第35卷 第1期
2016年2月

中 国 岩 溶
CARSOLOGICA SINICA

Vol. 35 No. 1
Feb. 2016

王延岭. 山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析[J]. 中国岩溶,2016,35(1):60－66.
DOI:10.11932/karst20160109

山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析

王延岭
(山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队,山东 泰安 271000)

摘 要:岩溶塌陷地质灾害的发生是一个复杂的、多因素共同作用的过程。塌陷虽然受多种因素的影响,但不外乎可溶岩类岩溶发育程度、覆盖层特征和动力条件(主要是地下水动力条件)3个基本因素。文章在总结和分析前人研究的基础上,结合最新调查成果,对影响岩溶塌陷的3个基本因素逐一分解,揭示了各因素对岩溶塌陷的影响和作用规律,探讨了岩溶塌陷地质灾害与其主要影响因素的相关关系:质纯厚层的石灰岩分布区岩溶塌陷最为发育,地质构造对岩溶塌陷具有明显的控制作用;研究区内主要岩溶塌陷区的覆盖层以多元结构为主,其次为一元结构和二元结构,区内岩溶塌陷发生于覆盖层厚度小于30 m的区域;岩溶地下水位在基岩面上下波动时最易引发岩溶塌陷,岩溶塌陷点数量的自然对数与岩溶地下水位变幅近似呈线型正相关,塌陷点数量与岩溶地下水开采模数的自然对数值近似呈指数型正相关。

关键词:岩溶塌陷;影响因素;相关性;地质灾害;泰莱盆地
中图分类号:P642.26 **文献标识码**:A **文章编号**:1001－4810(2016)01－0060－07

0 引 言

岩溶塌陷地质灾害的发生是多种因素共同作用的结果,国内外诸多专家、学者和工程技术人员对岩溶塌陷的影响因素进行过研究和分析[1－15]。如:于青春、沈继芳[1]利用泰斯公式分析了岩溶水位降深与塌陷数量的关系;朱大力、甘文珍[2]基于对泰安铁路三角区岩溶塌陷的研究,分析了岩溶塌陷与抽水井影响半径、抽水量的关系;袁杰、高宗军等[3]从压力差的角度,分析了岩溶地下水位对岩溶塌陷的控制作用;王国强[4]、何宗彬[5]分别从土层物理力学性质、结构和厚度等方面分析了覆盖层特征与岩溶塌陷的关系;刘建茂等[10]则从构造对覆盖层结构和完整性的控制作用出发,分析了岩溶塌陷与断裂构造的关系。本文综合前人研究成果,利用"山东省泰莱盆地岩溶塌陷地质灾害调查与防治"项目的最新工作成果,从影响岩溶塌陷的基本因素出发,对岩溶塌陷与其影响因素的相关关系进行分析探讨。

1 泰莱盆地岩溶塌陷发育历史及现状

泰莱盆地位于山东省中部,包括泰安市部分地区和莱芜市大部,区内自上世纪60年代开始发生岩溶塌陷,截止2014年底,共发生有记录的岩溶塌陷115处。塌陷主要发生于覆盖型岩溶区内的岩溶地下水供水水源地及矿山疏干排水区附近,塌陷点集中分布于以下几个区域[6]:①泰安市的城区及旧县水源地一带;②莱芜铁矿区的孟公清、孟家庄、西泉河一带;③莱芜市大王庄镇孤山一寨里镇枯河一带,此外在泰安市徂徕镇桥沟地区、边家庄地区以及莱芜市的鹏山水源地、清泥沟水源地也有零星分布(图1)。

基金项目:山东省国土资源厅地质勘查项目"山东省泰莱盆地岩溶塌陷地质灾害调查与防治"(鲁勘字2012(58)号)
作者简介:王延岭(1978－),男,工程师,主要从事水工环地质勘查和地质环境监测工作。E-mail:sddkwyl@163.com。
收稿日期:2015－12－29

万方数据

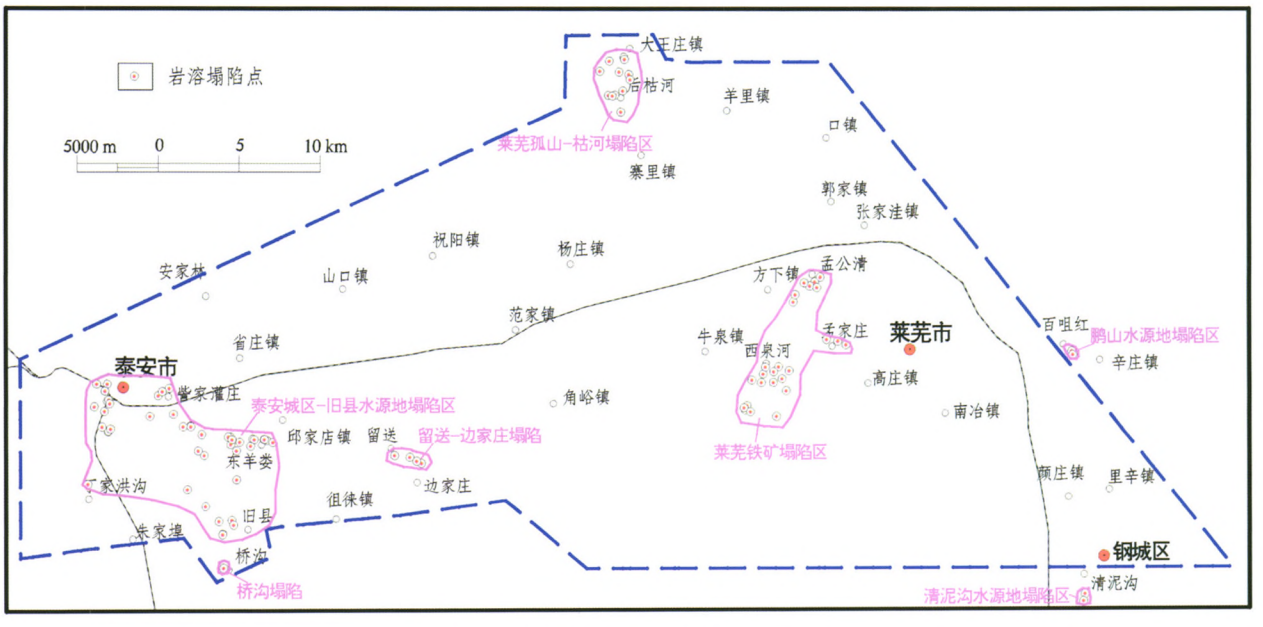

图 1　泰莱盆地岩溶塌陷分布图

Fig. 1　The distribution map of karst collapse in Tailai Basin

2　岩溶塌陷与影响因素的相关性探讨

岩溶塌陷是由于可溶岩类存在溶蚀裂隙和洞穴，其上覆松散盖层由于自然或人为因素作用向下塌落的现象。可溶岩类岩溶发育程度、松散盖层特征和动力条件（主要是地下水动力条件）是影响岩溶塌陷的基本要素。

2.1　可溶岩类岩溶发育程度

由于碳酸盐岩类的可溶性，往往在岩土界面附近，形成溶洞、溶隙、竖井等开口岩溶形态，开口岩溶是岩溶塌陷产生的前提[11]。除开口岩溶外，可溶岩类内部发育的各类溶蚀洞穴和裂隙，也为塌陷物质提供了运移通道和储存空间。影响可溶岩各类岩溶形态发育程度的主要因素有两个：一是岩性，二是地质构造。

2.1.1　地层岩性

岩性是控制岩溶发育的基本条件。不同地层岩性岩溶发育程度的差异主要受岩石化学成分（主要是可溶物成分）的影响，根据泰安城区－旧县地区可溶岩类岩石成分分析结果，岩石中 CaO 的含量对岩溶的发育程度和塌陷数量具有明显的控制作用（表 1）。而 CaO 含量相对较低的白云岩、白云质灰岩和泥质白云岩中岩溶发育的主要原因则与岩石的结构有关。质纯灰岩为隐晶质结构，为化学沉积成因，而白云岩、白云质灰岩和泥质白云岩为微晶－微（细）粒结构，其

表 1　岩石成分与溶洞发育对照表[12]

Table 1　The comparison chart between rock composition and caverns development

岩石类型	CaO 含量/%		溶洞发育情况		
	数值范围	平均值	个数	一般洞高/m	最大洞高/m
致密结晶灰岩	38.44～53.63	50.16	370	0.10～1.00	11.50
鲕状灰岩	46.92～53.63	49.08	106	0.60～1.20	8.75
云斑灰岩	46.09～53.09	48.98	99	0.30～1.00	2.77
竹叶粒状灰岩	47.79～53.10	50.93	60	0.20～0.90	2.20
疙瘩灰岩	38.91～53.63	48.85	21	0.10～0.60	1.20
条带灰岩	26.2～54.52	39.39	19	0.20～1.20	1.90
白云质灰岩	27.31～44.38	33.80	36	0.10～0.70	1.60
白云岩	20.18～31.11	29.02	23	0.20～0.90	1.10
泥质灰岩	15.17		15	0.10～0.40	0.84
泥灰岩			13	0.20～0.60	1.08

万方数据

沉积过程除化学沉积外，尚伴随有物理沉积及生物沉积作用，其结构较隐晶质结构的灰岩疏松，有利于地下水的运动和溶蚀，因此岩石结构也是影响其岩溶发育程度的重要因素。

就地层时代而言，奥陶纪碳酸盐岩类的岩性以致密结晶灰岩、云斑灰岩、白云质灰岩和白云岩为主，其岩溶较其它时代的可溶岩类发育，这也是区内主要岩溶塌陷区基岩岩性以奥陶纪碳酸盐岩为主的原因。根据统计(图 2)，泰莱盆地内发生的 115 处塌陷中，81 处基岩为奥陶纪马家沟群，占 70.43%；其次是炒米店组、三山子组、张夏组和朱砂洞组，各占 15.65%、7.83%、5.22%和 0.87%。

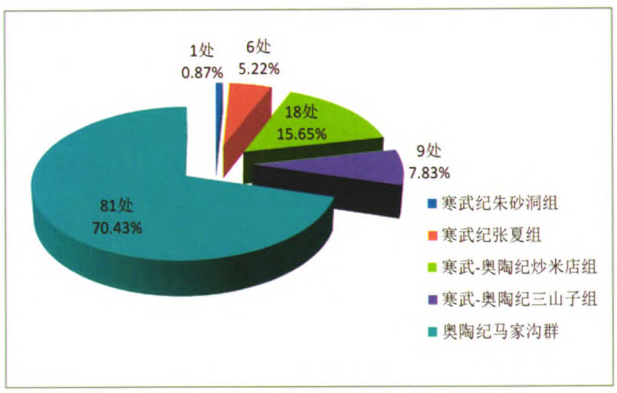

图 2 不同时代地层塌陷统计图

Fig. 2 The statistical chart of collapse quantity in different strata

2.1.2 地质构造

可溶岩类岩溶发育程度除与地层岩性密切相关外，还受地质构造的控制。沿断裂带及其影响带岩石破碎，裂隙发育，在褶皱发育区，由于岩层弯曲也易产生岩石变形和裂隙。因此，在同样的岩性情况下，断裂及其影响带、褶皱区成为地下水的良好赋存空间和运移通道，地下水与岩石密切接触，溶蚀作用增强，在漫长的地质历史过程中，岩溶裂隙、溶孔、溶洞逐渐形成并扩大，为岩溶塌陷的形成创造了条件[6]。工作区已发岩溶塌陷大多都处在断裂及其影响带和褶皱发育区。如莱芜铁矿区孟公清－张公清、孟家庄及西泉河塌陷区位于矿山背斜的两翼大理岩与燕山期侵入岩体接触带附近；泰安旧县水源地塌陷区的塌陷点多位于岱道庵断裂及其分支断裂两侧，呈条带状分布；上述情况均因构造对可溶岩类岩溶发育程度的影响所致。本次工作以构造带(主要为断层带)两侧 100 m、300 m 和 600 m 范围作为统计区域，对泰莱盆地内的 115 处主要岩溶塌陷点进行了统计，根据统计结果(图 3)，塌陷点数量随着与构造带距离的增大而减少。

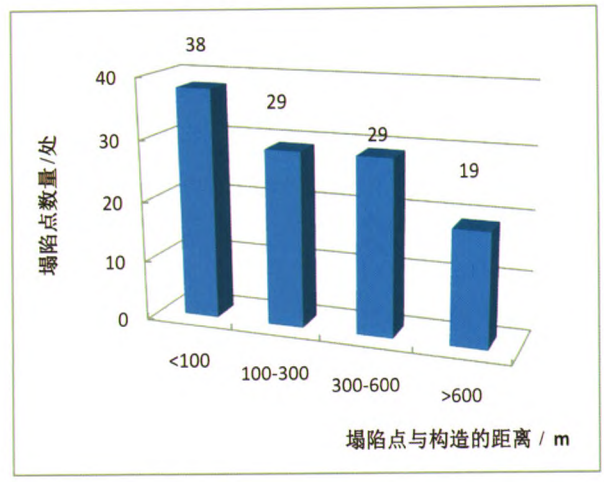

图 3 塌陷点与断层距离关系统计图

Fig. 3 The statistical chart of relationship between collapse and fault distance

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塌陷的主要因素，泰莱盆地主要塌陷区的土层结构及厚度情况见表 2。

2.2.1 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，覆盖层土体一般由粘性土、砂及砾石等组成，包括一元结构、二元结构和多元结构(三元及以上结构)。根据统计，截止 2014 年 12 月，工作区发生的 115 处岩溶塌陷中，有 47 处土层以三元或多元结构为主，39 处为一元结构(粉质黏土为主)，29 处为二元结构(图 4)。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，因此最易形成塌陷。二元结构的塌陷区多以上部粘性土，底部砂类土的结构为主，致塌力以潜蚀作用为主[6]，由于砂类土的内聚力较小，因此常不易形成土洞，在地表形成的塌陷坑相对较少，多造成地面微变形，导致建筑物斑裂(如泰安旧县水源地塌陷区的旧县村一带)。

2.2.2 覆盖层厚度

岩溶塌陷发生的可能性、时间及塌陷规模与土层厚度有关。根据初步统计，岩溶塌陷大部分发生在土层较薄的地区，特别以土层厚度小于 20 m 的地段居多。这是因为在相同的水文地质条件下，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。若土层厚度

万方数据

表 2　主要岩溶塌陷区覆盖层特征统计表

Table 2　The statistical table of characteristics of overburden layer in main karst collapse area

塌陷区名称	岩性	土层结构	土层厚度/m
莱芜铁矿区孟公清－张公清塌陷区	粘性土、中粗砂	多元结构为主	10～13
莱芜铁矿区孟家庄塌陷区	粘性土、中粗砂	一元结构为主	10～11
莱芜铁矿区泉河塌陷区	粘性土为主	一元结构为主	4～15
莱芜铁矿区侯家沟塌陷区	粘性土为主	一元结构为主	4～8
莱芜鹏山水源地塌陷	粘性土、中粗砂	二元结构	10～12
莱芜清泥沟水源地塌陷	粘性土、中粗砂	二元结构	5～8
莱芜大王庄孤山－寨里枯河塌陷区	粘性土、中粗砂	多元结构	15～20
泰安城区铁路三角区塌陷区	粘性土、中粗砂含卵砾	多元结构	17～25
泰安城区訾家灌庄塌陷区	粘性土为主	一元结构为主	5～15
泰安城区徐家楼栗家庄、尚寨村	粘性土、中粗砂	多元结构	12～15
泰安旧县水源地塌陷区	粘性土、中粗砂	二元结构	11～15
泰安羊娄塌陷区	粘性土、中粗砂	二元结构	10～20
泰安桥沟塌陷	粘性土、中粗砂	二元结构	12～15
泰安徂徕边家庄塌陷	粘性土、中粗砂	多元结构	5～10

大，从土洞形成到波及到地面所需的时间长，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[11]。根据区内相似的原则，将泰莱盆地主要岩溶塌陷区按照覆盖层厚度的不同划分为 42 个区域，根据统计结果（图 5、图 6），区内 90%以上的塌陷点土层厚度在 5～20 m 之间，其次为小于等于 5 m 和 20～30 m，而覆盖层厚度大于 30 m 的地段无塌陷点分布。

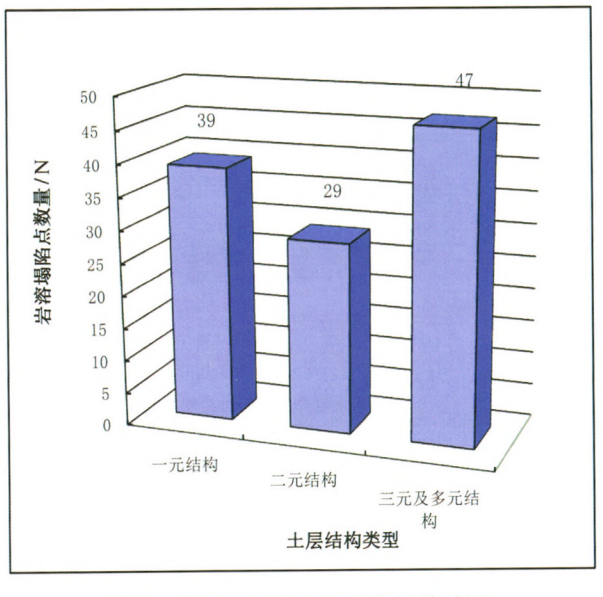

图 4　不同土层结构塌陷数量统计图

Fig. 4　The statistical chart of collapses amount with different soil structures

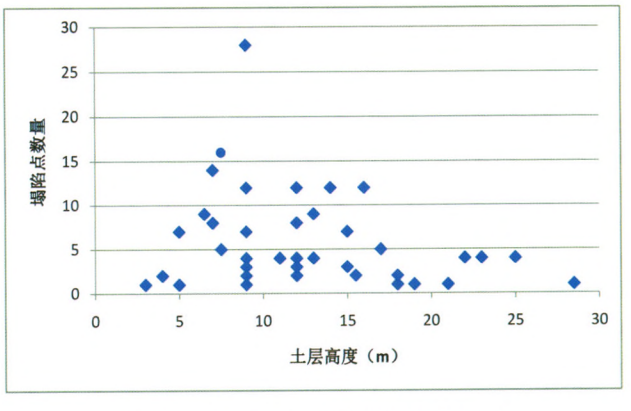

图 5　土层厚度与塌陷点数量散点图

Fig. 5　The scatter plot of soil depth and collapse amount

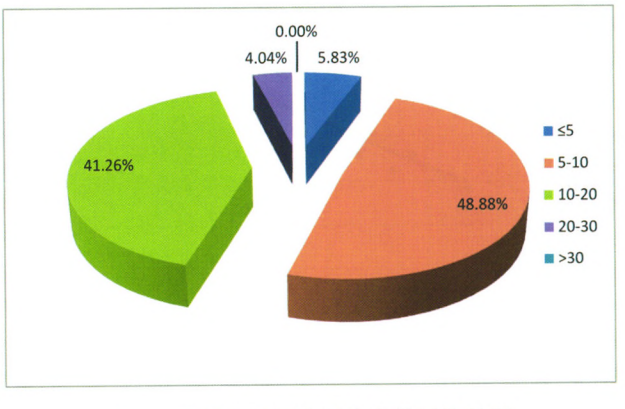

图 6　不同土层厚度塌陷点数量统计图

Fig. 6　The statistical chart of collapse quantity against different soil depth

万方数据

2.3 岩溶地下水动力特征

地下水动力条件是诱发岩溶塌陷的最主要动力条件，也是塌陷形成的关键。其中地下水位变幅、地下水位与基岩面的关系及开采强度是构成岩溶塌陷地下水动力条件的主要因素[15-16]。

2.3.1 地下水位变幅

地下水位变幅的大小反映了地下水位变化的强度，水位变幅的大小在一定程度上控制了致塌作用的强弱。短时间、大幅度的水位下降，会使覆盖层受到的浮托力快速消失，增大致塌力；大幅度的水位下降还会增大孔隙水、地表水与下部岩溶水的水头差，使潜蚀作用增强。岩溶水位的上升则会产生向上的渗透力，使覆盖层土颗粒间的有效应力减小，强度降低，在一定条件下会使土颗粒产生液化现象，当水位再次下降时，土颗粒被搬运带走，形成土洞。

岩溶地下水位的升降还会引起岩溶空腔及土洞内的气压产生变化，水位下降会在洞内形成负压，使致塌力增大；水位上升则会形成正压力，在压力得不到及时释放的情况下，则可能产生气爆，导致塌陷发生。在相对密闭的土洞或岩溶空腔内，气压的变化与岩溶地下水位的变化速度和幅度呈正比关系。

选取泰安旧镇铁路三角区、訾家灌庄、东羊娄、旧县、边家庄，莱芜西泉河、大王庄、孟公清－张公清等8个塌陷区作为统计对象，采用岩溶塌陷发生年份的岩溶地下水位变幅 A 和塌陷点的数量 N 的自然对数做散点图，分析得出两个参数相关性曲线见图 7，两个参数基本呈线型正相关关系，即岩溶塌陷的数量随岩溶地下水位变幅的增大而增加，相关方程为：

$$\ln N = 0.028A + 1.401$$

式中：N 为塌陷数量，A 为岩溶水位年变幅。

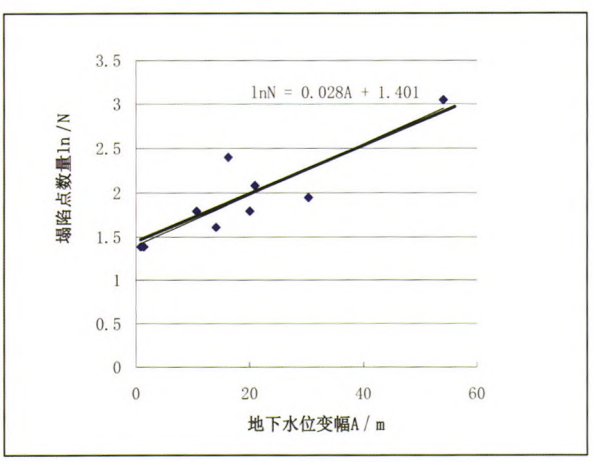

图 7 岩溶塌陷与地下水位变幅关系曲线图

Fig. 7 The relationship between collapse and change of ground water level

2.3.2 岩溶地下水位与基岩面的关系

岩溶地下水位与基岩面的关系包括承压波动（波动于基岩面之上）、无压波动（波动于基岩面之下）和承压－无压波动（波动于基岩面上下）三种情况[18]。

地下水位在基岩面附近波动时，最易形成塌陷。此种情况下，水位升降产生动水压力直接作用于开口岩溶顶板的盖层土体，在水位升降产生的潜蚀等致塌力作用下，土体易破坏，加之开口岩溶及通道为破坏的土体运移和储存提供了空间条件，因此易于形成土洞，从而引发塌陷。

当岩溶地下水动水位高于基岩面时，地下水波动产生的动荷载作用于盖层土体，同样会引起波动范围内的土体潜蚀破坏，但对开口岩溶顶板的土体影响较小，即开口岩溶与潜蚀破坏的土体之间存在一定厚度的未破坏土层，无流畅的搬运通道，潜蚀破坏的土体难以被水流搬运和掏空，不易形成土洞。因此，岩溶地下水位在基岩面以上波动的情况下，土体不易塌陷。

当岩溶水水位波动于基岩面以下时，一方面由于岩溶水位低于孔隙水位，孔隙水下渗补给岩溶水所产生的潜蚀作用有利于土洞的形成和发展；另一方面岩溶水位在基岩面之下波动会引起岩溶空腔或土洞内气压的变化，有利于土洞的形成和发展。

根据统计，泰莱盆地内 115 处岩溶塌陷中，发生塌陷期间，有 53 处岩溶水位波动于灰岩顶板上下，35 处波动于灰岩顶板之下 30 m 以下，20 处波动于灰岩顶板之下 10～30 m 范围内，7 处波动于灰岩顶板之上。统计情况图 8。

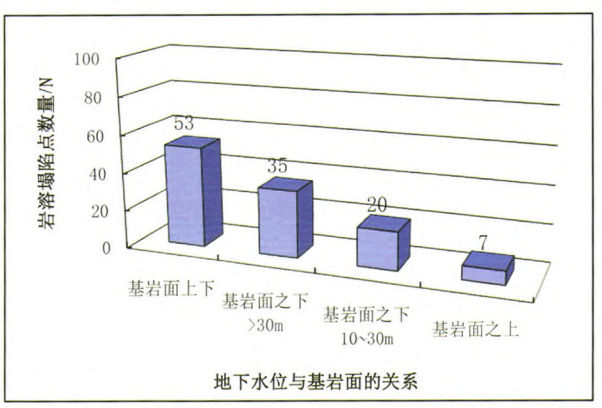

图 8 塌陷点数量与水岩面关系统计图

Fig. 8 The statistical chart of relationship between collapse amount and water-rock layer

2.3.3 岩溶地下水开采

泰莱盆地内已发生的岩溶塌陷，均位于岩溶水供

万方数据

水水源地周围及工矿企业排水区，高强度地抽排岩溶地下水一方面使地下水径流速度加快，冲蚀携带能力增强；另一方面使孔隙水或地表水对岩溶水的补给强度增大，潜蚀作用增强；再者，高强度地抽排地下水岩溶水位的波动强度增大，对覆盖层的扰动破坏程度增强，从而引发塌陷。莱芜铁矿区的耿公清－张公清地区的岩溶塌陷主要由谷家台铁矿排水以及泰山造纸厂大量抽取岩溶地下水引发，孟家庄－大曹村地区的岩溶塌陷主要由于叶庄矿排水及叶马曹水源地大量抽取岩溶地下水引发，泉河、侯家沟一带的岩溶塌陷同样是由周边多个铁矿排水及工农业生产大量抽取地下水引发；莱芜大王庄孤山－寨里后枯河地区的塌陷，则由于集中生活供水及农业灌溉抽取地下水而引发；泰安城区－旧县水源地一带的塌陷，由城区水源地、旧县水源地集中供水及农灌井抽水而引发[18-19]。可见，高强度岩溶地下水开采活动是导致泰莱盆地隐伏型岩溶区地质环境系统破坏，产生岩溶塌陷的主要原因。

岩溶地下水开采强度采用开采模数来量化描述。根据主要塌陷区岩溶地下水开采历史及现状[18-21]，将工作区开采相对集中且开采量较大的区域进行了分区计算，开采模数及塌陷点数量统计情况表 3。

根据统计计算所得计算模数与塌陷点数量两组数据，以开采模数 M 的自然对数为横轴，以塌陷点的数量 N 为纵轴，做散点图(图 9)，分析得出，塌陷点数量与地下水开采模数的自然对数值近似呈指数相关，即塌陷数量随开采模数的增大而增加。相关方程为：

$$N = 0.236e^{1.2321\ \ln(M)}$$

式中：N 为塌陷数量，M 为岩溶地下水开采模数。

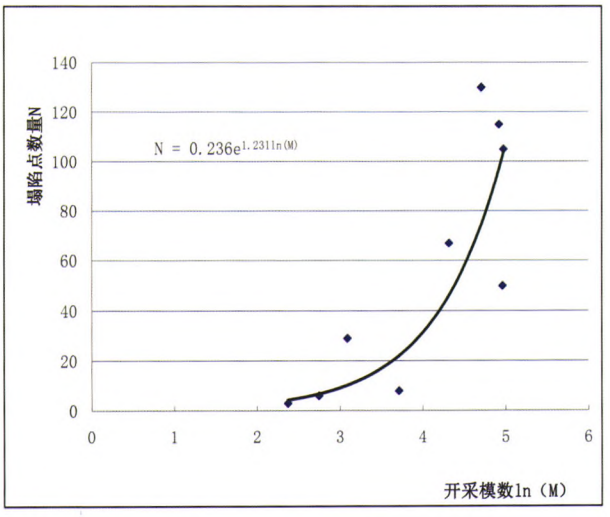

图 9　开采模数与塌陷数量关系曲线图

Fig. 9　The graph of relationship between exploiting modulus and collapse amount

表 3　主要塌陷区岩溶水开采模数及塌陷点数量统计表

Table 3　The statistical table of karst water exploiting modulus and collapse amount in main collapse area

计算区域	岩溶水开采量/$10^4 m^3/a$	开采模数/$10^4 m^3/(a \cdot km^2)$	塌陷点数量/个
泰安城区	3 650.00	110.70	约 130
泰安徐家楼	303.28	15.58	6
泰安旧县水源地	1 657.06	75.03	67
泰安桥沟	438.00	348.73	10
泰安徂徕边家庄	11.80	10.72	3
莱芜大王庄孤山－寨里枯河	378.57	21.96	29
莱芜牛泉侯家沟	200.25	41.00	8
莱芜牛泉西泉河	200.34	144.58	110
莱芜方下耿公清	433.13	137.08	117
莱芜孟家庄	251.12	142.82	50

3　结　论

(1)可溶岩类岩溶发育程度是岩溶塌陷产生的基础。岩溶塌陷多沿岩溶发育的构造带发育，就泰莱盆地而言，塌陷区岩性以奥陶纪马家沟群为主。

(2)一定厚度的覆盖层是岩溶塌陷的主体。岩溶塌陷多发生于覆盖层厚度小于 30 m 的区域，且覆盖层以多元结构为主。

(3)地下水动力条件是岩溶塌陷产生的主要诱导因素。岩溶地下水位波动于可溶岩与覆盖层界面的情况最易引发塌陷，岩溶塌陷发生的强度与岩溶地下水位变幅大小、岩溶地下水开采强度大小呈正相关关系。

万方数据

参考文献

[1] 于青春,沈继芳.岩溶地面塌陷机理分析[J].地质灾害与防治,1991,2(1):97-102.

[2] 朱大力.泰安地面塌陷若干数理统计[J].铁道工程学报,1996,(4):66-70.

[3] 袁杰,高宗军,马海会.论岩溶地下水位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.

[4] 王国强.隐伏岩溶地面塌陷的探讨[J].水文地质工程地质,1993,1993,(3):50-51.

[5] 何宗彬.喀斯特机理研究[J].上海地质,1993,(2):63.

[6] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等.山东省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.

[7] 赵博超,朱蓓,王弘元,等.浅谈岩溶塌陷的影响因素与模型研究[J].中国岩溶,2015,34(5):515-521.

[8] 王滨,贺可强.山东省枣庄市市中区岩溶塌陷调查与成因分析[J].地质灾害与环境保护,2004,15(4):26-34.

[9] 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):239-245.

[10] 刘建茂,郑文忠.新构造断裂对莱芜铁矿田中岩溶地面塌陷的控制作用[J].地质找矿论丛,2002,17(4):282-286.

[11] 贺可强,王滨,杜汝霖.中国北方岩溶塌陷[M].北京:地质出版社,2005:45-65.

[12] 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,(4):38-43.

[13] 成世才,郭加朋,马海会,等.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.

[14] 高宗军.泰安市岩溶地面形成机理与防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(4):73-76.

[15] 高宗军,孙文广,唐蒙生,等.泰安-旧县水源区岩溶水开采与地质环境的关系[J].山东地质,2001,17(3-4):86-91.

[16] 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.

[17] 山东省地质调查院.山东省泰安地区岩溶塌陷调查与风险评估报告[R].2006.

[18] 山东省第五地质矿产勘查院.山东省泰莱盆地岩溶塌陷机理研究及风险区预测报告[R].2014.

[19] 山东省地质环境研究院.山东省莱芜市孟公清-西泉河地区矿山地质灾害勘查报告[R].1997.

[20] 泰安地质环境监测站.山东省泰安市地下水动态监测报告[R].1981-2014.

[21] 莱芜地质环境监测站.山东省莱芜市地下水动态监测报告[R].1994-2014.

Research on influential factors of the karst collapse in the Tailai Basin of Shandong Province

WANG Yan-ling

(*No. 5 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Taian, Shandong* 271000, *China*)

Abstract The geologic disaster of karst collapse is a complicated process controlled by multiple factors. Though the karst collapse is influenced by many factors, it is largely controlled by the degree of karstification, the characteristics of overburden layers and the dynamic conditions (mainly groundwater dynamic condition). On the basis of previous studies and the latest investigation, this paper has analyzed the 3 influential factors and reveals the impact conditions and function on karst collapses. Results show that, (1) the karst collapses mostly develop in the locality with thick-layered limestone of high purity, while geological structure has an obvious control on the karst collapse; (2) the karst collapses in the study area mainly occur in Quaternary strata with multiple structures, followed by quaternary strata with unitary structure and dualistic structures. Moreover, karst the collapse occurred in the area of quaternary strata are less than 30 meters in thickness; (3) the karst collapse most frequently happen at where the cavern water level fluctuates around the bedrock surface. There is an approximately linear positive correlation between the natural logarithm of the karst collapse number and changes in cavern water level; there is also an approximately exponential positive correlation between the karst collapse number and natural logarithm of the exploitation modulus of cavern water. This paper can provide scientific basis for the integrated control of karst collapse in the study area.

Key words karst collapse, influencing factors, correlations, geological hazard, Tailai Basin

(编辑 吴华英)

万方数据