

潘宗源,陈学军,杨鑫,等.湖南郴州地区岩溶塌陷分布规律及其影响因素浅析[J].中国岩溶,2021,40(2):221-229.
DOI:10.11932/karst20210203

湖南郴州地区岩溶塌陷分布规律 及其影响因素浅析

潘宗源^{1,2},陈学军¹,杨鑫¹,宋宇¹,张铭致¹

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质调查局岩溶塌陷防治重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:通过地质环境调查,分析湖南郴州地区岩溶塌陷分布规律及其影响因素,结果表明:(1) 1980-1983年为岩溶塌陷盛发期,平均8.5个·年⁻¹;2012-2020年塌陷发生频率增加,平均5.88个/年;岩溶塌陷主要发生在3-7月份雨季;(2)低丘冲沟中发生塌陷54个,占塌陷总数的55.67%;岩溶平原中发生塌陷40个,占41.24%。97个岩溶塌陷主要发生在石炭系壶天群及泥盆系中统棋梓桥组下段地层;塌陷区域多为断裂构造带及褶皱轴部;(3)冲洪积成因土层共发生岩溶塌陷58个,占塌陷总数的59.79%,而残坡积成因土层发生塌陷39个,占40.21%。粉质黏土层发生塌陷数量多于黏土层,而粉质黏土与卵石土,粉质黏土、淤泥质黏土和砂土等组合土层分布面积较小,发生数量偏少。单层结构土体发生岩溶塌陷63个,占总数的64.94%;双层结构与多层结构土体发生塌陷数量占比35.06%。土层厚度小于10 m的区域发生岩溶塌陷48个,占总数的49.48%;土层厚度为10~15 m的区域发生塌陷49个,占总数的50.52%;(4)本地区浅部岩溶强发育,覆盖层薄且力学性能较弱,满足发生岩溶塌陷的基本条件;城市供水和采矿开采地下水是岩溶塌陷的主要触发因素。

关键词:郴州;岩溶塌陷;时空分布特征;岩溶地下水开采

中图分类号:P642.25 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2021)02-0221-09 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶塌陷是岩溶地区常见的地质灾害,在全球各地如美国^[1]、土耳其^[2]、西班牙^[3]及加拿大^[4]等国家地区都有发生并造成严重的损失。岩溶塌陷是岩溶洞隙上方岩土体在自然或人为因素作用下,发生变形破坏而在地表产生陷落坑的岩溶动力地质作用现象^[5],其形成条件和分布规律是广大学者都普遍关注的问题^[6-7]。陈亮晶等^[8]通过对地质环境条件及岩溶

塌陷时空分布特征的分析,总结出湖南宁乡大成桥地区岩溶地面塌陷的分布特征和影响因素。花修权等^[9]基于调查成果,研究了徐州岩溶塌陷、采空塌陷和地面沉降的分布特征、发育规律、危害和形成条件。杨云丽等^[10]研究指出黔中高原台面的岩溶塌陷多分布在浅覆盖层岩溶区,地下水是最主要的触发因素。查甫生等^[11]分析铜陵市朝山地区岩溶塌陷过程,认为断裂构造、地层岩性、土层结构及矿山排水等因素控制了岩溶塌陷的分布。目前为止,不少学

基金项目:广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA294020);国家自然科学基金项目(41967037;41877300;41402284);中国地质调查局地质调查项目(DD20190266)

第一作者简介:潘宗源(1987-),男,博士研究生,助理工程师,主要从事灾害地质与岩土工程方面的研究。E-mail:zypan880@163.com。

通信作者:宋宇(1981-),女,博士研究生,副教授,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:songyu119@126.com。

收稿日期:2020-11-10

者对岩溶塌陷的分布规律和影响因素等做了大量的研究分析工作,但由于客观地质环境条件具有区域性和属地性,因此得出的结论也不尽相同。

郴州位于湖南省东南部,碳酸盐岩分布面积为 137.2 km²,总体呈北东向条带展布,占区域总面积的 1/3 以上。从 20 世纪 50 年代开始,由于城市供水与矿产资源开发利用的需求,石炭系壶天群等地层岩溶地下水被大量抽排而形成地下水降落漏斗,引发大规模的岩溶塌陷^[12]。至 80 年代末,郴州市政府出台了一系列地下水停采、限采的政策,且随着东江引水工程的竣工和投入使用,在一定程度上缓解了区内岩溶塌陷频发的问题。但郴州总体上岩溶发育程度较高,地质条件脆弱,当环境条件发生变化,尤其是开采地下水超过最大允许量时,岩溶塌陷仍有发生的可能。前人研究多从不引起岩溶塌陷危害的地下水安全开采量,以及典型矿区岩溶塌陷的形成条件和影响因素等方面展开研究,对郴州地区岩溶塌陷分布规律及其影响因素的分析还有不足^[13-14]。本文依托中国地质调查局地质调查项目(DD20190266),研究郴州地区岩溶塌陷的分布规律及其影响因素,

以期为进一步研究其成因机制和制订防治对策提供科学依据。

1 研究区概况

研究区总体地势为南高北低、东高西低,中部山麓地带为花岗岩侵入岩体,偷营山、王仙岭、千里山等山峰耸立。区内东南部、南部为侵蚀构造高中山地貌,北部为构造剥蚀丘陵地貌,西部、西南部为溶丘谷地地貌。区内海拔在 190.0~1913.8 m,其中最低处为郴州市区郴江河谷,绝对高程为 190 m,海拔最高处为区内东南角狮子口山,绝对高程为 1913.8 m。如图 1 所示,震旦系、寒武系等地层主要分布在区内东部和东南部,泥盆系集中在南部,中部为印支期及燕山期侵入岩体,石炭系则分布于西部。区内碳酸盐岩地层从新到老序列为二叠系下统栖霞组(P_1q)、石炭系上统船山组(C_3c)、石炭系中统黄龙组(C_2h)、石炭系下统大塘阶梓门桥段(C_1d^3)、石炭系下统大塘阶石磴子组(C_1d^{1-2})、石炭系下统岩关阶第四段(C_1y^4)、石炭系下统岩关阶第二段(C_1y^2)、泥盆系上统锡矿山组下段(D_3x^1)、泥盆系上统余田桥组(D_3s)及泥

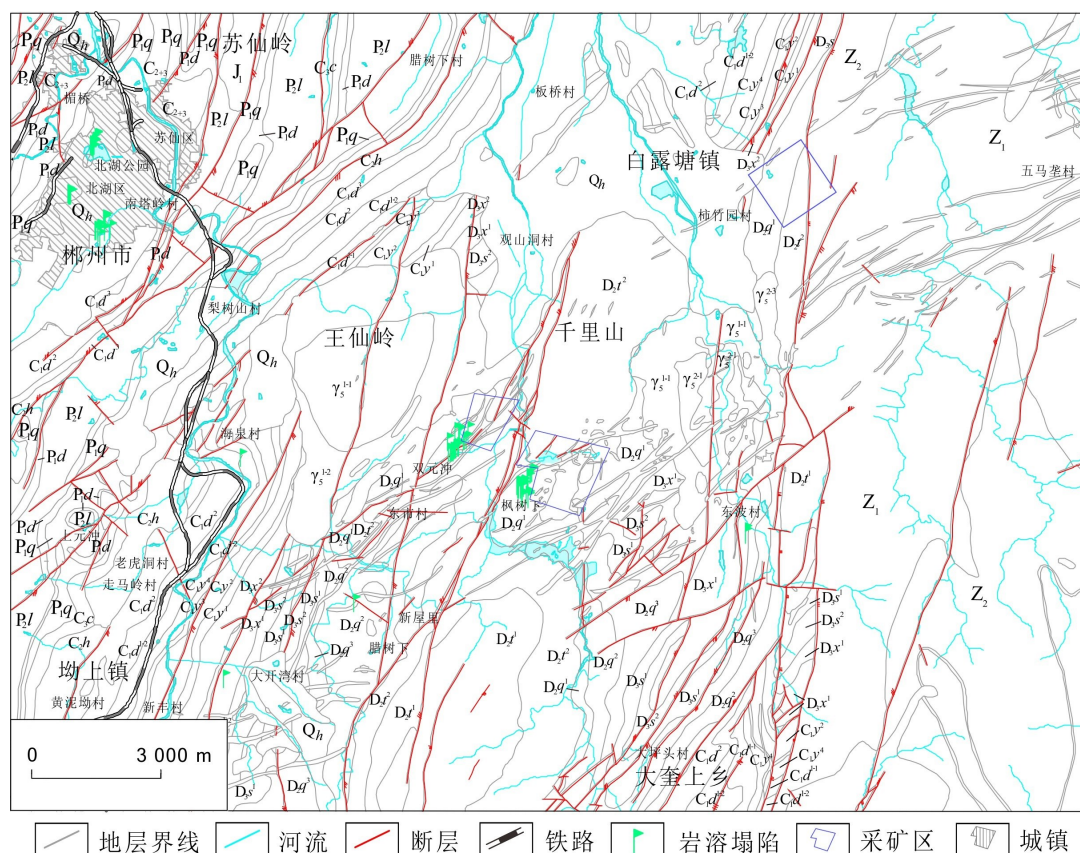


图 1 研究区环境地质条件概况

Fig. 1 Environmental and geological conditions of the study area

盆系中统棋梓桥组(D_2q)。区内岩溶主要分布在郴州市西部及坳上镇一带,呈连续带状展布,溶沟、溶槽、石牙、落水洞等地表岩溶形态星罗棋布。在岩溶含水层组和富水性方面, D_2q 、 D_3x^1 、 C_1y^2 、 C_1y^4 、 C_1d^{1-2} 以及 C_3c 、 C_2h 、 D_3s 等地层为岩溶强发育,富水性强; P_1q 和 C_1d^3 等地层岩溶发育中等,富水性中等。研究区位于南岭东西向构造带中段,桂阳—郴县东西向构造带与酃县—汝城南北向构造带在此相交,属湘东新华夏系茶陵—永兴拗陷带与资兴—宜章褶断带又斜穿全区。经查明,区内主要构造有五盖山—偷营山复式背斜,香山坪—升桥铺压扭性断层、东坡复式向斜、五盖山压性断裂、王仙岭压性断裂等。

研究区属亚热带季风气候,年均气温为 $17.8\text{ }^{\circ}\text{C}$;区内降雨充沛,但年内降雨分配不均,每年3—7月份降雨较多,年降雨量范围在 $1\,029.5\sim 2\,209.4\text{ mm}$,多年平均降雨量为 $1\,503.4\text{ mm}$,月最大降雨量为 712.3 mm 。

2 岩溶塌陷分布规律

2.1 时间分布规律

区内岩溶塌陷发生时间最早可追溯至20世纪70年代,最近发生于2020年,时间跨度长达近50年(图2)。20世纪70年代共发生岩溶塌陷3个,平均 $0.3\text{ 个}\cdot\text{年}^{-1}$ 。1980—1983年为岩溶塌陷盛发期,共发生塌陷34个,平均 $8.5\text{ 个}\cdot\text{年}^{-1}$,其中1982年岩溶塌陷数量达25个。20世纪90年代至2010年岩溶塌陷时有发生,但数量较少且各年内分配均衡。2012年后研究区内发生岩溶塌陷数量明显增加,至2020年7月止共发生塌陷53个,平均 $5.88\text{ 个}\cdot\text{年}^{-1}$,尤其在2013年和2019年塌陷数量最多,分别为16个和10个。结合区内人类工程活动可知,岩溶塌陷与抽排地下水活动密切相关,随着地下水开采程度不同,岩溶塌陷发生的频度和范围也随之变化。

由图3可知,区内岩溶塌陷主要发生在雨季3—7月份,其余时段呈零散分布。其中,春季(1—3月)共发生岩溶塌陷26个,占总数的26.80%;夏季(4—7月)共发生塌陷54个,占总数的55.67%;秋季(8—10月)共发生塌陷11个,占总数的11.34%;冬季(11—12月)共发生塌陷6个,占总数的6.19%。经调查,每年3—6月是湖南的雨季,在降雨和地表水补给下地下水位会频繁升降,隐伏土洞在地下水作用下快速发育,最终发生地面塌陷。

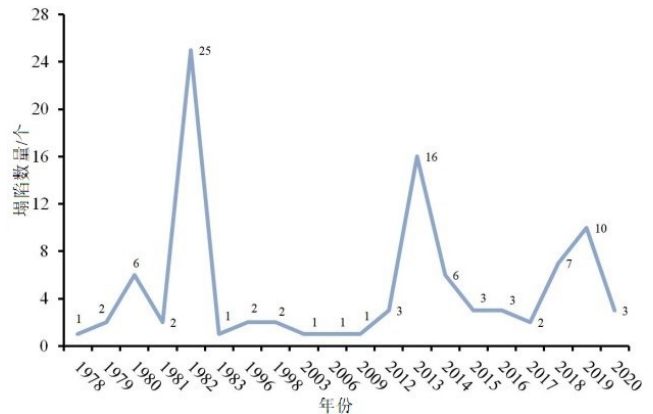


图2 岩溶塌陷年份分布规律

Fig. 2 Annual distribution of sinkholes

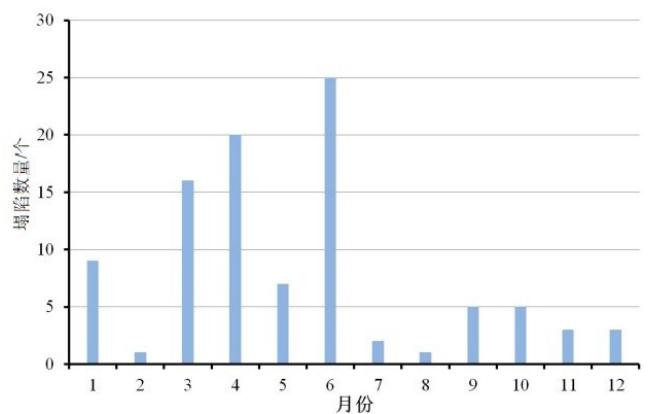


图3 岩溶塌陷月份分布规律

Fig. 3 Monthly distribution of sinkholes

2.2 空间分布规律

岩溶塌陷分布具有区域性和聚集性,部分集中在苏仙区北湖实验中学、卷烟厂和北湖公园等地附近(图4),总影响面积达 1.27 km^2 ,塌陷发生时间较久远,已进行回填处置。另有部分岩溶塌陷分布在东市村枫树下和双元冲一带(图5),呈条带状展布,占塌陷总数的一半以上。该处岩溶塌陷仍处于活跃期,在采矿排水过程会频繁发生。此外,在研究区西南部坳上镇大开湾村、海泉村,以及东南部白露塘镇东波村等地呈零散分布。

2.2.1 地形地貌

研究区岩溶塌陷主要分布于低丘冲沟、岩溶谷地和河谷平原等地貌单元(表1)。其中54个塌陷分布于低丘冲沟中,占塌陷总数的55.67%,塌陷密度为 $0.55\text{ 个}\cdot\text{km}^2$;3个岩溶塌陷发生于岩溶谷地中,占塌

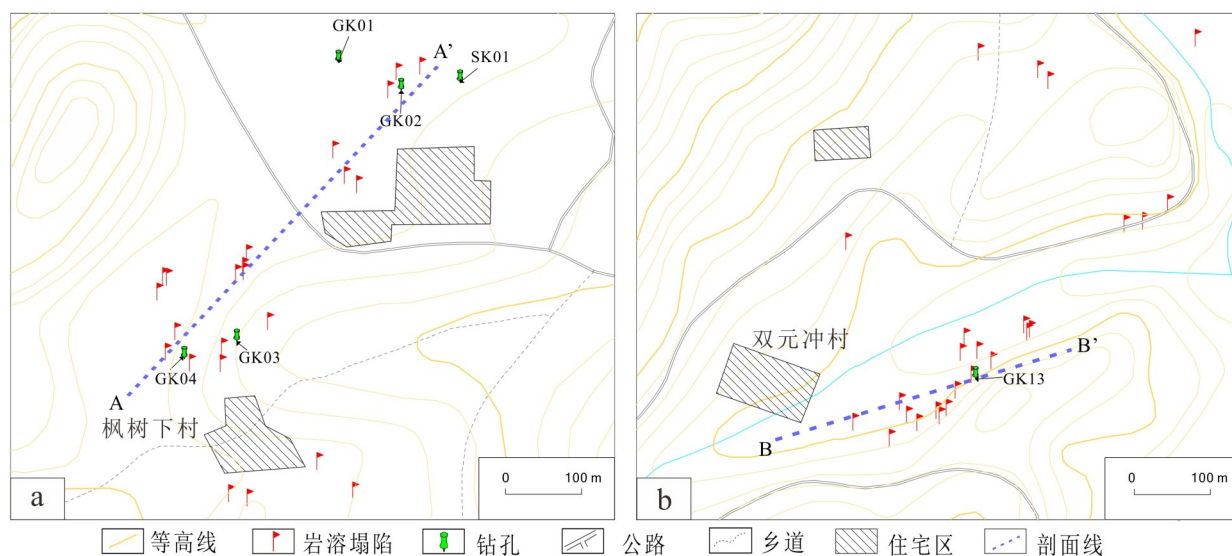


Fig. 4 Distribution characteristics of sinkholes in typical areas

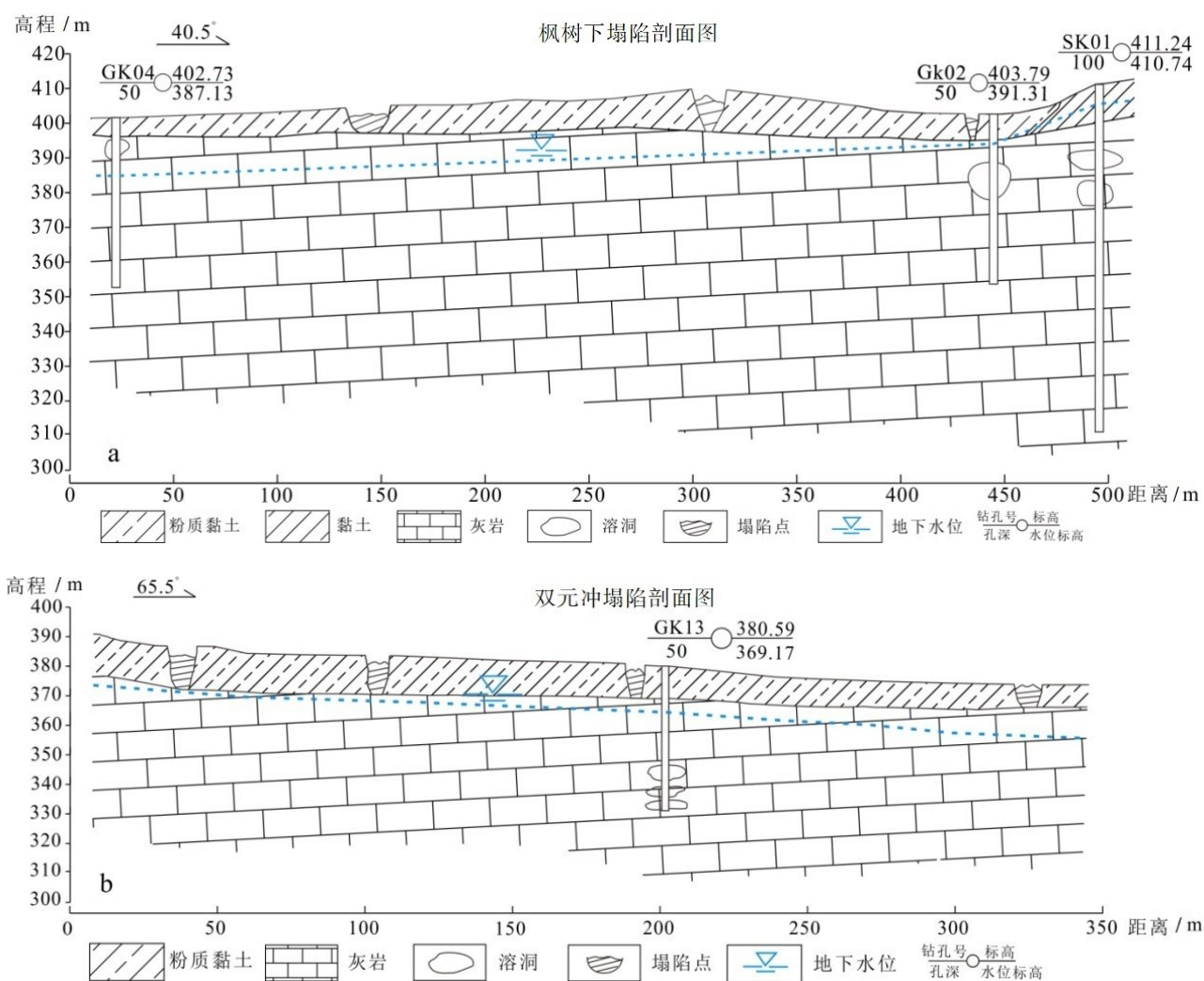


Fig. 5 Longitudinal profile of hydrogeology in typical areas

表 1 不同地貌单元岩溶塌陷的分布规律

Table 1 Distribution of sinkholes in different landform units

地貌单元	面积/km ²	塌陷数量/个	塌陷密度/ 个·km ²	塌陷比 例/%
低丘冲沟	98.55	54	0.55	55.67
岩溶谷地	65.54	3	0.05	3.09
河谷平原	25.93	40	1.54	41.24

陷总数的 3.09%,塌陷密度为 0.05 个·km²;40 个岩溶塌陷发生于河谷平原中,占塌陷总数的 41.24%,塌陷密度为 1.54 个·km²。可见低丘冲沟地区易发塌陷,其次为河谷平原地貌单元。经分析是由于地表水和大气降雨容易在低丘冲沟和河谷平原区域汇聚和下渗,土体饱水后力学性能降低,加上地下水的机械冲刷作用,导致该区域易发岩溶塌陷。

2.2.2 地层岩性

由表 2 可知,区内 97 个岩溶塌陷主要发生在石炭系壶天群(C₂₊₃)及泥盆系中统棋梓桥组下段(D₂q¹)地层,其余地层中分布较少。其中,C₂₊₃中发育岩溶塌陷 40 个,占塌陷总数的 41.24%;D₂q¹中共发生岩溶塌陷 51 个,占塌陷总数的 52.58%;其余碳酸盐岩地层,如 C₁d¹⁻²、D₃x¹、D₂q²和 D₃s¹⁻²等,共发生岩溶塌陷 6 个,占塌陷总数的 6.18%。与地质勘探成果结合分析,C₂₊₃和 D₂q¹地层基岩埋深较浅且岩溶发育,这是岩溶塌陷主要分布于该地层的重要原因。

表 2 不同地层岩性岩溶塌陷的分布规律

Table 2 Distribution of sinkholes in different strata and lithologies

地层代号	岩性特征	塌陷数量/个	塌陷比例/%
C ₂₊₃	灰岩夹白云岩	40	41.24
C ₂ d ¹⁻²	灰岩	2	2.06
D ₃ x ¹	灰岩、云灰岩	1	1.03
D ₂ q ²	生物屑云灰岩	1	1.03
D ₂ q ¹	白云岩夹灰岩	51	52.58
D ₃ s ¹⁻²	泥灰岩与灰岩互层	2	2.06

2.2.3 地质构造

区内岩溶塌陷主要分布在断裂构造带及褶皱轴部,整体呈线性分布于西南部的周家压扭性断裂带、围子湾—兆吉洞压扭性断裂带,中部的厚泉湾压扭

性断裂带与玛瑙山压扭性断裂带,以及北西部的普庄—五里堆弧形压性断层带等构造带。褶皱构造主要有五盖山复式向斜和东波复式向斜等构造部位。断裂带和褶皱构造等部位的岩土体受构造应力挤压而变得破碎,更容易被地下水冲蚀和掏空形成土洞,因此该部位形成的岩溶塌陷常具有沿构造带呈线状展布的特点。

2.2.4 土层特征

由表 3 可知,易发岩溶塌陷的土层成因可分为残坡积和冲洪积两种,其中残坡积成因土层发生塌陷 39 个,占塌陷总数的 40.21%;冲洪积成因土层发生塌陷 58 个,占塌陷总数的 59.79%。在土层特性方面,岩溶塌陷主要发生在黏土和粉质黏土层中,其中黏土类土层发生塌陷 26 个,粉质黏土类土层发生塌陷 37 个,两者分别占塌陷总数的 26.80%和 38.14%;在粉质黏土与卵石土,粉质黏土、淤泥质黏土及砂土的土层组合中分别发生岩溶塌陷 18 个与 16 个。此外,土层结构可分为单层结构、双层结构和多层结构,其中单层结构为黏土或粉质黏土层;双层结构土体的上部为粉质黏土,下部为卵石土;多层结构中从上至下依次为粉质黏土、淤泥质黏土和砂土。研究区内单层结构土体发生岩溶塌陷 63 个,占塌陷总数的 64.95%;双层结构土体发生岩溶塌陷 18 个,占比为 18.56%;多层结构土体发生塌陷 16 个,占比为 16.49%。单层结构土体中以粉质黏土发生岩溶塌陷较多,这是由于粉质黏土由于夹细砂与角砾较多,粒间黏聚力较黏土层低,更容易在地下水与地表水渗流作用下被掏空而产生塌陷;而双层与多层结构土体分布面积较小,发生塌陷数量亦少。在土层厚度方面,塌陷分布区土层厚度均小于 20 m,仅郴州市城区南部及东部部分区域土层厚度超过 20 m。经统计,土层厚度小于 10 m 区域发生岩溶塌陷占塌陷总数的 49.48%,其中土层厚度为 5~10 m 区域发生塌陷共 25 个,占比为 25.77%;土层厚度为 0~5 m 区域发生塌陷共 23 个,占比为 23.71%。而土层厚度为 10~15 m 区域发生塌陷 49 个,占比为 50.52%。可见土层厚度小于 15m 的区域易发生岩溶塌陷,这是因为薄层土体往往不满足土洞发育自稳平衡拱最小顶板厚度的要求,因此土洞可以持续发育最后形成塌陷。而 10~15 m 土层厚度中多为双层结构和多层结构土体,故 10~15 m 土层厚度发生塌陷数量居多。

表3 不同土层特征岩溶塌陷的分布规律
Table 3 Distribution of sinkholes in different soil beds

土层特征	类型	塌陷数量/个	塌陷比例/%
土层成因	残坡积	39	40.21
	冲洪积	58	59.79
土层特性	黏土	26	26.80
	粉质黏土	37	38.14
	粉质黏土+卵石土	18	18.56
	粉质黏土+淤泥质黏土+砂土	16	16.50
土层结构	单层结构	63	64.95
	双层结构	18	18.56
	多层结构	16	16.49
土层厚度	0~5 m	23	23.71
	5~10 m	25	25.77
	10~15 m	49	50.52

3 岩溶塌陷分布影响因素

3.1 浅部岩溶发育程度

从以往的研究来看,隐伏岩溶发育程度是控制岩溶塌陷分布的主要因素,尤其在浅部岩溶强发育地区更易发生,从而导致地面塌陷呈条带状、面状或星点状的分布特征^[15-16]。基岩中溶蚀洞隙及溶洞等开口大小、方向、深度和充填特征,控制着岩溶塌陷

的发育规模和密度,在浅部岩溶发育区域,塌陷的密度也愈大^[17]。

钻孔遇溶洞率和线岩溶率是岩溶发育程度的重要指标,结合地质钻探资料,统计分析郴州地区 224 个钻孔的地层岩性(表4)。由表4可知,C₂₊₃及D₂q¹是发生岩溶塌陷较多、塌陷规模较大的碳酸盐岩地层,两者的钻孔遇洞率和线岩溶率均较高,为岩溶强发育地层。结合图6可知,C₂₊₃地层揭露溶洞主要在基岩埋深10~30 m的位置,D₂q¹地层溶洞主要发育在0~20 m的深度范围;之后随着基岩埋深的增大,岩溶发育程度逐渐减弱。可见C₂₊₃及D₂q¹地层浅部岩溶强发育,是造成该地层岩溶塌陷无论数量还是密度均较高的主要原因。

表4 不同地层岩溶指标及岩溶塌陷分布
Table 4 Karst indicators and sinkhole distribution in different strata

地层代号	塌陷数量/个	溶洞高度/m	溶洞数量/个	遇洞率/%	线岩溶率/%
C ₂₊₃	40	279.36	226	76.67	11.22
C ₂ d ¹⁻²	2	9.60	7	13.46	2.22
D ₃ x ¹	1	—	—	—	—
D ₂ q ²	1	8.70	2	66.67	5.99
D ₂ q ¹	51	20.50	11	83.33	6.02
D ₃ s ¹⁻²	2	4.40	1	33.33	4.57

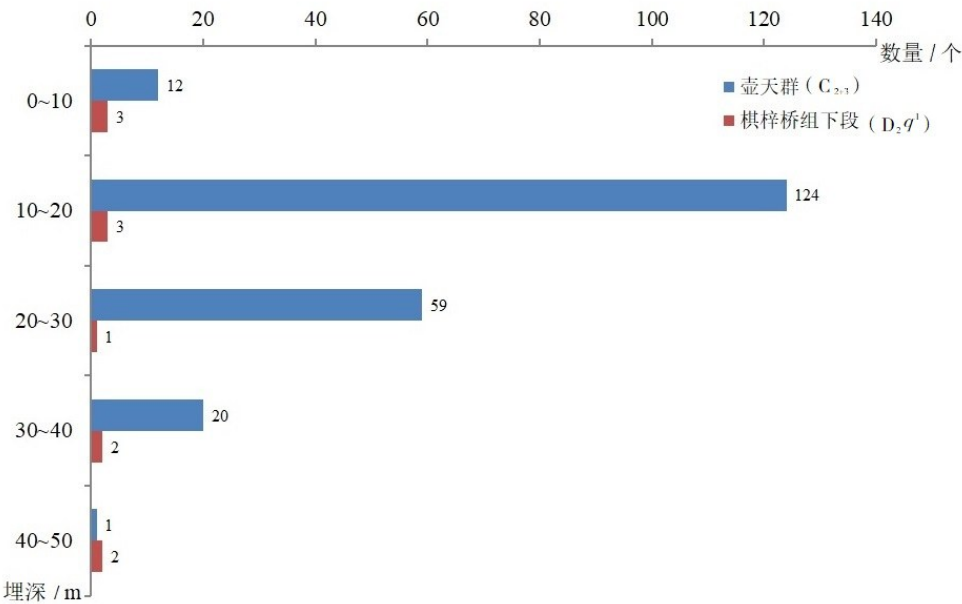


图6 溶洞埋深与溶洞发育数量关系图

Fig. 6 Relationship between depth and development characteristic of karst cavities

3.2 覆盖层特性

土体的变形破坏形式和机理与土层性质、组成和结构等因素关系密切,如砂性土会发生沙漏型塌陷,黏性土则为土洞型塌陷^[18]。一般情况下,土层黏粒含量越多,土体黏聚力愈大,土颗粒移动需要克服的滑动摩擦力和咬合摩擦力也越大,因此也愈不容易发生地面塌陷^[19]。

研究区岩溶塌陷主要发育于黏土和粉质黏土层。经现场调查,黏土为黄色冲洪积碎石土,呈松散状,碎石磨圆度较差,厚度为 3.0~11.5 m。粉质黏土为灰黄色松散状碎石土,含少量铅锌矿石、黄铁矿等,厚度在 2.2~12.0 m。由表 5 可知,黏土及粉质黏土层含水率随深度增加而增大,其中黏土层含水率增长速率较快,底部土体较表层土体含水率增大 8.3%,相同深度情况下粉质黏土层含水率仅增大

4.4%。随着深度增加,土体密度逐步降低,黏土和粉质黏土层密度降低比例分别为 3.12% 和 4.1%。而土体孔隙比随深度增加而增大,其中黏土层孔隙比增大比例为 22.8%,粉质黏土则为 19.60%。

根据土体抗剪强度理论,在不考虑孔隙水压力条件下,土体发生变形破坏时满足下列关系式^[19]:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{1}$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \tag{2}$$

式中: c 为土的黏聚力,kPa; φ 为土的内摩擦角,度; σ 为土体总应力,kPa; γ_i 为第*i*层土的重度,kN·m⁻³; h_i 为第*i*层土的厚度,m。

由此可见,黏土层由浅至深土体抗剪强度由 51.28 kPa 降至 33.23 kPa,降幅为 35.2%;粉质黏土层则从 40.44 kPa 降至 31.50 kPa,降幅为 22.1%。因此地下水位降深愈大,土体遭受渗流压力愈大,当总应力超过其抗剪强度时,土体发生破坏并垮落。

表 5 研究区土体物理力学参数

Table 5 Geotechnical parameters of overburden soil in study area

类型	深度/m	含水率/%	密度/ g·cm ⁻³	孔隙比	液限/%	塑限/%	内摩擦角/°	黏聚力/ kPa	渗透系数/ cm·s ⁻¹
黏土	1.25~1.45	25.5	1.92	0.798	42.30	24.00	16.8	50.50	3.57×10 ⁻⁶
	3.15~3.85	28.7	1.89	0.872	44.40	24.95	10.6	46.05	6.89×10 ⁻⁶
	6.20~7.25	33.8	1.86	0.980	44.55	25.20	7.5	31.70	
粉质黏土	1.60~1.80	21.8	1.95	0.699	31.70	19.10	14.3	39.60	8.26×10 ⁻⁵
	3.20~3.40	21.9	2.02	0.641	34.20	20.50	17.7	48.50	2.46×10 ⁻⁵
	6.40~6.60	26.2	1.87	0.836	35.40	21.50	13.8	26.70	
	8.40~8.60	27.4	1.56	1.195	38.10	22.30	11.2	28.40	4.85×10 ⁻⁵

3.3 地下水开采

地下水位下降条件对盖层土体的作用机制有失托增荷、吸水软化、渗透冲蚀和真空吸蚀^[20-21]。当地下水位在岩—土界面以上快速下降时,原有地下水对土体的浮托力消失,随着土体孔隙水压力消散而自重应力增大。与此同时,土体被水浸泡后粒间胶结作用降低,易发生崩解并被地下水带走,从而在岩—土界面形成土洞。随着地下水位持续降低,土体的水力坡降增大,上层潜水向下渗流过程对土体产生冲刷和掏蚀作用,导致土洞持续向地表扩展。尤其在地下水位急剧降低至脱离岩—土界面时,还

会对上覆饱和土体产生负压吸蚀作用,从而加速土洞的发育^[22-23]。

郴州地区地下水资源超采主要源于城市供水水源地和矿山开采抽排地下水两方面。20 世纪 50~80 年代,郴州北湖、南湖、温泉、金银冲等水厂相继投产使用,对二叠系栖霞组、石炭系船山组和黄龙组等碳酸盐岩地层地下水进行大规模开采,如北湖水厂开采量由最初的 171.51 m³·d⁻¹增至 23 371 m³·d⁻¹,南湖水厂的平均开采量为 10 811.1 m³·d⁻¹等。长期超采透支地下水资源造成地下水降落漏斗不断扩大,因此在北湖、南湖、白鹿洞、海泉、泉溪洞等地发生大规模岩溶塌陷。在采矿排水方面,研究区主要矿区有柿

竹园、玛瑙山等金属矿区,矿区开采需大量抽排地下水,主要疏干石炭系岩关阶、泥盆系棋梓桥组等地层碳酸盐岩类岩溶水,采矿排水引发的岩溶塌陷主要分布在采掘井口及主要地下水径流带附近。

4 岩溶塌陷防治建议

(1)从人口密集程度、基础设施条件、经济发展现状、农业开发利用和地质文化遗迹等方面出发,与岩溶塌陷易发程度分区结果进行综合分析,将其划分为重点保护区、次重点保护和一般保护区,做好相应防治预案和应急措施;

(2)在已发生岩溶塌陷区域设置警示标志、警戒线等,防止人畜进入发生跌落伤亡事件。对于岩溶塌陷灾害险情严重,受威胁建筑不适宜居住,或灾害点地质条件脆弱,实施工程处置措施难度较大且费用较高时,应考虑组织居民进行避让搬迁;

(3)合理开采岩溶地下水资源,保持地下水水位的基本稳定,避免同一水文地质单元的工厂、企业同时期大量开采岩溶地下水;对于岩溶塌陷重灾区实行禁采政策,在塌陷程度较轻地区实行限采方针,控制开采时间和开采量,避免发生地下水位大幅度下降的情况;

(4)在岩溶塌陷易发区应组织专人定期巡查,对于地面下沉、地裂缝、房屋不均匀沉降或开裂、泉井变浑浊等现象应及时报告上级政府和相关部门;相关单位应组织力量进行现场调查和勘探,对于确定的岩溶塌陷隐患点应采取工程手段及时处置;

(5)建立岩溶塌陷监测系统,掌握区域降雨和地下水位实时变化过程,重点观测地下水位出现突升或突降的异常情况,绘制区域地下水位等值线图,避免出现大范围地下水位降落漏斗。对于岩溶塌陷易发区可考虑结合地质雷达与布里渊光时域反射(BOTDR)技术进行监测,准确掌握土体变形过程和规律,为岩溶塌陷预警和防治工作服务。

参考文献

- [1] Shishay T K, Neil L A, David R. Using Gis-based spatial analysis to determine factors influencing the formation of sinkholes in Greene county, Missouri [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2018, 24(3):251-261.
- [2] Adnan O. Sinkhole susceptibility mapping using a frequency ratio method and GIS technology near Karapinar, Konya-Turkey [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15: 502-506.
- [3] Jesus G, Francisco G, Jaime B, et al. A sinkhole susceptibility zonation based on paleokarst analysis along a stretch of the Madrid-Barcelona high-speed railway built over gypsum and salt bearing evaporates (NE Spain) [J]. Engineering Geology, 2008, 102(1-2):62-73.
- [4] Zhou W F, Lei M T, James W L, et al. Pre-glacial and post-glacial sinkholes in Silurian carbonate rocks in the James bay lowland, Canada [C]. Proceedings of 16th multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst, Puerto Rico, 2020:299-306.
- [5] 戴建玲,罗伟权,吴远斌,等.广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析[J].中国岩溶,2017,36(6):808-818.
- [6] 魏永耀,孙树林,黄敬军,等.徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J].中国岩溶,2015,34(1):52-57.
- [7] 谢晓彤,李少荣,廖云平,等.重庆市铜锣山地区岩溶塌陷分布规律及成因分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(4):751-756.
- [8] 陈亮晶,孙锡良,皮景,等.湖南宁乡大成桥地区岩溶地面塌陷分布特征及影响因素分析[J].中国岩溶,2014,33(4):490-498.
- [9] 花修权,黄敬军,缪世贤,等.徐州市地质灾害分布特征及成因分析[J].地质灾害与环境保护,2015,26(2):72-79.
- [10] 杨云丽,杨荣康,孟凡涛,等.黔中高原台面浅覆盖型岩溶塌陷分布及影响因素浅析[J].中国岩溶,2017,36(6):801-807.
- [11] 查甫生,刘从民,苏晶文,等.铜陵市朝山地区岩溶塌陷形成条件与地面稳定性评价分析[J].地质论评,2020,66(1):246-254.
- [12] 刘铁山,刘立明,刘会钟,等.湖南省郴州市北湖区1:5万地质灾害详细调查报告[R].2013.
- [13] 李守贤,陈荣华,申俊.郴州华塘煤矿采空区地面塌陷的影响因素及防治措施探讨[J].地质灾害与环境保护,2007,18(3):19-23.
- [14] 吴孝航,罗照华.以塌陷范围为约束的岩溶水源地安全开采量评价[J].水电能源科学,2013,31(8):34-38.
- [15] Gutiérrez F, Parise M, Waele J D, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst [J]. Earth Science Reviews, 2014, 138: 61-88.
- [16] 张伟,甘伏平,魏巍,等.综合物探方法在淮河滨河浅滩岩溶塌陷调查中的应用研究[J].地球物理学进展,2019,34(2):832-839.
- [17] 汪庆玖,叶小华,孟贻,等.安徽省沿江地区典型岩溶塌陷区盖层—岩溶组合特征[J].中国岩溶,2017,36(6):859-866.
- [18] 罗小杰.论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J].工程地质学报,2015,23(5):886-896.
- [19] 陈明晓.岩溶覆盖层塌陷的原因分析及其半定量预测[J].岩石力学与工程学报,2002,21(2):285-289.
- [20] Pan Z Y, Jiang X J, Lei M T, et al. Mechanism of sinkhole

- formation during groundwater-level recovery in karst mining area, Dachengqiao, Hunan province, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77:799.
- [21] Zhou W F, Lei M T. Conceptual site models for sinkhole formation and remediation [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76:818.
- [22] 袁杰,高宗军,马海会.论岩溶地下水位对岩溶塌陷形成的控制作用:以山东枣庄市岩溶地面塌陷区为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(4):95-99.
- [23] Meng Y, Li Z J, Jia L. An analysis of allowable groundwater drawdown and pumpage from a karst aquifer to prevent sinkhole collapses in the Pearl River Delta, China. [J]. *Water Resources*, 2020, 47 (4): 530-536.
- [22] 袁杰,高宗军,马海会.论岩溶地下水位对岩溶塌陷形成的控制作用:以山东枣庄市岩溶地面塌陷区为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(4):95-99.

Distribution and influence factors of sinkholes in the Chenzhou area, Hunan Province

PAN Zongyuan^{1,2}, CHEN Xuejun¹, YANG Xin¹, SONG Yu¹, ZHANG Minzhi¹

(1.College of Civil and Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamic, MNR&GZAR/ Key Laboratory of Karst Collapse CGS Prevention, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The Chenzhou area is characterized by widely distributed carbonate rocks and thin overburden soil. The sinkholes occur frequently due to long-term dewatering of mines. Based on geological investigations, this paper analyzes the distribution and influencing factors of sinkholes in this area. Results show that, (1) most sinkholes took place from 1980 to 1983, with 8.5 sinkholes per year on average. But severe sinkholes occurred since 2012, with 5.88 sinkholes per year. Sinkholes tended to occur during rainy seasons between March and July. (2) Fifty-four sinkholes (55.67% of the total) are distributed in low hilly gullies, and 40 sinkholes (41.24% of the total) are distributed in karst plain. Ninety-seven sinkholes took place in Carboniferous Hutian Group strata and Lower Qiziqiao Formation of Middle Devonian strata. Many sinkholes appeared in fault zones and fold zones. (3) 40.21% of sinkholes are distributed in alluvium layer, and 59.79% of sinkholes are distributed in diluvial beds. Collapse sinkholes were more likely to occur in silty clay because of its large distribution and more prone to subsoil erosion than other types of overburden materials. There are 63 sinkholes distributed in single-layer soil structure areas, and 34 sinkholes occurred in double-layer and multilayer soil structure. Double-layer soil consists of silty clay and pebble soil, whereas multilayer soil is form of silty clay, mud clay and sandy soil. 49.48% of sinkholes occurred in the overburden soil with thickness less than 10 m, and 50.52% of sinkholes took place in the overburden soil with thickness 10 m to 15 m. (4) The basic conditions of sinkholes include well developed karst in the shallow subsurface, and thin and weak overburden soil. The primary triggering factor is pumping karst groundwater for urban water supply and mining.

Key words Chenzhou, sinkhole, characteristics of spatio-temporal distribution, karst groundwater pumping

(编辑 黄晨晖)