

# 连续特枯年份下呼包平原水资源短缺的对策研究

徐映雪<sup>1</sup>, 邵景力<sup>1</sup>, 崔亚莉<sup>1</sup>, 王伦辉<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北京市垃圾渣土管理处, 北京 100067)

**摘要:** 文章对呼包平原地下水多年平均补给量和可开采资源量进行了评价, 并运用 51 年降水资料分析确定了特枯年份的降水量, 预测了该地区在连续特枯年份下的地下水水量及水位的变化情况。结果表明: 地下水多年平均可开采资源量为  $5.8505 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 在连续遭遇特枯年份下累计动用储存量达  $7.5295 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 潜水和承压含水层地下水水位出现大幅度下降, 其中漏斗中心主要分布在呼和浩特和包头市城区。结合呼包平原现状条件下地下水水资源评价情况, 文章有针对性地提出该地区连续遭遇特枯年份下的水资源对策。

**关键词:** 呼包平原; 特枯年份; 水资源对策

**中图分类号:** P641.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2007)03-0046-05

呼包平原上的呼和浩特和包头是以地下水为主要供水水源的大城市, 降水是该区地下水的主要补给源, 降水量大小直接影响地下水补给量的多少, 特别是连续枯水年或特枯水年会对呼包平原供水安全和地下水环境造成一定影响。通过对该区 1951~2001 年的降水资料分析得知: 呼包平原连续枯水年的情况一般可持续 2 年。本文从最大限度地保证城市供水安全的角度出发, 选定呼包平原连续遭遇 2 个特枯年份作为预报方案, 对在连续特枯年份下的呼包平原地下水水流场演化趋势进行模拟预测, 并提出了相应的水资源对策。

## 1 水文地质条件概述

呼包平原位于内蒙古自治区中西部, 北依大青山、乌拉山, 南濒黄河, 东临蛮汗山, 西与乌拉特前旗相接, 东西长约 200km, 南北宽 3~40km, 面积约 7 754km<sup>2</sup>。多年平均降水量为 300~400mm, 东部多于西部。多年平均蒸发强度为 1 700~2 400mm。区内地表水系不发育, 除黄河流经南部边缘外, 无一常年性河流。

呼包平原为一降幅较大的断陷盆地, 水文地质特征具有明显的分带性。水平方向上, 自北向南可分为山前冲洪积平原、冲湖积平原、黄河冲湖积平原和湖积台地四个水文地质区。北部山前冲洪积平原, 含水层颗粒粗, 厚度大, 水量丰富; 南部黄河冲湖积平原, 含水

层颗粒细, 厚度变薄, 富水性差。垂直方向上, 按埋藏条件分为浅层和深层两大含水岩组, 在山前地带两大含水岩组基本相通。地下水的补给主要来自山区的侧向径流及降水渗入, 排泄途径主要是蒸发和人工开采。

地下水是本区的主要供水水源, 在难以引黄灌溉地区, 地下水是唯一的供水水源。地下水开采量为  $6.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 占总供水量的 55% 左右(1998 年)。由于局部地区过量开采而形成大范围的降落漏斗, 如在包头和呼和浩特市, 已形成大面积的地下水位降落漏斗, 地下水位累计下降 40m 左右<sup>[1-2]</sup>。此外, 由于地下水水位持续大幅度下降, 研究区局部出现了不同程度的地面沉降, 如在呼市南部地区年沉降最高幅度达 0.5~1.0cm。本区地表水利用以引黄河水灌溉为主, 本地地表水引用量很少。在没有配套的排水系统的引黄灌区, 已造成土壤次生盐渍化。

## 2 地下水流数值模拟模型

### 2.1 水文地质概念模型和数学模型

在分析研究区地下水系统特征的基础上, 根据钻孔、剖面图以及分层开采量的统计资料, 确定含水层的空间结构, 建立水文地质概念模型<sup>[3-4]</sup>: 模拟区为呼包平原; 北边界是大青山与平原的交界, 定义为流入边界, 南边界为黄河, 定义为水位边界, 东西边界定义为隔水边界; 在垂向上可分为上部潜水含水层, 下部承压含水层, 中间有相对连续分布的弱透水层; 由于呼包盆地由不同的地貌单元组成, 且存在兰阿活动大断裂, 加之地下水位的大幅度下降, 因而存在多个承压含水层和潜水含水层的缺失区和疏干区(图 1)。以上水文地质概念模型可用如下微分方程的定解问题来描述:

收稿日期: 2006-07-26; 修订日期: 2006-10-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(G1999043606)

作者简介: 徐映雪(1979-), 女, 博士研究生, 从事水资源评价管理和水文遥感方面研究。

E-mail: xuyx\_239@163.com

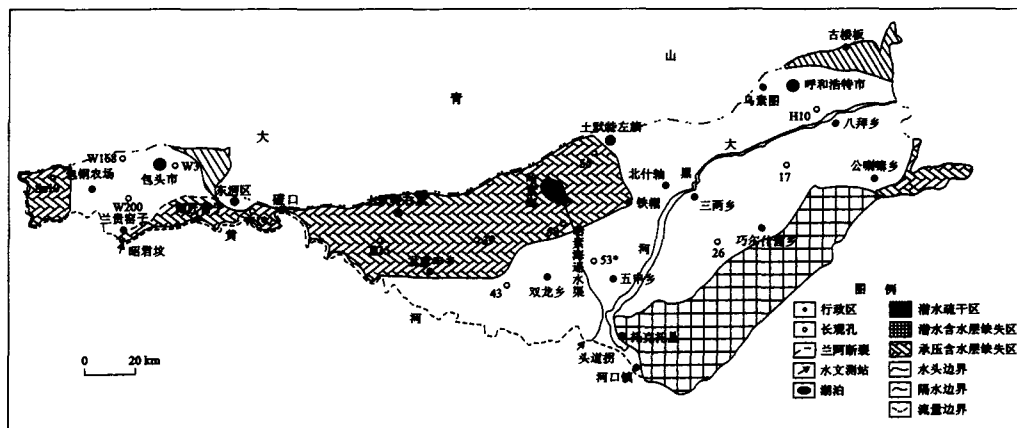


图1 呼包平原水文地质概念模型

Fig.1 Hydrogeologic conceptual model of the Hubao Basin

$$\begin{cases}
 S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \epsilon & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\
 \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_x + p) + p & x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\
 h(x, y, z, t) |_{t=0} = h_0 & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\
 h = h_1 & x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\
 K_n \frac{\partial h}{\partial \bar{n}} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, t) & x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial \bar{n}} \Big|_{\Gamma_3} = 0 & x, y, z \in \Gamma_3, t \geq 0
 \end{cases}$$

式中： $\Omega$ ——渗流区域；

$h$ ——含水层的水位标高(m)；

$h_1$ ——含水体的一类边界值；

$K_x, K_y, K_z$ —— $x, y, z$ 方向的渗透系数(m/d)；

$K_n$ ——边界面法向方向的渗透系数(m/d)；

$S$ ——自由面以下含水层储水系数(1/m)；

$\mu$ ——潜水含水层在潜水面上的重力给水度；

$\epsilon$ ——含水层的源汇项(1/d)；

$p$ ——潜水面的蒸发和降水等(1/d)；

$h_0$ ——含水层的初始水位分布(m)；

$\Gamma_0$ ——渗流区上边界，即地下水的自由表面；

$\Gamma_1$ ——含水层的一类边界；

$\Gamma_2$ ——渗流区域的侧向边界；

$\Gamma_3$ ——渗流区域的下边界，即承压含水层底部的隔水边界；

$\bar{n}$ ——边界面的法线方向；

$q(x, y, z, t)$ ——二类边界的单宽流量( $m^2/d$ )。

m))，流入为正，流出为负，隔水边界为0。

## 2.2 模型的识别与验证

利用地下水模型软件 Processing Modflow 5.1<sup>[5]</sup> 建立研究区地下水数值模拟模型。首先，按  $2km \times 2km$  的正方形网格对模拟区进行离散，潜水含水层有 1473 个活动网格，承压含水层有 1089 个活动网格，中间弱透水层剖分同承压含水层。根据现有均衡要素资料和水位动态资料，选择模拟初始时刻为 1998 年 1 月 1 日，模拟期为一个完整的日历年，同时依据地下水动态随季节变化的规律，将模拟期划分为 12 个应力期。

遵循模型识别和验证原则，反复调整参数和均衡量，确定了模型结构、水文地质参数和均衡要素<sup>[6]</sup>。对比模拟期末实测和模拟地下水流场(图 2)，模型基本反映了实际地下水系统的流动特征。

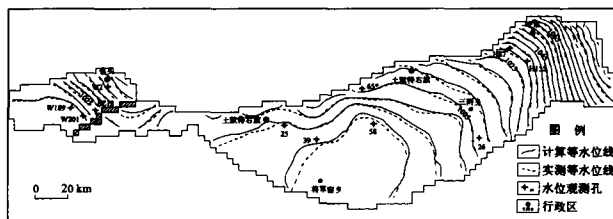


图2 1998年末实测地下水流场与模拟流场比较

Fig.2 Comparison of the modeled and observed groundwater flow field in the unconfined aquifer at the end of 1998

## 2.3 地下水资源评价

### 2.3.1 地下水多年平均补给资源量

运用模型识别的水文地质参数和部分补排量，可评价研究区地下水补给资源量。前已论述，降水量的大小决定了本区地下水补给量的多少。根据研究区 1951~2001 年平均降水量(呼和浩特市为 406.8mm，包

头市为 306.7mm),计算出研究区多年平均地下水补给资源量为  $7.7685 \times 10^8 \text{ m}^3$  (表 1)。其中,降水入渗量为  $1.6508 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占总补给量的 21.25%;山前侧向补给量为  $5.4346 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占总补给量的 69.96%, 是最重要的补给项, 而该侧向量也是由山区降水入渗转化而来;其他补排项所占比例较小<sup>[7]</sup>。

表 1 多年平均地下水补给资源量

Table 1 Perennial average groundwater recharge

| 补给项   | 补给量 ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ ) | 比例 (%) |
|-------|-----------------------------------|--------|
| 降水入渗量 | 1.6508                            | 21.25  |
| 灌溉回渗量 | 0.6288                            | 8.09   |
| 黄河侧渗量 | 0.0543                            | 0.70   |
| 山前侧向量 | 5.4346                            | 69.96  |
| 总补给量  | 7.7685                            | 100.00 |

### 2.3.2 可开采资源量

研究区潜水含水层组较厚,渗透性好,是一个巨大的地下水库,具有良好的多年调节作用,故可将研究区地下水多年平均补给资源量作为可开采资源量的计算基础。研究区潜水含水层地下水补给量主要消耗于人工开采和蒸发,理论上可开采资源量来自激发补给量和减少的排泄量,但本区基本没有激发补给的条件。因此,在假定层间越流量和流入流出量不变的情况下:

$$\text{可开采资源量} = \text{补给资源量} + \text{袭夺的蒸发量} - \text{不可袭夺的排泄量}$$

由模拟期地下水均衡情况<sup>[6]</sup>得到潜水含水层可开采资源量为  $4.1309 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。据模型计算承压含水层补给量约为  $1.7196 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 由于开采是研究区承压水主要的排泄方式,故可以认为承压含水层的可开

采资源量为  $1.7196 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。综上所述,研究区地下水可开采资源量约为  $5.8505 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

## 3 连续特枯年份地下水流场的演化趋势

### 3.1 源汇项的给定和处理

前已提及,本研究将连续两个特枯年份(95%保证率)作为预报方案。由于降水量时空变异和随机特征,造成水资源量的时空变化大<sup>[8]</sup>。研究区形状狭长,基本以包头市郊的磴口为界形成了东西差异较大的气象和水文条件。1951年以来包头地区特枯年份出现在2000年(161.2mm),而呼市地区则出现在1962年(234.7mm)。因此,东西两区分别采用对应特枯年的气象资料,根据降雨入渗系数分区计算降雨入渗量,蒸发量的计算则利用 Modflow 5.1 中的蒸发蒸腾子程序包(阿维扬诺夫公式);限于资料,山前侧向补给量是依据特枯年降水量与建模期降水量的比值推算得到;灌溉入渗量取1998年的一半;开采量则保持1998年现状。各补排项均按不同应力期换算成相应分区的单元强度并分配到相应的单元格。以1998年12月地下水位为初始水位,预测连续遭遇特枯年份研究区的地下水场演化趋势及各补排项的变化情况。

### 3.2 地下水资源量变化趋势预测

按照上述条件进行预测,可以得到连续特枯年份地下水均衡量、流场以及地下水位动态的变化情况。从连续特枯年份地下水均衡表(表2)可以看出:研究区潜水和承压水累计补给资源量为  $7.6742 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 累计动用储存量为  $7.5295 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 2 连续特枯年地下水均衡表 (单位:  $\times 10^8 \text{ m}^3$ )Table 2 Groundwater balance in the extra drought period of 2 years ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )

| 类型  | 补给项    |        |        |        |        | 排泄项     |        |        | 储变量     |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
|     | 降水入渗量  | 灌溉回渗量  | 山前侧向量  | 黄河侧渗量  | 越流补给量  | 人工开采量   | 蒸发量    | 越流排泄量  |         |
| 潜水  | 1.5039 | 0.6288 | 3.7151 | 0.1068 | -      | 8.7784  | 2.2099 | 0.4823 | -5.5160 |
| 承压水 | -      | -      | 1.7196 | -      | 0.4823 | 4.2154  | -      | -      | -2.0135 |
| 合计  | 1.5039 | 0.6288 | 5.4347 | 0.1068 | -      | 12.9938 | 2.2099 | -      | -7.5295 |

连续遭遇两个特枯年后,研究区地下水场发生了较大变化,对初始流场和模拟期末流场进行对比分析后得到:全区地下水位普遍大幅度下降,其中潜水位降幅在 0~4m, 并且降幅从近山前地带向冲积平原逐渐加大;在土默特左旗的三两乡附近一带、包头的青年农场和红旗农场等局部地段由于农业用水严重超采地下水,水位降幅在 3~4m;而承压水位降幅则在 0~17m 不等,且最大降幅主要分布于城区自来水管的集

中开采地段,降幅为 8~17m(图 3,4)。其中呼包两市城区地段的承压水位下降幅度最大;呼市孔家营一带的开采漏斗不断加深,漏斗区面积不断扩大,超过 700km<sup>2</sup>;包头青山区及包钢厂区一带的承压含水层形成了更大范围的区域性降落漏斗。城区水位的大幅度下降和漏斗区面积的扩大,将使地面沉降速率加大,并对地面沉降产生持续性影响。

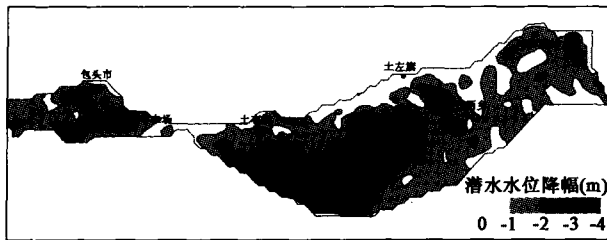


图3 连续两个特枯年研究区潜水水位变幅图

Fig.3 Water table difference in the unconfined aquifer in continuous drought years

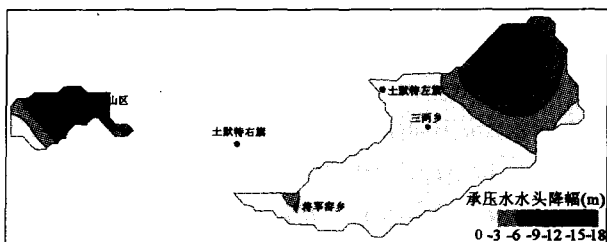


图4 连续两个特枯年研究区承压水水位变幅图

Fig.4 Water table difference in the confined aquifer in continuous drought years

#### 4 连续特枯年份下的水资源对策

(1)建立地下水应急水源,提高供水保证程度。呼包平原地下水库具有巨大的储存空间和调节库容,在连续两个特枯年份的情况下,仍能动用 $7.5295 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的储存量。建议在开采条件好的呼市和包头市区及北部的冲洪积扇中上部,建立地下应急和备用水源地,以防多个连续枯水年和其他供水突发事件的发生。

(2)实行以丰补歉,对地下水进行人工调蓄。充分发挥地下库容的调蓄作用,在特枯年份可以动用部分地下水储存量,丰水年时得以恢复,在条件允许的地段应积极开展人工回灌研究。如在呼市可考虑南郊化肥厂和炼油厂地段附近,利用二道凹水库调节的黄河水进行人工回灌,可以减缓土默特左旗的三两乡一带的潜水含水层的漏斗;充分利用大青山前(呼和浩特市和包头市北郊)砂砾石坑,用昆都仑等水库的弃水进行人工回灌,增加地下水库容,从而弥补呼和浩特市和包头市地下水的亏空。

(3)合理开发利用地下水资源,调整现有的开采布局,避免地面沉降现象加剧。针对承压水局部严重超采现状,工农业用水应尽可能利用地表水和浅层水,深层承压水应优先保证呼包两城市生活用水,禁止使用深层地下水灌溉。

(4)在开源的同时,应大力提倡节约用水。1998年全区农业取水量为 $4.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,约占地下水总取水量的62%。全区农业灌溉工程不配套,灌溉方法较为落后,农业用水浪费掉40%~50%的水资源<sup>[9]</sup>。目前,呼和浩特市和包头市的工业用水重复利用率较低,单位产品耗水量大,国外先进企业水的重复利用率达70%~80%,而呼和浩特市1988年工业用水重复利用率只有28%,包头也仅为61.47%<sup>[10]</sup>。因此提高工业用水的重复利用率,引进清洁生产新工艺,不但能节约用水而且能减少污水排放。这样大约累计可节水 $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 左右,可大大缓解特枯年份水资源短缺状况。

(5)污水资源化和水利工程改造也是缓解水资源紧张的有效措施<sup>[11-12]</sup>。同时应加强法制宣传,节约用水的同时利用经济杠杆的调控作用实现有限水资源的合理利用。

#### 参考文献:

- [1] 呼和浩特市环境地质监测站. 内蒙古呼和浩特市1991~1995年地下水环境监测综合报告[R]. 1996.
- [2] 包头市环境地质监测站. 内蒙古自治区包头市1991~1995年地下水环境监测综合报告[R]. 1996.
- [3] Anderson M P. Applied Ground Modeling [M]. New York: Academic Press INC, 1992.
- [4] 柴崎达雄, 王秉忱, 周文辅, 闵连太, 等, 译. 地下水盆地管理[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- [5] Wen-Hsing Chiang. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN-A simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [6] 邵景力, 徐映雪, 崔亚利, 等. 变异条件下内蒙古呼包平原地下水演化趋势研究[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 480-485.
- [7] 内蒙古自治区地质矿产勘查开发局. 内蒙古自治区地下水资源评价[R]. 2002.
- [8] 姜文来. 水资源价值论[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 海春兴. 内蒙古土默特左旗区域节水型生态农业规划研究[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(2): 65-70.
- [10] 韩俊丽. 包头市水资源可持续利用研究[J]. 阴山学刊, 1999, 15(2): 25-32.
- [11] 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.
- [12] 关宇, 温志宏. 呼和浩特市可持续发展水资源战略[J]. 内蒙古水利, 2002(3): 24-27.

## Countermeasures for water resources shortage in continuous drought years in the Hubao Plain

XU Ying-xue<sup>1</sup>, SHAO Jing-li<sup>1</sup>, CUI Ya-li<sup>1</sup>, WANG Lun-hui<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
2. Beijing Solid Waste Administration Department, Beijing 100067, China)

**Abstract:** With a numerical model groundwater flow, the perennial average groundwater recharge and safe yield in the Hubao Plain are evaluated in this paper. The extra drought period of 2 years is defined by analyzing rainfall of recent 51 years, and the groundwater states were simulated with the model. The results show that: (1) the perennial average groundwater recharge is  $5.8505 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; (2) groundwater storage decreases by  $7.5295 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; (3) water levels in the unconfined and confined aquifers depress in a large extend, the centers of drawdown are located at the downtown areas of Huhehaote and Baotou. For the safety and security, this paper puts forward countermeasures for dealing with the problem concerning water resources in the Hubao Basin in continuous drought years.

**Key words:** Hubao Plain; drought year; countermeasures for water resources

编辑:汪美华

(上接第45页)

- [7] 丁宏伟,赵成,黄晓辉.疏勒河流域生态与沙漠化[J]. 干旱区研究,2001,18(2):11-16. 环与地下水形成演化模式[M].北京:地质出版社,2004:265-271.
- [8] 张光辉,刘少玉,谢悦波,等.西北内陆黑河流域水循

## Assessment of groundwater function in the middle and lower reaches of the Shulehe River Basin

YAN Cheng-yun<sup>1</sup>, NIE Zhen-long<sup>2</sup>, ZHANG Guang-hui<sup>2</sup>, SHEN Jian-mei<sup>2</sup>, CHENG Xu-xue<sup>1</sup>, YU Sheng-bo<sup>1</sup>

(1. Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou, Gansu 730000, China;  
2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

**Abstract:** Because of adjusting and utilizing water resources on a large scale in the middle and lower reaches of the Shulehe River Basin, groundwater resources function, ecological environment function and geological environment function in this area have been changed. On the basis of the theory of analytic hierarchy process (AHP), the paper presents an assessment method of groundwater function, constructs the groundwater function assessment system of the Shulehe River Basin, and assesses and grades the single function and the multiple functions. Based on the results, the applied direction of groundwater is put forward in this paper. The results are suitable to the hydrogeological and environment conditions of Shulehe River Basin, and are the base of groundwater function zoning.

**Key words:** groundwater function; analytic hierarchy process; assessment index system; Shulehe River Basin

编辑:汪美华