

宋小庆, 屈秋楠, 杨振华. 岩溶地区小城镇地下水资源多目标应急配置研究: 以织金县为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 218-227.
DOI: 10. 11932/karst20180208

岩溶地区小城镇地下水资源多目标应急配置研究 ——以织金县为例

宋小庆^{1,2}, 屈秋楠^{1,2}, 杨振华³

(1. 贵州地质工程勘察设计院, 贵阳 550008; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局 111 地质大队, 贵阳 550008;
3. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550002)

摘要:以织金县珠藏向斜北段储水构造为例, 依据混合整数线性规划和多目标线性规划原理, 从保障应急水资源供给的角度构建了不同干旱条件下地下水资源多目标应急配置模型(E-MIP), 并提出了2010—2030年的织金县城区地下水资源应急配置方案, 结果表明: (1) 珠藏背斜北部储水构造中裂隙—溶洞水的出露方式以地下河集中排泄为主, 平均流量为 $62.04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 基岩—松散岩类孔隙泉则以分散排泄为主, 平均流量仅 $2.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; (2) 干旱程度的加深不单纯限制了可利用水资源量, 也直接刺激了用水效率和社会经济效益的提升, 2010—2030年期间的织金县重度干旱缺水率比轻度干旱低 21.25%, 但其社会经济效益却增加了 5.84 倍; (3) 应急地下水资源配置原则是优先保障居民生活用水需求, 其次依据用水效率和权重次序对盈余地下水资源量进行产业化分配。进一步推算出了 2020 年、2025 年织金县城区不同干旱状态下水资源应急配置方案。

关键词: 小城镇; 地下水资源; 应急配置; 储水构造

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4810(2018)02-0218-10

0 引言

西南岩溶地区地下水资源储量丰富, 可开发利用潜力巨大, 其天然储量达 $1.808 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 可开采资源量为 $620 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ [1-2], 是区域社会经济持续、稳定发展的基础性战略资源, 对其优化配置不仅有利于实现水资源循环系统可持续性, 也有助于保证社会经济、资源、生态环境的协调发展。然而, 岩溶地下水资源优化配置受旱涝灾害、特殊水资源补给、径流、排泄规律, “三生” 供需水量, 水权制度等多个子系统 [3] 的影响, 使得地下水资源供需配置时空差异显著, 尤其是干旱时期, 如何实现多目标的地下水资源应急利用, 对优化配置技术与方法均提出了新的挑战。

解决地下水资源应急优化配置的关键问题在于复杂地下储水构造中水资源可开发量计算以及在此

基础上的水资源供需方案(部门用水效益与优先权的博弈)的确定。以往国内外学者从以下 2 个方面探讨不同地区水资源多目标配置方案: (1) 计算地下水资源量开发潜力, 对于地下水资源量模拟多采用 MODFLOW 模型实现地下水开发潜力的模拟 [4], 例如, 粟晓玲等 [5] 采用非均值各向异性介质的三维地下水流模型模拟地下水量, 通过对不同方案的地下水位模拟得出优化方法; Rahman, Chatterjee 等 [6-7] 根据地下水资源补给量的时空特征, 得到不同地下水资源配置方案对水资源平衡的影响; (2) 地表—地下水资源配置模型优化, 其优化配置模型包括蚁群—粒子群混合算法 [8]、模拟退火遗传算法 [9]、多目标混沌算法 [10] 等多种算法, 例如, 杨改强等 [11] 依据排队理论确定农业灌区地表水、地下水优化配置模型和方案; Loo 等 [12] 则分析了应急状态下水资源配置的技术和标准选择。

资助项目: 国家科技支撑计划(2014BAB03B03); 贵州省地质勘查基金项目(黔国土资地环函[2014]23)

第一作者简介: 宋小庆(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质、地热地质工作。E-mail: 376109559@qq.com。

通信作者: 杨振华(1991—), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向为水资源开发利用与评价。E-mail: yangzh750@sina.com。

收稿日期: 2017-09-26

然而,水资源应急配置对岩溶“工程性”缺水区的研 究薄弱,仅通过地下水资源模拟的角度对地下水资源进行优化配置^[13-14],鲜有从应急地下水资源利用的角度对不同用水部门的需水时空特征、供水次序进行梳理,导致优化配置方案不具备应急调控价值,对旱涝灾害频发的岩溶地区指导意义不大。

基于此,本文以珠藏向斜北段储水区的地下水资源应急配置为例,构建小城镇地下水资源多目标应急配置模型(Emergency multi-objective integer programming, E-MIP),提出不同于旱条件下的织金县 2010—2030 年地下水资源应急配置方案,以满足干

旱时期水资源优化配置,实现地下水资源应急利用综合效益最大化。

1 地下水系统分区特征

珠藏向斜北段储水构造区总面积为 146 km²,受区内碎屑岩及断层的阻水作用形成地下水的集中与分散排泄区(图 1),其北段地下水资源以裂隙泉水露头 和地下河出口为主,探采井开发流量较小,其泉点露头达 27 处,平均流量为 2.14 m³ · s⁻¹,地下河集中排泄,故流量较大,平均流量为 62.04 m³ · s⁻¹(表 1)。

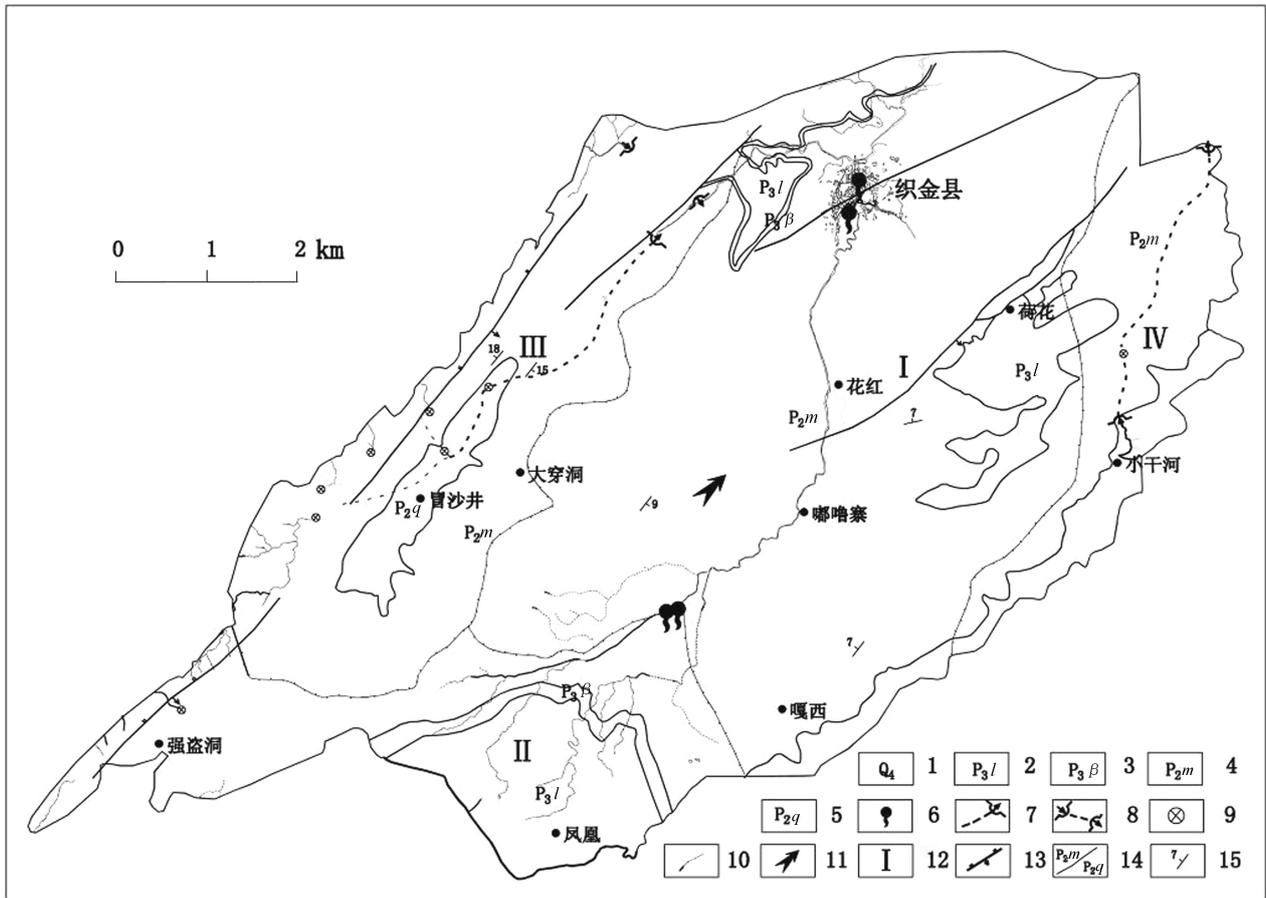


图 1 珠藏向斜北段水文地质简图^[15]

Fig. 1 Hydrogeological map of the northern Zhucang syncline

1—第四系 2—二叠系上统龙潭组 3—二叠系上统峨眉山玄武岩 4—二叠系中统茅口组 5—二叠系中统栖霞组 6—下降泉 7—地下河及出口
8—伏流 9—落水洞 10—地下水系统流域分水岭 11—地下水流向 12—地下水系统及编号 13—逆断层 14—地质界线 15—岩层产状

依据含水岩组界线和裂隙水出露特征将珠藏向斜北段储水构造可划分为 4 个子系统(图 1),各地下水系统特征如下:

1.1 分散排泄系统

(1) 四方井—迴龙潭岩溶泉系统(I)

迴龙潭—四方井岩溶泉系统的含水岩组为二叠系中统栖霞组(P_{2q})和部分第四系(Q),岩性为中厚层至块状灰岩夹燧石团块,地下水类型以裂隙—溶洞水为主,地下水调蓄能力强;地貌以峰丛槽谷为主,槽谷发育方向主要受控于 20°与 120°两组裂隙,其中

表1 珠藏向斜北段不同类型地下水流量特征
Table 1 Characteristics of different types groundwater flow in the northern of Zhucang syncline

储水构造	水文地质分区	含水岩组	出露编号	出露类型	平均流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
珠藏向斜北段	金鱼池岩溶泉系统	二叠系上统峨眉山玄武岩及龙潭组 $P_3\beta-l$	S228	上升泉	0.25
			S94	上升泉	2.00
			S93	上升泉	1.00
			S204	上升泉	10.00
			S205	上升泉	10.00
			Ks72	探采井	2.00
			S271	上升泉	0.50
			S273	上升泉	1.20
			S275	上升泉	4.20
			S259	上升泉	1.30
			S276	上升泉	1.20
			S207	上升泉	0.01
			S208	上升泉	0.05
			S209	上升泉	0.15
	S210	上升泉	0.01		
	四方井一週龙潭岩溶泉系统	二叠系中统栖霞组 (P_2q) 和第四系 (Q)	S14	上升泉	1.41
			S15	上升泉	0.92
			S17	上升泉	4.00
			Ks211	探采井	0.10
			S5	上升泉	0.20
			BS4	上升泉	0.12
			S239	上升泉	0.05
			S244	上升泉	0.20
			S51	上升泉	6.30
			S46	上升泉	5.00
			S278	上升泉	4.50
			S24	上升泉	0.50
S29			上升泉	0.05	
S257	地下河出口	94.77			
S270	地下河出口	62.00			
大冲地下河系统	二叠系中统栖霞—茅口组 (P_2q-m)	S43	地下河出口	42.9	
杨家冲地下河系统	二叠系中统栖霞组 (P_2m)	S75	上升泉	2.7	
		S45	地下河出口	48.5	

20°走向裂隙控制了区域内地下水的主径流方向,且受地形地貌及向斜构造控制,地下水自南西向北东径流,并最终与岩溶大泉的形式由向斜两翼向织金河槽谷中汇集。

(2) 金鱼池岩溶泉系统(II)

金鱼池岩溶泉系统的含水岩组主要为二叠系中统茅口组灰岩(P_2m)和上统龙潭组(P_2l),地貌上以峰丛槽谷、侵蚀—溶蚀中低山沟谷地貌为主,槽谷发育方向主要受控于 83°与 175°两组裂隙,沟谷多沿 30°走向裂隙发育。

1.2 集中排泄系统

(1) 大冲地下河系统(III)

大冲地下河发源于独店子、河坝一带的二叠系中统栖霞—茅口组(P_2q-m),出露于织金县城西侧的大冲村,流域面积为 19.5 km^2 ;地貌上以峰丛洼地为主,且洼地多呈漏斗状,底部发育落水洞,洼地分布方向与背斜轴向一致,整体上由南西向北东方向逐渐降低;地下河发育主要受控于 35°走向的裂隙,其管道总长 8.24 km,平均水力坡度为 18.75‰,平均流量为 42.9 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 杨家冲地下河系统(IV)

杨家冲地下河位于珠藏向斜东翼,属岩溶峰丛洼地分布区,发育地层为二叠系中统栖霞组(P_2m),岩性为中厚层至块状灰岩含燧石团块,流域面积达 12.91 km^2 ;该地下河发源于小干河、马龙箐一带,地下河管道自南西向北东呈单枝状发育,河管道长 5.435 km,平均水力坡度为 28.5‰;受大嘎断层阻水带的影响,地下水只接受部分小干河流域的地表水补给,然后集中排泄,且平均流量仅为 48.5 $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

珠藏向斜北东段(织金县城一带)的水文地质条件、地下水化学特征、含水层参数、地下水流量等数据来源于贵州地质工程勘察设计院 2010 年开展的“贵州省织金县县城应急水源地勘查”项目成果,其中水文地质特征依据织金县 1:50 000 水文地质图集整理得到;区域各部门用水量、人口、产业等社会经济指标来源于《贵州省织金县城乡总体规划》(2011—2030)、《织金县国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》和《织金县 2010 年政府工作报告》。

2.2 地下水资源应急配置模型

为实现小城镇应急地下水资源配置的经济效益、社会效益和公共效益协调统一^[16-17],满足多目标用水部门对地下水资源的应急需求(水污染事件发生、干旱等应急条件),本文采用多目标线性规划模型(Multi-objective linear programming),构建小城镇地下水资源应急优化配置模型(E-MIP)和供水方案。

2.2.1 E-MIP 模型构建

根据不同水文年储水单元的补给量和径流量,计算出不同降水保证率下水资源供需的社会经济效益,进一步绘制水资源优化配置的技术流程图(图 2),确定最优供水方案。

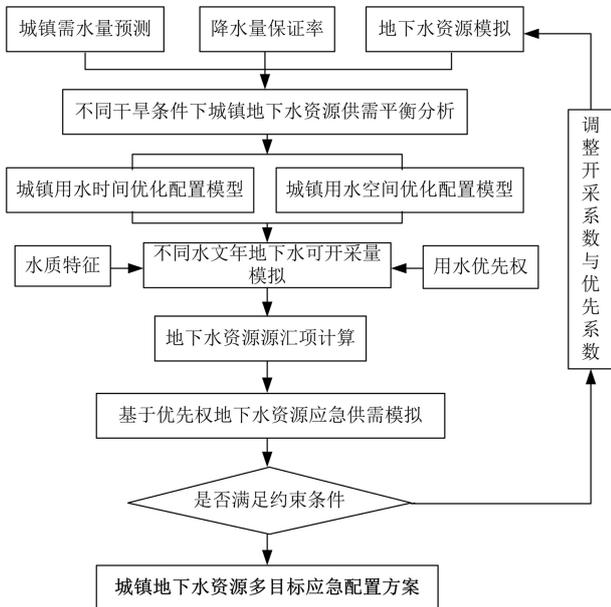


图 2 地下水资源应急配置方案流程图

Fig. 2 Flow chart of optimal allocation of groundwater resources

应急水资源配置是个多目标规划问题,宜采用多目标线性规划模型对所规划区域进行水资源的合理配置,多目标配置综合效益(W)的一般表达式为:

$$W = \max F[f_e(x) + f_s(x)] \quad (1)$$

式中: $f_e(x)$ 和 $f_s(x)$ 分别代表水资源利用的经济效益和社会效益,其中经济效益为水资源对生产贡献的价值,社会效益为水资源对社会公共机构(医院、学校、机关事业单位等)的维护价值和人口的发展; $x = (x_i)$ 为决策向量,代表不同行业的用水量,下式同义。

(1) 目标函数

a. 产业效益

$$\max f_e(x) = \max (B - C) x^T \quad (2)$$

式中: $B = (B_i)$, $C = (C_i)$ 为不同行业部门的单位供水效益向量和单位供水成本向量; x^T 为不同水文年的降水保证率。

b. 社会效益

由于社会部门产出以间接效益为主,直接衡量难度较大,故通常采用最低地区缺水率来表征社会效益:

$$\min f_{s1}(x) = \min \sum_{i=1}^m \varphi_i B_i (D_i - x_i) \quad (3)$$

式中: $\min f_{s1}(x)$ 为最低缺水率; D_i 为不同社会部门需水量; B_i 为不同社会部门的单位供水效益系数; φ_i 表示不同行业的供水优先次序。社会效益目标在于水资源与经济发展、人们生活水平相协调,其值越接近 1,表明水资源与两者的协调度越大,社会效益也越大。协调度函数^[16-17]:

$$\max f_{s2}(x) = \exp [-(x_i - D_i)^2 / S^2] \quad (4)$$

式中: x_i 为不同社会部门用水量; D_i 为不同行业的需水量; S^2 为两者的方差值。将两者结合起来表征小城镇应急供水的社会效益目标函数为:

$$\max f_s(x) = \min f_{s1}(x) / \max f_{s2}(x) \quad (5)$$

(2) 约束条件

应急水资源配置的约束条件主要包括地下水资源允许开采量(供水量),生活用水优先保障约束和变量非负约束。其中,供水量不得超过地下水资源允许开采量,在干旱条件下优先保障生活用水需求之后,对剩余水资源进行产业配置,且所有的变量均不得为负数。

2.2.2 E-MIP 模型求解

(1) 参数率定

a. 单位供水效益

单位供水效益通常用单位万元产值用水量、农业亩均灌溉水量表示,而对于公居民用水量则采用人均用水量来确定。本文依据投入产出法^[18]、扣除非水成本法^[19]、效益分摊系数^[20]等方法的计算原理和优缺点,选用计算结果稳定、可靠的投入产出法作为单位供水效益的确定方法(表 2),其因为投入产出法能有效体现水资源的投入供给对产品社会效益的贡献程度,也有利于比较不同用水部门的水资源利用效益,为合理确定水资源分配等级和方向奠定坚实基础。

b. 供水优先次序

不同用水部门供水配置的优先顺序可通过层次分析法构造出最优传递矩阵^[21],确定不同干旱条件下织金县城区工业、农业、服务业、生活用水权重(表 2)。

表2 织金县县城不同用水部门用水效益和供水优先权排序

Table 2 Ranking of water efficiency and supply department of different water departments in Zhijin county

用水部门	综合用水效益	供水权重			总体排序
		轻度干旱	中度干旱	重度干旱	
生活用水	49.50 m ³ /a·人	0.469	0.493	0.524	1
农业用水	410.00 m ³ /a·亩	0.062	0.046	0.031	4
工业用水	15.92 m ³ /万元	0.281	0.246	0.215	3
服务业用水	5.31 m ³ /万元	0.188	0.216	0.231	2

(2)多目标配置

不同干旱条件下的权重可得出不同的优劣解,提供更多的有关目标权衡比较的信息,以便选择最佳的权衡解。在水资源多目标配置中,依权重分配的供水量大于需水量时,盈余的水量可直接纳入到下一轮的依权配置中,直到供水量配置完毕为止,反之则直接仅按照权重大小依次配置,从而得到最大的综合效益。

3 案例研究

根据织金县珠藏向斜北东段(织金县城一带)的水文地质条件、含水层参数等储水结构特征,对该区域地下水资源量进行模拟,同时依据社会经济统计与规划数据分析不同时期水资源供需平衡状况,并据此对不同干旱条件下2010—2030年织金县县城地下水资源应急分配方案进行优化。

3.1 水资源评价

(1)地下水资源量评价

表3 研究区不同干旱条件下地下水系统天然补给量

Table 3 Natural supply of groundwater system under different drought conditions in the study area

系统名称	地下水资源量(10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)			可开采量 (10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)
	50%保证率/ 轻度干旱	75%保证率/ 中度干旱	95%保证率/ 重度干旱	
四方井—廻龙潭岩溶泉系统	2 384.3	2 094.9	1 749.0	585.71
金鱼池岩溶泉系统	734.0	645.0	538.5	507.01
大冲地下河系统	629.0	552.6	461.4	135.29
杨家冲地下河系统	578.9	508.6	424.6	153.03
合计	4 326.2	3 801.1	3 173.5	1 381.04

由于受岩溶水赋存条件、地表水文网、地形等条件控制(图3),在一个水文地质单元中,对枯季地下水径流量开采必须首先保证生态储水量,一方面是因为部分地下水埋藏深度大,开采条件差,另一方面是应考虑保留流域中水循环的可持续性等问题。因此,

由于在部分地下河出口开展的流量动态观测工作不足一个水文年,所获资料难以反映出一水文年内流量动态的变化规律,尤其是在缺乏丰水期长观点流量值的前提下进行的地下水天然资源量计算,其结果必然导致研究区地下水资源天然储量偏小,故采用地下水径流模数法评价地下水天然补给量,能较好地反映出岩溶地下水“快补、快排”,流量动态与降水量呈线性相关的特点,为地下水资源开发利用潜力的准确评估提供数据支撑。依据水文年与干旱分级标准的关联性^[21-22],将50%、75%和95%的降水保证率划分成轻度干旱、中度干旱和重度干旱3个等级。同时,采用地下水径流模数法对地下水资源开发潜力进行模拟,得到四方井—廻龙潭岩溶泉集中排泄系统为1 533.8万m³·a⁻¹,金鱼池岩溶泉集中排泄系统为784.32万m³·a⁻¹,大冲地下河系统为536.24万m³·a⁻¹;杨家冲地下河系统为416.35万m³·a⁻¹(表3)。

结合研究区2009—2010年的西南大旱背景,采用枯季泉水汇总法作为允许开采量,可代表不同保证率下地下水资源可开采量(表3),扣除地下水系统的生态需水量外,得到珠藏向斜北东段的地下水资源可开采量为1 381.04×10⁴m³·a⁻¹。

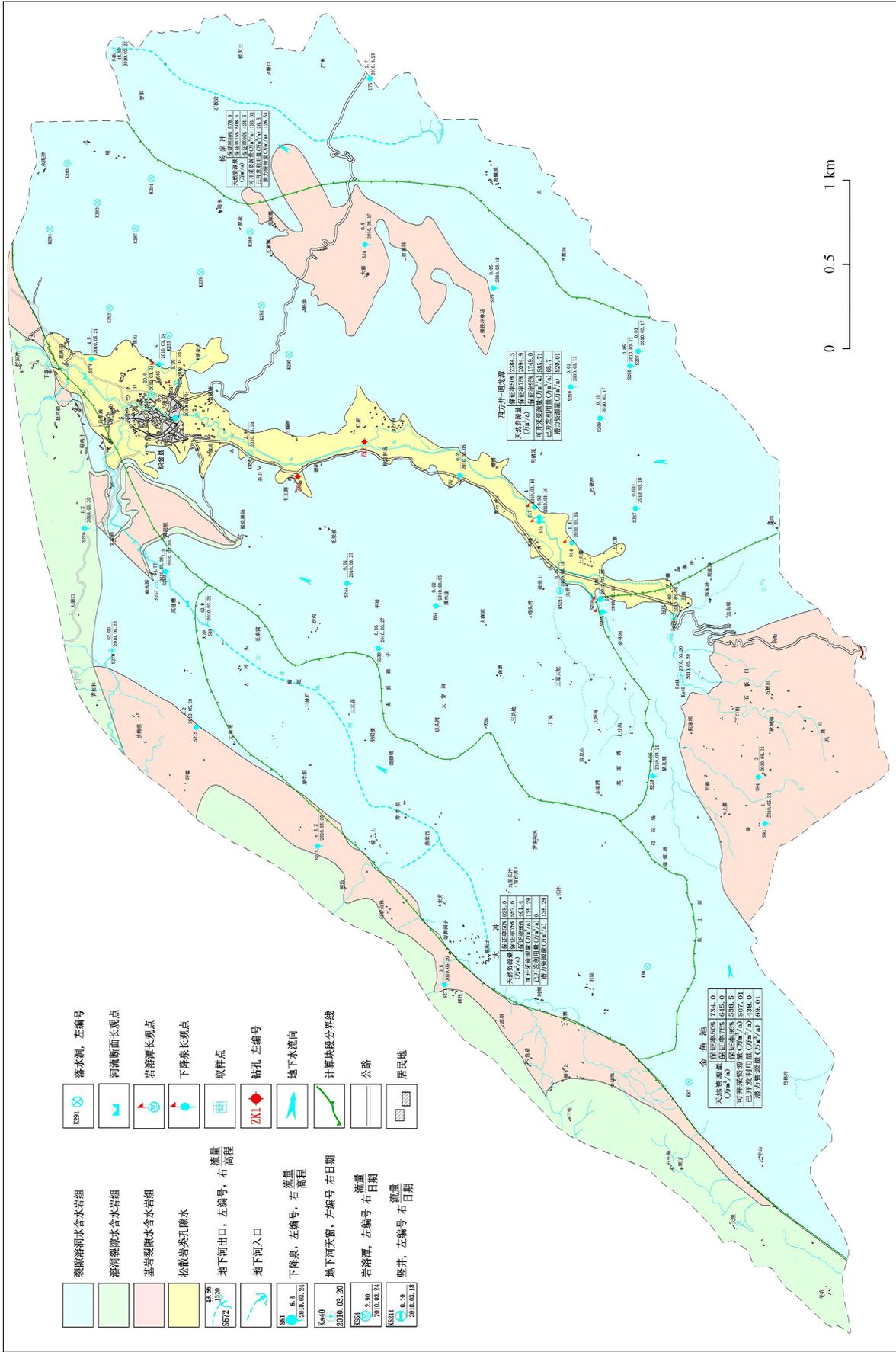


图 3 珠藏向斜北段地下水资源分布特征
Fig. 3 Distribution characteristics of groundwater resources in the northern of Zhucang syncline

(2) 地下水质量评价

根据研究区 2009—2010 年丰、枯季取样检测结果和地表水环境质量标准 (GB3838—2002) 可知, 金鱼池集中排泄系统、大冲地下河系统丰、枯季水质均达到 II 类地表水环境标准, 适用于各种用途。四方井—迴龙潭集中排泄系统地下水枯季水质属 IV 类标准, 丰季属 II 类标准, 杨家冲地下河系统丰、枯季水质均属 IV 类标准, 属受污染较重的地下河, 开发利用潜力小。

3.2 织金县县城用水量预测

据织金县 2010 年国民经济与社会发展状况公报

人口统计结果和社会经济年均增长率, 得到 2010 年至 2030 年织金县城区人口、工农业规模; 结合《贵州省织金县城乡总体规划 (2011—2030)》和《贵州省行业用水定额 (DB52/T725—2011)》中的行业用水定额, 通过不同水文年的需水比率, 确定不同干旱条件下社会经济各部门的用水定额 (用水效率) 和需水量 (表 4), 且干旱程度越深, 用水定额也越低, 反之则越高; 其中, 由于城镇集中了大部分的工商业活动, 故工业规模可采用工业产值替代, 农业规模采用耕地面积计算。

表 4 不同干旱条件下织金县城区社会经济需水量预测

Table 4 Forecast of social and economic water demand in Zhijin county under different drought conditions

年份	干旱条件	社会经济规模				需水量/ 10^4m^3			
		人口/ 10^4 人	工业/ 10^8 元	农业/ km^2	服务业/ 10^8 元	生活	工业	农业	服务业
2010	轻度干旱					484.43	519.71	45.20	334.97
	中度干旱	11.06	22.67	0.49	25.29	444.06	433.09	36.16	267.97
	重度干旱					403.69	360.91	30.14	223.31
2015	轻度干旱					729.27	1 074.22	32.40	617.24
	中度干旱	16.65	60.60	0.48	63.60	668.50	895.18	25.92	493.79
	重度干旱					607.73	745.99	21.60	411.49
2020	轻度干旱					980.24	1 598.49	20.49	907.38
	中度干旱	22.38	126.00	0.46	142.00	898.56	1 332.07	16.39	725.90
	重度干旱					816.87	1 110.06	13.66	604.92
2030	轻度干旱					1 420.43	1 460.46	9.50	676.50
	中度干旱	32.43	191.00	0.44	220.00	1 302.06	1 217.05	7.60	541.20
	重度干旱					1 183.70	1 014.21	6.34	451.00

由表 4 可知, 随着干旱条件的不断增加, 除生活用水效率基本不变, 社会经济的总体用水效率则持续上升, 特别是不同干旱年份的同一产业用水效率。以 2010 年属枯水年份为例, 在社会经济规模不变的前提下, 工业用水效率从重度干旱的 $15.92\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$ 下降至轻度干旱的 $22.92\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$, 下降率达 30.55%, 生活用水量则仅从 $110\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ 人下降至 $120\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ 人。另外, 在社会经济发展过程中, 除农业用水量持续减少外, 生活、工业、服务业用水量都将呈现大幅度上涨。2010—2030 年织金县县城人口预计将从 11.06 万人增长至 32.43 万人, 重度干旱时段的生活用水按 $100\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ 人计算, 则 2010 年生活需水量将由 $403.69 \times 10^4\text{m}^3$ 持续上升至 2030 年的 $1 183.70 \times 10^4\text{m}^3$ 。期间受农业用水效率提升, 耕地面积占用的影响, 城区农业需水量将从 $30.14 \times 10^4\text{m}^3$

下降至 $6.34 \times 10^4\text{m}^3$, 降低 7.13 倍; 工业用水效率提升的同时, 工业规模将持续扩大, 其用水总量也逐渐增加, 2010—2030 年城区单位万元工业产值用水量也逐渐从 15.92m^3 下降至 5.31m^3 , 但其工业用水总量却从 $519.71 \times 10^4\text{m}^3$ 增长至 $1 460.46 \times 10^4\text{m}^3$ 。由此可见, 未来织金县城区用水结构将以生活用水、工业用水为主, 其次是服务业用水, 农业用水量比重则不断下降, 但工业用水的经济效益最高。

3.3 不同干旱条件下供需水平衡及其效益分析

由表 5 可知, 2010 年地下水资源供需状况基本保持平衡, 2015 年以后工业、服务业供需水缺口不断加大, 综合缺水率也逐渐上升, 2015—2030 年重度干旱条件下的缺水率从 0.23 提升至 0.48, 增长 1.08 倍, 2015 年的供水平衡系数就只有 0.77, 表明 22.69% 的需水量只能依靠地表水供给, 尤其是轻度

干旱条件下,各部分用水效率相对低下,需水量变大,单纯依靠地下水进行水资源供给则缺水率更大,因为轻度干旱时段,地表水对总供水量的影响比较显著,地下水资源的供水地位也次于地表水。

表 5 织金县城区地下水资源供需状况及效益

Table 5 Supply and demand status of groundwater resources in Zhijin county and its benefits

年份	干旱条件	供需平衡系数				社会经济效益(10 ⁸ 元)			
		生活用水	工业用水	农业用水	服务业用水	综合缺水率	工业	农业	服务业
2010	轻度干旱	1.77	0.99	2.50	1.03	0.00	22.53	0.20	25.29
	中度干旱	2.03	1.04	2.31	1.48	-0.17	22.67	0.13	25.29
	重度干旱	2.38	1.09	1.86	1.89	-0.36	22.67	0.09	25.29
2015	轻度干旱	1.18	0.48	3.49	0.56	0.44	21.92	0.64	32.50
	中度干旱	1.35	0.50	3.22	0.80	0.34	30.48	0.41	63.60
	重度干旱	1.58	0.53	2.59	1.03	0.23	60.60	0.29	65.30
2020	轻度干旱	0.88	0.32	5.52	0.38	0.61	30.62	0.92	40.59
	中度干旱	1.00	0.34	5.09	0.54	0.54	42.60	0.59	91.16
	重度干旱	1.17	0.35	4.10	0.70	0.46	44.71	0.41	142.45
2030	轻度干旱	0.60	0.35	11.91	0.51	0.61	50.81	0.68	84.34
	中度干旱	0.69	0.37	10.98	0.73	0.55	70.67	0.43	160.80
	重度干旱	0.81	0.39	8.84	0.94	0.48	74.18	0.30	206.09

注:表中综合缺水率的负值代表供水量盈余,正值代表供水量匮乏。

(1) 水资源供需状况

随着干旱等级的提升,织金县城区 2010—2030 年生活、服务业、工业用水量不断降低,水资源盈余量不断下降,匮乏量不断加大,除农业用水量一直处于供大于求以外,其余部分依次出现不同程度的地下水资源短缺,其中生活用水则从 2020 年的轻度干旱时段开始就出现供小于求的现象,至 2030 年其供需平衡系数下降至 0.6,地下水资源供需缺口达 $772.59 \times 10^4 \text{ m}^3$;2015—2030 年工业用水供需平衡系数均低于 0.5(2015 年度重度干旱除外),2020 年达到最大缺口值 $1210 \times 10^4 \text{ m}^3$,表明水资源量对工业活动的影响出现脱钩;服务业的供需平衡系数则差异显著,2015 年度重度干旱的水资源平衡系数为 1.03,而轻度干旱系数仅有 0.56,表明生活用水对地下水资源依赖程度高,服务业用水对不同干旱条件下的地下水资源敏感性大。故从优先满足生活用水的角度,应当开发多样化水资源,减少产业活动对地下水资源的开采,同时保护地下水资源对居民生活起着关键性作用。由此可见,干旱程度与用水量呈正相关,地下水资源保证率越高,水资源愈加充沛,则居民用水量也逐渐加大。

(2) 水资源社会效益

由于不同干旱条件下部分用水部门的供需水状况出现盈余,故结合“优先保障生活供水,兼顾经济效益最大化”的原则对盈余水量配置到生活和服务业用水部门,从而优化地下水资源配置方案。2010—2030 年综合缺水率逐渐上升的同时,工业、服务业产值也逐年上升,尤其是用水效率较高的服务业,其产值从 2010 年的 25.29 亿元上升至 2030 年的 206.09 亿元,同期工业产值却仅增长 51.65 亿元,年均增长产值 2.58 亿元,农业产值则因城区农耕面积逐渐缩减的原因,导致农业产值先上升后下降,年均产值仅为 0.42 亿元。由此可见,供水经济效益主要体现在地下水资源对工业、服务业的贡献,且干旱程度越低,经济效益越小,因为随着干旱程度加深,政府对生产用水的管制会越来越严格,当水资源短缺造成的损失不足以抵消利用效率提升带来的贡献时,就会导致重度干旱条件下有限水资源向高用水部门倾斜,如 2030 年在重度干旱条件下,其工业产值亦能达到 74.18 亿元,服务业产值达到 206.09 亿元,两者之和是 2010 年的 5.84 倍。因此,地下水资源应急配置的优化,也可刺激产业结构的优化、国民生产总值的提升。

4 结论与讨论

(1)珠藏背斜北部储水构造包含裂隙—溶洞含水岩组、基岩裂隙含水层组和松散岩类孔隙岩层,裂隙—溶洞水的出露方式以地下河集中排泄为主,基岩裂隙水和松散岩类孔隙水则以分散岩溶泉排泄为主。大冲和杨家冲地下河系统的平均流量达 $62.04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,四方井—迴龙潭和金鱼池岩溶泉系统虽泉点露头多达 27 处,但平均流量仅为 $2.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。另外,两者水质以 III 类水质为主,具有较大开发利用价值。

(2)在限定地下水资源可开采量的基础上,干旱程度的加深直接刺激了用水效率和社会经济效益的提升。同一年份的重度干旱缺水率比轻度干旱低 21.25%,但其社会效益却相反。2010—2030 年间,重度干旱条件下的地下水资源供需平衡状况虽从 35.68% 盈余率转变成 47.98% 的缺水率,但织金县城区 GDP 由 47.96 亿元逐年上升至 280.27 亿元,故应急水资源优化配置是保障干旱时期水资源持续利用的关键。

(3)应急地下水资源配置需要满足两个前提:一是以枯季($P=95\%$)允许开采量作为地下水系统的可开发利用率和限制开发系数,得到珠藏背斜北部地下水资源可开采量为 $1381.06 \times 10^4 \text{ m}^3$;二是水资源配置首先需保障居民生活用水需求,其次依据用水效率和权重次序对剩余地下水资源进行再分配,实现国民经济系统良好运转的同时,侧重对用水效率高的服务业的分配。因此,水资源应急配置的关键在于分配不同用水部门的用水量和优先次序,在满足生活最低用水定额的前提下,将水资源按比例配置到高新技术部门和国民经济基础部门,这有利于深化水资源应急配置理论和方法,但在本文的案例研究过程中,将毕节市的平均用水效率直接套用到织金县城区中,且因第三产业用水部分广泛,其用水效率仅用行业平均值替代,导致研究结果有待于进一步精细化。另外,对不同于干旱条件下的水资源配置方案采用保守的地下水资源配置方案,在实际运用过程中可适当加以修正地下水资源开发系数,提升水资源的利用率。

参考文献

- [1] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5):461-468.
- [2] 范宏喜. 我国地下水资源与环境现状综述[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2):147-149.
- [3] Iftekhar M S, Fogarty J. Impact of water allocation strategies to manage groundwater resources in Western Australia: Equity and efficiency considerations[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548:145-156.
- [4] 黄一帆, 刘俊民, 姜鹏, 等. 基于 Modflow 的泾惠渠地下水动态及预测研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 273-278.
- [5] 粟晓玲, 宋悦, 刘俊民, 等. 耦合地下水模拟的渠井灌区水资源时空优化配置[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13):43-51.
- [6] Rahman M A, Hossain A, Schmidt S, et al. Optimization framework for groundwater resources allocation and use in a rural water resources management context[C]// Integrated Water Resources Management, 2012.
- [7] Chatterjee R, Purohit R R. Estimation of replenishable groundwater resources of India and their status of utilization[J]. Current Science, 2009, 96(12):1581-1591.
- [8] 李朦, 解建仓, 杨柳, 等. 基于蚁群—粒子群混合算法的水资源优化配置研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2015, 43(1):229-234.
- [9] 何国华, 解建仓, 汪妮, 等. 基于模拟退火遗传算法的水资源优化配置研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2016, 44(6):196-202.
- [10] 黄显峰, 邵东国, 顾文权, 等. 基于多目标混沌优化算法的水资源配置研究[J]. 水利学报, 2008, 39(2):183-188.
- [11] 杨改强, 郭萍, 李睿环, 等. 基于排队理论的灌区渠系地表水及地下水优化配置模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6):115-120.
- [12] Loo S L, Fane A G, Krantz W B, et al. Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria [J]. Water Research, 2012, 46(10):3125-3151.
- [13] Wada Y, Wisser D, Bierkens M F P. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources[J]. Earth System Dynamics, 2014, 4(1):355-392.
- [14] 尹尚先, 韩永, 常浩宇, 等. 邯邢矿区岩溶水资源优化配置研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8):29-34.
- [15] 宋小庆, 彭钦. 贵州织金县城区岩溶地下水脆弱性评价[J]. 贵州地质, 2012, 29(2):99-103.
- [16] 黄旭. 大连市水资源合理配置及其方案综合评价研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [17] 张宏伟, 和夏冰, 王媛. 基于投入产出法的中国行业水资源消耗分析[J]. 资源科学, 2011, 33(7):1218-1224.
- [18] 甘泓, 汪林, 倪红珍, 等. 水经济价值计算方法评价研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11):1160-1166.
- [19] 李良县, 甘泓, 汪林, 等. 水资源经济价值计算与分析[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3):494-499.
- [20] 王世军, 朱九龙, 陶晓燕. 基于不确定型 AHP 法的南水北调中线工程对河南省水源区经济影响评价[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(3):17-20.
- [21] 高雅玉, 张新民, 于惠. GIS 技术在陇东沟道雨洪资源可利用量分析中的应用[J]. 中国水利, 2015(19):62-64.
- [22] 气象干旱等级, GB/T20481-2017[M]. 北京:中国标准出版社, 2017:1-28.

Study on multi-objective emergency allocation of groundwater resources for small towns in karst area: A case study of Zhijin county

SONG Xiaoqing^{1,2}, QU Qiunan^{1,2}, YANG Zhenhua³

(1. *Guizhou Geological Engineering Investigation Design and Research Institute, Guiyang, Guizhou 550008, China;*

2. *111 Geological Brigade, Guizhou Geological and Mineral Exploration & Development Bureau, Guiyang, Guizhou 550008, China;*

3. *Guizhou Institute of Mountain Resources Research, Guiyang, Guizhou 550002, China)*

Abstract In order to solve the problem of discrepancy between the water supply and water demand in urban area and to put forward an emergency allocation scheme for groundwater resources in karst areas under drought conditions. In this paper, we take Zhijin county north Zhucang water storage syncline structure as an example; and the runoff modulus method was used to simulate the development and utilization of the water resources in the study area. According to the principles of mixed integer linear programming and multi-objective linear programming, following the principle of "giving priority to the protection of domestic water and taking into account the maximization of economic benefits", a drought emergency allocation model for the resources at different targets, i. e. E-MIP (Emergency Multi-objective Integer Programming) model, was constructed and applied to the study area. As a result, the groundwater resources in the city of Zhijin county emergency scheme during 2010—2030 were put forward. The research result shows that, (1) In the north of Zhucang anticline, the exposed water from the fractured-karst aquifers mainly discharges through the underground river, with an average flow rate of $62.04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; and in porous-fractured bedrock are springs mainly discharge groundwater in an manner of dispersion, with an average flow of only $2.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. (2) The elevated degree of drought not only restricts the amount of water resources used, but also directly stimulates and improve the water use efficiency and social and economic benefits. In the period of 2010—2030, the severe drought rate in Zhijin county was 21.25% which was lower than that of the mild drought, but its social and economic benefits increased by 5.84 times. Meanwhile, the supply and demand balance of groundwater resources under severe drought has changed from 35.68% surplus rate to 47.98% water shortage rate, but the GDP of Zhijin urban area was 47.96×10^8 yuan, rising to 280.27×10^8 yuan year by year. (3) The emergency allocation principle of groundwater resources is a priority to protect residents living water demand; secondly, according to the water use efficiency and the weight order, the distribution of the surplus groundwater resources is allocated; in addition, the emergency allocation scheme of water resources for the years of 2020 and 2030 in Zhijin was further predicted, respectively which has laid the foundation for improving the state of emergency under the rational and scientific use of resources. The above research indicates that with the increase of water use efficiency, the social and economic benefits of the allocation of groundwater resources in the northern part of Zhucang syncline will gradually increase, and domestic water will become the key object of emergency allocation of water resources, so that making the social benefits greatly exceed its economic benefits.

Key words small towns, groundwater resources, emergency allocation, water storage structure

(编辑 黄晨晖)