维普资讯 http://www.cqvip.com

第21卷 第2期
2007年4月

矿产与地质
MINERAL RESOURCES AND GEOLOGY

Vol. 21, No. 2
Apr., 2007

桂林市岩溶塌陷的基本特征和防治对策①

钱建平
(桂林工学院资源与环境工程系,广西 桂林 541004)

摘 要:桂林市岩溶塌陷的分布主要受地貌因素、地层岩性、地质构造、地下水运动和人为因素的影响。其成因类型可分为自然塌陷和人为塌陷。人为塌陷主要是由抽取地下水、工业废水排放、加载或振动因素引起。在论述桂林市岩溶塌陷的基本特征基础上,提出了岩溶塌陷地质灾害的防治对策。

关键词:地质灾害;岩溶塌陷;综述;地下水;桂林
中图分类号:X141 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-5663(2007)02-0200-05

0 前 言

岩溶塌陷泛指岩溶地区土层中的塌陷、岩溶基岩中的塌陷及上覆土层同下伏基岩一起坍塌的塌陷总称[1]。其中土洞与溶洞往往有内在联系,在垂向上往往呈上下叠置关系。一般若没有岩溶发育,没有与土层相连接的开放的岩溶洞穴,岩溶塌陷是不会发生的。塌陷调查表明,塌陷处均无一例外地存在着岩溶洞穴[2]。

桂林地处北回归线以北的低纬度区,具湿热多雨的亚热带季风气候,年平均温度为19℃,年平均降雨量为1900mm±。在地质构造上位于近SN向的桂林一阳朔复式向斜中心。区内主要出露泥盆系和下石炭统一套质纯、层厚的碳酸盐岩,总厚度达1600余米,出露面积约占本区总面积的90%。在地貌上,沿市中心南北贯穿而过的是清澈秀丽的漓江及河谷孤峰平原,两侧为石灰岩峰林和峰丛,形成了雄甲天下的桂林山水——典型喀斯特地貌现象。但是,典型喀斯特地貌亦伴随着非常发育的岩溶塌陷,据统计,截止1999年底的前40年间,在市区及近郊约300km^{2}的范围内,至少发生岩溶塌陷654个[3],构成本区主要的地质灾害,给该市工农业生产、城市建设及人民生命财产安全等方面带来严重的危害。因此,通过对桂林市岩溶塌陷的基本特征的研究,进而提出桂林市岩溶塌陷的防治原则和措施,对该市积极有效地进行地质灾害的预防工作具有重要意义。

1 桂林市岩溶塌陷的基本特征

1.1 岩溶塌陷分布及影响因素

桂林市岩溶塌陷的分布主要受地貌因素、地层岩性、地质构造、地下水运动和人为因素的影响。在地貌上,岩溶塌陷主要发生在岩溶负地貌的峰林、孤峰平原和一级阶地上;在地势上,岩溶塌陷多分布在地势低洼带及高低地势过渡带,此类塌陷约占塌陷总数的80%[4]。不同的地貌单元基岩上方土壤覆盖层的厚度不同,通常覆盖层厚度越小,岩溶塌陷越发育。第四系土壤覆盖层是产生塌陷的主体。

岩溶塌陷主要沿岩溶强烈发育的地段分布[5]。洞隙是塌陷产生的基础,岩溶越发育,洞隙越发育,塌陷密度越大。而后者显然受制于岩性和地质构造。桂林市岩溶塌陷主要发生在中、上泥盆统和下石炭统可溶性碳酸盐岩之上的土层中。质纯、层厚的灰岩岩溶发育,塌陷密度亦大。岩溶塌陷在空间分布上与地质构造关系密切,具有成群性和成带性,岩溶塌陷密集区大多分布在NE向和NW向两组断层交汇部位以及褶皱轴部和倾伏端。

地下水活动是岩溶塌陷产生的主要动力。地下水位的频繁升降会引起地下水水力坡度的变化,导致地下水的冲刷、潜蚀能力发生相应的变化,产生渗透潜

① 收稿日期:2006-12-22 作者简介:钱建平(1953-),男,教授,主要从事构造地质与地球化学方面的研究。
基金项目:广西高校人才小高地创新团队建设项目资助。

维普资讯 http://www.cqvip.com

蚀作用；可以改变上覆土体的含水量、性状和强度，促进土体崩落；可以引起地下岩溶及土洞空腔内的正负压力的交替变化，使周围岩石土体失稳，并导致气爆致塌或真空吸蚀致塌作用[6~8]。地下水位波动频度愈高，地面塌陷愈易产生。在地下水强径流带，地下水的冲刷、潜蚀能力相应增强，塌陷分布亦较为密集。因此，塌陷多分布于地下水、地表水活动频繁的地带，尤其分布在河道、池塘及干渠两侧约50m范围内。受抽排地下水影响而产生的塌陷一般分布在抽水井的周围，其中分布在开采点周围50m范围内的塌陷约占抽水引起塌陷总数的70%[4]。

人类工程活动亦是岩溶塌陷产生的重要影响因素。一般而言，在人类工程活动愈频繁、活动强度愈大的地区，塌陷产生的数量愈多、规模愈大。人类工程活动类型的主要形式有抽水、振动、堆载、开挖，其中尤以抽水影响最大。总体上看，岩溶塌陷具有逐年递增的趋势，反映着随着城市建设规模的不断扩大，人类工程活动强度、频度和范围也急剧增大，进而对自然岩溶塌陷过程起着诱发或加速的作用。

在时间上，岩溶塌陷多发生于冬、春两季，对439个塌陷（占总数67.1%）的统计表明，冬、春两季分别占32.6%和40.1%；夏、秋两季仅占12.1%和15.3%[2]。这是由于春季是桂林的雨季，有大量地表水补给地下水，冬季则是桂林的枯水季节，抽取地下水的强度加大，二者均易导致地下水位、土体性状和洞穴空腔压力的显著变化。

1.2 岩溶塌陷的成因类型

桂林地区的岩溶塌陷从成因上可分为自然塌陷和人为塌陷[1]。

自然塌陷主要是由潜蚀作用形成的，在地势较低、地下水位较浅的地区，土壤层下伏的基岩有着发育的溶洞、溶隙等空洞，地表水的下渗或渗流作用使土层底部被潜蚀，土粒被带入溶洞或溶隙中，形成土洞，而土洞逐渐向上发展引起地面塌陷。如近年发生的穿山村塌陷、依仁路塌陷等均属此类型。

人为塌陷是在岩溶洞穴的基础上由于人类工程活动而引起的塌陷，如抽取地下水、地表水下渗、排放工业或生活废水、工程荷载、爆破振动等均可引起塌陷。桂林市岩溶塌陷以人为塌陷为主。按其成因可分为：

(1)抽取地下水引起地面塌陷。频繁抽取地下水作为工农业和生活用水，引起地下水水位的反复升降，加剧了侵蚀作用，从而导致地面塌陷。据统计，因抽水引起的塌陷占全市总塌陷点(处)的39.4%，占人为塌陷点(处)总数的88.3%[1]。如桂林市南茶店村、龙门砖厂、大凤山发生的塌陷均属此类型。

(2)工业废水下渗引起的塌陷。下渗的工业废水往往含有大量腐蚀性的物质，使土体受到强烈潜蚀并促使土体强度下降，导致土洞发育。如桂林第二造纸厂和大凤山化工厂两处，10余个规模较大塌陷坑属此类型。桂林市第二造纸厂废液含盐酸，每日平均有15m^{3}的废液渗入车间外的地下，连续七年后，地面出现塌陷，最大一次塌陷使得离子混合罐倾倒，造成惨重的损失[9]。

(3)振动或加载引起的塌陷。这类塌陷是在原有土洞基础上，由于振动或上部负荷增加、破坏土体平衡所致，常见于钻探桩基工程施工地段。另外，在公路、铁路附近，由于车辆长期往返震荡，使土体失稳而造成塌陷，如桂梧高速公路临桂县会仙镇附近的塌陷群属此类型。

1.3 岩溶塌陷的危害

岩溶塌陷给工农业生产、城市建设及人民生命财产等方面造成了严重危害。它表现在：

(1)会造成房屋倒塌和破坏，造成人员伤亡，甚至诱发地震。由于许多塌陷主要由人类工程活动诱发引起，因而在人口密集的地方发生的频数增高，使人民生命和财产蒙受损失。如1996年初，市中心体育场的岩溶塌陷造成了数百万元的经济损失[2]；1997年底，市郊柘木村因疏通漓江河道炸礁爆破的振动作用诱发了岩溶塌陷，于数日内出现的塌陷近40个，全村116户居民中的86户房屋遭受不同程度的损坏，其中倒塌1户，严重危房须拆除重建的5户，直接经济损失200多万元[10~11]；1999年1月，临桂县某粮库发生数起塌陷，80t粮食受损[4]；2005年，桂林灵川县三街镇一农民的房屋内，塌陷出一个深达10余米的大洞，以该洞为中心的3000m^{2}范围内居民的房屋、地面也不同程度地出现裂缝，致使5户居民被迫迁移。

(2)危害工农业生产。岩溶塌陷会造成厂房及设施的破坏，使已有的建筑格局严重走样，并使得工程建设场地等级、地基等级复杂程度提高，地基处理费用大大增加。岩溶塌陷也会毁坏农田、灌渠、鱼塘等，影响正常的农业生产。特别是，岩溶塌陷还会对城市交通和地下管线(如通讯、水电等)构成极大的威胁，如桂梧高速公路的临桂县会仙镇马面村以南约2km处发现有85个塌陷溶洞，分布在2km长的新辟路基上，直径在1～10多米，深度在1～3米多。修复此塌陷群而使此段公路的修建耗资巨大。

(3)污染地下水。塌陷发生后，地表污水沿塌陷坑

维普资讯 http://www.cqvip.com

渗水通道灌入地下水系，会直接污染了地下水。

2 岩溶塌陷的防治

对岩溶塌陷防治必须坚持预防和治理相结合的方针，做到预防为主、防治结合、标本兼治，并且首先应从预防入手(表1)。

表1 岩溶塌陷的防治原则和措施

Table 1 Principles and measures for protecting karst collapse

防治原则	防治措施
(1)建筑工程勘察设计过程中，要认真地研究环境工程地质条件，避开塌陷不稳定区或严重渗漏区，选择稳定性较好的场地用于工程建设	(1)通过工程地质测绘和调查、钻探、物探和有关的试验，查清建筑场地引起塌陷的可能性和场地的稳定性，并做出评价
(2)由于某些特定因素决定，必须把建设场地选择在稳定性较差的场地时，要提出经济合理的治理方案，经过充分论证后，提出最优化的方案	(2)建(构)筑物宜布置在环境工程地质条件好的地区，绕避塌陷区，
(3)要事先做好建筑场地塌陷的预测，避免因塌陷灾害而威胁地面建(构)筑物的稳定和人民生命财产安全	(3)对于某些不可绕避的塌陷区，要采取适当的措施进行治理。当水文地质条件有利时，可采取压力灌浆的方法进行帷幕灌浆，解决场地不稳定或渗漏等问题
(4)对于开采地下资源(含矿床开采)而进行抽排水或掘进等，引起了矿坑涌突水时，应及时采取适宜的防治措施，加以排除，以保证顺利进行资源开发。尽可能采取疏导，不得已时方考虑堵截方案	(4)对于相对封闭的岩溶网络地段，可设置通气孔，以防止产生负压(真空吸蚀或高压冲爆)作用，把钻孔打入岩溶通道并下入钢管或铸铁管使之与大气连通，也可利用塌陷坑来埋设通气管
(5)在开采深部岩溶水的抽取或排放时，要合理控制地下水的下降速度，尽可能远离降落漏斗中心地段布置建筑物；地下水开采的布置要合理，防止乱采乱抽，要加强水资源管理	(5)条件适宜时，可把基础直接放置在稳定的基岩上，否则可利用桩基
(6)防止场地地面积水，避免地表水大量下渗，减少和杜绝地下水位在基岩面附近波动	(6)合理选择和布置水源地，井管结构采用必要的过滤措施。防止抽水过程中淘刷土体颗粒
(7)要持续进行地下水观察点站的监测工作，避免中断，勘察工作结束时，要做好移交工作	(7)对已产生塌陷的地区和土洞，要进行填堵，当填堵无效或不经济时，再考虑其他较经济合理的治理方法
(8)必要时，在设计中采用抗塌结构	(8)有条件时可采用直梁、拱梁和八字梁、筏板的方法跨越经过处理的地面塌陷坑
(9)注意地方塌陷及其预测资料的积累和整理建档，防止零散和遗失。	(9)对于土层较厚、已有较多塌陷的建筑场地，宜采用强夯的办法将塌坑分层填塞夯实

注：据万志清等人资料的参考[1]

2.1 岩溶塌陷的预防措施

岩溶塌陷的预防是指在查明塌陷成因、影响因素的基础上，为消除或消减塌陷发生、发展主导因素的作用而采取的措施。如调整抽排水方案、设置完善的排水系统、建立监测网(对水点、地面、建筑物及塌陷前兆现象进行监测)、工程选址时避开岩溶塌陷发育且尚有活动迹象的地段等。

开展岩溶塌陷调查、详查和监测工作，掌握塌陷区的地质结构、岩溶发育状况、富水特征及塌陷发育规律。选择有效的新技术、新方法如地质雷达、浅层地震、电磁波、声波透视(CT)、高密度电法及瞬变电磁法等为代表的综合物探方法，形成能对岩溶塌陷迹象进行有效探测、识别的探测技术[12~14]。

根据勘查资料，力求科学合理地进行城市建设总体规划。在岩溶分布区建设重要建筑物时，必须在选址阶段进行以岩溶塌陷为主的地质灾害危险性评估分级。对可能继续发生岩溶塌陷的地段进行预测，划定潜在危险区，并使规划中的重要建筑物尽量避开易塌陷区。在岩溶地面塌陷易发区制定防治方案，及时采取措施进行综合治理，减轻灾害造成的经济损失。修建建筑物时，应避开低洼地段，尽可能建在高处[18]。在难以变动场地的岩溶发育地段布置工程时，必须对地基进行详细的勘察和严格的处理(桩基、加固、充填、架桥、高压灌注、封堵水源及排导等)。若须设置载荷大(如高层建筑、水库等)、振动强(如车站等)的工程，必须坚持清基处理，工程应砌置在牢固的基岩上。

在塌陷区及其附近，避免开山放炮，因为放炮引

维普资讯 http://www.cqvip.com

起的地下震动有气压、液压的传布与冲击，其较地震的破坏性更大。

合理地抽排地下水。地下水供水水源地的抽水井宜选远离工业区、生活区及铁路线的地点。在主要开采井点中心的100～200m范围内，不宜有重要建筑物，以减轻对建筑物的破坏和人民生命财产的危害。确定允许开采水量，开采井的布置以区域上分散、开采区集中为宜，使区域水位均匀变化。尽量避免开采浅层岩溶地下水，可用套管把浅部岩溶发育段隔住，只抽取深部岩溶水。这是因为大多数抽水引起的岩溶塌陷都与60～70m以内的浅层岩溶地下水抽取有关。抽排地下水的井(孔)要根据岩溶充填物和第四系土层的颗粒级配来选择过滤器的类型和规格，避免或减少土粒迁移进入井内被水带走[15]，导致洞腔体扩大，引起塌陷的发生。控制抽水强度，应禁止或限制过量抽取地下水，避免水动力条件发生急剧变化，破坏岩体应力平衡状态而导致地面塌陷。合理控制水位降深值，将地下水位降深值控制在临界值以内，即小于覆盖土层深度，降低地下水对岩溶充填物和土层的潜蚀搬运能力，达到减少塌陷的目的。在抽水过程中，要由小到大，使地下水位缓慢下降，尤其在经过土层与基岩接触带附近时，地下水位下降速度要慢且平稳，避免因地下水位快速下降而产生渗透力致塌、负压致塌、失托增荷致塌等作用[16]。采用持续抽水方式，避免因间歇性抽水而引起地下水位的频繁升降，加剧地下水在覆盖土层与基岩接触带上的潜蚀冲刷作用，导致塌陷产生。做好久旱后初期暴雨的地表排水工作，以减少土洞顶板因浸水而增加土体自重力，破坏其稳定状态而产生塌陷。

加强对工业废水和生活污水的处理力度，切实搞好沟道排水工程，尽量防止或减少工业废水和生活污水在岩溶地下管道内的排放、停滞、浸泡、下渗、溶蚀等作用，避免由此而引起排放区土层性质改变或岩溶地下管道洞腔扩大及相关联的化学溶蚀塌陷。

与此同时，在岩溶塌陷发育区，建立由地下水动态监测、孔隙水压力监测[7]、地面沉降与变形监测、地球物理探测和遥感技术监测等组成的综合岩溶塌陷监测网点，进行长期监测。通过地下水动态观测，及时发现降落漏斗形成与扩展，掌握水位、水量、水质、水色动态变化规律，在抽水过程中若有泥沙出现，水量忽大忽小，变化异常，说明有充填或半充填的岩溶水进入井内，此时应停止抽水[15]。

在以上工作基础上，建立数学分析预测系统和全自动化的预警预报监测系统。如在桂林市柘木塌陷区，岩溶地质研究所就建立了国内第一个自动采集数据的岩溶塌陷监测站，利用国内外先进的监测仪器对岩溶塌陷进行监测预报。研究表明，就柘木研究区的地质条件而言，对由地下水引发的岩溶地面塌陷，采用岩溶管道裂隙系统中的水(气)压力传感器自动监测技术，再辅以地质雷达和光导纤维等技术来监测岩溶塌陷，是行之有效的。地质雷达监测费用昂贵，适用于短距离、小范围监测；光纤监测法适用于各种线状工程监测；岩溶管道裂隙中的水(气)压力传感器自动监测法则适用于由地下水触发的塌陷的监测[17]。

2.2 岩溶塌陷的治理措施

岩溶塌陷的治理主要是针对塌陷发育的基本要素如岩溶洞隙、土体、含水层等分别进行堵截水流、强化土层和洞穴充填物、填堵岩溶通道等工程措施。具体方法主要有清除填堵法、地表封闭处理、跨越法、强夯法、深基础法、灌注法、控制抽排水强度法、疏排围改综合治理法、恢复水位法和钻孔充气等。[18]

(1)清除填堵法　及时回填新、老地面塌陷，避免陷坑对周边地面的牵连性变形破坏。首先清除塌陷土层直至基岩，然后自下而上地回填块石、碎石、粗砂、粘土，做成反滤层，再进行灌浆固结。如在上部建筑房屋时，一般还需用梁板跨越，同时加强上部结构的整体刚度。

(2)强夯法　用强夯法加固土层。表土经过强力夯实后，降低压缩性，增加密实度，提高土层的强度，有利于拱的平衡，进而增加了稳定土层的厚度，能减少或避免塌陷的发生。强夯法还可以破坏土层中尚未发展到地面的洞穴，消除隐患，达到处理的目的。

(3)深基础法　对于一些深度较大，跨越结构无能为力的土洞、塌陷，通常采用桩基将荷载传递到基岩上[19]。

(4)恢复水位法　采取地下水人工回灌、恢复地下水平衡状态或停用取水水源来抑制塌陷的发展。但应注意回灌水质符合标准，以防污染地下水水质。从根本上清除因地下水位下降造成地面塌陷的病源。

(5)灌注法　对砂性土土洞而言，则需通过钻孔填实空洞或加固扰动土层，并灌浆封盖下面的岩溶管道开口。

(6)钻孔充气法　对粘性土的土洞而言，其洞腔上覆土层有一层密封性能良好的粘土存在，则在抽水之前，应先从地表打通一个连接地下洞腔的排气孔或安装一根排气管，采用“堵水不堵气”或“通气泄水”等减压特置处理，避免人为构成或恢复气爆条件，防止抽水停止时地下水位迅速上升而产生气爆致塌。

维普资讯 http://www.cqvip.com

(7)修筑围堰法　规模较大的塌坑，往往反映其下岩溶强烈发育，一般很难根治。可构筑土堤将塌陷区圈起来，防止洪水对汇水区塌洞的径流补给。

在具体治理时，防治方法要结合区内塌陷的成因、致塌模式及主控因素来进行合理的选择，以确保防治工作的效果。

参考文献：

[1] 万志清，秦四清，祁生文. 桂林市岩溶塌陷及防治[J]. 工程地质学报，2001，9(2)：199-203.

[2] 王年生. 自然因素、抽水因素与岩溶塌陷的关系[J]. 西部探矿工程，2006，(5)：281-282.

[3] 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.

[4] 刘宝臣，宋庆生，陈学军，等. 桂林市西城区岩溶塌陷特征分析[J]. 地质灾害与环境保护. 2000，11(3)：200-203.

[5] 朱寿增，周健红，陈学军. 桂林市西城区岩溶塌陷形成条件及主要影响因素[J]. 桂林工学院学报，2000，20(2)：100-105.

[6] 王柳林，高武振. 桂林市西城区地下水活动与岩溶塌陷的关系[J]. 桂林工学院学报，2000，20(2)：106-111.

[7] 蒋小珍. 岩溶塌陷中水压力的触发作用[J]. 中国地质灾害与防治学报，1998，9(3)：43-47.

[8] 苏维词. 贵州主要城市的岩溶塌陷灾害及其防治[J]. 水文地质工程地质，1998，(3)：40-42.

[9] 缪钟灵，宗凤书. 桂林岩溶塌陷风险评价[J]. 中国地质灾害与防治学报，1995，6(2)：58-66.

[10] 冯佐海，阵南春，韦继武. 桂林市柘木岩溶塌陷成因及其分布的基本特征[J]. 中国地质灾害与防治学报，1998(3)：85-89.

[11] 雷明堂，蒋小珍，李瑜. 桂林市柘木镇地面塌陷成因机制[J]. 中国地质灾害与防治学报，1998(增刊)：432-435.

[12] 雷明堂，蒋小珍. 岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J]. 中国地质灾害与防治学报，1998，9(3)：1-6.

[13] 唐大荣. 地面岩溶塌陷的高分辨地震勘查[J]. 物探与化探，1994，18(1)：35-39.

[14] 盛玉环. 岩溶塌陷的勘察与防治[J]. 岩土工程界，2004，7(4)：72-74.

[15] 朱真. 广西岩溶塌陷特征及防治对策[J]. 水文地质工程地质，2002，(3)：75-76.

[16] 余业雄，欧阳振华. 地下水位下降引起地表塌陷的作用机理研究[J]. 露天采矿技术，2005(3)：20-22.

[17] 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.

[18] 莫家光. 广西岩溶塌陷的危害及其防治措施[J]. 中国地质，1990，17(4)：24-25.

[19] 殷和平. 矿区岩溶塌陷及治理[J]. 西部探矿工程，2001(4)：124-125.

Basic characteristics of karstic collapse in Guilin city and its prevention countermeasures

QIAN Jian-ping

(*Department of Resource and Environmental Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin* 541004, *China*)

Abstract: The distribution of karstic collapses are mainly controlled by geomorphic feature, strata lithology, structure, groundwater movement and manmade factor in Guilin. The genetic types can be divided into natural collapse and manmade collapse. Manmade collapses are mainly caused by pumping, wastewater seepage, loading and vibration. This paper expounds the basic characteristics of the karstic collapses, and proposes the Prevention countermeasures.

Key Words: geologic hazard, karstic collapse, summarize, groundwater, Guilin