

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.18

广西桂林市规划中心城区岩溶发育特征及分布规律

江思义, 吴 福, 刘庆超, 李海良, 吴莹莹

(广西壮族自治区地质环境监测总站, 广西 桂林 541004)

摘要: 弄清规划中心城区岩溶发育特征及其分布规律, 对于岩溶地区规划中心城区建设布局, 特别是建设场地工程地质勘察具有重要的指导意义。桂林市规划中心城区, 属于岩溶发育分布区。论文基于前人研究成果, 采用资料收集、地面调查、高密度电法及钻探相结合的方法, 开展桂林市规划中心城区岩溶地质调查, 分析了岩溶发育类型与岩性及岩性组合、水文地质单元、埋藏深度及地质构造的关系, 总结提出了桂林市规划中心城区岩溶发育特征及分布规律。研究表明, 桂林市规划中心城区岩溶发育主要以浅表的融县组、桂林组为主, 在褶皱轴部, 或断层影响带内, 在垂直节理裂隙和缓倾斜层面裂隙组成的裂隙系统中, 岩溶发育较强; 可溶岩与非可溶岩接触地段岩溶发育强; 在低平谷地中的分水岭处岩溶发育亦较强烈; 在水文网长期摆动的地段地面以上岩溶发育程度强烈。

关键词: 桂林市规划中心城区; 岩溶地质调查; 发育特征; 分布规律

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0120-09

Karst development characteristics and distribution in Guilin urban planning center of Guangxi Zhuang Autonomas Region

JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, LI Hailiang, WU Yingying

(The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring
Station, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Understand karst development characteristics and distribution of urban planning center, center for karst region planning urban construction layout, especially in the construction site engineering geological investigation has important guiding significance. The central urban area of Guilin city planning belongs to the karst development and distribution area. Paper based on the predecessors' research results, using the data collection, the ground survey, the combination of high density resistivity method and drilling method, city planning and city center karst geologic survey, analyzes the types of karst development and lithology and lithologic combination, hydrogeological unit, buried depth and the relationship between the geological structure, summarizes proposes the Guilin karst development characteristics and distribution of urban planning center. The researches show that the karst development in the area is mainly composed of the shallow D_3r and D_3g . The karst development is strong such as in the fissure system of vertical joint fissure, slanted plane, the fold axis, the fault zone, contact surface of soluble and non-soluble rock, a watershed in a low valley, and above ground in the long-period swing of the hydrologic network.

Keywords: Guilin urban planning center; karst geological survey; development characteristics; regularity of distribution

收稿日期: 2018-05-20; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114022101); 广西壮族自治区国土资源厅、桂林市人民政府地质调查项目(桂国土资办[2014]70号)

第一作者: 江思义(1987-), 男, 湖北天门人, 硕士, 工程师, 主要从事地质调查和岩土工程勘查与设计工作。E-mail: 370333108@qq.com

通讯作者: 吴 福(1972-), 男, 广西北海人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质环境监测、地质灾害防治工作。E-mail: 404630357@qq.com

0 引言

桂林市是桂湘黔粤交界区域中心城市,属于中亚热带湿润季风气候型溶蚀侵蚀区,是典型的喀斯特岩溶地貌。前人对区内的研究多集中于岩溶塌陷的评价与研究,冯佐海等^[1-2]对区内岩溶塌陷成因类型与时空分布特征进行了研究,归纳了桂林市岩溶塌陷的成因类型,并分析出塌陷与地质构造的关系;万志清等^[3]分析了桂林市岩溶地面塌陷的成因机制和分布规律,提出了对应的防治措施;肖明贵^[4]揭示了桂林岩溶发育规律和地面塌陷分布规律,并对岩溶塌陷地质灾害危险性进行了多目标二级模糊综合预测。而针对桂林岩溶的分布特征和发育规律的研究较少,仅吴枝坦^[5]在1986年进行过初步探讨,其时间相隔较远,且研究成果精度相对较低。随着全国 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 1:5万岩溶地质调查的完成^[6],岩溶地质调查及评价方法也得到了大家的广泛探讨。罗以达等^[7]早在2009年已经对城市岩溶地质调查及评价方法进行了探讨;夏日元等^[8]在2017年总结了南方岩溶地区1:5万水文地质环境地质调查的技术要点;缪世贤等^[9]在2017年完成了徐州市的岩溶地质调查并对其发育特征进行了分析。基于桂林市城市规划建设对岩溶地质调查的需求,充分利用前人资料,参考《1:50 000 岩溶地面调查规范(送审稿)》,开展了桂林城区相关地质调查工作,有效提高了桂林市岩溶地质特征与岩溶塌陷问题的研究程度。

1 岩溶地质调查

1.1 岩溶地质资料收集利用

系统收集岩溶区及周边地层岩性、地质构造、地下河及溶洞分布、岩溶塌陷、岩溶水开采井等详细资料,将其统一投在同一底图上,编制岩溶地质草图,反映岩溶区的分布范围、岩溶发育程度及岩溶水开采强度、分析存在的主要问题,为进一步的工作部署提供依据^[10]。

1.2 钻孔资料筛选整理

先根据钻孔资料的完整性及可靠程度,筛选出有效钻孔,包括其孔号、坐标、孔口高程、孔深、基岩埋深、分层描述、土工测试数据及抽水试验等指标,优先选择见基岩较深,揭露到溶洞或土洞且地层岩性不尽相同的钻孔。

再将筛选出来的钻孔坐标进行换算,投影到研究区的地理底图上,并综合考虑钻孔分布密度和精度等

因素,进一步取舍后形成研究区钻孔平面分布图,结合后期施工钻孔,构成了研究区基础数据库。

1.3 地面调查

1.3.1 裸露型岩溶地质调查

裸露型岩溶地质调查以1:50 000环境地质调查为主,以划分岩溶层组类型为重点,选择构造复杂的区段,分析不同岩组类型与岩溶发育特征,对典型喀斯特地貌,如溶洞、溶沟、漏斗等进行形态特征、成因等研究,基本查明研究区岩溶地质背景条件、岩溶地貌类型、分布特征及发育程度等。进而分析、判断相邻覆盖岩溶区的构造格架与碳酸盐岩地层的空间展布格局。

1.3.2 覆盖型岩溶地质调查

对于覆盖型岩溶区,根据岩溶发育程度、人口密度、研究程度以及城市功能规划等,将研究区分为一般研究区和重点研究区。一般研究区,主要通过相关可利用资料进行分析,并配合一定量的实物工作进行调查评价;对于地面塌陷较多、人口密集、地下空间规划的重点研究区(主要为桂林市城区及临桂新区),在收集利用各类资料的基础上,还需采取遥感解译、地面调查、物探及钻探等相结合的方法进行调查评价。而对于新发生、具有代表性的岩溶塌陷点,需进行专项剖析。

2 勘探验证

物探是开展覆盖型岩溶调查的重要手段^[11],研究区采用物探的高密度电阻率法与钻探相结合的勘探手段,旨在查明隐伏岩溶区分布范围、覆盖层结构和厚度、基岩面起伏情况、裂隙及溶(土)洞等发育情况,揭露桂林规划中心城区岩溶地质情况。

2.1 岩土体地球物理特征分析

高密度电阻率法以岩、土导电性的差异为基础。对于岩溶地区,第四系覆盖层与基岩之间、完整基岩与不良地质体(溶洞、溶槽、断层破碎带、裂隙带等)之间存在明显的电性差异(如介电常数、电阻率等),第四系(Q_4)覆盖层电阻率(一般小于 $100 \Omega \cdot \text{m}$,若覆盖层干燥或含有砂砾石其电阻率可达 $n \times 10^2 \Omega \cdot \text{m}$)、基岩裂隙和岩溶发育带的电阻率($n \times 10 \sim n \times 10^2 \Omega \cdot \text{m}$)比完整基岩电阻率($n \times 10^2 \sim n \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$)低,从而形成了不同的电性界面,具备了开展高密度电法勘探的良好地球物理前提。

2.2 电阻率探测与钻探验证应用实例

在地质调查和综合分析的基础上,用高密度电阻率法进行探测,对电阻率探测异常辅以钻探验证。

图 1 为桂林市象山区万福路沿路一条高密度电阻率物探线,测线分七段,总计长 4 600 m,其中 B_1 段长 1 460 m, B_2 段长 580 m, B_3 段长 560 m, B_4 段长 410 m, B_5 段长 580 m, B_6 段长 730 m, B_7 段长 280 m,测线方向大体由西向东,最小电极距 5 m。

其中 B_4 段测线的第一电性层深度较有起伏,埋深 4 ~ 16 m 不等,电阻率值在 10 ~ 70 $\Omega \cdot m$,为相对低阻层,推断为黏土层, B_4 测线 125 m 附近地层厚度最大,可达 16 m 左右;第二电性层深度在 4 m 以下,电阻率值在 100 ~ 5 300 $\Omega \cdot m$,为相对高阻层,推断地层为泥盆系(D),岩性为灰岩。据此测线推测有 1 处断裂破

碎区,即位于 B_4 线的 100 ~ 330 m 段,电阻率值相对完整围岩较低,说明该区域含水率高,为富水区域。另外,推测有 3 处溶洞发育, R_4 、 R_5 、 R_6 在视电阻率断面上呈低阻圈闭状,说明为含水溶洞,其中,推测溶洞 R_4 、 R_5 、 R_6 顶板厚度分别为 10 m、33 m、8 m。

水文地质钻孔 BZK13 位于 B_4 测线 210 m 桩号附近,钻孔深度为 40 m。根据钻孔资料显示:0 ~ 1.0 m 为人工填土,1 ~ 6.5 m 为第四系黄褐色黏土,6.5 ~ 40 m 下伏基岩岩性为灰岩,节理裂隙十分发育,其中在 10.8 ~ 15.0 m 处揭露溶洞。物探推测成果与钻探揭露地层结构和岩溶发育情况基本吻合。

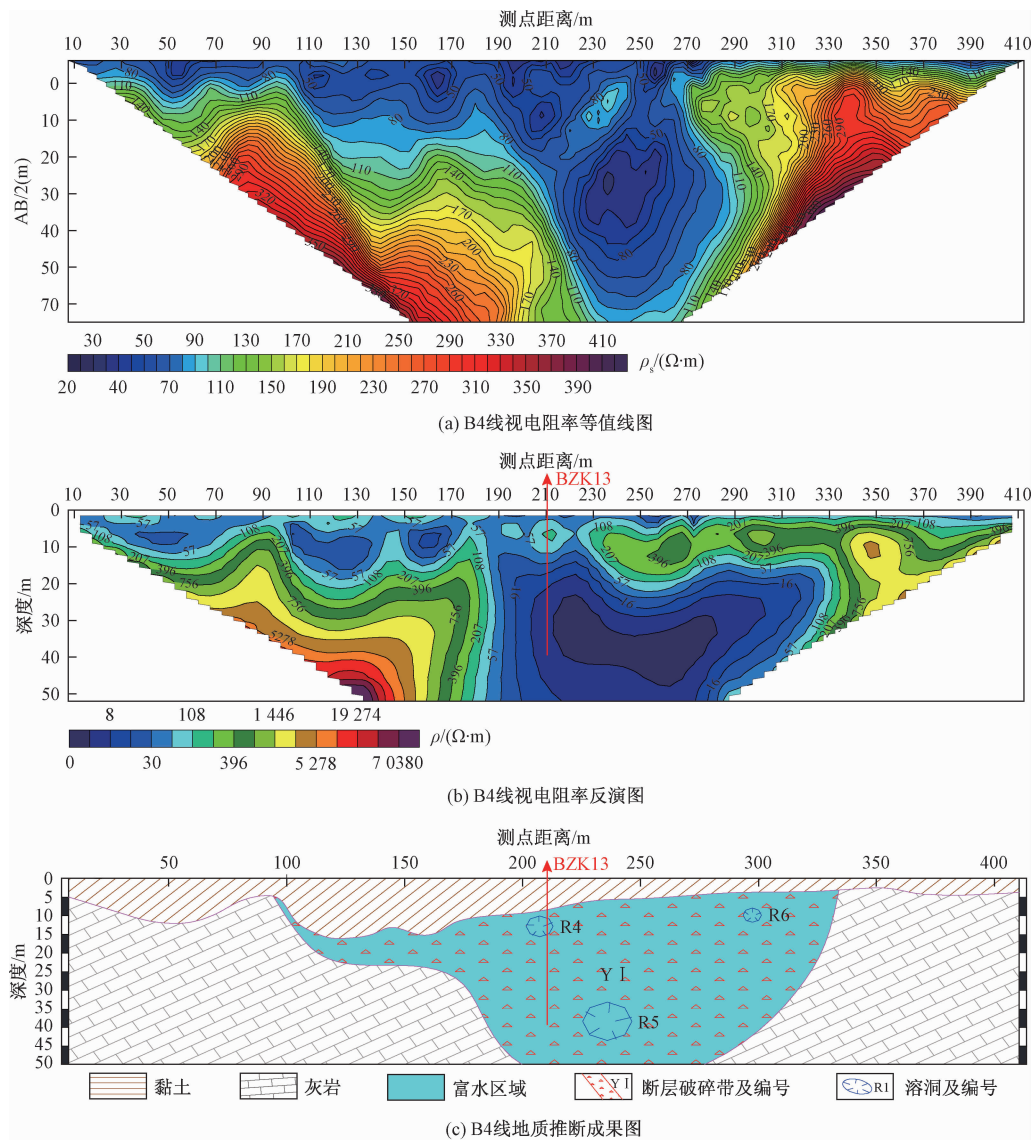


图 1 桂林市万福路隐伏岩溶区高密度电阻率法综合解译

Fig. 1 Comprehensive interpretation of high-density resistivity for hidden karst in Wanfu Road of Guilin

3 岩溶发育特征分析

3.1 岩溶发育类型

根据区内岩溶出露情况,将岩溶发育类型划分为裸露型、覆盖型及埋藏型三类(图2)。其中裸露型主要分布于漓东一带和西部大皇山、大风山一带,东南部的大山头一带。上覆第四系覆盖层厚度小于5 m,分布地层泥盆统至石炭统灰岩、白云质灰岩,其主要表现为溶洞(隙)、溶蚀裂隙、洞口岩溶堆积物钙华、钟乳石等,组成了桂林山水的主要岩溶形态。覆盖型主要分布于桂林市区北自乌石村南至雁山之间的地带,北自庙岭南至横山一带,上覆第四系松散沉积层地势较平坦。上覆第四系厚度1~55 m,矮山塘、瓦窑、坪山一带覆盖层厚度最大,达50 m以上,由漓江冲洪积层组成。覆盖层厚度一般在1~15 m,翻山底一带覆盖层厚度最大,最深达15 m,由第四系溶余堆积黏土层构成。

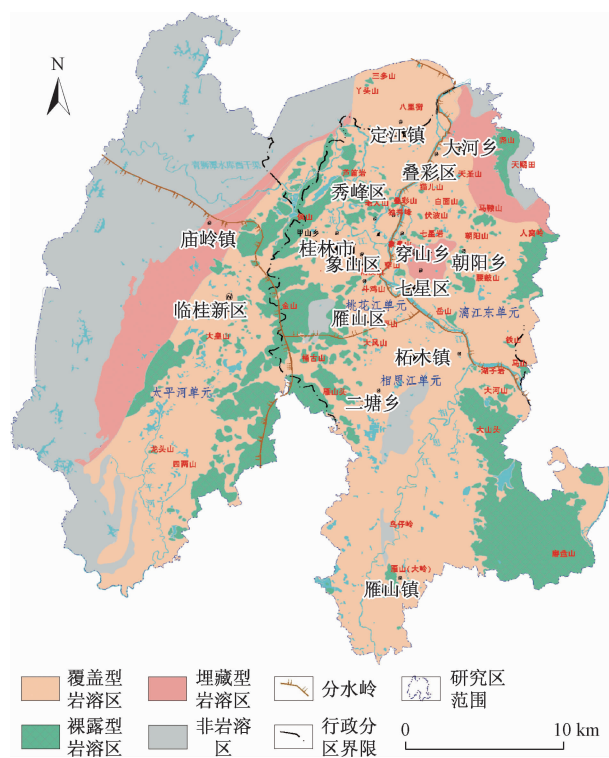


图2 桂林市中心城区可溶岩分布及水文地质单元划分图

Fig.2 Karst distribution and hydrogeological unit partition map of central city in Guilin.

研究区其他地段由残坡积成因的黏性土、含碎石黏性土组成,下伏地层石炭系下统-泥盆系可溶性碳酸盐岩地层均有分布,受构造断裂的影响,该地层节理裂隙发育,岩石受地下水活动影响,岩体中沿裂隙方向或

构造断裂带方向地下岩溶发育,剖面上表现为岩体中的溶槽、溶沟、岩溶地下河等发育明显。其地面多以岩溶洼地、岩溶塌陷等形式出现。埋藏型主要分布在桂林市区北部大河乡以东至尧山地区,以及临桂县城以西大部分地区。上部盖层为白垩系绿灰色页岩夹砂质页岩及少许粉砂岩,以及泥盆统砂岩、页岩,底部灰岩。地表表现主要为岩溶塌陷、岩溶洼地、岩溶漏斗等;地下表现形态主要为地下洞穴系统、地下溶潭、地下河、溶槽等现象。

3.2 岩溶发育控制因素关系

研究区岩溶形态类型多样,从典型的亚热带灰岩岩溶地貌一峰丛洼地、峰林谷地及伴生的大型洞穴、地下河,到分布最广的孤峰平原,及其具有典型意义的溶孔、溶隙,在研究区具有十分重要的水文地质意义。它们的形成,揭示了研究区特定的自然地理、地质背景、水文地质条件与岩溶发育的相互关系。岩溶发育的主要因素有以下三点:

(1) 岩性及岩性组合因素

研究区碳酸盐岩分为纯碳酸盐岩(灰岩、白云质灰岩、白云岩)和不纯碳酸盐岩。它们在矿物、化学成分、结构等方面,存在较大差异。其具体的岩溶层组见表1,不同碳酸盐岩岩性的组合和碳酸盐岩与非碳酸盐岩的组合对岩溶发育影响较大。

不同岩性的岩石组合,影响岩溶发育程度,如东岗岭组和桂林组下段,是以白云岩为主与灰岩的组合,岩溶发育强度中等。桂林组上段和东村组、融县组为纯灰岩的组合,岩溶发育程度强烈;英塘组和尧云岭组,灰岩中常含燧石条带或结核,且在中段夹有硅质岩、泥岩,岩溶发育较弱。碳酸盐岩酸不溶物含量不同,洞穴发育程度也不一样。如下石炭统尧云岭组含酸不溶物较多,岩性不纯。次为上泥盆统桂林组灰岩,含有少量酸不溶物,但氧化钙含量较英塘组高。中泥盆统东岗岭组主要是白云岩。以上泥盆统融县组灰岩质量纯,含杂质最少。

分析可知,东岗岭组遇洞率较高,说明平面分布密度高,遇洞孔的平均洞高虽低,但垂向上的密度同其他地层相近,而平均洞高,遇洞孔的平均总洞高及线洞率均是最低的。这说明,在白云岩中洞穴分布较均匀,而洞穴规模较小。

除岩性影响岩溶发育程度和形态特征外,碳酸盐岩与非可溶岩的沉积组合亦有很大的影响。研究区内碳酸盐岩与碎屑岩的沉积组合,按地质产状可分为两类,一类为厚度小而不纯的碳酸盐岩,夹于厚度大的碎屑岩地层中,且分布区域不同,形成的地貌不同。如分

布于勘察区北部、东部的尧云岭组和英塘组,组成低山丘陵地貌,岩溶发育程度较弱。分布于东区北部的英塘组灰岩,夹有泥岩或炭质灰岩,形成溶丘平原地貌,仅见小泉水出露,钻孔未遇溶洞;分布于中部及南部的尧云岭组和英塘组,地貌上为溶岭谷地或峰林、孤峰平原,由于地层中含炭、泥杂质和硅质结合或夹有硅质

岩、泥岩夹层,岩溶发育较弱,钻孔遇洞率及线洞率较低,但溶潭较多。另一类为沉积连续、厚度大、岩性纯、分布广的碳酸盐岩,大面积分布于研究区中部及南部的东岗岭组、桂林组、东村组、融县组、尧云岭组及英塘组中。峰丛耸立,峰林罗列,山中溶洞发育,平地泉潭出露,呈典型的岩溶景观。岩性及岩性组合的影响见表2。

表1 桂林市城市规划中心城区岩溶层组分类

Table 1 Classification of karst layers in Guilin

时代	岩溶层组	代号	主要类型	厚度/m	面积/km ²	占岩溶区的比例/%
石炭系	罗城组	C ₁ l	纯碳酸盐岩	>10	0.16	0.03
	黄金组	C ₁ h ₂	纯碳酸盐岩	77~126	36.27	6.01
		C ₁ h ₁		77~126		
		C ₁ l ₃		>71		
	鹿寨组	C ₁ l ₂	不纯碳酸盐岩	68~125	8.54	1.42
		C ₁ l ₁		30~442		
	船埠头组	C ₁ c	纯碳酸盐岩	95	32.54	5.39
	英塘组	C ₁ yt	不纯碳酸盐岩	0~279	54.58	9.05
	尧云岭组	C ₁ y	不纯碳酸盐岩	29~99	39.14	6.49
	五指山组	D ₃ w	纯碳酸盐岩	72~125	0.61	0.10
泥盆系	榴江组	D ₃ l	不纯碳酸盐岩	200~695	1.36	0.23
	融县组	D ₃ r ²	纯碳酸盐岩	524~1 219	161.48	26.75
		D ₃ r ¹	纯碳酸盐岩	141~658	17.36	2.88
	额头村组	D ₃ e	不纯碳酸盐岩	52~76	16.90	16.90
	东村组	D ₃ d	纯碳酸盐岩	486~492	132.49	21.96
	桂林组	D ₃ g ²	纯碳酸盐岩	174~256	65.22	10.81
		D ₃ g ¹	不纯碳酸盐岩	202~256		
	东岗岭组	D ₂ d	纯碳酸盐岩	124~173	0.76	0.13
	唐家湾组	D ₂ t	不纯碳酸盐岩	227~337	17.99	2.98
	信都组	D ₂ x	不纯碳酸盐岩	548	3.61	0.60

(2) 地下水因素

岩溶发育离不开水,且水要具有一定的侵蚀性和循环运动条件,即由构造运动产生的断层、裂隙、节理提供水运移的通道。同时,岩溶的发育应具有一定的气候、地形、土壤等自然地理背景。

研究区多年平均气温为 19.52℃,多年平均降雨量达 2 182 mm,这种自然气候条件对岩溶发育十分有利^[4]。研究区为一向斜构造盆地,盆地周边为中下泥盆统及下石炭统的碎屑岩组成的低山丘陵地形,构成一向斜汇水盆地,盆地中为东岗岭组至下石炭统大塘组连续沉积的碳酸盐岩,岩性主要为生物灰岩和灰岩、次为白云质灰岩和白云岩。其酸不溶物小于 3%,比溶解度 0.8~1.2。该向斜盆地又可分为 4 个小构造盆地,即桂林向斜盆地、临桂-太平单斜盆地、二塘-白芬单斜盆地和奇峰-枫林向斜盆地。这种特殊的水文地质结构场,为岩溶作用提供了极为有利的条件。

通过对研究区的水文地质调查,并结合前人资料对区内地下水系统进行研究,确定地下分水岭,将区内

分为四个水文地质单元,如图 2 所示,包括桃花江水文地质单元、漓江东岸水文地质单元、太平河水文地质单元和相思江水文地质单元。由于古水文网的影响,在低平谷地中的分水岭处岩溶发育亦较强烈,如临桂县城一带,为漓江与柳江的分水岭,岩溶发育比较强烈,遇洞率 52.17%,线洞率 7.03%,大于 7 m 的洞穴占洞穴总数的 10.53%。对各水文地质单元地下不同标高岩溶发育程度进行统计,得到地下不同标高岩溶发育程度曲线图见图 3。

(3) 地质构造因素

断层、裂隙及褶皱轴部破碎带,改变了地下水的径流条件,使岩溶水流形成后,就受到一定边界条件的约束,水动力作用加强。桂林的断裂系统较为复杂,有南北向、北东向及北西向三组。南北向断裂多产于背斜轴部,呈压性或压扭性,分布于分水岭附近。北东向断裂发育于西部,控制了峰林谷地的走向。北西向断裂多分布于东部及南部,常控制着河流及溪流的走向。东西向的构造裂隙也较发育,控制了峰林的排列方向。

表 2 岩溶发育特征表

Table 2 Karst development characteristics table

岩溶类型	分区特征	面积/ km ²	发育 程度	岩溶发育强度特征和指标值
纯碳酸盐岩溶区	地貌形态为孤峰、峰林平原及峰丛洼地、谷地等。出露地层有中泥盆统东岗岭组、上泥盆统桂林组与融县组、下石炭统尧云岭组等,其中尤以融县组的分布为最广,岩性以厚层状纯灰岩为主,白云岩、白云质灰岩亦有分布。溶洞、地下河、溶潭、落水洞、溶井、岩溶泉、塌陷等岩溶形态发育特别是溶洞的发育数量最多,规模最大,据溶洞调查资料,洞长大于 100 m 者占总数的 22%。地下岩溶发育呈管道状、网络状,岩溶发育不均一。	133.55	强烈	该区面积 133.55 km ² ,占研究区面积 15.39%,主要分布于市城区中部、七星区、象山区、柘木及临桂县城等。地层主要为融县组(D ₃ r)纯灰岩,次为桂林组(D ₃ g)灰岩,地层产状平缓,垂直节理发育,主要是峰林平原和孤峰平原地貌,在山地中,洞穴化程度较高,地下溶洞发育数量相对较多,较均匀,出露水点有溶潭、地下有网状岩溶管道。地下岩溶呈网状发育。石峰洞穴化程度 1 509.0~2 016.2 m/km ² ,面岩溶率 0.85~0.87,点岩溶率 3.73~4.50 个/km ² ,钻孔线岩溶率 7.47%~12.52%
		245.72	中等	该区面积 245.72 km ² ,占研究区面积 28.31%,分布于研究区中部庙岭、兰塘、岩口村、横山村、东村、唐家村、北东侧四联村、南洲村、东侧丫吉村、东南侧的苏家村、罗安村、兴隆村一带,地层主要为融县组(D ₃ r)、桂林组(D ₃ g)、东村组(D ₃ d)、唐家湾组(D ₂ t)、东岗岭组(D ₂ d)、灰岩、白云岩,呈北东向分布的单体构造或南北向分布的向斜翼部及背斜的轴部和翼部,地层产状平缓,垂直层面的节理发育,北东向断裂及北西向断裂发育,主要是孤峰平原和峰林平原地貌,水点主要以溶潭出露,山体中溶洞较发育,平原地面以下溶洞分布密度中等,不均一。各种岩溶个体形态均发育,地下岩溶以管道状发育为主。石峰洞穴化程度 214.7~773.4 m/km ² ,面岩溶率 0.37~0.79,点岩溶率 1.52~2.80 个/km ² ,钻孔线岩溶率 0.93%~4.74%
次纯碳酸盐岩溶区	地貌形态主要为洼地谷地及岩溶平原,出露地层有下石炭统尧云岭组,岩性为灰岩、白云岩、硅质岩、含燧石灰岩、泥灰岩、泥质灰岩,局部夹页岩等尚有溶洞、岩溶泉、溶井、塌陷等岩溶形态发育,但其数量少,以溶蚀裂隙、溶孔及小溶洞的发育为主,地下岩溶发育深度较浅,一般在标高 90 m 以上。局部见规模较大的溶洞。岩溶发育强度划分为中等、弱两个级别。	7.18	中等	该区面积 7.18 km ² ,占研究区面积 0.83%,分布于象山区、市郊官桥村一带,出露地层为尧云岭组(C ₁ y)灰岩,夹少量硅质岩、泥质透镜体,主要构成向斜轴部,呈孤峰平原地貌,钻孔遇洞率 40.79%,平均洞高 1.43 m,线溶洞率 4.72%。石峰洞穴化程度 145.5 m/km ² ,点岩溶率 0.82 个/km ² 。
		216.90	弱	该区面积 216.90 km ² ,占研究区面积 24.99%,分布于东南侧湖塘村至二塘乡、五塘村一带,西南庙岭镇至刘村、田基头一带,北侧定江镇等,多为被断裂破坏了一翼的向斜,出露为尧云岭组(C ₁ y)含硅质结核或条带灰岩,黄金组(C ₁ h)次纯灰岩,英塘组(C ₁ yt)灰岩夹含燧石灰岩、船头埠组(C ₁ c)燧石灰岩为峰林平原、孤峰平原地貌,山体中洞穴少而小,平地中有泉、潭出露,钻孔遇洞率低。石峰洞穴化程度 19.92~28.23 m/km ² ,点岩溶率 0.24~0.57 个/km ² ,钻孔线岩溶率 2.18%。

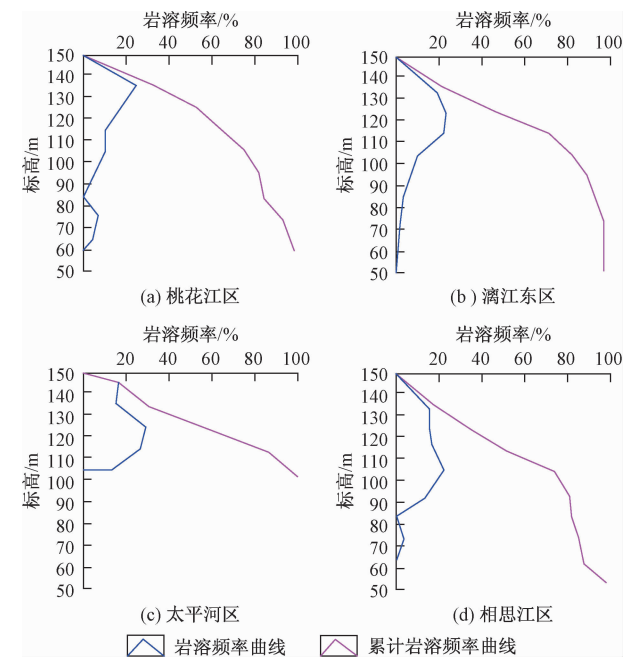


图 3 地下不同标高岩溶发育程度曲线图

Fig.3 Karst development of different elevation in underground

特别是向斜盆地中缓倾斜的层面裂隙和垂直节理裂隙系统构成的水循环系统,为水系密度的增大和地层渗透

性的增强,为溶蚀水与可溶岩的接触时间和接触面积,为山体的沿节理的溶离和崩塌,均创造了良好的环境。

研究区内,岩层褶皱宽缓,垂直节理发育,层面裂隙和垂直节理所结合的导水系统,易于接受大气降水的渗入,同时使水对层面裂隙有充分的溶蚀时间,故研究区层面溶洞甚为发育,如象鼻山洞穴。洞穴延伸方向,多追踪当地的两组节理,如穿山洞穴。典型的峰林地貌,常见于碳酸盐岩地层产状平缓的地区,研究区内,峰林区的地质倾角多在 15°以内,峰丛山区多在 20°以上。断层所造成的两侧岩石原生结构的破坏,使裂隙增多,裂隙面粗糙,导致了可溶岩的易溶,研究区内的溶洞多分布在断层带上。串珠状洼地或落水洞的分布,条形谷地的长轴方向,都和当地的断层或背斜轴部的裂隙发育有关,如长海谷地。以芦笛岩断裂为界,将研究区分为东、西两个区,得到地表溶洞发育方向与构造裂隙发育方向关系图如图 4 所示。

4 岩溶分布规律

由于区内水的溶蚀能力和水动力条件在三维空间上的差异、岩溶发育强度在垂直方向上(图 3)和平面图上(图 5)也具有明显的变化规律。在垂向上岩溶发育

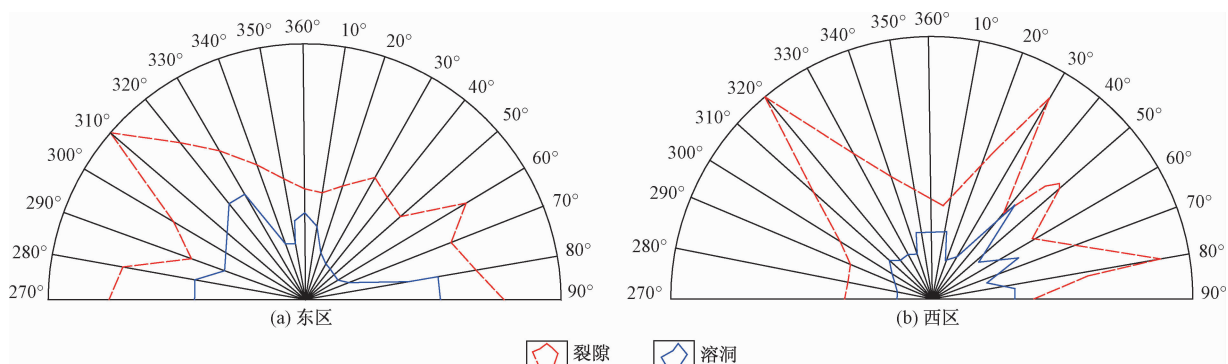


图 4 地表溶洞发育方向与构造裂隙发育方向关系图

Fig. 4 The development direction of karst caves and the development direction of structural fractures

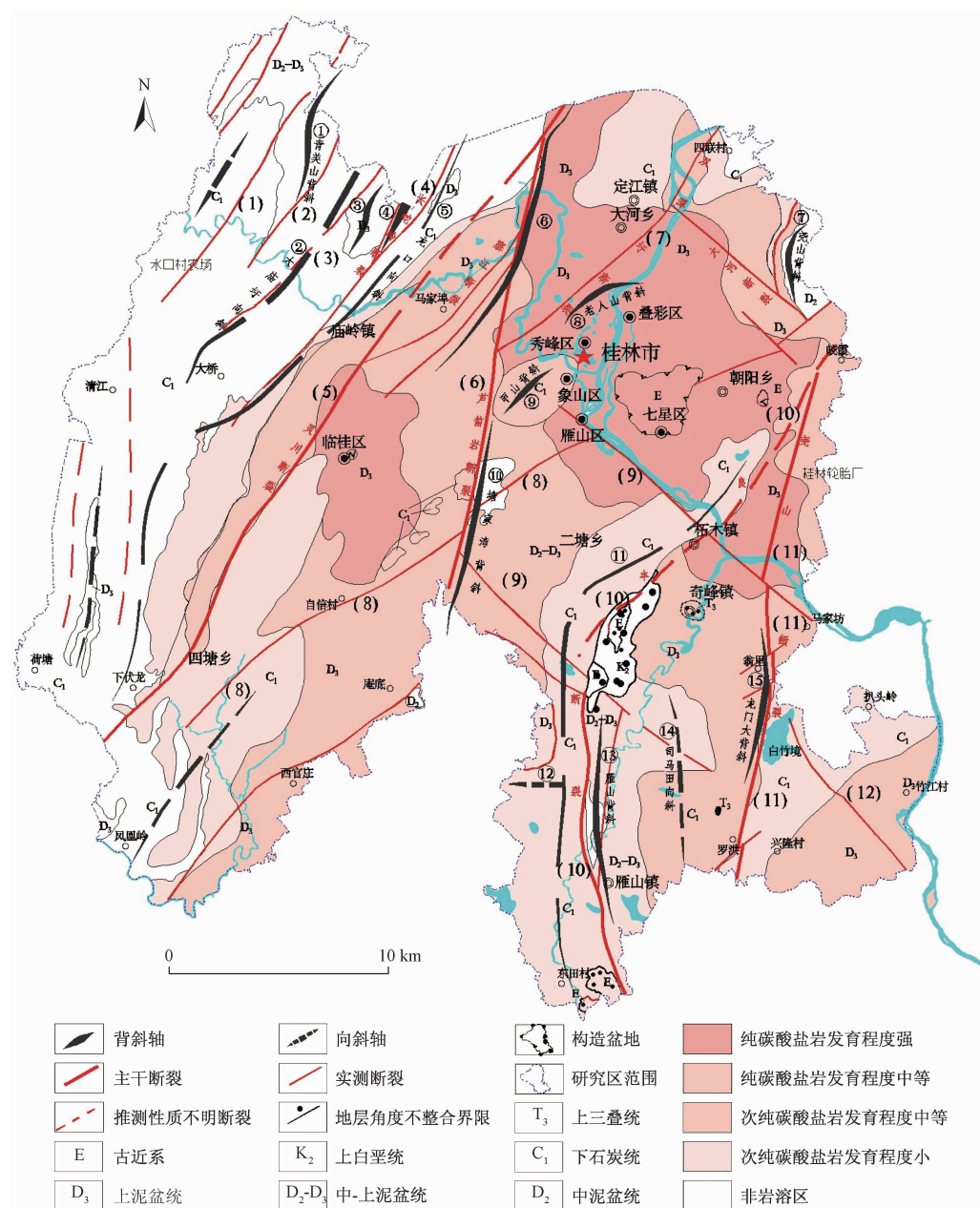


图 5 桂林市规划中心城区构造纲要及岩溶发育分区图

Fig. 5 Structure outline and karst development zoning of planning center in Guilin

强度由浅部向深度逐渐减弱;岩溶充填程度也由高到低,岩溶区与非岩溶区接触带岩溶发育强度大,据钻孔资料,垂直方向上可划分出3个不同岩溶发育带,即标高(基岩面标高)140~90 m 强烈岩溶发育带,90~50 m 中等岩溶发育带,50 m 以下弱岩溶发育带。从平面上看,桂林中心城区及临桂中心县城岩溶发育强度最大,中部峰丛洼地次之,东西两侧最弱,钻孔遇洞率分别为80.21%、58.93%、38.84%,线岩溶率分别为8.58%、6.75%、4.00%。从地下水补给区到排泄区,排泄区的水循环交替最频繁和强烈,岩溶发育强度最大,补给区岩溶发育强度较弱。

碳酸盐岩根据纯度、厚度及夹层(非碳酸盐岩)厚度,可分成纯碳酸盐岩和次纯碳酸盐岩两大类型;而根据石峰洞穴化程度、面岩溶率、点岩溶率和钻孔线岩溶率并结合其它岩溶现象,岩溶发育程度又分强烈、中等、弱三个级别,具体划分见图5、表2。

由图5分析研究区平面上的变化规律:北西和北东向两组斜交的张扭或张性断裂和构造裂隙控制着地下岩溶管道和溶槽的展布方向。褶皱轴部应力集中,岩石破碎节理裂隙发育、有利于岩溶发育。漓江是区内最低侵蚀基准面,它经历了溶蚀、下切、沉积、抬升和改道等一系列演变过程。漓江河道早期亦是地下水交替最频繁地区,岩溶发育强烈。根据钻孔资料统计,遇洞率、有水孔命中率均在90%左右。

5 结论

(1)桂林市规划中心城区以往地质调查及研究工作程度较高,充分收集整理前人研究资料,尤其是岩溶地质资料和钻孔资料,是开展桂林市规划中心城区岩溶地质调查研究工作的重要前提,以岩溶地质背景、裸露型岩溶的形态特征为调查基础,掌握岩溶的空间分布、形态特征、发育程度及形成原因等,在结合其他勘探手段进行验证,利于进一步对覆盖型岩溶区进行研究。

(2)明确岩溶分布平面及立面规律:由于区内水的溶蚀能力和水动力条件在三维空间上的差异、岩溶发育强度在垂直方向上和平面上具有明显的变化规律。在垂向上岩溶发育强度由浅部向深度逐渐减弱;岩溶充填程度也由高到低,岩溶区与非岩溶区接触带岩溶发育强度大;从平面上看,桂林中心城区及临桂中心县城岩溶发育强度最大,中部峰丛洼地次之,东西两侧最弱。

(3)明确岩溶发育与岩性及岩性组合、水文地质

单元、埋藏深度及地质构造的关系及其岩溶发育特征。桂林市规划中心城区岩溶发育主要以浅表的融县组、桂林组为主,在褶皱轴部,或断层影响带内,在垂直节理裂隙和缓倾斜层面裂隙组成的裂隙系统中,岩溶发育较强;可溶岩与非可溶岩接触地段岩溶发育强;在低平谷地中的分水岭处岩溶发育亦较强烈;在水文网长期摆动的地段地面以上岩溶发育程度强烈。

参考文献:

- [1] 冯佐海,梁金城,李晓峰,等.桂林市岩溶塌陷成因类型与时空分布特征[J].自然灾害学报,2001,8(10):92-97.
FENG Zuohai, LIANG Jincheng, LI Xiaofeng, et al. Genetic types and distributive characters of karst collapses in Guilin urban and suburban area, Guangxi Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 8(10):92-97.
- [2] 冯佐海,李晓峰,张明华,等.桂林市岩溶塌陷空间分布与地质构造的关系[J].地质灾害与环境保护,2001,6(12):16-20.
FENG Zuohai, LI Xiaofeng, ZHANG Minghua, et al. Distribution of karst collapses and its relation to geological structures in the Guilin urban and suburban areas, Guangxi Province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2001, 6(12):16-20.
- [3] 万志清,秦四清,祁生文.桂林市岩溶塌陷及防治[J].工程地质学报,2001,9(2):199-203.
WAN Zhiqing, QIN Siqing, QI Shengwen. The karstic collapse and its protection in Guilin City [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(2):199-203.
- [4] 肖明贵.桂林市岩溶塌陷形成机制与危险性预测[D].长春:吉林大学博士学位论文,2005.
XIAO Mingui. The forming mechanism and forecast of fatalness about karst subsidence in Guilin City [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [5] 吴枝坦.桂林市地下岩溶发育规律性的初步探讨[J].广西地质,1986,6(1):77-84.
WU Zhitan. A preliminary discussion on the developing regularity of underground karst in Guilin City [J]. Geology of Guangxi, 1986, 6(1):77-84.
- [6] 夏日元,蒋忠诚,邹胜章,等.岩溶地区水文地质环境地质综合调查工程进展[J].中国地质调查,2017,2(4):1-10.
XIA Riyuan, JIANG Zhongcheng, ZOU Shengzhang, et al. Progress of hydrogeology and environmental

- geology comprehensive survey in karst area [J].
 Geological survey of China, 2007, 2(4):1-10.
- [7] 罗以达,梁河,高海发,等.城市岩溶地质调查及评价方法探讨——以浙江杭州市为例[J].中国地质,2009,10(36):1187-1193.
- LUO Yida, LIANG He, GAO Haifa, et al. A tentative discussion on methods for urban karst geological survey and evaluation: a case study of Hangzhou City in Zhejiang Province [J]. Geology in China, 2009, 10(36): 1187-1193.
- [8] 夏日元,邹胜章,唐建生,等.南方岩溶地区1:5万水文地质环境地质调查技术要点分析[J].中国岩溶,2017,10(36):599-608.
- XIA Riyuan, ZOU Shengzhang, TANG Jiansheng, et al. Technical key points of 1:50,000 hydrogeological and environmental geology surveys in karst areas of South China [J]. Carsologica Sinica, 2017, 10(36): 599-608.
- [9] 缪世贤,黄敬军,武鑫,等.徐州岩溶地质调查及其发育特征分析[J].水文地质工程地质,2017,44(3):172-177.
- MIAO Shixian, HUANG Jingjun, WU Xin, et al. Karst geological survey and analysis of its development characteristics in Xuzhou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 172-177.
- [10] 周立新,时坚. GIS技术在1:5万岩溶水文地质综合调查野外工作中的应用——以湖南新田河流域为例[J].中国岩溶,2009,28(3):268-274.
- ZHAO Lixin, SHI Jian. Application of GIS to 1:50 000 karst hydrogeologic field survey: A case study in Xintian basin, Hunan province [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(3): 268-274.
- [11] 刘晓东,张虎生,邢应太.高密度电法在岩溶地质调查中的应用[J].地质与勘探,2003,39(增刊1):65-68.
- LIU Xiaodong, ZHANG Husheng, XING Yingtai. The application of resistivity imaging to geological survey of karst [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(S1): 65-68.

(上接第119页)

- [28] 李明超,胡兴娥,安娜,等.滑坡体三维地质建模与可视化分析[J].岩土力学,2008,29(5):1355-1360.
- LI Mingchao, HU Xing'e, AN Na, et al. 3-D geological modeling and visual analysis of landslide mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1355-1360.
- [29] 刘釜保.基于3DSMax与OpenGL的水库滑坡三维可视化研究[D].杨凌区:西北农林科技大学,2010.
- LIU Fubao. Research on 3D visualization of reservoir landslide based on 3DSMax and OpenGL [D]. YANGLINGQU: Northwest Agriculture and Forestry University, 2010.
- [30] 李建辉,王琴.三维激光扫描技术应用于滑坡体地形可视化的研究[J].测绘通报,2012(10):51-54.
- LI Jianhui, WANG Qin. On landslide terrain visualization by 3D laser scanning measurement system [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(10): 51-54.
- [31] 谭冬生,洪政,袁小龙,等.基于Open GL的滑坡三维可视化计算及动态模拟研究[J].铁道工程学报,2013(8):57-61.
- TAN Dongsheng, HONG Zheng, YUAN Xiaolong, et al. Three-Dimensional visualization calculation and research on dynamic simulation of landslide based on Open GL [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(8): 57-61.