

DOI: 10. 16031/j. cnki. issn. 1003-8035. 2019. 06. 09

# 湖北武汉岩溶塌陷时空分布规律及其影响因素分析

涂 婧<sup>1</sup>, 魏瑞均<sup>2</sup>, 杨戈欣<sup>1</sup>, 刘长宪<sup>1</sup>, 金小刚<sup>3</sup>, 李海涛<sup>4</sup>

(1. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430051; 2. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610000;  
3. 北京数码视讯科技股份有限公司, 北京 100085; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:** 近年来, 武汉市岩溶塌陷地质灾害频发, 给人民的生命财产安全造成了一定的损失, 影响和制约了武汉市经济社会的发展。本文在武汉市以往岩溶塌陷事件调查及勘察资料的基础上, 分别从时间和空间上总结了武汉市岩溶塌陷的分布规律。在空间上, 武汉市岩溶塌陷主要分布于位于中心城区的长江一级阶地; 在时间上, 武汉市岩溶塌陷时间多发生于 2005 年之后, 且多发生在 4~9 月份。另外从自然因素和人为因素两个大的方面, 系统分析了武汉市岩溶塌陷的影响因素, 包括岩溶发育条件、上覆第四系土层结构、长江水位波动、降雨等自然因素和地下水开采、人类工程活动等人为因素。本文旨在为制定科学的、合理的岩溶塌陷地质灾害防治对策提供基础技术支持。

**关键词:** 武汉市; 岩溶塌陷; 分布规律; 影响因素

中图分类号: P694; P642. 25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)06-0068-06

## Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of karst collapse and its influence factors in Wuhan City of Hubei Province

TU Jing<sup>1</sup>, WEI Ruijun<sup>2</sup>, YANG Gexin<sup>1</sup>, LIU Changxian<sup>1</sup>, JIN Xiaogang<sup>3</sup>, LI Haitao<sup>4</sup>

(1. Geological Environment Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430051, China; 2. Hua-Di Construction Engineering Co., Ltd. in Sichuan, Chengdu, Sichuan 610000, China; 3. Beijing Sumavision Inc., Beijing 100085, China; 4. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In recent years, the frequent occurrence of karst collapse geological disasters in Wuhan has caused the loss of life and property, which affected the development of Wuhan economy and society. In this paper, based on from two aspects of natural factors and human factors, this paper systematically analyzes the influencing factors of karst collapse in Wuhan, including natural factors such as karst development conditions, quaternary soil structure, fluctuation of water level in the Yangtze river, rainfall, and human factors such as groundwater exploitation and engineering activities. This paper aims to provide basic technical support for prevention and control of karst collapse geological disasters.

**Keywords:** Wuhan City; karst collapse; distribution characteristics; influence factors

### 0 引言

武汉市岩溶地质条件十分复杂, 给工程建设特别是地下工程建设带来隐患与威胁, 严重的影响和制约

着武汉市的城市规划和建设。近年来, 随着人类经济工程活动加剧, 岩溶塌陷与人类工程经济活动的联系越发密切, 岩溶塌陷地质灾害时有发生, 因工程施工引发的岩溶塌陷显得尤为突出。岩溶塌陷的危害不仅造

收稿日期: 2019-01-15; 修订日期: 2019-04-02

基金项目: 中国地质调查局矿评项目(1212011220189)

第一作者: 涂 婧(1987-), 女, 湖北黄石人, 工程师, 硕士, 主要从事水工环方面的研究工作。E-mail: 445216579@qq.com

通讯作者: 李海涛(1979-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水工环方面的研究工作。E-mail: liht@mail.cigem.govcigem.cn

成人员伤亡、财产损失,城市建设、工程建设及公共设施遭致破坏,还使地质环境和生态平衡遭致破坏。

早在1994年,贾淑霞等<sup>[1]</sup>就对武汉市岩溶塌陷的成因机理进行了初步的分析研究,但是研究塌陷种类较为单一,且不详;2004年郑先昌等<sup>[2]</sup>、2006年范士凯<sup>[3]</sup>对武汉市岩溶塌陷分布特征、诱发因素和成因机理进行了研究,但是研究范围小,塌陷数量及类型不够全面。2013年,杨涛等<sup>[4]</sup>对武汉市岩溶塌陷进行了分类研究,其根据成因及主要诱发因素将塌陷划分为自然塌陷和人为塌陷,其中人为塌陷又划分为抽水、载荷、振动和渗水四种。本文以“武汉市岩溶塌陷调查”项目为依托,在收集以往武汉市发生的各类岩溶塌陷案例的相关资料<sup>[5-6]</sup>和2012—2015年度开展的“武汉市岩溶塌陷调查<sup>[7]</sup>”项目的基础上,总结了武汉市岩溶塌陷地质灾害在空间分布和时间序列表现出的各种特征,并分析了岩溶塌陷的影响因素,为武汉市岩溶塌陷地质灾害防治提供技术支撑和借鉴。

## 1 武汉岩溶区地质概况

### 1.1 岩溶分布与可溶岩地层

武汉市位于我国中部,地处江汉平原东部、长江和汉江交汇处,为长江中游特大城市。武汉市内的岩溶地质条件十分复杂。区内隐伏可溶岩总体呈近东西向条带状分布,局部地区由于受构造影响岩溶条带发生折曲,条带宽度一般为0.8~6.8 km,最宽可达12 km,隐伏可溶岩分布总面积约1 091.51 km<sup>2</sup>,占武汉市总面积的12.85%<sup>[7]</sup>。受构造和地形控制,隐伏可溶岩主要位于向斜核部,少数位于向斜翼部,可溶岩地层主要为三叠系中下统嘉陵江组( $T_{1-2j}$ )白云质灰岩、灰岩夹白云岩和下统大冶组( $T_{1d}$ )灰岩,二叠系中统栖霞组( $P_{2q}$ )燧石结核灰岩,石炭系上统黄龙组-大埔组( $C_{2h-C_{2d}}$ )白云岩、灰岩。

### 1.2 岩溶区第四系土层特征

针对第四系土层结构对岩溶塌陷的影响大小,并根据第四系岩性特征,将第四系土层结构划分为单层结构、双层结构和多层结构三种类型<sup>[7]</sup>。

武汉市单层结构土层岩性以较单一的黏性土层为主,一般为粉质黏土、黏土,局部夹有淤泥质黏土,底部无砂层,为相对隔水层。双层结构土层主要为“上黏下砂”的双层结构,其上部主要为粉质黏土、黏土;下部主要为粉砂、细砂和砾砂。多层结构土层包括具“黏性土—砂土—碎石土或黏性土”的三层结构和具“黏性土—砂土—黏性土—砂砾石层等”多个旋回沉

积的多层结构。

第四系松散沉积物是塌陷体的主要组成部分。在地下水的侧向渗透力及垂直渗透力的作用下,土体颗粒易产生侧向潜蚀及垂直潜蚀流失,形成土洞,进而发展成为塌陷。含砂粒越多、黏粒越少的土体,内聚力越小,在地下水的作用下越易造成扰动和流失,从而越易形成塌陷<sup>[8]</sup>。双层结构土体覆盖的岩溶区,粉细砂直接覆盖于碳酸盐岩之上,全新统孔隙承压水含水层与碳酸盐岩岩溶水含水层直接接触,地下水呈互补关系,更易造成砂土的流失,更易形成塌陷<sup>[9]</sup>。因此,不同结构土体覆盖的岩溶区发生岩溶塌陷的概率为:土体结构双层结构>多层结构土体>单层结构土体。

### 1.3 岩溶区水文地质条件

武汉市岩溶区内的地下水类型主要包括松散岩类孔隙水和碳酸盐岩裂隙岩溶水。松散岩类孔隙水包括全新统孔隙潜水和全新统孔隙承压水。

全新统孔隙潜水主要分布在江滩、江心洲及冲沟、湖泊周边等地表低洼处。全新统孔隙承压水主要分布于长江、汉江沿岸,长江汉江切穿至孔隙承压水含水岩组,江水与孔隙承压水直接贯通,两者呈互补关系。阶地前缘汛期时地下水位高于阶地中后部,且随长江水位上涨而抬升,离长江近者,地下水位升幅大,反之则小。

碳酸盐岩裂隙岩溶水主要赋存于碳酸盐岩溶蚀裂隙及溶洞中,岩溶发育不均衡,一般不受大气降雨及地表水影响,裂隙岩溶水水位不随长江水位上升和下降而上下波动,与长江等地表水没有直接互补关系。在长江、汉江一级阶地的局部地区,全新统孔隙承压水含水岩组,直接覆盖于碳酸盐岩裂隙岩溶水含水岩组之上,裂隙岩溶水与全新统孔隙承压水呈互补关系。大部分地区二者之间存在较薄的含碎石黏土相对隔水层,致使岩溶水与全新统孔隙承压水水力联系变弱。

## 2 武汉岩溶塌陷概况

根据记录统计,武汉市先后发生过33处(38次)岩溶塌陷(少数塌陷同一地点发生两次或多次),塌陷坑96个(表1)。

武汉市塌陷除极少数时间较早的塌陷为自然因素引起外,其余均为人为因素引起的塌陷。塌陷集中于中心城区的一级阶地,近几年来随着武汉市城区范围的不断扩大以及远城区城镇化的推进,岩溶塌陷也向远郊新城扩散。此外,岩溶塌陷地段的岩溶地质特征也不再局限于“位于长江沿岸,上覆土层为“上黏下

砂”的双层结构的覆盖型岩溶”。在上覆第四系中更新统( $Q_2w$ ) 单层黏土的覆盖型岩溶区, 以及上覆红砂岩较薄的埋藏型岩溶区内, 强烈的人类工程活动也可能诱发塌陷。

表 1 武汉市岩溶塌陷事件一览表<sup>[5-7]</sup>

Table1 Events of karst collapse in Wuhan City

序号	发生时间	位置	塌陷类型	序号	发生时间	位置	塌陷类型
1	1931. 8	武昌区丁公庙	自然	20	2009. 11. 24	洪山区白沙洲大道张家湾段	人为
2	1977. 9	汉阳区汉阳中南轧钢厂	人为	21	2009. 12. 22	洪山区烽火村钢材市场	人为
3	1983. 7	武昌区白沙洲阮家巷	自然	22	2010. 01. 28	洪山区青菱乡光霞村五组	人为
4	1988. 5	武昌区陆家街	自然	23	2010. 4. 18	青菱乡烽火村白沙洲大道	人为
5	1994. 06. 03	江夏区金口街金水一村	自然	24	2010. 7. 19	青菱乡张家湾南湖变电站	人为
6	1999. 4. 22	洪山区青菱乡毛坦港小学	自然	25	2011. 05	武昌南湖红旗村	人为
7	2000. 2. 22	武昌区涂家沟市司法学校	自然	26	2011. 12. 12	武昌区民政学校	人为
8	1997	洪山区青菱乡烽火村乔木湾	人为	27	2012. 11. 02	江夏区金水农场金水办事处农科所菜地	人为
9	2000. 3	洪山区青菱乡烽火村乔木湾	人为	28	2013. 4. 14	洪山区青菱乡毛坦港佳兆业·金域天下三期	人为
10	2000. 4. 6	洪山区青菱乡烽火村乔木湾	人为	29	2013. 12. 26	汉阳拦江路锦绣长江三期工地	人为
11	2001. 5. 30	乌龙泉街京广铁路侧	人为	30	2014. 5. 2	江夏区大桥新区鹏湖湾二期工地	人为
12	2005. 8. 10	洪山区青菱乡烽火村 江南竹木大市场	自然	31	2014. 6. 4 ~ 2014. 6. 26	洪山区烽火村在建项目 H10、H11 地块	人为
13	2005. 8. 22	武昌区白沙洲阮家巷	人为	32	2014. 09. 05	江夏区法泗街长虹村、八塘村	人为
14	2006. 4	武昌区白沙洲长江紫都花园	人为	33	2015. 8. 10	汉阳区鹦鹉大道乐福园酒楼锦绣长江店北	人为
15	2008. 02. 29	汉南区纱帽街陡埠村	人为	34	2015. 8. 7	汉阳区鹦鹉大道地铁 6 号线 K12 + 583	人为
16	2009. 6. 10	武昌区武泰闸	人为	35	2016. 2. 25	武汉东方明洋混凝土有限公司厂区	人为
17	2009. 12. 16	武昌区武泰闸	人为	36	2017. 5. 23	洪山区烽胜路保利·新武昌段	人为
18	2009. 6. 17	洪山区烽火村	人为	37	2018. 3. 16	江夏区实验高级中学校园内	人为
19	2009. 6. 27	洪山区烽火村	人为	38	2018. 11. 3	江夏区纸坊街一人行道路	自然

### 3 岩溶塌陷时空分布规律

#### 3.1 岩溶塌陷空间分布规律

在空间分布上, 武汉市岩溶塌陷主要发生在于长

江一级阶地<sup>[7]</sup>(图 1)。

根据岩溶埋藏类型, 武汉市岩溶塌陷多发生于覆盖型岩溶区或覆盖型和埋藏型岩溶交界处, 如烽火村钢材市场、乔木湾等地的岩溶塌陷。

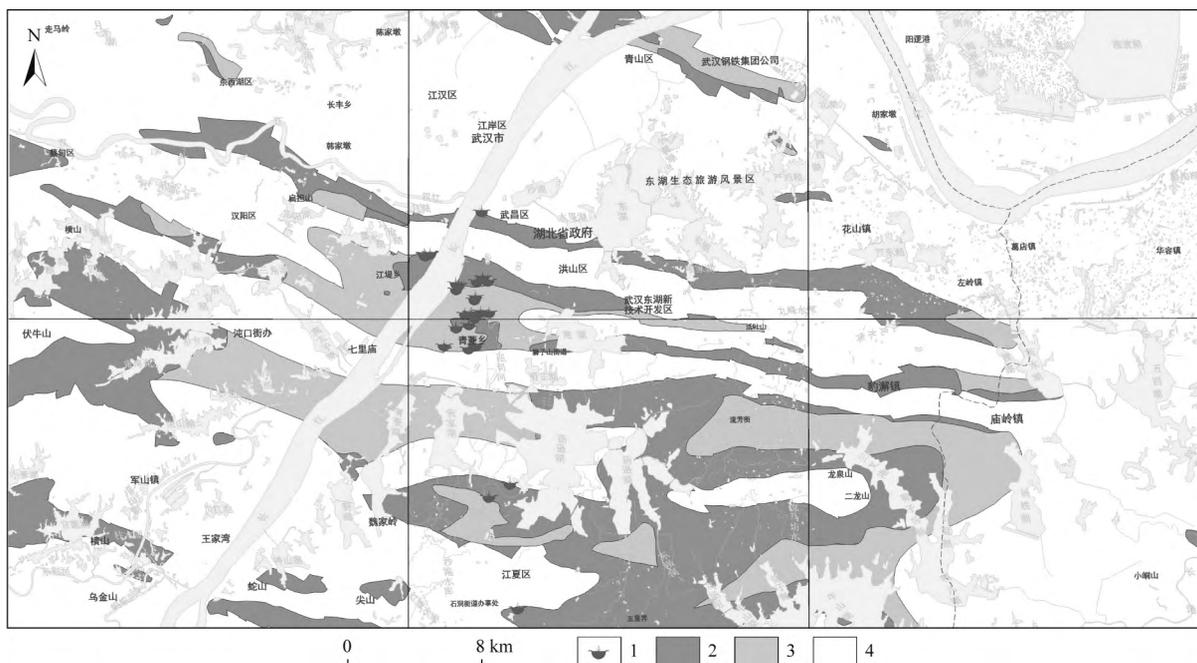


图 1 武汉市主要城区岩溶塌陷分布图

Fig. 1 Distribution of karst collapse in Wuhan City

1—岩溶塌陷点; 2—覆盖型岩溶区; 3—埋藏型岩溶区; 4—非可溶岩分区。

### 3.2 岩溶塌陷时间分布规律

图 2 为武汉市岩溶塌陷自有详细记录以来,在各年份的岩溶塌陷数量统计柱状图。

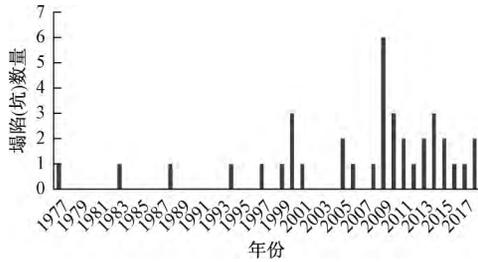


图 2 武汉市岩溶塌陷统计柱状图

Fig.2 Statistical histogram of Karst collapse in Wuhan City

从图 2 中可以看出,武汉市岩溶塌陷主要发生于 2005 年以后,近年来呈高发态势,发生频率越来越高,间隔越来越短。从 2009 年至 2016 年,每年均有岩溶塌陷事件发生,2009 年高达 6 次,2010 年至 2015 年每年均发生 2 次以上。

图 3 为根据武汉市多年岩溶塌陷事件统计出来的岩溶塌陷与年内月份之间的关系。一般来说,岩溶塌陷多发生在 4~9 月份,主要是由于武汉市降雨多集中于 4~9 月份。11、12 月份发生塌陷数量也较多,主要是由于人类活动的影响。

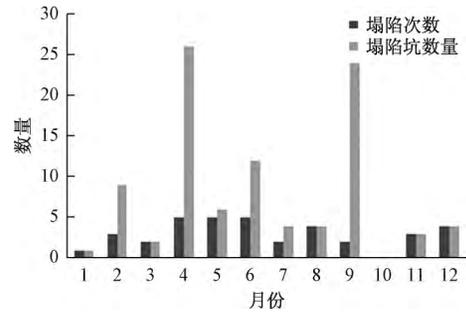


图 3 岩溶塌陷与年内月份关系图

Fig.3 Relationship between Karst collapse and months in a year

### 4 岩溶塌陷影响因素

从表 1 中可以看出,在 2000 年以前,武汉市绝大部分岩溶塌陷诱发因素为自然因素,而 2000 年以后,绝大部分诱发因素为人为因素。这与整个武汉市城市规划和城市化进程的速度是基本相符的。2000 年以前,人工工程活动较少,城市化进程较慢,岩溶塌陷多以自然因素诱发,如降雨、长江水位的波动等;2000 年以后,武汉市城市化进程加快,人工工程活动加剧,岩溶塌陷多以人为因素诱发,如钻探、桩基施工等。

下面从自然因素和人为因素两个方面分析影响岩

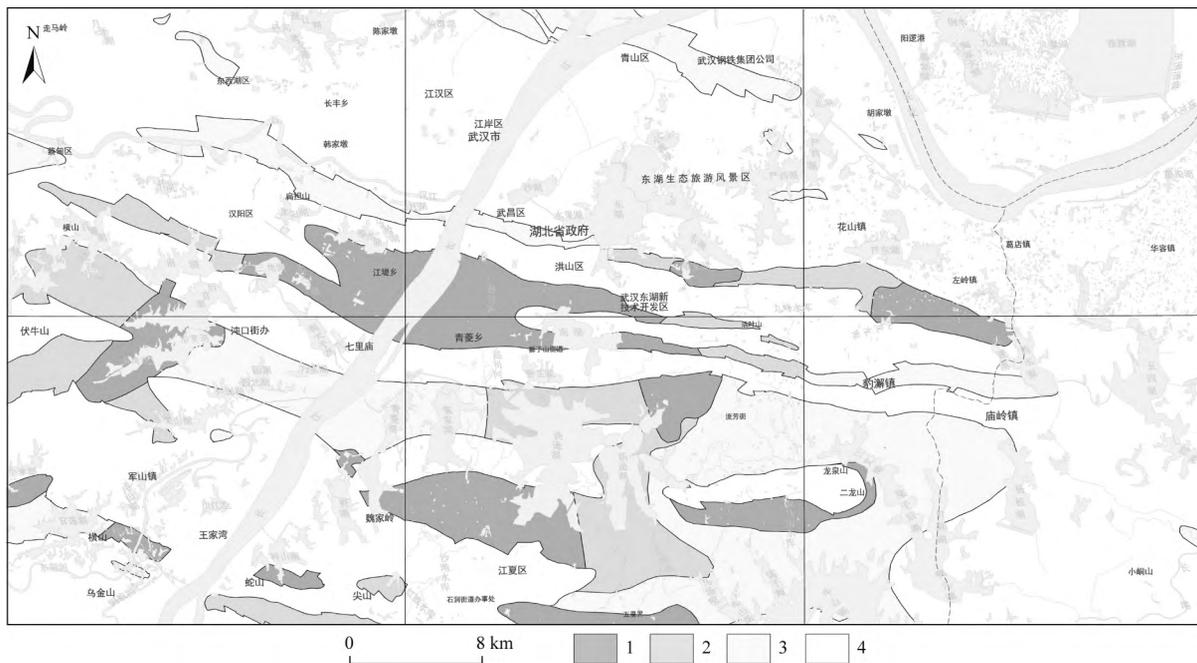


图 4 武汉市主要城区岩溶发育程度分区图

Fig.4 Degree of Karst development in Wuhan City

1—岩溶强发育区;2—岩溶中等发育区;3—岩溶弱发育区;4—非可溶岩区调查区。

溶塌陷的主要因素。

### 4.1 自然因素

#### 4.1.1 岩溶发育条件

岩溶塌陷与岩溶的发育程度有密切关系,从图 1 和图 4 中可以看出,绝大部分岩溶塌陷事件发生在岩溶强发育区,位于长江一级阶地。影响岩溶发育的因素较多,如构造、地层岩性、可溶岩与非可溶岩接触关

系等<sup>[9]</sup>。

#### 4.1.2 上覆第四系土层

图 5 为武汉市第四系土层结构及等厚度图。武汉市岩溶塌陷多发生在具有双层结构和多层结构特征的上覆土层分布区。对于单层结构,一般为地层岩性较单一的黏性土层,稳定性相对较强,发生岩溶塌陷的概率较小。

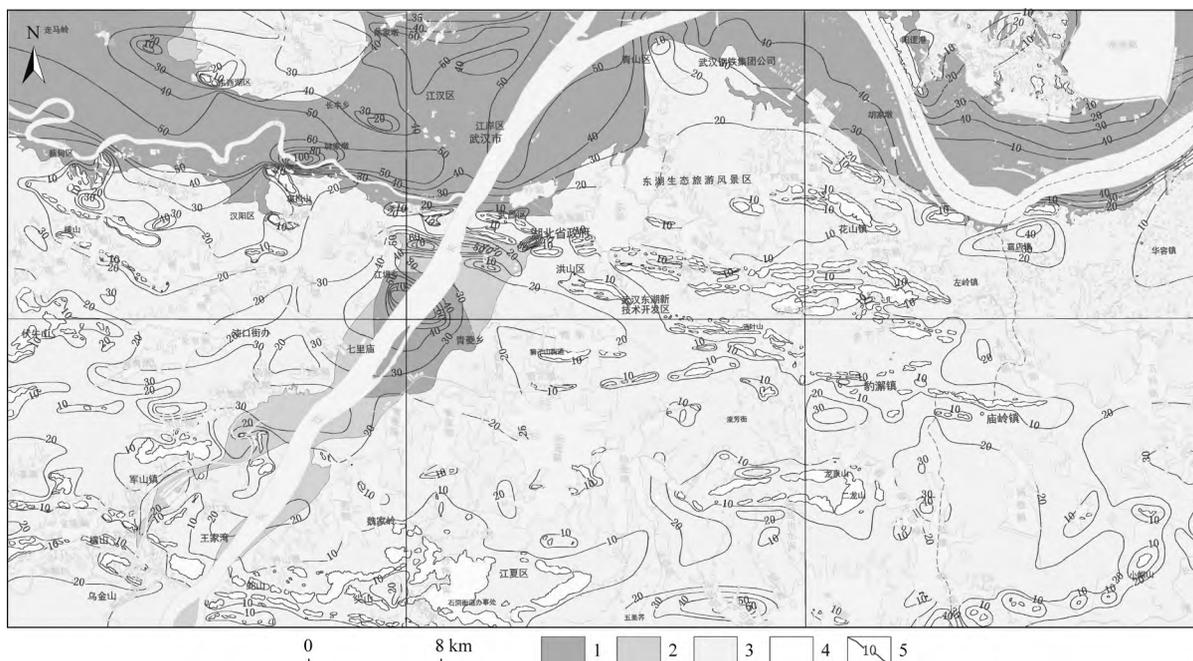


图 5 武汉市主要城区第四系土层结构及等厚度图

Fig. 5 The Structure and contour map of Quaternary soil layer in Wuhan City

1—多层结构土层分区;2—双层结构土层分区;3—单层粘土分区;4—基岩出露区;5—第四系等厚线。

根据统计,武汉市有 28 处岩溶塌陷发生于具有双层结构和多层结构特征的上覆土层分布区。另外,有 5 处岩溶塌陷发生于具有单层结构特征的上覆土层分布区,说明单层黏土结构的土层也不是绝对的稳定。

#### 4.1.3 长江水位波动

在图 1 中,岩溶塌陷事件大多发生在长江一级阶地上。根据武汉市的水文地质调查及勘察资料,长江切穿至第四系孔隙承压水含水层,江水与第四系孔隙承压水直接贯通。当长江水位发生波动时,特别是在丰水期或洪水季节(一般在 6~8 月份),长江一级阶地范围内地下水位会随着长江水位的波动而发生异常变化,导致地下水水头差增大。在水头压力作用下,第四系孔隙承压水向岩溶裂隙通道渗流。在渗流潜蚀作用下,土层中易形成空洞,随着时间推移,土洞不断扩展,直至洞体支撑力小于上覆荷载时,上部土层在自重作用下不断失稳垮落,产生地面变形直至塌陷。如

1983 年武昌区阮家巷、1988 年武昌区陆家街、1999 年洪山区青菱乡毛坦港小学等岩溶塌陷均是由于地下水波动潜蚀作用引发的。

长江水位波动引起的地下水位异常波动属于自然因素导致的,在后面章节中还会分析由于人为因素导致的地下水位异常波动。

#### 4.1.4 降雨

降雨可使上覆土体饱水,自重增大,从而加大致塌力,土质软化,物理力学强度降低,当洞体支撑力(抗塌力)小于上覆荷载(土体压力及外荷载)时,产生地面变形直至地面塌陷。如 2000 年武昌区涂家沟市司法学校岩溶塌陷,主要是由于持续降雨诱发的自然塌陷。

从历年来武汉市气象水文资料统计分析可见 4~9 月为降水丰沛期,其中 5~7 月多暴雨。考虑降雨入渗的滞后效应,武汉市岩溶塌陷发生的月份与降雨强度的月份基本吻合(图 6)。

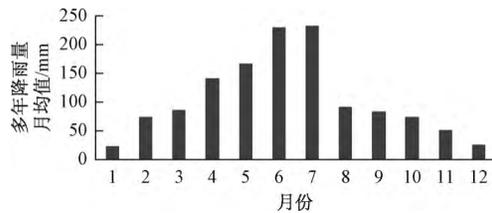


图6 多年月平均降水量变化直方图(2009—2018年)

Fig. 6 Histogram of monthly averaged precipitation (2009—2018)

## 4.2 人为因素

影响武汉市岩溶塌陷的人为因素大致可分为两类:开采地下水与人类工程活动。

### 4.2.1 开采地下水

武汉市的地表水资源很丰富,地下水开采量较少。只是在早期,由于地下水开采,发生过个别岩溶塌陷事件,如1977年发生在汉阳区汉阳中南轧钢厂的岩溶塌陷事件。后期,武汉市政府高度重视岩溶塌陷的防治,加大了地下水开采监控力度,并禁止在隐伏岩溶区开采利用地下水后,此类岩溶塌陷未发生过。

### 4.2.2 人类工程活动

人类工程活动造成的岩溶塌陷事件大致可以分为以下几类:

(1) 桩基施工时(如大口径冲击成孔灌注桩),产生了剧烈的震动,使岩土体中产生破裂位移、压密下沉、振动液化等破坏效应,破坏了土体结构,扩大或形成了土洞,进而形成塌陷,例如2005年8月白沙洲阮家巷岩溶塌陷。

(2) 桩基、钻孔施工时,在成孔过程中揭穿厚薄不均的下部黏性土层、粉细砂层和溶洞或者岩溶裂隙带,导致地下水发生异常波动。在水位差和潜蚀作用下,掏空覆盖层,形成土洞,加上冲击振动的作用,最终形成塌陷,例如洪山区青菱乡光霞村五组岩溶塌陷。

在本节中,虽然将岩溶塌陷的影响因素分别进行了单独的论述,但是,在岩溶塌陷事件实际发生过程中,大部分为多种影响因素共同作用的结果。

## 5 岩溶塌陷防治对策建议

针对上覆土体含砂层的岩溶区,即极易发生岩溶塌陷的区域内,开展工程建设时可采取以下防治措施<sup>[9]</sup>:在粉细砂层中灌注水泥浆,增大粉细砂的凝聚力,避免砂粒流动;在灰岩面上方的粉细砂层中设置厚度不小于3m的水泥土垫层,阻止粉细砂向灰岩中流失;在灰岩面以下5m范围内的灰岩中灌浆,用以堵塞

灰岩中粉细砂的流失通道。当粉细砂层厚度不大时,可考虑予以挖除。在该区进行钻探施工时,首先要防止钻探过程中的岩溶塌陷,一般跟管钻进至基岩中2~3m可有效防止粉细砂随着钻进而漏失。其次是在钻探施工结束后要及时按照“以土还土、以砂还砂、以砾还岩”的原则进行封孔。

针对上覆单层结构土体的岩溶区,尤其是底部土体为红黏土的岩溶区,土/岩界面处地下水位升降频繁,可能形成土洞,地下水位急剧下降,形成真空吸蚀而导致地面塌陷。因此,该区应限量或严禁开采地下水;该区进行工程施工时应注意土洞存在的可能性,必要时可采用填灌土洞或钻、挖孔灌注桩穿过土洞等工程措施进行处理。

## 6 结论

本文根据武汉市岩溶塌陷事件进行统计分析,总结了武汉市岩溶塌陷的时空分布规律。在空间上,武汉市岩溶塌陷主要分布于位于中心城区的长江一级阶地;在时间上,武汉市岩溶塌陷时间多发生于2005年之后,在年内,岩溶塌陷事件多发生在4~9月份。在掌握岩溶塌陷时空分布规律的基础上,从自然因素和人为因素两个大的方面,系统分析了武汉市岩溶塌陷的影响因素,包括岩溶发育条件、上覆第四系土层结构、长江水位波动、降雨等自然因素和地下水开采、人类工程活动等人为因素。岩溶塌陷是一个复杂的过程,大部分岩溶塌陷是自然影响因素和人为影响因素共同作用的结果。

总之,随着武汉市城市经济社会的发展,工程建设活动的不断加剧,岩溶塌陷事件发生的频率有逐年增高的趋势。只有在充分掌握武汉市岩溶塌陷发生的时空规律及影响因素,才能制定出科学的、合理的岩溶塌陷地质灾害防治对策,本文以期制定武汉市岩溶塌陷防治对策提供基础技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 贾淑霞,马霄汉. 武汉市岩溶地面塌陷成因机理与预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(增刊): 103-108.
- JIA Shuxia, MA Xiaohan. Genetic mechanism and forecast for karst surface collapse in Wuhan Urban area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5(S): 103-108.

(下转第93页)

- 质量的影响:以云南小江流域为例[D].重庆:西南师范大学,2005.
- JIANG Yongjun. Land use change and its effects on soil quality in a typical karst watershed: A case study in Xiaojiang watershed of Yunnan Province, [D]. Chongqing: Southwest University, 2005.
- [14] 王正祥. 岩溶地区土地利用变化对生态服务功能的影响分析——以重庆南川区为例[D].重庆:西南大学硕士学位论文,2011.
- WANG Zhengxiang. Analysis on impact of land use change on ecosystem service in karst area [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [15] 刘耀林,刘艳芳,夏早发. 模糊综合评判在土地适宜性评价中应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,1995,20(1):71-75.
- LIU Yaolin, LIU Yanfang, XIA Zaofa. Land suitability evaluation based on fuzzy comprehensive judgement [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995, 20(1): 71-75.
- [16] 方大春,刘国林,王芳,等. 基于GIS的土地适宜性评价模型研究[J]. 测绘与空间地理信息,2004,27(1):35-36.
- FANG Dachun, LIU Guolin, WANG Fang, et al. The research on the GIS-based land suitability evaluation model(LSEM) [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004, 27(1): 35-36.
- [17] 江思义,吴福,刘庆超,等. 广西桂林市规划中心城区岩溶发育特征及分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(3):120-128.
- JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, et al. Karst development characteristics and distribution in Guilin urban planning center of Guangxi Zhuang Autonomas Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 120-128.
- [18] 吴福,江思义,刘庆超,等. 广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):83-91.
- WU Fu, JIANG Siyi, LIU Qingchao, et al. Evaluation of susceptibility of karst collapse in urban planning area of Guilin City of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 83-91.
- [19] 江思义,吴福,王启耀,等. 岩溶地区地下空间开发适宜性评价:以桂林市规划中心城区为例[J]. 桂林理工大学学报,2019,39(2):402-409.
- JIANG Siyi, WU Fu, WANG Qiyao, et al. Suitability evaluation of underground space development in karst area: an example from Guilin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(2): 402-409.

## (上接第73页)

- [2] 郑先昌,卫中营. 武汉市岩溶地面塌陷诱发因素分析[J]. 城市勘测, 2004, (1): 15-22.
- ZHENG Xianchang, WEI Zhongying. Analysis of inducing factors of karst surface collapse in Wuhan [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2004, (1): 15-22.
- [3] 范士凯. 武汉(湖北)地区岩溶地面塌陷[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(增刊): 608-616.
- FAN Shikai. Karst ground collapse in Wuhan (Hubei) [J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(S): 608-616.
- [4] 杨涛,涂婧,殷美,等. 武汉市岩溶塌陷分类及防治对策[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(5): 661-664.
- YANG Tao, TU JING, YIN Mei, et al. The classification of karst collapse in Wuhan and its control measures [J]. Resources Environment & Engineering, 2013, 27(5): 661-664.
- [5] 湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查(H50E011001、H50E012001)项目成果报告[R]. 2016.
- Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse investigation in Wuhan (H50E011001、H50E012001) [R]. 2016.
- [6] 湖北省地质环境总站. 湖北江夏地区(土地堂幅)岩溶塌陷1:5万环境地质调查报告[R]. 2017.
- Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse 1: 50 000 scale environmental geology investigation in Jiangxia District of Hubei Province (Tu Ditang Map) [R]. 2017.
- [7] 中国地质环境监测院,湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查项目成果报告[R]. 2016.
- China Geological Environmental Monitoring Institute, Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse investigation in Wuhan [R]. 2016.
- [8] 余泰敏,喻理传. 武汉地区砂土渗漏一漏失型岩溶地面塌陷致塌模式分析[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(6): 887-891.
- YU Taimin, YU Lichuan. Analysis of collapse-causing model of karst collapse in Wuhan [J]. Resources Environment & Engineering, 2015, 29(6): 887-891.
- [9] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 419-432.
- LUO Xiaojie. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan [J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 419-432.