

玉屏县朱家场地下水集中开采区地下水数值模型 建立及相关问题探讨

杨荣康, 罗 维, 王诗扬, 宁黎元

(贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550004)

[摘要]以玉屏县朱家场白云岩盆地地下水集中开采区为研究对象,在收集总结前人工作成果、开展地面调查、水文地质钻探、地下水动态监测等工作的基础上,采用有限差分法,建立研究区基于三维非均质各向异性非稳定流承压水数值模型,经检验与区内地下水水位动态监测点一个水文年监测数据拟合良好。最后对建模的过程及其对研究区地下水管理意义和在省内其他条件相似地区可推广性等相关问题展开探讨。

[关键词]岩溶地下水;有限差分法;数值模型;地下水管理

[中图分类号]P588.24⁺5;P541.2 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2017)04-0306-07

0 引言

地下水数值模拟技术在我国的应用始于上世纪90年代,常用模拟软件有 Visual MODFLOW、GMS 和 FEFLOW 等(郭晓东,2010年),地下水数值模拟技术从最初解决水量评价、水资源管理等“水量问题”,逐步发展为研究水源管理、规划地等水资源评估等“水质问题”方向发展(孙从军,2013年)。随着现代信息技术迅猛发展,地下水数值模拟技术方法日趋成熟,地下水数值模拟更深入对复杂规律的研究(王浩等,2010年),但也存在过多依赖模拟技术和模拟结果的可视化程度,轻视水文地质问题和条件研究等问题(薛禹群,2010年)。

受山区地形和岩溶地质环境影响,贵州省岩溶发育强烈、地形起伏大,地表水资源在时空上分布不均匀,岩溶山区人口居住分散、零星,集中式供水不经济且不现实(陈革平,2008年)，“工程性”缺水问题突出。但受地质构造控制,岩溶地下水在时空上分布相对均匀,资源较为丰富,特别是白云岩地区地下水赋存富集,水位埋深浅,是适宜使用人工机井开采地下水的区域,成为解决缺

水岩溶区人畜饮水和农田补充灌溉的重要水源(王明章,2015年)。早在上世纪末,省内水文地质工作者就提出合理、有效地开发岩溶水资源,可有效促进岩溶贫困石山地区脱贫和经济发展以及解决农村饮水安全问题。2007—2015年,基于对岩溶地下水开发利用需求的迫切性和现实意义,贵州省启动以解决农村饮水安全、抗旱找水为目的地下水勘查和找水打井工程,截止到2015年底,全省累计施工机井4 694口,成井3 756口,在众多山间白云岩地区成了集中开采井群。地下水开采工程的实施为解决该类缺水区的人畜引水和农田灌溉起到了积极的作用,但同时也带来了如何合理开发利用地下水、实现地下水的科学管理、保证地下水资源可持续利用以及提高地下水管理效率和水平的问题。面对岩溶山区复杂的水文地质条件,传统的水文地质理论和方法难以有效刻画岩溶地下水系统的含水层空间结构和水流系统特征和有效支撑地下水的科学有效开发和管理(王明章,2010年)。近代计算机和网络技术的发展,使得利用高科技实现地下水系统的研究、资源评价、地下水资源的管理和研究成为了现实。地下水资源管理模型是利用计算机技术实现地下水

[收稿日期]2017-06-20

[基金项目]贵州省地勘基金项目“贵州省岩溶地下水系统功能可持续利用性研究”;贵州省地矿局地质科研项目“白云岩盆地地下水管理研究-以玉屏朱家场盆地为例”。

[作者简介]杨荣康(1986—),男,贵州省修文县人,硕士学位,工程师,主要研究方向:水文地质、环境地质。

资源管理的重要工具,而地下水系统的水流仿真(数字)模型则是地下水资源管理模型的基础。因此,地下水系统水流数字模型建立的合理与否,决定着地下水资源评价、规划和管理成败与否。省内水文地质前辈如王明章、杨胜元、鄢贵权、丁坚平等曾针对岩溶区地下水水量、水质管理数值模型等开展过相关研究,并取得较好的成果,但是,由于受软件系统以及对研究区水文地质条件认识的程度影响,对地下水系统水流数字(仿真)模型的建立方法仍存在一些不完善之处。

基于以上岩溶地下水开发的历史背景和问题,本研究以贵州玉屏朱家场镇—兴隆村—大有乡一带地下水集中开采区为研究对象,以实现区域地下水可持续利用和科学管理的目标,在收集前人资料和补充调查、新建地下水监测网络和取得实时监测序列数据的基础上,基于 Modflow 软件平台,建立玉屏朱家场地下水集中开采区地下水流动数值模型,并对建模的方法、过程等有关问题进行了探讨,为贵州省内同类地区地下水系统数值模型建立提供借鉴。

1 研究区概况

1.1 水文地质概况

研究区构造上处于北北东向松桃—榕江深大活动断裂构造带北西盘,总面积 91 km²,以朱家场断裂为代表的北东向断裂构造构成了研究区的主要构造格架。研究区出露地层主要为娄山关群($\epsilon_{3-4}ls$)、高台组(ϵ_3g)、清虚洞组(ϵ_2q)和杷榔组(ϵ_1p)。其中以娄山关群($\epsilon_{3-4}ls$)和高台组(ϵ_3g)岩性以白云岩为主,含水介质组合类型为溶孔-溶隙,岩层的含水性较为均匀。

研究区东南部边为界朱家场断裂,为一阻水断裂,成为研究区内的南东部边界,北东、北西及南西侧边界则为自然分水岭,在地貌上形成一个中部低洼,周边地势相对较高的独立地下水系统单元。来自周围山区的地下水汇集于后,受地形和构造控制,缓慢地向东南方向径流,流至谢桥村一带受断裂阻隔,排泄不畅,集中富集起来,使研究区构成一个类似于遵义北郊高坪水源地的断裂阻水型蓄水构造(王诗扬,2010年)。沿北东向朱家场断层和性质不明推测断层一带上升泉及自流井分布,具有流量大、动态稳定等特征,是区内地下水主要的天

然排泄点,研究区水文地质条件概化如图 1 所示。

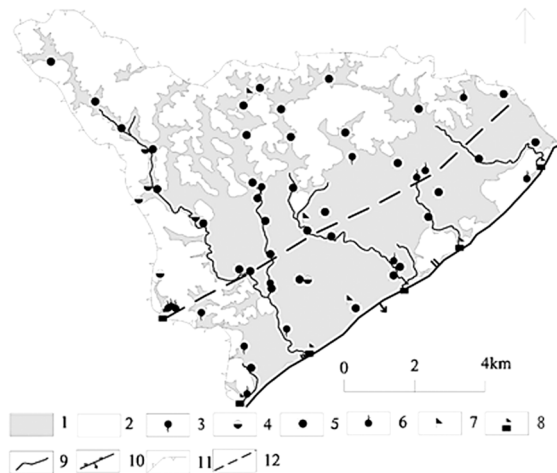


图 1 水文地质条件概化图

Fig. 1 Conceptual diagram of hydrogeologic condition

1—第四系覆盖区;2—基岩出露区;3—下降泉;4—岩溶潭;5—开采井;6—上升泉;7—水位监测点;8—溪流流量监测点;9—溪流、河流;10—逆断层;11—地表水分水岭;12—推测断层

1.2 地下水开采历史与现状

研究区岩溶地下水开发利用始于上世纪 80 年代后期,是贵州省以机井方式集中开采地下水的典型,主要用于农田灌溉和农村人畜饮水。1998 年以后进入大规模开发时期,据区内机井勘探资料及实地开发利用现状调查分析,区内地下水天然补给量为 $1.02 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,累计施工开采井 36 口,总涌水量 $22\,278 \text{ m}^3/\text{d}$,灌溉期开采量 $5\,890 \text{ m}^3/\text{d}$,非灌溉期开采量 $836 \text{ m}^3/\text{d}$,最大开采量仅占总涌水量的 26.4%。

2 研究区水文地质条件概化

研究区为一个完整的分散排泄白云岩溶地下水系统,系统边界条件清楚,根据水文地质条件,将东南部边界概化为断层隔水边界,处理为零流量边界,北东与北西部为地下水分水岭,概化为零流量边界;含水层岩性为白云岩,含水空间主要为小型的溶蚀孔洞和裂隙,岩层含水均匀,地下水的运动基本满足于达西理论假设。钻探资料显示,地下 150 m 左右以下岩溶和裂隙发育较差,含水性变弱,含水层的地板划为地表以下平均 150 m。区内基岩含水层上覆相对隔水的第四系土层,地下水具有一定的承压性。周边基岩裸露区地下水流上部为自由界面,地下水动力特征属

于潜水;地下水主要补给来源大气降水补给,并岩溶泉和散流的形式排入研究区的6条溪流,地下水的人工排泄方式为机井开采,区内地下水动态成因属气象类型,年内地下水位峰值滞后大气降水4—5个月,地下水位年内变幅2~5 m,属较稳定类型。水文地质概念模型框图如图2所示。

3 水文地质数学模型建立

3.1 数学模型

根据上述概化的水文地质概念模型,本研究

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + \varepsilon(x, y, z, t) + P(x, y, z, t) = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t}; & (x, y, z) \in \Omega & t > t_0; \\ H(x, y, z, t) = h_0(x, y, z); & (x, y, z) \in \Omega & t = t_0; \\ K \frac{\partial h}{\partial n} = q(x, y, z, t) = 0; & (x, y, z) \in \Gamma & t > t_0; \end{cases} \quad (1)$$

式中:H为地下水头函数;P(x,y,z,t)为t时刻位于(x,y,z)点处的可控制脉冲量;(x,y,t)为不可控脉冲量;h₀为初始水位;n为边界的外法线方向;K为渗透系数;q为二类边界的单宽流量(m³/d);为模拟区;为零流量边界。可控和不可控脉冲量是指地下水的补给量、排泄量及开采量等源汇项。顾名思义,可控脉冲量是指可控的补给和开采量,如灌溉量、机井、岩溶潭开采量等,不可控脉冲量则指大气降雨补给量、溪流渗漏补给量以及边界上的排泄量等不可控源汇项。

3.2 初始条件

根据模拟区钻孔的初见水位标高、岩溶潭水位标高、天然泉点的出露标高等共52个水位控制点,通过空间插值处理形成初始流场图(图3)。

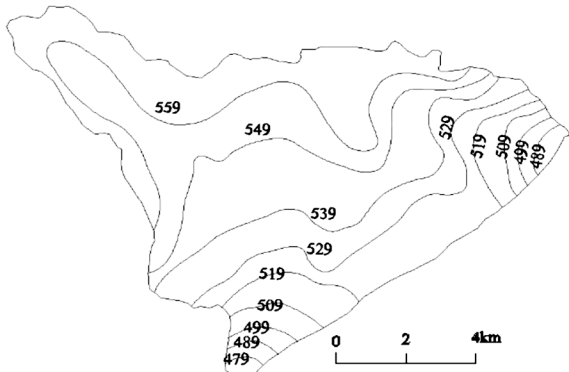


图3 模拟区初始流场图

Fig. 3 Primary flow field chart of the model area

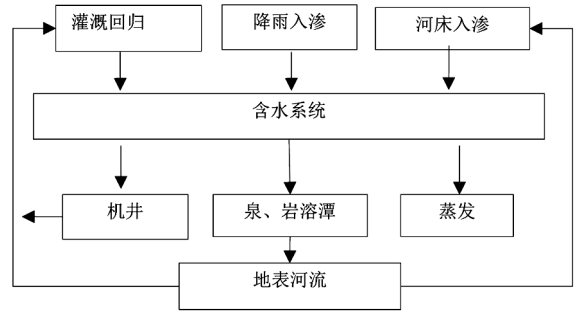


图2 水文地质概念

Fig. 2 Conceptual model block diagram of hydrogeology

采用三维非均质各向异性非稳定流承压水运动模型来刻画地下水系统:模型框图

通过实地调查和排泄点流量监测,研究区机井、泉和溪流排泄点分布图及其枯、丰季流量以及灌溉期与非灌溉期开采量分布见图4。

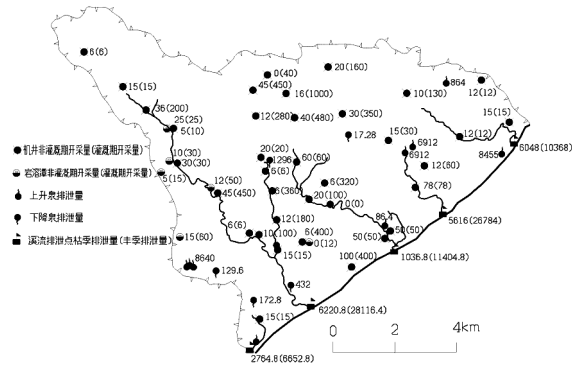


图4 模拟区机井、泉、岩溶潭分布及开采量分布图 (单位:m³/d)

Fig. 4 Distribution of drill, spring, karst tam and yield in the model area

3.3 研究区空间离散及时间离散

(1)空间离散

依据研究区基础地质、水文地质钻探、物探剖面、遥感解译成果资料,基于研究区1:1万数字高程模型,利用空间插值方法对含水层顶板进行插值,采用矩形剖分建立140×140 m三维规则网格模型,优化后的网格如图5所示。

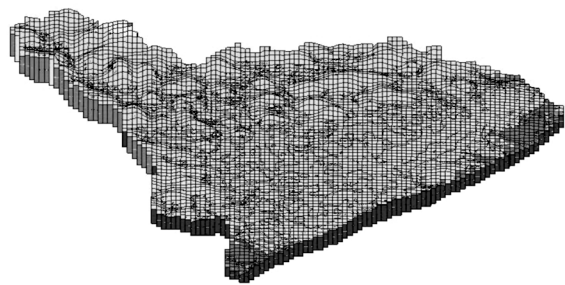


图 5 模拟区三维网格模型图

Fig. 5 3D net model of the model area

(2)模拟期、模拟时间步长

选取模拟区内具有连续监测数据的 2015 年 10 月至 2016 年 10 月一个完整水文年为模拟期。为了反应模拟期内地下水动态特征,有效实现对模拟过程的拟合以及计算,将非线性的变化过程线性化,将丰水期(每年 4—9 月)与枯水期、灌溉期(每年 5—8 月)和非灌溉期区别开,作为不同的抽水时期进而形成模拟期内的四个抽水期:①枯水期—非灌溉期(2015 年 10 月—2016 年 3 月);②丰水期—非灌溉期(2016 年 4 月);③丰水期—灌溉期(2016 年 5 月—2016 年 8 月);④丰水期—非灌溉期(2016 年 9 月)。并将该模拟期内四个不同的抽水期离散成若干个时间段,将丰水期、灌溉期两个源汇项变化较大时间段,采用较小的时间步长 1 天,枯水期、非灌溉期模拟时间步长为 5 天,共计 210 个计算时段。

3.4 水文地质参数分区及赋值

结合区内水文地质条件、水文地质勘探和试验、地下水动态变化特征,将上覆第四系土层水文地质参数(降雨入渗、蒸发及灌溉入渗)分为若干小区,主要河(溪)流划分为 6 个渗漏段,下伏基岩含水层水文地质参数划分为 4 个区(图 6、图 7、图 8、图 9),根据区内钻孔水文地质试验并结合同类岩溶区水文地质工作经验,对各分区进行水文地质参数的初步赋值:基岩含水层①区 $K = 0.09 \text{ m/d}$, $\mu = 0.125$, ②区 $K = 0.22 \text{ m/d}$, $\mu = 0.262$, ③区 $K = 0.23 \text{ m/d}$, $\mu = 0.305$, ④区 $K = 0.35 \text{ m/d}$, $\mu = 0.451$;第四系含水层中非灌溉区 $K = 1.2 \text{ m/d}$, $\mu = 0.024$, 灌溉区 $K = 0.58 \text{ m/d}$, $\mu = 0.127$;入渗、蒸发及灌溉回归分区中基岩裸露区 $a = 0.16$, 蒸发系数 0.046 , 第四系覆盖区 $a = 0.13$, 蒸发系数 0.026 , 灌溉区 $a = 0.25$, 蒸发系数 0.032 , 灌溉回归系数 0.095 ;主要河(溪)流渗漏

段渗漏系数为①段为 0.05 , ②段为 0.04 , ③段为 0.05 , ④段为 0.04 , ⑤段为 0.03 , ⑥段为 0.01 。

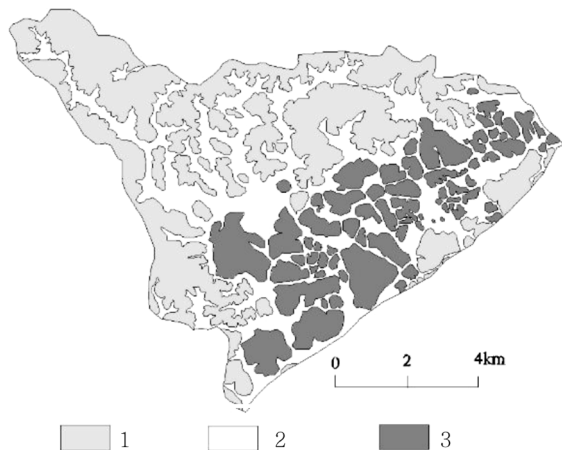


图 6 入渗、蒸发及灌溉回归分区图

Fig. 6 Zonation of infiltration, evaporation and return irrigation

1—基岩裸露区;2—第四系覆盖区;3—灌溉区

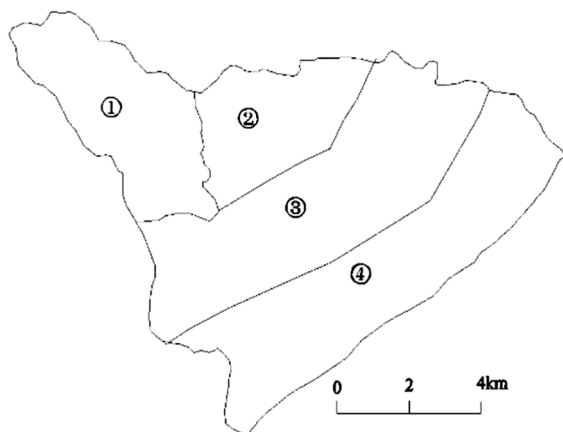


图 7 基岩含水层水文地质参数分区图

Fig. 7 Hydrogeology parameters zonation of water-bearing bed rock

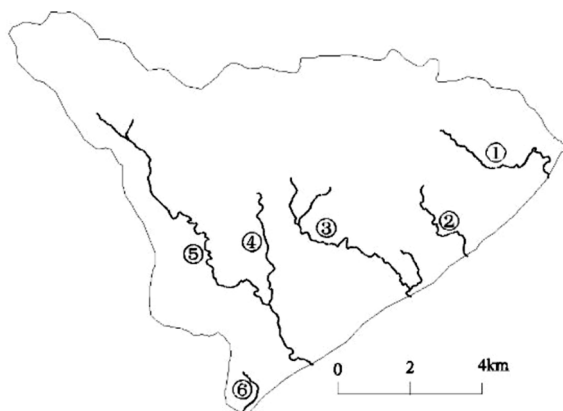


图 8 要(河)溪流渗漏补给图

Fig. 8 Leakage recharge of main river (stream)

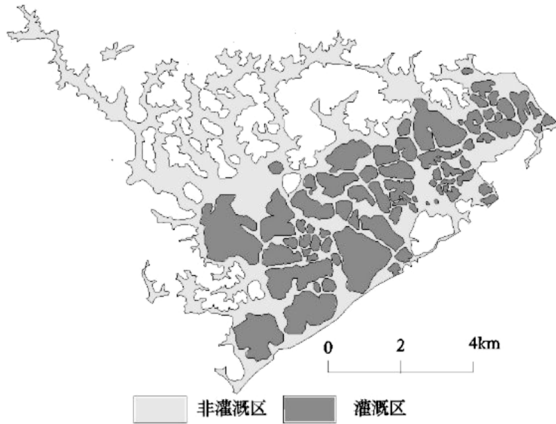


图9 第四系含水层参数分区图

Fig. 9 Zonation of quaternary water-bearing layer parameter

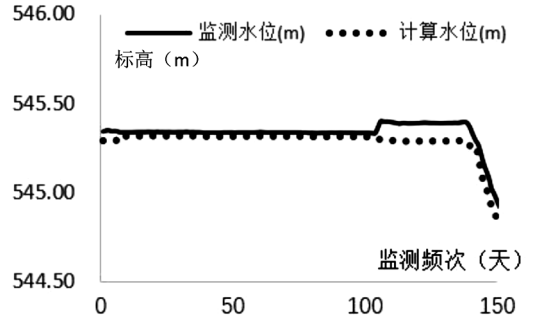


图11 丰水期水位拟合曲线图(2016.4—2016.9)

Fig. 11 Fitted curve of water level during wet season

3.5 模型识别与检验

(1) 模型识别与检验方法、标准

模型的识别与检验采用试估-校正法,要求模拟水位过程线与实测水位过程线形态相似,率定的水文地质参数、含水层结构、边界条件要符合实际的水文地质条件,对比监测点的模拟计算值绝对误差应小于模拟时段的水位变幅,相对误差不超过10%。

(2) 模型识别与检验

依托 Modflow 软件平台,通过有限差分法求解方程(1)进行模拟期内水动态计算,以模拟区内监测点丰水期和枯水期实测水位数据和确定的允许误差为约束条件,对实际的水位历时过程曲线进行拟合,拟合过程中通过对含水层水文地质参数分区、参数进行调整,最终实现了模拟计算结果与监测点实测水位动态历时曲线基本吻合。其中位于谢桥村监测点枯水期和丰水期水位拟合结果见图10、图11。监测周期内谢桥村监测点实际水位变幅为2.8 m,模拟计算最大绝对误差为0.82 m,

最大相对误差为0.2%,兴隆起村监测点实际水位变幅为4.68 m,模拟计算最大绝对误差为1.31 m,最大相对误差为1%,绝对误差均小于监测点水位年变幅,相对误差远小于10%,模拟计算结果满足约定检验标准要求,水文地质参数与实际参数基本相符,能较好的反应地下水系统特征。

在此基础上确定了研究区的水文地质参数分区和参数系统(图12),最终率定的模型参数为:基岩水文地质参数为①区 $K = 0.08 \text{ m/d}$, $\mu = 0.15$, ②区 $K = 0.12 \text{ m/d}$, $\mu = 0.25$, ③区 $K = 0.18 \text{ m/d}$, $\mu = 0.35$, ④区 $K = 0.21 \text{ m/d}$, $\mu = 0.35$, ⑤区 $K = 0.21 \text{ m/d}$, $\mu = 0.35$, ⑥区 $K = 0.21 \text{ m/d}$, $\mu = 0.35$;第四系含水层中非灌溉区 $K = 0.8 \text{ m/d}$, $\mu = 0.05$,灌溉区 $K = 0.15 \text{ m/d}$, $\mu = 0.02$;入渗、蒸发及灌溉回归分区中基岩裸露区 $a = 0.18$,蒸发系数0.012,第四系覆盖区 $a = 0.13$,蒸发系数0.016,灌溉区 $a = 0.15$,蒸发系数0.018,灌溉回归系数0.1;主要河(溪)流渗漏段渗漏系数为①段为0.05,②段为0.04,③段为0.03,④段为0.03,⑤段为0.04,⑥段为0.01。

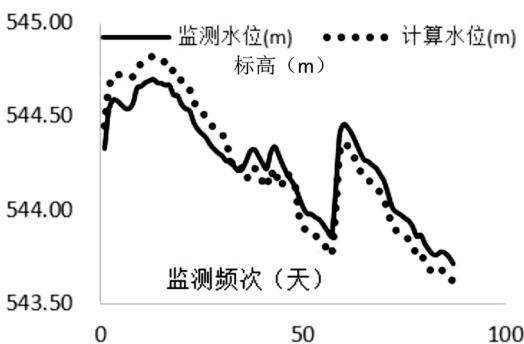


图10 枯水期水位拟合曲线图(2015.12—2016.2)

Fig. 10 Fitted curve of water level during dry season

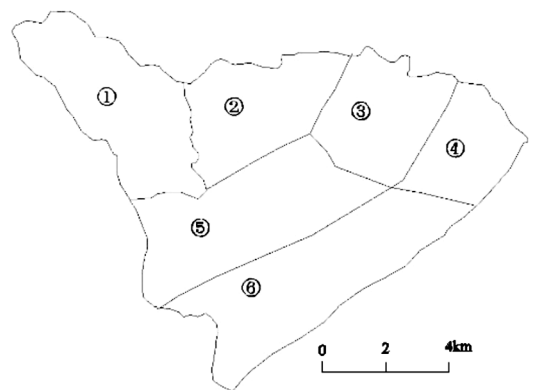


图12 最终基岩含水层水文地质参数分

Fig. 12 Final hydrogeology parameters zonation of water-bearing bed rock

4 结论与探讨

4.1 结论

(1)通过玉屏县朱家场地下水集中开采区地下水三维数值模型的建立及模拟计算,计算水位与模拟周期监测点监测水位拟合良好,研究区采用地下水三维数值模型模拟地下水流动的方法可行,模型参数分区及参数取值具有较高的可信度;

(2)通过研究区地下水开发利用现状调查、水位动态监测和初步模拟计算显示,研究区地下水集中开采时段在丰水期,同时灌溉回归对地下水量进行持续补给,尚未形成地下水集中持续开采造成的地下水位持续下降以和形成开采漏斗等现象,区内岩溶地下水资源丰富,还具备较大的开发利用潜力。

4.2 有关探讨

(1)地下水流动数学模型

研究区为白云岩地区岩溶地下水集中开采区,地表浅部为第四系覆盖层。研究区地下水的补给主要来自周边山区地带地下水的侧向径流以及大气降水和地表水通过第四系覆盖层入渗。研究区基岩层中含水均匀,但具有一定的各向异性。地下水埋深浅,长期位于基岩面以上,地下水水力性质表现为一定的承压性质。区域地下水位基本不受机井开采的影响,动态较稳定,采用三维非均质各向异性非稳定流承压水运动模型来刻画地下水系统。在描述地下水运动的三维数学模型中,把地下水补给和排泄部分为可控脉冲量的和不可控脉冲量两大部分进行处理,可控脉冲量为不同抽水期可控的补给量或排泄量变化,有利于基于地下水数值模型的地下水管理模型中响应矩阵的形成和处理,原因在于地下水系统中不可控制脉冲量不为零时,则地下水系统不是线性系统,不能直接应用叠加原理确定单位脉冲量响应系数。

(2)时间、空间离散

时间离散与空间离散是影响模型精度与计算效率的重要因素之一,模型中将地质模型概化为第四系层和基岩层两层,采用规则矩形网格模型,通过地下水水位监测结果得出,在同抽水期地下水位总体动态变化较小,丰水期趋于平缓,因此,

机井集中开采区未进行网格加密,在保证精度的同时兼顾模型计算效率。模型中根据灌溉期和非灌溉期、枯季和丰季开采量和相应的灌溉入渗量分为不同的抽水期参数的赋值,尤其是降雨及灌溉入渗参数分区,提高了模型计算精度,虽参数的精细化也增加了计算机运算负担,随着现代计算机技术水平的革新,总体对模型计算效率影响不大。

(3)区域地下水流场拟合

研究区地下水监测程度较低,区域上监测点覆盖不全,贵州省地质环境监测院09年-10年在研究区内建设地下水开采动态远程自动监测示范点8个,但由于监测点均位于开采井中,地下水位受地下水开采影响较大,且存在数据不连续等诸多问题,监测数据难以真实反应区域上地下水流场,本次研究虽依托研究区内其他科研项目新建了3个地下水位监测站,要做到较为精确的区域上流场变化控制还不够,仅能对3个已有监测点地下水监测数据进行拟合。

(4)研究区地下水开采潜力

研究区是贵州省地下水集中开采的典型,具有多年的开采历史,地下水资源是否超采,以及区内地下水今后开发潜力存在一定的争议,通过本次研究区地下水水位动态监测和模拟计算,区内地下水开发利集中,主要开采时段集中丰季,且主要用于农业灌溉,模拟计算结果显示,灌溉回归量又对地下水水量进行补给,加之丰季大气降水的补给,持续开采对区域地下水位基本影响不大,目前尚未形成地下水持续开采造成区域地下水位下降以及地下水漏斗现象,现阶段最大开采量仅占机井总涌水量的26.4%,研究区为一个较为完整含水均匀的白云岩岩溶地下水系统,具有较好的地下水补给、富存和开采条件,地下水资源还具有较大的开采潜力。

(5)模型建立的意义、适用性及可推广性

贵州省总体上受北东、北北东向区域构造控制较明显,众多白云岩地区边缘受构造控制而形成了地下水富集区,第四覆盖层相对较薄,是省内地下水开采较为集中区,水文地质条件与本次研究区具有一定相似性,同样面临着如何合理开发利用地下水、实现地下水的科学管理,实现地下水资源可持续利用、提高地下水管理效率和水平的问题,利用现代化信息技术实现地下水资源评价、管理是必然趋势。随着国家级地下水监测工程(贵

州)部分、贵州省地下水监测工程以及正在实施的贵州省 1:5 万水文地质编图等系列项目的实施和完成,将大幅提高贵州省水文地质研究程度,同时提高省内地下水自动化监测和数据管理水平,形成较为完整、系统、科学的全省地下水监测网络及数据服务平台,在这些工作开展的基础上,可进一步优化研究区模型参数,做到区域上的地下水流场拟合。同时,对省内其他地下水开采较为集中的白云岩地区地下水数值模拟的建立乃至基于此的地下水管理问题,本文中地下水三维数值模型的建立方法具有较好的适用性和推广性,并为今后的地下水管理研究奠定了良好基础。

[参 考 文 献]

陈萍. 贵州省地下水优势及开发对策[J]. 贵州地质, 2008, (03): 222-224+200.
 陈革平. 论岩溶地下水开发在贵州省农村饮水安全工作中的作

用[J]. 贵州地质, 2008, (01): 6-10.
 郭晓东, 田辉, 张梅桂, 朱威, 崔健. 我国地下水数值模拟软件应用进展[J]. 地下水, 2010, (04): 5-7.
 孙从军, 韩振波, 赵振, 范宇. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, (05): 9-13+17.
 王明章. 贵州省水文地质工作思考[J]. 贵州地质, 2012, (02): 81-85.
 王浩, 陆垂裕, 秦大庸, 桑学锋, 李扬, 肖伟华. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010, (06): 1-12.
 王明章. 论贵州省岩溶石山地区的岩溶地下水开发[J]. 贵州地质, 1999, (03): 259-265.
 王明章. 贵州省岩溶区地下水与地质环境[M]. 北京: 地质出版社, 2015, 163-165.
 王诗扬. 基于 GIS 的遵义市北郊地下水源地管理建模及应用[D]. 武汉: 武汉大学. 2010: 10-15.
 薛禹群. 中国地下水数值模拟的现状与展望[J]. 高校地质学报, 2010, (01): 1-6.
 鄢贵权, 丁坚平, 王伍军, 李景阳. 贵州岩溶地下水的水质管理模型[J]. 贵州地质, 1999, (03): 266-269.

Groundwater Digital Model Construction and Relevant Questions Discussion of Dolomite Basin in Zhujiachang, Yuping County

YANG Rong-kang, LUO Wei, WANG Shi-yang, NING Li-yuan

(Guizhou Institute of Geo-environmental Monitoring, Guiyang 550004, Guizhou, China)

[Abstract] The groundwater concentrated mining area of dolomite basin in Zhujiachang was chosen to be the research subject, the former information was collected, on the basis of ground investigation, hydrogeological drilling and groundwater dynamic monitoring, numerical model of 3D heterogeneous anisotropic unsteady flow confined groundwater was built in the target area, the tested results are identical with a annual hydrological monitoring data of groundwater level dynamic monitoring point. Finally, the process of model building, the significance of groundwater study and promotion in the similar area are discussed.

[Key words] Dolomite basin; Finite difference method; Numerical model; Groundwater management