

地下水动态监测系统质量评价研究进展

陶月赞¹, 席道瑛², 高尔根²

(1. 合肥工业大学土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230007; 2. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:指出地下水动态监测资料是地下水资源评价、开发与管理的基礎, 监测成果的时效性、可靠性等在很大程度上取决于地下水动态监测系统的质量。基于此, 对地下水动态监测系统质量评价研究现状进行了深入分析, 同时, 基于地下水系统的动态、开放性质, 介绍动态 Kriging 方法的应用, 完善了地质统计学方法在动态开放系统中的应用。

关键词:地下水动态监测网; 地质统计学; 动态系统; 动态 Kriging 方法

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)03-0061-03

Assessment of groundwater dynamic monitoring system//TAO Yue-zan¹, XI Dao-ying², GAO Er-gen² (1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230007, China; 2. College of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: It is pointed out that the dynamic monitoring data of groundwater is the basis for assessment, development and management of groundwater resources, and that the time effectiveness and reliability of the monitoring result depend on the performance of the dynamic monitoring system of groundwater to a great degree. Based on the ideas, an analysis was made on the current situation of quality assessment of the groundwater dynamic monitoring system, and the dynamic Kriging method was introduced and applied based on the dynamic and open characteristics of groundwater. The present study promotes the application of the geo-statistical method to the dynamic and open system.

Key words: groundwater dynamic monitoring network; geostatistics; dynamic system; dynamic Kriging method

地下水动态监测系统质量的定量研究, 始于 20 世纪 80 年代, 以 Ricard A Olea 用单变量 Kriging 方法分析美国 Kansas 州一地下水管理区的地下水水位监测网密度问题作为标志^[1]。

1 地下水动态监测系统质量

地下水动态监测系统质量的含义、内容, 与监测系统的布设目的有关, 为进一步研究区域水文地质条件, 掌握地下水变化动态, 为水资源评价及相关研究提供基础资料的区域地下水动态监测网的质量内容主要包括: ①样品源质量。在地下水监测系统中主要取决于监测井结构的合理性, 如监测井是否正确地揭露了监测目的层, 井径与目的层结构是否相适应以灵敏地反映动态变化过程, 以及监测目标变量是否受到其他因素(如地表水体)影响等。②样品点位置与密度。在地下水监测系统中, 井网密度与监测井在井网中的相对位置, 直接关系到目标变量的区域分布特征能否被有效监控。③取样频率。取样频率与目标变量动态特征可否被有效监测相对应。④数

据传输与分析整理。数据传输关系到监测成果被利用的时效性, 数据分析整理与监测成果被开发利用的深度及广度相关^[2]。

由于对“观测点的几何位置、分布密度及观测频率的确定缺乏充分的科学依据”^[3], 造成文献[3]和[4]在对同一地区(如冲洪积平原区)井网密度的规定竟然相差 2 倍以上。所以, 目前关于动态监测系统质量的评价研究主要集中在关于井网密度、监测井位置及取样频率的分析评价与设计方面, 这既是监测系统质量评价的理论核心所在, 也是实际工作中的重点和难点所在。

2 地下水流系统特征

地下水流系统中的大多数系统状态变量如地下水水位、水质浓度等, 都是空间位置的函数, 也即属于区域化变量, 由于变量在空间上具有相关性质, 所以可应用地质统计学原理来进行相关研究。与一些区域化变量(如固体矿床厚度等)所处的系统相比, 地下水流系统(以地下水水位为例)还具有以下特

点:①系统状态变量在空间上具有相对的连续性和渐变性,区域地下水流系统内,系统状态变量在空间上一般是连续分布的,其变化也相对较平稳,很少有影响区域系统特征的突变;②系统状态变量在时间上具有动态性和自相关性,变量是时间的函数,并具有明显的自相关关系;③系统的开放性,系统状态变量不仅是空间位置和时间的函数,而且还是降水、蒸发、人工开采等自变量的函数^[1,5,6]。

基于系统状态变量在空间上的相对连续性和渐变性,变量的空间统计结构一般可用半变差函数刻画;基于系统状态变量的动态性和自相关性,以及系统的动态开放性质,传统的 Kriging 方法对动态变量监测(网)点难以进行实质上的质量评价^[1]。

3 动态监测系统质量评价的研究现状

在 Ricard A Olea 用 Kriging 方法研究地下水水位监测网密度问题后,Aboufirassi M 和 Marrino M A 在研究导水系数“T”野外分布时,利用 Co-Kriging 方法,将单井出水能力“SC”作为一辅助变量来弥补含水层导水系数取样点不足问题;Jesus C 等将地下水水位作为辅助变量,也利用 Co-Kriging 方法,对美国 Arizona 州 San Pedro 流域地下水水质取样点设计问题进行了研究.在研究某一目标变量时,常遇到取样点不足的问题,利用 Co-Kriging 方法,可将其他与变量相关的信息用来辅助对目标变量的研究。

Aboufirassi M 和 Marrino M A 在研究 Morocco Souss 地区的地下水水位分布时,利用 Uni-Kriging 方法,以解决非本征条件下(即随机函数 $Z(x)$ 增量的数学期望与方差函数不平稳,但此时 $Z(x)$ 的协方差函数或半变差函数为已知)变量空间统计结构模型的建立问题;Carrera 等、Neuman S P 和 Jacobson E L, Ahmed 和 De Marsily,以及 Shamsi 等也在各自的研究中利用了这一技术方法^[7]。研究地下水流系统中不符合本征条件的变量空间统计结构问题时,Uni-Kriging方法是一种有效的方法。

Board I 和 Bardosy A 在研究含水层结构参数取样点问题时,提出用混合整数规划与 Kriging 方法相结合来进行优化设计;Loaiciga H A 用这一方法对地下水水质井网进行了优化设计的研究.优化技术的引入,使地下水监测井网的最优化设计成为可能。

Loaiciga H A 等,对 Kriging 系列方法在地下水水质取样点(网)的评价与设计中的应用的研究进行了概述与展望分析^[7];Fethi B J 等对 Kriging 系列方法在地下水监测井位置与井网密度、监测(取样)频率优化设计中应用的研究,进行了综合性概述与展望分析^[8]。

在该领域研究中,重要文献的作者还有:

Nakamura M 和 Riley J M, Szidarovszky F, Keith S J, Olea R A, Loaiciga H A, Loucks D P, 仵颜卿, Quinlan J F, 孙永堂, Tain-Shing Ma 等。

由于地质统计学最初是在对固体矿床的研究中发展起来的,它所研究的目标变量(如矿床厚度、矿体品位等)是不随时间变化的,但在地下水流系统中,变量随时间变化问题是难以回避的,为此 Shahrokh Rouhai 和 Timothy J Hall 提出了 S-T(Space-Time)Kriging 方法,该方法用构造变量空间统计结构的方法来构造变量时间上的变化特征,这可能能解决变量时间上的自相关(系统动态性)问题,但难以解决系统的开放性问题^[1]。

根据水量均衡原理,将刻画系统输入响应和变量时间上自相关性质的动态模拟模型与 Kriging 方法的变量空间统计结构模型相耦合,由此建立的动态 Kriging 方法可有效地解决开放的动态系统中地质统计学方法的应用问题^[1,6]。实例研究表明,在诸如浅层地下水流这样的动态开放系统中,动态 Kriging 方法的计算效果要好于传统的 Kriging 算法^[1]。

4 动态 Kriging 方法

以在平面二维空间上建立地下水水位动态 Kriging 计算方程为例,阐明该方法的基本原理.在动态开放系统的地下水流中,空间某点 x 上 $t+1$ 时刻的地下水水位 $Z^{t+1}(x)$,既是该点 x 上的 t 时刻水位 $Z^t(x)$ 的函数,也是其他与水位相关的自变量(如降水入渗等)的函数,用根据水量均衡原理建立的多元回归与自回归相结合的动态模拟模型刻画^[1]:

$$Z^{t+1}(x) = \delta Z^t(x) + \sum_{\beta=0}^B b_{\beta} q_{\beta}^{t+1} + \epsilon \quad (1)$$

式中: δ 为 $Z^t(x)$ 对 $Z^{t+1}(x)$ 的自回归系数; b_{β} 为第 β 个自变量 q_{β} 的回归系数; ϵ 为随机成分; B 为对水位影响的变量个数.值得一提的是,当变量动态模拟模型的影响因子比较多时,控制进入模型因子个数对模拟质量十分重要,回归方程中并非是因子个数越多越好^[9]。

由 Kriging 插值方法原理,在 x_0 点 $t+1$ 时刻的地下水水位待估值为 $Z^{t+1}(x_0)^*$,它由 N 个已知点水位 $Z^{t+1}(x_i)$ 的线性组合来计算:

$$Z^{t+1}(x_0)^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z^{t+1}(x_i) \quad (2)$$

式中 λ 表示 Kriging 权系数.该插值算法要求满足无偏性条件和最优性条件:

无偏性

$$E[Z^{t+1}(x_0)^* - Z^{t+1}(x_0)] = 0 \quad (3)$$

最优性

$$\delta^2 = \text{Var}[Z^{t+1}(x_0)^* - Z^{t+1}(x_0)] = \min \quad (4)$$

式中 $\text{Var}[*]$ 为方差算符. 对距离为 h 的空间不同点之间的水位相关关系, Kriging 方法用半变差函数来刻画:

$$\gamma(x, h) = \frac{\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]}{2} \quad (5)$$

半变差函数是通过实际观测数据与理论半变差函数的拟合来构造的. 要在无偏性条件下获得插值计算的最优性, 利用拉格朗日算法, 注意协方差定义与式(5)的半变差函数之间在本征条件的转换关系, 可推导出求解 Kriging 权系数 λ 的动态 Kriging 方程组, 该方程组是正定方程组, 有惟一解:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \gamma(x_i, x_j) + \mu_\delta \delta(x_i) + \sum_{\beta=0}^B \mu_\beta b_\beta(x_i) q^{t+1}(x_i) = \gamma(x_i, x_0) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i \delta(x_i) = \delta(x_0) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i b_\beta(x_i) q^{t+1}(x_i) = b_\beta(x_0) q^{t+1}(x_0) \end{cases} \quad \begin{matrix} (i = 1 \sim N) \\ \\ (\beta = 0 \sim B) \end{matrix}$$

利用上述方程组可求出动态 Kriging 权系数 λ_i , μ_δ 和 μ_β 是拉格朗日算子. 在非本征条件下, 利用 Uni-Kriging 对变量空间统计结构模型的构成方法, 同上述动态 Kriging 方法建立过程, 可建立动态的 Uni-Kriging 方程组; 同理可建立动态的 Co-Kriging 方程组. 在求出 Kriging 权系数 λ_i 后, 根据已知点水位, 利用式(2)就可对未知点进行估值计算了.

理论上, 一定范围内所有空间点之间都存在空间统计结构关系, 而且不论点的多少, 都进入 Kriging 方程组中; 在地下水流系统的实际问题研究中, 当进入 Kriging 方程组中空间点过多, 往往引起 Kriging 方程组产生严重病态, 此时, 可通过统计结构分析与 Kriging 方程组验算相结合来确定进入 Kriging 方程组中空间点的范围和数量^[1,6].

动态 Kriging 方法是根据水量均衡原理, 将系统输入作用和变量时间上的自相关性质综合在多元回归与自回归相结合的动态模拟模型中, 再与关于变量空间统计结构的半变差函数模型相耦合, 建立变量空间插值的计算方程. 与传统 Kriging 方法相比, 动态方法具有以下优点: ①更全面地反映了水位在时空上的变化特征, 也更客观地刻画了变量的本质, 因而也可获得更为精确的计算值^[1]; ②因为结合了变量时间上的自相关关系, 动态 Kriging 方法可模拟

预测变量在空间上的动态分布状态, 这是传统方法所不能的^[5]; ③可对动态变量进行取样点(如水位动态监测网)的优化设计. 传统方法由于未考虑变量的动态性, 只能依据动态变量在某一时刻的分布特征来进行评价(设计), 由此显然只能得出该特定时刻的评价(设计)结果, 而难以对未来动态监测点(网)进行实质设计^[6]. 动态 Kriging 方法可有效解决这一问题.

5 结 语

地下水动态监测系统质量评价研究的核心问题是关于井网密度、监测井位置及取样频率的评价与设计, 但点上基础数据质量及监测成果的开发利用也不可忽略, 目前井径与目的层结构相适应问题的研究基本上还处于空白阶段^[2].

基于系统状态变量在空间上的相对连续性和渐变性, 传统的 Kriging 方法可较好地刻画变量的空间统计结构; 基于系统动态、开放性质, 动态 Kriging 方法是对地质统计学方法原理在动态开放系统中应用的完善.

参考文献:

- [1] 陶月赞. 安徽省阜阳地区浅层地下水动态监测网优化设计[D]. 长春: 长春科技大学, 1997.
- [2] 陶月赞, 岳文君. 安徽省淮河流域地下水动态监测系统存在的问题与改进建议[J]. 治淮, 2003(10): 15—16.
- [3] CJJ/T76-98, 城市地下水观测规程[S].
- [4] SL/T183-96, 地下水监测规范[S].
- [5] 陶月赞. 动态 kriging 方法[J]. 世界地质, 1997(4): 35—37.
- [6] 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.
- [7] Loaiciga H A, Charbeneau R J, Everett L G, et al. Review of ground-water quality monitoring network design [J]. Hgdrg ASCE, 1992, 118(1): 11—37.
- [8] Fethi B J, Marino M A, Loaiciga H A, et al. Multivariate geostatistical design of ground-water monitoring network [J]. Water Resources Planning and Management, 1994, 120(4): 502—522.
- [9] 陈葆仁, 洪再吉, 汪福忻. 地下水动态及其监测[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [10] Keith S J. Sources of spatial-temporal variability in groundwater quality data and methods of control [J]. Groundwater Monitoring Review, 1983(2): 21—32.
- [11] Ma T S, Marios S, Yu Y S, et al. Geostatistics applications in ground water modeling in south-central Kansas [J]. J Hydrological Engineering, 1999(1): 57—64.
- [12] 陈梦熊, 马凤山. 中国地下水资源与环境[M]. 北京: 地震出版社, 2002.

(收稿日期: 2004-04-01 编辑: 高建群)