

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.05022

# 陕西省吴堡县岔上水源地地下水允许开采量评价

陈泉萌<sup>a,b</sup>, 徐嘉璐<sup>a</sup>, 郭倩<sup>a</sup>, 牟海斌<sup>a</sup>

(长安大学 a. 环境科学与工程学院; b. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** 根据陕西省吴堡县岔上水源地水文地质条件, 确定了研究范围和边界条件, 建立了研究区水文地质概念模型和地下水二维非稳定流数学模型, 利用基于有限差分法的 Visual MODFLOW 进行地下水流数值模拟计算。经过模型的识别和验证, 获取可靠的水文地质参数, 然后对水源地地下水资源进行定量评价。通过对比设计了9种开采方案, 选取了最为合理的开采方案, 最终得到岔上水源地平枯期允许开采量均为 6 880 m<sup>3</sup>/d。根据模型预报结果, 水源地目前的设计开采量是可行的。研究结果为研究区地下水资源的合理开发利用提供了依据。

**关键词:** 岔上水源地; 数值法; 有限差分法; Visual MODFLOW; 数值模拟; 地下水允许开采量

**中图分类号:** TV213; P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0022-04

## Evaluation of Allowable Groundwater Exploitation Amount of Chashang Water Source Area in Wubao County of Shaanxi Province

CHEN Xiaomeng<sup>a,b</sup>, XU Jialu<sup>a</sup>, GUO Qian<sup>a</sup>, MOU Haibin<sup>a</sup>

(a. School of Environmental Science and Engineering; b. Key Laboratory of Subsurface

Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Based on the hydrogeological conditions of Chashang water source area in Wubao County of Shaanxi Province, the study area and boundary conditions were determined, and the hydrogeological conceptual model and two dimensional unsteady mathematical groundwater flow were constructed. Visual MODFLOW, which is based on the finite difference method, was selected for numerical simulation of groundwater flow. The reliable hydrogeological parameters were determined through model identification and verification, and they were used to perform quantitative evaluation of groundwater resources in Chashang water source area. Nine designed pumping schemes were compared and the most reasonable groundwater pumping scheme was selected, and the allowable groundwater exploitation amount in normal and dry seasons was obtained as 6 880 m<sup>3</sup>/d. Based on the prediction results, the currently designed groundwater exploitation amount is reasonable, which provides a basis for the reasonable exploration and utilization of groundwater resources in the study area.

**Key words:** Chashang water resource area; Numerical method; finite difference method; Visual MODFLOW; numerical simulation; allowable groundwater exploitation amount

在我国, 水资源短缺问题及其相关的水环境问题日益成为制约地区经济和社会发展的瓶颈。在干旱半干旱地区, 地下水作为主要供水水源, 对其合理开发利用, 是改善水环境, 保证水资源可持续开发利用的重要途径。

陕西省榆林地区矿产资源储量大, 品质优, 组合配置条件好, 开发利用前景优越, 是中国新兴的能源化工基地和 21 世纪重要的能源接续地<sup>[1]</sup>。但是与此同时, 该地区水资源日趋枯竭, 水危机形势严峻, 在本地区开展水资源可持续开发

利用研究具有极其重大的理论意义和实用价值。为了促进矿产资源开发和社会经济发展, 在陕北能源化工基地探寻新的供水水源, 陕西省地矿局九〇八水文地质工程地质大队组织开展了陕北能源化工基地黄河谷地地下水勘查项目, 吴堡县岔上水源地地下水允许开采量评价是该项目的组成部分。

常用的地下水允许开采量评价方法是数值模拟法<sup>2,3</sup>, 目前求解地下水运动偏微分方程最常用的两种数值方法是

收稿日期: 2013-01-09 修回日期: 2013-07-31 网络出版时间: 2013-08-22  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130822.1705.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972154)

作者简介: 陈泉萌(1988-), 女, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源的学习和研究。E-mail: 61579435@qq.com

通讯作者: 王玮(1970-), 男, 江西乐平人, 副教授, 硕士生导师, 从事水资源与环境方面的教学与科研工作。

有限差分法和有限单元法。本文采用基于有限差分法的 Visual MODFLOW 软件对岔上水源地地下水允许开采量进行评价。

## 1 研究区水文地质概况

岔上水源地研究区地处黄河河谷陕西省一侧、陕北黄土高原东北部边缘地带,属于吴堡县岔上乡川口村至岔上村之间的黄河谷地,南距吴堡县县城 35 km,地理坐标为东经 109°41′50″ - 109°44′15″,北纬 37°41′00″ - 37°42′15″,面积 2.52 km<sup>2</sup>。研究区受极地大陆冷气团影响较大,受海洋热带暖气团影响较小,为典型的半干旱大陆性气候。作为水源地东北边界的黄河是一条融雪-降雨型河流,近年来其流量总体呈减少趋势,最大年径流量为 306 80 万 m<sup>3</sup>,最小年径流量为 95 05 万 m<sup>3</sup>。

区内地貌可分为黄河河谷区和黄河岸边低山丘陵区,有较长的、连续分布的漫滩阶地。依据赋存条件、水力特征和含水介质,可以将研究区地下水分为第四系冲洪积层孔隙潜水和三叠系碎屑岩类裂隙水两类。黄河岸边低山丘陵区地势高,地形破碎,地表黄土土厚度较薄,为透水不含水岩层。三叠系碎屑岩类由于其岩性、风化裂隙发育程度和所处地貌分区不同,地下水的赋存具有较大差异。黄河河谷区地势平坦,冲洪积层结构松散,孔隙率大,透水性较强,地下水主要赋存于泥质砂砾卵石层和含砾砂层的孔隙内,补给源稳定,形成第四系冲洪积层含水层。黄河河谷中第四系冲洪积层厚度一般 10 m 左右,河漫滩冲洪积含水层岩性主要为泥质砂砾卵石层,部分地段夹含砾粗中砂透镜体,颗粒粗,孔隙率较大,地下水赋存条件较好,水位埋藏浅,一般 1.70~3.15 m,含水层厚度 9.50~10.80 m(见图 1)。除接受大气降水入渗补给和一级阶地冲洪积含水层的侧向径流补给外,开采状态下还可得到黄河地表水渗漏补给。

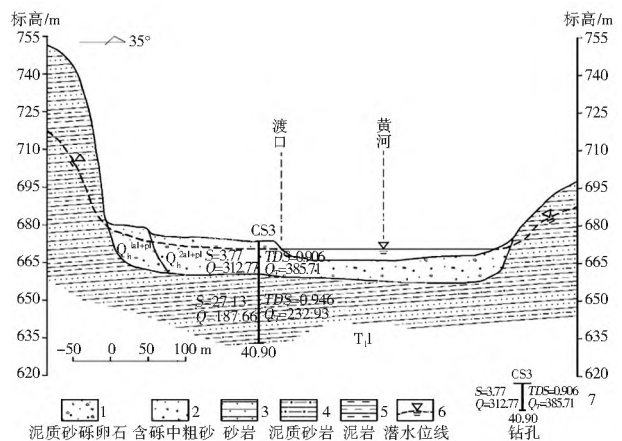


图 1 岔上黄河河谷横向水文地质剖面

Fig. 1 Hydrogeological cross section map of yellow river valley in Chashang water source area

## 2 地下水允许开采量评价

### 2.1 水文地质概念模型

研究区内含水介质主要为第四系全新统冲洪积砂砾卵石含水层和三叠系碎屑岩类裂隙含水层。区内具有开发利

用前景的地下水富水地段主要为黄河漫滩阶地地区,其含水介质为第四系全新统冲洪积砂砾卵石层及三叠系基岩风化带,二者均为非均质轴对称各向异性介质。

如图 2 所示,研究区东北边界为黄河,在天然条件下,地下水在接受大气降水入渗补给后向黄河排泄,因此可将黄河概化为第三类河流边界。西南沿线为低山丘陵区,其下伏基岩透水性差,加之地形破碎,可将其概化为隔水边界。取水工程正常工作时不会影响到黄河上、下游边界(即研究区的西北、东南边界),故将其概化为一类定水头边界。研究区的顶面为潜水面,在该面上发生着降水入渗、潜水蒸发等垂向水交换作用,可概化为潜水面边界。研究区底面为三叠系完整基岩,基岩结构致密,裂隙不发育,构成区域隔水底板。

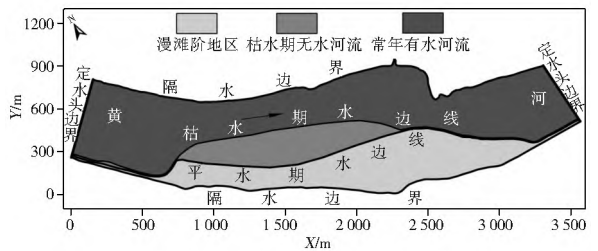


图 2 岔上水源地水文地质概念模型

Fig. 2 Hydrogeological conceptual model in Chashang water source area

### 2.2 计算区的数学模型

在黄河岸边富水地段,可将地下水流概化为平面二维流,水流服从达西定律。根据上述水文地质概念模型,岔上水源地地下水二维非稳定流数学模型<sup>[4]</sup>可建立为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h-B) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(h-B) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + W - Q_i \delta(x-x_i, y-y_i) = \mu \frac{\partial h}{\partial t} & (x, y) \in D, t > 0 \\ \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0 & \text{零流量边界} \\ h(x, y, 0) = h_0 & \text{初始条件} \\ \frac{K_r}{M_r} (H_r - H) = q_r, t > 0 & \text{东部黄河, 第三类边界} \\ \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0 & t > 0 \text{ 隔水边界} \end{cases}$$

式中: $h$ 为地下水位标高(m); $K$ 为渗透系数(m/d); $\mu$ 为给水度; $t$ 为时间(d); $x, y$ 为坐标变量(m); $x_i, y_i$ 为第*i*眼开采井坐标(m); $h_0$ 为初始水位标高(m); $K_r$ 为河床介质垂向渗透系数(m/d); $M_r$ 为河床介质厚度(m); $q_r$ 为河流与地下水交换水量(m<sup>3</sup>/d); $Q_i$ 为第*i*眼开采井开采量(m<sup>3</sup>/d); $\Gamma_2$ 为二类边界; $D$ 为岔上水源地范围。

### 2.3 数学模型的求解

#### 2.3.1 模型初始化

本文采用基于有限差分法的 MODFLOW 软件进行地下水数值模拟计算。

首先进行计算单元剖分。将模拟区逆时针旋转 30°后,采用分别平行于 X、Y 轴的正交网格对计算域进行平面上的剖分。利用 10 m×10 m 的等间距网格,将岔上水源地在平面上沿南北向剖分为 95 行,沿东西向剖分为 357 列,共剖分

22 037 个活动单元, 实际代表平面面积 2 203 700 m<sup>2</sup>。

其次, 确定水文地质参数初值。计算水源地补给量时, 参数选择至关重要<sup>51</sup>。本次计算涉及的水文地质参数主要是渗透系数和给水度。确定水文地质参数初值的具体步骤如下: 利用已有抽水试验资料计算渗透系数和给水度, 结合不同岩性的经验值, 确定不同岩性的水平、垂直渗透系数和给水度; 根据岩性的空间分布规律, 利用渗流等效原理和克里格插值方法确定各单元渗透系数和给水度<sup>61</sup>; 根据抽水试验值和经验值给各参数赋予初值。根据区内稳定流抽水试验, 将研究区划分为 3 个参数区(见图 3): 岔上水源地西北部的黄河上游岔上村地区为Ⅰ区, 渗透系数采用 3 722 m/d; 岔上水源地东南部的下游川口村地区为Ⅱ区, 渗透系数采用 13 259 m/d; 其余中游地区为Ⅲ区, 渗透系数采用 2 371 m/d (见表 1)。各地区相应的垂向渗透系数也可通过双环渗水试验得到(见表 2)。根据本地区含水层岩性及颗粒组成, 参照本区的前人研究成果和《水文地质手册》中的经验值, 整个岔上水源地给水度取 0.15。

虽然岔上水源地存在大气降水入渗补给和潜水蒸发蒸腾排泄, 但由于岔上河谷区面积较小, 并且蒸发排泄量与开采条件下激发的河流渗漏补给量相比很小, 故模型建立时可以忽略降水入渗量以及设计开采量之外的源汇项。研究区东部的黄河为三类边界, 边界水位取平水期黄河水位, 河床淤积层(泥皮)厚 1 cm, 渗透系数根据邻区资料并结合经验取值为 0.01 m/d。计算区黄河上下游一类边界水位取黄河水位。

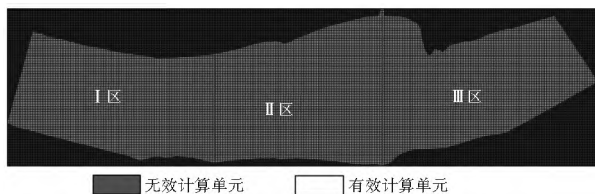


图 3 计算区参数分区及单元剖分

Fig. 3 Parameter zonation and element subdivision of the study area

表 1 稳定流抽水试验渗透系数计算成果

Table 1 Calculation results of hydraulic conductivity based on the steady pumping test

孔号	层别	静止水位 /m	距水边线距离 /m	厚度 /m	降深 /m	涌水量 / (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	渗透系数 / (m·d <sup>-1</sup> )	影响半径 /m
CS1	潜水	2.31	30	10.19	8.43	193.67	3.722	341.89
CS2	潜水	1.7	30	10.8	7.72	131.24	2.371	233.23
CS3	潜水	3.15	40	10.65	3.77	432.17	13.259	185.07

表 2 双环渗水试验成果

Table 2 Results of the double loop infiltration test

编号	地点	岩性	垂向渗透系数 K <sub>Z</sub> / (m·d <sup>-1</sup> )
CSS1	岔上黄河漫滩	粉细砂	1.021
CSS2	岔上黄河漫滩	中细砂	5.976
CSS3	岔上黄河漫滩	粉细砂	1.624

### 2.3.2 模型识别与检验

模型的识别在数学运算过程中称为解逆问题。模型识别主要对含水层的渗透系数(K)和给水度(μ)进行率定。此

次模型的识别利用的是抽水试验前 20 d 的实测水位资料。将初始的渗透系数和给水度带入到模型中, 计算出前 20 d 各节点的水位, 与实测的水位进行比较。拟合点的水位计算值与其水位实测值的误差绝对值越小, 说明模型的仿真性越强, 选取的参数越合理。否则, 需要对参数进行调整, 直到误差达到允许的范围。调参结束后, 再利用 20~ 80 d 的地下水动态资料对模型进行了检验, 得到地下水动态观测值和计算值拟合图<sup>71</sup>, 可看出计算水位降深与实测水位降深等值线的整体拟合程度良好(见图 4), 各节点水位拟合达到精度要求, 说明含水层结构、边界条件的概化、水文地质参数的选取是合理的。模型计算的地下水流场基本上反映了区域地下水流动的规律<sup>81</sup>。因此, 建立的数值模型可以用于地下水允许开采量的评价和水位的预报。

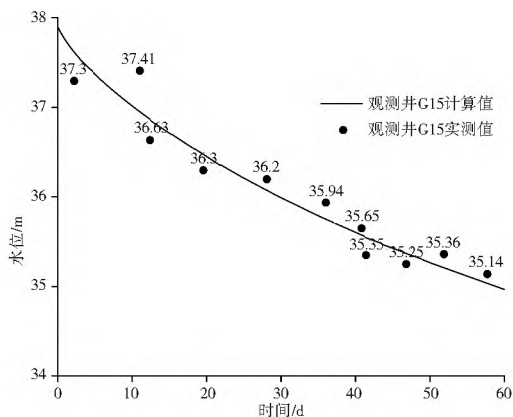


图 4 岔上水源地地下水动态观测值和计算值拟合图

Fig. 4 The fitting curve between the measured and simulated groundwater levels in Chashang water source area

### 2.3.3 地下水允许开采量评价结果

岔上水源地的可开采量大小取决于对激发的黄河渗漏补给量大小, 为此, 根据本次勘查钻孔揭露及抽水试验资料, 在宜井地段沿黄河岸边选择适当的位置布设, 按不同的开采井间距设计了 3 种开采井排, 各井排井数分别为 43 眼(井间距 60 m)、22 眼(井间距 120 m)、15 眼(井间距 180 m); 又根据勘查期间抽水试验资料及含水层富水性, 设计了 3 种单井开采量, 分别为 180 m<sup>3</sup>/d、160 m<sup>3</sup>/d、140 m<sup>3</sup>/d。这样共设计了 9 种开采方案(表 3)。

表 3 岔上水源地设计开采方案

Table 3 Designed pumping schemes in Chashang water source area

方案	井数	井间距/m	单井开采量 / (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	总开采量 / (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
1	43	60	180	7 740
2	43	60	160	6 880
3	43	60	140	6 020
4	22	120	180	3 960
5	22	120	160	3 520
6	22	120	140	3 080
7	15	180	180	2 700
8	15	180	160	2 400
9	15	180	140	2 100

对比 9 种方案平水期的数值模拟结果可知: 随着总开采量的增大, 各开采井的地下水位降深逐渐增大(见图 5), 对于

图5中的三种井排开采方案曲线, 开采量一定时, 井数越多、单井开采量越小, 降深越小, 说明要取得一定量的开采量, 宜采用较小单井开采量、较多开采井数的开采方案<sup>[9]</sup>。为此推荐采用第二方案(图6) 开采区内地下水, 即单井开采量为160 m<sup>3</sup>/d, 总开采量为6 880 m<sup>3</sup>/d。

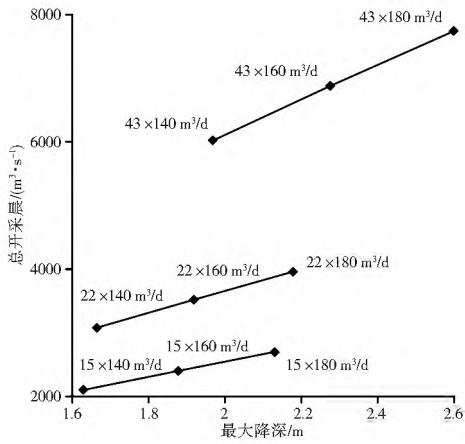


图5 岔上水源地各开采方案下总开采量与最大降深关系

Fig. 5 Relationship between the total groundwater exploitation amount and groundwater draw down under different groundwater pumping schemes

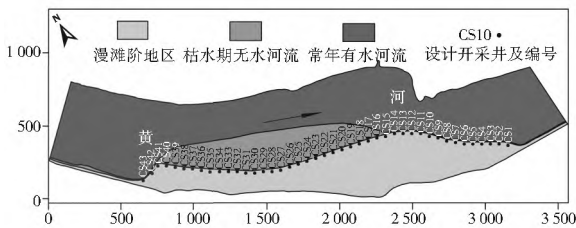


图6 岔上水源地推荐方案布井位置

Fig. 6 The well distribution map of the recommended scheme in Chashang water source area

在每年枯水期的6月、7月份, 黄河流经水源地的河段会出现水位下降、水边线后退的现象, 从而对傍河管井开采量产生一定的影响。为此建立岔上水源地傍河管井开采的枯水期非稳定流数值模型, 将推荐采用的第二方案在枯水期进行历时60 d的非稳定流模拟。模拟过程中, 初始流场采用推荐方案平水期的稳定流场, 黄河水边线按枯水期水边线确定, 黄河水位下降1 m。由计算结果可得, 在黄河水位下降、水边线后退条件下, 抽水降深会在平水期降深的基础上有所增加(见图7、图8), 但该方案仍能维持60 d的正常开采。

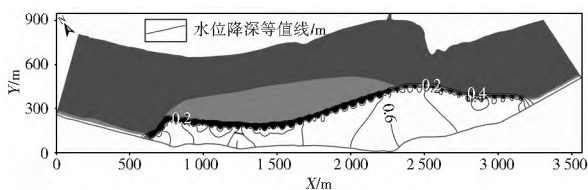


图7 岔上水源地平水期推荐方案终期地下水位降深

Fig. 7 Groundwater draw down map of the recommended scheme at the final time period during normal season in Chashang water source area

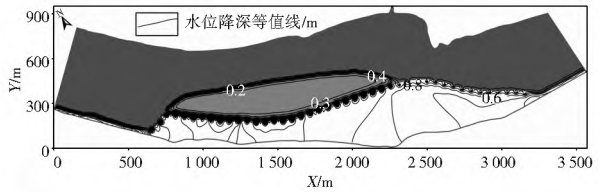


图8 岔上水源地枯水期推荐方案终期降深

Fig. 8 Groundwater draw down map of the recommended scheme at the final time period during low flow season in Chashang water source area

### 3 结语

在掌握吴堡县岔上水源地水文地质条件的基础上建立了二维地下水非稳定流数值模型, 采用基于有限差分法的Visual MODFLOW软件对研究区地下水允许开采量进行了评价。经过模型识别和验证, 确定了符合区内水文地质条件的模型参数和边界条件。通过对研究区设计的9种不同开采方案模拟计算, 最终推荐采用第二开采方案, 能够保证平、枯水期开采量均可达到6 880 m<sup>3</sup>/d。模拟工作对今后此类黄河河谷区傍河取水源地数值模拟计算具有重要指导意义。

### 参考文献(References):

- [1] 贺帅军, 李云锋, 张茂省, 等. 陕北能源化工基地潜水易污性评价[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1186-1191. (HE Shuai jun, LI Yun feng, ZHANG Mao sheng, et al. Vulnerability Assessments of Phreatic Water in the Northern Shaanxi Energy and Chemical Base[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1186-1191. (in Chinese))
- [2] 曹宝峰, 迟宝明, 王文科, 等. 专门水文地质学(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (CAO Bao feng, CHI Bao ming, WANG Wen ke, et al. Applied Hydrogeology(The Third Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [3] 李俊亭. 地下水流数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1989. (LI Jun ting. Groundwater Numerical Simulation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. (in Chinese))
- [4] 郭东屏. 地下水动力学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994. (GUO Dong ping. Dynamics of Groundwater[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technique Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [5] 陈炜. 玉溪市萝卜子水源地地下水允许开采量评价[J]. 云南地质, 2007, 26(2): 242-248. (CHEN Wei. An Evaluation of the Allowable Exploitation Amount of Underground Water of Lubozidi Water Source Site, Yuxi[J]. Yunnan Geology, 2007, 26(2): 242-248. (in Chinese))
- [6] 杨维, 丁斌, 王恩德, 等. 地下水傍河水源地数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报, 2004, 20(4): 325-328. (YANG Wei, DING Bin, WANG En de, et al. Groundwater Numerical Simulation Living Example of Phreatic Water Aquifer beside the River[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 2004, 25(4): 325-328. (in Chinese))
- [7] 郭守玺, 李威, 张树恒, 等. 青海省盐湖集团供水二期水源地数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 116-120. (GUO Shou xi, LI Wei, ZHANG Shu heng, et al. Numerical Simulation of the Second Period Water Source Area of Water Supply for Salt Lake Group in Qinghai Province[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 116-120. (in Chinese))

(下转第85页)

## 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))