

文章编号:1001-4810(2009)01-0023-07

昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施

邓启江^{1,2}, 李星宇², 吕琼², 李坚峰²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 云南地质工程勘察设计院, 昆明 650041)

摘要:昆明市是岩溶塌陷危害较重的城市之一。岩溶塌陷主要集中分布在翠湖—圆通山、金马寺等8个地段,已形成塌陷坑405个,发生时间主要在6—9月,该时段形成的塌陷占全年发生数的73%。岩溶塌陷多发育于地下岩溶发育、松散盖层厚度小于15m、地下水埋深小于20m的地段。碳酸盐岩岩溶发育、松散盖层厚度较小和水动力条件(降水、地表水和地下水)是昆明市岩溶塌陷产生的必要条件,其中地下水的作用对岩溶塌陷的形成至关重要。昆明市岩溶塌陷机理主要有地下水升降致塌、地表水下渗致塌和动荷载致塌3种类型。防治方法主要包括避让、合理开采地下水的预防措施和防渗封闭、结构物跨越及地下加固处理的工程措施。

关键词:岩溶塌陷;发育特征;塌陷机理;防治措施;昆明

中图分类号:P642.2;X141 **文献标识码:**A

云南省碳酸盐岩出露面积约 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省国土总面积的近1/3。昆明市是云南省省会所在地,也是全国受岩溶塌陷危害较重的七城市之一^[1]。云南省除昆明市以外,尚有曲靖、昭通、个旧和保山等近30个城市也处于碳酸盐岩分布区,其中曲靖和个旧两市已经受到岩溶塌陷危害。据不完全统计,近50年来,云南已发生岩溶塌陷事件1 000余起,累计经济损失已超过5 000万元。开展昆明市岩溶塌陷机理研究,不仅对昆明市预防和治理岩溶塌陷具有指导作用,而且对云南省乃至西南岩溶地区岩溶塌陷防治工作也有借鉴意义。

1 昆明市岩溶形成的地质环境条件

昆明市整体处于滇池湖盆中,属亚热带季风气候,年均气温 14.7°C ,四季如春。本区多年平均降水量 $1\,011.8\text{ mm}$,每年6—10月为雨季,降雨量占全年降水量的80%;12月至次年的4月为旱季,降水量仅占全年降水量的7%。

区内水系均属长江流域。滇池处于流域分水岭附

近,为一源头型淡水湖泊,南北长40km,东西宽12.9km,面积 300.7 km^2 ,湖水面高程 $1\,885.7 \sim 1\,887.2\text{ m}$ 。汇入滇池的大小河流有20余条,主要有盘龙江、宝象河等。昆明市以滇池为中心,环湖而建,现状主城区位于滇池北岸。研究区总体地势由四周向中心(滇池)倾斜,四周高中间低,大体可分为盆地、盆地斜坡和边缘山地3种地貌单元。盆地内地面高程在1 900m左右,边缘山地山顶高程多在 $2\,000 \sim 2\,400\text{ m}$ 之间。

研究区内除志留系外,从震旦系至第四系各个时代地层均有出露。第四系和上第三系松散层集中分布在盆地和山间洼地内,基岩地层中碳酸盐岩呈片状出露或是呈条带状与非碳酸盐岩相间分布(图1),裸露型和覆盖型岩溶发育。

该区处于普渡河断裂带,由数条南北走向的断层组成,断裂带宽20余公里,属于岩石圈断裂。普渡河断裂带自晚元古代末形成以来,地史上多次活动,滇池湖盆即是断裂带所夹持的地块作地堑式陷落形成。在新构造运动时期乃至现代,普渡河断裂带仍是活动比较强烈的断裂带。

基金项目:云南省科技计划项目“国家重点工程昆明新机场岩溶塌陷预测与减灾技术研究”(2006GG38)

第一作者简介:邓启江(1969—),男,高级工程师,1991年成都地质学院水文地质与工程地质专业毕业,现为中国地质大学(北京)地质工程专业在读博士研究生。研究方向:水文地质、工程地质。通讯地址:650041,昆明市董家湾路172号云南地质工程勘察设计院总工办。电话:15887246970, E-mail: dengqijiang@163.com。

收稿日期:2009-01-10

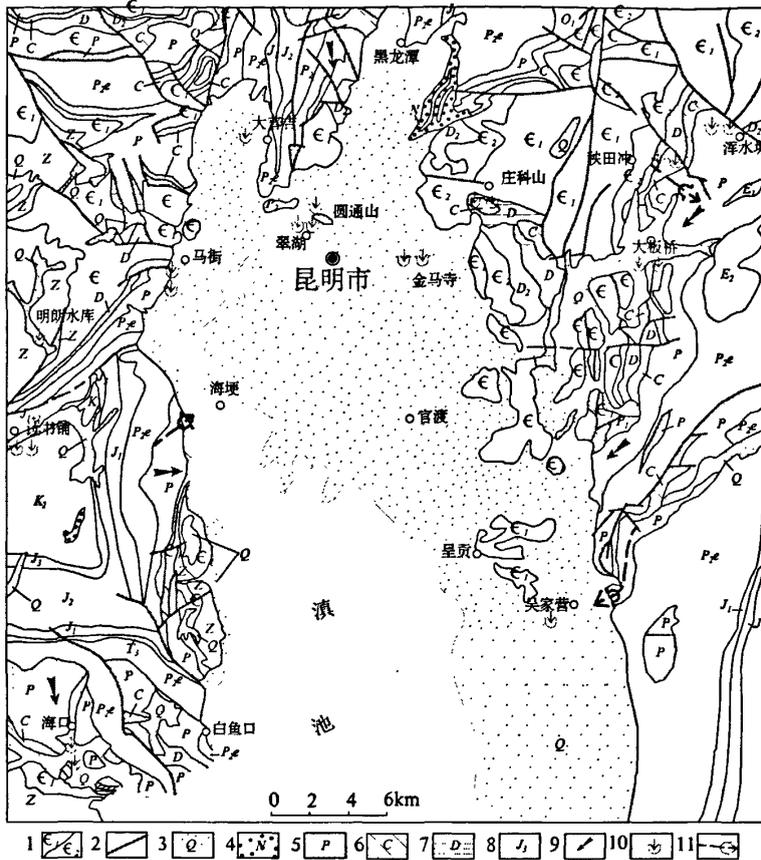


图1 昆明地区水文地质简图

Fig.1 Sketch map of hydrogeology in Kunming

1. 地层界线; 2. 断层; 3. 第四系粘土、砂砾、淤泥; 4. 新第三系粘土岩; 5. 二叠系灰岩、灰质白云岩; 6. 石炭系灰岩; 7. 泥盆系白云岩; 8. 非碳酸盐岩(除P_{2e}为玄武岩外,其余为泥岩、页岩、砂岩); 9. 岩溶水流向; 10. 岩溶塌陷; 11. 暗河及其出口

2 昆明市岩溶塌陷时空分布特征

2.1 昆明市岩溶塌陷的空间分布特征

昆明市岩溶塌陷主要集中分布在翠湖—圆通山、金马寺、浑水塘—秧田冲、大板桥、马街和海口等8个地段^[1]。几乎所有岩溶塌陷密集地段都落在NE-SW向延伸、宽10余公里的条带状区域内(见图1)。据概

略统计,全区已形成岩溶塌陷坑405个^[1],各塌陷地段发生的塌陷坑数见表1。上述区域共同之处是属于浅覆盖型岩溶发育区,地下岩溶中等~强烈发育,以溶洞、溶隙为主;松散盖层厚度一般小于15m;地下水水位埋深一般小于20m;构造上多处于断陷盆地边缘,断裂构造发育,有利于岩溶的形成和发展,容易形成岩溶塌陷。

表1 昆明市岩溶塌陷分布情况统计表

Tab.1 The statistical chart of the karst collapse distribution in Kunming

塌陷地段	翠湖	金马寺	庄科山	浑水塘	大板桥	马街	明朗水库	海口	其它地段	合计
塌陷坑数	116	33	21	79	24	11	76	37	8	405
所占比例/%	29	8	5	20	6	3	19	9	2	100

2.2 岩溶塌陷的时间分布特征

根据对1964—2007年期间岩溶塌陷资料的统

计,在1978—1982年和1985—1989年的两个时间段内,昆明市岩溶塌陷发生的频数最高,占统计总数的

70.4%。对照历史气象资料,可以看出上述时段恰好是丰水年。岩溶塌陷在月份的分布上,大多发生在6—9月(图2),这4个月刚好是昆明地区降雨量最为集中的时段,占全年发生数的73%。据此认为,降雨是影响岩溶塌陷的重要因素之一,降雨量与岩溶塌陷发生频数成正比。

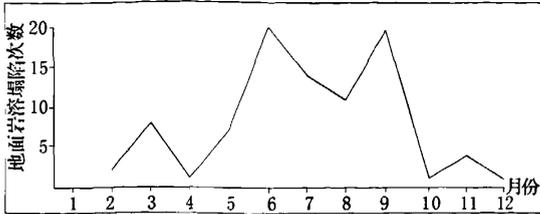


图2 昆明市岩溶塌陷月份分布曲线
Fig. 2 Monthly distribution curve of the karst collapse in Kunming

3 塌陷坑的个体几何特征

昆明市岩溶塌陷坑的个体形态,平面以圆至椭圆状为主。坑口长短径之比等于1:1的占总数的80%,1~1.5:1的占15%,其余占5%;从塌陷坑坑口直径的长度看,最小的不足1m,最大的达20m,87%的塌陷坑直径小于或等于5m。

岩溶塌陷的剖面形态可概化为漏斗状、倒漏斗状、鼓状、桶状和碟状5种形状。研究发现塌陷坑的形态演化一般是沿着倒漏斗状—鼓状—漏斗状—碟状的方向进行^[1]。

4 昆明市岩溶塌陷形成的基本条件和影响因素

4.1 岩溶发育程度

昆明市的可溶岩均为碳酸盐岩,主要为古生界地层。从出露面积看,二叠系阳新组灰岩分布最广(参见图1),约占全部碳酸盐岩出露面积的60%;石炭、泥盆系碳酸盐岩出露面积约占各时代碳酸盐岩出露总面积的25%,但分布较零散;其余的碳酸盐岩约占15%。

二叠系阳新组、石炭系和泥盆系碳酸盐岩不仅出露面积广,岩溶发育程度也高。以线岩溶率、面岩溶率作为衡量岩溶化程度的指标,将昆明各时代碳酸盐岩线、面岩溶率与岩溶塌陷发生频数作对比分析(图3),结果表明:岩溶化程度与塌陷频数具有一致的消长关系。根据统计,昆明市岩溶塌陷主要分布在二叠系阳新组(P_{1y})、泥盆系宰格组(D_{3zg})和石炭系威宁组(C_{2w})三套碳酸盐岩地层中。

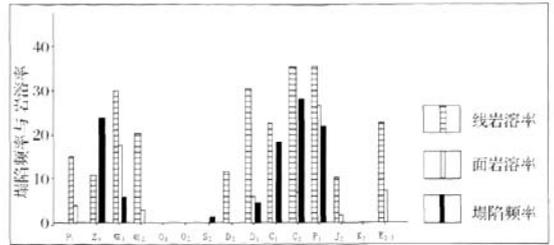


图3 岩溶化程度与岩溶塌陷关系图
Fig. 3 Map of the relationship between the karst development degree and karst collapse

4.2 松散盖层的结构和厚度

研究区内第四系松散层分布广泛,成因类型复杂。盆地区主要以冲、湖积为主,山区主要以洪积为主,山地和盆地过渡地带以冲、洪、残坡积为主。在土体类型上,又可分为碎石土、砂性土、粘性土和特殊土四大类。碎石土分布于山区沟谷、盆地边缘和堆积台地等地段,以洪积、冲湖积成因为主。砂性土以粉、细砂为主,主要成因类型为冲洪积、冲积,主要分布在市区及其以南广大地区。粘性土是区内分布最广的土体类型,盆地内粘性土多埋藏于填土之下,盆地边缘则直接出露于地表,成因类型为冲湖积、冲洪积和残坡积。特殊土主要是指人工填土、软土、红粘土和膨胀土。杂、素填土主要分布在市区、城镇附近,覆盖在其它土层之上。软土包括淤泥、淤泥质土、泥炭质土等,主要分布在滇池沿岸及梁家河以南的冲湖积平原区。膨胀土主要分布于盆地北部和东部边缘,以冲洪积和湖积为主。红粘土沿盆地边缘分布,主要为残坡积成因。

统计资料显示,昆明市80%的岩溶塌陷发生在松散盖层为一元均质粘性土(主要是粉质粘土)的区域内。究其原因,主要是由于粉质粘土粒间连结较差,在渗透水流作用下容易产生潜蚀作用而引起塌陷^[7]。研究区内砂砾石层和多元结构土层多分布在盆地中部,厚度多大于50m,该区域内塌陷很少发生。

调查显示,松散层厚度越小,越容易产生岩溶塌陷。盖层厚度小于15m的塌陷占本区塌陷总数的96%;盖层厚度在15~30m的塌陷占4%;盖层厚度大于30m的土层中未发现岩溶塌陷发生。

4.3 地下水

地下水的作用是影响本区岩溶塌陷的最活跃因素,在全区405个岩溶塌陷坑中,有284个塌陷坑的形成与地下水作用有关,占总数的70%。

从地下水埋深看,水位越浅,发生塌陷的机率越

高。据统计,地下水水位埋深小于10m的塌陷坑个数占塌陷坑总数的72%;水位埋深在10~20m的塌陷坑个数占总数的20%;水位埋深大于20m的塌陷坑个数仅占8%。

当地下水位在岩土界面附近波动时,水位变幅越大塌陷越易形成,水位变化越频繁对塌陷的形成越有利。从翠湖、海口、金马寺和马街等岩溶塌陷集中发生地段的情况看,在岩溶塌陷大量发生之前或之中,都有地下水位在短时间内大幅度下降的记录,可作为这一认识的佐证。

4.4 大气降水和地表水

如2.3节所述,降雨也是影响岩溶塌陷的重要因素之一。降雨影响岩溶塌陷的机理在于,一定量的雨水在通过松散盖层向下渗入的过程中,可以引起细粒物质的位移,特别是在有开口溶洞或孔隙的岩土界面附近,这种作用更为显著。

地表水体对岩溶塌陷的形成也有很大影响,特别是水库蓄水可以改变局部水文地质条件,打破原有力学平衡状态,使可溶岩之上的盖层失稳破坏,引起岩溶塌陷。昆明市明朗水库蓄水后在大坝左侧内坡先后形成岩溶塌陷坑76个,严重影响了库区蓄水及其使用效益。

本区明显受大气降水影响的岩溶塌陷占塌陷总数的60%,典型案例如浑水塘塌陷(见后文);因地表水作用参与引起的岩溶塌陷占塌陷总数的19%,典型案例如翠湖塌陷(见后文)。

4.5 地面振动

研究区内的地面振动主要是由运动中的机车引起的,影响范围沿铁路或公路呈带状分布。贵昆线浑水塘至秧田冲段的岩溶塌陷的形成就明显受振动力作用的影响。区内与振动力作用有关的岩溶塌陷坑个数为82个,占全区塌陷坑总数的20%。

4.6 地表土扰动

平整场地、开挖路堑等施工过程中,都可造成点、片状土层扰动,使原本具有保护作用的植被和表土层结构遭到破坏,为大气降水和地表水向地下渗入创造了便利条件,进而导致岩溶塌陷的发生。

本区的庄科山、铁路沿线的岩溶塌陷都与土层扰动有不同程度的关系,此类塌陷约占全区塌陷总数的6%。

综上所述,碳酸盐岩岩溶发育、松散盖层厚度较小和水动力条件(降水、地表水和地下水)是昆明市岩溶塌陷产生的必要条件,其中地下水的作用对岩溶塌

陷的形成至关重要。

5 昆明市岩溶塌陷机理模式

通常情况下,岩溶塌陷是在土-水-岩三者所构成的岩溶塌陷系统内由于自然演化或叠加人为因素所导致。在自然条件下岩溶塌陷的形成是一个缓慢的过程;由于人类活动的加入,主要有抽水或人工降水、动荷载等,则可极大地加速岩溶的致塌过程^[2]。昆明市已发生的岩溶塌陷大部分与人类活动密切相关。概括起来,昆明市岩溶塌陷机理主要可分为3种类型:地下水位升降致塌、地表水下渗致塌和动荷载致塌。岩溶塌陷的形成多数情况下是多重因素复合叠加作用的结果,单一因素引起的岩溶塌陷为数不多。

5.1 地下水位升降致塌模式

典型案例是昆明市金马寺岩溶塌陷。金马寺位于昆明城区东部,地貌上为湖积台地,表层被粘土、砂质粘土覆盖,盖层厚度8~10m,下伏基岩为中、下石炭统灰岩。上个世纪70年代初,该地段尚有泉水出露,中期之后,这一地段陆续有20眼地下开采井投入使用,开采量一度达到2400m³/d。由于布井不合理,造成该地段地下水位下降5.0~12.6m,并随着枯季、雨季发生往复波动。自1979年以来,该地段多处发生岩溶塌陷,最近的一次发生在2007年5月31日凌晨,由于岩溶地面塌陷,金马寺大村两幢4层民房(图4中的白瓷砖房及其右侧的红砖房)突然发生地基下沉,相互靠在一起,墙壁挤压开裂,存在倒塌的危险^[3]。



图4 金马寺大村两幢民房受灾状况
(引自彩龙中国网)

Fig. 4 Damage situation of two houses caused by karst collapse in Jinmashi village
(from www.clzg.cn/xinwen)

由于大量抽取岩溶地下水导致地下水位显著下降时,一方面由于流向、流速和水力坡度的改变而使地下水对松散层的潜蚀能力加强;另一方面,由于基底中溶洞空间发育,使界面附近被潜蚀的松散物质随地下水流进入溶洞内而被带走,使界面附近逐渐形成土洞。当岩溶地下水动水位降至岩土界面附近时,潜蚀作用加剧,地下水对上覆土层的浮托力急剧衰减,垂直向下的动水压力及真空负压增大,土体抗剪能力相对减弱,土洞洞壁上发生剪切破坏,形成塌陷。

金马寺致塌机制为“水压差场潜蚀—真空吸蚀—失托增荷致塌”,致塌模式见图5。

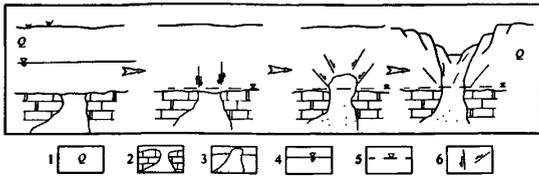


图5 金马寺岩溶塌陷成因机理剖面示意图

Fig. 5 Profile of the collapse's mechanism in Jinmasi

1. 第四系松散盖层; 2. 岩溶基底及开口溶洞; 3. 塌落土洞及松散物;
4. 岩溶水静水位; 5. 岩溶水动水位; 6. 剪切破裂面及应力方向

5.2 地表水下渗和动荷载致塌模式

典型案例是贵昆铁路浑水塘—秧田冲路段岩溶塌陷。1966年贵昆铁路正式通车。1975年开始,本段岩溶塌陷频繁发生,在长10km的路段内已发生岩溶塌陷79次,塌陷大多发生在路基旁,少数发生在道心^[1]。

该地段属横山溶蚀台地的一部分,属裸露一半裸露型岩溶区,松散盖层主要为第四系残坡积红粘土,坚硬~可塑状,一般厚度0~10m;下伏基岩以泥盆系宰格组(D₃z_g)、二叠系阳新组(P₁y)灰岩、白云质灰岩为主。地表落水洞、漏斗和石牙广泛发育,地下溶蚀洞隙非常发育且连通较好。K606+100~753m路段电法勘探资料显示,在地表以下20m范围内发育51个直径在2m以上的溶洞。该地段处于岩溶地下水补给—径流区,地下水深埋,勘探资料表明,路基以下40m深度范围内尚未发现地下水位^[1]。

该地段分布的红粘土,浅表网状裂隙非常发育,地表水或降水在沿裂隙下渗过程中,使红粘土逐渐软化崩解或散解,同时使土体被软化。另一方面,与土层相通的向上开口的岩溶裂隙构成土体中下渗水的排泄通道。在渗流水通过岩溶管道向地下的排泄过程中,土粒随水流被带走,从而在上覆盖层中形成土洞并使土洞扩大。铁路动荷载是一种周期性的振动荷

载,它的加入改变了原来土洞中的应力分布,造成土洞内部一些地方应力降低,而另一些地方应力增加,应力增大的部位主要集中在土洞顶板附近^[2]。长期往复,应力增大的顶板部位首先发生塌陷并引起洞壁及其周边发生塌陷。

其致塌机制为“土层软化—动荷载叠加耦合—破坏累积—重力致塌”。岩溶塌陷模式详见图6。

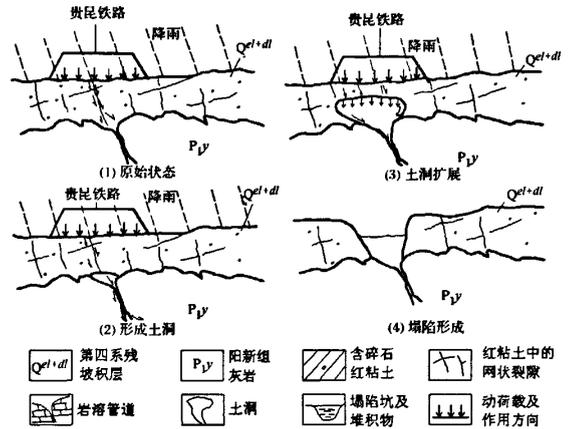


图6 贵昆铁路浑水塘—秧田冲段岩溶塌陷成因机理剖面图

Fig. 6 Profile of the collapse's mechanism in the Hunshuitang—Yangtianchong section along Gui—kun Railway

5.3 地下水位下降和地表水下渗致塌模式

典型案例是翠湖公园岩溶地面塌陷。翠湖公园位于昆明市城区北部,是昆明著名的风景区。翠湖一带地势低洼,上个世纪70年代以前,翠湖因得到“九龙池”每日5 000~7 500m³的泉水补给,湖水翠绿,常年不干。翠湖湖水面积0.25km²,水面标高1 894m。翠湖湖底被第四系冲积、湖积粘土、淤泥质土和砂砾覆盖,厚度一般在2~8m,与基岩接触面附近普遍有一层1~3m厚的湖沼相泥炭层分布。翠湖基底地层为石炭系角砾状白云岩,粉~细晶灰岩。翠湖湖底下伏岩溶发育具多期叠加的特点,溶洞、溶孔多而集中。1978年对翠湖湖底做物探探测,发现湖底隐伏溶洞200余个,其中洞径大于1m的溶洞达48个;溶孔、溶隙特别发育,个别孔段线岩溶率达27.5%~40.5%。由于地处地下水的汇流排泄带,下伏承压含水层富水性强,据附近钻孔揭露,单孔涌水量1 000~4 000m³/d^[4]。

翠湖九龙池是昆明市最早开发利用地下水的地段。翠湖地段地下水开采量随着城市的发展不断增加,至1974年,地下水开采量已达5 000 m³/d。此外,

从1973年开始,翠湖附近人防工程施工大量抽排地下水(3 500~5 000 m³/d),使翠湖地段地下水位急剧下降。1975年底翠湖部分干涸,1976年5月22日“九龙池”泉水断流。1983年5月3日调查时,翠湖地下水水位埋深达14.05m。翠湖岩溶地面塌陷最早出现于1974年,1976—1983年塌陷活动最为活跃^[4]。

由于地下水多年持续增长的开采活动和人防工程抽排地下水,导致该地区岩溶地下水水位下降,地下水水力坡度增大,流速加快,动水压力增加,对松散土体产生潜蚀作用。由于湖水、浅层孔隙水与岩溶地下

水之间存在紧密的水力联系,岩溶地下水位的持续下降,使得湖水和孔隙水不断越流补给岩溶水,对盖层土体的潜蚀作用逐步加强,沿渗流方向形成一些细小空洞;同时,地下水流还将溶洞中的充填物搬运走,使溶洞被掏空成为畅通的水流通道。土层中的细小洞隙在水流不断的冲刷作用下逐步扩大,随着洞腔的扩大,上覆土体在自重、动水压力等的作用下,最终产生塌陷。

翠湖岩溶塌陷致塌机制为“水压差场潜蚀—入渗渗透—失托增荷致塌”。塌陷模式详见图7。

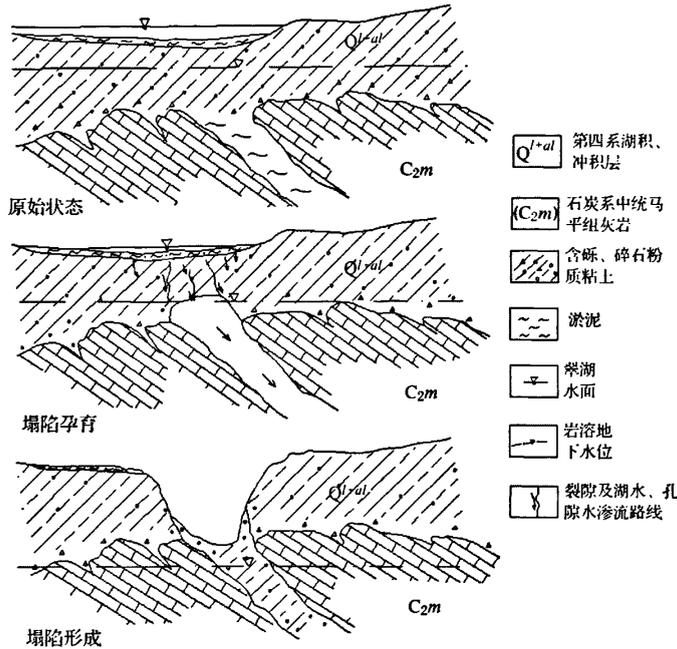


图7 翠湖公园岩溶塌陷成因机理剖面图

Fig. 7 Profile of the collapse's mechanism in Cuihu park

6 岩溶塌陷防治措施

在对昆明市岩溶塌陷发育特征及其形成机理进行分析的基础上,综合国内外岩溶塌陷防治工程实践经验^[5~12],提出昆明市岩溶塌陷的防治措施如下:

6.1 预防措施

(1)避让。当拟建工程所处地质环境条件可能产生岩溶塌陷时,建筑物布置时应尽可能避开岩溶塌陷易发区(段)。

(2)合理布置地下水开采工程,调控地下水位。对于需开采地下水的地段,要解决供水与岩溶塌陷的矛盾,可在合理布井、分层取水、强化统一管理等方面寻找出路。对于已出现地下水超采的地段,地下水水位下降过快,自然补给不足以恢复地下水位时,可采用

人工回灌措施。

6.2 工程治理措施

当区段内已发生岩溶塌陷或是存在岩溶塌陷隐患时,可采取消除或改变形成岩溶塌陷条件、影响因素的工程措施进行防治,主要包括防渗封闭、结构物跨越和地下加固处理^[5~16]等。

(1)防渗封闭。包括地面回填、夯实、排水、水泥土封闭、隔水土工布封闭、氯丁橡胶板防水等方法。

(2)结构物跨越。从结构形式来看,跨越可分为桥跨、梁跨、板跨、拱跨等。

(3)地下加固处理。方法有压浆、强夯、旋喷、锚杆、锚桩、换填碎石、桩基、钻孔充气等多种方法,可根据实际情况选择使用。

7 结 论

(1)昆明市岩溶塌陷主要集中分布在翠湖—圆通山、金马寺等8个地段,岩溶塌陷发生时段主要集中在6—9月;

(2)碳酸盐岩岩溶发育、松散盖层厚度较小和水动力条件(降水、地表水和地下水)是昆明市岩溶塌陷产生的必要条件,其中地下水的作用对岩溶塌陷的形成至关重要;

(3)昆明市已发生的岩溶塌陷大部分与人类活动密切相关;

(4)昆明市岩溶塌陷机理主要可分为3种类型:地下水位升降致塌、地表水下渗致塌和动荷载致塌,岩溶塌陷的形成多数情况下是多重因素复合叠加作用的结果;

(5)昆明市岩溶塌陷的防治措施主要包括预防措施和工程治理措施。

参考文献

- [1] 云南地矿局第一水文地质工程地质大队. 昆明市岩溶塌陷机理及防治阶段性报告[R]. 1993:24—84.
- [2] 程星. 岩溶塌陷机理及其预测与评价研究[M]. 北京:地质出版社,2006:24—90.
- [3] 云南省地质环境监测总站. 昆明市官渡区金马街道办事处金马寺大村岩溶塌陷应急调查报告[R]. 2007:3—12.
- [4] 云南省环境地质监测总站. 昆明市翠湖地区环境水文地质工程地质研究报告[R]. 1988:21—45.
- [5] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等. 中国岩溶学[M]. 地质出版社,1994:141—145.
- [6] 卢耀如,于海潮,董国榜,等. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M]. 科学出版社,1999:143—147.
- [7] 陈国亮. 岩溶塌陷的成因与防治[M]. 中国铁道出版社,1994:13—39.
- [8] 毋进伟,雷明堂,梁军林,等. 岩溶路基病害与处置技术国内外研究现状[J]. 中国岩溶,2005,24(2):91—93.
- [9] 康彦仁. 中国南方岩溶塌陷[M]. 中国铁道出版社,1994:14—18.
- [10] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 水利电力出版社,1994:217—224.
- [11] 赵国梁. 贵昆线岩溶路基病害勘察与设计[J]. 路基工程,1995,(3):45—48.
- [12] 陈忠平. 岩溶区路基塌陷防治的灌浆技术[J]. 冶金矿山设计与建设,2001,(3):51—54.
- [13] 邓家喜,王浩,韦明. 广西河池水任至南宁公路岩溶路基病害特点及防治技术[J]. 中国岩溶,2005,24(2):131—133.
- [14] 项均,廖如松. 岩溶塌陷灾害的预测与评价[J]. 地质灾害防治,1990,1(1):67—71.
- [15] 谭鸿增. 南昆铁路岩溶塌陷的预测与整治[J]. 工程地质学报,2000,8,supple:216—219.
- [16] 陈国亮. 岩溶地面塌陷机制、预测及整治研究[J]. 地质灾害防治,1999,1(3):43—47.

Development characters and prevention measures of the karst collapse in Kunming

DENG Qi-jiang^{1,2}, LI Xing-yu², LU Qiong², LI Jian-feng²

(1. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Yunnan Geological Engineering Prospecting Institute, Kunming, Yunnan 650041, China)

Abstract: Kunming is one of the cities have been severely damaged by karst collapse. The karst collapse concentrated in eight sites such as Cuihu—Yuantongshan, Jinmasi etc., there are 405 karst collapses. The karst collapse mainly takes place from June to September, accounting for 73% of all the annual collapses. Most collapses take place where the underground karst developed, the thickness of the loose cover is thinner than 15 meters and the groundwater table is buried deeper than 20 meters. The karst development, thin cover and the hydrodynamic conditions (precipitation, surface water and groundwater) are necessary conditions which cause the collapse in Kunming. The groundwater effect is the most important among these conditions. The mechanisms of the collapse in Kunming involve three types as follows; phreatic fluctuation, surface water seepage and moving load. The major measures to prevent and control the collapse include avoiding around the collapse, reasonable exploiting of groundwater, preventing surface water seepage and making architectures cross-over the collapse as well as underground consolidating engineer.

Key words: karst collapse; development character; mechanism of the collapse; prevention measures; Kunming