、西小河最高洪水位比调查时的地 表水位高出1 m 左右,故场地区域最高设计洪水位 高程为 4 397 m<sup>[9]</sup>。

## 河流径流量及水质

结合现场多处测流断面监测数据和流域面积、

大气降水分布和地表径流系数,实测并计算河流及 S217 公路过路涵洞流量。

### 4.1 测量点所属河溪

在场地中选取流量测点和水样采集点共11个 (其中8个为溪流流量测点和水样采集点,3个为 S217 公路涵洞流量测点,见图 3)。测流点 D44 和 D53 属西小河,测流点 D58 和 D70 属东小河。西小河 与东小河首先在场地中部交汇,在其汇成的干流处选 取测流点 D83 进行流量测计,此干流最终与南小河在 南部交汇,形成一条向场地南西流出的总干流巴隆 曲。在南小河下游选取测流点 D24、在总干流选取测 流点 D81 进行流量测计。沿 S217 公路自南向北对于 3 处涵洞(测流点 D163、D130 和 D164)进行过流量 测。图 3 中同时标出了水样采集点 D58、D9。

## 4.2 测量方法简述

选取河道较平直、水流较平稳的河段,采用传统 流速面积法测量河流各测点处的流量(图4(b)为测 量场景)。对于3处涵洞,因其水流量较小,采用易 操作的量杯法进行流量测量。

流速面积法是在垂直于流向的河道横断面上进 行相关水力要素的测量和流量计算。在断面垂线上 用测深杆测量水深,并通过缆索测定垂线与岸边起 点的间距。两相邻垂线的间距乘以其间平均水深为 部分过流面积,其总和为断面过流面积,断面流速与 断面过流面积的乘积即为测点处断面流量。

采用流速面积法进行流量测量时,在测量断面 上、下游选取间距约为5 m 的两个断面,测量断面的 选取遵照以下原则:两测量断面所在河道宽度变化 较小,两断面间水流较平稳,避开水流过于湍急或漩 涡处,避开河床上石块或卵砾石过大过多处。另外, 量测尽量选择在无风时段进行。

在现场采用秒表、漂浮物等测量河道断面流速。 通过计算时间 t 内漂浮物位移 L 便可求得水流流速 V,再采用公式(1) 求得该河道断面流量  $Q_{m}$ 。

$$Q_{\text{pi}} = S \cdot V$$
 (1)  
中:  $Q_{\text{pi}}$  为河道断面流量,  $m^3/s$ ;  $S$  为过流断面面

式中: $Q_{ij}$  为河道断面流量, $m^3/s$ ; S 为过流断面面 积, $m^2$ ; V 为断面流速, $m/s_o$ 

因涵洞测流点 D164 和 D130 处的水流量较小, 故选择量杯法测量流量。通过反复测计量杯中的水 达到某个量程M时所需时间t,由公式(2) 求得涵洞 过流流量。

$$Q_{\tilde{\mathbf{M}}} = M/t \tag{2}$$

式中: $Q_{\text{M}}$  为涵洞过流流量, $m^3/s$ ; M 为量杯中水的 体积, $m^3$ ; t 为测流历时, $s_o$ 

#### 4.3 测量结果汇总

对某测点上、下游两个断面分别量取过流面积和计算流量,则该段河流流量为两个断面流量的面积加权和平均值,即(上游断面各分段流量乘以面积+下游断面各分段流量乘以面积)/2个断面面积之和。

为降低测点流量的人为测量误差,需对所测数据进行核检。通过计算得出总体取平均值与剔除极大或极小值之后取平均值的结果相差不大,表明2014年9月现场考察中人为测量的地表水流量的

计算结果较为可信。将场地各测流断面的流量计算结果列于表 1。自上游流入场区的地表水为: 西小河(测点 D44) + 东小河(测点 D58) + 2 个涵洞(测点 D164 和 D130),其总流量为 0.782 m³/s。三者之和小于上游两河交汇处(D83 测点)干流流量 0.948 m³/s,说明地表径流对盆地中地下水有补给作用。下游有南小河水汇入,总干流流量达 1.295 m³/s。将所测流量用于雨季 150 d、旱季 215 d 折减 30% 作为年径流量,结果为 23 999 976 m³,取整为 2 400 × 10<sup>4</sup> m³。

	18	I LIIAASO &	勿地古沙儿吗 医	4 1-20 1201 1201 121 1 3	+ 14 不		
测点位置	测点编号	上断面 面积/m²	下断面 面积/m²	ì	流量/		
				最小值	最大值	平均值	$(m^3 \cdot s^{-1})$
西小河	D44	1.286	1.567	0.060	0.520	0. 261	0.376
	D53	1.278	1.220	0.085	0.520	0.222	0.278
东小河	D58	1.500	1.336	0.174	0.538	0.271	0.385
	D70	1.005	0.837	0.216	0.375	0.309	0.287
北涵洞	D164	0.049	0.021	0.436	0.574	0.483	0.020
中涵洞	D130						0.001
西、东小河汇合	D83	1.007	1.474	0.531	0.848	0.738	0.948
南小河	D24	0.785	0.848	0.497	0.760	0.667	0.545
南涵洞	D163						0.001
总干流	D81	2.644	2,692	0.356	0.769	0.549	1.295

表 1 LHAASO 场地各测流断面现场测流计算结果

2014年9月现场测量时发现河岸洪水迹线高 出水面约0.5 m。考虑到非汛期水量有所减少,故 该次现场所测流量不是洪峰流量,水流清且流速不 大,基本代表正常丰水季地表径流量。

另外采用降水产流方法计算径流量。根据1:100000地形图和Google卫星影像图计算出西小河、东小河、南小河流域面积分别为10.13、7.23、15.96 km²。S217公路西侧的涵洞进入场区之前的汇水面积按5 km² 计算。考虑到高原地形和稻城冰帽发育特征,花岗岩完整性较好,且植被不发育,灌木持水能力差,径流系数取0.9<sup>[16-17]</sup>。结合年降水量650 mm,计算得到3条河流年地表径流量分别为:西小河5926050 m³;东小河4229550 m³;南小河9336600 m³,公路西侧经由涵洞汇入的年径流量约为2925000 m³。因而每年汇入和流经本场地的地表径流量约为2241.72×104 m³,取整后为2242×104 m³。

#### 4.4 地表水质

对东小河和西小河水样的化学全分析结果见表

2。由表 2 可见, 矿化度、硬度、阴离子和阳离子浓度均很低。矿化度约为 0.085~g/L, 小于 1.0~g/L, 属淡水; 硬度(以  $CaCO_3$  计) 小于 75~mg/L, 属极软水。从水化学分析结果计算的离子毫克当量数及毫克当量百分数看,阴离子  $HCO_3$  的值最高,阳离子  $K^+ + Na^+$ 的值最高。河水 pH 值略高于 7.0。

用分式形式表示水化学成分的库尔洛夫式表明,两河均为 HCO<sub>3</sub> - Cl - (Na + K) - Ca 型水,属中性的低矿化度、低硬度的 I 型水(阿廖金分类法)。西小河的水化学库尔洛夫式如下:

$$CO_{0.\,035}^{2}M_{0.\,084}\frac{HCO_{48.\,54}^{3}Cl_{33.\,74}SO_{17.\,72}^{4}}{\left(\:Na+K\:\right)_{\,48.\,86}Ca_{30.\,52}Mg_{20.\,62}}$$

两河的总阳离子当量浓度为 0.675 meq/L,低于世界河流平均值 0.725 meq/L<sup>[18]</sup>。总阴离子当量浓度 1.16 meq/L,pH = 7.2,偏中性。该结果与花岗岩为主的赣南小流域 23 个河水样品相应参数平均值<sup>[19]</sup>较接近,尤其是 K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>含量较高,反映大范围裸露花岗岩对水质离子成分的影响。

受人类活动影响,地表水水化学类型虽可改变,

但相对稳定。例如,史栾生等[20]对花岗岩广泛分布 的广东省主要河流 2005 年调查成果与第一次水资 源调查成果对比表明:矿化度本次和第一次一、二级 水调查占比分别为97.57%和100%,总硬度本次和 第一次一、二级水分别为84.04%和100%。从水化 学类型来看,两次调查评价均以重碳酸盐类水为主。

由于本场区浅表大孔隙土层透水性属强 - 中等透 水性地层,贯通性较好,且两条小河从场地内流过。根 据文献[21]可知,场地环境类型属于J类,对本场区地下 及地表水的侵蚀性 CO<sub>2</sub>、pH 值、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>及总矿化 度等分析成果指标表明,地下水及地表水对混凝土结 构具微腐蚀性,对混凝土结构中的钢筋具微腐蚀性。

表 2 东小河和西小河河水水质的化学全分析结果

<u> </u>	福口	阴离子				阳离子			总矿	<i>以7</i> ∓ 庄:	暂时	4n4m	游离	
河流	项目	Cl -	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	合计	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K + Na	a+ 合计	化度 '	总硬度	硬度	忠侧足	$CO_2$
	浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	13.900	9.870	34.360	58. 130	4. 120	1.670	20.450	26. 240	84.36	17. 15	17. 15	28.21	34.58
西小河	毫克当量/L	0.392	0.206	0.563	1.161	0.206	0.139	0.818	0.675					
	毫克当量百分数/%	33.740	17.720	48.540	100.000	17.710	11.960	70.330	100.000					
	浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	13.900	7.890	37.110	58.900	4. 120	1.170	21.580	26.870	85.76	15. 10	15. 10	30.47	35.54
东小河	毫克当量/L	0.392	0.164	0.608	1.164	0.206	0.098	0.863	0.652					
	毫克当量百分数/%	33.630	14. 120	52.250	100.000	17.660	8.360	73.980	100.000					

注:(1)测试数据来源于文献[9],采样日期为2016-08-18;(2)总硬度、暂时硬度和总碱度均以CaCO。计。

## 5 地下水变化特征

#### 5.1 地下水水位

场区水文地质条件较简单,主要为覆盖层孔隙 潜水和基岩裂隙水两类,受大气降水和冰雪融水补 给,向西小河、东小河、巴隆曲河和低洼地带排泄。 场地中部地形平缓开阔,西小河、东小河坡降较缓, 切割较浅。盆地中透水性好的阶地堆积厚度较大, 地下水主要属第四系孔隙潜水,砾砂和粗砂层为主 要含水层。潜水面受河水位涨落影响较大。场地周 边多处见泉水出露,流量较小,在低洼地带积水形成 沼泽或湿地。

场地布置钻孔31个(一般性孔26个,控制性孔5 个)、探井15个。建筑物区勘察工程按周边线及角点 布置,间距15~40 m。考虑到 WCDA 水池区结构形 式和技术要求,在水池区域边角及中心线上按55~75 m 布设勘察钻孔。一般性勘察孔深度为10~15 m,控 制性勘察孔深度为30 m。钻孔揭示场地外围大孤石 区地下水位埋藏较深,多位于基岩顶面附近或以下。 场地中部和南部沼泽湿地区和砂砾区地下水位较浅。 勘察时实测地下水位埋深 0.1~10.8 m,水位高程为 4 387.4 m(10 号孔)~4 396.0 m(26 号孔)(表 3,钻 孔位置见图 3)。根据钻孔揭露,在场地西部边缘的 中南侧及场地中心靠近河流区域的覆盖层中存在粉 土软弱层,埋深0~11.2 m,厚1.4~5.9 m,呈透镜状

产出于砂土层中。分析应为堰塞湖相沉积形成,易受 压缩产生变形、地基承载力低。

表 3 钻孔水位测量结果表 [9]

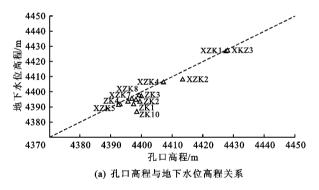
钻孔 编号	孔口高程	终孔水 位埋深	终孔水 位高程	覆盖层 厚度	基岩顶 面高程		
ZK1	4397.4	5.1	4392.3	25.2	4372.2		
ZK2	4399.3	5.0	4394.3	17.2	4382.1		
ZK3	4399.2	0.9	4398.3	4.1	4395.1		
ZK4	4395.5	1.2	4394.3	4.6	4390.9		
XZK1	4427.5	0.3	4427.2	> 10.5			
XZK2	4413.2	4.5	4408.7	2.1	4411.1		
XZK3	4428.0	0.5	4427.5	>10.0			
XZK4	4407.1	0.3	4406.8	4.2	4402.9		
XZK5	4392.6	0.6	4392.0	> 10.1			
XZK6	4393.0	0.7	4392.3	> 10.1			
XZK7	4398.0	2.7	4395.3	> 10.3			
XZK8	4399.9	2.3	4397.6	>10.4			

## 5.2 含水层渗透性

为了解土层渗透性做覆盖层抽水试验5段,试 验段总长度 15 m。根据钻孔抽水试验结果,场地区 覆盖层 0.0~10.0 m 土体以漂块石、碎石土、砾砂和 粗砂为主,渗透系数  $K = 1.15 \times 10^{-1}$  cm/s,为强诱 水;10.0 m 以下土体以粗砂和中砂为主,K =4.27~4.92×10<sup>-3</sup> cm/s,为中等透水<sup>[22]</sup>。

在稻城河水电规划梯级开发第二级电站日霍水电站,坝址处覆盖层厚度超过 40 m,采用悬挂式防渗墙布置方案防渗,计算得到含漂砂卵砾石层的最大渗透坡度降 I 为 0. 13 (允许坡降为 0. 10 ~ 0.15) [6]。LHAASO 场区基岩顶面起伏较大,埋深 4.6~25.4 m 不等,顶面海拔高程 4 368.1~4 395.1 m。钻孔 26 到 10 号孔直线距离 248 m,地下水位高差 8.6 m(水位高程差 = 4 396.0 m -4 387.4 m),平均水力梯度 I = 0.034 68。

如渗透系数 K 取值 5 × 10<sup>-2</sup> cm/s (合 43.2 m/d),按达西定律地下水流速 V = KI,得地下水流速V = 1.5 m/d。根据文献[23]和工程经验,建议采用管井降水。在进行降水方案设计时,降水深度应降至开挖面以下 0.5 m。据已有工程经验及相关工程类比,本场地砂砾层渗透系数 K 值建议为 30~40 m/d。施工宜选择在降水少的旱季,地表径流量较小,块石中间少水而便于炸药发挥作用。施工期应布置好排水系统,预降地下水位,保障施工干场作业。基坑开挖时难以完全有效排水,应以堵截排水措施为主。开挖深度控制在潜水位面以上,做好抗潜水浮力和冻胀力影响的保温防护。砂砾区和大孤石区部分基坑开挖或基础施工前须先工程降水。人



工挖孔桩施工进入基岩后渗透系数低 3~4 个数量级, 裂隙水渗流较小, 可坑内明排。

### 5.3 水位变化原因

钻探揭示地下水面与地面高程及覆盖层厚度或基岩面起伏存在相关关系。从 12 个钻孔的孔口高程和地下水位高程关系曲线看,两者大致呈正相关(图 5(a)),即地面高程大则地下水位高程大,且地下水位一般埋深在 5 m以内,个别孔(ZK10)可大至10.8 m,异常偏低。据本场地 10、19 和 29 号 3 个钻孔波速测试报告,场地等效剪切波速为 339 m/s,场地土属中硬场地土,覆盖层厚 15~20 m,一般大于 5 m,故建筑场地类别为 II 类。覆盖层厚度与水位埋深无明显相关关系。相反,如覆盖层厚度小,即基岩埋深小,水位埋深变大(如孔 ZK10 覆盖层厚约 5 m)(图 5(b))。

为更好掌握含水层厚度和基岩顶面起伏变化情况,在LHAASO工程场地中要求较高的300 m×300 mWCDA区,布置东西向和南北向各3条长300 m高密度电法勘探剖面(图3),采用意大利地震电法系统PASI勘探。参考1:10万地形图和数字地图提取物探剖面地表高程。勘探深度150 m,点距5~10 m,勘探线总长1.8 km。

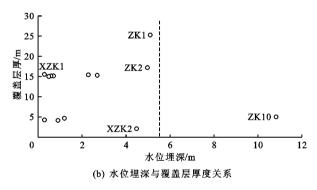


图 5 钻孔地下水位与地表高程及覆盖层厚度关系图

根据不同岩性和特征电阻率差异判断地质体分布特征<sup>[24]</sup>。不同岩性电阻率范围如表 4 所示。由物探反演解释结果可大致确定基岩顶面埋深变化,场地中心区基岩埋深变化情况见图 6。这里基岩指中(弱)风化花岗岩,埋深指其顶面位于地面以下深度。从图 6 可见, WCDA 基岩埋深(因其位于全风化和强风化层之下,因而大于由钻探确定的覆盖层厚度。后者钻探揭露的堆积层深度一般为 15~20 m,变化范围为 14~60 m。

3条东西向剖面方向指向东、从北向南排列,最 北部 W1 剖面基岩埋深从西向东变浅,从超过 40 m 变化到 20 m,剖面中部埋深最浅约 10 m。中间 W2 剖面基岩埋深从西向东变深,剖面中部埋深最浅小于 15 m(ZK10 孔大致位于该部位)。南部 W3 剖面其基岩埋深西部是 WCDA 区域最深地区,埋深可达 90 m。3 条南北向剖面从西向东排列,总体从西向东基岩埋深从 N1 近 50 m 到 N2 和 N3 剖面的超过 20 m。每条剖面基岩埋深从北向南逐渐变浅。在 WCDA 区域西北角有一条近东西走向的隆起带(图 6)。

图 6 综合呈现 WCDA 区基底面。由图 6 可以看出,蓝色部分表示基底面较深区,红色为基底面较浅区。结果显示草场中间基岩面埋深较小,一般在30 m以内。高低起伏总体不大,局部埋深很小,钻孔 ZK10 位于该处。这与其地表面平坦的草场外貌

基本一致。在东、西和南侧河流急拐弯处,显示几个厚度较大低阻坳陷带。在 WCDA 场区地下水位埋深较浅,含水层主要为河流相粗粒砂、砂砾岩层。场地近鼓丘山体地带,岩体含水量少,浅表存在不同厚度风化层。

## 6 截排水方案对比

河流冲刷作用常引起岸坡滑塌,带来边坡不稳 定性问题。场地冰碛垄所在区上部巨块石区架空结 构发育,下部为充填砂砾的较密实块石。在缓坡处 架空的大块石下部往往成为地下水溢出带和径流带。为保证 LHAASO 场区施工和运行安全,需规划实施截排水工程。

最早提出将上游东小河水通过长约200 m 的导流明渠引入西小河,在场地北侧疏直西小河同时兼具排涵洞来水之功效,向西直线引水穿过侧碛垄坳口,直至汇入场地西侧季节性湖,再沿草场与垄岗边缘排泄至南小河。这一方案(方案一)似与场地最大限度布设观测装置的目标存在一定冲突(图7(a))。

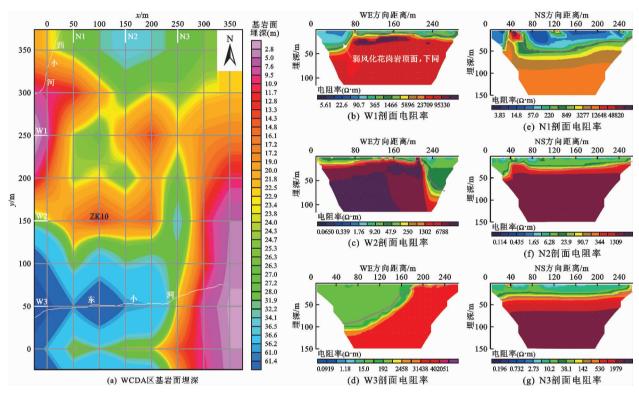


图 6 高密度电法勘探的场地中心 WCDA 区基岩面埋深及电阻率变化情况

表 4 LHAASO 场区岩土体电阻率变化范围

场区岩石类型	电阻率/(Ω·m)
砂、泥土层	几~几十
河流冰川细粒沉积物	1 ~ 100
花岗岩风化层	$1 \times 10^2 \sim 2 \times 10^2$
花岗岩	$> 10^{3}$
无充填冰积漂砾	几千
断层带	1 ~ 100

建设单位提出的方案二是上游修建 SE 向渡槽, 将西小河的水引入东小河;在 S217 道路东侧低洼处 的过水涵洞下游开挖截排水沟渠,将开挖沟渠平行于 公路和块石边坡布置,将过水涵洞上游来水引入下游 湖泊的处理方案。方案二存在的问题是对上游湿地 和局部汇水难以有效收集和处理,且涵洞侧引水明渠 的上游截水效果和开挖沟渠水位抬高对其西侧路堤的浸润破坏作用会成为突出问题(图 7(b))。

方案三是将场地边界设在西小河河道,场地大圆环整体东移,即将场地中心向东移动到鼓丘地形基岩上。将基岩山削平而承载主体的 WCDA 场区。方案三优点是可极大地避免地表常年性流水影响,充分利用基岩山丘周边草场岗地,较好避开了西侧道路涵洞来水的专门开渠引流问题。缺点是其南端有一条 NE 向的季节性水沟,且场地平整时对大面积基岩丘岗工程处理难度和费用较大,但可以用作排水(图 7(e))。

上述3个方案各有优缺点,从工程地质专业技术角度,将方案二与方案三综合后作为预可研阶段优先推荐方案。

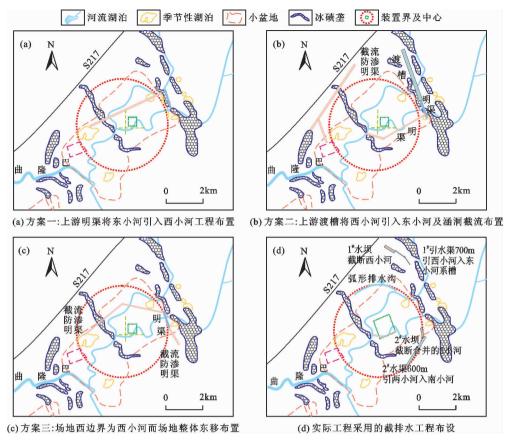


图 7 LHAASO 场地截排水方案对比

在详细工程地质勘察和初步施工方案确定后,对这3个方案做经济、环保和施工安全综合对比,基本选定方案二和方案三组合优化。最终的实施方案优化许多,但工程量增大不少。加之环保要求严格,对方案反复比选而保留场内两条原有河道为天然排水沟系,修一条弧形排水沟引导北边 S217 涵洞来水人原西小河,开挖一条联通渠保持原东小河通畅(图7(d))。

为防排北部的两条小河,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>截水堤修筑于沼泽湿地区,导流明渠主要位于大孤石区,场内附属建筑物主要位于砂砾区,MCD水池基坑开挖(填方)在3个分区均有涉及。1<sup>#</sup>截水堤位于场地外围北西侧沼泽湿地区,地基持力层主要为冲洪积的粗砂及砾砂。1<sup>#</sup>导流明渠位于场地北西侧西小河砾石区及大孤石区,渠基持力层主要为冰水沉积的含砾粉土及粗砂。2<sup>#</sup>截水堤位于场地外围东侧东小河沼泽湿地区,地基持力层主要为冲洪积的粗砂及砾砂。2<sup>#</sup>导流明渠位于场地外围东侧大孤石区,渠基持力层主要为冰水沉积的粗砂及贪砾粉土。

1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>导流明渠路线借用东侧南小河河道后与 下游南小河汇合,充分利用了原有河道,节省了开挖 明渠长度,减少了对原始地貌的改变。 为排泄公路3个涵洞来水的弧形排水沟效果不理想。排水应是往西直排场外即整体排向下游,但实际排水方向却相反,结果水又回到西小河上游,穿过整个场地才能排出。再者,排水沟深度略有不足,大量的水由沟底下方顺坡进入场地北部。

因当地水文、气象资料不全等问题,难以对峰值 洪水做可靠计算,截排水按50 a 防洪标准设计。场 区截排水系统于2016年底基本建成,2017年雨季 前投入使用。从近几年两条堤坝和明渠行洪能力来 看,对5倍于正常流量的洪水行洪没有问题。场内 来水现主要是其自身汇集的水量和公路西侧坡面汇 集经涵洞来水,后者汇水面比现有场地大。实际上 西小河上游截流后,场地基本排掉了这些汇水。从 实际效果看,排水设计思路正确,主流绕过LHAASO 场地,适度留生态流量通过场地;保持原河道为场内 的排水通道,从而利用了自然水流通道,最终取得了 很好的工程效果。虽然场地内仍有部分原先未预见 到的积水区域,只需局部引排即可解决。

## 7 结 论

LHAASO 场区冰碛物堆积物发育,基岩面埋深 10~90 m 变化较大,多种成因、结构不同的堆积物

相接触。汇水盆地范围清楚,以孔隙水为主,地下水埋藏浅,水文地质条件简单。地表水测流结果与降水产流计算结果基本一致,年水量约为2200×10<sup>4</sup> m³。地表水矿化度低、硬度低,水质为I型水,为极软淡水。

盆地中透水性好的阶地堆积厚度较大,潜水面 受河水水位涨落影响较大。地下水埋深受基岩顶面 埋深影响很大。松散堆积物透水性中等,平均水力 梯度 *I* = 0.034 68。

场地潜在地质灾害主要为雨季洪峰带来的大流量洪水、河流侧蚀引发的岸坡滑塌灾害,以及地基土冻融破坏。观测站基坑开挖深度要控制在潜水位面以上,做好抗潜水浮力和冻胀力影响的保温防护。场区基坑开挖时难以完全有效排水,而应以截排水措施为主。上游引流至南小河的方案二和方案三组合得到采纳应用,取得了比较好的工程效果。

致谢:工作得到中国科学院高能物理研究所曹 臻研究员、何会海研究员、白云翔和李鲲鹏副研究员 等的大力帮助和支持。参加野外工作的还有张文 辉、杨长德等。秦大军博士对水质部分结果给出了 有益的修改建议。文中引用了中国电建集团成都勘 测设计研究院有限公司勘察报告中部分数据。审稿 专家和编辑部老师对论文提出了很多有益的修改建 议。在此谨致谢忱!

#### 参考文献:

- [1] 王 茜. 四川稻城温泉同位素、元素水文地球化学特征研究[D]. 成都:成都理工大学,2002.
- [2] 尹 观,倪师军,范 晓,等. 冰雪溶融的同位素效应及氘 过量参数演化——以四川稻城水体同位素为例[J]. 地球学报,2004,25(2):157-160.
- [3] 傅广海. 四川省甘孜州温泉类型、成因及旅游开发模式研究[D]. 成都:成都理工大学,2009.
- [4] 方学东,黄润秋. 青藏高原典型冰碛土的物理力学特性研究[J]. 工程地质学报,2013,21(1):123-128.
- [5] 孟 景,彭彦铭,李敬茹. 四川省稻城河干流梯级开发方案研究[J]. 河南水利与南水北调,2012(16):93-94.
- [6] 杜全胜,闫倩倩. 四川稻城河日霍水电站首部枢纽布置 研究[J]. 河南水利与南水北调,2014(16):70-71.
- [7] 曹 臻,陈明君,陈松战,等. 高海拔宇宙线观测站 LHAASO 概况[J]. 天文学报,2019,60(3):19-1 19-16.
- [8] 中国科学院地质与地球物理研究所. LHAASO 稻城站

- 址(预可研阶段)工程地质勘察和地球物理勘探报告 [R]. 中国科学院地质与地球物理研究所,2014.
- [9] 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司. 稻城高海拔宇宙线观测站地方配套建设项目土建工程岩土工程详细勘察报告[R]. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,2016.
- [10] 四川省稻城县志编纂委员会. 稻城县志[M]. 成都:四川人民出版社,1997.
- [11] 姚檀栋, 冯兆东, 李吉均. 稻城古冰帽的基本特征 [C] // 青藏高原研究横断山考察专集(一), 昆明: 云南 人民出版社, 1983.
- [12] 周尚哲,许刘兵,崔建新,等. 沙鲁里山第四纪地貌发育与 环境演变[J]. 科学通报,2004,49(23):2480-2484.
- [13] 郑本兴,马秋华. 川西稻城古冰帽的地貌特征与冰期 探讨[J]. 冰川冻土,1995,17(1):23-32.
- [14] 四川省地质矿产局. 1: 20 万区域地质图(稻城幅) [R]. 1984.
- [15] 吕伯西,王增,张能德,等. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [16] 许申来,李秀珍,胡远满,等. 岷江上游黑水河流域不同景观结构小流域径流系数的比较[J]. 生态学杂志, 2007,26(5):712-717.
- [17] 李太兵,王根绪,胡宏昌,等. 长江源多年冻土区典型 小流域水文过程特征研究[J]. 冰川冻土,2009,31 (1):82-88.
- [18] GAILARDET J, DUPRE B, LOUVAT P, et al. Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999,159;3-30.
- [19] 孙媛媛,季宏兵,罗建美,等. 赣南小流域的水文地球 化学特征和主要风化过程[J]. 环境化学,2006,25 (5);550-557.
- [20] 史栾生,黄小兰. 广东省地表水水化学特征分析[J]. 广东水利水电 2005(2):78 80.
- [21] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2019 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [22] 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司. 四川省 甘孜藏族自治州稻城 LHAASO 高海拔宇宙线观测站 地基土地震液化评价报告[R]. 中国电建集团成都勘 测设计研究院有限公司,2015.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水电水利工程物探规程: DL/T 5010—2005 [S]. 北京: 中国水利水电出版社,2005.