

doi: 10.12029/gc20220819001

戴建玲, 雷明堂, 蒋小珍, Zhou Wanfang, 蒙彦, 吴远斌, 管振德, 贾龙, 殷仁朝, 潘宗源, 尹欧, 陈英姿, 杨涛, 雷柱平, 黄敬军, 杨荣康. 2024. 长江经济带岩溶塌陷分布、成因及其对工程建设的影响[J]. 中国地质, 51(1): 184–202.

Dai Jianling, Lei Mingtang, Jiang Xiaozhen, Zhou Wanfang, Meng Yan, Wu Yuanbin, Guan Zhende, Jia Long, Yin Renchao, Pan Zongyuan, Yin Ou, Chen Yingzi, Yang Tao, Lei Zhuping, Huang Jingjun, Yang Rongkang. 2024. Distribution and causes of karst collapse in Yangtze River Economic Belt and its influence on engineering construction[J]. Geology in China, 51(1): 184–202(in Chinese with English abstract).

长江经济带岩溶塌陷分布、成因及其对 工程建设的影响

戴建玲^{1,2}, 雷明堂^{1,2}, 蒋小珍^{1,2}, ZHOU Wanfang³, 蒙彦^{1,2}, 吴远斌^{1,2},
管振德^{1,2}, 贾龙^{1,2}, 殷仁朝^{1,2}, 潘宗源^{1,2}, 尹欧⁴, 陈英姿⁵, 杨涛⁶,
雷柱平⁷, 黄敬军⁸, 杨荣康⁹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/中国地质调查局岩溶塌陷防治技术创新中心/广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004; 3. Zeo 环境有限责任公司, 诺克斯维尔 田纳西州 美国 37934; 4. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410116; 5. 湖南省地质矿产勘查开发局四一八队, 湖南 娄底 417009; 6. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430034; 7. 安徽省地质环境监测总站, 安徽 合肥 230001; 8. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 9. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550001)

摘要:【研究目的】岩溶塌陷是长江经济带主要环境地质问题之一, 开展长江经济带岩溶塌陷分布、成因及其对工程建设的影响研究, 对长江经济带立体综合交通走廊建设和新型城镇化建设地质环境安全保障具有重要意义。

【研究方法】本文系统梳理了长江经济带岩溶塌陷研究成果, 从岩溶环境特征、岩溶塌陷的成因类型和机制、发育及分布规律、对工程建设的影响及防控措施几个方面进行论述。【研究结果】研究结果表明, 长江经济带岩溶塌陷易发区面积约 25.4 万 km², 有记录的岩溶塌陷灾害 2146 处, 矿山疏干排水、抽水、工程施工等是这一地区岩溶塌陷的主要诱发因素。长江经济带岩溶塌陷具有以下发育分布规律: 一是具有区域性和地带性的分布特征; 二是发育地层一般为均匀状纯碳酸盐岩, 沿断裂破碎带、褶皱轴部裂隙发育带、可溶岩与非可溶岩接触地带等岩溶洞隙密集发育带分布; 三是多发生在岩溶地下水强径流带、河流两岸等地下水位变化幅度大、水动力条件易发生急剧变化的地段; 四是多发生在人类工程活动强烈的地区, 塌陷的规模取决于人类活动的性质和强度。为了降低岩溶塌陷对工程建设和安全运营影响, 本文同时提出了相关建议 and 对策。【结论】长江经济带岩溶塌陷分布广、危害大, 高易发区内线性工程、重要城市群等规划建设应对这一环境地质问题引起重视, 该研究成果可为长江经济带国土空间规划、地质灾害防治提供基础支撑和理论依据。

关键词: 岩溶塌陷; 地质灾害; 分布; 成因; 工程建设; 地质调查工程; 长江经济带

创新点: 基于详细的调查数据, 系统分析总结了长江经济带岩溶塌陷的成因、形成机制、发展模式、分布特征以及对工程建设的影响, 并提出了减轻这种影响的有效措施。

中图分类号: P642.25 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0184-19

收稿日期: 2022-08-19; 改回日期: 2022-12-25

基金项目: 中国地质调查项目(DD20190266、DD20160254、DD20221637)、中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2021003)以及国家自然科学基金项目(42077273、41472298)联合资助。

作者简介: 戴建玲, 女, 1981 年生, 高级工程师, 主要从事岩溶地质灾害防治研究; E-mail: daijianling@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 蒋小珍, 女, 1970 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩溶地质灾害防治研究; E-mail: jiangxiaozhen@mail.cgs.gov.cn。

Distribution and causes of karst collapse in Yangtze River Economic Belt and its influence on engineering construction

DAI Jianling^{1,2}, LEI Mingtang^{1,2}, JIANG Xiaozhen^{1,2}, ZHOU Wanfang³, MENG Yan^{1,2}, WU Yuanbin^{1,2},
GUAN Zhende^{1,2}, JIA Long^{1,2}, YIN Renchao^{1,2}, PAN Zongyuan^{1,2}, YIN Ou⁴, CHEN Yingzi⁵,
YANG Tao⁶, LEI Zhuping⁷, HUANG Jingjun⁸, YANG Rongkang⁹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CGS/Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO, National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. Zeo Environmental, LLC, Knoxville 37934, Tennessee, USA; 4. Geological Survey of Hunan Institute, Changsha 410116, Hunan, China; 5. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, 418 Geological Brigade, Loudi 417099, Hunan, China; 6. Geological Environment Center of Hubei Province, Wuhan 430034, Hubei, China; 7. Geological Environment Monitoring Station of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 8. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China; 9. Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang 550001, Guizhou, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Karst collapse is one of the main environmental geological problems in the Yangtze River Economic Belt. Conducting research on the distribution, causes, and impact on engineering construction of karst collapse in the Yangtze River Economic Belt is of great significance for the geological environment safety guarantee faced by the construction of multimodal transport corridor and urbanization in the Yangtze River Economic Belt. **[Methods]** This article systematically summarizes the survey results of karst collapse implemented by China Geological Survey since 2016, including the geological background, cause types and mechanisms, development and distribution patterns, impact on engineering construction, and prevention and control measures of karst collapse. **[Results]** The research results indicate that the area of potential karst collapse in the Yangtze River Economic Belt is about 254000 square kilometers, with 2146 documented karst collapse disasters events. Mine drainage, pumping and engineering construction are the main inducing factors for karst collapse in this area. The karst collapse in the Yangtze River Economic Belt has the following formation and distribution characteristics: firstly, it has regional and zonal distribution characteristics; The second is that the underlying strata are generally homogeneous pure carbonate rocks, distributed along strong karstification zones such as fault fracture zones, the axis of strata fold and contact zones between soluble and non-soluble rocks; Thirdly, it often occurs in areas with large amplitude, high speed, and high frequency of groundwater level fluctuation such as concentrated flow zone of karst and river terraces; Finally, it often occurs in areas with strong human engineering activities, and the scale and quantity mainly depend on the type and intensity of human activities. In order to reduce the impact of karst collapse on engineering, this article also proposes relevant suggestions and countermeasures. **[Conclusions]** The karst collapse in the Yangtze River Economic Belt is widely distributed and has a great impact. The planning and construction of linear engineering and Megalopolis in high risk areas should pay attention to this issue. The research results can provide basic support and theoretical basis for the spatial planning of the Yangtze River Economic Belt and the prevention and control of geological disasters.

Key words: karst collapse; geohazard; distribution; cause; engineering construction; geological survey engineering; Yangtze River Economic Belt

Highlights: Based on detailed investigation data, we systematically analyzes and summarizes the causes, formation mechanisms, development patterns, distribution characteristics, and impact on engineering construction of karst collapse in the Yangtze River Economic Belt, and proposes effective measures to mitigate this impact.

About the first author: DAI Jianling, female, born in 1981, senior engineer, engaged in the prevention and control of karst geohazard; E-mail: daijianling@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: JIANG Xiaozhen, female, born in 1970, doctor, professor, engaged in karst engineering geology and geohazard; E-mail: jiangxiaozhen@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20160254, No.DD20190266, No.DD20221637), fundamental research funds of the Institute of Karst Geology, CAGS (No.2021003) and the National Natural Science Foundation of China (No.42077273, No.41472298).

1 引 言

长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州 11 个省市,面积约 205.23 万 km²,人口约 6 亿,占全国 43%,GDP 总量接近 46 万亿,占全国 46%(据 2020 年《中国统计年鉴》中 2019 年统计数据),是中国综合实力最强、战略支撑作用最大的区域之一。

长江经济带也是中国岩溶地貌发育的典型地区。岩溶分布广、类型多,不但蕴藏着各类岩溶资源,而且构成了众多规模不等、性质各异的岩溶环境。独特的地质环境孕育着独特的岩溶环境地质问题,近年来,随着国民经济建设和发展,岩溶塌陷已成为长江经济带交通工程建设和城镇化建设面临的重要地质环境问题之一(姜月华等,2017,2021)。岩溶塌陷是隐伏岩溶洞隙上的岩、土体在自然或人为因素作用下发生变形破坏,并在地面形成塌陷坑(洞)的一种岩溶地质作用和现象,岩溶塌陷的形成和发展受区域地质构造、水文地质、岩溶发育、地表排水以及人为改变地下水动力条件等诸因素的影响(项式均等,1986; Waltham et al., 2005; 邓启江等,2009; Gutierrez et al., 2014; Zhou and Lei, 2017; Luu et al., 2019; 蒙彦和雷明堂,2019; 周正等,2022)。岩溶塌陷大多发生在人口密集的城市、矿山或交通线上,由于具有隐蔽性、突发性的特点,往往使人陷入“防不胜防”的境地,给岩溶地区人民生命财产安全、重大工程建设和城乡经济发展带来严重影响。岩溶塌陷的影响主要包括建筑设施变形破坏,损毁土地资源,加剧地下工程和矿坑突水突泥灾害,导致岩溶地下水系统的井泉干涸、环境退化等(康彦仁和项式均,1990; 程星和黄润秋,2003; 付开隆,2005; Brinkmann et al., 2008; 何芳等,2010; 吴孟杰等,2013; 刘璐,2021)。

本文系统梳理了 2010—2021 年岩溶塌陷环境地质调查成果(中国地质科学院岩溶地质研究所,2019^①,2022^②),对长江经济带岩溶塌陷分布、成因及其对工程建设的影响问题进行了研究,对如何降

低岩溶塌陷对工程建设和安全运营影响提出了相关建议和对策,旨在为长江经济带绿色生态廊道打造、立体交通走廊重大工程规划建设、新型城镇化建设提供基础地质数据。

2 长江经济带岩溶环境特征

长江经济带面积 205.23 万 km²,碳酸盐岩面积约 44.2 万 km²,在新华夏系构造的隆起带为裸露型岩溶区,而在沉降带则为被第四系松散层所覆盖的覆盖型岩溶区或被非碳酸盐岩所埋藏的埋藏型岩溶区,前者如湘江上游,后者以四川盆地为最大。就省(区)来看,主要分布在滇、黔、湘、鄂、川等省,尤其是集中连片分布在滇东、黔北、湘西、鄂西、川东等地区。

根据中国岩溶环境区划(毕雪丽和时坚,2018),长江经济带除皖北和苏北属华北温带季风气候亚干旱岩溶环境区、川西大部 and 滇北属青藏高原高寒带山地气候干旱—湿润岩溶环境区外,大部分地区属于华南热带亚热带季风气候湿润—半湿润岩溶环境区。长江经济带岩溶地质环境类型复杂多样,以岩溶地形地貌的地区性、地带性组合特征为标志,同时考虑地质构造、可溶岩沉积组合和岩溶化程度,进一步分为 15 类(图 1,表 1)。可见,长江经济带岩溶分布广、类型多,西部青藏高原、横断山脉和北部大巴山地由于受气候、地形和岩溶地质条件的影响,岩溶发育以微弱为主,局部中等,其余地区以强—中等为主。

3 长江经济带岩溶塌陷的成因类型及机制

根据长江经济带岩溶塌陷易发性区划(图 2),岩溶塌陷高易发区面积约 12.2 万 km²,中等易发区面积约 13.2 万 km²,低易发区面积约 18.9 万 km²,有记录的岩溶塌陷 2146 处,除上海市外各省均有岩溶塌陷分布(表 2)。

长江经济带岩溶塌陷大多为碳酸盐岩类岩溶塌陷,少数为红层岩溶塌陷(约占 2.17%)。岩溶塌

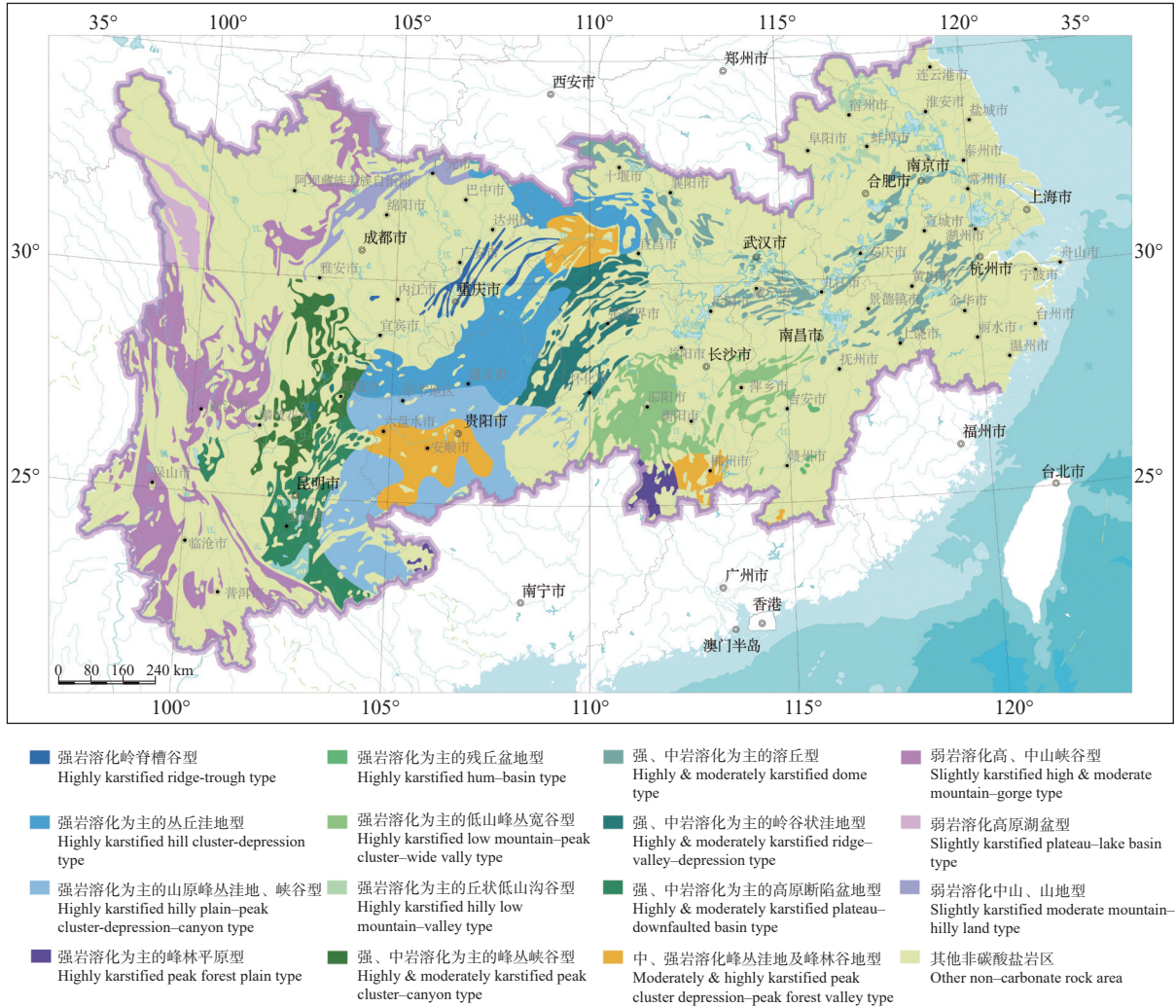


图 1 长江经济带岩溶环境图
Fig.1 Environmental geological map of karst in Yangtze River Economic Belt

表 1 长江经济带岩溶环境一览

Table 1 List of environmental geology of karst in Yangtze River Economic Belt

编号	岩溶地质环境类型	分布范围	面积/km ²
1	强岩溶化岭脊槽谷型	四川盆地东部	9504.39
2	强岩溶化为主的从丘洼地型	黔北、川东南的一部分(云贵高原的北延部分)	94580.27
3	强岩溶化为主的山原峰从洼地、峡谷型	滇东、黔中、黔南	97213.08
4	强岩溶化为主的峰林平原型	湘南永州西南地区	7328.42
5	强岩溶化为主的残丘盆地型	赣中南	986.38
6	强岩溶化为主的低山峰从宽谷型	湘中、湘东及赣西	49714.31
7	强岩溶化为主的丘状低山沟谷型	皖中、皖北、苏西北地区	5979.38
8	强、中岩溶化为主的峰从峡谷型	川西南—滇东北, 云贵高原西部	34258.77
9	强、中岩溶化为主的溶丘型	长江中、下游两岸的大片地区	44129.11
10	强、中岩溶化为主的岭谷状洼地型	湘西、鄂西和黔东北的部分地区	37908.02
11	强、中岩溶化为主的高原断陷盆地型	滇中高原	40092.05
12	中、强岩溶化峰从洼地及峰林谷地型	贵州都匀—贵阳—安顺地区以及湘南郴州一带	58883.16
13	弱岩溶化高、中山峡谷型	横断山脉大雪山一带	121371.64
14	弱岩溶化高原湖盆型	川西, 与西藏交界地带	17229.91
15	弱岩溶化中山、山地型	高原、高山周围地形递降的斜坡带上	17442.03

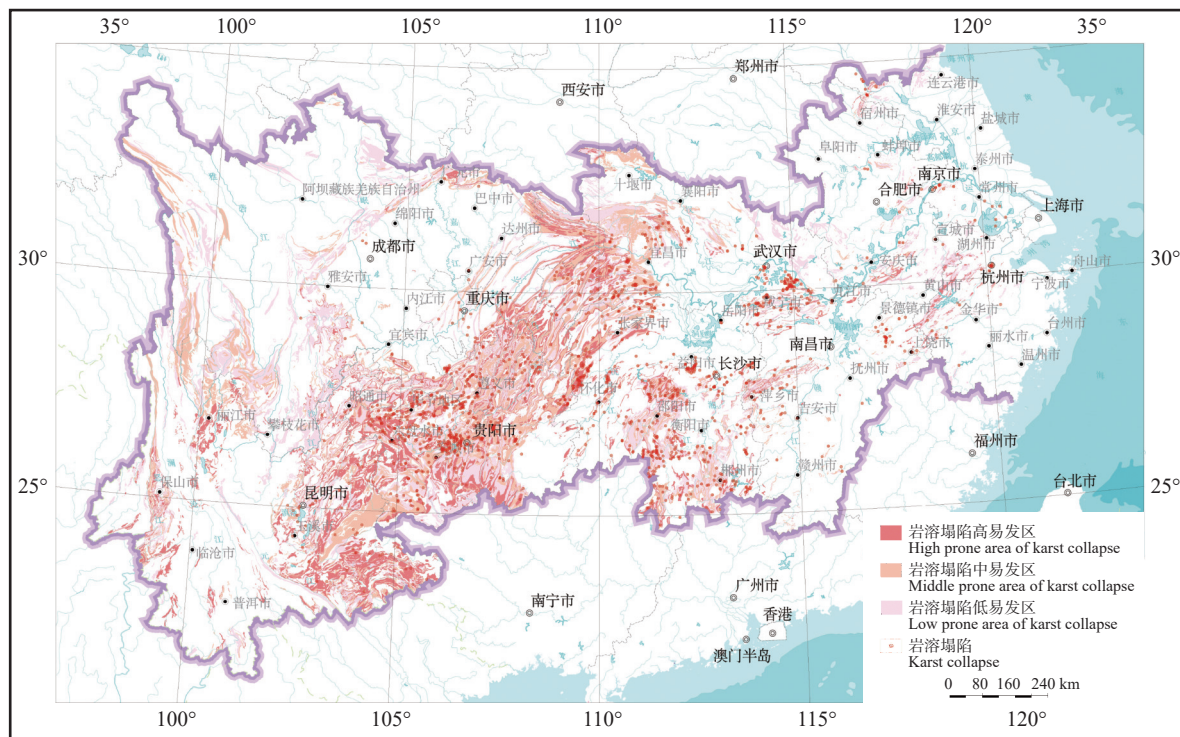


图2 长江经济带岩溶塌陷分布图

Fig.2 Distribution map of karst collapse in the Yangtze River Economic Belt

表2 长江经济带岩溶塌陷易发区及塌陷点数量统计

Table 2 Statistics of karst collapse prone areas and collapse points in Yangtze River Economic Belt

省	岩溶塌陷易发区面积/km ²	岩溶塌陷/处	省	岩溶塌陷易发区面积/km ²	岩溶塌陷/处
湖南省	29664	663	江苏省	446	58
贵州省	66867	603	重庆市	24653	67
湖北省	28892	348	安徽省	2451	29
云南省	71006	186	四川省	28719	20
江西省	4758	156	浙江省	2166	14

陷中,土层塌陷占绝大多数,基岩塌陷少见。岩溶塌陷成因类型较齐全,按其成因可以分为自然塌陷和人为塌陷。自然塌陷是指自然作用下产生的塌陷,人为塌陷是由于人类的工程-经济活动,改变了岩溶洞穴及其上覆盖层的稳定平衡状态而引起的塌陷,包括矿山型岩溶塌陷、工程施工型岩溶塌陷、抽水型岩溶塌陷、振动型岩溶塌陷以及水库型岩溶塌陷等。

3.1 自然塌陷

长江经济带自然塌陷约占塌陷总数的30%,主要出现在现代岩溶作用强烈的山区,以云贵高原的斜坡地带最为多见,常发育于自然状态下地下水动态变化幅度较大的岩溶山地之洼地、槽谷中,塌陷范围小、强度弱,往往呈单个塌坑零星分布。

自然塌陷按其形成时期可分为古塌陷、老塌陷和新塌陷,按其成因又可分为暴雨、地震、重力等原因引起的塌陷。长江经济带自然塌陷以新塌陷为主,多为土层塌陷。例如湖南省新化县孟公镇付家村,塌陷最早于1961年记录,早期塌坑规模小,坑口直径一般为1~2 m,深1~5 m。2009—2012年,塌坑规模稍有扩大,坑口直径一般为1~5 m,深1~10 m,2014年1—5月,再次发生塌陷,塌坑规模与危害都比以往要大,至今,有记录的塌陷坑约15~20个,形成了一北东长约500 m、宽约300 m的塌陷区,付家村岩溶塌陷是在自然演化过程中发生的,塌陷区下伏基岩岩溶强烈发育,岩溶系统连通性好,上覆第四系全新统冲洪积层,为一级阶地及河漫滩堆积,具二元结构,土层的结构力较差,在大气降雨、

地下水位升降等自然因素作用下, 潜蚀作用增强, 土洞上覆土体自重增加, 导致土洞拱顶抗塌力减弱, 土体结构破坏发生坍塌形成地面塌陷。自然塌陷中古、老塌陷较少发现, 且大多属基岩塌陷, 规模一般较大。例如云南蒙自—草坝以东, 沿东坡下部分布 10 多个基岩塌陷, 直径数米至 70 多米, 深可达 30 多米, 这些塌陷都是由于个旧组灰岩的岩溶管道、溶洞发育, 其顶板失稳后陷落形成。

3.2 人为塌陷

长江经济带人为塌陷约占塌陷总数的 70%, 在人类工程—经济活动较强烈的地区最为活跃, 以矿山型、抽水型、工程施工型、振动型以及水库型为其主要类型。其中, 矿坑排水或突水引起的塌陷依存于矿产资源的分布, 主要见于煤盆地和金属成矿带中。抽水引起的塌陷主要见于经济比较发达的城镇地区, 以云贵高原的断陷盆地和分水岭地区的盆地、谷地较为多见。水库塌陷主要分布于长江上游岩溶山地的洼地、谷地中。工程施工诱发的塌陷则与工程活动息息相关。

3.2.1 矿山型岩溶塌陷

处于覆盖型岩溶区的岩溶充水矿床, 在矿坑排水过程中几乎不可避免地出现岩溶塌陷。由于矿坑排水降深达 10~300 m 以上, 疏干影响范围最大可达 10 km, 因此, 在各类人为岩溶塌陷中, 采矿造成的塌陷影响范围最广、数量最多、持续时间最长, 危害最大。

长江经济带矿山型岩溶塌陷主要分布于湘中、鄂东南、赣中—赣东北及安徽的沿江地带等, 如湖南的恩口煤矿、斗笠山煤矿、煤炭坝煤矿、桥头河煤矿、水口山铅锌矿; 湖北的铜录山铜矿、叶花香铜矿、大广山铁矿; 江西的云庄煤矿、花亭锰矿、鸣山煤矿、桥头丘煤矿、涌山煤矿; 安徽的新桥铜矿、狮子山硫铁矿铜矿、朝山金矿、新华山铜矿等矿区。矿山型岩溶塌陷带来的危害和损失是巨大的。例如湖南恩口煤矿(图 3), 从 1973 年到 1998 年 2 月, 区内累计产生塌洞 8757 个, 其中闭坑前 8632 个, 闭坑后 125 个, 塌陷多成群成带分布, 岩溶塌陷破坏房屋 374 栋、农田 600 hm²、桥梁 4 座、引水渠道 11.4 km、小型水库 13 座、山塘 99 口, 区内 116 个泉点中的 66 个泉点干枯断流, 占总量的 57%, 至今仍有大部分井泉无法恢复, 影响 11700 余人用水,

直接经济损失达 800 万元; 再如安徽铜陵狮子山矿区, 包括狮子山硫铁矿铜矿、朝山金矿、新华山铜矿三座矿山, 从 2011 年 12 月 10 日开始首次发生岩溶塌陷以来, 到 2012 年 1 月 8 日止, 累计产生塌陷坑 48 处, 塌陷坑密度达 200 个/km², 毁坏农田 13.33 hm², 毁坏鱼塘 20000 m², 造成朝山黄金屋及新四军史迹陈列馆墙体、地面开裂, 无法正常使用, 同时部分公路、河道遭受毁坏。

矿山排水往往还引起红层岩溶的塌陷, 多产生于洞隙型岩溶发育的白垩纪、古近纪—新近纪钙质胶结灰质砾岩, 砂砾岩中。例如, 湖南宁乡大成桥村距离煤炭坝矿区 2 km, 受煤炭坝地下深部大量抽排岩溶地下水活动的影响, 截至 2013 年底大成桥村共发生岩溶塌陷 343 起, 以白垩系百花亭组(K_b)岩溶塌陷分布最广, 占塌陷总数 97.71%。

矿山型岩溶塌陷主要分布范围与矿山地下水疏干形成的降落漏斗密切相关。矿山疏干或突水时, 地下水位快速下降, 地下水流速增大, 加大了地下水对土体的搬运能力, 原先充填、半充填的岩溶裂隙管道得到疏通, 造成岩溶空腔内水气压力降低, 当存在第四系含水层时, 由于岩溶空隙内排水顺畅, 水位下降快, 而第四系土层水位下降相对滞后, 形成水位差, 甚至产生负压, 第四系土层孔隙水向下渗流补给岩溶水的作用增强, 岩溶空腔开口附近土体所受向下的渗流潜蚀作用增大, 当作用于上覆土层的水力坡度超过了土体发生渗透破坏的临界水力坡度, 土体发生渗透变形破坏, 形成土洞, 土洞不断向上扩展最终导致塌陷的产生(图 4)。

以往研究认为, 矿山疏干排水诱发的岩溶塌陷主要发生在疏干开始、地下水位下降至基岩面附近、矿坑发生突水突泥灾害等 3 个阶段(陈国亮等, 1990), 而地下水位长期疏干至基岩面以下一定水平时岩溶塌陷相对不易发。近期的调查表明矿山疏干区地下水位降至基岩面以下一定水平, 岩溶塌陷依然频繁发生而且时间上大多发生在暴雨期间。例如, 湖南宁乡大成桥镇, 塌陷始发于 20 世纪 80 年代, 2000 年前共发生 64 起, 2005 年后, 岩溶塌陷发生有较明显的上升, 年发生次数都在 20 起以上。通过对大成桥镇岩溶塌陷的研究(蒋小珍等, 2016; 潘宗源等, 2017; Jiang et al., 2018)表明在岩溶矿山疏干区, 疏干排水影响因素一直存在, 岩溶塌

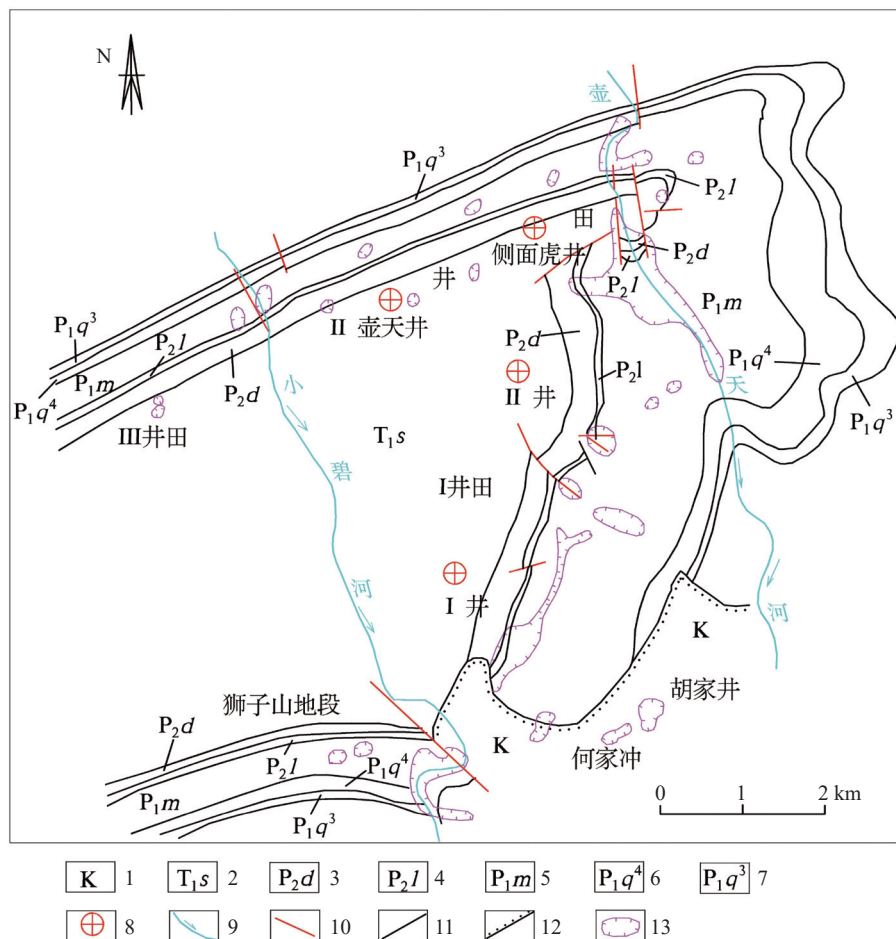


图3 恩口煤矿区矿井排水诱发岩溶塌陷分布简略图

1—白垩系; 2—下三叠统; 3—大隆组; 4—龙潭组; 5—茅口组; 6—香泉山段; 7—李子塘段; 8—排水矿井; 9—河流; 10—断层; 11—地层界线; 12—不整合地层界线; 13—塌陷带

Fig.3 Sketch map of distribution of karst collapse induced by mine drainage in Enkou Coal Mine Area

1—Cretaceous System; 2—Lower Triassic System; 3—Dalong Formation; 4—Longtan Formation; 5—Maokou Formation; 6—Xiangquanshan Member; 7—Lizitang Member; 8—Drainage mine; 9—River; 10—Fault; 11—Stratigraphic boundary; 12—Unconformity stratigraphic boundary; 13—Collapse zone

陷仍处于活跃期,暴雨引起的岩溶管道的水气压力突变是这类岩溶塌陷产生的重要原因(图5)。

3.2.2 抽水型岩溶塌陷

20世纪70年代以来,随着城镇化进程的加快,工农业及生活用水量迅速增加,岩溶水大规模开发,诱发了大量岩溶塌陷。长江经济带范围内已有昆明、贵阳、武汉、南京、杭州等5个省会和一些中小城市如贵州水城、遵义、安顺、清镇,湖南的娄底、黔城、湘潭、郴州,江西的九江、上高、宜春,江苏的徐州等都因抽水发生岩溶塌陷。例如贵州水城盆地(图6),自1966年以来,由于大规模三线建设,先后在盆地内建抽水井20余口,取中下石炭统灰岩岩溶水,平均取水能力3136 m³/h,由于大量抽

取地下水,在岩溶盆地软土中形成了近千处地面塌陷,造成了严重的经济损失(杨德才,2002);再如昆明市由于工农业的发展及城市人口的增加,岩溶地下水开采量由解放初2000 m³/d,增至1974年5000 m³/d,至1983年,附近共打井28口,加之人防洞施工排水,日抽排地下水达30000 m³,形成了长2.7 km,宽2 km,中心水位下降14.05 m的降落漏斗,0.3 km²内20余处地面产生开裂、下沉塌陷,产生塌坑41处,使房屋开裂,亭台倒塌,桥梁破坏,路面下沉。

岩溶塌陷的发生和发展与抽排水时的水位降深、降落漏斗范围、流速等均有一定的关系。当人为地降低地下水位时,因减少或失去了水对第四系

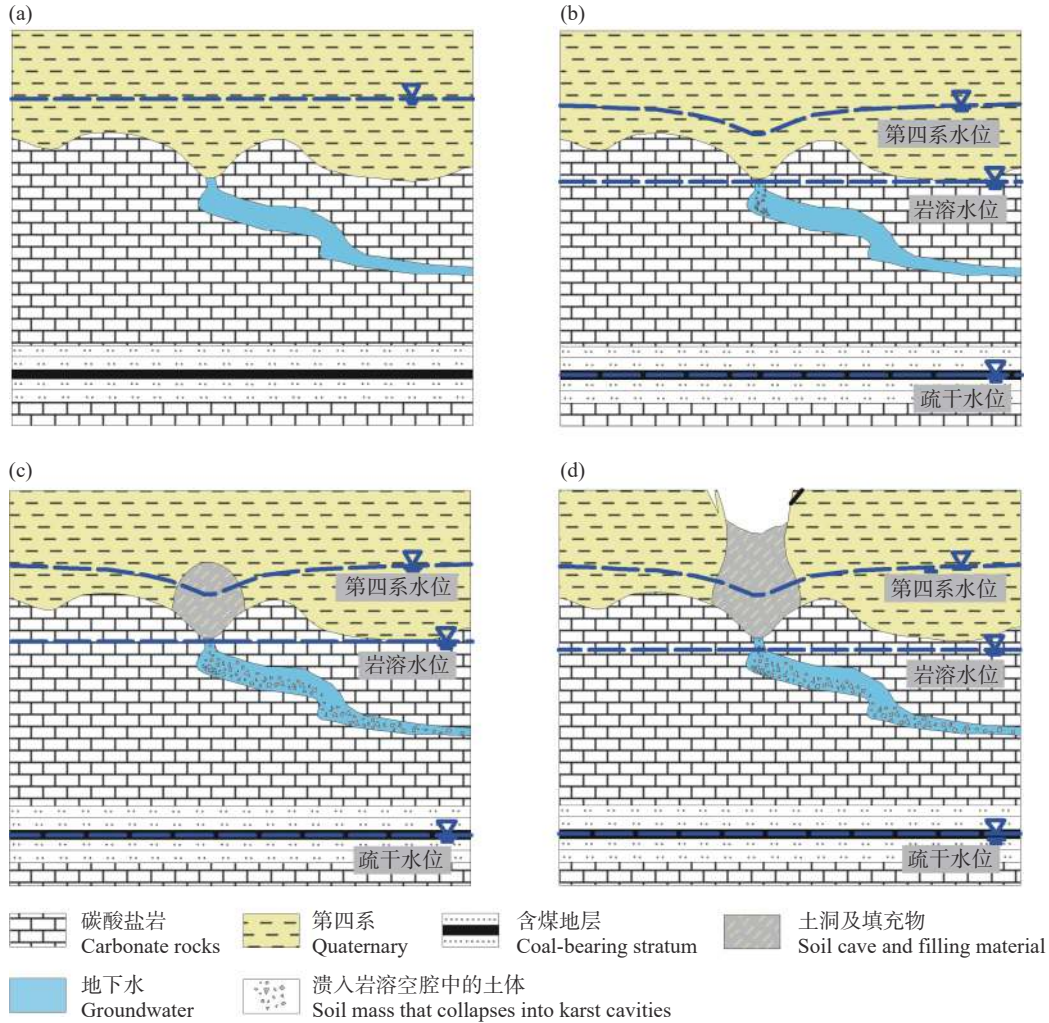


图 4 矿山疏干排水诱发岩溶塌陷机理(第四系含水)

a—初始状态, 第四系水位与岩溶水位一致; b—矿山排水, 地下水位急剧下降, 由于岩溶水位下降得比第四系水位快, 形成水位差; c—渗透侵蚀, 真空吸蚀, 土洞形成, 发展; d—土洞失稳, 形成塌陷

Fig.4 Mechanism of karst collapse induced by mine drainage (with Quaternary aquifer)

a—Initial state, the water level of the Quaternary system is consistent with the karst water level; b—Mine drainage leads to a sharp drop in groundwater level. Due to the rapid decrease in karst water level compared to the Quaternary water level, a water level difference is formed; c—Infiltration erosion, vacuum suction erosion, formation and development of soil cavities; d—Soil cave instability, resulting in collapse

土层的浮托力, 使第四系土层失去了自然平衡状态, 由于渗透坡降和流速增大, 地下水对上覆第四系土层和充填在岩溶裂隙中的充填物的潜蚀作用增强, 另外, 岩溶水向降落漏斗中心不断贯入, 又会对上部土体、土洞等形成真空吸蚀效应, 并伴有地表水与地下水的强渗透、潜蚀作用, 形成土洞并最终发展成塌陷(图 7)。

3.2.3 工程施工型岩溶塌陷

(1) 隧道施工诱发岩溶塌陷

随着隧道施工的推进, 隧道所在区的水-土-

岩平衡逐渐被打破, 当隧道突然揭露溶洞或大断层时, 隧道洞身会成为集水廊道, 隧道影响范围内地下水位急剧下降, 导致地下水渗流场及水动力条件发生急剧变化, 地下水潜蚀和真空吸蚀作用增强, 地下水对泥、沙的搬运能力增大, 第四系底部土层或溶洞充填物中的颗粒在地下水渗流的作用下不断向隧道中运移, 发生渗透变形破坏, 这种应力变化不断向上传递, 顶部覆盖土层最终失稳产生塌陷(图 8)。比较典型的如重庆穿越明月山、中梁山、铜锣山和缙云山等“四山”地区的 50 多条公路隧

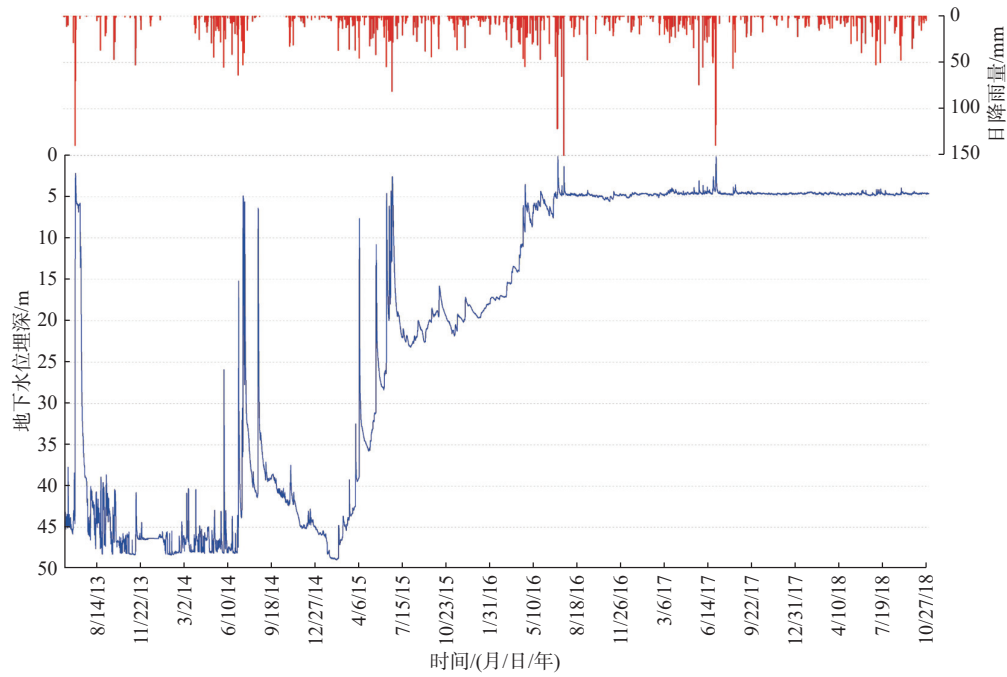


图5 湖南宁乡大成桥监测点地下位埋深与降雨量关系图

Fig.5 Relationship between underground buried depth and rainfall at Dacheng bridge monitoring point in Ningxiang, Hunan

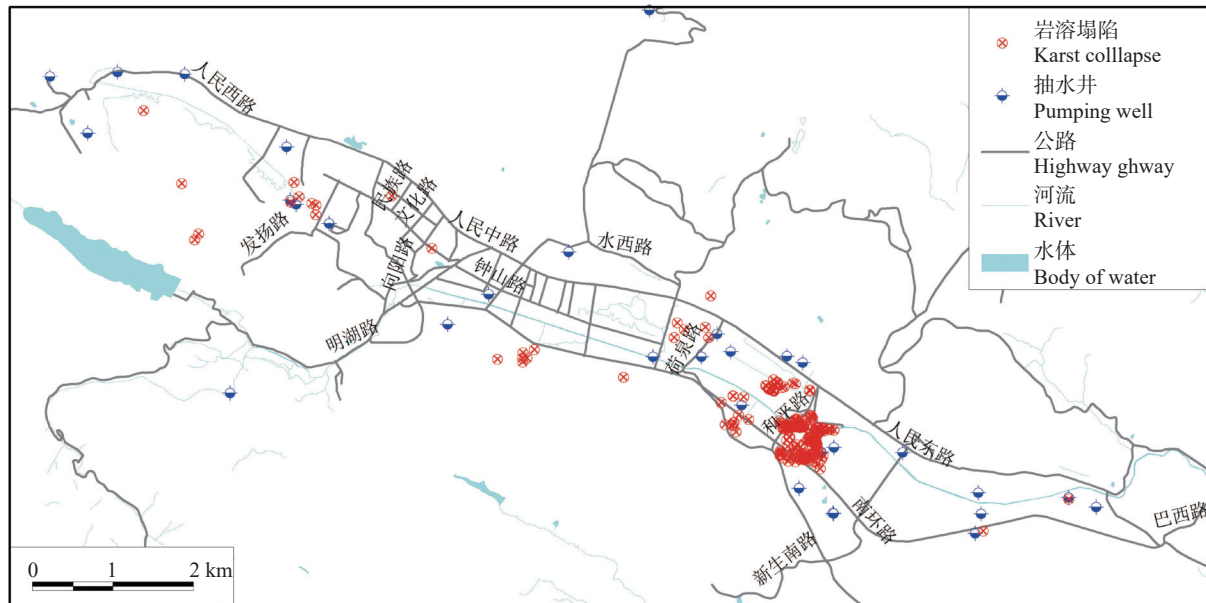


图6 水城盆地岩溶塌陷分布图

Fig.6 Distribution map of karst collapse in Shuicheng Basin

道, 施工以及长期工后排水, 致地表井泉干涸共计 363 处, 水库(塘)漏失共计 62 处, 溪沟断流 16 处, 形成地面塌陷近 300 处(图 9), 还造成大量地面建筑物损坏, 对当地居民生产生活和安全造成严重影响, 引发多起群体事件, 造成了恶劣社会影响。另

外, 京广复线南岭双线隧道、沪昆高铁刘家庄隧道、广昆铁路复线秀宁隧道等都发生过较严重的岩溶塌陷。

隧道施工诱发的岩溶塌陷在不同的阶段机理不同, 在建设期以潜蚀、吸蚀致塌为主, 诱发岩溶塌

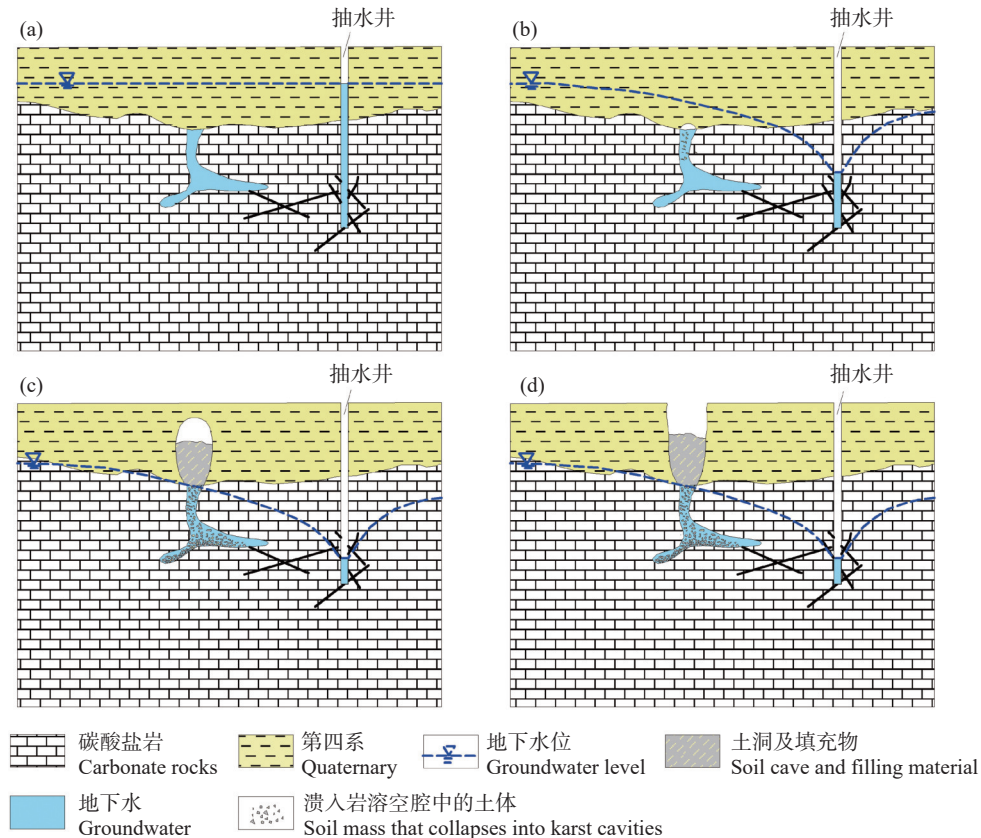


图 7 抽水诱发岩溶塌陷机理

a—初始状态; b—抽水, 地下水位下降, 形成降落漏斗, 在潜蚀作用下土洞形成; c—渗流潜蚀持续, 土洞不断扩大; d—土洞失稳, 形成塌陷

Fig.7 Mechanism of karst collapse induced by pumping

a—Initial state; b—Pumping leads to a decrease in groundwater level, forming a depression funnel, and soil caves are formed under the action of subsurface erosion; c—The seepage erosion continues, and the soil cave continues to expand; d—Soil cave instability, resulting in collapse

陷主要原因是隧道突水(排水)造成地下水快速流动和水位快速下降对岩溶充填物及岩溶裂隙上覆土体产生的潜蚀和吸蚀效应, 运营期以降雨入渗致塌为主, 由于隧道的疏干, 而且建成后排水仍在继续, 岩溶水位未能有效恢复, 含水层具有“三明治”结构, 诱发岩溶塌陷的主要原因是大气降雨作用下(吴远斌等, 2021), 岩溶系统气压力突变导致第四系孔隙水向岩溶管道裂隙集中渗流, 使岩溶充填物及岩溶裂隙上覆土体产生的渗透破坏。

(2) 桩基施工诱发岩溶塌陷

近年来, 随着我国城乡一体化、城市建设的跨越式发展和人类工程活动的增强, 由桩基施工触发的岩溶塌陷灾害呈逐年增长势头, 已严重制约了地方的开发建设和经济发展, 甚至威胁到人民的生命安全。例如 2014 年 9 月 5 日 11:20 左右, 武汉市武嘉高速公路金水河大桥 8-1#桩基钻孔发生严重漏

浆现象, 11:40 该钻孔施工处首先发生岩溶塌陷, 由此诱发了大规模的塌陷, 并向东北方向延伸, 范围从长虹村跨越金水河延伸至北岸的八塘村, 至 9 月 6 日 17:00 时, 共产生了 19 处塌陷坑。此次塌陷未造成人员伤亡, 但造成 1 栋 3 层楼和 2 间平房完全被毁, 2 幢 3 层楼严重倾斜, 金水河西侧河岸毁坏 8 m, 金水河东侧河岸毁坏 21 m, 1 台桩机冲击钻机 and 1 个钻头被掩埋。2021 年 5 月 11 日早上 7 点, 由于桥梁桩基施工造成冷水江市禾青镇禾青村中心学校北侧 50 m 水田内产生岩溶塌陷 16 处, 几乎同时形成, 主要损害农田、公路, 直接经济损失约 20 万元。

桩基施工诱发岩溶塌陷主要与施工过程中对岩溶地下水的强烈扰动有关, 在岩溶发育地区, 桩基施工击穿溶洞顶板瞬间, 在循环泥浆和地下水产生的较大水头压力和采用重锤冲击振动双重作用

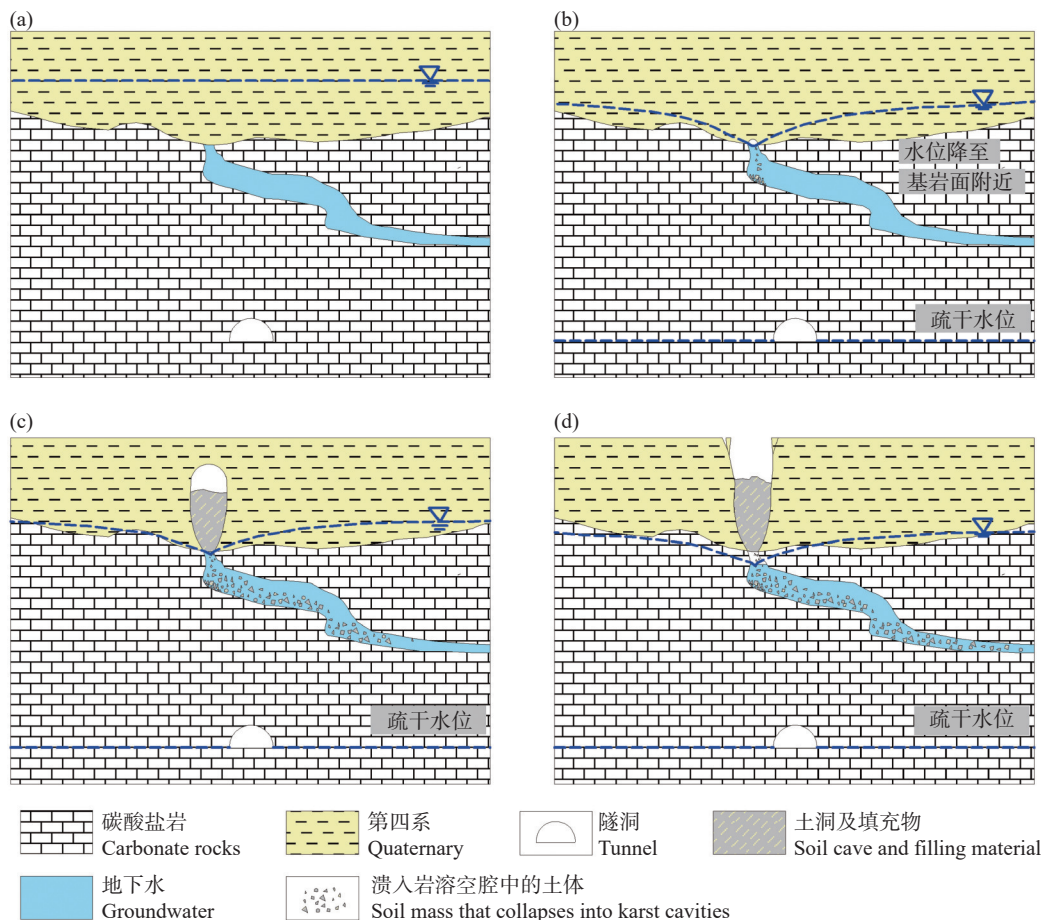


图 8 隧道施工诱发岩溶塌陷机理

a—初始状态; b—隧道涌水或抽排水, 地下水急剧下降形成降落漏斗, 在潜蚀作用下, 土体向岩溶空腔转移, 土洞形成; c—渗流潜蚀, 真空吸蚀, 土洞不断扩大; d—土洞失稳, 形成塌陷

Fig. 8 Mechanism of karst collapse induced by tunnel construction

a—Initial state; b—Tunnel water inflow or drainage causes a sharp drop in groundwater level, forming a depression funnel. Under the subsurface erosion action, the soil moves towards the karst cavity, resulting in the formation of soil caves; c—Seepage erosion, vacuum suction, and continuous expansion of soil cavities; d—Soil cave instability, resulting in collapse

下, 短时间内会快速发生潜蚀、渗流液化, 大量砂土溃入下部岩溶空隙, 在第四系覆盖层中快速形成土洞, 土洞上部土体在自身重力或外部荷载、振动作用下垮塌, 从而形成岩溶塌陷(图 10)。

3.2.4 振动型岩溶塌陷

振动引起的岩溶塌陷往往在铁路路基附近较为常见, 振动是使处于接近极限平衡状态的隐伏土洞产生塌陷的导因, 往往与其他因素联合作用。岩溶强发育区岩石节理、裂隙发育, 地表溶蚀剧烈, 大气降雨及坡面表水极易沿着节理、裂隙及地表溶洞、沟槽等下渗后, 再沿土层界面或层间汇积于低处集中下渗, 当下渗水力梯度、速度较大时便产生冲刷和潜蚀作用, 从而使第四系覆盖土体及溶洞、

缝隙、沟槽中充填半充填物质及破碎颗粒被带走, 导致形成土洞, 土洞不断向上扩大, 顶板渐渐失稳, 产生开裂、下沉, 在列车荷载作用下渐次发展, 最终形成地面塌陷。例如 1976 年 7 月 7 日, 贵昆线 K606+475 处路基大雨后出现直径 8 m 的岩溶地面塌坑, 造成中断行车 62 小时 40 分钟。1979 年 9 月 1 日及 1985 年 7 月 6 日, 贵昆线在 K534+076 格以头村附近发生路基岩溶塌陷, 导致货物列车脱轨、颠覆。浙赣铁路分宜至彬江线上, 1996 年发生路基塌陷以后, 道床又发生塌陷, 岩溶塌陷致使线路路基出现不同程度的下沉。

3.2.5 水库型岩溶塌陷

长江经济带水库型岩溶塌陷主要发生于岩溶

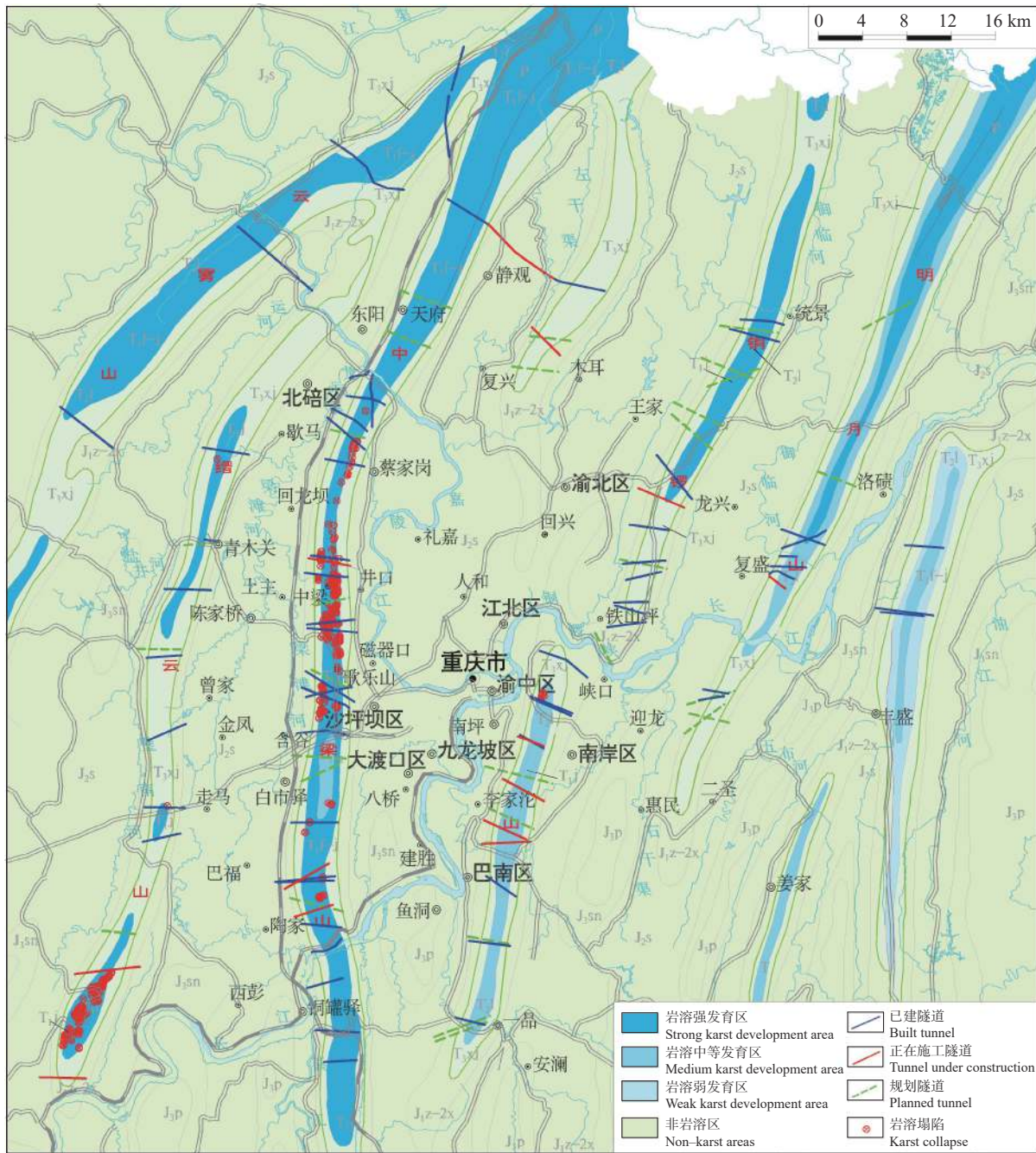


图 9 重庆四山地区岩溶塌陷与隧道分布图

Fig.9 Karst collapse and tunnel distribution in Sishan area of Chongqing

山区、洼地、谷地的小型水库及少量中型水库，多在水体增荷，渗漏潜蚀及雨季地下水位迅猛变化的正负压力和冲爆等多种作用下而在库内产生塌陷，一般规模较小，塌陷坑数量少，强度较弱，但往往多次复活而不易稳定。例如，云南以礼河水槽子水库建成后自 1958—1965 年每年塌陷数十个，累计达 117 个，形成长 400 m、宽 100 m 的塌陷区，库水

漏失。再如，2016 年 11 月 16 日，香格里拉县小中甸镇联合村发生岩溶塌陷，形成直径 7~8 m，深 3.0 m 的塌陷坑，造成进村公路的损毁。塌陷的发生，主要与小中甸水库的水位变化有关，该水库于 2014 年 8 月 15 日建成蓄水，库水位标高在 3207.61~3235.05 m 波动，涨落幅度约 27.44 m (图 11)。

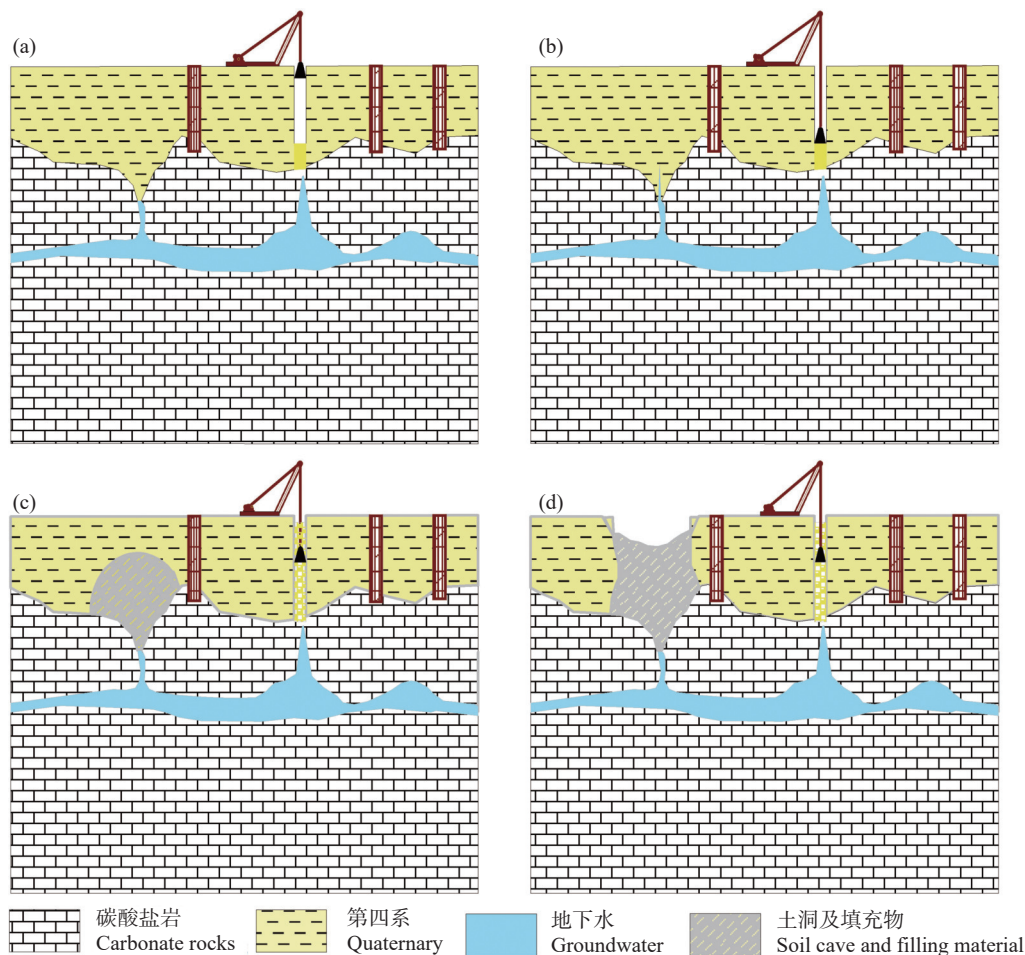


图 10 桩基施工诱发岩溶塌陷机理

a—初始状态; b—桩基施工, 地下水强烈扰动; c—潜蚀、渗流液化, 土洞形成、发展; d—土洞失稳, 形成塌陷

Fig.10 Mechanism of karst collapse induced by pile foundation construction

a—Initial state; b—Pile foundation construction, strong disturbance of groundwater; c—Seepage erosion and seepage liquefaction, formation and development of soil caves; d—Soil cave instability, resulting in collapse

4 长江经济带岩溶塌陷发育规律、分布特征

通过对长江经济带岩溶塌陷的统计分析, 长江经济带岩溶塌陷受岩溶地质条件、地貌类型及人为作用的性质和强度等因素的影响具有一定的发育规律和分布特征。

4.1 长江经济带岩溶塌陷具有区域性和地带性的分布特征

从区域上看, 西部青藏高原、横断山脉和北部大巴山地等地区由于受气候、地形和地质条件的影响, 岩溶发育以微弱为主, 局部中等, 岩溶塌陷基本不发育。中部云贵高原山地区, 碳酸盐岩分布最广, 岩溶发育也较强烈, 从震旦纪到三叠纪各时代

碳酸盐岩均有发育, 而岩溶塌陷受区域岩溶发育特征的影响, 其较强烈发育的地段主要集中于云贵高原面上各级剥夷面和分水岭地带, 在峡谷地段则较弱。东部丘陵平原区碳酸盐岩分布相对较少, 以覆盖型为主, 但受人类活动影响, 岩溶塌陷在人类工程-经济活动较强烈的地区最为活跃, 呈现地带性的特征(图 12)。矿山型塌陷主要集中分布于矿产资源富集的地带, 如湘中煤盆地, 湘南金属成矿带, 赣中煤、金属矿富集的萍乐拗陷带, 鄂东南及长江下游沿江的金属成矿带等地, 抽水型塌陷主要见于经济较发达的城镇地区。

4.2 岩溶塌陷与岩溶发育程度有明显的相关性

长江经济带岩溶发育强烈的层位, 在占主要面积的扬子准地台区, 包括云贵高原和湘、鄂西山原

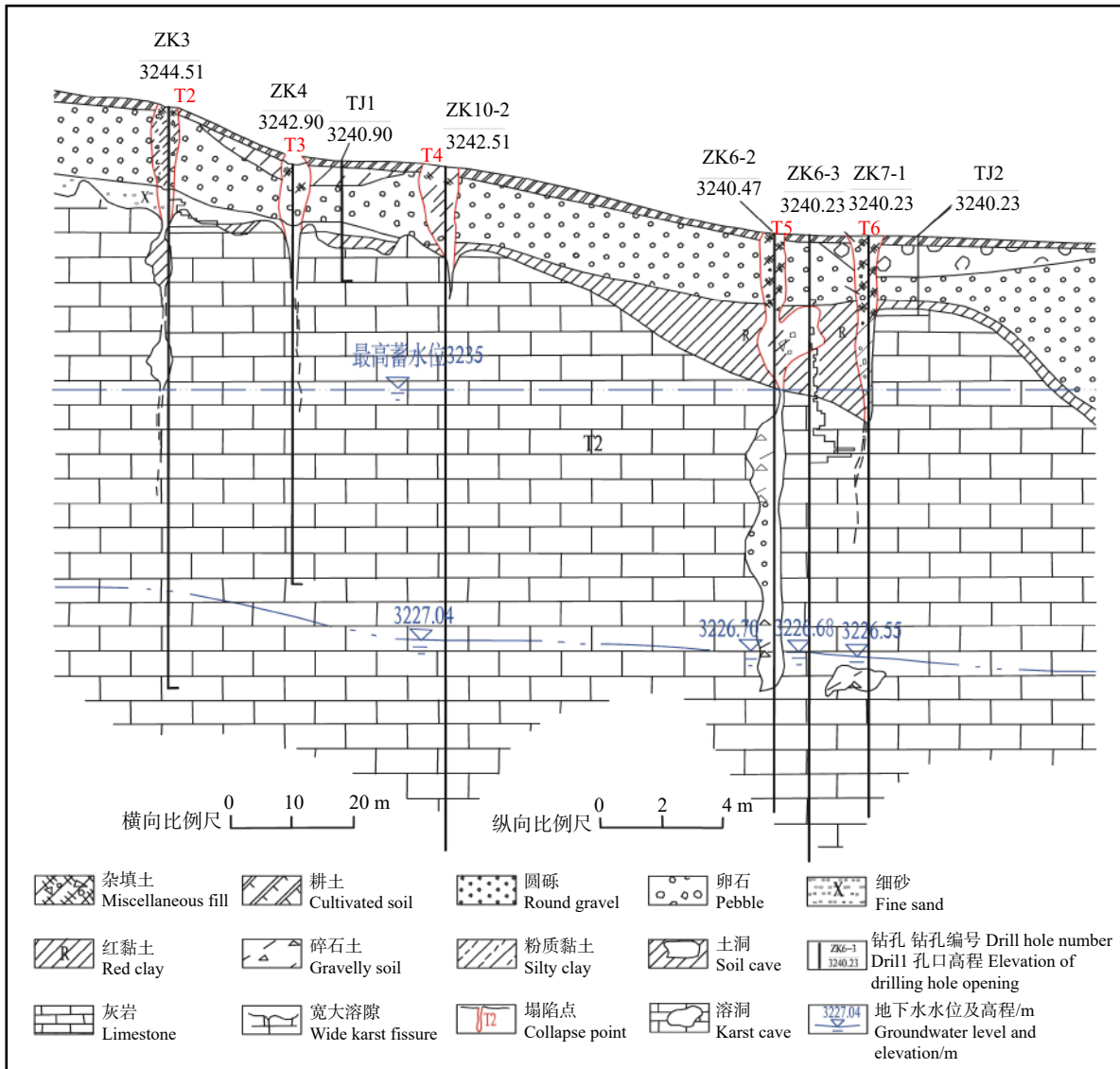


图 11 小中甸水库塌陷剖面示意图
 Fig.11 Schematic diagram of collapse profile of Xiaozhongdian Reservoir

及川东丘陵区,主要是上古生界和中生代的碳酸盐岩,特别是 P_1 、 C_{2-3} 和 T_1 ,碳酸盐岩岩性岩相和厚度较稳定,以较纯的灰岩为主,连续厚度大,岩溶发育普遍强烈,尤其在高原面上各级剥表面及分水岭地带。在华南褶皱系的湘南地区, D_{2-3} 为连续厚度较大的较纯碳酸盐岩,岩溶发育也较强烈。而下古生界和震旦系的碳酸盐岩,除了个别地区的个别层位如黔东北、鄂西的 C_1 上部和 O_1 下部、安徽沿江地带的 O_1 下部,局部岩溶发育较强烈外,一般相对较弱。

长江经济带岩溶塌陷与岩溶发育程度呈明显

的相关性,岩溶发育越强烈,岩溶塌陷越发育,根据已有资料统计,岩溶强发育区的岩溶塌陷占总数的 66.49%,中等发育区的岩溶塌陷占总数的 30.81%,岩溶发育弱的,仅在局部相对强烈的地段发育一些。长江经济带不同时代碳酸盐岩地层都有岩溶塌陷发育,并显示出地层由老到新塌陷数量由少增多的趋势。根据已知发育地层的岩溶塌陷的统计,在上古生界及三叠系中,占数量的 81.51%,其中以 T_1 、 P_1 、 D_{2-3} 、 C_{1-2} 最为发育,在震旦系及下古生界中岩溶塌陷仅占 16.02%,其中以寒武系较为发育,占了一半以上,见表 3。

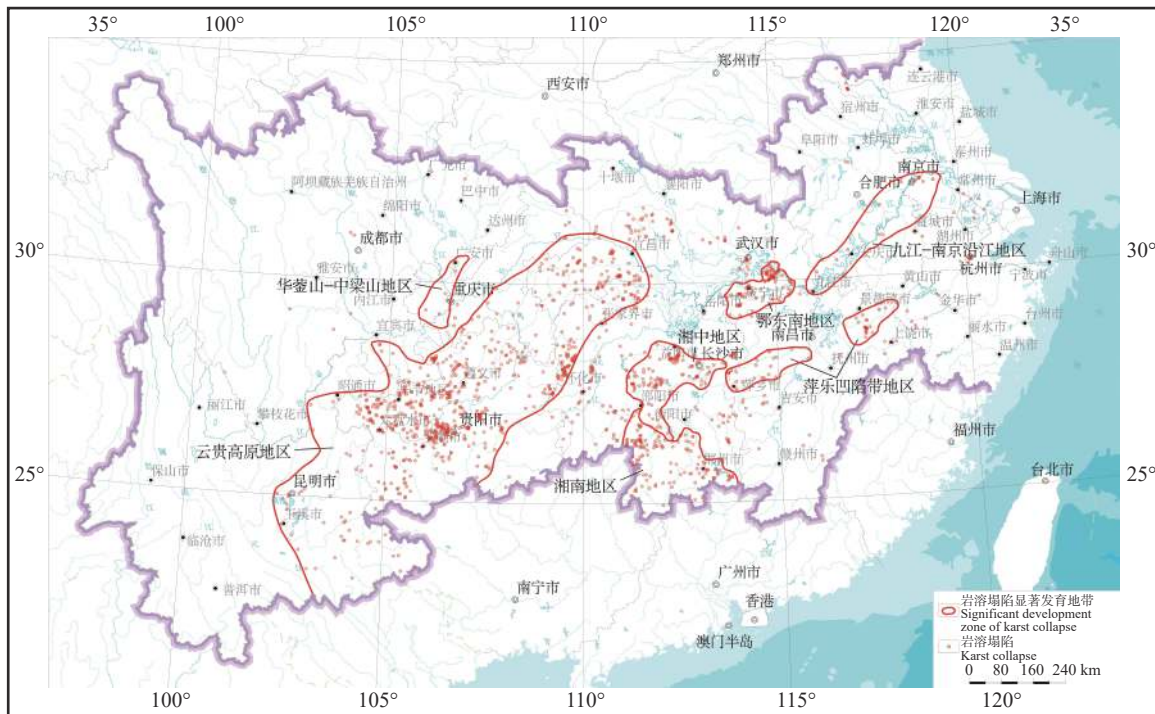


图 12 长江经济带岩溶塌陷显著发育地带
Fig.12 Karst collapse significant development zone in the Yangtze River Economic Belt

表 3 长江经济带岩溶塌陷与岩溶发育程度的关系

Table 3 Relationship between karst collapse and karst development degree in the Yangtze River Economic Belt

省区	C			O			D			C			P		T			J	K		岩溶发育程度		
	C ₁	C ₂	C ₃	O ₁	O ₂	O ₃	D ₁	D ₂	D ₃	C ₁	C ₂	C ₃	P ₁	P ₂	T ₁	T ₂	T ₃	J	K ₁	K ₂	强	中	弱
云南	2	1	1						76		6		46		9	5	3				137	5	8
四川				1										3		17					21		
重庆	3	1		5											39	4					43	4	5
贵州	39	16	11	11		5	1	3	5	17	7		51	117	169	67	5			4	366	162	0
湖北	9	33		12							21		51	3	114	10					168	75	10
湖南	5	22	41	10	4	8		95	92	90	59		52	25	26	2	9	5	14	17	291	264	21
江西			3							3	16		32		6					2	51	9	2
安徽	2		1	2									13								14	4	
江苏			2	22							6										28	2	
浙江										7	2	5									14		
合计		192			81			272		234			398		485			5	37		1133	525	46
百分比/%		11.27			4.75			15.96		13.73			23.36		28.46			0.29	2.17		66.49	30.81	2.70

4.3 长江经济带岩溶塌陷受地质构造发育带的影响

褶皱构造核部、翘起端、倾伏端、不整合接触线、大的断裂破碎带等是良好的导水通道,因此岩溶发育、含水丰富、在地下岩溶水位变化幅度较大时多沿这些部位产生地表塌陷。这些构造带具有较大的空间,导水性好,有利于地下水的循环及第四系盖层中颗粒物的冲刷搬运,所以沿构造带产生的塌陷数量多、规模大。例如,斗笠山煤矿黄土岭

背斜倾伏端泉塘一带,既是多条断裂交汇处,又是次级背斜轴部和倾伏端,密集的构造使岩层破碎和裂隙发育塌陷区的塌陷密度达到 3167 个/km²。恩口煤矿恩口向斜东北转折端壶天河与水杉河交汇地段,由于 5 条断层相互切割,为地下岩溶的发育创造了极好的条件,在该地段产生的塌陷占塌陷总数的 50.7%(谭克龙和周春光, 1996)(图 3)。徐州城区是岩溶塌陷地质灾害危害严重的区域,已发生的塌

陷均展布在废黄河断裂带内,有明显的规律性,为断裂带地下水富集区过量抽水所造成(黄敬军等,2019)。

4.4 长江经济带岩溶塌陷多发生在岩溶地下水强径流带、河流两岸等地下水位变化幅度大,水动力条件易发生急剧变化的地段

岩溶地下水位频繁波动会加速岩溶管道的形成,或疏通已有管道中的充填物,增强地下水径流强度,形成地下水强径流带。这些区域水流集中,水流速较大,流态复杂易变,地下水位波动频繁,地下水交替循环强烈,因此地下水对岩土体的溶蚀、潜蚀、吸蚀等作用都会加强,从而使塌陷更加容易形成与产生。另外,地下水与地表水转换密切的地方,例如河流沟溪地带,第四系为松散的冲洪积物,渗透性能很强,渗透系数很大,当地下水位下降时,地表水补给地下水,溶洞内充填的松散冲洪积物易被掏空,也易于塌陷。因此塌陷多沿河流沟溪等地表水汇集之处和地下水排泄地段密集发育。如恩口煤矿的岩溶塌陷多集中分布在溪河河床及其两岸低阶地,小碧河、壶天河流经的茅口组岩溶含水层地段,沿河床及两侧阶地上都发生大量的塌陷坑,发生于河谷区的塌陷占总塌陷数目的 58.78% (谭克龙和周春光,1996)。

4.5 长江经济带岩溶塌陷多发生在人类活动强烈的地区,塌陷的规模取决于人类活动的性质和强度

长江经济带岩溶塌陷约 70% 为人类活动所诱发,其余与极端降雨或地下水长期作用有关。以矿山疏干排水、地下水开采、工程施工为代表的人类工程活动是岩溶塌陷的主要诱发因素。矿山疏干排水或突水由于降深大,影响范围广,因而塌陷的规模和强度都很大。抽水因降深有限,塌陷规模较小,强度较低,但在城镇或厂矿地区,由于供水井较密集,也往往形成大规模的塌陷,如水城盆地。工程施工形成的塌陷虽然影响范围有限,但塌陷常常聚集发生,塌陷规模和强度中等。水库蓄水、振动等引起的塌陷则多零星发育,规模小,强度相对也低。

5 长江经济带岩溶塌陷对工程建设的影响

长江经济带岩溶塌陷对工程建设的影响主要

表现在四个方面:

5.1 毁坏城镇村庄各种建筑设施,直接导致地面建筑下沉、垮塌、开裂

岩溶塌陷,由于塌坑的陷落及由其产生的地面下沉和开裂,造成建筑物的开裂、倾斜和倒塌,是它最主要的危害。例如湘中煤炭坝煤矿自 1978 年到 2009 年闭矿以来累计发生岩溶塌陷 376 个,受灾面积达 75 hm²,共造成 2 人死亡,毁坏房屋 6555 间、农田 60.7 hm²、水塘 26 口、公路 1008 m、水渠 1300 m、桥梁 2 座,小水电站 1 座,直接经济损失 8127.72 万元。

为了降低岩溶塌陷的风险,有的城市或建筑物在设计时不得不再修改规划、改变设计,不得不充分考虑地基稳定,扩大安全系数,增加投资和建筑费用。例如 2010 年 1 月湖南宁乡大成桥福泉小学操场因矿山疏干排水诱发塌陷,塌坑直径达 80 m,深 30 m,造成学校异地重建。

5.2 导致路面塌陷、沉陷、桥梁桩基下沉,严重损毁工程设施,影响交通,威胁行人、车辆安全

岩溶塌陷不仅破坏房屋建筑,而且损坏梁隧道、公路路面、通讯动力设施,威胁行人、车辆安全。例如 2011 年 9 月 2 日江西萍乡芦溪蛇形冲塌陷,沪昆高速公路 K940+200 双向 100 多米长路段路面整幅下沉、开裂,沉陷最深处达 60~70 cm,不得不封闭 10 天进行紧急处置。1979 年 9 月 1 日及 1985 年 7 月 6 日,贵昆线在 K534+076 格以头村附近发生路基岩溶塌陷,导致货物列车脱轨、颠覆。

5.3 联通地表水体和地下含水层,加剧地下工程突水突泥,威胁、影响资源的开发利用

岩溶塌陷不单破坏各种地表建筑物,还因由塌陷坑灌入的地表、地下水往往使矿坑排水量或隧道涌水量成倍、几十倍增加,甚至造成事故。同时大量泥砂随水进入坑道或地下工程,给矿山及地下工程建设生产中带来难以排除的困难。例如,湖南恩口煤矿,河床塌陷改河铺底 5300 m,河水灌入增加矿坑用水量,最大灌入量 8000 t/h,并将泥砂等带入矿坑。2007 年建成通车的渝遂高速公路上的云雾山隧道塌陷使地表溪流直接灌入隧道,极大加剧了隧道涌水量,给隧道安全带带来极大隐患。

岩溶塌陷联通了地表和地下,还容易造成地下水污染,使原有供水井报废。例如,贵州水城盆地,塌陷使平坦地面在 3~4 km² 范围内出现大小 1000

多个塌坑,严重影响了耕作,大量的工业及生活污水从塌坑灌入地下,污染了水源,使好几口井水无法饮用,被迫停产报废或改为生产水井。

5.4 造成水库不能蓄水,成为废库或病库

在岩溶地区,由于水库蓄水,在水体增荷、渗漏潜蚀及雨季地下水位迅猛变化产生的正负压力和冲爆等多种作用下而在库内产生塌陷,常造成库水漏失,影响蓄水库运营和大坝的安全,成为废库或病库。

6 讨 论

为了降低岩溶塌陷对工程建设和安全运营影响,可以采取以下措施:

一是加强岩溶区城市地质调查,特别是隐伏岩溶发育分布的边界、岩溶地下水强径流带的精细调查。1:5万比例尺无法满足城市建设规划需要,对于岩溶塌陷高易发区要有针对性地开展与国土和地下空间规划相匹配的地质调查,提高地质调查比例尺和精度,应达到更好地服务国土空间规划和突发地质灾害防治。

二是加强国土空间开发管控,针对岩溶强发育区、岩溶塌陷高易发区,划分规划红线,减少在红线区内的工程建设。

三是在工程建设之前,应当有对地质灾害与环境效应方面的认真评估,应当建立防治地质灾害的风险意识,进行有关风险的评价和风险的工程管理,也必须有一定资金投入,进行相关的防治工程,进行正确的地质灾害防治是保障工程安全的最基本的前提,不论是在施工期间还是工程完工长期运行中,地质灾害防治及相应减灾措施都是安全的需要。

四是对线性工程应加强岩溶塌陷高易发区的线路优化,岩溶山区隧道应特别避让层状强岩溶发育带,加强岩溶塌陷防治勘查设计,特别是桥梁桩基、隧道岩溶勘查设计,施工中,应尽可能减少桩基冲孔桩的应用,加强隧道超前探测,采取适当工程止水措施,防范突水突泥灾害,减少对岩溶生态环境破坏,隧道施工中对地下水的处理应因地制宜,堵排结合,尽量减少岩溶水的排放,对已建工程沿线200m范围实施严格的地下水禁采,加强路面沉降、变形地段的岩溶塌陷隐患的探测和监测。

五是加强对岩溶区地下工程、基础工程的管理,要求做好动态施工,对于地铁、高铁的线性工程地下开挖、城市基础工程冲孔桩施工、石灰石矿山开采等可能诱发城市岩溶塌陷的工程活动要进行动态监管,要根据岩溶塌陷易发程度划定地下水禁采区范围,对冲孔桩施工要进行安全论证并做好防范措施。

六是合理开采地下水,在开采地下水前必须做到水文地质条件清楚,避免无依据的布井和无目地的滥采,在地下水的开发利用中应本着统一规划、合理开采、综合利用的原则,要控制抽水量和水位降深。

七是加强岩溶塌陷监测预警工程建设,岩溶塌陷实时监测预警是防治岩溶塌陷的重要手段,应加强岩溶塌陷隐患探测识别和监测预警技术研发及运用。

7 结 论

(1)长江经济带岩溶塌陷易发区面积约25.4万 km^2 ,有记录的岩溶塌陷灾害2146处,主要分布在湖南省(663处)、贵州省(603处)和湖北省(348处)。这些岩溶塌陷约70%为人类活动所诱发,其余与极端降雨或地下水长期作用有关,矿山疏干排水、打井抽水、工程施工等是这一地区岩溶塌陷的主要诱发因素。人类活动诱发的岩溶塌陷中,矿坑排水或突水引起的塌陷依存于矿产资源的分布,主要见于煤盆地和金属成矿带中,如湘中煤盆地,湘南金属成矿带,赣中煤、金属矿富集的萍乐拗陷带,鄂东南及长江下游沿江的金属成矿带等地。抽水引起的塌陷主要见于经济比较发达的城镇地区,以云贵高原的断陷盆地和分水岭地区的盆地、谷地较为多见。水库塌陷主要分布于长江上游岩溶山地的洼地、谷地中。工程施工诱发的塌陷则与工程活动息息相关。

(2)长江经济带岩溶塌陷具有以下发育分布规律:一是具有区域性和地带性的分布特征;二是发育地层一般为均匀状纯碳酸盐岩,沿断裂破碎带、褶皱轴部裂隙发育带、可溶岩与非可溶岩接触地带等岩溶洞隙密集发育带分布;三是多发生在岩溶地下水强径流带、河流两岸等地下水位变化幅度大,水动力条件易发生急剧变化的地段;四是多发生在

人类工程活动强烈的地区, 塌陷的规模取决于人类活动的性质和强度。

(3) 长江经济带岩溶分布广泛, 随着近年来国民经济建设和发展, 岩溶塌陷已成为长江经济带交通工程建设和城镇化建设面临的重要环境地质问题之一, 岩溶塌陷对工程建设带来的影响是巨大的: 一是毁坏城镇村庄各种建筑设施, 直接导致地面建筑下沉、垮塌、开裂; 二是导致路面塌陷、沉陷、桥梁桩基下沉, 严重损毁工程设施, 影响交通, 威胁行人、车辆安全; 三是联通地表水体和地下含水层, 加剧地下工程突水突泥, 威胁、影响资源的开发利用; 四是造成水库不能蓄水, 成为废库或病库。

(4) 区内岩溶塌陷高易发区 12.2 万 km², 高易发区内高速铁路、高速公路、重要城市群等规划建设应对这一环境地质问题引起重视, 建议加强规划建设工程的比选、优化和岩溶专项勘察。

致谢: 审稿专家和编辑老师提供了宝贵的意见, 在此表示衷心地感谢!

注释

① 中国地质科学院岩溶地质研究所. 2019. 湘西鄂东皖北岩溶塌陷 1:5 万环境地质调查 [R]. 桂林: 广西.

② 中国地质科学院岩溶地质研究所. 2022. 渝中湘南岩溶塌陷区综合地质调查 [R]. 桂林: 广西.

References

Bi Xueli, Shi Jian. 2018. Environmental Geological Map of Karst in China (attached instructions) 1: 500000 [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Brinkmann R, Parise M, Dye D. 2008. Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough county, Tampa Bay area, Florida[J]. *Engineering Geology*, 99(3/4): 169–184.

Chen Guoliang, Chen Yuchang, Tan Hongzeng, Zhang Jianghua, Li Naifei. 1990. Research on mechanism, prediction and countermeasure for land-collapse in karst area[J]. *Journal of Geological Hazard and Control*, 1(3): 39–48 (in Chinese with English abstract).

Cheng Xing, Huang Runqiu. 2003. Study on train-induced vibration and its influence on karst collapse[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(12): 2062–2066 (in Chinese with English abstract).

Deng Qijiang, Li Xingyu, Lu Qiong, Li Jianfeng. 2009. Development characters and prevention measures of the karst collapse in Kunming[J]. *Carsologica Sinica*, 28(1): 23–29 (in Chinese with English abstract).

Fu Kailong. 2005. An analysis of the karst ground collapse and water yield of the Zhongliangshan Tunnel in the Yusui Expressway[J]. *Hydrogeological and Engineering Geology*, (2): 107–110 (in Chinese with English abstract).

Gutierrez F, Parise M, De Waele J, Jourde H. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth Science Reviews*, 138: 61–88.

He Fang, Xu Youning, Qiao Gang, Liu Ruiping. 2010. Regional distribution characteristics of mine environmental geological problems in China[J]. *Geology in China*, 37(5): 1520–1529 (in Chinese with English abstract).

Huang Jingjun, Cui Longyu, Wu Xin, Jiang Su, Jiang Guoqing, Xu Shiyin. 2019. The control of the old (abandoned course of) Yellow River fault zone in Xuzhou on the karst collapse[J]. *Geology in China*, 46(2): 389–397 (in Chinese with English abstract).

Kang Yanren, Xiang Shijun. 1990. Karst Collapse in South China[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press (in Chinese).

Liu Lu. 2021. Research on mine geological environmental problems and prevention techniques in Huainan City[J]. *Resources Environment & Engineering*, 35(2): 200–205 (in Chinese with English abstract).

Luu L H, Noury G, Benseghier Z, Philippe P. 2019. Hydro-mechanical modeling of sinkhole occurrence processes in covered karst terrains during a flood[J]. *Engineering Geology*, 260: 1–12.

Jiang Xiaozhen, Lei Mingtang, Guan Zhende. 2016. Character of water or barometric pressure jump within karst conduit in large strong drainage area of karst water filling mine in Dachengqiao, Ningxiang, Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 35(2): 179–189 (in Chinese with English abstract).

Jiang Xiaozhen, Lei Mingtang. 2018. New karst sinkhole formation mechanism discovered in a mine dewatering area in Hunan, China[J]. *Mine Water Environ*, (37): 625–635.

Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanping, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2017. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Geology in China*, 44(6): 1045–1061 (in Chinese with English abstract).

Jiang Yuehua, Ni Huayong, Zhou Quanping, Cheng Zhiyan, Duan Xuejun, Zhu Zhimin, Wu Jichun, Ren Haiyan, Fan Chenzi, Yang Jinwei, Chen Chao, Hu Jian, Wang Xiaolong, Jiang Xiaye, Liu Yongbing, Yang Hai, Guo Wei, Feng Naiqi, Wei Guangqing, Jin Yang, Yang Hui, Liu Lin, Mei Shijia, Zhang Hong, Chen Pengjun, Yuan Jihai, Qi Qiuju, Lü Jinsong, Gu Xuan, Liu Peng. 2021. Key technology of ecological restoration demonstration in the Yangtze River Economic Zone and its application[J]. *Geology in China*, 48(5): 1305–1333 (in Chinese with English abstract).

Meng Yan, Lei Mingtang. 2019. Analysis of situation and trend of

- sinkhole collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 38(3): 411-417 (in Chinese with English abstract).
- Pan Zongyuan, Jiang Xiaozhen, Dai Jianling, Guan Zhende, Wu Yuanbin. 2017. Study on the mechanism of groundwater level restoration process to karst sinkholes in karst deposit drainage area: A case of Dachengqiao, Ningxiang county, Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 36(6): 786-794 (in Chinese with English abstract).
- Tan Kelong, Zhou Chunguang. 1996. Research on karst collapse in Enkou-Doulshan mine district of middle Hunan province[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 16(2): 130-134 (in Chinese with English abstract).
- Waltham T, Fred GB, Martin GG. 2005. *Sinkholes and Subsidence*[M]. Chichester: Praxis Publishing Ltd.
- Wu Mengjie, Shen Huizhen, Liu Sixi. 2013. Status quo and prevention measures of karst collapses in Zhejiang[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 24(4): 18-24 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbin, Yin Renchao, Lei Mingtang, Dai Jianling, Jia Long, Pan Zongyuan, Ma Xiao, Zhou Fubiao. 2021. Triggering factors and prevention-control countermeasures of karst collapses caused by tunnel construction in the Zhongliangshan area, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 40(2): 246-252 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Shijun, Kang Yanren, Liu Zhiyun, Xie Daixing, Chen Jian, Yan Zhiwei. 1986. Karst collapse in the Yangtze River Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 5 (4): 255-272(in Chinese with English abstract).
- Yang Decai. 2002. Study on pumping collapse in Shuicheng karst basin[J]. *Geotechnical Engineering*, 5(6): 27-29 (in Chinese with English abstract).
- Zhou W F, Lei M T. 2017. Conceptual site models for sinkhole formation and remediation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(24): 818.
- Zhou Zheng, Li Dahua, Liao Yunping, Lin Junzhi, Zhang Ye, Chen Hongkai, Qi Yongai, Wang He. 2022. Characteristics and formation mechanism of karst ground collapse in Zhongliangshan area, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 41(1): 67-78 (in Chinese with English abstract).
- 预测及整治研究[J]. *地质灾害与防治*, 1(3): 39-48.
- 程星, 黄润秋. 2003. 铁路振动及其在岩溶塌陷中的致塌力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 22(12): 2062-2066.
- 邓启江, 李星宇, 吕琼, 李坚峰. 2009. 昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J]. *中国岩溶*, 28(1): 23-29.
- 付开隆. 2005. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析[J]. *水文地质工程地质*, (2): 107-110.
- 何芳, 徐友宁, 乔冈, 刘瑞平. 2010. 中国矿山环境地质问题区域分布特征[J]. *中国地质*, 37(5): 1520-1529.
- 黄敬军, 崔龙玉, 武鑫, 姜素, 姜国庆, 徐士银. 2019. 徐州废黄河断裂带对岩溶塌陷的控制作用[J]. *中国地质*, 46(2): 389-397.
- 康彦仁, 项式均. 1990. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁: 广西科学技术出版社.
- 刘璐. 2021. 淮南市矿山地质环境问题及防治技术研究[J]. *资源环境与工程*, 35(2): 200-205.
- 蒋小珍, 雷明堂, 管振德. 2016. 湖南宁乡大成桥充水矿山疏干区岩溶系统水气压力监测及突变特征[J]. *中国岩溶*, 35(2): 179-189.
- 姜月华, 林良俊, 陈立德, 倪化勇, 葛伟亚, 成杭新, 翟刚毅, 王贵玲, 班宜忠, 李媛, 雷明堂, 谭成轩, 苏晶文, 周权平, 张泰丽, 李云, 刘红樱, 彭柯, 王寒梅. 2017. 长江经济带资源环境条件与重大地质问题[J]. *中国地质*, 44(6): 1045-1061.
- 姜月华, 倪化勇, 周权平, 程知言, 段学军, 朱志敏, 吴吉春, 任海彦, 范晨子, 杨晋炜, 陈超, 胡建, 王晓龙, 姜夏焯, 刘永兵, 杨海, 郭威, 冯乃琦, 魏广庆, 金阳, 杨辉, 刘林, 梅世嘉, 张鸿, 陈澎军, 袁继海, 齐秋菊, 吕劲松, 顾轩, 刘鹏. 2021. 长江经济带生态修复示范关键技术及其应用[J]. *中国地质*, 48(5): 1305-1333.
- 蒙彦, 雷明堂. 2019. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. *中国岩溶*, 38(3): 411-417.
- 潘宗源, 蒋小珍, 戴建玲, 管振德, 吴远斌. 2017. 岩溶矿床疏干区地下水恢复对岩溶塌陷作用机制的研究: 以湖南宁乡大成桥为例[J]. *中国岩溶*, 36(6): 786-794.
- 谭克龙, 周春光. 1996. 湘中恩口—斗笠山矿区岩溶塌陷研究[J]. *西安矿业学院学报*, 16(2): 130-134.
- 吴孟杰, 沈慧珍, 刘思秀. 2013. 浙江省岩溶地面塌陷现状及防治措施[J]. *地质灾害与环境保护*, 24(4): 18-24.
- 吴远斌, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 贾龙, 潘宗源, 马晓, 周富彪. 2021. 重庆中梁山地区隧道工程影响下岩溶塌陷形成演化模式及防治对策[J]. *中国岩溶*, 40(2): 246-252.
- 项式均, 康彦仁, 刘志云, 谢代兴, 陈健, 阎志为. 1986. 长江流域的岩溶塌陷[J]. *中国岩溶*, 5(4): 255-272.
- 杨德才. 2002. 水城岩溶盆地抽水塌陷研究[J]. *岩土工程界*, 5(6): 27-29.
- 周正, 李大华, 廖云平, 林军志, 张焯, 陈洪凯, 祁永爱, 王贺. 2022. 重庆中梁山岩溶地面塌陷特征及形成机理[J]. *中国岩溶*, 41(1): 67-78.

附中文参考文献

- 毕雪丽, 时坚. 2018. 中国岩溶环境地质图(附说明书)1: 500000[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈国亮, 陈裕昌, 谭鸿增, 张江华, 李乃飞. 1990. 岩溶地面塌陷机制、