

中国地质大学（武汉）学术著作出版基金

长输管道地质灾害风险评价与控制

忠武管道地质灾害研究

邓清禄 等著

CHANGSHU GUANDAO DIZHI ZAIHAI FENGXIAN PINGJIA YU KONGZHI
ZHONGWU GUANDAO DIZHI ZAIHAI YANJIU



非
外
借



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

中国地质大学（武汉）学术著作出版基金

长输管道地质灾害风险评估与控制

忠武管道地质灾害研究

邓清禄 等著

CHANGSHU GUANDAO DIZHI ZAIHAI FENGXIAN PINGJIA YU KONGZHI
ZHONGWU GUANDAO DIZHI ZAIHAI YANJIU

图书馆
印章

 中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

长输管道地质灾害风险评价与控制 忠武管道地质灾害研究/邓清禄等著. —武汉:中国地质大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5625-3737-3

I. ①长…

II. ①邓…

III. ①天然气输送-长输管道-管道工程-地质灾害-研究-中国

IV. ①TE832②P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 314351 号

长输管道地质灾害风险评价与控制 忠武管道地质灾害研究

邓清禄 等著

责任编辑:彭琳

责任校对:周旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮编:430074

电话:(027)67883511

传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经销:全国新华书店

http://cugp.cug.edu.cn

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:560千字 印张:21.75

版次:2016年12月第1版

印次:2016年12月第1次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—500册

ISBN 978-7-5625-3737-3

定价:58.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

作者 2004 年首次接触管道地质灾害问题,自此研究工作重心一直围绕着管道地质灾害开展,至 2016 年编写出版本书时已有 12 年。

过去的 12 年,恰逢中国管道建设蓬勃发展时期。2003 年以前,中国有长输油气管道 3.5×10^4 km,随着西气东输一线(2004)、忠县—武汉输气管道(简称“忠武管道”,2004)、陕京二线(2005)、西部原油成品油管道(成品油 2006、原油 2007)、川气东送(2010)、陕京三线(2011)、西气东输二线(2012)、兰郑长成品油管道(2013)、中缅油气管道(输气 2013、输油 2015)等重大输油气管道工程的相继建成投产,至 2016 年中国在役油气管道总里程已愈 12×10^4 km,12 年间增长了 2.5 倍,基本形成横跨东西、纵贯南北、连通海外的输油气网络。

过去 10 余年,也是中国管道地质灾害防治工作从摸索认知到逐步完善,最终纳入常规管道管理程序的过程。兰成渝成品油管道(2002)穿越地形地质条件复杂的秦巴山区,开始涌现出大量的管道地质灾害问题,但真正到忠武管道(2004)及西气东输一线(2004)的投产运行,管道管理部门才开始意识到管道地质灾害是与第三方损伤、管体腐蚀、制造缺陷、误操作相并列的一类管道安全风险源,才开始落实管道地质灾害风险识别、风险评价和风险控制等问题的系统探索和实践。中国石油天然气行业标准《油气管道地质灾害风险管理技术规范》(SY/T 6828—2011)的发布,标志着中国管道地质灾害防治被纳入到常规的管道管理轨道。

作为忠武管道地质灾害防治工作的主要支撑单位之一,中国地质大学(武汉)管道地质灾害防治课题组从该管道建设期开始,承担了大量的管道地质灾害防治咨询服务与科研攻关工作,为忠武管道安全运行增添了一份保障,在管道管理者中逐步树立起管道地质灾害系统防治的理念,倡导管道地质灾害调查识别、监测预警与工程防治并举,逐步形成以管道地质灾害风险识别—风险评价—监测预警—工程防治—信息化管理为主线的管道地质灾害防治技术体系。依托忠武管道地质灾害防治,作者属于中国较早系统开展管道地质灾害研究的团队,做了些开创性的工作,对中国管道地质灾害研究起到了推动作用。

我们研究工作投入最多的是忠武管道,特别是从重庆忠县首站至宜昌约 400km 的山区段。忠武管道山区段,穿越川东—鄂西山区,地质灾害突出,其地貌地质背景及地质灾害特征,在我国南方包括西南地区长输管道中都具有代表性。本书成果总结材料主要来自忠武管道,也有少部分来自与之并行敷设的川气东送管道。

出版本书的目的主要有三点:一是对我们过去从事管道地质灾害防治研究工作进行一次全面的总结,希望通过这份总结,能将我们的一点认识与经验和同行及管道管理者分享,对我国今后长输油气管道建设及管道管理有所裨益;二是为忠武管道地质灾害管理积累资料,总结的成果资料对忠武管道今后的管道地质灾害管理具有指导作用;三是给我们自己一份交代并留下一份纪念,总结之成果是我们过去十几年为管道地质灾害所付出的艰辛劳动的结晶,有淋

滴汗水的浇灌,有通宵达旦的坚守。

本书以管道地质灾害风险识别—风险评价—监测预警—工程防治—信息化管理为主线,对管道地质灾害防治技术体系进行总结,按8章进行编排:第一、第二章在简要介绍管道建设及管道地质灾害研究现状的基础上,重点阐述管道地质灾害研究的主要理论基础与技术方法,包括管道地质灾害风险评价、滑坡位移—管道受力分析、落石冲击—管道受力分析、管土相互作用数值模拟及管道地质灾害预警预报等;第三章至第五章重点围绕忠武管道,总结管道地质灾害特征,开展管道地质灾害易发性区段划分和单体地质灾害风险评价,分析河沟段管道敷设方式对管道地质灾害易发性的影响;第六章展示管道地质灾害监测预警的一些工作实践,通过监测手段的选择、监测网络建设、监测数据分析、管道受力模型计算以及地质灾害预警全过程的展示,发挥管道地质灾害监测技术在实际工程中应用的示范作用;第七章介绍管道地质灾害工程防治实践和探索,涉及管道地质灾害防治管理策略、典型地质灾害勘查评价、滑坡格构锚固防治工程设计与格构梁内力试验分析、典型河段管道水毁问题分析与防治等;第八章介绍了基于 ArcGIS 的管道地质灾害管理信息系统开发与实现。

邓清禄负责本书大纲制定、统稿及第二、第四、第五章的编写工作和第一、第三、第六、第七章部分内容的编写,朱大鹏负责第七章的编写并参与第一、第二章的编写,王学平负责第八章的编写并参与第二章的编写,徐景田负责第六章的编写,荆宏远负责第三章的编写并参与第二章和第七章的编写,李亮亮负责第一章的编写并参与第七章编写,操丽参与第二章和第八章的编写。本书是一份集体力量的产物,除以上列出的作者外,历届研究生如刘斌、杨建、王海庆、王磊、叶润青、罗群、王晓燕、杨辉建、熊高、董国梁、王薇、吴斌、王曼、施晓文、杨智、余伟、张宏亮、李华章、姚鱼跃、郭春迎、熊健、杨辉、庞伟军、张申、万飞、王红伟、唐正浩、曹慎、刘勇、武义强、吴锐、庞成立、李佰龙、杨慧之、张腾飞、付敏、龙杨、朱家畅、安鹏举、蒋孝鹏、赵学金、伍运霖等对本书的成果均有所贡献。魏民、张吉顺、易顺华、樊光明、钱同辉、李华亮等老师也参加了部分野外调查和资料整理工作。

中国石油天然气股份有限公司管道分公司(简称“中国石油管道公司”)一批管理者的远见卓识,推动了管道地质灾害的研究。本书的成果离不开董盛厚、陈健峰、张利、李伟林、张欣佳、李江、周德义、张东江、胡万志、郝建斌、高长顺、徐志诚、李永宏、张贵喜、黄碧海、蔡荣海、孟国忠、刘建平、吴张中、卢启春、王耀忠、冯磊、蒲昭军、于忠波、陈川、沈飞军等同志直接或间接的支持。

一批管道领域的专家,如曲兴元、周亮臣、万金明、梅云新、王向东、颜宇森等,在项目研究咨询、成果审查等过程中,与作者有过广泛坦诚的交流,书中的成果也体现了他们的智慧。

以上提到以及没有提到的人们,对你们的贡献或给予的支持帮助一并致以最真诚的感谢!

邓清禄

2016年1月20日

目 录

| | | |
|------------|------------------------|-------|
| 第一章 | 管道地质灾害研究现状 | (1) |
| 第一节 | 长输油气管道建设现状及趋势 | (1) |
| 第二节 | 长输油气管道地质灾害管理及研究现状 | (2) |
| 第二章 | 管道地质灾害基础理论与技术方法 | (15) |
| 第一节 | 管道地质灾害风险评价体系 | (15) |
| 第二节 | 滑坡推力作用下管道安全评价 | (36) |
| 第三节 | 崩塌落石冲击作用下管道安全评价 | (63) |
| 第四节 | 管-土相互作用有限元模拟 | (83) |
| 第五节 | 管道地质灾害监测与预警预报 | (111) |
| 第三章 | 忠武管道地质灾害特征 | (123) |
| 第一节 | 忠武管道地质灾害背景 | (123) |
| 第二节 | 忠武管道地质灾害调查 | (137) |
| 第三节 | 地质灾害类型、分布及规模特征 | (144) |
| 第四节 | 地质灾害对管道的危害 | (149) |
| 第五节 | 忠武管道地质灾害主要影响因素 | (151) |
| 第四章 | 忠武管道地质灾害风险评价 | (155) |
| 第一节 | 忠武管道地质灾害易发程度区划 | (155) |
| 第二节 | 忠武管道单体地质灾害风险评价 | (168) |
| 第五章 | 地质灾害与管道敷设方式关系 | (171) |
| 第一节 | 山区段管道敷设方式分类 | (171) |
| 第二节 | 不同敷设方式与管道地质灾害易发性 | (173) |
| 第三节 | 不同敷设方式管道建设成本与维护成本分析 | (177) |
| 第六章 | 管道地质灾害监测预警实践 | (183) |
| 第一节 | 罗针田滑坡 | (183) |
| 第二节 | 黄草坡滑坡 | (191) |

| | | |
|------------|---|--------------|
| 第三节 | 张家沟危岩····· | (198) |
| 第四节 | 野三河跨越边坡····· | (208) |
| 第五节 | 顺溪 1 [#] 滑坡防治工程效果监测····· | (217) |
| 第六节 | 管道跨越变形监测····· | (230) |
| 第七章 | 忠武管道地质灾害防治实践 ····· | (238) |
| 第一节 | 忠武管道地质灾害防治管理策略····· | (238) |
| 第二节 | 忠武管道一碗水线段工程地质评价····· | (241) |
| 第三节 | 顺溪 1 [#] 滑坡格构锚固防治设计及格构梁受力检测试验研究····· | (262) |
| 第四节 | 榔坪河段管道水毁问题分析与防治····· | (278) |
| 第五节 | 其他管道地质灾害防治工程设计实践与示范····· | (300) |
| 第八章 | 管道地质灾害管理信息系统建设 ····· | (310) |
| 第一节 | 系统建设目标任务及设计思路与原则····· | (311) |
| 第二节 | 系统设计····· | (312) |
| 第三节 | 系统功能实现····· | (316) |
| | 主要参考文献 ····· | (334) |

第一章 管道地质灾害研究现状

长输管道运输是随着石油与天然气工业快速发展而产生的一种特殊的国际货物运输方式,具有运量大、运费低、占地少、不受气候限制、易于自动控制及可连续作业等优点,目前在中国已成为继水路、公路、铁路、航空运输之后的第五大运输行业。无论在国内还是国外,长输油气管道都有很大发展空间。由于管道内输送的是高压油气介质,具有易燃易爆等特性,油气管道安全问题突出。地质灾害是影响长输油气管道安全运营的主要风险源之一,无论过去还是将来,管道地质灾害问题一直是管道运营与管理部门关注的问题。

第一节 长输油气管道建设现状及趋势

一、国际现状及趋势

截至 2015 年,全球在役管道数量为 3 800 余条,总里程约 196×10^4 km,其中天然气管道约 127.4×10^4 km,占管道总里程的 65.0%;原油管道约 36.2×10^4 km,占管道总里程的 18.5%;成品油管道约 24.8×10^4 km,占管道总里程的 12.6%;液化天然气(LNG)管道约 7.6×10^4 km,占管道总里程的 3.9%。全球管道主要集中在北美、俄罗斯及欧洲、中亚、中东和亚太地区,其中以北美管道里程最多,约 84.5×10^4 km,亚太地区管道里程约 26.5×10^4 km,其他地区管道里程合计约 85×10^4 km。

据统计,全世界在建和规划管道共计约 18.4×10^4 km,其中在建管道 6.9×10^4 km,亚太和北美地区仍然是管道建设的主力军,约占规划和在建管道总里程的 81%。处于规划中的伊朗—伊拉克—叙利亚—黎巴嫩天然气管道总长约 6 000 km,管径 1 422 mm,预计 2018 年建成投产,建成后将成为全球最大口径的天然气管道工程项目。预计到 2019 年,将新增加 31×10^4 km 管道建设(Rita, 2016)。

近年来,全球经济整体增速放缓,油气行业呈现低迷态势,管道建设速度明显变缓,诸多规划管道被迫暂缓或停止。例如欧洲纳布科管道项目流产、美加 Keystone XL 输油管道项目被否决等。未来几年,全球油气管道建设投资将保持逐年下降趋势,新建管道将集中在天然气管道和海底管道。虽然油气行业态势低迷,但仍不可撼动化石能源在全球一次能源消费结构中的重要地位。中国、印度、巴西等新兴经济体国家由于消费增长迅速和管网建设不够完善,未来管道建设将向拓展资源进口通道和提高国内管网覆盖率的方向发展;美国、欧洲等传统发达经济体消费增长开始放缓,而且已经拥有较为完善的油气资源配送管网,未来的管道建设主要

以完善局部管网、优化输送网络为主;中东、中亚、俄罗斯等能源经济型国家,则主要致力于发展能源外输管道(祝睿智等,2015)。

二、我国现状及趋势

随着以中国、印度为代表的经济体高速发展,亚太地区油气需求增长迅速,目前已超过美国和欧洲,成为世界最大的油气消费中心。2015年,中国原油表观消费量约为 5.43×10^8 t,而原油产量仅为 2.3×10^8 t,对外依存度高达60%;天然气表观消费量约为 1.932×10^8 m³,产量为 1.350×10^8 m³,对外依存度超过30%。

也正因油气不断增长的需求,中国油气管道建设发展迅速,其油气管道总里程占亚太油气管道总里程的43%,高达 11.7×10^4 km,基本形成了贯穿全国、连通海外的油气输送管网。

截至2015年,中国在役原油管道超过 2.8×10^4 km,其中2015年建成投产3110 km,封存退役2700 km;在役成品油管道 2.2×10^4 km,2015年建成投产2200 km;在役天然气管道 6.7×10^4 km,已形成了以西气东输一、二、三线,陕京一、二、三线,川气东送管道等为主干线、联络线和以省管网为补充的横跨东西、纵贯南北、连通海外的供气网络。

中国油气管道建设将朝着大口径、大流量和立体网络化方向发展。专家预计,至2020年,中国油气管道总里程将超过 16×10^4 km,储气库工作气量将达到 105×10^8 m³,液化天然气(LNG)接收能力将达到 1.900×10^4 t/年。同时,中国政府正在推进的“一带一路”战略,构建的亚洲基础设施投资银行、丝路基金、中非发展基金等投融资平台,都将为国际油气通道建设发展带来新的机遇。

第二节 长输油气管道地质灾害管理及研究现状

一、长输油气管道面临地质灾害威胁

对于浅埋钢质输油气管道,地质灾害是主要风险源之一。地质灾害引发岩土体运动和地表变形,从而导致埋地管道产生弯曲、压缩、扭曲、拉裂、屈曲等变形破坏行为。管道在埋设的过程中会不可避免地穿越地形地质条件复杂的地区,这些地区常常发育各类地质灾害,威胁管道运行安全,常见的诸如地震、滑坡、崩塌、泥石流、水毁、地面塌陷等典型地质灾害,也包括冻土、湿陷性黄土、软土、膨胀土、盐渍土等不良地质体带来的危害。

国外管道失效统计数据表明,虽然在数量上地质灾害导致油气管道失效事件概率并不高,但造成的财产损失却非常巨大。据欧洲天然气管道事故数据小组(2015)统计,1970—2013年由地质灾害引起的管道事故约占8.0%,其中滑坡和洪水所占比例较高,分别占60.6%和16.3%,且近10年(2004—2013)由地质灾害引起的管道事故约占13%,低于施工缺陷(16%)、腐蚀(24%)及外部干扰(35%)引起的管道事故;美国交通运输部下属的管道及危险物品安全管理局(Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration,简称PHMSA)每年均发布所有油气运输管道事件,据统计1992—2011年重大输气管道事故中,由地质灾害引起的管道严重事故比例约占12.3%,低于材料缺陷、腐蚀及第三方破坏,但造成的损失却超过材

料缺陷和腐蚀,仅次于第三方破坏(狄彦等,2013)。加拿大国家能源委员会调查结果显示:2011—2015年输气管道事故中,由地质灾害引起的管道事故比例约占7.4%(图1-1)。在地质条件复杂地区敷设的管道,地质灾害的风险更加突出,在南美的安第斯山区玻利维亚管道事故数据显示,地质灾害导致了50%的管道事故。Girgin等(2014)对美国21000起油气管道事件进行分析发现,约6%的事件是由自然灾害引起,自然灾害中地质灾害和水文灾害分别占50%、11%,其中滑坡是诱发管道地质灾害的主要因素,约占43%,洪水灾害占水文灾害的84%。Girgin等(2016)对美国液体管道1986—2012年间的3802起重大突发事件进行统计,其中自然灾害诱发的重大管道事故234起(6.2%),自然灾害中地质灾害及水文灾害的比例分别为26%及14%,且地面沉降是主要的地质灾害类型(32%),洪水是最主要的水文灾害类型(81%)。

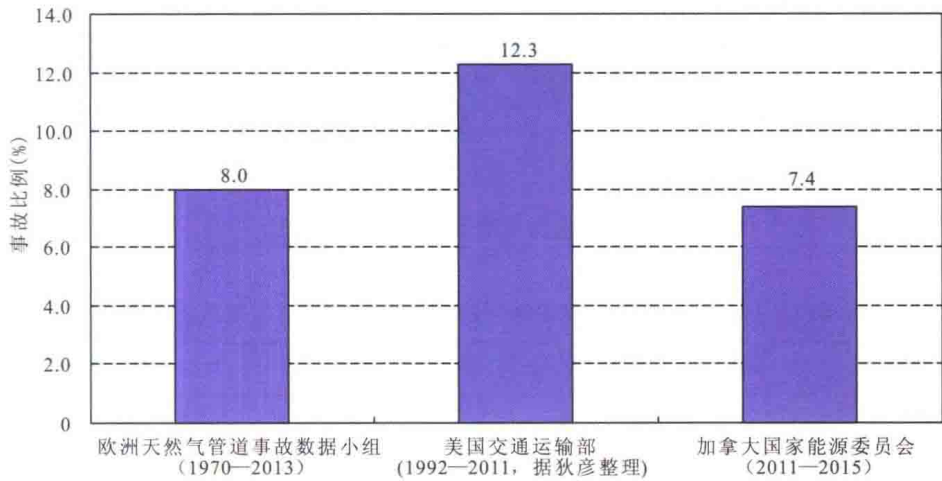


图1-1 地质灾害在管道事故中的比例

我国长输油气管道面临的地质灾害威胁相较于国外更加显著和严峻。我国地质构造复杂、地形地貌组合多样,随着管道建设事业的迅猛发展,通过复杂地形地貌和地质条件地区的管道越来越多,地质灾害频频发生,如涩宁兰输气管道、兰成渝成品油输油管道、忠武输气管道、陕京输气管道、川气东送管道等,面临的滑坡、崩塌、泥石流、水毁等地质灾害问题突出,而如中缅管道、西气东输管道、漠大原油管道等,还面临诸如强震和活动断裂、冻土冻胀融沉、黄土湿陷、软土、膨胀土、风蚀沙埋、岩溶塌陷和采空区塌陷等特殊地质灾害问题(图1-2)。表1-1列举了近年来滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害导致管道损毁的部分案例,从中可以窥见我国长输油气管道所面临的严峻的地质灾害形势。

二、管道地质灾害风险管理

面对地质灾害的严峻形势,国内外管道运营公司纷纷采取应对措施,较为普遍的是实施管道地质灾害风险管理,亦即对管道地质灾害进行风险识别、风险评价、风险控制,以及再识别、再评价和再控制的过程。该过程在管道全生命周期内将不断循环往复,以将管道地质灾害风险降低到可接受水平,直至管道报废。

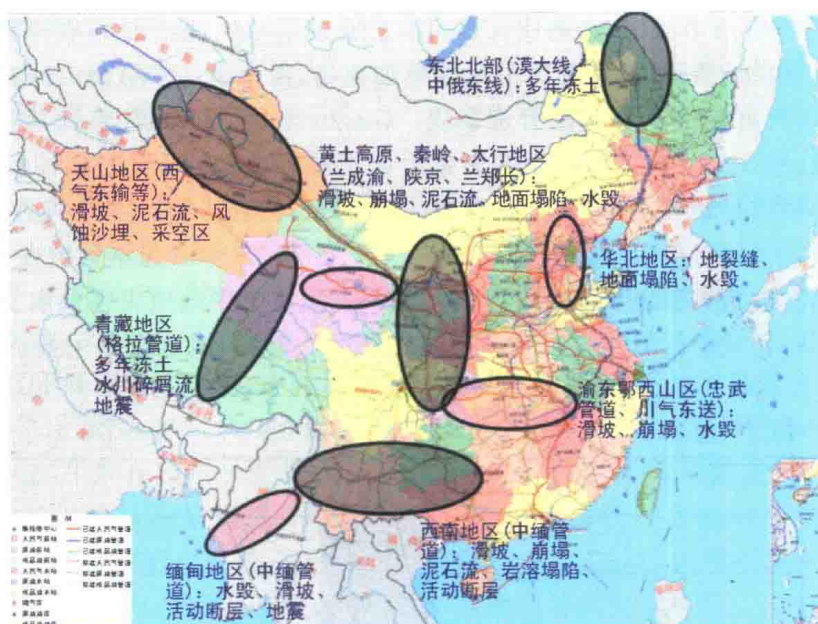


图 1-2 我国管道地质灾害分布情况

表 1-1 近 10 余年来我国地质灾害引发管道破坏事故典型案例

| 时间 | 地点 | 地质灾害类型 | 管道损毁灾害情况 |
|------------------|--------------------------|-------------|---------------------------|
| 2016 年 8 月 16 日 | 长庆油田采油六厂 | 泥石流 | 输油管线破裂, 导致少量原油泄漏 |
| 2016 年 7 月 20 日 | 恩施崔家坝镇 | 暴雨引发山体滑坡泥石流 | 川气东送天然气管道发生爆炸燃烧 |
| 2016 年 6 月 30 日 | 重庆市南岸区 | 暴雨引发滑坡 | 某输油管道被拉裂, 发生柴油泄漏 |
| 2016 年 6 月 29 日 | 重庆市涪陵区白涛镇三门子村 | 强降雨引发的山体滑坡 | 管道破损, 页岩气泄漏 |
| 2016 年 7 月 8 日 | 江苏省镇江市 308 省道 K208+900 段 | 滑坡 | 成品油输送管道弯曲 40cm |
| 2015 年 12 月 20 日 | 深圳市 | 深圳“12·20”滑坡 | 某管道广深支干线爆裂 |
| 2013 年 7 月 15 日 | 陕西省延安市子长县余家坪 | 强降雨引发山体滑塌 | 安塞至永炼输油管道破裂, 少量原油泄漏污染水体 |
| 2013 年 7 月 12 日 | 陕北安塞五里湾小桥 | 暴雨引发落石 | 砸断天然气管道 |
| 2012 年 7 月 4 日 | 四川省遂宁市安居区磨溪镇 | 暴雨引发公路边坡崩塌 | 川中油气矿集气总站的一条天然气管道发生爆炸, 起火 |

续表 1-1

| 时间 | 地点 | 地质灾害类型 | 管道损毁灾害情况 |
|------------|-----------------|------------------------|---|
| 2011年9月17日 | 四川省巴中市南江县 | 暴雨引发崩塌 | 砸断巴中至南江县天然气输送管道 |
| 2011年9月8日 | 陕西省榆林靖边青阳岔镇阳坪村 | 多日连阴雨导致山体滑坡 | 某采油厂一输油管道发生破裂, 导致原油泄漏 100m ³ |
| 2011年6月21日 | 四川省巴中市元潭镇 | 泥石流 | 巴中市通往南江县输气管道破裂 |
| 2009年8月3日 | 四川省南充市西充县永清乡 | 暴雨引发山体滑坡 | 成都通往蓬溪、西充县城的燃气主管破裂 |
| 2008年5月12日 | 甘肃省陇南市康县段 | 受2008年汶川地震影响, 康县阳坝发生崩塌 | 巨石将兰成渝管道接头处砸开, 造成柴油泄漏 |
| 2005年8月15日 | 四川省江油市二郎庙乡辛家沟4组 | 山体滑坡 | 江油—广元天然气输气管道二郎庙段因山体滑坡拉断弯头, 泄漏气体喷出20余米高 |

20世纪80年代末至90年代初,很多跨国管道运营公司普遍采用地质灾害风险管理。意大利 SNAM 公司早在20世纪70年代就建立了管道地质灾害监测网,对危险状态提前预警,目前该监测网还在不断更新与完善,该公司还较早开展了灾害体对管道的作用效应试验;1997年美国 North West 管道实施地质灾害风险管理;1998年加拿大贯山管道(TMPL)实施自然(地质和水毁)灾害风险管理,开发了地质灾害数据库管理程序,用于管道运营者的决策;2001年南美 Concentrate 管道实施自然灾害风险管理;2002年 Nor Andino 管道实施地质灾害风险管理,并于2005年进行了升级;2002年安第斯(Andean)管道实施地质灾害风险管理;2003年玻利维亚 OSSA-1 管道实施地质灾害风险管理。地质灾害风险管理的实施为管道运营企业带来了显著的管道安全效益,如南美洲的 Nor Andino 管道在进行地质灾害风险管理后,失效概率由原来的 0.64 次/ $1 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{a}$ 降低到了 0.28 次/ $1 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{a}$ 。

下面简要介绍加拿大 BGC 公司是如何开展管道地质灾害风险管理的(图 1-3)。加拿大 BGC 公司从20世纪90年代开始研究管道地质灾害的风险管理,其研究基于 Kent^①的管道风险模型,充分运用国际上流行的风险评价方法,开发了地质灾害风险管理(GRM)系统,结合之前研发的管道自然灾害风险管理(NHRM)系统,总计先后在超过 $3 \times 10^4 \text{ km}$ 的管道上得到应用,代表性的管道有加拿大 TMPL 管道、Alliance 管道、Transredes 管道,南美的 Concentrate 管道、Nor Andino 管道、Andean 管道,欧洲的 Erskine 管道。目前,仍管理着 $1 \times 10^4 \text{ km}$ 长输管道沿线的 3 000 个水毁灾害点和 700 个滑坡崩塌点。

我国开展管道地质灾害风险管理工作始于2000年左右,当时针对管道沿线出现的大量地质灾害开始进行系统的防治,逐步形成了基于风险管理的地质灾害应对模式。

^① Kent 即 Kent 评分法,由 W. K. Muhlbaue(1992)编著的《管理风险管理手册》中首次提出,是用于油气长输管道的专家评分法。

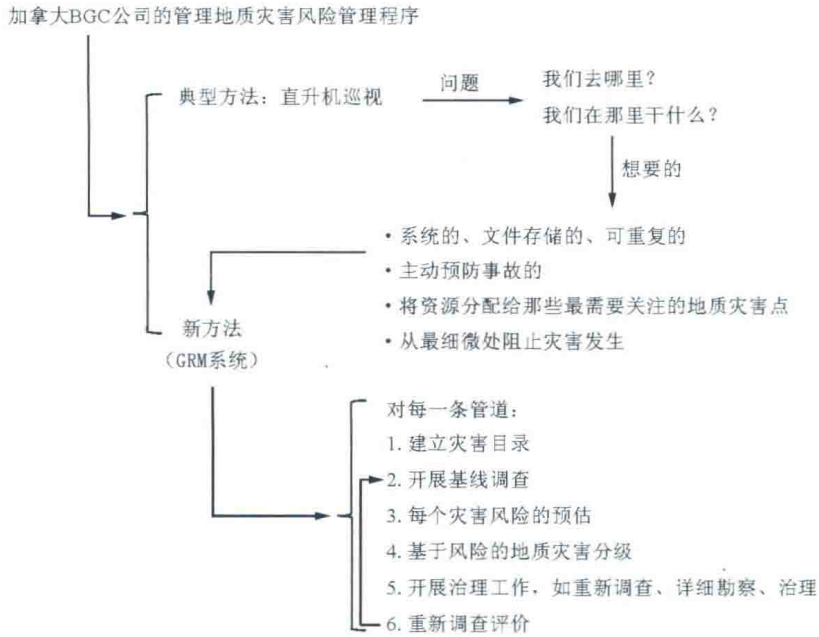


图 1-3 加拿大 BGC 公司的管道地质灾害风险管理程序

2001 年涩宁兰管道投产,2002 年兰成渝管道投产,针对严重的地质灾害威胁,这两条管道运营部门于 2003 年开始大力整治地质灾害,之后每年对地质灾害严重的管道进行治理投资。1997 年陕京一线投产,2005 年陕京二线投产,对沿线地质灾害进行了危险性评估,并制定风险控制方案。2004 年西气东输管道投产,管道穿越不同地区,遇到地质灾害威胁,于 2006 年开展了系统的调查、评价和防治工作。2004 年底忠武管道投产,2005 年首次对全线地质灾害进行普查,评价灾害的风险,并根据风险制订系统的整治规划,效果显著,逐步推广到其他管道。

管道运营部门经过多年的管道地质灾害管理探索和实践,结合国外经验,逐步形成了适应我国的油气管道地质灾害风险管理模式。2009 年初,中国石油管道公司发布《管道地质灾害风险管理程序》及相关作业指导书,正式推行管道地质灾害风险管理工作,风险管理流程如图 1-4 所示。

在上述基础上,中国石油天然气股份有限公司(简称“中国石油”)于 2010 年发布并实施了企业标准,并于 2011 年升级为中华人民共和国石油天然气行业标准《油气管道地质灾害风险管理技术规范》(SY/T 6828—2011)。该标准对管道沿线地质灾害的调查、评价、监测与防治工程的实施,提出技术和管理方面的规定和要求,指导管理部门制订系统的防治规划,有序开展地质灾害防治工作。

风险识别、风险评价和风险控制是管道地质灾害风险管理工作的三大核心内容。

三、管道地质灾害风险识别

早期的地质灾害识别对象主要针对滑坡地质灾害,主要从地形地貌、地层、水文地质条件、裂缝类型及成因等方面识别滑坡。1939 年,苏联萨瓦连斯基出版了《工程地质手册》,奠定了工程地质学的发展基础。1958 年,美国高速公路局滑坡调查委员会编写了《滑坡工程实践》,

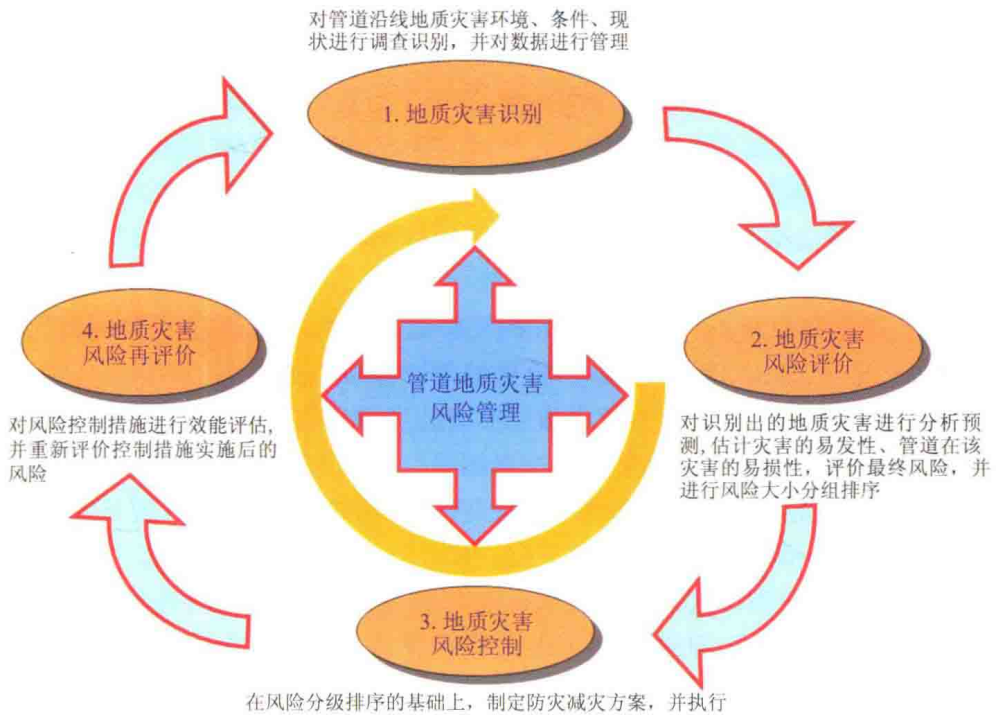


图 1-4 我国管道地质灾害风险管理流程

较为全面地总结了滑坡运动的类型及防治方法。1977年，加拿大供应与服务部矿物与能源技术中心编写了《高边坡工程手册》，介绍了边坡工程相关实验与稳定性评价方法等。1978—1979年，美国 R. L. Schuster, R. J. Krizek 等编写了《滑坡的分析与防治》。1983年，日本矢野义男和渡正亮等出版了《泥砂、泥石流、滑坡、崩塌防治工程手册》，详细介绍了滑坡、边坡及落石的预测、调查与规划。1975年我国出版了《工程地质手册》，详细说明了特殊地质条件勘察与评价，并于1982年、1992年及2007年进行了3次修订。

我国管道地质灾害识别工作主要是2000年之后逐步开展起来的。

忠武输气管道从2004年底投入试运行以来，开展了多次较为系统的管道地质灾害调查与识别，其中2005开展了忠武管道试运投产后地质灾害调查评价，共识别滑坡31处、崩塌（危岩及高边坡）23处、泥石流（河道冲刷）8处、塌陷3处；2006年开展了忠武管道张家沟—双河段危岩（群）调查评价，共识别出97个危岩；2008年开展了忠武输气管道地质灾害调查及整治规划，共识别225处规模大小不等的、对管道存在不同程度的直接或间接危害的地质灾害点，其中滑坡34处、崩塌（危岩体）32处、水工点（包括挡墙、排水渠、过河硬覆盖等）159处。

2010年，川气东送管道开展了川渝—鄂西段地质灾害调查评价与防治规划，共发现较大规模地质灾害90处（滑坡点48处、崩塌点42处）。

2012年，通过对中缅油气管道安顺—贵阳段沿线野外实地地质考察，共发现灾害点34处，其中崩塌17处、不稳定斜坡4处、滑坡3处、地面沉陷10处，且以崩塌和地面沉陷为主（李效萌等，2012）。以陕京三线输气管道工程某改线段推测采空区为研究对象，通过对采空区实施详细地质调查、物探与钻探等技术方法，评价该区域是否存在采空异常区，管道路由是否存

在可控风险,并对异常区提出治理建议(赵高等,2015)。

2013年,对中缅管道云南段在施工扫线、施工机具进场、管沟开挖等施工阶段诱发滑坡、泥石流、崩塌等典型地质灾害进行识别及危险性评价,并提出了有针对性的防治方法(穆树怀等,2014)。

2014年,通过对长庆油田—呼和浩特石化原油管道工程的调查,共识别地质灾害349处,其中:干线管道沿线地质灾害点337处、站场及阀室地质灾害点9处、油房庄首站外管线管道沿线地质灾害点3处。地质灾害包括水毁266处(其中坡面水毁190处、河沟道水毁31处、台田地水毁45处)、风蚀沙埋75处、地面沉降8处(张恒等,2014)。

2014年,经现场实地调查,商洛至商南输气管道沿线评估范围内发育各类地质灾害42处,其中滑坡14处、崩塌25处、泥石流3条(张静等,2015)。

通过对管道地质灾害的识别,为管道地质灾害的后续治理提供了科学的依据。

目前,我国在管道运营阶段,地质灾害的识别仍然以现场地质调查为主,而卫星遥感技术一般用于区域性地质灾害识别中。在管道建设期一般都利用无人机或卫星遥感图像开展地质灾害的粗识别,作为管道路由选择的决策依据。国外管道运营部门,无论是管道建设期还是运营期,在开展地质灾害识别时大多采用无人机或卫星遥感技术,对于特殊地段,诸如某个待定或特定的滑坡、崩塌、泥石流,抑或活动断层、大中型河流、高陡斜坡、特殊地形地貌、特殊地质单元等特殊地段才开展详细的地面调查及精确识别工作(高姣姣等,2010;张士虎等,2012)。

四、管道地质灾害风险评价

风险评价技术作为管道地质灾害风险管理的主要技术之一,其目的是对识别的风险点进行风险计算、评价,并按风险大小进行排序,为风险控制规划提供依据。

20世纪90年代,美国的油气管道风险管理技术已经达到较高水平。1985年,美国化工过程安全中心发表了《风险评估指南》,首次应用评分法进行管道风险评估与分析。Muhlbauer(1992)在总结前20年油气管道风险评价工作的基础上,撰写了《管道风险管理手册》(简称《手册》),叙述了管道风险评估模型和评价方法,并为世界各国管道风险评价所接受,1996年该《手册》第二版修订时,补充了成本与风险关系的内容,对长输管道风险评价体系中的部分指标和权重进行了修正,2004年修订到第三版时定量风险评价方法已更加精细。

加拿大从20世纪90年代开始从事油气管道风险评价和风险管理等研究。1994年,加拿大成立了能源管道风险评价指导委员会。1996年,W. H. Feil等提出了管道完整性管理的目标是在控制预算范围内尽可能以最低的成本减小管道风险。1998年,加拿大对从埃德蒙顿到温哥华的贯山管道实施地质和水毁灾害风险管理(Leir M et al,2002)。加拿大BGC公司1995年开发了管道自然灾害风险管理(NHRM)系统,对北美 2×10^4 km的油气管道进行了地质灾害风险管理(Porter M et al,2002),2002年该公司持续改进NHRM系统,开发了基于半定量评价方法的GRM系统,可对滑坡、崩塌和河沟道水毁灾害进行半定量风险评价,实现风险排序。自1996年在加拿大阿尔伯塔省召开了第一届国际管道会议以来,至今已召开11届国际管道会议。

英国健康与风险委员会基于数学模型研制出MISHAP软件包及PIPERS计算机程序,主要用于计算英国主要管道地质灾害失效风险(Kinsman P,2002)。

比利时 Tractebel 公司运营的从阿根廷北部到智利海岸的 Nor Andino 管道,于 1999 年正式投产,受 2001 年突发洪水及 2002 年落石作用两次发生管道破裂,2002 年 4 月起开始风险识别与半定量风险评估,失效概率大大降低(Porter M et al,2006)。2004 年,玻利维亚考虑到该国约 5 500km 的天然气和液体管道位于地震、洪水和山体滑坡活跃的地区,决定以 OSSA-1 管道为试点,定制了风险评估程序(Esford F et al,2004)。2006 年,俄罗斯以库页岛 2 号主管道(Sakhalin2 Main Pipeline Project)为例,应用两种方法开展了滑坡风险评估(SI Matsiy et al,2006)。2011 年,秘鲁采用风险矩阵方法开展了长 700km 的 Camisea 埋地管道滑坡风险分析(Pettinger A et al,2011)。

与国外相比,我国开展油气管道风险评价的研究较晚。路胜(1994)介绍了基于专家打分法的管道风险评估模型。著名油气储运专家潘家华(1995)在《油气储运》上发表连载文章,详细介绍了风险分析的概念及管道风险评估法,之后该方法广泛应用于国内管道风险评估。时崇林等(1996)提出了开展油气管道风险分析的重要性的建议。李建辉、余建星(1999)在基于指标打分法的基础上,运用故障树原理初步建立了适合中国国情的管道风险概率计算模型及风险评估方法。

2000 年以来,随着我国管道建设的飞速发展,国内陆续开展了管道地质灾害风险管理与研究。

2006 年中国石油西气东输管道公司开展了“西气东输技术指南”和“管道环境及地质灾害风险辨识与评估指标体系”等专项课题研究,联合西南石油大学开发了西气东输管道环境地质灾害风险评估系统,可对西气东输管道面临的水毁、滑坡、湿陷性黄土、采空塌陷、泥石流等 9 种灾害进行半定量风险评价;开发了西气东输管道环境地质灾害风险评估系统软件,其风险分级标准对西气东输管道有较好的适用性。

2007 年 12 月,中国石油北京天然气管道有限公司(陕京管道)制定了管理体系作业文件《陕京管道地质灾害风险评价方法》,该方法从地形与土壤、降水情况、消减措施效果、管道埋深、巡线频率 5 个方面,定性评价管道地质灾害风险(吕晓华,2008)。

2007 年中国石油管道科技研究中心开展了管道地质灾害风险评价技术研究,开发了基于指标评分法的崩塌、滑坡、水毁、泥石流等 11 种常见的管道地质灾害的半定量评价方法,建立了管道地质灾害风险评价模型及与各种灾害相对应的风险评价指标体系。后续还开发了管道地质灾害风险管理系统(PGRMS),具有信息管理、风险评价、风险控制、统计分析、工作流管理和模型维护等功能。该系统自 2011 年起在中国石油全面推广实施,目前应用管道里程已超过 1.7×10^4 km(荆宏远等,2011)。

2009 年,王学平等以忠县—武汉输气管道地质灾害为例,提出了“以地质灾害易发性作为风险分级的主体,考虑了管道作为核心承灾体的地质灾害危害性,并兼顾考虑周围环境的影响,且立足于野外地质灾害详细调查阶段”的风险分级方法,并基于风险分级提出了整治规划。

2010 年,中国石油管道公司出版了《油气管道地质灾害风险管理技术》一书,系统介绍了油气管道地质灾害风险识别、风险评价、监测预警、工程防治及风险后评价等技术,全面阐述了管道地质灾害风险管理的程序、内容和方法,详细讲述了管道地质灾害风险管理技术在兰成渝管道的成功应用和实践经验。

2011 年,国家能源局发布了中华人民共和国石油天然气行业标准《油气管道地质灾害风险管理技术规范》(SY/T 6828—2011),规定了油气管道地质灾害风险识别、评价与控制的任

务、内容及基本方法。

2013年,邓清禄等基于NET平台及ArcGIS,进行了川气东送输气管道(川渝—鄂西段)地质灾害空间信息管理与风险评价系统的设计,可实现管道及其周边地质灾害空间信息的快速查询、图形显示、分析统计、风险评价等功能,有助于管道沿线地质灾害管理、抢险维修决策及预警指挥工作,也有助于地质灾害信息的发布和交流。

21世纪初,地质灾害风险评价技术被引用到管道风险研究领域,各国管道公司已逐渐建立了管道地质灾害风险管理系统。目前,关于管道风险评价的方法大致可分为3类:①以经验为主的定性评价方法,如风险矩阵法,包括灾害易发性评价、管道易损性评价和后果评价3个部分,均分为3个等级;②半定量评价,如指标评分法,包括风险概率指数计算和后果指数计算两部分,用风险矩阵表示风险;③定量评价,如概率评估法、模糊综合评判法等(王其磊,2012;董航,2013;许卫豪,2014;王亚春,2015;施宁等,2016)。经过近30年的理论研究与工程实践,风险分析已从定性风险评价逐步转向更加精确的半定量和定量风险评价,风险评价已逐步走向规范化。

五、管道地质灾害风险控制

国外管道运营公司更倾向于选择有一定风险、但成本较低的地质灾害防治方式。如意大利SNAM公司经常采用应力监测的方式来监控管道风险;美国North West则采用开挖管道释放应力的方法减轻管道的附加应力,降低管道风险。

国外对某些单点地质灾害的一些处理做法值得我们借鉴。如加拿大AEC管道House River滑坡:1977年AEC公司发现该滑坡不稳定,进行了简易观察;1991年对滑坡进行勘察,并监测滑坡的深部位移;1996年发现滑坡位移明显增加;1998年对滑坡进行了地质评价,采用数值模拟手段评价了管道受力,在此基础上提出了5种防灾减灾方案;1999年5月专门开发了基于风险的决策树模型(PDM),分析防灾投资与管道失效的耦合成本,确定减灾方案;1999年9月实施减灾方案;2000年8月通过监测重新评价风险,发现风险仍不可接受,于是实施附加的减灾方案。从开始识别灾害到彻底的治理,历时23年,期间反复地研究比选,最后治理的成本仅为30万美元,充分显示了科学研究和成本管理的优势(杜曼,2012)。

澳大利亚管道运行管理标准AS2885.1中将地质灾害风险控制措施分为两类,即物理性控制措施和程序性控制措施。物理性控制措施将保护管道不受指定威胁的损坏,程序性控制措施则有助于降低威胁发生的频率。灾害体治理、管道保护、非明挖穿越、更改路由等措施属于物理性控制措施,而监测、巡检和告知(警示)则属于程序性控制措施。

我国在常规的地质灾害防治工作方面拥有大量的实践经验,但在处理管道风险和效益的优化关系方面存在不足。最新的进展是中国石油天然气股份有限公司新发布了行业标准《油气输送管道工程地质灾害防治设计规范》(SY/T 7040—2016)。

监测作为管道地质灾害风险控制的重要手段,得到了长足的发展。地质灾害监测是指运用各种技术和方法,测量、监视地质灾害活动以及各种诱发因素动态变化的工作,包括不稳定或潜在不稳定滑坡(变形体)、危岩(边坡)及泥石流等的监测、地质灾害防治工程施工期的安全监测、地质灾害防治工程施工期后的防治效果监测。管道地质灾害监测是在一般地质灾害监测的基础上,运用各种量测设备及技术方法,进一步加强对管道及管道与灾害体相互作用的