

区域地下水流数值模拟的方法和实践 ——以华北平原为例

张二勇^{1,2} 李长青³ 李旭峰⁴

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质调查局, 北京 100037; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
4. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要:平原(盆地)和流域尺度的地下水流数值模拟对于区域地下水资源合理开发利用具有重要意义。本文在总结分析国内外区域地下水资源数值模型特点的基础上,重点介绍了华北平原区域地下水流数值模型,并指出了区域地下水流数值模拟中存在的问题。

关键词:平原盆地;区域尺度;地下水流;数值模型

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)04-0920-07

区域地下水流数值模拟是指以完整的平原(盆地)和地下水系统为单元,包含不同级别地下水流动亚系统的大范围地下水流数值模拟,是开展区域地下水定量评价和预测研究的工具。区域地下水流数值模拟通过对地下水流场宏观趋势的模拟与校验,实现区域地下水资源的定量评价与预测预报,为研究区域水文地质条件和地下水流动系统特征提供参考依据,为区域地下水资源的合理开发利用提供定量决策支持。

1 引言

地下水数值模拟技术自 1973 年引入中国,取得了长足发展,众多学者与专家在该领域做出了卓越的贡献。薛禹群、谢春红 1981 年编著了《水文地质学的数值法》^[1],孙讷正 1982 年出版了《地下水流的数学模型和数值方法》^[2]系统地总结了地下水流动数学模型建立,有限元、有限差分等数值方法的计算原理与计算过程;1988 年,林学钰,邹立芝等编写了《地下水水量水质模拟及管理程序集》^[3]、李俊亭 1989 年编写了《地下水流数值模拟》^[4],集合了许多

地下水流数值模型应用程序,为专业人员提供许多有针对性的计算程序,大大促进了数值模拟方法的应用与发展;近年来,根据目前水文地质条件变化情况及日益突显的实际问题,薛禹群、谢春红对《地下水数值模拟》^[5]进行重新修订并再版。地下水流数学模型的数值方法也由有限差分法、有限单元法逐步发展到现在的多尺度有限单元法、边界元法、有限分析法、混合有限元法等,数值模型也由确定性模型发展到随机模型,模拟面积由小范围模拟逐步扩展到大范围的区域模拟。

针对大区域地下水流数值模拟问题,国内外专业人员进行了许多卓有成效的探索工作。美国地质调查局 1978 年开展的区域含水层系统分析项目^[6],运用数值模拟对区域地下水系统进行模拟、分析与管理。目前国际上比较典型的区域地下水流数值模型有美国死谷地区地下水流模拟模型^[7]和澳大利亚大自流盆地地下水流数值模型^[8,9]。国内有关学者^[10-12]也对有关区域地下水流数值模型建立方面的问题做过研究。2003 年,中国地质调查局开展的全国地下水资源及其环境问题调查评价项目,以平原盆地为单元,在中

国北方主要平原盆地利用各种方法建立了大区域地下水流数值模拟模型,在区域地下水流数值模拟建立的方法、适用性等方面做了许多有益的探讨。

2 中国北方主要平原盆地地下水流数值模拟概况

2003 年,国土资源大调查组织开展的“全国地下水资源及其环境问题调查评价”项目,以平原盆地为单元,建立了中国北方主要平原盆地地下水的确定性分布参数数值模型。其中松嫩平原、西辽河平原、华北平原、太原盆地、银川平原、河西走廊疏勒河流域平原区为覆盖全区的地下水流数值模型,柴达木盆地建立了重点地区——格尔木河流域的地下水流数值模型,准噶尔盆地建立了重点地区——玛纳斯河流域的地下水流数值模型。

除河西走廊疏勒河流域平原区采用自主研发的 PGMS 为模拟软件外,其余平原盆地数值模型采用 Visual modflow、GMS、Feflow、Processing Modflow 作为模拟软件,其中西辽河平原、银川平原、准噶尔盆地采用 Visual modflow 软件,松嫩平原、华北平原、太原盆地采用 GMS 模拟软件,柴达木盆地采用 Processing Modflow 模拟软件。

3 区域数值模型的主要特点

1)模拟区面积大。区域地下水流数值模拟的边界以平原、盆地和流域的自然边界或地下水流动系统的分水岭作为模型的边界,模拟区域为完整的平原、盆地和流域。其模拟面积最大可达十几万甚至数百万平方千米,与传统地下水流数值模拟的面积存在着数量级差别,如澳大利亚大自流盆地模拟区面积为 $154 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。中国北方主要平原盆地地下水流数值模型中,华北平原地下水流数值模型面积达 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$,松嫩平原地下水流数值模型面积达 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2)结构模型建立依据充分。区域地下水流数值模型的水文地质结构模型是在充分收集整理钻孔资料的基础上,采用定量与定性相结合的方式建立的。如为建立区域水文地质结构模型,松嫩平原收集钻孔资料 1800 个,华北平原共收集钻孔资料 2800 个,西辽河平原收集钻孔资料 800 个,银川平原收集钻孔资料 1000 个。另外为详细刻画研究区水文地质结构特点,从华北平原的 2800 个钻孔中筛选出 768 个

用于建立水文地质结构模型,结合人工绘制的 31 条水文地质剖面的定性分析,将华北平原松散层含水层岩性概化为中粗砂、粉细砂、粉土和粘性土 4 类,在对 768 个钻孔岩性重新整理分类的基础上,运用转移概率统计学方法,构建了华北平原三维水文地质结构模型。

3)模型层位的概化充分考虑地质特征与人工开采特点。区域地下水流数值模型的含水层系统一般都概化为区域骨干潜水含水层、承压水含水层和弱透水层,在进行含水层概化和划分时除考虑到地层沉积年代、类型、岩性分布与组合外,还充分考虑和结合人工开采层位的分布。在一些地质条件复杂的沉积平原地区,由于人工大量抽取地下水,使传统意义上的含水层与隔水层具有了统一的水力联系,即在全区无法找到统一的隔水层与含水层,因此在模型层位概化时以开采层概念代替了传统意义含水层。

4)充分利用 GIS 技术储存与输入数据。GIS 软件具有强大的数据管理和处理能力,目前国际上通用的地下水流数值模拟软件都提供了与 GIS 软件的接口,使地下水模拟软件由依赖网格剖分的地下水模型软件向基于概念的地下水数值模拟软件发展。区域地下水数据模型面积较大,因此源汇项数据的获取和处理方式也各不相同。其源汇项主要包括补给项和排泄项,补给项包括降雨入渗量、农业灌溉回归量、侧向流入量和河流入渗补给量。排泄量主要包括人工开采量和蒸发量。源汇项中的农业灌溉回归量、人工开采量以县域为单元进行统计,因此将其处理为以县为单元的面状数据输入到模型中。源汇项中的降雨入渗补给量和蒸发量根据各气象站收集资料,结合水文地质条件,以水文地质分区为单元,将其处理为面状数据输入到模型中。侧向流入量和河流入渗补给量处理为线状数据输入到模型中。

5)多渠道海量数据融合特点。大区域地下水流模型建立过程中,需要分析与处理大量不同格式、不同目的的海量数据,目前 RS、GPS、电测等技术越来越多地利用到地下水的模型中,采取最为合理的分析方式,使多渠道海量数据充分融合是建立大区域地下水流模型需要特别关注的问题之一。如在区域地下水数据模拟中的潜水蒸发问题就涉及到对遥感数据的处理。通常情况下小范围地下水流数值模拟多采用气象站观测的蒸发度数据——即不同口径的蒸发皿的水面蒸发系数乘以折算系数来得到研究范

围内的蒸散发量,对于区域地下水流数值模拟,该方法受气象条件、地貌及土壤类型和植被覆盖等因素影响易产生较大误差。因此区域地下水流数值模拟中采用基于表面能量平衡系统(SEBS)的遥感技术进行大范围蒸散发量计算是重要的探索性工作,如华北平原地下水流数值模拟中采用通过 NOAA 和 TM 卫星数据,根据 SEBS 模型求得模拟区地表蒸散发量,鄂尔多斯盆地在大区域地下水流数值模拟中采用 NOAA/AVHRR 卫星数据,根据 SEBS 模型计算了盆地内的区域蒸发蒸腾总量,都取得了较好的效果。

6)模型识别以趋势拟合一致为标准。目前区域地下水流数值模型剖分的大小不再是限制模型应用因素,无论是有限差方法还是有限元方法对模型剖分的尺度都有了很大的拓宽,笔者认为,模型建立精度的高低,不单是以剖分的尺度来决定的,更重要的是以目前所取得的数据是否满足模型建立的要求为准则,尤其对于大区域地下水流模型更是如此。因此大区域模型识别总的建模准则应是:识别后的模型结构及参数应基本符合实际水文地质条件;模拟的流场与实际流场整体趋势一致,即能反映区域地下水的流向、主要地下水漏斗及相关环境地质问题;模拟的地下水位变化过程线趋势与实际地下水位过程线趋势一致;模拟的地下水均衡变化与实际要基本相符。因此对于大区域地下水流模型,单纯的追求流场与过程线的拟合的完全一致最终可能会导致模型的失真,导致以错误的的数据得到错误的模拟结果,需要在建模过程中,有针对性开展与模型数据有关的工作,以达到模型精度的要求。

下面以华北平原区域地下水流数值模型为例,说明区域地下水流数值模型的建立过程和有关特点,并以此总结目前大区域地下水流数值模型建立过程中存在的若干问题。

4 实例分析

4.1 研究区概况

华北平原位于中国东部,东临渤海,西抵太行山,北起燕山,南至黄河,面积 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。多年平均降水量一般为 500~600 mm,年蒸发量为 900~1400 mm。第四系沉积最大厚度可达 600 m,由多层砂、砾石和粘土交叠组成,含水层呈层状交错重叠分布。地下水以降水补给为主,人工开采是华北平原地下水

最主要的排泄方式。由于地下水的过量开采导致平原内地面沉降、海水入侵等环境地质问题突出。

为评价区域地下水资源量,预测不同降水条件和人类活动影响下区域地下水位变化趋势,促进华北平原盆地尺度地下水资源科学管理,建立华北平原区域地下水流数值模型。

4.2 水文地质概念模型

地下水模型的范围为整个华北平原,即西抵太行山,北起燕山,南至黄河,总面积为 $13.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据区内含水层及人工开采特点,将华北平原区域含水层概化为 3 层,由于第一含水岩组和第二含水岩组水力联系紧密,且实际开采多以混合井居多,将第一含水岩组和第二含水岩组合并概化为第一含水层,底界埋深为 120~170 m;第三含水组概化为模型第二含水层,底界埋深为 250~350 m;新近系明化镇组含水层概化为模型第三层,底界埋深为 550~600 m。

模型区西部和北部的山区与平原自然分界线为流入边界,模型第一层经过此边界接受山区侧向补给;模型的第二、三层(承压含水层)的北部和西部边界位于单一潜水含水层与多层含水层区的交界处,处理为自由边界,即该边界的水位与潜水水位一致;模型第一层的南部及东南部以黄河为边界概化为流量边界;其他层位概化为隔水边界;模型第一层的东部以渤海海岸线概化为水头边界,下覆各层为隔水边界;潜水含水层自由水面为系统的上边界,以第四系松散层底界作为模型的底部边界,下伏岩层大部分为新近系碎屑岩类,处理为隔水边界;模型通过顶部潜水自由水面获取降水入渗、灌溉回渗等垂向地下水补给,通过蒸发排泄地下水。

为客观准确地刻画区内含水介质的非均质性特点,利用华北平原 780 个钻孔剖面,结合华北平原绘制的 31 条水文地质剖面,以及水文地质专业人员定性分析,采用储水介质条件模拟的方法,建立了华北平原储水介质的模拟结构,以岩性赋水文地质参数的形式,解决了大区域特别是冲洪积平原区含水层非均质问题。

限于目前区域地下水流数学模型的建立仍然沿用已有的质量守恒定律和达西定律,因此对华北平原区域水文地质结构进行合理的层状概化,可以较容易地实现数值模型建立和运行的目标,但另一方面也忽略了华北平原山前冲洪积平原、中部冲积

平原、东部冲海积平原水文地质结构的差异性和复杂性,在一定程度上会影响模型模拟结果的精度,但所建模型可以满足当前对地下水流系统宏观趋势把握的要求。

4.3 数学模型

根据水文地质概念模型,建立华北平原非均质各向同性三维非稳定渗流数学模型,

$$\begin{cases}
S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \mathcal{E} & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\
h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0 & x, y, z \in \Omega \\
\mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p & x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\
h(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_1 & x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\
K_n \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q & x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0
\end{cases}$$

式中 Ω -渗流区域; h -地下水系统的水位标高(m); K -含水介质的水平渗透系数 (m/d); K_z -含水介质垂向渗透系数(m/d); \mathcal{E} -含水层的源汇项(1/d); h_0 -系统的初始水位分布 (m); S -自由面以下含水层储水率(1/m); Γ_0 -渗流区域的上边界,即地下水的自由表面; μ -潜水含水层在潜水面上的重力给水度; p -潜水面的蒸发和降水入渗强度等(m/d); Γ_1 -已知水位边界; h_1 -已知边界水位值(m); Γ_2 -渗流区域的

流量边界; K_n -边界法线方向的渗透系数(m/d), n -边界的法线方向; q - Γ_2 边界的单位面积上的流量(m/d),流入为正,流出为负,隔水边界为0。

华北平原模拟区面积达 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$,其北、西部山区边界条件,东部渤海边界条件,以及南部黄河边界条件的实际情况比较复杂,特别是华北平原地下水与渤海海水的补排关系度需要进一步开展深入细致的实际调查工作;华北平原地下水开采量的调查主要靠收集相关资料结合典型调查点进行推算,与实际的地下水开采量存在一定的出入;华北平原含水层沉积韵律复杂,由多层冲洪积、冲海积地层相互叠置,水文地质参数各型异型明显。以上根据层状含水层概化建立的确定性各相同性分布参数模型,对模型的尺度因素和随机因素考虑不足,将会在一定程度上影响模型对实际条件的刻画和反映。

4.4 数值模拟

利用国际通用的地下水流数值模拟软件 GMS 进行区域地下水的模拟。模拟区第一层剖分为 164 行,148 列规则网格,各层均采用 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 的剖分格式。其中第一层有效单元(活动网格)共 8694 个。图 1 为华北平原第一模型层网格剖分图,下部第二、三层有效单元为 7763 个。图 2 为华北平原第二、三模型层网格剖分图;模拟期为 2002 年 1 月到

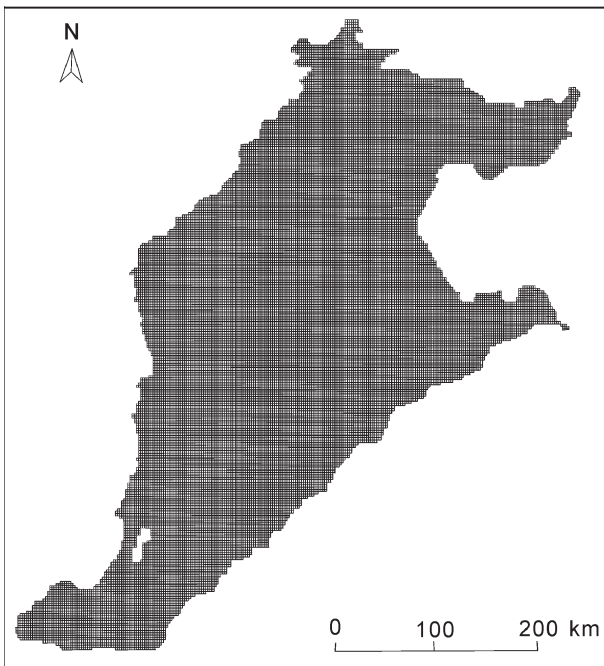


图 1 华北平原第一模型层网格剖分图

Fig.1 First modeling layer grid map of the North China plain

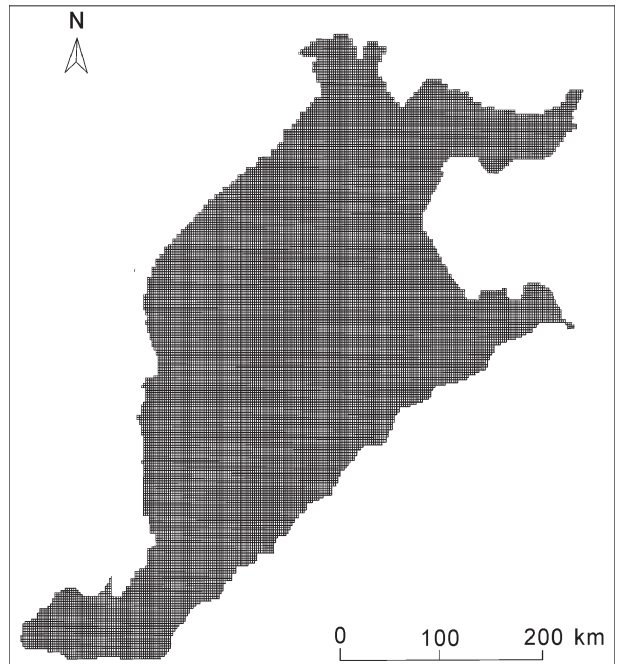


图 2 华北平原第二、三模型层网格剖分图

Fig.2 Second and third modeling layer grid map of the North China plain

2003 年 12 月, 将整个模拟期划分为 24 个应力期, 每个应力期为一个相应的自然月, 计算的时间步长为一天。在每个应力期中, 所有外部源汇项强度保持不变。以 2001 年 12 月底流场作为模型的初始流场。源汇项数据主要包括面状、线状和点状数据。如降水入渗系数、井灌回归系数为面状数据, 由于地下水的开采量和气象资料以县为单元进行统计, 因此以面状数据给出; 山前侧向流出量、河流渗漏量以线状数据给出; 集中开采水源地处理为点状数据。

利用 2003 年 1—12 月的流场作为拟合流场, 采用试估—校正法反求模型的水文地质参数。

4.5 模拟结果和预测预报

根据 2003 年 12 月流场拟合结果, 浅层地下水拟合水头差在 1~2 m, 深层地下水拟合水头差 3~8 m。浅层和深层地下水模拟流场与实际地下水流场拟合较好, 模拟流场可以很好地表现出区域地下水的总体流动趋势和规律, 同时拟合流场可以清晰地反映出山前地区浅层含水层和滨海地区深层地下水漏斗的规模和形状。图 3 为 2003 年 12 月华北平原

浅层地下水的模拟流场图与实测流场的拟合图。图 4 为华北平原(天津浅层地下水)观测孔模拟水位与实测水位的拟合曲线图。图 5 为华北平原(河北深层地下水)观测孔模拟水位与实测水位的拟合曲线图。受区域模型剖分网格大小限制以及模型数据精度的影响, 观测孔模拟水位与实测水位存在一定的误差, 最大达到了 10 m 左右, 水位动态趋势基本一致。

利用识别后的模型进行了华北平原水均衡分析、地下水资源评价和南水北调来水后华北平原地下水位的时空变化, 取得了较好效果。

5 区域数值模型存在的问题

1) 缺乏新理论的指导。现有的区域地下水流数值模型的理论基础仍然建立在传统的 REV 平均化方法、达西定律和质量守恒定律的基础上, 其采用的地下水流数学表达方程式也是沿袭传统表达形式, 采用的数值模拟软件和计算程序多是借用小范围地下水流数值模型的模拟软件和计算程序, 而大区域地下水流的含水层结构与理想化含水层结构相差甚远、含水介质的非均质性更强, 地下水流动系统和地下水的属性也更为复杂。目前国内外相关研究较少, 还没有形成完善的理论体系, 因此急需开展大区域地下水流数值模拟中新理论和新方法研究。

2) 随机理论和方法应用不足。区域地下水流数值模拟面积呈数量级增长, 地下水流系统的复杂性以及地下水流数值模型参数、边界条件、含水层结构、源汇项的不确定性增加, 单纯使用确定性方法往往不能很好地解决大区域地下水流数值模拟的相关问题, 目前国内的大区域地下水流数值模型中随机方法的使用多限于水文地质结构的建立, 较少用于数值模拟的过程, 因此今后应进一步加强随机方法在大区域地下水流数值模拟中应用的研究。

3) 含水层的非均质性问题尚有更广的探索空间。由于区域地下储水空间形成的复杂性, 依靠传统平面分区、垂向分层的方法处理大区域含水层非均质性问题显得力不从心, 而解决好储水介质非均质性问题对于大区域地下水流数值模型无疑具有非常重要的现实意义。华北平原数值模型建立过程中尝试采用储水介质条件模拟的方法来解决, 取得了初步的认识^[2], 但笔者认为无论是从方法、还是从问题本身均需要加强研究, 尚有更为宽广的探索空间。

4) 模型识别与检验的标准尚未确立。大区域地

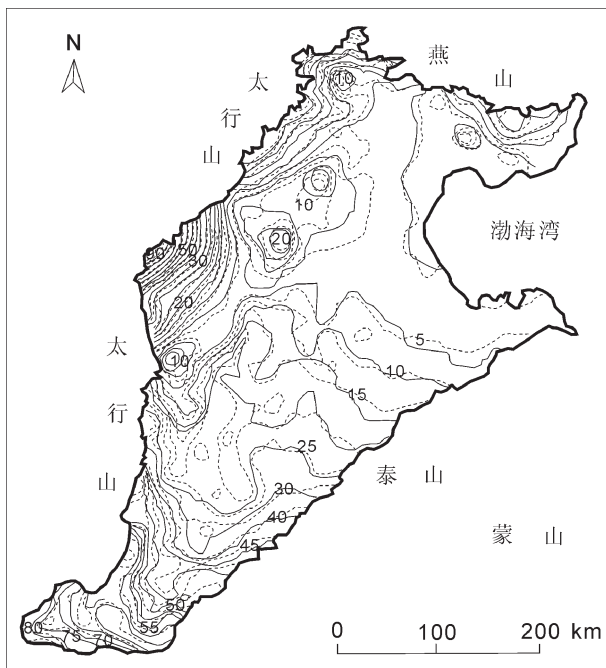


图 3 2003 年 12 月华北平原浅层地下水流场拟合图

Fig.3 Shallow groundwater flow contour map showing contrast between observation and simulation in the North China plain in December 2003

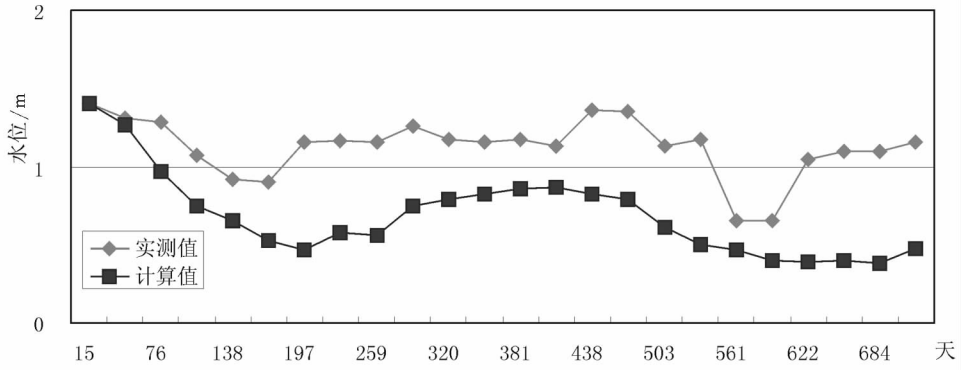


图 4 华北平原(天津浅层地下水)观测孔拟合曲线图

Fig.4 Contrast map between observation and simulation groundwater levels in the shallow well of North China plain

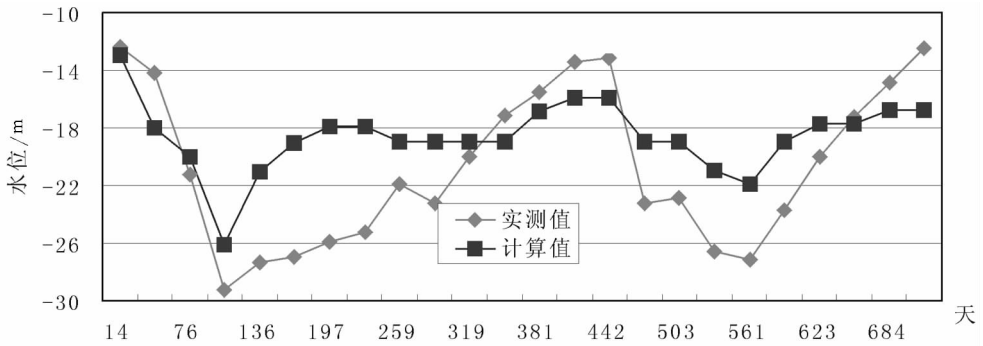


图 5 华北平原(河北深层地下水)观测孔拟合曲线图

Fig.5 Contrast map between observation and simulation groundwater levels in the deep well of the North China plain

下水流模型剖分网格单元面积可达数平方千米,单元网格中心水头或剖分节点水头是单元内部的区域平均水头,因此在模型识别和检验过程中,计算流场与实测流场整体趋势的拟合效果相对较好,计算水头与单井实测水头动态拟合的实际效果较差,主要原因在于网格剖分较大。如华北平原地下水流数值模拟的剖分网格为 $4000 \times 4000 \text{ m}^2$,必然导致平均水位与实际点上水位存在着误差,此外各种源汇项数据的单元分配相对均一,无法体现实际点井的开采强度。因此,需要在针对模型建立开展专门性的工作的基础上,重新确定模型识别与检验的标准。

5)河流与其他地表水体处理简单化。部分区域地下水数值模拟将河流或其他地表水体简单处理为定水头边界,结果造成模拟结果偏差。大型平原盆地含水层的沉积厚度可达数百米甚至上千米,河流往往仅切穿潜水含水层或部分承压含水层,承压含水层与河流联系微弱,承压含水层中的地下水甚至

越过河流底部流向模拟区外部。因此在河流边界处的定水头边界、隔水边界和流量边界 3 种类型都可能存在,因此应结合水文地质条件、地下水动力、同位素、水化学等数据分析河流的存在对边界条件的影响,根据实际情况进行合理概化,避免简单处理。

6)部分模拟过程的缺失。目前国内建立的大区域地下水流数值模型普遍缺失灵敏度分析和后期校正维护等环节,还有部分地下水流数值模拟缺失模型检验环节。重要环节的缺失将导致模型运行的失败,同时部分地区“重建模、轻利用”的错误做法最终造成资源的严重浪费,因此迫切需要加强模型后续工作,以保证数值能够真正得以运用,真正能够解决实际问题。

6 结论与建议

1)区域地下水流数值模型对于平原(盆地)和流域尺度的地下水资源管理具有重要意义。

2)应注重模型的后期管理与维护,编制详细的模型报告和使用手册,加强区域地下水流数值模型的实用性和通用性,避免重建模、轻应用的趋势。

3)加强区域地下水流模型建立理论与方法研究,及有关专门性问题如地表水体、边界、非均质性、蒸发、降水及模型与 GIS 技术应用等有关方面的研究工作。

本文写作过程中参考了国土资源大调查的相关成果,在此对相关单位和个人表示感谢!

参考文献 (References):

- [1] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京:科学出版社,1981.
Xue Yuqun, Xie Chunhong. Groundwater Numerical Simulation [M]. Beijing: Science Press, 1981(in Chinese).
- [2] 孙纳正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京:地质出版社,1981.
Sun Nazheng. Groundwater Flow Mathematic Modeling and Numerical Simulation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981(in Chinese).
- [3] 林学钰, 邹立芝. 地下水水量水质模拟及管理程序集 [M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 1988.
Lin Xueyu, Zhou Lizhi. Groundwater Quantity and Quality Simulation and Management Program Collection [M]. Jilin: Jilin Science and Technology Press, 1988(in Chinese).
- [4] 李俊亭. 地下水流数值模拟[M]. 北京:地质出版社, 1989.
Li Junting. Groundwater Flow Numerical Simulation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989(in Chinese).
- [5] 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 Numerical Simulation [M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese).
- [6] Sun R J, Johnson R. H. Regional aquifer system analysis program of the U.S. Geological Survey [J]. U.S. Geological Survey Circular, 1978-1992: 1099.
- [7] Faunt C C, D'Agnes F A, G.M. O'Brien. Chapter D of Death Valley regional Groundwater Flow System, Nevada and California-Hydrogeological Framework and Transient Groundwater Flow Model [J]. U.S. Geological Survey, Scientific Investigation Report, 2004: 5205.
- [8] Welsh W D. A steady state groundwater flow model of the Great Artesian Basin [J]. Land and Water Sciences Division, Bureau of Rural Sciences, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia, 2000.
- [9] Welsh W D. Great Artesian Basin transient groundwater model [J]. Bureau of Rural Sciences, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia, 2006.
- [10] 张祥伟, 竹内邦良. 大区域地下水模拟的理论和方法[J]. 水利学报, 2004, (6): 7-13.
Zhang Xiangwei, Takeuchi Kuniyoshi. Methodology for modeling of groundwater flow in large area [J]. Journey of Hydraulic and Engineering, 2004, (6): 7-13(in Chinese with English abstract).
- [11] 薛禹群, 吴吉春, 张云, 等. 长江三角洲(南部)区域地面沉降模拟研究[J]. 中国科学, 2008, 38 (4): 477-492.
Xue Yuqun, Wu Jichun, Zhang Yun, et al. Regional Land subsidence simulation research in southern part of Yangtze River Delta [J]. Science in China, 2008, 38 (4): 477-492 (in Chinese).
- [12] 李长青, 邵景力, 靳萍, 等. 平原地区水文地质结构条件模拟及其应用: 以华北平原为例[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 137-143.
Li Changqing, Shao Jingli, Ju Ping, et al. Hydrogeology structure condition simulation and application in plain area: example for the Northern China plain [J]. Geoscience, 2009, 23, (1): 137-143 (in Chinese with English abstract).

Regional groundwater numerical modeling: a case study of the North China plain

ZHANG Er-yong^{1,2}, LI Chang-qing³, LI Xu-feng⁴

(1. China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China;

3. China Institute of Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 4. Center of Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: Groundwater numerical modeling on the regional scale is an important technical support for groundwater management. Based on a summarization of characteristics of regional groundwater modeling abroad, this paper describes features of regional groundwater modeling, with the regional groundwater numerical modeling for the North China plain as an example. The existent problems in regional groundwater numerical modeling are also pointed out.

Key words: plain and basin; regional scale; groundwater flow system; numerical modeling