

# 陕北南梁白豹地区地下水合理开发利用方式研究

万伟锋 王 玮 李云峰 付晓刚

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**建立地下水的合理开发利用模式,对能源基地建设及缓解其水资源紧缺状况十分重要。在分析南梁白豹地区的地下水开采条件的基础上,选择了典型地区建立了三维地下水流概念模型和数值模型。通过模拟计算不同单井开采量、不同井间距开采方案作用下的降落漏斗形态,对该区内地下水资源的合理开发利用方式进行了分析研究,结果表明,在该区内地下水开采井应布设在较大的河谷区,以线状井排方式开采,以截取河流排泄量为开采量,地下水线状开采强度以不超过 $(0.02\sim 0.03)\times 10^4\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{km})$ 为宜。

**关键词:**陕北;地下水;合理开发利用

**中图分类号:**P641.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-3657(2007)05-0915-05

南梁白豹地区地处陕北黄土高原,属半干旱内陆性季风气候,近年来,由于区域自然条件的限制加之能源基地建设的迅速发展,该区水资源匮乏,生态环境较脆弱<sup>[1]</sup>。该区内工业用水、生活用水及部分农业用水均取自地下水,且开采层多集中在潜水含水层。因开采布局不合理,现已造成黄土梁峁区地下水位大幅下降等不良后果。调整区内地下水开采布局,建立合理的开发利用模式成为当务之急。

## 1 地下水开发利用现状及存在问题

根据水均衡方程,并考虑到多年均衡,一个地区的开采量实际上可表示为: $Q_{\text{开}}=\Delta Q_{\text{补}}+\Delta Q_{\text{排}}+\Delta Q_{\text{储}}$ ,式中: $Q_{\text{开}}$ —实际开采量; $\Delta Q_{\text{补}}$ —增加的补给量; $\Delta Q_{\text{排}}$ —减少的天然排泄量; $\Delta Q_{\text{储}}$ —可动用的储存量。该式表明,开采量实质上由这 3 部分组成,要在一个地区实现地下水可持续开发利用,开采后在多年平均条件下地下水储量变化量应为 0<sup>[2,3]</sup>。对南梁白豹地区来说,天然条件下其主要排泄方式为向地表水的排泄,大气降水入渗补给、农灌回归水补给是区内的补给源,其中井灌区农灌回归水对水资源总量来说为重复量;降水入渗补给量的大小在区内(降水量一定、入渗系数一定)这个特定的地区来说仅与面积有关,因此在开采过程中因开采而增加的补给量是非常有限的。区内生态环境脆弱,虽然含水层厚

度大,储存量大,但动用永久储存量作为开采量的一部分是不合适的。

目前,该区的地下水开采布局十分不合理,开采井分布较为集中且局部井间距过小,使得局部开采强度过大,虽然区内的白垩系各含水岩组(洛河组、环河组)单井出水量较大,但由于该区地下水天然补给强度小,平均补给模数仅为 $2.36\times 10^4\text{m}^3/(\text{a}\cdot\text{km}^2)$ ,最终导致局部地区地下水位大幅持续下降,地表水流量减小。

为此调整开采井布局,确定地下水开发利用中的井间距、局部开采强度等就成为黄土梁峁区合理开发利用地下水的键所在。

## 2 水文地质模型的建立

### 2.1 水文地质条件概况

区内主要含水介质为第四系风积黄土裂隙孔隙介质、白垩系碎屑岩类裂隙孔隙介质和第四系冲洪积砂层松散岩类孔隙介质。侏罗系砂泥岩结构致密,裂隙不发育,渗透性及储水性较差,构成区域隔水底板。区内地下水主要接受大气降水入渗补给,其次为河谷区少量的农灌回归补给。受区域分水岭控制,进入到含水层中的水主要由地下分水岭分别向北、西向南、东面径流。天然条件下,区内地下水主要排泄方式为在沟

收稿日期:2007-01-25;改回日期:2007-02-23

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010331302)资助。

作者简介:万伟锋,男,1981年生,博士生,研究方向为地下水合理开发利用及生态环境保护;E-mail:wwfnt@163.com。

谷切割处向地表水的排泄、侧向径流排泄和人工开采。

### 2.2 水文地质概念模型及其数学描述

为确定黄土梁峁区地下水开发利用合理布局,可选择区内典型地区建立水文地质数值模型进行研究。

模拟区选择为区内葫芦河流域豹子川与葫芦河交汇处以上的流域范围,其北边界为葫芦河流域与洛河流域的分水岭,西边界为葫芦河流域与马莲河流域的分水岭,东、南边界均为葫芦河支沟间的分水岭,总面积 1312.78 km<sup>2</sup>。

模拟区含水介质主要为白垩系各含水岩组以及葫芦河河谷区的冲积细砂含水层,区内的黄土基本为透水不含水地层,区内含水介质可概化为非均质轴对称各向异性多孔介质。

模拟区周边边界均为分水岭,可概化为第二类零流量边界,上边界为潜水面边界与河流边界,在该处接受大气降水入渗补给,发生地下水向河水的排泄,底部边界为白垩系与侏罗系的分界面,可概化为隔水边界。大气降水是区内地下水唯一的补给源,进入到含水层中的水在区域排泄基准面的控制下,顺地势由分水岭向地表河流径流,并排泄到河流,最终汇入周河通过前麻子沟口附近流出区外。在人工作用下,人工开采将成为区内地下水的主要排泄方式之一。

根据上述的水文地质概念模型,可建立评价区的三维非均质各向异性介质稳定流数学模型<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\alpha}{\alpha x} (K_h \frac{\alpha H}{\alpha x}) + \frac{\alpha}{\alpha y} (K_h \frac{\alpha H}{\alpha y}) + \frac{\alpha}{\alpha z} (K_v \frac{\alpha H}{\alpha z}) = 0 \quad (x, y, z) \in \Omega$$

$$\left. \begin{aligned} H &= z \\ -K_v \frac{\alpha H}{\alpha z} &= W \end{aligned} \right\} \quad \text{潜水浸润面边界}$$

$$\left. \begin{aligned} H(x, y, z)|_{r_1} &= h_1 \\ -K_h M \frac{\alpha H}{\alpha n} |_{r_2} &= q \end{aligned} \right\}$$

$$\lim_{r \rightarrow r_0} 2 \pi r K_h M \frac{\alpha H}{\alpha r} = Q_i$$

其中:

- H—地下水位标高(m);Ω—计算区范围。
- K<sub>h</sub>、K<sub>v</sub>—水平和垂直方向上渗透系数(m/d);
- M—含水层厚度(m);
- x, y, z—坐标变量(m);
- h<sub>1</sub>—第一类(定水位)边界水位标高(m);
- W—潜水面上的垂向水交换强度 (m<sup>3</sup>/(d·m<sup>2</sup>)), 包含降水、凝结水补给, 潜水蒸发排泄等;
- q—第二类边界上的单宽渗流量(m<sup>2</sup>/d);
- Q<sub>i</sub>—第 i 眼开采井开采量(m<sup>3</sup>/d);
- n—二类边界外法线方向;
- Γ<sub>1</sub>—一类边界;Γ<sub>2</sub>—二类边界。

### 2.3 数值模型的建立

#### 2.3.1 建模依据

本次建模主要依据历年来石油、地矿等部门在区内及邻区开展的不同目的、不同精度的地质水文地质勘查所取得的资料,区内及周边地区县(旗)及以上气象站降水量序列资料。

#### 2.3.2 计算域剖分

本次计算根据三维有限差分方法,对计算域采用间距为 200 m 的等间距规则网格进行剖分,在模拟区范围内,采用长方体单元将研究区在空间上,沿东西向剖分为 197 列,沿南北向剖分为 230 行,其中在模拟区范围内的活动单元总数为 32852 个,代表实际面积 1314.08 km<sup>2</sup>。垂向上剖分为 5 层。其中由上至下第一层为冲积砂层含水层与风积黄土所在层,第二、三层为白垩系环河组含水岩组所在层,第四、五层为白垩系洛河组含水岩组所在层。

根据钻孔抽水试验资料,模拟区白垩系洛河组渗透系数取 0.25 m/d,环河组渗透系数取 0.12 m/d,白垩系各含水岩组垂向渗透系数均为水平渗透系数的 1/10;葫芦河河谷区冲积砂层含水层渗透系数为 5.68 m/d;风积黄土水平渗透系数取 0.0025 m/d,垂向渗透系数取 0.25 m/d。

模拟区周边边界及底部边界设置为隔水边界,顶部边界为潜水面边界,大气降水入渗补给强度为 20.8 mm/a(多年平均降水量按 520 mm/a 计, 大气降水入渗补给系数按 0.04 计),葫芦河及其支流设置为排水沟边界。

#### 2.3.3 模型的运行

本次模型可采用美国地调局开发的地下水流三维有限差分计算程序 MODFLOW2000 进行求解<sup>[5]</sup>。把上述各项代入模型,可计算出区内接受的大气降水入渗补给量为 89256 m<sup>3</sup>/d,葫芦河及其支流排泄地下水总量为 89256 m<sup>3</sup>/d。计算天然条件下(多年平均降水量条件下)模拟区稳定流场可知,区内黄土梁峁区绝大部分地下水位低于黄土层底面,黄土为透水不含水层(图 1)。

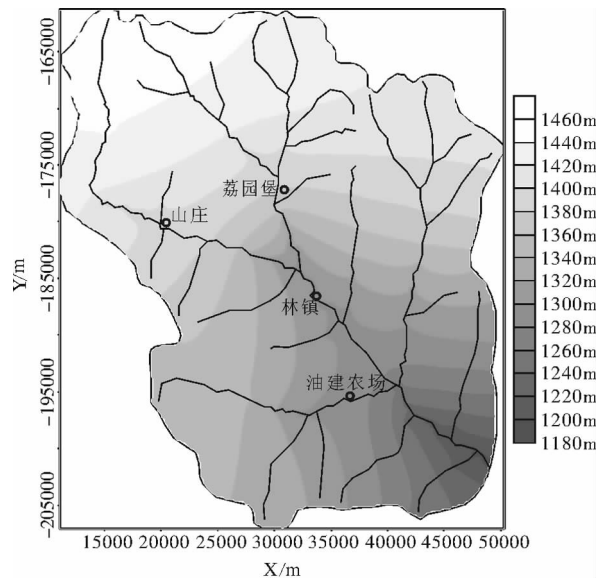


图 1 天然条件下模拟区稳定流场  
Fig.1 Calculated steady state flow field in the modelling area under natural condition

### 3 地下水合理开发利用方式<sup>[3,6]</sup>

根据区内钻孔抽水试验结果,区内白垩系含水层实际抽水量为 200~400 m<sup>3</sup>/d,为确定区内开采井开采量及开采井间距,可设计不同单井开采量、不同井间距条件下地下水系统的响应情况,各方案中开采井数均为 10 眼。各方案中单井开采量分别为 200 m<sup>3</sup>/d、300 m<sup>3</sup>/d、400 m<sup>3</sup>/d, 开采井间距分别为 400 m、600 m、800 m,这样总共设计了 9 种开采方案。各方案作用下地下水达到稳定时,相对于天然稳定流场的降落漏斗形态见表 1,图 2。

计算结果表明,在单井开采量相同的 3 个方案中,随着开采井间距的增加,区内最大计算水位降深逐渐减小(该降深为某一开采井所在单元的计算水位降深,它并不代表某一开采井的井壁水位降深或井筒内水位降深,而是开采井所在单元均衡域的平均水位降深,比井壁水位降深要小),而开采井外围水位降深增大,小降深的面积增大,而大降深的面

积减小,漏斗形状趋于平缓,说明较大井间距更适合开发利用本区地下水。在开采井井间距相同的 3 个方案中,随着单井开采量的减小,区内最大计算水位降深逐渐减小,小降深的面积增大,而大降深的面积减小,漏斗形状趋于平缓。综合以上表明,在开采总量相同的条件下,随着河谷区线状开采强度的减小,区内最大计算水位降深逐渐减小,小降深的面积增大,而大降深的面积减小,漏斗形状趋于平缓,更适合开发利用本区地下水。

计算结果同时也表明,随着线状开采强度的增加,开采地下水引起的最大计算水位降深(计算均衡域平均降深,不代表井壁降深)也将随之增大,且当线状开采强度相同时,单井开采量的增加也会导致开采地下水引起的最大计算水位降深也将随之增大。在一定的单井开采量作用下,随着井间距的减小,最大计算水位降深随之增大,且随着井间距的减小最大计算水位降深增大的幅度也是逐渐增大的(图 3)。

综上所述,在区内宜在河谷区采用开采井排的形式,开发利用地下水,并控制线状开采强度不超过允许范围,即当单井开采量较大时,采用较大的井间距,当单井开采量较小时,可采用较小的井间距。允许线状开采强度的确定与开采区段的汇流区域内所接收的大气降水入渗补给量大小,以及含水层的渗透性能等有关。根据本次模拟区计算结果,建议南梁白豹地区,地下水线状开采强度以不超过(0.02~0.03)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/(d·km)为宜,对于白垩系含水岩组渗透性能较好、含水层厚度大且补给量较大地区,线状开采强度可取上限,反之则取下限,但某开采区段总开采量应小于该区段的允许开采量。

因为在黄土梁峁区,白垩系含水层地下水水质复杂,分布有较大范围的高矿化地下水,当某个局部地区大量开采地下水,并导致地下水位大幅下降时,必将引起高矿化水体的入侵,从而破坏优质的地下水资源。故而从水质角度考虑,在黄土梁峁区也应采用相对分散的开采方式开采地下水资源。

在前述的地下水合理开发利用方式研究成果基础上,可采用开采系数法计算南梁白豹地区地下水允许开采量,根据区内及邻区地下水开发利用经验,区内开采系数选择为 0.4。

对于前述的模拟区,地下水天然资源量为 3257.84×10<sup>4</sup>

表 1 不同方案下稳定漏斗形态数据

Table 1 Drawdown cone shapes of different scenarios

| 方案 | 单井开采量<br>m <sup>3</sup> /d | 井间距<br>(m) | 最大降深<br>(m) | 降深大于某一值的漏斗面积(km <sup>2</sup> ) |      |       |       |        |
|----|----------------------------|------------|-------------|--------------------------------|------|-------|-------|--------|
|    |                            |            |             | >4m                            | >3m  | >2m   | >1m   | >0.5m  |
| 1  | 200                        | 400        | 2.68        | 0.00                           | 0.00 | 2.13  | 17.09 | 45.66  |
| 2  | 200                        | 600        | 2.18        | 0.00                           | 0.00 | 0.02  | 15.60 | 49.21  |
| 3  | 200                        | 800        | 2.04        | 0.00                           | 0.00 | 0.00  | 12.17 | 56.41  |
| 4  | 300                        | 400        | 4.02        | 0.00                           | 2.14 | 7.01  | 32.94 | 83.65  |
| 5  | 300                        | 600        | 3.28        | 0.00                           | 0.03 | 6.22  | 34.59 | 92.23  |
| 6  | 300                        | 800        | 3.07        | 0.00                           | 0.00 | 4.40  | 36.21 | 110.66 |
| 7  | 400                        | 400        | 5.37        | 2.15                           | 5.53 | 17.22 | 45.80 | 149.71 |
| 8  | 400                        | 600        | 4.38        | 0.03                           | 3.82 | 16.03 | 49.89 | 167.07 |
| 9  | 400                        | 800        | 4.10        | 0.00                           | 1.65 | 12.61 | 57.26 | 214.52 |

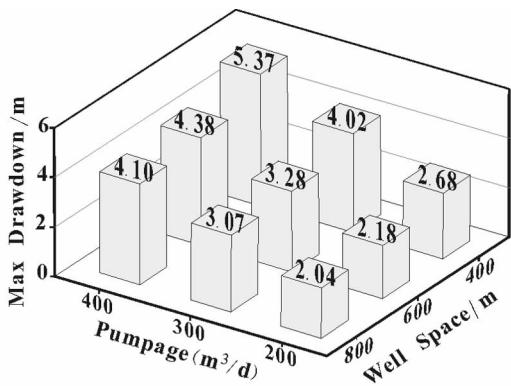


图 2 不同开采方案下开采井最大计算水位降深变化  
Fig.2 Variation diagram of calculated maximum drawdowns in different scenarios

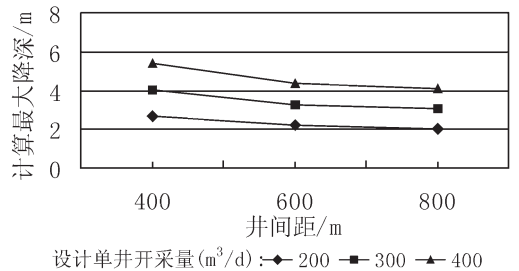


图 3 不同方案作用下井间距与计算最大降深关系曲线  
Fig.3 Maximum drawdown-well spacing curves in different scenarios

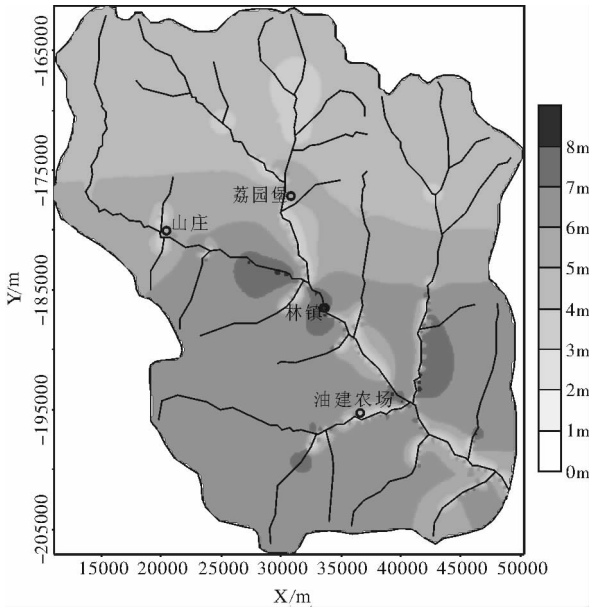


图4 模拟区 35700 m<sup>3</sup>/d 方案作用下稳定降深分布  
Fig.4 Distribution of calculated steady drawdown in a linear well array scenario (35700 m<sup>3</sup>/d)

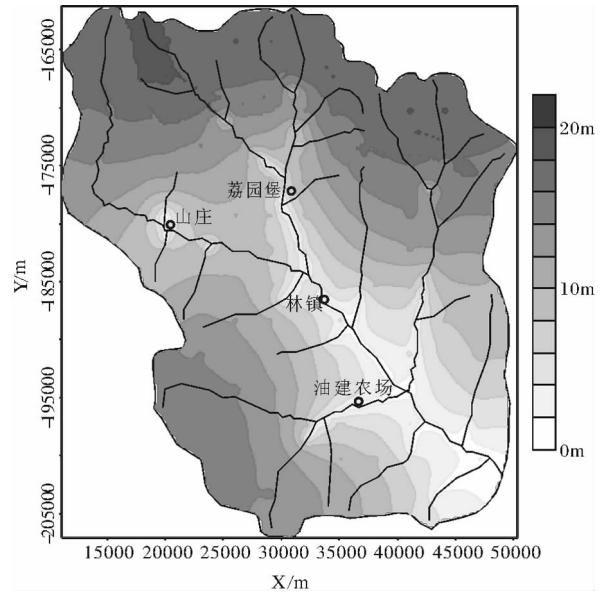


图5 平均布井条件下降深分布(开采量 23800 m<sup>3</sup>/d)  
Fig.5 Distribution of calculated steady drawdown in an average well array scenario (yield 23800 m<sup>3</sup>/d)

m<sup>3</sup>/a(89256 m<sup>3</sup>/d),当开采系数取 0.4 时,该地区允许开采量为 1303.14×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a(35702.4 m<sup>3</sup>/d),按照前述确定的线状开采强度,考虑单井开采量为 300 m<sup>3</sup>/d,井间距 600 m,共布设 119 眼开采井,总设计开采量 35700 m<sup>3</sup>/d,布井地段选择在葫芦河及其主要支流的河谷区。经模型计算,开采井最大水位降深为 8.64 m,降深大于 5 m 的面积为 794.26 km<sup>2</sup>,降深大于 4 m 的面积为 1151.84 km<sup>2</sup>。开采方案作用下相对于天然稳定流场的稳定降深分布见图 4。

应该指出,该可开采量是在低开采强度的最大可开采量,当采用较为集中的井群开采方式,在开采技术条件较好的地段开采地下水时,在同样的水位约束下,所获得的开采量将小于最大可开采量。

该区有小型油田分布,由于油田供水的特殊性,供水井可能不分布在开采技术条件较好的河谷区。从平均布井方案的效果可以侧面反映目前地下水开采情况(实际情况中由于部分地段开采强度过大而造成的地下水降深漏斗比平均布井方案中的计算结果更大)。

为此,在前述的数值模型基础上,设计了两个在模拟区平均布井的开采方案,各方案中均平均布设 119 眼开采井,井间距为 3 km,单井开采量分别为 200 m<sup>3</sup>/d、300 m<sup>3</sup>/d,则总开采量分别为 23800 m<sup>3</sup>/d、35700 m<sup>3</sup>/d。两方案计算稳定降深分布状况见图 5~6。

计算结果表明,由于天然条件下,区内地下水在整个区域内接受大气降水入渗补给后,向河谷区径流,并最终以下地下水溢出的方式排泄到河流,在整个模拟区采用平均布井法

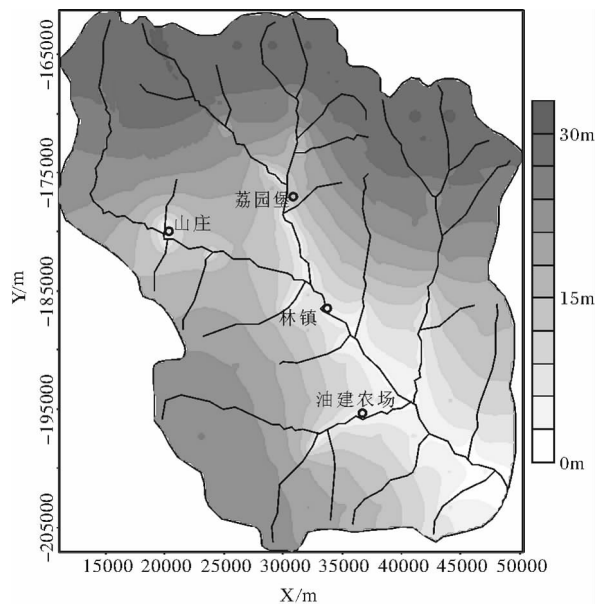


图6 平均布井条件下降深分布(开采量 35700 m<sup>3</sup>/d)  
Fig.6 Distribution of calculated steady state drawdown in an average well array scenario (yield 35700 m<sup>3</sup>/d)

开采区内地下水,不同位置的开采井对地下水排泄量的截取效果是不同的,并且都不如位于葫芦河河谷区的开采井。因而在开采条件下,一方面各开采井的计算降深相差较大,一般靠近分水岭处开采井的计算降深较大,靠近河谷区的开采

井计算降深较小;另一方面,由于开采井对地下水排泄量的截取效果不佳,导致整个模拟区的计算水位降深较大,在单井开采量为  $200 \text{ m}^3/\text{d}$  时,总开采量为  $23800 \text{ m}^3/\text{d}$ ,最大计算降深为  $19.942 \text{ m}$ ,计算降深大于  $10 \text{ m}$  的面积为  $772.25 \text{ km}^2$ ,计算降深大于  $5 \text{ m}$  的面积为  $1112.95 \text{ km}^2$ ,随着单井开采量的增大或者井间距的减小,计算水位降深以及计算降落漏斗扩展范围都在进一步扩大,当单井开采量为  $300 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总开采量为  $35700 \text{ m}^3/\text{d}$  时,最大计算降深为  $31.616 \text{ m}$ ,计算降深大于  $20 \text{ m}$  的面积为  $614.76 \text{ km}^2$ ,计算降深大于  $10 \text{ m}$  的面积为  $1061.17 \text{ km}^2$ ,计算降深大于  $5 \text{ m}$  的面积为  $1207.31 \text{ km}^2$ 。与前述的在葫芦河河谷区布井的方案相比,显然河谷区线状布井方案要优于平均布井方案,并且平均布井方案中,当开采井位于黄土梁岭上时,还存在着建井成本、运行成本高等其他问题。故而在区内地下水开发利用中应尽可能地将开采井布设在河谷区(葫芦河及其主要支流),且要求线状开采强度要小于允许的开采强度。

## 5 结论

(1) 在南梁白豹黄土梁岭区,地下水开采井应布设在较大的河谷区,地下水线状开采强度以不超过  $(0.02\sim 0.03)\times 10^4 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{km})$  为宜。

(2) 在整个模拟区采用平均布井法开采区内地下水,不同位置的开采井对地下水排泄量的截取效果是不同的,并且都不如以线状井排方式开采以截取河流排泄量的开采方式。

## 参考文献(References):

- [1] 薛惠锋,王平. 陕北能源基地环境资源问题分析与经济可持续发展研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1997, 27(1):65-68.  
Xue Huifeng, Wang Ping. The problem of environment and resource in relation to economic sustained development in the Northern Shaanxi Energy Base [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1997, 27 (1):65-68 (in Chinese with English abstract).
- [2] 王玮. 鄂尔多斯高原内流区地下水开发利用方式研究 [J]. 干旱区研究, 2005, 22(4):436-441.  
Wang Wei. Study on the sustainable exploitation and utilization of groundwater [J]. Arid Zone Research, 2005, 22 (4):436-441 (in Chinese with English abstract).
- [3] Wang Wei, Qin Yupeng, Chen Jianmin. Sustainable development manner of groundwater resources in loess area of Zhidan-Jingbian, China [C]//William G Lyon, Steven K Starrett. Environmental Science and Technolog Vol. (I), American Science Press, Houston, 2006:49-54.
- [4] 郭东屏. 地下水动力学[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1994.  
Guo Dongping. Dynamics of Groundwater [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1994(in Chinese) .
- [5] Waterloo Hydrogeologic Inc. Visual Modflow v.4.0 User's Manual [R]. 2004.
- [6] 张光辉,刘少玉,张翠云,等. 黑河流域地下水循环演化规律研究 [J]. 中国地质, 2004, 31(3):289-293.  
Zhang Guanghui, Liu Shaoyu, Zhang Cuiyun, et al. Evolution of groundwater circulation in the Heihe River drainage area [J]. Geology in China, 2004, 31(3):289-293(in Chinese with English abstract).

# Rational groundwater exploitation and utilization manner in the Nanliang-Baibao area, northern Shaanxi

WAN Wei-feng, WANG Wei, LI Yun-feng, FU Xiao-gang

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Establishing a rational model of groundwater exploitation and utilization is very important for the construction of an energy base and mitigating its urgent shortage of water resources. Based on an analysis of the conditions of groundwater in the Nanliang-Baibao area, a 3D groundwater flow conceptual model and a numerical model are constructed in a selected typical area. By modeling the shape of the drawdown cone using different exploitation scenarios with different single well yields and different well spacings, the manner of rational groundwater exploitation and utilization is studied. The analytical results indicate that the groundwater pumping wells should be laid out in the main river valley and that the linear well array should be used to intercept the river discharge as the yield. It is advisable that the linear pumping rate should not exceed  $(0.02\sim 0.03)\times 10^4 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{km})$ .

**Key words:** northern Shaanxi; groundwater resources; rational exploitation and utilization

**About the first author:** WAN Wei-feng, male, born in 1981, Ph.D student, his research interests are groundwater utilization and exploitation and environmental protection; E-mail: wwfint@163.com.