

基于数值模型的地下水水位预警体系研究 ——以临汾盆地为例

白利平^{1,2} 王业耀¹ 王金生²

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:地下水是中国许多城市主要的供水水源,对地下水的过量开采将导致地下水降落漏斗、地面沉降和地裂缝等环境地质问题。进行地下水水位预警体系的研究对于合理开发和有效利用地下水资源具有重要的现实意义,笔者以临汾盆地为例,根据当地的水文地质条件,利用数学模型建立了地下水水位预警体系,研究结果可为当地水资源的可持续利用提供科学依据。

关键词:地下水;地下水水位预警;数学模型

中图分类号:P641.74 **文章标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)01-0246-08

地下水是中国许多城市的主要供水水源,地下水水质好、分布广泛、变化稳定、便于利用,因此是良好的供水水源,对人类工农业生产和人类生活都起着重要作用。但对地下水的开采不能违背客观规律,如果开发利用不当会破坏原有的水文循环,产生系列的环境问题,如地面沉降、沼泽湿地疏干、水质恶化、海水入侵等环境问题。长期以来对地下水的过量开采在中国许多地区造成了地质环境问题,根据中国地质调查局 2005 年《中国地下水资源与环境调查成果报告》^①,中国 50 多个城市不同程度出现了地面沉降和地裂缝灾害,沉降面积扩展到 9.4 万 km²;全国出现地下水降落漏斗 180 多个,总面积约 19 万 km²,海水入侵面积逐年扩大,北方土地荒漠化面积有所增加。因此,建立地下水水位的预警模型对于合理利用地下水资源、减少地质环境负效应方面具有重要的意义。笔者以临汾盆地为例,进行了地下水水位预警体系研究,研究成果可为当地水主管部门和各级政府决策提供科学依据。

1 临汾盆地概况

临汾盆地位于山西省西南部,行政区主要包括洪洞县、临汾市、襄汾县、曲沃县、翼城县、侯马市、新绛县、稷山县、河津市和万荣县(图 1)。自 20 世纪 70 年代以来,因地下水的过量开采导致了地下水降落漏斗、地面沉降和地裂缝等环境地质问题,引发了尖锐的水资源供需矛盾,极大地制约了临汾盆地各地区的经济发展^①。据统计^{②③},1986 年临汾市地下水位降落漏斗分布区域面积已达 50 km²,自 1992 年到 2000 年,地下水水头降幅在 3m/a 左右。临汾市地裂缝灾害自 1976 年发现以来,已经发育成 6 个地裂缝灾害区域,造成市中心建筑物楼房开裂破坏;大面积农田灌溉用水漏失;多处公路被切断裂开;铁路也存在着潜在的危机^{①-③}。

1.1 临汾盆地水文地质概况

临汾盆地第四系包括下更新统、中更新统、上更新统与全新统^④。下更新统(Q₁)为一套黄褐色、灰黄

收稿日期:2008-05-27;改回日期:2008-08-01

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999043606)资助。

作者简介:白利平,男,1979 年生,工程师,博士生,主要从事环境数值模拟研究工作;E-mail:bclrp@163.com。

① 中国地质环境监测院. 全国地下水资源与环境调查取得最新成果, 2005. <http://www.cigem.gov.cn>.

② 山西省地质矿产局第二水文地质工程地质队. 山西省临汾地区水文地质编图及临汾盆地地下水资源评价报告, 1987.

色、深灰色亚砂土、亚粘土、砂及砂砾石层,该层广泛分布于盆地中,在盆地中部厚 200 m 左右;中更新统(Q₂)为一套砂、亚砂土、亚粘土互层的湖相为主、河流相次之的堆积物,岩性自边山到盆地中部由粗变细,自上而下则是由细到粗,该层厚约 150 m;上更新统(Q₃)在山前倾斜平原地区为洪积的砂砾石夹亚砂土,在河谷附近主要是河湖相沉积的亚砂土、亚粘土,该层厚度 30~50 m;全新统(Q₄)岩性为亚砂土、亚粘土及砂和砾石,该层主要分布在汾河一、二级阶地,一级阶地厚 0~10 m,二级阶地厚 0~20 m。

临汾盆地四周环山,山区风化产物和土状堆积物被水流带到盆地地区,形成了巨厚的松散层堆积物,特别是粗粒碎屑物的孔隙是地下水储存的良好场所。根据含水层的埋深及水力特征,盆地内松散岩类孔隙水可划分为潜水、中层承压水和深层承压水。

潜水含水岩组在盆地中部为上更新统及全新统,在黄土台塬区及山前倾斜平原区为中更新统上部,含水层多呈带状分布,且有上游颗粒粗、下游颗

粒细的特点。潜水含水层底板埋深 30~100 m,含水层以冲洪积的中细砂为主,有时含砾石。

中层承压水含水层底板埋深为 150~200 m,含水岩组为中更新统冲洪积、湖积砂层,是本区地下水的主要开采对象。西部山前以洪积为主,含水层厚度大,颗粒粗,具备良好的储水条件;东部山前以洪积为主,含水层颗粒细,储水条件较西部差;在盆地中部中层为河湖积相堆积,含水层颗粒较细,但厚度大。

深层承压水底板埋深 350~400 m,含水岩组为下更新统,地下水赋存条件及分布规律与中层水基本一致,深层含水岩组目前不是本区的主要开采对象。

研究区潜水的补给来源主要是降水入渗、地表水体渗漏和侧向径流补给,排泄主要是人工开采,其次是通过汾河排泄和蒸发排泄。中层承压水和深层承压水的补给来源主要是山区侧向补给,人工开采是承压水的主要排泄方式。中层承压水与潜水通过弱透水层存在越流补排关系。图 1 为临汾盆地区域水文地质图,图 2 为图 1 中 A-A'地质剖面图。

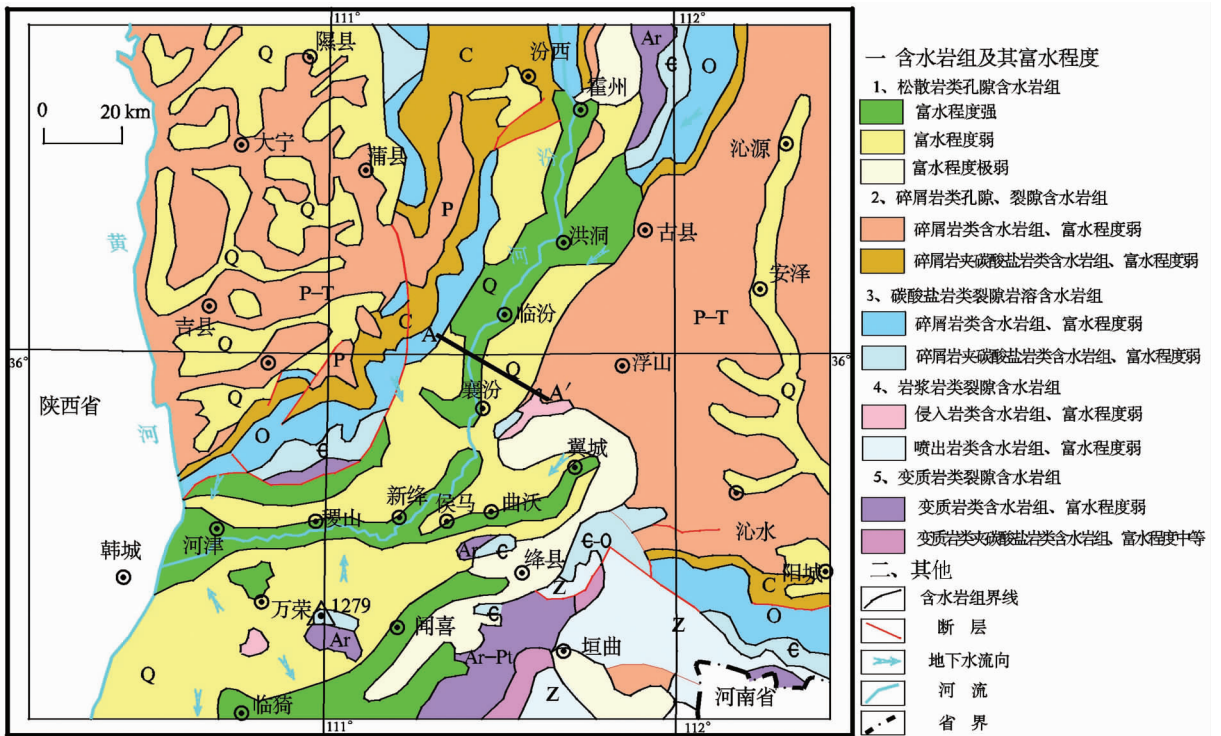


图 1 临汾盆地区域水文地质图
Fig.1 Regional hydrogeological map of Linfen basin

① 山西省地质矿产局第二水文地质工程地质队,山西省临汾地区水文地质编图及临汾盆地地下水资源评价报告,1987。
② 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,中华人民共和国水文地质图集,1979。

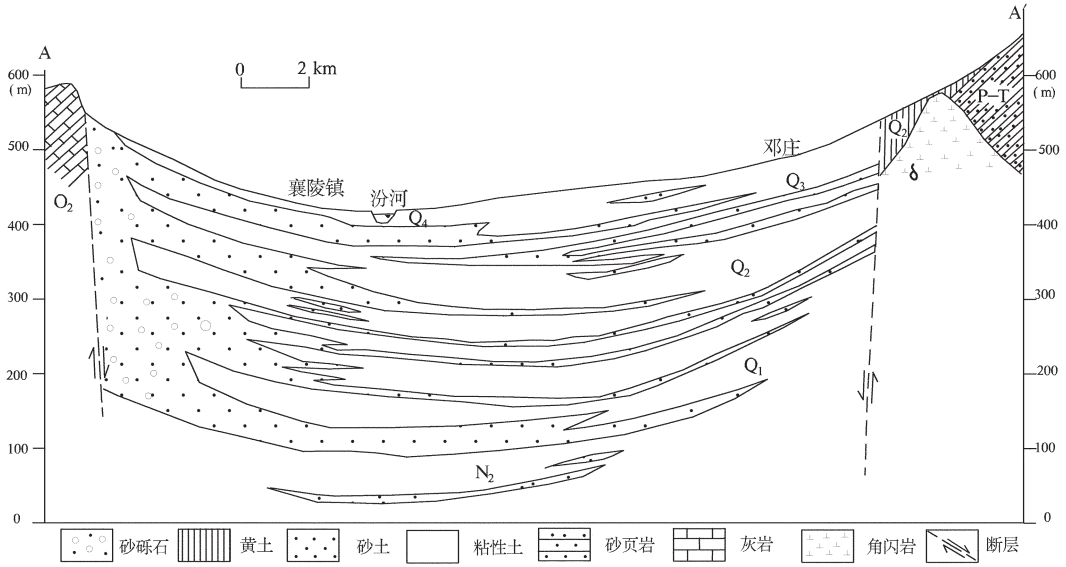


图2 临汾盆地 A-A'地质剖面图

Fig.2 Geological section of Linfen basin (A-A')

1.2 临汾盆地地下水动态分析

地下水的动态主要受地形、地貌、水文气象、地表水渗漏和人工开采的影响，临汾盆地目前对地下水的主要开采对象为潜水和中层承压水。盆地潜水的输入方式主要包括降水入渗，侧向径流输入和地表水体渗漏，输出方式包括蒸发、人工开采以及径流排泄输出；中层水的输入方式为侧向径流补给和潜水的越流补给，输出方式主要是人工开采。综合以上影响因素，临汾盆地内地下水动态的主要制约因素为降水入渗因素和人工开采因素。

1.2.1 地下水水位的年内变化

浅层地下水动态一般为降雨入渗-径流型 (图

3)、径流-开采型(图 4)。潜水水位的年内变化特征为峰值多出现在 2—4 月份。

中层水地下水动态主要受径流和人工开采的影响，多为径流-开采型和开采-下降型(图 5~6)。中层水一般在 9、10 月份出现一个低值，这是由于人为集中开采的结果。

1.2.2 临汾盆地地下水年际水位动态

根据 1984—1999 年的临汾盆地地下水水位监测资料，临汾盆地潜水水位年际动态变化不大 (图 7~8)，但总体上潜水水位有逐年下降的趋势；盆地承压水水位主要受开采量控制，在同一年内水位回升不明显，年际动态曲线均为逐年下降(图 9~10)。

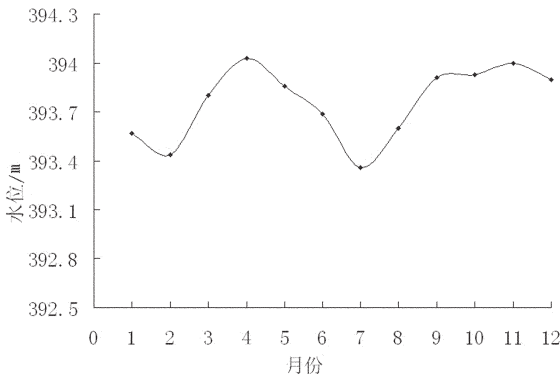


图3 河津潜水观测井 2000 年水位变化曲线图

Fig.3 Variation of groundwater level in the observation well of the phreatic aquifer in Hejin in 2000

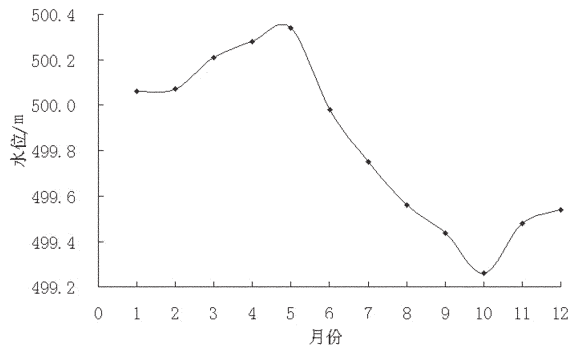


图4 洪洞潜水观测井 1999 年水位变化曲线图

Fig.4 Variation of groundwater level in the observation well of the phreatic aquifer in Hongdong in 1999

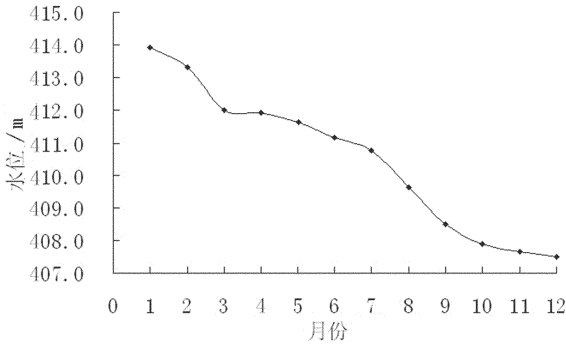


图 5 洪洞中层水观测井 2000 年水位变化曲线图
Fig.5 Variation of groundwater level in the observation well of the confined aquifer in Hongdong in 2000

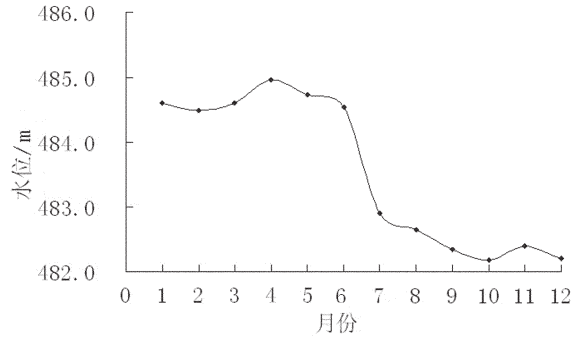


图 6 襄汾中层水观测井 1999 年水位变化曲线图
Fig.6 Variation of groundwater level in the observation well of the confined aquifer in Xiangfen in 1999

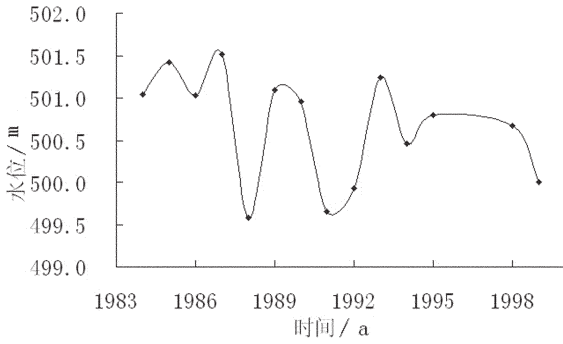


图 7 1984—1999 年洪洞潜水观测井水位变化曲线
Fig.7 Variation of groundwater level in the observation well of the phreatic aquifer in Hongdong in the period of 1984—1999

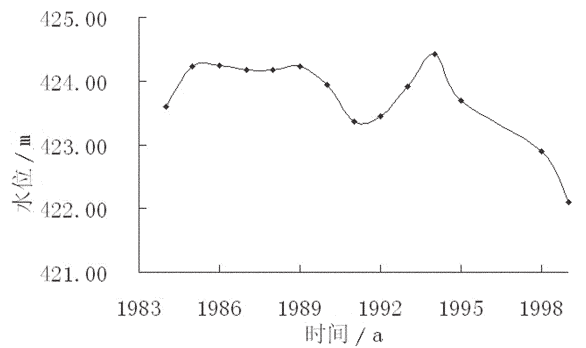


图 8 1984—1999 年襄汾潜水观测井水位变化曲线
Fig.8 Variation of groundwater level in the observation well of the phreatic aquifer in Xiangfen in the period of 1984—1999

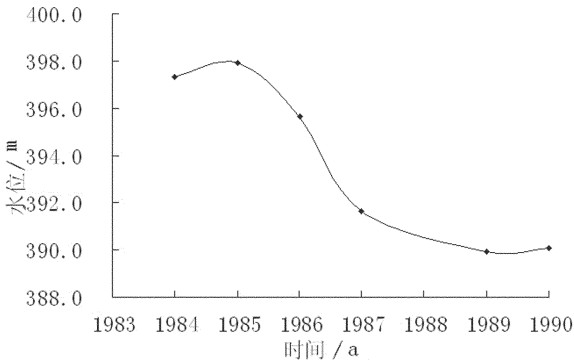


图 9 1984—1990 年襄汾承压水观测井水位变化曲线
Fig.9 Variation of groundwater level in the observation well of the confined aquifer in Xiangfen in the period of 1984—1990

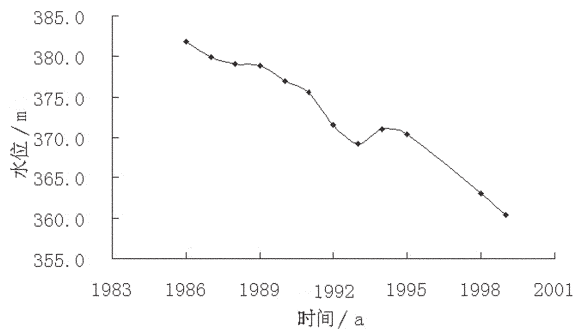


图 10 1986—2000 年侯马承压水观测井水位变化曲线图
Fig.10 Variation of groundwater level in the observation well of the confined aquifer in Houma in the period of 1986—2000

根据临汾盆地潜水及中层地下水水位年内、年际变化情况来看,潜水和中层承压水水位总体上呈现下降的趋势。当前盆地内主要的开采层位为中层承压水,因此中层水水位下降显著;潜水由于部分地区水质较差,因此对其开采量小于承压水。

2 地下水水位预警体系研究

为避免地下水水位持续下降而引发严重的环境

地质问题,有必要建立对地下水开采的预警体系,当地下水开采量达到临界开采阈值时就可发出预警信息,供有关决策部门利用。

2.1 地下水水位预警体系研究现状

预警一词最早出现于军事领域,近年来其理论在经济、社会、人口、资源、环境等各个方面得到了广泛的应用。国外水环境预警主要针对突发事件,为应对突发环境事件造成的环境事故,许多国家制定了应急措施。

中国对水环境预警的研究目前尚处于起步阶段,对地下水水位预警体系的研究始于最近几年。洪梅等^[4]建立了地下水预警的综合指标体系,建立了以GIS为核心技术的地下水预警信息系统;李宏卿等^[5]采用Visual Modflow对长春城区的地下水位进行模拟和预报,在此基础上,建立了长春城区地下水开采预警系统;王凯军等^[6]在长春地区进行了地下水水位、水质预警研究,利用地下水资源管理模型及提出的水位、水质预警标准,编制了地下水资源管理预警系统。

2.2 临汾盆地地下水水位预警体系研究

地下水水位预警的依据为地下水水位的动态变化。因此,本次研究利用GMS软件建立了地下水系统数值模型,根据模型对水位的模拟计算结果进行预警分析。

2.2.1 地下水系统数值模型的建立

为模拟地下水水位的动态变化情况,首先要建立临汾盆地地下水数值模拟模型。根据临汾盆地的水文地质条件,将研究区含水层在垂向上概化为三层,第一层为潜水含水层,第二层为弱透水层,第三层为中层承压水含水层。空间上,研究区地下水可概化成非均质各向同性、非稳定、空间三维结构的地下水流系统。

采用地下水模拟软件GMS建模,本次模拟用到的主要模块为2D SCATTER POINT模块、MAP模块与MODFLOW等模块^[7,8]。根据研究区的含水层结构及地下水流场特征,采用矩形网格进行划分,每层的有效单元数为3031个,各单元面积为1.6 km²。

以2000年1月地下水监测井监测水位作为初始流场,以2000年1月至2000年12月的水位对模型进行识别与验证,其中1—3月为模型识别阶段,4—12月为模型验证阶段。模拟共分12个应力期,每个应力期为30天。模型的识别和验证利用GMS

中的PEST和UCODE模块,结合人工调参进行。经反复拟合计算,潜水模拟水位中70.9%的误差小于0.5 m,承压水模拟水位与观测水位的误差均小于1 m。潜水观测井计算水位与观测水位误差统计情况见表1,潜水和承压水典型观测井计算水位与观测水位误差对比见图11~12。

表1 临汾盆地潜水观测井计算与观测水位误差
Table 1 Difference between observed and computed values of the observation wells in the phreatic aquifer of Linfen basin

误差范围	<0.5 m	0.5~1 m	1~1.5 m	1.5~2 m
个数	102	24	15	3
比例/%	70.9	16.7	10.4	2

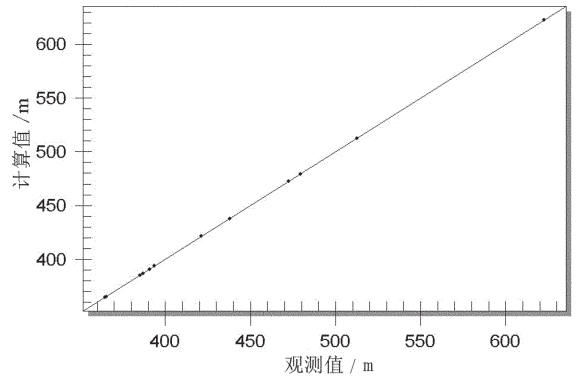


图11 2000年12月浅层水典型观测井计算水位与观测水位误差对比图

Fig.11 Contrast map of the observed and computed values in the main observation wells in the phreatic aquifer in Dec. 2000

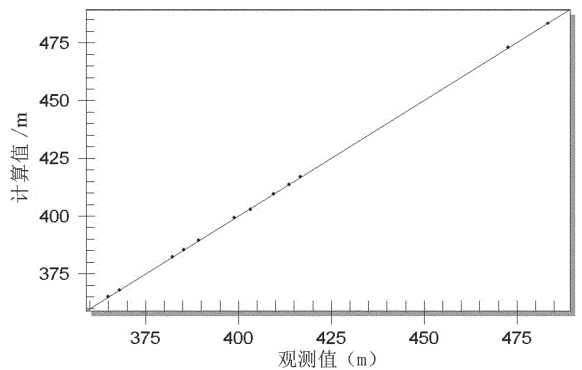


图12 2000年12月中层水典型观测井计算水位与观测水位误差对比图

Fig.12 Contrast map of the observed and computed values in the main observation wells in the confined aquifer in Dec. 2000

根据模拟计算水位与实测水位的拟合情况看,所建立的模型基本能够反映地下水系统的水流特征,模型能够反映实际的水文地质条件,可利用该模型进行地下水水位预报。

2.2.2 地下水水位预警标准的确定

根据临汾盆地水文地质概念模型及含水层岩性、厚度及富水性的差异,地下水系统中各含水层的预警水位也不相同。

预警水位一般是根据实地的水文地质条件和开采井的水位变化来确定的,如文献[5,6]中将弱透水层顶板高层作为浅层水的预警水位。

笔者认为对地下水的开采要适量,不仅不能导致含水层的疏干,还要保证开采后地下水水位不持续下降,能够达到或趋向于稳定状态,可取地下水水位达到或趋于稳定状态时的水位值作为地下水预警水位。

(1) 潜水预警水位的确定

研究区潜水含水岩组以冲洪积的中细砂为主,局部地区含砾石。潜水含水层岩性的分布受地貌所控制,一般多呈带状分布,且有上游颗粒粗、下游颗粒细的特点。潜水含水层底板埋深 30~100 m。根据潜水含水层多年水位观测结果,潜水水位总体变化趋势呈下降状态,但变化幅度小。

本次研究中潜水预警水位是利用数值模型的模拟运算得到的,在其他参数不变的情况下调整地下水的开采量进行模拟,模拟期为 10 年。首先调整数值模型中的潜水开采量(参照 2000 年的实际潜水开采量进行调整,若水位持续下降则减小开采量;若水位升高或基本不变化则加大开采量),当潜水水位在模拟期内能够达到或趋向于稳定状态,则可将此时的水位作为预警水位。根据模型模拟计算结果,在模拟期内研究区潜水水位可以达到或趋向于稳定状态,当水位达到或趋向于稳定状态时区域水位下降值一般为 5~7 m,换算至开采井中的水位约为各处含水层厚度的 1/2。因此,可取潜水含水层厚度的 1/2 处的高程作为潜水预警水位。当某处开采井潜水的水位达到预警水位时,即以红色信号表示预警,代表该处对潜水的开采已处于临界状态,如持续过量开采则会导致含水层的疏干。

(2) 中层承压水预警水位的确定

中层承压水含水岩组为中更新统冲洪积、湖积砂层。在盆地内西部山前以洪积为主,含水层厚度

大,颗粒粗,具备良好的储水条件;东部山前以洪积为主,含水层颗粒细,储水条件较西部差;在盆地中部中层为河湖积相堆积,含水层颗粒较细,但厚度大。中层承压水含水层底板埋深为 150~200 m,是本区地下水的主要开采对象。

中层承压水超采是临汾盆地地面沉降、地裂缝等灾害的主要诱发因素之一,因此,提出中层承压水的预警水位是本次研究的重点工作。

与潜水预警水位的确定类似,利用数值模型模拟运算得到中层承压水的预警水位。在其他参数不变的情况下调整中层水的开采量进行模拟,模拟期为 10 年。首先调整数值模型中的中层水开采量(参照 2000 年中层水的实际开采量进行调整,若水位持续下降则减小开采量;若水位升高或基本不变化则加大开采量),当中层水水位在模拟期内能够达到或趋向于稳定状态,则可将此时的中层水水位作为预警水位。根据模型模拟计算结果,在模拟期内研究区中层水位可以达到或趋向于稳定状态,当水位达到或趋向于稳定状态时区域水位下降值一般为 8~10 m,换算至开采井中的水位约为各处承压水隔水顶板之上 10 m 处。因此,可取含水层隔水顶板以上 10 m 处的高程作为中层承压水的预警水位。当某处中层承压水水位小于预警水位时,即以红色信号表示预警,代表该处对中层承压水的开采已处于临界状态,如持续过量开采则会导致含水层的疏干,进而可能诱发地裂缝、地面沉降等地质环境问题。

2.2.3 临汾盆地地下水水位预警演示

根据 2.2.2 中确定的地下水水位预警标准,利用数值模型模拟计算可得到临汾盆地各处的地下水临界开采量 $W_{\text{临界}}$,当某地区的实际地下水开采量 $W > W_{\text{临界}}$ 时,就可发出地下水水位预警信息,当地的水资源管理部门或相关政府决策部门可根据该预警信息采取响应的应急措施,以防止地下水水位持续下降而引发地质环境问题。

以 2000 年临汾盆地各地区对地下水的开采量作为模拟开采量,利用数值模型对地下水水位进行模拟计算,经计算,潜水中洪洞县和河津市的地下水水位已低于预警水位,其余地区地下水水位未达到预警水位;中层水中除洪洞县外,其余地区均低于预警水位。因此,洪洞县和河津市潜水需要发布预警信息;中层水除洪洞县外,均需要发布预警信息,各地区水位预警演示情况见图 13~14。

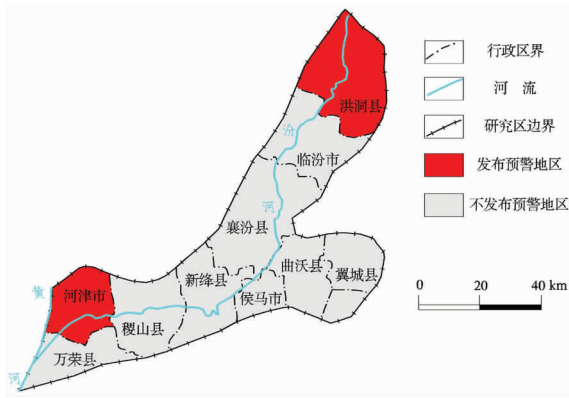


图 13 临汾盆地潜水水位预警演示图

Fig.13 Demonstration diagram of the Groundwater Level Early-warning System in Linfen basin

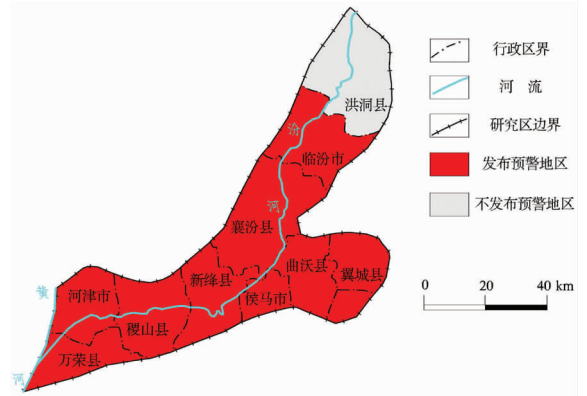


图 14 临汾盆地承压水水位预警演示图

Fig.14 Demonstration diagram of the Groundwater Level Early-warning System in Linfen basin

为便于地下水资源管理，此处以行政区为统计单元提出各地区的地下水临界开采量，计算结果见表 2。

表 2 临汾盆地各地区潜水与中层承压水临界开采量
Table 2 Recoverable resource of groundwater in Linfen basin

地区	浅层水(万 m ³)	中层水(万 m ³)
临汾市	3845	2951
侯马市	1850	1446
襄汾县	3625	3880
洪洞县	2175	2394
曲沃县	1760	1457
翼城县	1685	720
新绛县	1750	1660
河津市	4670	2350
稷山县	1600	1450
万荣县	856	640
总计	23816	18948

3 结 语

进行地下水水位预警体系的研究对于地下水资源的可持续利用、减少生态环境负效应方面具有重要的意义。地下水水位预警也是水质预警的基础，当前中国对地下水环境预警的研究尚处于起步阶段，面对日益稀缺的地下水资源，如何有效地开发、利用水资源是当前亟需解决的问题。

本文以临汾盆地为例，利用地下水数值模型建立了地下水水位预警体系，并以行政区为单元提出

了各地区潜水和中层承压水的临界开采量。研究成果可为当地水资源管理工作提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 陈素霞. 临汾市地下水超采现状 & 保护措施 [J]. 山西水利科技, 2008(1): 49-50.
Chen Suxia. On present situation of groundwater overdraft in Linfen city and protection measures [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2008 (1): 49-50 (in Chinese with English abstract).
- [2] 董东林, 武强, 孙桂敏, 等. 临汾地裂缝灾害与地下水开采相关关系 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(1): 90-93.
Dong Donglin, Wu Qiang, Sun Guimin, et al. Correlative relation between earth-fissure hazards and over-exploitation of groundwater [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28 (1): 90-93 (in Chinese with English abstract).
- [3] 董东林, 武强, 钱增江, 等. 临汾地面沉降数值模拟及其与地裂缝灾害关系研究 [J]. 工程地质学报, 2001, 9(2): 218-222.
Dong Donglin, Wu Qiang, Qian Zengjian, et al. Numerical simulation to ground fissure of surface subsidence and its relation to ground fissure hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9 (2): 218-222 (in Chinese with English abstract).
- [4] 洪梅, 赵勇胜, 张博. 地下水水质预警信息系统研究 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(4): 364-368.
Hong Mei, Zhao Yongsheng, Zhang Bo. The research on groundwater quality early warning system [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32 (4): 364-368 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李宏卿, 吴琼, 张福林, 等. Visua1Modflow 在建立长春市地下水开采预警系统中的应用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33 (3): 319-322.
Li Hongqing, Wu Qiong, Zhang Fulin, et al. An application of groundwater exploitation forecasting-alarm system based on Visual

- Modflow in Changchun[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(3):319-322 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王凯军, 曹剑峰, 徐蕾, 等. 地下水资源管理预警系统的建立及应用研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2):238-243.
- Wang Kaijun, Cao Jianfeng, Xu Lei, et al. Establishment and application of early-warning system in groundwater resource management in the urban area of Changchun[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2):238-243 (in Chinese with English abstract).
- [7] McDonald M G, Harbaugh A W, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model [M]. U.S. Geological Survey, 1988.
- [8] Harbaugh A W, McDonald M G, An update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference groundwater flow model [M]. U.S. Geological Survey, 1996.

The numerical model based groundwater level early-warning system: a case study of Linfen basin

Bai Li-ping^{1,2}, Wang Ye-yao¹, Wang Jin-sheng²

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Groundwater is the main source of water supply in many cities of China. Excessive exploitation of groundwater has brought about lots of environmental problems, such as groundwater level declining, land subsidence, and land crack. Research on the groundwater level early-warning system plays an important role in the development and utilization of groundwater resource. This paper suggests a groundwater level early-warning system based on the numerical model for Linfen basin. The result of the research provides a scientific basis for the sustainable utilization of groundwater resource.

Key words: groundwater; groundwater level early-warning system; numerical model

About the first author: BAI Li-ping, male, born in 1979, engineer, Ph. D. candidate, mainly engages in the research of numerical simulation of environment; E-mail: bcrp@163.com.

2007 年度地质、地球科学类期刊前 40 名影响因子排序表

序次	期刊名称	影响因子	序次	期刊名称	影响因子
1	地质科学	4.395	21	矿物岩石地球化学通报	1.123
2	岩石学报	3.524	22	工程地质学报	1.075
3	地球物理学报	2.823	23	现代地质	1.103
4	大地构造与成矿学	2.323	24	地球科学进展	1.103
5	地学前缘	2.306	25	沉积学报	1.053
6	矿床地质	2.145	26	地层学杂志	1.037
7	地质学报	2.090	27	矿物岩石	0.801
8	中国地质	2.082	28	地震地质	0.763
9	中国科学(D辑)	1.839	29	地质与勘探	0.751
10	石油实验地质	1.828	30	地质科技情报	0.737
11	古地理学报	1.794	31	吉林大学学报地球科学版	0.701
12	第四纪研究	1.780	32	地震学报	0.673
13	地质评论	1.773	33	地震	0.667
14	地球化学	1.662	34	中国岩溶	0.642
15	地球科学	1.657	35	海洋地质与第四纪地质	0.616
16	高校地质学报	1.621	36	地球科学与环境学报	0.576
17	岩石矿物学杂志	1.548	37	铀矿地质	0.574
18	地质通报	1.367	38	地球与环境	0.543
19	地球学报	1.278	39	沉积与特提斯地质	0.513
20	西北地质	1.175	40	新疆地质	0.503

注:表中数据引自中国科学技术信息研究所编《2008年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,北京:科学技术文献出版社。