

罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 101-111.
DOI: 10. 11932/karst20180106

我国岩溶地面塌陷研究进展与展望

罗小杰¹, 沈建²

(1. 长江岩土工程总公司(武汉), 武汉 430010; 2. 武汉地铁集团有限公司, 武汉 430030)

摘 要: 为了解我国岩溶地面塌陷理论和实践的状况, 在讨论了岩溶地面塌陷概念的内涵和外延后, 全面总结了岩溶地面塌陷在塌陷机理、预测、监测、防治等方面的研究现状, 分析了目前存在的问题, 概述了近年来研究的新进展, 提出了岩溶地面塌陷研究的发展方向。

关键词: 覆盖型岩溶; 地面塌陷机理; 综合地质预测; 危险性评估; 进展与展望

中图分类号: P642. 26

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2018)01-0101-11

0 引 言

资料表明, 我国可溶岩面积为 $346.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的三分之一以上, 为岩溶地面塌陷的发育提供了必要的物质基础, 岩溶地面塌陷灾害分布十分广泛, 是全球 16 个存在严重岩溶地面塌陷问题的国家之一^[1]。据不完全统计, 除上海、宁夏、新疆等局部地区外, 我国 24 个省(市、区)内共发生岩溶地面塌陷 2 841 处, 塌陷坑 40 119 个; 其中以南方的桂、黔、湘、赣、川、滇、鄂, 以及北方的冀、鲁、辽、豫、晋等省区最为发育; 此外, 京、苏、皖等地也发生过不同程度的岩溶地面塌陷^[2]。

统计表明, 我国有 30 多个大中城市、420 个县市处于地面塌陷高风险区, 有 40 余座矿山、25 条铁路线和数百座水库长期遭受岩溶地面塌陷的困扰。在我国已发生的岩溶地面塌陷灾害中, 约 70% 为人类活动所诱发。过量开采地下水和矿山排水是产生岩溶地面塌陷的主要原因。其它如拦蓄地表水、岩土工程施工、铁路公路施工、工程爆破等, 也会诱发岩溶地面塌陷。因此, 岩溶地面塌陷灾害往往发生在人口密集的城市、矿山或交通线上, 给国民经济建设和人民生命财产带来严重影响和威胁^[3]。

如武汉地区中部发育 6 条走向南南东、南部发育 3 条走向北东的、各自近于平行的碳酸盐岩条带, 自 1931 年以来, 发生了十余次岩溶地面塌陷, 给当地居民及工程建设带来严重的灾害; 而我国北方岩溶地面塌陷均由人类工程及经济活动所造成^[4]。

按可溶岩的埋藏条件, 一般将岩溶可划分为裸露型岩溶、覆盖型岩溶和埋藏型岩溶三种类型。裸露型岩溶是指可溶性岩石裸露地表、经地表水溶蚀、机械侵蚀后形成的各种岩溶地貌。覆盖型岩溶是指被第四系松散堆积层所覆盖的岩溶, 埋藏型岩溶是指为基岩所覆盖的岩溶。其中, 覆盖型岩溶分布非常广泛, 许多大中型城市都发育覆盖型岩溶。长期以来, 岩溶地面塌陷已引起广泛的关注, 国内外学者对其形成条件、成因机理、诱发因素、预测预报、防治原则、处理措施等做出了许多有益的探索。

关于岩溶地面塌陷的概念, 不同的研究者赋予了不完全相同的内涵和外延。一般认为, 岩溶地面塌陷包括岩体和土体塌陷两个方面: 前者是指溶洞顶板坍塌而导致的地面塌陷, 后者指岩溶地区由土颗粒丧失而导致土体塌陷而引起地面沉降变形, 是为覆盖型岩溶地面塌陷, 在实际工程中极为常见, 常常造成较为严重的损失。在本文中, 如无特殊说明, “岩溶地面

第一作者简介: 罗小杰(1965—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事工程地质技术管理工作。E-mail: lxj420106@sina.com。
收稿日期: 2017-05-10

塌陷”、“地面塌陷”及“塌陷”等简称即是指后者，即覆盖型岩溶地面塌陷。目前，岩溶地面塌陷概念的差异主要在立足点不同：一是立足于“地质现象”，强调地质作用及其结果；如康彦仁认为岩溶地面塌陷是“岩溶洞隙上方的岩、土体在自然或人为因素作用下引起变形破坏，并在地面形成塌陷坑(洞)的一种岩溶动力地质作用与现象”；另一是立足于“力学效应”，强调成

因机制；如《铁路工程地质岩溶勘测规则》(TBJ28—91)表述为“开口岩溶洞隙与上覆土层(少数为松软岩层)中的水、气对盖层发生的力学效应导致的地面塌落”。如此等等。

为了更好地把握岩溶地面塌陷概念的内涵和外延，用图 1 示出岩溶地面塌陷物质条件、诱因、作用力与塌陷机理四者间的相互关系。

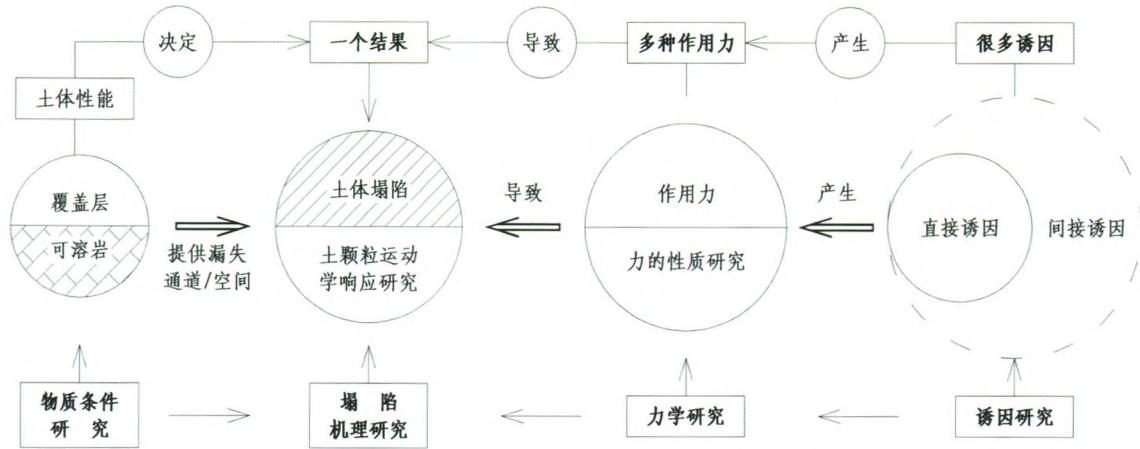


图 1 地面塌陷物质条件、诱因、作用力与塌陷机理间关系

Fig. 1 Relationship among the material condition, inducement, force and collapse mechanism for Covered Karst Ground Collapse (CKGC)

对于岩溶地面塌陷而言，发生塌陷的物质条件包括覆盖层、可溶岩及其空间组合关系(即岩溶地质结构)三方面。其中覆盖层是塌陷的主体，其受外力作用后土颗粒的运动方式决定了塌陷机理。而土颗粒的运动方式又与覆盖层的地层岩性、粒度成分、土体性状及其物理力学性能密切相关。因此，研究岩溶地面塌陷首先必须要对覆盖层进行研究。

岩溶包括岩溶作用和岩溶作用的结果(即岩溶现象)两方面。岩溶作用是水对可溶岩进行以化学溶蚀作用为主，流水的冲蚀、潜蚀和崩塌等机械作用为辅的地质作用。它是一个长期的、缓慢的地质作用过程。在工程寿命期内(一般以百年计，不同)，对岩溶地面塌陷基本不起作用，或者说，其产生的后果对岩溶地面塌陷基本没有影响。在岩溶地面塌陷的研究中，更关注地质历史时期岩溶作用的结果，即溶蚀管道系统和(或)溶洞。因为溶蚀管道系统为上覆土体的土颗粒提供转移通道，给后续土颗粒漏失腾出空间；溶洞直接为上覆土体中土颗粒漏失提供储藏空间。它们为岩溶地面塌陷提供了天然条件。

岩溶地质结构是指不同类型覆盖层和不同岩溶

发育程度的可溶岩之间的叠置关系。不同的岩溶地质结构，具有不同的塌陷机理；相应地具有不完全相同的预测、监测和防治方法。

可溶岩上方的土体是经过地质历史时期的沉积与固结作用形成的；经历了长期的地质作用后，下伏可溶岩通道大多被堵塞，可溶岩与其上方覆盖层已经达到平衡状态。没有外力作用来破坏这种平衡，岩溶地面塌陷现象不会发生，尤其是在时间极为短暂的工程寿命期内(与地质历史相比)。因此，外部因素诱发的作用力是岩溶地面塌陷的动力，是重要的力源。

岩溶地面塌陷的诱因很多，按与土体的作用关系，可分为直接诱因和间接诱因两大类。这里，将直接产生作用力作用于土体之上的诱发因素称为直接诱因；例如，“地下水渗流”直接将渗透压力作用在土体颗粒之上、使土体产生运动学响应，故称“地下水作用”是直接诱因；其它如堆荷载，施工荷载，车辆振动荷载、地震荷载等都是直接产生作用力作用于土体之上，都属于直接诱因。将不直接对土体产生作用力、通过其他方式间接地诱发出外力作用于土体之上的诱发因素称为间接诱因；例如，“岩溶矿区大规模突

水”没有将力直接作用于土体,而是由于岩溶水水位急剧下降,在密闭的岩、土空间内产生真空;然后由真空衍生出大气压力作用在土体之上。这里称“大规模岩溶突水”为间接诱因。其他如岩溶矿区大规模排水、大量开采地下水、施工降水等都属于间接诱因。

无论是直接诱因还是间接诱因,它们的作用都是直接或间接地产生作用力,并使这些作用力作用于土体之上,使土体受到力的作用。这些作用力可能导致地面塌陷,也可能不导致地面塌陷,因而诱因不直接导致塌陷。诱发因素研究的目的是寻找出作用于土体上外力的来源和作用力的产生过程,为岩溶地面塌陷作用力的研究提供依据。

外部诱发因素所产生的作用力的性质有相同之处,也有很多不同点。诱因研究就是要搞清楚诱因所产生的作用力的性质、大小、方向、作用位置和作用方式等,按作用效果进行等效归类,为建立通用的物理力学模型提供依据。例如,由地下大规模突水诱发的真空荷载,作用在土洞顶板上表面上时,土洞顶板承受向下的面积荷载,其效果与堆载荷载相同。建立物理力学模型时,可以和堆载荷载一并考虑^[5-9],进行力的合成计算;同样是真空荷载,对于砂性土而言,真空荷载的表现形式不再是作用在地面的面积荷载,而是直接作用在流体(地下水)上的渗透力,为体积力,此时的真空荷载的作用效果与地下水水头的作用效果相同。在这种情况下,应将真空荷载折算成为水头,与地下水产生的水头叠加,从而建立统一的水力学模型。

土体塌陷机理研究就是研究土颗粒受力后的运动学响应,即研究土体的破坏方式。受外力作用后,不同的土体将产生不同的运动学响应。如以老黏土为代表的黏性土,具有较高的凝聚力,土颗粒之间联系密切,往往形成“黏粒团”,在外力作用下,这些“黏粒团”整体运动,或多个“黏粒团”联系在一起发生块体运动,“一块一块”地崩落;而以粉细砂为代表的砂颗粒在重力和地下水的联合作用下“一颗一颗”地漏失;软弱土体则在重力和(或)真空吸力等的作用下发生流动,向岩溶通道或溶洞中“流失”^[10]。

综上所述,在覆盖型岩溶地区,岩溶孔隙和洞穴为土体中土颗粒的漏失提供通道或储存空间;一种或多种诱发因素(包括直接诱因和间接诱因)产生一种或多种作用力,单独或共同作用在土体上,最终导致土体块体坍塌、土颗粒漏失或软弱土流失,从而导致

地表宏观变形,即发生地面塌陷。因此,在岩溶地面塌陷中,塌陷的主体既不是诱因,也不是岩溶,而是土体本身。诱因和岩溶只是分别提供了土体塌陷的作用力和空间条件。据此,这里将“覆盖型岩溶地面塌陷”定义为:在覆盖型岩溶地区,岩溶孔隙、洞穴等提供土颗粒运移通道和(或)储存空间,外部诱发因素直接或间接地产生的作用力导致土体“黏粒团”坍塌、砂颗粒漏失或软弱土流失而引起地面沉降变形现象。这一表述突出了地面塌陷的核心是土体塌陷而非其它,岩溶现象提供塌陷的先决条件,诱因提供塌陷所需的动力。这个概念有利于确定覆盖型岩溶地面塌陷的研究重点和研究方向,避免人们在研究中分散精力,误入歧途。

1 研究现状

早在 1637 年,我国明代地理学家徐霞客(1586—1641)最早描述了岩溶地面塌陷现象。直到 1973 年,广东省地质局编写的《隐伏岩溶类型矿区水文地质特征及勘探方法》才将岩溶地面塌陷作为地质问题来论述。此后,我国相继召开了多次专门学术讨论会来研讨岩溶地面塌陷,如铁路部门曾为泰安站、分宜站、南京岔路口、南岭隧道、大瑶山隧道等的岩溶地面塌陷问题举行了多次研讨会和年会;全国也多次召开学术会议重点研讨岩溶地面塌陷地质灾害问题^[11]。

20 世纪 80 年代以来,特别是 20 世纪 90 年代,随着我国工程建设的大规模开展,遭遇的岩溶地面塌陷问题越来越频繁,很多高等院校、科研部门以及生产单位逐渐对其进行深入研究,取得了丰富的成果。如徐卫国等的“真空吸蚀机理”、康彦仁的塌陷模式以及陈国亮的塌陷效应等都在这个时期得到完善和发展,取得长足进步;在工程实践积累了较为丰富的塌陷预测、监测、防治和应急措施等方面的工程经验。

1.1 关于塌陷机理

在成因机理方面,原苏联著名地质学家 A. И. 巴普洛夫(1898)提出了地面塌陷成因的“潜蚀论”,认为地下水的活动是造成岩溶地面塌陷的重要因素,充分认识到地下水作用对岩溶地面塌陷的不利影响,一般采用回填法进行治理。此后直到 20 世纪 70 年代中期以前,80 年来这一理论长期占领着统治地位。

二十世纪 70 年代中期以来,我国的岩溶地面塌陷机理研究成果呈现出一派繁荣景象,在对众多的塌

陷现象进行深入研究后,认识到了潜蚀论的一些局限性,大量的研究论文纷纷发表,甚至还出版了专著,提出了很多新的观点和认识。

徐卫国等从研究矿山岩溶地面塌陷出发^[12-18],认为岩溶盖层(由区域性分布的残积黏土或碎屑岩)被“初始真空吸盘”、“真空腔”和“旋吸漏斗”等三种吸蚀作用所破坏而产生塌陷,进而提出了岩溶地面塌陷的“真空吸蚀”机理。并认为采用“回填法”防治地面变形是一种人为地再次密封岩溶网络的消极办法,其害处:(1)导致岩溶水击的形成,造成矿井突水,局部地面变形;(2)地面变形内因依然存在,后患并没有消除;(3)回填密封的塌陷还可能由于岩溶水击的作用而发生再次塌陷。因此,回填法并不能治本。但是“真空吸蚀机理”也不能很好地解释“塌陷群”现象,即同一地区先后发生多个塌陷的现象。

尽管“潜蚀论”和“真空吸蚀论”仍存在一些疑义^[19-20],但是仍然较好的解释了一些地面塌陷现象,目前已被多数学者所接受。

1980 年代中期,康彦仁、项式均^[21-22]等以大量的岩溶地面塌陷调查资料为依据,按塌陷产生的主导因素和受力状态,将岩溶地面塌陷划分为自然塌陷和人为塌陷两个大类和八种基本类型,即:重力塌陷、潜蚀塌陷、冲(气)爆塌陷、真空吸蚀塌陷、振动塌陷、荷载塌陷、溶蚀塌陷和根蚀塌陷,并提出了相应 8 种致塌模式(即机理)^[20,23]。

1990 年代初期,陈国亮^[11]对岩溶地面塌陷这一地质灾害的国内外最新研究成果及实践经验进行了总结,出版了专著《岩溶地面塌陷的成因与防治》。在该著作中,作者进一步讨论了压强差、浮力、土体强度和酸液作用等四个效应。

此外,还有研究者提出了新的机理,如机械贯穿机理^[24]、共振论^[25-26]、胀缩—崩解效应^[27-29]等。

总体来看,更多的研究者或论证或支持上述某个或部分观点,或运用某一机理解释了一些具体的岩溶地面塌陷现象,并在其指导下成功解决了某个或某类工程实际问题,同时,大多数研究者认为,岩溶地面塌陷现象是多机理叠加的结果(实际上是多因素共同作用的结果)^[20,24,30-31]。

1.2 关于塌陷预测

罗小杰根据黏性土、砂性土和软弱土在塌陷过程中的这种运动学响应特征,提出了土体塌陷的土洞型、沙漏型和泥流型三种塌陷机理^[10]。岩溶地面塌

陷的预测,从理论上讲,就是要以塌陷机理为理论依据,回答在什么时间和什么地点与部位发生塌陷灾害,甚至更进一步要求预测出塌陷的历时、规模、危害程度等,以便作出处理方案和采取应对措施。

目前,对岩溶地面塌陷的预测,基本上仅限于空间位置的预测,尽管偶尔有文献提及塌陷时间预测,但都是初步的尝试^[32-34],塌陷历时预测等则鲜有报道,而且,预测内容和精度远没有达到预期的要求。其次,受对塌陷机理认识的限制,目前的预测几乎都与诱发因素紧密联系,包括所有的确定性模型和不确定性模型,使得所建立的预测模型多为个案^[5-9,32,34-53],缺乏通用性,因而也谈不上真正的预测模型。如不确定性预测模型从岩溶地面塌陷灾害的随机性、模糊性和灰色性出发,依据与塌陷相关的各种因素,包括覆盖层因素(岩性、厚度、地质结构、物理力学性能等)、岩溶因素(可溶岩岩性及岩溶发育程度)、构造因素(影响岩溶发育程度断层、裂隙、层面等)、地下水因素(水位变化、渗流特征等)地形地貌因素以及环境因素等,分别通过建立数学统计模型、模糊模型、灰色模型等不确定性模型,运用相应的演算方法,对岩溶地面塌陷进行半定量预测。如 Fisher 判别法^[36]、模糊综合评判法^[37-42]、灰色系统理论法^[34,53]、人工神经网络法^[43-46]、因子赋分法^[47-52]等等。代表性确定性模型有杜甫志^[5]的两种力学模型、刘长礼^[6]与高宗军等^[7-8]的水岩耦合模型、谭鉴益^[9]的坛状圆柱状模型以及贺可强^[35]等的渗压效应模型等。这些模型考虑了某些具体的影响因素,主要是根据极限平衡理论,对土洞型塌陷的土洞顶板而建立的。

目前的确定性模型预测仅限于土洞型塌陷机理,沙漏型和泥流型塌陷预测仅仅才起步。罗小杰等在区分了各种诱发因素提供的作用力性质后,将作用力从各种诱因中抽象出来,脱离具体的诱发因素,按作用方式进行归类,分别运用极限平衡理论、水力学理论和牛顿内摩擦定律,对土洞型、沙漏型和泥流型塌陷机理各自建立了相应的数学物理模型^[32-33,54]。与以前的模型相比,这三个确定性预测模型的显著特点是,他们是纯粹的力学模型未将具体诱因带入模型中,因而具有普遍的代表性;同时首次探讨了沙漏型和泥流型塌陷的塌陷历时问题。这些模型离实际工程实际应用相差较远,可用于工程应用的综合地质预测模型于 2016 年才正式被总结提出^[55]。

1.3 关于塌陷监测

在地面塌陷过程中,由于岩溶作用的速度十分缓慢,在工程寿命期内对塌陷基本不起作用,因而可以不予监测。岩溶地面塌陷的监测对象主要是土体变形和诱发因素两个方面。

在水的作用、外加荷载和土体弱化(包括土体强度降低、结构破坏和土洞顶板厚度较小)等三大类诱发因素中,目前对地下水的动态和地面变形(荷载作用和土体弱化的结果)监测有比较成熟的技术方法。其中岩溶管道系统中水(气)压力的动态变化传感器自动监测技术是一个长效的监测方法,可以很好地监测地下水动态。其监测结果可以作为追踪、了解和掌握土体变形的参考依据^[56-57]。外加荷载和土体弱化的监测一般通过工程设计方案、施工管理以及行政管理等来实现。

土体变形包括土体形变、地面沉降和建(构)筑物变形破坏等。其中地面标高降低和地面倾斜、建(构)筑物变形、变位等目前一般采用已经成熟的、常规的监测方法,如精密水准测量技术、GPS 技术、合成孔径雷达干涉测量技术等。这些监测技术的监测成果是精确的、可靠的。这些方法对土体变形后已经引起地面变形和建、构筑物变位反映后才有实际效果,因而更适用于塌陷发生和应急抢险阶段或塌陷区域的工程施工过程等临时性的短期监测。当然,群测群防也不失为一个行之有效的方法。

土体形变主要是指土洞的发生、发展和砂性土体及软弱土体的内部变形,是塌陷监测的重点,也是监测的难点。然而,由于塌陷土体形变具有隐蔽性、长期性和突发性的特点,其有效的、具有工程实践意义的监测方法目前尚在积极探索中。如地质雷达技术、光纤传感技术(BOTDA)、电磁波时域反射技术(TDR)等,多处于试验和研究阶段,尚未检索到实际工程案例的报道。国外在 1984—1987 年已尝试运用地质雷达进行潜在塌陷的监测工作。如美国学者 Benson 等在北卡罗来那州威尔明顿(Wilmington)西南部的一条军用铁路进行了试验。近几十年来,尤其是 21 世纪以来,我国学者也在积极开展监测方面的研究和试验工作^[56-69]。

1.4 关于塌陷防治

岩溶地面塌陷的预防和治理应以塌陷机理为理论依据,在塌陷预测和危险性评估的基础上,采取系统的防治措施和方法。

塌陷预防可区分为规避和回避两类措施。规避措施是指在规划阶段进行工程选线、选址时,根据塌陷灾害预测和危险性评估成果,避开塌陷灾害分布区位和地点,选定安全的线路和稳定的场地。回避措施是指在选定工程线路和场址后,对于不可规避的塌陷灾害采取适当的工程措施(主要是改变工程方案或基础结构型式、梁板跨越和采用恰当的施工方法等)避免塌陷灾害的不利影响^[11,70-72]。在岩溶地面塌陷灾害预防中,对于线路工程,一般有较大的选择余地,多采用规避措施;历史较悠久的城镇岩溶区,由于土地弥足珍贵,多采取回避措施。对于无可规避和回避的塌陷灾害则采取治理措施。

塌陷治理措施是指采取工程措施改善土体性能、消除岩溶缺陷、改良岩溶地质结构,从而消除塌陷灾害。在目前的工程实践中,最常用的工程措施是充填溶洞、土洞和封堵岩溶通道,破坏地面塌陷的岩溶条件;其它还有控制外加荷载和水的不良作用等诱发因素的措施,改良土体性能的措施在工程实践中少见;最常用的治理方法是注(灌)浆和(或)填充粗料(块石、瓜米石或砂等)^[73-84],其它方法还有设置排气孔、做隔水帷幕、挖填、挤密或夯实土洞以及管理措施等^[4,12,85-90]。

2 存在的问题

在岩溶地面塌陷理论与防治实践中,尽管在塌陷机理、塌陷预测、塌陷监测和塌陷防治等方面取得了长足的进步和成功的经验,但是,由于岩溶发育的复杂性、塌陷机理的多变性以及诱发因素的多样性,对塌陷的研究尚存在一些不足之处。

2.1 关于塌陷机理

(1)岩溶地面塌陷机理很多,目前已达十余种,甚至还有新的机理被不断提出,以致塌陷机理的数量呈发散趋势,没有收敛的迹象。

(2)将诱发因素作为塌陷机理的研究对象。纵观各家塌陷机理,无一不是与诱发因素和(或)力学效应紧密相联系,起于诱因、止于力学效应,将诱发因素或其产生作用力的力学效应作为塌陷机理来研究,导致一个诱因和(或)力学效应总结出一个塌陷机理;当单因素或多因素产生多个作用力共同导致地面塌陷时,则错误地认为是多机理叠加的结果。随着塌陷现象的越来越多,会有更多的影响因素被发现,则必然出

现新的解释,出现了新的所谓的“塌陷机理”。这就是塌陷机理数量呈发散趋势的原因。并且,现有塌陷机理或效应多属于诱发因素范畴,或是对岩溶地面塌陷形成过程的某一作用或环节的描述,还够不上自成体系的“理论”。

(3)忽略了土颗粒的运动学响应特性研究。岩溶地面塌陷的实质是土体塌陷,毫无疑问,土体应该是塌陷机理的研究对象。土体受外力后的变形过程及相应的变形特征即是塌陷机理的研究内容。土体塌陷机理就是土体受外力作用时土体本身的破坏机理,也就是土颗粒在外力作用下的行为特征,即运动学响应。不同的土体,受到相同的外力作用具有不同的运动学响应特征,相应地,相同的土体,受到不同的外力作用,具有不同的运动学响应特点。

如前所述的砂性土、黏性土和软弱土等三类土,塌陷时土颗粒运动学响应迥异,变形特征亦不同。在塌陷过程中,同样受到渗流力作用时,砂性土是粗颗粒构成的散体结构,渗透系数较大,对地下水的渗流力很敏感,易发生渗流潜蚀作用;砂颗粒在重力及渗透压力作用下“一颗一颗”地漏失;黏性土的渗透系数很小,一般具有弱到极微透水性,这类盖层区不存在一般意义上的渗流场^[91],因而渗流潜蚀现象一般不会发生,但是容易发生冲刷潜蚀现象,使黏粒团“成块成块”地剥落;软弱土则对物理潜蚀作用反应不敏感。例如,同样作用于黏性土体上的渗流力和外加向下的正向荷载作用,前者在土洞形成与发展阶段起一定作用(主要是冲刷潜蚀作用),对土洞顶板坍塌影响不大;后者则可导致土洞顶板的块体破坏而发生塌陷。因此,在岩溶地面塌陷机理研究应落脚于土体本身的特性及其受外力作用时的运动学响应特征等的研究。

(4)夸大了岩溶的作用。由于是发育在岩溶地区的塌陷,与岩溶关系密切,岩溶通道和(或)溶洞为塌陷土颗粒运移或储存提供了条件,很多研究者理所当然地将岩溶作为主要研究对象,花费很多精力过度地关注和研究岩石的可溶性、地质构造的控制作用以及地下水的作用等,甚至将这些内容作为地面塌陷的控制因素。事实上,它们仅仅控制了岩溶的发育,而不是地面塌陷的控制因素,没有正确地认识岩溶在塌陷中的真正作用。在自然界中,岩溶作用是一个十分缓慢的地质作用过程,其作用时间往往是用地质年代来计算的。在岩溶地面塌陷中,岩溶作用可以忽略不计。对塌陷真正起作用的是先前岩溶作用的结果,即

已存的溶洞及岩溶通道,他们也仅仅只是为塌陷土体提供了储存空间或运移通道而已。事实上,除了岩溶作用提供的溶洞及岩溶通道可以导致塌陷外,其它原因提供的储存空间也会导致同样现象,即岩溶是地面塌陷的充分不必要条件。

(5)室内模拟实验的局限性。在岩溶地面塌陷的研究中,采用室内模拟实验进行辅助研究是必要的。但是,由于室内条件的限制和实际地质条件的复杂性,难以在室内理想地模拟实际情况,使得室内模拟实验结果与现实情况存在很大差异,没有达到模拟实验的目的。例如,共振论的提出就是基于室内模拟实验。在模拟实验中观测到,放水过程中,水位的波动与密封的塑料发生共振现象,于是就推断这种共振现象在岩溶地面塌陷中也存在,提出了“共振”成因的塌陷观点^[25]。由于真实的共振破坏现象在自然界中很难判断,因而这种观点与现实情况存在一定的差距。又如,徐卫国等(1978)所做的真空吸蚀室内模拟实验,其密封程度在实验室是可以控制得很好的,即在室内可以获得较高的真空度。但是,在自然界中,由于密封欠缺,很难得到较高的真空度。由于室内模拟实验的种种局限性,导致模拟实验不能很好的支持相应的论点。

2.2 关于塌陷预测

塌陷过程的复杂性和塌陷机理理论上的局限性直接导致预测模型的建立很难取得实质性的进展。

首先,地面塌陷预测包括塌陷时间、空间位置以及塌陷历时等各个主要方面的预测。目前的预测模型基本集中在塌陷空间位置的预测;塌陷时间的预测偶尔有文献提及^[34,92],但都是初步的尝试和探索;塌陷历时预测等则鲜有报道。这是由地面塌陷的复杂性所决定的。

其次,确定性预测模型仅仅为土洞型塌陷的模型,砂性土和软弱土的预测模型建立才刚刚起步。这些模型尚处于探索阶段,距工程应用还有很长一段距离。随机模型、模糊模型及灰色模型等半定量预测模型的区域性预测成果可作为塌陷灾害预防时的宏观指导,基本不能作为塌陷治理的依据。

第三,半定量预测方法强调了各种因素对岩溶地面塌陷贡献的不确定性,忽略或忽视了一定条件下岩溶地面塌陷与某个或某些因素间的必然性,即没有关注塌陷机理、外部条件和诱发因素间的必然性,没有经过严格的“地质现象→地质模型→物理模型→数学

模型”的凝练过程,导致半定量预测数学模型与实际地质模型相去甚远或为纯粹的数学模型,因而其地质理论依据往往显得不是很充分。

第四,由于岩溶地质条件和诱发因素的差异,以及各个研究者考虑问题的角度不同,每个数学模型选取的因子、所考虑的因子层次及数量等都存在很大的差别;而且,在岩溶地面塌陷过程中,与塌陷相关的各因素对塌陷事件的贡献是不一样的。这导致所建立的数学模型往往很难准确地刻画这种差异,且与实际地质模型的符合性受研究者本人的经验或其所依据的他人的经验的影响较大,因而所建立的模型的可靠性较差。

第五,相同的外部因素,对于不同的岩溶地质结构,覆盖层的塌陷变形具有不同的特征,即具有不同的塌陷机理。同一因素在不同的数学模型中的权重具有重大的差异!这些原因必然导致,同一研究对象,采用同样的数学方法,不同的研究者所建立的数学模型可能存在很大的差异。如同样是大量抽取地下水或岩溶突水,在黏性土覆盖区可能产生真空吸蚀型塌陷^[12],在砂性土地区则发生沙漏型塌陷^[10],二者的塌陷机理存在本质的差别。因而同样的因素,所取权重有着实质性的差别。

第六,目前的预测研究大多注重了确定性和不确定性预测模型建立和预测,忽略了岩溶地面塌陷本身就是一种地质现象这一事实,因而还未见令人信服的、真正的地质预测模型。

2.3 关于塌陷监测

岩溶地面塌陷监测的目的,就是要实时了解塌陷发展的过程和状况,对塌陷发生的时间和地点作出预报,达到防灾减灾的目的。但是,由于可溶岩中溶洞和岩溶通道发育的随机性,加上上覆盖层的变化,触发因素多而复杂,岩溶地面塌陷的产生具有随机性、模糊性、灰色性、突发性和隐蔽性的特点。一般认为,岩溶地面塌陷难以采取有效的手段和方法进行监测和预报。

(1)由于岩溶地面塌陷机理复杂,缺乏可靠的塌陷理论作为指导,因而塌陷监测没有形成完整的塌陷监测理论体系,缺乏专门的岩溶地面塌陷监测规程、规范等技术标准来规范塌陷监测行为。目前的监测工作主要借助其他行业或专业的技术标准来开展,处于“一例一监测”的探索阶段。

(2)对岩溶地面塌陷的有效监测是对塌陷土体变

形的直接监测。由于岩溶通道和溶洞及其规模的随机性,很难找到这样的重点部位进行有针对性的监测。因而对塌陷土体内部变形的监测只能是面上的工作,且监测的手段和方法目前仍处于探索阶段,尚未检索到这方面成功的报道。

(3)地面沉降和建(构)筑物变形监测只适用于应急抢险阶段的短期监测,指导抢险工作的顺利进行。因为能监测到沉降和变形说明地面塌陷已经发生了。

(4)地面塌陷诱发因素中,外加荷载和土体弱化的监测可以通过设计、施工管理和行政管理措施来解决,但水的作用监测结果可以作为水对土体变形的参考标志,不能作为塌陷的直接依据,只能用作间接判断地面塌陷的可能性。

(5)根据现有的监测方法取得的监测数据基本不能进行准确的塌陷时间预报。要达到这一目的,还需进行理论上的准备和实践的检验,因而还有很长的一段路要走。

2.4 关于塌陷防治

在岩溶地面塌陷防治方面,存在下列不足:

(1)由于塌陷机理尚未取得一致性的认识而在理论上获得突破,确定性预测模型缺乏普适性、不确定性预测模型多为半定量预测,故而目前主要是针对具体工程或某地区的岩溶发育特征采取有针对性的措施,而没有根据塌陷机理、岩溶条件和诱发因素提出系统性的、理论层次的防治措施,故显得理论依据不是很充分,导致有“头痛医头脚痛医脚”和“无病呻吟”之嫌。前者主要表现在“一事一例”地防治,没有系统的塌陷理论作为指导;后者表现在把岩溶塌陷灾害扩大化,无视或忽略塌陷机理,无论是否会发生灾害都进行治疗,造成浪费。

(2)目前最常用的工程措施是通过注浆和/或抛填粗料充填溶洞、土洞和封堵岩溶通道,以破坏地面塌陷的岩溶地下水条件,或选用适当的基础型式、梁板跨越等以回避岩溶的不利影响;在改良土体性能的措施方面,如降低砂性土颗粒的自由度、增大软弱土的可塑性等,在塌陷治理工程实践中少见;故防治方法略显单一。

3 研究新进展

鉴于目前塌陷研究中存在的问题,罗小杰等在全面研究了塌陷土体、可溶岩及岩溶地质结构、诱发因

素及其产生的作用力后,建立了从塌陷机理→确定性预测模型→地质模型预测→塌陷防治→应急处置的一套完整的岩溶地面塌陷理论体系。

根据可溶岩上覆盖层物质成份、地质结构及其物理力学性能的差异,首次提出了覆盖型岩溶地面塌陷的沙漏型、土洞型和泥流型三种机理^[10]。砂性土层分布区,由外界因素的触发导致沙颗粒向岩溶通道和溶洞漏失而产生的地面塌陷现象称为沙漏型塌陷。重力和岩溶提供的有效空间是产生沙漏型塌陷的必要条件,地下水作用加速了沙漏型地面塌陷发生,缩短了塌陷发生的过程。发生在黏性土和密实砂性土层中、由于土洞洞顶拱效应失效而产生的地面塌陷现象称为土洞型塌陷;天然土洞通过地表水侵蚀与地下水潜蚀作用、砂土漏失和软土流失等三种方式形成;土洞的形成和发展时期内洞顶上方土体是稳定的,在外部因素触发而导致洞顶拱效应失效时才发生地面塌陷;土洞型塌陷具有隐蔽性和突发性的特点。由软弱土体流失而产生的地面塌陷现象称为泥流型塌陷;泥流型地面塌陷是软弱土体向溶蚀通道和溶洞中流失的结果。岩溶地面塌陷的触发因素包括水的作用(垂直和水平渗流、土/岩界面处地下水位频繁波动)、外加荷载(动荷载和静荷载)和土洞顶板抗力降低(顶板强度降低、厚度减薄和结构破坏)等方面。这些外因触发了岩溶地面塌陷的发生。

在关于土体塌陷理论的基础上,着重研究了地面塌陷地质现象、地质模型、物理模型及其数学表达式,分别建立了土洞型、沙漏型和泥流型塌陷机理的物理力学模型^[32-33,54]。

对于土洞型塌陷机理,分离了具体的影响因素、将同属性的作用力合成后,根据塌陷过程中的宏观地质现象,结合土体在变形中的运动学响应特征及其周围土体变形表现,建立了相应的地质模型,概化了土洞型岩溶地面塌陷的物理模型,依据极限平衡理论,提出了具有普适性的数学表达式;进一步探讨了土洞顶板临界厚度的影响因素,认为土洞顶板临界厚度与洞径、外加荷载增量以及较高的顶板抗剪强度呈正相关性,与较低的顶板抗剪强度呈负相关性^[54]。

对于沙漏型塌陷机理,根据地质现象和砂性土中砂颗粒在塌陷过程中的运动学响应特征,建立了沙漏型岩溶地面塌陷的地质模型,概化出了物理模型,并根据物质守恒定律建立了沙漏型塌陷的数学表达式,并由此探讨了沙漏型塌陷规模与岩溶和水文地质条

件的关系,认为沙漏型塌陷历时与砂性土的摩擦系数的平方、水力坡降的平方根及可溶岩洞径的 $8/3$ 次方根成反比,与塌陷坑深度的立方成正比^[33]。

对于泥流型塌陷机理,根据软弱土在塌陷中的运动学响应特征及其周围土体变形表现,建立了泥流型岩溶地面塌陷的地质模型。由于软弱土具有高含水量、高液限、低抗剪强度和可流动的特点,将其视为高粘滞性的流体,在塌陷过程中呈层流状态流动;进而概化了泥流型岩溶地面塌陷的物理模型;依据牛顿内摩擦定律及极限平衡理论,提出了相应的数学表达式,探讨了泥流型地面塌陷的基本特征,认为泥流型地面塌陷将以一固定的速度发生,塌陷速度与岩溶通道直径的平方、软弱土的重度和天然含水量成正比,与粘性系数成反比。塌陷历时与软弱土的粘稠程度和厚度成正比,与重度和岩溶通道直径的平方成反比^[32]。

以岩溶地面塌陷的土洞型、沙漏型和泥流型等三个塌陷机理为基础,根据岩溶地质结构,结合岩溶发育程度和触发因素,提出了覆盖型岩溶地面塌陷综合地质预测和危险性评估方法^[55]。根据塌陷变形中土颗粒行为特征,将可溶岩上覆盖层土体区分为砂性土、粘性土和软弱土三种基本类型,依据三类土层在剖面上的组合关系,划分出九类岩溶地质结构。首先,依据岩溶地质结构的平面分布特征,结合岩溶发育程度和研究区可能存在的触发因素,对岩溶地面塌陷进行综合地质预测,即区分为高易发区、中等易发区和低易发区三个区;然后结合塌陷灾害对周围环境的可能影响程度,进行地面塌陷危险性评估,即划分为高危险区、中等危险区和低危险区三个区。覆盖型岩溶地面塌陷综合地质预测与危险性评估方法之地质理论依据充分,具有较好的实用性和可操作性。由于地质条件的复杂性,该模型不能用数学物理表达式来表示。

以岩溶地面塌陷的三个塌陷机理为指导,全面总结了地面塌陷治理的预防与治理方法,认为地面塌陷的预防应采取控制触发因素、适当的工程措施以及重点监测与群测群防相结合的措施。地面塌陷的治理应根据沙漏型、土洞型和泥流型三个塌陷机理修复有缺陷的岩溶地质结构。地面塌陷应急处置应在突变、缓变和暂时稳定阶段分别采取应急自救、外界救援和工程处理措施^[72]。

4 研究发展方向

根据岩溶地面塌陷研究现状和存在的不足,在今后的研究中,下列几个方面是需要重点研究的课题。

在塌陷机理方面,要准确把握塌陷土体、岩溶和诱发因素各自在地面塌陷中的地位和作用,正确确定塌陷机理的研究对象和核心内容,认识岩溶的实质作用,研究诱发因素产生的作用力及其作用效果,关注和研究土体塌陷过程中土颗粒的运动规律,提出恰当的塌陷机理,并逐渐上升到理论层次,为塌陷的预测、监测和防治提供可靠的理论支撑。

在塌陷预测方面,在新的塌陷理论的基础上,开展地质预测模型的研究,不断丰富确定性模型,克服不确定性模型的缺陷,在现有土洞型塌陷机理、沙漏型塌陷机理和泥流型塌陷机理的基础上,建立具有普适性的、符合客观实际的预测模型,提高各种岩溶地质结构下不同类型土体塌陷的空间预测精度,力争在塌陷时间、历时等方面的预测上取得突破,提出可靠的预测成果,为塌陷的防治奠定基础。

在塌陷监测方面,根据岩溶地面塌陷的特点,在新的塌陷理论的指导下,建立塌陷监测的理论体系,完善诱发因素监测方法,研发塌陷土体变形直接监测预报的新技术和新手段,争取在塌陷的长效性监测方面取得突破,在塌陷时间、地点方面得出较为准确的、能作为塌陷防治依据的预报成果,为塌陷防治和应急措施提供指导。

在塌陷防治方面,以岩溶地面塌陷新理论为依据,建立和完善塌陷防治的理论体系;在塌陷理论的指导下,依据塌陷预测和监测成果,优化现有塌陷防治方法和手段,拓展思路,研发防治新方法,提出必要的、有针对性的、切实可行的防治方案,提高塌陷防治效果,降低防治成本。

参考文献

- [1] 李瑞敏,王萍,王轶,等.中国主要环境地质问题[M].北京:地质出版社,2007.
- [2] 李海涛,陈邦松,杨雪,等.岩溶塌陷监测内容及方法概述[J].工程地质学报,2015,23(1):126-134.
- [3] 雷明堂,蒋小珍,李瑜,等.桂林柘木岩溶塌陷监测预报[A]//中国地质调查局.中国岩溶地下水与石漠化研究[M].南宁:广西科学出版社,2004:102-116.
- [4] 田级生.北方岩溶地面塌陷及其防治[J].勘察科学技术,1992(1):38-41.

- [5] 杜甫志.覆盖型岩溶区地面塌陷的两种力学分析模型及其应用[J].桂林冶金地质学院学报,1989,9(2):177-186.
- [6] 刘长礼,贺可强,高宗军.岩溶地面塌陷的机理分析及其预测模型[J].河北地质学院学报,1993,16(3):264-270.
- [7] 高宗军,马海会,王敏,等.岩溶地面塌陷预测模型初探[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(4):66-85.
- [8] 高宗军,王敏,成世才,等.岩溶地面塌陷的水-岩耦合模型[J].昆明理工大学学报(理工版),2009,34(3):6-11,23.
- [9] 谭鉴益.坛状圆柱状岩溶塌陷预测模型与分析[J].水文地质工程地质,2001,28(4):19-22.
- [10] 罗小杰.也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J].工程地质学报,2015,23(5):886-895.
- [11] 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.
- [12] 徐卫国,赵桂荣.试论岩溶矿区地面塌陷的成因及防治设想[J].化工矿山技术,1978(4):19-27,18.
- [13] 徐卫国,赵桂荣.试论我国岩溶地区地面变形成因及其防治[J].勘察技术,1979(4):29-36.
- [14] 徐卫国,赵桂荣.岩溶矿区地面塌陷的成因与防治再探[J].化工矿山技术,1979(4):50-59,72.
- [15] 徐卫国,赵桂荣.试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J].地质论评,1981,27(2):174-180,183.
- [16] 徐卫国.岩溶矿区地面塌陷成因[J].煤田地质与勘探,1981(4):37-40.
- [17] 徐卫国,赵桂荣.论岩溶塌陷形成机理[J].煤炭学报,1986,11(2):1-11.
- [18] 徐卫国,赵桂荣.真空吸蚀作用引起的塌陷实例[J].水文地质工程地质,1988,15(3):50-51.
- [19] 左平怡,赵济群,钱再华.对真空吸蚀作用解释地面塌陷的疑义[J].地质论评,1981,27(3):243-248.
- [20] 康彦仁.论岩溶塌陷形成的致塌模式[J].水文地质工程地质,1992,19(4):31-34.
- [21] 康彦仁.试论岩溶地面塌陷的类型划分[J].中国岩溶,1984,3(2):146-155.
- [22] 项式钧,康彦仁,刘志云,等.长江流域的岩溶塌陷[J].中国岩溶,1986,5(4):256-282.
- [23] 康彦仁.岩溶塌陷的形成机制[J].广西地质,1989(2):83-90.
- [24] 郑小战.广花盆地岩溶地面塌陷灾害形成机理及风险评估研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [25] 代群力.岩溶矿区地面塌陷成因新说——共振论[J].中国煤田地质,1991,3(3):66-68.
- [26] 代群力.论岩溶地面塌陷的形式机制与防治[J].中国煤田地质,1994,6(2):59-63.
- [27] 肖明贵.桂林市岩溶塌陷形成机制与危险性预测[D].长春:吉林大学,2005.
- [28] 苏阳,曾克强,陈孟芝.桂林市岩溶土洞塌陷的形成机制及治理措施[J].矿产与地质,2007,6(6):692-694.
- [29] 王建庆.覆盖型岩溶区土洞塌陷机制及其稳定性研究[D].桂林:桂林理工大学,2013.
- [30] 吴永华,谢春波,朱洵.陆家街地区岩溶塌陷形成机制及预测评

- 价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(S1): 118-123.
- [31] 胡亚波, 刘广润, 肖尚德, 等. 一种复合型岩溶地面塌陷的形成机理: 以武汉市烽火村塌陷为例[J]. 地质科技情报, 2007, 26(1): 96-100.
- [32] 罗小杰, 罗程. 泥流型岩溶地面塌陷物理模型[A]//2016年全国工程地质学术年会论文集(C). 中国地质学会工程地质专业委员会, 2016: 1054-1059.
- [33] 罗小杰, 罗程. 沙漏型岩溶地面塌陷物理模型[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 88-93.
- [34] 蒙彦, 黄健民, 雷明堂, 等. 基于灰色 Verhulst 模型的岩溶塌陷定量预报预测方法[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 17-22.
- [35] 贺可强, 王滨, 万继涛. 枣庄岩溶塌陷形成机理与致塌模型的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 564-569, 574.
- [36] 姜春露, 姜振泉. 基于 Fisher 判别分析法的岩溶塌陷预测[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 91-95.
- [37] 陈学军, 陈植华, 陈先华, 等. 桂林市西城区岩溶塌陷模糊层次综合预测[J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(2): 112-116.
- [38] 包惠明, 胡长顺. 岩溶塌陷两级模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(3): 49-52.
- [39] 邱向荣. 岩溶塌陷稳定性的灰色模糊综合评价[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 58-61.
- [40] 李公岩, 李元仲, 杨蕊英, 等. 山东省枣庄市岩溶塌陷的层次模糊预测评判[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 87-90.
- [41] 柏瑾, 周游游, 王伟. 基于模糊综合评判的大石围天坑群生态旅游形象定位[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 93-97.
- [42] 杨全城, 姚春梅, 邵景力, 等. 模糊综合评判在临沂城区岩溶塌陷危险性评价中的应用[J]. 山东国土资源, 2010, 26(6): 24-27.
- [43] 贺玉龙, 杨立中, 黄涛. 人工神经网络在岩溶塌陷预测中的应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(4): 87-91, 80.
- [44] 包惠明, 胡长顺. 岩溶地面塌陷神经网络预测[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 299-304.
- [45] 朱庆杰, 刘挺权, 张秀彦, 等. 唐山市岩溶塌陷的神经网络预测模型[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(6): 753-755.
- [46] 管佳林, 罗周全, 杨彪, 等. 矿区岩溶地表塌陷神经网络预测模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 28-33.
- [47] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜, 等. 城市岩溶塌陷地质灾害风险评估: 以贵州六盘水市为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(4): 23-24.
- [48] 陈明晓. 岩溶覆盖层塌陷的原因分析及其半定量预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 285-289.
- [49] 宾红卫. 层次因子综合预测法在岩溶地面塌陷地质灾害预测分析评估中的应用[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(4): 111-114, 117.
- [50] 赵德君, 彭凤, 杨建, 等. 基于层次分析法的武汉市岩溶塌陷危险性分区评价[J]. 资源环境与工程, 2012, 26(S1): 97-99.
- [51] 金艳珠, 谈树成, 虎雄岗, 等. 基于层次分析法与 GIS 相结合的岩溶塌陷地质灾害易发性分区评估: 以云南师宗县为例[J]. 热带地理, 2012, 32(2): 173-178.
- [52] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. GB50307-2012 城市轨道交通岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [53] 贾秀梅, 周骏业, 董玉良, 等. 灰色系统理论在岩溶地面塌陷分析预测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(S1): 113-117.
- [54] 罗小杰, 罗程. 土洞型岩溶地面塌陷物理模型[J]//工程地质学报, 2016, 24(Sup.): 1229-1237.
- [55] 罗小杰, 罗程. 覆盖型岩溶地面塌陷综合地质预测与危险性评估[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 51-59.
- [56] 焦华. 地下水监测频率的初步研究[J]. 水文地质工程地质, 1990, 17(2): 45-48.
- [57] 刘雅欣. 地下水监测系统及其应用探讨[J]. 山西水利科技, 2011, (1): 88-89.
- [58] 王目光, 魏淮, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 867-869.
- [59] 孙安, 乔学光, 贾振安. 一种新颖的温度补偿光纤光栅应力传感测量技术[J]. 光学技术, 2003, 29(5): 534-536.
- [60] 雷明堂, 李瑜, 蒋小珍, 等. 岩溶塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究: 以桂林市柘木村岩溶塌陷监测为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(S1): 148-152.
- [61] 施斌, 丁勇, 徐洪钟, 等. 分布式光纤应变测量技术在滑坡早期预警中的应用[J]. 工程地质学报, 2004, 12(S1): 515-518.
- [62] 李瑜, 朱平, 雷明堂, 等. 岩溶地面塌陷监测技术与方法[J]. 中国岩溶, 2005, 24(2): 103-108.
- [63] 蒋小珍, 雷明堂, 陈渊, 等. 岩溶塌陷的光纤传感监测试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 75-79.
- [64] 孙伟民, 姜福强, 刘志海, 等. 利用掺铒光纤光栅实现应变测试中的温度补偿[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(6): 719-722.
- [65] 覃秀玲. 岩溶土洞稳定性分析及 TDR 监测预警研究: 以桂阳高速公路 K9~K23 段路基工程为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [66] 蒙彦, 管振德. 应用光纤传感技术进行岩溶塌陷监测预报的关键问题探讨[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 187-192.
- [67] 孙志军, 王浩, 邓家喜. 桂阳公路岩溶土洞发育区路基稳定性监测预报研究[J]. 中外公路, 2012, 32(1): 37-40.
- [68] 郝文杰, 杨卓静, 张青, 等. 光纤传感技术在岩溶塌陷监测中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 134-137.
- [69] 何建平, 徐骏. 基于分布式光纤传感技术的铁路路基岩溶土洞塌陷监测[J]. 铁道建筑, 2016(2): 111-115.
- [70] 龚茂波. 从工程实例谈岩溶地区土洞的处理[J]. 城市道桥与防洪, 1998(3): 26-29.
- [71] 罗小杰, 罗世杰. 武汉市汉南区长江干堤内地面塌陷成因分析与处置措施探讨[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(S2): 75-79.
- [72] 罗小杰. 覆盖型岩溶地面塌陷防治与应急处置[J]. 人民长江, 2016, 47(5): 38-44.
- [73] 王红. 浅埋岩溶地区地面塌陷的注浆治理技术[J]. 采矿技术, 2005, 5(1): 33-35.
- [74] 李双辉. 广州白云国际机场勘察及溶土洞处理建议的几点体会[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(S1): 134-135.
- [75] 刘俊洪, 赖月彬. 花都某村地面塌陷原因分析和治理[J]. 广东建材, 2007(1): 117-119.

- [76] 刘源,张可能.桂林某公路地面塌陷成因分析及治理措施[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(11):159-162.
- [77] 蔡裕超,何春盛.小论岩溶地面塌陷对道路的影响及防治措施[J].科技创新导报,2009(9):58.
- [78] 廖未来.碎石桩和注浆法处理岩溶地区软弱地基中的土洞[J].地质灾害与环境保护,2009,20(3):76-79.
- [79] 袁辉.大体积土洞处理技术[J].市政技术,2010,28(2):129-130,148.
- [80] 武卫星,朱敏,郭晓刚.地铁工程穿越岩溶地区处理技术研究[J].人民长江,2011,42(1):47-49.
- [81] 程学昌.地铁盾构区间溶土洞处理技术研究[J].城市建设理论(电子版),2012(8).
- [82] 何志强.溶、土洞的化学灌浆处理技术[J].建材与装饰,2012(2):109-110.
- [83] 黎颂康.浅谈合生君景湾三期项目的溶、土洞处理方法[J].城市建设理论研究(电子版),2013(18).
- [84] 李慎奎,陶岚.武汉地区岩溶发育特征及地铁工程中岩溶处理[J].隧道建设,2015,35(5):449-454.
- [85] 杨德才.水城岩溶盆地抽水塌陷研究[J].岩土工程界,2002,5(6):21-23.
- [86] 尹若君,盛志勇.郴州市岩溶地面塌陷分布规律及防治措施探讨[J].地质灾害与环境保护,2005,16(2):143-146.
- [87] 傅颖娣.地基下土洞注浆处理的应用[J].中外建筑,2007(8):92-94.
- [88] 程劲夫,宾斌.大型溶蚀土洞施工处理新技术[J].湖南水利水电,2013(1):20-22.
- [89] 韦俊发,麻荣广,杨彰智,等.广西来宾凤凰变电站土洞塌陷形成机理及其治理[J].中国岩溶,2013,32(3):325-329.
- [90] 郑添寿.覆盖型岩溶塌陷注浆治理工程实例[J].福建建设科技,2014(4):23-25.
- [91] 王建秀,杨立中,刘丹,等.铁路岩溶塌陷典型概念模型研究及实例分析[J].铁道工程学报,1999(4):75-79.
- [92] 谭鉴益.广西覆盖型岩溶区土层崩解机理研究[J].工程地质学报,2001,9(3):272-276.

Research progress and prospect of karst ground collapse in China

LUO Xiaojie¹, SHEN Jian²

(1. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation(Wuhan), Wuhan, Hubei 430010, China;

2. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430030, China)

Abstract In order to understand the theory and practice of karst ground collapse in China, this paper discusses the connotation and extension of karst ground collapses. It also reviews current research status of karst ground collapse in the aspects of mechanism, prediction, monitoring and prevention. The new research progress conducted in recent years and existing problems are summarized, from which the author proposed key ways forward for the research of karst ground collapse.

Key words covered karst, ground collapse mechanism, comprehensive geological prediction, risk assessment, progress and prospect

(编辑 张玲)