

# 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

查甫生<sup>1)</sup>, 刘从民<sup>1)</sup>, 苏晶文<sup>2)</sup>, 吴长贵<sup>3)</sup>, 崔可锐<sup>1)</sup>

1) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009;

2) 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京, 210016;

3) 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队, 安徽铜陵, 244033

**内容提要:** 铜陵市朝山地区岩溶塌陷灾害是安徽省大型地质灾害隐患点。从该区基岩岩性、覆盖层特征、水文地质条件和人为影响等方面入手, 利用钻探和地下水长期观测等技术手段, 通过岩溶塌陷的影响因素分析, 查明了研究区岩溶塌陷形成条件, 评价了地面稳定性。得到主要结论如下: 区内岩溶塌陷的分布受断裂控制, 90%以上的塌坑位于距断裂 20 m 区域内; 区内岩溶塌陷的发生与基岩岩性密切相关, CaO 含量高有利于塌陷的发生; 区内塌陷多发生于多元或二元结构地层区域; 矿山排水是区内岩溶塌陷的主要诱发因素。最后在查明区内岩溶塌陷形成条件的基础上, 采用经验指标法对朝山地区地面稳定性进行评价分析, 确定研究区为易塌陷区, 须重点监测与防治。

**关键词:** 岩溶塌陷; 断裂; 形成条件; 地面稳定性

岩溶塌陷是指在岩溶发育地区, 存在于下伏可溶性岩层中的岩溶洞隙或者上覆土层中的土洞, 在自然因素或人为因素的影响下洞隙自身扩大, 洞隙顶板失稳产生塌落或沉陷的现象(康彦仁, 1990; 袁道先, 2006; 郝永红等, 2009; 赵博超等, 2015; 姜伏伟, 2017; 崔霖峰等, 2017)。岩溶塌陷是一类典型的突发性地质灾害, 由于其存在和发展的隐蔽性, 发生的突然性, 往往给人类生命、工程建筑和经济开发活动造成极大的危害(雷明堂等, 1997; 邵勇等, 2012; 李国峰, 2015; 缪世贤等, 2017)。长期以来很多学者在岩溶塌陷的形成条件和成因机制方面做了大量的研究工作(陈国亮, 1994; 高宗军, 2001; Kaufmann et al., 2002; Jones et al., 2005; Johnson, 2005; Eeckhaut et al., 2007; 王滨等, 2016; 黄奇波等, 2019), 但得到的结论不尽相同。

朝山村岩溶塌陷区位于安徽省铜陵市中部(如图 1), 距市区约 10 km, 南北长约 900 m, 东西宽约 700 m, 塌陷影响面积约 0.24 km<sup>2</sup>, 为大型规模岩溶塌陷灾害。塌陷区周边人类工程活动频繁, 主要为矿业开发, 共有狮子山硫铁矿铜矿、朝山金矿、新华山铜矿三座矿山。区内人口密集, 工矿企业单位较

多。从 2011 年 12 月 10 日开始首次发生岩溶塌陷以来, 到 2012 年 1 月 8 日止, 累计产生塌陷坑 48 处, 塌陷坑密度达 200 个/km<sup>2</sup>, 岩溶塌陷发育强烈, 已造成毁坏农田 200 亩(1 亩 =  $\frac{2000}{3}$  m<sup>2</sup>), 毁坏鱼塘 30 亩, 造成朝山黄金屋及新四军史迹陈列馆墙体、地面开裂, 无法正常使用时, 同时部分公路、河道遭受毁坏, 给当地人民生命财产安全埋下极大隐患。

本文通过对铜陵市朝山地区基岩岩性、覆盖层特征、水文地质条件与人为影响等方面的研究, 分析区内岩溶塌陷的形成条件, 并采用经验指标法进行地面稳定性评价, 以期对区内的塌陷治理提供依据。

## 1 地质构造对岩溶塌陷的影响

研究区属扬子地层区芜湖—安庆地层小区, 地处大通—顺安向斜中部偏北西翼, 向西与青山背斜北东翼相接, 区内断裂构造发育, 主要有北西—南东向、东西向和南西—北东向三组断裂。区内断裂分布如图 2 所示。北西—南东向断裂共有 6 条, 4 条分布在研究区北部农田中, 间距约 25~40 m, 长度约 190 m; 另 2 条分布在南部鱼塘中, 间距 67~100 m,

注: 本文为中国地质调查局项目“皖江经济带安庆—马鞍山沿江段 1:5 万环境地质调查”(编号:DD20160247)、安徽省国土资源科技项目“安徽省沿江地区岩溶塌陷监测预警技术研究”(编号:2013-K-05)的成果。

收稿日期:2018-12-18; 改回日期:2019-09-16; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.01.018

作者简介: 查甫生, 男, 1978 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与岩土工程方面的工作; Email: zhafusheng@163.com。

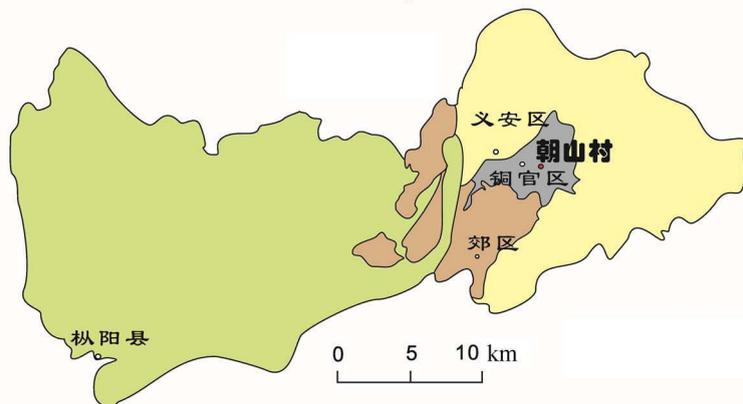


图 1 朝山村地理位置图

Fig. 1 Chaoshan village geographic location map

长度约 190 m。其中以龙塘湖破碎带为代表,位于研究区北西,走向北西—南东,倾向北北东,倾角  $70^\circ$ ,水平延伸长度 1500 m,垂直延伸长度 400 m,宽度约 15~20 m。东西向断裂有 2 条,分布于研究区北部农田中,间距约 70 m,长约 180~270 m。其中以铜塘冲破碎带为代表,位于研究区北,走向近东西向,倾向为北,倾角  $70^\circ \sim 75^\circ$ ,水平延伸长度 1300 m,垂直延伸长度 550 m,宽度约 10~15 m。南西—北东向断裂共有 4 条,均分布于研究区北部农田中,间距约 19~50 m,长约 180~280 m,其中以鸡冠山—新华山南北向断裂为代表,地表为强烈硅化破碎带,岩石角砾状构造明显,向东陡倾,控制了新华山岩体(石英闪长岩)的分布。综上所述,研究区所在区域地质构造复杂,盖层断裂构造发育。地表全部被第四系所覆盖,其下为三叠系地层,分布广泛。主要为下三叠统南陵湖组、中三叠统东马鞍山组与铜头尖组。

研究区共有 48 个岩溶塌陷点,其中 37 处分布在地势相对低洼的农田和池塘中。区内已有塌陷与断裂分布的关系如图 1 所示,塌坑密集分布于断裂构造发育部位,北部农田塌坑分布区存在北西—南东向、东西向和南西—北东向三组断裂,塌坑多位于断裂带或交叉点上,南部鱼塘塌坑分布区位于东马鞍山组大理岩与铜头尖组砂岩不整合接触带附近,塌坑相对较密集。据统计分析得知,区内岩溶塌陷的发生受断裂分布影响强烈。区内共有 45 处塌陷位于距断裂 20 m 区域内,占总数的 93.75%,其余 3 处分别距断裂 26.3 m, 62.0 m, 158.9 m。这是因为断裂破坏了岩土体的完整性,使其结构松散,渗透性增强,有利于地下水的渗透和土体的运移,岩溶作用

得以充分发挥所致。

## 2 岩溶塌陷形成条件

岩溶塌陷的形成受诸多因素影响,基本影响因素有三个,即:具有一定发育程度的岩溶孔洞、上方有一定厚度的岩土体以及具有一定水位差的双介质地下水系统(王洪涛等,1996;邹胜章等,2016)。归纳国内岩溶塌陷发育的实践经验(胡瑞林等,2001;贺可强等,2002;雷明堂等,1998;褚高强等,2017),结合研究区的地质环境,确定影响区内岩溶塌陷的主要因素为基岩岩性、覆盖层特征、水文地质条件和人为影响等。

### 2.1 基岩岩性条件

研究区下伏基岩为下三叠统南陵湖组( $T_1n$ )和中三叠统东马鞍山组( $T_2d$ )、铜头尖组( $T_2t$ ),其中南陵湖组和东马鞍山组为碳酸盐岩,铜头尖组为碎屑岩。

南陵湖组:分布于研究区中部、南部,厚度大于 256 m。下部为浅灰、深灰色页片状—薄层状灰岩,间夹中厚层状灰岩,底部有一层浅灰色巨厚层状同生砾岩;中部为浅灰、深灰色薄层、中厚层状灰岩;上部为灰、灰黑色中厚层状灰岩,局部夹中厚层假鲕状灰岩。

东马鞍山组:分布于研究区西部,厚度大于 192 m,岩性为灰白、肉红色薄—中厚层状白云岩、白云质大理岩。

铜头尖组:分布于研究区东部,厚度大于 139 m,岩性为紫红色粉砂岩、粉砂质页岩、黏土页岩。底部与东马鞍山组( $T_2d$ )呈不整合接触。

研究区内共施工钻孔 15 个,其中 5 个钻孔见溶洞。南陵湖组( $T_1n$ )灰岩见溶洞钻孔 3 个,见洞率 50%,岩溶率 11.4%~39%,单孔最大岩溶率达 39%;东马鞍山组( $T_2d$ )白云岩见溶洞钻孔 2 个,见洞率 22.2%,岩溶率 6.25%~9.93%。

区内岩溶塌陷有 42 处塌坑位于南陵湖组( $T_1n$ )灰岩之上,占塌坑总数的 87.5%,6 处位于东马鞍山组( $T_2d$ )白云岩之上,占比 12.5%,铜头尖组( $T_2t$ )地层无岩溶塌陷分布。区内岩溶塌陷集中分布于南陵湖组灰岩地区,这与所处地层基岩岩性密切相关。南陵湖组灰岩较东马鞍山组白云岩 CaO 含量偏高, MgO 和酸不溶物含量均偏低,如表 1 所示。对比基岩溶蚀情况,以及前人工作成果,岩石成

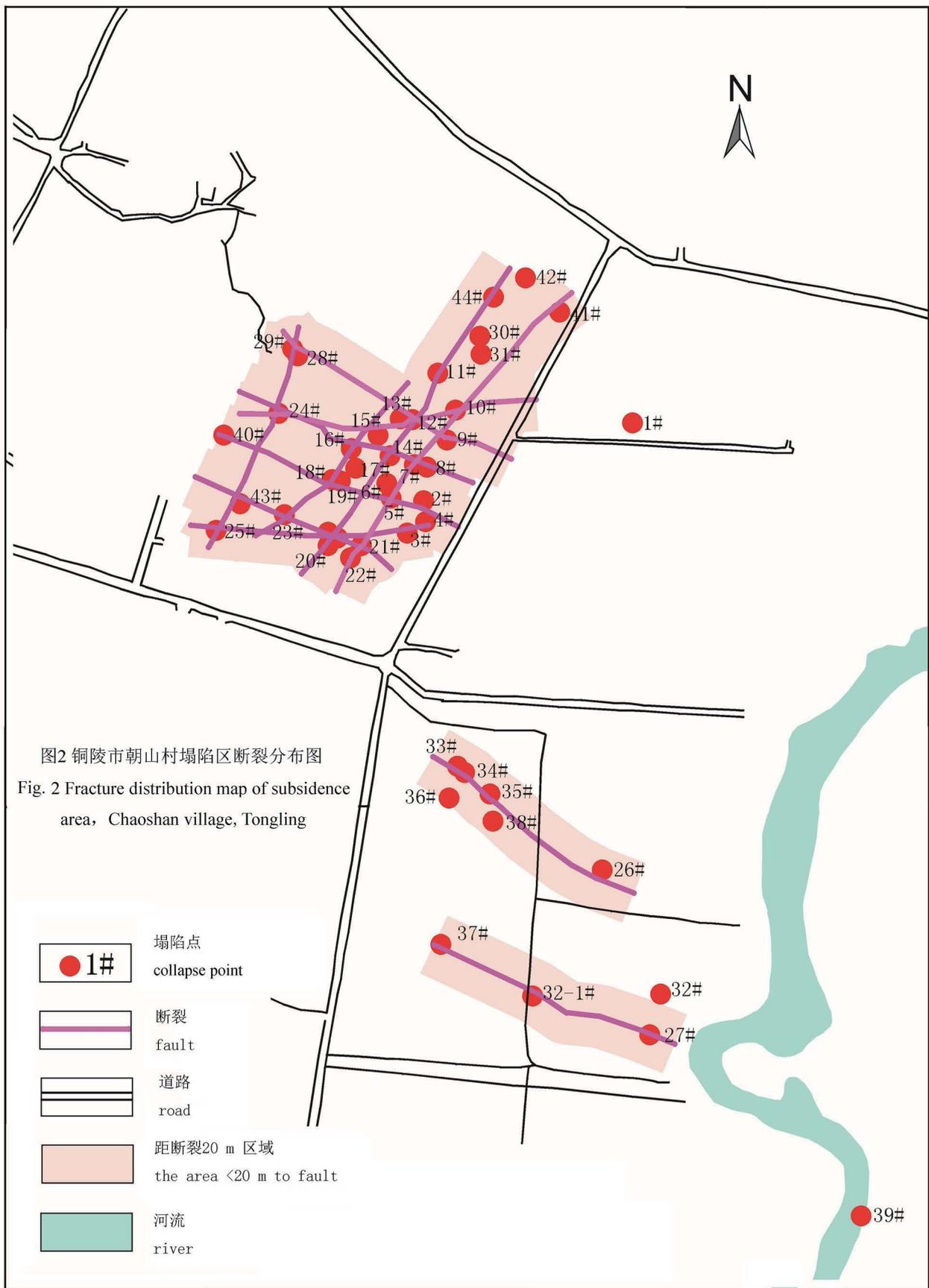


表 1 岩石化学成分表

Table 1 Table of rock chemical composition

地层	主要岩石	CaO	MgO	酸不溶物	岩溶发育情况
T <sub>1n</sub>	中-厚层状灰岩	52.52	0.76	4.08	很发育
T <sub>1n</sub>	薄层状灰岩	52.13	0.74	4.68	很发育
T <sub>2d</sub>	薄-中厚层状白云岩	42.02	8.41	5.08	发育

分对碳酸盐岩相对溶解速度和岩溶作用有着决定性影响,表现为 MgO 和酸不溶物含量高的其溶解速度慢;CaO 含量高则其溶解速度快,岩溶作用强烈(李颜贵等,2014)。同时,南陵湖组灰岩含多层结构,并且裂隙发育,增加了岩体结构面的数量与体积,从而加大岩体的渗透性与溶解速度。

### 2.2 覆盖层特征

覆盖层是岩溶塌陷的主体,是岩溶塌陷形成的物质基础,其中覆盖层的结构和厚度是影响岩溶塌陷的主要因素。

#### 2.2.1 覆盖层结构

根据钻孔剖面及以往工程勘查资料显示,表明研究区覆盖层为多元结构(三元及以上),部分地区地层缺失为二元或一元结构。区内表层普遍分布一层耕植土,层厚 0.6~1.8 m,棕褐色,主要成分为黏土,夹植物根系,松散。中部分布一层全新统粉质黏土,冲积成因,层厚 2.2~5.6 m,褐色,湿,可塑状态,30 cm 标准贯入击数 6~7 击,土质较均匀,属中等压缩性土,承载力特征值 170 kPa,层底常见砂砾石。覆盖层底部一般分布一层中更新统粉质黏土,冲积成因,层厚 2.3~13.6 m,褐色,褐红色,稍湿,硬塑状态,含铁锰氧化物及高岭土条带,土质较均匀,30 cm 标准贯入试验击数为 11~14 击,属中偏低压缩性土,承载力特征值 260KPa,层底常见砂砾石,如图 3 所示。

覆盖层的结构组成对岩溶塌陷的产生有较大影响。根据统计,截止至 2012 年 1 月,研究区发生的 48 处岩溶塌陷中,有 26 处土层以三元或多元结构为主,18 处为二

元结构,4 处为一元结构。多元结构的覆盖层具有孔隙水、岩溶水双层或多层水位,遭受真空吸蚀、潜蚀双重致塌力作用,因此最易形成岩溶塌陷(王延岭,2016)。二元结构的塌陷区多为上部粉质黏土,下部砂类土的结构,致塌力以潜蚀作用为主(王延岭等,2015),由于砂类土内聚力较小,因此常易形成土洞,导致塌陷发生。

#### 2.2.2 覆盖层厚度

钻探资料显示研究区覆盖层厚度为 4.3~14.4 m,东北部土体最薄,厚度约 4~8 m;中部、南部厚度中等,约 8~10 m,西北部、西部厚度大于 10 m,如图 4 所示。

岩溶塌陷发生的可能性、时间以及塌陷规模都与覆盖层的厚度有关。根据初步统计,区内岩溶塌陷大部分发生在覆盖层较薄的区域。根据图 4 中塌陷点的分布可以得知,区内 50%塌陷点覆盖层厚度在 8~10 m 之间,其次为 10~12 m 和 6~8 m 区域。这是因为在相同的水文地质条件下,覆盖层厚度小,有利于地下水的潜蚀和掏空作用,使土洞扩展到地面的进程缩短,使塌陷易于发生。若覆盖层厚度大,从土洞形成到波及地面所需的时间长,在塌陷未波及地表之前,洞内应力就已达到平衡状态,在致塌力变化不大的情况下,土洞不再向上部扩展形成塌陷坑(贺可强,2005)。

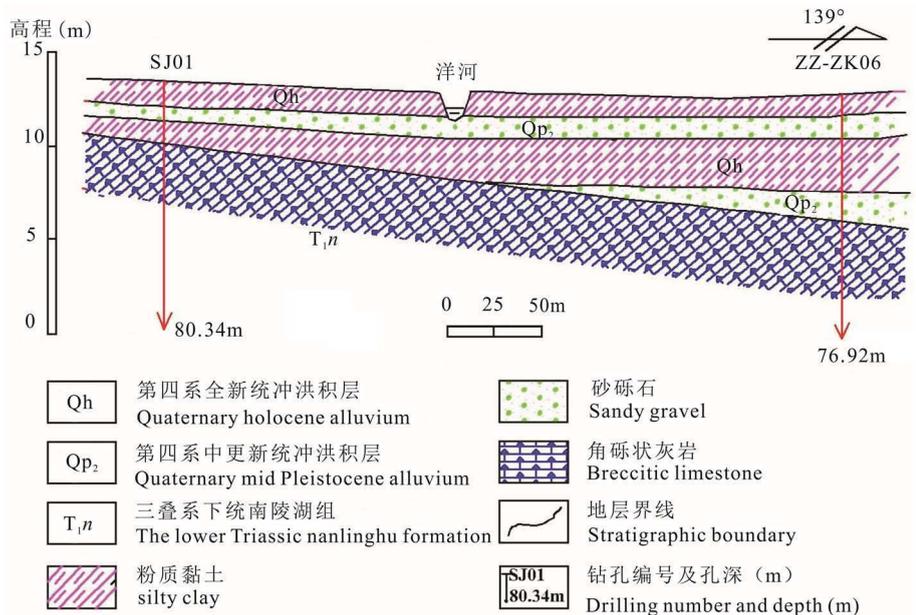


图 3 铜陵朝山村羊河河谷第四纪地质剖面图

Fig. 3 Geological section of Quaternary along Yanghe River Valley, Chaoshan village, Tongling

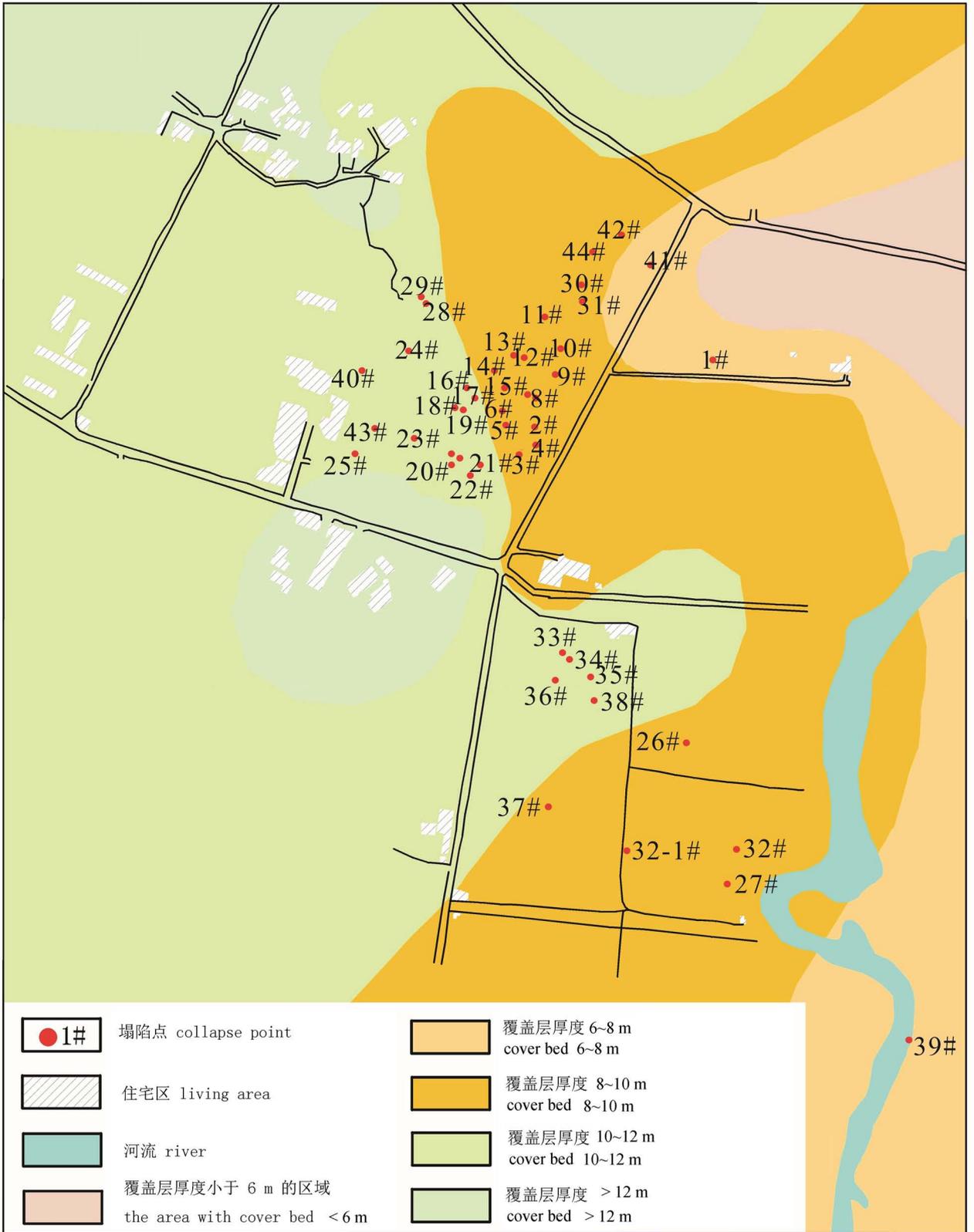


图4 朝山村塌陷区覆盖层厚度分区图

Fig. 4 Chaoshan village Cover thickness zoning map of subsidence area

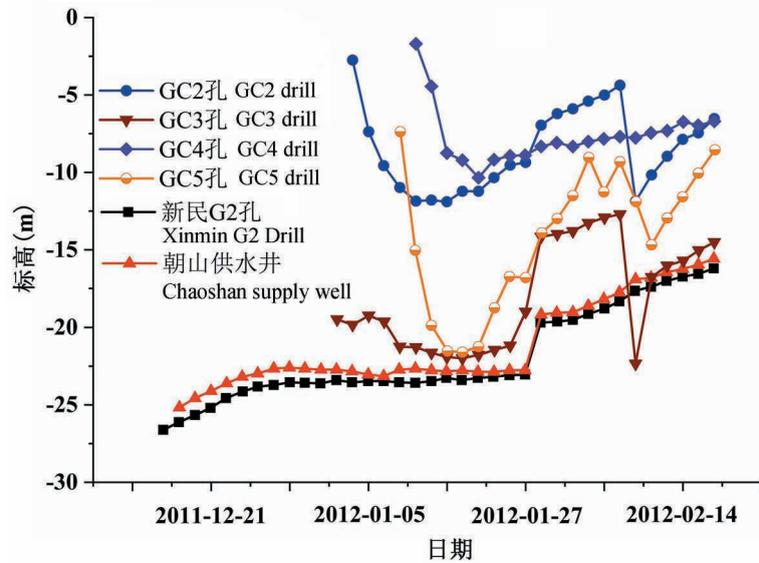


图 5 铜陵市朝山村塌陷区地下水水位变化曲线图  
Fig. 5 Curve of groundwater level change of subsidence area, Chaoshan village, Tongling

### 2.3 水文地质条件

研究区位于岗地与冲击平原交接地带,主要地下水类型为第四系松散岩类孔隙水和三叠系碳酸盐岩类岩溶裂隙水。第四系黏性土层组成多个含水结构,上部全新统冲洪积含水层岩性为可塑状粉质黏土,局部夹有碎石土,有一定渗水性,含有孔隙水,富水程度极弱;下部中更新统冲洪积含水层岩性为硬塑粉质黏土,不含地下水,属相对隔水层。三叠系碳酸盐岩地层含水丰富。东马鞍山组含水层在岩体接触带、不整合面附近岩溶更为发育,岩体单位涌水量大于  $1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,明显大于正常含水层含水性;南陵湖组含水层浅部岩溶裂隙较发育,主要为溶蚀裂隙和小溶洞,含水性中等。区内大气降水是地下水主要补给来源,降水通过区域径流区补给地下水,采矿排水是区内地下水的主要排泄方式。通过分析区内监测孔水位监测资料,发现区内地下水位东低西高,北低南高。为了确切了解研究区地下水流向和流速,本次调查时选取 GC2、GC3、GC5 三孔实施井中

充电法试验。试验结果表明:GC2 孔地下水流向为北东东,流速约  $10 \text{ m}/\text{h}$ ,GC5 孔地下水流向为北,流速约  $10 \text{ m}/\text{h}$ ,GC3 孔地下水流向为南东,流速约  $12 \text{ m}/\text{h}$ ,总体上地下水流向为自西向东,汇集至东部接触带附近再向南流动。

综上所述,研究区岩溶地下水资源丰富,径流排泄条件好,在地表水与地下水径流和大气降水渗透的共同作用下,特别是渗透潜蚀效应,容易将土体搬运、迁移,引起土体破坏,形成土洞,导致塌陷。另外地下水位变化引起岩溶洞隙空间产生负压效应,在真空吸蚀作用下也有助于塌陷产生。

### 2.4 人为因素影响

研究区周边坐落三座矿山,区内地下水位受矿山排水影响十分显著。朝山供水井位于研究区东侧,1996 年 7 月水位标高为  $-2.1 \text{ m}$ ,由于受矿山排水影响,现今供水井水位标高已下降至  $-25 \sim -22 \text{ m}$ ,降幅达  $20 \sim 23 \text{ m}$ 。自 2011 年 12 月 15 日新华山铜矿停止排水后,区内及周边地下水呈逐步回升态势,水位回升了  $6.5 \sim 7.0 \text{ m}$ ,其中新民 G2 孔回升了  $10.82 \text{ m}$ ,朝山供水井回升了  $9.75 \text{ m}$ ,如图 5 所示。

研究区内岩溶塌陷集中产生于附近矿山排水试验期间,自 2011 年 12 月 10 日至 15 日,共产生 44 处塌陷或变形,15 日矿山停排至今,区内塌陷及地面变形趋缓,仅产生 4 处塌陷,且规模较小,说明岩

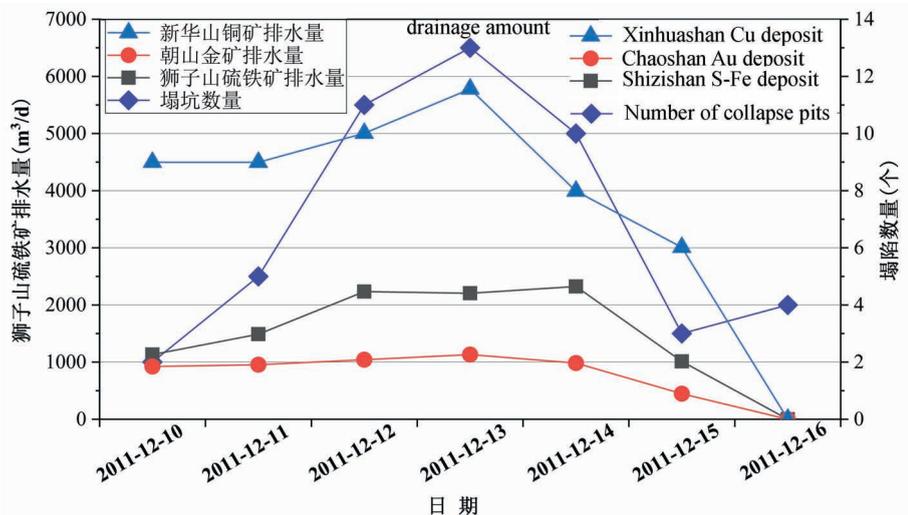


图 6 矿山排水量与塌陷数量关系曲线图  
Fig. 6 The graph of relationship between collapse amount and mine drainage amount

溶塌陷与矿山大强度排水在时间上相关性密切。统计2011年岩溶塌陷集中爆发期间矿山排水量与塌陷数量的关系如图6所示。分析得知区内岩溶塌陷数量与矿山排水量密切相关,且塌陷数量与矿山排水量呈同向增长之势,故矿山排水是区内岩溶塌陷的主要诱发因素。矿山排水破坏地下水动态平衡,地下水位急速升降频繁,地下水水力坡度迅速加大,流速加快,增强地下水潜蚀、搬运能力,加剧塌陷速度和强度。

### 3 塌陷区地面稳定性评价

通过参考《地质灾害勘查指南》(刘传正,2000)和对区内岩溶塌陷形成条件的分析,选取浅部岩溶发育指标、土体厚度和结构指标、地下水位和径流条件指标、地貌特征指标等6个评价因子,对区内地面稳定性进行评价。评价因子按它们对岩溶塌陷发育的影响大小分为三到四级,综合已有的实践经验,分别赋予经验指标,评价模型见规划式(程星,2006):

$$N=K+S+H+W+F+G \quad (1)$$

式中, $K$ 、 $S$ 、 $H$ 、 $W$ 、 $F$ 、 $G$ 分别表示岩溶发育程度、覆盖层岩性结构、覆盖层厚度、岩溶地下水位、岩溶地下水径流条件、地貌等评价因子的等级。评价结果 $N \geq 17$ 表示区内极易塌陷,地面不稳定,可产生大量塌陷; $N = 13 \sim 16$ 则区内易塌陷,地面较不稳定,可产生较多塌陷; $N \leq 12$ 则表示区内不易塌陷,地面基本稳定,可产生少量或零星塌陷。

通过上述对区内岩溶塌陷形成条件的分析,现评价结果如下:区内碳酸盐岩广泛分布,岩溶发育程度强, $K=3$ ;覆盖层为多元结构,以黏性土为主, $S=2$ ;覆盖层厚度 $4.3 \sim 14.4$  m, $H=3$ ;地下水受矿山排水影响,水位降低,岩溶地下水在基岩中,且大于10 m, $W=1$ ;岩溶地下水位于主径流带,排泄带, $F=3$ ;地貌属平原, $G=3$ 。经计算,本区 $N=15$ ,属易塌陷区,地面较不稳定,可产生较多塌陷。故本区须作为岩溶塌陷地质灾害重点监测区域,严禁周边矿山排水,妥善部署监测预报预警、防治工程等措施。

### 4 结论

本文在对铜陵市朝山地区岩溶塌陷现场调查的基础上,从基岩岩性、覆盖层特征、水文地质条件和人为影响等方面分析其形成条件,并对区内地面稳定性进行评价,得到结论如下:

(1)研究区所在区域地质构造复杂,断裂发育,区内岩溶塌陷的分布明显受断裂控制,90%以上的

塌坑位于距断裂20 m的区域内。

(2)区内三叠系碳酸盐岩广泛分布,岩溶发育强烈,塌陷的发生与基岩岩性密切相关,岩石CaO含量高有利于岩溶塌陷的形成。

(3)区内岩溶塌陷的分布受覆盖层的结构和厚度影响显著。塌陷大多发生于多元和二元结构地层中,且塌陷点均分布于覆盖层厚度小于12 m的地段。

(4)研究区地下水水位受矿山排水影响变化明显。区内塌陷与矿山排水在时间上存在明显相关性,且塌陷数量与排水量呈同向增长之势,矿山排水是区内岩溶塌陷的主要诱发因素。

(5)区内地面稳定性的经验指标法评价结果 $N=15$ ,属易塌陷区,较不稳定,本区须作为岩溶塌陷地质灾害重点监测和防治区域。

### 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈国亮. 1994. 岩溶地面塌陷的成因与防治. 北京:中国铁道出版社.
- 程星. 2006. 岩溶塌陷机理及其预测与评价研究. 北京:地质出版社.
- 褚高强,谭磊,龚敦红,余斐. 2017. 并行电法在河道岩溶探查中的应用. 地质论评,63(增刊):357~359.
- 崔霖峰,陈邦松,涂婧,杨涛,李海涛. 2017. 湖北武汉市典型地段岩溶塌陷风险评价. 中国地质灾害与防治学报,28(2):59~68.
- 高宗军. 2001. 泰安岩溶地面塌陷形成机理与防治对策. 中国地质灾害与防治学报,12(4):73~76.
- 郝永红,王玮,王国卿,杜欣,朱宇恩,王学萌. 2009. 气候变化及人类活动对中国北方岩溶泉的影响——以山西柳林泉为例. 地质学报,83(1):138~144.
- 贺可强,王滨,万继涛. 2002. 枣庄岩溶塌陷形成机理与致塌模型的研究. 岩土力学,23(5):564~569.
- 贺可强. 2005. 中国北方岩溶塌陷. 北京:地质出版社.
- 胡瑞林,王思敬,王焯芬,向缉熙. 2001. 唐山市岩溶塌陷区域风险评价. 岩石力学与工程学报,20(2):180~189.
- 黄奇波,覃小群,刘朋雨,张连凯,程瑞端,李腾芳. 2019. 山西柳林泉域岩溶地下水溶解无机碳特征及控制因素. 地质论评,65(4):961~972.
- 姜伙伟. 2017. 岩溶塌陷发育机理模式研究. 中国岩溶,36(6):1~5.
- 康彦仁. 1990. 中国南方岩溶塌陷. 南宁:广西科学技术出版社.
- 雷明堂,项式均. 1997. 近20年来中国岩溶塌陷研究回顾. 中国地质灾害与防治学报,增刊1:9~13.
- 雷明堂,蒋小珍. 1998. 岩溶塌陷研究现状,发展趋势及其支撑技术方法. 中国地质灾害与防治学报,9(3):1~6.
- 李国峰. 2015. 安徽省沿江地区岩溶塌陷机理研究. 导师:崔可瑞. 合肥:合肥工业大学:1~79.
- 李颜贵,刘子龙,于孝民,罗水余,雍凡,蒋正中. 2014. 唐山黄庄岩溶塌陷形成条件和机理分析. 中国岩溶,33(3):299~307.
- 刘传正. 2000. 地质灾害勘查指南. 北京:地质出版社.

- 缪世贤,黄敬军,武鑫,姜国庆,王艺霖. 2017. 徐州岩溶地质调查及其发育特征分析. 水文地质工程地质, 44(2):172~177.
- 邵勇,阎长虹,许宝田,王宁,郑军. 2012. 小型溶洞对隧道稳定性的影响分析. 地质论评, 58(3):519~525.
- 王滨,贺可强. 2016. 岩溶塌陷临界土洞的极限平衡高度公式. 岩土力学, 27(3):458~462.
- 王洪涛,王恩志,李士雄. 1996. 唐山市岩溶地面塌陷成因机制与选置分析方法. 中国岩溶, 15(4):311~318.
- 王延岭,陈伟清,蒋小珍,管振德. 2015. 山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理. 中国岩溶, 34(5):495~506.
- 王延岭. 2016. 山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析. 中国岩溶, 35(1):60~66.
- 袁道先. 2006. 现代岩溶学在中国的发展. 地质论评, 52(6):733~736.
- 赵博超,朱蓓,王弘元,赖柄霖. 2015. 浅谈岩溶塌陷的影响因素与模型研究. 中国岩溶, 34(05):515~521.
- 邹胜章,夏日元,刘莉,唐建生,梁彬. 2016. 塔河油田奥陶系岩溶储层垂向带发育特征及其识别标准. 地质学报, 90(9):2490~2501.
- Chen Guoliang. 1994#. Karst Ground Collapse Causes and Prevention. Beijing: China Railway Publishing House.
- Cheng Xing. 2006#. Karst Collapse Mechanism and Its Prediction and Evaluation. Beijing: Geological Publishing House.
- Chu Gaoqiang, Tan Lei, Gong Dunhong, Yu Fei. 2017#. Application of parallel electrical method to karst cave in river. Geological Review, 63(Supp. ):357~359.
- Cui Linfeng, Chen Bangsong, Tu Jing, Yang Tao, Li Haitao. 2017#. Karst collapse risk assessment of the district in Wuhan, Hubei. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 28(2):59~68.
- Eeckhaut M V D, Poesen J, Dusar M, Martens V, Duchateau P. 2007. Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg (Belgium). Geomorphology, 91(1):19~37.
- Gao Zongjun. 2001#. The mechanism and treatment for karst collapse in Taian. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 12(4):73~76.
- Hao Yonghong, Wang Wei, Wang Guoqing, Du Xin, Zhu Yuen, Wang Xuemeng. 2009#. Effects of climate change and human activities on the karstic springs in northern China: A case study of the Liulin Springs. Acta Geologica Sinica, 83(1):138~144.
- He Keqiang, Wang Bin, Wan Jitao. 2002#. Study on forming mechanism of Zaozhuang karst collapse and collapse model. Rock and Soil Mechanics, 23(5):564~569.
- He Keqiang. 2005#. Karst Collapse in Northern China. Beijing: Geological Publishing House.
- Hu Ruilin, Wang Sijing, Lee Chaofen, Xiang Jixi. 2001#. Regional risk assessment on karst collapse in Tangshan City, China. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 20(2):180~189.
- Huang Qibo, Qin Xiaoqun, Liu Pengyu, Zhan Liankai, Cheng Ruirui, Li Tengfang. 2019#. Characteristics and control factors of dissolved inorganic carbon in karst groundwater in Liuling Spring catchment, Luliang, Shanxi. Geological Review, 65(4):961~972.
- Jian Fuwei. 2017#. Study on the developing model of karst collapse. Carstologica Sinica, 36(6):1~5.
- Jones C J F P, Cooper A H. 2005. Road construction over voids caused by active gypsum dissolution, with an example from Ripon, North Yorkshire, England. Environmental Geology, 48(3):384~394.
- Johnson K S. 2005. Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States. Environmental Geology, 48(3):395~409.
- Kang Yanren. 1990#. Karst Collapse in South China. Nanning: Guangxi Science and Technology Press.
- Lei Mingtang, XIANG Shijun. 1997#. Review of karst collapse research in China in recent twenty years. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, S1:9~13.
- Lei Mingtang, Jiang Xiaozhen. 1998#. Research on the Present Situation and Developing Tendency of Karst Collapse and Techniques for Its Supporting. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 9(3):1~6.
- Li Guofeng. 2015#. Study on the mechanism of karst collapse along the Yangtze River area in Anhui Province. Supervisor: Cui Kerui. Hefei: Hefei University of Technology.
- Li Yangui, Liu Zilong, Yu Xiaomin, Luo Shuiyu, Yong Fan, Jiang Zhengzhong. 2014#. Formation conditions and mechanisms of karst subsidence: A case study of Huangzhuang village in Tangshan. Carstologica Sinica, 33(3):299~307.
- Liu Chuangzheng. 2000#. Geological Exploration Guide. Beijing: Geological Publishing House.
- Miao Shixian, Huang Jingjun, Wu Xin, Jiang Guoqing, Wang Yilin. 2017#. Karst geological survey and analysis of its development characteristics in Xuzhou. Hydrogeology and Engineering Geology, 44(2):172~177.
- Olivier Kaufmann, Yves Quinif. 2002#. Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the 'Tournaisis' area, southern Belgium. Engineering Geology, 65(2~3):117~124.
- Shao Yong, Yan Changhong, Xu Baotian, Wang Ning, Zheng Jun. 2012#. Analysis on the Influence of Small Caves on Stability of Underground Tunnel. Geological Review, 58(3):519~525.
- Wang Bin, He Keqiang. 2006#. Study on limit equilibrium height expression of critical soil cave of karst collapse. Rock and Soil Mechanics, 27(3):458~462.
- Wang Hongtao, Wang Enzhi, Li Shixiong. 1996#. Formation mechanism of karst land collapse in Tangshan and overlap analysis method. Carstologica Sinica, 15(4):311~318.
- Wang Yanling, Chen Weiqing, Jiang Xiaozhen, Guan Zhengde. 2015#. Development features and formation mechanisms of karst collapses in the Tailai Basin, Shandong Province. Carstologica Sinica, 34(5):495~506.
- Wang Yanling. 2016#. Research on influential factors of the karst collapse in the Tailai Basin of Shandong Province. Carstologica Sinica, 35(1):60~66.
- Yuan Daoxian. 2006#. The development of modern karstology in China. Geological Review, 52(6):733~736.
- Zhao Bochao, Zhu Bei, Wang Hongyuan, Lai Binglin. 2015#. Influenced factors and mathematical models of karst collapse. Carstologica Sinica, 34(5):515~521.
- Zou Shengzhang, Xia Riyuan, Li Li, Tang Jiansheng, Liang Bi. 2016#. Vertical zone characteristics and identification standard of Ordovician karst reservoirs in the Tahe oilfield. Acta Geologica Sinica, 90(9):2490~2501.

## Formation conditions of karst collapse and evaluation of ground stability in Chaoshan area of Tongling City

ZHA Fusheng<sup>1)</sup>, LIU Congmin<sup>1)</sup>, SU Jingwen<sup>2)</sup>, WU Changgui<sup>3)</sup>, CUI Kerui<sup>1)</sup>

1) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009;

2) Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016;

3) The No. 321 Geological Team, Bureau of Geological and Mineral Exploration of Anhui Province, Tongling, Anhui, 244033

**Objectives:** The karst collapse area of Chaoshan Village is located in the central part of Tongling City, Anhui Province. The area affected by the collapse is about 0.24 km<sup>2</sup>, which is a large-scale karst collapse disaster. Based on the study of bedrock lithology, characteristics of overburden, dynamic conditions of groundwater and human influence in Chaoshan area of Tongling City, the formation conditions of karst collapse in this area are analyzed. And the empirical index method is used to evaluate the stability of the ground, in order to provide a basis for the collapse management in the area.

**Methods:** In the study area, borehole observation and in-well charging method test are carried out, and statistical analysis is made based on previous engineering survey data.

**Results:** Fractures dominate the distribution of karst collapse in the area, and upwards of 90% of the pits are situated in the 20m region of fractures. Lithology of the basement bears close association with occurrence of karst collapse, and collapse is triggered by advantage of the high levels of calcium carbonate. collapse mostly takes place in the zone of multiple or dualistic structure, and the collapse points are all distributed in the section with the thickness of overburden less than 12m. There is a significant correlation between subsidence and drainage in the study area, and the number of subsidence and displacement increase in the same direction.

**Conclusions:** The formation conditions of large-scale karst collapse in Chaoshan Village area of Tongling City mainly include the following: ① Calcium oxide content in bedrock is relatively high; ② The covering layer is of multiple structures with thin thickness; ③ Abundant karst groundwater resources and good runoff discharge conditions; ④ Affected by drainage of three surrounding mines.

In addition, Based on the investigation of the formation conditions of karst collapse in the area, the empirical index method is used to evaluate the ground stability of the Chaoshan area, and determines that the research area is a collapseable area, which requires key monitoring and prevention.

**Keywords:** karst collapse; fracture; formation conditions; ground stability

**Acknowledgements:** This study was financially supported by the China Geological Survey (No. DD20160247) and Anhui Province Land and Resources Science and Technology Project (No. 2013-K-05).

**First author:** ZHA Fusheng, male, born in 1978, professor, Mainly engaged in engineering geology and geotechnical engineering. Address: No. 193, Tunxi Road, Baohe District, Hefei, 230009; Email: zhafusheng@163.com

Manuscript received on: 2018-12-18; Accepted on: 2019-09-16; Edited by: ZHANG Yuxu

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2020.01.018