

# 北京平原地下水水位监测网优化

董殿伟<sup>1</sup>, 林 沛<sup>1</sup>, 晏 婴<sup>1</sup>, 刘久荣<sup>1</sup>, 叶 超<sup>1</sup>, 郑跃军<sup>2</sup>, 万利勤<sup>2</sup>, 李文鹏<sup>2</sup>, 周仰效<sup>3</sup>

(1. 北京市地质工程勘察院, 北京 100037; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;  
3. 荷兰联合国教科文组织水资源学院, 荷兰德尔福特)

**摘要:** 文章在北京市地下水水位监测现状基础上, 分潜水和承压水对北京平原地下水监测网的监测密度和监测频率进行了优化设计。主要采用编制地下水动态类型图的方法进行了地下水水位监测网的优化, 克里金插值法能定量评价依据监测网观测值绘制的地下水水位等高线的精度, 因而可以用来评价监测优化结果。并根据时间序列分析和统计检验提供的定量标准优化了地下水水位监测频率。优化后, 北京平原共有监测孔400眼, 其中利用原有监测孔300眼, 新设计监测孔100眼, 手工监测频率由原来的每月6次优化为每月1次, 专项高频率监测可以由地下水自动监测仪实现。文中还对地下水自动监测仪(DIVER)的监测结果和手工监测结果进行了对比评价, 提出了地下水水位监测网的维护、管理措施和信息发布方式。

**关键词:** 地下水水位; 监测密度; 观测频率; 自动监测

中图分类号: P641.74

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2007)01-0010-10

## 1 序言

北京市地下水动态监测始于20世纪50年代中期, 多年来, 动态监测为城市建设和工农业发展提供了大量的地下水信息<sup>[1]</sup>。但近年来经济社会的快速发展对地下水信息的需求提出了更高要求, 在这样的发展态势下, 北京市的地下水监测也显出一些问题<sup>[1]</sup>:

(1) 监测点分布不尽合理。目前, 北京市专门监测孔主要分布在城区和近郊区, 且分层监测较少; 群众观测孔分布也不均匀; 同时, 对一些重要的水文地质单元尚未进行监测。

(2) 监测频率不尽科学。监测频率目前是6次/月, 随着地下水自动监测仪的使用, 高频率的地下水监测均可由监测仪实现, 而对于反映区域地下水动态变化特征的手动监测来说, 目前的监测频率过高, 可以适当降低。

(3) 监测手段落后。群众监测孔的水位测量主要是委托当地村民进行, 测量工具为自制的测绳和电表, 存在测量误差。

(4) 数据存储丢失风险大。20世纪90年代以前的监测数据全部以纸介质形式存放, 基本无备份。90

年代后计算机应用于地下水监测数据存储工作中, 由于无正确存储形式, 存在数据丢失现象。

加强和改进北京市地下水动态监测是关系到水资源开发、城市建设、环境保护和减灾防灾的一项重要工作。本文将通过科学的优化方法, 对现有地下水监测网的监测密度和监测频率进行优化, 从而建立科学、有效的地下水动态监测网, 以便为政府部门提供科学可靠的地下水信息, 更好地为经济社会的可持续发展提供服务。同时对加强地下水监测网的维护和管理进行了探索。

## 2 地下水监测的目的与历史

地下水动态监测既是地质工作中一项基础性的水文地质工作, 又是一项公益性事业。北京市地下水监测的目的主要是为城市建设和工农业发展提供必需的地下水信息。监测工作开展以来, 每年定时发布地下水情预报与简报, 为政府决策部门提供了科学可靠的地下水资料, 并为市属有关单位和地下水用户提供水情服务, 在城市供水、开源节流、地下水资源、工程地质、环境地质等方面起到了重要作用<sup>[2]</sup>。

北京市地下水动态监测工作开展初期, 只在城近郊区建立了33个监测孔。20世纪50年代末期, 地下水水位动态监测孔达到558个。文革期间, 监测孔逐年减少, 远郊区县监测工作甚至中断。1979年全市地下水监测孔恢复到624个。1983年, 全市监测孔数量达752个, 并编辑出版了《北京市地下水动态年鉴》。

收稿日期: 2006-10-09; 修订日期: 2006-11-23

基金项目: 中荷合作项目“中国地下水信息中心能力建设”

作者简介: 董殿伟(1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质研究工作。

地下水动态监测网覆盖整个北京市平原区 $6\,540\text{km}^2$  (包括延庆盆地)。20世纪90年代以后,城乡建设快速发展,导致部分观测孔遭到破坏。目前,北京市地下水观测孔共650个左右,其中专门孔150个、群众监测孔500个。

### 3 北京平原区地下水位变化趋势及现状<sup>3~4)</sup>

北京平原区地下水位在20世纪60年代基本呈天然状态(图1)。进入20世纪70年代以后,由于工业的发展,城近郊地下水开采量大幅增加,城近郊的地下水位下降很快,在东郊地区形成了地下水降落漏斗;而在远郊区县,地下水水位下降幅度较小,仍然处于天然平

衡状态(图2)。20世纪80年代,从1980年至1984年出现了连续五年的干旱少雨天气(5年平均降水量 $459\text{mm}$ ),地下水补给量减少,开采量增加,地下水位快速下降;另外,水源八厂开始投入使用,潮白河断流,使该地区地下水补给条件和开采条件都发生了变化,水位开始逐年下降。在水源八厂地区、城近郊的东部、东北部出现了大面积的地下水降落漏斗(图3)。进入20世纪90年代,1994至1998年连续4个偏丰年份,使城区地下水位有所上升。至1998年,永定河冲洪积扇顶部、潮白河冲洪积扇顶部的潜水水位和城区地下水位普遍回升。但顺义、通州等地下水集中开采区,水位仍在持续下降(图4)。

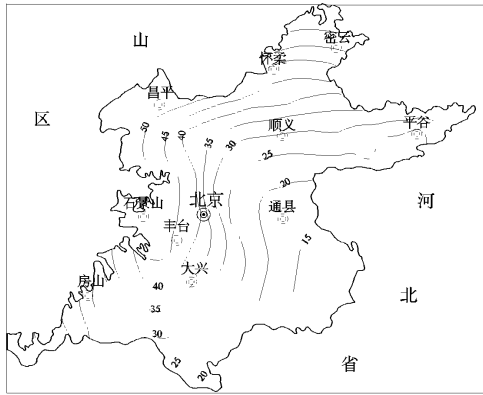


图1 1965年北京平原地下水位等值线图

Fig. 1 Contour map of groundwater levels in 1965

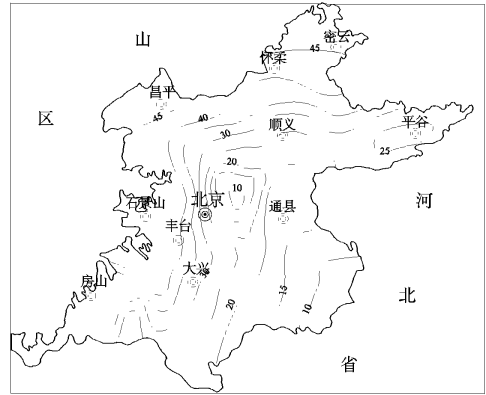


图2 1975年北京平原地下水位等值线图

Fig. 2 Contour map of groundwater levels in 1975

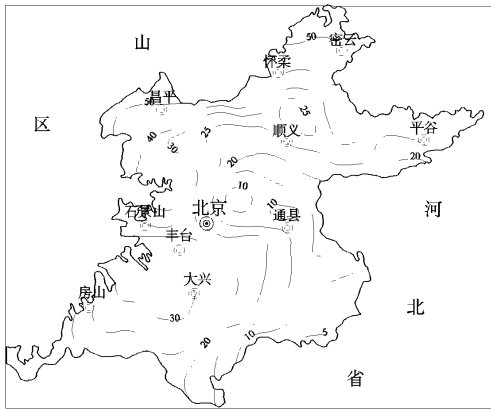


图3 1985年北京平原地下水位等值线图

Fig. 3 Contour map of groundwater levels in 1985

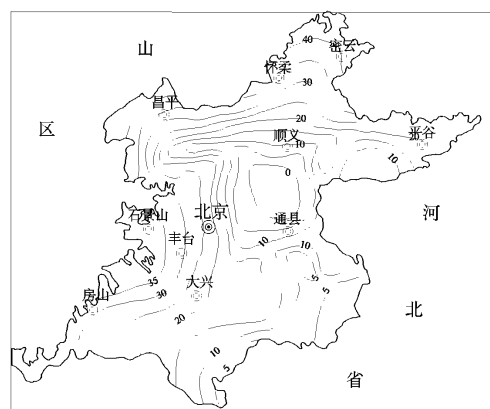


图4 1995年北京平原地下水位等值线图

Fig. 4 Contour map of groundwater levels in 1995

从1999~2005年,由于连续多年干旱,地下水补给量减少,北京市平原区地下水位普遍加速下降,特别是冲洪积扇的顶部及山前地区,水位下降速率增加十分明显,2005年底地下水位与1998年年底水位相比,水位最大下降幅度都在 $15\sim 20\text{m}$ 左右,年均下降 $3\sim 4\text{m}$ (图5)。

### 4 北京平原区地下水水位监测网密度优化

通过地下水水位监测网密度的优化,可使监测点的空间分布合理化,能够充分监测到地下水动态区域变化。优化方法如下:根据不同的地下水动态类型,对北京平原地下水动态在空间上进行分类和分区,即绘制地下水动态类型分区图,然后在地下水动态类型分

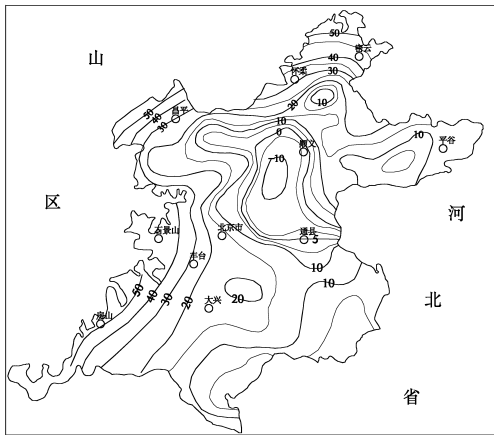


图5 2005年北京平原地下水位等值线图  
Fig. 5 Contour map of groundwater levels in 2005

区图上进行地下水监测点的布设,使每个地下水动态分区中都有监测点控制,最后用克里金插值法分析评

价地下水监测点布设的合理性,其原理与方法已在前文详细论述<sup>[9]</sup>。

#### 4.1 地下水动态类型分区

地下水动态类型分区是反映地下水动态类型在空间上的分布,主要考虑了影响地下水动态的主要因素,包括地形地貌、含水层结构特征、水位埋深、土壤类型、土地利用、降水量、地表水体及人工开采等,对各种因素进行综合后绘制四张地下水动态影响要素图,即水文地质分区图、非饱和带特征分区图、地下水补给分区图和地下水局部影响分区图,然后将四张要素图进行叠加得到地下水动态类型分区图(图6)。共划分了280个不同类型的地下水动态分区。主要大区有永定河流域、潮白河流域、温榆河流域、拒马河冲洪积扇区、蓟运河冲洪积扇区、北京城区与地下水降落漏斗区。每个大区由土壤岩性和地下水补给划分成若干小区。

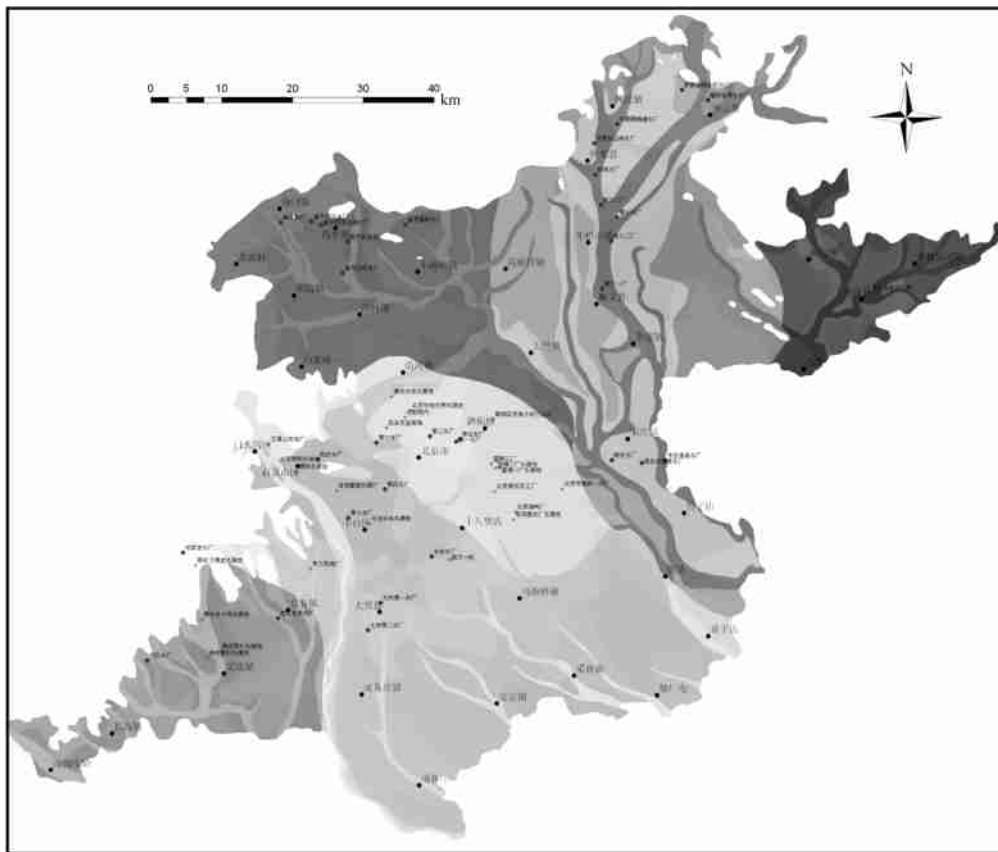


图6 北京平原地下水动态分区图  
Fig. 6 Groundwater regime zone map of Beijing Plain

#### 4.2 地下水水位监测孔的布设

地下水动态分区图是监测网设计的主要依据,只有每个地下水动态类型区都有监测井控制,才能真正监测到地下水动态区域变化。同时,在设计过程中,重

点考虑北京城区、水位降落漏斗、大型水源地和主要河流河谷补给区。

根据地下水监测网现状调查结果,将监测情况较好,能够利用的监测点投影到地下水动态分区图上,然

后在没有监测点分布的动态分区内补充新的监测点。北京平原已有潜水监测点 164 眼,在地下水动态类型分区图上布设新的潜水监测点 65 个(图 7),合计 229

个;已有承压水监测点 136 眼,在地下水动态类型分区图上布设新的承压水监测点 35 个(图 8),合计 171 个。北京平原区总计需 400 眼专业长期监测井。

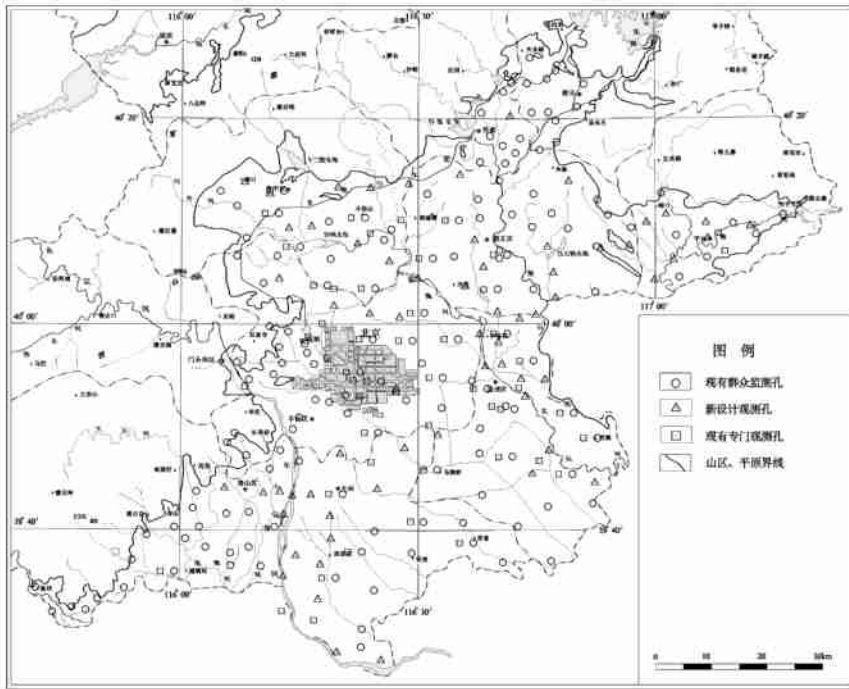


图 7 潜水监测网优化设计图

Fig. 7 Location of observation wells in top unconfined aquifer

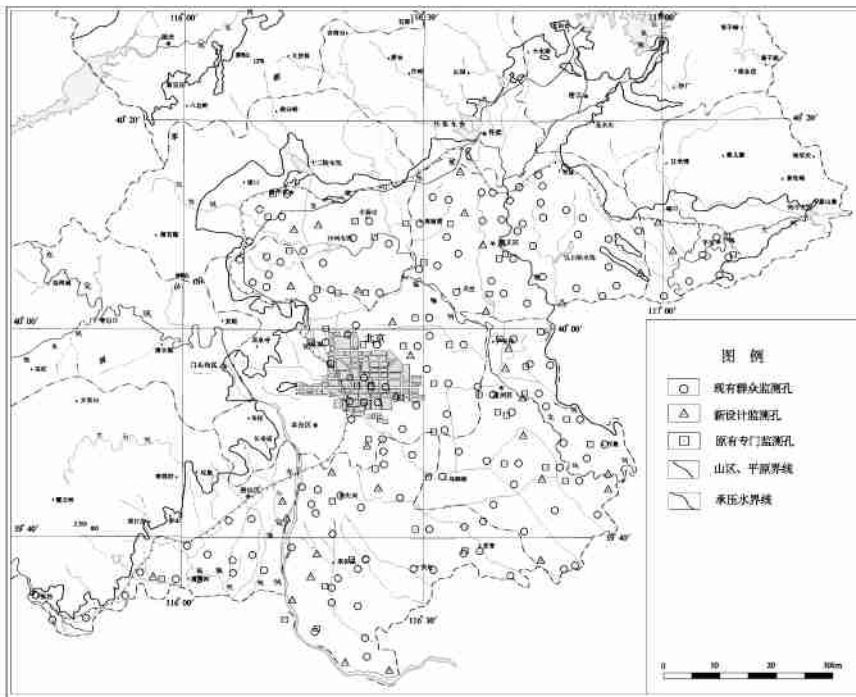


图 8 承压水监测网优化设计图

Fig. 8 Location of observation wells in confined aquifer

### 4.3 监测网优化后合理性评价

根据地下水动态类型分区图布设完监测点后,用克里金插值法对其进行检验分析评价,对比优化前后插值的残值误差的大小,评价优化结果。从克里金插

值误差评价结果可见,如优化前、后潜水观测孔标准差等值线图(图9~10)所示,优化后克里金插值的残值误差明显减小,所以监测点的布设是合理的。

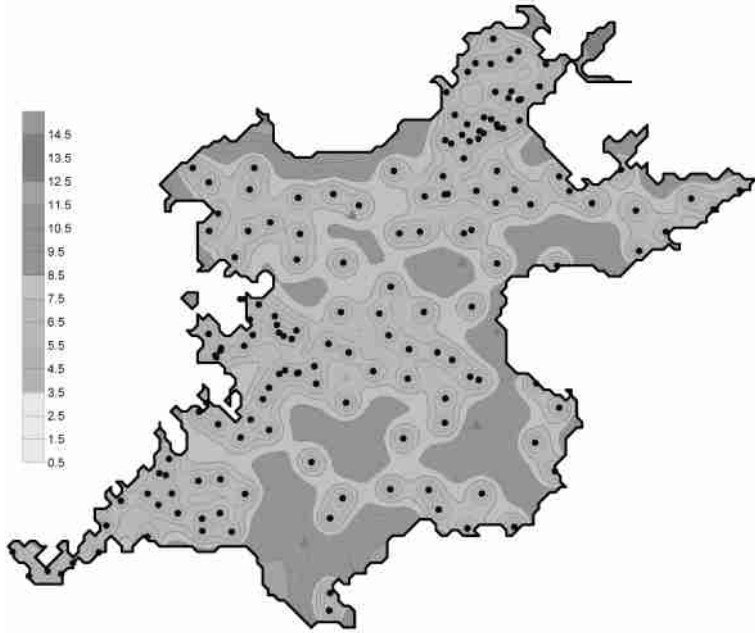


图9 优化前潜水观测孔标准差等值线图

Fig. 9 Contour map of Kriging interpolation error of existing network in unconfined aquifer

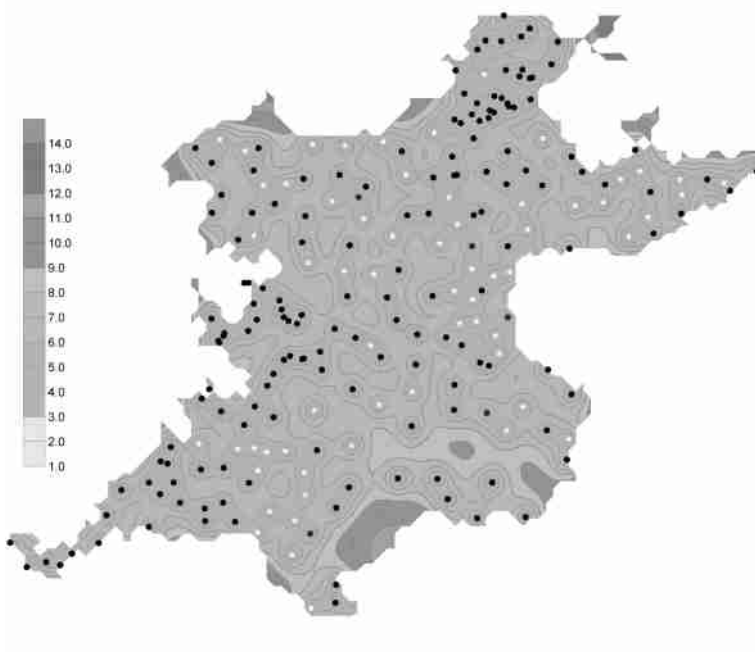


图10 优化后潜水观测孔标准差等值线图

Fig. 10 Contour map of Kriging interpolation error of newly designed network in unconfined aquifer

## 5 北京平原区地下水水位监测频率优化

北京平原大部分长期观测井是手工监测的, 监测频率为每个月观测 6 次。那么这种频率的观测数据是不是足以反映水位长期变化趋势与周期变化规律呢? 这就需要在时间序列分析的基础上进行采样频率的优化<sup>[9]</sup>。

### 5.1 地下水水位时间序列分析

地下水水位随时间的变化特征可用时间序列分析方法进行分析<sup>[9]</sup>。本文选用 612-4 号观测孔地下水水位时间序列为例, 分析降落漏斗区(朝阳区八里桥)深层承压水地下水水位变化特征。

趋势分析: 612-4 号井的水位观测数据序列由两个时期不同变化组成的, 有明显的下降趋势(图 11), 水位系列是由两条线性下降的趋势线组成, 水位在 12 年中下降达到 17m, 如表 1 所示。

表 1 地下水水位数据系列趋势表

Table 1 Trend of groundwater level decline

井号	数据时间	第一阶段趋势	第二阶段趋势	水位下降
612-4	05/07/1990~30/06/2002	$H_t = -0.0170t - 3.9578$	$H_t = -0.0159t - 7.2723$	17m(12年)

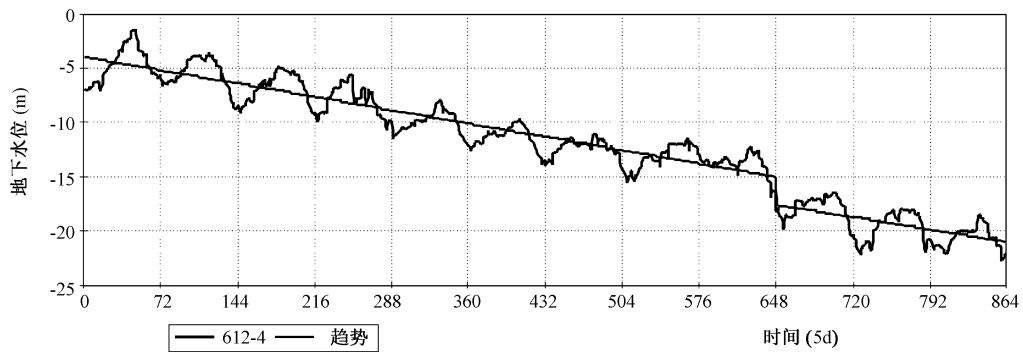


图 11 地下水水位数据系列变化趋势图

Fig. 11 Trend of groundwater level decline in 612-4 well

周期性分析: 由于受降水量和开采量的影响, 除去趋势性的地下水水位数据序列通常具有季节性变化规律。通过调和和分析发现 612-4 的数据系列以年为周期波动(图 12), 以每年 3.0m 的幅度变化, 最大值在 12 月, 最小值在 8 月, 如表 2 所示。

表 2 地下水水位数据系列周期性变化参数表

Table 2 Periodic changes of groundwater levels

井号	主要周期	水位最高月	水位最低月	年水位变幅
612-4	一年	二月	八月	3.0m

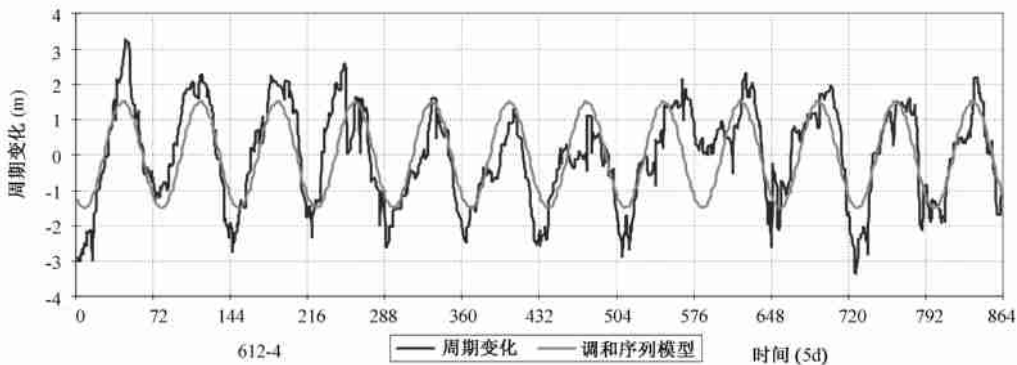


图 12 地下水水位数据系列周期性变化图

Fig. 12 Periodic fluctuation of groundwater level in 612-4 well

自回归分析:地下水时间序列数据减去趋势性和周期后,利用自回归模型来分析平稳系列的自相关特征。分析显示,平稳系列可用AR(1)模型模拟(表3)。AR(1)模型与实际序列拟合很好(图13)。

表3 地下水水位数据系列随机成份表

井号	相关系数	AR(1) 模型	标准方差的残差
612-4	0.92	$s_t = 0.9214s_{t-1}$	0.32m

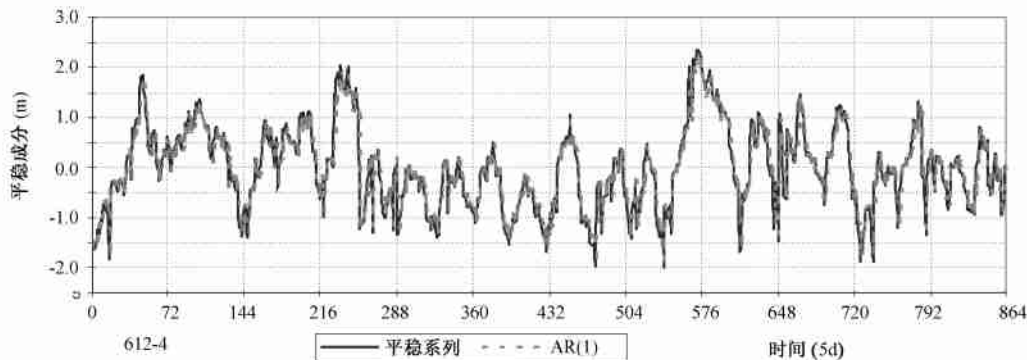


图13 地下水水位数据系列随机成份与模拟值对比曲线图

Fig. 13 AR(1) model of 612-4 well

如果成功减去了水位时间序列中的所有信息,地下水时间序列数据减去趋势、周期和平稳成分后的剩余部分应该是一个独立的随机变化,它可能通过计

算自相关系数进行验证,如果相关图在上下限内,就说明干扰是独立的(图14)。

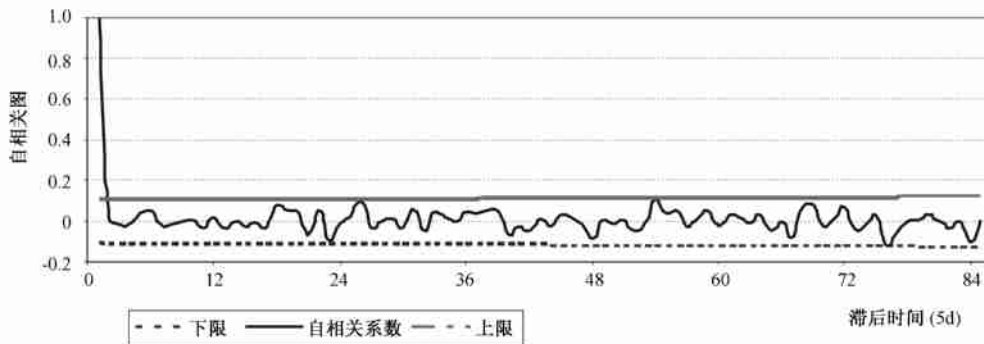


图14 残差相关图

Fig. 14 Correlogram of residuals

联合模型:模拟一个非稳定地下水时间序列可以由一个联合模型来表达,即由趋势、周期和AR(1)模型构成的联合模型。由模型模拟值与实测值的曲线对比图(图15)可以看出,两者几乎相同,拟合效果很好。

5.2 监测频率优化

监测频率优化方法已有专文论述<sup>[9]</sup>。北京平原地下水长期变化的主要特征是趋势性下降与年周期波动,因而,监测频率应能满足识别趋势与周期变化的要求。

为了确定识别趋势的监测频率,在此假定:

趋势检测的时间为 2a;

- 残差系列的标准方差为 0.5m;
- 检测到的趋势为地下水每年下降 1m;
- 置信度为 0.05;
- 检测到趋势的能力(概率)为 90%。

依据以上假设条件可以建立趋势检测的能力曲线(图16),每个月6次的观测频率为1(每年测量72次)。由能力曲线可见,在频率为0.15时,趋势检测的能力达到了97%。超过了这个频率,随着频率的增加,检测趋势的能力就会增长缓慢。因此0.15的频率已经足够了,也就是说每年只需要观测11次就可以了。因而一个月观测一次就可以满足要求了。

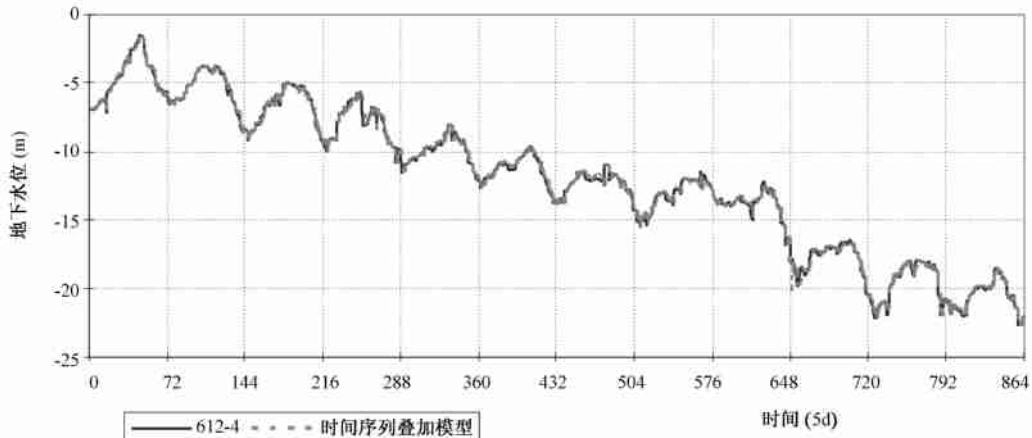


图 15 地下水水位原始数据与模型模拟数据拟合图

Fig. 15 Fit of the additive model to series of 612-4 well

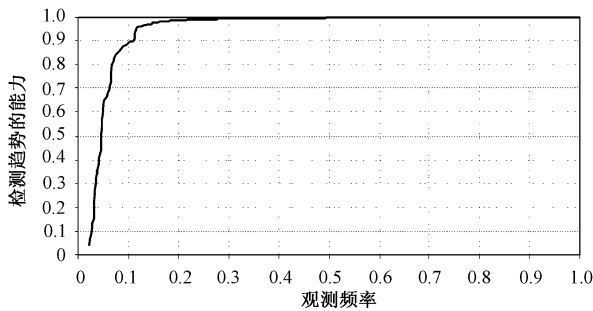


图 16 趋势检测曲线图

Fig. 16 Power of trend detection

当用调和系列来建立周期波动模型时, 参数估计的精确度依赖观测数量, 可以用半置信区间来描述。半置信区间随着观测频率的增加而减小。当前每个月 6 次的观测频率为 1 (每年测量 72 次)。同样, 频率超过 0.15, 半置信区间基本为常数 (图 17)。这就说明每个月一次观测就足够记录周期的变化而且有很好的精确度。

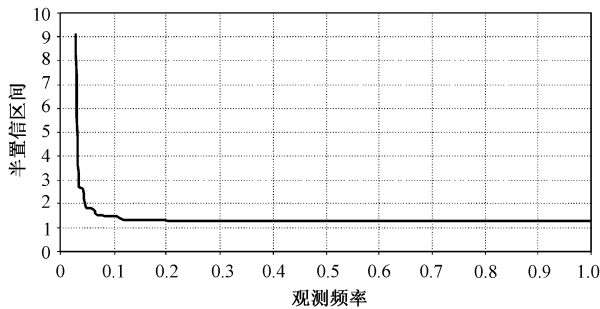


图 17 观测频率与半置信区间间隔关系曲线图

Fig. 17 Half-width of confidence interval for estimating harmonic parameters

### 5.3 小结

根据北京地下水监测频率优化结果, 每月一次的

监测频率就可以监测到地下水的趋势变化和周期性变化, 可以满足监测目的。但是这种监测频率只能监测到大时间尺度的地下水水位变化特征, 而对于小时间尺度的地下水变化就不能监测到, 比如一次降水过程地下水变化或某次抽水过程地下水变化, 但这些可以用地下水自动监测仪来实现。目前北京平原区观测井每个月有 6 次定期观测, 但是有很多数据缺失。对于手动测量来说, 低频率的连续观测 (1 个月 1 次) 比高频率不连续观测 (1 个月 6 次) 更重要。

## 6 北京平原区地下水水位自动监测仪器的安装

目前, 北京平原区共安装地下水水位自动监测仪 90 台。其中 60 台为河北保定水文地质工程地质方法所生产的 WS-1040 型地下水自动监测仪, 中荷合作项目从荷兰引进了 30 台 DIVER。这里只介绍 DIVER 地下水自动监测仪的安装和运行情况。

在进行地下水自动监测仪安装之前, 首先对现有地下水专门监测井进行详细的调查, 调查内容主要包括: 井位、原井深、现在井深、井径、观测层位、地下水类型、周围环境、观测水位资料质量、是否适合安装自动监测仪等。通过调查, 选择了 30 眼专门监测孔安装 DIVER 仪器, 安装前对观测孔进行了修复和维护, 包括洗井和安装孔口保护装置。Diver 自动监测仪用直读电缆线悬挂在井中水面之下, 设置每小时读一次水位值并储存在仪器中, 每季度用笔记本电脑采取数据。为了确定仪器的可靠性与精度, 安装自动监测仪的监测井继续每月手测一次。由图 18 可见, 两者所观测的水位值基本一致。经过一年多时间的运行, DIVER 仪器运行情况良好, 运行期间没有出现质量问题, 可靠



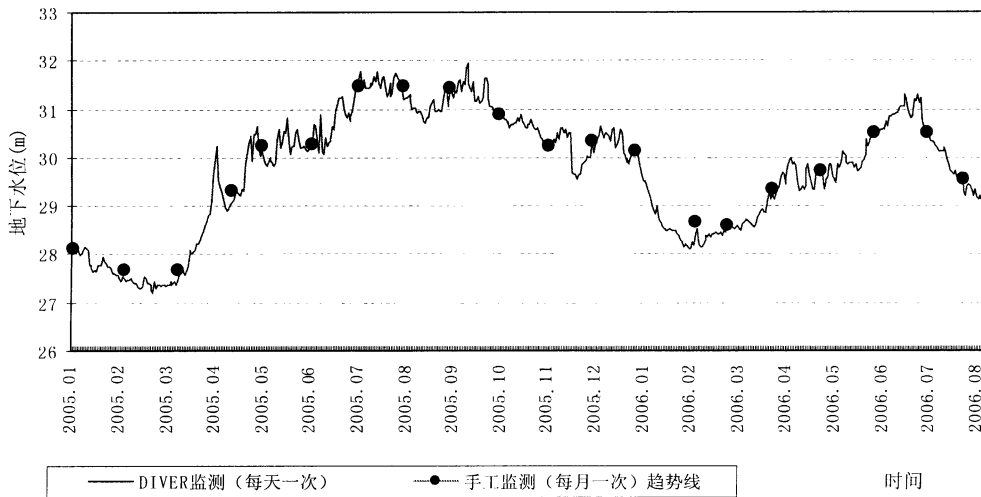


图 18 仪器监测与手工监测地下水位埋深数据对比图(146号孔)

Fig. 18 Comparison of hand measurements and Diver measurements

性较高。

### 7 北京平原区地下水监测网维护及地下水信息发布

地下水位监测孔是重要的公共设施,为了保证监测网的完好和监测工作的正常进行,应由监测部门对专业监测井进行适当的维护和管理,保证观测井不受人为破坏,并在发现受到损坏时及时维修。

为了保护每眼专门监测井及其配套的水位监测仪,中荷合作项目专门设计了专门监测井的孔口保护装置。该装置包括一个钢筋混凝土基座和厚钢板制成的孔口帽。在孔口帽上设计了一个牢固的锁固装置,使用专门工具才能打开井口帽。钢筋水泥基座施工时应保证钢筋的数量和混凝土的厚度和强度,保证孔口帽和基座的连接牢固。

做好监测井保护工作的同时,还应做好监测井的管理工作,进行定期巡查。对于专门监测井应每月巡查一次,建立相应的巡查记录,对发现的问题及时进行处理。对群众观测井的巡查以观测人为主,管理单位应每年进行一次巡查,并建立相应的巡查记录。

为了保证地下水位观测工作的正常进行,需要对观测井进行定期维护,特别是专门监测井,主要包括清理井内杂物和洗井作业。目前,对安装自记水位仪的监测井均完成了上述维护工作。建议今后继续进行这样的监测井维护,以5年为周期对所有的专门监测井进行维护和修复。

通过监测得到的地下水动态原始数据,应被转化为水文地质信息,通过地下水动态数据的分类存贮,利

用有关的计算机软件,进行计算机制图,以地下水水情月报、地下水水情简报及地下水水情年报的形式将地下水水情按不同的部门不同的需要进行发布:

水管理部门:提供地下水水位、水质、年内枯、丰水期的水量及时间序列变化,同时提供地下水水位、水质及水量的变化趋势及可能造成的影响,为水管理部门进行决策和采取措施提供依据。

水用户:提供地下水水质现状及污染现状,使用户对所用水质的质量有一定了解。

社会公众:提供地下水水位、水质现状等信息,使社会公众了解地下水水位和水质现状,增强公众参与地下水资源保护的意识。

### 8 结论

北京平原地下水位监测历史长、面积广、监测网密度相对较高。但随着社会经济的高速增长,水资源开发强度不断加大,已引起区域地下水位普遍下降。现有监测网已不能适应监测区域地下水位、为地下水的持续开发利用提供足够信息的需要。本此中荷合作项目,结合地下水动态类型图与克里金插值方法,共布设了100个新的监测点,其中潜水监测点65个,承压水监测点35个,优化后北京平原共有专业长期监测孔400眼。利用400个监测孔观测的水位值,可用克里金插值法获得区域地下水位等值线图,监测地下水位区域变化趋势。

时间序列分析表明北京平原地下水位普遍存在持续下降趋势与年周期变化。频率优化表明每月一次的水位监测即可监测到这些大时间尺度的变化。因而,

目前人工监测每月6次可减少到每月一次。而在地下水动态变化大的地区,如重点水源地、降落漏斗中心、河谷地带,可能存在小尺度的变化,需要安装自计水位仪监测高频率的变化。目前,自计水位仪每小时读一次值,经过两年运行后,对监测序列进行分析,有可能减少到每日读一次值。

北京平原地下水监测工作由北京市地质环境监测总站承担。通过中荷合作项目,建立和完善了地下水监测规范。专业长期监测孔进行了洗井并安装了孔口保护装置。自动监测仪的安装使用使地下水监测逐步走向现代化。计算机数据库与信息系统的的使用能够及时分析监测数据,为管理部门、水用户及公众提供所需的地下水信息。

致谢:该项目得到了中国和荷兰政府的经费资助,北京平原地下水水位监测网优化设计工作得到了荷兰联合国教科文组织水资源学院(UNESCO-IHE)、荷兰应用地质研究所(TNO)、荷兰范爱森仪器公司、中国地质

环境监测院和北京市国土资源局等单位及领导、专家的大力支持和帮助,在此表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 谢振华,王翊虹,陈鸿汉,等.首都地区地下水资源和环境调查评价[R].北京:北京市地质调查研究院,2003.
- [2] 冯一平,曹型荣,谢振华,等.北京市用水调研报告[R].1998.
- [3] 北京市地质环境监测总站.北京地下水情简报[R].1990—2005.
- [4] 北京市水文地质工程地质大队.北京市水文地质图集[M].上海:上海中华印刷厂,1980.
- [5] 周仰效,李文鹏.区域地下水位监测网优化设计方法[J].水文地质工程地质,2007,34(1):1—9.
- [6] ZHOU Yangxiao, TING Cheh-Shyh, LIU Chen-wuing. Design of Groundwater Monitoring Networks with Case study of Pingtung Plain[M]. Taiwan: WU-NAN BOOK INC, 2003.

## Optimum design of groundwater level monitoring network of Beijing Plain

DONG Dian-wei<sup>1</sup>, LIN Pei<sup>1</sup>, YAN Ying<sup>1</sup>, LIU Jiu-rong<sup>1</sup>, YE Chao<sup>1</sup>, ZHENG Yue-jun<sup>2</sup>,  
WAN Li-qin<sup>2</sup>, LI Wen-peng<sup>2</sup>, ZHOU Yang-xiao<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Geological Engineering, Beijing 100037, China; 2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 3. UNESCO-IHE, Institute for Water Education, Delft, The Netherlands)

**Abstract:** The present groundwater level monitoring network of Beijing Plain is not able to monitor regional groundwater regime. The monitoring network density and sampling frequency of the top unconfined and deep confined aquifers in Beijing Plain were optimized respectively in this paper. The groundwater regime zone map was created and used as the basis for locating new observation wells. The effectiveness of the newly designed network density was assessed using Kriging interpolation error standard deviation as the criteria. In addition, the sampling frequency of monitoring groundwater level was optimized by using time series analysis and statistical test. As a result, around 400 monitoring wells are necessary to monitor regional groundwater regime in Beijing Plain; 300 are existing monitoring wells and 100 are newly designed monitoring wells. The monthly sampling frequency was found sufficient to monitor long-term trend and annual periodic changes. Smaller scale variations can be captured by the installed automatic groundwater monitoring data loggers. The comparison of manual observations and data loggers confirmed the reliability and accuracy of the automatic data loggers. The monitored data is stored in GIS information system and will be regularly analyzed to provide important information to water managers, water users and publics.

**Key words:** groundwater level; network density; sampling frequency; automatic monitoring

编辑:汪美华