

文章编号: 1674—8247(2018)05—0038—06

岩溶区铁路勘察防治技术研究现状及发展趋势

宋章 王科 蒋良文 王茂靖

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:文章针对岩溶灾害的特性及危害形式,对岩溶区减灾选线、勘察技术、灾害风险评估及防治技术的国内外研究现状及发展趋势进行了详细的述评。得出:(1)由于高速铁路大曲线半径、高速度目标值及高轨道平顺度等技术特点,线路选线完全绕避岩溶区极为困难;(2)目前针对深埋长大隧道及厚覆盖型岩溶桥路典型岩溶地质问题研究较少,需进一步深化现代深部岩溶及其系统划分和分区的理论研究;(3)目前运用工程经济学、动力学及工程经验等选线的理论和方法较多,但基于岩溶灾害学、环境学及现代数理理论等减灾选线原则及方法的研究鲜有报道;(4)在传统勘察技术优缺点对比分析、新技术引进并消化的基础上,创建适合铁路各类工程的综合勘察模式及体系;(5)重点关注风险源致灾因子识别、指标量化及权重确定的研究,构建岩溶区灾害风险评估模型及体系。在此基础上,加强岩溶灾害防治技术的研究和应用。

关键词:岩溶; 减灾选线; 综合勘察; 风险评估; 防治技术

中图分类号:TV223.3+3

文献标志码:A

Research Status and Developing Trends of Reconnaissance and Control Technology of Railway in Karst Area

SONG Zhang WANG Ke JIANG Liangwen WANG Maojing

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdou 610031, China)

Abstract:Based on the characteristics and hazard forms of karst disasters, the current research status and developing trends of the disaster alleviation route selection, survey technique, disaster risk assessment and control technique in karst areas are reviewed in detail. that the results are: 1. the route selection of high-speed railway is extremely difficult to avoid karst area because of the characteristics of bigger curve radius, high-speed target value and high track smoothness of high-speed railway. 2. At present the typical karst geological problems are seldom studied on the deep seated long tunnels and thick covered karst bridge and subgrade, and further research on the modern deep karst, karstification system division and karst engineering zoning should be taken. 3. There are many theories and methods of route selection which based on the engineering economics, dynamics and engineering experience, but there are few reports on the principles and methods of disaster alleviation and route selection based on the karst disaster science, environmental science and modern mathematical theory. 4. On the basis of the comparative analysis of the advantages and disadvantages of traditional survey technology, and the introduction and digestion of new technology in comprehensive investigation, to create a comprehensive survey model and system which are suitable for various types of projects. 5. In disaster risk assessment, to pay close attention to the research of risk factors identification, index quantification and weight determination, to construct disaster risk assessment model and evaluation system in Karst Area. On above basis, the research and application on the prevention and control technology of karst disaster are strengthened.

收稿日期:2017-12-13

作者简介:宋章(1977-),男,高级工程师。

基金项目:国家铁路局科技研究计划(KF2015-007);中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KYY2017005(17-19))

引文格式:宋章,王科,蒋良文,等. 岩溶区铁路勘察防治技术研究现状及发展趋势[J]. 高速铁路技术,2018,9(5):38-43.

SONG Zhang, WANG Ke, JIANG Liangwen, et al. Research Status and Developing Trends of Reconnaissance and Control Technology of Railway in Karst Area[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 38-43.

Key words: karst; disaster alleviation route selection; comprehensive survey; risk assessment; control technique

全球岩溶总面积约2 200万 km^2 ;我国岩溶总面积约363万 km^2 ,占国土面积的1/3以上,其中分布于桂、云、贵、川、渝及湘、鄂、粤等地的裸露型岩溶面积约203万 km^2 ^[1]。

据统计,目前全球岩溶区高速铁路约0.5万km,而我国岩溶区高速铁路时程约0.36万km,占比高达72%;其中中铁二院完成了岩溶高速铁路约0.26万km,占比52%,且随着我国西部铁路建设的加速,岩溶区高速铁路占比还将进一步增加。岩溶工程地质问题较为突出的建成和在(待)建的高速铁路及客专主要有武广(韶花段)、渝利、贵广(贵贺段)、湘桂(永柳段)、南广、广西沿海、兰渝川渝段、沪昆云贵段、云桂、成渝、西成四川段、渝黔、成贵、郑万(鄂渝段)、贵南、渝昆等。

铁路建设遇到的岩溶工程地质问题^[2-5]主要有:(1)路基岩溶地质问题,如岩溶地面塌陷、内涝水害、溶蚀沟槽区不均匀沉降、边坡坍塌等;(2)桥梁岩溶地质问题,如桥基漏浆、成桩困难,基础下沉、倾斜,地面塌陷等;(3)隧道岩溶地质问题,如岩溶(高压)涌水、突泥,巨型溶洞、溶腔,洞穴堆积物,洞口危岩落石,水环境破坏等。

岩溶分布的隐蔽性、不均一性及动态变化等特点,给铁路工程岩溶勘察、选线、评估及防治带来极大的挑战。

1 国内外研究现状

桂、云、贵、川、渝及湘、鄂、粤等为我国岩溶发育区,该区铁路工程建设及运营受到复杂岩溶地质条件的影响和制约。如上世纪70年代前建成的成昆线、川黔线、贵昆线、盘西线,上世纪90年代后建成的南昆线、株六复线、水柏线、渝怀线、宜万线、黔渝线、黔桂线,及近年兴建的贵广线、湘桂线、南广线、云桂线、武广线、沪昆线等均遭遇了不同程度的岩溶地质问题,如岩溶地面塌陷、隧道涌水、突泥、桥基漏浆及成桩困难等。目前在建的成贵线、贵南线等高速铁路亦出现了不同程度的岩溶地质灾害问题。

根据岩溶灾害的特性及危害,本文从岩溶区减灾选线、岩溶勘察技术、岩溶灾害风险评估及灾害防治四个方面对其理论及工程实践的现状进行概括分析。

1.1 岩溶区减灾选线研究现状

目前国外对基于解析几何、动力学及工程经济学等的铁路选线设计理论和方法^[6]研究较多,如1877年,美国工程师Wellington Arthur M.编著了《The Eco-

nomic Theory of the Location of Railway》一书,基于此,欧美的铁路选线经济学得到了较好的发展;1927年,法国铁路总工程师M. R. Allegret在《Project De Trace et de Terrassements》^[7]一书中提出了铁路选线经济与技术的理论;1977年,法国Jean Alias教授在《La Voie Ferree - Techniques de Construction of d'Entretien》一书中系统地介绍了法国铁路先进技术成果;此后,铁路技术的进步不断地影响着铁路选线设计。

国内对整体选线原则研究较多,但大多基于工程经验,而相对选线理论、线路方案定量比选研究较少^[7-12]。1984年,铁道部第二勘察设计院主编的《岩溶工程地质》一书系统地总结了岩溶地区普速铁路线路方案选择原则^[7]。1993年陈成宗及2005年李苍松等人^[8-9]基于岩溶隧道地质问题分析,提出了分水岭地区、坡岸地段及峰丛地区普速铁路隧道选线技术及选线原则;近年来,众多学者^[10-12]基于地形地貌、地层岩性、地质构造、岩溶发育、分布的影响和控制因素、深部岩溶发育受控因素及发育机制等,对岩溶区减灾选线进行了一定程度的研究,并取得了一些成果。

总体来说,目前国内外基于工程经济学、力学及工程经验等方面的选线研究较多,但基于铁道工程学、岩溶学、灾害学及现代数理理论等研究铁路减灾选线的理论和方法较少,基于岩溶致灾特性对高速铁路进行减灾选线的研究鲜有报道。

1.2 岩溶区综合勘察技术研究现状

目前国内外岩溶区综合勘探技术主要包括遥感图像地质解译、地质调绘、勘探(钻探、物探)和地质测试(原位测试、水文地质测试和室内试验)及地理信息系统(GIS)等。

国外基于地质调绘、遥感图像地质解译、钻探及物探等传统岩溶勘察技术方法的应用较为成熟^[16-20]。因仪器设备及技术的优势,基于地球物理方法(如地质雷达、高密度电法、浅层地震、声波孔间透视、CT层析法等)用于隐伏岩溶探测,目前已成为岩溶地质勘察技术研究的热点^[1,13-17]。在隐伏岩溶探测技术研究^[13-16]方面,国外取得的另一重要成果是相关标准和指南的制定。如1999年,美国试验与材料协会(ASTM)颁布了《地面地球物理方法选择标准指南(D6429-99)》^[13],2004年,British Standards Institute颁布了《现场调查标准(BS5930)》^[14],系统描述了岩溶探测中最有效的地球物理方法。美国Technos, Inc^[15]基于多年的物探工程经验,认为地震面波、地质

雷达及微重力法最为行之有效。

国内在铁路工程岩溶探测技术上,尤其是地球物理勘探方面进行了一些研究和应用^[1,17],主要有遥感技术、地球物理勘探技术(重力勘察技术、磁法勘探技术、电法勘察技术及地震勘探技术)、环境同位素技术、岩溶地貌与水文网分析法和地理信息系统(GIS)法等^[1]。众多学者及工程师们结合重大岩溶工程,就铁路工程勘探技术的原理和应用等进行了较多的研究,并取得了一定成效。

1.3 岩溶灾害风险评估研究现状

不同领域对岩溶灾害问题的研究,其侧重点有所差异,铁路及公路等线状工程主要关注岩溶地面塌陷及岩溶隧道涌水、突泥、岩溶灾害预测预报及岩溶洞穴的稳定性等问题。

(1) 岩溶地面塌陷研究现状

上世纪70年代以来,国际上召开了多次与岩溶地面塌陷有关的会议,针对岩溶地面塌陷的广泛性和危害性进行经验交流^[2,16,18-19]。如:1978年在西德汉诺威举行的首届有关岩溶的国际大会,重点讨论了岩溶地面塌陷及其分布规律、勘测技术和防治等方面的问题^[18];1984~2008年多次在美国召开的有关岩溶塌陷及其相关工程环境问题的国际会议,重点讨论了岩溶地面塌陷分布发育规律等问题^[18];1996年美国George Sowers基于多年的研究,重点论述了岩溶塌陷的机理和防治措施^[18];2004年英国Tony Waltham等,基于工程实践探讨了工程活动中岩溶隐患的处置技术^[18]。目前,国外对岩溶塌陷灾害的研究及其成果主要体现在6个方面^[16,18-19]:①岩溶塌陷发育条件、分布规律及机理研究;②岩溶塌陷综合勘测技术研究;③岩溶塌陷基础数据库建设;④岩溶塌陷危险性预测与风险评估;⑤岩溶塌陷预测预报;⑥岩溶塌陷对环境的影响。

作为我国典型的地质灾害类型之一,上世纪90年代末后,岩溶地面塌陷受到国家相关部门和学者的高度重视。特别是近20年来,开展了系列岩溶塌陷分布规律及防治研究工作,取得了大量研究成果^[2,18-19]。目前我国岩溶塌陷的研究成果主要包括^[18-19]:①岩溶塌陷的分布规律及机理研究;②岩溶塌陷的勘测及评价技术研究;③岩溶塌陷灾害风险管理与评估研究;④岩溶塌陷预测与防治技术研究。

(2) 岩溶区隧道涌水、突泥风险评估研究现状

与浅埋隧道相比,深埋长大隧道因其复杂的水文地质单元、充足的水源补给量、高水头压力等特点,潜在的风险因素较多,更易发生涌水、突泥等风险事故。

基于不同地质体的水文地质环境、水文地质条件的复杂程度及隧道施工方式方法,国内外学者对隧道涌水量预测做了大量的研究并取得了一定成果^[20-23]。目前,在隧道涌水量预测方法上应用较多的有降水入渗法、简易水均衡法(地下水径流深度法及径流模数法)、地下水动力学法、水文地质比拟法、同位素氡法等^[20],还有待进一步探讨的经验公式法、解析法、数值分析法及非线性理论方法等。但鉴于各种预测方法存在的局限性围,实际应用中常把复杂的水文地质条件理想化和简单化,忽视了水文地质条件本身的复杂性,因此岩溶区隧道涌水量的准确计算仍是难题,尚无成熟的理论和准确的计算方法^[20-22]。

(3) 隧道岩溶灾害预测预报研究现状

目前,隧道岩溶灾害预测预报方法主要有工程地质调绘与推断方法、水平钻孔法、地质雷达法、地震预报法、TSP法以及TRT地震波反射层析成像法等。此外,水平声波剖面法、陆地声纳法、红外探水法、BEAM、核磁共振法、瞬变电磁法等亦得到了广泛的应用^[21,23-29]。

英、法、日、德等国家将地质灾害超前预报列为隧道工程建设的重要研究内容由来已久^[21,23-27]。在我国,隧道施工超前地质预报研究始于上世纪50年代末,上世纪70年代末之后,多家单位相继将地质素描法、地质调查、超前钻孔、声波、TSP、地质雷达、红外线等应用于隧道超前地质预报工作,并取得了丰硕成果^[25-27]。

近年来,交通部和水利部及其下属单位开始在新建铁路隧道、高速公路隧道及大型引水水隧道中普遍开展基于TSP、地质雷达、红外探测等为主的超前地质预报工作,并制定了相应的标准和指南^[28-30],为隧道超前地质预报工作创造了有利的条件。

(4) 岩溶洞穴稳定性评价研究现状

近年来,关于岩溶区溶洞稳定性的研究不断增多,对自然条件下的岩溶地面塌陷失稳机理研究做了一定工作并取得了一些成果^[5,19,28-30]。如:在岩溶塌陷失稳预测和稳定性分析评价方面,廖如松^[28]基于逐步判别法分析了桂林岩溶区塌陷失稳特性,陈国亮^[29]分析了岩溶地面塌陷失稳的成因机制与防治对策,王建秀等人^[30]提出了“盖层土体-薄顶板无充填溶洞力学系统”,并分析评价了无充填溶洞薄顶板的稳定性。此外,部分学者^[5,19]基于结构力学原理,提出了将溶洞顶板视为梁板(悬臂梁、简支梁、两端固定梁)、塌落拱、压力拱等的溶洞顶板安全厚度计算方法。但由于岩溶洞穴的潜伏性和不均一性,其分布形态和分布规律难

以查明,目前岩溶洞穴的稳定性分析评价仍是一个复杂的系统工程问题,很难基于某一理论准确地分析评价。

1.4 岩溶灾害防治技术研究现状

(1) 岩溶地面塌陷防治技术研究现状

在岩溶地面塌陷的防治方面,综合防治技术已提到议程。在工程处理上,目前运用较多且比较有效的方法为钻孔注浆技术。国内针对岩溶地面塌陷的防治技术主要有^[4,9,30]:①防排水技术,即通过防排水工程将地表水直接引入下伏岩溶系统中,避免建筑物基础受破坏;②特殊基础,以片筏基础和条形基础最为经济有效,且可防止覆盖型岩溶区地面塌陷和不均匀沉降对建筑物的危害。国外针对岩溶地面塌陷的防治技术主要有^[4,16]:①防渗技术,即回填、夯实、水泥抹面、隔水土工布封闭、氯丁橡胶板防水、隔离拦水坝、改河工程等技术;②地下加固技术,即强夯、碎石填筑、灌浆固结、帷幕灌浆、桩基、锚杆加固等技术;③结构物跨越技术,即桥、梁、板、拱跨越等技术。

(2) 桥梁岩溶灾害防治技术研究现状

岩溶区典型桥梁岩溶工程地质问题主要有基础漏浆、成桩困难、基础下沉、倾斜及地面塌陷等。针对不同的岩溶工程地质问题,其防治技术亦有侧重。目前,国内针对厚覆盖型、隐伏型岩溶可能引起的桥基下沉、倾斜等灾害,在查明岩溶发育特性的基础上,一般采用长桩基础为主的防治措施。对于岩溶区桩基穿越串珠状溶洞时产生的掉钻、斜孔、坍孔及漏浆、串浆等造成成桩困难的岩溶工程地质问题,目前其防治主要采用回填片石、黏性土、灌混凝土和注浆等工程措施处理,溶洞较大时,采用钢护筒跟进措施穿过。在岩溶发育区,在采用钻探技术查明岩溶发育的情况下,一般采用桩基础以满足高速铁路对桥梁桩基础的沉降及变形要求。对于施工震动及地下水位变动可能引起的岩溶地面塌陷问题,在查明岩溶发育的情况下,一般采取对影响区域先行注浆加固,再采用桩基础的措施。

(3) 隧道岩溶灾害防治技术研究现状

目前,隧道岩溶灾害常用的处理方法有“引、堵、越、绕”四种^[3,9-11,31]。国内外深埋长大隧道涌突水地质灾害、防治技术一般遵循以下原则^[3,9-11,31]:①重视岩溶区超前地质预报工作,根据不同岩溶地质问题采用相应的技术措施;②涌突水整治采取“防、截、堵、排综合治理,以堵为主,堵排结合”;③注浆基于不同目的应选用不同注浆材料;④隧道内岩溶、断层等复杂地质段应以预防为主,洞内外并重处理为宜。

2 对国内外研究现状的分析

高速铁路线路曲线半径大、速度目标值高,线路对地质条件的适应性差,对场地的稳定性要求高,轨道的高平顺度,对线下工程严格的工后沉降控制要求对地基岩土体适宜性要求高。绕避岩溶区,岩溶区高速铁路建设须加强典型岩溶地质问题的研究、深化岩溶及岩溶水理论认识,加强地质勘察的深细度和精细度,加强岩溶综合勘察技术及新技术的研究和应用,强化减灾选线,加强岩溶灾害综合评估及防治对策。

针对岩溶理论,从岩性、地质构造、地貌、岩溶水发育及运动等方面进行了较为系统的分析和研究。但针对铁路深埋长大隧道、厚覆盖型路基及高墩大跨特殊结构桥梁典型岩溶地质问题的研究较少,需进一步深化现代深部岩溶、岩溶系统划分及岩溶分区等方面的认识和研究工作。

(1) 选线技术方面

目前国外基于工程经济学、解析几何、动力学等角度,研究铁路选线设计理论和方法较多;国内以实际工程经验为基础,对选线整体原则研究较多,对选线理论、线路方案定量比选研究较少。目前,国内外基于灾害地质学、风险理论等研究高速铁路减灾选线的理论和方法甚少,基于岩溶致灾特征对高速铁路进行减灾选线的研究鲜有报道。

(2) 勘察技术方面

目前传统的遥感图像地质解译、地质调绘、传统的勘探及测试技术等研究和应用较多,而在立体勘探模式方面,如三维遥感地质解译、物探三维遥感、岩溶空腔、暗河摄影技术、西南山区深厚覆盖型岩溶、斜坡岩溶等研究和应用极少。

(3) 岩溶灾害风险评估方面

①在岩溶塌陷预测方面,基于地理信息系统技术(GIS)及风险评估(EMRS)体系的岩溶塌陷危险性评价得到了较好的研究;但在岩溶塌陷监测预报方面,因难以运用地面监测手段对塌陷进行监测,此方面的研究目前基本尚未开展;②在涌水突泥方面,国内外学者从地质角度对岩溶的形态、发育规律、特点及形成条件等方面进行较多研究,但成果尚不系统、深入难以指导岩溶区铁路建设的勘察、设计和施工。且涌水量计算目前尚无成熟的理论和准确的计算方法;③在岩溶洞穴稳定性方面,由于岩溶洞穴的隐蔽性和不均一性,其分布形态和规律难以查明,缺乏准确有效的岩溶洞穴稳定性分析评价方法。

在岩溶灾害防治方面,岩溶区普速铁路的岩溶防

治技术及工程措施已无法满足高速铁路发展的需要,需加强岩溶防治新技术的开发和应用研究。

3 应进一步研究的问题及发展趋势

根据高速铁路的特点及岩溶区铁路勘察防治亟待解决的技术问题,岩溶区岩溶工程地质应加强以下几方面的研究工作:

(1) 岩溶工程地质分区研究

针对深埋长大隧道(高压)涌水、突泥,大(巨)型溶洞及充填物,(厚)覆盖型岩溶路基塌陷及桥梁基础下沉、漏浆及塌陷等突出的岩溶地质灾害,深化现代深部岩溶与岩溶系统划分研究,并构建高速铁路岩溶工程分区。

(2) 复杂岩溶区高速铁路减灾选线理论与实践研究

针对高速铁路的特点和岩溶地质灾害特征,运用铁道工程、岩溶学、灾害学、工程地质学、环境学及现代数理理论等,重点研究减灾选线的指导原则与综合选线方法,并创立复杂岩溶区高速铁路减灾选线理论。

(3) 复杂岩溶区高速铁路综合勘察技术研究

在现有常规勘察技术优缺点对比分析、引进并消化新技术新方法的基础上,重点研究航片、卫片、无人机勘察技术、反磁通等值瞬变电磁技术、微动探测技术、轻便型全液压钻探技术及超深覆盖层综合原位测试技术等的技术特点,创建适用于各类工程的综合勘察模式,并凝炼出复杂岩溶区高速铁路空、天、地一体化综合勘察成套技术体系。

(4) 复杂岩溶区高速铁路主要灾害风险评估体系研究

针对高速铁路岩溶区隧道涌水、突泥,大型溶洞,岩溶塌陷等工程地质问题,基于评价体系、评价方法、计算模型等分析,开展主要风险源致灾因子识别、指标量化及权重确定研究,构建风险评估模型,并创建岩溶区高速铁路主要灾害风险评估体系。

(5) 复杂岩溶区高速铁路主要灾害防治关键技术研究

针对岩溶灾害类型及其对工程的影响,重点研究高速铁路路基、桥梁及隧道等工程的岩溶灾害防治关键技术。

参考文献:

- [1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 岩溶勘察技术报告[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2009.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Report of Karst

Exploitation Technique [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2009.

- [2] 唐万春. 高速铁路厚覆盖型岩溶路基地质工程问题系统研究[D]. 成都:成都理工大学,2011.

TANG Wanchun. Systematic Study on Geological Engineering Problems of Thick-covering Karst Subgrade in High-speed Railway [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.

- [3] 王遇国. 岩溶隧道突水灾害与防治研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2010.

WANG Yuguo. Study on Water Inrush and Prevention of Karst Tunnel [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010.

- [4] 邓启江. 重大工程岩溶塌陷防治综合研究[D]. 北京:中国地质大学,2010.

DENG Qijiang. Synthetic Study on Karst Collapse Prevention of Important Project [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.

- [5] 蒋小珍. 线性工程路基岩溶土洞-塌陷-灾害防治综合研究[D]. 北京:中国地质大学,2008.

JIANG Xiaozhen. Integrated Research on Karst Soil-Void (Sinkhole Collapse) Hazard of Linear Engineering [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.

- [6] 易思蓉. 铁路选线设计[M]. 重庆:重庆大学出版社,2009.

YI Sirong. Design of Route Selection for Railway [M]. Chongqing: Chongqing University Publishing House, 2009.

- [7] 铁道部第二勘测设计院. 岩溶工程地质[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.

The Second Survey Design Institute, Ministry of Railway. Karst Engineering Geology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.

- [8] 陈成宗. 铁路工程地质的发展趋向[J]. 水文地质工程地质, 1993,8(1):31-34.

CHEN Chengzong. Development Trend of Railway Engineering Geology [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1993,8(1): 31-34.

- [9] 李苍松,王石春,陈成宗. 岩溶地区铁路工程地质研究[J]. 铁道工程学报, 2005,22(S1):357-363.

LI Cangsong, WANG Shichun, CHEN Chengzong. Research on The Railway Engineering Geology in Karst Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005,22(S1):357-363.

- [10] 吴俊猛,喻洪平. 沪昆客专云贵段主要地质问题及选线对策研究[J]. 铁道工程学报,2013,30(10):12-15.

WU Junmeng, YU Hongping. Research on the Main Adverse Geologic Phenomenas and Geological Location for Yunnan-Guizhou Area on Shanghai-Kunming PDL [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013,30(10):12-15.

- [11] 李光伟. 论岩溶区工程地质勘察问题与地质选线[J]. 铁道勘察, 2016,42(2):12-15.

LI Guangwei. Discussion on the Problems of Engineering Geological Surveying in Karst Area and Geological Route Selection [J]. Railway Survey, 2016,42(2):12-15.

- [12] 曹化平,王科. 铁路岩溶隧道工程地质选线研究[J]. 高速铁路技术,2011,2(1):31-36.

CAO Huaping, WANG Ke. Study on Geological Route Selection for Railway Engineering in Karst Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2011,2(1):31-36.

[13] American Society for Testing and Materials. Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods [S], West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM D6429-99,1999.

[14] British Standard Society (GB-BSI). Code of practice for site investigations [S], BS5930-1999.

[15] Technos, Inc. Surface Geophysical Methods [M]. Florida: Volume 1, 2004.

[16] Vladimir Tolmachev. The main results of engineering karstology research conducted in Dzerzhinsk, Russia, Proceedings of The ninth Multidisciplinary conference on sinkholes and the Environmental Impacts of Karst [C], Huntsville, Alabama, 2003.

[17] 李彦军. 岩溶地质综合勘察方法 [J]. 铁道建筑,2000,40(5):8-9.

LI Yanjun. Comprehensive Exploration Method of Karst Geology [J]. Railway Engineering, 2000,40(5):8-9.

[18] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 国内外岩溶塌陷调查评价方法与防治技术现状报告 [R]. 桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2010.

Institute of Karst Geology of the Chinese Academy of Geological Sciences. Report on the Evaluation Method and Control Technology of Karst Collapse at Home and Abroad [R]. Guilin: Institute of Karst Geology of the Chinese Academy of Geological Sciences, 2010.

[19] 雷明堂,蒋小珍. 岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报,1998,9(3):22-25.

LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen. Research Status, Developing Tendency and Supporting Techniques of Karst Collapse [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998,9(3):22-25.

[20] TB 10049-2014 铁路工程水文地质勘察规范 [S].

TB 10049-2014 Code for Hydrogeological Investigation of Railway Engineering [S].

[21] 王成亮. 铁路隧道岩溶突水灾害风险识别与预警方法研究 [D]. 北京:北京交通大学,2015.

WANG Chengliang. Study on Risk Identification and Warning of Karst Water Bursting Disaster of Railway Tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[22] 徐正宣,彭芬. 方斗山隧道岩溶水文地质条件危险性研究 [J]. 高速铁路技术,2017,8(4):28-33.

XU Zhengxuan, PENG Fen. Karst Hydrogeology and Risk Research on Fangdoushan Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2017,8(4):28-33.

[23] James A. Doolittle, Mary E. Collins. A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst [J]. Geoderma. Volume:85, Issue: 1, July 11,1998,p:83-102.

[24] Dorothy J. Vesper. Transport and Storage of Trace Metals in a Karst Aquifer: An Example From Front Campbell Kentucky [D]. The Pennsylvania State University, 2002.

[25] Daniel Hatim. The Hydrogeology of the Classical Karst (Karsts) Aquifer of Southwestern Slovenia [D]. the Graduate School of the University of Minnesota, 2002.

[26] 赵永贵. 国内外隧道超前预报技术评析与推介 [J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1344-1352.

ZHAO Yonggui. Analysis and Recommendation of Tunnel Prediction Techniques at Home and Abroad [J]. Progress in Geophysics, 2007,22(4):1344-1352.

[27] 光耀华. 岩溶地区工程地质研究的若干新进展概述 [J]. 中国岩溶,1998,17(4):70-75.

GUANG Yaohua. An Introduction to the Progress of the Geologic Engineering Research in Karst Regions [J]. Carsologica Sinica, 1998,17(4):70-75.

[28] 廖如松. 应用逐步判别法预测岩溶塌陷探讨-以桂林岩溶地区为例 [J]. 中国岩溶,1987,6(1):11-12.

LIAO Rusong. The Application of Stepwise Discriminant Method to the Prediction of Karst Collapse-Taking Karst Area of Guilin as an Example [J]. Carsologica Sinica, 1987,6(1):11-12.

[29] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治 [M]. 北京:中国铁道出版社,1994.

CHEN Guoliang. Karst Collapse of Ground Soil Genesis, Prevention and Remediation (extract) [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.

[30] 王建秀,杨立中,刘丹,等. 阻水盖层分布区岩溶塌陷的物质基础及成因研究 [J]. 水文地质工程地质,2000,15(4):25-29.

WANG Jianxiu, YANG Lizhong, LIU Dan, et al. Material Foundation and Study of Karst Collapse in Water Blocking Cover [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000,15(4):25-29.

[31] 蒋建平,高广运,李晓昭,等. 隧道工程突水机制及对策 [J]. 中国铁道科学, 2006,5(27):76-82.

JIANG Jianping, GAO Guanyun, LI Xiaozhao, et al. Mechanism and Countermeasures of Water-Bursting in Railroad Tunnel Engineering [J]. China Railway Science, 2006,5(27):76-82.

(编辑:刘会娟 白雪)