

黑河中游地下水数值模拟与开发方案

彭顺风, 张行南

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 针对黑河中游地区由于极度干旱和地表水资源过度开发而导致生态环境恶化的现状, 从增加水资源可利用量的角度出发, 给出了在地下水埋深浅的地方用地下水代替现有供水系统中地表水的开发策略, 并制定了在张掖下游沿黑河两岸、碱滩和新华地区进行地下水开发的方案。为了评价开发方案的实施效果, 利用基于地理信息系统 ArcView 3.0 的地下水模拟系统软件 GMS 建立了黑河中游地区地下水数值模型, 该模型能较好地模拟研究区域的地下水流场以及各项补给量和排泄量。从模拟的结果来看, 该开发方案能显著减少潜水蒸发量, 提高水资源可利用量, 减轻土壤盐碱化, 对生态环境的负面影响较小。

关键词 地理信息系统; 地下水数值模型; 地下水开发策略; GMS; 黑河流域

中图分类号 :X523 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2006)S1-0036-04

黑河发源于祁连山北麓, 干流全长 821 km, 流域面积 11.6 万 km², 多年平均出祁连山径流量为 28.08 亿 m³[1]。中游地区介于莺落峡与正义峡之间, 为洪积扇和冲积平原区, 气候干旱, 年降水量仅 140 mm, 年蒸发能力达 1410 mm, 人工绿洲面积较大, 为黑河流域主要耗水区。目前, 由于中游地区对地表水资源的过度开发, 加上气候干旱等原因, 致使黑河流域出现了严重的生态环境问题, 主要表现为上游冰川萎缩、森林面积减小; 中游土地沙漠化和盐碱化严重; 下游河道断流、尾间湖干涸、天然绿洲萎缩、草场退化。由于中游地区总供水量占全流域的 92.5%, 因此, 该地区水资源开发策略对全流域的生态环境恢复有着重要的影响。

本文选择了祁连山、龙首山与合黎山之间 8 200 km² 的平原地区为研究区域(见图 1), 整个研究区域是一个连续的以周边基岩为边界的地下水盆地, 含水层为砂砾石与亚砂土互层, 厚度在张掖市区附近达 300~500 m, 北部边缘约 50 m。多年平均地下水位从南部山麓的 1 900 m 递减到北部 1 300 m 以下。张掖下游沿黑河地区地下水位埋深小于 5 m, 导水系数 3 000~5 000 m²/d² (见图 1)。因此, 该地区具有较好的地下水开采条件。

1 地下水运动数值模拟

本文以 GMS(groundwater modeling system)^[3] 为

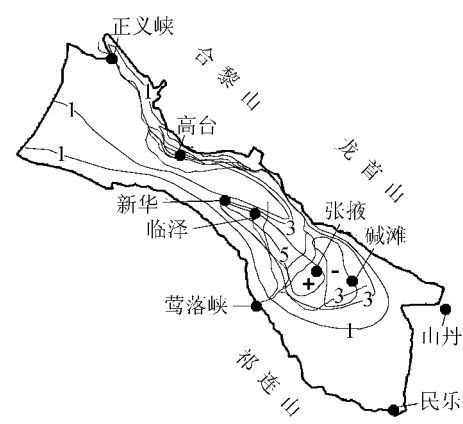


图 1 导水系数等值线(单位: 10³ m²/d)

平台构建地下水数值模型。利用该模型计算研究区域地下水系统的各项补给量和排泄量, 并勾绘其地下水等水位线。

1.1 模型构建

模型主要依据甘肃省地质矿产局第二水文地质工程地质队(以下简称“地质队”) 绘制的水文地质图构建, 包括 1/20 万的黑河干流中游地区水文地质图、潜水位埋深及水位等值线图、机井分布图、第四系含水层厚度、岩性及富水性图、农田水利化现状图, 以及张掖、临泽、高台、民乐、山丹等地区 1/100 000 的水文地质图。

第一步是构建基于 GIS 点、线、面图元的概念性模型。首先把上述水文地质图扫描成电子图片并校

作者简介: 彭顺风(1969—) 男, 安徽五河人, 高级工程师, 博士研究生, 从事水文学及水资源研究。E-mail: pengsf@hrc.gov.cn

准到基于 ArcView 3.0^[4]的黑河流域水资源地理信息系统^[5]上,然后以其为底图,在 ArcView 平台上编辑下列 12 类图元集合:边界、河道、渠道、城镇供水井、农灌供水井、泉群、潜水蒸发分区、灌溉回归水补给地下水分区、上层岩性分区、中层岩性分区、下层岩性分区、地下水观测孔。将这些图元集合输入 GIS 系统中,赋给每个图元相应的水文地质参数、河道和渠道的水位过程、井抽水过程,概念性模型就建立起来了。

第二步是利用 GIS 的功能对研究区域进行计算网格划分。本文以北偏东 52.6°方向为 x 轴,北偏西 37.4°方向为 y 轴,原点设在研究区域最南端。网格的尺寸为 1 km×1 km,在 x 方向上有 68 列,在 y 方向上有 205 行,在垂直方向上有 3 层。然后把从水文地质剖面图上读取的各含水层底和顶的离散点高程输入到相应的网格,再用 GIS 的插值功能计算出每个网格各层的底和顶的高程。

最后,把概念性模型与网格叠置起来,GIS 自动把概念性模型各分区的地下水各项补给量、排泄量、各岩性分区水文地质参数等值赋给相应的计算网格。这样,就可以利用 GIS 的 MODFLOW 模块计算地下水系统的各项补给量和排泄量,计算各网格的地下水位,并勾绘研究区域地下水等水位线^[6]。其中,各网格的潜水蒸发量通过式(1)计算:

$$Q_{ET} = \begin{cases} R_{ET}A_{i,j} & h_{i,j,k} > h_{ET} \\ 0 & h_{i,j,k} < h_{ET} - d_{i,j} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_{ET} 为潜水蒸发量, L^3/T ; R_{ET} 为单位面积上潜水蒸发能力, $L^3/T/L^2$; $A_{i,j}$ 为计算单元面积, L^2 ; $h_{i,j,k}$ 为计算单元地下水位, L ; h_{ET} 为以蒸发能力蒸发时的地下水位, L ; $d_{i,j}$ 为蒸散发为零时的地下水位埋深, L 。

1.2 模型率定

本文用以下 3 种已有资料来控制模型的精度:水文地质图上的地下水位等值线、43 处观测孔的观测水位和地质队根据实测资料计算的水量平衡项目^[2]。采用 1986 年资料率定模型,由洪积扇下部和细土平原区 9 处观测孔 1981~1988 年逐月平均地下水位埋深系列分析成果可知,1988 年以前的地下水处于相对稳定的状态,并且,1986 年莺落峡径流量为 15.57 亿 m^3 ,接近多年平均值 15.80 m^3 ^[1]。因此,1986 年的年均地下水系统能代表多年平均稳定状态的情况。

研究区域的西部和南部山区有入流补给量,模型用虚拟注水井来模拟该项补给量,即在入流边界的每个网格处设置 1 个注水井。该类边界共划分为 20 段,每段内注水井都采用相同的注水量。正义峡附近有地下水流出研究区域,流出量取决于正义峡

河道水位与边界网格地下水位的差值,因此,模型利用通用水头边界^[3]来模拟该项补给量,边界处地下水位根据水文地质图上对应的地下水位设置。其余边界设为零流量边界(见图 2,图中 Z 为岩性分区编号, W 为入流边界分段编号)。

利用试错法,通过调整边界各段虚拟井的注水量、河床(包括渠道和泉群)的导水系数^[3]、灌溉水补给系数、各含水层各分区的水力传导系数等水文地质参数,使模拟的地下水流场、观测孔水位和水量平衡成分与地质队的成果接近。参数调整的结果为:临泽以南、以北的河床导水系数分别为 10 m/d,20 m/d;张掖市境内泉群导水系数为 5 m/d,其余地区为 10 m/d;所有灌区灌溉水补给系数均设为 0.09 mm/d;入流边界各段虚拟井注水量见表 1;3 层含水层的岩性分区见图 2 和图 3;各分区水平方向上的水力传导系数见表 2,垂直方向上的水力传导系数均设为相应水平方向上的 1/10。

表 1 入流边界各段虚拟井单井注水量 m^3/d										
分段号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10
Q_{λ}	500	347	1	0	0	107	95	419	1715	601
分段号	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20
Q_{λ}	750	220	1158	1158	2512	460	0	1000	2636	562

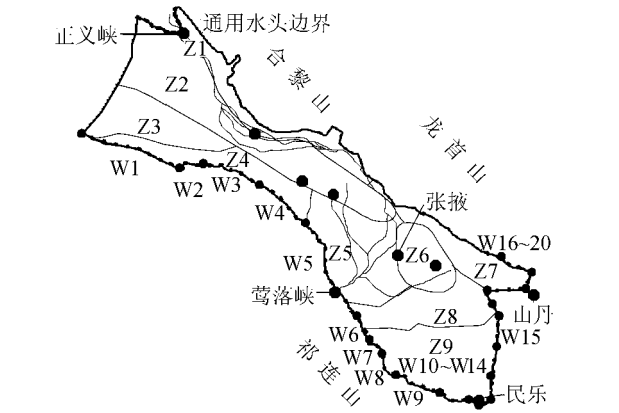


图 2 模型边界虚拟注水井分段和模型第 2 层(中间层)岩性分区

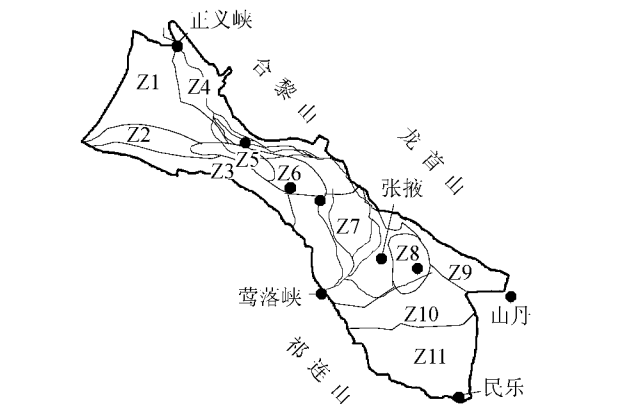


图 3 模型第 1 层(顶层)和第 3 层(底层)岩性分区

表 2 各岩性分区水平方向上的水力传导系数 m/d

区号	顶层	中层	底层	区号	顶层	中层	底层
Z1	1.0	5.0	1.0	Z7	23.0	4.0	25.0
Z2	3.0	0.1	3.0	Z8	5.0	3.0	5.0
Z3	5.0	3.0	5.0	Z9	4.0	2.0	4.0
Z4	5.0	5.0	5.0	Z10	3.0		3.0
Z5	4.0	24.0	5.0	Z11	1.0		2.0
Z6	10.0	0.1	10.0				

率定后的模型计算所得地下水流场与水文地质图提供的地下水流场非常接近(见图4)。43处观测孔的模拟水位和实测水位相比,有67%的绝对差在±4.0m以内。根据观测孔资料,由于研究区域南、北端地下水位差超过600m,网格内地下水位空间变幅的平均值大约为4m。因此,模拟地下水位的误差是可以接受的。模拟所得地下水总补给量和总排泄量均为17.07亿m³/a;地质队计算的总补给量为16.88亿m³/a,总排泄量为17.48亿m³/a^[2]。总的来看,这两个成果是相近的(见表3)。

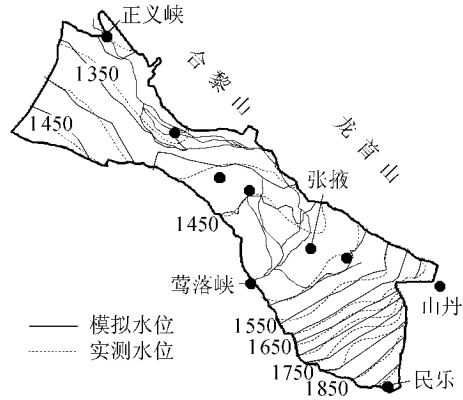


图 4 地下水位等值线(单位:m)

表 3 地下水平衡分项比较 亿 m³/a

水量平衡项目	地质队成果	模型成果	绝对差
山区潜水流入量	0.90	1.17	0.27
河道灌渠入渗量	14.32	14.30	-0.02
灌溉、降水入渗量	1.66	1.60	-0.06
总补给量	16.88	17.07	0.19
机电井抽水量	1.08	1.08	0.00
泉、河床溢出量	12.78	12.26	-0.52
潜水蒸发量	3.62	3.64	0.02
北部边界出流量	0.00	0.09	0.09
总排泄量	17.48	17.07	-0.41

从模拟的成果来看,率定后的模型基本反映了地下水系统多年平均稳定的状况,可以用来模拟各种开发方案对研究区域地下水系统的影响。

2 地下水资源开发方案

黑河流域生态系统脆弱,在制定地下水资源开发方案时应坚持可持续发展的原则。目前,研究区域灌区主要依赖于河水,从而抬升了灌区地下水位。

研究区域现有40多座平原水库,水深大部分在2~4m左右,水库蒸发渗漏量占总蓄水量的30%~40%^[1]。张掖以下沿黑河两岸地下水位埋深大多不到5m,局部地区只有1m左右,从而造成了大量的潜水蒸发,加重了土壤盐碱化。因此,本文建议地下水资源开发应采用以下策略:联合运用地表水和地下水,在地下水位埋深较浅的地方利用地下水代替地表水。基于这一策略,结合现状灌区的分布情况,本文建议地下水开采应集中在张掖下游沿黑河干流两岸地区,实施地下水开发方案后地下水位降深等值线见图5。由于张掖东南部的碱滩地区含水层厚度超过300m,单井5m降深涌水量超过3000m³/d,局部达5000m³/d,可以作为张掖市的城市水源地;临泽西部的新华地区位于梨园河洪积扇的下缘,单井5m降深出水量可达4000m³/d,该地区由于地下水位埋深较浅导致了严重的土壤盐碱化,应加大地下水的开采力度。由于地下水库容大,张掖、临泽、高台含水层水位平均下降1m时的单位调储能力分别为2.048亿m³,1.578亿m³和1.600亿m³^[2],地下水系统调节能力比地表水强,因此,利用地下水取代地表水方案可行,同时还可以提高供水保证率。

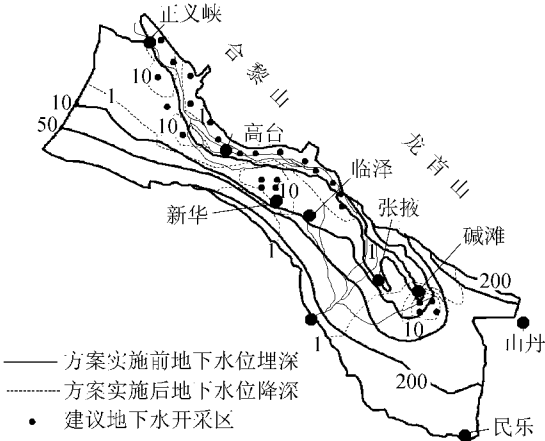


图 5 地下水位降深等值线(单位:m)

为了模拟利用地下水取代40多座小型平原水库(有效库容0.79亿m³^[1])和新规划的正义峡水库(有效库容3.40亿m³^[1])的情况,在碱滩、新华和沿黑河干流两侧分别新增101,196和218眼井,单井的抽水量均设为2000m³/d,然后利用率定的地下水数值模型模拟新开采地下水对水量平衡和地下水流场的影响。

根据模型模拟的情况,方案实施后增加地下水开采量4.01亿m³/a(见表4),总的开采量占总补给量的26.4%,不会影响地下水的可持续开发。在碱滩地区,开采中心地下水位下降20m以上,但此处的地下水位埋深原来大都在10m以上,地表植被等生态系统主要依赖灌溉水维持。因此,开采中心地

下水位的下降不会危及当地生态系统的安全。新华地区和中北部沿黑河干流两侧大部分地区地下水位下降了 1~10 m,局部地区超过 10 m,这对于减轻该地区的土壤盐碱化非常有利。

表 4 地下水开发方案实施前后地下水平衡分项比较 亿 m³/a

水量平衡项目	方案实施前	方案实施后	绝对差
山区潜水流入量	1.17	1.17	0.00
河道灌渠入渗量	14.30	16.50	2.20
灌溉、降水入渗量	1.60	1.60	0.00
总补给量	17.07	19.27	2.20
机电井抽水量	1.08	5.09	4.01
泉、河床溢出量	12.26	11.19	-1.07
潜水蒸发量	3.64	2.99	-0.65
北部边界出流量	0.09	0.00	-0.09
总排泄量	17.07	19.27	2.20

该方案新增开采的地下水量由增加的河道灌渠入渗量(2.20 亿 m³/a)减少的泉和河床溢出量(1.07 m³/a)减少的潜水蒸发量(0.65 亿 m³/a)和减少的北部边界出流量(0.09 m³/a)4 个部分组成(见表 4)。其中,减少的潜水蒸发量占增加开采量的 16.2%,这是本方案对研究区域水资源系统的最大贡献。如果采用 40 多座平原水库和正义峡水库蓄水,由于当地超过 1500 mm/a 的蒸发能力,将导致平原水库至少有 0.60 亿 m³/a,正义峡水库约有 0.38 亿 m³/a(当库容为 1.5 亿 m³时)的水面蒸发损失。因此,本开采方案比保留和增建平原水库方案减少了至少 1.63 亿 m³/a 的蒸发损失量。

3 结 语

基于 GMS 构建的地下水数值模型较好地模拟了黑河中游地区的地下水流场和地下水系统的各项补给量和排泄量。模型计算的结果表明,在碱滩、新华和张掖下游沿黑河两侧地区进行地下水开发以替代现有供水系统中的地表水的方案是可行的。该方案将地下水开采量从 1986 年的 1.08 亿 m³/a 提高到 5.09 亿 m³/a 后,总的地下水开采量仅占到总补给量的 26.4%,可以保证地下水资源的可持续开发。同时,该方案能减少潜水蒸发量 0.65 亿 m³,从而增加了水资源可利用量。该方案实施后,地下水位下降到新的稳定状态对原来依赖灌溉水的地下水生态系统影响较小,而对于控制当地的土壤盐碱化非常有利。

然而,由于黑河中游缺水严重,仅靠开发新水源、提高水资源利用率等技术手段不可能满足巨大的水量需求,反而有可能导致水资源的进一步滥采。因此,必须结合政府的管理和引导,防止水量需求不合理扩大。只有这样,才能保证当地水土资源的可持续开发。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部.黑河流域近期治理规划[R].北京:中华人民共和国水利部,2001.

[2] 甘肃省地质矿产局第二水文地质工程地质队.甘肃省黑河干流中游地区地下水资源及其合理开发利用勘查研究[R].张掖:甘肃省地质矿产局,1990.

[3] Environmental Modeling System Incorporated. Groundwater flow and transport modeling with GMS :training manual[M]. Park City :Environmental Modeling System Incorporated,2000.

[4] Environmental Systems Research Institute ,Inc. ArcView GIS 使用手册[M].北京:地震出版社,1999.

[5] 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所.黑河流域水资源地理信息系统[CP].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,1998.

[6] MCDONALD M G ,HARBOUGH A W. A modular three dimensional finite difference ground-water flow model[C]//Techniques of Water Resources Investigation Book. Washington D C : United States Government Printing Office ,1988.

(收稿日期 2006-04-26 编辑 骆超)

·简讯·

我国最大的水电机组通过满负荷试验

2006 年 10 月 29 日 9 时,我国最大的水轮发电机组——三峡电站机组结束了持续 3 d 的满负荷运行试验,电站运行平稳,发电出力达到 980 万 kW,这标志着我国进入了自主运行巨型水电机组的新时代。

三峡电站已投产 14 台 70 万 kW 巨型机组,这也是目前世界上最大的水电机组,全世界共投产 37 台。从 26 日 9 时起,三峡电站机组开始进行 72h 满负荷试验,每台机组发电出力均达到 70 万 kW 的额定功率。此前,中国没有自主运行这类特大型机组的经验。从 2003 年 7 月首台机组投产以来,三峡电站运行水位一直在 135~139 m 之间,三峡电站机组只有在水库水位达到 148 m 以上高程时,才能进行满负荷发电。蓄水期间,14 台机组经受住了高水位考验,运行状态优良,按计划实施了机组稳定性及相对效率试验、厂房振动试验、机组过速及甩负荷试验、调速器试验等。截至 29 日,三峡电站投产以来已累计发电 1380 亿 kWh。

(编辑部供稿)

