

重庆市铜锣山地区岩溶塌陷分布规律及成因分析

谢晓彤^{1,2}, 李少荣^{1,2}, 廖云平^{1,2}, 杨乐^{1,2}, 彭海游^{1,2}, 阳畅^{1,2}

(1. 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室(重庆地质矿产研究院), 重庆 400042;
2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室重庆研究中心, 重庆 400042)

摘要: 重庆市主城区内铜锣山地区可溶岩主要分布在铜锣峡背斜和南温泉背斜中心地带, 以三叠系下统嘉陵江组、中统雷口坡组碳酸盐岩为主, 岩溶发育的主要特征为顺层性、垂直分带性和不均匀性, 上覆土层为透水-阻水型二元结构盖层。研究区内地面塌陷主要为自然状态下岩溶坍塌及人类工程建设活动引发的塌陷两种, 自然条件下塌陷为个别产生, 人为因素导致的塌陷则成群出现, 塌陷群的分布特征主要受可溶岩的分布、岩溶发育程度和塌陷诱发因素的控制。研究区岩溶塌陷分布主要集中于: (1) 槽谷中地势低洼地带; (2) 裸露岩层为可溶碳酸盐岩且岩溶发育的地区; (3) 土层覆盖层厚度 3~10 m 的地区; (4) 地下水位急剧下降地区。地面塌陷成因为“潜蚀软化-渗透破坏-负压吸蚀”致塌。此外, 隧道开挖切穿含水层导致地下水位迅速下降是诱发地面塌陷的关键环节。

关键词: 重庆市铜锣山; 二元土层结构; 岩溶塌陷; 成因分析

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0751-05

Analysis on distribution and formation of the karst collapse in Tongluoshan of Chongqing

XIE Xiaotong^{1,2}, LI Shaorong^{1,2}, LIAO Yunping^{1,2}, YANG Le^{1,2}, PENG Haiyou^{1,2}, YANG Chang^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;

2. Chongqing Research Center of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Chongqing 400042, China)

Abstract: Karst rocks in Tongluoshan of Chongqing city are mainly distributed in the heartland of the Tongluoxia Anticline and Nanwenquan Anticline, and are mostly the carbonate of the Lower Triassic Jialingjiang Formation and Middle Triassic Leikoupo Formation. The karst rocks develop along the strata layers unevenly and are characterized by vertical zonation, and the overlying stratum on the karst rocks has a dual structure consisting of the upper permeable layer and lower impervious layer. Two types of karst collapse dominate in the study area including the natural collapse and man-made collapse, and the natural collapse occurs independently while the man-made collapse usually occurs in groups. The distribution of karst collapse is affected by the distribution of karst rock, karst development, and inducing factors. Karst collapse in Tongluoshan of Chongqing city is mainly located in (1) low-lying areas in the trough valley; (2) carbonate outcrops with karst development; (3) areas covered by soil layers with thickness of 3 to 10 meters; and (4) areas with significantly decreasing groundwater levels. Ground collapse in study area is mainly caused by “subsurface erosion and softening-seepage failure-negative pressure absorption”. Moreover, sudden decline in groundwater levels resulted from tunnel excavation through aquifer is the key of collapse development.

Key words: Tongluoshan of Chongqing; Dual soil layer structure; karst collapse; genetic analysis

岩溶塌陷已成为妨碍岩溶区经济、社会发展的一个重要问题^[1]。前人研究表明, 岩溶塌陷的成因主要包括重力致塌、溶蚀致塌、渗透致塌、负压吸蚀致塌等^[2], 不同地区由于地质环境和致塌因素的差异, 岩溶塌陷成因各不相同^[3]。近年来由于地下工程建设日益增多, 尤其是大量公路、铁路隧

道的修建, 重庆市主城区范围内铜锣山地区地下水水位疏降, 产生了岩溶地面塌陷等一系列地质环境问题^[4]。尤其是地面塌陷不仅破坏农田且对当地居民生命财产安全造成安全隐患, 社会矛盾突出^[5]。而针对研究区进行的岩溶塌陷相关研究还比较少。本文通过研究区岩溶塌陷现场调查及塌陷形成

收稿日期: 2014-09-25 修回日期: 2015-04-28 网络出版时间: 2015-07-23
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1118.002.html>
基金项目: 重庆市国土房管局 2011 年度地质灾害防治专项资金资助项目(120301)
作者简介: 谢晓彤(1986), 男, 河南洛阳人, 工程师, 主要从事水工环地质相关的工作。E-mail: xixiaotong_cqdky@163.com

条件、形成过程分析,总结了铜锣山地区岩溶塌陷分布规律,分析了塌陷成因机理,并对区内岩溶塌陷预防进行了探讨。

1 研究区地质概况

铜锣山北起四川省达州市雷音铺山,止于重庆綦江北岸天台山,呈 NNE 走向,全长 260 km,为穿越重庆市区内的重要地质构造单元。重庆市主城区区内铜锣山区域面积 463 km²,构造位置属川东平行岭谷区,是以铜锣峡背斜轴部隆起为主体的“背斜脊状山”。区内地貌发育受构造和岩性的严格控制,隔档式构造使背斜成条状山,构造线与山脊线一致,为 NNE 向展布,地貌属构造剥蚀脊状低山地貌,呈“一山二岭一槽”形态(图 1)。研究区内地层从三叠系至第四系均有发育,其中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})主要分布于背斜轴部山顶岩溶槽谷内,岩性以碳酸盐岩夹泥质岩为主;三叠系上统须家河组(T_{3xj}),侏罗系下统珍珠冲组(J_{1z})、自流井组(J_{1zl}),侏罗系中统新田沟组(J_{2x})、下沙溪庙组(J_{2sx})、上沙溪庙组(J_{2s})分布于背斜两

翼山脊的两侧,岩性主要为碎屑岩(图 1);第四系在区内零星分布,主要位于岩溶槽谷内,土层厚度一般 3~10 m,上部为粉质黏土和砂、碎石,厚度一般为 1~3 m;下部为红黏土,厚度一般 2~8 m。

可溶岩分布在背斜中心地带,以三叠系下统嘉陵江组中厚层白云岩、灰岩夹岩溶角砾岩为主,面积约 74 km²;其次为三叠系中统雷口坡组,面积约 44 km²,岩性为灰、褐灰色白云岩、白云质灰岩夹石灰岩及盐溶角砾岩。由于可溶岩少,非可溶岩分布广,平面上呈现出可溶岩被非可溶岩分割包裹的形态,这种分布特征常在可溶岩与非可溶岩交界处的可溶岩一侧形成汇水区域,导致岩溶强烈发育。另外研究区雨量充沛,而塌陷多发区地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙岩溶水和第四系松散层孔隙水,背斜轴部岩层倾角大,裂隙多,利于地下水的下渗,也导致槽谷区岩溶发育^[9]。除蒸发、植被吸收及少量地表径流外,大部分降水转化成岩溶地下水,在构造条件控制下,岩溶水主要沿地层分布,沿槽谷作纵向运动形成规模较大的水平岩溶管道径流,并且有垂直分带的规律。

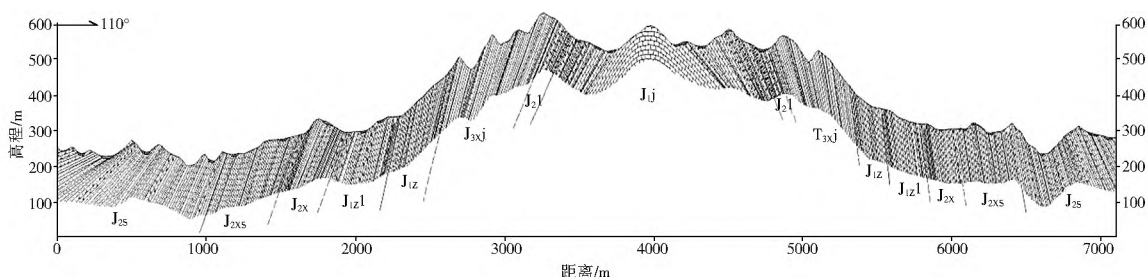


图 1 铜锣峡背斜横剖面

Fig. 1 Cross section of the Tongluoxia Anticline

2 岩溶塌陷发育特征

研究区可溶岩与非可溶岩岩层相间,地表多形成槽谷,岩溶的发育主要受到构造、岩性和地形地貌控制。区内岩溶的主要特征为:(1)顺层性,并沿构造裂隙发育;(2)垂直分带性,下部有多级水平岩溶管道;(3)不均匀性,区内岩溶强烈发育段主要为嘉陵江组二段和四段,另外飞仙关组三段岩溶发育也较强烈,同一地层内岩溶发育差异较大。

自 2000 年以来,重庆市主城区区内铜锣山地区共计地面塌陷点 13 处,塌陷坑 40 余个,如表 1 所示塌陷主要集中于槽谷地带嘉陵江组灰岩地层。研究区内地面塌陷为岩溶塌陷,包括自然状态下的岩溶坍塌及人类工程建设活动引发塌陷两种。通过调查发现研究区主要有 3 个岩溶塌陷分布区:(1)玉峰山塌陷区,为隧道修建抽排地下水诱发,主要分布于隧道通过区南北各 0~3 km 的岩溶槽谷地带,塌陷分布区面积约 5 km²;(2)南山森林公园和南山街道,为人类活动诱发坍塌,该区为槽谷汇水区,下伏嘉陵江组灰岩,塌陷点主要位于涂山湖水库、黄桷埡镇联合村;(3)巴南区南泉镇至一品镇区域,该区内人为塌陷与自然坍塌均有发生,岩溶较为发育,地下径流、暗河纵横交错,由于地下水位下降而导致岩溶塌陷。

研究区岩溶地面塌陷主要集中于洼地农田,覆土较薄,下伏嘉陵江灰岩。其形态和大小各异,岩溶塌陷平面形态多呈椭圆形、圆形、U 字形,空间形态多呈 V 形、漏斗状。平面

面积多为 5~100 m² 之间,可见深度 1~6 m;少数塌陷坑规模较大:如巴南区一品镇金田村塌陷坑,塌陷剖面形态呈 U 字形,长轴约 40 m,短轴约 18 m,深约 15 m。塌陷形成之初基岩暴露,可见竖向溶沟、溶洞、及地下暗河。

表 1 铜锣山地面塌陷统计

Tab. 1 Statistics of ground collapse in Tongluoshan

地点	塌陷点	塌陷坑	分布地层	诱发因素
玉峰山镇旱土村、关口村	7 处	20 个	T _{1j}	不合理抽排地下水
黄桷埡镇联合村	2 处	7 个	T _{1j}	
巴南区红炉场	1 处	10 个	T _{1j}	自然形成
巴南区一品镇金田村	2 处	2 个	T _{1j}	
巴南区南泉镇红星村	1 处	1 个	T _{1j}	

3 岩溶塌陷分布规律

在自然条件下,塌陷一般个别产生,但对于人为因素导致的塌陷由于各种致塌因素的作用较强,塌陷坑往往成群出现^[6],研究区内由不合理抽排地下水导致的塌陷点共 10 处,占全部塌陷点的 77%。塌陷群的分布特征主要受可溶岩的分布、岩溶发育程度和塌陷诱发因素的控制。铜锣山地区岩溶塌陷主要分布如下。

(1) 主要集中于槽谷中地势低洼地带、岩溶洼地。这些地带有利于地表水、地下水汇集,地下水位交替循环剧烈。

(2) 出露岩层为可溶碳酸盐岩的地区。这些地区一般

岩溶发育,易形成连通性好的溶洞、溶隙。须家河组砂、泥岩地层与嘉陵江灰岩地层交界处常形成较为明显的塌陷分界线。

(3) 土层覆盖层较薄的地带。区内塌陷发生地多为农田、水塘,土层厚度一般 3~10 m。

(4) 地下水水位急剧下降的地区。研究区内大部分地面塌陷发生前均发生地下工程建设抽排地下水导致地下水水位急剧下降,地表水严重减少。

铜锣山地区地面塌陷的分布规律与其他地区相比既有相似性^[7]又有其明显特点,相似性即地面塌陷主要分布在岩溶强烈发育、地势低洼和覆盖层厚度较小的地区。另外,重庆铜锣山地区地面塌陷与区内地下工程尤其是穿越山岭隧道工程的分布区域比较一致。这种分布特点表明隧道开挖切穿含水层是诱发地面塌陷的关键因素。

4 铜锣山地区岩溶塌陷成因分析

4.1 岩溶塌陷形成条件分析

岩溶塌陷的发生,一般应具备 3 个条件^[8]。

(1) 地面以下一定深度溶洞基岩表层存在岩溶裂隙或洞穴系统,能够运移被地下水潜蚀的上覆岩土体。岩溶洞隙的开启程度,一定程度上决定着塌陷产生的可能性,向上开口的溶隙、洞穴,是接受塌陷物质的窗口。大量资料证实,塌陷坑与溶洞普遍存在垂向上对应关系,且大的溶洞,往往形成大的塌陷,小的溶洞形成小的塌陷,裂隙状溶洞形成长条状塌陷。可溶岩地层的岩溶发育程度不同,影响着岩溶塌陷产生的规模和强度,岩溶发育程度强烈的,塌陷产生的数量多且强度大,反之则小。经过资料收集和现场调查,铜锣山地区槽谷内可溶岩分布广泛,且岩溶发育,下部发育多级水平岩溶管道,形成连通性好的溶洞、溶隙,属塌陷易发区。

(2) 岩溶裂隙或洞穴系统上部有一定厚度的松散覆盖层土体。松散破碎的盖层是塌陷体的主要组成部份,铜锣山塌陷区上覆土层多为二元结构,土层厚度一般 3~10 m,上部为透水粉质黏土和砂、碎石,厚度一般为 1~3 m;下部为红黏土,厚度一般 2~8 m,为“透水-阻水型”覆盖层。塌陷区土层厚度较薄,当地下水位波动强烈时,易发生塌陷。

(3) 剧烈的地下水活动。地下水是岩溶塌陷形成中最积极最活跃的因素,在天然状态下地下水水位波动一般不大,流速流量的变化较小。但人工抽水、隧道排水等人类工程活动引起的地下水位、流速流量的变化往往十分剧烈,由地下水产生的各种作用和力学效应也较强烈。因而,人为作用产生的塌陷,远远超过自然条件下产生的塌陷。

4.2 地下工程排水与岩溶塌陷的关系

铜锣山地区岩溶塌陷,以人类地下工程活动诱发为主,占全部塌陷点类型的 77%。以玉峰山塌陷区为例,自 2006 年 4 月外环玉峰山隧道动工起,玉峰山镇一带开始出现井泉干涸、河流断流、水库堰塘水体漏失等现象,2007 年开始陆续出现地面塌陷,隧道于 2008 年 7 月正式贯通,而区域内的地面塌陷现象一直持续到 2010 年(图 2)。可见的塌陷点有 7 处,塌陷坑共计 20 余个,塌陷主要分布在隧道轴线上方两侧 1~2 km 范围内,最远可达 3 km。另外,涂山湖水库漏失干

涸及出现塌陷也发生在铜锣山隧道掘进至可溶岩地层的大量排水时段。

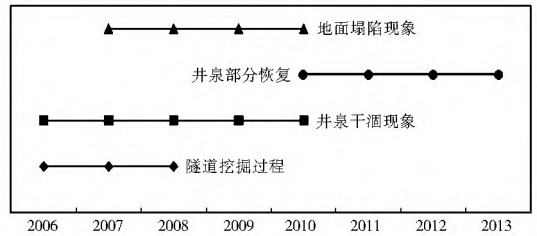


图 2 玉峰山地区地面塌陷时间节点示意图

Fig. 2 Layout diagram of ground collapse in the Yufengshan area

大量研究和工程实践表明,地下水示踪试验可以用来确定地下水流场特征与不同含水层之间的水力联系^[9]。玉峰山隧道正上方的岩溶槽谷为大型岩溶洼地,该处形成多处地面塌陷,通过进行地下水连通试验,查明了玉峰山塌陷区浅部地下水与中、深部循环系统之间的水力联系,找出了塌陷区浅部岩溶水位下降的原因。选取规模较大的典型塌陷点 L009-TX004 作为示踪试验投放点,玉峰山隧道东侧和西侧洞口出口排水沟作为监测点 NO.1 和 NO.2(图 3)。为防止示踪剂对地下水的污染,本次选用食盐作为示踪剂,分两次投放。试验前对监测点水体进行了检测,测定监测点温度和电导率背景值见表 2。

表 2 玉峰山隧道各监测点背景值

Tab. 2 Background values of each observation point in the Yufengshan area

监测点	温度(°C)	电导率/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)
玉峰山隧道西洞口	25.0	591
玉峰山隧道东洞口	25.4	580

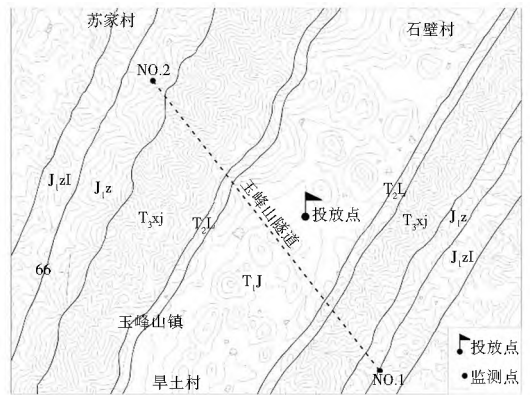


图 3 连通试验位置示意图

Fig. 3 Location of the connecting test

通过监测,得到 NO.1 和 NO.2 的电导率-时间变化曲线(图 4 和图 5),可知:监测点 NO.1 和 NO.2 电导率值均发生明显变化和异常,监测过程中隧道两个洞口均发生电导率数值的快速升高,在 72 h 监测时间内电导率值出现两个波峰,然后逐渐恢复正常。说明塌陷区浅部地下水与中、深部循环系统直接具有较好的水力联系,当隧道附近含水层被切穿排水时将造成地表浅部地下水位迅速下降。

由试验及水样检测结果可知:玉峰山塌陷区浅部岩溶地下水与深部地下水联系密切。这与该区地层岩性和地质构

造特征有关,由于位于碳酸盐岩可溶岩地层区,且背斜轴部岩层倾角大、裂隙多,利于地下水的下渗,导致岩溶十分发育,地下径流、暗河纵横交错,隧道开挖大量抽排地下水将直接导致岩溶槽谷浅部地下水位快速下降。从而在岩溶裂隙或洞穴系统发育且上部覆盖一定厚度松散岩土体的近地表诱发地面塌陷。

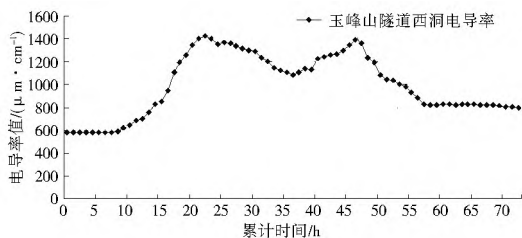


图 4 NO. 1 电导率- 时间变化曲线

Fig. 4 Variation curve of conductivity with time of observation point No. 1

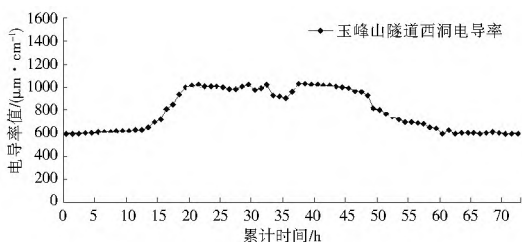


图 5 NO. 2 电导率- 时间变化曲线

Fig. 5 Variation curve of conductivity with time of observation point No. 2

4.3 岩溶塌陷形成过程

岩溶塌陷盖层包括阻水盖层和透水盖层。阻水盖层包括黏土、亚黏土等透水性较差的地层,以及其他胶结较好的砂岩等;而透水盖层包括轻亚黏土、粉质黏土、砂质黏土、砂、砾石等。研究区地面塌陷发生地位于嘉陵江组灰岩地层内,溶洞较发育,多属岩溶洞穴表层松散土体沉降陷落,而非岩质顶板坍塌。研究区塌陷形成过程包括岩溶洞穴表层土洞形成和土洞空腔土体盖层坍塌。

岩溶洞穴上方盖层土体内部土洞的形成与发育扩展是岩溶塌陷产生的基础。在自然状态下,土洞的形成、扩展并最终导致岩溶塌陷是一个缓慢的过程^[10]。然而,研究区人类工程活动对岩溶地下水的影响大大加快了这种进程,岩溶地下水的作用主要有:失托增荷、潜蚀渗透、负压吸蚀、波动散解等。

(1) 地下水的失托增荷^[11]作用。在自然状态下,处于地

下水位以下的岩土体都受到压差 ΔH 形成的地下水浮托力作用。当水位上升,浮托力按其增加的水头值增大,产生正压效果;当水位下降时浮托力消减,对于不透水的黏性土,其作用相当于使盖层增加一个同值的附加荷载,可使盖层的稳定性降低。

(2) 地下水水位于盖层土体中时,盖层与水直接接触,红黏土被软化,地下水位下降后,红黏土强烈失水收缩产生表层裂隙,土体完整性被破坏,同时地表水沿裂隙入渗并伴随地下水运动,盖层土体不断遭受剥蚀和搬运;当地下水位持续下降至盖层土体之下,土层中节理裂隙使得地表水入渗补给地下水,盖层中形成较强的渗透破坏,土体颗粒被剥蚀和搬运。

(3) 地下工程建设抽排地下水导致岩溶地下水位大幅度下降可在封闭的岩溶裂隙空间产生负压,对盖层土体产生附加吸力而使其遭到吸蚀剥落,加速土体的破坏。

(4) 岩溶地下水位波动使岩溶裂隙上盖岩土体处于频繁干湿交替状态,使其发生崩解和剥落,促进土洞的发育和扩展。地下水水位波动在土洞中可形成压力波动,土洞中压力变化也可使土洞向上覆盖层剥落扩大。岩溶地下水各种破坏作用使溶洞与盖层土体交界处逐渐形成空腔土洞。

若地下水位保持不变,空腔上部土层受力状态较简单,单位面积土体重量 G 加上其上部荷载 P ,与土体抗剪强度 τ 平衡^[12]。即

$$P + G = \sigma_n \tan \varphi + C \quad (1)$$

式中: σ_n 为侧压力; φ 为内摩擦角; C 为内聚力; G 为土体自重; P 为土体上垂直作用力。

自然状态下,地表浅部地层中侧向压力一般较小,忽略此侧压,稳定系数 $K = C / P + G$ 。若此时水位急降,则上式分母可加上 $(p - p_0)$, p 为大气压强, p_0 为土洞中的压强,此时土洞内形成负压,稳定系数 K 急速下降^[12],表明此状态下土洞非常不稳定。

水位急速下降,可能在局部形成超临界水力坡降潜蚀,还可在土洞内形成负压吸蚀,从而使黏土层在短时间内被破坏。由于上部的透水土层内聚力较小,在上部载荷、负压差及水力坡降产生的渗透力的共同作用下,土洞加速向两侧及向上发展,最后发生塌陷。

研究区地面塌陷成因可概括为“潜蚀软化- 渗透破坏- 负压吸蚀”致塌。如图 6 地面塌陷演化过程可分为 5 个阶段:(1)地面塌陷,原始地质条件;(2)溶洞顶部黏土层渗透破坏;(3)溶洞顶口形成土洞空腔;(4)土洞向上部透水层扩展并在近地表产生裂缝;(5)土质盖层坍塌。

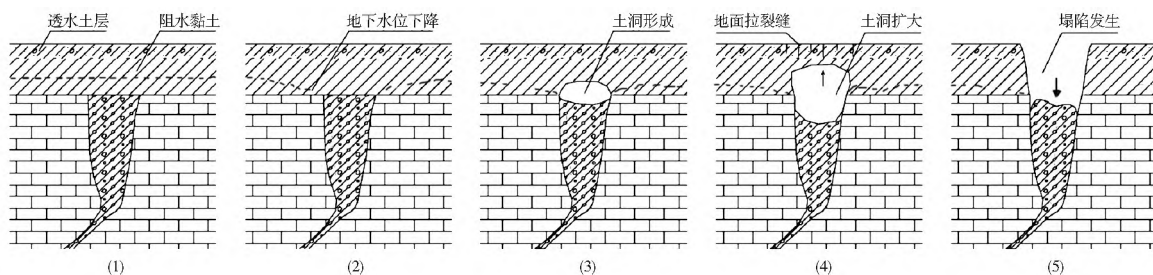


图 6 铜锣山地区岩溶地面塌陷演化过程示意图^[13]

Fig. 6 Schematic diagram of the evolution process of karst ground collapse in Tongluoshan(revised from Chen et al., 2013)

5 结论

(1) 重庆主城铜锣山地区岩溶塌陷主要集中在分布于铜锣山槽谷地带嘉陵江组灰岩地层中, 上覆土层多为上部透水下部隔水的二元结构盖层。

(2) 自然条件下, 各种致塌因素的作用强度较弱, 塌陷一般为单个产生; 人类活动导致的塌陷由于各种致塌因素作用较强, 塌陷成群出现, 塌陷群分布主要受可溶岩分布、岩溶发育程度和塌陷诱发因素控制。

(3) 重庆主城铜锣山槽谷地区岩溶十分发育, 地下径流、暗河纵横交错, 浅部岩溶地下水与深部地下水联系密切, 地下工程开挖切穿岩溶含水层将导致浅部岩溶地下水快速下降。

(4) 重庆主城区铜锣山地区地面塌陷因为“潜蚀软化- 渗透破坏- 负压吸蚀”致塌。塌陷发生的前提条件是地面以下一定深度基岩表层存在岩溶裂隙或洞穴系统, 关键条件为地下水突发性降落并在土质盖层与溶洞顶部之间形成土洞, 土洞进一步扩大导致溶洞顶部土质盖层坍塌。

参考文献(References):

[1] 王明伟, 许泮. 云南岩溶山区生态环境地质问题与可持续发展研究综述[J]. 生态经济, 2014, 30(9): 185-187. (WANG Mingwei, XU Han. Research review of karst mountain ecological environmental geological problems and sustainable development in Yunnan[J]. Ecological Economy, 2014, 30(9): 185-187. (in Chinese))

[2] 程星. 岩溶塌陷机制及其预测与评价研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006. (CHENG Xing. Research on prediction and evaluation and the mechanism of the karst collapse. [M]. Beijing: Geological Press, 2006.)

[3] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 419-431. (LUO Xiaojie. The development features of karst collapse and its disaster prevention in Wuhan[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 419-431. (in Chinese))

[4] 祝军. 隧道工程对云雾山岩溶地区地质环境的影响[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(6): 776-780. (ZHU Jun. The influences of tunnel engineering on geological environment of Yunwushan karst area[J]. Resources Environment & Engineering., 2013, 27(6): 776-780. (in Chinese))

[5] 杨乐, 任秀文, 谢晓彤, 等. 重庆市“四山”规划区铜锣山片区地质环境专项调查报告[R]. 重庆地质矿产研究院, 2013. (YANG

Le, REN Xirwen, XIE Xiaotong, et al. The special investigation of geological environment of the Tongluo mountains in Chongqing[R]. Chongqing Institute of geology and mineral resources, 2013. (in Chinese))

[6] 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, 35(3): 23-27. (TAN Kaiou, LI Yusheng. Karst collapse and its formation mechanism in Chongqing region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 35(3): 23-27. (in Chinese))

[7] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 等. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 126-130. (ZHANG Lifen, ZENG Xiaosheng, YAO Yusheng, et al. Review on karst collapse in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 126-130. (in Chinese))

[8] 严若钧, 盛智勇. 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. (YAN Ruojun, SHENG Zhiyong. Study on distribution and prevention measures of karst collapse in Chenzhou[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(2): 143-146. (in Chinese))

[9] 潘国林, 洪天求. 地下水示踪试验在岩溶塌陷成因判别中应用分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 125-129. (PAN Guolin, HONG Tianqiu. The application of groundwater tracer test to discriminant causes of the karst collapse[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 125-129. (in Chinese))

[10] Roberto Salvati, Ira D. Sasowsky. Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge[J]. Journal of Hydrology(2002), 26: 1-11.

[11] 康彦仁. 岩溶地面塌陷的形成条件[J]. 中国岩溶, 1988, 7(1): 9-17. (KANG Yanren. Formation and condition of karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(1): 9-17. (in Chinese))

[12] 程星, 黄润秋. 岩溶塌陷的地质概化模型[J]. 水文地质工程地质, 2002(6): 30-34. (CHENG Xing, HUANG Runqiu. Geological conceptive models of karst collapse[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002(6): 30-34. (in Chinese))

[13] 陈洪凯, 廖云平, 唐红梅, 等. 地下工程岩土变形破坏机理与控制研究报告[R]. 重庆交通大学, 2014. (CHEN Hongkai, LIAO Yunping, TANG Hongmei. The mechanism and its control of rock deformation and failure of underground engineering[R]. Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

(上接第 732 页)

[12] 池元成, 方杰, 蔡国飙, 等. 基于差分进化和粒子群优化算法的混合优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2009(12): 2963-2966. (CHI Yuancheng, FANG Jie, CAI Guobiao, et al. Hybrid optimization based on differential evolution and particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Design, 2009(12): 2963-2966. (in Chinese))

[13] 张智星, 孙春在. 神经模糊和软计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 131-135. (ZHANG Zhixing, SUN Chunzai. Neuro-fuzzy and soft computing[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 131-135. (in Chinese))

[14] 张娟娟. 智能优化算法在含水层参数反演中的应用[D]. 西安:

长安大学, 2006. (ZHANG Juanjuan. Intelligent optimization algorithms in the applications of the aquifer parameters inversion[D]. Xi'an: Changan University, 2006. (in Chinese))

[15] U. S. Department of the Interior(USDI). Ground water manual[M]. Washington, D. C: Bureau of Reclamation, 1981: 121-127.

[16] 张鹤志, 郭建青. 粒子群优化算法在确定越流含水层参数中的应用[J]. 水利水电科学进展, 2011(3): 13-16. (ZHANG Huzhi, GUO Jianqing. Application of particle swarm optimization algorithm to determination of leakage aquifer parameters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011(3): 13-16. (in Chinese))