

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.10

九寨沟地震生态敏感区评估与道路重建方案论证

汪晓锋, 朱 圻, 向 波

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 九寨沟 7.0 级地震诱发大量地质灾害对九寨沟景区景观、生态和基础设施造成了较大破坏, 景区公路沿线灾害频繁, 公路受损严重, 多处中断, 其中五花海与熊猫海之间的老虎嘴路段因地形地质条件极其复杂, 受损最为严重。在九寨沟生态极其敏感区进行恢复重建等工程活动中, 仅靠地灾评估无法满足工程方案评价的需要, 同时须考虑工程活动、地灾和生态之间的相互影响。本文首次结合地灾风险评估, 建立了生态敏感区的生态风险评估标准, 在对九寨沟老虎嘴路段联合进行地灾评估和生态风险评估的基础上, 对该路段道路恢复重建方案进行了评价论证, 最终确定道路恢复重建方案。

关键词: 九寨沟 7.0 地震; 生态风险评估标准; 恢复重建; 方案评估论证

中图分类号: P642; X826

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)05-0070-09

Evaluation of Jiuzhaigou earthquake ecological sensitive area and demonstration of road reconstruction plan

WANG Xiaofeng, ZHU Qi, XIANG Bo

(Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: A large number of geological disasters caused by the Jiuzhaigou 7.0 earthquake caused great damage to the landscape, ecology and infrastructure in Jiuzhaigou scenic area. The disasters along the scenic roads were frequent, the roads were severely damaged, and many were interrupted. Due to the extremely complicated terrain and geological conditions, the road section between the Wuhuahai and Xiongmaohai is most damaged. Reconstruction and other engineering activities in ecologically sensitive areas such as Jiuzhaigou can not meet the needs of the evaluation of engineering schemes by geological disaster assessment alone. At the same time, the interaction between engineering activities, geological disasters and ecology must be considered. This article for the first time combined with the geological disaster risk assessment, established the ecological risk assessment criteria for ecologically sensitive areas. Based on both of the disaster assessment and ecological risk assessment, the road restoration and reconstruction plan of Laohuzui road section in Jiuzhaigou was evaluated and demonstrated. The road restoration and reconstruction plan was finalized.

Keywords: the 7.0 magnitude earthquake in Jiuzhaigou; ecological risk assessment criteria; recovery reconstruction; evaluation and demonstration

收稿日期: 2020-06-24; 修订日期: 2020-08-10

基金项目: 四川省交通科技项目: 山区公路地质灾害及边坡工程安全风险评估及防范研究(2016 B2-2)

第一作者: 汪晓锋(1976-), 男, 安徽潜山人, 高级工程师, 主要从事公路工程地质勘察设计及研究。E-mail: 47213476@qq.com

通讯作者: 向 波(1973-), 男, 四川自贡人, 工学博士, 教高, 主要从事岩土工程、公路工程地质勘察设计及研究。E-mail: xiangbo215@sina.com

0 引言

2017年8月8日,四川省阿坝州九寨沟发生7.0级地震,地震诱发的地质灾害对景区景观、生态和基础设施造成了较大破坏,地质灾害频发,景区道路也多处中断^[1-4]。目前,景区道路仍在恢复重建中,景区仍未完全开放。在地震诱发的地质灾害中,以五花海与熊猫海之间的老虎嘴路段受损最为严重,此段也成为景区灾害治理和道路恢复重建的控制点(图1)。



图1 老虎嘴路段震后航拍图

Fig.1 Aerial photo of Laohuzui road section after the earthquake

九寨沟属世界遗产地、国家级自然保护区、风景名胜区分区等,环境极其特殊,生态极其敏感,条件极其复杂。以一般地区的地灾评估依据《地质灾害危险性评估规范》^[5](以下称《规范》)进行,对灾害的调查和评价集中于地质环境^[6],未包括生态环境,对地质灾害危险性的预测评估,也集中在灾害自身的影响,未考虑对生态环境的影响结果评价。因此老虎嘴路段灾害评估治理和道路恢复重建方案迟迟未确定。

道路恢复重建设计团队虽有汶川及芦山地震灾后重建经验^[7],但叠加生态环境极其敏感区域的恢复重建也是首次面对。本文通过结合地灾风险评估方法,建立生态敏感区的风险评估标准,在联合进行地灾评估和生态风险评估的基础上,对老虎嘴路段道路恢复重建方案的可行性进行了论证,最终确定了道路恢复重建方案,为同类工程提供技术参考。

1 生态敏感区

1.1 老虎嘴路段

九寨沟景区既有主干公路沿区内三条主沟(则查洼沟、日则沟和树正沟)呈“Y”字型展布,老虎嘴路段位于“Y”字型右支,属于沿日则沟展布的主干公路诺日朗至原始森林中的一段,介于景区内著名景点五花海与熊猫海之间(图2)。

地震前,老虎嘴路段位置因地势陡峻,上下边坡高耸陡立,灰岩基岩,坡面裸露,多组节理裂隙发育,时有危岩落石,约200 m路段位于凹岩腔中,路基较窄,无法满足观光车辆双向行驶,属于景区内瓶颈路段之一。

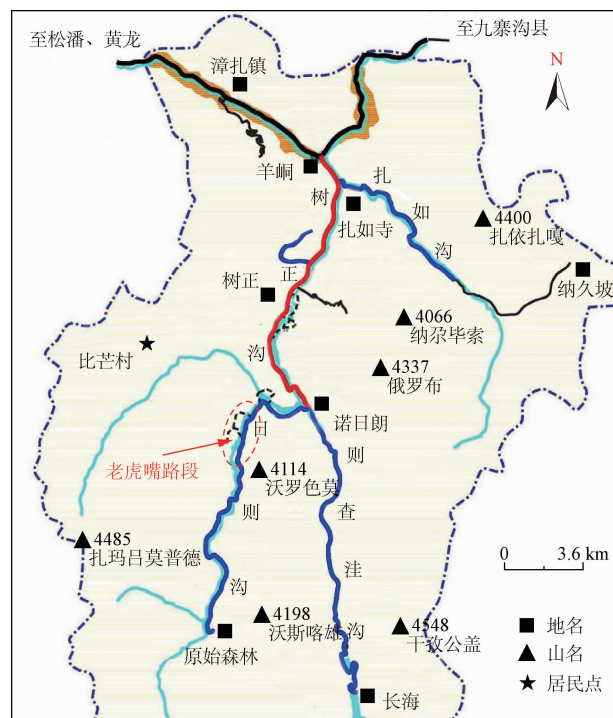


图2 九寨沟景区道路示意图

Fig.2 Road sketch map of Jiuzhaigou Scenic Area

1.2 灾害发育特征

九寨沟7.0级大地震震中位于九寨沟景区西部5 km处的比芒村,区域内构造发育。受地震作用影响,老虎嘴路段上边坡裂隙拉张明显,坡顶发育有30 m长、1.5~2.0 m深的卸荷裂隙,裂隙贯通后的上边坡存在整体垮塌风险,且整个坡面崩塌落石严重,安全隐患极大(图3)。

受崩塌落石影响,老虎嘴路段原有路基全部被掩埋,损毁严重(图4),路基外侧下边坡陡峻近直立,坡脚即为熊猫海与五花海之间的沟谷,该路段中断数月,是景区内灾害发育最为严重的路段,后经冒险抢通,最窄处路基宽度仅3.6 m,勉强能通行小型车辆(图5)。其灾害发育具有典型的高位、高危、连片发育、道路上下皆受限的特征。

1.3 环境条件

现场调查搜集的老虎嘴段地灾评估和生态评估的环境条件,同时也是该路段恢复重建的控制因素。

(1) 区域地质

区域内构造发育,工点区位于日则保护站背斜北



图 7 老虎嘴路段凹岩腔卸荷裂隙图
Fig. 7 Picture of fissures in concave rock cavities of Laohuzui road section after the earthquake

级,解决后期运营安全问题。老虎嘴路段起止点高差约 47.7 m,平均纵坡 5.96%,最大纵坡 10%,属于爬坡路段。冬季积雪结冰严重时,不利于行车安全。

(6) 生态环境

九寨沟是世界遗产地、国家级自然保护区、重点风景名胜区、世界地质公园、世界生物圈保护区等世界级旅游景点,自然生态环境优美,拥有独一无二的水景观环境,工点区位于著名景点熊猫海和五花海之间。

2 生态风险评估

2.1 评估标准

《规范》中对地灾的风险评估分为地灾危险性现状评估和地灾危险性预测评估,与《规范》相对应,引入生态环境因子后,建立地灾对生态环境现状评估和生态环境预测评估。

《规范》中对地灾危害程度按灾情和险情所影响人数和经济损失分为危害大、危害中等和危害小三级(表 1)。

考虑生态环境因子,将地灾对生态环境的危害对应分为三级,划分标准根据地质灾害对生态环境影响的可预测性和影响程度,如果地灾对生态环境的影响结果不可预测,则安全风险大,如果对生态环境的影响可预测或可评估,则根据预测的影响程度进行划分(表 2)。

《规范》中对于地灾与工程建设相关的预测性评估,根据工程建设对灾害的影响、灾害危害程度、发育程度,将危险性等级分为危害大、危害中等、危害小三级。以崩塌为例,表 3 为崩塌(危岩)危险性的预测评估分级情况。

表 1 地质灾害危害程度分级表
Table 1 Classification table of degree of damage of geological disasters

危害程度	灾情		险情	
	死亡人数/人	直接经济损失/万元	受威胁人数/人	可能直接经济损失/万元
大	≥10	≥500	≥100	≥500
中等	3~10	100~500	10~100	100~500
小	≤3	≤100	≤10	≤100

注 1:灾情:指已发生的地质灾害,采用“人员伤亡情况”“直接经济损失”指标评价。

注 2:险情:指可能发生的地质灾害,采用“受威胁人数”“可能直接经济损失”指标评价。

注 3:危害程度采用“灾情”或“险情”指标评价。

表 2 地质灾害对生态环境危害程度分级表

Table 2 Classification table of the degree of damage to the ecological environment by geological disasters

危害程度	对生态环境影响
大	地灾对生态环境已造成不可修复的永久破坏,或地灾对生态环境的影响结果无法预测,或预测地灾仍将对生态环境造成不可修复的破坏。
中等	地灾已对生态环境造成可修复的破坏,或地灾对生态环境的影响经预测可能造成可接受或可修复的破坏。
小	地灾对生态环境已造成的破坏较小,或经预测地灾对生态环境后续影响小。

表 3 崩塌(危岩)危险性预测评估分级

Table 3 Collapse risk prediction assessment classification

工程建设引发或加剧崩塌(危岩)发生的可能性	危害程度	发育程度	危险性等级
工程建设位于崩塌(危岩)影响范围内,工程建设活动对崩塌(危岩)稳定性影响大,引发或加剧崩塌的可能性大。	大	强	大
		中等	大
		弱	中等
工程建设位于崩塌(危岩)影响范围,工程建设活动对崩塌(危岩)稳定性影响中等,引发或加剧崩塌的可能性中等。	中等	强	大
		中等	中等
		弱	中等
工程建设位于崩塌(危岩)影响范围外,工程建设活动对崩塌(危岩)稳定性影响小,引发或加剧崩塌的可能性小。	小	强	大
		中等	中等
		弱	小

同样地,表中未评估工程建设对生态环境或诱发地灾对生态环境造成影响的危险性。考虑生态环境因子,将工程对生态环境影响或诱发地灾对生态环境造成影响的危险性等级对应划分为三级,划分标准为对生态环境影响的可修复性或影响结果的可接受性(表 4)。

在建立了评价标准后,结合老虎嘴路段相关基础条件,对九寨沟景区老虎嘴路段进行了地灾联合生态环境评估。

2.2 评估结果

根据《规范》,对老虎嘴段地灾现状进行评估,老

虎嘴段崩塌(危岩)灾害的危险性评估为一级,地灾危害程度大,地灾危险性大。

表 4 生态环境危险性预测评估分级
Table 4 Ecological environment risk prediction assessment classification

工程建设或诱发灾害对生态环境影响程度	危险性等级
对生态环境造成不可修复的永久破坏,或造成不可接受的破坏。	大
对生态环境造成可修复的破坏,或造成的破坏属可接受范围。	中等
对生态环境影响小。	小

根据对生态环境危害的评估,老虎嘴段震后灾害对沟内景观造成了较大的破坏,且后期危害性不可预测,因此危害大。

现状评估结果直接影响到恢复重建方案的选择。

根据对地灾和生态环境现状的评估结果,拟定恢复重建方案,利用地灾和生态环境预测评估方法,对恢复重建方案进行评价论证。

3 道路恢复重建方案论证与评价

综合对老虎嘴段地灾评价结果和控制因素的研究,拟定恢复重建理念和原则,将“底线思维,保证安全”列为首位,重建将有效防治地质灾害,保证道路的运营和景区的水环境、自然生态安全;同时提出“尊重自然,生态优先”和“因地制宜,科学重建”的重建理念。并拟定“重建方案以恢复为主,兼顾提升”的原则,以恢复和提高景区道路使用功能为主,重点在打通老虎嘴瓶颈路段,解决瓶颈路段和道路沿线震后地质灾害造成的运营风险。

根据确定的设计理念、原则,拟定所有可能的重建方案进行分析,最终落实到原路恢复和隧道绕避两种思路。

3.1 原路恢复方案

为最大限度保持原有生态性和游览便捷性,首先拟定了原路恢复方案(图8)。原路恢复方案重点在于解决原路功能恢复和灾害的彻底根治。

路线完全利用既有道路进行布设,受制于老虎嘴路段灾害和路基宽度不足,局部路段拟采用设置满足双向行车的棚洞形式通过,路基宽度不足处棚洞结构大部分基础需悬挑在路基外侧,以墩柱为基础予以支撑。道路上边坡灾害须进行彻底根治,拟对危岩采用人工清危后设柔性主动网或帘式网进行防护,减少危岩落石对棚洞结构的冲击和破坏。

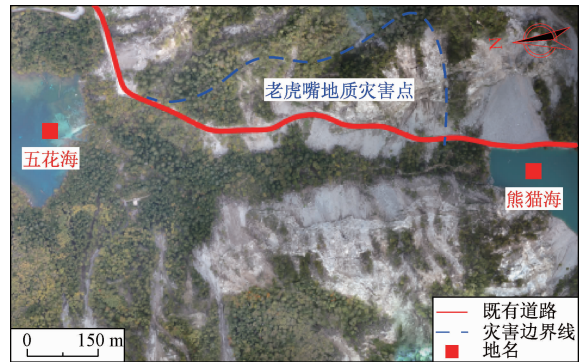


图 8 老虎嘴路段原路恢复方案示意图

Fig. 8 Schematic diagram of original road restoration plan of Laohuzui road section

经设计团队及专家组多次现场调查、放线测量和方案会审研究,对该方案从以下三个方面进行地灾和生态环境评价论证。

(1)老虎嘴路段上方岩质边坡,高耸陡峻,最高达 150 m 以上,节理裂隙极为发育,坡体破碎,既有整体崩塌风险,又有全坡面危岩落石威胁,无法对其进行有效的评估和评判,也很难对其进行彻底有效的根治。因此在道路施工和景区后期运营过程中受到卸荷作用和风化作用的双重影响下,不可避免出现崩塌落石等地质灾害,极有可能砸穿棚洞等公路结构威胁景区运营安全,存在极大的安全隐患。

(2)老虎嘴局部路段路基宽度严重不足,最窄处仅 3.6 m,且位于凹岩腔中,恢复道路须向内或向外拓宽路基,而向内为凹岩腔,山体破碎,拓宽开挖更加剧了上方边坡的灾害风险;若向外悬挑,则采用的棚洞结构大部分基础必须悬挑在路基外侧,靠墩柱基础支撑,而老虎嘴路段下边坡坡面陡峻,外侧靠近熊猫海与五花海之间的沟谷,支撑悬挑结构的墩柱基础最高达 45 m,由于墩柱基础仅能承受竖向荷载,无法承受大的水平向荷载,因此如此高墩柱基础,不能满足棚洞需要的承受动载要求,技术上存在极大的困难。

(3)另一方面,由于棚洞侧墙基础墩柱需要嵌入下边坡基岩,埋深较深,而熊猫海与五花海之间的水体运移主要通过地下暗河中的地下水完成,墩柱施工存在打通地下暗河、导致地下水体泄露的环境风险,对生态环境预测评估结果为危险性大,对景区水体景观会产生毁灭性的破坏。

基于以上方面问题的深入研究和评价,考虑在原路通过修建棚洞,保障公路路基宽度和运营安全存在技术上缺陷,无论从工程建设角度还是后期景区运营

角度来看,均存在重大安全 and 环境风险,危害大,不宜采用原路恢复方案。

3.2 隧道绕避方案

隧道绕避方案结合灾害治理能根本解决地质灾害对道路的威胁。根据老虎嘴路段的地质灾害影响范围和程度、洞口条件、工程规模、后期运营管理和游览组织等影响因素,分别拟定了多条隧道路线方案,综合为两类,即中隧道方案(A、D线)和长隧道方案(B、C线)(图9)。

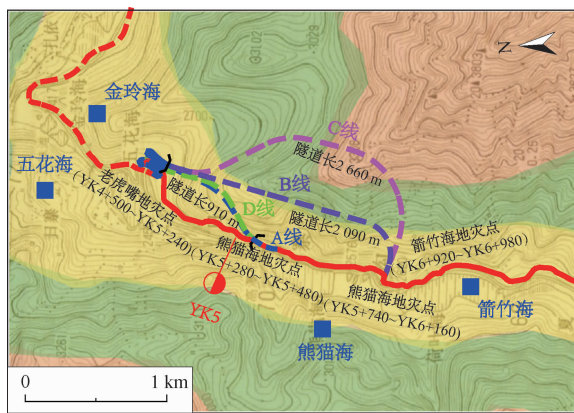


图9 老虎嘴路段隧道绕避方案示意图

Fig.9 Schematic diagram of tunnel avoidance scheme of Laohuzui road section

(1) 中隧道方案(A、D线)

中隧道方案起于五花海既有道路回头弯附近,沿既有道路第一组回头曲线后,从既有道路上边坡至老虎嘴东北侧设置老虎嘴隧道(A线880 m,隧道纵坡3.82%;D线900 m,隧道纵坡4.98%)绕避老虎嘴路段不良地质灾害点,隧道出口位于老虎嘴路段止点处的熊猫海北侧。

中隧道方案出口即为熊猫海,在隧道范围内无其它景点,对游客的游览体验影响较小;但在熊猫海路段仍发育较多地质灾害,采用棚洞、清方、挂网等综合方案进行处治,确保运营安全。

(2) 长隧道方案(B、C线)

长隧道方案起点与中隧道方案一致,起于五花海既有道路回头弯附近,于老虎嘴东北侧设置老虎嘴长隧道(B线2090 m,隧道纵坡3.81%;C线2660 m,隧道纵坡2.97%)完全绕避老虎嘴和熊猫海沿线不良地质灾害路段,隧道出口位于熊猫海南侧,路线终点与既有道路顺接。

长隧道方案将该段重大地质灾害均完全绕避,但由于出口位于熊猫海尾端,游客须返回才能游览熊猫

海,对游客的游览体验较差。由于熊猫海仍然是九寨沟重要的游览景点,所以仍需对熊猫海与隧道出口之间的地质灾害进行处治。

隧道绕避方案可以绕避老虎嘴路段不良地质灾害点,对生态环境破坏相对较小,比较适宜。对中隧道方案和长隧道方案进行论证比选后确定最终方案。

3.3 隧道方案评价论证

隧道绕避方案是否可行受老虎嘴路段的地形高差、洞口地质、水文条件和环境影响等几大因素控制,而其中受水文条件控制的生态环境影响最为关键,采用隧道绕避方案是否会对景区地下水循环产生影响,减少对临近老虎嘴路段的几处著名水景如箭竹海、熊猫海和五花海等的水文破坏是隧道绕避方案成立的前提条件。

经多方资料查阅^[8-9]、多次现场调查论证,并开展了专项水文评价,经评价研究得出九寨沟景区内发育有五个水系统,分别是树正(I)、则查洼(II)、日则(III)、丹祖沟(IV)和扎如沟(V)水系统(图10),每个水系统下又细分出一个或多个子水系统,其中,日则水系统下分熊猫海(及上游区域)子水系统(III-1)、珍珠滩子水系统(III-2)和诺日朗子水系统(III-3)。

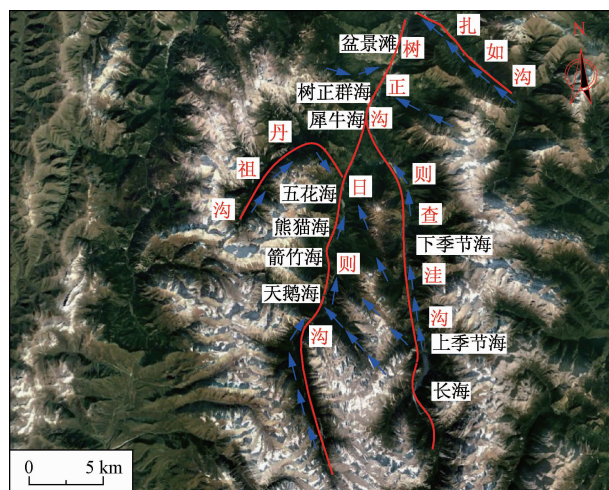


图10 九寨沟水循环系统示意图

Fig.10 Schematic diagram of groundwater circulation system of Jiuzhaigou Scenic Area

不同水系统之间又存在一定的循环转化关系,则查洼水系统中的长海对整个九寨沟景区水资源有着重要的调节作用^[10];各水系统中的岩溶干谷分布区内地下水也对主要景观沟谷有着补给作用。老虎嘴路段位于熊猫海与五花海之间的日则沟主要受到其东侧的则查洼沟和西侧的丹祖沟2个水系统的邻沟侧向补给;

日则沟内箭竹海瀑布季节性翻水,景观水在熊猫上游的箭竹海和熊猫海之间渗漏,经熊猫海、熊猫海与五花海之间的沟谷地下潜流,在五花海南侧尾部以泉水形式出露。

(1)隧道绕避方案对熊猫海(及上游区域)子水系统(Ⅲ-1)的影响评价

隧道绕避方案的长隧道出口位于箭竹海瀑布处(图9),海拔高程2 631 m,箭竹海瀑布主要受地表水补给,其水面海拔高程2 625 m,其水面作为最高潜水面与长线隧道出口存在6 m高差,因此长线隧道的建设不会对该段的水循环系统造成影响,同时因中隧道出口与长线隧道出口有1 120 m距离,与箭竹海瀑布不属于同一子水系统,故中隧道也不会对此段水系统产生影响。

熊猫海上游,道路上边坡处可见地壳抬升前的残留干溶洞(隙)(图11),溶蚀现象最低处海拔约2 576 m,低于中隧道出口处海拔高程2 580 m,因此中线隧道位于该段最高潜水面之上,不会对邻谷补给的断裂带、岩溶裂隙水造成影响,进而也不会对该段地下水循环造成影响。



图 11 熊猫海上游干溶洞(隙)

Fig. 11 Dry cave in the upper reaches of Xiongmaohai

熊猫海下游中隧道出口处干溶洞较为发育,但未见裂隙水和泉水出露(图12),熊猫海最高水位为2 574.5 m,为该段的最高潜水面,低于中隧道出口海拔高程2 580 m,因此中线隧道也不会对此段水系统产生影响,同理长线隧道对此段水循环也无影响。

(2)隧道绕避方案对珍珠滩子水系统(Ⅲ-2)的影响评价

珍珠滩子水系统中的五花海平面上位于老虎嘴路段起点处,五花海是景区内地下水和地表水集中出露



图 12 熊猫海下游上边坡干溶洞

Fig. 12 Dry cave on the upper slope of the lower reaches of Xiongmaohai

的海子,除丰水期受上游熊猫海翻坝地表径流补给外,还接受五花海向斜的基岩裂隙水、箭竹海和熊猫海之间下渗的地下水和西侧丹祖沟渗漏的地下水补给。五花海湖面海拔高程2 472 m,低于A、B、C线隧道进口海拔高程2 536.78 m和D线隧道进口海拔高程2 523.48 m。虽然老虎嘴路段沿线上边坡存在较多规模不等的干溶洞(隙)(图13),说明此处曾是地下水通道,但受五花海断层的影响,地壳抬升,地下水水位下降至五花海湖面高程,以泉眼形式出露。隧道穿越五花海断层可能会在雨季对基岩裂隙水的运移造成一些影响外,对此子水循环系统影响较小。



图 13 老虎嘴路段上边坡干溶洞(隙)

Fig. 13 Dry cave on upper slope of Laohuzui road section

(3)隧道绕避方案对诺日朗子水系统(Ⅲ-3)和其他水系统的影响评价

诺日朗子水系统(Ⅲ-3)和其他水系统远离老虎嘴路段,则查洼水系统中的长海对日则水系统的地下水补给主要在熊猫海上游的原始森林和五花海以泉眼形式出露,因此老虎嘴路段的隧道绕避方案对诺日朗子水系统(Ⅲ-3)和其他水系统的地下水循环亦不造

成影响。

综上对老虎嘴路段隧道绕避方案专项地下水循环系统影响评价论证,老虎嘴路段采用隧道绕避方案不会对景区地下水循环产生影响,对生态环境影响评估的结果为危险性小,方案可行。

对拟定的几个隧道方案又分别从路线指标、工程规模、生态环境保护、施工难度等方面进行综合比选之后,最终选择了中隧道D线方案绕避老虎嘴路段,待后期老虎嘴路段原路地质灾害基本稳定后,可根据景区实际情况对原路设置单向行车棚洞或人行棚洞,既可以与隧道在老虎嘴路段局部形成车辆交通环线,解决交通压力,又将形成一条备用应急通道,又可提升游客对观景的需求。

4 结论

九寨沟7.0级大地震后,景区内地质灾害频发,地震导致的山体松动和崩塌堆积,在未来一段时间内仍有发生崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害的风险,对景区基础设施构成威胁;景区生态脆弱,环境敏感,生态修复治理难度大。通过对地震中受灾最为严重的老虎嘴路段的灾害分析和评估,建立生态环境危险性评估方法,对拟定的多方案进行评价、论证和比选,最终确定了老虎嘴路段的恢复重建方案。

(1)受制于震后老虎嘴路段原路条件,在地形地貌以及地质条件非常恶劣、地灾发育、环境敏感的情况下,为保障公路路基宽度无论是向内拓宽和向外悬挑的方式,均存在技术上缺陷,无论从工程建设角度还是后期景区运营角度来看,均存在重大安全和环境风险,因此原路重建方案基本不可行。

(2)老虎嘴路段采用隧道绕避方案不会对九寨沟景区的地下水循环系统和生态系统产生影响和破坏。隧道绕避方案在施工安全、后期运营安全和环境保护等多方面均优于原路恢复方案。在中、长隧道方案中,因中隧道既解决了地灾威胁问题,又对景区的生态、游客游览体验影响小,采用中隧道方案更有优势。

(3)目前该路段已启动恢复重建,最终确定了采用中隧道D线方案,设置长900 m,纵坡4.98%的老虎嘴隧道,对隧道纵坡超限论证安全。对隧道口明洞连接处,熊猫海段地灾采用挂帘式网、清方、支挡、棚洞等综合措施进行处治,确保安全。对隧道内进行了景观专项设计,与九寨沟风景相融合。

参考文献:

[1] 程强,胡朝旭,杨绪波. 九寨沟地震区公路沿线地

质灾害发育规律及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 114 - 120. [CHENG Q, HU C X, YANG X B. Developmental regularity and preventive countermeasures of geological hazards along the highway in Jiuzhaigou earthquake area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 114 - 120. (in Chinese)]

[2] 李敏娟,沈旭章,张元生,等. 基于密集台阵的青藏高原东北缘地壳精细结构及九寨沟地震震源区结构特征分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 2075 - 2087. [LI M J, SHEN X Z, ZHANG Y S, et al. Fine crustal structures of northeast margin of the Tibetan Plateau and structural features of Jiuzhaigou earthquake focal area constrained by the data from a high-density seismic array[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 2075 - 2087. (in Chinese)]

[3] 许冲,谭锡斌,王世元,等. 2017年8月8日四川省九寨沟MS7.0地震触发滑坡全景[J]. 地震地质, 2018, 40(1): 232 - 260. [XU C, TAN X B, WANG S Y, et al. A panorama of landslides triggered by the 8 August 2017 Jiuzhaigou, Sichuan Ms 7.0 earthquake[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(1): 232 - 260. (in Chinese)]

[4] 杨华阳,许向宁,杨鸿发. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 20 - 29. [YANG H Y, XU X N, YANG H F. The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 20 - 29. (in Chinese)]

[5] 中华人民共和国国土资源部. 地质灾害危险性评估规范: DZ/T 0286—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of risk assessment for geological hazard: DZ/T 0286—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)]

[6] 刘传正. 论地质灾害风险识别问题[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 1 - 7. [LIU C Z. Research on the risk recognition of geological disasters[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 1 - 7. (in Chinese)]

[7] 向波,蒋劲松,李本伟. 公路应急抢通保通技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018. [XIANG B, JIANG J S, LI B W. Technical manual for highway emergency repair and protection [M].

- Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)]
- [8] 甘建军, 刘民生, 黄润秋, 等. 九寨沟核心景区水循环系统研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1):34-39. [GAN J J, LIU M S, HUANG R Q, et al. A study of hydrological cycle in the Jiuzhaigou core scenic area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(1):34-39. (in Chinese)]
- [9] 武斌, 汪智, 张淳, 等. 综合工程物探在九寨沟核心景区水循环系统研究中应用评价[J]. 四川地质学报, 2009, 29(2):213-216. [WU B, WANG Z, ZHANG C, et al. The application of comprehensive engineering geophysical exploration to the study of hydrologic cycle system in the Jiuzhai valley scenic spot[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(2):213-216. (in Chinese)]
- [10] 尹观, 范晓. 四川九寨沟水循环系统的同位素示踪[J]. 地理学报, 2000, 55(4):487-494. [YIN G, FAN X. Isotope tracer on water cycly system in Jiuzhaigou, Sichuan [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4):487-494. (in Chinese)]

(上接第 69 页)

- [20] 罗小燕, 占鹏飞, 黄祥海, 等. 基于加权 D-S 证据理论融合多域特征的岩体失稳预测方法[J]. 煤炭学报:1-9. [LUO X Y, ZHAN P F, HUANG X H, et al. Rock mass instability prediction method based on weighted D-S evidence theory and multi-domain features fusion [J]. Journal of China Coal Society: 1-9. (in Chinese)]
- [21] YU L, LIU J J. Stability of interbed for salt cavern gas storage in solution mining considering cusp displacement catastrophe theory [J]. Petroleum, 2015, 1(1):82-90.
- [22] 于秋鸽, 张华兴, 邓伟男. 基于尖点突变模型的采空塌陷地表裂缝形成机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2):73-77. [YU Q G, ZHANG H X, DENG W N. Mechanism of collapsing ground fissure formation based on cusp catastrophe model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2):73-77. (in Chinese)]
- [23] 鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎. 基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6):112-118. [JU X H, YANG X H, ZHANG S S. An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6):112-118. (in Chinese)]
- [24] 王明洋, 李杰, 李凯锐. 深部岩体非线性力学能量作用原理与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4):659-667. [WANG M Y, LI J, LI K R. A nonlinear mechanical energy theory in deep rock mass engineering and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4):659-667. (in Chinese)]
- [25] 孙建, 王连国. 基于微震信号突变分析的底板断层突水预测[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8):1404-1410. [SUN J, WANG L G. Floor fault water-inrush prediction based on catastrophe analysis of micro-seismic signals [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8):1404-1410. (in Chinese)]
- [26] 易革军. 基于 D-S 证据理论的信息融合方法研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2015. [YI G J. Research and application of information fusion based on D-S evidence theory [D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)]
- [27] CHEN L W, WANG W H, ZHANG W J. Risk evaluation of regional collapses geological hazard based on D-S evidence theory-A case study of Haiyuan active fault belt in Ningxia Province [J]. Energy Procedia, 2012, 16:371-376.
- [28] XU N W, LI T B, DAI F, et al. Microseismic monitoring and stability evaluation for the large scale underground Caverns at the Houziyan hydropower station in Southwest China [J]. Engineering Geology, 2015, 188:48-67.