

王有智, 杨宁, 于林弘, 等. 烟台中桥岩溶塌陷发育特征及防治对策[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 1007-1015.

DOI: 10.11932/karst20220612

# 烟台中桥岩溶塌陷发育特征及防治对策

王有智, 杨宁, 于林弘, 吕凌峰

(山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264004)

**摘要:**中桥灰岩分布区是胶东岩溶地貌的典型代表, 近些年岩溶塌陷较为严重, 给当地人民生命财产造成严重威胁。文章以力学、构造地质学、水文地质学等理论为依据, 宏观微观相结合, 对岩溶塌陷发育特征和过程以及岩溶塌陷触发因素进行研究。结果表明: 在塌陷诸多因素中, 地层岩性是基本条件, 地质构造为主导因素, 而水动力条件是决定因素; 从地貌角度看, 距离河流 300 m 以内区域岩溶发育更强烈, 岩溶塌陷均发生于河流与河流夹角 V 型区域内; 从盖层及构造角度看, 岩溶塌陷多发育于覆盖层厚度为 10~15 m、断裂上盘 1 km 以内的岩溶区域, 为岩溶塌陷脆弱区; 在塌陷触发因素方面, 在具备岩溶塌陷基本前提下, 强降雨、过度采排地下水以及连续干旱, 特别是水位在灰岩面上方 0~2 m 持续波动超过 5 d 以上更易触发塌陷。在岩溶塌陷防治方面首先要合理规划地下水采排方案, 其次在区内建设地下水监测预警网络, 在矿山周边建设止水帷幕工程。

**关键词:**岩溶塌陷; 发育特征; 触发因素; 防治对策

**中图分类号:** P642.25 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2022) 06-1007-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

岩溶塌陷是岩溶发育区主要地质灾害类型之一, 其发生具有隐蔽性、突发性等特点<sup>[1]</sup>, 目前已成为制约岩溶区城乡建设发展的主要地质环境因素。国内外学者针对岩溶塌陷内在机理进行了相关研究, 如地下水潜蚀论、真空吸蚀论、气爆论以及振动论等<sup>[2]</sup>, 各地在成因机理方面具有一定相似性, 但在区域上又不尽相同。烟台市中桥地区分布有大面积的灰岩地层, 为胶东岩溶塌陷最严重区域, 不但严重影响了区内企业及居民的生产生活, 也给百姓带来严重的恐慌情绪, 给不合理开采地下水敲响了警钟。为更

好预防岩溶塌陷, 广大学者从岩溶地层埋藏特征、塌陷分布规律、水动力学、岩溶水系统划分<sup>[3-6]</sup>以及塌陷易发性<sup>[7]</sup>等方面进行了分析和评价。

以上研究, 虽丰富了该地区岩溶塌陷成因理论基础, 但缺少系统性和定量分析, 本次研究基于《山东省栖霞市中桥地区岩溶塌陷地质环境调查》《烟台市城市地质调查》等项目, 通过大量数据分析, 深入剖析该地区岩溶塌陷时空分布规律、岩溶塌陷发育特征、过程及触发因素, 充分认识胶东岩溶塌陷发育模式和演化规律, 以期为进一步合理规划开采地下水、岩溶塌陷监测预警以及更有针对性的防治提供重要科学依据。

资助项目: 栖霞市自然资源和规划局项目(栖霞政采[正平]服务 2017012); 烟台市城市地质调查(地质资源调查部分); 山东省自然资源厅项目(鲁地环资(2018)06号)

第一作者简介: 王有智(1981-), 男, 高级工程师, 从事水工环地质方面工作。E-mail: 89053146@qq.com。

通信作者: 于林弘(1985-), 女, 高级工程师, 从事水工环地质工作。E-mail: yulinhong305@163.com。

收稿日期: 2021-09-23

# 1 研究区概况

## 1.1 自然地理

研究区为中桥岩溶地层分布的核心区域,位于烟台市西南约 25 km,面积约 30 km<sup>2</sup>。本区属暖温带大陆性季风型半湿润气候,年平均降水量为 658.36 mm (1990—2020 年),雨季主要集中在 7—9 月份。区内主要河流有白洋河及其支流燕地河;地形总体趋势呈西北高、东南低,最高海拔为 202.9 m,位于马院山;地貌为剥蚀丘陵,坡度一般为 9°~15°。

## 1.2 地质特征

中桥地区大地构造单元为华北板块—胶辽隆起区—胶北隆起—胶北断隆—臧格庄凹陷,出露有古元古界粉子山群和荆山群、新元古界蓬莱群、中生界白

垩系、新生界第四系地层,第四系覆盖层厚度一般小于 30 m,岩浆岩主要为中生代燕山晚期二长花岗岩、斜长角闪岩,断裂构造走向主要为 EW、NNE,其主要断裂有吴阳泉断裂、大谷家断裂(F1)、燕地河西断裂(F5)、东吴家断裂(F6)。

区内地下水含水岩组分为第四系松散岩类孔隙含水岩组、碳酸盐岩类岩溶裂隙含水岩组以及碎屑岩类孔隙含水岩组(图 1)。松散岩类孔隙含水岩组主要分布在水道观—中桥镇—大潘家村的河谷地带,岩性主要为砂、砾石及碎石土,该含水岩组厚度一般为 5~30 m,地下水水位埋深一般为 1.60~10.00 m;富水性分布不均匀,单井涌水量一般小于 500 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,在白洋河河谷冲洪积层富水性较好,含水层岩性以粗砂和砾石为主,单井涌水量为 500~1 000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,局部地段可达 1 000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> 以上。碳酸盐岩类岩溶裂隙含水岩组在研究区内大面积分布,其岩性主要为蓬

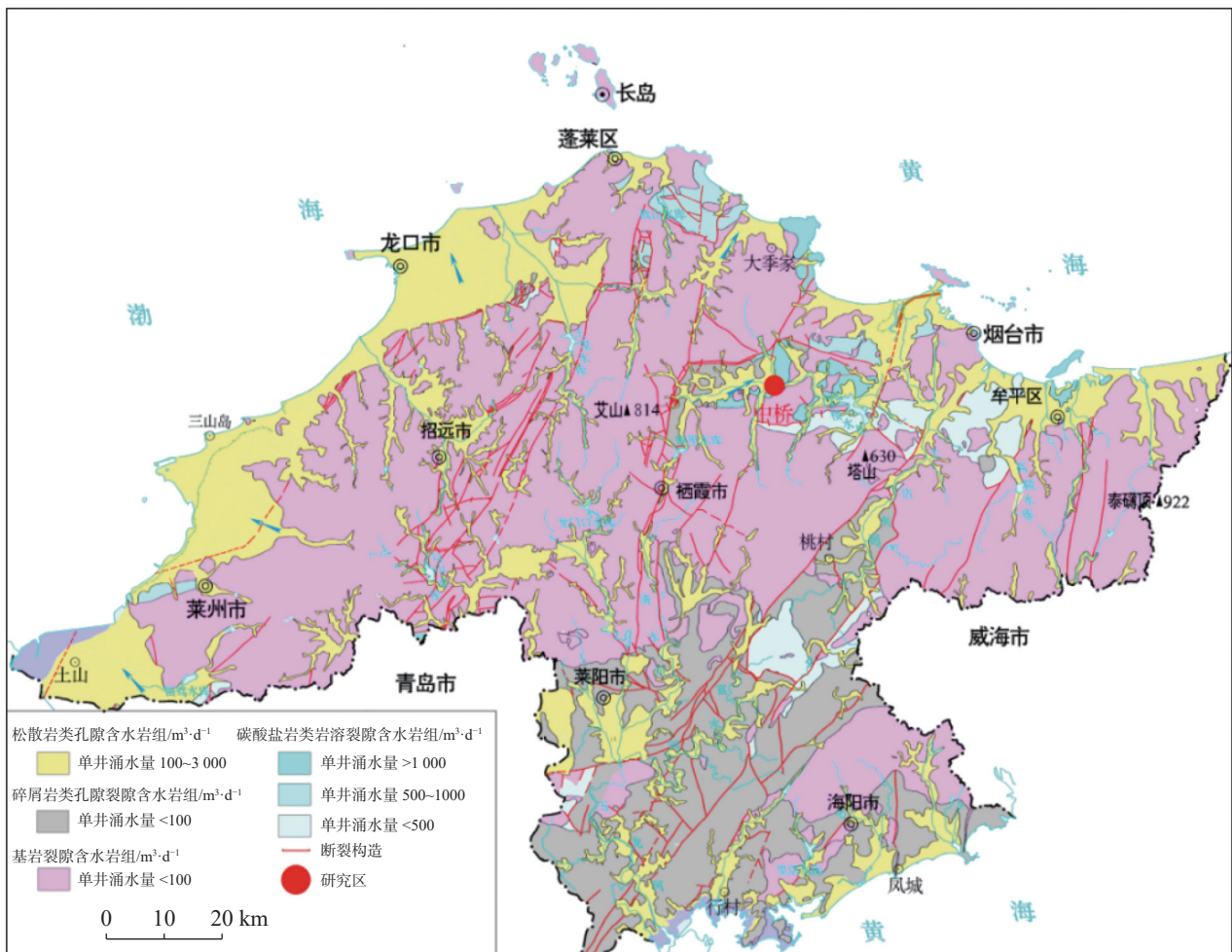


图 1 研究区水文地质略图

Fig. 1 Regional hydrogeology sketch in the study area

莱群香芥组二段中厚层灰岩，岩溶发育深度主要在 -80 m 以上，该含水岩组富水性好，单井涌水量一般大于 500 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>，在中桥村东部地段，单井涌水量可达 1 000~3 000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>，南桥村附近可达 5 000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>。

### 1.3 岩溶发育特征及塌陷概况

本区有裸露型、覆盖型和埋藏型 3 种岩溶类型，覆盖型岩溶区为本次研究重点，其岩溶发育形态主要分为溶孔、溶隙、溶洞 3 种类型。通过对 56 个钻孔进行统计，其中有 47 个钻孔揭露了大小不等的浅层溶洞，埋藏深度多小于 50 m，浅层溶洞主要发育于地表以下 10~50 m 深度内，38% 的溶洞被粉质黏土充填。浅部岩溶区受气候条件和区域地质条件影响明显，有层控性特征，浅部岩溶发育的深度主要受节理、裂隙等发育的深度控制，岩溶发育具有方向性，发育深度一般较小；区内深部岩溶具有定向性分布特点，在断裂构造带、岩性接触带附近，岩溶发育程度较高。

研究区发生的 17 处岩溶塌陷均位于覆盖型岩溶区，塌陷始发于 2005 年(2 次)，之后 2014—2021 年陆续发生了 17 次，主要发生在 6—7 月份，塌坑直径 1~10 m 不等，深度多在 3~5 m，塌陷在平面上以椭圆形、圆形居多，成群出现，断面上为坛状、漏斗状。塌陷多发生在地下水排泄区、河流与河流的 V 型区域及地质构造发育的区域内。塌陷覆盖土层厚度大都在 10~15 m 之间，其塌陷点典型剖面图见图 2。

## 2 岩溶塌陷发育过程

北方岩溶塌陷发育要素基本相同，但发育特征不尽相同<sup>[8]</sup>。

### 2.1 岩溶塌陷发育与断裂构造关系

区内可溶岩发育与导水性质较好的断裂构造联系密切，自新构造运动以来，总体呈抬升状态<sup>[9]</sup>，并形成不同时代和不同方向的延伸断裂(图 3)，整体

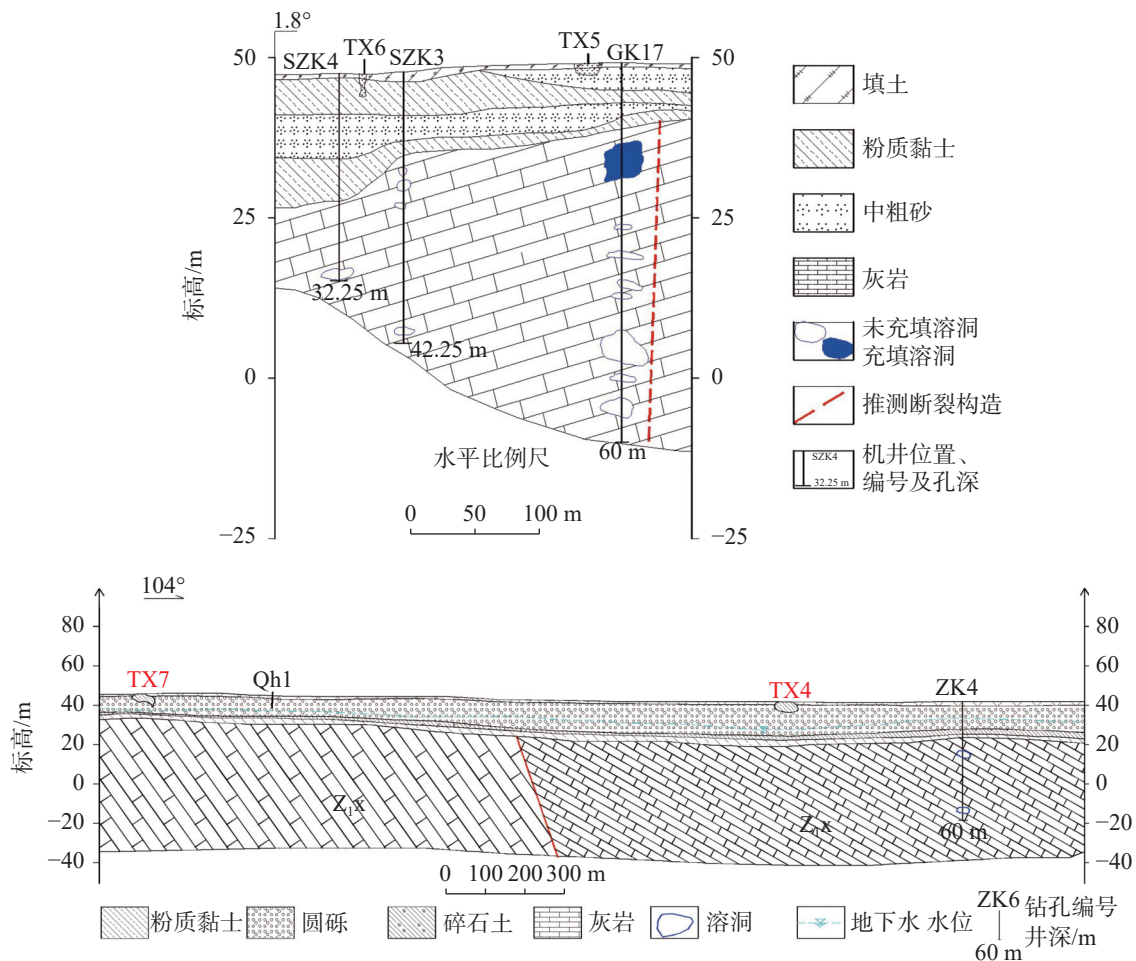


图 2 塌陷区地层剖面图

Fig. 2 Section of the surrounding strata of the subsidence area

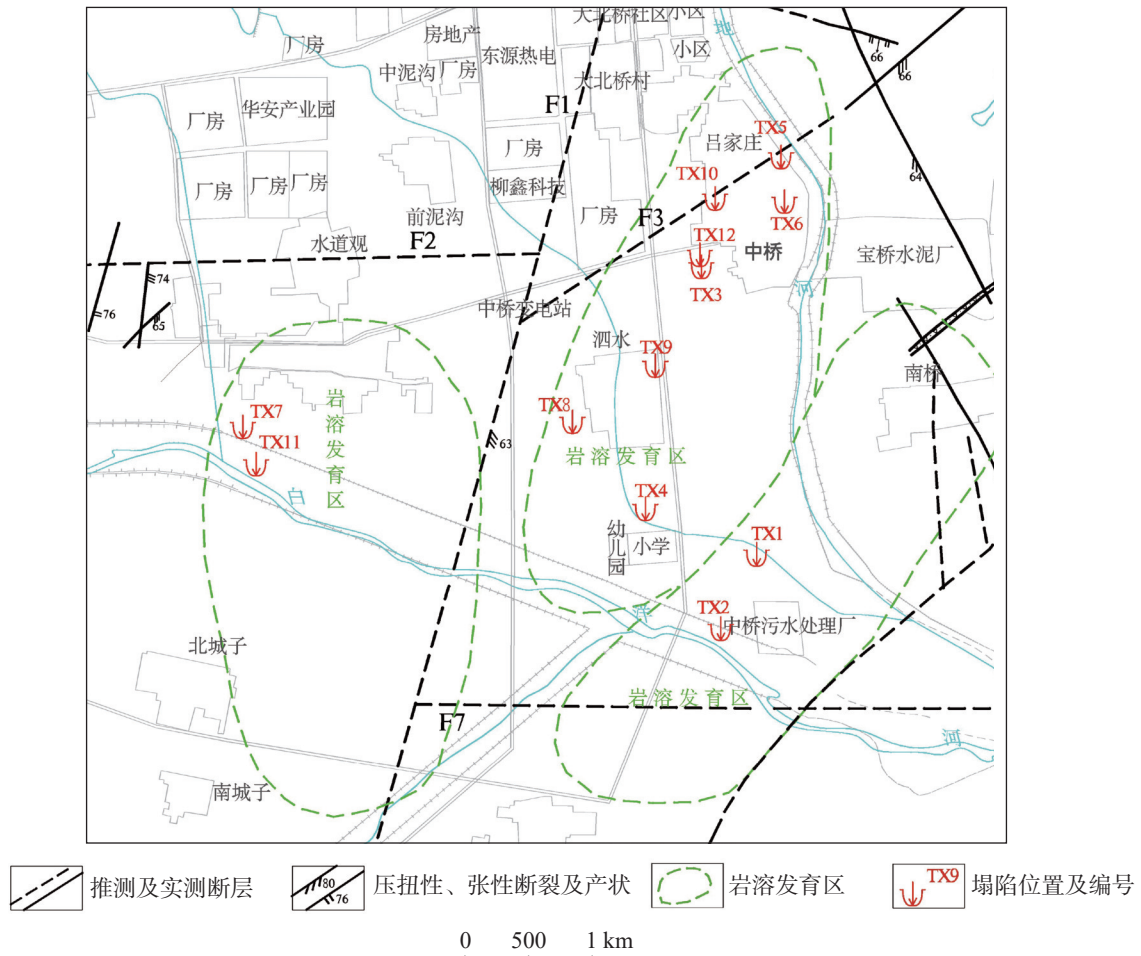


图 3 岩溶塌陷与断裂构造的位置关系

Fig. 3 Location relationship between karst collapse and fault structure

呈网状发育, 断裂性质多为左行压扭性、左行张扭性的正断层。区内岩溶塌陷主要发生于 F1 和 F3 两断裂构造附近, 其次为 F2 和 F7 附近, 83% 以上发生于断裂构造的上盘岩溶发育区(表 1)。经研究发现上盘附近岩石较为破碎, 上盘相对于下盘岩溶发育。断裂的发育加强了含水层之间的水力联系, 有利于岩溶水循环及岩溶溶蚀作用; 断裂构造带附近脉岩较为发育, 闪长(玢)岩脉与灰岩的接触带同样为坍塌土体提供了良好的储存场所和物质运移通道。

### 2.2 岩溶塌陷发育与河流关系

钻孔揭露的岩溶强发育区多分布于白洋河与燕地河内夹角 V 型区内(图 2), 分析发现 3/4 的塌陷点距离河流不到 300 m(表 1), 该区域地势低洼, 是地下水主要径流、排泄带, 地下水与地表水水力联系非常密切, 对覆盖松散土层有强烈的潜蚀作用, 为岩溶塌陷的敏感区和脆弱地带。例如, 2018 年, 区内塌陷 TX11 发生在连续降雨后, 当时发现距离塌陷点东

南约 50 m 处的白洋河中出現喷气点, 且此现象持续了三天后停止, 初步分析是由于降雨使得地下水水位迅速抬升, 岩溶通道内的气体受到压缩, 形成高压气团, 作用于管道顶板后, 当强度大于覆盖土层强度时, 便首先在薄弱部位产生气爆效应, 土层土体结构遭到破坏, 在大气压与土体自重的共同作用下发生塌陷。

### 2.3 岩溶塌陷发育与上覆松散岩层关系

第四系松散覆盖层厚度及其砂土层结构、物理力学性质与岩溶塌陷关系密切。中桥地区 17 处岩溶塌陷中 9 处发生在土层厚度小于 15 m 的区域, 占塌陷总数 53%。根据黏性土、砂土、碎石土组合情况, 划分为单层、双层、多层结构三种类型(图 4), 具体为“黏性土”单层、“黏性土—碎石土”双层、“黏性土—砂土—碎石土互层”多层结构, 塌陷其中有 13 处土层为多层结构(表 1), 底部岩性多以碎石土及砂为主, 砂土黏稠性差、粘聚力低, 在地下水的作

表 1 部分岩溶塌陷与相关条件关系一览表  
Table 1 List of relative relations between karst collapse points and structures

塌陷编号	与断裂构造相对位置				与河流位置关系		与土层结构关系			
	F1	F2	F3	F7	上盘	<300 m	>300 m	粉质黏土 单层结构	粉质黏土、碎石 土双层结构	砂土、黏性土、碎石 土多层结构
TX1	-	-	-	√	-	√		-	-	√
TX2	-	-	-	√	-	√		√	-	-
TX3	-	-	√	-	√		√	-	-	√
TX4	√	-	-	-	√	√		-	-	√
TX5	-	-	√	-	√	√		-	-	√
TX6	-	-	√	-	√	√		-	-	√
TX7	-	√	-	-	√	√		-	-	√
TX8	√	-	-	-	√	√		-	-	√
TX9	√	-	-	-	√	√		-	-	√
TX10	-	-	√	-	√		√	-	-	√
TX11	-	√	-	-	√	√		-	-	√
TX12	-	-	√	-	√		√	-	-	√

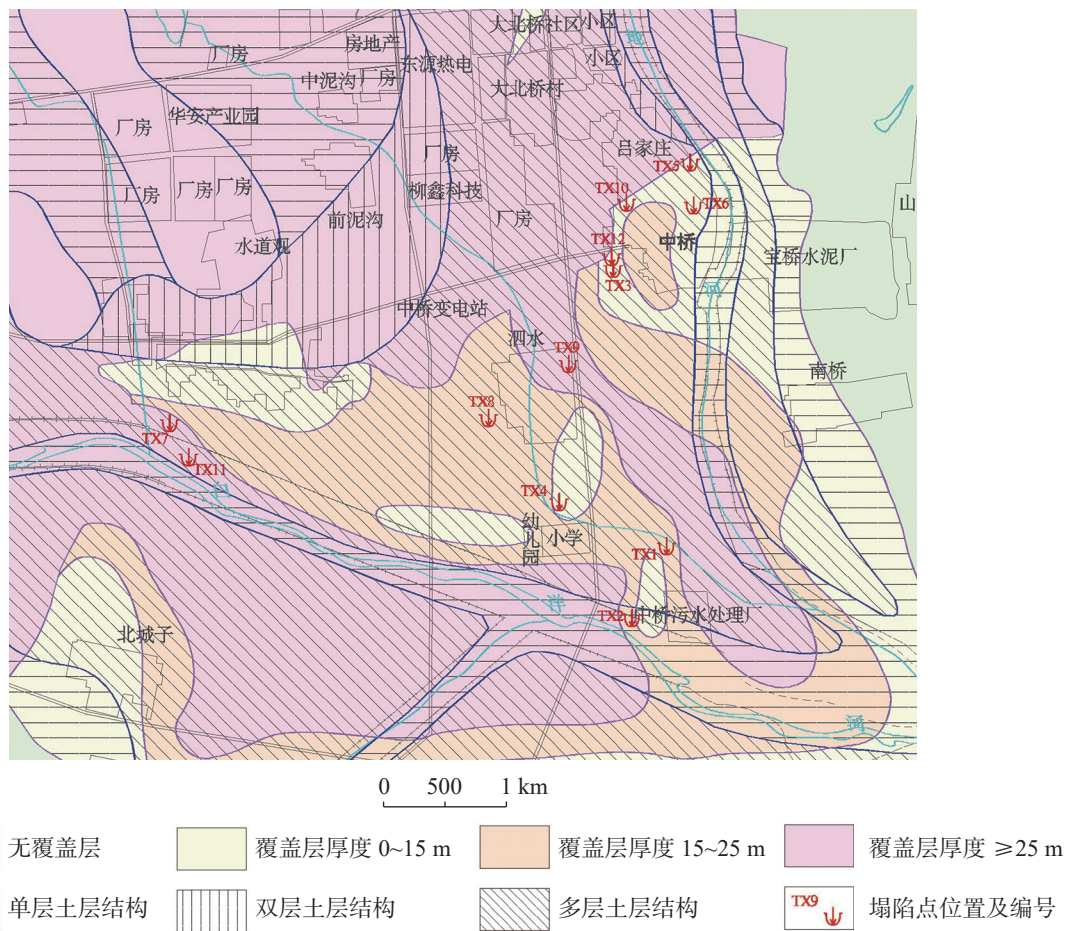


图 4 岩溶区覆盖层厚度及土层结构分布图

Fig. 4 Thickness of overburden and distribution of soil layer structure in karst area

用下易崩解,特别是在岩溶裂隙发育的区域易被水流带走形成土洞,因而接触带为砂性土的多层结构土层更容易发生塌陷。

### 2.4 地下水动力条件

岩溶地下水位变化主要包括岩溶水位急剧下降或上升、水位持续性下降或上升、在岩土界面位置上下反复波动等。2016年为区内岩溶塌陷高峰期,2017年次之(图5),2001—2013年间降水量较为充沛,地下水得到有效补给,通过分析中桥村J6观测孔监测数据可知,在此期间年均水位较为稳定,在灰岩

面上4~6m范围内进行波动,未发生塌陷;自2014年开始,降水量较之前发生突减,地下水水位开始下降,在灰岩面上、下2~4m范围进行波动,发生2次塌陷,2016年区内岩溶地下水水位持续下降,并在灰岩面上2m范围内波动,发生7次岩溶塌陷;2017年7月后降水量骤增,地下水水位开始回升,在灰岩面上2~5m范围内波动,发生4次岩溶塌陷。综上所述,水动力条件的改变是产生塌陷的主要决定因素,这种力主要来自地下水位改变及水流场产生的水、气作用力。

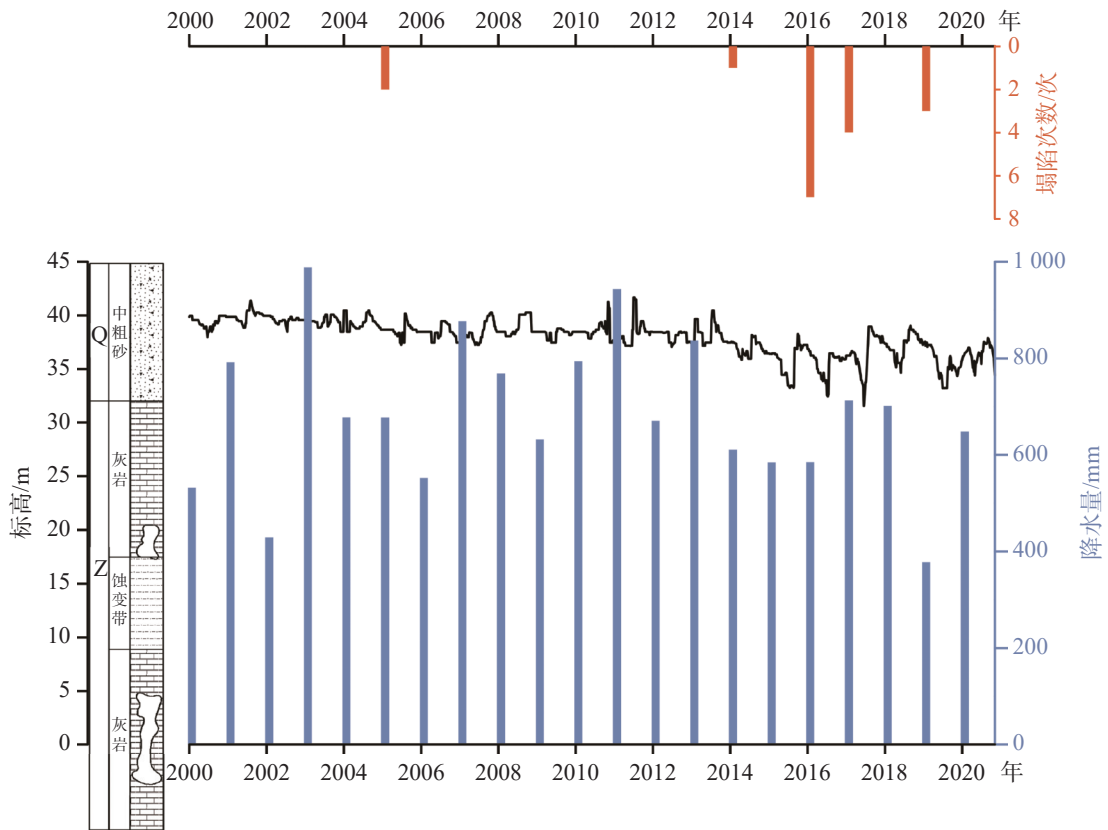


图5 J6观测孔水位变化、降水量与岩溶塌陷关系图(2000-2020年)

Fig. 5 Relationship between water level change, precipitation and karst collapse in observation hole J6 (2000-2020)

## 3 岩溶塌陷触发因素分析

### 3.1 地表水、降水入渗

区内岩溶塌陷多发生在强降雨中或雨后的一段时间内,干旱时期覆盖松散土层呈疏干—半疏干状态,土层自重压力与地下水潜蚀等作用力处于相对平衡状态,当7月份降水量突然变大,降水入渗量加

大,覆盖土体中含水量骤增,土体孔隙率突然减小,水力坡度增大,地下水径流速度加快,将底部松散土体沿着岩溶裂隙携带走,致使岩溶发育区松散覆盖土层结构和力学性质发生破坏及改变,同时粉质黏土土体内聚力及内摩擦角较小,有利于土洞向地表扩大发展<sup>[10-13]</sup>,从而触发岩溶塌陷。

### 3.2 地下水径流

TX5、TX6位于燕地河流域中桥—南桥地下水

强径流带附近,2016年7月,位于吕家庄的自来水井(距离TX5北约80m、距离TX6北约180m)发生井水浑浊现象,两三天后TX5、TX6塌陷发生,此现象说明自来水井与TX5、TX6下伏的岩溶通道有较好连通性,地下水交替强烈,对第四系松散覆盖土层的潜蚀及携带能力强,地下水强径流是触发岩溶塌陷另一因素。

### 3.3 地下水过度开采及水位变化

研究区引起地下水动力条件变化的主要为矿山疏干排水、工矿企业生产用水及农田灌溉。

(1)矿山疏干排水 具相关资料,2016—2017年矿山疏干排水量年均 $1\ 200\times 10^4\text{ m}^3$ ,矿山排水改变了原始的地下水流场,不仅截取下游中桥等地岩溶水的主要补给来源,使中桥村岩溶水位相比20世纪90年代降低了近4m,且形成以采坑为中心的降落漏斗,对该区域地下水位持续下降产生较大影响。2017年11月—2018年6月降落漏斗中心地下水位持续下降,又下降了8.17m。该降落漏斗界线随着矿山排水深度的加大,正在迅速扩展,已由山丘地段扩展至中桥村东部,致使下游地段岩溶水由接受上游补给转变为反向补给上游。

(2)其他工农业生产生活开采地下水 由于研究区岩溶水资源丰富,当地各类企业、村庄在研究区内施工大量的深水井,抽取岩溶水用于生产、生活、灌溉。2016—2019年度除矿山排水外,研究区各类水井开采岩溶水水量约 $350\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 。

居民生活用水、农业灌溉用水和少数工厂企业生产生活用水在小范围内加剧地下水水位的明显变化,形成局部小范围岩溶水位降落漏斗,增大了局部地下水水力坡度,增强了地下水的搬运能力;同时也会增加地表水、第四系水的垂直渗流强度,加大地表水、第四系水与岩溶水的水力联系,使局部第四系松散地层的颗粒物潜蚀加剧,从而形成土洞或土洞扩展。研究区2017年度开采地下水总量约 $1\ 515.39\times 10^4\text{ m}^3$ (合 $4.15\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ),根据2006年11月山东省第三地质矿产勘查院提交的《山东省烟台市城市应急供水水源地调查研究报告》,该区正常允许开采量为 $2.5\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ,概算应急可开采量 $3.5\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ,2017年(不计当地民用和小工业作坊取水量)为 $4.15\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 已超正常允许开采量的66.0%,形成超采态势。

(3)水位变化分析 通过对地下水水位监测数据与岩溶塌陷发生时的相关性分析,将地下水水位变幅诱发岩溶塌陷发生程度分为三种:一是当岩溶水水位五日变幅接近水位与灰岩面距离时,容易引发岩溶塌陷;二是当岩溶水水位五日变幅较小于水位与灰岩面距离时,或岩溶水水位波动范围距离灰岩面较近而水位变幅相对较小时,较易引发岩溶塌陷;三是当水位五日变幅远小于水位与灰岩面距离时,不易引发岩溶塌陷。

## 4 结论及防治对策

### 4.1 结论

岩溶发育区上覆松散层厚度薄、碎石及砂含量高、结构松散,断裂构造导水性性质好,过度开采岩溶地下水,干旱后强降雨引发岩溶发育区地表水越流补给岩溶水,地下水径流强度大、水位在基岩面附近波动大等综合因素,成为近些年岩溶塌陷频发的主要原因。

(1)中桥岩溶塌陷主要发育于白洋河与燕地河夹角V型区内侧,且断裂构造上盘发生塌陷次数多于构造下盘,岩溶塌陷高发于6-7月;

(2)研究区岩溶塌陷发生的地质模式主要为:第四系覆盖层厚度小于15.00m,土岩接触带上覆土层为砂土、碎石土、粉质黏土的多层结构;

(3)持续干旱是岩溶塌陷先决条件,干旱后强降雨引起的土层软化及崩解效应、渗透潜蚀作用以及岩溶管道内水气压力发生重大变化是其主要动力因素;

(4)岩溶塌陷从发育过程到塌陷是多重因素综合作用的结果。其塌陷的主要触发因素有三个:一是地下水在灰岩面0~2m内持续波动超过五日可触发,二是地表水及强降雨入渗可触发,三是越流补给等水动力条件改变可触发。

### 4.2 防治对策

(1)监测网建设 建议建立网状地下水水位监测点,对地下水水位进行实时监测。通过地下水动态变化及时做好岩溶塌陷预警、预报工作<sup>[14]</sup>,当地下水位出现异常变化时,及时组织附近人员实施避让或采用其他有关防治措施;在区内相对稳定地段布设基准点,在岩溶发育区内村庄、学校、道路等重

要地段布设地面变形监测点;设立警示标志与围挡,提高群众对岩溶塌陷的防范意识。

(2)地下水采排建议 加强规划,合理开采地下水。开采强度、水位下降幅度及变化频度对地面塌陷极为关键,应严格控制开采井水位降深和开采强度,应采取小型(小流量水泵)分散开采的方法,计划控制开采量。加强矿山排水的综合利用,减少区域工业和农业用水对地下水的开采;严格控制岩溶水井的施工,同时控制当地企业、村庄对区内现有水井的开采强度;合理调整岩溶水的开采布局,控制开采时间,采取分段错时等开采措施,避免造成地下水径流强度过大;尤其在枯水季节,避免集中长时间开采<sup>[15]</sup>。

(3)矿山采坑帷幕止水的建议 矿山排水导致区域性地下水水位下降,是诱发本区岩溶塌陷的主要因素之一。建议完善对排水矿山水文地质条件的研究<sup>[16]</sup>,查明矿坑周边主要的地下水径流通道,采用注浆帷幕进行止水,降低矿山排水对周围岩溶水位的影响。

## 参考文献

- [1] 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.  
LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen. Research on the present situation and developing tendency of karst collapse and techniques for its supporting[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(3): 1-6.
- [2] 冯亚伟.山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制[J].中国岩溶,2021,40(2):205-214.  
FENG Yawei. Distribution and genesis of karst collapse in Shandong Province[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 205-214.
- [3] 罗小杰.也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J].工程地质学报,2015,23(5):886-896.  
LUO Xiaojie. Further discussion on mechanism of covered karst ground collapse[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 886-896.
- [4] 王建秀,杨立中,刘丹.覆盖型岩溶区土体塌陷典型数学模型的研究[J].中国地质灾害防治学报,1998,9(3):54-59.  
WANG Jianxiu, YANG Lizhong, LIU Dan. Study of the cap soil at the covered karst area by the typical collapse mathematical models[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(3): 54-59.
- [5] 冯亚伟,陈洪年,贾德旺.山东省岩溶地下水系统划分及构造模式[J].水文,2020,40(6):83-88,39.  
FENG Yawei, CHEN Hongnian, JIA Dewang. Division and structural pattern of karst groundwater system in Shandong Province[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6): 83-88, 39.
- [6] 姜伏伟.岩溶塌陷发育机理模式研究[J].中国岩溶,2017,36(6):759-763.  
JIANG Fuwei. Study on the developing model of karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 759-763.
- [7] 张杰,毕攀,魏爱华,陶志斌,朱慧超.基于模糊综合法的烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价[J].中国岩溶,2021,40(2):215-220.  
ZHANG Jie, BI Pan, WEI Aihua, TAO Zhibing, ZHU Huichao. Assessment of susceptibility to karst collapse in the Qixia Zhongqiao district of Yantai based on fuzzy comprehensive method[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 215-220.
- [8] 高培德,王林峰.覆盖型岩溶塌陷的塌陷机制分析[J].中国岩溶,2017,36(6):770-776.  
GAO Peide, WANG Linfeng. Analysis of collapse mechanism for mantled karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 770-776.
- [9] 邱连贵,任凤楼,曹忠祥,张岳桥.胶东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约[J].大地构造与成矿学,2008,32(1):117-123.  
QIU Liangui, REN Fenglou, CAO Zhongxiang, ZHANG Yueqiao. Late mesozoic magmatic activities and their constraints on geotectonics of Jiaodong region[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(1): 117-123.
- [10] 张治伟,朱章雄.中国南方不同岩溶类型区土地利用的问题与对策[J].中国土地科学,2012,26(12):64-68.  
ZHANG Zhiwei, ZHU Zhangxiong. Problems and countermeasures for land use in various karst regions in South China[J]. China Land Sciences, 2012, 26(12): 64-68.
- [11] 李保方,李占军,王俊杰,于景宗,赵海阔.大藤峡水利枢纽工程岩溶发育特点及规律分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):177-181.  
LI Baofang, LI Zhanjun, WANG Junjie, YU Jingzong, ZHAO Haikuo. Karst development characteristics and regularity analysis of Datengxia hydro project[J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science), 2019, 41(S1): 177-181.
- [12] 万佳威,张勤军,石树静.岩溶塌陷不确定性预测评价综述[J].中国岩溶,2017,36(6):764-769.  
WAN Jiawei, ZHANG Qinjun, SHI Shujing. Overview of uncertainty assessment on karst collapse prediction[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 764-769.
- [13] 张晓斌.福建省大田县桃源镇前厝村岩溶塌陷发育特征及成因分析[J].地质灾害与环境,2018,29(4):15-20.  
ZHANG Xiaobin. Development characteristics and causes analysis of karst collapse in Qiancuo village, Taoyuan town, Datian of Fujian Province[J]. Journal of Geological Hazards and Environmental Protection, 2018, 29(4): 15-20.
- [14] 蒋小珍,雷明堂.岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用[J].中国岩溶,2018,37(5):786-791.  
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Monitoring technique and its



- application of karst groundwater-air pressure in karst collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 786-791.
- [15] 刘思秀. 杭州市西部岩溶山区地面塌陷及地下水资源开发初步研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2000, 11(1): 11-16.
- LIU Sixiu. A preliminary study on the karst collapse and underground water utilization in the western hills, Hangzhou[J]. *Journal of Geological Hazards and Environmental Protection*, 2000, 11(1): 11-16.
- [16] 孙佑光, 崔煜烽. 山东烟台市栖霞中桥岩溶塌陷机理及防治措施[J]. *西部探矿工程*, 2017, 29(9): 5-7.
- SUN Youguang, CUI Yufeng. Karst collapse mechanism and prevention measures of Qixia Zhongqiao, Yantai City, Shandong Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2017, 29(9): 5-7.

## Development characteristics and prevention countermeasures of karst collapse in Zhongqiao of Yantai

WANG Youzhi, YANG Ning, YU Linhong, LV Lingfeng

(*The Third Shandong Institute of Geology and Mineral Exploration, Yantai, Shandong 264004, China*)

**Abstract** The limestone distribution area of Zhongqiao is a typical representative of the karst landform distribution in Jiaodong Peninsula. With an area of about 30 km<sup>2</sup>, it is located about 25 km southwest of Yantai City, and is the core area of Fushan Economic-Technological Development Zone. In recent years, frequent karst collapse has seriously affected the economic development and local people's life, and even brought some panic to the them. 17 times of karst collapse in the study area occurred in the covered karst area. The collapse began in 2005 (2 times), and then occurred 17 times in 2014-2021. The diameter of the collapse pit varies from 1 m to 10 m, and the depth is mostly 3-5 m. The collapse is mostly elliptical and circular on the plane, appearing in groups, and the section is jar-shaped and funnel-shaped. In terms of space, the collapse is mainly located near the groundwater runoff zone, river bed, gully and terraces on both banks where geological structures are developed. The covering soil thickness of collapse point is mostly between 10-15 m.

In order to provide a scientific basis for the future rational planning of groundwater exploitation and monitoring and early warning of karst collapse, and provide a geological basis for the prevention of karst collapse, we have further analyzed the spatial and temporal distribution, the development characteristics, process and triggering factors of karst collapse in the study area to better understand the development mode and evolution law of karst collapse in Jiaodong Peninsula. In this paper, the development characteristics, process and triggering factors of karst collapse are studied from the aspects of mechanics, structural geology and hydrogeology. The research shows that among the many factors of collapse, stratum lithology is the basic condition; the geological structure is the dominant factor; and the hydrodynamic condition is the decisive factor. From the perspective of geomorphology, the karst development is more intense within 300 m from the river, and karst collapse occurs in the V-shaped area between the two rivers. In terms of cap rock and structure, karst collapse is mostly developed in the fragile area of karst area where the thickness of overburden is 10-15 m and the hanging wall of fault is less than 1 km. Given the basic conditions of karst collapse, collapse trigger factors, such as heavy rainfall, excessive exploitation and drainage of groundwater and continuous drought, especially the continuous fluctuation of water level 0-2 m above limestone surface for more than 5 days, are more likely to trigger collapse. In the prevention and control of karst collapse, we must first rationally plan the groundwater mining and drainage scheme, then establish a groundwater monitoring and early warning network in the area, and build a water-stopping curtain around the mine.

**Key words** karst collapse, development characteristics, geological hazards, prevention and control countermeasures

(编辑 黄晨晖)