

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.10

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

冯亚伟^{1,2}, 李志峰¹, 仝路¹, 曾斌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:截至2018年底,山东荆泉断块研究区内先后发生岩溶塌陷58起,给当地的生产生活带来了极大的安全隐患。本文结合研究区基础地质条件、地下水动态监测、地球物理勘探及水文地质钻探等资料,对荆泉断块区内覆盖型岩溶塌陷的主要控制因素和影响因素进行了分析。研究发现:区内岩溶塌陷主要分布在多层土层结构区,土层厚度基本介于0~15 m且含有砂层;岩溶塌陷多沿构造或构造影响带分布,断层两侧1 000 m内为岩溶塌陷高发区;降雨对地下水动力条件的改变是诱发岩溶塌陷的重要环境影响因素之一;人类活动对岩溶塌陷的影响则主要表现在岩溶水的大量开采及地表大型工程的修建等。亟需采取措施降低区内岩溶塌陷再次发生的概率。

关键词:荆泉断块;岩溶水;岩溶塌陷;诱发因素

中图分类号:P642.25

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2020)03-0073-10

Analysis on factors controlling and influencing overburden karst collapse in Jingquan fault block, Shandong Province

FENG Yawei^{1,2}, LI Zhifeng¹, TONG Lu¹, ZENG Bin³

(1. Shandong Lunan Geological Engineering Investigation Institute (Second Geological Brigade of Shandong Geological Survey Bureau), Yanzhou, Shandong 272100, China; 2. Key Laboratory of Karst Geology of Shandong Bureau of Geology and Mining, Yanzhou, Shandong 272100, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Up to the end of 2018, 58 karst collapses occurred successively in Jingquan fault block research area, Shandong Province, which brought great potential safety hazard to local production and life. Based on the basic geological conditions, groundwater dynamic monitoring, geophysical exploration and hydrogeological drilling data, the main inducing factors of overburden karst collapse in Jingquan fault block area are analyzed. It is found that karst collapse mainly distributes in multi-layered soil structure area, and the thickness of soil layer is between 0 and 15 m and contains sand layer; karst collapse distributes along structural or tectonic influencing zone, and karst collapse occurs frequently within 1 000 m on both sides of faults; the change of groundwater dynamic condition caused by rainfall is one of the important environmental factors that induce karst collapse; and human activities influence karst collapse. The impact of human activities is mainly manifested in the large-scale exploitation of karst water and the construction of large-scale surface projects. Measures are urgently needed to reduce the probability of recurrence of karst collapse in the area.

收稿日期: 2019-07-25; 修订日期: 2019-09-03

基金项目: 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); 山东省自然资源厅《山东省地下水水源地调查评价(鲁西南)》(鲁地环(2016)02号)

第一作者: 冯亚伟(1990-), 男, 山东济宁人, 本科, 工程师, 主要从事水文地质环境地质方面研究。E-mail: 1102844258@qq.com

Keywords: Jingquan fault block; karst water; karst collapse; inducing factors

0 引言

据统计,全球岩溶发育区涉及 85 个主要国家,总面积约 $17.89 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全球陆地总面积的 12%^[1],“一带一路”沿线国家为世界主要岩溶分布区,约 55 个国家分布有岩溶,占全球岩溶总面积的 60%。我国岩溶分布面积约 $346.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土总面积的三分之一以上,由此引发了一系列的岩溶地质问题,岩溶塌陷是其中主要地质灾害类型之一,主要分布在西南、华南、华中等岩溶强发育区^[2],截至 2010 年,全国已发生岩溶塌陷 1 600 起,形成塌陷坑 40 000 个^[3]。随着山东省岩溶发育区社会经济的快速发展,土地资源、水资源和矿产资源开发的不断增强,由此引发的岩溶塌陷问题日益突出,自 20 世纪 70 年代初期以来,发生多起岩溶塌陷问题,主要分布于鲁中南的临沂、泰安、莱芜和枣庄等地^[4]。

近年来,山东省荆泉断块岩溶塌陷灾害频发,以西坞沟村岩溶塌陷为例,该塌陷发生于 2016 年 5 月 26 日清晨的马铃薯田地,当时该田地正在灌溉,地面突然下陷,形成一个平面呈圆形、直径约 12 m、深约 13 m 的塌陷坑,距京沪高铁直线距离仅 80 余米(图 1)。



图 1 西坞沟村岩溶塌陷现场(本图片来源于网络)

Fig.1 Site of karst collapse in Xiwugou Village
(this picture is from the network)

塌陷发生后,不仅在当地村民中引起了恐慌,还对京沪高铁运输安全造成严重威胁,引起了相关部门的高度重视,迫切需要查明当地岩溶塌陷诱发因素,提出岩溶塌陷防治措施,降低这一区域岩溶塌陷再次发生的可能性。

由于岩溶塌陷的突发性和破坏性,国内外众多学者致力于研究其诱发因素,以期降低危害。通常,岩溶

塌陷的形成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,形成塌陷^[5]。有些学者通过开展水气压力监测探讨岩溶塌陷的诱发因素^[6-7],评价岩溶塌陷形成临界力学模型^[8];有些学者通过开展地球物理勘探、钻孔、地下水高程测量及地下水水化学分析等多种方法,研究岩溶塌陷影响因素,总结岩溶塌陷形成机理^[9],认为大多数的岩溶塌陷均是由与水相关的因素(低水位和强降雨)直接造成的^[10]。我国岩溶塌陷问题的研究始于 20 世纪 80 年代,特别是 20 世纪 90 年代以来,岩溶塌陷问题频发,与之相关的研究也越来越深入,取得了丰富的研究成果^[11]。山东省岩溶塌陷的研究主要集中于临沂市城区预警系统的建设及风险性评价^[12-13]、泰莱盆地岩溶塌陷形成机理及水源地岩溶塌陷演化过程^[14-15]。荆泉断块岩溶塌陷的成因机理,在中国北方岩溶地区具有良好的代表性,但研究尚不深入。本文以荆泉断块岩溶塌陷为研究对象,探讨其诱发因素,不仅可以丰富中国北方岩溶塌陷理论研究,还可为政府职能部门防灾减灾提供决策依据。

1 研究区地质背景

荆泉断块位于山东省滕州市东北部,北部以长龙断裂为界,西南部边界为峰山断裂,东部和东南部以地层岩性及地表分水岭为界,总面积约 160 km^2 ,地势总体东北高、西南低,京沪高速铁路由北往南贯穿全区;地处暖温带半湿润大陆性季风气候区,多年平均降水量 748 mm;属淮河流域运河水系,主要地表水体为荆河及城郭河,其次为分布于北部、东部边缘山区的马河水库和岩马水库。荆泉断块内变质岩多分布于桑村穹隆及其附近地区;奥陶系地层多分布于峰山断裂之东、长龙断裂之南,以隐伏分布为主;侏罗系地层多分布于峰山断裂以西的广大地区,多为浅埋藏状态,局部见有露头;古近系地层小范围分布于长龙断裂以南的杨明庄周围;第四系主要分布于本区中部及西部的广大地区,以长龙断裂之南田庄一带最厚;岩浆岩主要分布在桑村穹隆的核部及长龙断裂之北,在桑村穹隆的核部多为隐伏状态,长龙断裂之北大部分裸露(图 2)。

荆泉断块岩溶水系统为一相对独立、完整的地下水系统,具有间接补给、直接补给和汇集排泄等一套完

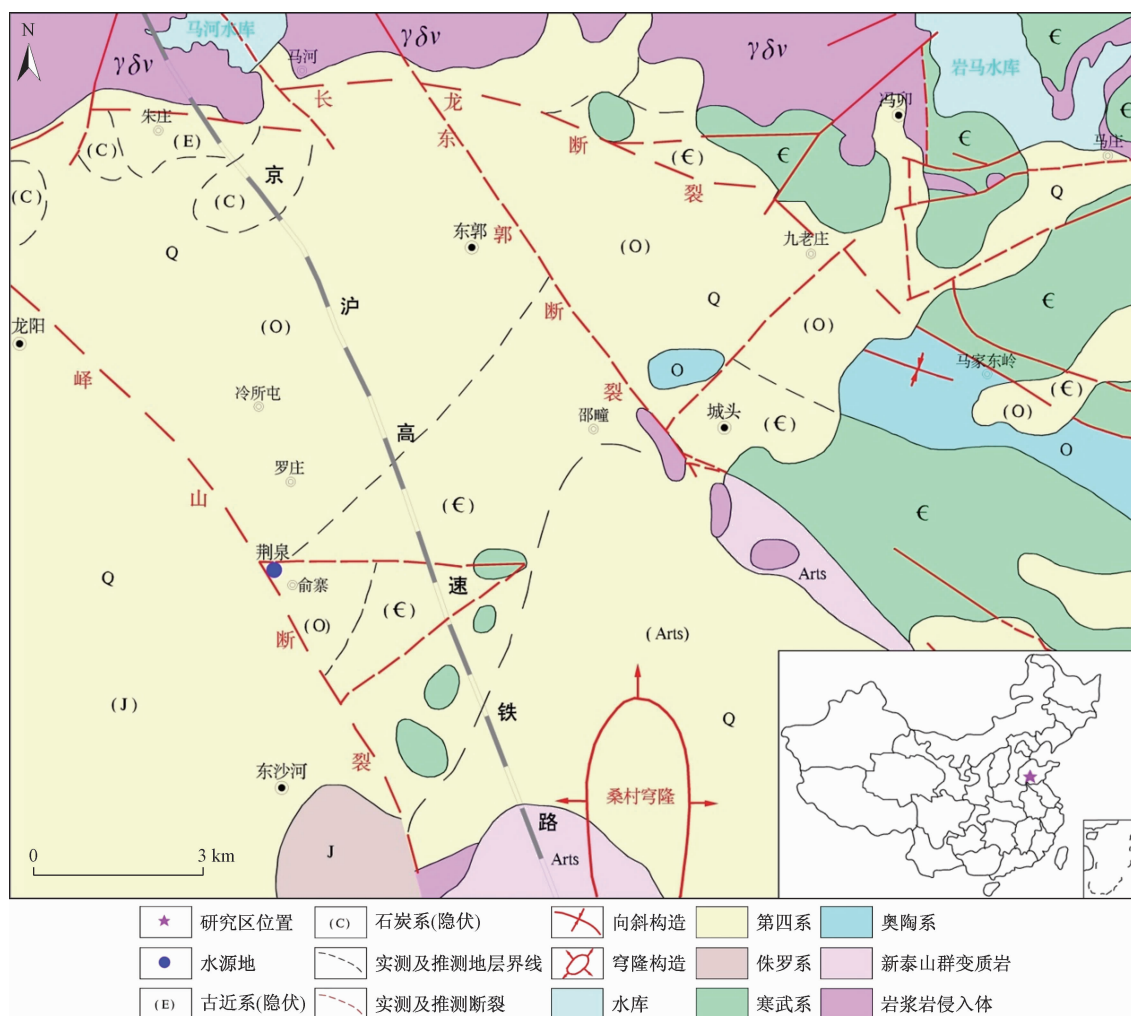


图2 研究区位置及地质图

Fig. 2 Location and geological map of the study area

整的地下水补给、径流、排泄与蓄存功能。岩溶主要发育在奥陶系马家沟组中,马家沟组地层连通性好,导水性强,水量丰富,是区内岩溶水的主要赋水岩组。以俞寨-罗庄一带为例,此区岩溶发育极为强烈,含水层厚50~70 m,井孔单位涌水量大于 $3\,000\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,最大达 $6\,988.98\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。本区岩溶水具有补给面积大,径流条件好,排泄集中的特点。区内岩溶水的补给以大气降水入渗、地表水渗漏补给为主,其次为农田灌溉回渗补给、孔隙水越流补给。岩溶水的整体径流方向为北东-南西向,水力坡度沿径流方向逐渐变小。岩溶水的主径流带在冯卯-邵疃-俞寨一线。岩溶水的排泄方式主要有自然排泄和人工开采排泄两种,自然排泄包括泉水排泄和向第四系孔隙水越流排泄;人工排泄以荆泉水源地的集中大量开采为主,也是区内岩溶水最主要的排泄方式。

京沪高铁滕州段从滕州市东北经过荆泉水源地主

开采区北侧。水源地内,岩溶隐伏于第四系松散岩之下,岩溶发育于寒武-奥陶系碳酸盐岩内,岩溶发育,溶洞竖向直径一般1~2 m,最大约6 m,溶洞多为空洞或半充填,充填物为黏土夹碎石及粗砂、砾砂等。

2 岩溶塌陷现状

据初步统计,2015年5月份以来,区内共发生岩溶塌陷58起(图3、表1),主要分布在杨明庄、大坞沟、罗庄、后梁及俞寨周边。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。小型塌坑约占所有塌坑的75.86%(圆形塌坑直径介于0.3~8 m,椭圆形塌坑长轴介于0.6~9.5 m,深度介于0.1~7 m),其余为中型塌坑(圆形塌坑直径介于10~12 m,深度介于1~13 m;其余塌坑长轴介于10~34.6 m,深度介于0.3~4.5 m)。塌坑底部均被第四系黏质砂土覆盖,未见基岩出露,附近地面多见土

体开裂,形成岩溶塌陷隐患点,分布多呈条带状,由南 西向东北方向展布。

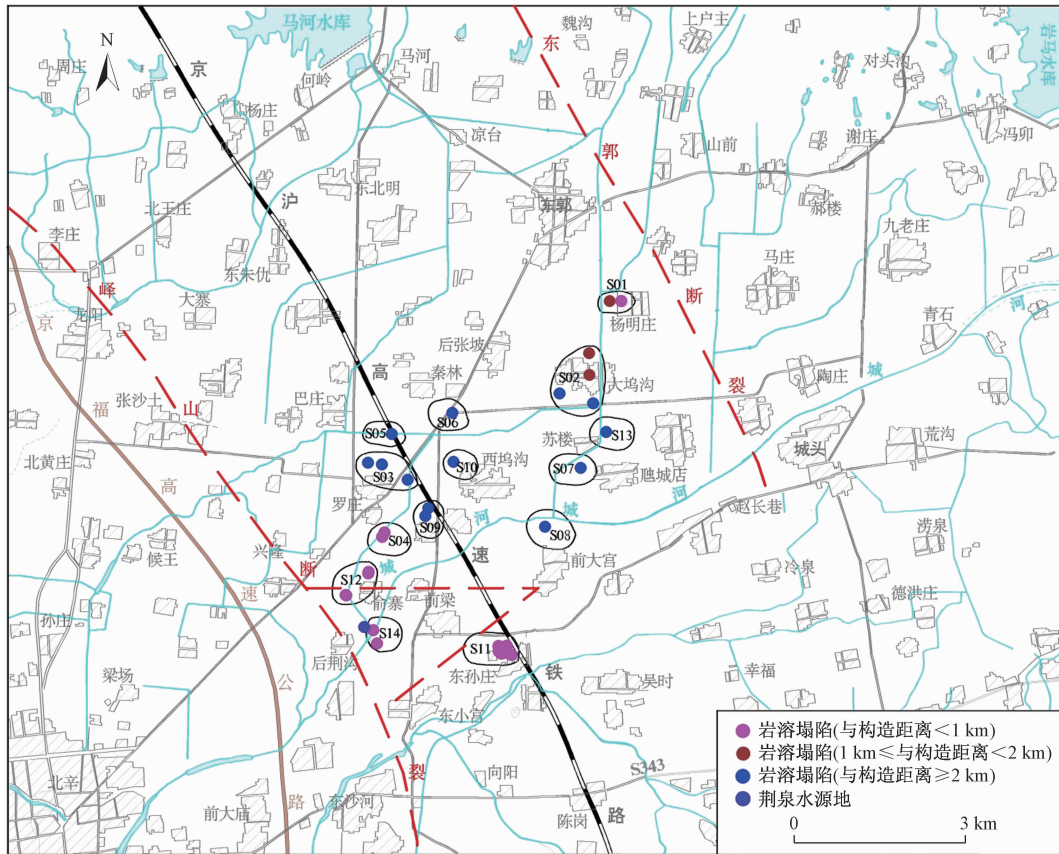


图 3 岩溶塌陷点分布位置图

Fig. 3 Distribution of karst collapse points

表 1 岩溶塌陷点基本情况一览表

Table1 A list of basic conditions of karst collapse points

序号	编号	时间	平面形状/剖面形状	深/m	规模/m	土层结构	下伏基岩	塌陷数量
1	S01	2015. 6	圆形/圆柱状	4	6. 8 × 6. 8	砂-黏-砂-黏-砂-黏	奥陶系灰岩	8
2		2015. 6	圆形/圆柱状	6	3. 2 × 3. 2		奥陶系灰岩	
3		2015. 7	圆形/圆柱状	7	7 × 7		奥陶系灰岩	
4		2015. 6	圆形/圆柱状	5	3 × 3		奥陶系灰岩	
5		2015. 7	圆形/圆柱状	7	8 × 8		奥陶系灰岩	
6		2015. 6	椭圆形/圆柱状	4. 5	16 × 6		奥陶系灰岩	
7		2015. 9	椭圆形/圆柱状	0. 5	20 × 15		奥陶系灰岩	
8		2015. 9	圆形/圆柱状	1	1. 5 × 1. 5		奥陶系灰岩	
9	S02	2016. 6	不规则/坛状	3. 5	9. 5 × 5	砂-黏-砂	寒武系灰岩	4
10		2016. 6	椭圆形/坛状	3	8 × 5		寒武系灰岩	
11		2016. 7	椭圆形/锥状	3	20 × 12. 5		寒武系灰岩	
12		2018. 6	椭圆形/坛状	1. 3	2. 2 × 2. 1		寒武系灰岩	
13	S03	2015. 6	圆形/圆柱状	0. 7	5. 9 × 5. 9	砂-黏-砂-黏-砂-黏	奥陶系灰岩	3
14		2015. 6	圆形/碟状	1. 2	3. 5 × 3. 5		奥陶系灰岩	
15	S04	2016. 5	圆形/圆柱状	13	12 × 12	黏-砂-黏	奥陶系灰岩	2
16		2016. 6	椭圆形/圆柱状	. 8	5. 4 × 3. 4		寒武系灰岩	
17	S05	2016. 6	椭圆形/圆柱状	2. 2	8. 6 × 5. 6	黏-砂-黏-砂-黏	寒武系灰岩	1
18		2015. 5	圆形/圆柱状	1	10 × 10		奥陶系灰岩	
19	S06	2015. 5	圆形/圆柱状	0. 5	5 × 5	黏-砂砾-粉-砂砾-黏	奥陶系灰岩	1

续表

序号	编号	时间	平面形状/剖面形状	深/m	规模/m	土层结构	下伏基岩	塌陷数量
20	S07	2015. 9	不规则/碟状	2. 5	3. 8 × 3. 5	砂-黏-砂-黏-砂-黏	寒武系灰岩	1
21	S08	2015. 10	圆形/圆柱状	2. 7	5. 36 × 5. 36	砂-黏-砂砾-混粒-砂砾-黏	寒武系灰岩	1
22	S09	2018. 6	圆形/锥状	1. 5	3. 5 × 3. 5	砂-黏-砂砾-黏	奥陶系灰岩	2
23		2018. 5	圆形/锥状	1. 8	10 × 10		奥陶系灰岩	
24	S10	2017. 10	椭圆/锥状	1. 1	4. 7 × 3. 8	砂-黏-砂砾-黏	奥陶系灰岩	1
25	S11	2017. 6	不规则/锥状	0. 5	10 × 1. 5	砂-黏-砂	寒武系白云岩	8
26		2017. 6	圆形/锥状	0. 3	0. 5 × 0. 5		寒武系白云岩	
27		2017. 5	圆形/锥状	0. 2	0. 3 × 0. 3		寒武系白云岩	
28		2017. 5	椭圆形/锥状	0. 2	0. 8 × 0. 3		寒武系白云岩	
29		2017. 5	圆形/坛状	0. 5	2 × 2		寒武系白云岩	
30		2017. 6	不规则/锥状	0. 3	6 × 2. 5		寒武系白云岩	
31		2017. 5	不规则/锥状	0. 3	0. 6 × 0. 3		寒武系白云岩	
32		2017. 6	圆形/锥状	0. 4	0. 8 × 0. 8		寒武系白云岩	
33	S12	2015. 6	不规则/碟状	0. 2	2. 4 × 2	砂-黏	奥陶系灰岩	16
34		2015. 5	不规则/碟状	1. 1	0. 6 × 0. 45		奥陶系灰岩	
35		2015. 6	不规则/碟状	0. 6	3. 35 × 3. 25		奥陶系灰岩	
36		2015. 6	不规则/碟状	1. 5	12. 4 × 0. 6		奥陶系灰岩	
37		2015. 5	不规则/碟状	0. 15	5. 1 × 0. 6		奥陶系灰岩	
38		2015. 5	圆形/碟状	0. 1	7 × 7		奥陶系灰岩	
39		2015. 6	不规则/碟状	0. 45	1. 7 × 1		奥陶系灰岩	
40		2015. 5	不规则/碟状	0. 3	9. 3 × 4. 9		奥陶系灰岩	
41		2015. 6	不规则/碟状	0. 6	24. 8 × 5. 5		奥陶系灰岩	
42		2015. 5	不规则/碟状	0. 3	8 × 2		奥陶系灰岩	
43		2015. 6	不规则/碟状	0. 45	5 × 1. 3		奥陶系灰岩	
44		2015. 6	不规则/碟状	0. 4	3. 1 × 1. 5		奥陶系灰岩	
45		2015. 5	不规则/碟状	0. 8	19. 3 × 11. 4		奥陶系灰岩	
46		2015. 6	不规则/锥状	0. 7	34. 6 × 3. 2		奥陶系灰岩	
47		2015. 5	不规则/碟状	0. 6	43 × 5		奥陶系灰岩	
48		2015. 5	不规则/碟状	0. 3	15. 3 × 3. 1		奥陶系灰岩	
49	S13	2015. 5	不规则/碟状	0. 3	2 × 0. 4	砂-黏-砂-黏-砂-黏	寒武系灰岩	4
50		2015. 6	不规则/碟状	0. 6	21 × 1. 2		寒武系灰岩	
51		2015. 5	不规则/碟状	0. 7	0. 8 × 0. 15		寒武系灰岩	
52		2015. 6	不规则/碟状	0. 7	4 × 2		寒武系灰岩	
53	S14	2015. 6	不规则/碟状	0. 55	2 × 1. 4	砂-淤泥-黏	奥陶系灰岩	6
54		2015. 6	不规则/碟状	0. 62	2. 5 × 1		奥陶系灰岩	
55		2015. 5	不规则/碟状	0. 44	0. 8 × 0. 6		奥陶系灰岩	
56		2015. 5	不规则/碟状	2. 07	0. 67 × 0. 54		奥陶系灰岩	
57		2015. 5	不规则/碟状	0. 5	2. 22 × 0. 9		奥陶系灰岩	
58		2015. 6	不规则/碟状	0. 25	4. 3 × 0. 9		奥陶系灰岩	

注:S(Sinkhole 岩溶塌陷)、黏(黏土)、砂(砂土)、粒(混粒土)、砂砾(砂砾石层)、淤泥(淤泥质黏土)。

3 岩溶塌陷控制因素分析

3.1 岩溶发育程度

研究区岩溶发育程度分区见图 4。

由图 3 结合钻孔资料可知,奥陶系地层岩溶形态以溶蚀裂隙和蜂窝状溶孔为主,地层岩溶能见率介于 10% ~ 72% 之间,强岩溶发育带位于俞寨、秦林、屯里、王庄一带等排泄区或近排泄区,隐伏奥陶系灰岩岩溶发育均一,以蜂窝状溶孔为主,大部分钻孔可见溶洞;寒武系地层岩溶发育情况不一,馒头组石店段地层岩

溶发育强,地层岩溶能见率达 30% ,强岩溶发育带主要位于岩马水库大坝下游,前坞沟、邵疃、东郭一带等径流区,岩溶形态主要为溶蚀裂隙,溶孔次之,很少溶洞,岩溶能见率 10% ~ 20% ,为岩溶发育区。

据岩溶埋深能见率统计,基岩顶板下埋深 30 ~ 60 m 段,岩溶埋深能见率 31. 4% ,为岩溶最发育段;其次为 0 ~ 30 m 和 60 ~ 90 m 段,岩溶埋深能见率约 24% ,为岩溶强发育段;90 ~ 180 m,岩溶埋深能见率 15% 左右,为岩溶中等发育段;180 ~ 210 m,岩溶埋深能见率 3. 6% ,为岩溶弱发育段;210 m 以下,极少见岩

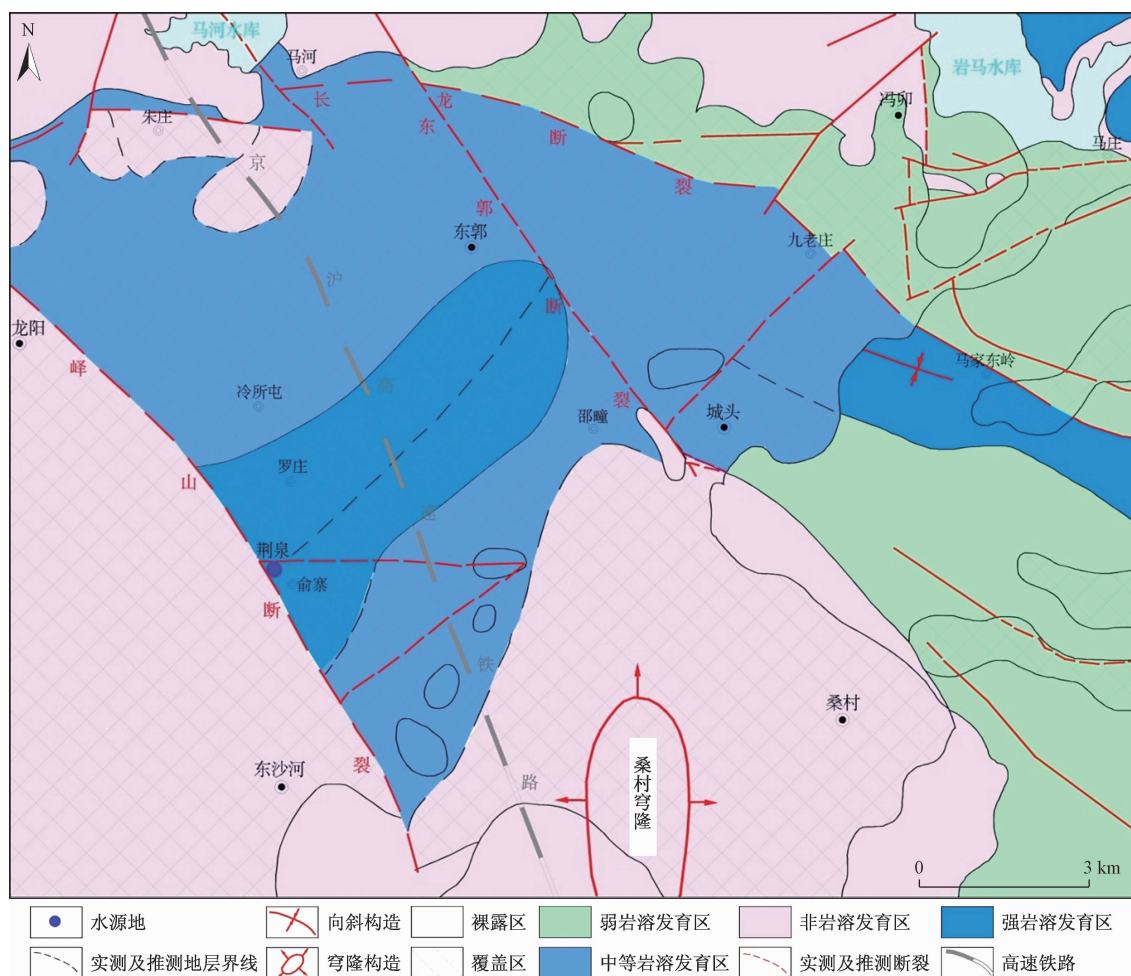


图4 岩溶发育程度分区图

Fig. 4 Zoning map of karst development degree

溶发育,为岩溶极弱发育段。

强烈发育的岩溶是区内岩溶塌陷形成的最基础条件^[16],岩溶越发育的地方越有利于岩溶塌陷的形成。与岩溶发育程度分区相一致,岩溶塌陷主要分布在强岩溶发育带中的俞寨、罗庄、后荆沟、后梁及杨明庄一带,这一地区地势较低洼,岩溶发育较为强烈,含水层厚约 50~70 m,水量较为丰富,地下水径流迅速,上覆第四系砂层较为松散,在地下水流的冲刷作用下不断塌落,土洞越来越大,当其无法承受上覆土体压力时,就会在地表形成岩溶塌陷,反向证明了岩溶发育是本区岩溶塌陷形成的主要影响因素之一。

3.2 覆盖层土体结构及厚度

据表 1 可知,除 S12 岩溶塌陷点上覆土层结构为双层结构外,其余各点上覆土层结构均为多层结构,占总数的 92.9%,多以砂土与黏土互层,少数含有砂砾石层、混粒土与淤泥质土。相对黏性土来说,砂土的黏结性较差,在地下岩溶水的冲刷下,易于土洞的形成,

产生塌陷。

按可溶岩地层的出露条件,可将岩溶区划分为裸露型岩溶区、覆盖型岩溶区和埋藏型岩溶区^[2]。据图 5 可知,区内上覆第四系土层厚度多在 20 m 以浅,属浅覆盖型。按照土层厚度结构分区来看,裸露岩溶区未产生岩溶塌陷,在地表多分布溶沟溶槽;0~5 m 土层厚度分区产生岩溶塌陷 8 起,占总塌陷个数的 13.8%,主要分布在东孙庄东北(S11),距京沪高铁仅 100 余米;5~10 m 土层厚度分区产生岩溶塌陷 22 起,占总塌陷个数的 37.9%,主要分布在俞寨村西(S12)和后荆沟村东北(S14),基本都分布在距荆泉水源地直线距离 300 m 范围内;10~15 m 土层厚度分区产生岩溶塌陷 28 起,占总塌陷个数的 48.3%,主要分布在罗庄及西坞沟村高铁沿线、杨明庄-虬城店一线,这一地区为荆泉断块地下水主径流区,地下水流速快,富水性好;15 m 以上土层厚度分区基本未产生岩溶塌陷。

据研究统计分析,地面塌陷绝大多数发生在覆盖

型岩溶区,而覆盖层是覆盖型岩溶塌陷发生的主体,其厚度和结构影响岩溶塌陷的易发程度^[17]。综合来看,

荆泉断块土层厚度相对较薄,且多夹有砂层及砂砾石层,为岩溶塌陷的形成提供了必要的基础条件。

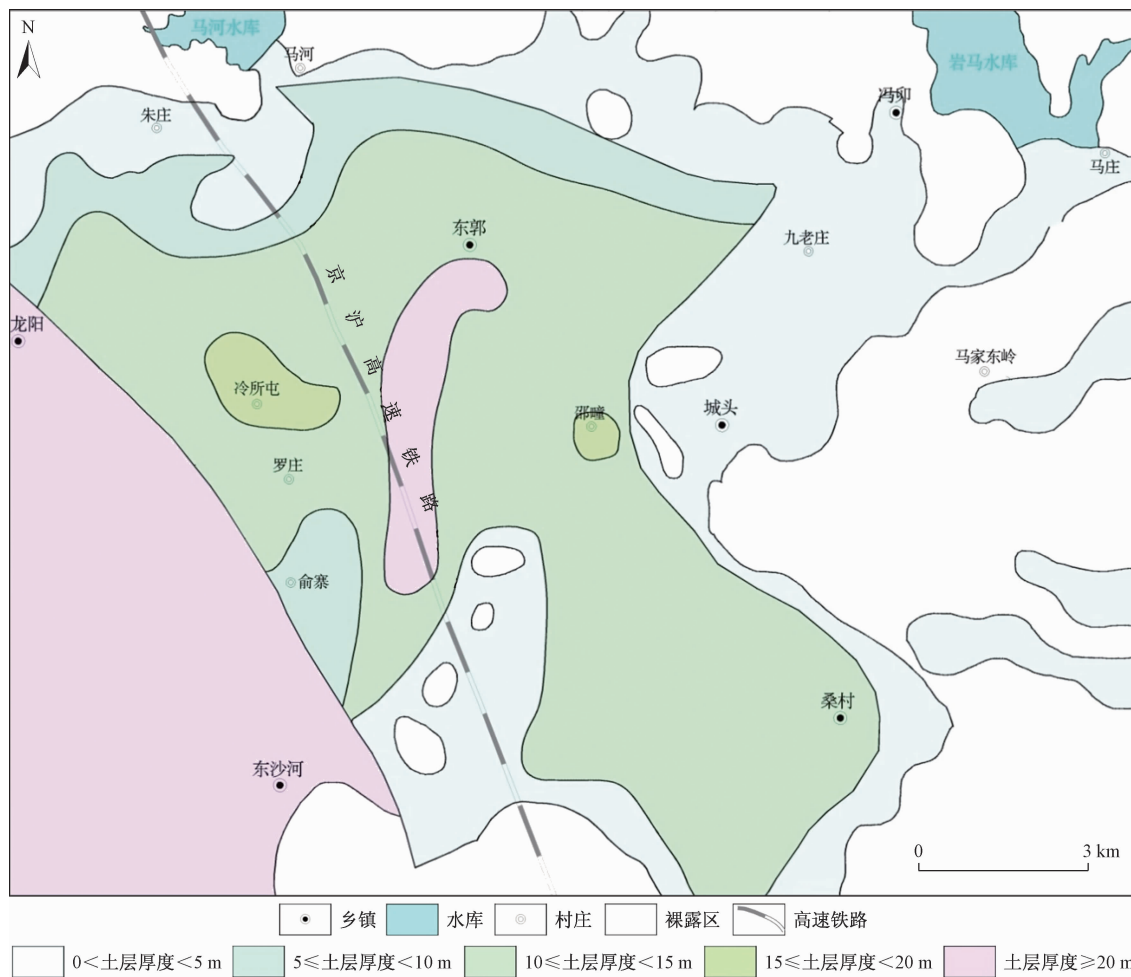


图5 覆盖层土层厚度分区图

Fig. 5 Subarea map of overlying soil thickness

3.3 地质构造

地质构造主要是通过控制岩溶发育程度来影响岩溶塌陷程度的。断裂构造发育的地段,岩石破碎,利于地下水的渗透,是岩溶发育强烈的地段,亦是水流活动强烈之处,有利于岩溶塌陷的发生。荆泉断块构造特征是以断裂为主,区域节理、裂隙普遍发育,褶皱次之。构造活动所形成的断裂、节理、裂隙,为碳酸盐岩地下水溶蚀作用创造了有利条件,并制约着区域岩溶及垂向岩溶的发育与分布。岩溶发育形成了地下水运动的良好通道和储存空间。

由图3可知,在区内发生的58起岩溶塌陷中,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,占总塌陷点数的50%;3起发生在距东郭断裂1 km以外2 km以内范围,占总塌陷点数的5.2%;26起发生在距主要断裂2 km以外地区,占总塌陷点数的

44.8%,这类岩溶塌陷点多沿河道及高铁周边分布;其它非构造发育区,岩溶裂隙不发育,没有岩溶塌陷发育的基本条件,基本没有产生岩溶塌陷。

4 影响因素和诱发因素分析

4.1 水动力条件

根据区内多年降雨量监测资料,选取荆泉水源地内孔隙水、岩溶水水位长期监测资料,做出多年地下水水位动态图(图6)。

4.1.1 孔隙水

孔隙水与岩溶水水力联系越强,越有利于岩溶塌陷的产生。由图6可知,2014年初开始,区内降雨普遍偏少,2015年及2016年枯水期之后,区内降雨明显增加。由图7可知,岩溶塌陷多发区第四系覆盖厚度大多在15 m以浅,且含有砂层,而枯水期岩溶水水位

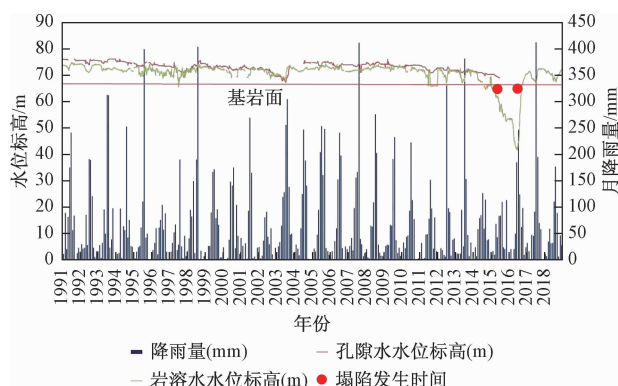


图6 荆泉断块地下水水位动态图

Fig. 6 Dynamic groundwater level of Jingquan fault block

远远低于基岩顶板,当夏季强降雨过后,大气降水迅速入渗补给孔隙水,松散土层快速饱和,后又迅速下渗补给岩溶水,在此过程中,孔隙水携带大量的砂土颗粒进入岩溶管道,“土洞”逐渐形成,当上覆土层不足以支撑自重时,就会在地表形成岩溶塌陷。

2015 年及 2016 年的 9 月—10 月,区内共产生 5 起岩溶塌陷,占总塌陷点数的 8.6%,相对增强的水力联系,是这一时期岩溶塌陷产生的一大影响因素。

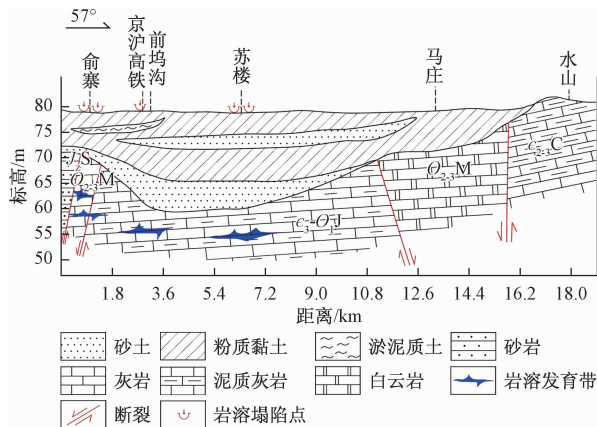


图7 荆泉断块岩溶塌陷地质剖面图

Fig. 7 Geological profile of karst collapse in Jingquan fault block

4.1.2 岩溶水

岩溶水位波动对岩溶塌陷的影响主要表现在改变基岩面附近岩溶水管道中水气压力的变化速度及变化幅度。

由图 6 可知,从 2014 年年初开始,到 2016 年枯水期结束,为区内相对枯水时段,这一时期区内降水量明显低于多年平均降水量,从而导致在 2016 年枯水期达到历史最低水位。且岩溶塌陷出现的时间集中分布于岩溶水水位在基岩面附近波动时期,也就是水位标高

在 68 m 左右。

相对以往多年平均地下水水位埋深来说,2015 年 5、6 月份地下水水位平均埋深分别下降 8.31 m、10.74 m,水位波动分别为 1.20 m、4.04 m,发生岩溶塌陷 34 起,占总塌陷点数的 58.6%;2016 年 5、6 月份地下水水位平均埋深分别下降 26.98 m、26.49 m,水位波动分别为 1.12 m、1.56 m,发生岩溶塌陷 5 起,占总塌陷点数的 8.6%;2017 年 5、6 月份地下水水位平均埋深分别下降 1.38 m、1.11 m,水位波动分别为 0.49 m、0.78 m,发生岩溶塌陷 8 起,占总塌陷点数的 13.8%;2018 年 5、6 月份地下水水位平均埋深分别下降 -0.8 m、-0.11 m,水位波动分别为 0.60 m、2.44 m,发生岩溶塌陷 8 起,占总塌陷点数的 13.8%。由此可以看出,岩溶水水位波动大的时段易产生岩溶塌陷,主要原因为:地下水水位波动明显,岩溶水空腔中产生负压,且这一时期,区内灌溉活动频繁,第四系中含有较多的灌溉回渗水量,负压出现后,会加剧灌溉回渗水的渗流作用,从而导致土体破坏,诱发岩溶塌陷。

4.1.3 地表水

区内河流基本为季节性河流,只有在雨季下大雨后河道才会有水,且河道部分基岩裸露,下伏基岩岩溶发育,大气降水沿河床溶孔溶隙下渗迅速补给地下水,造成地下岩溶水位的快速抬升,大大加速岩溶水的流动,岩溶管道内压力快速变化,产生压力差,从而诱发岩溶塌陷。

4.2 人类活动

一个地区岩溶塌陷的形成除受自然因素(地质、水文和气象)影响以外,还受人类活动(地下水开采、地面载荷)的影响,而人类活动的影响是至关重要的^[18]。

4.2.1 水源地开采

自 20 世纪 70、80 年代以来在泉水出露的排泄区建立了供应滕州市工业与生活用水的集中供水水源地,大量抽取地下水,造成泉水逐年减少,地下水位持续下降。该水源地允许开采量为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,目前实际开采量约 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,超过允许开采量约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。近几年来降水偏少,地表水干涸,农业开采岩溶水量增大,岩溶水位连续下降。俞寨水厂水位埋深 36.346 m(2016 年 6 月),远低于松散层底板。水源地内大部分地段岩溶水位已低于松散岩底板。地下水的大量开采,改变了原始地下水动力条件,加大了地下水流速,加快了地下水三水转化速率,易于诱发岩溶

塌陷。

4.2.2 灌溉

据表1可知,岩溶塌陷发生时间多集中分布于每年的5~6月份,占总塌陷点数的86.2%。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。

4.2.3 地表载荷

2011年6月京沪高速铁路通车之前,区内未记载发生过岩溶塌陷,之后,随着京沪高速铁路车辆密度的逐渐增加,对区内的影响也逐渐显现出来。由图2可知,在京沪高速铁路附近分布有S03、S05、S09及S11等岩溶塌陷点。列车在行驶过程中,不但会产生振动,振动波还会改变上覆土层的密实程度,当土洞顶板承载力不满足要求时,就会在地面形成塌陷坑,产生岩溶塌陷。

5 结论

通过对荆泉断块岩溶水系统基础地质条件、地下水动态监测及水文地质钻探等资料的分析研究,得出以下结论:

(1)岩溶塌陷的产生综合受覆盖层、地质构造及岩溶发育等基础地质条件的影响。厚度15 m以内且含有砂层的上覆土层区最容易产生岩溶塌陷;岩溶塌陷主要分布在强岩溶发育带中;断层两侧1 000 m内为岩溶塌陷高发区。

(2)当岩溶水水位在基岩面附近波动的时候(水位标高为68 m)最容易产生岩溶塌陷,可将68 m水位标高划定为岩溶塌陷制约下的开采水位红线。

(3)人类活动对岩溶塌陷的影响主要表现在岩溶水的大量开采、土地灌溉及地表工程的修建,其中,岩溶水的大量开采已成为诱发岩溶塌陷的主要因素之一。当水位埋深下降介于8~27 m、月水位变幅达1~5 m时,最容易诱发岩溶塌陷。

(4)合理规划开采区内岩溶水,做到工业用水、灌溉用水的水源置换,做好地表大型工程的勘查规划等是降低岩溶塌陷发生概率的主要手段。

参考文献:

- [1] 中国地质调查局. 全球岩溶分布图(1:10 000 000)[R]. 自然资源部中国地质调查局, 2019. [China Geological Survey. Global karst distribution map(1:10 000 000)[R]. China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, 2019. (in Chinese)]
- [2] 文冬光, 雷明堂, 曹佳文, 等. 岩溶塌陷调查规范(1:50 000)[R]. 中国地质调查局, 2015. [WEN D G, LEI M T, CAO J W, et al. Standard for investigation of karst collapse(1:50 000)[R]. China Geological Survey, 2015. (in Chinese)]
- [3] 雷明堂. 我国重点地区岩溶塌陷调查取得可喜进展[N]. 地质调查报, 2014-3-10(三版). [LEI M T. Pleasant progress has been made in karst collapse investigation in key areas of China[N]. Geological Survey, 2014-3-10. (in Chinese)]
- [4] 徐军祥, 赵书泉, 康风新. 山东省地质环境问题研究[M]. 北京: 地质出版社, 2010. [XU J X, ZHAO S Q, KANG F X. Study on the geological environment problems in Shandong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese)]
- [5] MESSERKLINGER S. Formation mechanism of large subsidence sinkholes in the Lar Valley in Iran[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2014, 47(3): 237-250.
- [6] PAN Z Y, JIANG X Z, LEI M T, et al. Mechanism of sinkhole formation during groundwater-level recovery in Karst mining area, Dachengqiao, Hunan Province, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(24): 799.
- [7] JIANG X Z, LEI M T, GAO Y L. New Karst sinkhole formation mechanism discovered in a mine dewatering area in Hunan, China[J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(3): 625-635.
- [8] WEI Y Y, SUN S L. Comprehensive critical mechanical model of covered Karst collapse under the effects of positive and negative pressure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(1): 177-190.
- [9] JIANG X Z, LEI M T, GAO Y L. Formation mechanism of large sinkhole collapses in Laibin, Guangxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(24): 823.
- [10] BENSON R C, YUHR L B. Triggering mechanisms for sinkholes[M]//Site Characterization in Karst and Pseudokarst Terraines. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016: 67-74.
- [11] 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 X J, SHEN J. Research progress and prospect of Karst ground collapse in China [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 101 - 111. (in Chinese)]
- [12] 冯克印, 任翠爱, 姚春梅, 等. 地下水数值模拟在岩溶塌陷预警系统中的应用——以山东临沂市城区岩溶塌陷为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 112 - 116. [FENG K Y, REN C A, YAO C M, et al. Application of groundwater numerical simulation in early-warning system construction for Karst collapse—Taking the Karst collapse in Linyi urban areas as an example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 112 - 116. (in Chinese)]
- [13] 姚春梅, 杨全城, 邵景力, 等. 山东临沂市城区岩溶塌陷易损性和期望损失评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 74 - 76. [YAO C M, YANG Q C, SHAO J L, et al. Vulnerability and expectation loss assessment of Karst collapse in Linyi City, Shandong Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2): 74 - 76. (in Chinese)]
- [14] 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. [WANG Y L, CHEN W Q, JIANG X Z, et al. Development features and formation mechanisms of Karst collapses in the Tailai basin, Shandong Province [J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(5): 495 - 506. (in Chinese)]
- [15] 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 Y N. Analysis of Karst collapse development in Tai'an-Jiuxian water source area [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 94 - 100. (in Chinese)]
- [16] 戴建玲, 罗伟权, 吴远斌, 等. 广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 808 - 818. [DAI J L, LUO W Q, WU Y B, et al. Mechanism analysis of sinkholes formation at Jili village, Laibin City, Guangxi, China [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 808 - 818. (in Chinese)]
- [17] 袁道先. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 233 - 234. [YUAN D X. Karst Environmentology [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 233 - 234. (in Chinese)]
- [18] KROMHOUT, CLINT, BAKER, et al. sinkhole vulnerability mapping: results from a pilot study in north central Florida[M]. 14th Sinkhole Conference, 2015: 241 - 254.

关于为《中国地质灾害与防治学报》征集照片的启事

为了使本刊论文内容更加形象、生动,便于读者清晰地识别地质灾害的各种地质作用及现象,反映治理措施及治后效果,我刊每期另附彩版照片。凡为彩版或封面提供照片者,每版应附 100 ~ 500 字说明,每张照片也应有相应说明。为保证出版效果,请提供原照片;若用数码相机拍摄,请采用 200 万像素以上的模式拍照。照片的分辨率应在 1 600 × 1 200 dpi 以上(Fine 或 High 模式);如照片文件为扫描版,请采用 600 dpi 以上的设置扫描。如用电子邮件发送,请提供照片的原电子文档 JPG 格式(勿自行用 Photoshop 或 ACDsee 等软件处理),以保证照片的清晰度。另请提供 1 份 Word 文档,但其仅供排版时参考,不能作为印刷、排版的原始稿件。提供的照片采用刊登后,付稿酬。欢迎各地、各界同仁踊跃选送各种典型照片(含国外照片)。

感谢您的支持与合作!

本刊网址: www.zgdzzhyfzxb.com

电子信箱: nitx@cigem.cn

《中国地质灾害与防治学报》编辑部