

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.01.10

引用格式: 罗崴. 广西凌云县地下水资源量评价[J]. 中国地质调查, 2022, 9(1): 91–103. (Luo W. Evaluation of groundwater resources quantity in Lingyun County of Guangxi[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(1): 91–103.)

广西凌云县地下水资源量评价

罗崴

(广西壮族自治区地质调查院, 广西南宁 530023)

摘要: 为研究广西凌云县地下水资源状况, 在分析区内地质构造、岩溶发育特征、含水介质及水动力条件的基础上, 采用降水入渗系数法和枯季径流模数法分别对凌云县地下水天然补给量和可开采资源量进行评价, 并对地下水资源空间分布特征进行分析。结果表明: 全区地下水多年平均天然补给量 112 619.73 万 m^3/a , 其中岩溶地下水多年平均天然补给量 69 797.68 万 m^3/a , 基岩裂隙水多年平均天然补给量为 42 822.05 万 m^3/a , 可开采资源量为 9 840.37 万 m^3/a 。区内岩溶发育较强烈, 岩溶形态丰富, 岩溶发育在垂向上具有一定分带性, 高程跨度大, 地下水资源空间分布总体相对较为均匀。研究成果为凌云县地下水资源可持续开发利用提供了科学依据。

关键词: 地下水资源量评价; 降水入渗系数法; 枯季径流模数法; 地下水空间分布

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2022)01–0091–13

0 引言

地下水资源是我国淡水资源的主要来源^[1], 随着经济快速发展, 人口不断增加, 水资源短缺问题日益严重^[2]。近些年, 我国多个城市由于地下水严重超采或不合理开发, 出现地面沉降、海水入侵、地下水污染等问题^[3]。为实现水资源的合理开发利用, 降低地下水资源开采的环境危害^[4], 资源评价必不可少^[5]。常见地下水资源评价方法有水量均衡法、地下水开采实验法^[4]、比拟法、解析法、数值模拟法^[6]、GIS 概念模型^[7]、潜力指数法、长期动态分析法、单因子评价法^[8]等, 这些方法为地下水资源评价提供了重要手段, 能定量反映出地下水系统的运动规律、含水介质、水量等特征, 对地下水资源可持续利用和科学管理^[9]具有重大意义。本文根据凌云县水文地质条件、岩溶发育等特征, 划分地下水系统, 依据实地调查结果和长期观测数据资料, 采用降水入渗系数法和枯季径流模数法, 分析与评价凌云县的地下水资源量。

1 研究区概况

1.1 自然地理

研究区位于广西西北部红水河上游布柳河流域、坡心河流域及右江上游澄碧河流域(图1), 地处北回归线附近, 属亚热带季风气候区, 雨量充沛, 气候温和, 四季分明。多年平均气温 20.5 $^{\circ}\text{C}$, 多年平均降雨量 1 708.3 mm, 5—10 月份为雨季, 多年平均相对湿度 78%。

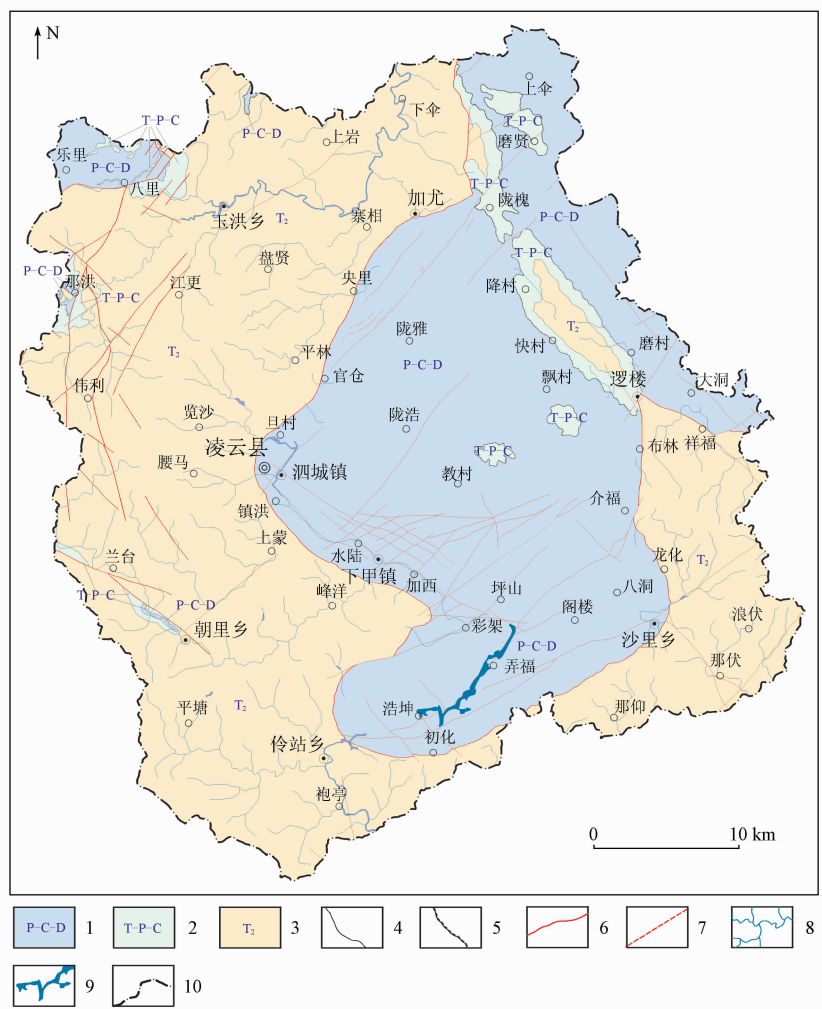
研究区总体地势北高南低, 由西北向东南方向倾斜。区内地表河流主要为澄碧河、布柳河及其支流。澄碧河从中部向南流, 平均径流量为 36.72 m^3/s ; 布柳河自西南向东北流, 平均径流量为 11.10 m^3/s 。

研究区为典型的山地地形, 分为岩溶地貌和非岩溶地貌, 总体山高谷深, 落差较大。地下水资源丰富, 空间分布总体较为均匀, 集中排泄于澄碧河河谷、沟谷等地势低洼处。而岩溶台地峰丛区, 水位埋藏普遍较深, 溶蚀强烈, 入渗快速, 地表蓄水能力差, 出现集中连片功能性缺水, 形成众多季节性

收稿日期: 2021–03–31; 修订日期: 2021–09–30。

基金项目: 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局、广西凌云县自然资源局“凌云县岩溶区 1:5 万水文地质环境地质调查、凌云县地下水资源开发利用与保护调查(编号: GXBSZC 2017–G3–0009–DY)”项目资助。

作者简介: 罗崴(1986—), 男, 工程师, 主要从事水文地质、岩溶塌陷、地质灾害调查研究工作。Email: 472540601@qq.com。



1. 二叠系—石炭系—泥盆系灰岩、白云岩; 2. 三叠系—二叠系—石炭系碳酸盐岩夹碎屑岩; 3. 三叠系上统碎屑岩; 4. 地层界线; 5. 地层界线(平行不整合); 6. 断层; 7. 推测断层; 8. 地表水系; 9. 地表水; 10. 县界。

图 1 研究区地质及构造概况

Fig. 1 Geological and structural sketch map of the study area

干旱洼地,存在典型的岩溶区干旱缺水问题。碎屑岩山地区,发育流量不大的泉水,供水能力有限。据统计,目前区内约有 2.83 万亩(1 亩 = 1/15 hm^2)耕地缺水,缺水人口约 5 346 人,饮水安全与农田干旱问题比较突出。

1.2 基础地质条件

研究区出露的主要地层从老到新依次有泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、白垩系、古近系,其中三叠系分布最广,第四系只在河谷、洼地零星分布。泥盆系融县组(D_3r)、东岗岭组(D_2d)、桂林组(D_3g)、唐家湾组(D_2t)为灰色、深灰色中厚层灰岩;石炭系马平组(C_2P_1m)、威宁组(C_2P_1h-m)、黄龙组(C_3h)、南丹组(C_2P_1n)、都安组(C_1-d)、巴

平组(C_1b)、隆安组(C_1la)、鹿寨组(C_1lz)为浅灰、深灰色中厚层至块状生物屑灰岩、白云岩;二叠系合山组(P_3h)、领薨组(P_3lh)、茅口组(P_2m)、栖霞组(P_2q)、四大寨组(P_2s)为浅灰色、灰色薄至中层生物屑灰岩、灰岩;三叠系兰木组(T_2l)为砂岩、泥岩,百逢组(T_2b)为泥岩、砂岩、泥岩夹粉砂岩,罗楼组(T_1l)为灰岩、泥质灰岩,石炮组(T_1s)为泥岩、泥灰岩、灰岩;古近系邕宁群(Ey)为泥岩、粉砂岩、砾岩。

研究区处于右江褶皱系百色凹陷内,褶皱和断裂构造发育,形成巴马区域性大断裂及凌云环形断裂 2 个构造单元。主要发育 NE 向和 NW 向构造形迹,地下河也主要沿这 2 组构造方向发育。

2 水文地质特征

2.1 岩溶发育特征

研究区碳酸盐岩区岩溶发育强烈。地表岩溶形态丰富,宏观以岩溶洼地、槽谷、峰丛、岩溶湖、天窗、消水洞、溶洞为主,微观有溶痕、溶隙等。区内岩溶洞穴共有 29 个,以垂向为主,水平洞穴中部多发育有宽大洞厅,大多发育于地下水径流较为集中的部位。主要发育于石炭系、二叠系中厚层状生物

屑灰岩地层中,以茅口组(P_2m)发育溶洞最多,占比为 34.4%。溶洞主要沿北东向、北西向构造发育,其中 NW—SE 方向最为发育。

本区 65 个钻孔中,有 22 个揭露溶洞,钻孔遇洞率为 33.8%。共揭露 40 个溶洞,洞高 0.2 ~ 47.4 m,平均线岩溶率 2.00%。根据钻孔资料统计(图 2),区内岩溶发育规律在垂向上具有分带性:310 ~ 370 m、470 ~ 690 m 高程段岩溶最为发育,岩溶发育高程跨度大,最低发育于 316.13 m,最高于 1 008.8 m 仍可见溶洞发育。

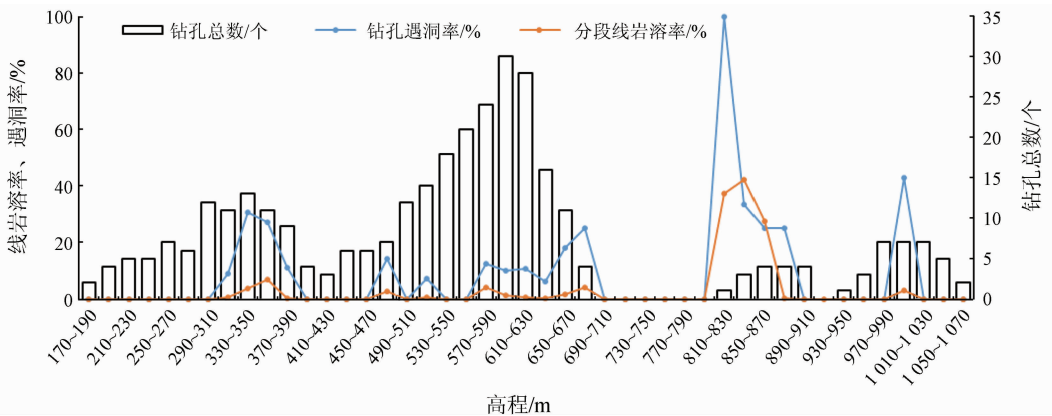


图 2 研究区岩溶发育随高程变化曲线

Fig.2 Diagram of karst development with elevation variation in the study area

2.2 地下水储存条件

研究区内碳酸盐岩地层广泛分布,面积约为 905 km²,占总面积的 44.1%,其余主要为碎屑岩,岩浆岩少量分布。结合地层岩性分布特征,研究区可分为红层碎屑岩含水岩组、碎屑岩含水岩组、碳酸盐岩(灰岩、白云岩)含水岩组、碳酸盐岩夹碎屑岩含水岩组。根据地下水赋存条件和含水岩组岩性及层组结构,研究区地下水可分为岩溶水、基岩裂隙水和孔隙裂隙水 3 个大类。其中孔隙裂隙水赋存于邕宁群地层孔隙裂隙中,基岩裂隙水主要赋存于其余非碳酸盐岩类地层基岩裂隙中,包括碎屑岩类构造裂隙水和岩浆岩网状风化裂隙水;而岩溶水则主要分布于碳酸盐岩地层以溶洞为主的含水介质中和碳酸盐岩夹碎屑岩地层以溶蚀裂隙为主的含水介质中。根据含水岩组含水介质的特征,区内岩溶水又可细分为碳酸盐岩类裂隙溶洞水、碳酸盐岩夹碎屑岩溶洞裂隙水 2 种类型。而孔隙裂隙水零星分布,水量贫乏,面积小,与基岩裂隙水合并计算。不同地层单元及其

所赋存的地下水类型见表 1 和图 3。

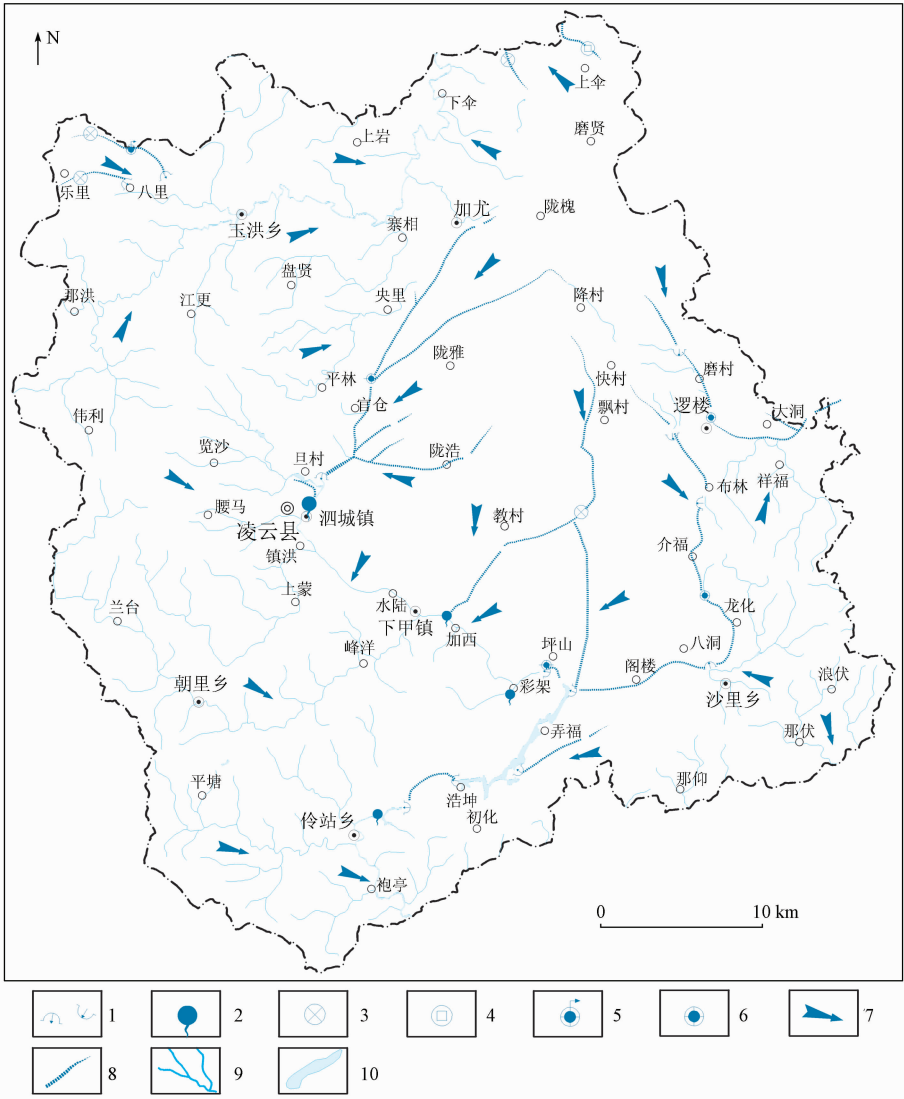
表 1 研究区地下水含水岩组及富水性

Tab.1 Water – bearing rock formation and water – rich groundwater in the study area

含水岩组	地下水类型	富水性	分布位置	面积/ km ²
灰 岩、 白云岩	岩 溶 水	丰富	中部澄碧河谷、东部逻楼村南部、北西岑老王山一带	71.94
		中等	东部大峒—磨村—关垌一带	74.44
		贫乏	研究区中部—北东部大部分岩溶区	665.71
碳酸盐 岩夹碎 屑岩	溶 洞 裂 隙 水	丰富	东部逻楼村附近	5.63
		中等	东 北 部 逻 楼—加 尤 一 带、西北部边缘地带	68.81
碎屑岩	基岩裂隙水	丰富	泗城镇西部中低山区	162.67
		中等	区内西北部、西部、西南部及东南部广泛分布	997.80
		贫乏	区内东部大洞村附近、中北部陇雅—加尤一带、北部上岩附近、西部里乐附近零星分布	1.58

输距离较短。深切沟谷的中上部为地下水天然露头集中的部位,以众多规模较小的下降泉排泄。沟

谷下部地下水难以形成集中排泄,以分散流的形式进入冲沟中,地表溪流逐渐变大(图4)。



1. 地下河出口、入口; 2. 岩溶泉; 3. 落水洞; 4. 溶井; 5. 溢流天窗; 6. 天窗; 7. 地下水流向; 8. 地下河管道; 9. 地表水系; 10. 地表水体。

图4 研究区地下水补径排示意图

Fig.4 Schematic diagram of groundwater diameter in the study area

2.4 地下水动态特征

研究区地下水埋深地段差异性较大。岩溶区地下水埋深普遍较深,非岩溶区地下水埋深普遍较浅。根据水位长期观测资料,岩溶区地下水补给区和径流区,枯季水位埋深一般 > 50 m,局部 80 ~ 100 m; 岩溶谷地、河谷等排泄区,枯季水位埋深一般 < 10 m。非岩溶区地下水枯季水位埋深一般 < 10 m(图5)。区内不同地段地下水位动态对短期的大气降水和季节性气候变化的响应程度存在一定的差异。

研究区水位长期观测资料表明,岩溶区不同地段水位年变幅差异较大。补给、径流区水位年变幅多大于 30 m,最大者达 71.2 m; 排泄区水位年变幅多在 10 m 以下; 整体上,岩溶地下水补给、径流区水位年变幅远大于排泄区。大部分地段的岩溶地下水位对大气降水的响应比较敏感,一般情况下,5 d 内降水量超过 30 mm 时,在本频次或下一个频次的水位动态曲线上有明显的反应(图6)。同时岩溶地下水位动态随季节变化明显,水位动态曲线在丰水季与枯水季有明显的峰谷变化。峰谷多数

具有不对称性,水位上升的时间很短,在 1~2 个月内即可达到峰值,但下降延续时间较长,常常在 12 月甚至次年 1 月份才降至最低谷(图 7),延续时间长达 4~5 个月。

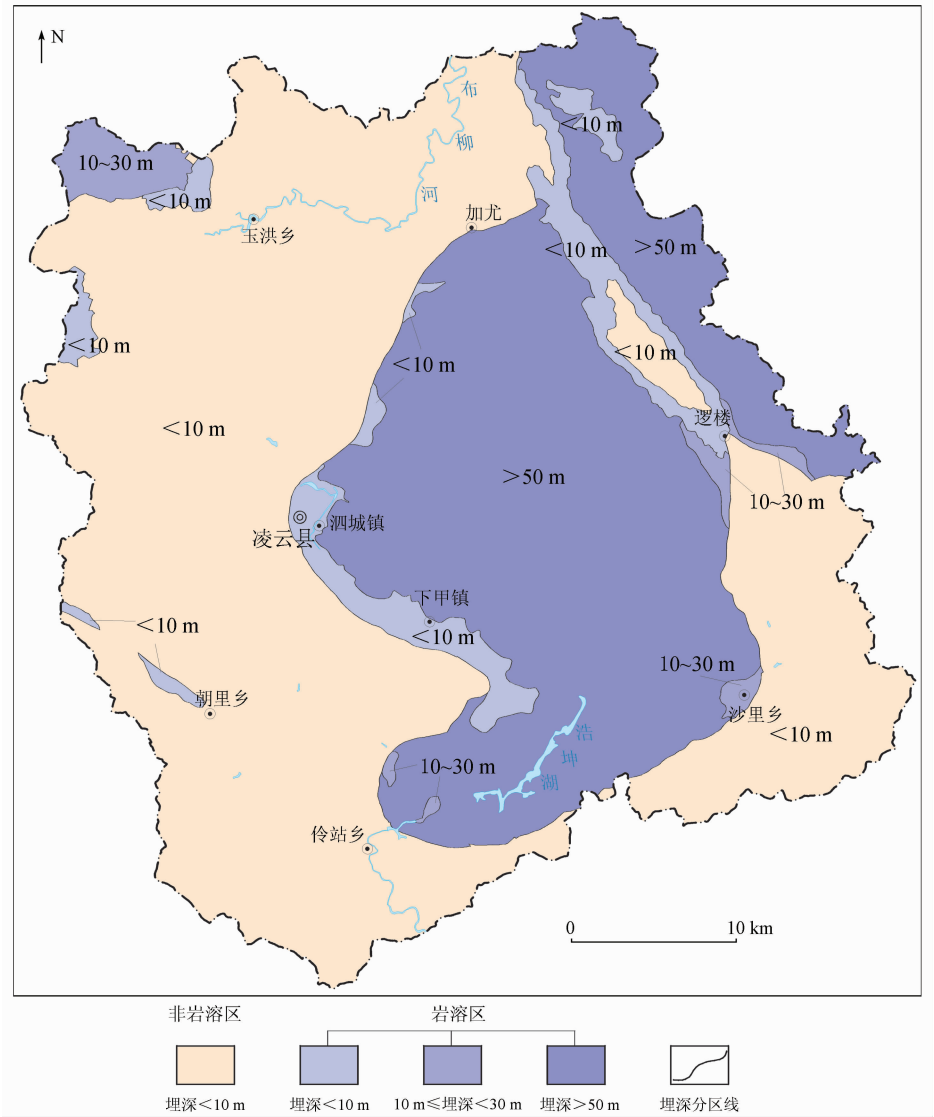


图 5 研究区地下水埋深分区

Fig. 5 Division plot of groundwater burial depth in the study area

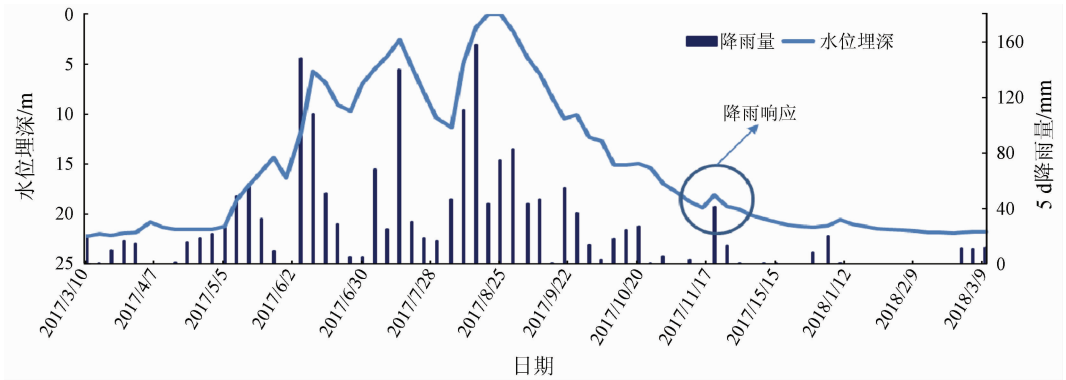


图 6 沙里小学机井(KCJ17)水位动态变化曲线

Fig. 6 Graph of dynamic variation of water level in machine well (KCJ17) of Shali Primary School

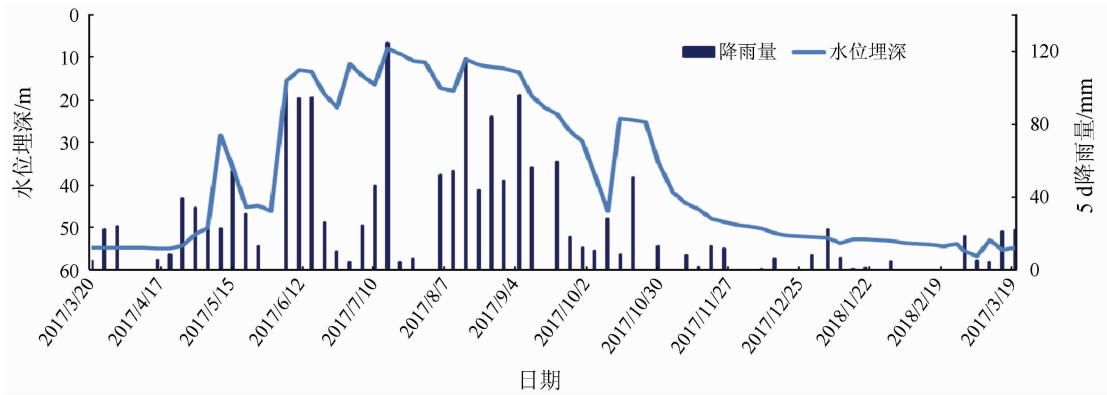


图 7 堡上屯机井 (KCJ05) 水位动态变化曲线

Fig. 7 Curve of dynamic variation of water level in machine well (KCJ05) of Baoshangtun

根据研究区长期观测资料分析,岩溶区内的地下水露头的流量对单次大气降水的响应较为敏感。地下河流量动态类型多为“极不稳定”型,随降雨呈暴涨暴落的特征;在径流区溢洪溶井、天窗等具有一定承压性,流量动态多呈“不稳定”型;而大多数下降泉流量动态为“较稳定”型。岩

溶区内的地下水露头流量对单次大气降水的响应较为敏感,无论是地下河还是岩溶泉,几乎每场大于 20 mm 的降水都会引起流量的增涨(图 8)。非岩溶区下降泉受季节性降雨的影响明显,流量相差悬殊,地表溪流丰枯水季流量相差明显,随季节性变化十分显著(图 9)。

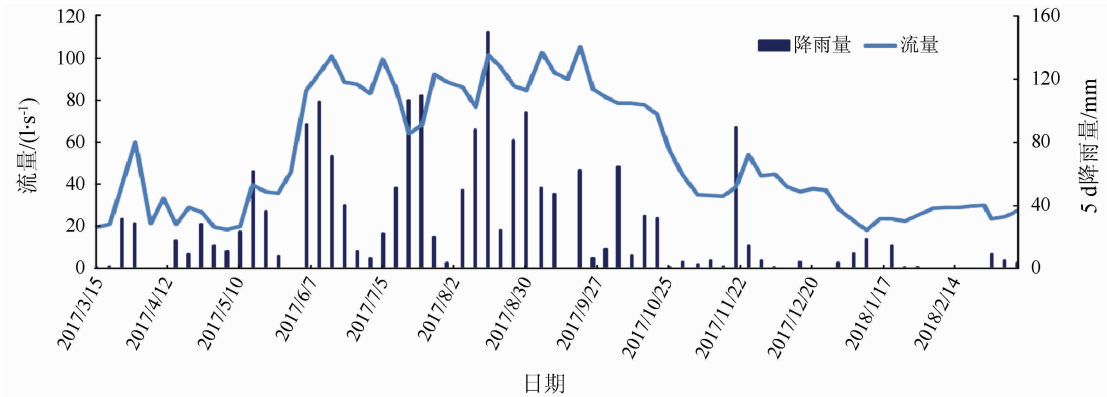


图 8 彩架下降泉 (S342) 流量动态变化曲线

Fig. 8 Curve of flow dynamics of Caijia Spring (S342)

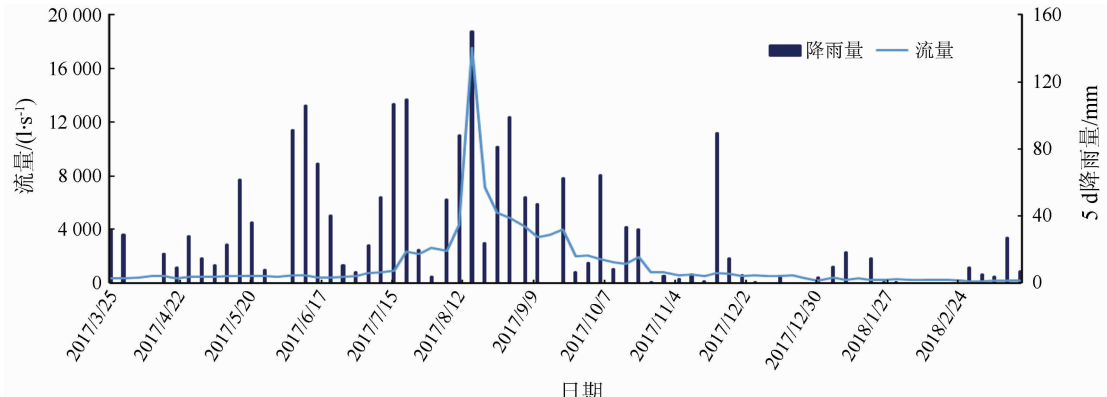


图 9 床屯溪流 (LS146) 流量动态变化曲线

Fig. 9 Curve of flow dynamics of Chuangtun Flow (LS146)

3 地下水资源量计算

3.1 地下水系统划分

研究区属西江水系的红水河水系和右江水系。按地表水系统的划分方法,珠江为一级水系统,西江为二级水系统,红水河和右江为三级水系统。研究区主要位于红水河上游布柳河水系、坡心河水系及右江上游澄碧河水系,为四级水系统,在此基础上进一步划分地下水五级子系统。根据地形地貌、含水层特征和地下水补给、径流、排泄条件,将研究区地下水五级子系统划分为岩溶地下河系统(I)、岩溶大泉系统(II)和基岩分散流系统(III)3 大类。根据各系统内不同含水岩组的特征细分为孔隙裂隙水区、裂隙溶洞水区、溶洞裂隙水区、基岩裂隙水区 4 种亚区。因此,区内共分为 7 个地下河系统、1 个岩溶泉系统和 5 个基岩分散流系统(表 2,图 10)。

表 2 研究区地下水系统划分表
Tab.2 Classification of the groundwater system in the research area

四级水系统	五级地下水系统	系统代号	面积/km ²
布柳河流域	河坪地下河系统	I ₁	12.56
	地下河系统	I ₂	12.94
	八里地下河系统	I ₃	89.26
	弄留地下河系统	I ₃	89.26
坡心河流域	分散流系统	III ₁	387.65
	地下河系统	I ₅	143.44
	坡心地下河支流系统	I ₅	143.44
澄碧河流域	水源洞地下河系统	I ₄	250.83
	地下河系统	I ₆	394.21
	弄福地下河系统	I ₆	394.21
	弄林地下河系统	I ₇	121.68
	岩溶泉系统	II ₁	21.62
	彩架泉系统	II ₁	21.62
	分散流系统	III ₂	177.10
	腰马河及镇洪河流域	III ₂	177.10
	朝里河流域	III ₃	171.94
	澄碧河中游段	III ₄	186.17
	浪伏分散流	III ₅	77.60

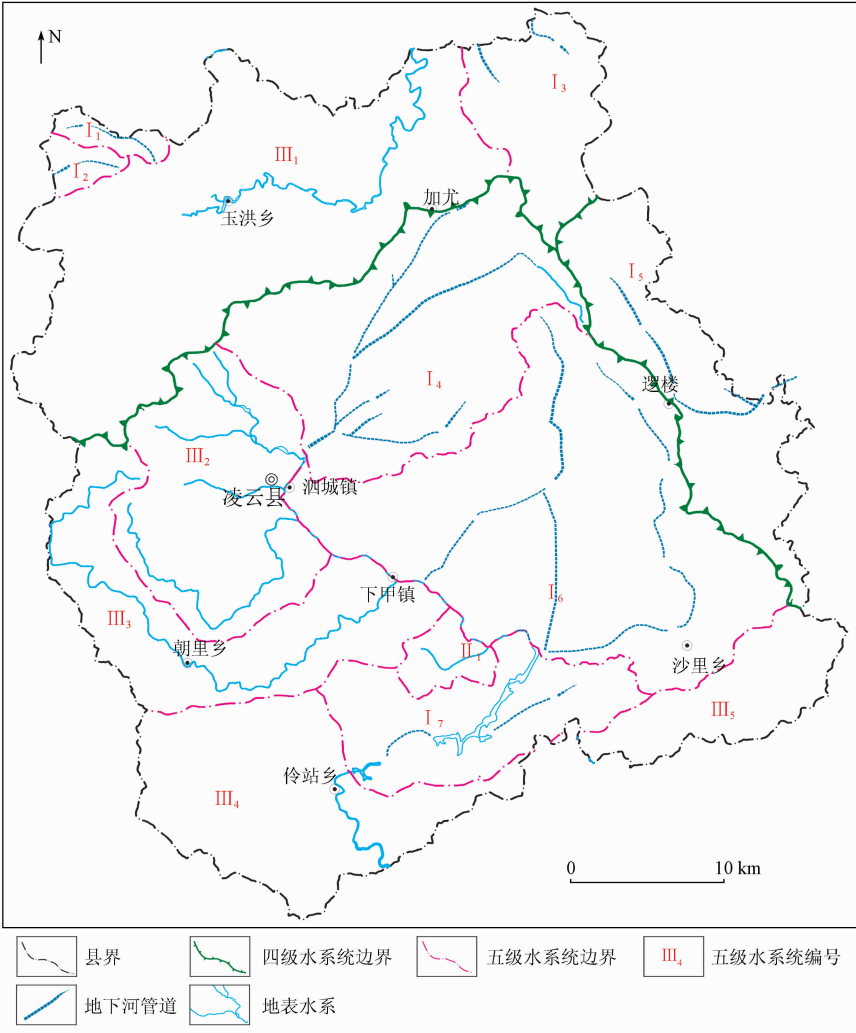


图 10 研究区地下水系统分布
Fig. 10 Distribution diagram of the groundwater system in the study area

3.2 计算单元划分

在地下水系统划分的基础上,进行地下水资源计算单元划分,主要遵循以下划分原则。

(1)为便于具体开发利用规划,以五级地下水系统中的地下河系统、岩溶泉系统和分散流子系统为一级分区,作为地下水资源评价的计算大单元。单元内地下水的补径排自成体系,保证水资源计算不重复。

(2)根据地下河系统、岩溶泉系统和分散流子系统内含水岩组类型进行二级分区,主要分为碳酸盐岩裂隙溶洞水区、碳酸盐岩夹碎屑岩溶洞裂隙水区、碎屑岩基岩裂隙水区 3 个亚区,其中孔隙裂隙水区因分布零散,面积较小,合并到碎屑岩基岩裂隙水区。

(3)同一含水岩组中,根据所处位置、含水岩组富水性及水文地质条件的不同进行三级分区,作为最终的地下水资源评价块段。

(4)为了方便计算,将五级地下水系统内相对孤立且面积小于 0.75 km²、位于系统边界部位、不能单独构成有效含水层的块段,根据含水岩组和富水性相近相似的原则进行合并处理。

根据以上划分原则,将表 2 所列的 13 个地下水系统划分为 54 个含水块段进行水资源量评价。

3.3 天然补给量计算

采用降水入渗系数法计算地下水天然补给量,计算公式为

$$Q_{补} = 100 \cdot \alpha \cdot A \cdot P。$$
 (1)

式中: $Q_{补}$ 为天然补给量,万 m³/a; α 为降水入渗系数; A 为计算区面积,km²; P 为计算期降水量,m。

各个计算区面积在 1:5 万数字地图上直接读取。根据研究区气象站 1961—2004 年降水量资料进行统计,50% 保证率的年降水量为 1 697.9 mm,75% 保证率的年降水量为 1 449.4 mm,95% 保证率的年降水量为 1 183.1 mm,多年平均降水量为 1 677.3 mm。

根据地下河出口和岩溶大泉的流量动态长期观测资料及溶井、天窗和钻孔等出水点的水位动态长期观测资料,推算相应区段的降水入渗系数 α ,其中相似条件下的 α 取加权平均值,最终确定 α 的取值(表 3)。

表 3 各单元降雨入渗系数取值表
Tab.3 Values of rainfall infiltration coefficients for each unit

含水岩组	富水性	降水入渗系数	单元编号
灰 岩、白云岩	丰富	0.51	$I_1^{1-1}、I_1^{1-2}、I_1^{1-3}、I_2^1$
		0.57	I_4^1
		0.60	$I_6^{1-1}、I_6^{1-2}、II_1^1、III_3^1$
		0.73	III_1^1
		0.67	III_2^1
碳酸盐岩夹碎屑岩	中等	0.57	I_5^1
	贫乏	0.47	$I_3^1、I_4^2、I_6^2、III_2^2、III_3^2$
	丰富	0.38	$I_5^2、I_6^3$
	中等	0.38	$I_2^2、I_3^{2-1}、I_3^{2-2}、I_3^{2-3}、III_1^{2-1}、III_1^{2-2}、III_1^{2-3}、III_3^{3-1}、III_3^{3-2}、$
		0.31	$I_4^{3-1}、I_4^{3-2}、I_5^3、I_6^{4-1}、I_6^{4-2}、I_6^{4-3}$
碎屑岩	丰富	0.22	III_2^3
	中等	0.22	$I_1^3、I_2^3、I_3^3、I_4^{4-1}、I_4^{4-2}、I_5^{4-1}、I_5^{4-2}、I_6^{5-1}、I_6^{5-2}、I_7^{2-1}、I_7^{2-2}、II_1^3、III_1^3、III_3^4、III_4^1、III_5^1$

将上述参数代入公式(1),得到研究区地下水多年平均天然补给量($Q_{补}$)为 112 619.73 万 m³/a,50% 保证率的 $Q_{补}$ 为 114 002.92 万 m³/a,75% 保证率的 $Q_{补}$ 为 97 317.77 万 m³/a,95% 保证率的 $Q_{补}$ 为 79 437.42 万 m³/a,其中岩溶地下水多年平均天然补给量为 69 797.68 万 m³/a,基岩裂隙水多年平均天然补给量为 42 822.05 万 m³/a。

3.4 可开采资源量计算

采用枯季径流模数法计算地下水可开采资源量,计算块段的划分与前面一致,计算公式为

$$Q_{允} = 3.153\ 6 \times M_{枯} \cdot A。$$
 (2)

式中: $Q_{允}$ 为计算块段地下水允许开采量,万 m³/a; $M_{枯}$ 为计算块段地下水枯季径流模数,L/(s · km²); A 为计算块段面积,km²。

地下水枯季径流模数($M_{枯}$)采用公式 $M_{枯} = Q_{枯}/A'$ 计算,其中 $M_{枯}$ 为枯季径流模数(L/(s · km²)), $Q_{枯}$ 为地下河系统、岩溶泉系统、基岩分散流系统枯季流量(L/s), A' 为地下河系统、岩溶泉系统、基岩分散流系统汇水面积(km²)。全排型地下河或岩溶泉点根据枯季统测流量计算枯季径流模数($M_{枯}$)。碎屑岩区根据溪沟测流点的枯季流量数据可求出相应块段的径流模数。对于既有岩溶区又有非岩溶区的地下水系统,首先通过溪沟测流数据求取非岩溶区枯季径流模数,然后根据地下水系统总排泄量求取平均径流模数来反求岩溶区枯季径流模数值。其他无实测资料的地段,根据水文地

质条件的相似性,采用比拟法进行取值。各区枯季径流模数值的计算结果见表 4。

表 4 各单元枯季径流模数取值表
Tab.4 Value of runoff modulus of each unit in dry season

系统类型	岩组类型	富水性	枯季径流模数/ (L·s ⁻¹ ·km ⁻²)	单元编号
地下河系统	灰岩、白云岩	丰富	7.41	I ₁ ¹⁻¹ 、I ₁ ¹⁻² 、I ₁ ¹⁻³ 、I ₂ ¹ 、I ₄ ¹ 、I ₆ ¹⁻¹ 、I ₆ ¹⁻²
			9.88	I ₂ ¹
			7.48	I ₄ ¹ 、I ₆ ¹⁻²
			7.59	I ₆ ¹⁻¹
		中等	3.77	I ₅ ¹
		贫乏	0.73	I ₃ ¹ 、I ₄ ²
			1.40	I ₆ ² 、I ₇ ¹
		丰富	7.54	I ₅ ²
			7.59	I ₆ ³
	碳酸盐岩夹碎屑岩	中等	3.71	(I ₆ ³)
			4.94	(I ₂ ²)
			3.77	I ₅ ³
			3.74	I ₃ ²⁻¹ 、I ₃ ²⁻² 、I ₃ ²⁻³ 、I ₄ ³⁻¹ 、I ₄ ³⁻² 、
			3.80	I ₆ ⁴⁻¹ 、I ₆ ⁴⁻² 、I ₆ ⁴⁻³
	碎屑岩	中等	1.69	I ₁ ³ 、I ₂ ³ 、I ₃ ³ 、
			2.75	I ₄ ⁴⁻¹ 、I ₄ ⁴⁻² 、I ₅ ⁴⁻¹
			1.83	I ₅ ⁴⁻² 、I ₆ ⁵⁻¹ 、I ₆ ⁵⁻²
			2.15	I ₇ ²⁻¹
			2.26	I ₇ ²⁻²
岩溶泉系统	灰岩、白云岩	丰富	7.48	Ⅱ ₁ ¹
		贫乏	1.40	Ⅱ ₁ ²
	碎屑岩	中等	2.15	Ⅱ ₁ ³
基岩分散流系统	灰岩、白云岩	丰富	9.88	Ⅲ ₁ ¹
			7.48	Ⅲ ₂ ¹ 、Ⅲ ₃ ¹
		贫乏	0.73	Ⅲ ₂ ²
			1.40	Ⅲ ₃ ²
		中等	4.94	Ⅲ ₁ ²⁻¹ 、Ⅲ ₁ ²⁻² 、Ⅲ ₁ ²⁻³ 、
			3.74	Ⅲ ₃ ³⁻¹ 、Ⅲ ₃ ³⁻²
	碎屑岩	丰富	3.83	Ⅲ ₂ ³
		中等	1.69	Ⅲ ₁ ³
			2.15	Ⅲ ₃ ⁴
			1.66	Ⅲ ₄ ¹
			2.26	Ⅲ ₅ ¹

将各参数代入式(3),计算得到区内地下水总允许开采资源量为 14 057.67 万 m³/a,再按 30%的比例扣除生态需水后,可得允许可开采资源量为 9 840.37 万 m³/a,占多年平均天然补给量的 8.74%。

3.5 地下水资源空间分布特征

区内地下水赋存状态相对比较简单,地下水资源空间分布相对较为均匀。以四级地下水系统为空间尺度进行统计,其地下水资源空间配比关系见表 5 和图 11。根据图表可知,在四级地下水系统的

表 5 四级地下水系统地下水资源量分布情况
Tab.5 Distribution of underground water resources in level 4 Groundwater System

四级地下水系统	面积		多年平均补给资源量		可开采资源量	
	面积/ km ²	百分比/ %	资源量/ (万 m ³ ·a ⁻¹)	百分比/ %	资源量/ (万 m ³ ·a ⁻¹)	百分比/ %
布柳河流域	502.41	24.54	23 439.96	20.81	2 330.49	23.68
坡心河流域	143.44	7.01	9 825.46	8.73	969.57	9.85
澄碧河流域	1 401.15	68.45	79 354.32	70.46	6 540.31	66.47
合计	2 047.00	100.00	112 619.74	100.00	9 840.37	100.00

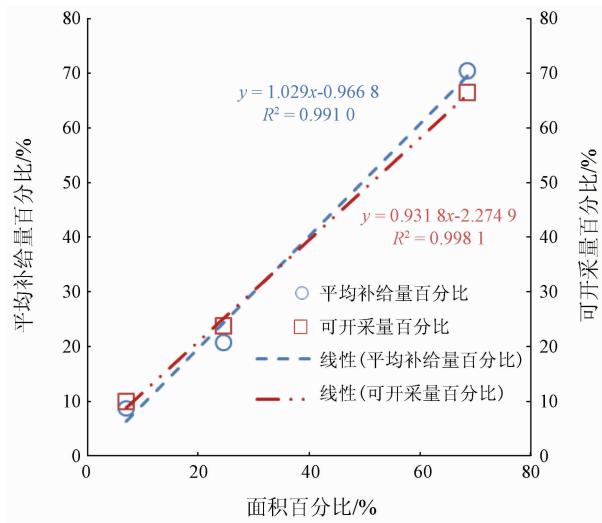


图 11 四级地下水系统地下水资源量与系统空间规模的关系

Fig. 11 Relationship between groundwater resources quantity and spatial scale in Level 4 Groundwater System

空间尺度上,地下水在不同流域的空间赋存状态较为相似,地下水的空间分布相对较为均匀。

同样,以五级地下水系统为空间尺度进行水资源空间分布统计,结果见图 12 和表 6。由此可知,五级地下水系统地下水的空间分布总体也较为均匀,只在个别系统因地形地貌、岩溶发育和植被对

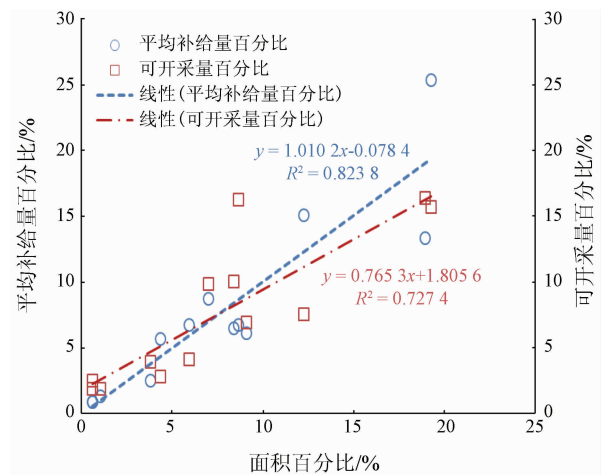


图 12 五级地下水系统地下水资源量与系统空间规模的关系

Fig. 12 Relationship between groundwater resources and spatial scale in Level 5 Groundwater System

表 6 五级地下水系统地下水资源量分布情况

Tab. 6 Distribution of underground water resources in Level 5 Groundwater System

五级地下水系统		面积		多年平均补给资源量		可开采资源量	
名称	代号	面积/km ²	百分比/%	资源量/ (万 m ³ · a ⁻¹)	百分比/%	资源量/ (万 m ³ · a ⁻¹)	百分比/%
河坪地下河系统	I ₁	12.56	0.61	1 025.28	0.91	188.34	1.91
八里地下河系统	I ₂	12.94	0.63	1 009.85	0.90	245.36	2.49
弄留地下河系统	I ₃	89.26	4.36	6 407.77	5.69	280.14	2.85
布柳河上游段	Ⅲ ₁	387.65	18.94	14 997.06	13.32	1 616.65	16.43
坡心地下河支流系统	I ₅	143.44	7.01	9 825.46	8.73	969.57	9.85
水源洞地下河系统	I ₄	250.83	12.25	17 020.13	15.11	740.83	7.53
弄福地下河系统	I ₆	394.21	19.26	28 536.17	25.34	1 546.99	15.72
弄林地下河系统	I ₇	121.68	5.94	7 600.99	6.75	407.88	4.15
彩架泉系统	Ⅱ ₁	21.62	1.06	1 523.44	1.35	187.49	1.91
腰马河及镇洪河流域	Ⅲ ₂	177.10	8.65	7 593.05	6.74	1 599.76	16.26
朝里河流域	Ⅲ ₃	171.94	8.40	7 347.26	6.52	988.01	10.04
澄碧河中游段	Ⅲ ₄	186.17	9.10	6 869.78	6.10	682.22	6.93
浪伏分散流	Ⅲ ₅	77.60	3.79	2 863.49	2.54	387.15	3.93
合计		2 047.00	100.00	112 619.74	100.00	9 840.37	100.00

地下水调蓄能力不同而导致其资源量评价价值比其他地下水系统的值要大。

岩溶水为研究区最主要的地下水资源,同时也是重要的供水水源。因此,有必要对岩溶水的空间分布特征进行单独论述。以四级地下水系统为空间尺度进行统计,各系统内岩溶水资源量的空间分

布见表 7 和图 13。可见,四级地下水系统岩溶水在空间分布上相对较为均匀。以五级地下水系统为空间尺度进行统计时(图 14,表 8),岩溶水的不均一性会有所彰显,但整体上依然较为均匀(图 13)。受到个别地下水系统参数的差异的影响,其相关系数明显降低。

表 7 四级地下水系统岩溶水资源量分布情况

Tab.7 Distribution of karst water resources quantity in Level 4 Groundwater System

四级地下水系统	面积		多年平均补给资源量		可开采资源量	
	面积/ km ²	百分比/ %	资源量/ (万 m ³ · a ⁻¹)	百分比/ %	资源量/ (万 m ³ · a ⁻¹)	百分比/ %
布柳河流域	123.15	13.89	9 445.04	13.53	915.58	21.38
坡心河流域	83.93	9.47	7 629.50	10.93	712.06	16.62
澄碧河流域	679.45	76.64	52 723.16	75.54	2 655.47	62.00
合计	886.53	100.00	69 797.70	100.00	4 283.11	100.00

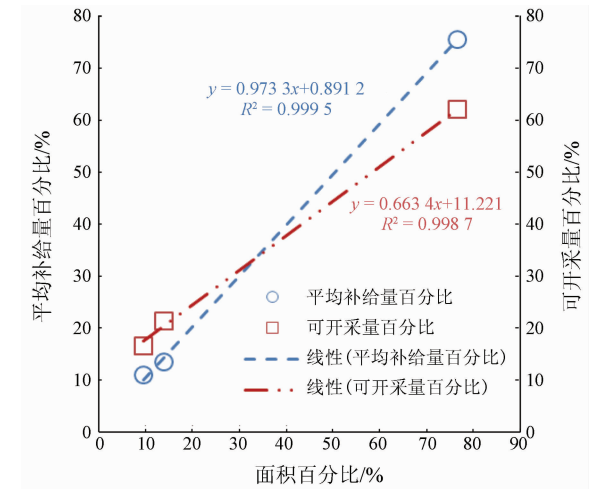


图 13 四级地下水系统岩溶水资源量与系统空间规模的关系

Fig.13 Relationship between karst water resources quantity and spatial scale in Level 4 Groundwater System

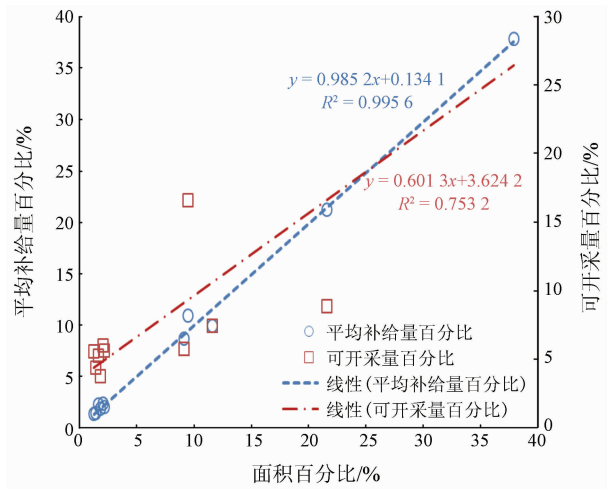


图 14 五级地下水系统岩溶水资源量与系统空间规模的关系

Fig.14 Relationship between karst water resources quantity and spatial scale in Level 5 Groundwater System

表 8 五级地下水系统岩溶水资源量分布情况

Tab.8 Distribution of karst water resources quantity in Level 5 Groundwater System

五级地下水系统		面积		多年平均补给资源量		可开采资源量	
名称	代号	面积/km ²	百分比/%	资源量/ (万 m ³ · a ⁻¹)	百分比/%	资源量/ (万 m ³ · a ⁻¹)	百分比/%
河坪地下河系统	I ₁	12.33	1.39	1 016.80	1.46	187.48	4.38
八里地下河系统	I ₂	11.07	1.25	940.85	1.35	238.39	5.57
弄留地下河系统	I ₃	80.66	9.10	6 090.43	8.73	248.06	5.79
布柳河上游段	Ⅲ ₁	19.09	2.15	1 396.97	2.00	241.66	5.64
坡心地下河支流系统	I ₅	83.93	9.47	7 629.50	10.93	712.06	16.62
水源洞地下河系统	I ₄	191.40	21.59	14 827.13	21.24	380.05	8.87
弄福地下河系统	I ₆	336.33	37.94	26 400.37	37.82	1 313.17	30.66
弄林地下河系统	I ₇	103.04	11.62	6 913.16	9.90	318.45	7.43
彩架泉系统	Ⅱ ₁	16.10	1.82	1 319.75	1.89	161.29	3.77
腰马河及镇洪河流域	Ⅲ ₂	14.43	1.63	1 590.43	2.28	224.41	5.24
朝里河流域	Ⅲ ₃	18.15	2.05	1 672.32	2.40	258.09	6.03
合计		886.53	100.00	69 797.70	100.00	4 283.11	100.00

烈,地表岩溶形态丰富,共发育 8 条地下河,岩溶发育在垂向上具有一定分带性:310~370 m、470~690 m 高程段岩溶最为发育,岩溶发育高程跨度大。

(2)区内地下水主要接受大气降水补给,地下水类型主要划分为碳酸盐岩裂隙溶洞水、碳酸

5 结论

(1)广西凌云县区内碳酸盐岩区岩溶发育较强

盐岩夹碎屑岩溶洞裂隙水、碎屑岩基岩裂隙水 3 种子类型。

(3) 全区地下水多年平均天然补给量为 112 619.73 万 m³/a,其中岩溶地下水多年平均天然补给量为 69 797.68 万 m³/a,基岩裂隙水多年平均天然补给量为 42 822.05 万 m³/a。可开采资源量为 9 840.37 万 m³/a。

(4) 区内地下水赋存状态相对比较简单,地下水资源空间分布总体相对较为均匀。

参考文献 (References):

[1] 池苗苗. 基于对地下水资源开发利用问题的思考[J]. 环境与发展,2018,30(9):219-220.
Chi M M. Thoughts on the development and utilization of groundwater resources[J]. Environ Dev,2018,30(9):219-220.

[2] 张艳,王正红,赵钰. 济南市地下水资源与环境质量评价[J]. 智能城市,2021,7(1):113-114.
Zhang Y, Wang Z H, Zhao Y. Evaluation of groundwater resources and environmental quality in Jinan city[J]. Intell City, 2021, 7(1):113-114.

[3] 颜久印,马建锋. 地下水开发引起的环境问题与治理[J]. 环境与发展,2020,32(4):69-70.
Yan J Y, Ma J F. Environmental problems caused by groundwater development and its treatment[J]. Environ Dev,2020,32(4):69-70.

[4] 张博源,王爱欣,李鹏飞,等. 地下水资源评价方法与发展研究[J]. 工程技术研究,2020,5(19):231-232.
Zhang B Y, Wang A X, Li P F, et al. Research on the evaluation method and development of groundwater resources[J]. Eng Technol Res,2020,5(19):231-232.

[5] 万福涛,陈昭蔚,刘永秋,等. 水资源评价关键问题探讨[J]. 工程建设与设计,2020(20):120-121.
Wan F T, Chen Z W, Liu Y Q, et al. Discussion on the key issues of water resources evaluation[J]. Constr Des Eng,2020(20):120-121.

[6] 梁丽青,刘喜峰,常颖. 地下水资源评价发展及现状研究[J]. 江西建材,2016(20):222,226.
Liang L Q, Liu X F, Chang Y. Research on the evaluation and status of underground water resources[J]. Jiangxi Build Mater,2016(20):222,226.

[7] 杨晓强. 浅谈地下水资源评价方法[J]. 内蒙古水利,2015(1):78-79.
Yang X Q. A brief discussion on the evaluation method of groundwater resources[J]. Inner Mongolia Water Resour,2015(1):78-79.

[8] 胡广录,张克海. 地下水资源评价综述[J]. 水资源开发与管理,2020(11):34-39.
Hu G L, Zhang K H. Summary of groundwater resources evaluation[J]. Water Resour Dev Manag,2020(11):34-39.

[9] 刘长生. 地下水资源评价方法的研究[J]. 石化技术,2017,24(9):210.
Liu C S. Research on the evaluation methods of groundwater resources[J]. Petrochem Ind Technol,2017,24(9):210.

Evaluation of groundwater resources quantity in
Lingyun County of Guangxi

LUO Wei

(Guangxi Geological Survey Institute, Guangxi Nanning 530023, China)

Abstract: In order to study the situation of groundwater resources in Lingyun County of Guangxi, based on the analysis of geological structure, karst development characteristics, water-bearing medium and hydrodynamic conditions, the author evaluated the natural recharge and recoverable resources of groundwater in Lingyun County through precipitation infiltration coefficient method and runoff modulus method in dry season, and analyzed the spatial distribution characteristics of groundwater resources. The results show that the annual average natural recharge of groundwater in the whole region is $112\,619.73 \times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$, of which the annual average natural recharge of karst groundwater is $69\,797.68 \times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$, and the annual average natural recharge of bedrock fissure water is $42\,822.05 \times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$, with $9\,840.37 \times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ of recoverable resource. The karst is well developed in this area, with abundant karst forms. The karst development has certain subdivision in the vertical, of which the elevation span is large, and the overall spatial distribution of groundwater resources is relatively uniform. This research results provide scientific basis for the sustainable development and utilization of groundwater resources in Lingyun County.

Keywords: groundwater resource evaluation; precipitation infiltration coefficient method; runoff modulus method in dry season; space distribution of groundwater