

区域地下水位监测网优化设计方法

周仰效¹, 李文鹏²

(1. 联合国教科文组织荷兰水资源学院, 荷兰 德尔夫特; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 区域地下水位监测提供了定量评价含水层地下水位持续下降及其对环境的影响必不可少的信息。历史上的地下水位监测网是为了评价地下水资源或监测水源地降落漏斗而设立的, 目前它们已经不能适应为流域水资源综合管理提供必需的信息。本文在综述国际地下水位监测现状的基础上, 介绍了区域地下水位监测网优化设计的方法。采用地理信息系统编制的地下水动态类型图为地下水位监测井位置的选择提供了坚实的水文地质基础; 克里金插值法能定量评价监测网观测值绘制的地下水位等高线的精度, 因而可以用来定量设计地下水位监测网; 时间序列分析和统计检验提供了优化地下水位监测频率的定量标准。这些方法已被应用于北京平原、乌鲁木齐河流域和济南岩溶泉域, 其成果将在本刊分期发表。

关键词: 区域地下水位监测; 监测网优化设计; 监测网密度; 监测网频率

中图分类号: P641.74

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2007)01-0001-09

1 前言

过去的半个世纪以来, 世界许多地方已经观测到了地下水位的持续下降, 证实已经发生了大规模的地下水疏干^[1]。其原因是地下水超采或地下水补给量的减少, 两者同时发生则造成许多区域地下水盆地的地下水疏干。一方面, 地下水开采量逐年增高以满足农业现代化、工业化和城市化的供水需求; 另一方面, 由于地表水的拦蓄引用以及土地利用的影响, 天然地下水补给量不断减少。另外, 气候变化也对地下水资源施加了额外的压力。例如, 北京平原地下水位自 1970 年以来明显下降。特别是从 1999 至 2003 年连续 5 年的干旱使地下水位降到历史最低水位, 漏斗中心区自 1970 年以来地下水位下降总量达 20 余米。

对地下水位持续下降进行定量评价, 能为有效管理地下水资源提供重要信息。含水层地下水位的变化可以用不同时期地下水位等高线之差来计算, 或者用校正准确的地下水模型来计算^[2]。显然, 无论哪种方法都需要区域地下水位的历史观测数据。只有最优设计的区域地下水位监测网才能提供评价地下水疏干的准确信息。区域地下水位监测网也能够为下述目的提供重要的信息:

- (1) 含水层参数的识别;
- (2) 地下水动态的分析;
- (3) 地下水历史的演变;
- (4) 环境变化的诊断;
- (5) 区域地下水模型的校正;
- (6) 水资源管理措施效果的评价。

历史上地下水的监测是从水源地和城市的监测开始的, 观测孔集中在水源地和市区。许多国家, 尤其是发展中国家, 还没有建立区域地下水位监测网, 设计区域地下水位监测网的方法在文献上也难以查到。本文在综述国际地下水位监测现状的基础上, 介绍了区域地下水位监测网优化设计的方法。在中荷合作“中国地下水信息中心能力建设”项目中, 把这些方法已应用于北京平原、乌鲁木齐河流域和济南岩溶泉域, 其成果将在本刊分期发表。

2 国际地下水位监测现状

2.1 监测历史

从已发表的调查得知^[3-4], 大约在 1845 年英格兰/威尔士就设立了第一个地下水位监测网。荷兰地下水位的监测从 1870 年开始。欧盟对地下水位的系统监测是从 20 世纪 50 年代开始, 20 世纪 80 年代已建立并运行国家地下水位监测网。美国对地下水位的监测起步于 20 世纪初^[5]。新泽西从 1923 年开始观测地下水位, 宾夕法尼亚从 1925 年开始。至 20 世纪 60 年代末建立了美国国家地下水位监测网。

发展中国家还没有对地下水位进行系统监测。在

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: 周仰效(1958-), 男, 博士, 主要从事水资源与水文地质教学和研究工作。

许多发展中国家,对地下水位的监测只是临时性的,局限于地下水资源和城市供水的评价。但中国是个例外。中国地下水位的监测历史相对久远,从20世纪50年代已经开始,截至目前,已经在中国北方以地下水供水为主的17个省市建立了初步的地下水位监测网。但监测网现状不容乐观,监测孔严重淤堵或遭到破坏的较多,且多集中在水源地和市区,难以监测区域地下水位的变化趋势。

地下水位的监测一般是从监测局部问题开始,在发展过程中逐步完善成为区域地下水位监测网以至国家地下水位监测网。区域或国家地下水位监测网不仅监测局部问题,同时监测区域问题。由于地下水盆地一般是区域性的,人类活动对地下水的影响已经波及到整个地下水盆地,流域水资源综合管理需要区域地下水位的消息。因而,建立区域地下水位监测网已属必然。地下水位监测网的历史发展可以划分为三个阶段^[3]:

- (1)为地下水资源调查评价设立的临时监测网;
- (2)为监测地下水强烈开采建立的专门局部监测网;
- (3)为流域水资源综合规划和管理建立的区域性的或国家级的长期监测网。

荷兰也许建立了世界上最好的地下水位监测网。荷兰是一个人口密度极高的国家,大约1700万人口居在 $3.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的国土上。由于地势平坦低洼,地下水位埋藏很浅。地下水位的微小变化就会对房屋和农业造成很大影响。对于这个水涝多发的国家,地下水的监测与排水同等重要。荷兰目前大约有30000个地下水观测孔。地下水位监测网区分为三类:水资源管理监测网,水系统运行监测网和科研网。水资源管理监测网划分为三级:

- (1)国家级监测网,由交通运输、公共工程及水管理部负责,用于国家水资源的规划与管理;
- (2)区域监测网,由省政府负责,用于各省地下水的规划与管理;
- (3)局部监测网,由水董事会、市政府、供水公司和自然保护区负责,用于特定的水系统的运行管理。

国家级地下水位监测网由荷兰应用地学研究所运营管理,由大约4000个观测站组成(每个观测站有不同深度的观测孔组)。大部分观测孔是由志愿者每月观测两次。最近几年,区域监测网安装了大量的自动监测仪。荷兰应用地学研究所同时建立和维护全国地下水数据库。三级监测网的全部观测数据都储存在国

家地下水数据库中,用户可通过万维网提取数据。

2.2 监测网目的与分类

明确定义监测目的与所需信息对设计监测网是至关重要的。监测经验表明,针对监测目的设计的监测网可取得事半功倍的效果。下面是通用的地下水监测目的:

地下水系统识别,包括:

- (1)含水层参数识别;
- (2)地下水资源评价;
- (3)地下水时空分布特征;
- (4)确定与地表水的联系;
- (5)补给与排泄区的划分。

地下水资源开发,包括:

- (1)地下水最优开采方案设计;
- (2)降落漏斗区圈定;
- (3)地下水开采的影响。

水资源综合管理,包括:

- (1)控制地下水位埋深;
- (2)保护自然保护区;
- (3)湿地修复;
- (4)水管理措施的效果评价;
- (5)跨界水流的确定。

地下水位监测网一般可划分为两大类型:战略(一级或背景)监测网,运营(二级或特殊)监测网。

战略监测网指大区域性的区域监测网或国家监测网,用于地下水资源的规划与管理。其特点是:

- (1)以独立的地下水盆地为监测单元,甚至包括整个国家;
- (2)监测区域地下水动态和总体影响;
- (3)观测井设立在主要含水层组,密度相对低;
- (4)长期观测,频率相对低。

运营监测网指局部监测网,用以监测供水地下水系统的运行和其他的特殊目的。其特点是:

- (1)面向局部问题,比如监测水源地周围的水位下降,监测灌区的影响,监测自然保护区的地下水位变化等;
- (2)监测网密度要相对高,以便确定局部影响;
- (3)观测频率要相对高,以便监测短期的变化趋势。

战略监测网和运营监测网通常结合在一起,组成一个统一的地下水监测网。在这个统一的监测网中,低密度的战略监测井提供区域地下水的背景水位值,局部高密度的运营监测井监测局部影响。把监测网划

分为战略监测网和运营监测网也便于对监测网分级管理。比如荷兰的战略监测网由国家与省政府管理,运营监测网由水董事会、市政府、供水公司和自然保护区负责管理。

2.3 监测仪器与信息管理

地下水位监测仪包括简单的手测测钟到非常现代化的自动监测仪^[9]。具体有:

(1)测钟,是最简单的水位监测仪,适用于水位埋深浅的观测孔;

(2)电感应测头,连接在标有刻度的电缆线上,当电感应测头接触到水面时发出信号(声音或灯亮),适用于各种水位埋深的观测孔;

(3)悬浮在水面上的自计水位仪,能够自动连续记录水位;

(4)压力传感器,用电缆线悬挂在井中,连续测量压力传感器之上的水柱高度;

(5)声学测头,固定在井口,通过声波返回的参数连续计算声学测头与水面之间的距离。

手测监测仪(测钟和电感应测头)仍然是广泛应用的监测方法。然而,近年来在欧洲,北美和澳大利亚,自计水位仪的应用发展迅速。许多国家使用压力传感器自计水位仪,测量数据贮存在贮存单元,通过接口可直接读入电脑。监测数据的无线传输已经在试用阶段^[7]。

地下水位监测数据以前一般保存在纸表上。近20年来数据库的使用推动了地下水观测数据在科研与水资源管理中的广泛应用。在许多工业化国家,地下水观测数据已在万维网发布。实时在线监测地下水已在荷兰和美国进行试验。

3 区域地下水位监测设计方法

3.1 监测网设计程序

区域地下水监测网设计程序如下:

- (1)确定监测区的特征;
- (2)定义地下水监测目的;
- (3)概化水文地质条件;
- (4)评价现有监测网;
- (5)设计优化的监测网。

监测区域的地理范围应当包括一个完整的地下水盆地,应分析监测区域内的气象、水文、地形、土地利用、社会经济活动以及水资源开发数据,以确定监测区的特征。区域地下水位监测的主要目的是定量评价地下水量状态及其对基流和生态系统的影响^[8]。之后建

立地下水系统的概念模型以确定地下水的流动系统。地下水系统的概念模型是编制地下水动态分区图,监测网设计和观测数据解译的基础。如果区内已有观测孔监测地下水位,应对现有监测网进行评价,包括观测井情况调查、监测网密度和频率评价、数据管理和信息发布的检测。

地下水位监测网的定量设计一般要用地质统计方法,需要用实测数据估计空间和时间上的相关结构^[9-10]。如果现有数据太少无法应用地质统计法,必须应用水文地质方法。地下水动态类型编图法是设计区域地下水位监测网的有用方法^[11-12]。

3.2 地下水动态类型编图

地下水位的空间分布与随时间的变化表明地下水的均衡状态,一般称为地下水动态。虽然地下水一般是由高水位的补给区流向低水位的排泄区,但含水层的非均质导水和贮水性能造成地下水位在空间上的复杂分布和随时间的复杂变化。地下水位的时空分布是受气象、水文、地质、地形、生态和人类活动综合影响的结果。影响地下水动态的因素可归类为:

(1)地表特性:包括地形地貌和土地利用,影响地下水的补给和排泄;

(2)非饱和带特性:包括土壤岩性和地下水位埋深,作为一个缓冲带延迟和减缓地下水位对外部影响的响应;

(3)饱和带特性:包括含水层的岩性和边界条件,在很大程度上决定地下水位在空间上的复杂分布和随时间的复杂变化;

(4)水文因素:包括降水,蒸发蒸腾和地表水体,是天然地下水位变化的主要因素;

(5)人类活动影响:包括地表水库,引水和地下水开采,是地下水位持续下降的主要因素。

图1显示影响地下水动态的因素。显而易见,对

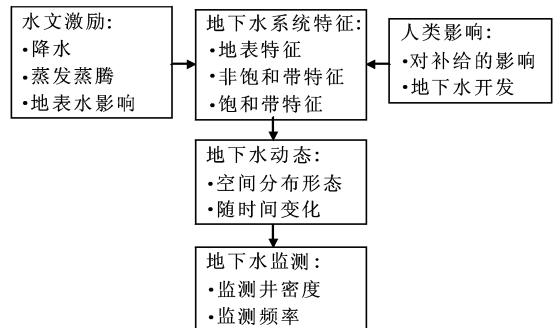


图1 影响地下水动态的因素

Fig. 1 Factors influencing groundwater regime

这些因素的综合分析将提供设计区域地下水位监测网的依据。

由于影响地下水动态的因素存在空间变化,把这些因素在空间进行叠加会划分出许多不同的区,每个区可能存在不同的地下水动态类型,这些区可以称为地下水动态类型区。例如,补给区的地下水位变化与排泄区不一样。系统地圈划地下水动态类型区是综合分析动态影响因素的合理方法。

图2表示圈划地下水动态类型区的流程。首先结合地貌图和地质图编制水文地质分区图。水文地质分区图代表饱和带特性。用水位埋深和非饱和带岩性图编制非饱和带分区图。利用降水分布图和土地利用图编制地下水补给分区图。在河流、湖泊、水库、泉水溢出带和水源地周围划分局部影响区。把这四张专题图叠加则生成地下水动态类型分区图。

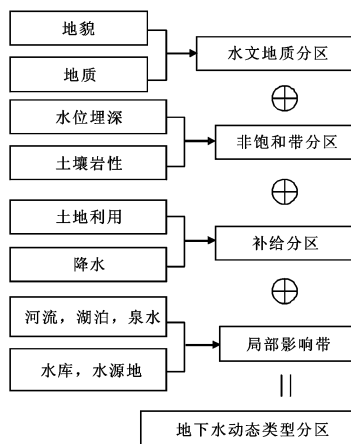


图2 圈划地下水动态类型区的流程

Fig. 2 Delineation of groundwater regime zones

近几十年来,地理信息系统(GIS)的广泛应用使其成为水文地质编图的流行工具。在国际上, ArcGIS已成为地学应用使用最多的工具^[13]。在中国, MapGIS在水文地质编图中被广泛应用^[14]。应用GIS的数据贮存、查寻和空间分析功能,很容易编制专题图。而GIS的图形处理功能可以合成四个专题图以获得地下水动态类型分区图。图2显示的编图流程已在ArcGIS和MapGIS上实现,并且应用于北京平原、乌鲁木齐河流域和济南岩溶泉域,其成果在本期同时发表。

地下水动态类型分区图可作为设计区域地下水位监测网的依据。其基本原理是每个地下水动态类型分区至少应有一个地下水位监测孔,以便监测不同的地下水位时空变化规律。另外还需要考虑下面的设计原则:

(1)垂直水文地质边界设计一对观测孔,用以计算

边界的流入量和流出量;

(2)垂直河流、湖泊或水库设计一对观测孔,用以计算水量交换;

(3)在多层含水层安装观测组孔监测分层地下水位,用以计算垂向水量交换;

(4)观测孔应离开采井足够远,以消除开采造成的短期影响。

3.3 克里金(Kriging)法

区域地下水位监测网最优设计的基本思路是:对区内重要位置(比如每个动态类型区)的地下水位进行观测,观测点之间的地下水位用空间插值法插值。联合应用监测网与空间插值法可以用最低的费用获取所需的地下水位信息。插值的精度取决于监测井的个数与位置。因而,所用的插值法应不仅能给出插值,还应提供插值的误差值。克里金是一个合适的方法。

克里金插值法的原理可参阅许多专著^[15]。克里金插值 Z_0^* 定义为观测值的加权平均值:

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i^j Z_i \quad (1)$$

插值的精度定义为插值的误差的方差:

$$\text{var}(Z_0^* - Z_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_0^j \gamma(x_i - x_0) + \mu \quad (2)$$

式中: Z_0^* ——克里金插值;

Z_i ——在位置 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)的观测值;

λ_0^j ——克里金权值;

$\gamma(x_i - x_0)$ ——方差函数(Variogram)值;

μ ——拉格朗日乘子。

克里金插值误差的方差可以作为评价监测网质量的一个标准。一个最优的监测网生成的克里金插值误差的方差应当是最小的。克里金插值法的特点是:计算插值误差的方差只与观测井的个数和位置(监测网的密度)、空间相关结构(方差函数)有关,而与实测值无关。利用这一特点可以预先设计监测网密度。

用克里金插值法设计监测网密度的方法有两类:

(1)模拟方法;(2)最优化方法。在事先给定最大允许的插值误差的条件下,模拟方法试图确定最小的观测井个数,具体办法可以用试误调整法^[16~17],或用系统分析法^[18~21]。最优化方法的目标是使插值误差最小^[22~24],或用多目标决策^[21, 29]。最优化方法还在开发阶段。

3.3.1 监测网密度图

一般来说,区域地下水位监测网的目的是为区域或国家地下水管理政策提供支撑。监测网应能提供区

域地下水位的空间分布。在许多情况下,管理者只关注监测网的全局精度,不关心每个点的插值误差。因此,可以用监测区克里金插值误差方差的平均值作为评价监测网整体精度的标准^[26]。克里金插值误差的均方差的平均值可用下式计算:

$$\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [\text{var}(Z_{0j}^* - Z_{0j})]^{1/2} \quad (3)$$

给定系统监测网格式(矩形,三角形或六边形分布),观测井与插值点的位置是已知的,克里金插值误差均方差的平均值是监测井密度(监测井个数)的函数。可以绘制插值误差均方差的平均随监测井个数变化的曲线,称之为监测网密度图(图 3)。显而易见,插值误差均方差的平均值随监测井个数的增加而降低。给定要求的插值精度,可以从监测网密度图直接读取所需的监测井个数。监测网密度图提供了确定监测井个数的简单易行的方法。

3.3.2 模拟方法

模拟方法试图在满足事先给定的插值误差均方差

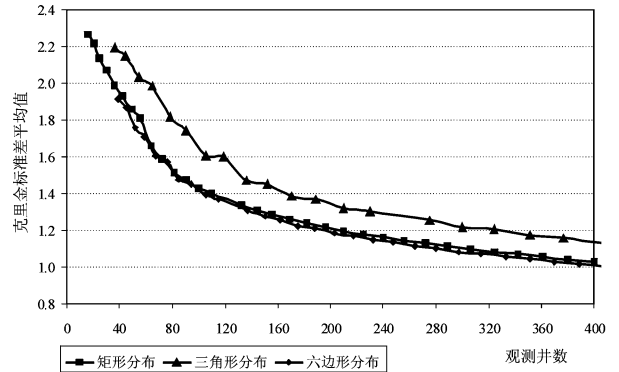


图 3 监测网密度图

Fig. 3 Network density graph

临界值的前提下设计最低的监测网密度。具体办法是:在计算的插值误差标准差高于临界值的区域,增加新的监测井;而在计算的插值误差标准差低于临界值的区域,去除老的监测井,直至全区计算的插值误差标准差逼近临界值,这时设计的监测网为最优的监测网。具体实施流程如图 4 所示。

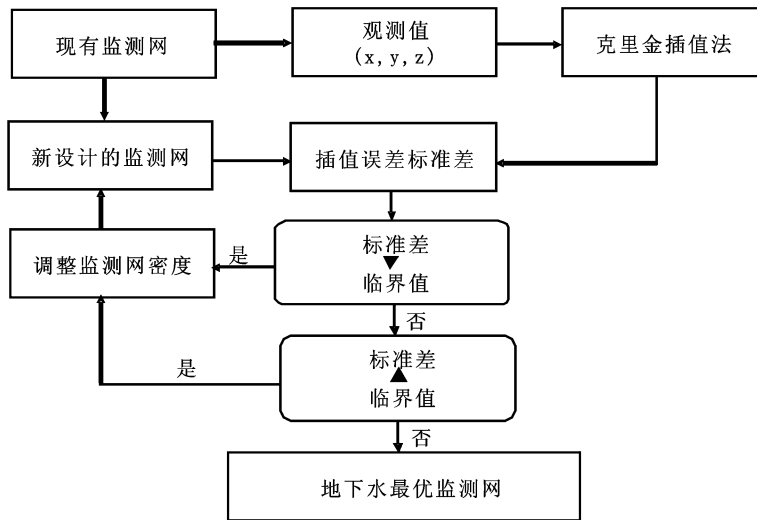


图 4 用克里金模拟方法设计监测网的流程

Fig. 4 Flow chart of the design of a groundwater level monitoring network using Kriging simulation method

3.4 观测频率

已有开发的观测频率设计的方法应用于实践^[10~11]。该方法把观测频率与监测目的用统计参数结合起来(表 1)。总目标分解为三个技术目标:

- (1) 监测趋势;
- (2) 识别周期变化;
- (3) 估计平均值。

观测频率同时取决于地下水位的变化特征:趋势特征、周期特征与平稳随机变量的特征。

趋势特征包括趋势类型(如线型或阶梯趋势)和趋

势大小。趋势越大,统计检验出趋势的概率越高。因而,用低频率的观测即可发现大幅度的趋势变化。

周期特征包括有多少周期成分,每个周期成分的周期与振幅。显而易见,高频率的周期波动只有用高频率的观测才能监测到。

平稳随机变量的特征包括时间相关结构与标准差。时间相关结构用时间序列的自相关函数描述。地下水时间序列自相关越高,观测频率应越低。标准差越大,说明随机干扰越多,越难监测趋势和识别周期变化,需要的观测频率越高。

表1 确定观测频率的目标与定量标准

Table 1 Objectives and criteria for determining sampling frequency

技术目标	定量标准	观测序列特征	观测频率
监测趋势	● 检验趋势的概率	● 趋势类型 ● 趋势大小 ● 相关结构 ● 标准差	f_T
识别周期变化	● 最高频率 ● 识别周期变化参数的精度	● 显著周期 ● 相关结构 ● 标准差	f_P
估计平均值	● 估计精度 ● 信息量	● 相关结构 ● 标准差	f_M
总目标: 监测地下水位变化动态		$f = \max(f_T, f_P, f_M)$	

3.4.1 监测趋势

检验线型或阶梯趋势的概率可作为监测趋势的定量标准。检验趋势的概率也称为检验趋势的能力, 用下面的公式计算:

$$P_w = 1 - \beta = F(N_T - t_{\alpha/2}) \quad (4)$$

式中: $F(x)$ ——累计学生概率分布函数;

N_T ——趋势数;

$t_{\alpha/2}$ ——置信度为 α (通常取 5%) 时的学生分布的临界值。

对阶梯趋势检验, N_T 由下式计算:

$$N_T = \frac{T_r}{2s_p / \sqrt{n}} \quad (5)$$

对线型趋势检验由下式计算:

$$N_T = \frac{T_r}{\sqrt{12s_l} / \sqrt{n(n+1)(n-1)}} \quad (6)$$

式中: T_r ——趋势幅度。

对阶梯趋势检验, 由下式计算:

$$T_r = |\mu_1 - \mu_2| \quad (7)$$

对线型趋势检验由下式计算:

$$T_r = n |\beta_1| \quad (8)$$

式中: s_p 和 s_l ——分别是阶梯和线型趋势序列的标准差;

μ_1 和 μ_2 ——阶梯序列两个子序列的平均值;

β_1 ——线型趋势序列的斜率。

给定置信度, 趋势检验的能力取决于趋势大小、检验趋势的时期、观测频率、观测序列的相关结构和标准差。对于某个监测区, 观测序列的相关结构和标准差可以用历史观测数据计算。因而, 趋势检验的能力简化为观测频率的函数。图5显示检验阶梯趋势的能力与观测频率的相互关系。很显然, 随着观测频率的增加, 检验阶梯趋势的能力也增加。趋势幅度越大, 检验阶梯趋势的能力也越大。当给定要检验的趋势大小和要求检验的能力, 所需的观测频率(f_T)可从图上读取。

3.4.2 识别周期变化

观测频率应当足够高才可以监测周期性变化。图6显示观测频率对监测周期变化的影响。当观测间隔大于周期的一半时, 则无法监测到真实的周期变化。只有当观测间隔小于周期的一半时, 才有可能监测到真实的周期变化。因此, 在每个周期内, 至少要观测三次才可能监测到显著的周期变化。中国北方地下水最重要的周期变化为年周期, 因而每年至少应观测三次以上地下水位才能监测到年周期变化。

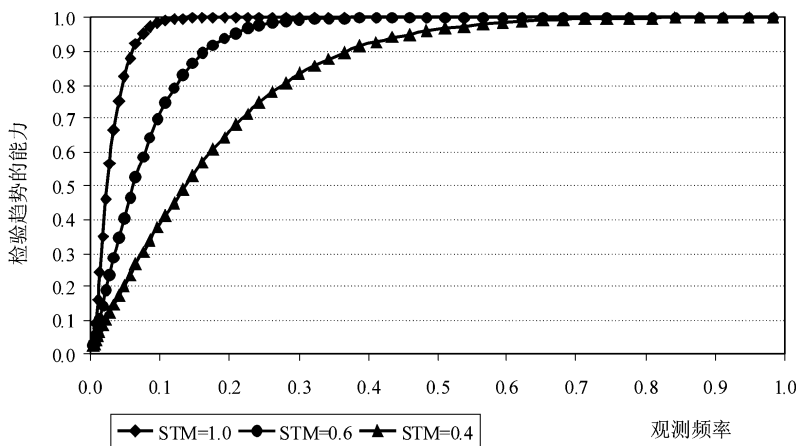


图5 检验阶梯趋势的能力与观测频率的相互关系

Fig. 5 Power of the trend detection against a step trend versus sampling frequency for various trend magnitudes at confidence level of 95%

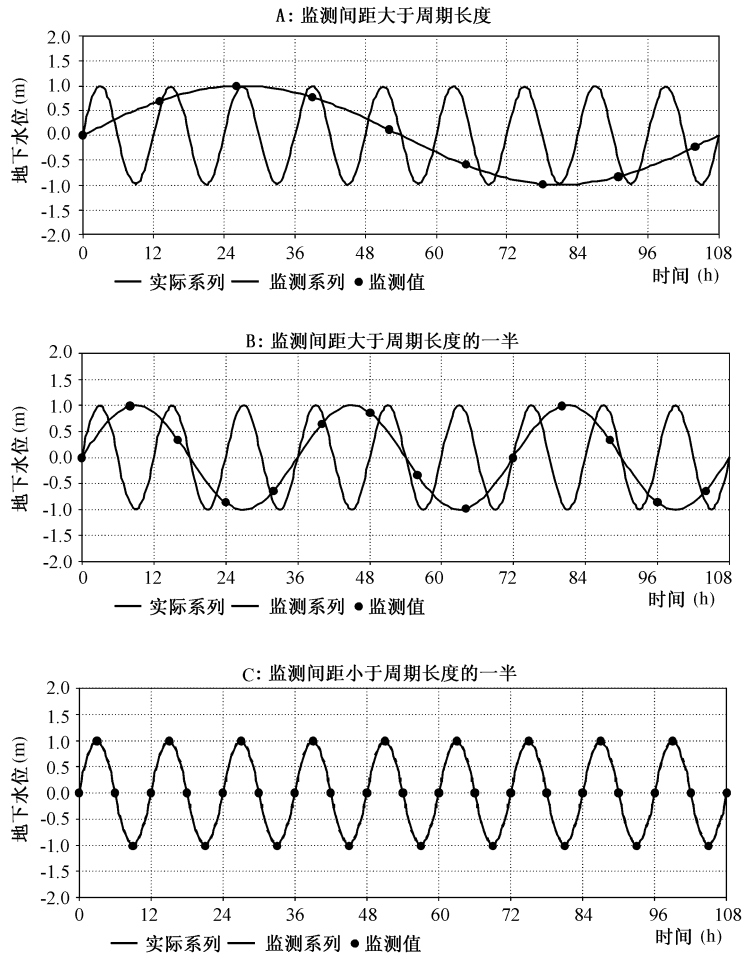


图 6 观测频率对监测周期变化的影响

Fig. 6 Effects of the sampling interval on observing periodic fluctuations

地下水位的周期变化不仅有年周期变化, 还有其它的周期变化。通常用调和序列分析识别不同的周期。调和序列参数的估计精度与观测频率相关, 观测频率越高, 参数估计的精度越高。参数估计精度的半置信区间可以用以识别周期变化的定量标准。半置信区间的计算公式为:

$$R = \frac{2st_{a/2}}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

式中: s ——监测序列的标准差。

给定置信度, 半置信区间是观测频率、观测序列的相关结构和标准差的函数。随着观测频率的增加, 半置信区间逐渐减小, 估计精度越高。给定需要的估计精度, 所需的观测频率(f_p)可由式(9)计算。

3.4.3 估计平均值

对于估计平稳序列的平均值, 有两个定量标准可以应用: 一个是估计平均值的半置信区间, 另一个是估计的平均值的信息含量。在此只介绍半置信区间, 其

计算公式为:

$$R = \frac{t_{a/2} S}{\sqrt{n^*}} \quad (10)$$

式中: n^* ——等效独立观测次数。对于 AR(1) 时间序列用下式计算^[13]:

$$n^* = \left[\frac{1}{n} + \frac{2}{n^2} \frac{\rho_1^{(n+1)\Delta t} - n\rho_1^{2\Delta t} + (n-1)\rho_1^{\Delta t}}{(\rho_1^{\Delta t} - 1)^2} \right]^{-1} \quad (11)$$

式中: ρ_1 ——时间滞后一个单位时的自相关系数。

图 7 显示标准化的半置信区间与观测频率的关系。随着观测频率的增加, 半置信区间逐渐减小, 估计平均值的精度越高。如给定要估计平均值的精度, 所需的观测频率(f_M)可从图 7 读取。

最后, 选取 f_T , f_p 和 f_M 中最大的频率作为监测区域地下水位的观测频率, 它可以满足监测区域地下水位实际动态变化的要求。

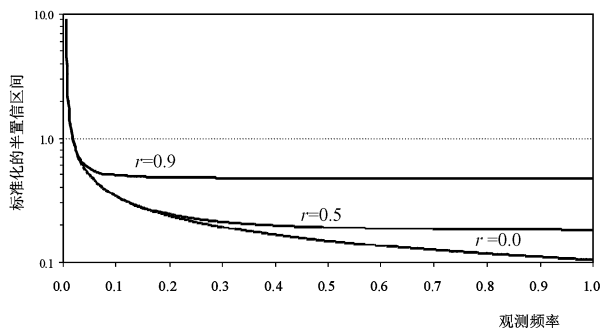


图7 估计平均值的标准化的半置信区间与观测频率的关系

Fig. 7 Standard half width of confidence interval of the mean versus sampling frequency

4 结论

区域地下水位监测为地下水资源管理和其它水文地质研究提供重要的信息。只有一个优化了的监测网才能获取足够的信息。中国地下水监测目前仍处于面向水源地和城市的问题监测, 这些监测网急需扩展为面向水文地质过程监测的区域地下水位监测网。地下水动态类型图能圈画出独特的分区, 每个分区的地下水位具有明显的时空变化特征。因此, 地下水动态类型编图法可以用于设计区域地下水位监测网。

如果已有历史观测水位, 可以运用克里金法优化监测网密度。克里金法同时对观测水位插值绘制地下水位等值线图。联合应用克里金插值法和区域地下水位监测网能以最小的费用获取足够准确的区域地下水位分布。

地下水位观测频率应当足够高才可能监测重要的季节性变化, 在每个周期波动的周期内至少应观测三次以上。观测初期, 应采用比较高的观测频率以便识别重要的周期变化。高频率观测几年, 累积了足够长的观测序列后, 可用时间序列分析和统计检验方法分析地下水位随时间的变化特征并优化观测频率。

致谢: 该项研究得到中国和荷兰政府的经费资助, 荷兰应用地学研究所、荷兰范爱森仪器公司、中国新疆、北京和山东地质环境监测总站参与项目研究, 在此一并致谢!

参考文献:

[1] Konikow L, Kendy E. Groundwater depletion: a global problem[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13: 317—

- [2] McGuire V L, M R Jonson, R L Schieffer *et al.* Water in storage and approaches to groundwater management, High Plains aquifers, 2000[R]. US Geological Survey Circ 1243, 2003.
- [3] Jousma G, F J Roelofs. World-wide inventory on groundwater monitoring[R]. The Netherlands: International Groundwater Resources Assessment Centre, 2004.
- [4] Koreimann C, J Grath, G Winkler *et al.* Groundwater monitoring in Europe[R]. European Topic Centre on Inland Waters 1996.
- [5] USGS. Water Fact Sheet, History of water resources activities of the USGS[R] // USGS Open-File Report. 1995: 85—646.
- [6] Aller, L TW Bennett, G Hackett. Handbook of suggested practices for the design and installation of groundwater monitoring wells[M]. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 1991.
- [7] Van Essen Instruments. Diver Product Manual[M/OL]. 2005. <http://www.vanessen.com>.
- [8] European Union Water Framework Directive, Working Group 2.7. Guidance on monitoring for the Water Framework Directive[M \ OL]. 2003. <http://Public/irc/env/wfd/library>.
- [9] Zhou Y. Objectives criteria and methodologies for the design of primary groundwater monitoring networks[C] // Proceedings of the Helsinki conference. Future Groundwater Resources at Risk. IAHS publication no. 222, 1994.
- [10] Zhou Y. Sampling frequency for monitoring the actual state of groundwater systems[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 180: 301—318.
- [11] Lettenmaier D P. Detection of trends in water quality data from records with dependent observations[J]. *Water Resour. Res.*, 1976, 12(5): 1037—1046.
- [12] Zhou Y. Groundwater regime zoning as a tool to design regional groundwater level monitoring networks[C] // Proceedings of the 34th conference of International Association of Hydrogeologists. Beijing, 2006.
- [13] ESRI. ArcGIS version 9.0[M/OL]. 2005. <http://www.esri.com>.
- [14] Zondy Cyber. MapGIS 7.0[M/OL]. 2005. <http://www.mapgis.com.cn>.
- [15] Matheron G. The intrinsic random functions and their applications[J]. *Adv. Appli. Prob.*, 1973, 5: 439—468.
- [16] Van Bracht M J, E Romijn. Redesign of groundwater lev-

- el monitoring networks by application of Kalman filter and Kriging methods[C] // Proceedings of the Symposium of the Stochastic Approach to Subsurface Flow. Montvillargenne, France, 1985.
- [17] Bogardi I, A Bardossy, L Duckstein. Multicriterion network design using geostatistics[J]. Water Resour. Res., 1985, 21: 199—208.
- [18] McBratney A B, R Webster, T M Burgess. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables-I[J]. Computers and Geosciences 1981, 7(4): 331—334.
- [19] Rouhani S. Variance reduction analysis[J]. Water Resour. Res., 1985, 21(6): 837—846.
- [20] Olea R A. Sampling design optimization for spatial functions[J]. Mathematical Geology, 1984, 16(4): 369—392.
- [21] Christakos G, R A Olea. Sampling design for spatially distributed hydrogeologic and environmental processes [J]. Advances in Water Resources 1992, 15: 219—273.
- [22] Hughes J P, D P Lettenmaier. Data requirements for Kriging estimation and network design[J]. Water Resour. Res., 1981, 17(6): 1641—1650.
- [23] Carrera J, E Usunoff, F Szidarovszky. A Method for optimal observation network design for groundwater management[J]. Hydrology, 1984, 73: 147—163.
- [24] Loaiciga H A. A optimization approach for groundwater quality monitoring network design[J]. Water Resour. Res., 1989, 25(8): 1771—1782.
- [25] Woldt W, I Bogardi. Groundwater monitoring network design using multiple criteria decision making and geostatistics[J]. Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, 1992, 28(1): 45—62.
- [26] Zhou Y. NETGRAPH, a program for determining network density for groundwater monitoring[R]. Delft, The Netherlands; UNESCO-IHE Institute for Water Education, 1993.

Design of regional groundwater level monitoring networks

ZHOU Yang-xiao¹, LI Wen-peng²

(1. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands;

2. China Institute of Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Monitoring of regional groundwater levels provides important information for quantifying groundwater depletion and assessing impacts on the environment. Historically groundwater level monitoring networks were set up in responding to demand of data for groundwater resources assessment or need to monitor the cone of depression. There is urgent need to upgrade this network to a regional groundwater level monitoring network to acquire information for integrated water resources management at the river basin scale. This paper reviews the state of art of groundwater level monitoring in the world. Methodologies for designing groundwater level monitoring networks are described. GIS-based mapping of groundwater regime zones provides solid bases for locating groundwater monitoring wells. Kriging based method can quantify the accuracy of the interpolation which can be used as a measure to evaluate the effectiveness of the monitoring network. Time series analysis and statistical test provide quantitative criteria to determine the optimum observation frequency. These methods were applied to the Urumqi River Basin, Beijing Plain and Jinan Karst Spring Basin and discussed in subsequent papers.

Key words: regional groundwater monitoring; optimum design; network density; observation frequency

编辑:汪美华