

张海坦,李庆华,邓书金. 歌乐山岩溶地面塌陷发育特征[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 58—63.
DOI:10.11932/karst20150108

歌乐山岩溶地面塌陷发育特征

张海坦,李庆华,邓书金

(重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队,重庆 401147)

摘要:歌乐山为高位岩溶地带,加之近年来人类工程活动加剧,岩溶地面塌陷发生频繁。中梁山山脉沙坪坝行政区段基本覆盖传统意义上歌乐山地区,文章以此为研究范围,搜集以往调查、勘察资料并加以系统分析,旨在研究、总结歌乐山地区岩溶地面塌陷发育特征。研究结果表明,区内岩溶地面塌陷数量呈现逐年递增的趋势,但季节分布不均匀,其空间上主要分布在岩溶较发育、地下水位变动较大、地层岩性碳酸钙含量较高、土层厚度3~8 m的地带;塌陷发育过程分为早期、中期、晚期三个阶段,以潜蚀作用为主导因素。

关键词:歌乐山;岩溶地面塌陷;致塌因素;发育规律

中图分类号:P642.26 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2015)01-0058-06

0 引言

重庆市歌乐山属低山地貌区,由观音峡背斜构成山地^[1],为高位岩溶地带,地形切割强烈,地质环境条件复杂,加之近年来人类工程活动加剧,岩溶地面塌陷发生频繁^[2],已成为歌乐山最主要的地质灾害类型,严重威胁区内群众生命和财产安全。目前大量关于岩溶地面塌陷的研究工作正在开展,但由于其发展过程的缓慢性、潜伏性及歌乐山水文地质与工程地质条件的复杂性等多种原因,人们对于其形成的机理及发育发展过程等特征的认识还比较模糊^[3]。本文通过搜集以往调查、勘察资料并加以分析,系统研究区内岩溶地面塌陷发育特征,以期对歌乐山建设规划、工程建设、地质灾害防治提供理论依据。

1 研究区概况

歌乐山位于重庆市沙坪坝区(图1),北起中梁镇

桂花垭口,南止歌乐山镇凉风垭,东西侧止于三叠系上统须家河组山脊,面积约为68.2 km²;属低山地貌区,由观音峡背斜构成山地,山体两侧斜坡呈陡坡状,坡角在35°~60°之间,山体中部为相对较平缓的岩溶槽谷地貌,地形特征为“一山二槽三岭”和“一山一槽二岭”,山体呈南北走向,岩溶槽谷区高程460~550 m之间,多形成洼地与低缓的峰丛残丘等地貌形态。歌乐山位于川东南弧形地带,华蓥山帚状褶皱束东南部,地处观音峡背斜中段,区内出露地层从背斜核部至两翼对称分布,主要是二叠系上统长兴组(P_{2c})、三叠系下统飞仙关组(T_{1f})、嘉陵江组(T_{1j}),中统雷口坡组(T_{2l}),上统须家河组(T_{3xj}),在斜坡的凹部及槽谷区等较平缓地带分布有第四系残坡积层(Q_{4^{el+dl}})。歌乐山地处亚热带季风性湿润气候,夏半年(5月—10月)降水量偏多,达881.40 mm,约占全年总降水量的80%,冬半年(11月—次年4月)降水量仅235.4 mm,约占年总降水量的20%^[5],区内植被茂盛,有国家级森林公园坐落其间^[4]。

资助项目:“重庆市‘四山’交通通道地质环境调查及研究”(2013)

第一作者简介:张海坦(1985—),男,工程师,研究方向为岩溶发育、地灾防治等。E-mail:281571182@qq.com。

收稿日期:2014-10-13

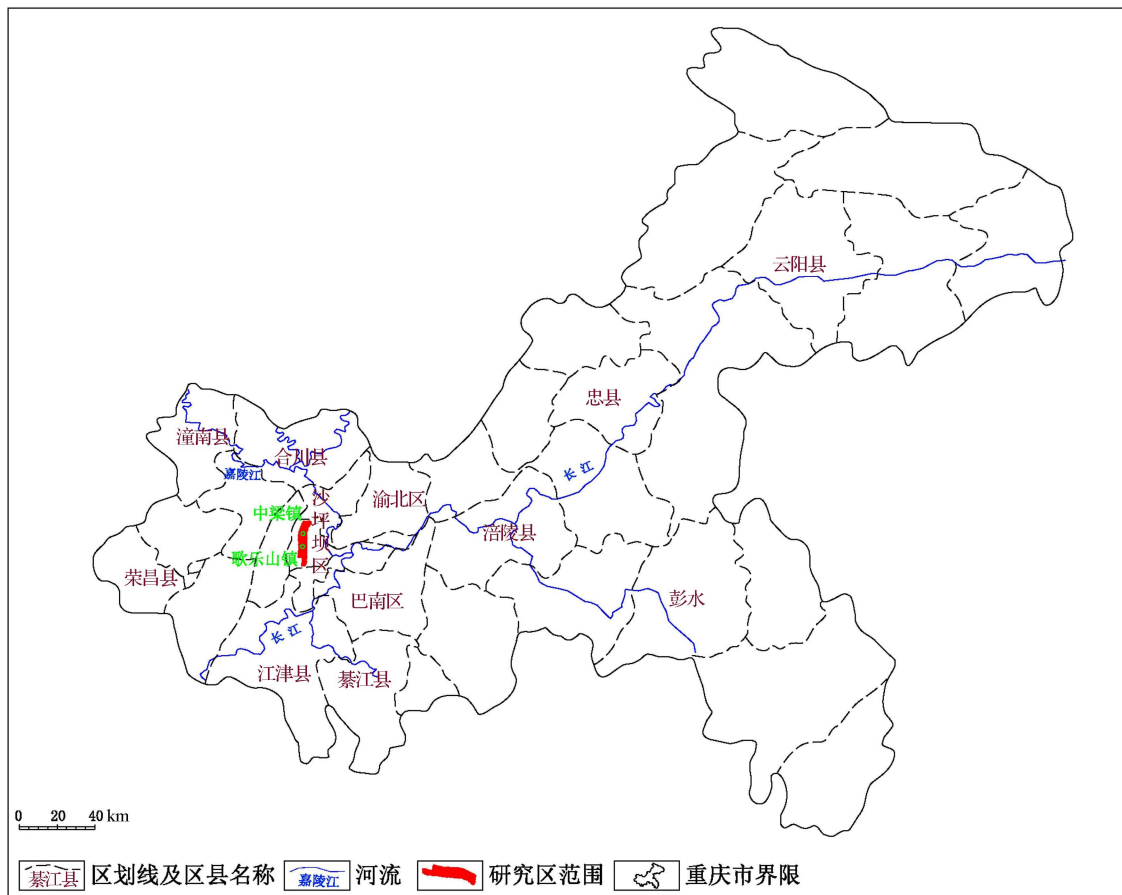


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Schematic map showing location of the study area

2 研究方法

本研究搜集大量歌乐山区地质、地质灾害等资料进行综合分析,在此基础上采用1:2 000~1:10 000专项环境地质、地质灾害调查掌握区内岩溶塌陷数量及分布、人类工程活动现状等资料,结合区内已有水文长观钻孔数据,分析气象水文、地形地

貌、岩土类型、水文地质条件和人类工程活动与地面塌陷发育及分布的关系,研究地面塌陷发育过程、特征要素和致塌模式等规律。本次调查范围整体位于歌乐山(研究区),为研究目的需要,实际调查范围沿槽谷南北侧外伸,向北至嘉陵江,向南至白市驿镇附近,东西侧至已建隧道洞口附近地层,外围调查面积达60 km²(图2)。

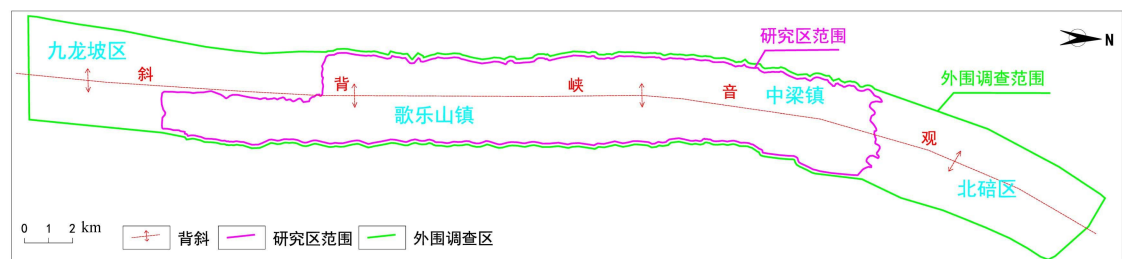


图2 歌乐山调查范围示意图

Fig. 2 Schematic map showing the range of investigation

3 结果与分析

3.1 塌陷数量呈逐年上升趋势,但季节分布不均匀

3.1.1 塌陷数量呈逐年上升趋势

虽然歌乐山槽谷地带灰岩分布广泛,地质环境脆弱,极易产生岩溶地面塌陷,但是经过调查分析可知,

由于自然原因产生的地面塌陷数量非常少,目前只有 15 处,仅占总数的 11%。而由于人类工程活动(主要是隧道施工)造成地下水疏干而引发的地面塌陷达 118 处,占总数的 89%。尤其是近年来随着隧道密集施工,隧道周边地下水疏干严重,地面塌陷数量呈现逐年递增的趋势,且历史上每条隧道的施工均会在随后的一段时间内引发系列地面塌陷(图 3)。

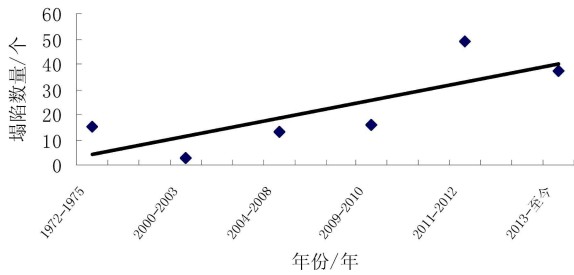


图 3 塌陷数量随年份变化

Fig. 3 Number of collapse varying with years

3.1.2 塌陷数量季节分布不均匀

降水是促进塌陷发生的重要外部因素^[5]。隧道施工显著降低区内地下水位,而降水则引发地下水位频繁升降,使岩溶裂隙水和岩溶管道水流速加快,加速了对裂隙和管道中充填土体的运移,当水位升至岩土界面以上时,增强对地表第四系覆盖土层的潜蚀作用,形成土洞,随着顶板厚度进一步减小,土洞垮塌。

另外降水使土体饱水软化,自重增加也是促进塌陷发生的原因之一。统计区内岩溶地面塌陷发生时间发现,夏半年(5 月—10 月)发生数量为 93 个,约占总数的 70%,而冬半年(11 月—次年 4 月)发生数量为 40 个,约占总数的 30%。根据区域气象水文资料,夏半年(5 月—10 月)降水量偏多,约占全年总降水量的 80%,因此,雨季是塌陷发生的高峰期,如中梁镇的茅山峡村大龙井、庾大田、窝凼、七水田塌陷群都发生在雨季,其他季节塌陷发生数量明显减少。所以说歌乐山岩溶地面塌陷季节分布不均匀。

3.2 塌陷空间分布规律及影响因素分析

歌乐山自南向北分布襄渝铁路隧道、成渝高速公路隧道等 8 条已建隧道,导致大面积地下水疏干^[6-7],岩溶地面塌陷广泛分布,但是受岩溶发育程度、地貌条件、覆盖层厚度、地下水及地表水等条件控制,地面塌陷分布的数量和规模存在区域差异性。在多种因素相对集中的地带,塌陷发生集中,反之较低。

3.2.1 塌陷在岩溶发育地段集中分布

槽谷纵横冲沟交汇地带、槽谷中地势低洼地带、岩溶洼地等地带构造裂隙较发育,岩溶发育更强烈,同时有利于地表水、地下水汇集,地下水位交替循环强烈,有利于岩溶地面塌陷发育,如区内新庙、龙塘坎、大龙井及余家湾水库等地具备以上条件,地面塌陷发生十分集中(表 1)。

表 1 典型岩溶发育地段地面塌陷分布表

Table 1 Distribution of ground collapse in typical places with karst development

地理位置	塌陷数量	地形、地貌及岩溶发育特征
歌乐山镇歌乐村新庙	11	位于观音峡背斜东翼纵横冲沟交汇地带,构造裂隙发育,出露嘉陵江组(T_{1j})地层,地势低,汇水条件好,岩溶十分发育,仅 0.012 km ² 发生 11 处塌陷。
歌乐山镇余家湾水库	23	位于观音峡背斜西翼低洼地带,构造裂隙发育,出露嘉陵江组(T_{1j})地层,地势低,汇水条件好,且库尾出露一处大泉,岩溶十分发育,水库面积约 0.072 km ² ,发生 23 处塌陷,致使水库干涸。
中梁镇茅山峡村大龙井	17	位于观音峡背斜东翼纵横冲沟交汇地带,地势低洼,汇水条件好,出露嘉陵江组(T_{1j})地层,岩溶十分发育,仅 0.044 km ² 发生 17 处塌陷。
歌乐山镇新开寺村钱家湾	11	位于观音峡背斜东翼纵横冲沟交汇地带,地势低洼,汇水条件好,出露嘉陵江组(T_{1j})地层,构造裂隙发育,岩溶发育,仅 0.031 km ² 发生 11 处塌陷。
歌乐山镇凌云水库	6	位于观音峡背斜东翼低洼地带,构造裂隙发育,出露嘉陵江组(T_{1j})及雷口坡组(T_{2l})地层,地势低汇水条件好,岩溶十分发育,仅 0.014 km ² 发生 6 处塌陷,致使水库干涸。
歌乐山镇歌乐村龙塘坎	7	位于观音峡背斜西翼纵横冲沟交汇地带,构造裂隙发育,出露嘉陵江组(T_{1j})地层,地势低,汇水条件好,岩溶十分发育,仅 0.026 km ² 发生 7 处塌陷。

3.2.2 塌陷分布在地下水位变动带

通过分析水文长观钻孔地下水位变动情况发现,区内地下水位受季节降水影响产生变动,雨季水位上

升旱季下降,对第四系覆盖土层产生强烈潜蚀作用,易形成土洞进而发生地面塌陷,如歌乐山西槽谷龙塘坎水文长观钻孔(ZY9)同年 3 月份与 6 月份地下水

位变幅达 49.06 m,目前该处已发生 7 处塌陷,北侧余家湾水库发生塌陷 23 处;东槽谷大龙井水文长观孔(ZY3)同年 3 月份与 7 月份地下水位变幅 7.85 m,该处已发生 17 处塌陷;凌云水库长观钻孔(ZY14)同年地下水位变幅近 100 m,目前水库发生塌陷 6 处;蒲草田水文长观钻孔(ZY4)同年地下水位变幅达 134.92 m,目前周边已发生塌陷 7 处。

3.2.3 塌陷与地层岩性分布关系

塌陷主要发育于飞仙关组(T_1f^3)、嘉陵江组(T_1j)和雷口坡组(T_2l)灰岩中,不同地层中 CaCO_3 含量不同,其岩溶发育程度也不同^[8],地面塌陷分布数量不同。其中飞仙关组三段(T_1f^3)有 1 个,所占比例 1%;嘉陵江组一段(T_1j^1)有 52 个,所占比例 39%;二段(T_1j^2)有 23 个,所占比例 17%;三段(T_1j^3)有 36 个,所占比例 27%;四段(T_1j^4)有 20 个,所占比例 15%;雷口坡组(T_2l)有 1 个,所占比例 1%(图 4)。

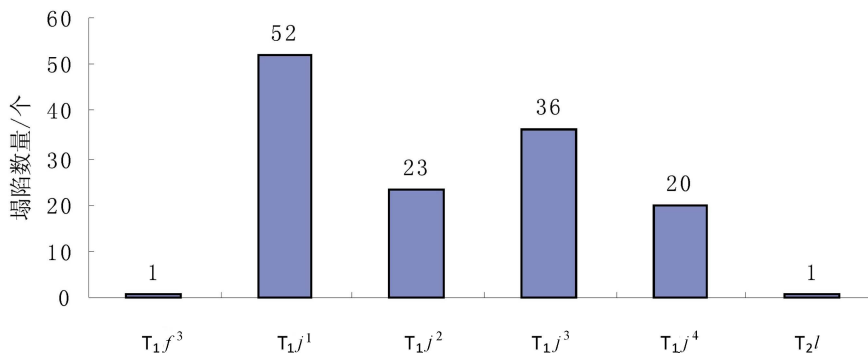


图 4 岩溶地面塌陷在不同岩层组数量分布图

Fig. 4 Number distribution of karst collapse in different stratum sets

3.2.4 塌陷分布与土层厚度关系

歌乐山岩溶地面塌陷均为土体塌陷,土层的厚度是影响塌陷发育及分布的重要因素^[9]。统计分析塌陷周边土层厚度发现,发生塌陷地方的土层 <3 m 的有 9 处,约占总数的 7%;发生塌陷地方土层厚度 3~5 m 的有 60 处,约占总数的 45%;发生塌陷地方的土层 5~8 m 的有 50 处,约占总数的 37%;发生塌陷地方的土层 >8 m 的有 14 处,约占总数的 11%(表 2)。因此,土层厚度在 3~8 m 的地方塌陷分布集中,太薄及太厚的地方塌陷分布较少,这与国内主要研究成果一致^[10-11]。

表 2 地面塌陷与土层厚度分布情况

Table 2 Distribution of ground collapse and soil thickness

土层厚度/m	<3	3~5	5~8	>8	合计/个
个数	9	60	50	14	133

3.3 岩溶塌陷发育过程分析

3.3.1 岩溶塌陷不同发育阶段特征

塌陷形成首先应具备基岩竖向岩溶洞隙(管道)、一定厚度的覆盖土层、地下水运移管道以及地下水位降深等因素^[12]。外部条件应具备造成地下水位波动的人类工程活动,大气降水等因素。分析大量资料,

我们根据地面塌陷不同发育阶段的特征,将其划分为早、中、晚期三个阶段(图 5)。

早期:区内无隧道施工等疏干地下水的人类工程活动,地下水保持自然水位并相对稳定,地表覆土层与竖向岩溶洞隙充填的土体稳定性好,未发生明显的潜蚀作用。

中期:隧道施工造成地下水大量排泄,致使区内地下水位迅速下降,水流过程中对浅部竖向岩溶管道中的土体造成潜蚀^[13],加之降雨导致地下水位反复升降,进一步加速对地表覆盖土层及岩溶管道中土体的潜蚀和运移,逐渐形成土洞,地表土体在重力作用下出现拉裂缝、下沉迹象。施工中炮震产生的震动气压和液压破坏性大,一定程度加强深、浅部岩溶管道的连通性。

晚期:随着土洞进一步发育,顶板土层逐渐变薄,当真空负压、土体自重等致塌力大于抗塌力时,塌陷发生。

3.3.2 岩溶塌陷发育过程中主导致塌因素分析

塌陷发育过程往往要受到多种因素、多种力的影响和作用,因而有不同的形成机制。前人相关研究表明,常见的主导致塌因素分为重力作用、潜蚀作用、冲爆作用、真空吸蚀作用、振动作用、荷载作用、溶蚀作用、根蚀作用八种基本的致塌因素,每种致塌因素作

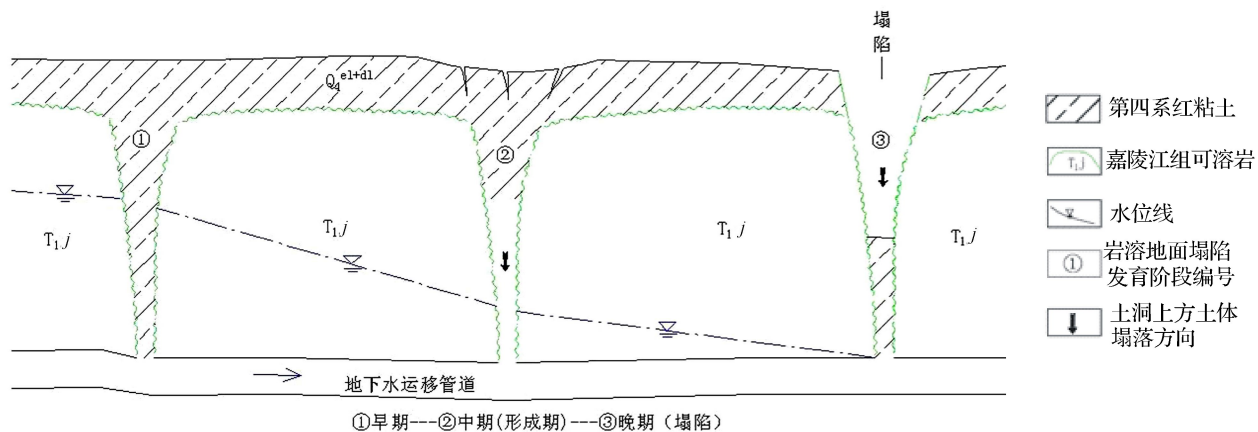


图 5 地面塌陷演变过程

Fig. 5 Evolution process of ground collapse

用过程各有特点^[14]。

通过统计分析歌乐山岩溶地面塌陷发育特点发现,区内岩溶塌陷基本为土体塌陷,空间形态为口小肚大的坛状,平面形态多为圆形,多分布于岩溶洼地、谷地等低洼地带,形成过程经历溶洞(或岩溶管道)—土洞—塌陷的过程,地下水存在集中渗透点(如隧道)和垂向渗透力,水位反复升降,土体受到多次潜蚀作用,这些特征符合潜蚀作用引发的塌陷类型,因此区内主导致塌因素为潜蚀作用,塌陷类型为潜蚀式塌陷。为进一步证实,我们选择歌乐山一处典型塌陷坑(2012 年 12 月发生)进行地下水位长观,发现水位上下波动频率与降雨量次数一致,降雨时地下水位升至塌陷坑口,雨后 10 d 水位降至基岩面以下,降落深度达 8 m,坑内水位可以代表区域地下水位变动情况,同时坑底积土和坑壁土体在水位反复升降过程中遭受潜蚀和运移,塌陷坑直径有变大趋势,局部有较大土块坍塌,观测结果有力支撑了我们的结论。

潜蚀作用是歌乐山岩溶塌陷主导致塌因素,但重力作用、真空吸蚀作用等其他致塌因素在塌陷发育过程中也起到促进作用,因此,岩溶塌陷是多机制综合作用的结果,这与国内外主要研究成果一致^[15-16]。

4 结 论

(1)塌陷数量逐年上升,且雨季为高发季 塌陷数量与隧道数量呈正相关,在歌乐山未修建隧道前区内仅分布少量自然原因产生的塌陷,随着隧道数量逐年增加,区域地下水疏干程度进一步增大,地下水位继

续下降,进而诱发更多的地面塌陷发生。当隧道数量不再增加之后,区域地表水和地下水逐渐达到新的补、径、排平衡,水位等水文地质条件趋于稳定,岩溶地面塌陷发生率可能趋于稳定甚至下降,相关结论待进一步展开科学研究。雨季地下水位升降频率和幅度相应增加,引发地面塌陷在雨季集中发生。

(2)塌陷空间分布具较强规律 主要分布在岩溶较发育、地下水位变动较大、地层岩性碳酸钙含量较高、土层厚度 3~8 m 的地带。

(3)塌陷发育过程具阶段性并以潜蚀作用为主导因素 根据地面塌陷不同发育阶段的特征,区内塌陷发育过程分为早期、中期、晚期三个阶段,并研究得出发育过程中以潜蚀作用为主导因素的特点。

(4)研究发现,隧道疏干地下水是诱发地面塌陷的内因,应合理规划隧道,施工过程采取全堵水工艺;降雨增加地下水位升降幅度和频率,是诱发地面塌陷的外因,在低洼、汇水地段等塌陷易发区应限制规划建设用地,在雨季加强地灾巡查,群测群防。

参考文献

- [1] 贾红杰,傅瓦利,张治伟,等. 中梁山岩溶区坡耕地土壤侵蚀¹³⁷Cs 法研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2008,30(8):57-61.
- [2] 李忠,曲力群,栾晶晶. 西康线鱼洞峡隧道岩溶形成机理及发育特征研究[J]. 地下空间与工程学报,2004,24(1):110-113.
- [3] 王滨,贺可强,高宗军. 岩溶塌陷发育的时空阶段性分析[J]. 水文地质工程地质,2001(5):24-27.
- [4] 李庆华,刘虎队,赵元伟,等. 重庆市地质灾害高风险区重要集镇环境地质勘察报告(沙坪坝区歌乐山镇、中梁镇)[R]. 重庆:重庆市地勘局南江水文地质工程地质队,2012.

- [5] 冯佐海,梁金城,李晓峰,等.桂林市岩溶塌陷成因类型与时空分布特征[J].自然灾害学报,2001,10(3):92-97.
- [6] 单士军,李耐霞.歌乐山隧道施工过程环境影响分析及建议[J].工业安全与环保,2004,11(30):21-22.
- [7] 袁勇.歌乐山隧道施工与环境保护[J].现代隧道技术,2004,41(1):68-71.
- [8] 毛烨峰,伍进.岩溶发育控制因素及发育规律浅析[J].西部探矿工程,2009(S1):80-82.
- [9] 邵如九,司绍敏,黄桂光.地面岩溶塌陷规律的探讨[J].铁道工程学报,1985(1):101-106.
- [10] 康彦仁.岩溶地面塌陷的形成条件[J].中国岩溶,1988,1(7):9-17.
- [11] 潘国林,方涛,蔡生来,等.安庆市怀宁县马山口地区岩溶塌陷的分布特征及形成条件分析[J].中国岩溶,2013,32(2):175-181.
- [12] 邓启江,李星宇,吕琼,等.昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J].中国岩溶,2009,28(1):23-29.
- [13] 官善友,蒙核量,周森.武汉市岩溶分布与发育规律[J].城市勘测,2008(4):145-149.
- [14] 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):32-34,46.
- [15] 谭开鸥,李玉生.重庆地区的岩溶塌陷及其形成机理[J].中国地质灾害与防治学报,1995,6(3):23-27.
- [16] 左平怡.论岩溶地面塌陷的形成过程与机理[J].中国岩溶,1987,6(1):69-77.

Development characters of karst collapse in the Gele mountain area

ZHANG Hai-tan, LI Qing-hua, DENG Shu-jin

(Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401147, China)

Abstract: The trough valley zone of the Gele mountains is largely covered by limestone, with a hill landform and complex geological environment. Influenced by the subtropical monsoon climate, the rainfall of the rainy season (from May to October) in this area reaches 881.40 mm, accounting for 80 percent of the total annual precipitation, resulting in nonuniform distribution of rainfall between the rainy and dry seasons. With the increasing human engineering activity in recent years, karst collapse occurs frequently, which have become the main geological disaster in this region. This work collected and analyzed relevant data of previous surveys and related data of existing hydrological boreholes with long-term observations, and made a special investigation of environmental geology and geological disasters on scales of 1 : 2 000~1 : 10 000. The purpose was to determine the number and distribution of karst collapse and human engineering activity status in this region. The survey area is 60 km². The results show that the number of karst collapse has an increasing trend year by year, which are mainly distributed in those places where the karst developed well, the groundwater level changed significantly, more calcium carbonate are present, and the thickness of the loose cover ranges from 3 to 8 meters. It divided the process of collapse development into early stage, middle stage and late stage and analyzed the characteristics of these developmental stages. By analysis of the types and function of collapse forces in the process above, it suggests that the latent erosion is the primary mechanism for the collapse. To sum up, the number of karst collapses increases year by year, which mostly occur in rainy seasons. There is an obvious characteristic pattern of spatial distribution as well as stage-wise development of karst collapse, and the latent erosion is the dominant mechanism.

Key words: Gele mountain; karst collapse; collapse force; development rule of karst

(编辑 黄晨晖)