

# 肥城盆地石横电厂水源地岩溶水 系统地下水管理模型

王 玮<sup>1</sup>, 李云峰<sup>1</sup>, 侯东辉<sup>2</sup>, 张二勇<sup>3</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北电力设计院,  
陕西 西安 710032; 3. 中国地质调查局, 北京 100035)

[摘要] 为防治肥城盆地地下水持续下降, 科学管理盆地地下水资源, 建立了盆地内岩溶水系统地下水优化管理模型, 并采用改进单纯形法求解该模型, 取得了较好地效果。首先根据 1994 年 11 月 1 日~1997 年 7 月 31 日历年 33 个月盆地内各用水部门岩溶水开采量调查资料、地下水位长观资料等, 采用有限单元法建立了盆地岩溶地下水流数值模型; 然后在对盆地内 2001 年水资源开发利用现状及存在问题进行分析的基础上, 提出了盆地内岩溶地下水资源的开源节流措施, 并指出通过开源节流、加强管理、优化水量分配方案、控制开采、积极外引客水资源等措施, 有望控制住盆地内地下水位持续下降。最后采用响应矩阵法耦合地下水流数值模型与优化模型建立了管理模型。在求解方法上, 对于因资源不足而无解时, 可在形成背景水位时, 根据既定的供水优先秩序, 对优先级较低的用户分配较少的资源, 通过试算的方法求得当前资源约束下的满意解。

[关键词] 岩溶地下水系统; 管理模型; 响应矩阵法; 改进单纯形法; 山东省

[中图分类号] P641.8 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)03-0032-08

[作者简介] 王玮(1970—), 男, 江西乐平人, 工程师, 博士研究生, 现从事水资源与环境工程教学与科研工作。

石横电厂位于山东省肥城盆地西部, 该电厂乙站分两期建设, 电厂乙站总装机 1 200 MW, 扩建后总需水量为  $7.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (已采取节水措施), 夏季用水高峰时可达  $9.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 电厂生产和生活用水均开采肥城盆地内古生界碳酸岩类岩溶裂隙水。

盆地内各行各业均取奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶水作为供水水源, 电厂水源地只是肥城岩溶水盆地的局部集中开采地段之一。从 1981 年勘探至今时隔 20 余年, 肥城盆地内气象条件、用水条件的变化, 导致水资源状况发生了很大改变, 由于盆地内工农业用水量、生活用水量的增加 (基本为开采岩溶地下水), 造成盆地内区域水位持续下降, 同 20 世纪 80 年代初相比较, 区域水位下降了 30~33 m, 目前盆地内已形成 300 km<sup>2</sup> 以上的漏斗区。盆地内水资源供需矛盾在枯水年表现得非常尖锐, 水资源不足将会成为制约该地区经济发展的一大因素。

目前盆地内开采岩溶地下水基本没有实行统一管理, 各部门按照需要各自打深井开采岩溶地下水, 枯水年枯水期农业灌溉大量开采岩溶水, 造成用水紧张。该区由于受水利设施限制, 地表水利用率低。

针对肥城盆地岩溶地下水已处于严重超采的现状, 为了有效地控制地下水的开采, 确保石横电厂和其他国民经济各部门供水安全, 必须加强水资源的科学管理和统一调配、合理规划, 为工农业生产发展创造一个稳定的供水环境。

## 1 岩溶地下水流模型

### 1.1 水文地质概念模型及数学描述

计算区范围包括整个肥城盆地, 即西、北、东、东南均到分水岭, 南边界的西段为盆地的下游出口, 人为划至石横电厂水源地南 12 km 开外处, 计算域面积为 1 127.875 km<sup>2</sup>。

肥城盆地岩溶含水层在整个计算范围内均有分布, 由于岩溶发育相对较均匀, 含水层空隙多为 0.2~0.5 mm 的溶孔溶隙, 可将含水介质概化为非均质多孔介质; 在盆地中心, 岩溶含水层被第四系覆盖, 且溶岩顶部 15~20 m 的强风化带普遍被粘性土所充填, 构成岩溶含水层的隔水顶板, 使岩溶地下水具有承压性, 为承压含水层; 这个区域的岩溶承压含水层接受以越流形式进入的大气降水入渗补给、河流渗漏、农田灌溉入渗等垂直补给。在靠近分水岭的灰岩裸露区, 只接受大气降水的入渗补给, 该区岩溶含水层未承压, 仍为潜水, 但考虑到该区岩溶含水层厚度 200 m 左右, 在数值计算与管理模型计算中, 最大水位降深均不足 20 m, 小于含水层厚度的 1/10, 因此, 也近似按承压含水层处理, 与盆地中心岩溶承压含水层归并在一起, 统一按承压含水层计算, 这样处理所带来的误差是允许的。

计算区西、北、东、东南边界为地下水分水岭, 处理为隔水边界。南边界的西段远离盆地开采中心, 在盆地内开采影响之外, 处理为定水头边界。

根据以上概化的水文地质概念模型, 在某个初始流场时, 本区地下水流可用下列非均质各向同性平面二维流数学模型来描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ T \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ T \frac{\partial H}{\partial y} \right] - \sum_{j=1}^m \delta Q_j(x, y, t) + \\ w = S \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y) \in D, t \geq 0, \\ H(x, y, t) |_{t=0} = H_0(x, y) & (x, y) \in D, \\ T \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0 & t \geq 0, \\ H(x, y, t) |_{\Gamma_1} = H_0(x, y) & t \geq 0, \end{cases}$$

式中:  $T$  为承压含水层的导水系数( $\text{m}^2/\text{d}$ );  $Q_j$  为承压含水层中  $m$  个抽水井中第  $j$  口井的开采量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $\delta$  为  $\delta(x-x_j, y-y_j)$ , 为承压含水层中第  $j$  口井的  $\delta$  函数( $1/\text{m}^2$ ),  $(x_j, y_j)$  为第  $i$  口井的坐标;  $S$  为承压含水层的弹性释水系数;  $H(x, y, t)$  为承压含水层的水头函数( $\text{m}$ );  $H_0(x, y)$  为承压含水层的初始水头函数( $\text{m}$ );  $w$  为承压含水层的各项垂向补给强度之和( $\text{m}/\text{d}$ );  $m$  为承压含水层抽水井的总数;  $\Gamma_1$  为计算区定水头边界;  $\Gamma_2$  为计算区隔水边界;  $n$  为外法线方向;  $D$  为承压含水层计算域。

可采用有限单元法求解该模型。

1.2 岩溶地下水流数值模型

本次计算岩溶承压含水层采用不规则三角形网格剖分, 以互不重叠的三角形面元所构成的折面逼近代替岩溶承压水水头面, 以面元边线构成的连续折线代替计算区内不同类型的界线, 将全区剖分成 1 074 个单元, 576 个节点, 其中一类边界节点 11 个, 内节点与二类边界节点 565 个, 代表实际面积 1 127.875  $\text{km}^2$ 。剖分时, 把区内所有的岩溶承压水长观点、抽水主孔, 全部剖分在节点上(图 1)。图 1 中典型点位于石横电厂水源地范围内(东部 3 个点)及现状盆地降落漏斗中心地带(西部的 1 个点), 这些点最能体现岩溶含水系统对输入(人工开采量)的响应。

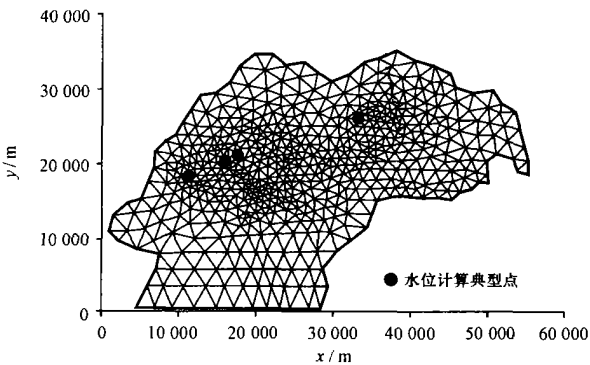


图 1 计算域剖分图

Fig. 1 Grid map of model domain

模型识别以勘察工作中所进行的岩溶地下水长观资料为依据, 其中以 1994 年 11 月 1 日岩溶地下水位统测资料为依据绘制出初始流场图, 再采用 Kriging 插值方法计算出剖分各节点水位值。

根据勘察工作中所进行的岩溶地下水长观工作的观测间隔、各源汇项作用期(以月为时间计算单位), 将模型识别与模型检验阶段(19941101~19970731)的时间步长确定为 33 个大时段(每月一个大时段), 为细化计算结果, 将每个大时段内划分 20 个小时段(小时段步长变化系数取 1.2), 据此, 把 1994 年 11 月 1 日~1997 年 7 月 31 日的计算时间剖分为 33 个大时段, 660 个小时段。

把 1994 年 11 月 1 日~1997 年 7 月 31 日的地下水长期观测资料分作两个阶段使用, 其中 1994 年 11 月 1 日~1996 年 7 月 31 日共 21 个月的地下水长期观测资料用作模型识别, 1996 年 8 月 1 日~1997 年 7 月 31 日共 12 个月的地下水长期观测资料用作模型检验。把各项原始数据(包括期间的各项

源汇项)输入模型中,计算各未知节点上各时段末刻的水头值,与相应节点上的实测水位值对比,通过反复调整参数分区及分区参数值,使计算水位与实测水位之间的差值尽量小。经模型识别和检验,拟合点逐时段的拟合误差绝对值 $<0.5\text{ m}$ ,所建立的地下水流模型能够反映实际含水层的渗流情况。

## 2 岩溶地下水流优化管理模型

### 2.1 响应矩阵的产生

前述的水流模型刻画了盆地岩溶含水系统的性质和变化状态,是建立优化管理模型和预测的基础。在管理模型中,需将水流模拟模型耦合于规划模型之中,耦合方法采用响应矩阵法。

最佳单位脉冲的确定,通过试算的方法求得单位脉冲为 $10\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 。脉冲点为现 3 个水源地供水井所在节点,共计 15 个节点。

### 2.2 水资源平衡分析

根据肥城市水资办统计资料,2001 年肥城盆地内,一般工业用水(指电厂之外的工业用水) $5\ 842.18\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,非农业人口生活用水量 $1\ 699.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,电厂用水量 $2\ 138.82\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,农业用水 $12\ 591.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (其中含农业灌溉、农业人口生活用水及农村的其他用水量),煤矿矿坑排水量 $2\ 883.54\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (1986~2000 年多年统计资料,平均为 $3\ 483.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ );以上总计 $25\ 154.54\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (若矿坑排水量按 $3\ 483.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 计,则以上总计为 $25\ 754.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ )。除部分农业用水为地表水外(约 $1\ 500\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ),其余均为开采岩溶地下水。

西北电力设计院先期工作的评价结果表明,盆地的大羊集断面以上岩溶地下水多年平均资源量为 $1.8271\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。由此可见,盆地内岩溶含水系统已处在严重超采状态。另外对比 2001 年 11 月与 1994 年 11 月的地下水位可知,现状地下水位较 7 年前整体下降了 $15\sim 20\text{ m}$ ,这也说明了盆地多年来一直处于严重超采状态,从而造成区域地下水位持续下降。

根据已建立的盆地岩溶地下水水流数值模型,将现状开采量(不含电厂水源地的现状开采量)、1982~2001 年实测月降水量等代入数值模型计算可知,在枯水年及其他年份的枯水期,地下水位均大大低于 $18\text{ m}$ ,更有甚者低于海平面,为 $-0.95\text{ m}$

(图 2)。

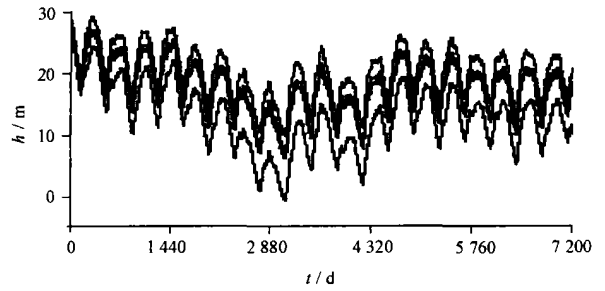


图 2 现状开采量下典型点预报水位历时曲线

Fig. 2 Predicted head of typical nodes vs. time under actual yield

### 2.3 开源节流措施

盆地内岩溶地下水的补给资源有限,现状开采已处于严重超采状态,因此,对全盆地的地下水资源必须加强管理。对水资源的管理既包括政府部门政策法规、行政命令等措施,还包括专业技术人员从技术角度提出的开源节流建议和地下水资源管理方案。经分析区域水资源条件及开发利用现状,可知尚有开源节流的潜力。

#### 2.3.1 矿坑水重复利用

根据肥城市水利部门的研究结果,盆地内矿坑排水经简单处理后可用于农业灌溉及一般工业用水,2001 年矿坑排水量为 $2\ 883.54\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (按 1986~2000 年多年统计资料,则平均为 $3\ 483.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ),大都白白流失了,假设这些水能重复利用 80%,则相当于新增水源 $2\ 306.832\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (或 $2\ 786.64\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ),可使农灌开采量减少 $2\ 306.832\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (或 $2\ 786.64\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ )。

#### 2.3.2 一般工业节水

根据肥城市 1993 年的“肥城市城区及石横工业区供水水源规划”,对盆地内一般工业用水,通过循环、逆流、清浊分流、综合利用等途径,可在现状用水量的基础上节水 30%左右。2001 年一般工业用水 $5\ 842.18\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,通过采取上述节水措施,可节水 $1\ 752.654\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,相当于一般工业用水开采量相应地可减少 $1\ 752.654\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 。

#### 2.3.3 农业灌溉节水

根据肥城市 1993 年的“肥城市城区及石横工业区供水水源规划”,盆地内水浇地约 $20\ 000\text{ hm}^2$ 。关于农业灌溉用水定额,50%降水量年份为 $204\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$ ,75%降水量年份为 $241\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$ ,95%降水量年份为 $306\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$ 。

a),如能采用一些节水灌溉技术,按定额进行灌溉,则各年份相应的农灌开采量为 $6\,120\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ , $7\,230\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ , $9\,180\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,这样农灌可节约大量用水。

城镇居民生活用水量(约 $1\,699\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ )占盆地内总用水量的比例较小,且基本符合定额用水量,基本没有节水潜力。

在盆地范围内,通过采用节流措施后,需水量为 $18\,430.886\sim 21\,490.886\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,而通过上述的开源措施,可新增水源(矿坑水重复利用) $2\,306.832\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (或 $2\,786.64\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ),如此一来,盆地内可供利用的水资源量则为 $20\,577.832\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (含矿坑水重复利用量)(或 $21\,057.64\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,含矿坑水重复利用量),配之以加强管理、优化水量分配方案、控制开采、积极外引客水资源等措施,则有望控制住盆地内地下水位的持续下降。

## 2.4 最低限制水位的确定

根据石横电厂水源地勘探资料,从钻孔揭露的岩溶发育深度及发育位置来看,在垂向上一般在可溶岩层顶部约20 m内,为充填或半充填带,洞穴基本上已被粘性土充填,此带以下至孔深150 m左右,为岩溶裂隙发育带,洞隙高度一般为0.2~0.5 m,为主要岩溶含水段。

该区第四系底板(同时也是可溶岩基岩的顶面)标高在水源地范围内相差很大,衡鱼水源地为19.72~42.67 m,孙庄—王小屯水源地为23.95~47.65 m,四合村水源地为38.20~44.20 m,营子一带为52.54 m,店子一带为42.20~49.70 m,这说明在盆地中可溶岩顶面起伏高差在30 m左右。通常情况下,基岩风化壳发育厚度在古正地形处大于负地形处,其充填厚度也随风化壳发育厚度的增大而变大。分析盆地中心钻孔资料,高于标高18 m时,基本上为岩溶被充填区,可作为岩溶承压水的顶板处理。

鉴于以上情况,说明盆地内岩溶水水位标高大于18 m时,仍未改变岩溶水的水动力性质(极个别地段除外),而当水位降至18 m以下时,不仅改变了地下水水动力性质,还有可能使盆地内一部分生活用水井和农灌井发生吊泵现象,因此,本次计算最低约束水位取为18 m。

## 2.5 管理方案

管理模型研究以满足最低水位限制时使允许

开采量达到最大为目标、或以满足需水要求时使降深达到最小为目标,分别设计了6个优化管理方案,其中,方案4~6是在方案1~3的基础上,仅改变了矿坑排水量这一个因素(方案1~3的矿坑排水量采用的是2001年的实测值 $2\,883.54\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,方案4~6矿坑排水量采用的是1986~2000年的平均值 $3\,483.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ );对这6个优化管理方案分述如下:

### 2.5.1 方案1

以电厂水源地各开采井的允许开采量为决策变量,当最低水位限制标高为18 m时,以盆地内岩溶水允许总开采量最大为目标。该方案中,计算背景水位时的源汇项包括开源节流后的农灌开采、矿坑排水等电厂开采以外的源汇项,其中,对农业开采,在枯水、特枯水年份,在电厂允许开采量不小于电厂总需水量的情况下,适当多分配一些水量,力争在满足电厂总需水量的前提下,最大限度地满足农业需水量。计算时段 $K=1,2,\dots,n$ ,根据电厂开采量 $Q(j,K)$ 的变化时段设定。按电厂水源地的分布,划分出3个管理亚区。据此可建立优化模型为:

目标函数为盆地内岩溶水允许开采量最大,即

$$Z = \max \sum_{j=1}^M \sum_{K=1}^n Q(j,K).$$

约束条件为:

(1)水位约束:各计算点 $i$ 各时段 $K$ 末刻降深要小于最大允许降深(最低水位限制标高为18 m):

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K Q(j,k) \beta(i,j,K-k+1) \leq$$

$$H_0(i,k) - H_{\min}(i,K)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad K = 1, 2, \dots, n.$$

(2)需水量约束:各管理亚区各时段 $K$ 的开采量应不小于该区该时段 $K$ 的需水量,即保证各水源地自身解决自身的需水量(这是最经济的采水、供水方式):

$$\sum_{j=1}^{M_1} Q(j,K) \geq Q_{M_1}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^{M_2} Q(j,K) \geq Q_{M_2}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^{M_3} Q(j,K) \geq Q_{M_3}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

且各时段 $K$ 所有水源地的总开采量不小于该时段 $K$ 电厂的总需水量 $Q_{\text{总}}(K)$ :

$$\sum_{j=1}^M Q(j, K) \geq Q_{\text{总}}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n.$$

(3) 单井开采量约束: 各开采井  $j$  各时段  $K$  的开采量  $Q(j, K)$  小于该井水泵的额定流量  $Q_{\text{额}}(j)$ :  
 $Q(j, K) \leq Q_{\text{额}}(j), j = 1, 2, \dots, M \quad K = 1, 2, \dots, n.$

(4) 非负约束:

$$Q(j, K) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, M \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

上述各式中,  $n$  为管理时段数;  $N$  为响应点个数;  $M$  为管理开采井个数;  $M_1 \sim M_3$  为 3 个管理亚区各区开采井个数。

该方案反映了盆地岩溶地下水系统最大出水能力。

### 2.5.2 方案 2

以电厂水源地各开采井的开采量为决策变量, 最低水位限制标高为 18 m, 当电厂水源地总开采量等于电厂总需水量时, 以水源地全部计算点降深的加权和最小为目标。该方案中, 计算响应矩阵时数学模型中的源汇项包括开源节流后的农灌开采、矿坑排水等电厂开采以外的源汇项, 其中, 对农业开采, 在枯水、特枯水年份, 适当多分配一些水量, 力争在满足电厂总需水量的前提下, 最大限度地满足农业需水量。计算时段  $k = 1, 2, \dots, K$ , 根据电厂开采量  $Q(j, k)$  的变化时段设定。按电厂水源地的分布, 划分出 3 个管理亚区。据此可建立优化模型为: 目标函数为电厂水源地全部计算点  $i = 1, 2, \dots, N$  在第  $K$  时段末刻降深加权和最小:

$$Z = \min \sum_{i=1}^N w(i) s(i, K) \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

其中:

$$s(i, K) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K Q(j, k) \beta(i, j, K - k + 1) \quad K = 1, 2, \dots, n.$$

约束条件为:

(1) 水位约束: 各计算点  $i = 1, 2, \dots, N$  各时段末刻降深  $s(i, K)$  要小于最大允许降深(最低水位限制标高为 18 m):

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K Q(j, k) \beta(i, j, K - k + 1) \leq H_0(i, k) - H_{\min}(i, K)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad K = 1, 2, \dots, n.$$

(2) 需水量约束: 各管理亚区各时段  $K$  的开采量要不小于该区该时段  $K$  的需水量, 即保证各水源地自身解决自身的需水量:

$$\sum_{j=1}^{M_1} Q(j, K) \geq Q_{M_1}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^{M_2} Q(j, K) \geq Q_{M_2}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^{M_3} Q(j, K) \geq Q_{M_3}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n,$$

且所有水源地的总开采量等于电厂总需水量:

$$\sum_{j=1}^M Q(j, K) = Q_{\text{总}}(K) \quad K = 1, 2, \dots, n.$$

(3) 单井开采量约束: 各开采井  $j$  各时段  $K$  的开采量  $Q(j, K)$  小于该井水泵的额定流量  $Q_{\text{额}}(j)$ :

$$Q(j, K) \leq Q_{\text{额}}(j) \quad j = 1, 2, \dots, M \quad K = 1, 2, \dots, n.$$

(4) 非负约束:

$$Q(j, K) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, M \quad K = 1, 2, \dots, n.$$

### 2.5.3 方案 3

在方案 1 的基础上, 将最低水位限制标高改为 17 m, 其余同方案 1。

该方案反映盆地岩溶地下水的调节能力随最低水位限制标高的变化情况。

### 2.5.4 方案 4

在方案 1 的基础上, 仅将矿坑排水量由方案 1 采用的 2001 年的实测值  $2\,883.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 改用 1986~2000 年的平均值  $3\,480 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 矿坑水重复利用量由  $2\,306.832 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  改用  $2\,786.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 其余同方案 1。

### 2.5.5 方案 5

在方案 2 的基础上, 仅将矿坑排水量由方案 2 采用的 2001 年的实测值  $2\,883.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 改用 1986~2000 年的平均值  $3\,483.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 矿坑水重复利用量由  $2\,306.832 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  改用  $2\,786.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 其余同方案 2。

### 2.5.6 方案 6

在方案 3 的基础上, 仅将矿坑排水量由方案 3 采用的 2001 年的实测值  $2\,883.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 改用 1986~2000 年的平均值  $3\,483.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 矿坑水重复利用量由  $2\,306.832 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  改用  $2\,786.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 其余同方案 3。

## 2.6 背景水位的计算

对上述的 6 个管理方案, 分别采用不同背景水位, 直接利用已建立的盆地水流数值模型预测背景水位。将 6 个管理方案的各项源汇项代入模型(不含电厂水源地开采量), 在降水频率  $> 95\%$  年份, 当

农灌开采量为  $306\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$  时, 所有 6 个模型均无解。经反复试算, 对于第 1, 2 方案, 在降水频率  $> 95\%$  年份农灌开采量为  $259\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$  时, 模型得到较好地求解; 对于第 3 方案, 在降水频率  $> 95\%$  年份农灌开采量为  $277\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$  时, 模型得到较好地求解; 对于第 4, 5 方案, 在降水频率  $> 95\%$  年份农灌开采量为  $241\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$  时, 模型得到较好地求解; 对于第 6 方案, 在降水频率  $> 95\%$  年份农灌开采量为  $267\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$  时, 模型得到较好地求解; 故背景水位预测时, 降水频率  $> 95\%$  年份根据不同的方案选择不同的农灌开采量, 以体现在缺水时期优先保证生活用水、电厂用水、其次为一般工业用水的思想。其中降水量序列采用 1982 年 1 月至 2001 年 12 月间 20 年的实测月降水量。初始流场采用 2001 年 12 月份实测值采用 Kriging 插值方法模拟绘制而成 (图 3), 典型点背景水位预测历时曲线见图 4 (方案 2, 农业开采量为  $241\text{ m}^3/(0.067\text{ hm}^2\cdot\text{a})$ )。

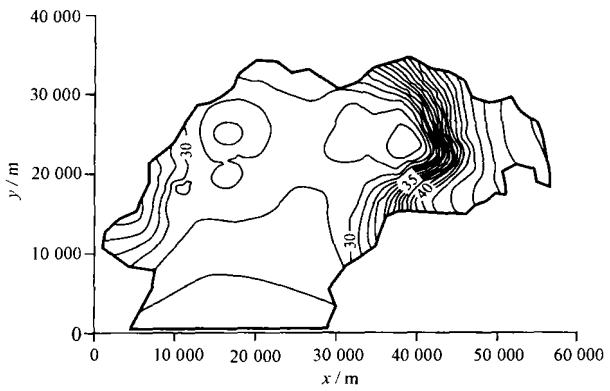


图 3 初始流场(2001 年 12 月)  
Fig. 3 Initial head(2001. 12)

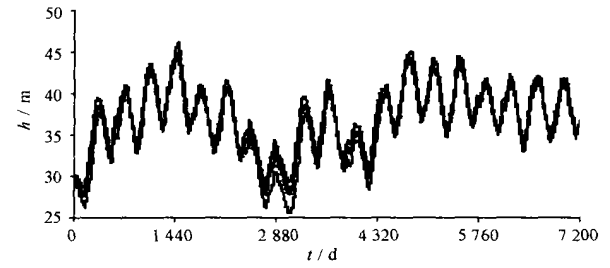


图 4 典型点背景水位预测历时曲线  
Fig. 4 Background head of typical nodes vs. time

2.7 管理模型优化结果

对上述 6 个管理模型采用改进单纯形方法求解, 可求出电厂水源地各开采井的最优开采水量,

对盆地内不同行业的最优化分配结果如表 1。优化分配结果表明, 在方案 1, 3, 4, 6 作用下, 由于电厂允许开采量无最大约束, 故而优化结果为丰水期或丰水年允许开采量较大, 而枯水年仅满足需水量要求; 在方案 2 及方案 5 作用下, 优化后电厂开采量尽可能集中在四合村水源地, 以减小对盆地漏斗中心的影响。方案 3, 6 的水位限制标高为 17 m, 含水层的调节能力比方案 1, 4 的要强, 在降水频率  $> 95\%$  年份分配的水量要多。

表 1 盆地内各方案不同频率年优化分配水量

Table 1 Optimized allocation water volume of different scenarios and different frequency years in Feicheng basin							
方	频	城镇生	电厂用	一般工	矿坑	农业用	盆地总
案	率	活用水	水分配	业用水		水分配	分配水
年/	%	分配水量	水量	分配水量	排水	水量	量
方	50	1 698.96	5 418.09	4 089.526	2 883.54	5 284.929	19 375.045
	75	1 698.96	2 821.50	4 089.526	2 883.54	6 388.860	17 882.386
	97	1 698.96	2 821.50	4 089.526	2 883.54	6 926.059	18 419.585
方	50	1 698.96	2 821.50	4 089.526	2 883.54	5 284.929	16 778.455
	75	1 698.96	2 821.50	4 089.526	2 883.54	6 388.860	17 882.386
	97	1 698.96	2 821.50	4 089.526	2 883.54	6 926.059	18 419.585
方	50	1 698.96	5 475.00	4 089.526	2 883.54	5 284.929	19 431.955
	75	1 698.96	2 821.50	4 089.526	2 883.54	6 388.860	17 882.386
	97	1 698.96	2 821.50	4 089.526	2 883.54	7 463.253	18 956.779
方	50	1 698.96	5 293.145	4 089.526	3 483.30	5 284.929	20 546.560
	75	1 698.96	2 821.50	4 089.526	3 483.30	6 388.860	19 178.846
	97	1 698.96	2 821.50	4 089.526	3 483.30	6 388.860	19 178.846
方	50	1 698.96	2 821.50	4 089.526	3 483.30	5 284.929	17 378.215
	75	1 698.96	2 821.50	4 089.526	3 483.30	6 388.860	18 482.146
	97	1 698.96	2 821.50	4 089.526	3 483.30	6 388.860	18 482.146
方	50	1 698.96	5 475.00	4 089.526	3 483.30	5 284.929	20 031.715
	75	1 698.96	2 821.50	4 089.526	3 483.30	6 388.860	18 482.146
	97	1 698.96	2 821.50	4 089.526	3 483.30	7 164.866	19 258.152

注: 表中数据单位为  $\text{m}^3/\text{d}$

3 规划结果分析

为了检验各种规划方案的效果, 将表 1 中对盆地内不同行业的优化分配水量代入数值模型。初

始流场采用 2001 年 12 月的流场, 计算未来 20 年在各方案作用下地下水位的变化情况及未刻流场, 计算结果见表。结果表明, 在方案 1, 4 作用下, 地下水的开发利用达到最大限度, 由于丰水期大量开采地下水, 枯水期仅满足需水量要求, 故地下水位变幅较小。需要说明的是, 在 6 个管理模型中, 对最低水位的约束方案 1, 2, 4, 5 均不得低于 18 m, 方案 3, 6 均不得低于 17 m; 而将 6 个方案的开采量代入数值模型计算未来 20 年地下水位的历时曲线及未刻流场时, 出现了枯水期个别点计算水位略低于最低水位约束 18 m(或 17 m)的情况, 这是把模型线性化后, 采用叠加原理所形成的积累误差是允许的。

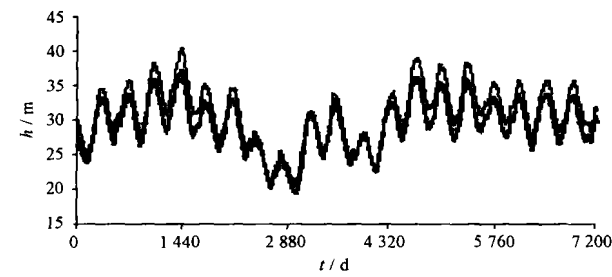


图 5 方案 2 典型点地下水位历时曲线

Fig. 5 Predicted head of typical nodes vs. time, scenario 2

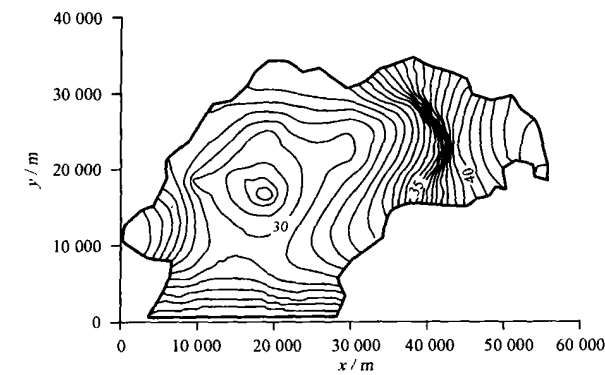


图 6 方案 2 地下水位未刻流场

Fig. 6 Predicted head, scenario 2

对于方案 2, 5, 在这两种方案的作用下, 盆地内地下水位在停止持续下降的基础上还略呈上升趋势, 这十分有利于盆地内水源的涵养、减少减弱环境地质问题的发生。

## 4 结论与建议

对比 6 个方案, 建议采用第 5 方案, 即最低水位限制标高为 18 m, 设计电厂水源地总开采量等于电厂总需水量, 以水源地全部计算点降深的加权和

最小为目标。该方案中, 首先保证了城镇生活用水开采量  $1\,698.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  和电厂总需水开采量  $2\,821.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 其次保证了一般工业用水开采量  $4\,789.526 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 对矿坑排水量用 1986~2000 年的平均值  $3\,483.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 矿坑水重复利用量按其 80% 计, 为  $2\,786.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 对农业用水, 在枯水、特枯水年份适当少分配一些水量; 计算结果, 50% 年份, 允许农业开采量为  $5\,284.929 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 75% 年份, 允许农业开采量为  $6\,388.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 97% 年份, 允许农业开采量为  $6\,388.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

按照第 5 方案的水最优化分与结果, 50% 及 75% 年份农业靠开采地下水及充分利用 80% 的矿坑排水量 ( $2\,784 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ) 后, 基本能按定额进行供水; 97% 年份农业靠开采地下水则短缺水量为  $4\,291.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 充分利用 80% 的矿坑排水量  $2\,784 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  后仍短缺  $1\,507.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。建议采取如下措施:

(1) 提高农业灌溉效率, 大力发展节水灌溉, 降低灌溉定额, 在保证农业产量的前提下, 用较少的水, 灌溉较多的农田。

(2) 充分挖掘本区大气降水地表产流的潜力, 使大气降水能更多地留在本区发挥作用; 必要时, 可修建地表水库、地下水库。

(3) 积极引进客水水源, 包括地表水源(引黄、引其他地表水)、地下水源(引邻区的地下水)等。

(4) 为了能利用矿坑排水量, 也应采用必要的工程措施, 拦蓄矿坑排水, 用于农业灌溉或经处理后用于一般工业用水。

(5) 必须强化水政水资源管理, 在全盆地范围内强制性地按分配量采水, 严禁任何单位、任何部门超量开采, 祸及全盆地各行各业及子孙后代。

在管理模型求解方面, 若因资源不足而无解时, 可在形成背景水位时, 根据既定的供水优先秩序, 对优先级较低的用户分配较少的资源, 通过试算的方法求得当前资源约束下的满意解。

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 刘强, 邹立芝, 李虎. 遗传算法在地下水资源管理中的应用——以松原市区的地下水资源管理为例[ J ]. 世界地质, 2002, 21(2): 145~149.
- [ 2 ] 尹尚先, 刘月琴. Application of the Boundary Element Method to Groundwater Resources Management[ J ]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 86~90.
- [ 3 ] 张远东, 魏加华, 邵景力, 等. 0—1 整数规划在水源地开采并

最优布局中的应用研究[J]. 第四纪研究, 2002, 22(2): 141 ~ 147.

[ 4 ] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 基于生态用水的地下水系统模拟与

优化管理模型[ J]. 地理学报, 2002, 57(5): 611~ 618.

[ 5 ] 张志忠, 李义昌, 杨国勇. 岩溶地下水管理模型及应用——以徐州市为例[ J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(6): 643~ 646.

Groundwater resource management model of  
Karst groundwater system in the water supplying field  
for Shiheng electric power plant in the Feicheng basin

WANG Wei<sup>1</sup>, LI Yun-feng<sup>1</sup>, HOU Dong-hui<sup>2</sup>, ZHANG Er-yong<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054 China;  
2. Institute of Northwest Electric Power Design, Xi'an 710032, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100035 China)

**Abstract:** In order to prevent and cure regional groundwater head decline continually in Feicheng basin, manage groundwater resource, a groundwater management model for the Karst groundwater system has been constructed, modified simplex method was adopted to solve this model, and achieved a good result. First, a FEM numerical model for Karst groundwater system has been constructed based on the information of extraction of each water-user and long-term serial of water head from 1994. 11. 01 to 1997. 07. 31. Then, some measures to broaden the sources of income and reduce expenditure have been brought forward for the karst groundwater resource in the basin based on the analysis of development and usage and existing problem of current status in 2001, and pointed out it is possible to control the regional groundwater head decline continually in the basin by adopting measures of broadening income and reducing outcome, reinforcing management, optimizing assignment of water resource, controlling extraction, introducing water resource from outside of the basin. Finally, coupling the groundwater flow numerical model and optimization model constructed management model using response matrix method. On the solving method, for the situation of non-solution caused by the shortage of resource, it is effective to get the satisfaction solution under the current resource constraints by trial and error, during the calculation of background water head, less water resource was assigned to the user with low priority.

**Key words:** Karst groundwater system; management model; response matrix method; modified simplex method; Shandong province

[ 英文审定: 苏生瑞]