

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.03.010

引用格式:李国礼,周锴镔,张庆,等. 地表水与地下水联合数值模拟系统在阜阳市水资源优化管理中的应用[J]. 华东地质, 2018,39(3):234-240.

地表水与地下水联合数值模拟系统在阜阳市水资源优化管理中的应用

李国礼¹,周锴镔²,张庆¹,袁红武²

(1. 阜阳市水资源管理处,阜阳 236001; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016)

摘要: 在综合研究阜阳市水资源系统特征、地面沉降等环境地质问题的基础上,对研究区地表水系统与地下水系统进行概化,建立该市城市地表水和地下水联合数值模拟模型和优化管理模型。通过优化管理模型的运行和应用,确定了研究区水资源合理开发利用的规划方案。模型预测结果表明,应用该文所选的规划方案,不仅可使研究区地表水和地下水资源得到合理调度和优化开采,还可控制地面沉降的进一步发展。

关键词: 地表水;地下水;联合模拟模型;阜阳市

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2018)03-234-07

20 世纪 80 年代以来,国内外在地下水数值模拟模型和优化管理模型的研究方面取得了丰硕成果^[1-4],其中一些成果涉及地表水与地下水耦合模型的运用^[5-6],但这些地区地下水含水层较单一,仅涉及浅层地下水,且不存在地面沉降等环境地质问题。安徽阜阳地区松散层巨厚、含水层具有多个层组且底板最大埋深达 300 m,虽然地表水丰富,但存在严重的地面沉降。目前,类似地区尚未形成完善的地表水与地下水联合数值模拟模型及优化管理模型的研究方法。本文综合研究阜阳市水文条件、水文地质条件、水资源系统特征和地面沉降等环境地质问题,探讨包含控制地面沉降约束条件下的地表水与多层含水层组地下水联合数值模拟模型和多目标优化管理模型的建立及求解方法,并提出水资源管理综合决策,为类似阜阳市具有特殊水文地质和水资源条件、存在地面沉降等环境地质问题的地区,提供水资源联合模拟模型和水资源优化管理模型的研究思路和方法。

1 地质概况

1.1 水文地质条件

阜阳市位于淮北平原西部,地表下 30~55 m 广

泛分布 1 层 14~20 m 厚的黏土层。以地表下 50 m 为界限,将埋深<50 m 的松散岩类孔隙水系统划分为浅层地下水系统,将埋深>50 m 的松散岩类孔隙水系统划分为深层地下水系统^[7](图 1)。本次研究的目的层主要为浅层地下水(第一含水层组埋深<50 m,岩性主要为粉细砂和细砂),兼顾第二含水层组(埋深 50~150 m,岩性主要为粉细砂和细砂)和第三含水层组(埋深 150~300 m,岩性主要为粉细砂和细砂)。

1.2 水资源开采现状

研究区地表水丰富,颍河、泉河和茨淮新河等河流穿过市区。城市供水主要采自深层地下水,部分采自地表水。2014 年,研究区地下水开采量为 $9\,916.22 \times 10^4 \text{ m}^3$,地表水开采量为 $1\,351 \times 10^4 \text{ m}^3$,农村大部分地区分散开采浅层孔隙水^[8-9]。

1.3 水质现状

研究区地下水质量优良,除局部浅层地下水中铁锰离子含量略超标外,地下水总体为Ⅲ类水。地表水除颍河、泉河下游局部河段水质较差外,地表水水质总体为Ⅲ—Ⅳ类水^[10]。

* 收稿日期:2017-04-20 修订日期:2017-12-07 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“沂徐淮地区水文地质调查(编号:12120113102500)”项目资助。

第一作者简介:李国礼,1964 年生,男,高级工程师,主要从事水资源管理与研究工作。

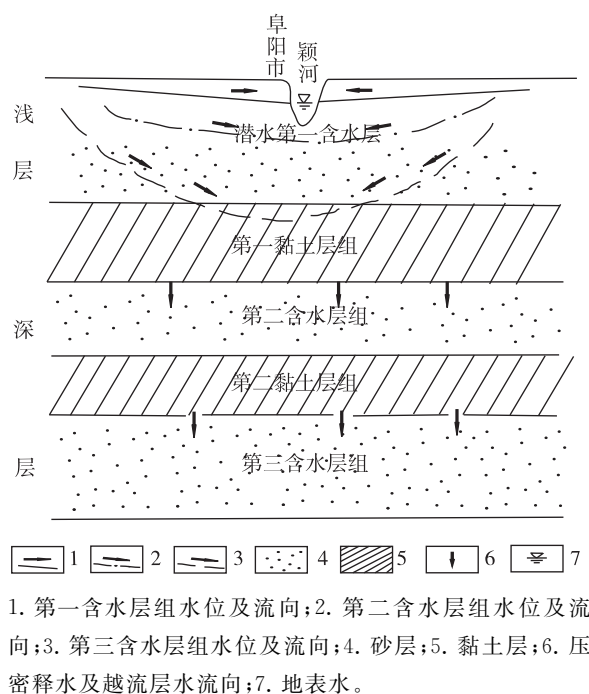


图 1 研究区松散层多层结构剖面示意图
Fig. 1 Multiple structural profiles of loose strata in the study area

1.4 地下水开采诱发的环境问题

长期以来,由于开采布局和开采地段不合理、过度开采深层地下水、浅层地下水开发利用程度较低等问题,阜阳市深层地下水水位持续下降,形成大面积地下水位漏斗区。至 2013 年,漏斗面积达 $1\,400\text{ km}^2$,漏斗中心地下水埋深达 $50\sim 60\text{ m}$,局部达 65 m 。大面积地下水水位持续下降引起地面沉降,自 1980 年起,该区地面沉降范围不断扩大,至 2013 年,沉降中心累计沉降量已达 1.023 m ^[8,10]。

2 水资源联合模拟系统构建

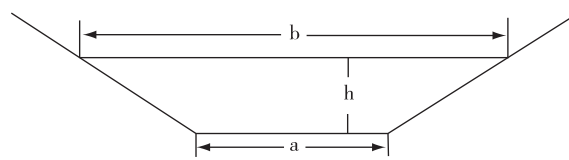
在对地表水系统与地下水系统概化的基础上,分别建立二者的数学模拟模型。将 2 个模型耦合为 1 个整体的联合模拟模型,耦合的关键是确定耦合因子。该区地表水水位和浅层(第一含水层组)地下水水位直接影响地表水系统和浅层地下水系统。天然状态下,区内河流大部分河段河水位常年低于地下水,接受地下水的排泄补给,仅在水量丰富年份的汛期,河水位抬高补给地下水^[11]。此外,在浅层地下水水位和深层地下水水头差值作用下,浅层地下水和深层地下水通过越流联系^[10]。因此,将地

表水水位和浅层地下水水位确定为耦合因子。为掌握地表水水位和地下水水位的变化规律,满足模型建设和修订水文地质参数的需要,2014 年 1 月—2015 年 12 月,在区内进行 2 个水文年的地下水水位与地表水水位监测。2014 年 8 月和 12 月分别进行丰水期和枯水期河水水位和地下水水位统测。

2.1 地表河流的概化

研究区地表河流河床底部为亚砂土和细砂,直接切入浅层含水层组(第一含水层组)中,河水与浅层地下水水力联系密切。除丰水期外,其余时期地下水常年补给河水。

区内地表河流均概化为棱柱体明渠,其断面形状为梯形(图 2),将河流划分为若干段,每段河流的断面、坡度和糙率均视为一致。将整个规划期划分为若干个时段,在每一时段内,河水的流量概化为均值,近似看成恒定的、均匀的缓变流^[11-12]。



a. 河底宽度; b. 河面宽度; h. 河水水深。

图 2 研究区河床断面示意图

Fig. 2 Sketch diagram showing the river section in the study area

2.2 水文地质条件的概化

目的含水层可概化为非均质各向同性的潜水含水层和承压水含水层,局部可视为均质。浅层含水层顶部有降雨、灌溉水的入渗补给,同时有蒸发及农业开采排泄,将上述补排量概化为单元强度^[9]。由图 3 可知,模拟区北部边界(茨淮新河)为人工河,在模拟中概化为已知水头边界(第一类边界),将无法选择天然边界的左边界、右边界和下边界用地下水观测孔水位控制边界。第一含水层组侧向边界采用水头边界,水头值根据边界附近钻孔水位确定;第二含水岩组和第三含水岩组是地下水主要开采层位,且与大气降水、地表水水力联系较弱,因此将第一含水层以下各层侧向边界概化为柯西边界(第三类边界),即在边界处赋参考水头值(根据边界附近该层位钻孔水位确定)和交换率,用于模拟计算模拟区与模拟区外部地下水交换量^[13]。

模拟区存在较多开采井,根据其分布特点,将

其分别概化为点井、大井和面积井。区内浅层地下水水流场呈天然状态,承压水水头逐年下降,地下水流呈非稳定状态。

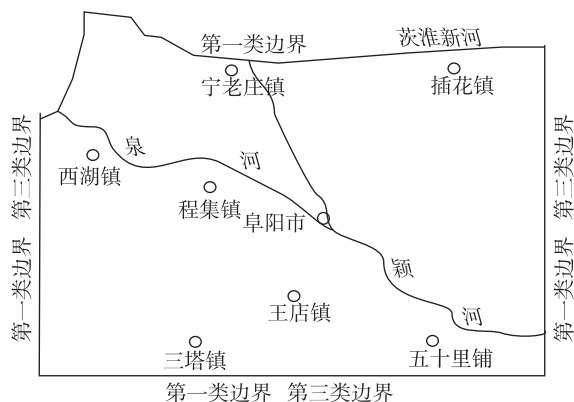


图3 研究区边界性质示意图

Fig. 3 Sketch diagram showing the boundary conditions of the study area

2.3 水文地质系数分区与选取

在水文地质参数专项试验的基础上,结合室内和野外模拟试验、地下水动态监测、抽水试验等工作成果,对研究区的渗透系数 K 、给水度 μ 和弹性释水系数 μ' 进行修正。根据渗透性差异,以岩性特征及土地利用情况为依据,对研究区各含水层组的水文地质参数进行分区(图4,图5)。在模型构建中,结合模拟结果反复调整,最终选取合适的各含水层组的水文地质参数值。

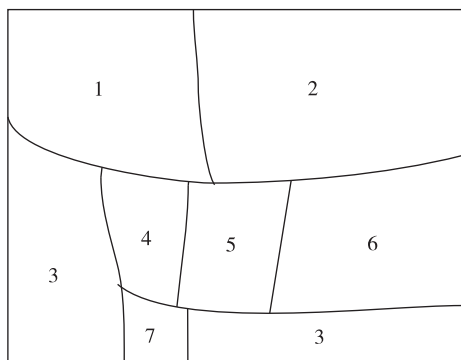


图4 第一含水层组水文地质参数分区

Fig. 4 Hydrogeological parameter division of the first aquifer

本次模拟的计算模型中需输入的主要水文地质参数为渗透系数 K 、给水度 μ 和弹性释水系数 μ' 。第一层分区如图4所示,第三层(第二含水层组)分区

如图5所示。模型的渗透系数根据抽水试验及淮北平原各岩性渗透系数经验值取值,给水度根据抽水试验拟合结果取值,弹性释水系数根据经验取值。

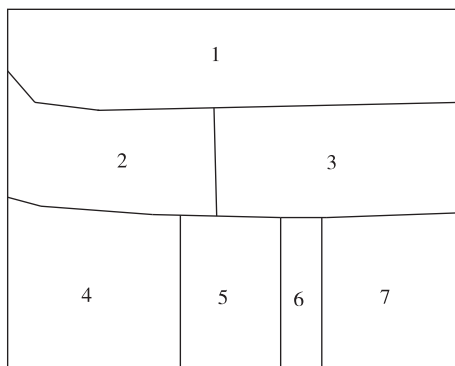


图5 第二含水层组水文地质参数分区

Fig. 5 Hydrogeological parameter division of the second aquifer

2.4 地表河水数学模拟模型及河水与地下水耦合方程

2.4.1 地表河水数学模拟模型

一般天然河水的平均深度 h 比水面宽度 b 小,由研究区地表河流的概化,得到河流某断面流量 Q 与平均水深 h 之间的关系式为

$$Q = ah^\beta, \quad (1)$$

式中: Q 为河流某断面流量, L^3 ; h 为河流某断面平均水深, L ; $\beta \approx 1.67$; a 为待定系数,由 Q 和 h 实测资料通过统计分析确定。

当河水水面面积不大时,降水对河流的补给量、河水的蒸发量以及在某一时段内河段贮存量的改变均可忽略不计。根据质量守恒定律,该区地表河水的均衡方程为

$$Q_p - Q_s - Q_d - Q_c = 0, \quad (2)$$

式中: Q_p 为河流最上游断面的入流量, L^3 ; Q_s 为河流第 r 个河段的河水入渗量, L^3 ; Q_d 为第 r 个河段的河水利用量, L^3 ; Q_c 为第 r 个河段下游断面的流量, L^3 。

将研究区河流划分为 r 个河段 ($r=1, 2, \dots, r$), 入渗量 Q_p 和利用量 Q_s 均沿整个河段均匀分布。因此,地表河水的数学模拟模型为

$$Hs = Z + \left[\left(Q_p - \sum_{i=1}^{r-1} Q_s - \frac{1}{2} Q_s - \sum_{i=1}^{r-1} Q_d - \frac{1}{2} Q_d \right) / a \right]^{1/\beta}, \quad (3)$$

式中: H_s 为河水位, L ; Z 为河床底标高, L ; 其他符号意义同前。河水位 H_s 与河水利用强度 Q_d 为非线性关系。

2.4.2 河水与地下水耦合方程

研究区河水与浅层地下水水力联系密切。在河水与浅层地下水水位差的作用下,河水与浅层地下水发生水量交换。某河段河水与浅层地下水的渗透量 Q_s 为

$$Q_s = \gamma(H_s - h_1)F_s, \quad (4)$$

式中: γ 为综合影响系数; H_s 为河水位, L ; h_1 为浅层地下水水位, L ; F_s 为河段水面面积, L^2 。

当河水补给潜水时, $Q_s > 0$; 当地下水补给河水

时, $Q_s < 0$ 。由式(4)可知,河水与浅层地下水之间的交换流量是河水和潜水的状态变量(水位)的函数。

2.5 水资源系统联合模拟模型

研究区水资源系统包括地表水和地下水 2 个相对独立的子系统。地下水子系统中包括多个含水层及弱透水层组合,上、下含水层之间以越流关系耦合。建立模型的同时应考虑黏土层由于地面沉降所产生的压密释水。参照已有研究成果^[2,4,5],通过概化地下水系统(含水层及弱透水层)及边界,建立非均质三维饱和地下水水流数值模拟模型^[13-16],其数学模型为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \epsilon = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t}, (x, y, z) \in \Omega, t > 0 \\ H(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y, z), (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t) \Big|_{(x, y, z) \in B_1} = H_1(x, y, z, t), (x, y, z) \in B_1, t > 0 \\ K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{(x, y, z) \in B_3} = \frac{H_n - H}{\sigma'}, (x, y, z) \in B_3, t > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: Ω 为研究区域; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 分别为 x, y, z 方向的渗透系数, $L T^{-1}$; $H(x, y, z, t)$ 为 t 时刻的水位标高, L ; $H_0(x, y, z)$ 为初始水位标高, L ; μ_s 为含水层储水系数; 第一含水层取重力给水度 μ , 其他含水层取弹性释水(储水)系数 μ' , L^{-1} ; ϵ 为源汇项, T^{-1} ; H_n 为边界内侧研究区水头, L ; H 为边界外侧水头, L ; $\sigma' = \frac{m_1}{K_1}$, K_1 和 m_1 分别为弱透水层的渗透系数(L/t)和厚度(L)。

通过构建河水运动的数学模拟模型、河水和潜水相互作用耦合方程以及地下水流数值模拟模型,连接方程式(3)、(4)和(5),构成研究区地表河水与地下水系统联合数学模拟模型。

运转联合模拟模型的关键是河水与潜水之间交换量的确定。在耦合方程(3)中,每个河段的浅层地下水位 h_1 和河水位 H_s 用各河段中点处的浅层地下水位和河水位 H_s 代之,即用中点处的水位差代表该河段的水位差。河段中点处的河水位 H_s 由式(2)确定。

2.6 联合数学模拟模型的识别与验证

参照已有研究^[3,5],对建立的水资源联合模拟模型进行识别与验证。选取 2014 年 1 月 1 日—

2015 年 12 月 31 日浅层地下水和深层地下水动态观测资料,以及 2014 年 8 月和 12 月的地下水位观测资料,用以上模型进行识别与验证。

对模型参数分区及参数值进行调整,直至模拟水位与实测水位拟合较好,拟合获得浅层含水层观测孔识别期实测水位与模拟水位对比曲线(图 6),深层含水层观测孔识别期实测水位与模拟水位对比曲线如图 7 所示。

由识别期模拟结果可知,模拟计算的地下水水位过程线与实测水位动态变化基本吻合,说明基于区内水资源系统结构模型和水文地质概念模型建立的地表水与地下水联合数值模拟模型基本达到精度要求,符合区内实际水文地质条件,能较好地反映研究区地下水流场的时空变化,模型具有较高的可靠性。

3 联合模拟模型的应用

3.1 水资源管理目标

研究区水资源利用的主要问题是深层地下水开采过量,导致深层地下水水位持续下降和地面沉降,地表水和浅层水没有得到充分利用。因此,水资源管理的总目标为合理调度地表水资源,优化开

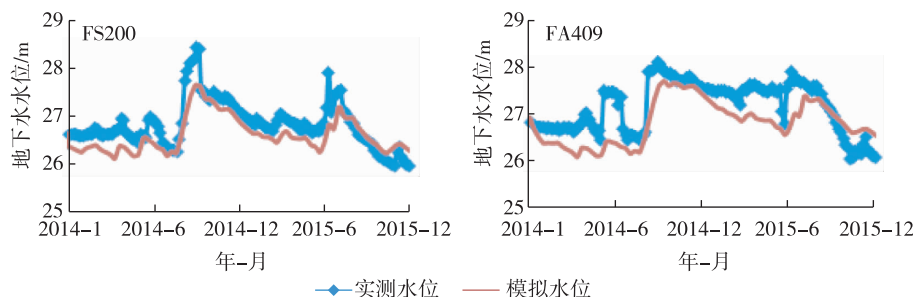


图 6 浅层含水层观测孔识别期实测水位与模拟水位对比图[10]

Fig. 6 Comparison between the measured and the simulated water levels of shallow aquifer

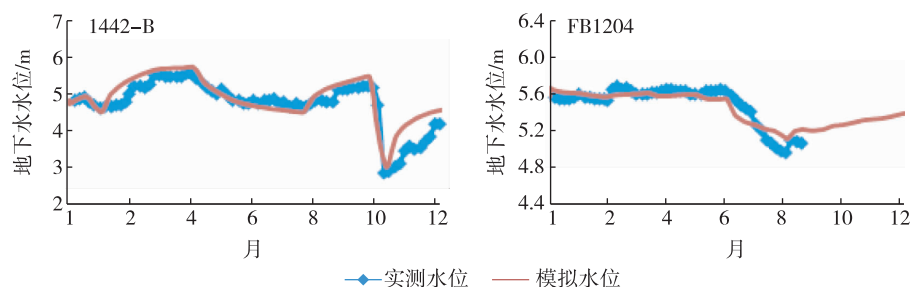


图 7 深层含水层观测孔识别期实测水位与模拟水位对比图

Fig. 7 Comparison between the measured and the simulated water levels of deep aquifer

采地下水资源,合理分配工业及生活用水量,在满足不断增长的供水需求的前提下,控制深层地下水水位降落漏斗和地面沉降的进一步发展,该总目标由以下具体目标构成。

水量均衡目标包括地表水均衡和地下水均衡;水位控制目标包括潜水水位控制和承压水水位控制;供需平衡目标包括工业用水平衡和生活用水平衡。

研究区水资源管理是一个复杂条件下多约束、多目标规划问题。本次研究通过建立多目标规划模型,采用多阶段目标规划法对模型进行求解。该方法相对于通常采用的单目标线性规划^[2]具有明显的优越性。

3.2 约束条件

资源约束指管理区内优化的地表水和地下水水量不得超过可供水量;地表水均衡约束为地表水的可供水量及其正负偏差, 10^4 m^3 ;地下水均衡约束为潜水允许开采量及其正、负偏差, 10^4 m^3 ;承压水允许开采量及其正、负偏差, 10^4 m^3 。

水位约束指地下水开采时需保证区内各水位

控制点的水位降深值不超过某极限降深值。

对潜水,按照分质供水要求,在大量饮用地表水前要适当加大潜水的开采量,其水位降深约束需保证至 2020 年,开采中心潜水累计水位下降不超过潜水含水层厚度的一半。

深层承压水的水位降深约束值主要考虑允许地面沉降条件下的允许水位。过量抽取深层第二含水层组承压水是地面沉降的主要原因。当保持第二含水层组地下水开采中心水位埋深(60 m)不变时,可使地面沉降逐渐减小直至停止。根据区内地面沉降历史及市政建设特点,沉降量 $\leq 250 \text{ mm}$ 时,对城市规划建设不会造成明显危害。推定区内允许地面沉降量为 250 mm,第二含水层允许水位埋深为 45 m。因此,承压水水位约束的极限取值,即在开采中心第二含水层组地下水水位的界限为埋深 $< 60 \text{ m}$,其他地区第二含水层组地下水水位的界限为 40~45 m。第三含水层组地下水水位约束的极限取值以目前水位埋深 30 m 为宜。对浅层地下水选取 25 个水位控制点,对第二含水层地下水选取 21 个控制点,对第三含水层选取 14 个水位控制点,共 60 个水位约束方程。

需求约束指区内水资源的优化利用量要保证管理期内的用水要求。

3.3 地下水合理开发管理方案

研究区供水需求平衡对策应利用地表水和地下水联合供水模式。参照有关地下水合理开发和优化管理研究成果^[6],拟定研究区水资源科学管理方案为“开源节流型优化管理方案”。

(1) 规划管理方案(方案 A)

相关部门正在建设市区(南郊)清河水源地。该方案即在此基础上,不改变目前深层地下水的开采布局,在满足规划用水要求的前提下,对各管理亚区的水资源开采利用量进行时空优化。

(2) 分质供水管理方案(方案 B)

在方案 A 的基础上,按照“城市居民饮用水以深层承压水为主,工业用水以浅层潜水和地表水为主,承地水为辅”的原则,在不改变区内规划用水总量的前提下,调整各管理区各部门对潜水、承压水和地表水的期望用水量,缓和承压水水位持续下降和地面沉降的加剧。在地下水水位达到最佳状态时,对地下水开采量进行时空优化,达到分质供水的目的。

(3) 地表水联合调度管理方案(方案 C)

根据供水规划,增加潘寨和十二里庙 2 个后备浅层水源地的开采量。据调查,区内颖河和泉河可长期利用的水资源量为 $36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。按照研究区水污染治理规划,到 2020 年,该区地表水水质将普遍达到地面三级水标准。因此,应尽量利用区内地表水资源。到 2025 年,颖河、泉河的开采量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。方案 C 即在分质供水管理方案的基础上,在满足未来规划用水要求的前提下,对水资源进行优化管理。

3.4 地下水合理开发管理方案预测

3.4.1 水量均衡分析

通过对研究区水资源量进行预测,各管理期内水资源优化开采量均未超出允许可利用资源量,水量均衡是具有保证的。

3.4.2 供需平衡分析

对于规划管理方案(方案 A),至 2025 年潜水优化开采量将缺水 $5.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而承压水在各管理期内均不满足规划要求,且随着时间的推移缺水将日益严重。

对于分质供水管理方案(方案 B),至 2025 年潜

水优化开采量将缺水 $5.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而承压水在 2020 年时能满足规划要求,但至 2025 年将缺水 $1.93 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

利用地表水联合调度管理方案(方案 C),除增加地表水利用量外,对现有开采井区进行调整,开辟新的地下水水源地。潜水优化开采量均满足并超出规划值,承压水优化开采量和规划量均与方案 B 结果相同。

从研究区潜水和承压水水资源优化总量分析,方案 A 和方案 B 在各管理期内均不满足供水要求,且缺水日渐严重;方案 C 在各管理期内优化总量均满足并超出规划值。

3.4.3 环境效应分析

各管理方案均减缓了承压水水位的下降速度。在地下水漏斗中心,除方案 A(62.7 m)外,方案 B 和方案 C 的第二含水层组地下水位埋深均控制在 60 m 以内(方案 B 为 54 m,方案 C 为 52 m),减缓并控制了地面沉降的发展趋势。但只有充分利用地表水联合调度管理方案(方案 C)才能最大程度满足日益增长的供水需求,且还可最有效地减缓地面沉降的进一步发展,从而获得良好的环境效益。

4 结 论

(1)对于供水紧缺、水文地质条件复杂、存在多个地下水含水层组、地下水水位持续下降和地面沉降的内陆城市,在建立地下水和地表水联合数值模拟模型时,要正确选择地表水和地下水以及浅层地下水与深层地下水之间水力联系的耦合因子。

(2)制定水资源合理开发利用规划方案是行之有效的水资源科学管理模式,不仅可合理调度地表水资源,优化开采地下水资源,合理分配工业及生活用水量,还可控制深层承压水水位降落漏斗和地面沉降的进一步发展,使在供水过程中的生态环境效益达到最佳。

参考文献

- [1] Willis R, Liu P. Optimization Model for Ground-water Planning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1984, 110(3): 333-347.
- [2] 邵景力,崔亚莉,李慈君.包头市地下水—地表水联合调度多目标管理模型[J].资源科学, 2003, 25(4): 49-55.

- [3] 石玉波,母敏霞.地表水地下水资源联合管理的递阶优化模型[J].水电能源科学,1995,13(3):149-155.
- [4] 鲍卫锋,黄介生,陈玲,等.地表水地下水联合运用模拟模型[J].中国农村水利水电,2003(6):45-47.
- [5] 余美,芮孝芳.防治土壤盐碱化地表水地下水联合管理模型[J].水资源保护,2007,23(4):6-9.
- [6] 曲兴辉,谷秀英.平原区地表水与地下水联合调控模型研究[J].水文,2005,25(4):23-25.
- [7] 安徽省地矿局第一水文地质工程地质队.1:20万毫州幅、阜阳幅区域水文地质普查报告[R].蚌埠:安徽省地矿局第一水文地质工程地质队,1990.
- [8] 杨则东.阜阳地下水开采利用现状及其引发的地质环境问题[J].安徽地质,2007,17(2):134-139.
- [9] 阜阳市水务局.阜阳市水资源公报[R].阜阳:阜阳市水务局,2011—2014.
- [10] 中国地质调查局南京地质调查中心.淮河流域沂徐淮地区水文地质调查报告[R].南京:中国地质调查局南京地质调查中心,2016.
- [11] 石玉波,周之豪.区域地表水地下水联合运用的分解协调优化方法[J].水科学进展,1996,7(3):239-245.
- [12] 杜文堂,张忠永.剡江流域地下水与地表水联合调度模型[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版)2000,19(2):156-158.
- [13] 齐学斌,赵辉,王景雷,等.商丘试验区引黄水、地下水联合调度大系统递阶管理模型研究[J].灌溉排水,1999(4):36-39.
- [14] 黄丹,肖伟,李勇.地下水三维数值模拟及其优化开采[J].资源调查与环境,2005,26(2):137-145.
- [15] 徐海珍,李国敏,张寿全,等.北京市平谷盆地地下水三维数值模拟及管理应用[J].水文地质工程地质,2011,38(2):27-34.
- [16] 阎学义,朱国荣.淄博市王旺庄水源地地下水开采预测的数值模拟[J].资源调查与环境,2008,29(3):226-232.

The application of a joint numerical simulation system of surface water and groundwater in optimized management of Fuyang water resources

LI Guo-li¹, ZHOU Kai-e², ZHANG Qing², YUAN Hong-wu¹

(1. Water Affair Bureau of Fuyang City, Fuyang 236001, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: On the basis of the characteristics of water resources system in the city of Fuyang, and environmental geology issues (such as land subsidence), this study summarized general features of surface water system and groundwater system, and finally established a joint numerical simulation model and an optimized management model for urban water resources. By operation and application of the optimized management model, the planning scheme of rational utilization for water resources in the study area was determined. The model prediction results show that the planning scheme selected in this study will not only make surface water and groundwater resources regulated reasonably and mined optimally, but also control the further development of land subsidence in the study area.

Key words: surface water; groundwater; joint numerical simulation model; Fuyang City