

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20181106.002

李腾芳,覃小群,黄奇波,等.崇左岩溶峰林区岩溶发育特征及对钻孔涌水量的影响[J].广西科学,2018,25(5):560-566,578.

LI T F, QIN X Q, HUANG Q B, et al. Characteristics of karst development and its impact on the yields of wells in karst peak forest region in Chongzuo city, Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(5): 560-566, 578.

崇左岩溶峰林区岩溶发育特征及对钻孔涌水量的影响* Characteristics of Karst Development and Its Impact on the Yields of Wells in Karst Peak Forest Region in Chongzuo City, Guangxi

李腾芳^{1,2},覃小群^{1,2},黄奇波^{1,2},程瑞瑞^{1,2**},刘朋雨^{1,2},张连凯^{1,2}

LI Tengfang^{1,2}, QIN Xiaoqun^{1,2}, HUANG Qibo^{1,2}, CHENG Ruirui^{1,2},
LIU Pengyu^{1,2}, ZHANG Liankai^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林 541004;2. 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室,广西桂林 541004)

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:【目的】研究崇左岩溶峰林区岩溶发育规律及对钻孔涌水量的影响,深化对崇左岩溶峰林区岩溶水文地质条件的认识,更好地指导今后在该地区开展地下水资源开发利用。【方法】通过对崇左岩溶峰林区 128 个钻孔的深度、涌水量、岩溶发育特征等指标进行统计分析,总结该区岩溶发育规律及影响因素,并研究其对钻孔涌水量的控制作用。【结果】研究区最小钻井深 50.02 m,最大井深 121.80 m,平均深度为 94.04 m。成井 86 口,成井率为 67.18%,有 68.53%的钻井涌水量分布于 100~400 m³/d。钻孔遇洞率为 75.78%,平均线岩溶率为 5.01%。在 0~100 m 内均有溶洞发育,100 m 以下未见溶洞发育。0~60 m 深度段岩溶较发育,溶洞高度为 441.57 m,占总高度的 80.41%,线岩溶率(5.42%~12.91%)大于平均线岩溶率;但 0~40 m 深度段内溶洞全部或部分被充填,供水意义不大,而在 40~60 m 深度段溶洞填充率小。【结论】在该地区通过机井解决缺水问题的条件比较有利,机井井深不超过 100 m 为宜;40~60 m 深度段是本区主要出水段。由于钻孔均部署在地下水的补给区,或位于岩溶发育相对较弱的地区,钻孔中溶洞主要以小型溶洞(小于等于 2 m)为主,大型溶洞(大于 2 m)较少。这种水文地质条件和溶洞发育特征,导致研究区大部分钻孔(68.53%)的涌水量分布于 100~400 m³/d。

关键词:岩溶峰林区 钻孔涌水量 线岩溶率 溶洞填充率 崇左

中图分类号:P641 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2018)05-0560-07

Abstract:【Objective】In order to deepen the understanding of the karst hydro-geological conditions and better guide the development and utilization of groundwater resources in karst peak

forest area of Chongzuo city in the future, the karst development law and its impact on the yields of wells was studied in this paper. 【Methods】Through the statistical analysis of the depth, in flow of water and karst development characteristics from 128 boreholes, the karst development law and influencing factors were summarized, and its controlling impact on the yields

收稿日期:2018-01-29

作者简介:李腾芳(1990—),男,研究实习员,主要从事岩溶水文地质调查与研究,E-mail:litf@karst.ac.cn.

* 中国地质调查项目(DD20160301)和国家自然科学基金项目(41571203)资助。

** 通信作者:程瑞瑞(1991—),女,研究实习员,主要从事岩溶水文地质调查与研究,E-mail:chrr@karst.ac.cn.

of wells was studied in karst peak forest area of Chongzuo city. **【Results】**The minimum depth of borehole in the study area was 50.02 m, the maximum well depth was 121.80 m, with an average depth of 94.04 m. Of which 86 boreholes could be used as water wells with a standard water in flow, with the successful rate of 67.18%, and there were 68.53% wells with the drilling water in flow distributing between 100 m³/d and 400 m³/d. The rate of reaching holes when drilling was 75.78%, and the average line karst rate was 5.01%. The caves were all developed in the range of 0~100 m depth, and no caves were found below 100 m depth. The karst was more developed in the depth range of 0~60 m, and the height of the cave was 441.57 m, accounting for 80.41% of the total height. The line karst rate (range 5.42%~12.91%) was larger than the average line karst rate. However, all or part of the cave in the 0~40 m depth were filled with little significance to water supply, while the filling rates in the depth of 40~60 m was small. **【Conclusion】**It is more advantageous to solve the problem of water shortage through the well in the area. The well depth should not exceed 100 m and the 40~60 m depth is the main water discharge section in this area. Since the boreholes are all deployed in the recharge area of groundwater or in areas with relatively weak karst development, the caves in boreholes are mainly small caves (less than or equal to 2 m) and large caves (greater than 2 m) are fewer. This hydrogeological condition and karst development characteristics cause the water inflow in most of the boreholes (68.53%) in the study area to be distributed between 100 m³/d and 400 m³/d.

Key words: karst peak forest area, the yields of wells, line karst rate, cave filled rate, Chongzuo city

0 引言

【研究意义】崇左岩溶峰林区是全国甘蔗产地之一,甘蔗产量占全国的三分之一,是名副其实的“中国糖都”^[1]。为加快蔗糖产业转型升级,做大做强蔗糖业支柱产业,近年来大力推行甘蔗“双高”(高产高糖原料蔗生产)基地建设^[2]。但崇左地区也是广西三大旱片之一,旱灾频繁^[3]。农作物需水的高峰期(4—5月和9—10月)降雨量偏少,春旱出现频率为25.9%,秋旱出现频率为19.1%^[3]。干旱已成为影响该区“双高”基地建设的主要障碍,如果干旱问题得到治理,“双高”模式的现代化农业生产具有广阔的发展前景。**【前人研究进展】**崇左岩溶峰林区地表除水系干流外,大部分地区无常年性水流,不适宜修建地表引水工程和大型蓄水工程来解决干旱问题^[4]。而在地下浅部,在水位变动带或饱水带附近,横向洞穴比较发育,溶隙比较均一,地下水资源相对丰富,有效开发利用地下水资源是治理干旱的途径之一^[5]。该区虽然地下河较发育,但地下河出口大多位于河床两岸和河谷地带,出口位置低,加之近年来左江上修建大量水坝抬高水位蓄水发电,造成许多地下河出口被淹没于河水面以下,直接开发利用地下河水资源受到限制^[6]。与峰丛洼地或岩溶峡谷等类型区不同,岩溶

广西科学 2018年10月 第25卷第5期

峰林区大气降水、地表水、地下水交替强烈,地下水以分散的水平运动为主,水力坡度缓,地下水埋藏较浅,枯季水位埋深10~30 m,雨季仅数米^[7]。因此通过钻井取水、建设抽水型地下调节水库成为解决岩溶峰林区干旱问题的主要手段^[8-10]。**【本研究切入点】**2010年广西区政府启动“十二五”农村饮水安全工程找水打井项目,在广西岩溶峰林区共成井1 195孔,开采量为323 821 m³/d^[6]。大量的钻孔为当地提供了丰富的地下水资源,钻探所揭露的地层岩性、地下岩溶发育特征等第一手资料对于研究地下岩溶发育规律,指导下一步抗旱找水打井具有重要作用。岩溶地区普遍存在地下水分布具有非均一性、含水介质构成具有多重性、地下水流运动具有多相性、地下水流变化具有剧变性等特征^[11],在岩溶地区定井找水一直存在着一定的难度,上述研究对于成井率相对不高的现实状况尤为重要^[12-13];但关于岩溶发育特征与钻孔涌水之间的关系文献并不多见。**【拟解决的关键问题】**拟通过对钻孔深度、钻孔涌水量、岩溶发育特征等指标进行统计分析,总结该区岩溶发育规律及影响因素,并研究其对钻孔涌水量的控制作用,进一步深化对崇左岩溶峰林区岩溶水文地质条件的认识;以期更好地指导今后在该地区开展地下水资源开发利用工作,也为其他类似岩溶峰林区的水文地质工作提

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于广西西南部,左江流域中上游,涉及崇左市江州区、龙州县和宁明县(研究区在东经 $106^{\circ}40' \sim 107^{\circ}30'$,北纬 $22^{\circ}30' \sim 22^{\circ}45'$)。整个地势是北、南高,中间低,西高东低。左江从中部由西往北东流过,构成当地地下水最低排泄基准面。地下水分别由南、北、西方向往中部的左江排泄。

地貌主要有峰丛洼地、谷地,峰林谷地、平原,残峰坡地和低山丘陵。峰丛洼地、谷地山峰海拔高程一般为 $400 \sim 550$ m,谷地、洼地地面高程为 $150 \sim 270$ m;峰林谷地、平原峰顶高程为 $200 \sim 300$ m,谷地、平原地面高程为 $110 \sim 150$ m。总体地势平坦,耕地连片,地表水缺乏,地下水埋藏浅,水资源和光热资源丰富,经济以农业为主,主要农作物有水稻、玉米、木薯、豆类,经济作物有甘蔗、黄麻、龙眼等,工业主要有蔗糖加工业。

研究区域处于北回归线以南,属亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛。年日照时数 $1\ 600$ 多小时,1月平均气温 13.8°C ,7月平均气温 28.1°C ,年平均气温 $20.8 \sim 22.4^{\circ}\text{C}$,年无霜期长达 340 多天,年降雨量 $1\ 099.6 \sim 1\ 600$ mm,年蒸发量 $1\ 417.6 \sim 1\ 744.8$ mm。6—9月为雨季,集中了年降雨量 80% 左右。枯季一般在12月至次年3月。地表河径流量在时间上的分配与降雨是一致的,即每年12月至次年4月径流量很小,而6—9月集中了年径流量 80% 左右。

研究区域内主要河流有左江及其支流明江和黑水河,其余为岩溶水调节的季节性小河。左江源于越南境内,干流全长 539 km,流域面积 $32\ 068$ km²,其中有 $11\ 579$ km²在越南境内,全流域多年平均年径流量为 2.054×10^{10} m³。明江是左江的最大支流,发源于十万大山北面的上思县未军隘,自东向西流经上思县、宁明县,在宁明县城东南面拐向北流,在龙州县上金乡汇入左江,全长 315 km,流域面积 $6\ 441$ km²。黑水河发源于广西靖西市新靖镇环河村渔翁撒网东侧石山脚下的大龙潭,流经越南、广西崇左市大新县、江州区、龙州县,于龙州县响水镇棉江村与太平镇乙古村交界处汇入左江。黑水河流域面积 $6\ 025$ km²(包括越南境内的 505 km²),多年平均年径流量 4.75×10^9 m³,河长 192 km。

出露地层从老到新依次有石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及第四系。碳酸盐岩地层主要为泥盆系下统至三叠系下统,其余地层以碎屑岩相为主。此外,

1.2 钻孔分布

本研究除收集到广西“十二五”农村饮水安全工程在研究区的91个钻孔外,还收集到2016—2017年中国地质调查局启动的地质调查二级项目“西江中下游岩溶峰林区1:5万水文地质环境地质调查项目”实施的37个钻孔资料,共计128个钻孔,钻孔主要分布于宁明县(31个)、龙州县(29个)、江州区(68个)。通过对钻孔深度、钻孔涌水量、岩溶发育特征等指标进行统计分析,总结该区岩溶发育规律及影响因素,并研究其对钻孔涌水量的控制作用。

2 结果与分析

2.1 钻孔深度与涌水量

2.1.1 钻孔深度

128个钻孔总进尺 $12\ 146.58$ m,土层厚度 $1\ 182.08$ m,基岩进尺 $10\ 964.5$ m,涌水量达 $28\ 533.86$ m³/d(表1)。研究区最小钻井深 50.02 m,最大井深 121.80 m,平均深度为 94.04 m。从井深分布频率来看,井深主要分布于 $80 \sim 90$ m、 $90 \sim 100$ m和 $100 \sim 110$ m这3个深度范围,其他深度的钻孔比例较少(图1)。钻孔的孔口高程为 $87 \sim 337$ m,平均值为 160.77 m。左江为研究区最低排泄基准面,江面高程 $98 \sim 100$ m,左江深约 $20 \sim 30$ m,钻孔孔口平均高程与左江底面高程的相差约 $80 \sim 90$ m,由此可见,井深分布于 $80 \sim 90$ m、 $90 \sim 100$ m和 $100 \sim 110$ m的钻孔,其孔底高程基本与左江底面高程一致。一般说来,在地下水的当地排泄基准面之上,地下水的交替迅速,岩溶发育强烈;在地下水的当地排泄基准面之下,尤其是最低排泄基准面之下,地下水的交替速度缓慢,岩溶发育微弱甚至不发育^[5]。研究区由于受左江排泄基准面的控制,岩溶强发育带深度在 100 m以内。因此,在该地区布置钻井,井深不超过 100 m为宜。这与广西桂林、来宾等岩溶峰林地区的钻孔深度基本一致^[6]。但明显区别于云贵高原及斜坡地带岩溶地区的钻井,由于受河谷深切的影响,这些地区部分峰丛山区地下水位埋深达 300 m以上,因此在云贵高原及斜坡地带碳酸盐岩地层中所布置的抗旱井井深一般为 $150 \sim 300$ m^[14],最深达 500 m^[15]。

2.1.2 钻孔涌水量

128个钻孔中89个钻孔有水,按成井标准(明确为单井涌水量不低于 50 m³/d),其中有3个钻井小于 50 m³/d,86个可成井,成井率为 67.18% 。与其他岩溶地区相比,成井率较高。由于岩溶地下水主要

赋存于岩溶裂隙和管道中^[16],其储存空间分布和相互间连通的高度不均匀^[17-18],导致在岩溶地区打井的成井率极低,我国不少岩溶地区的成井率低于50%^[19-20],尤其在我国西南岩溶地区,成井率一直徘徊在30%左右^[21]。研究区较高的成井率,说明其水

文地质条件与西南其他类型岩溶区存在明显差异,由于岩溶峰林区岩溶发育强烈且相对均匀,管道多呈网络状发育,含水层给水度大,透水性好,地下水分布均匀,钻井成功率较高^[22]。因此通过机井解决缺水问题的条件比较有利。

表 1 研究区钻孔统计表

Table 1 Statistics of borehole in the study area

| 参数 Parameter | 孔口标高 Wellhead elevation (m) | 井深 Well depth (m) | 土层厚度 Soil thickness (m) | 基岩进尺 Bedrock footage (m) | 涌水量 Water inflow (m ³ /d) |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|---|
| 最小值 Minimum | 87.00 | 50.02 | 0.20 | 33.70 | 12.79 |
| 最大值 Maximum | 337.00 | 121.80 | 36.39 | 119.60 | 1 210.64 |
| 平均值 Average | 160.77 | 94.90 | 9.24 | 85.66 | 320.61 |
| 合计 Total | | 12 146.58 | 1 182.08 | 10 964.5 | 28 533.86 |

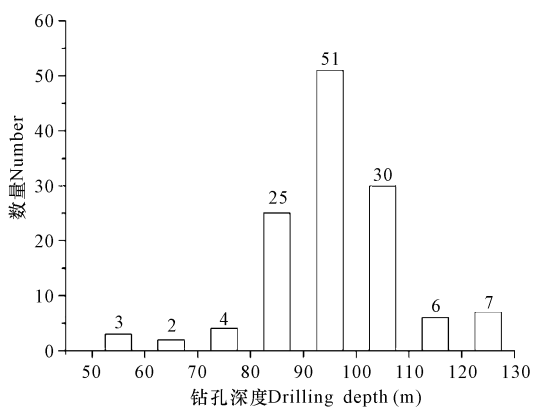


图 1 钻孔深度分布频数

Fig. 1 The depth frequencies of borehole

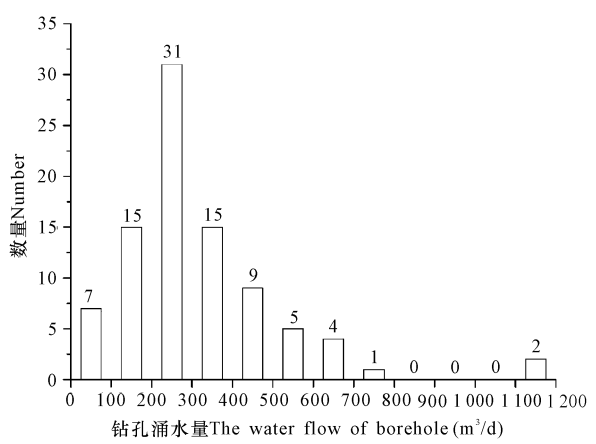


图 2 钻孔涌水量分布频数

Fig. 2 The water flow frequencies of borehole

大部分钻井的涌水量主要分布于100~400 m³/d,占总数的68.53%;小于100 m³/d占总数的7.87%;400~800 m³/d占总数的11.24%;有2个钻孔涌水量大于1 000 m³/d(图2)。这与广西“十二五”期间成井的单孔出水量范围是一致的。覃小群等^[6]研究表明广西“十二五”期间1 840个钻孔单孔涌水量平均值为261 m³/d,大多为200~300 m³/d,其中D3地层的单井出水量最高,平均为323 m³/d,约10%的钻孔流量大于1 000 m³/d。本研究区涌水量大于1 000 m³/d的2个孔钻均位于岩溶管道上,钻孔中均揭露有大于2 m的溶洞,水量补给范围大,水量丰富。如2016年西江中下游岩溶峰林区1:5万水文地质环境地质调查项目在龙州县响水镇棉江村实施的钻孔打在岩溶管道上,在30~40 m深揭露有一个2.3 m的大型溶洞,钻孔中地下水由12.2 m,上升到6.4 m,采用50 m³/d的水泵进行抽水实验,水位在5 min内由6.4 m迅速下降到10.6 m后,保

广西科学 2018年10月 第25卷第5期

持不变,水量十分丰富。

2.2 溶洞发育情况

2.2.1 岩溶垂向发育特征

岩溶发育程度是指碳酸盐岩遭受岩溶作用的程度,用一定范围内碳酸盐岩溶蚀体积与碳酸盐岩总体积的百分比来表示^[23]。在工程实践中,碳酸盐岩溶蚀体积一般很难确定,通常用钻孔线岩溶率来描述岩溶发育程度。线岩溶率是指某场地碳酸盐岩地层中,钻孔揭露的溶洞进尺与碳酸盐岩总进尺的百分比^[24]。

研究区128个钻孔有97个遇到了溶洞,钻孔遇洞率为75.78%,97个钻孔总共遇到了283个溶洞。溶洞总高度549.15 m,基岩进尺10 964.5 m,平均线岩溶率为5.01%。根据《岩溶地区工程地质调查规程(比例尺1:10万~1:20万)(DZ/T 0060-93)》中给出的岩溶中等发育程度线岩溶率参考性指标为3%~10%^[25],研究区属于岩溶中等发育区。在0~

100 m 内均有溶洞发育,100 m 以下未见溶洞发育(表 2)。这也进一步证实在该地区布置钻井,井深不超过 100 m 为宜。

岩溶发育在垂向上具有明显的分带性。0~60 m 深度段,溶洞高度为 441.57 m,占总高度的 80.41%,线岩溶率为 5.42%~12.91%,大于平均线岩溶率 5.01%,为岩溶强发育段,60~90 m 深度段,

表 2 不同深度岩溶发育情况

Table 2 Karst development in different depths

| 深度 Depth(m) | 溶洞发育高度 Cavity height(m) | 线岩溶率 Line karst rate | 溶洞数量 Number of caves | 填充数量 Number of filled caves | 填充率 Filled rate (%) |
|----------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 0~10 | 50.54 | 12.91 | 22 | 16 | 72.73 |
| 10~20 | 74.71 | 7.20 | 44 | 21 | 47.73 |
| 20~30 | 100.95 | 8.76 | 47 | 17 | 36.17 |
| 30~40 | 72.96 | 6.27 | 36 | 8 | 22.22 |
| 40~50 | 77.33 | 6.44 | 42 | 3 | 7.14 |
| 50~60 | 65.08 | 5.42 | 36 | 3 | 8.33 |
| 60~70 | 46.9 | 3.91 | 25 | 2 | 8 |
| 70~80 | 29.41 | 2.45 | 16 | 0 | 0 |
| 80~90 | 23.74 | 23.74 | 11 | 0 | 0 |
| 90~100 | 7.53 | 0.63 | 4 | 0 | 0 |
| 合计 Total | 549.15 | 5.01 | 283 | 70 | 24.7 |

溶洞高度为 100.05 m,占总高度的 18.22%,线岩溶率 1.98%~3.91%,为岩溶中等发育段;90~100 m 深度段,溶洞高度为 7.53 m,占总高度的 1.37%,线岩溶率 0.63%,为岩溶弱发育段。不同深度段溶洞总高度和线岩溶率均随深度增加而逐渐减小(图 3),反映出从地表向地下,岩溶发育逐渐减弱。

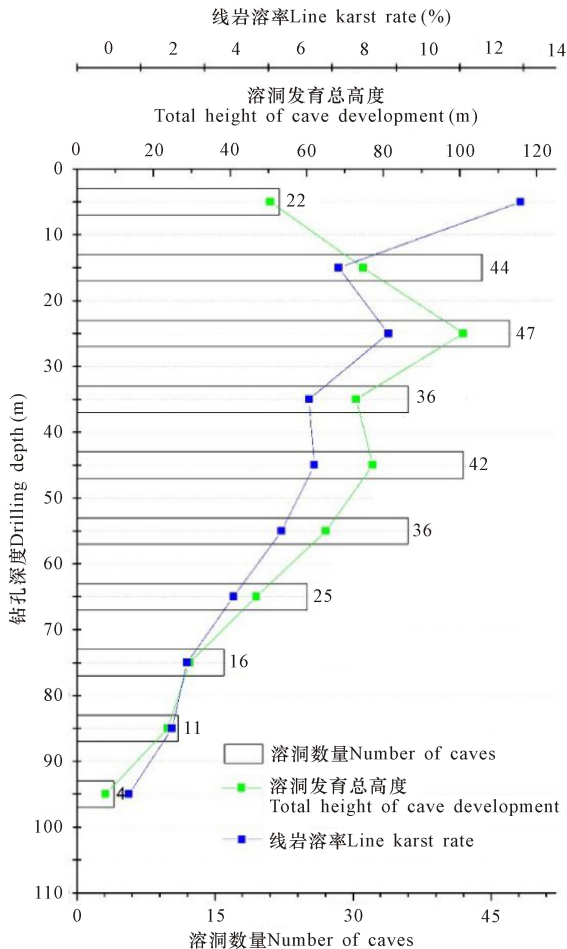


图 3 钻孔随深度岩溶发育特征

Fig. 3 The karst development characteristics with drilling depth

2.2.2 溶洞充填情况

0~10 m 深度段溶洞填充率达 72.73%,溶洞大部分被填充,10~40 m 深度段溶洞填充率为 22.22%~47.73%,溶洞部分被填充;40~70 m 深度段溶洞填充率小于 10%,溶洞少量被填充;70~100 m 深度段岩溶未被填充(表 2)。充填物主要为黏性土夹碎石,黏性土呈黄褐色、土黄色、棕红色等颜色,状态由流塑、软塑、可塑到硬塑都可见,主要来源于上部覆盖层。钻孔中溶洞填充率随深度增加而减小,反映出溶洞填充方式是自上而下充填。研究区地表浅层发育有溶洞、溶隙和落水洞等,属垂直直流岩溶带,地下水以垂直渗流作用为主,容易将地表第四系粘土层带入下部溶洞中。

根据前文分析,研究区 0~60 m 深度段岩溶高度大,线岩溶率大于平均线岩溶率,岩溶较发育,但 0~40 m 深度段内溶洞全部或部分被填充,供水意义不大;而在 40~60 m 深度段溶洞填充率小,因此,40~60 m 深度段应该是本区主要出水段。覃小群等^[6]研究证实广西岩溶峰林区钻井装泵深度平均为 37.67 m,出水段深度集中在 35~45 m。本研究结果与其结论基本一致。

2.2.3 溶洞数量及规模

283 个溶洞总高度为 549.15 m,平均高度 1.94 m。溶洞高度差异大,最小溶洞高度为 0.03 m,最大高度为 8.6 m,最大高度是最小高度的 286 倍。其中有 114 个溶洞洞高≤1 m,占总数的 40.3%;1~2 m

的溶洞有 62 个,占总数的 21.9%;2~3 m 的溶洞有 53 个,占总数的 18.7%;3~4 m 的溶洞有 19 个,占总数的 6.7%;4~5 m 的溶洞有 16 个,占总数的 5.7%;5~6 m 的溶洞有 8 个,占总数的 2.8%;洞高大于 6 m 的有 11 个,占总数的 3.9%(图 4)。说明钻孔中溶洞主要以小于等于 2 m 的小型溶洞为主,揭露出大型溶洞(大于 2 m)较少。研究区地下河发育,地下水埋深浅,地下河主管道附近的村庄可直接通过地下河天窗或溶井提水解决用水问题,这些地段的村民基本不缺水。缺水的村屯或位于地下水的补给区,或位于岩溶发育相对较弱的地区。广西“十二五”农村饮水安全工程及“西江中下游岩溶峰林区 1:5 万水文地质环境地质调查”项目实施的钻孔均根据当地需求,所有钻孔基本均部署在缺水较为严重的村屯,受水文地质条件限制,钻孔揭露的大型溶洞并不多。这种水文地质条件和溶洞发育特征,是导致研究区大部分钻井(68.53%)的涌水量并不大(主要分布于 100~400 m³/d)主要原因。

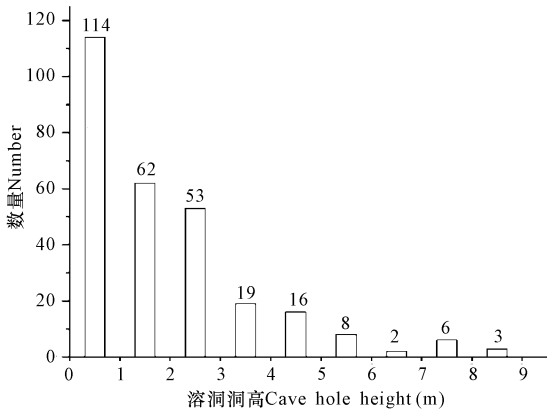


图 4 溶洞洞高频谱图

Fig. 4 Hole height frequencies of kart cave

3 结论

研究区最小钻井深 50.02 m,最大井深 121.80 m,平均深度为 94.04 m。从井深分布频率在来看,井深主要分布于 80~90 m、90~100 m 和 100~110 m,这 3 个深度范围,其他深度的钻孔比例较少。钻孔孔底高程基本与左江底面高程一致。由于受左江排泄基准面的控制,岩溶强发育带深度在 100 m 以内。因此,在该地区布置钻井,井深不超过 100 m 为宜。

研究区成井率为 67.18%,68.53% 钻井的涌水量主要分布于 100~400 m³/d。与西南其他类型岩溶地区相比,成井率较高,说明其水文地质条件与西南其他类型岩溶区存在明显差异。由于岩溶峰林区岩溶发育强烈且相对均匀,管道多呈网络状发育,含

水层给水度大,透水性好,地下水分布均匀,钻井成功率较高。因此通过机井解决缺水问题的条件比较有利。

研究区 128 个钻孔有 97 个遇到了溶洞,钻孔遇洞率为 75.78%,平均线岩溶率为 5.01%。在 0~100 m 均有溶洞发育,100 m 以下未见溶洞发育。岩溶发育在垂向上具有明显的分带性,10~60 m 深度段为岩溶强发育段,60~90 m 深度段为岩溶中等发育段;90~100 m 深度段为岩溶弱发育段。总体上,溶洞总高度和线岩溶率均随深度增加而逐渐减小,反映出从地表向地下,岩溶发育逐渐减弱。

钻孔中溶洞填充率随深度增加而减小,反映出溶洞充填方式是自上而下充填。0~60 m 深度段岩溶高度大,线岩溶率大于平均线岩溶率,岩溶较发育;但 0~40 m 深度段内溶洞全部或部分被充填,供水意义不大;而在 40~60 m 深度段溶洞填充率小。因此,40~60 m 深度段应是本区主要出水段。

由于钻孔均部署在地下水的补给区,或位于岩溶发育相对较弱的地区,钻孔中溶洞主要以小型溶洞(小于等于 2 m)为主,揭露出大型溶洞(大于 2 m)较少。这种水文地质条件和岩溶发育特征,造成研究区大部分钻井的涌水量分布于 100~400 m³/d。

参考文献:

- [1] 万崇兴,韦日成,万语,等.崇左市蔗糖产业“4331”发展战略研究[J].广西经济管理干部学院学报,2011,23(4):80-86.
WAN C X,WEI R C,WAN Y,et al. Study on 4331 development strategy for cane sugar industry in Chongzuo city[J]. Journal of Guangxi Economic Management Cadre College,2011,23(4):80-86.
- [2] 钟春云.崇左“甜蜜事业”再升级[J].当代广西,2015(17):24-25.
ZHONG C Y. Chongzuo's "sweet career" upgrade again [J]. Contemporary Guangxi,2015(17):24-25.
- [3] 盘光能.左江旱片干旱灾害成因分析及应对措施[J].中国防汛抗旱,2008(2):28-40.
PAN G N. Analysis of causes of drought disasters in Zujiang dry films and countermeasures[J]. China Flood and Drought Management,2008(2):28-40.
- [4] 夏日元,朱远峰,李兆林.广西岩溶区农业发展的资源及地质环境特征[J].广西科学,1997,4(2):192-195.
XIA R Y,ZHU Y F,LI Z L. The characteristics of resources and geological environment for agriculture development in Guangxi karst areas[J]. Guangxi Sciences, 1997,4(2):192-195.
- [5] 熊道馄.岩溶发育垂直分带及其工程地质意义[J].四川

- 地质学报,2004,24(2):95-98.
- XIONG D K. Vertical zoning of karstification and its engineering geological significance[J]. Acta Geologica Sichuan,2004,24(2):95-98.
- [6] 覃小群,宋开本,黄奇波,等. 广西岩溶峰林区地下水赋存特征及钻探成井模式[J]. 中国岩溶,2017,36(5):618-625.
- QIN X Q, SONG K B, HUANG Q B, et al. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst peak forest areas, Guangxi, China[J]. Carsologica Sinica,2017,36(5):618-625.
- [7] 曹建文,夏日元. 西南岩溶石山地区不同类型地下河开发利用模式探讨[J]. 中国岩溶,2017,36(5):609-617.
- CAO J W, XIA R Y. Exploitation models for different types of underground rivers in karst mountain areas southwestern China[J]. Carsologica Sinica,2017,36(5):609-617.
- [8] 陈伟海. 峰林平原区含水层特征与地下水开发——以广西来宾峰林平原区为例[J]. 广西科学,2000,7(4):289-292.
- CHEN W H. Characteristics of karst aquifers groundwater exploration in peak forest-plain area: An example in Laibin county, Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2000, 7(4):289-292.
- [9] 陈伟海,张之淦. 峰林平原区岩溶含水层特征与调蓄功能[J]. 中国岩溶,1999,18(1):19-27.
- CHEN W H, ZHANG Z G. The characteristics and regulation capacity of karst aquifer in peak forest-plain area [J]. Carsologica Sinica,1999,18(1):19-27.
- [10] 覃小群. 桂中岩溶干旱特征及综合治理对策[J]. 桂林工学院学报,2005,25(3):273-283.
- QIN X Q. Characteristics and comprehensive treatment strategy of karst drought in central Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2005, 25(3):273-283.
- [11] 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,2017,36(5):599-608.
- XIA R Y, ZOU S Z, TANG J S, et al. Technical key points of 1:50,000 hydrogeological and environmental geology surveys in karst areas of south China[J]. Carsologica Sinica,2017,36(5):599-608.
- [12] 潘晓东,张发旺,孟小军,等. 深切河谷附近岩溶地区打井找水模式[J]. 现代地质,2015,29(2):272-278.
- PAN X D, ZHANG F W, MENG X J, et al. Model for groundwater searching with drilling in karst area near deep valley[J]. Geoscience,2015,29(2):272-278.
- [13] 王宇,张贵,李丽辉,等. 岩溶找水与开发技术研究[M]. 北京:地质出版社,2007.
- WANG Y, ZHANG G, LI L H, et al. Research on karst water seeking and development technology [M]. Beijing: Geological Publishing House,2007.
- [14] 王宇,彭淑惠,王梓颀,等. 云南省抗旱井定井论证方法[J]. 中国岩溶,2013,32(3):305-312.
- WANG Y, PENG S H, WANG Z J, et al. The research methodology of drought resisting well locating in Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(3):305-312.
- [15] 潘晓东,梁杏,唐建生,等. 黔东北高原斜坡地区 4 种岩溶地下水系统模式及特点——基于地貌和蓄水构造特征[J]. 地球学报,2015,36(1):85-93.
- PAN X D, LIANG X, TANG J S, et al. The patterns and characteristics of four karst groundwater systems in northeast Guizhou slope zone based on the landscape and reservoir structure [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(1):85-93.
- [16] 蒋忠诚,夏日元,时坚,等. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. 地球学报,2006,27(5):495-502.
- JIANG Z C, XIA R Y, SHI J, et al. The application effects and exploitation capacity of karst underground water resources in Southwest China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(5):495-502.
- [17] 袁道先. 论岩溶水的不均匀性[M]. 北京:地质出版社,1977:1-225.
- YUAN D X. On the non-uniformity of karst water [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1977:1-225.
- [18] 袁道先,章程. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报,2008,29(3):355-365.
- YUAN D X, ZHANG C. Karst dynamics theory in China and its practice [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3):355-365.
- [19] 梁永平,韩行瑞,时坚,等. 鄂尔多斯盆地周边岩溶地下水系统模式及特点[J]. 地球学报,2005,26(4):365-369.
- LIANG Y P, HAN X R, SHI J, et al. The karst groundwater system in the peripheral area of Ordos basin: Its patterns and characteristics [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(4):365-369.
- [20] 梁永平,王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报,2010,31(6):860-868.
- LIANG Y P, WANG W T. The division and characteristics of karst water systems in northern China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(6):860-868.

(下转第 578 页)

Rio- camuy development proposals [J]. Nss Bulletin, 1967, 29(2): 27-71.

[49] HABIĆ P, KNEZ M, KOGOVSEK J, et al. Škocjanske jame speleological revue [J]. Int Journ Speleol, 1989, 18: 1-42.

[50] HOSE L D. Golondrinas and the giant shafts of Mexico [M]. GUNN J (ed.). Encyclopedia of Caves and Karst Science. New York: Fitzroy Dearborn, 2004: 390-391.

[51] HOSE L D. Selma plateau caves, Oman [M]. GUNN J (ed.). Encyclopedia of caves and karst science. New York: Fitzroy Dearborn, 2004: 639-641.

[52] MAIRE R. Giant shafts and underground rivers of the Nakanai Mountains (New Britain) [J]. Spelunca, 1981

(S2): 8-30.

[53] MIDDLETON G. Madagascar [M]. GUNN J (ed.). Encyclopedia of caves and karst science. New York: Fitzroy Dearborn, 2004: 493-495.

[54] PEYRE J C. Expedition speleologique Madagascar 1982 [M]. Paris: Federation Francais de Speleologie, 1982.

[55] WHITE T. The 1985 indonesia expedition [J]. Cave Science, 1986, 13: 25-45.

[56] WALTHAM T. Tiankengs of the world, outside China [J]. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2006, 4(1): 1-12.

(责任编辑: 陆 雁)

(上接第 566 页)

[21] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点 [J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 115-119.
WANG Y. Classification, features of karst water system and key point for the evaluation to karst water exploration in southwest China karst area [J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 115-119.

[22] 夏日元, 唐健生, 朱远峰. 西南岩溶区地下水资源可持续利用对策 [J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(1): 81-85.
XIA R Y, TANG J S, ZHU Y F. Sustainable utilization measures of groundwater resources in karst areas of southwest China [J]. China Population, Resources and Environment, 2003, 13(1): 81-85.

[23] 官善友, 陶良, 谢纪海, 等. 武汉市都市发展区岩溶发育特征 [J]. 城市勘测, 2017(4): 157-162.
GUAN S Y, TAO L, XIE J H, et al. The development

characteristics of karst in Wuhan urban development area [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(4): 157-162.

[24] 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 X J. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan [J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 419-432.

[25] 罗小杰. 武汉地区天兴洲碳酸盐岩条带岩溶发育的异常性及其成因探讨 [J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 35-42.
LUO X J. Karst abnormal development and origin of the Tianxingzhou carbonate rock belt in the Wuhan area [J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(1): 35-42.

(责任编辑: 符支宏)