

基于Kriging插值方法改善地下水数值模型的精度

冯忠伦,刁维杰,焦裕飞,曹滨,王维,林洪孝,王刚

(山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:为了建立更符合研究区的地下水数值模型,提升模型的计算精度,提高水资源的管理水平。采用Kriging插值和地统计分析的方法对研究区现有的地下水监测网进行优化,分析了地下水监测站网优化前后所建立地下水数值模型的计算精度。结果表明,监测站网标准差由优化前的0.2~2.7变为优化后的0.5~0.8,整体标准差显著减小;优化后的监测站网所建立的地下水数值模型的精度优于利用原有的监测站网所建立的模型,更有助于模型的后续计算。

关键词: Kriging; 插值; 改善; 地下水; 数值模型

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2017.04.015

冯忠伦,刁维杰,焦裕飞,等. 基于Kriging插值方法改善地下水数值模型的精度[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 83-87.

0 引言

近几十年来地下水数值模拟技术取得了长足进步,可以解决地下水流问题,水质、污染物在地下水中的运移问题,还能解决地下水热运移及含水介质形变问题等等,地下水数值计算逐步成为研究分析地下水各种问题的重要手段^[1-3]。而进行地下水数值计算的前提条件是建立符合研究区实际水文地质条件的地下水数值模型。目前对于模型精度的要求主要体现在以下2点:一是模拟的地下水流场与实际地下水流场基本一致,二是模拟地下水的动态过程曲线与实测值较为接近^[4-6]。以上2点均需利用地下水水位监测数据来体现,故地下水观测井位置、监测频率及观测井数量的多少均会影响地下水数值模型的精度。Kriging插值法可用于定量评价及优化地下水监测网密度,是优化设计的常用方法之一。该方法将Kriging插值误差的标准差作为评定监测网密度的标准,其优化过程中仅依赖于监测井的位置、数量和空间布局,与实测值无关。故一个最优的监测网计算的标准差应当是最小的^[7-9]。基于此,通过Kriging插值法对原始地下水监测站网进行优化,利用优化后的地下水监测数据来进行地下水数值模型的建立,以期提高所建模型的精度,为解决地下水管理工作中的各种问题提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 Kriging插值模型

1.1.1 原理

Kriging方法是一种对时空分布变量求最优、线性、无偏内插估计量的方法^[10]。根据已知监测井的实测数据,对其进行结构性分析之后,利用待测点周围监测井的数据并赋予一定的权系数,进行加权平均来获得待测点的数值^[11]。其公式^[12-13]为:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i), \quad (1)$$

收稿日期:2016-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41202174);科技部国际科技合作与交流计划项目(2007DFB70200);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20123702120020)

作者简介:冯忠伦(1989-),男,博士研究生,主要从事水资源开发利用与管理方面的研究。E-mail: fengzhonglunoffice@126.com

通信作者:林洪孝(1959-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事水资源开发利用与管理方面的研究。E-mail: linhx@sdaa.edu.cn

式中: $Z^*(x_0)$ 为 x_0 的估计值; λ_i 为 Kriging 权系数; $Z(x_i)$ 为实测数据。

利用式(1), 在保证无偏性和最优性的前提下, 结合协方差定义, 并引入拉格朗日算法, 可得:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \lambda_i r(x_i, x_j) + u = r(x_i, x_0) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $r(x_i, x_j)$ 为变差函数; u 为拉格朗日算子。

利用式(2)并结合方差函数、协方差函数、变差函数在本征条件下的转换关系, 可得计算误差的理论方差, 即:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i r(x_i, x_0) + u. \quad (3)$$

根据实际需要给定方差临界值 σ_0^2 , 用现有监测井算出各处理论上的 σ^2 。当 $\sigma^2 < \sigma_0^2$ 时, 表示井网密度偏大, 需减少井点; 反之, 则表示井网密度偏小, 需增加井点。

1.1.2 变差函数

变差函数是刻画变量空间统计结构的, 只依赖于空间点间的相对位置与随机场特性。当 $Z(x)$ 服从本征条件时, 理论上变差函数 $\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - z(x)]^2$ 。当监测点间距为 h 的数据对有 $N(h)$ 个时, 利用 x_i 和 x_i+h 点的实测值计算变差函数 $\gamma^*(h)$, 即:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \left[\sum_{i=1}^N Z(x_i) - z(x_i+h) \right]^2, \quad (4)$$

式中: $N(h) = N(N-1)/2$, N 为地下水系统内监测井的数量, $N(h)$ 为被距离矢量 h 分隔的区域变化量 $Z(x)$ 和 $Z(x+h)$ 数值对的数量。

利用式(4)可以求得不同间距 h 所对应的 $\gamma^*(h)$, 再作 $\gamma^*(h)$ 关于 h 的曲线拟合, 从而得到 $\gamma(h)$ 。

1.1.3 阶数 N 的确定

理论上计算某一估计值时, 整个研究区的水位都需要参与计算。但实际上, 仅有靠近估计点“内圈层”的若干监测井才与估计值密切相关。研究中, 宜采用最近内圈层 2~5 个监测点进行计算^[12,14]。

1.1.4 临界理论方差 σ_0^2 的确定

临界方差的选取, 目前我国尚无相应规范规定。就国内外文献来看, 一般认为当理论方差 σ_0^2 取 0.5~0.6 时, 地下水监测网精度就可满足实际需要^[10,12-13]。

1.2 研究对象

选取南水北调东线工程梁济运河段区域作为研究对象。为明晰南水北调通水后对区域地下水的影响, 需建立该区域的地下水数值模型。研究边界以梁济运河 2 侧 10 km 处作为研究区的东、西部边界, 北部以梁山县边境为界, 南部以梁济运河流域区边界为界, 面积 1 704.32 km², 区内共有 25 眼地下水观测井, 见图 1。

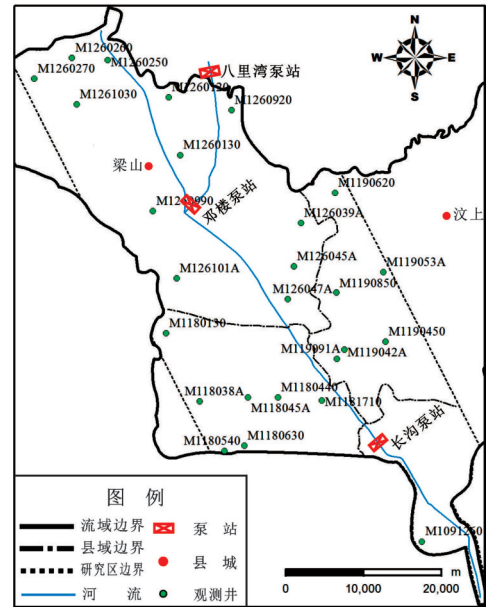


图 1 研究区位置图

2 结果与分析

2.1 变差函数的确定

首先计算两两井距并按距离间隔将其分为 6 类, 然后分别计算出各监测井的水位平方增量以及相应井距范围内的水位平方增量均值, 相关数据如表 1 所示。把 h_{ij} 均值和 $\frac{1}{2}(Z_i - Z_j)^2$ 分别作为 h 和 $\gamma^*(h)$ 的对应值, 进行曲线拟合, 拟合结果如图 2 所示。最终确定变差函数为:

$$\gamma^*(h)=0.59+20.58\left(1-e^{-\frac{h^2}{46.3^2}}\right)。(5)$$

表1 监测井井距均值与水位平方增量均值统计

井距范围/km	个数	井距均值/km	水位平方增量总和/m ²	水位平方增量均值/m ²
$h_{ij} \leq 10$	42	7.28	150.19	3.58
$10 < h_{ij} \leq 20$	61	15.47	337.70	5.54
$20 < h_{ij} \leq 30$	75	24.26	682.59	9.10
$30 < h_{ij} \leq 40$	56	34.60	827.08	14.77
$40 < h_{ij} \leq 50$	38	45.46	1156.30	30.43
$h_{ij} > 50$	28	52.83	894.35	31.94

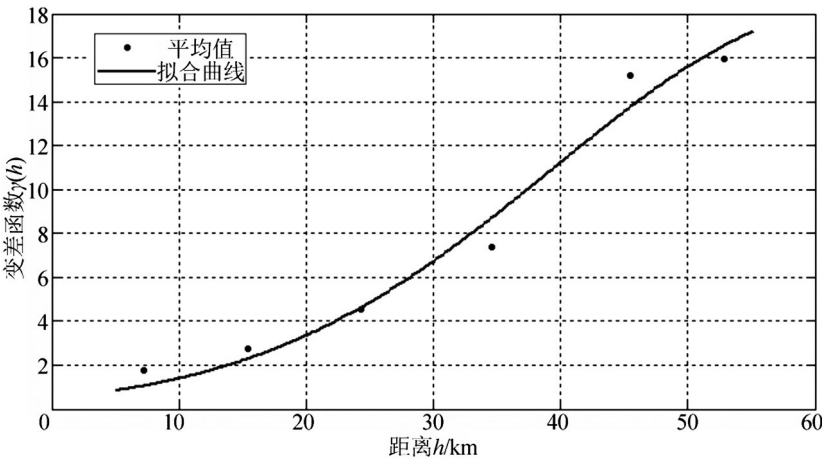


图2 变差函数拟合曲线

2.2 增(减)监测井前后估计误差计算

在图1的基础上,结合研究区实际条件,对监测井点位进行调整。调整中,根据上述变差函数(式(5)),借助ArcGIS软件地统计分析模块计算了每次调整后监测网的Kriging插值标准差,直至满意为止。研究区优化前所得出的标准差等值线见图3。由图3可以看出,研究区现行的地下水监测网计算所得标准差整体偏大,计算结果在0.2~2.7之间。在最南部区域以及北部的中间区域,偏大程度尤为明显。据此,在误差较大的区域通过增加监测点的方法对区域精测站网进行优化。研究区内最终设置32眼观测井,新增设7眼虚拟观测井。优化后监测网Kriging插值标准差大部分处于0.5~0.8之间,较优化前有显著提升。研究区优化设计后的Kriging插值标准差见图4,监测网的布设见图5。

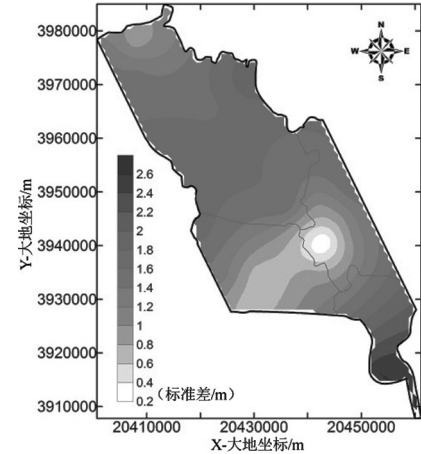


图3 优化前标准差等值线

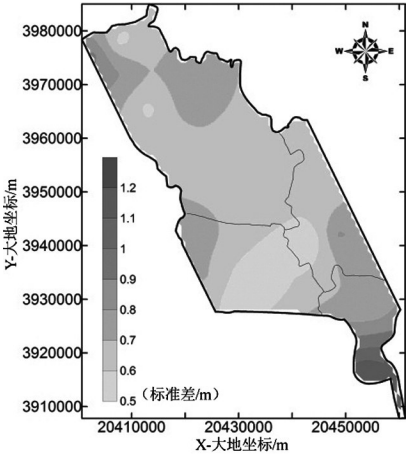


图4 优化后标准差等值线

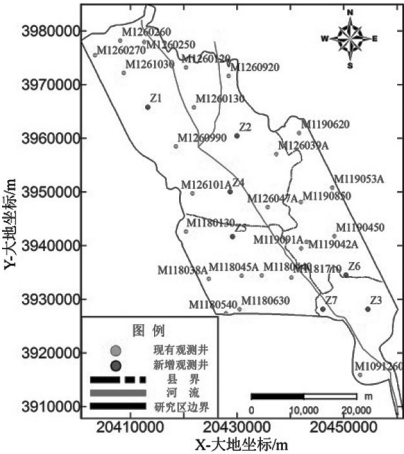


图5 优化后监测站网

2.3 监测网优化前后地下水数值模型精度对比

地下水数值模型的精度指标主要反映在均方根(RMS)、标准化均方根(NRMS)以及相关系数(R)3个方面,模型精度达到要求标准为 $RMS < 1\text{ m}$, $NRMS < 10\%$, 相关系数 R 越趋近于1越好^[15]。其中 RMS 、

NRMS均越小越好,相关系数 R 则越大越好。采用监测站网优化前后的实际观测数据及7眼虚拟观测井插值得到的数据,利用 Visual MODFLOW 建立能真实、客观、准确反映研究区地下含水层分布、属性以及边界条件、源汇项等特性的地下水数值模型,并对所建模型的精度进行验证。模型校准程度见图6、图7,相关精度指标统计见表2。

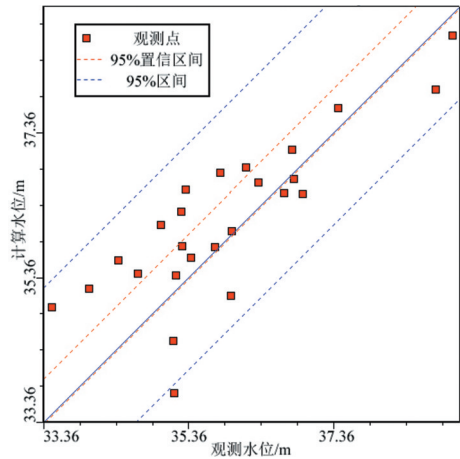


图6 优化前模型校准程度

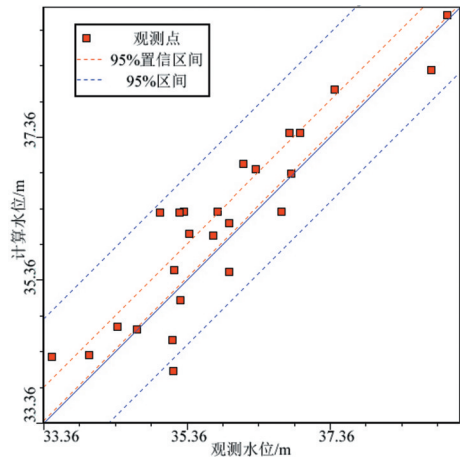


图7 优化后模型校准程度

表2 模型精度指标统计

统计指标	<i>RMS</i>	<i>NMRS</i>	<i>R</i>
优化前	0.79	14.45	0.81
优化后	0.61	9.13	0.90

由表2可知,利用优化后的监测站网所建立的地下水数值模型与利用原有的监测站网所建立的模型相比,均方根(RMS)由0.79降至0.61,标准化均方根($NMRS$)由14.45%降至9.13%,相关系数(R)由0.81提升至0.9,3个指标均优于利用原有的监测站网所建立的模型。说明利用 Kriging 插值模型优化后的地下水监测网所建立的地下水数值模型具备更高的精度。

3 结 论

1)针对该区域,提出了增设7眼虚拟观测井的优化方案。优化后,标准差大致在0.5~0.8之间,较优化前有显著提升。

2)优化后的监测站网所建立的地下水数值模型精度优于利用原有监测站网所建立的模型,说明利用 Kriging 插值模型优化后的站网有助于提高地下水数值模型的计算精度,可提供更为准确的计算结果,为地下水资源管理提供更为可靠的数据支撑。

对优化前后的监测站网所建立的地下水数值模型的精度进行了分析,表明采用 Kriging 插值和地统计分析方法优化后的监测站网提高了地下水数值模型的精度,这对地下水资源的管理具有积极的作用。在此次研究中所采用的插值计算方法为普通 Kriging 插值,对于其他插值方法对地下水数值模型精度可能产生的影响未做进一步研究。此外,在后续研究中,若条件允许,可在文中所提到的虚拟观测井的位置增设实际观测井,通过理论与实际效果的对比,以增强本文研究成果的说服力。

参考文献：

[1] 王浩,陆垂裕,秦大庸,等. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010, 17(6):1-12.

[2] 薛禹群. 中国地下水数值模拟的现状与展望[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1):1-6.

[3] 孙从军,韩振波,赵振,等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, 31(5):12-16.

[4] 李思达,林曼利,孙瑞. Feflow 在任楼井田第四含水层水场模拟中的应用[J]. 工程与建设, 2012, 26(1):21-23, 26.

[5] 魏国孝,王德军,王刚,等. GIS技术和FEFLOW在酒泉东盆地地下水系统数值模拟中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(6):1-6.

[6] 马从安,李克民,石磊,等. Visual MODFLOW 在露天矿地下水模拟中的应用[J]. 环境工程, 2011, 29(1):98-101.

[7] 郭燕莎,王劲峰,殷秀兰. 地下水监测网优化方法研究综述[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9):1159-1166.

[8] 余楚,张翼龙,孟瑞芳,等. 河套平原浅层地下水动态监测网优化设计[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4):1 173-1 179.

- [9] 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.
- [10] 陶月赞, 郑恒强, 汪学福. 用 Kriging 方法评价地下水监测网密度[J]. 水文, 2003, 23(2):46-48.
- [11] 何雨江, 靳孟贵, 刘延锋, 等. 南疆棉田表层土壤盐分的空间变异特征分析与应用[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6):89-93.
- [12] 刘治政, 吴晓东, 林洪孝. Kriging 插值模型在地下水位监测网优化中的应用[J]. 人民长江, 2010, 41(9):14-17.
- [13] 屈泽伟, 张翼龙, 王贵玲, 等. 内蒙古呼和浩特市承压地下水水位监测网优化[J]. 地球学报, 2013, 34(2):223-228.
- [14] 杨超. 银川平原地下水水位监测网优化设计[D]. 西安:长安大学, 2010.
- [15] 廖梓龙. 包头市地下水动态模拟与调控研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.

Improving Accuracy of Numerical Modelling of Groundwater Using Kriging Interpolation

FENG Zhonglun, DIAO Weijie, JIAO Yufei, CAO Bin, WANG Wei, LIN Hongxiao, WANG Gang
(Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: This paper investigated how to improve the accuracy of groundwater numerical modelling and the consequent water resource managements using Kriging interpolation and geostatistical analysis. We compared the simulated results with and without optimizing groundwater monitoring networks. The results showed that the standard deviation of monitoring network ranged from 0.2~2.7 to 0.5~0.8, and the overall standard deviation decreased significantly. The groundwater numerical model after optimizing the monitoring network was superior to the original method, helping any pro-calculations after the groundwater simulations.

Key words: Kriging; interpolation; improvement; groundwater; numerical model

责任编辑:陆红飞