

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190346

# 志丹靖边黄土区地下水合理开采方式研究

胡海洋<sup>1,2</sup>, 李金龙<sup>1,2</sup>, 孔德涛<sup>1,2</sup>, 王 玮<sup>1,2</sup>

(1.长安大学水利与环境学院,陕西 西安 710054;  
2.旱区地下水与生态效应教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘 要:**地下水是志丹靖边地区主要的用水来源,针对该地区水资源短缺的问题,通过控制性数值试验的方法,选择志丹靖边地区典型的区域,分别设计不同的方案,建立数值模型,对地下水的不同开采方式和开采强度下的降落漏斗形态和最大水位降深进行计算。结果表明,通过线状布井的方式沿河谷布设开采井优于在研究区内平均布井,并且线状开采强度应控制在  $600\sim 800\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}^{-1}$ 。对志丹靖边地区地下水的合理开采具有指导意义。

**关键词:**地下水资源;开采方式;线状布井;黄土区

**中图分类号:**TV213.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2020)03-0024-05

志丹靖边(简称志靖)地区位于黄土高原,沟壑纵横的梁茆使得该地区的地表水资源稀缺<sup>[1]</sup>,地下水成为主要的供水来源。近年来,为满足经济发展的需要,在该地区建造了大量的开采井。由于缺乏理论指导,虽然志靖地区地下水开采井布局能够有效地截取地下水向河流的排泄量,但同时也使得该区域内的地下水位严重下降<sup>[2-3]</sup>,一些超采区域的地下水位更是以每年4m的速度快速下降<sup>[4]</sup>,这对当地的生态环境造成一系列不良后果<sup>[5]</sup>,严重阻碍了该地区的经济发展和地下水资源的长期开发利用<sup>[6]</sup>。为此,迫切需要提出合理开采地下水的方式,为志靖地区的水资源短缺问题提供有效的解决方法,这也对油田区的建设和发展具有重要的意义<sup>[7]</sup>。

## 1 研究区概况

### 1.1 水文气象条件

研究区属于陕北志丹、靖边、安塞一带的黄土梁茆区,位于周河流域西武至麻子沟间的流域范围,气候类型为半干旱大陆性气候<sup>[8]</sup>。安塞站多年平均降水量为501mm,夏季降水量集中而冬季少雨,多年平均蒸发量达到1465mm以上<sup>[9]</sup>。

### 1.2 水文地质条件

根据多年的钻孔和勘察资料,得到研究区水文地质图(见图1),该地区具有供水意义的含水层为黄土覆盖下的白垩系环河组、洛河组地层。其中,洛河组在研究区范围内均有分布,厚度约为200~300m,而环河组主要分布于研究区的西北角,厚度约100~250m。地下水埋深较大,河谷区的含水层富水性较好,黄土梁茆区的含水层富水性极差。

对志丹靖边地区的气象和水文地质条件进行分析得

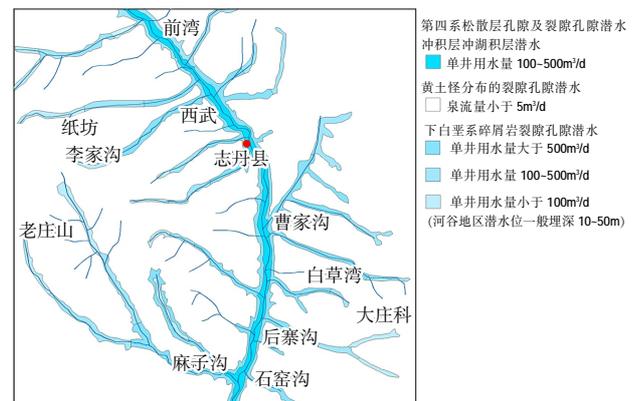


图1 研究区水文地质图

Fig.1 The hydrogeological map of the study area

收稿日期:2019-10-09

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(1212010331302)

作者简介:胡海洋(1994-),男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向为水文学及水资源。E-mail:461001456@qq.com

通讯作者:王玮(1970-),男,江西乐平人,教授,主要从事水资源与环境的教学与科研工作。E-mail:wangweichd@chd.edu.cn

到以下结论:天然条件下,地下水主要接受大气降水的补给,向河流进行排泄。地下水埋深较大,长期开采地下水几乎不会引起额外的补给增量。因此,如何在研究区内布设开采井,以尽可能截取地下水向河流的排泄量,同时又满足区内的地下水位不至于出现大幅下降,成为研究区内合理开采地下水的關鍵所在。

## 2 研究方法

根据水均衡原理,志靖黄土区地下水资源能够长期开采的条件是:在多年开采条件下,地下水位不出现严重下降,即地下水储量不随时间发生变化<sup>[10-11]</sup>。为此,采用控制性数值试验,建立数值模型,对研究区不同单井开采量和不同开采方式条件下的地下水降落漏斗形态进行计算,从而得出志靖地区合理的布井方式和最大开采强度。控制性数值试验的优点在于能够排除次要因素的干扰,只对主要因素进行分析,并据此建立不同的数值模型,讨论主要因素变化对结果的影响。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水文地质概念模型及其数学描述

研究区总面积 568.93km<sup>2</sup>,南、北边界均为周河支沟间的分水岭,东、西边界分别为周河流域与延河、洛河流域的分水岭。研究区含水层主要包括第四系松散层孔隙及裂隙含水层和下白垩系碎屑岩裂隙孔隙含水层。含水层介质类型为非均质轴对称各向异性多孔介质,即  $K_h=K_x=K_y \neq K_z$ 。

模型四周均为分水岭,可以设置为零流量边界;模型的潜水面接受大气降水补给,底部边界为白垩系与侏罗系的分界面,设置为隔水边界;周河及其支流设置成排水沟边界(Drain 边界),即一旦水位标高超过地表便会排走;抽水井可用定流量边界刻画。

依据上述对研究区内边界条件的概化,能够建立描述区内地下水实际流动的稳定流数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 (x, y, z) \in \Omega \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} H = z \\ -K_z \frac{\partial H}{\partial z} = W \end{array} \right\} \text{潜水浸润面边界} \quad (2)$$

$$H(x, y, z)|_{r_1} = h_1 \quad (3)$$

$$-K_h M \frac{\partial H}{\partial n} |_{r_2} = q \quad (4)$$

$$\lim_{r \rightarrow r_0} 2\pi r K_h M \frac{\partial H}{\partial r} = Q_i \quad (5)$$

式中: $x, y, z$  为空间变量(L); $H$  为地下水位(L); $K_h=K_x=K_y$  为水平渗透系数(L/T); $K_z$  为垂向渗透系数(L/T); $M$  为含水层厚度(L); $W$  为潜水面上的垂向水交换强度(L<sup>3</sup>/(TL<sup>2</sup>)),包含降水、凝结水补给,潜水蒸发排泄等; $h_1$  为第一类(定水位)边界水位标高(L); $q$  为第二类边界上的单宽渗流量(L<sup>2</sup>/T); $Q_i$  为第  $i$  眼开采井开采量(L<sup>3</sup>/T),开采井为圆形,采用柱坐标刻画较方便; $r$  为辅助柱坐标变量; $n$  为二类边界外法线方向; $\Omega$  为计算区范围; $\Gamma_1$  为第一类水头边界; $\Gamma_2$  为第二类水头边界。

### 3.2 数值模型的建立

(1)计算域剖分。由于模拟区的范围较大,在满足模型计算精度的要求上,采用 200m×200m 的等间距正交网格对平面区域进行剖分,模拟区范围内总的活动单元格个数为 14 267 个,代表实际面积 570.68 km<sup>2</sup>。垂直方向上按照实际地层总共剖分为 5 层。其中冲积砂层和风积黄土含水层位于模型第一层,白垩系环河组含水层仅分布在模型的第二层,白垩系的其他岩组含水层分布于第三至五层。

(2)参数的计算与输入。模型中用的参数主要包括:含水层渗透系数、降水入渗补给和模型各层高程。其中渗透系数主要是根据钻孔资料和抽水试验资料进行计算,白垩系洛河组: $K_h$  为 0.30m/d, $K_z$  为 0.03m/d;白垩系环河组: $K_h$  为 0.23m/d, $K_z$  为 0.023m/d;丘陵山区黄土层: $K_h$  为 0.025m/d, $K_z$  为 0.285m/d;周河河谷区冲积砂层含水层渗透系数为 3.19m/d。降水入渗补给由安塞站多年平均降水量(按 500mm/a 计)和当地的降水入渗补给系数(0.04)计算得到为 20mm/a。根据钻孔资料能得到冲积砂层和风积黄土层、洛河组和环河组地层的实际厚度,模型各层的底板标高通过地表标高减去各层厚度得到。由于地下水埋深较大,蒸发量可以忽略不计,不参与计算。

(3)模型的运行。利用 MODFLOW 软件,把上述各项参数代入模型,能够有效地对上述数学模型进行求解运算。本次模型主要用到的模拟包有:降水入渗补给(Recharge)、排水沟边界(Drain)、抽水井(Well)以及满足模型运行的基础模拟包。从模型计算结果可得到区内地下水向河流的排泄量为 31 270m<sup>3</sup>/d。天然条件下,由于地下水埋深大,地下水接受大气降水的补给,向河流排泄。稳定流条件下,含水层中储存的水量不参与计算,所以模型范围内地下水接受大气的补给量与向河流的排泄量相等,均为 31 270m<sup>3</sup>/d。

3.3 地下水合理开发利用方式

根据不同部门历年在研究区进行抽水试验所获得的资料,可确定在白垩系碎屑岩裂隙孔隙潜水、承压水中的实际抽水量范围为 200m<sup>3</sup>/d~500m<sup>3</sup>/d。为确定在河谷区合理的地下水开采井布局,一共设计了三种不同的单井开采量(300m<sup>3</sup>/d,400m<sup>3</sup>/d,500m<sup>3</sup>/d)和三种不同的开采井间距(400m,600m,800m)相互组合的 9 种开采方案,并且每一种方案的开采井的数量均为 10。统计不同方案条件下的降落漏斗面积见表 1 以及不同方案下的最大稳定降深见图 2。

表1 不同开采方案下降落漏斗面积及最大水位降深统计  
Table1 The statistics of falling funnel area and maximum drawdown under different exploitation scenarios

序号	单井开采量 /m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	井间距 /m	降深大于某一值的漏斗面积/km <sup>2</sup>				最大计算降深 /m	线状开采强度 /m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>
			>6m	>2m	>1m	>0.5m		
1	300	400	0.00	0.36	1.22	6.37	2.90	750
2	300	600	0.00	0.10	0.57	3.15	1.63	500
3	300	800	0.00	0.02	0.24	0.62	1.47	375
4	400	400	0.06	0.92	3.97	14.24	5.55	1000
5	400	600	0.00	0.65	1.67	7.38	2.67	667
6	400	800	0.00	0.17	0.57	3.45	1.93	500
7	500	400	0.34	2.60	10.16	26.96	9.52	1250
8	500	600	0.04	0.77	3.80	14.13	4.89	833
9	500	800	0.01	0.38	1.64	9.28	2.94	625

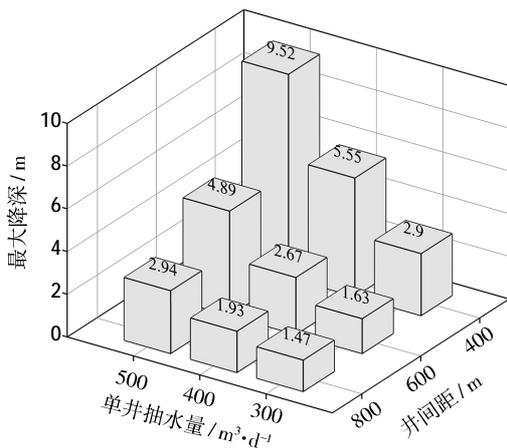


图2 不同方案模型最大计算水位降深

Fig.2 The maximum calculated drawdown of different scenarios

根据计算结果可以发现,在单井开采量相同的条件下,最大计算水位降深与开采井间距呈负相关。应该指出,模型计算的最大水位降深与实际开采井井壁处

的水位降深并不相同,这是因为实际开采过程中不可忽略井壁的影响。随着开采井间距的增加,开采井影响的范围随之增大,但最大计算降深逐渐减小,降落漏斗整体上趋于平缓状态。布井间距相同时,人工开采总量、模型计算水位降深、开采井的最大影响范围随着单井开采量的增加而迅速增大,降落漏斗也会随之向外扩张。综合以上表明,如果沿河谷区以较大的井间距布设开采井,且单井开采量控制在一定的范围内,那么形成的降落漏斗将会相对平缓。当开采强度大于一定数值后,开采井所在区域的最大水位降深将呈现跳跃式增大。因此,如何确定开采井的开采强度,使得开采地下水形成的降落漏斗相对平缓,成为解决该地区合理开采地下水的核心。

在此用线状开采强度来确定地下水的开采强度。线状开采强度定义为单井开采强度与开采井间距的比值。从表 1 可以发现,当单井开采量为 300m<sup>3</sup>/d,线状开采强度由 500m<sup>3</sup>/d·km<sup>-1</sup> 增加到 750m<sup>3</sup>/d·km<sup>-1</sup> 时,对应的最大水深从 1.63m 增加到 2.90m,且降深大于某一值的面积也显著增大;同理当单井开采量为 400m<sup>3</sup>/d 或 500m<sup>3</sup>/d,线状开采强度大于某个值时,最大水位降深和降深大于某一值的面积均存在较大的飞跃。线状开采强度与对应的最大水位降深如图 3 所示。

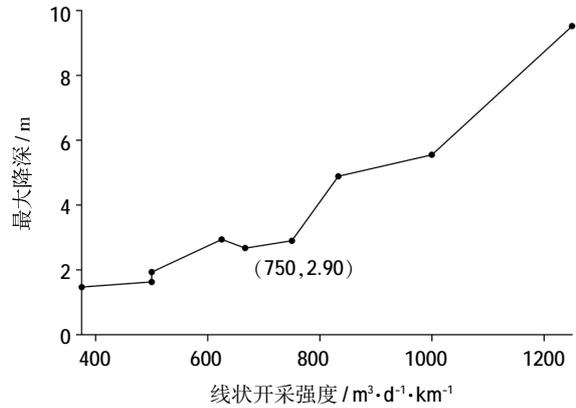


图3 线状开采强度与对应的最大水位降深

Fig.3 The linear mining intensity and its corresponding maximum drawdown

从图 3 可以看出,当线状开采强度大于750m<sup>3</sup>/d·km<sup>-1</sup> 时,最大水位降深开始显著增大,并且现状开采强度从 600m<sup>3</sup>/d·km<sup>-1</sup> 增加到 800m<sup>3</sup>/d·km<sup>-1</sup> 时,最大计算水位降深并没有明显增加。因此,为实现该地区地下水资源长期利用,线状开采强度应该控制在 600~800 m<sup>3</sup>/d·km<sup>-1</sup>,当单井开采量较大时,应适当增加井间距,以保证地下水位不出现严重的下降。

此外,该地区的地下水水质相对其他地方来说复杂,在局部地区分布着矿化度较高的地下水。当局部某个地区开采量过大或开采井过于集中时,必然会大幅度地降低当地的地下水位,从而高矿化度的水体入侵,矿化度升高,最终导致该地区地下水咸化。因此从水质的角度考虑,在志靖地区开采地下水时,不能引起较大的水位降深。

采用线状布井的方式在河谷区开采地下水,根据开采系数法来计算模拟区内地下水允许开采量。姜淑云<sup>[2]</sup>计算渭北乾县代家地区的地下水开采系数为0.45,而志靖地区与代家地区相距不远,且都属于黄土梁茆区,结合经验最终将开采系数定为0.4。由前面的计算可以知道,天然条件下,地下水向河流的排泄量为31 270m<sup>3</sup>/d,由此可计算出模拟区的地下水允许开采量为12 508m<sup>3</sup>/d。将布井地段选择在周河河谷区,由图2可知,单井开采量为500m<sup>3</sup>/d,开采井之间的距离为800m时,不会引起较大的水位降深,则12 508m<sup>3</sup>/d的开采量需要布设25口开采井。该开采方案下的稳定降深分布见图4。

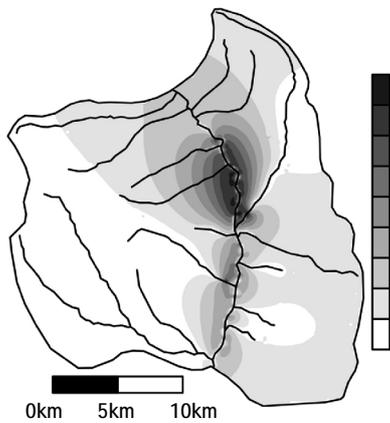


图4 线状布井方案下稳定降深分布(12 500m<sup>3</sup>/d)  
Fig.4 The distribution of drawdown in steady state under the scenario of linear well array (12 500m<sup>3</sup>/d)

在该开采方案下,开采井的最大水位降深为4.39m,开采井的影响主要集中在河谷区,黄土梁茆区的水位降深较小。应该指出,12 500m<sup>3</sup>/d是在开采强度较低或在河谷区开采地下水时的最大可开采量。如果开采区域的富水性、渗透性能等开采条件越好,那么对应的最大可开采量也会越大;反之含水层富水性越差、渗透性越差,对应的最大可开采量也就越小。

由于靖边志丹地区分布着丰富的矿产资源,油田的开采可能使供水井的分布受到限制,不能布设在富

水性较好、补给量较大的河谷区。为此,根据本文所建立的模型,模拟均匀布井开采地下水的情形,与在河谷区以线状布井的方式进行对比。均匀布井时,开采井之间的距离为4km,单井开采量为500m<sup>3</sup>/d,则对应的总开采量为12 500m<sup>3</sup>/d。均匀布井的降落漏斗分布如图5所示。

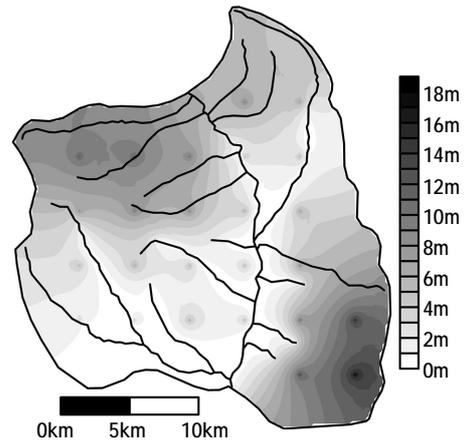


图5 平均布井方案下稳定降深分布(12 500m<sup>3</sup>/d)  
Fig.5 The distribution of drawdown in steady state under the scenario of distributing well array (12 500m<sup>3</sup>/d)

从图5可以看出,在研究区内采用平均布井的方式开采地下水时,开采井的水位降深存在着明显的空间差异性。一般来说,地下水补给量大,富水性好的区域降深小,例如河谷区附近;而地下水补给量小,富水性差的区域降深大,例如分水岭附近。此外,由于分水岭或黄土梁茆附近的开采井不能较好地截取地下水向河流的排泄减量,模型计算的水位降深非常大,不利于地下水的长期开采。均匀布井的方式也使得一些开采井位于地下水埋深较大的梁茆区,极大地增大了钻井成本。同时与线状布井的方式相比,均匀布井将导致开采井极为分散,不利于运行管理。

#### 4 结论

(1)志靖地区河谷区的富水性较好,地下水开采井应该尽量布设在河谷区,并且满足线状开采强度小于600~800m<sup>3</sup>/d·km<sup>-1</sup>,各开采井间距应该合理配置,单井开采量较大时,应适当增大井间距,以保证地下水位不出现大幅度的下降。

(2)志靖地区地下水的开采量主要取决于地下水的排泄减量,单井开采量相同的条件下,靠近分水岭的开采井引起的水位降深较大,靠近河谷区的开采井引起的水位降深较小。

## 参考文献:

- [1] 周明月, 王文刚, 朱首军, 等. 黄土高原沟头侵蚀柔性防护措施研究[J]. 水土保持研究, 2019,26(3):13-16+21. (ZHOU Mingyue, WANG Wengang, ZHU Shoujun, et al. Study on flexible protection measures for gully head erosion in Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3):13-16+21. (in Chinese))
- [2] 石辉, 刘秀花, 陈占飞, 等. 陕北榆林毛乌素沙地大规模土地整治开发的生态环境问题及其对策[J]. 生态学杂志, 2019,38(7):2228-2235. (SHI Hui, LIU Xiuhua, CHEN Zhanfei, et al. Eco-environmental problems and their solution strategy for large-scale land consolidation and development in Mu Us sandy land of Yulin in North Shaanxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(7):2228-2235. (in Chinese))
- [3] 刘志仁. 陕北能源开发与生态环境保护法律对策研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009,(1):20-25. (LIU Zhiren. Energy exploitation and ecological environment protection law research in North Shaanxi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009,(1):20-25. (in Chinese))
- [4] 薛亚莉, 陈乃联, 刘小学. 志丹县地下水资源开发利用与保护研究[J]. 人民黄河, 2013,35(2):58-60. (XUE Yali, CHEN Nailian, LIU Xiaoxue. Research on the utilization and protection of groundwater resources of Zhidan County [J]. Yellow River, 2013,35(2):58-60. (in Chinese))
- [5] 史晓琼, 杨泽元, 张艳娜, 等. 陕北高强度采煤对生态环境影响的研究进展[J]. 煤炭技术, 2016,(1):314-316. (SHI Xiaojiong, YANG Zeyuan, ZHANG Yanna, et al. Reviews of influence by high-intensity coal mining on ecological environment in Northern Shaanxi [J]. Coal Technology, 2016,(1):314-316. (in Chinese))
- [6] 李万明, 黄程琪. 西北干旱区水资源利用与经济要素的匹配研究[J]. 节水灌溉, 2018,275(7):93-98. (LI Wanming, HUANG Chengqi. The study of matching between utilization of water resource and economic factors in the northwest arid area of China [J]. Water Saving Irrigation, 2018,275(7):93-98. (in Chinese))
- [7] 王思佳, 刘鹤, 赵文智, 等. 干旱、半干旱区地下水可持续性研究评述[J]. 地球科学进展, 2019,34(2):210-223. (WANG Sijia, LIU Hu, ZHAO Wenzhi, et al. Groundwater sustainability in arid and semi-arid environments: a review [J]. Advances in Earth Science, 2019,34(2):210-223. (in Chinese))
- [8] 孙昭萱, 张强. 黄土高原半干旱区陆面温度和能量的气候特征分析[J]. 中国沙漠, 2011,(5):226-232. (SUN Zhaoxuan, ZHANG Qiang. Analysis of climate characteristics of land surface temperature and energy in the semi-arid region in the Loess Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2011,(5):226-232. (in Chinese))
- [9] 朱会利, 杨改河, 韩新辉. 陕北安塞县水文要素变化特征分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2011,39(8):178-184. (ZHU Huili, YANG Gaihe, HAN Xinhui. Variation characteristics of hydrological features in Ansai County [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2011,39(8):178-184. (in Chinese))
- [10] 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 resources in interior regions in the Ordos Plateau [J]. Arid Zone Research, 2005,22(4):436-441. (in Chinese))
- [11] 周仰效, 李文鹏. 地下水可持续开发:概念、原理与方法[J]. 水文地质工程地质, 2010,37(1):1-8. (ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Groundwater sustainability concepts and approaches [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010,37(1):1-8. (in Chinese))
- [12] 姜淑云, 佟永贺. 用有限元法评价代家地区地下水开采资源[J]. 水文地质工程地质, 1987,(3):45-49. (JIANG Shuyun, TONG Yonghe. Evaluation of groundwater exploitation in Daijia area by finite element method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1987,(3):45-49. (in Chinese))

## Study on Reasonable Groundwater Exploitation in Loess Area of Zhidan and Jingbian

HU Haiyang<sup>1,2</sup>, LI Jinlong<sup>1,2</sup>, KONG Detao<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, Zhang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Groundwater is main water source of Zhidan and Jingbian regions in China. Aiming at resolving its water shortage, this paper used the controlled numerical test, chosen its typical area, designed different schemes to calculate the shape of the falling funnel and maximum drawdown under different means and intensity of groundwater exploitation. The results show that it is superior to build wells by linear well pattern along the valley than that by the average well pattern in the study area. The linear mining intensity should be controlled within  $600\sim 800\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}^{-1}$ . This paper could have guiding significance for the rational exploitation of groundwater in Zhijing area.

**Key words:** groundwater resources; mining method; linear well array; loess area

胡海洋, 李金龙, 孔德涛, 王玮同志的题目为《志丹靖边黄土区地下水合理开采方式研究》的论文已于2020年3月11日在中国知网网络首发。网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20200311.1504.001.html>