

吴亚楠, 杨云涛, 焦玉国, 等. 山东省岩溶塌陷发育特征及诱因分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 128-138, 148.

DOI: 10.11932/karst2023y007

山东省岩溶塌陷发育特征及诱因分析

吴亚楠^{1,2}, 杨云涛^{1,2}, 焦玉国^{1,2}, 刘志涛^{1,2}, 王延岭^{1,2},
翟代廷^{1,2}, 周绍智^{1,2}, 魏凯^{1,2}, 程凤^{1,2}

(1. 山东省第五地质矿产勘查院, 山东泰安 271000; 2. 山东省地矿局
岩溶塌陷防治重点实验室, 山东泰安 271000)

摘要: 在归纳山东省岩溶塌陷时空分布规律的基础上, 从基岩特征、覆盖层特征、水动力条件、外界扰动4个方面分别阐述多处主要塌陷区的背景条件及影响因素, 分析其主要诱发因素。结果表明: 山东省岩溶塌陷主要分布于济南、泰安、枣庄、临沂等6个地市, 且近年来烟台、济宁等新发塌陷区的岩溶塌陷呈现加剧趋势; 山东省岩溶塌陷主要发生在薄覆盖型岩溶区, 地层以奥陶系马家沟群为主, 其次是三山子组、寒武系炒米店组; 岩溶塌陷区土层厚度均小于30 m, 覆盖层结构类型以多元结构为主, 其次为二元结构和一元结构, 且由试验得出黏性土的抗塌性能与其含水率、孔隙比等物理力学性质有关; 岩溶水的大幅度波动是塌陷发生的最主要因素, 且岩溶地下水位在基岩面附近波动时最易引发塌陷。山东省岩溶塌陷区主要分布于各重要地下水水源地, 地下水不合理开发利用引发的水位大幅下降或波动是主要人为诱因, 莱芜铁矿区水位受矿区排水影响明显, 另外在泰安市城区铁路三角区和东平县东王庄—西王庄运输线路的震动荷载也是另一重要人为诱因。

关键词: 岩溶塌陷; 发育规律; 分布特征; 诱发因素; 山东省

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)01-0128-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶塌陷是岩溶地区因岩溶作用而发生的一种地面变形和破坏的灾害, 根据塌陷主体的不同, 岩溶塌陷可分为基岩塌陷和地面塌陷两大类, 其中后者是我国北方主要的地质灾害之一^[1-3]。国内外学者已分别从岩溶塌陷影响因素、成因机理^[4-5]、风险防控及预报预警^[6-9]等方面进行大量研究, 取得丰富成果。

山东省岩溶塌陷区具有历史久、分布广、危害大等特点, 于20世纪70年代引起众多学者及科研、地勘单位的关注。

1978年, 铁道部水力勘查设计研究院首次对泰安市地面塌陷进行勘察工作^[10], 1985年, 铁道部第一勘测设计院对津浦线泰安段进行路基工程地质详查^[11-12], 这也是山东省首次开展的岩溶塌陷研究工作; 高宗军、王滨等^[13-17]对泰安市东羊娄、旧县水源地等地区的塌陷开展成因机理、诱发因素、致塌模型等方面的研究; 张世杰等^[18-19]分析莱芜地区塌陷成因; 2013年, 山东省地质矿产勘查院^[20]对包含泰安、莱芜地区的泰莱盆地开展系统性的地质灾害调查, 查明该地区塌陷的分布规律并进行风险区预测和预警预报方法的探索, 取得较丰富的研究成果^[21-23]。

资助项目: 山东省地矿局地质勘查项目[鲁地字2019(34)号]; 山东省地矿局水工环项目[鲁地字2016(93)号]

第一作者简介: 吴亚楠(1987—), 女, 高级工程师, 硕士研究生, 从事水工环地质工作。E-mail: 59097677@qq.com。

通信作者: 焦玉国(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工环地质勘查及评价工作。E-mail: sddkwy@163.com。

收稿日期: 2021-01-11

随着城市进程发展,山东省枣庄、临沂等地也多次发生岩溶塌陷。万继涛、贺可强、袁杰等^[24-30]对山东省枣庄市市中区的多处塌陷区进行岩溶塌陷形成机理、影响因素分析并预测评估风险性,重点讨论地下水对岩溶塌陷形成的控制作用^[31];马海会、冯克印等^[32-34]以临沂市城区塌陷区为研究对象,在岩溶塌陷机理分析的基础上,探索预警预报方法。

综上所述,山东省岩溶塌陷研究工作多是以各塌陷区为单位进行的,缺乏全省系统性的分析研究^[35]。本文通过总结前人的研究成果,化零为整,系统分析山东省岩溶塌陷历史进程、发育特征、诱发因素等,以为全省各地开展岩溶塌陷防治、城市规划、地下水合理开采布局等提供基础资料和决策依据。

1 岩溶塌陷分布规律

1.1 时间分布规律

(1) 年际分布

山东省岩溶塌陷最早发生于 1964 年泰安火车站铁路三角区一带^[10],自 20 世纪 80 年代以来开始大面积发生,90 年代渐趋于稳定,2000 年以后仍持续发生(图 1)。

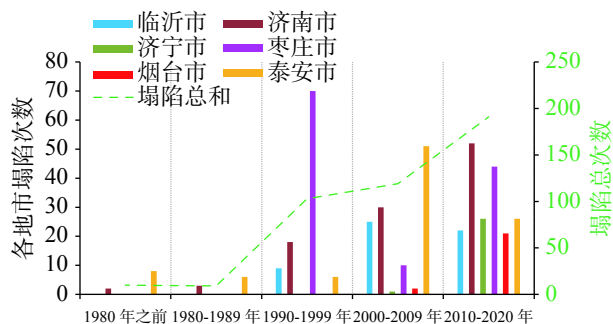


图 1 山东省岩溶塌陷发生次数统计图

Fig. 1 Statistics of karst collapse frequency in Shandong Province

1990 年之前,岩溶塌陷仅发生在泰安市及济南市(主要为泰安市城区—旧县水源地及莱芜铁矿区,受水源地开采及矿山抽排水影响),发生次数和区域有限^[20]。1990 年起,随着城市进程的不断发展,枣庄市、临沂市开始发生大规模岩溶塌陷^[35],2010 年以来,山东省岩溶塌陷发生规模和次数明显增加,尤其是塌陷发生较晚的济宁市和烟台市,2015 年以来,塌陷屡次发生。

(2) 年内分布

年内变化受人为开采地下水和大气降水双重因素控制^[22,35]。由图 2 可知,一年内塌陷主要发生在 6-9 月份,约占 83%,其中 7-8 月是全年塌陷最集中的月份,占 50% 之多。据调查,80% 以上的塌陷集中发生于每年汛期的较大降雨中或雨后的一段时间内。

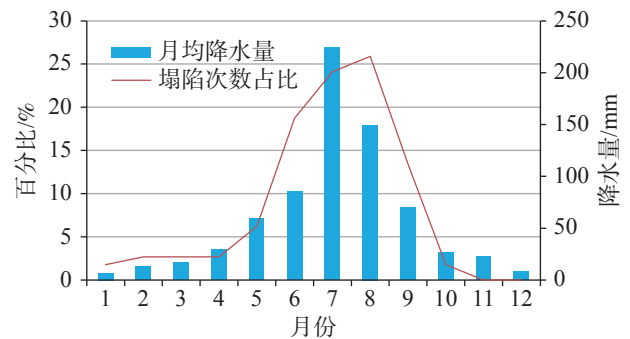


图 2 山东省岩溶塌陷年内分布特征图(1975-2019 年)

Fig. 2 Annual distribution characteristics of karst collapse in Shandong Province (1975-2019)

1.2 空间分布规律

(1) 各地市分布情况

就地市来说,山东省岩溶塌陷分布于济南、济宁、临沂、泰安、烟台和枣庄 6 个地市,其中济南市莱芜区和钢城区(即原莱芜市)、泰安市和枣庄市最多,分别为 273 处、46 处和 41 处;临沂市和烟台市次之,分别为 16 处和 13 处。

按照《岩溶塌陷防治工程设计规范》(T/CAGHP 049-2019),山东省岩溶塌陷以小型为主,其次是中型和大型。其中小型塌陷共 397 处,占全部已发生岩溶塌陷的 99.50%,主要分布在济南市莱芜区和钢城区、泰安市和枣庄市,分别为 273 处、46 处和 39 处;中型和大型各 1 处,均分布于枣庄市(表 1,图 3)。

(2) 平面分布特征

本区的岩溶塌陷在空间上的分布具有以下规律:

① 塌陷区的分布与抽水造成的地下水位降落漏斗成正相关,且集中分布在漏斗内地下水的主要补给方向上。例如,泰安市旧县水源地、枣庄市荆泉水源地等塌陷点均分布在地下水抽水降落漏斗范围内^[22,31]。

② 塌陷沿构造断裂带或主导裂隙分布。例如,泰安城区訾家灌庄塌陷区位于岱道庵断裂西侧,泰

表 1 山东省各地市岩溶塌陷分布情况统计表
Table 1 Karst collapse distribution in different cities of Shandong Province

地市	塌陷分布区域	塌陷规模	塌陷数量/处
泰安	泰安城区—旧县水源地, 大汶口水源地, 岱岳区徂徕镇、祝阳镇, 东平县大羊镇, 宁阳县伏山镇, 新泰市翟镇、泉沟镇、果都镇、禹村镇	小型	46
济南	莱芜区大王庄—寨里, 莱芜铁矿区, 钢城区鹏山水源地、清泥沟水源地	小型	273
枣庄	长清区孝里镇, 平阴县安城镇、孔村镇、洪范池镇	小型	6
临沂	市中区十里泉水源地、丁庄—东王庄水源地, 薛城区清凉泉水源地和峰城区峰城水源地	大型1处, 中型1处, 小型39处	41
烟台	临沂市城区, 沂南县双驼—双墩镇, 蒙阴县高都镇	小型	16
济宁	栖霞市臧家庄镇中桥村, 牟平区大窑街道李家庄村	小型	13
合计	曲阜市息陬镇刘家庄村、汶上县军屯乡王庄村、嘉祥县疇里镇土山村和泗水县泗水镇尖山村	小型	4
	合计	大型1处, 中型1处, 小型397处	399

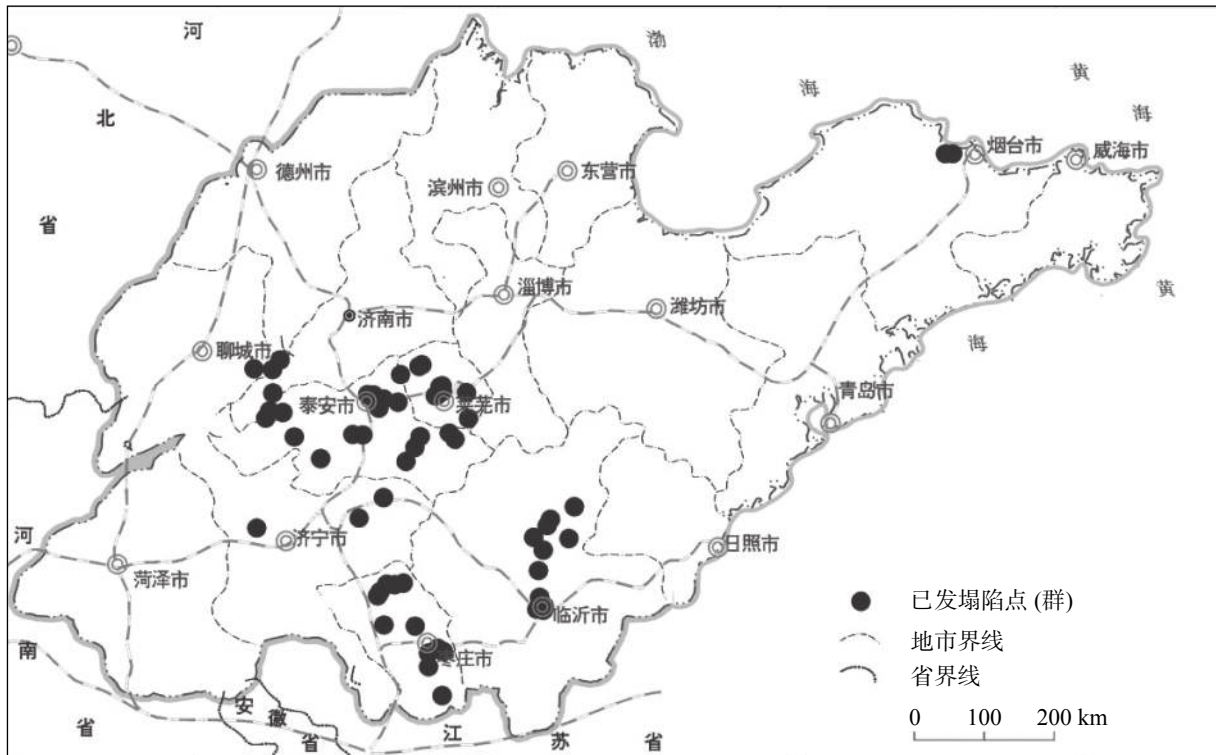


图 3 山东省岩溶塌陷分布图

Fig. 3 Distribution map of karst collapse in Shandong Province

安旧县水源地塌陷区的塌陷点多位于岱道庵断裂两侧, 呈条带状分布^[21]; 莱芜铁矿区孟公清—一张公清、孟家庄及西泉河塌陷区位于矿山背斜的西翼大理岩与燕山期侵入岩体接触带附近^[20]; 莱芜大王庄—寨里塌陷区的后枯河一带发育北东向的羊丘山—后枯河断裂, 沿断裂带方向分布有多处塌陷^[20]。

③岩溶塌陷点的分布与第四系结构密切相关。据统计, 岩溶塌陷多发生在第四系覆盖层厚度小于

30 m 的地段, 覆盖层结构主要为上部黏性土下部砂类土的二元结构, 另外“砂—土互层”的地区和“单一的砂类土”也是塌陷高发地段^[22,35]。

④塌陷分布在河床和地势低洼处。据统计, 山东省岩溶塌陷有很大一部分分布在河床和地形低洼处。例如, 泰安城区訾家灌庄煤机厂杨树林内塌陷、旧县陈家湾塌陷、桥沟鱼塘内塌陷^[22], 临沂市小涑河河床塌陷^[33], 济宁市嘉祥县土山村沟渠内塌陷, 烟台

市中桥地区河道内塌陷等。这些低洼地段在雨季容易积水,积水的渗漏使土体强度降低,并加速地下水对土体的潜蚀和搬运,导致岩溶塌陷的发生^[34]。

⑤部分塌陷分布在铁路或高速公路沿线。部分岩溶塌陷点在铁路或高速公路沿线,如泰安市城区跌路三角区塌陷^[3]和东平县大羊镇250省道沿线塌陷^[35]、临沂市城区兖石铁路附近塌陷^[32-34]等,其塌陷机理应与行车震动有密不可分的联系^[11]。

2 主要岩溶塌陷区特征分析

本文将从基岩特征、覆盖层特征、水动力条件、外界扰动4个方面分别阐述多处主要塌陷区的背景条件及影响因素。

2.1 基岩特征

山东省的岩溶塌陷地质灾害主要发育于薄覆盖型岩溶区,埋藏型及裸露型岩溶区未见有岩溶塌陷发生的记载。地层以奥陶系马家沟群为主,其次是三山子组、寒武系炒米店组、张夏组等^[35](表2)。

2.2 覆盖层特征

覆盖层是岩溶塌陷的主体,是塌陷发生的物质基础,覆盖层厚度、结构以及物理力学性质等对岩溶塌陷的发生概率大小具有控制作用。本文统计了岩溶塌陷最为严重的泰安市、济南市、枣庄市、临沂市几处典型塌陷区的覆盖层特征^[35](表3)。

2.2.1 覆盖层厚度

由表3、图4可知,岩溶塌陷大部分发生在土层较薄的地区,特别是土层厚度小于20m的地段居多。根据对主要塌陷区覆盖层厚度统计情况,约50%的塌陷点覆盖层厚度小于10m,70%以上的塌陷点覆盖层厚度小于20m,而覆盖层厚度大于30m的地段几乎无塌陷发生。上覆土层厚度小,有利于地下水的潜蚀和掏空作用,使土洞扩展到地表的进程缩短,使塌陷易于发生。

2.2.2 覆盖层结构

覆盖层的结构组成对岩溶塌陷的产生有较大影响^[22],山东省主要岩溶塌陷区覆盖层结构类型以二元结构为主,其次为多元结构和一元结构(图4)。其中,二元结构的塌陷区多以“上土下砂”为主。

2.2.3 覆盖层物理力学性质

覆盖层物理力学性质如含水率、孔隙比、饱和度及抗剪强度等决定覆盖层的稳定性(抗塌性能)^[4]。一般来说,含水率增加,饱和度变大,覆盖层自重增加,抗剪强度降低,抗塌力随之降低,发生塌陷的概率增加;而土体饱和度增加,透气性降低,封闭性增强,有利于形成真空负压,增大致塌力,这也是地势低洼的积水地段岩溶塌陷多发的原因。

地下水动力条件变化是引发岩溶塌陷的主要原因,是覆盖层在地下水渗透压力作用下产生变形破坏,特别是塌陷孕育初期(土洞形成之前),地下水渗透压力具有决定性作用。据此,岩溶地质研究所提出以地下水临界流速(水力坡度)表征覆盖层抵御地下水渗流破坏的能力,并通过渗透变形试验获取土层破坏的地下水临界流速和临界水力坡度,泰安旧县水源地也进行过取样行测试^[20,35]。

2.3 水动力条件

2.3.1 地下水动力条件

地下水动力条件是触发岩溶塌陷的最主要动力条件^[36-37],截止目前,山东省发生的岩溶塌陷地质灾害均为开采(抽排)岩溶地下水引发,主要塌陷区塌陷始发、盛发和现状水动力条件情况见表4,其中水位位于基岩面以下用“-”表示,水位位于基岩面以上用“+”表示。由于部分地区缺乏历史资料,因此未详尽列出。

由表4可知,岩溶塌陷始发和盛发年份开采量均较大,水位变化幅度大,且大部分时段持续位于基岩面以下波动,当开采量减少后,经过一段时间的水位恢复期,塌陷次数明显减少^[35]。目前,济南市莱芜区和钢城区由于铁矿开采抽排地下水^[20,35],引起水位大幅波动,近年来仍呈现持续发展的态势;其他地区由于当地政府及时采取禁采限采措施,大部分地区水位明显回升,岩溶塌陷次数明显减少,甚至常年趋于稳定状态。

2.3.2 大气降水及地表水入渗

除地下水动力条件外,大气降水和地表水入渗也是引发岩溶塌陷的重要水动力因素^[22]。

大气降水到达地表后,一部分形成地表径流,一部分蒸发,还有一部分通过岩土层的孔隙或裂隙渗

表 2 山东省主要岩溶塌陷发育区基岩地层统计表
Table 2 Bedrock strata of the main karst collapse areas in Shandong Province

市	塌陷点(区)名称	基岩地层	岩性		
泰安	城区	铁路三角区塌陷	奥陶系马家沟群、三山子组	厚层灰岩、白云岩、泥质灰岩	
		訾家灌庄—南上高塌陷区	奥陶系马家沟群为主	厚层灰岩、白云岩、泥质灰岩	
		旧县水源地塌陷区	奥陶系马家沟群、寒武纪炒米店组、寒武系馒头组	厚层灰岩、白云质灰岩	
泰安	岱岳区	徂徕镇 边家庄塌陷	寒武系炒米店组	薄层灰岩夹页岩	
			桥沟塌陷区	寒武系朱砂洞组	厚层—薄层灰岩、泥质灰岩
		祝阳镇 二王安塌陷区	寒武系炒米店组、奥陶系三山子组	厚层灰岩、泥质灰岩	
东平县	大汶口镇 土门、大侯塌陷	奥陶系马家沟群为主	厚层灰岩、白云岩		
新泰市	大羊乡 西王庄—东王庄塌陷	奥陶系马家沟群、三山子组	厚层灰岩、泥质灰岩		
	果都镇 王家庄塌陷区	奥陶系马家沟群为主	厚层灰岩		
泰安	新泰市	宫里镇 马家庄塌陷区	奥陶系马家沟群、三山子组	厚层灰岩、白云岩、	
		禹村镇 东杜村塌陷	奥陶系马家沟群	厚层灰岩、泥质灰岩	
		宁阳县 伏山镇 东代村塌陷	寒武系张夏组	厚层状灰岩	
济南	莱芜区、钢城区	大王庄—寨里塌陷区	奥陶系马家沟群、三山子组	厚层灰岩、白云岩、泥质灰岩	
		莱芜铁矿塌陷区	奥陶系马家沟群为主	中厚层灰岩、白云岩	
		鹏山水源地塌陷区	奥陶系马家沟群为主	厚层灰岩、白云岩	
		清泥沟水源地塌陷区	奥陶系马家沟群为主	厚层灰岩、泥质灰岩	
		长清区 潘庄区塌陷区	奥陶系马家沟群为主	厚层灰岩	
平阴县	平阴县塌陷区	奥陶系马家沟群为主	厚层灰岩		
枣庄	荆泉水源地塌陷区	十里泉、丁庄—东王庄水源地塌陷	奥陶系马家沟群、三山子组	厚层灰岩、白云岩、泥质灰岩	
			奥陶系马家沟群	厚层灰岩、白云岩、泥质灰岩	
		台儿庄小龚庄水源地塌陷区	奥陶系马家沟群	厚层灰岩、白云岩	
临沂	城区	临沂城区塌陷区	奥陶系马家沟群	厚层灰岩、白云岩	
	罗庄区	铁匠—常旺塌陷区	奥陶系马家沟群	厚层灰岩、白云岩	
	沂南县	双堠—青驼塌陷区	寒武系朱砂洞组	厚层灰岩、白云岩	
			孙祖镇塌陷区	寒武系朱砂洞组	薄层灰岩夹页岩
			铜井镇塌陷区	奥陶系马家沟群、寒武系张夏组	厚层灰岩、白云岩、泥质灰岩
济宁	曲阜市	大庄镇塌陷区	奥陶系马家沟群	薄层状灰岩、白云岩	
		岸堤—马牧池塌陷	奥陶系三山子组	薄层状白云岩	
		蒙阴县 高都镇洪沟塌陷	奥陶系马家沟群	厚层灰岩	
		嘉祥县 疃里镇塌陷区	奥陶系马家沟群	厚层灰岩	
烟台	栖霞市	息陬镇西夏—刘家庄村塌陷	奥陶系三山子组	中—厚层状白云岩	
		姚村镇竹子园塌陷	奥陶系马家沟群	厚层灰岩、白云岩	
烟台	牟平区	中桥地区塌陷区	新元古界蓬莱群	灰岩夹薄层泥灰岩	
		李家庄塌陷区	古元古代荆山群	白云石化大理岩	

入补给地下水。当降雨强度大、延续时间长时,渗流强度也增大,对土的搬运、潜蚀作用增强。另外,由于降雨使土壤湿度及自身重量增加,土体间的摩擦力降低,也容易引起土层失去平衡,发生岩溶塌陷。此外,降水入渗使表层土含水率增大,使覆盖层透气性降低,当地下水位大幅升降时,土洞及岩溶空腔内的空气得不到及时补充或释放,容易产生真空负压或气爆,导致岩溶塌陷的发生^[38]。

研究区已发的岩溶塌陷地质灾害 80% 均出现在汛期^[35],尤其是在大型降雨之后,例如,莱芜铁矿 2000 年共发生岩溶塌陷 56 处,其中 8 月份(降雨量 326 mm)发生 54 处(暴雨中发生 48 处),占全年岩溶塌陷总量的 96.4%;泰安城区訾家灌庄煤机厂东侧杨树林塌陷区,分布有 260 余个塌陷坑,其中 95% 以上发生在 6—9 月份;1997 年 8 月底一次特大降雨后,在旧县村西南农田内形成直径 1 m、深 0.6 m 左右塌

表 3 山东省主要岩溶塌陷区覆盖层特征统计表
Table 3 Overburden characteristics of the karst collapse areas in Shandong Province

市	塌陷点(区)名称	覆盖层厚度/m	覆盖层结构类型	
泰安	城区	铁路三角区塌陷	17~25 多元结构	
		訾家灌庄—南上高塌陷区	5~15 一元结构为主	
		旧县水源地塌陷区	11~15 二元结构为主	
	岱岳区	徂徕镇	边家庄塌陷区	5~10 多元结构
			桥沟塌陷区	12~15 二元结构为主, 少量多元结构
		祝阳镇	二王安塌陷区	5~15 一元结构、二元结构
	东平县	大汶口镇	土门、大候塌陷区	10~15 二元结构为主
		大羊乡	西王庄—东王庄塌陷区	5~13 一元结构为主
	新泰市	果都镇	王家庄塌陷区	3~10 多元结构
		宫里镇	马家庄塌陷区	3~10 二元结构为主
宁阳县	禹村镇	东杜村、中杜村塌陷区	3~10 二元结构为主	
	伏山镇	东代村塌陷	1~5 多元结构	
济南	莱芜区、钢城区	大王庄—寨里塌陷区	15~20 一元结构、多元结构	
		莱芜铁矿塌陷区	4~15 一元结构、多元结构	
		鹏山水源地塌陷区	10~12 二元结构为主	
	长清区	清泥沟水源地塌陷区	5~8 二元结构为主	
	平阴县	潘庄区塌陷区	<10 二元结构为主	
枣庄	平阴县	平阴县塌陷区	<10 二元结构为主	
		荆泉水源地塌陷区	10~30 多元结构为主	
	十里泉水源地、丁庄—东王庄水源地塌陷	2~10	一元结构为主, 少量二元结构	
	台儿庄小龚庄水源地塌陷区	约20	二元结构	
临沂	城区	临沂城区塌陷区	3~11 二元结构为主	
	罗庄区	铁匠—常旺塌陷区	5~12 一元及二元结构	
		双堠—青驼塌陷区	<10 一元结构、二元结构	
	沂南县	孙祖镇塌陷区	8~15 多元结构为主, 少量二元结构	
		铜井镇塌陷区	15~20 二元结构	
		大庄镇塌陷区	<10 二元结构	
	蒙阴县	岸堤—马牧池塌陷	<10 二元结构	
		高都镇洪沟塌陷	<10 二元结构	
	嘉祥县	疃里镇塌陷区	<10 一元结构为主	
	曲阜市	息陬镇西夏—刘家庄村塌陷区	20~40 一元结构为主, 少量二元结构	
姚村镇竹子园塌陷		<30 一元结构为主, 少量二元结构		
烟台	栖霞市	中桥地区塌陷区	<20 一元结构为主, 少量二元结构	
	牟平区	李家庄塌陷区	<14 一元结构为主	

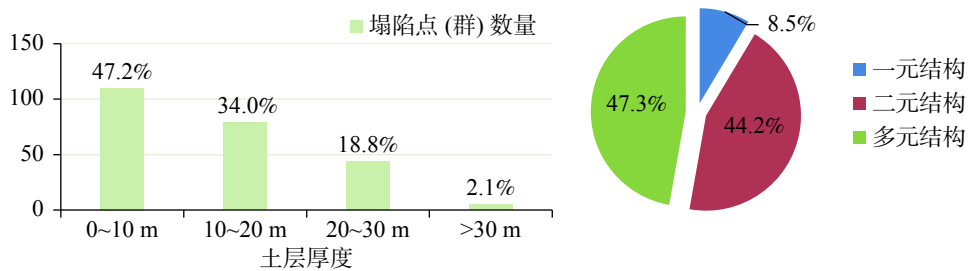


图 4 塌陷点数量与土层厚度、结构关系统计图

Fig. 4 Relationship between collapse and soil thickness or structure

表4 山东省主要岩溶塌陷区水动力条件一览表
Table 4 Hydrodynamic conditions of the main karst collapse areas in Shandong Province

分布地区	塌陷始发水动力条件			塌陷盛发时水动力条件		
	始发年份	始发水位	开采量/ 万m ³ ·d ⁻¹	盛发年份	盛发时水位	开采量/ 万m ³ ·d ⁻¹
泰安	城区铁路三角区	标高 105 m	6.0	1978~1985	标高 84~100 m	7.0~10.0
		距岩面 -6 m			距岩面 -20~-10 m	
	城区訾家灌庄	标高 108 m	6.5	1976~1983	标高 96~108 m	6.7
	距岩面 -15 m	距岩面 -27~-15 m				
泰安	旧县水源地	标高 108 m	2.1	2002~2004	标高 86~116 m	5.0
		距岩面 +2 m			距岩面 -20~+10 m	
	大汶口东武水源地			2017年塌陷一次	标高 70~73 m	2.0~3.0
					距岩面 -8~+3 m	
临沂	临沂城区	标高 62 m	1.2	2002~2012	标高 28~55 m	0.8
		距岩面 -3 m			距岩面 -37~-2 m	
	十里泉水源地	标高 45 m	10.0	1995~2000	标高 26~42 m	8.0~12.0
		距岩面 +1 m			距岩面 -19~+3 m	
枣庄	丁庄—东王庄水源地	标高 42 m	6.0	1995~1998	标高 30~41 m	8.0
		距岩面 -13 m			距岩面 -25~-14 m	
	荆泉水源地	标高 68 m	8.0	2015~2016	标高 57~70 m	4.0~11.0
		距岩面 -7 m			距岩面 -18~-5 m	
	大王庄—寨里	标高 162 m	3.0	2009~2016	标高 113~158 m	3.5
		距岩面 -1 m			距岩面 -23~-1 m	
济南	铁矿区孟公清—主井	标高 163 m	铁矿放水引发	1995~2000	标高 128~162 m	1.5~2.0
		距岩面 +8 m			距岩面 -27~+12 m	
	铁矿区孟家庄一带	标高 162 m	铁矿放水引发	1992~1993	标高 46~86 m	8.0
	距岩面 +12 m	距岩面 -60~-20				
	铁矿区西泉河一带	标高 155 m	铁矿放水引发	1992~1996	标高 80~130 m	5.0~7.0
		距岩面 -1 m			距岩面 -20~-75 m	

陷坑一处,究其原因是因为土体湿度变大,自身重量增加,土层内聚力降低,同时潜蚀作用增强,最终导致上覆土体失去平衡发生塌陷。因此大气降水特别是暴雨对岩溶塌陷起重要作用^[1,4,35]。

2.4 外界扰动

岩溶地区铁路沿线由于列车振动产生的岩溶塌陷现象最为典型,泰安市城区铁路沿线大量的岩溶塌陷实例充分反映出两者间的内在联系^[10~12]。

据山东科技大学成世才研究,铁路震动诱发岩溶塌陷实质上是振动所产生的附加应力诱发的岩溶塌陷,振波在铁路路基旁的土层中所产生的附加应力为0.005~0.5 N·cm⁻²。显然,与土层破坏时的应力相比,该应力值偏小,不足以直接对土层产生破坏。但在与自重应力相叠加耦合作用于土体时,可使土

层中的应力分布发生改变,当土层中的局部应力因此而增高时,可以造成塌陷。另一方面,由于波动及反射波周期性累加作用,微小的破坏经过一定时间的累积,可使土层发生累积破坏^[15]。

由此可见,列车振动不会直接对土层产生破坏,其致塌机制与耦合效应的破坏累积有关。

3 岩溶塌陷诱因分析

岩溶塌陷发生受人为因素和自然因素影响,自然因素包括降水、干旱、地表水、地震等,人为因素包括抽水、蓄水、引水、灌溉、振动、加荷等(表5)。

区内岩溶塌陷区主要分布于各重要地下水水源地,地下水不合理开发利用引发的水位大幅下降或波动是主要人为诱因,莱芜铁矿区水位受矿区排水

表 5 山东省各塌陷区塌陷诱因一览表
Table 5 Inducement of karst collapse in Shandong Province

市	塌陷点(区)名称	诱发因素			
		人为因素	自然因素		
泰安	城区	铁路三角区塌陷	地下水超采+震动荷载	降水	
		訾家灌庄—南上高塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水	
		旧县水源地塌陷区	地下水超采	大气降水	
	岱岳区	徂徕镇	边家庄塌陷区	地下水超采	大气降水
			桥沟塌陷区	地下水超采	大气降水
		祝阳镇	二王安塌陷区	地下水超采	大气降水
		大汶口镇	土门—大候塌陷	地下水超采	大气降水
	东平县	大羊乡	西王庄—东王庄塌陷	地下水超采+震动荷载	地表水
	新泰市	果都镇	王家庄塌陷区	地下水超采	大气降水
		宫里镇	马家庄塌陷区	地下水超采	大气降水
		禹村镇	东杜村塌陷	禹村煤矿抽水	大气降水
	宁阳县	伏山镇	东代村塌陷	地下水超采	大气降水
	济南		大王庄—寨里塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水
		莱芜区、钢城区	莱芜铁矿塌陷区	矿山排水	地表水、大气降水
鹏山水源地塌陷区			地下水超采	地表水	
清泥沟水源地塌陷区			地下水超采	大气降水	
长清区		潘庄区塌陷区	地下水超采	大气降水	
平阴县		平阴县塌陷区	地下水超采	大气降水	
枣庄		荆泉水源地塌陷区	地下水超采+震动荷载	大气降水	
		十里泉水源地	地下水超采	大气降水	
		丁庄—东王庄水源地塌陷	地下水超采	大气降水	
		小龚庄水源地塌陷区	地下水超采	地表水	
	城区	临沂城区塌陷区	地下水超采+震动荷载	地表水、大气降水	
临沂	罗庄区	铁匠—常旺塌陷区	地下水超采	大气降水	
		双堠—青驼塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水	
		孙祖镇塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水	
	沂南县	铜井镇塌陷区	矿山排水	地表水、大气降水	
		大庄镇塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水	
		岸堤—马牧池塌陷	地下水超采	地表水、大气降水	
	蒙阴县	高都镇洪沟塌陷	矿山突水	大气降水	
嘉祥县	疃里镇塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水		
济宁	曲阜	息陬镇西夏—刘家庄村塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水	
		姚村镇竹子园塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水	
烟台	栖霞市	中桥地区塌陷区	地下水超采、爆破	大气降水	
	牟平区	李家庄塌陷区	地下水超采	地表水、大气降水	

影响明显,另外在泰安市城区铁路三角区和东平县东王庄—西王庄运输线路的震动荷载也是另一重要人为诱因^[35]。

据统计,80%的塌陷是发生在汛期强降雨之后,且多发于河道、地表洼地等易积水地带,大气降水和地表水入渗是主要自然致塌因素^[35]。

4 结论及建议

4.1 结论

(1)山东省岩溶塌陷始发于1964年泰安火车站附近,20世纪80年代以来大面积发生,90年代后趋

于稳定,2000年后持续发生。其塌陷主要分布于泰安、枣庄、临沂、济南4个地市,以小型为主,仅枣庄市发生过一次中型和大型塌陷;

(2)山东省岩溶塌陷主要发生在薄覆盖型岩溶区,少量塌陷发生于岩溶发育的大理岩分布区;覆盖层厚度多小于30m,覆盖层结构以二元结构为主;

(3)山东省岩溶塌陷区主要分布于各重要地下水源地,地下水不合理开发利用引发的水位大幅下降或波动是主要人为诱因,另外,矿区排水和运输线路的震动荷载在个别地区影响也较为明显;大气降水和地表水入渗是诱发岩溶塌陷的主要自然因素。

4.2 建议

(1)山东省岩溶塌陷的主要人为诱因是不合理的开采利用地下水导致的地下水位频繁大幅波动,因此合理规划地下水开发布局是减少塌陷发生的重要举措。建议各地市加强地表水利用率,减少地下水的开采,地表水—地下水联合调度以满足城市用水需求;

(2)目前山东省岩溶塌陷研究方向多集中于分布特征、机理研究及单指标短期预警,建议今后工作的重点逐步转移到多指标、多时间尺度的岩溶塌陷综合预警预报上,切实为全省地质灾害防治、城市规划等提供技术支持;

(3)建议各地市完善地下水监测系统,实时掌握区域水位动态,做好塌陷防范工作。同时加强汛期地质灾害排查工作,及时发现安全隐患,并制订应对措施。

参考文献

- [1] 康彦仁. 岩溶地面塌陷的形成条件[J]. 中国岩溶, 1988, 7(7): 9-17.
KANG Yanren. Forming condition of land collapse in karst regions[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(7): 9-17.
- [2] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 101-111.
LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 101-111.
- [3] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 411-417.
MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 411-417.
- [4] 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 development mechanism model of karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 759-763.
- [5] 罗小杰, 罗程. 岩溶地面塌陷三机理论及其应用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 171-188.
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-Mechanism Theory (TMT) of karst ground collapse and its application[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 171-188.
- [6] 蒙彦, 黄健民, 贾龙. 基于地下水动力特征监测的岩溶塌陷预警阈值探索: 以广州金沙洲岩溶塌陷为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 408-414.
MENG Yan, HUANG Jianmin, JIA Long. Early warning threshold of sinkhole collapse based on dynamic characteristics from groundwater monitoring: A case study of Jinshazhou of Guangzhou, China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 408-414.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 高宗军, 鲁统民, 王敏, 冯建国, 刘书江, 王妹. 基于岩溶水动态的岩溶地面塌陷预测预报方法[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 739-745.
GAO Zongjun, LU Tongmin, WANG Min, FENG Jianguo, LIU Shujiang, WANG Shu. Prediction of karst ground collapse based on karst water regime[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 739-745.
- [10] 铁道部. 水力勘察设计研究院. 泰安市地面塌陷防治灾害理勘察报告[R]. 1978.
Ministry of Railways. Hydraulic Survey and Design Institute. Geological survey report on the prevention and control of land subsidence in Tai'an [R]. 1978.
- [11] 王淑彦. 泰安路基塌陷机理的探讨[J]. 铁道工程学报, 1985, 2(1): 93-95.
WANG Shuyan. Discussion on mechanism of subgrade collapse in Tai'an[J]. Journal of Railway Engineering, 1985, 2(1): 93-95.
- [12] 王淑彦. 津浦铁路泰安路基塌陷研究与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1992, 3(4): 77-86.
WANG Shuyan. Study on ground collapse in Tai'an station of Jin-Pu railway line[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1992, 3(4): 77-86.
- [13] 高宗军. 泰安岩溶地面塌陷形成机理与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(4): 75-78.
GAO Zongjun. The mechanism and treatment for karst collapse in Tai'an[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(4): 75-78.
- [14] 高宗军, 张富中, 鲁峰. 山东泰安岩溶地面塌陷前兆及其预测预报[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(3): 149-150.

- GAO Zongjun, ZHANG Fuzhong, LU Feng. Precursor and forecast of karst ground collapse in Tai'an, Shandong Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(3): 149-150.
- [15] 成世才, 郭加朋, 马海会, 王经, 袁杰. 泰安市岩溶地面塌陷动力诱导因素分析[J]. 山东国土资源, 2009, 25(12): 42-45.
CHENG Shicai, GUO Jiapeng, MA Haihui, WANG Jing, YUAN Jie. Analysis of the power-induced factors of the karst land collapse in Tai'an City[J]. Shandong Land and Resources, 2009, 25(12): 42-45.
- [16] 王滨, 李治广, 董昕, 陈立. 岩溶塌陷的致塌力学模型研究: 以泰安市东羊娄岩溶塌陷为例[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 119-125.
WANG Bin, LI Zhiguang, DONG Xin, CHEN Li. Study on mechanical model of karst collapse: A case of karst collapse in Dongyanglou village, Tai'an City[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(4): 119-125.
- [17] 王明媚. 泰安市岩溶塌陷机理及监测预报研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
WANG Mingmei. Study on mechanism and monitoring and prediction of karst collapse in Tai'an[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2006.
- [18] 张丽霞, 熊大军, 王集宇, 方庆海, 韩祥银, 付东叶. 莱芜市岩溶塌陷原因分析与评价[J]. 山东地质, 2002, 18(2): 32-35, 48.
ZHANG Lixia, XIONG Dajun, WANG Jining, FANG Qinghai, HAN Xiangyin, FU Dongye. Analysis and evaluation of karstic collapse in Laiwu City[J]. Geology of Shandong, 2002, 18(2): 32-35, 48.
- [19] 张世杰, 王孝勤. 莱芜鹏山地区岩溶塌陷的成因分析及防治对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2003(S1): 323.
ZHANG Shijie, WANG Xiaoqin. Cause analyses and countermeasures to rock dissolving collapse in Pengshan area of Laiwu[J]. Exploration Engineering(Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2003(S1): 323.
- [20] 山东省第五地质矿产勘查院. 山东省泰莱盆地岩溶塌陷地质灾害机理研究与风险区预测报告[R]. 2013.
Shandong Fifth Institute of Geology and Mineral Exploration. Study on mechanism of karst collapse and prediction of risk area in Tailai basin, Shandong Province [R]. 2013.
- [21] 吴亚楠. 泰安市城区—旧县水源地岩溶塌陷演化过程分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 94-100.
WU Ya'nán. Analysis of karst collapse development in Tai'an-Jiuxian water source area[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 94-100.
- [22] 吴亚楠. 泰安市城区—旧县水源地岩溶地面塌陷历程及影响因素分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2): 225-231.
WU Ya'nán. Process and influencing factors of karst ground collapse in the water source area of Tai'an -Jiuxian[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(2): 225-231.
- [23] 吴亚楠, 王延岭, 周绍智, 唐丽伟, 焦玉国. 基于综合指数法的泰莱盆地岩溶塌陷风险性评价[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 391-399.
WU Ya'nán, WANG Yanling, ZHOU Shaozhi, TANG Liwei, JIAO Yuguo. Risk assessment of karst collapse in Tailai basin based on synthetic index method[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 391-399.
- [24] 万继涛, 杨蕊英. 枣庄南部岩溶塌陷风险预测及评估[J]. 山东地质, 1999, 15(1): 38-42, 44.
WAN Jitao, YANG Ruiying. Risk predication and evaluation of karst collapse in south of Zaozhuang City[J]. Geology of Shandong, 1999, 15(1): 38-42, 44.
- [25] 贺可强, 王滨, 万继涛. 枣庄岩溶塌陷形成机理与致塌模型的研究[J]. 岩土力学, 2002, 34(5): 564-569, 574.
HE Keqiang, WANG Bin, WAN Jitao. Study on forming mechanism of Zaozhuang karst collapse and collapse model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 34(5): 564-569, 574.
- [26] 王滨, 贺可强, 姜先桥, 周智民. 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): 20-24.
WANG Bin, HE Keqiang, JIANG Xianqiao, ZHOU Zhimin. 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): 20-24.
- [27] 万志博, 武雄, 徐晟, 李元仲, 杨蕊英, 陈鸿汉, 高明显, 张顺风. 枣庄市中区岩溶塌陷特征与成因分析[J]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 146-151.
WAN Zhibo, WU Xiong, XU Sheng, LI Yuanzhong, YANG Ruiying, CHEN Honghan, GAO Mingxian, ZHANG Shunfeng. Analysis on the characteristics and causes of the karst collapse in Zaozhuang[J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(2): 146-151.
- [28] 徐晟. 枣庄市岩溶塌陷特征及其构造场研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
XU Sheng. Study on karst collapse characteristics and tectonic field in Zaozhuang[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2007.
- [29] 武雄, 高明显, 张顶峰, 孙燕冬, 管清花, 吴海燕. 枣庄岩溶塌陷形成条件及主要影响因素[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 227-233.
WU Xiong, GAO Mingxian, ZHANG Shunfeng, SUN Yandong, GUAN Qinghua, WU Haiyan. Analysis on forming conditions and main influential factors of karst collapse in the area of Zaozhuang[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 227-233.
- [30] 袁杰, 高宗军, 徐晓慧. 枣庄岩溶地面塌陷的影响因素及其发展趋势[J]. 山东国土资源, 2010, 26(8): 18-21.
YUAN Jie, GAO Zongjun, XU Xiaohui. Factors and development trend influenced karst land collapse in Zaozhuang City[J]. Shandong Land and Resources, 2010, 26(8): 18-21.
- [31] 袁杰, 高宗军, 马海会. 论岩溶地下水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): 95-98.
YUAN Jie, GAO Zongjun, MA Haihui. Discuss on controlling and forming mechanism of Zaozhuang karst collapse[J]. The

- Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(4): 95-98.
- [32] 李清春, 冯克印, 郑庭明, 董强. 临沂市城区岩溶塌陷特征及成因分析[J]. *山东国土资源*, 2005, 21(9): 61-64.
LI Qingchun, FENG Keyin, ZHENG Tingming, DONG Qiang. Characteristics and origin analysis of karst collapse in Linyi City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2005, 21(9): 61-64.
- [33] 姚春梅, 冯克印, 王元波, 王小燕, 任翠爱, 刘善军. 数值模拟在岩溶塌陷预警系统建设中的应用: 以临沂市城区岩溶塌陷为例[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 51(4): 94-97, 102.
YAO Chunmei, FENG Keyin, WANG Yuanbo, WANG Xiaoyan, REN Cui'ai, LIU Shanjun. Application of numerical modeling of groundwater flow to the construction of early-warning system of karst collapse: Exemplified by the karst collapse in the Linyi urban area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 51(4): 94-97, 102.
- [34] 马海会. 临沂市岩溶地面塌陷成因机理与防治对策研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
MA Haihui. Formation mechanism and prevention countermeasures of karst ground collapse in Linyi urban district[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [35] 山东省第五地质矿产勘查院. 岩溶塌陷机制研究与预警示范[R]. 2020.
Shandong Fifth Institute of Geology and Mineral Exploration. Study on karst collapse mechanism and early warning demonstration[R]. 2020.
- [36] 蒙彦, 殷坤龙, 雷明堂. 水位波动诱发岩溶塌陷的概率分析[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(3): 239-241, 245.
MENG Yan, YIN Kunlong, LEI Mingtang. Probabilistic analysis on karst collapse induced by water table fluctuation[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(3): 239-241, 245.
- [37] 陶小虎, 赵坚, Xiaoming Wang, Ming Ye, Roger Benito Pacheco Castro. 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 Xiaoming, YE Ming, Roger Benito Pacheco Castro. 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.
- [38] 马骁, 蒋小珍, 曹细冲, 潘宗源. 岩溶空腔水气压力脉动效应的发现及意义[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(3): 404-410.
MA Xiaohu, JIANG Xiaozhen, CAO Xichong, PAN Zongyuan. Discovery and significance of water-gas pressure pulsation effect within karst cavity[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 404-410.

Analysis on development characteristics and inducement of karst collapse in Shandong Province

WU Ya'nian^{1,2}, YANG Yuntao^{1,2}, JIAO Yuguo^{1,2}, LIU Zhitao^{1,2}, WANG Yanling^{1,2},
ZHAI Daiting^{1,2}, ZHOU Shaozhi^{1,2}, WEI Kai^{1,2}, CHENG Feng^{1,2}

(1. Shandong Fifth Institute of Geology and Mineral Exploration, Taian, Shandong 271000, China; 2. Key Laboratory of Karst Collapse Prevention and Control of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract The karst collapse in Shandong Province has occurred continuously since 1960s, showing the characteristics of wide distribution and great harm. In recent years, with the development of China's economy, the geological disasters caused by karst collapse have taken place widely and frequently. Therefore, it is significant for us to study development characteristics and inducement of karst collapse. Carbonate rocks chiefly compose soluble rock, and the main rock types are limestone and dolomite, including the transitional type and metamorphic product—marble, which are mainly distributed in the Sinian, Late Cambrian and Ordovician periods. The main geological structure in the study area is fault structure, and most of karst collapses are located in the fault zone, its effecting zones and fold developing area. The aquifer rock group of karst water include limestone and dolomite of Cambrian and Ordovician, and karst development is conducive to vertical precipitation and pore water infiltration. Artificial groundwater exploitation is the main route of water discharge, and mass exploitation has led to landing funnels of karst water in the study area. The change of hydrodynamic field is the most important factor causing karst collapse.

Based on previous studies and the results of investigation and monitoring, the spatial and temporal distribution law of karst collapse in Shandong is summarized. Then the background conditions and influencing factors of several main subsidence areas are expounded from the aspects of bedrock characteristics, overburden characteristics, hydrodynamic conditions and external disturbance. Statistical analyses show that the karst collapse in Shandong is mainly distributed in 6 cities such as Jinan, Tai'an, Zaozhuang, Linyi, etc. But new subsidence areas such as Yantai,

(下转第 148 页)

with the rapid development of economy and the continuous growth of urban population, the demand for groundwater resources is increasing, thus exacerbating the contradiction between supply and demand of water resources, which is bound to seriously restrict the improvement of local people's living standard and economic and social development. Therefore, the study on the hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the water-scarce mountainous area of eastern Zoucheng City can provide a strong theoretical basis for promoting the construction of new rural areas and the implementation of drinking water safety projects. Based on this, 32 samples of different types of groundwater (24 fracture water samples, 6 pore water samples and 2 karst water samples) were collected in this study, and the water chemistry indexes such as K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , F^- , TH and TDS were measured in the water-scarce mountainous area in eastern Zoucheng city as a typical research area. The water chemistry characteristics and formation mechanism of groundwater in the region were explored in depth by graphical method, correlation analysis and principal component analysis.

Results show that the cations of both fracture water and pore water are $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$, while the cations of karst water are $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$, and the anions of all three types of groundwater are $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > F^-$. The water chemistry types of fracture water and pore water are mainly HCO_3^- -Ca type, while the type of karst water is HCO_3^- -Ca-Mg. The water chemistry formation mechanism of pore water, fracture water and karst water is mainly related to water-rock interaction, followed by the human activities. The results of principal component analysis show that water-rock interaction and human activities affect 77.7% and 10.5% of pore water, and 63.9% and 11.3% of fracture water, respectively.

Key words fissure water, hydrochemical characteristics, formation mechanism, principal component analysis, Zoucheng City

(编辑 黄晨晖)

(上接第 138 页)

Jining, etc. have recently experienced increasing trend of karst collapse. Besides, the karst collapse usually occurs in the thin-covered karst area, and the strata are mainly Ordovician Majiagou group, followed by Sanshanzi formation and Cambrian Chaomidian formation. The thickness of soil layer in karst collapse area is less than 30 m, and the structure of overburden layer is mainly composed of multi-element structure, then binary structure and single-element structure, and the sloughing resistance of cohesive soil is related to its water content and porosity ratio. A large fluctuation of karst water level is the most important factor of collapse, and karst groundwater level is most likely to cause collapse when it fluctuates around the bedrock surface. Karst collapse areas in Shandong are mainly distributed in important groundwater source areas; therefore, the water level drop or fluctuation caused by irrational exploitation and utilization of groundwater is the main human-induced factor. The karst collapses in Laiwu iron mining area is obviously affected by the drainage in this area. In addition, the vibration load of the railway in Tai'an City and Dongwangzhuang-Xiwangzhuang of Dongping town is another important human factor.

Key words karst collapse, law of development, distribution characteristics, inducing factor, Shandong Province

(编辑 黄晨晖)