

平阴县前寨—凌庄水源地地下水数值模拟

王福花,朱国庆,张诚,王峰

(山东省第一地质矿产勘查院,山东 济南 250014)

摘要:根据平阴县前寨—凌庄水源地的水文地质条件,建立了裂隙岩溶水的平面二维非稳定地下水流模型,并应用 Modflow 软件对该区地下水流进行数值模拟。在进行计算区剖分、空间离散、参数分区、边界条件及源汇项处理与模型识别、验证的基础上,通过预测分析得出:该水源地按设计开采量开采后,地下水位不会出现持续下降趋势,最大降深在允许范围之内,因而也不会诱发环境地质问题。

关键词: Modflow; 数值模拟; 地下水水源地; 平阴县

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

1 水源地概况

1.1 地下水动态

平阴县前寨—凌庄水源地位于平阴县城西 12 km 处,呈 SE—NW 向椭圆形分布,面积 74.51 km²。地形总趋势南高北低,由低山丘陵→山间谷地→黄泛平原,标高大于 80 m。该区属暖温带大陆性半湿润季风气候,多年平均降水量 611.3 mm,多年平均蒸发量 1 975.1 mm。

在自然状态下,来自上游的侧向径流为该水源地地下水的主要补给来源,其次为接受大气降水入渗的直接补给。地下水由南向北缓慢径流。向下游径流、人工开采和丰水期的潜水蒸发为地下水的排泄方式。

水源地地下水水位动态主要受降水和农业开采的影响,呈季节性变化。地下水位埋深 3.09~8.00 m,年变幅 1.47~5.18 m,水位高峰值出现于 8 月下旬以后,滞后降水集中期一个月左右,最长滞后两个月以上。

1.2 水文地质条件

水源地分布有寒武纪、奥陶纪地层及第四纪黄河组,其中张夏组以中厚层鲕粒灰岩及藻灰岩为主,厚 160~180 m;崮山组为黄绿色页岩夹薄层灰岩及

竹叶状灰岩,厚 43~45.9 m;炒米店组为中厚层云斑灰岩夹泥质条带灰岩、竹叶状灰岩,厚 80~120 m;三山子组为薄层微晶白云岩与砾屑白云岩互层,上部为含燧石结核及条带微晶白云岩,为水源地主要富水层位,厚 135.0~160.0 m;黄河组为粉质黏土夹粉细砂,厚 15~18 m。水源地内断层不发育,东部发育有煌斑岩(黄山岩脉),走向 NNW,近于直立,长 16 km,宽 7 m,起阻水作用。

前寨—凌庄水源地位于泰山背斜北翼平阴单斜构造岩溶水文地质亚区,分布有松散岩类孔隙含水岩组和碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组,后者又分为三山子组白云岩裂隙岩溶含水亚组和炒米店组灰岩岩溶裂隙含水亚组。地段内三山子组白云岩裂隙岩溶十分发育,富水性强,单位涌水量大于 1 000 m³/(d·m),构成主要含水层。第四系孔隙水与三山子组裂隙岩溶水间无稳定的隔水层,水力联系密切,构成统一的潜水—微承压水含水体系。炒米店组各类灰岩裂隙岩溶发育微弱,富水性差,透水性弱,为地段内的相对隔水底板。

根据该水源地水文地质条件,建立了裂隙岩溶水的平面二维非稳定地下水流模型,并应用 Modflow 软件进行求解。Modflow 采用单元中心有限差分法模拟地下水在含水层中的运动,有限差分方程组用强隐式法和超松弛因子法进行求解^[1,2]。根据计算

* 收稿日期:2008-07-10;修订日期:2009-05-12;编辑:游文澄

作者简介:王福花(1971—),女,山东滨州人,工程师,主要从事水工环勘查工作。

结果,预测该水源地按 17 000 m³/d 设计开采量开采后的地下水位下降趋势,探讨了可能诱发的环境地质问题,为水源地合理开采提供地质依据。

2 数值模型的建立

2.1 水源地的边界条件

水源地位于平阴单斜岩溶水水文地质单元的汇集排泄区。东部的黄山岩脉和西部的龙桥—圣母山一线分水岭视为隔水边界;南部以详查工程的实际控制界限为径流补给边界;北部的黄河在自然条件下为径流排泄边界,开采条件下部分地段可转化为径流补给边界。下部边界以炒米店组泥质条带灰岩为隔水底板,上部边界将含水层的顶板与其外部进行水量垂向交换的界面,视为源汇项(图1)。

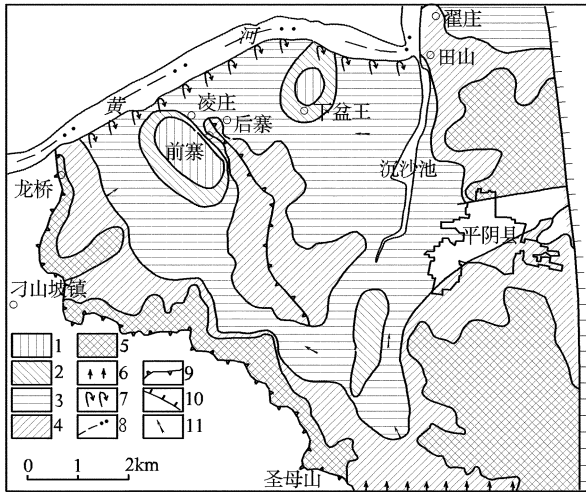


图1 水源地水文地质概念模型图

1—富水性强区;2—富水性较强区;3—富水性中等区;4—富水性较差区;5—富水性差区;6—流量补给边界;7—流量排泄-补给边界;8—弱透水边界;9—分水岭;10—隔水边界;11—地下水流向

2.2 数值模型的建立

根据区内岩溶含水层的水文地质特征,将水源地含水层概化为非均质、各向同性的平面二维非稳定地下水流模型。根据质量守恒原理,可建立如下的渗流数学模拟模型^[3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} [T_x \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [T_y \frac{\partial h}{\partial y}] + w = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y) \in D, t \geq t_0$$

$$h(x, y, t) |_{t=t_0} = h_0(x, y) \quad (x, y) \in D$$

$$\frac{\partial h}{\partial n} |_{(x, y) \in \Gamma_1} = 0 \quad t \geq t_0$$

$$T_n \frac{\partial h}{\partial n} |_{(x, y) \in \Gamma_2} = q(x, y, t) \quad t \geq t_0$$

式中: x, y 为平面坐标(m); T 为导水系数(m²/d); h 为水头(水位)标高(m); μ 为储水系数/给水度(无量纲); h_0 为初始水头(水位)标高(m); $\frac{\partial h}{\partial n}$ 为 h 沿外法线方向 n 的导数; D 为渗流区域(计算区范围); T_n 为二类已知流量边界法向导水系数(m²/d); t 为时间(d); t_0 为初始时间(d); Γ_1 为含水层渗流区域二类零流量边界; Γ_2 为含水层渗流区域二类已知流量边界; q 为 Γ_2 上的流量(m³/d)。

2.3 计算区剖分与资料处理

2.3.1 计算区剖分

计算模拟区面积为 74.51 km²,按 100 m × 100 m 离散成 1 个单元,利用 Modflow 可将平阴单斜岩溶水水文地质单元离散成 7 391 个单元。对每个计算单元分别输入相应的参数值和各类补排量,然后把所有单元结合在一起,利用 Modflow 自动计算每个单元及全区的水均衡及地下水位。

2.3.2 计算时段的确

选取区内地下水动态监测、开采量调查等系列动态资料较丰富时段,即从 2003 年 11 月 16 日至 2004 年 10 月 20 日,共计 340 天,作为数值模型的校正识别期。模拟模型的验证期选择水源地勘探期间进行的群孔抽水试验时段,即从 2005 年 1 月 16 日至 2005 年 1 月 31 日,累计 15 天。抽水试验期之所以选择在冬季进行,是因为这一时段无降水和农田灌溉,干扰因素少,因此能够较好地验证该区含水层水文地质参数的可靠性。2005 年 2 月至 2010 年 2 月为预测期,共计 5 年。

2.3.3 参数划分和水文地质参数初值的确定

本次计算选取的参数有渗透系数、给水度等,其初值是利用已有的单孔及群孔抽水试验成果确定的。其中平阴东关和南部边界附近采用了三组多孔抽水试验资料,而前寨—凌庄附近则采用了群孔抽水试验资料。从抽水试验产生的水位降深分布看,区内地下水均符合博尔顿(N. S. Boulton)井流模型^[4],故利用多孔抽水试验资料采用博尔顿模型配线法计算水文地质参数。水源地东南部的沉砂池附近第四系孔隙含水层的渗透系数,采用单孔简易抽水试验资料,用试算法求得(表1)。

2.3.4 源汇项的处理

大气降水为水源地最主要的补给来源,各分区

表1 导水系数、给水度初值

孔号	S15	ZK3	ZK1	S16	S71	S21	ZK5	S69	S125	S36	S50
导水系数 $T(m^2/d)$	3553.72	4472.52	4104.20	4834.04	8794.70	8794.70	4088.16	3971.80	1300.00	1377.40	326.87
给水度 μ	0.0075	0.0065	0.0071	0.0106	0.0054	0.0140	0.0056	0.0071	0.0071	0.0130	0.0094

降水入渗系数根据水位动态观测资料计算给出初值;引黄灌溉入渗量由引黄灌溉水量、引黄灌溉入渗系数、分区面积等计算给出初值;地下水开采量则直接加在相应的各剖分节点上,近似概化为在一个差分段内井流量是均一的;井灌回渗补给量由于在处理井灌开采量时已将井灌回渗量扣除,因此概化为零;侧向流入、流出量以单宽流量计;水源地开采排泄按点状排泄处理。

3 模型的识别与验证

3.1 模型的识别

校正识别期选取2003年11月16日至2004年10月20日,共计340天,经历了枯水期、丰水期、平水期,反映了一个完整水文年内地下水水位升降变化及其相关因子的特点。根据抽水试验资料计算的水文地质参数,将导水系数分成16个区、储水系数(给水度)分成10个区(图2,图3)。

首先对所有单元作区域拟合,进而对区内有代表性的10个岩溶水水位观测孔作重点拟合。将这10个观测孔的计算水位与实测水位做一对比,其拟合绝对误差一般小于0.4m(表2)。因此,在计算水位满足精度要求的条件下,所对应的参数系列可作为数值模型的优化参数。

3.2 模型的验证

选择本次勘探期间进行的群孔抽水试验资料对数值模拟模型进行验证。抽水试验时间为2005年1月16日至2005年1月31日,历时14天,水位恢复1天,数值模型计算输出的水位与实测水位接近(表3)。

由表3可以看出,群孔抽水试验期间岩溶水实测水位与模型计算水位吻合程度较好,拟合误差一般小于0.2m,说明建立的数值模型具有较高的仿真度,能够真实地反映平阴单斜岩溶水水文地质单元的水文地质特征。

4 模型的预报应用

经过模型的识别和检验,证明所建立的数值模型能够真实地反映水源地地下水水位变化,可以用

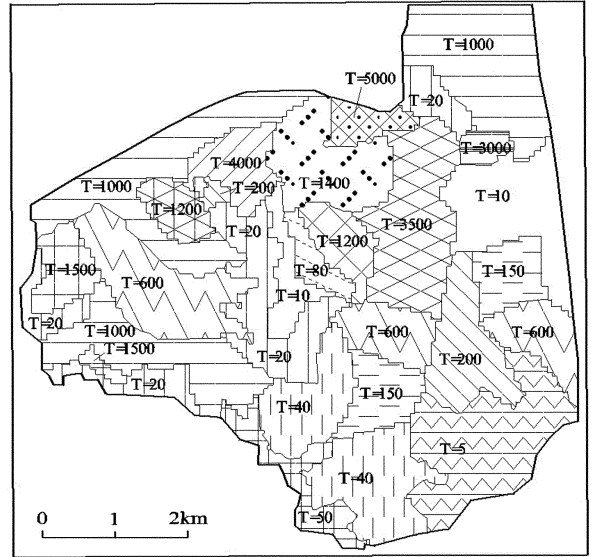


图2 导水系数(T)分区图

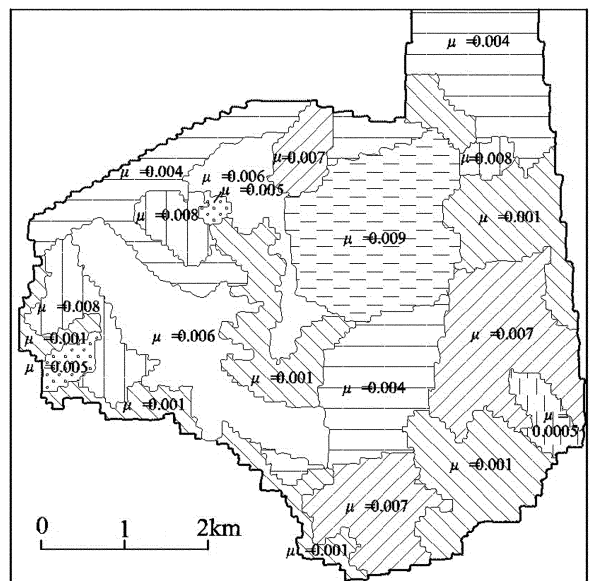


图3 储水系数(给水度 μ)分区图

表2 模型识别期实测水位与计算水位拟合

时间	观测孔岩溶水水位(m)											
	S13		S16		S38		S65		S101		S146	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
2003-12-01	34.48	34.36	33.89	33.90	38.00	37.78	34.30	34.29	45.63	45.39	33.96	33.92
2004-01-01	34.51	34.50	33.87	33.96	37.88	37.76	34.33	34.52	45.15	45.28	33.89	33.88
2004-02-01	34.51	34.40	33.80	33.90	37.65	37.86	34.26	34.46	44.24	44.35	33.80	33.92
2004-03-01	34.11	34.53	33.46	33.86	37.32	37.43	34.11	34.51	42.88	42.99	33.73	33.89
2004-04-01	33.96	34.10	33.55	33.85	37.58	37.60	33.91	34.16	40.92	40.91	33.35	33.25
2004-05-01	33.85	33.76	32.89	32.60	33.40	33.21	33.49	33.79	39.58	39.58	31.43	31.73
2004-06-01	33.82	34.41	33.17	33.56	35.49	35.78	33.46	33.76	38.29	38.28	33.17	33.45
2004-07-01	33.84	34.41	34.08	34.48	36.70	37.10	34.08	34.48	41.29	41.29	33.88	34.02
2004-08-01	34.52	34.52	35.54	35.15	38.20	38.58	35.54	35.75	45.63	45.63	35.44	35.46
2004-09-01	34.87	35.20	35.80	35.40	38.86	39.16	35.96	36.30	47.34	47.35	35.92	35.56
2004-10-01	35.24	35.31	35.13	34.83	39.10	39.10	35.59	35.50	47.28	47.00	35.16	34.76

表3 模型验证期实测水位与计算水位拟合

时间	钻孔抽水试验岩溶水水位(m)											
	ZK1		ZK5		ZK3		S16		S146		S68	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
2005-01-16	33.51	33.70	33.55	33.75	33.56	33.76	33.50	33.50	33.14	33.19	35.34	35.21
2005-01-17	32.91	33.05	32.95	33.15	32.94	33.12	32.90	32.85	31.60	31.50	35.37	35.25
2005-01-18	32.65	32.75	32.68	32.83	32.68	32.82	32.65	32.51	31.21	31.10	35.35	35.11
2005-01-19	32.53	32.62	32.55	32.66	32.55	32.68	32.55	32.41	31.56	31.41	35.34	35.40
2005-01-20	32.34	32.42	32.38	32.50	32.38	32.50	32.37	32.31	30.73	30.79	35.32	35.17
2005-01-21	32.25	32.32	32.28	32.36	32.27	32.40	32.29	32.24	30.60	30.65	35.34	32.40
2005-01-22	32.19	32.22	32.22	32.30	32.22	32.30	32.23	32.30	30.54	30.64	35.38	32.29
2005-01-23	32.11	32.12	32.14	32.18	32.13	32.18	32.16	32.25	30.46	30.16	35.36	35.31
2005-01-24	32.06	32.09	32.09	32.14	32.08	32.13	32.11	32.26	30.41	30.47	35.35	35.39
2005-01-25	31.98	32.99	32.02	32.07	32.00	32.05	32.04	32.19	30.31	30.41	35.36	35.34
2005-01-26	31.93	31.96	31.96	32.19	31.95	31.91	31.99	31.85	30.25	30.05	35.36	35.38
2005-01-27	31.89	31.98	31.92	31.98	31.91	31.87	31.95	31.81	30.20	30.29	35.36	35.31
2005-01-28	31.87	31.97	31.90	31.95	31.88	31.91	31.94	31.80	30.16	30.21	35.38	35.33
2005-01-29	31.78	31.89	31.81	31.87	31.80	31.80	31.85	31.81	30.08	30.09	35.37	35.33
2005-01-30	32.29	32.09	32.32	32.12	32.31	32.15	32.45	32.21	30.90	30.79	35.36	35.25

来对地下水运动状态进行预报。

4.1 地下水资源量情况

4.1.1 区域地下水资源量

该地下水系统补给资源量由降水入渗补给量、侧向径流补给量、黄河侧渗补给量和引黄河水灌溉入渗补给量四项构成。多年平均降水入渗补给量为

34 990.93 m³/d;侧向径流补给量为 3 510.00 m³/d;黄河侧渗补给量为 9 180.00 m³/d,沉砂池渗漏补给量为 3 591.50 m³/d;灌溉入渗补给量为 1 193.79 m³/d。该地区多年平均地下水补给资源量为 52 466.22m³/d。

现状开采条件下本区地下水的天然排泄量为潜

水蒸发量与向下游的侧向径流排泄量之和。潜水蒸发量为 3 582.90 m³/d。计算区域仅在北部边界的东端存在侧向径流排泄,侧向径流排泄量为 639.21 m³/d。水源按允许开采量开采,其地下水天然排泄量为 4 222.11 m³/d。

区域地下水开采量为 48 243.85 m³/d。该区地下水实际开采总量为 17 600.00 m³/d,包括工业和城市供水开采量 12 244.00 m³/d,以及农田灌溉开采量 4 766.84 m³/d(扣除回渗量后)。区域地下水剩余开采量为 31 233.27 m³/d。

4.1.2 水源允许开采量

该水源采用集中开采模式,为了使允许开采量更加合理,水源集中开采时应满足 3 个约束条件,即:①最大允许开采量小于区域地下水剩余开采量,且单井开采量大于 4 000.00 m³/d;②最大水位埋深小于 15 m,即最低水位标高不低于隐伏三山子组白云岩的顶板,以避免岩溶塌陷地质灾害的发生;③区内已有水源和自备井集中地段的干扰降深小于 0.1 m。

计算允许开采量时,首先对两条相互平行的隔水边界进行了反复映射处理,映射时将 4 眼井概化为由其所限定范围中心的一眼“大井”,再用“大井”对边界进行映射。共映射了 20 眼“大井”,用仿泰斯公式进行计算,四眼井在满足约束条件时最大允许开采量为 17 041.20 m³/d。

4.1.3 允许开采量保证程度分析

在水源地开采条件下,西部地下水子系统的补给组成除直接接受大气降水入渗补给和来自南部边界的侧向径流补给外,还将激发产生侧向径流补给(Q_增),其中来自北部边界的侧向径流补给量为 7 952.08 m³/d,东部地下水子系统(寨山北局部地段)的侧向径流补给量为 2 650.69 m³/d,共计 10 602.77 m³/d。在设计开采量条件下,地下水系统向下游的侧向径流量不仅被袭夺过来,还可夺取黄河北岸的侧渗量 4 515.70 m³/d。通过地下水均衡计算,前寨—凌庄水源地按允许开采量进行开采,其丰、平、枯水年地下水均处于正均衡状态,分别为 5 023.77, 2 360.42, 31.14 m³/d。计算结果还显示,即使在保证率为 95% 的极枯年份,地下水处于均衡差为 -2 715.74 m³/d 的负均衡状态下,也只要动用部分调节储存量就能使开采资源量得到完全补偿。因此,水源地允许开采量是有充分保证的。

4.2 模型的预报应用

为提高水源地允许开采量的保证程度,需要对最大水位降深进行预测,同时检验含水层的调蓄能力,按特枯年(降水量 319 mm,保证率 95%)、枯水年(降水量 467 mm,保证率 75%)、平水年(降水量 592.5 mm,保证率 50%)、丰水年(降水量 736 mm,保证率 25%)的降水组合系列进行 5 年的预报计算。

平阴县前寨—凌庄水源地设计开采量为 17 000 m³/d,利用经过识别校正的有限差分数值模型计算了各典型年的高、低水位。水位预报结果表明(图 4),在开采过程中,逢枯水年的枯水期,水位降深虽然相对较大,但最大水位降深仍未超过最大允许降深值。从预测的整个平阴单斜岩溶水水文地质单元最低水位分布来看(图 5),水源地周围并未出现大型的降落漏斗,可见水位降深对水源地地下水开采影响较小,这也说明平阴单斜岩溶水水文地质单元汇集排泄区有较大的调蓄功能。因此,平阴县前寨—凌庄水源地按 17 000 m³/d 的设计开采量进行开采是有补给保证的。

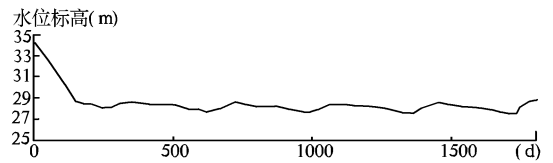


图 4 水源地开采后预测的水位动态曲线图

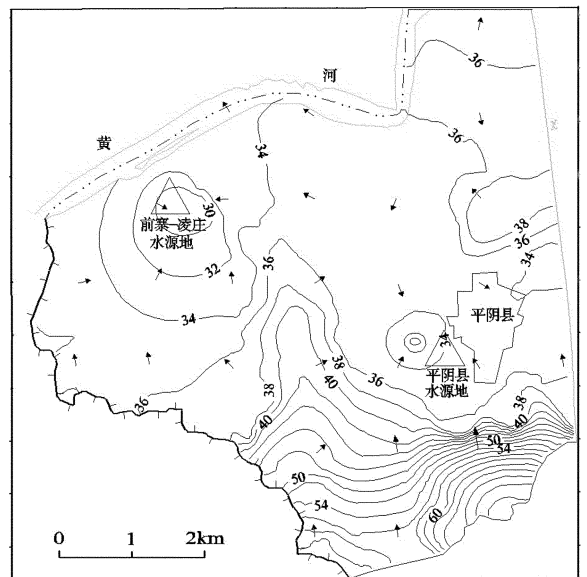


图 5 水源地开采后预测的最低水位等值线图

5 结论

(1)经数值模型识别和验证,计算水位与实测水位拟合良好,证明所建立的数值模型能够真实地反映水源地地下水水位变化特征,用该模型预测评价平阴县前寨-凌庄水源地允许开采量具有较高的精度。

(2)通过对平阴县前寨-凌庄水源地数值模拟预测,认为水源地按设计开采量 $17\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 进行开采,水资源补给是有保证的。预测水源地开采后最低水位标高仍在第四系底板之上,不会对水源地

产生不利影响,不会发生水源枯竭、地面塌陷等环境地质问题。

参考文献:

- [1] 李平,卢文喜,李俊. 蒲石河抽水蓄能电站水库三维渗流数值模拟[J]. 水文地质工程地质,2008,35(220):95-98.
- [2] 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(自然科学版),2004,20(4):325-328.
- [3] 孙纳正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [4] 薛禹群,朱学愚,吴吉春,等. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社,1997.

Numerical Simulation of Gound Water in Qianzhai – Lingzhuang Water Source in Pingyin County

WANG Fu – hua, ZHU Guo – qing, ZHANG Cheng, WANG Feng

(No. 1 Exploration Insitute of Geology and Mineral Resources, Shandong Jinan 250014, China)

Abstract: According to hydro – geological condition of Qianzhai – Lingzhuang water source, two – dimensional unstable groundwater flow model of fracture – karst water is set up. By using modflow software, numerical simulation of groundwater flow in this area is carried out. On the basis of calculating the area subdivision, spatial dispersion, geographical parameters, boundary conditions and sources conduction, model recognition and identification, after the predication and analysis, it is regarded that the groundwater level will not declining continuously after the mining exploitation according to the design. The largest declining depth will be kept within the permitted scope. Thus, it will not cause environmental geological problems.

Key words: Modflow; numerical simulation; underground water source; Pingyin county