Study on Water Inrush Characteristics and Emergency Countermeasures of Paoma Mountain No.2 Tunnel

Meiben Gao[1,2,*], Shiming Bai[1], Yuangui Pan[3], Kezhu Chen[4], Guoqiang Zheng[4]

[1] College of Emergency Management, Xihua University, Chengdu Sichuan, 610039

[2] Key Laboratory of Landslide Disaster Risk Early Warning and Prevention Emergency Management Department of Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan, 610059

[3] Southwest Jiaotong University School of Civil Engineering, Chengdu Sichuan,610031

[4] Sichuan Traffic Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu Sichuan,610017

[*] Corresponding author. Email: 578209337@qq.com

ABSTRACT

This study examines the No. 2 Tunnel of Paoma Mountain as a representative case and thoroughly analyzes the characteristics and emergency responses to water inrush and water outburst in tunnel engineering. Through comprehensive field investigations and rigorous data analysis at the tunnel engineering site, this study elucidates the mechanisms, characteristics, and impacts of water inrush and outburst in No. 2 Tunnel of Paoma Mountain. The paper outlines several preventive and emergency response strategies implemented in the tunnel project, encompassing initial geological assessments, pre-grouting fortification, expedited drainage systems, and contingency reaction protocols. Research indicates that these techniques can significantly mitigate safety risks and financial losses associated with groundwater inrush, hence facilitating the uninterrupted advancement of tunnel construction. The research findings of this work offer significant insights and references for analogous geological circumstances in tunnel engineering, as well as a theoretical foundation and practical assistance for the prevention and emergency management of tunnel water inrush.

Keyword: *Tunnel, Water Inrush, Emergency Management, Emergency Response*

跑马山二号隧道涌突水特征及应急对策研究

高美奔[1,2,*]，柏世铭[1]，潘元贵[3]，陈柯竹[4]，郑国强[4]

[1] *西华大学 应急管理学院，四川成都，610039*

[2] *成都理工大学 滑坡灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室，四川成都 610059*

[3] *西南交通大学 土木工程学院，四川成都，610031*

[4] *四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川成都，610017*

**通讯作者.电子邮箱：578209337@qq.com*

摘要

本文以跑马山二号隧道为典型案例，系统研究了隧道工程中涌突水的特征及其应急对策。通过对隧道工程现场的实地调查和数据分析，详细描述了跑马山二号隧道涌突水的发生机制、特点及其对工程的影响。论文总结了在该隧道工程中采取的一系列防治和应急处置措施，包括前期地质勘察、预注浆加固、快速排水系统及

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_26

应急预案等。研究表明，这些措施能有效减少涌突水带来的安全隐患和经济损失，确保隧道施工的顺利进行。本文的研究成果为类似地质条件下的隧道工程提供了宝贵的经验和参考，为隧道涌突水防治与应急管理提供了理论依据和实践指导。

关键词：*隧道,涌突水,应急管理,应急对策*

1. 引言

隧道工程在现代基础设施建设中占据着重要地位，然而，隧道施工过程中经常面临复杂多变的地质条件，尤其是涌突水问题，给工程的安全和进度带来严重挑战[1-3]。涌突水不仅会导致施工环境恶化、设备损坏，还可能引发次生灾害，威胁施工人员的生命安全[4-6]。为了有效应对这一问题，研究涌突水的特征及其应急对策显得尤为重要[7-8]。

本文以跑马山二号隧道为典型案例，系统分析了该隧道施工过程中涌突水的特征，并探讨了针对性的应急对策。跑马山二号隧道地处地质条件复杂区域，施工过程中多次遭遇涌突水问题，对工程进度和安全构成重大威胁。通过对该隧道涌突水事件的实地调查和数据分析，本文总结了涌突水的形成机制和主要特征，评估了其对工程的影响，并详细阐述了实施的防治和应急处置措施。

本研究不仅为跑马山二号隧道工程提供了科学依据和技术支持，也为类似地质条件下的隧道工程提供了宝贵的经验和借鉴。通过对涌突水特征和应急对策的深入研究，旨在提升隧道工程的安全性和施工效率，推动隧道建设技术的不断进步。

2. 涌突水问题的应急对策

2.1. 涌突水对隧道工程的不利影响

涌突水对隧道工程的不利影响是多方面的，具体表现为对工程安全、经济成本以及环境的全面影响。首先，涌突水对隧道施工的安全性构成重大威胁。在隧道掘进过程中，突如其来的大量水流可能迅速淹没施工现场，导致机械设备损坏，严重时会引发塌方、泥石流等次生灾害，威胁施工人员的生命安全。突水事件往往伴随着地下水的强烈冲刷作用，进一步削弱隧道掘进面和周边岩土体的稳定性，增加塌方风险。

从经济角度来看，涌突水会显著增加工程成本。首先是直接的设备损失和维修费用，涌水可能损坏昂贵的施工机械和设备，需要进行维修或更换。此外，清理涌水和排水的过程需要投入大量人力物力，包括高效的排水设备和加固材料。涌水导致的施工停滞和延误，增加了人工成本和工期延长费用，可能导致合同违约，产生赔偿费用。长期来看，涌突水可能对隧道结构造成损害，增加维护和加固成本，影响隧道的使用寿命和运营安全。

环境影响方面，涌突水可能携带大量泥沙和地下污染物进入地表水体，导致水资源污染。突水事件的发生可能扰乱地下水系统，改变地下水流动路径，影响周边生态环境。例如，地下水位的突然变化可能导致地表植被枯萎，甚至引发地表塌陷等地质灾害，对当地生态环境和居民生活产生不利影响。

总的来说，涌突水对隧道工程的不利影响不仅限于施工阶段，还包括长期的运营维护和环境保护等方面。为了有效应对涌突水的挑战，必须在工程设计和施工过程中加强地质勘察，制定科学的防治措施，并建立完善的应急处理机制，以保障隧道工程的安全和可持续发展。

2.2. 涌突水防治措施

为了有效防治涌突水对隧道工程的不利影响，必须采取一系列科学且系统的措施，涵盖前期勘察、施工过程中的预防以及应急处理等多个方面。

首先，在隧道工程的前期勘察阶段，必须进行详细的地质和水文地质调查。这包括采用钻探、地球物理勘探、地下水监测等技术手段，全面了解隧道沿线的地质构造、地下水分布及其流动规律。通过对这些

信息的综合分析，评估涌水风险，识别高风险区域，为后续施工制定有针对性的防治方案提供依据。

在隧道施工过程中，应采取多种预防措施以降低涌突水发生的概率。首先，可以在高风险区域进行预注浆加固，通过在隧道周围的岩体中注入浆液，填充和密封岩体中的裂隙和空隙，降低岩体的渗透性，减少地下水的渗流。其次，采用分段开挖和分层支护的方法，逐步推进施工，避免大规模开挖带来的突水风险。此外，安装实时监测系统，通过布设地下水位监测井和渗流监测仪器，实时监控地下水的变化情况，及时发现和预警潜在的突水风险。

应急处理是涌突水防治的重要组成部分。一旦发生涌突水，必须迅速启动应急预案。施工现场应配置高效的排水设备，如大功率水泵和排水管道，确保能够迅速排除突发涌水，防止水淹施工现场和设备。同时，建立完善的应急预案，明确各类突发事件的处理流程和责任分工，定期进行应急演练，提高施工人员的应急响应能力。

除了以上技术措施，还应加强施工管理和培训，提高全体施工人员的防灾减灾意识。在施工过程中，严格按照设计和施工规范操作，定期检查和维护防水、防涌设施，确保其正常运行。通过技术手段与管理措施的结合，形成一套完整的涌突水防治体系，有效保障隧道工程的安全和顺利进行。

2.3. 涌突水应急处理

涌突水应急处理是隧道工程安全管理中的关键环节，其目的是迅速有效地应对突发涌水事件，最大限度地减少人员伤亡和财产损失。应急处理需从准备、响应和恢复三个阶段进行系统规划和实施。

首先，应急准备阶段需要制定详细的应急预案。应急预案应包括涌突水风险评估、应急组织架构、应急物资和设备的配置、紧急撤离路线、人员职责分工等内容。施工现场应配备足够的应急物资和设备，如大功率水泵、排水管道、发电机、照明设备、防水服等。此外，必须定期进行应急演练，模拟涌突水场景，提高施工人员的应急响应能力和协作水平，确保在突发事件中能够迅速、有效地开展应急处理。

在应急响应阶段，一旦发生涌突水事件，应立即启动应急预案。首先，应确保施工人员的安全，迅速组织人员撤离至安全区域。现场应急指挥部应立即组建，协调各部门和应急小组的行动。应急排水设备应迅速投入使用，通过大功率水泵和排水管道将突入隧道的水排出，防止隧道内积水过多导致设备损坏和施工环境进一步恶化。同时，应密切监测隧道结构和周边地质情况，防止因涌水引发次生灾害，如塌方、泥石流等。

在应急排水的同时，还应采取措施防止进一步的涌水。可以通过注浆封堵突水点或在隧道周围构建防水屏障，减少地下水的渗入量。必要时，可减缓或暂停施工，集中力量处理涌水问题，确保现场人员和设备的安全。

最后，恢复阶段需要对隧道结构和施工设备进行全面检查和维修，确保其安全性和正常功能。在涌水事件后，应对隧道周边地质和水文条件进行重新评估，根据新的评估结果调整施工方案和防治措施。同时，总结应急处理过程中的经验和教训，完善应急预案，优化应急响应机制，提高应对涌突水事件的整体能力。

通过科学、系统的应急处理措施，可以有效应对隧道工程中的涌突水事件，保障施工安全和工程进度，减少经济损失和环境影响。

3. 典型案例分析

3.1. 跑马山二号隧道简介

跑马山二号隧道为特长隧道，起于康定市炉城南路(左线 ZK10+410、右线 YK10+455)，终点为康定市驷马桥村(左线 ZK17+200，右线 YK17+125)，左线全长 6777.2m，右线全长 6665.3m。主线纵坡-2.5%。隧道设计速度 80km/h，双向四车道，净宽 10.25m，高 5m，抗震设防标准≥9 度。

3.2. 地形地貌

跑马山二号隧道隧址区地貌类型为高山峡谷地貌，隧道走向约 175～181～297°，斜穿康定东南侧贡嘎保护区，从新建康定市汽车站东西侧穿出，设计路面高程 2628.86～2781.98m（高差 153.12m）。线路最高点位于 ZK14+620，高程 3564.96m，洞身最大埋深 845.45m。隧道出口段位于康定市榆林乡新建康定汽车站西北侧，以下穿方式与榆墨路呈 65°斜交，坡向 287°，与轴线近似平行，陡壁坡度 45～55°，出口段设计高程约 2781.98m。坡脚左侧约 30～50m 为榆林河。

3.3. 水文条件

跑马山二号隧道按含水岩组不同，主要划分为松散岩类孔隙水及基岩裂隙水、断裂破碎带孔隙裂隙水及可溶岩溶隙-裂隙水四大类型。同时根据地层结构，岩体的渗透性和富水性，将隧址区的含水岩组划分为松散岩类孔隙水岩组、弱-中等富水的裂隙水含水岩组，以及导水裂隙密集发育带含水岩组和相对隔水层。

3.4. 地质构造

隧址区构造上属于鲜水河 NW 向构造带，以东属于龙门山 NE 向构造带，以南为川滇 SN 向构造带，以上三大构造带共同组成了中国西南著名的“Y”字形构造格局，又称“三岔裂谷系”（图 1）。隧道主要穿越 F1、F20、F21 共 3 条断层。其中出口段施工穿越 F21 压扭性断层（左线 ZK16+054-ZK16+174、右线 K16+000-K16+120）、F20 上游断层（K16+950-K17+070）。

图 1 跑马山二号隧道区域地质构造图

4.涌突水特征及探测结果分析

2021 年 5 月 9 日，左洞掌子面已停工，掌子面 ZK15+988 拱顶有泥浆突然涌出，时间短、速度快（发生至结束约 7s），突泥体夹杂大量石块冲击强，造成部分隧道初期支护、施工机械、作业台车等损毁，涌突水长约 16m（掌子面 ZK15+988 至二衬 ZK16+150），突出体大部分呈黄色流沙状，突出的块状岩石手揉即碎，实测 ZK16+150 二衬位置涌突水位高约 1m，推算突泥突水方量约 8000m3。

4.1. 超前预报

（1）TSP-3D 物探

2021 年 5 月 18 日对左洞塌腔及前方掌子面围岩情况采用 TSP-3D 物探进行探测（图 2）。根据三维探测结果分析：测试面前方 25m 至 40m 处（即为左洞掌子面坍塌涌泥位置）信号反射强烈；信号反射域宽度约为 25m，长度约 25m，距离上台阶高度为 20m，呈椭圆形的漏斗构造，上宽下窄，顶部短轴为 12m、长轴为 20m；推断此区域为漏斗形坍塌体，顶部呈椭圆形构造，向上延伸并超出探测范围。含水信号较强，推断此区域岩体节理裂隙发育，岩体富水。

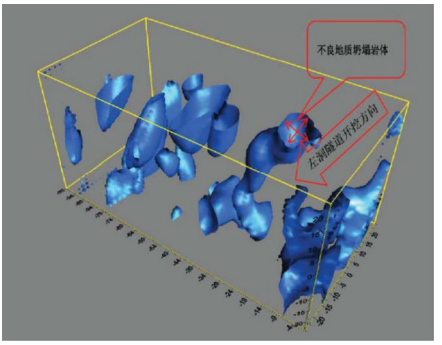

图 2 TSP-3D 三维图像

根据 TSP 地质探测数据图像分析，左洞掌子面前方，为较大破碎带且富水，围岩相对差，开挖时易发生掉块及突泥涌水现象。

（2）TGP 物探

采用 TGP 对 ZK15+994～ZK15+874 段围进行预报，依据当前掌子面围岩情况并结合探测结果，推断所预报段节理裂隙发育，围岩破碎，完整性差，裂隙水发育，局部可能出现淋雨状或涌流状出水。

表 1 超前钻孔探测结果分析表

编号	孔号	钻孔桩号	位置	角度	钻进长度（m）	钻进围岩描述	备注
1	1#	ZK15+995	拱顶	上偏角 13° 右偏 4°	26	围岩为黄色强风化极软岩，钻孔后持续有股状水流出，富水	10-11.5m 存在空腔
2	2#	ZK15+995	拱顶右侧 2m	上偏角 13° 右偏 4°	18	围岩为黄色强风化极软岩，钻孔后持续有股状水流出，富水	12-14m 为空腔，14-18m 为塌方堆积体
3	3#	ZK15+995	拱顶右侧 3.5m	上偏角 13° 右偏 20°	28	围岩为黄色强风化极软岩，钻孔后持续有股状水流出间歇性变大，富水	11-12m 为塌方堆积体

4	4#	ZK15+995	拱顶左侧 1.5m	上偏角 14° 右偏 4°	28	围岩为黄色强风化极软岩，钻孔后持续有股状水流出，富水	10-15m 存在空腔

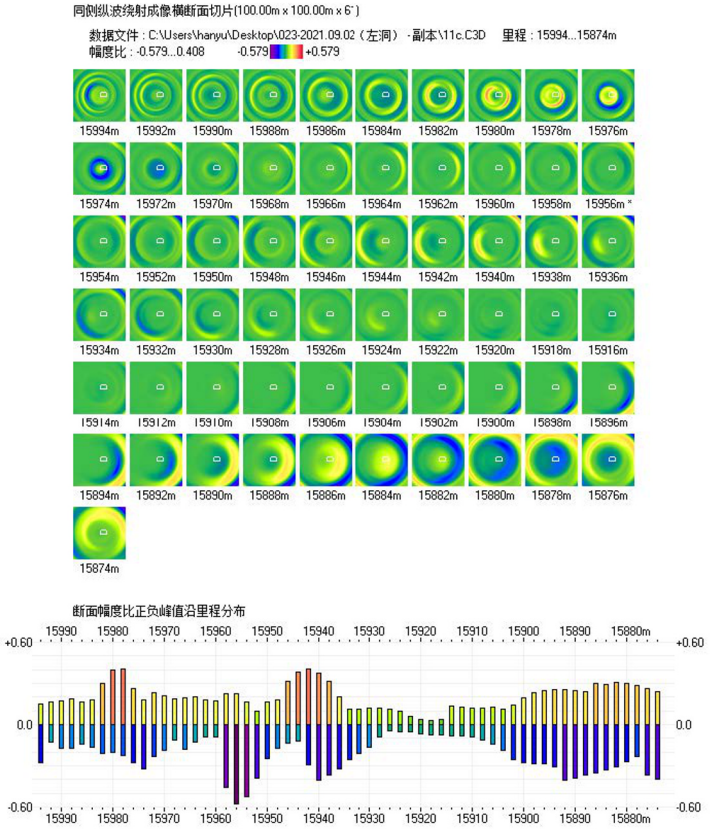

图 3 TGP 对向横断面切片图

（3）超前钻孔

从左洞已封闭初支拱顶 ZK15+995 处采用超前水平钻进行钻孔探明前方围岩及突泥塌腔情况，探测结果如表 1 所示。

图 4 超前钻孔现场图

5. 应急处置对策研究

5.1. 应急处置对策

应急处置对策的研究涵盖了应急预案的制定、应急物资和设备的准备、应急响应的实施以及事后恢复和总结。

首先，应急预案的制定是涌突水应急处置的基础。应急预案应包括涌水风险的评估、应急组织架构的建立、各类应急物资和设备的准备、紧急撤离路线的规划以及人员职责的明确分工。预案的制定应结合隧道工程的具体地质条件和施工环境，确保预案的科学性和可操作性。定期开展应急演练，通过模拟涌突水场景，检验应急预案的有效性，提高施工人员的应急响应能力。

在应急物资和设备的准备方面，应确保现场配备足够的大功率水泵、排水管道、发电机、照明设备、防水服等应急物资。同时，建立应急物资储备库，定期检查和维护，确保在突发事件中能够迅速投入使用。

应急响应的实施是应急处置的关键环节。当发生涌突水事件时，应立即启动应急预案。应急指挥部应迅速组建，协调各部门和应急小组的行动。首先，应确保施工人员的安全，迅速组织人员撤离至安全区域。应急排水设备应立即投入使用，通过大功率水泵和排水管道将突入隧道的水排出，防止隧道内积水过多导致设备损坏和施工环境进一步恶化。同时，应密切监测隧道结构和周边地质情况，防止因涌水引发次生灾害，如塌方、泥石流等。

在应急排水的同时，应采取措施控制和减少进一步的涌水。可以通过注浆封堵突水点或在隧道周围构建防水屏障，减少地下水的渗入量。必要时，可减缓或暂停施工，集中力量处理涌水问题，确保现场人员和设备的安全。

事后恢复和总结是应急处置的重要组成部分。在涌水事件后，应对隧道结构和施工设备进行全面检查和维修，确保其安全性和正常功能。对隧道周边地质和水文条件进行重新评估，根据新的评估结果调整施工方案和防治措施。同时，总结应急处置过程中的经验和教训，完善应急预案，优化应急响应机制，提高应对涌突水事件的整体能力。

5.2.跑马山二号隧道后续处治方案

横向加固：为确保清淤工作安全，避免二次风险，从右洞 YK15+951～YK15+911（对应左洞 ZK16+008-ZK15+968）向左洞进行深孔注浆，对突泥体进行加固，同时采用 φ108 跟管打设 3-6 个泄水孔，进行泄水。

反压回填及超前钻孔泄水：目前清淤位置距掌子面约 80m，继续直接清淤风险较高，对突泥体抛填片石铺路至掌子面附近，喷射混凝土封闭掌子面，初步注浆加固固结突泥体，抛填石洞渣反压回填至 ZK16+001，拱部无法填实段，采用 C20 泵送砼回填，预埋仰斜式 PVC 管泄水孔(直径 10cm，用土工布包裹严实)，对突泥体进行泄水。利用超前水平钻在回填体后洞顶钻孔，成孔后及时放 φ108 根管进行泄水，同时在前方设置集水坑，及时抽排洞内积水。

止浆墙：在反压回填后，在适当位置施工止浆墙，墙体采用 C25 混凝土现浇，止浆墙厚度 200cm，墙体坡度 1:1 或垂直（结合现场实际施工情况而定），墙体使用 φ12@20cm 双层钢筋网加强，环向钻打 φ42 小导管进行锚固。

已施工软弱富水段初支围岩加固：对 ZK16+003-ZK16+054 已施工初支软弱围岩进行注浆加固，防止突泥塌方处治过程中发生大变形、塌方等灾害。

超前帷幕注浆：从止浆墙打孔对掌子面上半断面进行超前注浆加固，注浆范围为止浆墙前方 25m（开挖 20m，预留 5m 作为下一循环注浆岩盘）,综合左右洞超前地质预报情况，采用双环帷幕注浆，超前加固范围为掌子面前方 50m。

超前大管棚：分别在 ZK16+005、ZK15+995 处采用 I22b 工字钢作为套拱拱架，从顶部打设两环超前大管棚（长度 36m），用于处治掌子面突泥涌水。

处治前应设置临时逃生平台和拦泥墙，应急逃生救援预案，左右洞形成联合预警机制，以警报灯形式进行突发事件预警。确保在出现紧急情况下，左右洞人员能第一时间得到撤离信号，并安全有序撤离。

6.结语

依托对跑马山二号隧道涌突水特征和应急对策的详细研究，本论文全面分析了涌突水对隧道工程的不利影响，并提出了一系列科学有效的防治和应急处置措施。跑马山二号隧道这个典型案例表明，地质条件复杂和地下水丰富是涌突水频发的主要原因。针对这一情况，实施了详尽的前期地质勘察、实时监测系统

和预注浆加固等预防措施，同时建立了高效的应急响应机制，包括快速排水系统和应急预案演练。通过这些措施，能成功减少涌突水对施工安全和工程进度的影响，保障隧道工程的顺利推进。该研究不仅为类似地质条件下的隧道工程提供了宝贵的经验和技术参考，也进一步丰富了隧道涌突水防治与应急管理的理论和实践。

致谢

本文章由基金项目：教育部人文社会科学研究项目(23YJCZH051)；成都理工大学滑坡灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室开放基金（KLLREC2022K003）；2022 年国家级大学生创新创业训练计划项目（202210623033）支持。

参考文献

[1] 孙密.浅谈飞仙关隧道 9.20 特大涌突水处治方案[J].四川水泥,2017(05):39+61. Mi Sun . A brief discussion on the treatment scheme for the extraordinary water inrush and outburst on september 20 in Feixianguan tunnel [J]. Sichuan Cement, 2017(05): 39+61.

[2] 唐运刚.可溶岩区隧洞岩溶涌突水防治对策研究[J].人民长江,2017,48(14):41-44. Yungang Tang. Study on prevention and control measures of water inrush in tunnels in karst area [J].Yangtze River, 2017,48(14):41-44.

[3] 张剑宁,黄鹏.山区公路隧道涌突水应急与处置方案[J].交通世界,2020(16):158-160. Jianning Zhang, Peng Huang. Emergency response and disposal scheme for water inrush and outburst in mountain highway tunnels [J]. Transportationworld, 2020(16): 158-160.

[4] 郭连.田坝岭隧道涌水原因分析及处理措施[J].山西建筑,2011,37(04):178-180. Lian Guo. On analysis of reasons for water inflow of T ianbaling tunnel and its treatm entm easures [J]. Shanxi Architecture. 2011,37(04):178-180.

[5] 肖永洲,于展绅,孔祥周.发耳煤矿三采区突水原因分析及防治对策[J].山东煤炭科技,2012(03):195-196. Yongzhou Xiao, Zhanshen Yu, Xiangzhou Kong . Analysis on the causes of water inrush in the third mining area of Fa'er Coal mine and prevention countermeasures[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2012(03): 195-196.

[6] 秦昊斌.特长隧道涌突水综合反坡排水施工技术[J].四川建材,2015,41(01):134-135. Haobin Qin. Comprehensive reverse slope drainage construction technology for water inrush and outburst in extra-Long tunnels [J]. Sichuan Building Materials, 2015, 41(01): 134-135.

[7] 黄嘉恒,张鹏飞,涂文博.岩溶发育区地铁车站基坑突水涌泥应急处理技术研究[J].工程建设与设计,2020(15):23-27. Jiaheng Huang, Pengfei Zhang, Wenbo Tu. Emergency Treatment Technology for the Water and Mud Gushing from Foundation Pit of A Subway Station in Karst Development Area [J]. Construction & Design For Project, 2020(15):23-27.

[8] 姜畔.填海区 TBM 穿越不良地层及突水应急措施研究[J].铁道工程学报,2020,37(12):83-88. Pan Jiang. Research on the TBM tunnel passing through bad geological technology and water inrush emergency measures in reclamation area [J].Journal of Railway Engineering Society,2020,37(12):83-88.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.