

地下水动态预测的探讨

王光生, 杨建青, 于 钊, 杨桂莲

(水利部水文局, 北京 100053)

摘要: 简要介绍地下水数学模型的原理和应用实例, 着重介绍在河北省大清河地下水系统的大沙河-磁河冲洪积扇孔隙地下水区, 尝试建立地下水埋深变幅预测的统计相关方法和神经网络模型取得的良好效果; 同时对地下水预测中的降水补给、边界和初始条件等的处理进行讨论, 对数学模型和统计相关模型优缺点进行比较。

关键词: 地下水动态预测; 数学模型; 统计相关方法; 神经网络

中图分类号: P345

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)03-0025-04

1 引言

科学合理开发利用地下水资源, 应以及时、准确的地下水动态信息为科学依据, 目前地下水动态信息多以实测信息为主, 对地下水动态的预测预报能力不足, 全国还没有一个部门开展规范的地下水作业预测预报, 不能满足水资源管理的需求。地球上的淡水资源主要包括大气降水、地表水和地下水三部分, 降水和地表河流湖泊的预测预报均已很成熟规范, 构建完善的水资源预测预报体系需要努力提高地下水预测预报能力。开展地下水预测预报既是满足水资源管理的需要, 同时也是人类探求自然规律、认识自然世界的需要。

浅层地下水是地下水资源开发利用的重点, 我国农村的农田灌溉和生活用水几乎全部是浅层地下水, 城市的生产和生活用水大部分也是浅层地下水; 浅层地下水与地表水、生态环境密切相关, 河流湖泊的干枯、土地的盐碱化等生态问题均源于浅层地下水的埋深不合理, 因此浅层地下水应是预测预报研究的重点。地下水的运动速度和水位的变化均相当缓慢, 其水位一日甚至几日内一般无显著变化, 短期预报没有太大意义; 地下水预测的主要服务对象是水资源管理等, 这些工作更需要的是地下水位变化的中长期趋势分析。因此地下水的预测预报应着眼于其中长期变化趋势的预测分析。

2 地下水预测方法

2.1 地下水数学模型

浅层地下水的运动属于饱和渗流, 在重力的作用

下, 由水位较高处向水位较低处通过含水层空隙渗透流动。描述浅层地下水渗流的是达西公式, 根据达西公式和水量平衡原理可得二维潜水非稳定流方程^[1]如下

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kb \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kb \frac{\partial H}{\partial y} \right) + w = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为地下水水位 (m); x 为距离 (m); y 为距离 (m); K 为渗透系数 (m/s); b 为含水层厚度 (m); w 为单位时间内单位面积上垂直方向的水分交换量, 入渗、蒸发、水井抽水等 (m/s); μ 为给水度 (无量纲); t 为时间 (s)。

式(1)是描述地下水非稳定流运动的微分方程, 因此对于地下水动态预测很容易想到去求解这个方程。20世纪后期, 随着计算机技术的发展, 数值求解地下水非稳定流移动方程逐渐被应用到地下水动态的分析预测中, 建立地下水分析预测的数学模型^[1], 进行地下水数值模拟, 经过多年发展种类方法的算法已经很成熟, 并开发出了一些成功的商业软件, 如 MODFLOW 等。目前比较流行的数值离散方法有有限差分法和有限单元法, 其基本思路是: 将计算区域划分成若干计算单元, 将微分方程离散为代数方程, 最后求解代数方程, 求出单元节点的地下水位值。

无论是求微分方程的解析解还是数值解均需要定解条件, 即边界条件和初始条件, 因此地下水数学模型需要计算区域的边界条件和初始条件。边界条件有两类: 第一类已知计算区域边界上的水位过程, 第二类已知计算区域边界上的流量, 就是已知水位沿边界的外法向导数值。初始条件是计算区域初始时刻的水位分

收稿日期: 2011-12-06

作者简介: 王光生 (1962-), 男, 河北肃宁人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源技术工作。E-mail: gshwang@mwr.gov.cn

布。要建立一个区域的地下水数学模型,还需要比较详细的资料,包括反映计算区域地形、含水层特性等的水文地质测绘、钻探和实验资料,用于模型率定的长期地下水位观测资料等。

2.2 统计相关法

20世纪上半叶水文工程师开始将统计相关方法应用于河流预测预报中^[2],简单实用且效果良好,其经验很值得地下水预测借鉴。统计相关法的原理是:通过分析历史观测资料,找出影响地下水位变化的主要因子,建立它们与地下水位的相关关系。统计相关法的关键是确定正确的相关因子,相关因子与地下水位的关系应有明确的物理成因,相关关系则是建立在统计基础上的纯数学关系。一些复杂的纯数学模型,如神经网络^[3]等,按其本质也应属于统计相关方法只是计算方法比较复杂。单井的水位易受附近抽水等偶然因素的影响,另外其补给区域也难以划定,因此统计相关法最好是预测一个区域的平均地下水位。

地下水位的变化主要受补给和排泄的影响,在诸多影响因素中最主要的补给是降水,在地下水埋深较大的北方平原区最主要的排泄是抽取地下水。降水通过土壤或岩石空隙缓慢渗入含水层,地下水埋深较大的地区降水对地下水的补给有较长的滞后期。在海河平原区,地下水位不仅受当月的降雨影响,一般还受上个月的降水影响,甚至受上两个月的降水影响。地下水的降水入渗补给和抽取等排泄引起储量的变化导致水位的升降,将地下水的补给和排泄因素与地下水位的变幅建立相关,更明了且计算精度更高。春季是主要灌溉期地下水的开采较多,夏季降水充沛地下水的补给较多,这两个季节相关模型的建立要考虑诸多补给和开采因素;深秋和冬季地下水的开采较少且相对稳定,地下水的补给也较少,在地下水的主要开采区北方这种特点尤为明显,因此相关模型的建立相对简单。

统计相关法一般不考虑一类边界条件,对于二类边界条件不能不考虑。如山前平原区山区径流通过坡角侧向补给平原区含水层,可将补给山区的降水作为一个影响因素考虑,与其它影响因素一同建立相关模型。统计相关法的初始条件比较简单,只是一个初始时刻区域的平均水位。

为了探索统计相关方法在地下水预测中的应用,在河北省大清河地下水系统的大沙河-磁河冲积扇孔隙地下水区,尝试建立地下水埋深的相关预测模型。该区属于山前平原,位于石家庄市和保定市交界处,面

积 2 600km²。多年平均降水量 492.6mm,年内降水分配极不均匀,全年降水量 75%~80%集中在 6~9 月,降水量的年际变化很大。区内有大沙河和磁河两条河流,常处于干枯状态。地下水主要接受降水入渗和山区侧向入渗补给,区内没有城市水源地及大的工业区,以农业开采为主。该区包气带岩性以砂性土为主,含水层呈单层及双层结构厚度 20~50m。

由于河流基本常年干枯,地下含水层与河流基本没有水量交换,影响地下水埋深变化最主要的因素是降雨和人为开采。这两个主要影响因素中,降雨量的年际变化较大,监测资料情况也较好;开采量全部为统计数据,准确性相对较差,经分析与地下水位的相关性并不好。因此只选择降雨量与地下水埋深建立相关关系。在统计面平均雨量时,将山前补给区的降雨一并统计。

6~9月的降雨量较大,降雨能够渗入土壤补给地下水,因此 6~10月的地下水位变化趋势受降雨影响比较明显,建立降雨量与地下水埋深的相关关系。经相关分析,建立 5月、6月合计区域面平均雨量与 5~6月区域面平均地下水埋深变幅,6月、7月合计区域面平均雨量与 6~7月区域面平均地下水埋深变幅,7月、8月合计区域面平均雨量与 7~8月区域面平均地下水埋深变幅,8月、9月合计区域面平均雨量与 8~9月区域面平均地下水埋深变幅,7月、8月、9月、10月合计区域面平均雨量与 9~10月区域面平均地下水埋深变幅的相关图,相关程度最好。图 1 是 8 和 9 月降水与 8 月末至 9 月末地下水埋深变幅的相关。

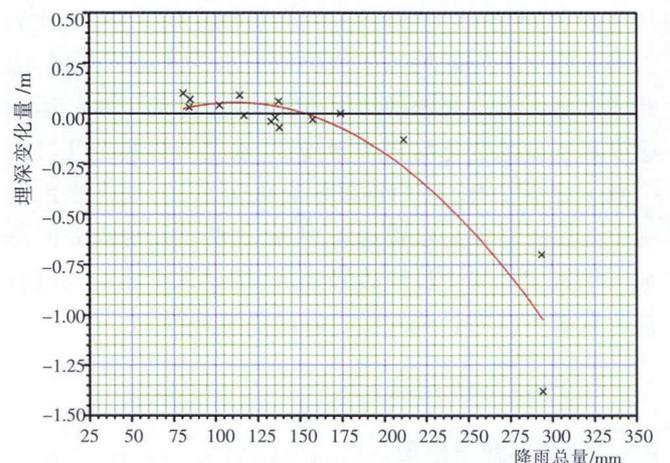


图 1 8 和 9 月降水与 8 月末至 9 月末地下水埋深变幅的相关
Fig.1 Correlation between the total rainfall of August and September, and the groundwater changes between the end of August and September

还建立了5月、6月区域面平均雨量与5~6月区域面平均地下水埋深变幅,6月、7月区域面平均雨量与6~7月区域面平均地下水埋深变幅,7月、8月区域面平均雨量与7~8月区域面平均地下水埋深变幅,8月、9月区域面平均雨量与8~9月区域面平均地下水埋深变幅,7月、8月、9月、10月区域面平均雨量与9~10月区域面平均地下水埋深变幅的神经网络模型^[3]。采用的是目前在水文预报中应用较多且已被实践证明效果良好的^[4-5]BP(Back Propagation)神经网络。图2是6~10月实测和模拟的区域平均地下水埋深,平均误差0.07m。

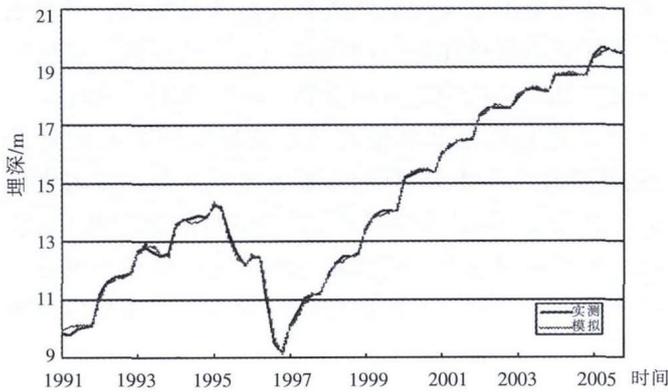


图2 1991~2005年6~10月实测区域平均地下水埋深与神经网络模型(ANN)模拟结果对比

Fig.2 Comparison between monitored and ANN simulated regional groundwater depth of June to October during 1991-2005

11~5月降水稀少地下水埋深与降水量几乎没相关,地下水埋深变幅当主要受开采量的影响。地下水的开采量没有精确的统计数据可利用,这几个月的历年埋深月变幅差别不大,因此采用各月历年区域埋深平均变化幅度预测,即

$$H_{i+1} = H_i + \overline{\Delta H_{i+1}} \quad (2)$$

式中: H_{i+1} 为下月末区域平均埋深,m; H_i 为本月末区域平均埋深,m; $\overline{\Delta H_{i+1}}$ 为本月末至下月末历年区域平均埋深平均变幅,m。

从10月末开始,由上月末实测区域平均地下水埋深推求下月末区域平均地下水埋深,预见期1个月,模拟结果见图3,平均误差0.06m;从10月末开始,由10月末的实测区域平均地下水埋深推求11~5月末的区域平均地下水埋深,预见期各月不同,11月预见期1个月,5月预见期7个月,模拟结果见图3,平均误差0.13m。

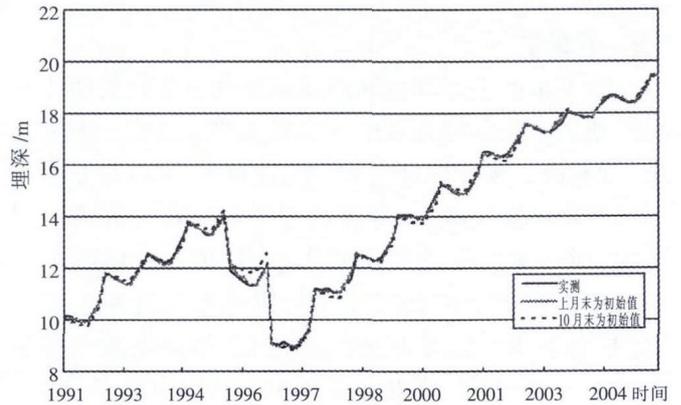


图3 1991~2005年11~5月实测区域平均地下水埋深与模拟对比
Fig.3 Comparison between monitored and simulated regional groundwater depth form November to May during 1991-2005

3 地下水预测中有关问题的讨论

3.1 降水补给

关于降水补给主要有两个问题:降雨补给地下水的计算,预见期内未来的降雨如何处理。降水如何补给地下水,在统计相关模型中比较简单,只是建立降水与地下水位的统计关系。对于数学模型,目前常用的方法是将降水乘以入渗补给系数。相对于数学模型的其它环节这个重要的补给源的处理有些粗糙,降水补给地下水的比例主要取决于入渗降水在包气带的损失,与由前期降水决定的包气带含水量相关,每场降水均不同。解决这个问题的途径应当是将地表径流的流域水文模型和地下水数学模型进行耦合,将流域水文模型中计算的基流作为降雨对地下水的补给。目前有人在进这方面的研究,但距离实用还有一定的差距。这个问题的难点是:降水对地下水的补给没有实测值,在开采量为欠准确的统计数据情况下模型的水量平衡难以控制。

未来的降水量,可以利用气象部门的中长气降水预报值,但是目前中长期降水预报的准确性还有待改进,利用预报降水值预测的地下水位准确性不会好。既然未来的降水不能准确的预知也可以另辟途径,根据当前的地下水位预测出未来各种降水情况下的地下水动态供参考。如选择丰水、平水和枯水等典型情况的降水量分别预测未来的地下水位,给出未来各种降水情况下的地下水位;或借鉴河川径流预报中集合预报^[6]的概念,根据当前的实测初始情况,将历年的降水分别输入预测模型得出一组预测值,再将这些预测结果进行频率统计,给出当前初始条件下未来地下水位的概

率分布。

3.2 开采量

地下水的主要开发利用地区是地下水分析预测的重点地区,在这些地区地下水最主要的排泄是人为开采。目前地下水开采量主要是统计数据,多由井灌面积乘以作物灌溉定额,每年无论天气如何开采量均差别不大,对于多年平均情况基本准确,但是具体到某一年就不准确了。因此需要寻找影响开采量的主要因素,与地下水位建立相关。在近20年来井灌面积基本稳定的情况下,如果农业种植结构没有大的变化,影响开采量最主要的因素是降水,干旱灌溉抽水多湿润灌溉抽水少。前面介绍的在河北研究区域建立的统计相关模型只用了降水资料,加入地下水开采量统计数据相关效果反而不好。另外经过分析温度也是一个影响地下水位的重要因素,在北方地下水主要开采区地下水的埋深较大,温度通过增加蒸发对地下水位的影响不会太大,唯一的可能是温度增高导致农田干旱,增加了用于灌溉的地下水开采导致地下水位下降。

3.3 边界条件和初始条件

第一类边界条件需已知预见期内计算区域边界上的水位过程,如果按照预测分析的需要在一个大的含水层内划出一块计算区域,计算区域内外的水是连通的,预见期内边界上的水位是变化的且很难预知。如果是分析水源地等地下水集中开采区漏斗的水位变化,由于开采漏斗的水位变化相对较大,假的边界未来的水位过程可以。对于区域水资源量的分析预测一类边界条件很难应用,分析未来地下水资源量的变化区域的水量平衡则尤为重要。因此在划定研究区域时应按照流域分水岭划分,研究区域相对封闭是真实的物理边界,可以假定边界上的流量为零。对于山前平原山区的降水补给,数学模型应研究通过流域水文模型计算补给量,统计相关模型可将补给区的降雨作为一个影响因素考虑。

数学模型需要计算区域内各网格节点均有一个初始水位值,但是在区域内一般只有有限的几个点有实测地下水位,需要通过空间插补得到各网格节点的初始水位值。空间插补,一般先通过可里金(Kriging)^[7]等空间插值算法由计算机自动完成再人工修改,是一项繁琐耗时的工作,需要经验丰富的专家才能完成。经常是确定后的初始值连续运行一年甚至一年以上,如果每月定期运行预测,本月的实测值不便加入作为模型

的起算点,导致模型的误差积累。应研究通过监测井的模拟与实测水位误差的空间分布校正区域内各网格模拟水位,这样年初生成初始水位场,每次预测分析时可根据当前的实测水位对当前的模型计算水位场进行校正,再以校正后的水位场作为当前的初始水位起算,减少模型的误差积累。

3.4 方法比较

数学模型和统计相关方法各有优点,同时也各有其局限性。数学模型是地下水运动微分方程的数值解,当然在求解时对含水层进行了一些概化,物理概念明确清晰、更贴近地下水运动的物理机制,对地下水动态刻画的相对细致能够求出区域内各网格节点的水位;缺点是需要的水文地质等资料比较详细精确,资料条件不好结果可能比简单的统计相关方法还差,这些特点又使其在生产中的应用受到了一定限制。统计相关方法建立的是地下水位与其主要影响因素的统计关系,物理概念不十分严谨,一般也不能预测区域内水位的空间分布;但是方法简单,需要的资料相对较少,能够满足对区域地下水资源量分析预测的要求,更适用于水利行业为地下水资源管理和开发利用服务的预测分析。

参考文献:

- [1] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. (XUE Yuqun, XIE Chunhong. Groundwater Mathematical Modeling [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 庄一鹤, 林三益. 水文预报 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1986. (ZHUANG Yiling, LIN Sanyi. Hydrological Forecasting [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1986. (in Chinese))
- [3] 韩力群. 神经网络理论、设计及应用 [M]. 北京: 化工出版社, 2002. (HAN Liqun. Theory, Design and Application of Artificial Neuron Network [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [4] A. Sezin Tokar, Peggy, A. Johnson. Rainfall-runoff modeling using artificial neural network [J]. Journal of Hydrology Engineering, 1999,(6):232-239.
- [5] 王光生, 苏佳林, 沈比成, 等. 神经网络理论在河道洪水预报中的应用 [J]. 水文, 2009, 5 (29). (WANG Guangsheng, SU Jialin, SHEN Bicheng, et al. Application of neural network theory in river flood forecasting [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 5(29). (in Chinese))
- [6] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. (CONG Shuzheng. Probability and Statistical Methods in Water Science and Technology [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [7] Baxter E. Vieux. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS (Second Edition) [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.

(下转第 51 页)

在流程上已经实现了全自动运行,能够满足业务实时自动运行的要求。

(2)系统在进行每日区域面雨量估算时,当降水强度较大时(面雨量>20 mm),MWRQ2 估算结果比常规雨量计估算结果系统偏小;当面雨量约 10 mm 左右时两者偏差最小,平均偏差约 2%~19%;当面雨量小于 5 mm 时,雷达往往超估很多(>30%),但是这种偏差不影响水文预报的业务应用。

(3) 由于没有得到流域内山东和江苏的自动雨量站资料,质量控制效果存在区域不平衡的问题,如果能增加该两省的自动雨量资料,同时将流域内的遥测站一起用于估算降水的校准,将可以大大提高降水精度。

(4) 系统在基数据的质量控制上较国内现有技术具有明显的优势。在降水定量估算上,由于淮河流域相对平坦,面雨量估算结果较好。但是,因系统建成时间

短,可供分析的个例少,分析结果代表性不足。

参考文献:

[1] Jian Zhang, Kenneth Howard, et al, National Mosaic and Multi-Sensor QPE(NMQ) System [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2011,91: 1321-1338.

[2] Zhang, J., Y. Qi. A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived precipitation estimation [J]. J. Hydrometeor., 2010,11: 1157 - 1171.

[3] 李伟珮,张诚,李全胜,等.遥测雨量站网的布设与合理性论证[J].水利水文自动化, 2009,(3):45-47. (LI Weipei, ZHANG Cheng, LI Quansheng, et al. Proof of layout and rationality of remote rain gauge network [J]. Water Conservancy Hydrological Automation, 2009,(3):45-47.(in Chinese))

[4] 葛小平.虹吸式自记雨量计与 JDZ02 型固态存储雨量器同步观测雨量的误差分析[J].甘肃水利水电技术,2009, 45(6): 17-18.(GE Xiaoping. The error analysis of rainfall observed synchronously by the siphon and the JDZ02 type solid storage rain gauge [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2009,45(6): 17-18.(in Chinese))

Application Analysis of Weather Radar Application System in Huang-Huai Basin

XU Sheng¹, WANG Lin², ZHENG Wen², ZHANG Lina³, ZHANG Jian⁴

(1. Bureau of Hydrology, Huaihe River Commission, Bengbu 233001, China;

2. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China;

3. Bureau of Hydrology, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China;

4. NOAA/National Severe Storms Laboratory, Norman 73072, USA)

Abstract: During 2009-2010, Bureau of Hydrology of MWR introduced to the multi-sensor quantitative precipitation estimation system of next-generation(Q2) developed by the NOAA/National Severe Storms Laboratory (NSSL). Q2 was transformed into weather radar application system (MWRQ2) for quantitative precipitation estimation experiment in the Huaihe River Basin and the middle-reach of Yellow River. The MWRQ2 integrates 6 Chinese new generation weather radar (CINRAD), rain gauge, and atmospheric environmental data and generates a suite of precipitation products in real-time on 0.01°×0.01°(1km×1km) grid mesh at 10-minute update frequency, and the area rainfall (1,3,6,12,24,48,72h) of the sub-catchment was also calculated synchronously. This paper described the components and key technology of the system. The area rainfall resulted from MWRQ2 was analyzed with the conventional rain gauge data. The results indicate that rainfall estimated with the two methods has good consistency, especially the time-interval area rainfall.

Key words: weather radar; multi-sensor; quantitative precipitation estimation; Huang-Huai basin

===== (上接第 28 页)

Preliminary Study on Groundwater Level Prediction

WANG Guangsheng, YANG Jianqing, YU Po, YANG Guilian

(Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: This paper briefly introduced the groundwater conception model and its application, and emphatically introduced the establishment of correlation models and neutral network models for groundwater level prediction in alluvial fan porewater aquifer of dashahe-cihe region at Daqinghe groundwater aquifer system in Hebei Province. Issues such as replenishment of precipitation for ground water, mining yield of groundwater, boundary condition and initialization condition in groundwater prediction were discussed. Advantage and disadvantage of conception model and correlation model were also compared.

Key words: groundwater dynamic prediction;conception model;correlation model;neutral network mod