

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-09

炭质灰岩地区抽水致塌控制因素和影响因素 ——以广西兴安县为例

唐灵明^{1,2}, 陈学军^{1,2,3}, 黄翔^{1,2}, 毕鹏雁^{1,2}, 张晓宸^{1,2}

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:为研究炭质灰岩地区抽水致塌控制因素和影响因素,通过电法物探、地质钻探及抽水致塌试验相结合的综合手段,对兴安县石炭系下统岩关组(C_{1y})炭质灰岩地区的岩溶塌陷进行关联分析,建立降深水位与时间、恢复水位与时间的关系对比曲线。研究表明:在炭质灰岩地区进行抽水活动时,其主要补给源为小溶洞内储存水,运输通道为岩溶裂隙;该炭质灰岩地区岩溶裂隙具有不规则性,因此,在同类地层中测得的渗透系数 k 及影响半径 R 有较大差异;研究区域内抽水致塌的位置受地质构造的影响较为明显;钻井人为抽水致塌受多种因素共同作用影响,而地下水位升降为主要影响因素。

关键词:炭质灰岩;抽水致塌;影响因素;预防措施;电法物探;地质钻探

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)04-0065-08

Controlling and influencing factors of the karst collapse caused by withdrawing of groundwater in carbonaceous limestone area: A case study of Xing'an County, Guangxi Province

TANG Lingming^{1,2}, CHEN Xuejun^{1,2,3}, HUANG Xiang^{1,2}, BI Pengyan^{1,2}, ZHANG Xiaochen^{1,2}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Open Research Fund of Guangxi Karst Dynamics Laboratory, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: For the study of the model of pumping collapse in carbonaceous limestone area, through the combination of electrical geophysical prospecting, geological drilling and pumping collapse test, this paper conducted the correlation analysis of karst collapse in carbonaceous limestone area of Lower Carboniferous Yanguan formation (C_{1y}) in Xing'an County, and established the correlation curves between drawdown water level and time and recovery water level and time. The results denotes that: The main supply source is water stored in small karst caves and the transfer passage are cave and karst fissures when pumping in calcareous limestone area. The karst fissures in the calcareous limestone area are irregular, so the permeability coefficient and influence radius measured in similar strata are quite different. The location of collapse caused by pumping in the study area is obviously affected by geological structure. When pumping produces excessive drawdown, the karst collapse often occurs at the fracture zone of aquifer. The collapse caused by man-made pumping is affected by many factors, and the rise and fall of

收稿日期: 2020-07-25; 修订日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(41967037); 广西岩溶动力学重点实验室开放课题基金(YR-JJHT-2016-466)

第一作者: 唐灵明(1987-), 男, 广西桂林人, 地质资源与地质工程专业, 硕士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程、地质灾害预测与防治研究。E-mail: 262611613@qq.com

通讯作者: 陈学军(1961-), 男, 广西桂林人, 地质工程专业, 博士研究生, 教授, 主要从事岩土工程、灾害地质与环境工程方面的教学和研究工作。E-mail: chenxj@glut.edu.cn

groundwater level is the main factor.

Keywords: carbonaceous limestone; pumping collapse; influence factors; preventive measures; electrical geophysical prospecting; geological drilling

0 引言

抽取地下水是获取安全用水的一种有效方法,在生产生活实践中被广泛使用。但是,抽取地下水往往容易引发地表塌陷,在岩溶发育地区抽水致塌现象尤为凸显^[1-4]。由此,剖析岩溶地区抽水致塌的影响因素,探明防预抽水致塌的措施应当作为业界关于获取安全用水的重要议题。截至目前,相关学者已经对岩溶塌陷问题做了较多研究,主要聚焦于岩溶塌陷过程监测^[5-7],岩溶塌陷机理^[8-11],岩溶塌陷影响因素^[12-15],岩溶塌陷模型试验^[16-19]和数值模拟研究^[20-23]等视角。基于已有研究成果发现,多数研究选取的工程案例所属区域为石灰岩地区,炭质灰岩地区工程案例较少。然而,炭质灰岩地区在我国覆盖面积较广,是生产生活取水来源之一;炭质灰岩较石灰岩而言,其含碳量较高,岩溶发育相对较弱,岩溶主要以浅层岩溶裂隙及小型溶洞形式出现,而石灰岩地区容易发育形成大型岩溶裂隙。因此,以炭质灰岩地区作为研究区域,综合电法物探、钻探方式查明研究区石炭系下统岩关组(C_{1p})炭质灰岩岩溶发育情况,再通过现场抽水试验对致塌影响因素进行综合分析,旨在为炭质灰岩地区未来安全抽水提供一定参考。

1 研究区概况

研究区位于广西兴安县,属于亚热带季风气候区,四季分明,雨量充沛,近年平均降雨量 1 700 ~ 1 800 mm。

1.1 地层岩性

研究区属于低山丘陵地貌,地势起伏较大;上覆土层主要以第四系冲洪积层含砾黏土为主,厚度 1 ~ 10 m 不等,下伏基岩为石炭系下统岩关组(C_{1p})炭质灰岩含碳量较高,岩溶发育较石灰岩地层相对较弱,岩溶主要以浅层岩溶裂隙及小型溶洞形式出现。

1.2 地质构造

研究区东南侧(距离约 0.5 km、1.3 km)有性质不明断层通过,断层走向近似平行,呈北东-南西走向,控制这一区域的岩层产出,其中研究区大泉点恰好位于该断层面上。

1.3 水文地质条件

根据地下水的赋存条件,水理性质,水力特征及各含水岩组的空间分布状况,研究区地下水类型主要有两类,一类是位于表层的松散土层孔隙潜水,其埋藏浅,主

要赋存于上部冲洪积形成的含砾黏土层中,受大气降水、地表溪沟水体的补给,季节性影响较大,水量贫乏-中等;另一类是碳酸盐岩碎屑岩互层溶洞裂隙水,主要赋存于石炭系下统岩关组(C_{1p})岩层中,浅部岩层岩溶裂隙发育,是发育岩溶管道和地下水富集的好场所,据区域水文地质资料,该层地下水水量贫乏-中等,泉流量小于 10 L/s,钻孔涌水量小于 500 m³/d,枯季地下水迳流模数为 1.0 ~ 3.0 L/(s·km²)。

2 人为抽水试验过程及结果分析

2.1 人为抽水试验过程

在研究区采用电法物探确定钻井位置,钻探钻取水井,并进行人为抽水活动,以此研究人为抽水致塌影响因素。

研究钻井属于稳定流承压水完整井,钻井结构及静水位详见图 1。井深 100.90 m,静止水位 0.71 m,采用 J100/16 型深井潜水泵进行抽水试验,水泵放置深度均为 28.0 m,试验过程中水温 T 基本为 21°。对研究井进行三次稳定流抽水试验及停止抽水后的水位恢复试验,分别编号为第 I、II、III 次。在第 I 次抽水试验前,预先采用水泵抽水方式进行洗井,将钻井内沉渣排出。在试验中分别对静止水位、抽水时水位、恢复水位进行观测。记录三次试验过程中各阶段经历时长,第 I 次抽水试验时间总长为 930 min,水位恢复总时长为 600 min;第 II 次抽水试验时间总长为 1 110 min,水位恢复总时长为 720 min;第 III 次抽水试验时间总长为 1 170 min,水位恢复总时长为 780 min。

2.2 人为抽水试验结果分析

2.2.1 研究钻井稳定流抽水参数计算

研究钻井总共进行三次稳定流抽水试验,采用其中一组抽水试验数据计算该钻井含水层的渗透系数 k 及影响半径 R ,采用以下公式近似进行计算:

裘布依承压完整井公式:

$$k = \frac{0.366Q \cdot (\lg R - \lg r_w)}{M \cdot S_w} \quad (1)$$

吉哈特承压完整井经验公式:

$$R = 10s_w \cdot \sqrt{k} \quad (2)$$

式中: k ——渗透系数/(m·d⁻¹);

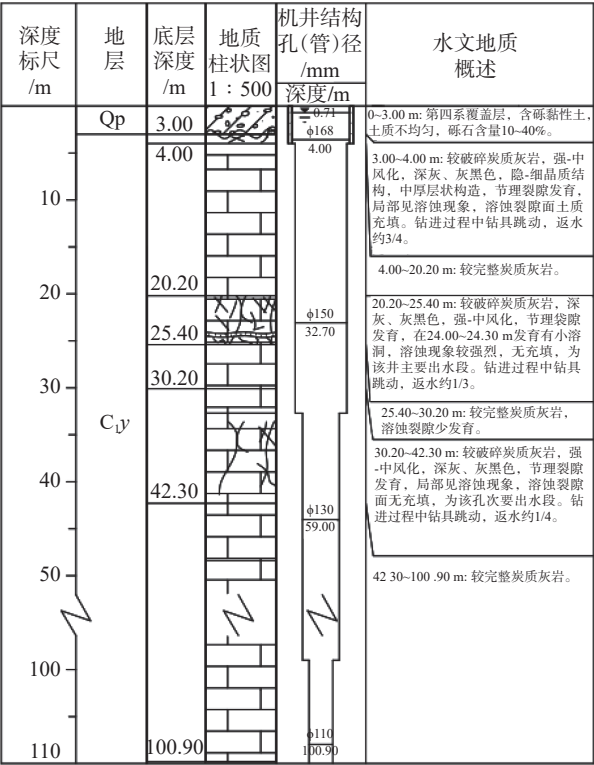


图 1 钻井结构图

Fig. 1 Drilling structure diagram

Q ——稳定流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);
 R ——影响半径/m;
 r_w ——抽水井半径/m;
 M ——含水层厚度/m;
 S_w ——水位降深/m。

结合水文地质试验资料,现场采用三角堰确定抽水稳定流量 Q 为 $121.392 \text{ m}^3/\text{d}$,含水层厚度 M 按 5.20 m 取用,水位降深 S_w 为 11.290 m ,抽水井半径 r_w 为 0.075 m ,运用 Matlab 软件计算得到渗透系数 k 为 2.56 m/d ,影响半径 R 为 180.61 m 。所得到的渗透系数 k 及影响半径 R 结果相对不同区域炭质灰岩地层有较大差异,说明该区域岩溶裂隙发育的不规则性。

2.2.2 抽水试验及水位恢复试验曲线结果分析

对研究钻井采用同一定流量进行了三次相同降深的抽水试验与水位恢复试验,对应曲线对比见图 2、图 3。

通过对比图 2 中的三条抽水试验曲线段可得出以下结论: ①100 min 以内,三次抽水试验水位下降速度相当,分析其原因: 短时间内抽水致水位降深有限,钻井内及其周边水源补给充足,小裂隙、小储存水源对水位降深影响作用较小; ②100 min 以后,第 II、III 次水位下降速率相当,但均缓于第 I 次,说明在首次抽水过程中,岩溶裂隙中充填物在抽水过程中被慢慢带出,裂隙间已形

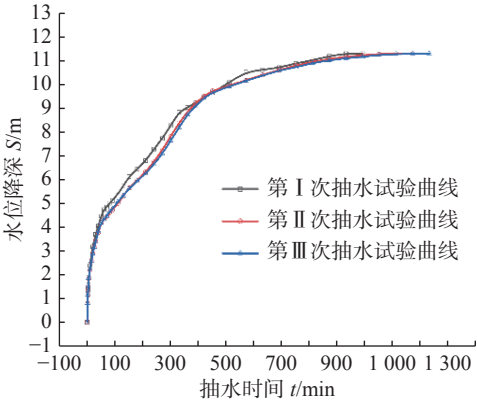


图 2 同一钻井三次定流量抽水试验曲线对比

Fig. 2 Comparison of three pumping test curves with a constant flow rate in the same well

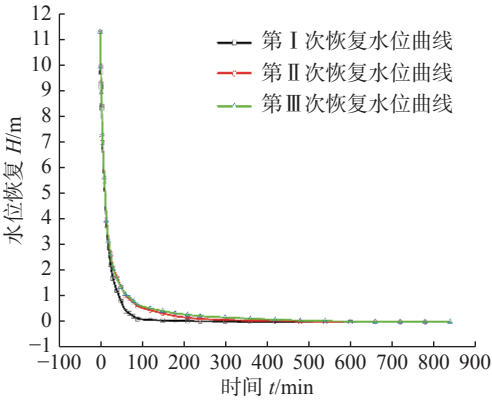


图 3 同一钻井三次定流量水位恢复试验曲线对比

Fig. 3 Comparison of three constant flow water level recovery test curves in the same well

成流畅通道,在后期抽水水位降低时,能够有效对钻井进行补给,因此 100 min 以后,第 II、III 次水位下降速率均缓于第 I 次,而岩溶裂隙中充填物有限,在首次长时间抽水时可受水动力影响的填充物已基本带出,岩溶裂隙之间已基本贯通,在后期抽水过程中通过岩溶裂隙对钻井补给作用是相当的,故第 II、III 次水位下降速率相当; ③三次相同定流量抽水试验达到稳定水位时间逐渐增长,第 II、III 次抽水达到稳定水位时间差值较第 I、II 次抽水达到稳定水位时间差值小 120 min,说明在经历首次较长时间抽水时,地下水动力将岩溶裂隙中的填充物带出,岩溶裂隙间形成了流畅通道,在后期抽水时,岩溶裂隙通道能有效地对钻井进行补给,故三次定流量抽水试验达到稳定时间逐渐增长。而岩溶裂隙中的填充物有限,在首次较长时间抽水过程中,可受水动力影响的填充物已基本带出,岩溶裂隙间已基本贯通,故通过小裂隙及小储存水源对钻井进行补给效果相差较小。

通过对比图 3 中的三条水位恢复时间曲线可得出

以下结论: ①30 min 以内, 三次试验的水位恢复速度均较快, 且相当, 分析原因为: 水位恢复初期, 主要由溶洞水及大孔隙通道内储存水补给, 不足以受小孔隙水源影响, 故三次试验的水位恢复初期速度均较快, 且相当; ②30 min 以后, 水位恢复速度逐渐减缓, 第Ⅱ、Ⅲ次水位恢复速率相当, 但均小于第Ⅰ次, 说明钻井区域周边有部分溶洞储存着大量的水源, 但在首次抽水试验时, 溶洞中的储存水源慢慢向钻井补给, 则储存量逐渐减小, 其对初次抽水试验时的补给作用强, 而对后期抽水试验补给作用相对较弱, 且后期补给作用因太小, 而对水位恢复作用影响甚微, 故第Ⅱ、Ⅲ次水位恢复速率相当, 但均小于第Ⅰ次; ③三次水位恢复试验时间依次增长, 其中第Ⅱ、Ⅲ次水位恢复时间的差值较第Ⅰ、Ⅱ次水位恢复时间的差值小 60 min, 且第Ⅱ、Ⅲ次水位恢复时间相当, 分析其原因: 溶洞及大孔隙内储存水源等主要补给作用在三次试验中相当, 产生此现象主要是研究钻井区域周边部分溶洞储存水源在每次抽水试验中均对钻井进行补给, 逐渐消耗殆尽, 而在短时间内又不能恢复到原有储能, 故对水位恢复补给作用逐渐减弱, 而后期试验, 因该部分蓄水溶洞水源基本已亏空, 对研究钻井补给作用甚微, 故第Ⅱ、Ⅲ次水位恢复时间相当。

3 抽水致塌的控制因素和影响因素

在炭质灰岩地区进行抽水活动, 抽水致塌受多种因素共同作用, 结合该研究区自身特殊性, 主要从研究区地形地貌、覆盖层岩性特征、区域地质构造、岩溶发育程度、水动力因素及成井工艺等影响因素进行分析研究。场区抽水致塌受多种因素关联作用, 随着抽水活动有序进行后, 其主次因素会因抽水条件及过程的递进而相应替换。

3.1 地形地貌对抽水致塌的影响

研究区属于低山丘陵地貌, 地势起伏较大, 周边发育有小型的季节性地表沟溪, 可补给地下水, 通过岩溶裂隙管道在水力坡度下径流, 最终向湘江排泄。北侧距离约为 800 m, 地势低洼处出露一上升泉, 流量约为 50 m³/h。

钻井位于地势较低水田边, 地势较周边低洼, 地形上刚好形成一汇水区域, 雨季时, 雨水易汇于该区域。钻井抽水过程, 井内水位迅速下降, 水位最大降深达 11.29 m, 同时钻井外围土层中水位下降约 0.40 m, 说明周边地表水以钻井为中心汇集, 通过岩面岩溶裂隙补给钻井, 地下水流速及水力梯度逐渐变大, 土层中的细颗粒随水流通过岩溶裂隙流入钻井, 抽出水体呈浑浊并稍

带岩屑, 土层的渗透系数增大, 力学强度降低, 促进上覆土层中土洞形成, 为岩溶塌陷创造有利条件。

3.2 覆盖层岩性特征对抽水致塌的影响

钻井施工时, 查明研究区表层为第四系 Q₃ 可塑状含砾黏性土, 厚度为 3.00 m; 下部则为石炭系下统岩关组(C_{1p})炭质灰岩, 在 3.00~4.00 m、20.20~25.40 m(其中 24.00~24.30 m 为小溶洞, 无黏性土充填)、30.20~42.30 m 为较破碎炭质灰岩, 岩溶裂隙较发育, 推断此即为钻井水源来源段, 钻井其余深度范围均为较完整炭质灰岩。

抽水泵放置井内 28.00 m 处进行抽水, 抽水稳定水位为 12.00 m, 炭质灰岩地层岩溶发育以裂隙及小溶洞为主, 地表水通过基岩面的岩溶裂隙补给钻井, 抽水时水位降深速度较快, 地下水流速及水力梯度逐渐增大, 含砾黏性土在渗透作用下, 其中的细颗粒被水流带入基岩裂隙或钻井, 降深越大, 则地下水流速及水力梯度越大, 更易促进基岩上覆土层中土洞形成, 促进岩溶塌陷形成。

钻井经过多次抽水, 地下水位上下波动, 基岩面上部土体在饱水状态时黏结强度降低, 在水位下降时逐渐崩解, 慢慢形成雏形土洞; 而当停止抽水, 水位慢慢恢复, 岩面与上部土体间所形成的土洞内由于存在气体, 在水位恢复过程中, 土洞中的气体短时间不能排出, 土洞内气压会逐渐增大, 周围水位恢复速度大于发育有土洞位置速度, 但随着时间推移, 土洞内气体气压会随着周边水位升高而逐渐增大, 当土洞内气压增大到一定值时, 土洞内气体会通过上覆土层中的孔隙裂隙逐渐消散, 洞内水位随着洞内气压消散而逐渐上升, 土洞内壁会在上升水体浸泡下黏结强度逐渐减弱而崩解, 土洞内侧土体崩解剥落, 土洞体积随之变大, 洞内气压随之减小, 形成真空负压作用, 洞内水位进一步上升, 如此循环, 直至土洞扩大到洞顶土体自重应力大于土体的抗塌力, 岩溶塌陷由此形成。经过多次抽水活动, 最终在钻井南东侧 1.3 m 处形成一不规整椭圆塌坑。

3.3 区域地质构造对抽水致塌的影响

研究区东南侧(距离约 0.5 km、1.3 km)有性质不明断层通过, 断层走向近似平行, 呈北东-南西走向, 控制这一区域的岩层产出, 周围大泉点正好发育于该断层上, 岩溶塌陷受地质构造控制较明显。电法物探及地质钻探资料显示, 研究区内浅部岩体受溶蚀风化作用破碎, 受次一级构造影响, 浅层岩溶裂隙、溶洞(槽)较发育, 浅部岩体成为地下水强烈活动、赋存和塌落物运移的较好空间和通道, 地下水在土层与基岩接触面附近活

动,软化基岩面处土体,土粒被地下水沿岩溶裂隙通道带走而逐渐形成土洞,而抽水促进以上地下水活动,是地面岩溶塌陷产生的基础,岩溶裂隙的发育受地质构造的影响,在一定程度上控制着塌陷的分布。

抽水钻井在进行第Ⅲ次抽水试验后段时,于钻井南侧距离为 1.30 m 处产生一个塌坑,地面形态呈不规整椭圆形,长轴 a 为 1.40 m,短轴 b 为 0.90 m,塌坑深 h 为 0.35 m。塌坑长轴方向与岩溶裂隙发育方向基本一致,说明炭质灰岩地区抽水致塌位置受地质构造的控制较为明显,由含水断层破碎带引起。

3.4 岩溶发育程度对抽水致塌的影响

研究区采用电法物探及钻探两种勘察手段进行调查,根据研究区电阻率联合剖面曲线的特征形态,推断研究区存在南东-北西方向的破碎断裂带;在推断出的破碎断裂带上采用四极电测深查明研究区在 20~25 m 之间存在低阻异常体,同时根据不同供电电极距的联合剖面测量结果,比较两种不同供电电极距曲线,易发现当 $AB/2$ 大于 40 m 后,尾枝曲线呈近 45° 上升,由此可反映在 30~40 m 仍有低阻体存在,说明该条异常体延深较大。电法物探结果表明研究区岩溶主要以裂隙为主,局部为小型溶洞,岩溶属弱发育,电法物探探测过程及结果详见图 4、图 5、图 6、图 7。

在选定区域采用钻探手段直接揭露岩土体分布情况,上覆土层厚度为 3.0 m,下伏基岩面起伏不平,溶沟溶槽较发育,其大致呈南东-北西向分布,分别于 3.00~4.00 m、20.20~25.40 m(其中 24.00~24.30 m 为小溶洞,无黏性土充填)、30.20~42.30 m 处查明为较破碎炭质灰岩,其余区段为较完整炭质灰岩,综合判定该区域岩溶属弱发育。钻探地层详细情况见图 1。

基岩面处上覆土体因长时间受地下水浸泡,基本呈软塑或流塑状态,其抗剪强度遭受极大弱化,通过为人抽取地下水时,地下水位从上覆土层迅速降至下伏基岩内,水体通过基岩面溶蚀裂隙入渗至抽水井内,岩溶发育越强烈,水体补给抽水井越迅速,基岩面处土体在较强水动力作用下被水体侵蚀剥落,在岩面处越容易形成土洞,促进岩溶塌陷的产生。而当停止抽取地下水,抽水井内水体得到周边水源补给,井内水位迅速恢复,井内水体以岩溶裂隙为运输通道及时补给上覆土体中水位,若岩溶发育越强烈,则抽水井中水体补给到土体中速度越快,对上覆土体的侵蚀作用越强烈,岩面处土体越容易发生侵蚀破坏,越易引发岩溶塌陷;反之,水体对岩面上覆土体侵蚀破坏越弱,越不易引发岩溶塌陷。

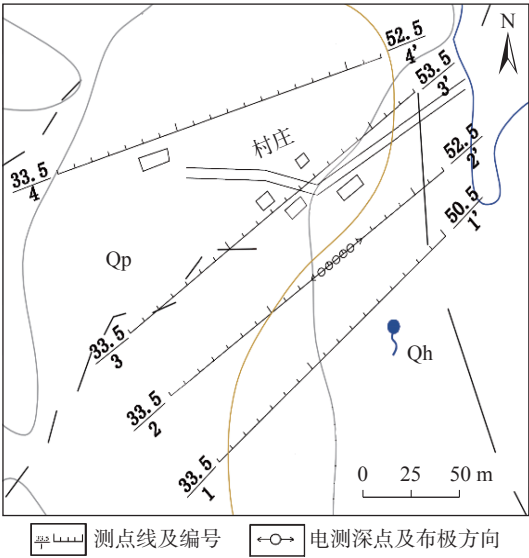


图 4 研究区电法工作布置平面图

Fig. 4 Plan of the electrical work layout of the study area

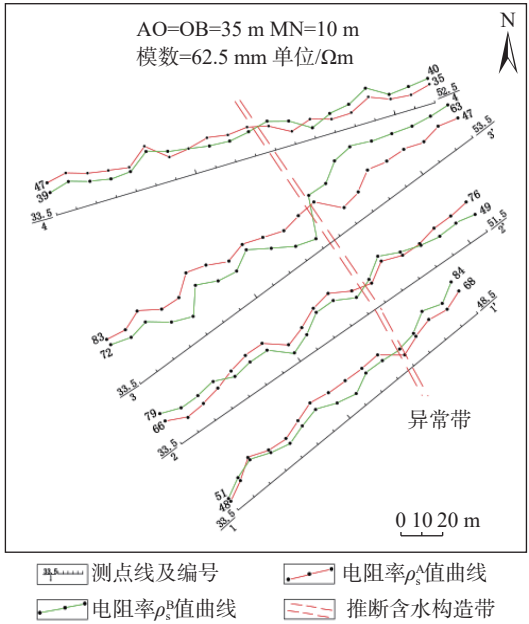


图 5 研究区联合剖面 ρ_s 剖面平面图

Fig. 5 Joint section ρ_s section plan of the study area

3.5 水动力因素对抽水致塌的影响

研究区地下水主要有两类,一类是位于表层的松散土层孔隙潜水,该层埋藏浅,赋存于上部冲洪积形成的含砾黏性土层中,受大气降水、地表溪沟水体的补给,季节性影响较大,水量贫乏-中等;另一类是碳酸盐岩碎屑岩互层溶洞裂隙水,主要赋存于石炭系下统岩关阶(C_{1y})炭质灰岩中,浅部岩溶裂隙发育,有助于岩溶管道发育和地下水富集,该层地下水水量贫乏。

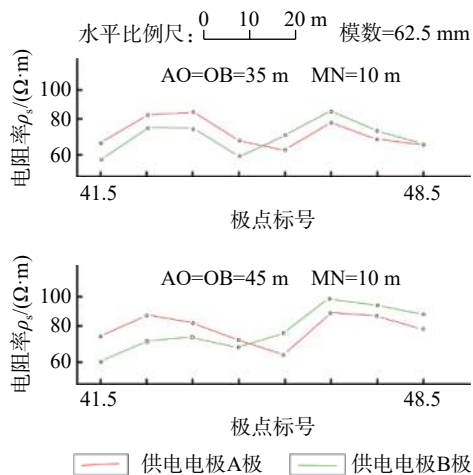
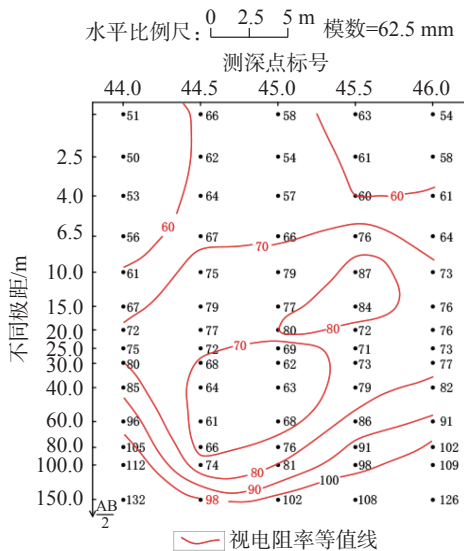


图 6 研究区 2 线不同供电电极距联剖对比曲线

Fig. 6 Contrast curve of different electrode distances in the 2 lines of the study area

图 7 研究区 2 线视电阻率 (ρ_s) 断面等值线图Fig. 7 2-line apparent resistivity (ρ_s) cross-sectional contour map of the study area

该区地下水主要为低水头承压水, 钻探查明上覆土层厚度为 3.0 m, 测得钻井内稳定水位为 0.71 m, 其压力水头在土层内, 通过岩溶裂隙通道与土层接触, 使局部土层饱和形成软塑土, 多次对钻井抽水活动加强了地表水与地下水之间的水力联系, 产生较大水位波动, 软塑土易被水流带走而形成土洞, 土洞内壁土体在地水位上下波动, 逐渐侵蚀崩解, 土洞进一步扩大, 当土洞扩大至一定程度时, 在突遇抽取地下水致使地下水位骤降, 上覆土体由于降雨或是浸水作用容重增大, 同时, 其土体抗剪强度减弱, 土洞原有的平衡被打破而突然失稳, 便产生岩溶塌陷。而当抽水量超过水的补给量时, 水位产

生过大降深, 极易产生岩溶塌陷。

3.6 成井工艺对抽水致塌的影响

钻井时, 若未将套管下至较完整基岩或下入深度不够, 在抽水时水流直接对上部土层潜蚀、搬运随水被抽出, 打破原有受力平衡状态, 极易产生岩溶塌陷。该研究钻井已将无缝钢管下放至较完整炭质灰岩层, 并有一定嵌固深度, 基本阻绝地表水通过钻井口直接下渗连通地下水, 成井工艺对该钻井抽水致塌影响较小。

综上所述, 研究区钻井人为抽水致塌过程及现象, 其塌陷产生受多种因素共同作用影响, 而非单一因素作用结果, 其主要受覆盖层岩性特征、岩溶发育程度及水动力因素作用影响, 其中, 地下水位升降在岩溶塌陷过程中发挥主要作用, 地下水位升降促进上覆土层中土洞形成、扩大, 直至打破上覆土层原有平衡, 最终导致岩溶塌陷。

4 预防措施建议

针对研究区特殊岩性特征条件下的抽水活动, 在此提出具体预防措施, 主要从以下几方面进行:

4.1 减小抽水水位降深

研究区基岩为炭质灰岩, 岩溶裂隙发育弱, 水量较小, 在高强度抽水工况下, 短时间内水位降深过大, 极易引发地表塌陷危险。建议钻井抽水时, 选择小功率水泵进行抽水, 延长抽水时间, 使地下水抽排与水源补给达到动态平衡, 避免短时间内产生过大降深; 可增大水源补给, 提高蓄水能力, 在地表一定深度范围内设置蓄水井, 一定时间内高强度的抽水活动, 蓄水井中水量满足抽水要求, 井位周围不致产生过大水位降深。

4.2 正确抽水方式

研究区地下水位较浅, 抽水活动时, 地下水位易产生基岩面上下波动情况, 故结合研究区实际情况, 建议钻井抽水时, 采用稳定抽水量方式抽水, 尽量避免间歇式抽水方式^[19], 可有效减小地下水活动, 基岩面土体不易受地下水剥落破坏, 减缓土洞的形成, 进而预防岩溶塌陷发生。

4.3 减少地表水与地下水间的水力联系

研究区确认有两层地下水, 一类是土层中的孔隙潜水, 另一类是炭质灰岩中的溶洞裂隙水, 为了减少地表水与地下水间的水力联系, 钻井过程中, 已将无缝钢管插入完整基岩, 并嵌入一定深度, 以防止抽水活动时地表水直接从井口流入井内, 造成地表水位突降, 表层土体中孔隙水压力急剧减小, 其有效应力剧增而产生地面塌陷。

4.4 其他

结合研究区周边实际环境情况,地表水及降雨容易从钻井周边直接往下入渗,对土体产生侵蚀作用及降低上覆土体力学强度,建议对研究区抽水井周边地表进行硬化,避免地表水或降雨对上覆土体发生侵蚀作用,同时,抽水井周边严禁震动或是大面积堆载。

5 结论与建议

5.1 结论

炭质灰岩地区岩溶发育主要以岩溶裂隙及小溶洞为主,在抽水水位降深时,岩溶裂隙与小溶洞内储存水为主要补给源和运输通道;研究区所得到的渗透系数 k 及影响半径 R 结果较同类地层有较大差异,说明该区域岩溶裂隙发育具不规则性;炭质灰岩地区抽水致塌位置受地质构造的控制较为明显,由含水断层破碎带引起;当抽水量超过水的补给量时,水位产生过大降深,极易产生岩溶塌陷;研究区钻井人为抽水致塌受多种因素共同作用影响,而非单一因素作用结果,其主要受覆盖层岩性特征、岩溶发育程度及水动力因素作用影响,其中,地下水位升降在岩溶塌陷过程中发挥主要作用,地下水位升降促进上覆土层中土洞形成、扩大,直至打破上覆土层原有平衡,最终产生岩溶塌陷。

5.2 建议

通过试验综合分析了炭质灰岩地区抽水致塌的影响因素及预防措施,但是尚未建立相应的抽水致塌模型,缺乏模型计算数据与现场试验数据对比。建议未来进一步通过建立模型实现以下研究:对抽水致塌的整个受力变化过程进行定量研究,求出抽水致塌的临界降幅水位。

参考文献 (References):

- [1] 谢忠球,万志清,钱海涛.抽水引起岩溶区路基塌陷的机理分析及其控制[J].公路,2006,51(7):25-29. [XIE Zhongqiu, WAN Zhiqing, QIAN Haitao. Mechanism analysis and control of roadbed subsidence in karst area caused by water pumping [J]. Highway, 2006, 51(7): 25-29. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 柳林,姜伏伟,张发旺,等.岩溶地下工程施工抽水诱发黏土层地面塌陷机理及临界条件探讨[J].中国岩溶,2019,38(5):752-758. [LIU Lin, JIANG Fuwei, ZHANG Fawang, et al. Discussion on the mechanism and critical conditions of ground subsidence of clay layer induced by pumping of karst underground engineering [J]. China Karst, 2019, 38(5): 752-758. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 雷国良,周济祚,邓自民,等.贵州水城工业区覆盖型岩溶塌陷研究[J].中国地质灾害与防治学报,1996,7(4):39-46. [LEI Guoliang, ZHOU Jizuo, DENG Zimin, et al. A study on mantled karst collapse at Shuicheng industry district in Guizhou [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(4): 39-46. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨志斌.骆驼山煤矿岩溶裂隙水抽水试验[J].煤矿安全,2012,43(11):41-44. [YANG Zhibin. Pumping test on the karstic fissure water in Luotuoshan coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(11): 41-44. (in Chinese with English abstract)]
- [5] BARRY F. BECK. Environmental and engineering effects of Sinkholes-the processes behind the problems [J]. Environmental Geology and Water Sciences, 1988, 12(2): 71-78.
- [6] 康彦仁,项式均,陈健,等.中国南方岩溶塌陷[M].广西:科学技术出版社,1990. [KANG Yanren, XIANG Shijun, CHEN Jian, et al. Karst collapse in southern China[M]. Guangxi: Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)]
- [7] 唐辉明.工程地质学基础[M].北京:化学工业出版社,2008. [TANG Huiming. Foundation of engineering geology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)]
- [8] 王滨,贺可强,姜先桥,等.岩溶塌陷渗压效应致塌机理研究:以山东省枣庄市岩溶塌陷为例[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(1):18-22. [WANG Bin, HE Keqiang, JIANG Xianqiao, et al. Study on formation mechanism of karst collapse by seepage pressure——Karst collapse in Zaozhuang City, Shandong Province as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(1): 18-22. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陶小虎,赵坚, WANG X M, 等.地下水位变化对透-阻型岩溶塌陷影响的分析[J].中国岩溶,2017,36(6):777-785. [TAO Xiaohu, ZHAO Jian, WANG X M, et al. Analysis of seepage effect on the formation of sinkhole in unconfined aquifer-aquitard system caused by groundwater changes [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 777-785. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 余政兴,金福喜,段选亮.河床透-阻型岩溶塌陷形成机理[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(2):57-66. [YU Zhengxing, JIN Fuxi, DUAN Xuanliang. Formation mechanism of karst collapse with unconfined aquifer-aquitard system in riverbed [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 57-66. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周建,张映钱,方亿刚,等.水位变动及降雨入渗联合作用对岩溶地面塌陷的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):218-222. [ZHOU Jian, ZHANG Yingqian, FANG Yigang, et al. Analysis of joint action of water level fluctuation and rainfall on the influence of karst ground collapse [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 218-222. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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. [ZHU Shouzeng, ZHOU Jianhong, CHEN Xuejun. Analysis of forming conditions and main influential factors of karst collapse in west urban district, Guilin City [J] . Journal of Guilin Institute of Technology, 2000, 20(2): 100–105. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 冯亚伟,李志峰,仝路,等. 山东荆泉断块区覆盖型岩溶塌陷控制因素和影响因素分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 73–82. [FENG Yawei, LI Zhifeng, TONG Lu, et al. Analysis on factors controlling and influencing overburden karst collapse in Jingquan fault block, Shandong Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 73–82. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 周长松,邹胜章,朱丹尼,等. 广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡—中村段岩溶塌陷成因 [J] . 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 146–152. [ZHOU Changsong, ZOU Shengzhang, ZHU Danni, et al. An analysis of the cause of karst collapses near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 146–152. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 涂婧,魏瑞均,杨戈欣,等. 湖北武汉岩溶塌陷时空分布规律及其影响因素分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 68–73. [TU Jing, WEI Ruijun, YANG Gexin, et al. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of karst collapse and its influence factors in Wuhan City of Hubei Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 68–73. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 雷明堂,蒋小珍,李瑜. 唐山市岩溶塌陷模型试验研究 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(增刊1): 187–194. [LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LI Yu. Model test study of karst collapse in Tangshan City [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(Sup1): 187–194. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴庆华,张伟,刘煜,等. 基于物理模型试验的岩溶塌陷定量研究 [J] . 长江科学院院报, 2018, 35(3): 52–58. [WU Qinghua, ZHANG Wei, LIU Yu, et al. Quantifying the process of karst collapse by a physical model [J] . Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(3): 52–58. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张鑫,崔可锐,查甫生. 覆盖型岩溶塌陷临界水位降幅模型试验研究 [J] . 科学技术与工程, 2016, 16(12): 195–199. [ZHANG Xin, CUI Kerui, CHA Fusheng. Experiment research of the critical water level fell of covered karst collapse [J] . Science Technology and Engineering, 2016, 16(12): 195–199. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈学军,周明芳,陈富坚,等. 岩溶地区破坏性抽水致塌试验研究—以广西桂林西城区为例 [J] . 地质科技情报, 2002, 21(1): 79–82. [CHEN Xuejun, ZHOU Mingfang, CHEN Fujian, et al. Destructive pumping test to study the characteristics of karst collapses in limestone region: A case study in the western urban area of Guilin City [J] . Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 79–82. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 程星,彭世寿. 岩溶区地下水位下降致塌的数值模拟研究 [J] . 地球与环境, 2005, 33(增刊1): 119–123. [CHENG Xing, PENG Shishou. The numerical simulating study on the karst collapse of the fall of groundwater table [J] . Earth and Environment, 2005, 33(Sup1): 119–123. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 冯永,赵辰,山傲岩. 基于FIAC3D的抽水致塌动态过程模拟分析 [J] . 工程勘察, 2015, 43(6): 33–36. [FENG Yong, ZHAO Chen, SHAN Aoyan. Dynamic procedure simulation by FIAC3D of ground collapse caused by groundwater pumping [J] . Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(6): 33–36. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 苏添金,洪儒宝,简文彬. 覆盖型岩溶土洞致灾过程的数值模拟与预测 [J] . 自然灾害学报, 2018, 27(5): 179–187. [SU Tianjin, HONG Rubao, JIAN Wenbin. Numerical simulation and prediction of covered karst collapse [J] . Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 179–187. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李慎奎. 武汉地区沙漏型岩溶塌陷数值分析与模型试验研究 [J] . 隧道建设, 2020, 40(7): 981–987. [LI Shengkui. Numerical analysis and model test of hourglass-shaped karst collapse in Wuhan area [J] . Tunnel Construction, 2020, 40(7): 981–987. (in Chinese with English abstract)]