

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.16

广州市花都区花山镇、花东镇岩溶发育规律初探

丁琛

(广州市地质调查院, 广东 广州 510440)

摘要:近年来,广州市花都区花东镇、花山镇发生多起岩溶地面塌陷,而对该地区岩溶发育规律研究较为薄弱,故本次利用《广东省广州市地质灾害详细调查(1:50 000)》项目平台,以“点面结合”为手段,采用野外调查配合钻探、物探等方法研究花东镇、花山镇南部冲洪积平原岩溶发育规律、规模及成因。研究表明,本区属于岩溶强发育区,主要为埋藏型岩溶,受地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水特征等因素控制,人类工程活动通过改变地下水平衡,促进岩溶的发育。地形地貌和标高控制研究区岩溶的纵、横向发育,纵向上主要分布在-15~-10 m 标高段,向上下两侧依次递减,横向上一般分布在地势低洼地段。而在相似地质环境条件下,岩溶发育的规模及数量与 Ca^{2+} 的含量呈正相关。

关键词:岩溶发育规律及成因;花山镇-花东镇; Ca^{2+} 含量

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0122-08

Karst development law of Huashan Town and Huadong Town in Huadu District of Guangzhou City

DING Chen

(Guangzhou Geological Survey Institute, Guangzhou, Guangdong 510440, China)

Abstract: In recent years, many karst process ground subsidences have occurred in Huadong Town and Huashan Town of Huadu District, Guangzhou City. However the research on karst development laws in this area is relatively weak. Therefore, utilized the project platform that detailed survey of geological disasters for 1:50 000 scale in Guangzhou, Guangdong Province, to study the karst process development laws, scale and genesis of the alluvial plains in Huadong Town and Huashan Town by field investigations combined with drilling and geophysical methods. The study shows that the area is strong karst development area, which is mainly buried karst. The karst process in this area is controlled by landform, stratum lithology, geological structure, groundwater characteristics and other factors. Human engineering activities can promote the development of karst by changing the groundwater balance. The vertical and horizontal development of karst in the study area is controlled by topography and elevation. In the longitudinal direction, it is mainly distributed in the elevation section of -15 to -10 m, and decreases gradually from the upper and lower sides, and generally distributed in low-lying areas horizontally. Under similar geological conditions, the scale and quantity of karst development are negatively correlated with the terrain, and positively correlated with the content of Ca^{2+} .

Keywords: karst development laws; Huashan Town-Huadong Town; Ca^{2+} content

收稿日期: 2020-06-20; 修订日期: 2020-07-06

基金项目: 广东省广州市地质灾害详细调查(1:50 000)(4111600000015); 广州多要素城市地质调查项目(DD20190291)

作者简介: 丁琛(1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事地质环境保护与地质灾害防治工作。E-mail: chding11@126.com

0 引言

地面塌陷与岩溶有密不可分的联系。地面塌陷的形成有两种方式,一是溶洞,二是土洞。在土层薄的地段,易发生岩溶地面塌陷;而在土层厚的区域,且基岩与上覆土层接触面有开口的地段,或在“上黏下砂”的土层结构条件下,易形成土洞^[1]。

对于岩溶,国内外学者提出众多研究方法,主要是地球物理钻探与工程钻探。地球物理勘探主要包括高密度电法、浅层地震法、瑞利波勘探技术、激光扫描技术、核磁共振技术等方法。目前利用较多的是高密度点法。其原理是以地下介质导电性差异为基础,通过观测和研究这些差异以及人工电场的分布规律,可达到查明地下地质构造和寻找地下典型不均匀体(岩溶、风化层、滑坡体等)的一种地球物理勘探方法。工程钻探根据可溶岩及地下水状态等进行合理的布控,补给区和径流区的勘探先进行地面调查,结合物探资料,有针对性的布置钻孔位置,而排泄区要进行全面的勘查,系统的评价岩溶发育状态^[2-4]。

广州市花都区花山镇、花东镇南部冲洪积平原(以下称研究区)位于广花盆地东北部,是广州发展较为迅速的地区。近年来,随着城市建设的加快,工程建设施工、抽排地下水,修建水库等原因,该区域已发生多起岩溶地面塌陷,严重威胁居民的生命和财产安全,已经成为制约研究区发展的瓶颈,对研究区岩溶发育规律及成因的研究已迫在眉睫。已有文献对广花盆地的赤坭镇、金沙洲等地区岩溶地面塌陷进行了研究^[5-14],基本在宏观上阐述了广花盆地的岩溶地面塌陷成因及规律,但针对性不强,对于花山镇、花东镇的岩溶发育没有系统的阐述,本次以研究区岩溶为研究对象,首次以“点+面”结合的方式,阐述研究区岩溶发育规律。

1 研究区概况

1.1 地形地貌.

研究区位于广州市北部,珠江三角洲的北缘。区内地势总体以平原为主,海拔总体在15~30 m范围内,北高南低,西北高东南低,最大高差约15 m,为堆

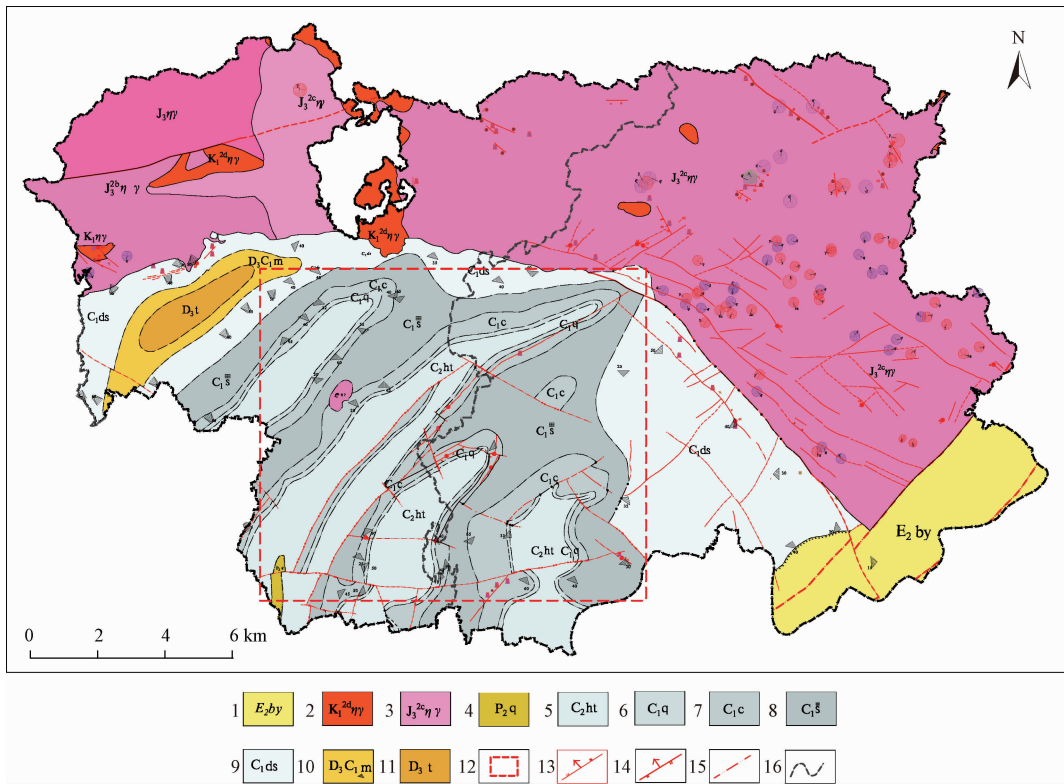


图1 花东镇、花山镇基岩地层及地质构造图(据广州市1:5万基岩地质图修改)

Fig.1 Bedrock stratum and geological structure map of Huadong Town and Huashan Town (revised according to geological map of 1:50 000 in Guangzhou City)

1—宝月组;2—细粒含斑黑云母二长花岗岩;3—中粒斑状黑云母二长花岗岩;4—栖霞组;5—壶天群;6—曲江组;7—测水组;8—石磴子组;
9—大寨坝组;10—帽子峰组;11—天子岭组;12—研究区界线;13—实测正断层;14—实测逆断层;15—推测断层;16—镇界

积地貌中的冲、洪积阶地,主要为粉质黏土、中粗砂及砾砂组成。研究区总体地势北高南低,北临丘陵地带,海拔总体在 200~600 m 之间,最高海拔 581 m。南临冲积平原,最低海拔为 1.2 m。

1.2 地质背景

研究区位于华南华夏系构造与南岭东西向构造交汇区的南部,经历了加里东期以来的多次构造运动,褶皱和断裂构造发育。根据前人资料,研究区内发育北东向、东向及南东向断裂,探明的以张性断裂为主;褶皱主要以花县复向斜为主,轴向北东,轴部为轴部大赛坝组(C_1ds),两翼为石磴子组(C_1sd)和测水组(C_1dc)。褶皱又多被纵、横断裂所破坏,致使褶皱两翼岩层多不对称。

研究区主要发育石炭系和第四系地层以及侏罗系侵入岩。石炭系揭露的地层有石磴子组(C_1s)灰岩、白云质灰岩,测水组(C_1c)砂岩、粉砂岩,曲江组(C_1q)砂岩、泥灰岩及含燧石灰岩,壶天群(C_2ht)厚层状泥灰岩;第四系揭露的地层有灯笼沙组黏土、砾砂,万顷沙组黏土、粉质黏土,横栏组砾砂、亚粉土,杏坛组粉质黏土、细砂、中粗砂、砾砂,具有典型的“上黏下砂”结构。侏罗纪侵入岩主要为粗粒斑状黑云母二长花岗岩,主要分布在研究区北部,呈点状零星分布。

1.3 地下水特征

根据前人资料及钻探揭露的地下水位表明,研究

区地下水主要有三类组成:孔隙水、裂隙水和岩溶水。

孔隙水主要分布在第四系黏土、粉质黏土和中粗砂、砾砂中,一般水位埋深 2~5 m。黏土、粉质黏土厚 4~10 m,有弱隔水性,故其下部的中粗砂、砾砂中的孔隙水具有弱承压性,水量丰富。裂隙水主要分布在测水组、曲江组砂岩以及花岗岩裂隙中,节理裂隙较为发育,水量中等~贫乏。岩溶水主要分布在石炭系灰岩、白云质灰岩中,其顶部埋深一般 15~20 m,节理裂隙较为发育,局部破碎,水量丰富。

孔隙水补给主要依靠大气降水和地表水体渗入,承压水主要接受地表水体补给,丰水期孔隙水受地表水体补给,枯水期孔隙水补给地表水体,少量受上层潜水补给。碎屑岩裂隙水主要受上覆孔隙水补给,其与地表水体和岩溶水互为补排关系。岩溶水主要受裂隙水和孔隙水补给,也受裂隙水的侧向补给,其排泄方式主要为人工开采及侧向径流。

2 研究区岩溶发育特征

地球物理勘探具有覆盖面积广,容易施工等特点,同时也具有多解性、不确定性等特点,工程钻探具有精确性,但覆盖面积小。前人对广花盆地岩溶的研究,多采用工程钻探方式,本次研究在综合分析前人资料和野外调查的基础上,采用地球物理勘探+工程钻探的方式进行研究,点面结合,研究更具有科学性,地球物理勘探测线布置与钻孔布置见图 2、图 3。

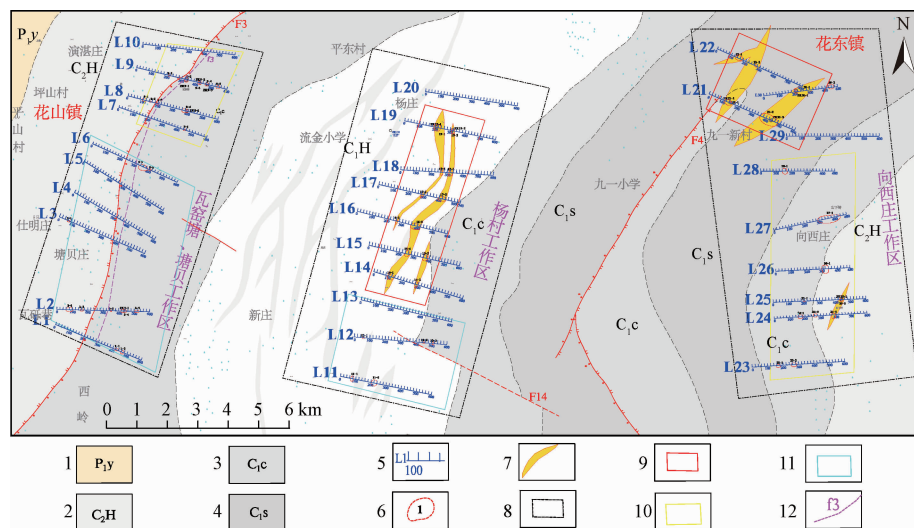


图 2 地球物理勘探测线布置图及成果图(据广州市 1:5 万基岩地质图修改)

Fig. 2 Geophysical survey line layout and result map (revised according to geological map of 1:50 000 in Guangzhou City)

1—二叠系下统阳新群砂页岩;2—石炭系中上统壶天群灰岩;3—石炭系下统测水组砂页岩;4—石炭系下统石磴子组灰岩;
5—高密度测线及测点;6—本次工作圈定的低阻异常;7—本次工作推断岩溶发育带;8—本次物探研究区;9—物探推断的
溶洞强发育区;10—物探推断的溶洞中等发育区;11—物探推断的溶洞弱发育区;12—本次物探推断断裂

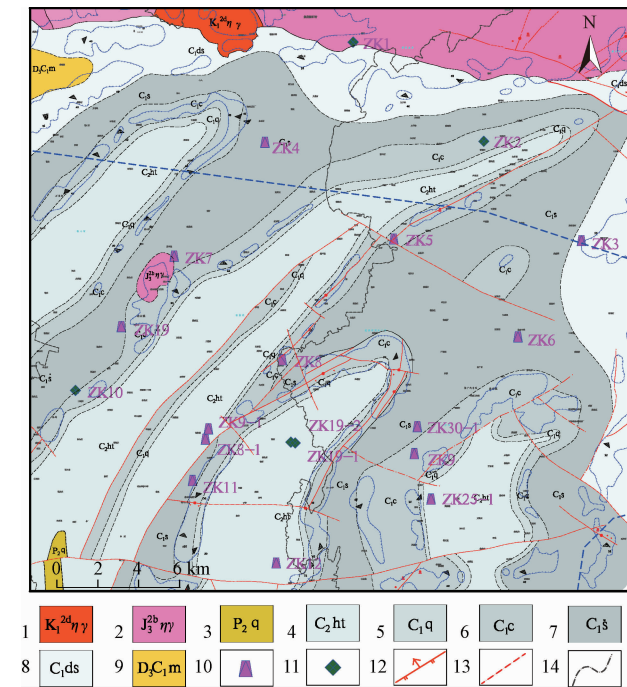


图 3 研究区地层构造与钻孔布置图
Fig.3 Stratigraphic structure and borehole layout of the study area

1—细粒含斑黑云母二长花岗岩;2—中粒斑状黑云母二长花岗岩;
3—栖霞组;4—壶天群;5—曲江组;6—测水组;7—石磴
子组;8—大赛坝组;9—帽子峰组;10—见溶洞钻孔;
11—未见溶洞钻孔;12—逆断层;13—推测断层;14—镇界

根据研究区区域地质及构造特征,将本次研究区分为三个子研究区:瓦窑塘、塘贝子研究区、杨村子研究区、向西庄子研究区,如图 2。根据前人资料,瓦窑塘、塘贝子研究区位于向斜西翼,基岩为测水组砂页岩与壶天群灰岩交界;杨村子研究区、西向庄子研究区位于两个毗邻褶斜轴部,基岩为壶天群灰岩、测水组砂页岩、石磴子组灰岩。

2.1 瓦窑塘、塘贝子研究区

本子研究区共布置地球物理勘探线 10 条,圈定地球物理异常 20 处,该地段位于石炭系测水组地层,推断为浅部的土洞引起,不排除测水组炭质层引起的可能,部分为不明性质异常;共布置钻探 5 个,其中见溶洞钻孔 2 个,溶蚀现象钻孔 1 个,平均线性溶蚀率为 60%,纵向单孔溶洞厚度最大的为 ZK19,厚 3.9 m,位于侏罗花岗岩与石炭系可溶岩接触部位。

2.2 杨村子研究区

本子研究区共布置地球物理勘探线 10 条,圈定地球物理异常 17 处,该地段测线地处向斜轴部地段,基岩为石磴子组灰岩与壶天群泥灰岩、白云质灰岩,地下

水向斜轴部汇合导致,均推断为溶(土)洞引起;共布置钻探 9 个,其中见溶洞钻孔 5 个,溶蚀现象钻孔 3 个,平均线性溶蚀率为 89.9%,纵向单孔溶洞厚度最大的钻孔为 ZK8-1,溶洞厚 8.9 m。

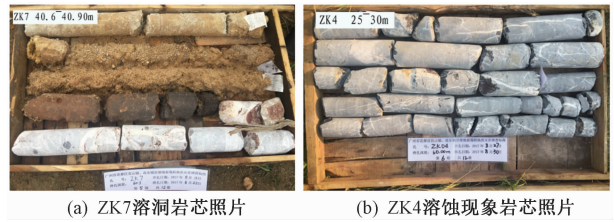


图 4 瓦窑塘、塘贝子研究区钻孔岩芯照片
Fig.4 Borehole core photos of Wayaotang and Tangbei study area



图 5 杨村子研究区钻孔岩芯照片
Fig.5 Borehole core photos of boreholes in Yangcun study area

2.3 西向庄子研究区

本子研究区共布置地球物理勘探线 10 条,圈定地球物理异常 16 处,该地段测线地处背斜轴部地段,基岩为石磴子组灰岩与壶天群泥灰岩、白云质灰岩,均推断为溶(土)洞引起;共布置钻探 5 个,其中见溶洞钻孔 5 个,平均线性溶蚀率为 100%,纵向单孔溶洞厚度最大的钻孔为 ZK25-1,溶洞厚 4.8 m。

2.4 溶洞纵向发育特征

将研究区钻孔按 5 m 分段分别计算标高段溶蚀率,其中 -15 ~ -10 m 段为岩溶最发育段,岩溶率大于 20%,其次 -25 ~ -20 m、-10 ~ -5 m 段为岩溶次发育段,岩溶率介于 3% ~ 20% 之间,-25 m 以下岩溶发育弱,仅见 ZK25-1 最大深度标高 -33.88 m,岩溶厚度 0.3 m,因此,研究区属于岩溶强发育区。根据不同标高段溶洞发育厚度占总溶洞厚度的比例见图 7。

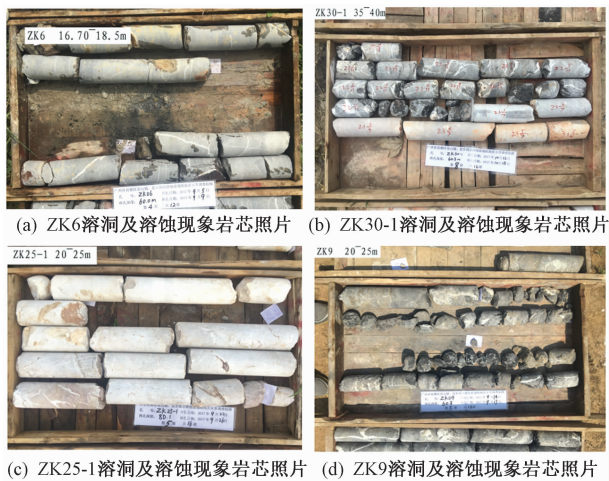


图 6 西向庄子研究区钻孔岩芯照片
Fig. 6 Borehole core photos of boreholes in West Zhuangzi study area

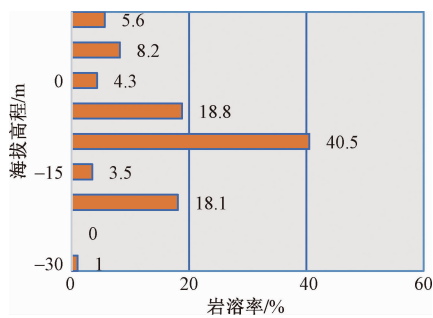


图 7 不同标高段岩溶情况
Fig. 7 Karst rate of different elevation sections

3 岩溶分布规律及成因

通过上述岩溶发育情况,可以看出,研究区内揭露的溶洞主要发育在杨庄子研究区和向西庄子研究区及其附近。根据岩溶揭露情况,分析其形成规律与主要与地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水及人类工程活动特征有关^[9-13,15-17]。

3.1 岩溶与地形地貌的关系

研究区岩溶主要发育在南部地势较低地带,并且随着地势低洼,溶洞发育数量及厚度逐渐增加,而从三个子研究区上看,岩溶发育程度瓦窑塘、塘贝子研究区 < 杨庄子研究区 < 西向庄子研究区,而地势则相反。

西向庄子研究区揭露有溶洞的钻孔为 ZK3、ZK6、ZK9、ZK25-1、ZK30-1,其中 ZK25-1 为低洼地带,岩溶最为发育,单孔溶洞厚度达 4.8 m。杨庄子研究区,揭露有溶洞的钻孔为 ZK5、ZK11、ZK9-1、ZK8-1、

ZK12,其中 ZK8-1、ZK9-1 为低洼地带,岩溶最为发育,单孔溶洞厚度为 8.9 m。瓦窑塘、塘贝子研究区揭露有溶洞的钻孔为 ZK4、ZK7、ZK19,其中 ZK19 为低洼地带,岩溶最为发育,单孔溶洞厚度为 3.9 m。根据相似地质环境原则,剔除非相似地质环境钻孔后,分别作三个子区岩溶随地势变化规律如图 8,可见岩溶发育程度与地势大体上呈负相关关系。由于低洼地带,为地下水的径流区或排泄区,地下水流量较大,地下水中的可溶介质较为丰富,岩溶更为发育。

3.2 岩溶与岩性的关系

可溶岩的存在是岩溶发育的必要条件^[5-14]。研究区的可溶岩为石炭系下统石蹬子组的灰岩,壶天群灰岩、白云质灰岩、大理岩等。本次研究中 ZK12、ZK19-1 及 ZK19-2 等揭露的可溶岩为壶天群含灰质粉晶白云岩,岩溶发育较弱;而 ZK8-1、ZK25-1 及 ZK9 等揭露的可溶岩为石蹬子组含生屑泥晶灰岩,由少量生物碎屑和微晶方解石基质组成,岩溶很发育。可见,石蹬子组地层岩溶发育较壶天群地层好。

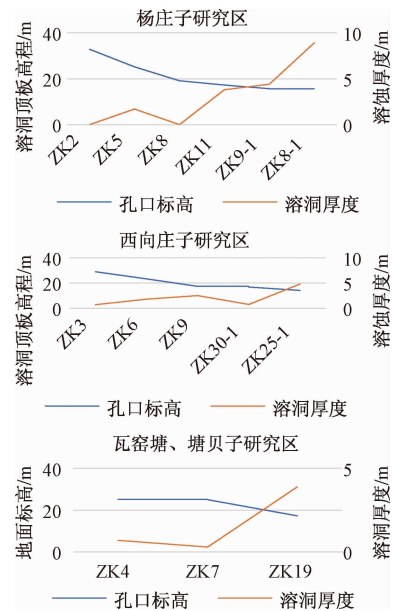


图 8 不同研究子区岩溶发育随地面标高变化情况

Fig. 8 Variation of karst development with ground elevation

根据分别采取溶洞发育好及差状态下的灰岩进行灰岩化学分析,分析结果见表 1。

根据测试结果,作 Ga^{2+} 散点图,如图 9,由图可知,随着 Ga^{2+} 的增加,岩溶发育程度越高,而 Ga^{2+} 的增加意味着灰岩含量较高,白云岩含量的相对减少,由此也验证石蹬子组灰岩岩溶更为发育。

表 1 灰岩化学分析测试结果一览表

Table 1 List of chemical analysis and test results of limestone

编号	岩溶发育	取样深度/m	SO ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	Cl	Bao	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O
ZK09-01	好	19.60~20.00	0.99	47.92	9.93	0.01	0.002 6	0.002 7	4.28	2.33	0.444	0.026	0.625	0.056
ZK05-01	好	18.80~19.30	0.088	50.37	0.789	0.009	0.002	0.0015	0.866	1.66	4.26	0.036	0.223	0.076
ZK05-02	好	24.70~25.00	0.555	50.67	0.6	0.011	0.001 9	0.001 6	0.953	1.58	3.91	0.028	0.255	0.073
ZK25-1-05	好	48.00~48.40	0.739	50.91	0.77	0.014	0.001 4	0.001 6	0.426	2.53	1.29	0.017	0.112	0.05
ZK03-01	好	18.10~18.20	0.03	51.23	0.489	0.014	0.003	0.001 9	1.95	0.572	2.72	0.025	0.698	0.065
ZK07-01	好	39.15~39.45	0.025	53.03	0.182	0.013	0.006 4	0.000 98	0.357	0.243	3.22	0.093	0.096	0.034
ZK06-01	好	18.50~19.00	0.018	53.66	0.154	0.011	0.000 8	0.001	0.257	0.393	2.81	0.007 5	0.069	0.055
ZK25-1-03	好	36.40~36.80	0.025	54.81	0.073	0.011	0.000 72	0.000 93	0.095	0.317	0.481	0.008 3	0.028	0.055
ZK19-01	好	17.00~17.20	0.012	54.85	0.085	0.001	0.001 2	0.001 3	0.33	0.459	0.292	0.011	0.057	0.053
ZK11-01	差	22.60~22.75	1.28	31.98	2.13	0.011	0.005 6	0.002 6	1.93	1.74	14.4	0.065	0.353	0.073
ZK19-2-02	差	48.50~48.75	0.024	34.84	0.161	0.015	0.005 7	0.001 2	0.103	15.77	0.884	0.013	0.032	0.087
ZK19-2-01	差	16.30~16.60	0.019	35.85	0.313	0.01	0.001 3	0.001 9	0.296	6.74	11.7	0.016	0.074	0.046
ZK08-02	差	33.05~33.40	1.64	41.2	2.14	0.011	0.007 4	0.001	4.55	0.886	13.46	0.074	0.982	0.161
ZK08-01	差	16.50~16.80	1.58	41.43	2.26	0.011	0.006 9	0.005 1	4.84	0.999	12.97	0.08	1.09	0.162
ZK08-04	差	55.25~55.65	2.2	42.47	10.58	0.012	0.005 8	0.004 4	4.28	0.75	12.86	0.04	1.01	0.11
ZK10-01	差	50.35~50.65	0.349	51.33	0.369	0.01	0.002 1	0.001 8	0.883	0.524	4.95	0.015	0.247	0.073
ZK10-03	差	28.40~28.85	0.297	52.07	0.353	0.012	0.001 1	0.001 4	0.601	0.525	4.26	0.012	0.161	0.055
ZK02-03	差	37.00~37.20	0.016	52.23	0.27	0.009	0.002 3	0.002 4	0.725	2.27	1.84	0.006 1	0.148	0.065
ZK02-01	差	23.00~23.10	0.026	53.32	0.318	0.007	0.002 9	0.001 1	0.641	0.404	2.01	0.13	0.221	0.048

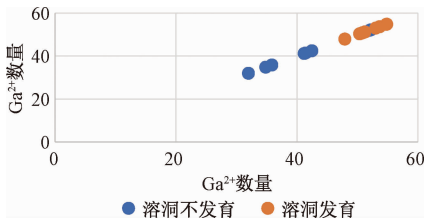


图 9 Ca²⁺ 与研究区岩溶的关系

Fig.9 Relationship between Ca²⁺ and karst in the study area

侵入岩周围岩层破碎,地下水流通性强,有助于岩溶的发育,例如瓦窑塘、塘贝子研究区中 ZK7 与 ZK19,位于侏罗纪花岗岩附近,均揭露有溶洞。

覆盖层对岩溶发育也由总要影响。研究区覆盖层为“上黏下砂”结构,致使砂土中的地下水具有弱承压性,且砂土具有良好的导水性,直接覆盖在可溶岩上,通过可溶岩的裂隙与岩溶水联通,为岩溶提供了良好的水文条件。

3.3 岩溶与地质构造的关系

研究区的构造主要有断裂和褶皱,褶皱轴部受应力集中,节理裂隙十分发育,岩石相对破碎,地下水流通性较好,岩溶较为发育。断裂除了可以使岩层破碎产生裂隙外,也增加了地下水的流动性及可溶岩与地下水的接触面积,加剧了岩溶发育^[7,11-12]。例如瓦窑

塘、塘贝子研究区中 ZK30-1、ZK3,位于两地层交界部位,最大岩溶厚度 0.75 m;瓦窑塘、塘贝子研究区中 ZK9、杨庄子研究区中 ZK11、ZK12,位于褶皱轴部,最大岩溶厚度为 3.8 m;瓦窑塘、塘贝子研究区中 ZK9、ZK25-1、杨庄子研究区中 ZK8-1、ZK9-1、ZK5,位于褶皱轴部与断裂交接部位,最大岩溶厚度 8.9 m。

表 2 不同构造部位钻孔岩溶发育

Table 2 Karst development at different structural positions

钻孔编号	构造位置	岩溶发育特征
ZK30-1、ZK3	地层界线	岩溶发育,岩溶厚度 0.7~0.75 m
ZK12、ZK11、ZK6	褶皱轴部	岩溶较为发育,岩溶厚度 0.7~3.8 m
ZK8-1、ZK9-1、ZK5、ZK25-1、ZK9	褶皱轴部或断裂极其交汇附近	岩溶最为发育,岩溶厚度 1.7~8.9 m

3.4 岩溶与地下水的关系

岩溶与地下水运动有密不可分的联系,是岩溶形成的主要动力^[15-16]。地下水受地形的控制,研究区北部与丘陵地带接触部位为地下水补给区,岩溶发育较弱,主要以溶蚀沟槽为主,埋藏浅,规模小,多以溶蚀裂缝、沟槽为主;补给区向南为径流区,岩溶发育逐渐增强,地下水埋深浅,流通性大,主要以水平溶洞、暗河为主(图 2)。

地下水水质对岩溶发育有重要影响,一般酸性地

下水条件下,岩溶发育更为强烈。研究区水文地质条件复杂,不同部位的地下水环境差异特别大,例如分别在岩溶十分发育的钻孔 ZK8-1 和岩溶发育较弱的钻孔 ZK19-1 取水样,进行测试,测试结果如表 3。

表 3 ZK8-1、ZK19-1 钻孔取水样测试结果平均值

Table 3 Average test results of zk8-1 and zk19-1

borehole water samples

钻孔 编号	PH	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	岩溶发 育情况
ZK19	7.37	6.23	8.42	14.2	52.6	0.625	210.5	9.29	弱
ZK8	6.72	10.36	8.69	6.76	148.2	129	202.1	5.08	强

测试结果表明,酸性条件下,岩溶发育较为强烈,碱性条件下,岩溶发育较为薄弱,甚至不发育。

3.5 岩溶与人类工程活动的关系

人类活动的影响,如矿山开采、新修排水渠、开挖鱼塘、地上及地下工程施工等、地表水库蓄水、灌溉、输水管渠渗水,地面挖水积水等增强地下水的补给,改变了地表水的自然流态和地表水与地下水的水力联系。据调查,研究区工业发展较强,人类工程设施建设、生产、生活中大量抽取地下水,呈地表河水补给地下水,出现明显的地下降水漏斗,加快了径流区水动力变化,引起水动力条件的改变,使地下水排泄增强,促进了岩溶的发育。

4 结论

(1)研究区属于岩溶强发育区,其发育受地层、地质构造、地下水、地形地貌等因素控制,人类工程活动促进了岩溶的发育。

(2)标高控制的岩溶纵向发育。根据本次调查,研究区主要发育埋藏型岩溶,纵向上岩溶主要发育在-15~-10 m 标高段,并以该标段为中心,向上下两边岩溶发育强度逐渐降低,向上至土、岩界面,向下可见岩溶最深标高-33.88 m。

(3)地形地貌控制岩溶横向发育。研究区为堆积地貌中的冲、洪积阶地地貌,三个子研究区总体地势北高南低,在相似地质环境下,随着地势的低洼,岩溶发育强度越大,岩溶发育强度与地势呈负相关关系。

(4)可溶岩控制岩溶发育强度。可溶岩控制了岩溶的发育程度及范围,研究区分布有厚层状的可溶岩,在地质环境条件相似的情况下,可溶岩中的 Ca²⁺ 含量越高,意味着碳酸盐岩中灰质成分越高,岩溶愈发育。

参考文献:

[1] 郑小战,黄健民,李德洲. 广花盆地南部金沙洲岩

溶演变及环境特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 138-143. [ZHENG X Z, HUANG J M, LI D Z. Karst evolution and environmental features in Jinshazhou in the southern Guangzhou-Huadu basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(1): 138-143. (in Chinese)]

[2] BENSON RICHARD C. Assessment and long term monitoring of localized subsidence using ground penetrating radar [M]. BECKB F, WILSON W L. Proceedings of the 2nd Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of Karst. Orlando: A A Balkema Publishers, 1987: 61-170.

[3] ZHANG X F, HAO W J, ZHANG Q, et al. Development of optical fiber strain monitoring system based on BOTDR [M]. CUI J P, ZHANG Y, WU J. Proceedings of 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Washington: IEEE PRESS, 2011: 38-41.

[4] 骆荣, 郑小战, 张凡, 等. 广花盆地西北部赤坭镇岩溶发育规律[J]. 热带地理, 2011, 31(6): 565-569. [LUO R, ZHENG X Z, ZHANG F, et al. Study of karst development rule in chini town in northwest Guanghua basin [J]. Tropical Geography, 2011, 31(6): 565-569. (in Chinese)]

[5] 房浩, 李巧灵, 雷晓东, 等. 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 153-160. [FANG H, LI Q L, LEI X D, et al. Applicability of geophysical survey methods for the main controlling factors of deep covered karst collapse in plain areas [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(1): 153-160. (in Chinese)]

[6] 李锦飞, 李人厚. 瑞利波勘探技术的发展与应用[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2): 122-126. [LI J F, LI R H. Development and application of rayleighwave prospecting technology [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2): 122-126. (in Chinese)]

[7] 史栾生, 陈敬德. 广花盆地地面塌陷成因与防治[J]. 中国岩溶, 1996: 73-78. [SHI L S, CHEN J D. Genesis and preventive measure of surface collapse in Guanghua basin [J]. Carsologica Sinica, 1996: 73-78. (in Chinese)]

[8] 黄健民, 郑小战, 陈小月, 等. 广州金沙洲广州大学附属实验学校地面沉降形成机理研究[J]. 热带地理, 2012, 32(4): 338-343. [HUANG J M, ZHENG X Z, CHEN X Y, et al. Formation

- mechanism of geological hazard of ground subsidence in experimental school attached to Guangzhou university[J]. Tropical Geography, 2012, 32(4): 338 - 343. (in Chinese)]
- [9] 苏扣林, 黄永贵, 郑小战. 广州市荔湾区大坦沙岩溶地面塌陷成因及其稳定性评价[J]. 热带地理, 2012, 32(2): 167 - 172. [SU K L, HUANG Y G, ZHENG X Z. Karst ground subsidence and stability evaluation for datansha, Guangzhou [J]. Tropical Geography, 2012, 32(2): 167 - 172. (in Chinese)]
- [10] 郭宇, 黄健民, 周志远, 等. 广东广州市白云区金沙洲地区地质灾害现状及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 100 - 104. [GUO Y, HUANG J M, ZHOU Z Y, et al. Geological hazard situation and control countermeasures in Jinshazhou area, Baiyun district of Guangzhou City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 100 - 104. (in Chinese)]
- [11] 骆荣, 郑小战, 易顺民. 广州花都区赤坭镇岩溶地面塌陷地质灾害现状及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 72 - 75. [LUO R, ZHENG X Z, YI S M. Current situation and prevention of karst surface-collapse geological disaster in Guangzhou Huadu district[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(1): 72 - 75. (in Chinese)]
- [12] 黄健民, 郑小战, 胡让全, 等. 广州金沙洲岩溶地面塌陷灾害预警预报研究[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 421 - 432. [HUANG J M, ZHENG X Z, HU R Q, et al. A study of warning and forecasting of karst collapse geological disaster in Jinshazhou of Guangzhou[J]. Geoscience, 2017, 31(2): 421 - 432. (in Chinese)]
- [13] 陈小月, 黄健民, 卢薇. 基于 FEFLOW 的广州金沙洲地区地下水流场数值模拟研究[J]. 地下水, 2014, 36(4): 4 - 7. [CHEN X Y, HUANG J M, LU W. Numerical simulation study of groundwater flow based on FEFLOW software in Jinshazhou of Guangdong Province[J]. Underground Water, 2014, 36(4): 4 - 7. (in Chinese)]
- [14] 张永定, 张澄博, 李洪艺, 等. 广州市西北区岩溶分布规律浅析[J]. 热带地理, 2011, 31(3): 257 - 261. [ZHANG Y D, ZHANG C B, LI H Y, et al. Distribution characteristics of karst in northwestern Guangzhou[J]. Tropical Geography, 2011, 31(3): 257 - 261. (in Chinese)]
- [15] 张宽, 唐朝晖, 柴波, 等. 薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 167 - 174. [ZHANG K, TANG Z H, CHAI B, et al. Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 167 - 174. (in Chinese)]
- [16] 廖康, 吴益平, 郭进雪, 等. 湖北武汉市三环区岩溶地面塌陷发育规律及危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, (29)2: 78 - 85. [LIAO K, WU Y P, GUO J X, et al. Development law and risk assessment of karst ground collapse in the Third Ring Road of Wuhan City, Hubei Province [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2018, (29)2: 78 - 85. (in Chinese)]
- [17] 江思义, 吴福, 刘庆超, 等. 岩溶地区建设用地质环境适宜性评价——以广西桂林规划中心城区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 84 - 93. [JIANG S Y, WU F, LIU Q C, et al. Suitability evaluation of construction land development in karst area: taking City planning center of Guilin as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 84 - 93. (in Chinese)]
- [18] 李国和, 荆志东, 许再良. 京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 90 - 94. [LI G H, JING Z D, XU Z L. A discussion of the correlation between land subsidence and groundwater level variation along the Jinghu high speed railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 90 - 94. (in Chinese)]
- [19] 王建秀, 杨立中. 覆盖型岩溶区土体塌陷典型数学模型的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(3): 54 - 59. [WANG J X, YANG L Z. Study of the cap soil at the covered karst area by the typical collapse mathematical models [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(3): 54 - 59. (in Chinese)]
- [20] 王泽君, 周宏, 罗明明, 等. 南方小型岩溶流域与非岩溶流域的释水过程及径流组分差异[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 27 - 32. [WANG Z J, ZHOU H, LUO M M, et al. Variations in discharge processes and runoff components between small karst watersheds and non-karst watersheds in Southern China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 27 - 32. (in Chinese)]