

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.05082

华北平原区地下水开采量估算研究

李玲, 邵景力, 崔亚莉, 杨程, 韩忠

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 准确获取地下水开采量对于区域地下水资源评价和管理工作具有十分重要的意义。但由于地下水开采活动过于分散, 目前管理和计量的手段不足, 导致地下水开采量统计数据存在较大误差。通过建立华北平原地下水流区域数值模型, 利用模拟水位与实际观测水位相拟合的方法, 完成了华北平原开采量的反演估算, 最终获得了华北平原 2002 年- 2008 年各年的地下水开采量, 其平均年开采量为 249.20 亿 m^3 。

关键词: 华北平原; 地下水; 开采量; 数值模型; 水量均衡; 反演计算; 地下水流模拟

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0082-04

Estimation of Groundwater Withdrawal in the North China Plain

LI Ling, SHAO Jing-li, CUI Ya-li, YANG Cheng, HAN Zhong

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurate estimation of groundwater withdrawal is meaningful for the assessment and management of regional groundwater resources. However, due to the dispersive groundwater pumping and inadequate means in the current management and statistic methods, errors exist in the statistical data of groundwater withdrawal. In this study, a numerical model of regional groundwater flow in the North China Plain was developed, and the inversion estimation of groundwater withdrawal was performed through the fitting between the simulated and measured water levels. Finally, the groundwater withdrawals data from 2002 to 2008 were obtained and the average annual groundwater withdrawal in the NCP was $2.492 \times 10^{10} m^3$.

Key words: North China Plain; groundwater; withdrawal; numerical model; water balance; inversion calculation; groundwater flow simulation

1 研究背景

华北平原是中国北方重要的经济核心地区和农业基地。随着社会经济的快速发展, 该地区对水资源的需求与依赖也愈加强烈^[1,2]。由于地表水稀缺, 地下水成为该地区最主要的水资源利用形式。根据我国目前地下水开采量调查工作所采用的传统方式^[3,4], 如水表计量法、定额法、亩次法等统计显示, 华北平原多年平均地下水开采量已由 20 世纪 60 年代的 39 亿 m^3 上升到 70 年代的 79 亿 m^3 ; 从 1985 年到 20 世纪末, 其多年平均开采量已超过 100 亿 m^3 ^[5]; 进入 21 世纪, 华北平原开采量则已超过 200 亿 m^3 ^[6]。但是, 华北平原开采井数量大、供水用途多样, 且目前我国地下水管理制度和手段不足, 绝大部分农业开采井缺乏准确计量, 因此通过以上传统统计方法难以获得比较准确的地下水开采量数据。而准确的地下水开采量, 是对华北平原地下水资源进行科学评

价和合理开发利用的基础, 因此有必要寻求科学有效的方法对地下水开采量进行估算。

目前世界范围内对地下水开采量的估算已有不少研究。20 世纪 80 年代早期, 美国的 Wray^[7] 曾借助遥感技术估算地下水开采量; 美国地调局曾采用水资源用途分类的方法对死谷流域 1913 年- 1998 年的地下水开采量进行了估算^[8]。其他的方法则有 Santos 等^[9] 采用的水位动态法、Nels Ruud 等^[10] 提出的基于 GIS 的分布式水文模型法等。在国内, 早期有王怀章和王忠诚^[11] 的概率统计方法, 孙明等人^[12] 提出的典型井监测与实际用电量相结合的办法。近期则有武美才^[13] 的台电量法, 徐箴等人^[14] 建立的地下水开采方程等。以上这些开采量估算方法, 大多适用于小范围的估算。并且到目前为止, 利用数值模拟方法估算地下水开采量的研究还尚不多见。

地下水流数值模型建立在长时间序列且较完善的地下

收稿日期: 2013-03-25 修回日期: 2013-04-19 网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1501.008.htm>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB428804)

作者简介: 李玲(1986), 女, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: yamdestiny@163.com

通讯作者: 邵景力(1959), 男, 山东滕州人, 教授, 主要从事地下水科学与工程方面的研究。E-mail: jshao@cugb.edu.cn

水监测数据资料之上,因此基于水均衡原理利用地下水数值模型反演开采量,不仅可望获得更为合理和准确的开采量,也可将开采量的估算研究扩展到区域面积上。本文将利用所构建的华北平原地下水数值模型,以2002年-2003年地下水开采量调查资料为基础,通过对地下水流场宏观趋势进行模拟与校验,实现对地下水开采量的反演估算。

2 华北平原数值模型

2.1 华北平原概况和地下水的开发利用情况

华北平原位于中国东部地区,包括北京、天津、河北三省(市)的全部平原及河南、山东二省的黄河以北平原(见图1),总面积为13.90万km²。该地区地下水埋藏在由洪积、湖积、海积物交错叠置而成的第四系松散层之中。华北平原自20世纪60年代开始大规模开采地下水,机井数由60年代的1800眼猛增至20世纪末的70万眼,目前地下水开采井已达200万眼左右。长期开采地下水,已造成地下水资源逐步枯竭、大型复合漏斗的形成和严重的地面沉降等环境问题。

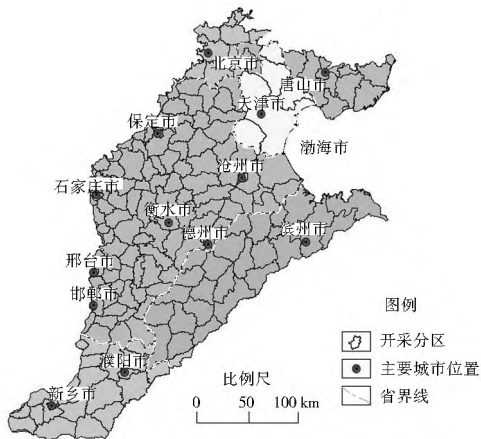


图1 华北平原范围及181个开采分区示意图

Fig. 1 Domain and 181 pumping zones of the North China Plain

2.3 地下水数值模型及其改进

作者曾依据2002年-2003年的水文地质调查资料,运用MODFLOW建立了4km×4km网格规模的华北平原三维地下水水流数值模型^[15-16],将整个华北平原在垂向上分为三个模拟层:第一层为第 \bar{N} 含水层组(潜水)和第 $\bar{0}$ 含水层组,第二和第三层分别为第 $\bar{0}$ 含水层组、第 $\bar{0}$ 含水层组。模拟期为2002年1月到2003年12月,一个自然月为一个应力期,并最终通过地下水流场和典型地下水监测孔动态曲线对模型进行了校正。本次研究在以上模型基础上,为提高模型精度和稳定性,将模拟识别期由2年(2002年-2003年)延长到7年(2002年-2008年)。模型仍以2001年12月的地下水流场作为初始流场,模型中所用到的水文地质参数、大部分补排项的处理与前期模型相同,与时间序列相关数据则依据现有资料确定,如降水资料使用2002年至2008年数据。最后利用2002年-2008年华北平原101个典型地下水水位观测孔的地下水动态曲线和2003年-2008年各年华北平原的地下水等水位线对模型进行识别,其中地下水开采量反演是模型识别过程中的主要内容。

3 地下水开采量估算方法

3.1 原理

根据水量均衡原理,任意时间段任意区域内,有以下关系:

$$Q_r - Q_d - Q_p = \mu^* \cdot A \cdot \frac{h_t - h_0}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: Q_r 为均衡区地下水的补给量(L³/T); Q_d 为均衡区地下水的排放量(L³/T),不包括地下水的开采量; Q_p 为地下水开采量(L³/T); Δt 为均衡期(T); h_0 为均衡期初始时刻平均地下水水位(L); h_t 为均衡期末时刻平均地下水水位(L); A 为均衡区面积(L²); μ^* 为含水层的给水度(潜水含水层)或储水系数(承压含水层)。

在地下水模拟过程中,由于开采量统计不准确,可能造成模拟的地下水水位与实际地下水水位有差异。因此根据模型中给定的地下水开采量,在假设其他补排量准确的条件下,可建立类似的地下水均衡方程式:

$$Q_r - Q_d - \hat{Q}_p = \mu^* \cdot A \cdot \frac{\hat{h}_t - h_0}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: \hat{Q}_p 为模型中给定的地下水开采量(L³/T); \hat{h}_t 为模型计算的均衡期末时刻模拟平均地下水水位(L);其余符号同式(1)。

整理式(1)、式(2)可得到:

$$Q_p = \hat{Q}_p - \mu^* \cdot A \cdot \frac{\Delta h_t}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: Δh_t 为均衡期末实际平均地下水水位与模拟平均地下水水位的差值(L),即 $\Delta h_t = h_t - \hat{h}_t$;其余符号同上。

由以上推导可知,地下水开采量估算的过程就是利用实际地下水水位与模拟水位的差值,推算出更为合理和准确的地下水开采量,并通过反复迭代试算,最终求出反演开采量。

3.2 估算方法

首先,将华北平原按县市级行政区划分为181个开采分区(见图1),并确定各开采分区对应的模型网格。然后按照图2步骤进行估算。

(1) 对2001年12月、2003年12月、2004年6月、2005年6月、2007年12月、2008年6月的统测水位观测值进行克里格插值,得到与模型相匹配的各含水层组、各网格点的水位值。以2001年12月的水位值作为估算的初始水位 $h_0^{i,j,k}$,其他年份水位值作为估算后各年水位拟合校正的末水位 $h_t^{i,j,k}$ (i,j 为网格编号, $k=1,2,3$ 为含水层代号)。

(2) 分别计算各开采分区2003年12月、2004年6月、2005年6月、2007年12月、2008年6月实际平均地下水水位值。

$$h_t^{L,k} = \frac{1}{N_L} \sum_{n=1}^{N_L} h_t^{i,j,k} \quad i,j \in L \quad (4)$$

式中: L 为开采分区编号, $L=1,2,\dots,181$; N_L 为第 L 开采分区的网格个数; $h_t^{i,j,k}$ 为实测地下水水位插值后得到的各年 i,j 网格第 k 层地下水水位(m); $h_t^{L,k}$ 为各年第 L 分区第 k 层的实际平均地下水水位(m)。

(3) 若为初次进行反演计算,即迭代次数 $e=0$,确定统计和定额法计算的各开采分区各层开采量初值 $Q_{L,k}^0$ (m³/d),并带入模型中进行运算。

(4) 若不是初次迭代计算, 则将 $Q_{L,k}^e$ (e 为迭代次数, $e=1, 2, 3, \dots$) 分配到各网格中作为初始开采量带入模型中, 以 $h_0^{i,j,k}$ 为初始水位运行数值模型, 得到 2002 年-2008 年各年各月地下水在每个网格点的模拟水位 $H_t^{i,j,k}$ 。

(5) 利用公式(5)计算模拟 2003 年 12 月、2004 年 6 月、2005 年 6 月、2007 年 12 月、2008 年 6 月各开采分区和各层模拟地下水位平均值:

$$H_t^{L,k} = \frac{1}{N_{L,n=1}^{N_k}} \sum_{i,j} H_t^{i,j,k} \quad i, j \in L \quad (5)$$

式中: $H_t^{i,j,k}$ 为模拟地下水位插值后得到的各年 i, j 网格第 k 层地下水位(m); $H_t^{L,k}$ 为各年第 L 分区第 k 层的模拟平均地下水位(m); 其余符合前同。

(6) 将各层位、各开采分区 $h_t^{L,k}$ 和 $H_t^{L,k}$ 相比较, 对比模拟和实际的水位过程线、流场拟合情况。若拟合情况较好, 且模拟水位与观测水位的平均绝对误差大于 5 m 的观测孔小于观测孔数的 1/3, 则认为模拟水位与实际水位接近, 估算的开采量达到精度要求, 程序结束。否则进行下一步。

(7) 计算下一次迭代需调整的开采量:

$$\Delta Q_{L,k}^e = \mu_{L,k} \cdot A_{L,k} \cdot (h_t^{L,k} - H_t^{L,k}) \quad (6)$$

式中: $\Delta Q_{L,k}^e$ 为第 L 个开采分区第 k 层 e 次迭代后需继续调整的地下水开采量(m^3/d); $\mu_{L,k}$ 为第 L 个开采分区第 k 层平均给水度(潜水含水层)或储水系数(承压含水层); $A_{L,k}$ 为第 L 个开采区第 k 层的面积(m^2); $\mu_{L,k} = \frac{1}{N_{L,n=1}^{N_k}} \sum_{i,j} \mu_{i,j,k} (i, j \in L)$; 其余符号同前。

据式(4)与式(7)得到第 L 个开采分区、第 k 层下一次迭代的开采量为 $Q_{L,k}^{e+1}$:

$$Q_{L,k}^{e+1} = Q_{L,k}^e - \frac{A_{L,k}}{N_L} (h_t^{L,k} - H_t^{L,k}) \sum_{n=1}^{N_k} \mu_{i,j,k} \quad i, j \in L \quad (7)$$

重复步骤(4)至(7)。

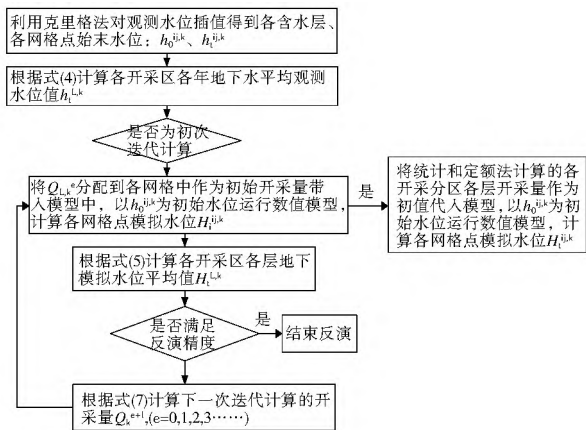


图 2 反演开采量流程图

Fig. 2 Flow chart of inversion estimation of groundwater withdrawal

4 估算结果与分析

由表 1 华北平原浅层(第Ⅱ含水层组和第Ⅰ含水层组)、深层(第Ⅲ和第Ⅳ含水层组)地下水开采量反演结果可知, 华北平原 2002 年-2008 年平均年开采量为 249.20 亿 m^3 。反演后开采量与原统计开采量之间存在一定的差值。有以

下两点需要说明。

表 1 华北平原 2002 年-2008 年浅、深层地下水开采量反演结果

Table 1 Inversion calculation results of groundwater withdrawal in the North China Plain from 2002 to 2008

		年份	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
浅层	统计	204.26	196.05	204.26	196.05	204.26	196.05	204.26	204.26
	反演	206.43	196.98	229.03	233.31	219.94	208.14	203.42	203.42
深层	统计	33.34	32.85	33.34	32.85	33.34	32.85	33.34	33.34
	反演	34.17	33.78	38.71	43.59	31.93	31.72	33.22	33.22
反演开采量合计		240.60	230.76	267.74	276.90	251.87	239.86	236.64	236.64

(1) 从图 3 中华北平原 2002 年-2008 年的区域年降水量柱状图可知, 华北平原在 2003 年经历了一个丰水年, 其开采量较前一年, 即 2002 年相比有所减少, 但 2004 年、2005 年华北平原降水量相对 2003 年偏小, 经历了降水量逐渐减少的过程, 在这样的情况下要满足华北平原工农业用水量的需求, 则十分有必要加大对地下水的开采, 因此这两年的开采量在 2003 年的开采规模之上。2005 年之后, 华北平原开采量随着降水量的逐渐增加呈现逐年减少的趋势, 同时也说明随着人们认识到过量开采地下水会带来的环境危害后, 华北平原地下水开采开始逐步得到遏制。

(2) 华北平原属于大面积区域, 容易出现个别区县地下水开采量统计不够全面、准确的现象。尤其华北平原农业灌溉并分布广泛, 而农业抽水往往因需开采, 在时间和规模上不具确定、统一性, 因此相关部门很容易忽略部分开采量, 从而造成原统计开采量值小于反演后开采量值。

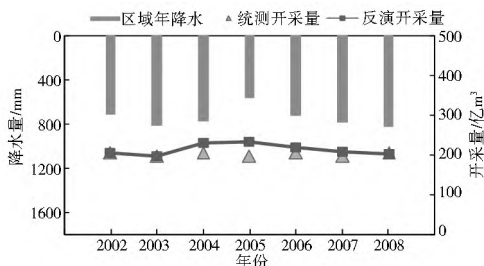


图 3 华北平原降水量与浅层含水层统测开采量、反演开采量对比

Fig. 3 Annual precipitation in the North China Plain and comparison of calculated and practical pumping data of shallow aquifer

5 结语

本文通过建立华北平原地下水流数值模型对区内地下水开采量进行了反演, 该方法的特点是结合了研究区的水文地质条件, 依据的是水量平衡原理。相比传统的地下水开采量统计方法, 该方法具有一定的客观性, 在一定程度上避免了外界因素对数据统计时产生的干扰。但此次研究也存在缺乏连续多年地下水位数据和地下水开采量数据等问题, 使得地下水数值模拟精度、地下水开采量反演精度受到了一定限制。

参考文献(References):

- [1] 王贵玲, 陈德华, 蔺文静, 等. 中国北方地区地下水资源的合理开发利用与保护[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 684-689. (WANG Guiling, CHEN Dehua, LIN Wenjing, et al. Reasonable Exploitation and Utilization of Groundwater Resource in North China [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 684-689. (in Chinese))
- [2] FANG Q X, MA L, GREEN T R, et al. Water Resources and Water Use Efficiency in the North China Plain: Current Status and Agronomic Management Options [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1102-1116.
- [3] 刘花台, 王贵玲, 朱延华. 地下水开采量调查和校核方法探讨[J]. 水文地质工程地质. 2004, (5): 109-111. (LIU Huatai, WANG Guiling, ZHU Yanhua. A Discussion of Methods of Investigation and Check of Groundwater Withdrawal [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, (5): 109-111. (in Chinese))
- [4] 张建民. 地下水开采量统计分析工作存在问题及解决对策[J]. 海河水利. 2009, (4): 56-58. (ZHANG Jianming. Existing Problems and Solutions to Statistical Analysis of Groundwater Withdrawal [J]. Haihe Water Resources, 2009, (4): 56-58. (in Chinese))
- [5] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009. (ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, CHEN Zongyu, et al. Investigation and Assessment of Sustainable Utilization of Groundwater Resources in the North China Plain [J]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [6] 刘昌明. 建设节水型社会, 缓解地下水危机[J]. 中国水利, 2007, (15): 10-13. (LIU Changming. Building Water saving Society and Alleviating Groundwater Crisis [J]. China Water Resources, 2007, (15): 10-13. (in Chinese))
- [7] WRAY JR. Estimating Irrigation Water Use and Withdrawal of Ground Water on the High Plains, U. S. A [J]. Advances in Space Research, 1982, 2(8): 127-129.
- [8] MOREO M T, HALFORD K J, LA CAMERA R J, et al. Estimated Groundwater Withdrawals from the Death Valley Regional Flow System, Nevada and California, 1913-98 [R]. Water Resources Investigations Report 03-4245, 2003.
- [9] MARTINEZ-SANTO P, MARTINEZ-ALFARO P E. Estimating Groundwater Withdrawals in Areas of Intensive Agricultural Pumping in Central Spain [J]. Agricultural Water Management, 2010, 98: 172-181.
- [10] RUUD N, HARTER T, NAUGLE A W. Estimation of Groundwater Pumping as Closure to the Water Balance of a Semi-arid, Irrigated Agricultural Basin [J]. Journal of Hydrology, 2004, 297: 51-73.
- [11] 王怀章, 王忠诚. 地下水开采量概率统计方法[J]. 东北水利水电, 1999, 182(9): 33-34. (WANG Huizhang, WANG Zhongcheng. Probability Statistic Method of Groundwater Yield [J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 1999, 182(9): 33-34. (in Chinese))
- [12] 孙明, 王立琴, 薛明霞, 等. 农业区地下水开采量统计方法研究[J]. 地下水, 2001, 24(2): 71-73. (SUN Ming, WANG Liqin, XUE Mingxia, et al. Study on Statistic Method of Groundwater Withdrawal for Agriculture Area [J]. Groundwater, 2001, 24(2): 71-73. (in Chinese))
- [13] 武美才. 变台电量法推算地下水开采量初探[J]. 水文, 2006, 26(6): 65-67. (WU Meicai. How to Calculate the Exploited Ground Water with Coulomb Method [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(6): 65-67. (in Chinese))
- [14] 徐箴, 唐玉兰, 刘强, 等. 沈阳市地下水开采量的确定及风险分析[J]. 供水技术, 2008, 2(5): 30-33. (XU Zhen, TANG Yulan, LIU Qiang, et al. Determination and Risk Analysis of Groundwater Yield in Shenyang [J]. Water Technology, 2008, 2(5): 30-33. (in Chinese))
- [15] 邵景力, 赵宗壮, 崔亚莉, 等. 华北平原地下水流模拟及地下水资源评价[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 361-367. (SHAO Jingli, ZHAO Zongzhuang, CUI Yali, et al. Application of Groundwater Modeling System to the Evaluation of Groundwater Resources in North China Plain [J]. Resources Science, 2009, 31(3): 361-367. (in Chinese))
- [16] SHAO Jingli, LI Ling, CUI Yali, et al. Groundwater Flow Simulation and its Application in Groundwater Resource Evaluation in the North China Plain, P. R. China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2013, 87(1): 243-253.

(上接第25页)

[8] 李宁, 周仰效, 李文鹏. 乌鲁木齐河流域柴窝堡盆地与河谷区地下水流模拟[J]. 水文地质工程地质, 2009, (3): 1-7. (LI Ning, ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Modelling of Regional Groundwater Flow of the Chaiwopu Basin and the River Valley in the Urumqi River Catchment [J]. Hydrology and Engineering Geology, 2009, (3): 1-7. (in Chinese))

[9] 殷丹, 许春东, 束龙仓, 等. 淮北市岩溶地下水可持续开采量及临界水位的确定[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 25-28. (YIN Dan, XU Chundong, SHU Longcang, et al. Research on Sustainable Exploitation Yield and Critical Water Level of Karst Groundwater in Huaibei City [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 25-28. (in Chinese))