

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.
DOI: 10. 11932/karst2021y01

山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制

冯亚伟^{1,2,3}

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地勘局第二地质大队), 山东 兖州 272100; 2. 山东省地矿局岩溶地质重点实验室, 山东 兖州 272100; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:选取山东省岩溶塌陷作为中国北方岩溶塌陷的代表,在对其分布规律进行分析的基础上,总结岩溶塌陷成因机制。研究表明:山东省岩溶塌陷受岩溶发育程度、第四系覆盖层结构厚度、断裂构造及地表水系等多种自然因素制约,分布呈现出规律性;在人为因素方面,岩溶塌陷多发生在地下水位陡升陡降及在基岩顶板波动时期。从力学角度出发,岩溶塌陷成因机制以真空吸蚀作用及潜蚀作用为主,多种作用为辅;从影响因素角度出发,在具备岩溶塌陷基础地质背景的前提下,其成因机制主要包含大气降水诱发成因、过量开采诱发成因、灌溉回渗诱发成因及地表重大工程修建诱发成因四种。

关键词:山东;岩溶塌陷;分布规律;诱发因素

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)02-0205-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

作为全国的经济文化大省,近年来,山东省经济社会发展迅速,人类工程活动强烈,对地质环境的影响较大,特别是岩溶发育区地质环境问题频发,主要岩溶地质环境问题有岩溶塌陷^[1-4]、岩溶地下水污染^[5-8]及岩溶大泉断流^[9]等,其中岩溶塌陷问题首当其冲。频繁发生的岩溶塌陷地质灾害,不仅制约着经济社会可持续发展,还给人民群众生命财产安全造成极大隐患,亟需总结岩溶塌陷分布规律及成因机制。

岩溶塌陷是由于上覆砂层被基岩渗透带中的水侵蚀至岩溶管道,在基岩面之上形成空腔,随着侵蚀的继续,空腔持续变大,达到砂土层的极限平衡之后产生的^[10]。目前,山东省岩溶塌陷成因机制的研究主要包括力学分析和定性分析两种,而岩溶塌陷的形成机制是多种多样的,一个塌陷坑的产生往往是

由多种因素综合作用的结果。

有些学者^[11-18]从力学角度出发,将塌陷力学机制总结为潜蚀效应、真空吸蚀效应、失托加荷效应、地震效应及荷载效应等多个类型,山东省岩溶塌陷以潜蚀效应及真空吸蚀效应为主^[19],哪种成因机理起到主要作用决定于塌陷地的岩溶发育程度、第四系覆盖层结构厚度及地下水动力条件等因素^[20];贺可强等^[21-22]对渗压效应又做了进一步分析,认为渗压效应又包括静水增荷效应、垂直渗透效应、吸水软化效应及负压封闭效应四种。

而一些学者以定性分析为主,王延岭等^[23]通过分析泰莱盆地发生的岩溶塌陷,认为其形成演化的基本地质结构模式可分为单层结构模式、双层结构模式和多层结构模式,地下水动力模式则包括岩溶水无压波动、承压波动和无压—承压波动;高宗军^[24]以泰安—莱芜一带岩溶塌陷为例,总结了隐伏灰岩区土体坍塌造成的岩溶地面塌陷和岩体坍塌形成的

资助项目:山东省自然资源厅“山东省岩溶发育区地质环境调查”[鲁地环(2018)06号];山东省地矿局“山东省岩溶塌陷危险性区划与防治研究”[鲁地字(2019)34号]

作者简介:冯亚伟(1990—),男,工程师,主要从事水工环地质方面研究。E-mail:1102844258@qq.com。

收稿日期:2020-05-05

岩溶地面塌陷两种成因模式。

以上开展的研究工作,丰富了各地区岩溶塌陷理论研究,但缺少整体概述。本文在充分搜集分析以往研究成果的基础上,结合相关项目成果,总结了山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制,以期为相关政府职能部门防灾减灾决策的制定提供技术支撑。

1 岩溶塌陷现状

山东省岩溶塌陷开始于20世纪70年代初期,这一时期随着经济社会的发展和人口数量的增多,岩溶地下水开采量加大,人类活动增强,据不完全统

计,截止目前,共发生岩溶塌陷1 300余处(表1),集中分布于泰安、枣庄、临沂、济南、济宁及胶东半岛地区^[25](图1)。据本次统计分析,全省较大规模的岩溶塌陷群约51处,主要有临沂城区、泰安城区、泰安旧县、莱芜公清、枣庄市十里泉及滕州市荆泉塌陷群等。塌陷平面形态一般为圆形、椭圆或不规则状,剖面形态多为圆柱状、锥状或碟状,小型塌陷坑约占所有塌陷坑的80%。全省规模最大的塌陷坑发生于2003年5月的省庄镇东羊娄村,塌陷坑口呈东西长35 m、南北宽27 m的椭圆形,深度约30 m。由于岩溶塌陷具有突发性,且易造成地面建筑物开裂,对人民生命财产安全构成极大威胁。

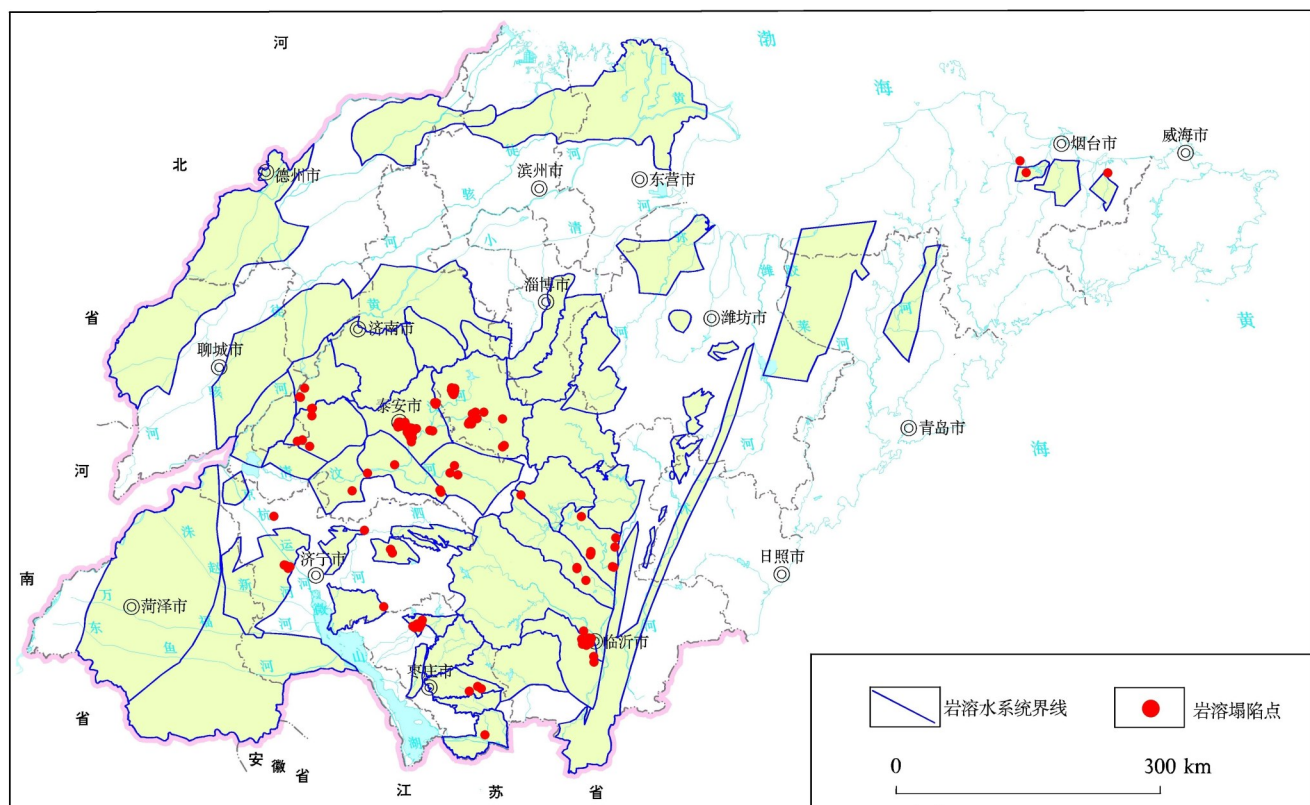


图1 山东省岩溶塌陷分布图^[26]

Fig. 1 Distribution of karst collapse in Shandong Province

2 岩溶塌陷分布规律

一个地区岩溶塌陷地质灾害的形成除了受自然因素(地层岩性、岩溶发育程度、覆盖层结构厚度、水文和气象)影响以外,还受人类活动(地下水开采、人类工程活动以及地表载荷)的影响^[27]。受以上因素影响,山东省岩溶塌陷的分布也呈现出一定的规律性。

2.1 岩溶塌陷多分布于强岩溶发育区

由图2可知,山东省岩溶塌陷集中分布于强岩溶发育区,约占塌陷总数的90%以上。结合表1可知,集中分布岩溶塌陷的地层岩性主要为五阳山组灰岩(占43.4%)、北庵庄组灰岩(占16.8%)、东黄山组白云岩(占14.2%)和三山子组白云岩(占10.8%),合计85.2%,其主要原因为:五阳山组灰岩、北庵庄组灰岩、东黄山组白云岩及三山子组白云岩质地较纯,在

相同外界条件下,易于被溶解溶蚀。由图 1 可知,强岩溶发育区主要位于各岩溶水系统的排泄区或近排泄区,岩溶发育形态以溶孔、溶洞为主,溶孔多呈蜂窝状、网格状,在地下水的进一步溶蚀作用下形成溶洞,溶洞直径大小不一,一般洞径介于 0.3~0.5 m,大

者可超过 1 m,地区单井涌水量大于 $1\,000\text{ m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{m})^{-1}$;在以上因素的作用下,强岩溶发育区富水性强,径流强度大,上覆第四系土层在地下水流的冲刷下,土洞不断扩大,当其无法承受自身重力时,就会产生岩溶塌陷。

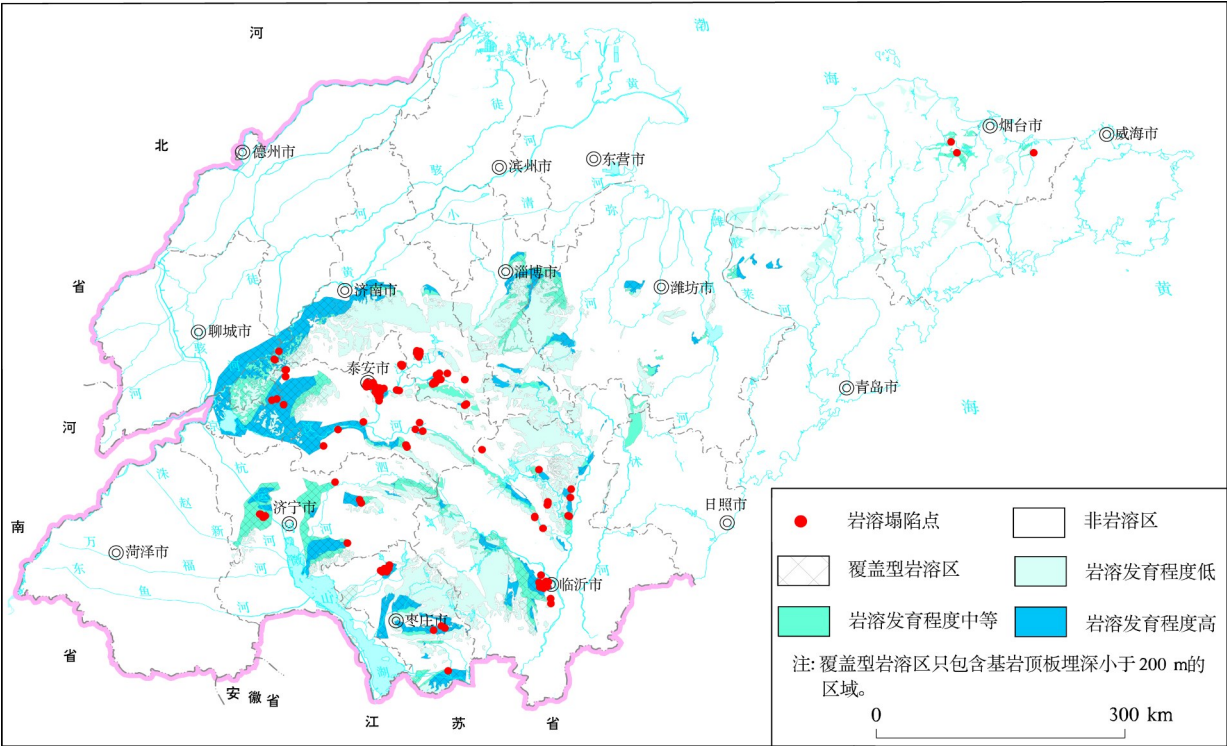


图 2 山东省岩溶发育程度与岩溶塌陷分布关系图

Fig. 2 Relationship between karst development degree and karst collapse distribution in Shandong Province

表 1 山东省不同地层岩性岩溶塌陷发育数量

Table 1 Amount of karst collapse in different strata and lithologies in Shandong Province

地层岩性	岩溶塌陷发育 数量/个	占比/%	地层岩性	岩溶塌陷发育 数量/个	占比/%
张格庄组大理岩	2	0.1	三山子组白云岩	145	10.8
野头组大理岩	16	1.2	东黄山组白云岩	191	14.2
香奁组灰岩	14	1.0	北庵庄组灰岩	225	16.8
朱砂洞组灰岩	24	1.8	土峪组白云岩	1	0.1
馒头组灰岩	10	0.7	五阳山组灰岩	582	43.4
张夏组灰岩	51	3.8	阁庄组白云岩	9	0.7
崮山组灰岩	3	0.2	朱家沟组灰质砾岩	1	0.1
炒米店组灰岩	68	5.1	合计	1 342	100.0

2.2 岩溶塌陷多分布于第四系浅覆盖区

按照可溶岩地层的出露条件,岩溶发育区可划分为裸露型岩溶区、浅覆盖型岩溶区(基岩顶板埋深 30 m 以浅)和深埋藏型岩溶区(第四系厚度大于 30 m 且基岩顶板埋深小于 200 m 的区域)。由图 3

可知,山东省岩溶塌陷绝大多数分布于浅覆盖型岩溶区(占岩溶塌陷总数的 99.4%)。由表 2 可知,上覆第四系厚度介于 $0<H\leq 10\text{ m}$ 、 $10<H\leq 20\text{ m}$ 及 $20<H\leq 30\text{ m}$ 的岩溶塌陷分别占总数的 35.5%、36.6% 及 27.3%,岩性多为松散砂土、粉质砂土、砂质黏土

或黏土等,底部分布有砂土,其主要原因:下伏寒武奥陶系碳酸盐岩岩溶发育强烈,分布有规模相对较大的岩溶裂隙、溶孔及溶洞,为上覆盖层的流失提供了空间条件;分布区上覆第四系多为上细下粗的盖层结构,这种结构有助于上层孔隙水与下层裂

隙岩溶水建立密切的水力联系^[28],随着下层岩溶水的快速运移,与基岩相接触的砂土在岩溶水的强烈冲刷下,易于土洞的形成,且规模越来越大,当上覆土层无法承担自身重力时,就会在地表形成岩溶塌陷。

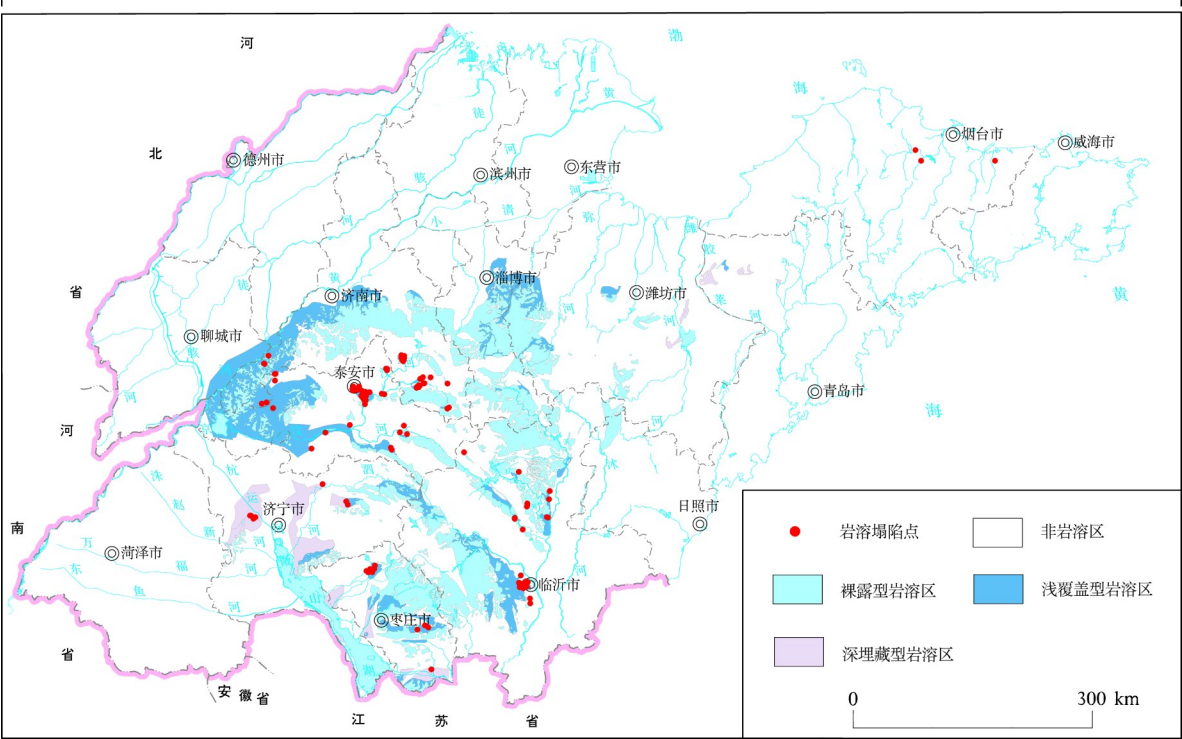


图3 山东省可溶岩埋藏条件与岩溶塌陷分布关系图

Fig. 3 Relationship between burial conditions of soluble rock and karst collapse distribution in Shandong Province

表2 不同土层厚度岩溶塌陷数量统计

Table 2 Statistics of karst collapse with different soil thickness

第四系厚度H/m	岩溶塌陷数量/个	占比/%
0<H≤10	476	35.5
10<H≤20	491	36.6
20<H≤30	366	27.3
30<H≤40	7	0.5
H>40	2	0.1
合计	1 342	100.0

2.3 岩溶塌陷多沿断裂构造分布

由表3可知,与主要地质构造距离 $0\leq L\leq 500\text{ m}$ 、 $500<L\leq 1\,500\text{ m}$ 及 $L>1\,500\text{ m}$ 的岩溶塌陷分别占总数的64.6%、11.8%及23.5%,64.6%的岩溶塌陷分布于断裂周边500 m范围内,其主要表现在:临沂市城区西南部苗庄小区岩溶塌陷附近存在一近南北向的断裂构造,沿断裂构造产生了岩溶塌陷;泰安市城区、旧县水源地岩溶塌陷多沿岱道庵断裂及其次级

断裂呈条带状分布;滕州市荆泉地区发生的58起岩溶塌陷,有29起发生在距东郭断裂、峰山断裂及其次级断裂1 km范围内,占塌陷总数的50%。以泰安市附近发生的岩溶塌陷为例,泰安城区訾家灌庄塌陷区位于岱道庵断裂西侧,泰安旧县水源地塌陷区的塌陷点则多位于岱道庵断裂两侧,呈条带状分布,随着与断层带距离的增大,岩溶塌陷数量逐渐减少,两者之间具有明显的相关性(表4)。

其主要原因:可溶岩发育程度除与地层岩性密切相关外,还受地质构造的控制,断裂构造发育的

表3 山东省岩溶塌陷与地质构造距离统计表

Table 3 Statistics of distance between karst collapse and geological structure in Shandong Province

与地质构造距离/m	岩溶塌陷数量/个	占比/%
$0\leq L\leq 500$	867	64.6
$500<L\leq 1\,500$	159	11.8
$L>1\,500$	316	23.5

表 4 泰安城区附近塌陷点数量与地质构造距离统计表
Table 4 Statistics of the number of collapse sites and distances
to geological structure near Tai'an City

与地质构造距离/m	岩溶塌陷数量/个	占比/%
$L \leq 100$	23	43.4
$100 < L \leq 300$	15	28.3
$300 < L \leq 500$	10	18.9
$L > 500$	5	9.4

地段,岩石破碎,地表水及地下水对基岩作用强烈,溶蚀作用增强,是岩溶强发育地段,有利于岩溶塌陷的产生,断裂构造主要是通过控制岩溶发育程度来影响岩溶塌陷分布的。

2.4 岩溶塌陷多发生于地下水位陡升陡降及在基岩顶板波动时期

据初步统计分析,发生于5-9月份的岩溶塌陷占总次数的90%以上(图4),其中,7月份出现岩溶塌陷峰值,占塌陷总数的33%。这一时期先是降雨偏少,水位达到全年最低值,后强降雨开始,大气降水迅速下渗补给孔隙水,孔隙水快速饱和后又携带大量砂土补给岩溶水,造成土洞扩大;孔隙水下渗补给岩溶水后,岩溶水水位快速波动,携带大量泥沙沿岩溶管道流失,空腔中产生负压,上覆土体破坏;5月份开始,北方农作物灌溉频繁,地下水开采量增大,原有地下水动力条件改变,表层土体含水率和自重增大,改变了土体原有稳定状态;地下水在基岩面附近波动时,由于孔隙介质裂隙不发育,随着地下水位的波动和快速流动,地下气压很难与外界气压达成平衡,从而造成土层结构发生破坏。综合受以上多种因素影响,地下水位陡升陡降或在基岩面附近波动时,容易产生岩溶塌陷。

以枣庄市十里泉地区为例,根据长期监测与调查资料,绘制出十里泉地区水位、降水量、开采量及岩溶塌陷的关系图(图5)。由图5可知,十里泉地区岩溶塌陷多分布于地下水水位变幅较大时期,地下水位变幅越大,升降速度越快,塌陷频率越高,塌陷数量一般随水位降深增大而增多。当地下水位标高快速降至约37 m、埋深约17 m时,即可诱发塌陷;水位标高在24.5~14.5 m、埋深在30~40 m之间快速波动时,便会出现第二个塌陷高峰。

2.5 岩溶塌陷多沿河道、古河道等地表水体或地势低洼处分布

由表5可知,与主要地质构造距离 $0 \leq L \leq 500$ m、

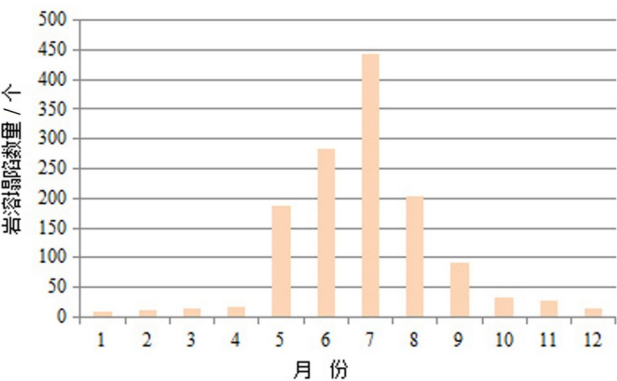


图4 山东省不同月份发生岩溶塌陷数量柱状图
Fig. 4 Histogram of karst collapse in Shandong Province in different months

$500 < L \leq 1\,000$ m及 $L > 1\,000$ m的岩溶塌陷分别占总数的87.4%、5.8%及6.8%,93.2%的岩溶塌陷分布于断裂两侧500 m范围内。其主要表现在:临沂市城区岩溶塌陷基本分布于小沭河、陷泥河和养鱼池及其沿岸地段;枣庄市十里泉地区60%的岩溶塌陷分布在河、塘等地表水体及其支流300 m以内;济宁市嘉祥县土山地区岩溶塌陷多分布于河道内,呈串珠状排列;莱芜大王庄、寨里及泉河塌陷区岩溶塌陷也多发生于暴雨洪水季节的河道内。

地势低洼处通常是地表水及地下水的汇集排泄区,地下水、地表水及大气降水交替转换较为强烈,动力条件充分,较易产生岩溶塌陷;河、塘等地表水体及附近,受侵蚀作用影响,上覆盖层较薄,且多分布砂性土,砂土颗粒较粗且松散,黏接性较差,在地下岩溶水的冲刷下,易于土洞的形成;当夏季暴雨来临,河、塘附近多有积水,导致土体充水,自重增加,稠度增大,强度降低,当上覆土层不足以支撑自身重力时,就会在地表产生岩溶塌陷。

以嘉祥地区岩溶塌陷为例,2014年4月以来,区内共发生岩溶塌陷27起,主要集中在分布于土山村、旷山村及尹家庄村附近,形成3个岩溶塌陷群。土山村岩溶塌陷主要分布于东北角和西北角的河沟及农田内,沿河沟方向,多呈串珠状(图6);尹家庄岩溶塌陷均位于村中地势低洼处(图7),常年雨后积水,塌陷后积水沿塌坑流入地下,村中房屋开裂。

3 岩溶塌陷成因机制

3.1 力学机制

据本次统计分析,不同岩溶塌陷力学机制所占比例见表6。

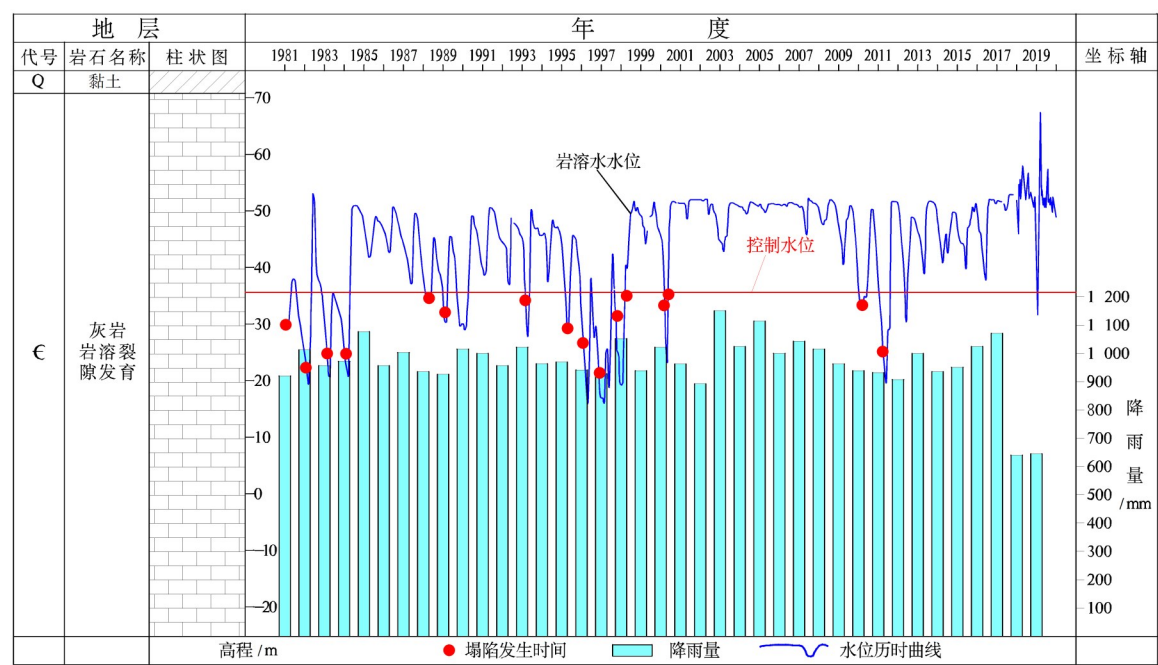


图5 十里泉地段岩溶塌陷与大气降水、水位、开采量关系图

Fig. 5 Relationship between karst collapse and atmospheric precipitation, water level and mining amount in Shiliquan sector

表5 岩溶塌陷与地表水体距离统计表

Table 5 Statistics of distances between karst collapse and surface water

与地表水体距离/m	岩溶塌陷数量/个	占比/%
$0\leq L\leq 500$	1 173	87.4
$500<L\leq 1\,000$	78	5.8
$L>1\,000$	91	6.8



图6 土山村串珠状岩溶塌陷

Fig. 6 Cluster karst collapse in Tushan village

3.1.1 真空吸蚀作用

真空吸蚀作用是指随着开采量的增加或降水量的减少,岩溶水水位逐渐降低至基岩顶板以下,承压水变成无压水,且覆盖层中上部或顶部为黏性土,透



图7 尹家庄地势低洼处岩溶塌陷

Fig. 7 Karst collapse at low-lying places of Yinjiazhuang village

表6 岩溶塌陷不同力学机制所占比例

Table 6 Proportion of different mechanical mechanisms of karst collapse

所属力学成因机制	岩溶塌陷数量/个	占比/%
真空吸蚀作用为主	792	59.0
潜蚀作用为主	231	17.2
失托加荷作用为主	192	14.3
地表水冲蚀增荷作用为主	116	8.7
荷载振动作用为主	11	0.8

气性差,下部岩溶管道与大气没有气体交换,随着地下水的不断流动,在岩溶水面与上覆盖层之间就会

出现真空区,表现为盖层上面作用有一个向下的大气压力,在此压力的不断作用下,上覆土层逐渐遭受破坏,当其不足以支撑自身重力时,就会在地表产生岩溶塌陷(图8)。山东省以真空吸蚀为主的岩溶塌陷约占塌陷总数的59.0%,主要分布于枣庄市十里泉地区、临沂市后交良地区、泰安訾家灌庄地区、津浦铁路泰安铁路三角区、泰安市徂徕镇桥沟地区以及平阴县张平一中洼地区。以上地区都有一个共同的特点:上覆土层多含有黏性土,胶结程度高,密封性好,多为浅覆盖型,岩溶水位的快速流动在岩溶管道中形成负压;地下水开采量大,开放性高,岩溶水位波动频繁,地下水位变幅大;地下岩溶发育程度高,存在规模较大的溶孔、溶洞,为土洞的形成提供了基本条件。

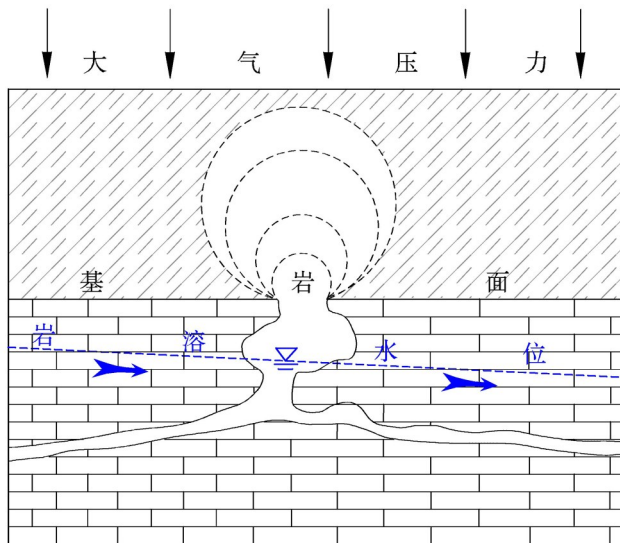


图8 真空吸蚀作用过程示意图(据贺可强等^[12]修改)

Fig. 8 Schematic diagram of vacuum erosion process

3.1.2 潜蚀作用

首先,基岩上部岩溶发育程度高,溶孔、溶洞发育,为地下水提供了良好的运移通道;然后,随着岩溶地下水开采量的增加,岩溶水位变幅增大,流速和水力坡度相应增大,当水力坡度达到临界值时,基岩顶板上部松散层产生潜蚀作用,松散细颗粒随着地下水的快速流动而不断流失,相对较粗的颗粒则会在重力的影响下落入岩溶裂隙之中,土洞逐渐形成,直至在地表产生塌陷(图9)。

山东省以潜蚀作用为主的岩溶塌陷占塌陷总数的约17.2%,主要分布于临沂城区地区、泰安旧县地区、曲阜市刘庄地区以及栖霞市中桥地区。以上地

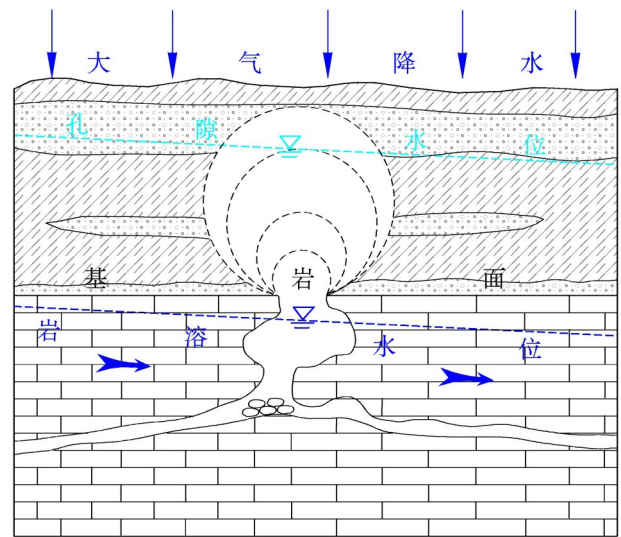


图9 潜蚀作用过程示意图(据贺可强等^[12]修改)

Fig. 9 Schematic diagram of subsurface erosion process

区的共同特点为:岩溶地下水开采量大,孔隙水水位高于岩溶水,孔隙水下渗补给岩溶水,造成松散细颗粒发生渗透变形破坏;上覆第四系覆盖层多为砂土或粉土,黏结性差,易于在地下水流的冲刷下崩解、剥落;地表多分布水系或河道,强降雨之后多形成积水,通过第四系覆盖层下渗补给岩溶水;地下多发育溶孔、溶洞,为地下水运移提供了通道。

3.1.3 失托加荷作用

当岩溶水水位高于基岩顶板时,岩溶水为承压水,对覆盖层会产生承压力和浮托力,随着承压岩溶水水位的不断下降,承压水的承压性消失,变为无压水,对覆盖层土体的承压力及浮托力消失,相当于在覆盖层之上增加了荷载,从而降低了覆盖层土体的抗塌力,较易产生土体破坏,产生岩溶塌陷。

山东省存在失托加荷作用的岩溶塌陷占比约14.3%,多见于滕州市荆泉地区、枣庄市十里泉地区以及莱芜大王庄—寨里—泉河地区。以上地区的共同特点为:受水源地开采或矿山疏干影响,岩溶地下水位远低于基岩顶板,承压水的承压力及浮托力消失;覆盖层多含有砂层,在地表大气压的作用下,土体较易产生破坏;地下岩溶发育程度高,溶孔、溶洞的存在为地下水的运移提供了通道。

3.1.4 地表水冲蚀增荷作用

地表水冲蚀增荷作用是指由于开采量的增大,岩溶水水位远远低于基岩顶板,夏季强降雨过后,地表河沟或池塘积累了大量地表水,造成孔隙水水位

升高,土体含水量增高,土体自重增大;地表水经过上覆第四系盖层下渗补给岩溶水的过程中,携带大量松散物质进入下部岩溶管道,造成土体流失,形成空洞,周而复始,空洞越来越大,就会在地表形成岩溶塌陷。

山东省存在地表水冲蚀增荷作用的岩溶塌陷占比约8.7%,多见于临沂城区陷泥河—小沭河塌陷、沂南新王沟村西塌陷、沂南张家营—李家营塌陷、莱芜大王庄—寨里—泉河塌陷以及嘉祥疃里塌陷。以上地区的共同特点为:位于地势低洼处,地表多有河沟及池塘分布,强降雨之后地表水很容易汇集;覆盖层多为砂性土,且土层较薄;区域地下水开采量较大,岩溶水水位远远低于基岩顶板;地下岩溶发育程度高,溶孔、溶洞的存在为地下水的运移提供了通道。

3.1.5 荷载振动作用

荷载是指作用在覆盖层上部的外加应力,通常所说的荷载包括土体的自重、地表静荷载以及地表动荷载,本文的荷载振动作用是指作用在上覆盖层之上的大型地表工程修建或运行时产生的振动效应。大型地表工程在产生振动时,土体产生破裂位移,作用在覆盖层之上的应力时大时小,土层结构破坏,密实程度改变,当土洞顶板承载力不满足要求时,就会在地表产生岩溶塌陷。

山东省存在荷载振动作用的岩溶塌陷多见于临沂城区兗石铁路全家红埠寺—杜家三岗段、泰安火车站地区、滕州市荆泉地区京沪高铁沿线以及莱芜寨里镇前枯河地区。以上地区的共同特点为:周边存在大型地表工程,如爆破、高速铁路、铁路及高速公路等,振动产生动荷载;基岩顶板之上覆盖层松散,多为砂土,在振动的作用下易于改变密实程度及土层结构;地下岩溶发育程度高,溶孔、溶洞的存在为地下水的运移提供了通道。

总体来说,山东省岩溶塌陷力学成因机制以真空吸蚀作用及潜蚀作用为主,多种作用相互影响。由于基础地质条件以及地下水动力条件的不同,各地区岩溶塌陷的主要形成机理也各不相同。真空吸蚀作用多分布于第四系覆盖层相对较高地区,且多含有黏性土,胶结程度好;潜蚀作用多分布于地下水开采量大,水位波动较大地区,第四系覆盖层多为砂性土,黏结性差;地表水冲蚀增荷作用多位于地势低洼处,且多有河沟及池塘分布;荷载振动作用多沿地表大型工程分布;失托加荷作用多分布于水源地及开采矿山周边,岩溶水水位远低于基岩顶板。

3.2 诱发机制

山东省岩溶塌陷诱发机制以地质因素为基础,多种诱发因素共同作用。

3.2.1 地质因素

(1)强烈发育的岩溶 通过在岩溶塌陷附近施工的岩溶地质钻探采集岩样分析发现,区内岩溶塌陷集中分布的奥陶系马家沟群五阳山组、北庵庄组、东黄山组及三山子组地层岩石化学成分以CaO为主,含有少量的白云质灰岩,CaO含量大于50%,MgO含量小于10%,CaO/MgO值一般介于20%~50%之间,灰岩质地较纯,易于溶蚀。在地壳运动的作用下,灰岩地层内部或表面产生裂隙或断裂,经地表及地下水流的反复作用,岩溶发育程度强,产生隐伏溶洞,为岩溶塌陷的产生提供了空间条件,同时也是地下水强烈运动的良好场所。在地下水流的不断作用下,先是隐伏溶洞中的填充物被冲蚀掉,形成空腔,产生负压;然后上覆松散层在地下水流的不断冲刷下,进入岩溶管道,从而造成上覆松散层的破坏,产生塌陷。

(2)第四系浅覆盖层 土洞的发育过程是岩溶塌陷的前期阶段,初始土洞的形成标志着岩溶塌陷的开始。区内岩溶塌陷集中分布于第四系浅覆盖区。第四系覆盖层多为砂性土,黏聚性差,在下伏存在裂隙、溶洞的条件下,伴随地下水流的冲刷,土体遭受剥落破坏,随着土洞规模的不断扩大,上覆土体整体稳定性不足以支撑自重,最终在地表形成岩溶塌陷。通常,在其他条件都具备的前提下,上覆松散层越薄,越容易产生岩溶塌陷,但规模较小;松散层厚度相对较大的浅覆盖型岩溶区,一旦产生岩溶塌陷,规模相对来说比较大。

3.2.2 诱发因素

(1)大气降水 大气降水是通过改变区内地表水、孔隙水及岩溶水的“三水”转化关系来诱发岩溶塌陷的。雨季强降雨之后,地势低洼处及河道内汇集大量雨水,增加上覆松散层压力;地表水下渗补给孔隙水,土层含水率增加、自重增大的同时,黏聚性变差;松散层快速饱和后,通过包气带迅速下渗补给岩溶水,增加了孔隙水与岩溶水之间的水力联系,孔隙水携带大量的砂土颗粒进入下部岩溶管道;岩溶水接受补给后,水位迅速回升,当回升到基岩顶板附近时,随着岩溶水的上下波动及水平流动,不断冲刷上覆松散层,“土洞”逐渐变大。山东省以大气降

水为主要诱发因素的岩溶塌陷多见于临沂城区陷泥河—小沭河塌陷、沂南新王沟村西塌陷、沂南张家营—李家营塌陷、莱芜大王庄—寨里—泉河塌陷以及嘉祥疃里塌陷。

(2)过量开采 以过量开采诱发因素为主的岩溶塌陷,主要表现在以下几个方面:受水源地开采或矿山疏干影响,部分地区岩溶地下水位远低于基岩顶板,承压水的承压力及浮托力消失,且这一地区覆盖层多含有砂层,在地表大气压的作用下,土体较易产生破坏;随着岩溶地下水开采量的增加,部分地区岩溶水位变幅增大,流速和水力坡度也相应增加,当水力坡度达到临界值时,基岩顶板上部松散层产生潜蚀作用,松散细颗粒随着地下水的快速流动而不断流逝,相对较粗的颗粒则会在重力的影响下落入岩溶裂隙之中,土洞逐渐形成,直至在地表产生塌陷。以这一诱发因素为主的岩溶塌陷多分布于枣庄市十里泉地区、莱芜大王庄—寨里—泉河地区、滕州市荆泉地区、临沂城区地区以及泰安旧县地区。

(3)灌溉回渗 以灌溉回渗为诱发因素的岩溶塌陷多集中发生于每年的5—6月份,这一时期,区内降雨偏少,气温偏高,普遍干旱,农作物需水量增加,农田灌溉集中进行,地下水开采量增大。灌溉开采的地下水除部分以蒸发和根系吸收等方式散失以外,其余均回渗补给地下水,增强了地下水的补给,改变了原有地下水动力条件,增加了表层土体的含水率及自重,地下水环境由相对静态转换为相对动态,易于诱发岩溶塌陷。以灌溉回渗诱发因素为主的岩溶塌陷多见于滕州市荆泉地区、曲阜市刘庄地区。

(4)地表重大工程修建 在具备岩溶塌陷基本地质因素的基础上,当上覆土层即将达到临界条件时,若在地表修建重大工程,如高速铁路等,在列车行驶过程中,不但会产生振动,改变土层的密实程度,还会增加上覆土层垂向压力,当土洞顶板承载力不满足要求时,就会在地面形成塌陷坑。以这一诱发因素为主的岩溶塌陷多见于泰安市铁路三角区、滕州市荆泉地区。

4 结 论

(1)受自然因素及人类活动的综合影响,岩溶塌陷多分布于强岩溶发育区、第四系浅覆盖区及地势低洼处,多沿断裂构造及河塘分布,多发生于地下水位陡升陡降及在基岩顶板波动时期;

(2)从力学角度出发,山东省岩溶塌陷成因机制以真空吸蚀作用及潜蚀作用为主,多种作用为辅,不同力学机制具有不同的分布特点;

(3)从影响因素角度出发,在具备岩溶塌陷基础地质背景的前提下,其诱发因素主要包含大气降水、过量开采、灌溉回渗及地表重大工程修建四种。

参考文献

- [1] 冯亚伟,李志峰,全路,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.
- [2] 王晓玮,赵志伟,陈伟清,等.泰安市覆盖型岩溶分布地区岩溶塌陷地下水位预警研究[J].中国岩溶,2017,36(6):795-800.
- [3] 李清春,冯克印,郑庭明,等.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):61-63.
- [4] 高峰,王振涛,靳丰山,等.山东省莱芜盆地岩溶塌陷风险性评价[J].中国人口·资源与环境,2016,26(11):359-362.
- [5] 冯亚伟,陈洪年,卜华,等.羊庄岩溶水系统水化学成因及同位素特征[J].中国岩溶,2019,38(3):394-403.
- [6] 马燕华,苏春利,刘伟江,等.水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J].环境科学,2016,37(12):4690-4699.
- [7] 张秋霞,周建伟,林尚华,等.淄博洪山、寨里煤矿区闭坑后地下水污染特征及成因分析[J].安全与环境工程,2015,22(6):23-28.
- [8] 王珺瑜,王家乐,靳孟贵.济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J].地球科学,2017,42(5):821-831.
- [9] 王茂枚,束龙仓,季叶飞,等.济南岩溶泉水流量衰减原因分析及动态模拟[J].中国岩溶,2008,27(1):19-23.
- [10] Sophie Messerklinger. Formation mechanism of large subsidence sinkholes in the Lar valley in Iran[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology,2014(47):237-250.
- [11] 马海会.临沂市区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.
- [12] 贺可强,王滨,杜汝霖.中国北方岩溶塌陷[M].北京:地质出版社,2005:116-120.
- [13] 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.
- [14] 万志博,武雄,徐晟,等.枣庄市十里泉岩溶塌陷机理分析[J].水文地质工程地质,2006,33(3):109-111.
- [15] 吴春寅,曹锋,朱嗣昭,等.山东省枣庄市十里泉、丁王庄一带地面塌陷的成因及防治对策[J].水文地质工程地质,1998,25(5):27-29.
- [16] 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.
- [17] 曹锋,吴春寅.枣庄地区岩溶地面塌陷成因与防治[J].中国岩溶,1998,17(2):104-110.

- [18] 贾玉跃. 中国北方岩溶塌陷风险评价与岩溶水资源保护对策研究:以山东枣庄十里泉域岩溶塌陷分析为例[D]. 青岛:青岛理工大学, 2010.
- [19] 姚春梅, 刘瑞峰, 张永伟, 等. 临沂市城区岩溶塌陷预警系统建设及研究[R]. 济南:山东省地质环境监测总站, 2008.
- [20] 李振兴. 山东泰安警家灌庄地区岩溶地面塌陷预测研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2012.
- [21] 王滨. 枣庄市岩溶塌陷的形成机理及其渗压模型的研究[D]. 青岛:青岛建筑工程学院, 2002.
- [22] 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, 23(5):564-574.
- [23] 王延岭, 陈伟清, 蒋小珍, 等. 山东省泰莱泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J]. 中国岩溶, 2015, 34(5):495-506.
- [24] 高宗军. 岩溶地面塌陷形成机理与成因模式研究:以山东泰安—莱芜为例[J]. 中国工程科学, 2008, 10(4):38-43.
- [25] 徐军祥, 赵书泉, 康凤新, 等. 山东省地质环境问题研究[M]. 北京:地质出版社, 2010.
- [26] 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.
- [27] C Kromhout, A Baker. Sinkhole vulnerability mapping: results from a pilot study in north central Florida[N]. 14th sinkhole conference, 2015:241-254.
- [28] 许公瞻, 周来, 冯启言. 枣庄岩溶地面塌陷机理研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(1):41-44.

Distribution and genesis of karst collapse in Shandong Province

FENG Yawei^{1,2,3}

(1.Shandong Lunan Geological Engineering Survey Institute (the second Geological Brigade of SDGM), Yanzhou, Shandong 272100, China;

2.Key Laboratory of Karst Geology, SDGM, Yanzhou, Shandong 272100, China; 3.School of Environmental Studies, China University of

Geosciences(Wuhan), Wanhuan, Hubei 430074, China)

Abstract As a major economic and cultural province in China, Shandong Province has developed rapidly in recent years. Human activities have made a great impact on the geological environment, especially in the karst areas. The main karst geological hazards include karst collapse, groundwater pollution and spring cut-off, among which karst collapse is the most significant. Frequent karst collapse not only restricts the sustainable development of economy and society, but also brings about great hidden danger to the safety of people's life and property. This paper analyzes the distribution and genesis of karst collapse in Shandong, so as to provide a basis for decision-making on targeted prevention and control of such geologic hazard.

Karst collapse documented in Shandong Province began in the early 1970s in Shandong Province. Since then, with the development of economy and society and the growth of population, the exploitation amount of karst groundwater mushroomed and human activities increased. According to incomplete statistics, up to now, there have been more than 1,300 karst collapse events, which are mainly distributed in Tai'an, Zaozhuang, Linyi, Jinan, Jining and Jiaodong Peninsula.

The karst collapse in Shandong Province is a representative geologic hazard in northern China. This study suggests that constrained by many natural factors, such as karst development, cap rock thickness, fault structure and surface water systems, karst collapse in Shandong Province exhibits certain regularity. Associated with human factors, karst collapse mostly occurs in the period of abrupt rise and fall of groundwater level and fluctuation of bedrock roof. From the perspective of mechanics, the genetic mechanism of karst collapse is dominated by vacuum suction erosion and potential erosion. From the perspective of influence factors and control factors, on the basis of basic control factors, the main inducing factors include atmospheric precipitation, excessive mining, irrigation and infiltration and major surface engineering.

Key words Shandong, karst collapse, distribution, genetic mechanism

(编辑 黄晨晖)