

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-08

# 广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析

韩庆定, 罗锡宜

(广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000)

**摘要:**以自然诱发的李家村岩溶塌陷群为研究对象,在系统收集区域地质、构造、工程、水文、环境、气象、历史灾害等资料的基础上,结合钻探揭露结果,查明了李家村岩溶塌陷群所在区域地质环境条件和岩溶发育特征,分析了形成过程,并探讨了成因机理。结果表明:(1)李家村岩溶塌陷群所在区域覆盖层为带“天窗”的“隔-透”交替型地质结构、基岩可溶岩砾状灰岩中方解石含量高易溶蚀,为土洞和溶洞形成和发展起到决定性作用;北东向和北西向断裂交叉叠加作用、紧靠西江和存在古河道,为地下水潜蚀强径流和频繁交换提供通道,对岩溶发育起到主导作用;地表水和地下水连通性好有助于降雨诱发岩溶塌陷;(2)李家村岩溶塌陷群的发生过程经过三个阶段:前期水渗气压阶段→中期软化塌陷阶段→后期振动群塌阶段,致塌模式属渗压-重力-软化型。(3)李家村岩溶塌陷群是在特殊的“岩-土-水-气”组合地质环境条件下,由强降雨作用诱发并导致土洞垮塌而引起一连串自然塌陷所形成的。

**关键词:**岩溶塌陷群;岩溶发育特征;成因机理;演化过程;佛山市高明区富湾镇

中图分类号: P642;TU478

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)04-0056-09

## Analysis on the formation mechanism and development process of karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City

HAN Qingding, LUO Xiyi

(Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan, Guangdong 528000, China)

**Abstract:** Taking natural-induced Lijia Village karst collapses as the research object, on the basis of systematically collecting the data of regional geology, tectonic geology, engineering geology, hydrogeology, environment, meteorology, historical disasters, combined with the drilling data, the geological environment conditions and karst development characteristics of Lijia Village karst collapses come to a conclusion, and its formation process is analyzed. Finally, the genetic mechanism is discussed. The results indicate that: (1) The overburden in the area where the Lijia Village karst collapses located is an alternate geological structure with “Skylight” and “Separation”, and the content of calcite in rudstone is high and easy to dissolve, which plays a decisive role in the formation and development of soil caves and karst caves. The intersection and superposition of the NE fault and NW fault, closing to Xijiang River and the existence of ancient river channels, provide a channel for groundwater erosion and strong runoff and frequent exchange, and play a leading role in karst development. Good connectivity between surface water and groundwater directly leads to rain-induced karst collapse. (2) The process of karst collapses in Lijia Village is divided into three stages: water pressure stage in the early stage, softening collapse in the middle stage and vibration group collapse in the later stage. The collapse model is Osmotic Pressure-Gravity-Softening. (3) The karst collapses in Lijia Village is formed by a series of natural collapses induced by heavy rainfall under the special geological environment of “rock soil water gas” combination.

**Keywords:** karst collapses; karst developmental features; formation mechanism; development process; Fuwan Town Gaoming District of Foshan City

收稿日期: 2020-07-19; 修订日期: 2020-09-01

基金项目: 广东省城镇典型岩溶地面塌陷防治研究(201603); 佛山市地质灾害监测预警与应急指挥平台(X20190436)

第一作者: 韩庆定(1987-), 男, 海南文昌人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 693479265@qq.com

## 0 引言

岩溶塌陷是指岩溶洞隙上的岩、土体在自然或人为因素作用下发生变形,并在地面形成塌陷坑(洞)的一种岩溶动力地质作用与现象<sup>[1]</sup>。岩溶塌陷形成需要具备岩溶空间、一定厚度的盖层和触发因素三个基本条件<sup>[2]</sup>。已有研究发现岩溶塌陷具有集中分布趋势<sup>[3-4]</sup>,如南宁市坛洛镇<sup>[5]</sup>、广州市夏茅、金沙洲和大坦沙<sup>[6]</sup>等均出现岩溶塌陷群迹象,因此,岩溶塌陷地质灾害除了具有突发性、隐蔽性等特点<sup>[7]</sup>外还具有群发性,也就是说岩溶塌陷地质灾害一般不会因为发生了就结束了,它将在未来某个时间还会再次发生,常常表现出周期性和重复产生的规律<sup>[1]</sup>,其发生的时间主要与诱发因素作用强度有关,针对岩溶塌陷这一特点需高度重视。

近年来人为诱发的岩溶塌陷群受到大家关注较多<sup>[5-10]</sup>,而自然诱发的岩溶塌陷群相关报道较少,比较著名的是广西玉林分界塌陷群和四川兴文小岩湾塌陷<sup>[1]</sup>。人为诱发的岩溶塌陷群预防相对较为简单且效果显著,只要控制好或切断人为诱发因素就能达到防止岩溶塌陷再次发生,实现主动防灾的目的。而自然诱发的岩溶塌陷群预防较为复杂,需查明其诱发因素并加以针对监测和精准预警方可避免受害,属于被动防灾,防灾难度大且效果难以保证,因此,自然诱发的岩溶塌陷群一旦发灾其破坏和影响程度要比人为诱发的岩溶塌陷群大得多,对此类成因的岩溶塌陷群更要加以关注。

本文依托“广东省城镇典型岩溶地面塌陷防治研究”项目,以佛山市高明区富湾镇李家村自然诱发的岩

溶塌陷群作为研究对象,通过系统收集区域地质、构造、工程、水文、环境、气象、历史灾害等资料,结合钻探揭露结果,查明区域内地质环境条件和岩溶发育特征,分析形成过程,最后探讨其成因机理。为该地区岩溶塌陷的科学防灾减灾提供地质理论依据,从而保障当地人民群众生命财产安全和社会经济建设安全持续高质量发展。

## 1 地质环境条件

研究区位于广东省中部佛山市高明区荷城街道办富湾镇南侧约 600 m 处,包括关家村、陈家村、李家村开田和余家村所在区域,面积约 0.25 km<sup>2</sup>;地貌类型为珠江三角洲冲积平原区,属亚热带季风型气候,日照充足,雨量充沛,多年平均气温为 21.9 ℃,多年平均降雨量为 1 674.9 mm,其中 4—9 月为雨季,降雨量约占全年的 80%。地表水系较发育,有鱼塘、小河流等,东侧距离西江最近约 800 m。地表植被发育,长有高大树木。区内主要有四个村庄,未见有抽排地下水现象和其他人类工程活动。

### 1.1 地层岩性

研究区为第四系所覆盖,第四系地层有第四系残坡积层(Q<sup>edl</sup>)、海陆交互相沉积层(Q<sup>mc</sup>)和人工填土(Q<sup>ml</sup>),下伏基岩地层为早侏罗世金鸡组(J<sub>j</sub>)基岩,各地层的岩性简要描述见表 1 和图 1。其中,第四系残坡积层(Q<sup>edl</sup>)为区内土洞发育的主要层位,早侏罗世金鸡组(J<sub>j</sub>)岩层为区内溶洞发育层位。

表 1 研究区主要地层岩性表

Table 1 Lithology table of main strata in the study area

地质年代	地层单位及代号	岩性概述
第四系	人工填土(Q <sup>ml</sup> )	以素填土为主,主要由粉质黏土和黏性土组成,含碎石和块石、砖块等。
	海陆交互相沉积层(Q <sup>mc</sup> )	岩性主要为粉质黏土、淤泥、淤泥质土、粉细砂、粗砂、砂砾、砾石。
	残坡积层(Q <sup>edl</sup> )	岩性主要由粉质黏土、粉土、粉砂、中砂和风化岩砾石、碎块组成。
侏罗系	金鸡组(J <sub>j</sub> )	岩性以砾状灰岩为主,局部为砂页岩,砾状灰岩碎块角砾结构及致密胶结状重结晶结构;碎块角砾成分以灰岩角砾为主,其次为少部分的内碎屑及变质砂岩角砾。岩石的胶结物及填隙物成分主要由细碎屑及方解石组成,且以方解石数量居多;细碎屑主要为灰岩、砂岩细碎物以及少量的生物碎屑及鲕粒内碎屑;重结晶方解石呈填充状分布于碎块角砾间,方解石成分较纯。

### 1.2 地质构造

研究区位于北西向西江断裂组(f<sub>2</sub>)和北东向大尧山断裂组(f<sub>1</sub>)交汇处附近。区内至少存在三组次级隐伏断裂(编号: f<sub>1</sub>~f<sub>3</sub>)交汇(图 1),其主要特征见表 2。由表 2 可知,断裂作用导致岩石破碎、节理裂隙发育,对区内岩溶发育起到控制作用;此外,北东向断裂(f<sub>1</sub>)与西江断裂(f<sub>2</sub>)交汇为区内地下水形成强径流和频繁交换提供导水通道,对区内岩溶发育起到加速作用,在

f<sub>1</sub> 断裂沿线曾发生过 3 处岩溶塌陷。

### 1.3 工程地质条件

研究区覆盖层厚度 16.70~68.50 m<sup>[11]</sup>,土体类型属多层土体,岩石类型属碎屑岩类综合岩性组。根据沉积年代、成因、岩性和物理力学性质差异,将其自上而下共划分出 17 个工程地质层,其中,(1)、(2)-1~(2)-11 和(3)为土层,(4)-1~(4)-4 为基岩,各工程地质层特征见表 3。

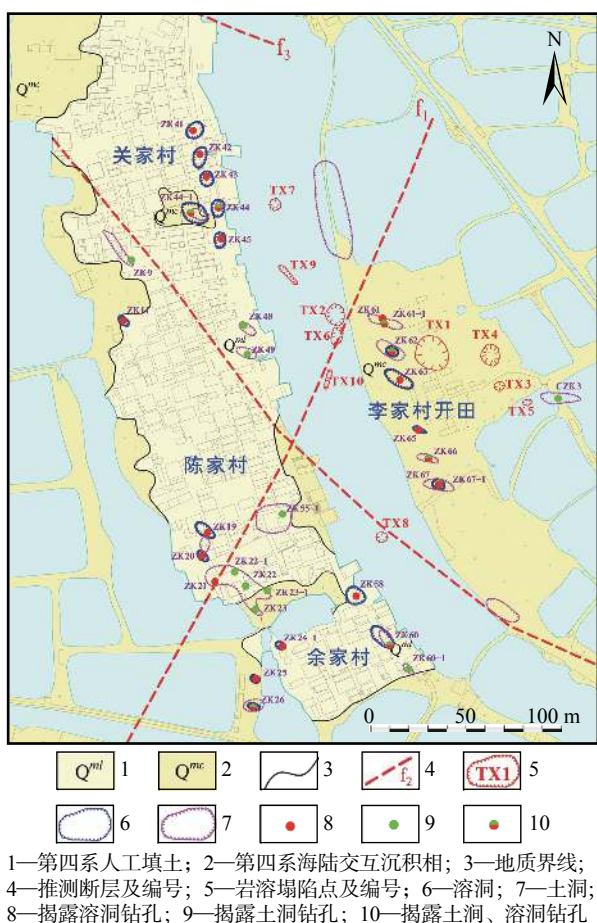


图 1 李家村岩溶塌陷群所在区域地质与岩溶发育分布图

Fig. 1 Regional geology and karst development distribution map of Lijia Village karst collapse group

由表 3 可知, 研究区覆盖层表现的特征总体为纵向

上呈隔水层与透水层交替分层(即“隔-透”交替分层)、平面上存在漏水“天窗”, 其中, (2)-1、(2)-3、(2)-5、(2)-8、(2)-11 和(3)等隔水层中粉质黏土、残坡积土等土体所含黏粒间黏聚力作用可为土洞洞壁形成提供框架支撑结构, 而(2)-4、(2)-7、(2)-10 等透水层渗透系数大( $1.3 \times 10^{-2} \sim 2.77 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ )<sup>[11]</sup>可为土层内细小颗粒流失形成土洞空洞提供通道。由于隔水层中存在“天窗”上下透水层之间形成沙漏效应, 土体中细小颗粒(如细砂、粉砂等)在地下水潜蚀作用下通过“天窗”、透水层和导水通道自下往上逐步流失而留下黏性物质最终形成土洞, 并会逐步扩大由小土洞发展为大土洞。钻探揭露发现土洞全部发育在土层最底层隔水层(3)和次底层隔水层(2)-8 中, 分别为 2 个和 16 个, 分别约占总揭露土洞数的 11% 和 89%, 也验证了上述结果。(2)-2、(2)-6 和(2)-9 等淤泥质土层起到一定隔水作用, 由于其具有流塑特性无法为土洞洞壁形成提供支撑力, 一旦土洞发展切穿该层底面容易引起较大范围垮塌甚至引发地面塌陷, 因此该层内一般不会发育土洞。程星等<sup>[12]</sup>将珠江三角洲盖层地质模型概化为阻-透-阻型和透-阻-透型, 并指出地下水流易向“天窗”处汇集形成超水力坡降引发“流土”现象, 总之, 这种带“天窗”的“隔-透”交替型地质结构对土洞的形成和发展十分有利。

此外, 基岩砾状灰岩中胶结物方解石含量高且质纯, 受构造作用岩石裂隙发育, 加上断裂导水通道叠加作用, 十分有利于地下水径流和交换, 进而溶蚀和带走细小颗粒形成溶洞, 并不断扩大和发展。

表 2 研究区主要断裂特征表

Table 2 Characteristics of main faults in the study area

断裂编号	走向	产状(°)	长度/km	宽度/m	断裂特征概述
f <sub>1</sub>	北东	145 ∠ 45	3.5	2 ~ 10	为大尧山断裂组之次级断裂, 主要发育早侏罗世地层之中, 构造岩以碎裂岩为主, 局部为硅化岩和硅化砂岩, 带内裂隙发育。
f <sub>2</sub>	北西	10 ~ 25 ∠ 70 ~ 80	2.5	10 ~ 15	同属西江断裂组之南蓬山断裂的次级断裂, 主要发育于泥盆系、石炭系地层中, 构造岩由构造角砾岩、硅化岩和碎裂岩组成; 断裂早期活动以压扭性为主, 晚期活动表现为张扭性, 具有活动多期性。
f <sub>3</sub>	北西	40 ∠ 50	2.5	10 ~ 25	

### 1.4 水文地质条件

研究区地下水类型主要有松散岩类孔隙水和覆盖型碳酸盐岩类裂隙溶洞水两种, 其地下水特征见表 4。由于研究区紧靠西江, 处于地下水强迳流和强交换带上, 地下水和地表水联系密切且含水层厚度大, 雨季地下水排入西江, 旱季西江补给地下水, 迳流方向有水平向也有垂直向, 为区内岩溶发育提供有利的动力条件, 同时也会直接诱发岩溶塌陷。此外, 区内溶洞水水位普遍比松散土层水位高<sup>[8]</sup>, 说明区内溶洞水具

有承压性, 反映出该区域断裂导水性较好, 是区内岩溶发育另一有利水文条件。

## 2 岩溶发育特征及岩溶塌陷概况

### 2.1 土洞发育特征

研究区内收集到 74 个钻孔资料, 其中有 18 个钻孔揭露到土洞, 钻孔见洞率约 24%, 所揭露的各土洞特征见表 5 和图 1。由图 1 可知, 土洞发育与断裂走向基本一致且在断裂交汇带处集中。由表 5 可知, 土洞洞顶土



表3 研究区岩土体特征表

Table 3 Characteristics of rock and soil mass in the study area

层号	地层代号	揭露厚度/m	土体特征概述	备注
(1)	Q <sup>nl</sup>	0.50~7.20	填土:广泛分布,由黏性土为主,含砂粒,局部见少量碎石、瓦片、砖块,已压实。	
(2)-1		1.50~7.80	粉质黏土:广泛分布,含少量砂粒,黏性一般-较强,可塑。	隔水层
(2)-2		0.50~9.80	淤泥质土:透镜状分布,含有机腐殖质、腐叶,局部夹淤泥质粉土、粉砂薄层,流塑。	相对隔水层
(2)-3		1.40~5.30	粉质黏土:较广泛分布,含粉细砂,局部含腐殖质,局部夹淤泥质土,稍密-中密,很湿,可塑。	隔水层
(2)-4		1.70~10.80	粉细砂:广泛分布,局部含较多黏粒,局部夹粉土、淤泥质土透镜体,松散-稍密,局部中密,饱和。	透水层
(2)-5		1.90~14.80	粉质黏土:较广泛分布,土质较杂,局部过渡有粉土、粉砂,局部夹淤泥质土薄层,黏性一般,软塑-可塑。	隔水层
(2)-6	Q <sup>mc</sup>	0.40~14.40	淤泥质土:较广泛分布,含少量腐殖质及粉砂,局部过渡为淤泥,局部夹粉土、粉质黏土,流塑。	相对隔水层
(2)-7		1.20~13.30	粉细砂:广泛分布,含少量泥质,局部夹中砂,稍密-中密,局部松散或密实,饱和。	透水层
(2)-8		0.90~26.60	粉质黏土:广泛分布,含少量粉砂,黏性一般较强,可塑,局部硬塑,该层揭露到2个土洞,占总揭露土洞的11%。	隔水层、土洞发育层
(2)-9		1.50~6.50	淤泥质土:局部分布,含有机腐殖质,局部夹薄层粉砂,流塑。	相对隔水层
(2)-10		1.60~18.90	粉细砂:局部分布,含少量黏粒,局部夹粉土,稍密-中密,饱和。	透水层
(2)-11		0.90~3.70	粗砂、砾砂:透镜状分布,含较多泥质,以砾砂为主,局部过渡为粗砂、圆砾,密实,饱和。	透水层
(3)	Q <sup>cd</sup>	0.80~18.50	残坡积土:广泛分布,以粉质黏土为主,含较多岩石风化的砂粒、角砾及碎石,可塑-硬塑状,中密-密实,饱和,该层揭露到16个土洞,占总揭露土洞的89%,是土洞发育的主要层。	隔水层、土洞主要层
(4)-1		1.50~9.17	全风化砂岩、炭质页岩:局部分布,砂岩密实砂土状,水冲易散;炭质页岩呈坚硬土状,局部夹煤层。	
(4)-2		4.50	强风化砂岩:零星分布,半岩半土状,岩质极软,岩芯易折断。	
(4)-3	J <sub>ij</sub>	1.40~2.80	中风化砂岩:局部分布,岩芯短柱状,岩质较坚硬,局部见褐铁矿化现象。	
(4)-4		0.20~11.56	微风化砾状灰岩:广泛分布,砾状结构,砾石主要为灰岩砾,岩芯短或长柱状,岩质较硬-坚硬,个别较软,该层钻孔见洞率31.08%。	岩溶发育层

表4 研究区地下水特征表

Table 4 Groundwater characteristics in the study area

地下水类型	地下水特征描述
松散岩类孔隙水	主要赋存于第四系海陆交互相沉积层和残坡积层中,含水介质为(2)-4、(2)-7、(2)-10层砂砾石层和(3)层碎石土层,含水层厚度2.00~26.30 m;存在多个隔水层,上部为潜水、下部为微承压水;水位埋深1.00~3.80 m;富水性中等。
覆盖型碳酸盐岩类裂隙溶洞水	主要赋存于早侏罗世金鸡组(J <sub>ij</sub> )基岩裂隙和溶洞中,含水介质为(4)-4层微风化砾状灰岩,水位埋深1.30~1.60 m;富水性以中等为主,局部为丰富。

层厚度 26.80~45.80 m,洞高 0.70~9.53 m;约有 48% 的土洞呈半充填状态,约有 39% 的土洞呈充填状态,约有 13% 的土洞呈无充填状态;充填物质主要有流塑—软塑黏性土,含砂、砾石、碎石;部分土洞与土洞之间连通性较好,连结成大土洞。

## 2.2 溶洞发育特征

所收集到的 74 个钻孔中有 23 个钻孔揭露到溶洞,钻孔见溶洞率约 31%,所揭露的各溶洞特征见表 6 和图 1。由图 1 可知,溶洞与土洞发育分布基本一致,受断裂和古河道控制<sup>[10]</sup>。由表 6 可知,溶洞顶板埋深 27.40~51.00 m,溶洞顶板砾状灰岩厚度 0.20~6.20 m,溶洞以 1~2 层为主,个别达 5 层,单洞洞高 0.30~11.00 m,单孔线岩溶率 4.0%~89.0%;溶洞多呈充填或半充填状态,仅 5 个溶洞无充填物,充填溶洞占溶洞总数的 63%,半充填溶洞占 20%;充填物为流塑—软塑黏性土的溶洞

占 47%,充填物为砂、砾石的占 37%。其中,充填及半充填溶洞分布于砾状灰岩的上部,埋藏浅,与古河道连通性好;而无充填的溶洞分布部位稍深,规模小。

## 2.3 以往岩溶塌陷概况

研究区内曾发生过 10 处岩溶塌陷地质灾害<sup>[11]</sup>,其特征见表 7 和图 1。由表 7 可知,2005 年 4 月 25 日—5 月 14 日期间在树林内、鱼塘边和河涌边陆续发生过 4 处(编号:TX1~TX4),10 月 8 日在干鱼塘内发现 1 处(编号:TX5),10 月 25 日在西安河(干鱼塘底)内发现 3 处(编号:TX6~TX8),之后 2006 年 3 月 10 日又在西安河(干鱼塘底)内发现 2 处(编号:TX9~TX10)。塌陷坑直径 0.6~5 m,个别达 22.5 m,深度 0.8~7 m,形态以圆形—近圆形为主,个别为长条形,按照塌陷坑数量个数分类标准<sup>[13]</sup>,可知李家村岩溶塌陷群规模属中型。

表 5 研究区土洞特征表  
Table 5 Characteristics of soil caves in the study area

孔号	土洞分布埋深/m	洞高/m	洞顶板土层厚度/m	充填情况	洞顶板最下部土层		所在层位
					土类	厚度/m	
ZK9	33.00 ~ 37.50	4.50	33.00	半充填, 洞底少量黏性土	残坡积土	1.20	(3)
ZK22	26.80 ~ 36.33	9.53	26.80	洞底(0.33 m)充填少量黏性土	残坡积土	1.70	(2)-8
ZK22-1	32.20 ~ 10.30	9.10	32.20	无	残坡积土	1.00	(3)
ZK23	27.10 ~ 30.12	3.02	27.10	无	残坡积土	3.60	(3)
ZK23-1	29.50 ~ 30.70	1.20	29.50	无	残坡积土	1.10	(3)
ZK26	35.10 ~ 39.20	4.10	35.10	充填砾夹泥	残坡积土	3.60	(3)
ZK44	37.50 ~ 40.00	2.50	37.50	充填黏性土	残坡积土	11.40	(3)
ZK44-1	37.00 ~ 39.00	2.00	37.00	充填流塑状黏性土	残坡积土	10.00	(3)
ZK48	45.80 ~ 16.50	0.70	45.80	无	残坡积土	8.30	(3)
ZK49	44.00 ~ 47.00	3.00	44.00	上部无充填、下部(1 m)充填黏性土	残坡积土	11.00	(3)
ZK55-1	45.00 ~ 47.50	2.50	45.00	半充填软塑状黏性土	残坡积土	5.50	(3)
ZK60	32.00 ~ 35.30	3.30	32.00	上部无充填、底部(0.3 m)充填黏性土	残坡积土	3.00	(3)
ZK60-1	29.50 ~ 30.50	1.00	29.50	充填流塑状黏性土	残坡积土	1.50	(3)
ZK61-1	28.70 ~ 31.30	2.60	28.70	充填流塑状黏性土	残坡积土	4.10	(3)
ZK62	28.00 ~ 31.70	3.70	28.00	充填流塑状黏性土, 含碎石	残坡积土	1.50	(3)
ZK66	26.20 ~ 28.30	2.10	27.10	充填流塑状黏性土, 含中砂、碎石	粉质黏土	1.20	(2)-8
ZK67	27.10 ~ 30.20	3.10	27.10	半充填流塑—可塑状黏性土	粉质黏土	3.50	(3)
CZK3	27.30 ~ 35.30	8.00	27.30	半充填软泥, 含碎石	残坡积土	7.20	(3)

### 3 岩溶塌陷群成因机理分析

#### 3.1 岩溶塌陷群形成的发生过程分析

根据李家村岩溶塌陷群所记录的发灾经过<sup>[11]</sup>(编号为 TX1 ~ TX4), 结合塌陷发生先后位置的地形地貌、岩土体结构、岩溶发育和降雨情况等特点, 将其发生过程划分为三个阶段: 前期水渗气压阶段→中期软化塌陷阶段→后期振动群塌阶段, 致塌模式属渗压-重力-软化型(图 2)。各阶段特点简述如下:

##### (1) 前期水渗气压阶段

因该区域长期受干旱少雨所影响, 地下水位处于低位, 在大暴雨作用时, 雨水除一部分地表迳流流失外另一部分通过土体孔隙渗入土中, 尤其是通过植物根系(如茂密树林)入渗至更深部, 此时形成土层上部入渗水峰面, 与地下水位面构成一个封闭区域, 将土体孔隙中填充的气体包围其中, 并随着入渗水峰面下降与地下水位面上升, 包围在其中的气体体积被压缩产生反作用力, 作用于土洞顶部土体中, 并随着两个面的靠近被压缩气体的反作用力亦逐渐变大。

##### (2) 中期软化塌陷阶段

雨水入渗水峰面的下降和地下水位面的上升所经过的区域土体发生软化, 同时土洞上覆土体由非饱和状态变为饱和状态从而导致其上覆土体重力增加, 入渗水峰面与地下水位面之间形成的气压冲击作用<sup>[14-18]</sup>、上

覆土体饱和后增加荷载作用和土体软化作用共同导致土洞顶部土体发生垮塌, 形成塌陷(TX1)。

##### (3) 后期振动群塌阶段

TX1 岩溶塌陷发生后, 瞬间导致大量上部土体和地表水充填原有土洞空间并涌入溶洞内, 有部分通过岩溶管道运移到其他地方, 水土瞬间的垮塌产生强烈的岩土体振动作用和水体波动作用, 通过“岩-土-水”媒介向四周传递, 破坏四周区域岩土体的原有结构性能, 改变原有“岩-土-水-气”系统的力学平衡极限, 直接引发岩溶塌陷(TX2), 或导致岩土体中抗垮塌力学平衡极限降低, 并在其他外界因素(如降雨)的再次作用下, 间接诱发岩溶塌陷(TX3), 如此继续影响作用, 不断四周外围扩展直接或间接引发塌陷(TX4 ~ TX10), 最终形成了塌陷群。

#### 3.2 岩溶塌陷群形成的成因分析

通过对研究区地质环境条件及岩溶塌陷形成的演化过程综合分析, 认为李家村岩溶塌陷群的致塌因素包括特殊的“岩-土-水-气”组合、断裂构造、植物根系和极端天气等。

##### 3.2.1 内因与特殊的“岩-土-水-气”组合有关

(1) 基岩: 可溶岩基岩为早侏罗世金鸡组(J<sub>1j</sub>)砾状灰岩, 砾石成分以灰岩为主, 约占砾石的 50%, 钙质胶结, 滴酸强烈起泡, CaCO<sub>3</sub> 含量大于 95%<sup>[11]</sup>, 属纯度较高

表6 研究区溶洞特征表

Table 6 Characteristics of karst caves in the study area

孔号	溶洞分布深度/m	洞高/m	洞顶板岩石厚度/m	洞顶板土层厚度/m	线岩溶率/%	充填情况
ZK11	33.00~33.50	0.50	1.50	29.00	6.3	无充填
ZK19	38.40~48.01	9.61	2.40	36.00	76.9	无充填
ZK20	33.10~33.50	0.40	1.20	31.90	4.4	无充填
ZK21	33.20~33.60	1.50	0.40	33.20	33.7	充填褐黄色黏性土
	36.56~38.56	2.00	1.46			充填褐黄色砂土,含碎岩屑
ZK24-1	39.70~40.30	0.60	5.40	34.30	6.0	无充填
ZK25	36.10~36.90	0.80	2.90	33.20	8.1	充填褐黏性土,含较多砂
ZK26	41.30~42.00	0.70	2.10	35.10	25.0	充填卵石夹泥,未到底
ZK41	35.00~35.20	0.20	0.25	34.75	89.0	充填粗砂
	35.60~43.50	7.90	0.40			充填碎块岩石及中粗砂
ZK42	32.40~38.00	5.60	5.00	27.40	51.9	充填碎石、中粗砂
	27.80~28.10	0.30	0.50			充填中砂
	28.60~29.00	0.40	0.50			充填细砂
ZK43	29.20~29.60	0.40	0.20	27.30	45.4	充填中砂
	29.90~32.90	3.00	0.30			充填中砂
	33.10~33.40	0.30	0.20			充填中砂
ZK44	43.90~46.65	2.75	3.90	37.50	39.6	上部无充填,下部(1.1 m)充填软塑状黏性土
ZK44-1	39.60~41.60	2.00	0.60	37.00	28.2	充填流塑状黏性土
ZK45	35.10~38.00	2.90	1.50	33.60	27.9	充填软塑状黏性土,含角砾、碎石
ZK58	34.80~37.30	2.50	1.70	33.10	42.6	充填黄色粉质黏土
	38.80~40.60	1.80	1.50			充填黄色粉质黏土
ZK60	36.80~37.40	0.60	1.50	32.00	6.2	充填黄色黏性土
ZK61	32.30~36.50	4.20	5.50	26.80	40.4	上部无充填,下部(1.1 m)充填黏性土,含碎石、粗砂
ZK61-1	32.30~36.30	4.00	1.00	28.70	70.2	上部无充填,下部(1.3 m)充填流塑状黏性土
ZK62	41.90~43.60	1.70	1.70	28.00	13.8	上部无充填,底部(0.5 m)充填流塑状黏性土
ZK63	30.10~40.90	10.80	0.30	29.80	88.5	充填流塑状黏性土,含碎石、角砾
ZK65	32.7~33.1	0.40	3.80	28.90	4.0	无充填
ZK66	32.60~34.00	1.40	4.30	26.20	22.6	上部充填粗砂,含砾石下部充填可塑状黏性土
ZK67	34.80~44.60	9.80	4.60	27.10	66.2	半充填黏性土,含粗砂、砾石
ZK67-1	33.30~42.60	9.30	6.20	27.10	58.5	上部无充填,下部(2.6 m)充填流塑状黏性土

表7 研究区岩溶塌陷地质灾害特征表

Table 7 Geological hazard characteristics of karst collapse in the study area

塌陷编号	面积/m <sup>2</sup>	形状	规模/m	深度/m	位置	发生发展情况	灾害情况
TX1	528	近圆形	长22.5,宽22	7	李家村开田		
TX 2	19.6	圆形	直径5	4	西安河		
TX 3	9.6	圆形	直径4.6	7	李家村开田		
TX 4	200	近圆形	长18,宽15	7	李家村开田		
TX 5	10.7	圆形	直径3.7	0.8	鱼塘底	始发时间为2005年4月25日,盛发时间为2005年4月26日至2005年5月8日;2006年3月10日干鱼塘时发现	毁树约10棵,直接威胁人员7户26人,间接威胁86户386人。经济损失超500万
TX 6	60.0	近圆形	长10,宽6.0	3.5			
TX 7	19.6	圆形	直径5.0	3.2			
TX 8	12.6	圆形	直径4.0	3.0	西安河		
TX 9		长条形	宽0.7~0.8	1.0			
TX 10		长条形	宽0.6~0.8	1.0			

的碳酸盐岩,极易溶蚀,为溶土洞发育和岩溶塌陷群的发生奠定了物质基底。

(2)土体:第四系海陆交互相沉积层(Q<sup>mc</sup>)广泛发育

着这种带“天窗”的“隔-透”交替型地质结构,十分有利于地下水的跃层交换潜蚀和细小颗粒的运移流失,为土洞发育和地下水强径流潜蚀作用创造了条件。第四系

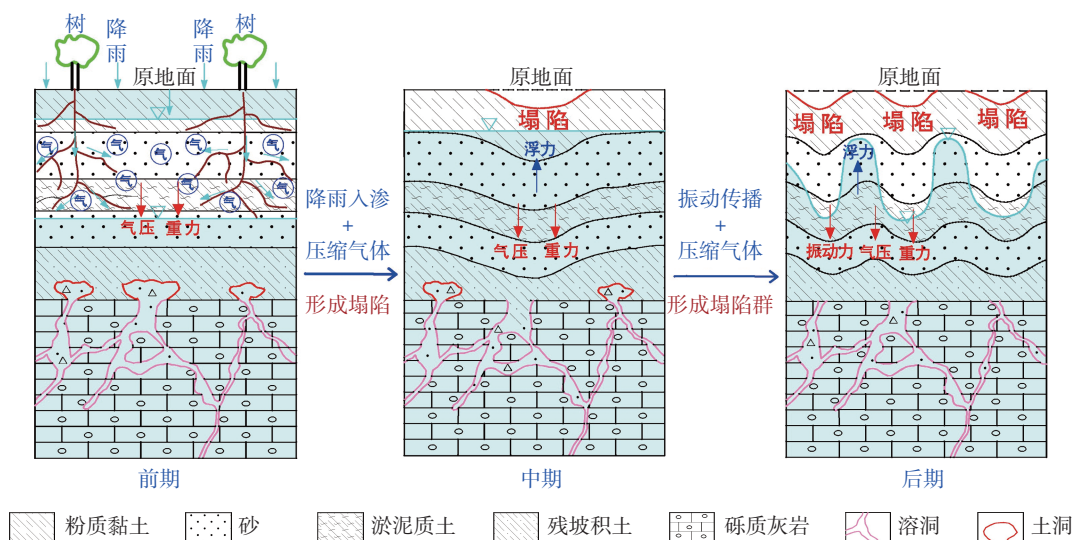


图 2 李家村岩溶塌陷群的发生过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of occurrence process of Lijia Village karst collapse group

底部由砾状灰岩风化而成的残坡积层(Q<sup>edl</sup>)物质组成主要有残积黏性土并含灰岩碎石,具有一定的黏结力和透水性,十分有利于地下水潜蚀作用发育土洞,为区内孕育土洞的主要地质体<sup>[10]</sup>。

(3)水体:地表水(鱼塘、小河流、西江等)资源丰富,加之地下水位埋深浅,导致地下水与地表水水力联系密切;其次,第四系海陆交互相沉积层(Q<sup>mc</sup>)中透水砂层较厚,地下水可通过砂层径流至西江,同时当西江水位上升时亦可接受西江水的渗流,常年反复作用形成地下水的强交换带;再者,地下水富水性中等-丰富且具有承压性,有利于可溶岩的溶蚀作用。总之,地下水丰富及其强径流和强交换作用为溶土洞的形成和发展提供了有利的动力条件。

(4)气体:由表 3 可知上部土层以松散-稍密为主,土颗粒间存在较大空隙,充填着较多气体,一旦雨水入渗密封顶板后,土间气体将起到压力传递介质间接诱发岩溶塌陷作用。

### 3.2.2 趋势由断裂构造控制

区内多期次断裂构造作用一方面导致岩石破碎增加可溶岩石被溶蚀表面积和加速其风化速度,另一方面大尧山断裂组次级断裂(f<sub>1</sub>)与西江断裂(f<sub>2</sub>)的交汇沟通了地表水(西江)和地下水的联系,为区内形成地下水强径流和强交换带提供了前提,从而控制着岩溶的发育。

### 3.2.3 过程受植物根系影响

高大树木根系可延伸进土中深处,从塌坑内观察可见较多树根延伸超过 1.5 m,加上区内地下水位埋深浅(1.05~3.08 m),因此,植物根系作用可构成地下水与地

表水的有利径流通道。

### 3.2.4 诱因与极端天气有关

李家村岩溶塌陷群是在一场大暴雨后开始暴发的,当日降雨量高达 151.20 mm。由图 3 可知,在岩溶塌陷群发生前两年(即 2003 年和 2004 年)年降雨量均小于 1 000 mm,日降雨量 0~40 mm,平均日降雨量约 10 mm,最大日降雨量约 60 mm,两年间多达 200 d 为无雨日,导致该区域地下水水位持续下降,直至 2005 年 4 月 25 日发生塌陷前地下水水位接近近年来历史最低位(埋深约 7.50 m),出现大暴雨后,在“岩-土-水-气”等综合作用下产生较大的气压差从而诱发了岩溶塌陷。

综上所述,李家村岩溶塌陷群是在特殊的“岩-土-水-气”组合地质环境条件下,由强降雨作用诱发导致土洞垮塌引发一连串自然塌陷所形成的。

## 4 结论

(1)李家村岩溶塌陷群的发生过程包括前期水渗气压、中期软化塌陷、后期振动群塌等三个阶段,其致塌模式为渗压-重力-软化型。

(2)李家村岩溶塌陷群是由强降雨诱发导致土洞垮塌引发一连串自然塌陷所形成的,其致塌因素主要包括特殊的“岩-土-水-气”组合、断裂构造、植物根系和极端天气等。基岩方解石含量高易溶蚀、带“天窗”的“隔-透”交替型地质结构、地下水的强径流与频繁交换潜蚀作用和土体饱气的特殊“岩-土-水-气”组合为土洞和溶洞形成和发展起到决定性作用,北东向和北西向断裂交叉叠加作用对岩溶发育起到控制作用,植物根系增加



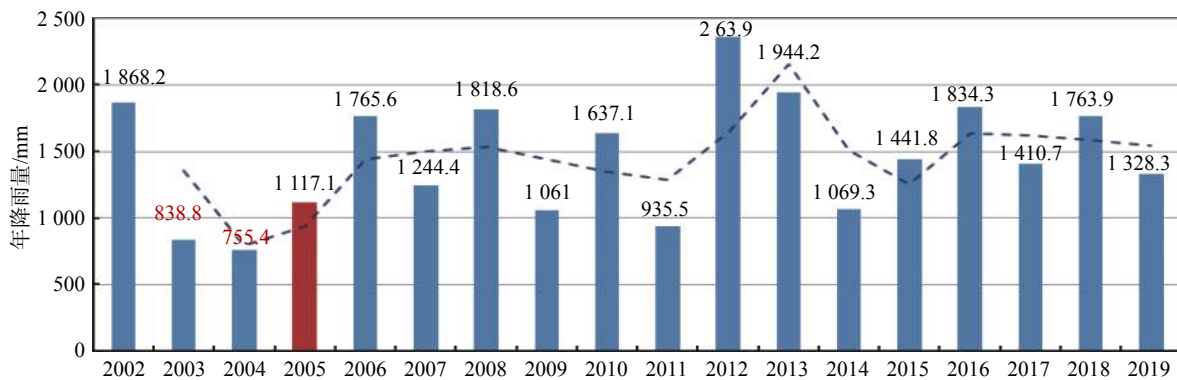


图3 研究区 2002—2019 年年降雨量分布图

Fig. 3 Annual rainfall distribution chart of the study area from 2002 to 2019

地表水和地下水连通性,强降雨极端天气作用是主要诱因。

致谢: 本文初稿完成后由本单位刘建雄教授级高级工程师进行审查,并给出了宝贵的修改意见,在此表示感谢! 另外,感谢广东省城镇典型岩溶地面塌陷防治研究项目组全体成员,为本文的完成提供了重要帮助。

#### 参考文献 (References) :

- [1] 康彦仁,项式均,陈健,等. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁: 广西科学出版社, 1990. [KANG Yanren, XIANG Shijun, CHEN Jian, et al. Karst collapse in South China[M]. Nanning: Guangxi Science Press, 1990. (in Chinese)]
- [2] 康彦仁. 岩溶塌陷的形成机制 [J]. 广西地质, 1989, 2(2): 83-90. [KANG Yanren. Formation mechanism of karst collapse [J]. Geology of Guangxi, 1989, 2(2): 83-90. (in Chinese with English abstract)]
- [3] ZHOU W, BECK B F, ADAMS A L. Application of matrix analysis in delineating sinkhole risk areas along highway(1-70 near Fredrick, Maryland) [J]. Environmental Geology, 2003, 122: 40-49.
- [4] MAGDALENE S, ALEXANDER E C. Sinkhole distribution in Winona County, Minnesota, rebistited [J]. Karst Geohazards, 1995: 43-51.
- [5] 石树静,张勤军,康志强. 南宁市坛洛镇岩溶塌陷群成因机制分析 [J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 507-514. [SHI Shujing, ZHANG Qinjun, KANG Zhiqiang. Formation mechanism and development process of karst collapses in Tanluo Town of Nanning City [J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(5): 507-514. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郑小站,郭宇,戴建玲,等. 广州市典型岩溶塌陷区岩溶发育及影响因素 [J]. 热带地理, 2014, 34(6): 794-803. [ZHENG Xiaozhan, GUO Yu, DAI Jianling, et al. Karst development and influencing factors in typical karst collapse districts of Guangzhou [J]. Tropical Geography, 2014, 34(6): 794-803. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈标典,李喜,李祖春,等. 湖北武汉白沙洲隐伏岩溶区地质结构与岩溶塌陷分类 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 43-52. [CHEN Biaodian, LI Xi, LI Zuchun, et al. Types of geological structures and mechanism of karst collapses in Baishazhou, Wuhan City of Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 43-52. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 周长松,邹胜章,朱丹尼,等. 广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡-中村段岩溶塌陷成因 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 146-168. [ZHOU Changsong, ZOU Shengzhang, ZHU Danni, et al. An analysis of the cause of karst collapse near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 146-168. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 高程鹏. 循环动荷载下伏空洞路面塌陷的模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 70-77. [GAO Chengpeng. Model tests of road subsidence progress with underground cavities caused by cyclic dynamic load [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 70-77. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郭松,郭广礼,李怀展,等. 基于主成分层次聚类模型的采空塌陷场地稳定性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 116-121. [GUO Song, GUO Guangli, LI Huaizhan, et al. Goaf-collapse sites stability evaluation based on principal component hierarchical clustering model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 116-121. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘建雄,张宗胜,黄芝惠,等. 广东省佛山市高明区富湾



- 地面塌陷地质灾害勘查报告[R]. 广州: 广东省佛山市地质局, 2006. [ LIU Jianxiong, ZHANG Zongsheng, HUANG Zhihui, et al. Geological hazard investigation report of Fuwan ground subsidence in District, Foshan City, Guangdong Province[R]. Guangzhou: Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, 2006. (in Chinese) ]
- [ 12 ] 何军, 刘磊, 黎清华, 等. 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例 [ J ] . 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 47-56. [ HE Jun, LIU Lei, LI Qinghua, et al. Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example [ J ] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 47-56. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 中国地质调查局. 1: 50000岩溶塌陷调查规范(送审稿)[S]. 2016. [ China Geological Survey. 1: 50000 karst collapse investigation specification(Draft for approval)[S]. 2016. (in Chinese) ]
- [ 14 ] 代群力. 论岩溶地面塌陷的形式机制与防治 [ J ] . 中国煤田地质, 1994, 6(2): 59-63. [ DAI Qunli. On the form mechanism and prevention of karst ground collapse [ J ] . Coalfield geology in China, 1994, 6(2): 59-63. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 等. 广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 131-139. [ HAN Qingding, LUO Xiyi, YI Shouyong, et al. Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 131-139. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 涂婧, 魏瑞均, 杨戈欣, 等. 湖北武汉岩溶塌陷时空分布规律及其影响因素分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 68-73. [ TU Jing, WEI Ruijun, YANG Gexin, et al. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of karst collapse and its influence factors in Wuhan City of Hubei Province [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 68-73. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 林云, 任华鑫, 武亚遵, 等. 不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究 [ J ] . 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 15-26. [ LIN Yun, REN Huaxin, WU Yazun, et al. Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions [ J ] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 15-26. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 张春潮, 侯新伟, 李向全, 等. 三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制 [ J ] . 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 62-71. [ ZHANG Chunchao, HOU Xinwei, LI Xiangquan, et al. Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring [ J ] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 62-71. (in Chinese with English abstract) ]