

地表水地下水的交互与耦合模拟研究现状与进展

徐力刚,张 奇,左海军

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,江苏 南京 210008)

摘要 在介绍‘四水’转化概念模型的基础上,引出了地表水与地下水之间的联系及相互作用过程,归纳地表水和地下水交互作用研究的基本规律和方法;系统介绍和对比国内外典型地表水与地下水耦合模型的总体结构、特点、适用领域及模型的局限性。对地表水地下水交互作用过程及耦合模拟研究中存在的问题提出看法,认为集成模型应该解决时空尺度整合、参数的不确定性等关键问题,指出综合水循环和水质各组成部分的复杂系统模拟是模型发展的必然趋势,对今后研究工作的发展趋势和研究前景作了探讨。

关键词 地表水 地下水 耦合模拟 交互作用

中图分类号 X32 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2009)05-0082-04

Status and progress of research on interaction and coupled modeling of surface water and groundwater

XU Li-gang^{1, 2}, ZHANG Qi¹, ZUO Hai-jun¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Based on an outline of the conceptual model of the transformations of four water cycle components (atmospheric water, surface water, groundwater, and soil water), the interaction between surface water and groundwater was reviewed. The basic interactions between surface water and groundwater were summarized. Representative coupled models of surface water and groundwater at home and abroad were examined in terms of their basic structures, characteristics, limitations and specializations. The problems existing in research on the interaction between and coupled modeling of surface water and groundwater were pointed out. The temporal and spatial conformity and uncertainty of parameters should be solved. Likewise, comprehensive modeling of all the elements in the water cycle and of water quality is a necessity. Further trends of development and the prospects of this research were also probed.

Key words surface water; groundwater; coupled modeling; interaction

地下水与地表水的交互作用既是水资源研究的核心和热点,也是陆气相互作用中重要的物理过程。国际水文科学协会(IAHS)和国际水文地质学家协会(IAH)分别于 1986 年和 1994 年将地表水和地下水相互作用问题正式提交会议讨论议题,于是对地表水和地下水相互作用的研究就成了水文学及水文

地质学方面研究的热点问题。地表水与地下水的相互转化直接影响着地表水和地下水体的水质和水量。从水质方面来说,该作用影响着水化学成分的分布和演变规律;从水量方面来说,地表水体接收地下水补给又可能直接向地下水排泄。近十年来,生态系统破坏严重,沼泽和海

基金项目 国家自然科学基金项目(40701176,40871026) 中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX2-YW-Q10-3) 江苏省自然科学基金(BK2009334) ；‘十一·五’国家科技支撑计划(2007BABZ3C02)

作者简介 徐力刚(1976—),男,四川仁寿人,副研究员,主要从事陆地水文学研究。E-mail: lxu@niglas.ac.cn

通讯作者 张奇(1966—),研究员,主要从事湖泊集水域物质输移模拟研究。E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

滩的面积呈扩张趋势,研究地下水与沼泽和海滩之间的关系也势必成行。以前的模拟由于各种条件的限制,以单独研究地表水或者地下水为主,但是随着科技发展和社会进步,地表水(SW)和地下水(GW)在整个水文体系中并不是独立的组成部分,其相互联系非常紧密^[1]。为了系统总结国内外地表水与地下水交互作用及耦合模型研究的最新进展及将来的研究趋势,更充分地发挥水资源的经济、社会、生态效益,本文首先介绍了“四水”转化概念模型,系统介绍和对比了国内外典型地表水与地下水耦合模型的总体结构、特点、适用领域及模型的局限性,对今后地表水地下水交互作用过程及耦合模拟研究工作的的发展趋势和研究前景作了探讨。

1 地表水地下水的联系与交互作用

1.1 “四水”转化的概念型模型

地表水、土壤水、地下水是陆地上普遍存在的 3 种水体。存在地表水系的地区,“四水”(大气降水、地表水、地下水、土壤水)之间往往存在着密切的水力联系与相互转化作用。地表水、地下水、土壤、植物、大气将构成一个彼此间存在密切联系的连续体(surface water-groundwater-soil-plant-atmosphere continuum, SG-SPAC)系统。“四水”转化关系分析是根据水循环机理和水均衡原理,以水文学径流形成理论为基础,结合水文水资源的科学实验研究,探求降水、径流、蒸发等要素的平衡关系和大气降水、地表水、土壤水及地下水之间的转化关系,为估算区域产水量以及合理开发利用水资源提供依据^[2]。一个区域的“四水”转化关系的概念性模型可以概化如图 1 所示。“四水”转化模型是建立在流域水文模型基础上的一种用于水文水资源数量评估计算的模拟技术,把计算单元或流域看成一个系统,将降水、蒸发、地表水、土壤水、地下水及农业生态和灌溉等视为相互关联,又相互制约的子系统。利用物理方程和逻辑

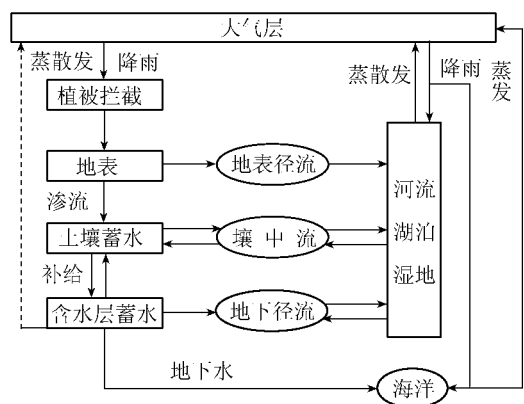


图 1 “四水”转化的概念性模型

判断,建立一个逻辑上严谨完整的计算系统,建立一套严密完整的计算程序,在计算机上加以实现^[3]。

1.2 地表水和地下水交互作用规律和方法的研究

对于地表水与地下水两者相互作用规律,总的来说,研究热点侧重于分析水、生态、气候和人类活动之间的作用规律。综合分析国内外已有文献及不同地区地表水和地下水的特点,对于地表水和地下水交换水量和水质定量的分析,经常用到的方法有如下几种:①解析法,如陈崇希等^[4]对傍河区开采地下水形成的承压—无压稳定井流进行了解析法求解与分析;崔亚莉等^[5]研究了水资源开发利用条件下新疆玛纳斯河流域地下水、地表水转化量的影响因素和变化趋势;董新光等^[6]对新疆博尔塔拉河采用系统分析的方法,建立水资源转换模型,计算不同河段的转换量及其水资源的重复利用量。②数值模型法,包括确定性的数值模拟模型、最优化管理模型和随机模型,如美国地质调查局新建立的用于模拟地下水和地表水相互关系的模型(GSFLOW),该模型同时考虑了气候条件、地表径流、地下潜流与储存,以及陆地系统、溪流、湖泊、湿地与地下水之间的关系^[7];国内杨建锋^[8]进行了农田水分运移与 SG-SPAC 系统的初步构建,建立了地下水浅埋区农田水分运动模型 GSPAC-FLOW 模型,从机理上定量描述了地下水浅埋区水分运动规律。贾仰文等^[9]构建黄河 WEP-L 模型,实现了水循环与能量交换过程的耦合模拟。③水文地质实际调查、地球物理及统计分析法,如罗金明等^[10]运用 Vensim 对苏打盐渍土地区的水循环进行研究,较好地描述盐渍土系统中土壤水—地下水的转化规律。④水文地球化学方法,包括化学取样分析及同位素方法,如 Hamada^[11]利用 Rn 来研究地表水和地下水相互转换关系;宋献方等^[12]利用环境同位素和水化学作为水循环研究中的示踪剂,有效地揭示北京市怀柔区的怀沙河流域内不同部位地表径流和地下径流对河川径流的相对贡献,并揭示了地表水和地下水之间的补给—排泄相互转化关系。⑤智能化方法,可用来获得水量和水质变化的关系,从而预测水量、水质时空的变化,包括 3S(GIS、RS 和 GPS)技术、遗传算法、混沌理论、人工神经网络、专家系统、数据挖掘等^[13],是目前兴起的研究方法。如国外 Ashu 等^[14]于 2006 年应用人工神经网络技术估算含水层导水系数、贮水系数、越流系数等;国内李艳平等^[15]在 GIS 支持下应用 LL-II 分布式水文模型对宜昌黄柏河天福庙水库日入库径流过程进行地表水和地下水的连续耦合模拟演算,取得了较好的模拟精度。在实际应用中,通常根据项目的目的将多种方法同时并用。相比其他方法

而言,数值模型法是基于物理基础建立的数值模型,虽然它对支撑的数据和测量的参数精度要求较高,但能模拟和分析各种复杂条件下的地表水和地下水作用规律,因此应用较广。在地表水和地下水交互作用与规律研究方面,国外学者侧重于对流域地表水与地下水交互的模拟研究,研究相对较深入。由于模拟中存在多种误差和不确定性,地表水与地下水交互过程模拟中的模糊理论、不确定性分析以及风险评价正成为国外学者研究的热点和重点^[16-18]。

2 地表水与地下水联合模拟研究进展

2.1 国内外代表性的地表水地下水耦合模型

国内外已出现一些集成地表水和地下水的模型,经过实践的检验和自身不断的发展,逐步形成了较为完善的模拟工具。由于其模拟机理和适用范围不同,各模型间存在明显差别。下面把常见的国内外耦合模型的基本结构和主要研究对象、适用范围做了总结归纳^[7,19-24],如表 1 所示,以便为应用者合理地选择最适宜模型提供一个参考依据。

2.2 地表水和地下水耦合模型发展特点

地表水和地下水耦合模型(以下简称耦合模型)是融合地表水和地下水的模型,同时考虑地表水和地下水模型耦合中的各个细节问题。地表水模型是利用经验公式、明渠圣维南原理的连续性和动力波方程来建立的,经常是小的时间步长和小、中、大的空间尺度,土壤水和地下水模型则是根据达西定律和水量平衡原理建立的,经常为大的时间步长和中、大的空间尺度,因此当耦合两者时,需要在时空尺度

上进行数据整合。包气带作为联系地表水和饱和地下水的纽带,其厚度虽然在不同地理位置或厚或薄,但它具有储存和运输作用,其作用不容忽视,因此当集成模型考虑包气带的运动规律时,模型的物理机理将更趋完善,最近国际上流行的地表水与地下水耦合模拟模型都对包气带水文过程进行了处理。

就目前有关地表水与地下水联合模拟评价和管理的数学模型而言,无论是水文学家所研制的以地表水评价为主的联合模拟管理模型,还是水文地质学家所开发的以地下水资源评价为主的联合模型,尽管建立模型的数学、数值方法有所不同,但它们大多数都具有一个共同特点,即所建立的数学模型仅考虑主要研究对象的水流运动规律,而不直接考虑与主要研究对象存在水力联系的其他水源的运动规律,仅仅把这些具有水力联系的水源作为主要评价对象的一个源(汇)项加以间接考虑,这些方法实际上未能将地表水与地下水两大子系统进行真正意义上的联合评价。例如,美国的 Young 等^[25]在研究美国东部科罗拉多的南 Platte 河谷的地下水与地表水联系时,尽管把河网对地下水的补给处理为随机输入,但这个量仍作为人工补给的一个源项。相比已有的地表水和地下水集成模型来说, Mike-SHE 系列软件和 MODHMS 模型功能较为完善。但它们需要大量的参数和数据支撑,其中一些数据还是时变的,因此建立和率定模型非常耗时^[19]。理论上集成模型的严格同操作上的困难之间的差距成为集成模型应用的一道障碍。

国内外已有的集成模型是在对现实特定条件概

表 1 国内外代表性地表水地下水耦合模拟模型对比

模型名称	开发单位	模型基本结构	主要研究对象和应用领域
Mike-SHE	丹麦水利研究所	矩形网格(GRID)的二维地表径流模型,竖立在每个网格单元内的一维土柱模型和矩形网格二(三)维地下水(潜水)有限差分模型,考虑复杂的土壤侵蚀和污染物平衡	流量、水位、泥沙输送氮、磷和农药等
SWATMOD	美国农业部农业研究局	分布式水文学模型 SWAT 和美国地质调查局开发的 MODFLOW 模型的耦合	模拟分析灌溉、施肥和耕作措施对农业生产和水资源利用方面的影响
HydroGeoSphere	加拿大滑铁卢大学	分布式水文模型 Integrated Hydrology Model 和三维有限元模型 FRAC3DVS 的耦合	地表水地下水流交互,营养盐输移
IGSM	美国加利福尼亚大学	地表水模型是基于河流汇流的原理,对于地下水以有限元理论为基础,时间上以月为时间步长,采取半隐式的时间离散格式,平面离散为三角形网络,垂向为四边形网络	水资源的管理与规划
GSFLOW	美国内政部和美国地质调查局	美国地质调查局降雨径流模拟系统 PRMS 和三维有限差分模型 MODFLOW-2005 的耦合	水资源的管理与规划,流域地表水与地下水联合模拟
LL-II	武汉大学	垂直方向将模型分为 3 层第 1 层为林冠层,中间 10 层为变动层(包括非饱和土壤水层、饱和土壤水层),最下一层为饱和、稳定的地下水层,模型分层计算产流得到各层的净雨深	水文过程模拟和预报
WEP-L	中国水利水电科学研究院	自然水文、能量传输和用水 3 个模拟过程组成	水量、水资源评价,流域水循环
WATLAC	中国科学院南京地理与湖泊研究所	模型有两个完全耦合的计算模块组成:地表水流模块和地下水水流模块。可模拟植被对降雨的拦截、土壤蓄水、坡面径流、河道径流、饱和地下水运动等水文过程及其交互作用	湖泊集水域水文过程、入湖径流量及研究湖泊与流域的相互作用

化基础上建立起来的,综合分析已有的地表水地下水集成模型软件,具有开发周期长、开发费用高的特点,模型需要收集地表水径流数据、降雨、蒸发及地下水位、水质等长期系统的监测数据。针对地表水和地下水相互作用的内容,一个好的模型应解决以下问题 ①能够真实地模拟各种水文现象和水文地质要素,既包括对水量的时空变化的刻画,又包括水体点源和非点源污染、地下水溶质运移的描述;既能反应瞬时发生的暴雨径流过程,又能描述区域性长期的水文和水文地质变化过程,等等。②时间尺度整合的灵活性,包括对地表水模型以秒、分等为步长,地下水模型以天、月等为步长的耦合;对每一水文过程采用不同的空间尺度规模,既能反映区域主要的水文过程,又要能反映局部地域的集水区性质变化。③程序结构设计灵活,利于扩充和兼容,尽可能支持 3S 数据和信息提取。④合理的数据求解算法,更好地进行不确定参数的反演以及对各个参数进行敏感度分析等,支持不同的数据格式输入和转化。⑤注重典型实例应用展示,这有助于模型的推广和应用;具有良好的使用说明手册,易于使用^[13]。

3 存在问题及研究展望

3.1 存在问题

虽然应用数值模拟模型来分析河流-含水层相互作用的过程已有近 40 年历史,并且在地表水地下水联合模拟方面近十年国内外研究学者取得了一些可喜成果,但所有数值模型在应用上仍存在许多不完善的地方。如 MODFLOW 采用矩形网格差分法来建立河流-含水层系统数值模型,它在逼近河流不规则几何形态方面缺乏灵活性,特别是在处理多河流汇流系统时更显得“简单有余,灵活不足”;另外,把地表水流近似处理为一维明渠恒定流,不能真实刻画地表河流的水力特征和地表水与地下水的相互作用。另外,随着研究问题的深入,非饱和带土壤的蓄水和滞留作用越来越需要做深入系统的研究。总的来看,地表水与地下水相互作用与联合模拟存在问题表现在以下几个方面。

a. 难以反映复杂系统的真实情况。由于现实系统包含的因素多,边界条件及因果关系复杂,有些指标可以量化,而有些指标是难于量化或者是不能量化的,从研究角度考虑肯定会做一些简单化处理,不可避免计算结果会同实际系统存在一定的误差。

b. 加强地表水地下水耦合模拟中参数的确定和模型的验证工作。地表水地下水集成模型是分析两者相互作用应用较广的方法,而参数确定对数值结果的精确性至关重要,如果对运移参数只是单独

给出其经验表达式,而很少考虑实际条件下对参数的不同要求,则会影响模型的模拟结果。因此有必要进一步研究参数的求解方法。对于集成模型中不同时空尺度的整合、不确定性参数的率定及如何处理水文系统的非线性是亟待解决的关键问题。

c. 重模型,轻地质条件,轻基础理论研究,缺乏学习和评估功能。建立模型不重视地质条件的调查、研究,不能正确地建立反映当地具体条件的概念模型,或者不是根据具体地质、水文地质条件来建立模型。缺乏学习和评估功能,同时模型后期维护也

3.2 展 望

地表水和地下水作用作为全球水循环的一部分,研究的范围已经涉及水文地质学、水文学、地球化学、生物学、气象学等,呈现出各学科的渗透交叉,综合集成全球水循环各组成部分的复杂系统模型是地表水和地下水相互作用研究发展的必然趋势。

伴随着 3S 信息技术的快速发展和应用,集成模型如何最大程度地应用 3S 数据将是地表水与地下水耦合模拟发展的重要方向之一。地表水与地下水联合模型与 GIS 的耦合集成平台的开发,将是以后这方面研究工作的突破点和热点。其他的研究方法(如水化学和智能化方法)的应用将是开展地表水与地下水交互研究的发展方向之一。鉴于此,今后应采用人工智能技术、决策支持系统、专家系统、灰色模糊系统等计算机技术,弥补上述不足。

目前水资源模型的研究仅局限于水量管理模型和水质管理模型两个方面,而从区域水环境角度对水资源进行研究,这方面的研究工作还不够深入,因此多种水源联合管理的研究应该将水量模型和水质模型耦合成一个整体,以区域水环境生态效益最优为目标,只有这样,才能使水资源的管理工作更好地反映客观实际情况,才能使水资源得以持续、高效的利用,从而为国民经济的高速、均衡、协调发展奠定基础。

参考文献:

[1] 余美,芮孝芳. 防治土壤盐碱化地表水地下水联合管理模型[J]. 水资源保护,2007,23(4): 6-9.
[2] 雷志栋,杨诗秀,胡和平,等. 四水转化,水资源与水土资源平衡[J]. 水利规划设计,2001(2): 28-30.
[3] 周桂兰,刘淑清,苑宝忠,等. 四平市四水转化产流模型研究[J]. 东北水利水电,2004,22(3): 18-20.
[4] 陈崇希,唐仲华. 地下水流问题数值方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社,1990.
[5] 崔亚莉,邵景力,李慈君. 玛纳斯河地表水、地下水转化关系研究[J]. 水文地质工程地质,2001(2): 9-13.

(下转第 102 页)

流场变化进行预测分析,结果表明,直接疏干开采大水铁矿田,将导致百泉泉域地下水资源接近枯竭,后果不堪设想,因此应采取治理河流渗漏、帷幕注浆截堵地下水源头等手段来开采大水铁矿田,并合理利用矿坑排水,做到供排结合,防止地下水进一步恶化,达到保护地下水环境的目的。

参考文献：

[1] 华北有色工程勘察院. 河北省邯邢铁矿田岩溶充水铁矿开采与地下水环境保护 [R]. 石家庄 :华北有色工程勘察院,2007.

[2] 王大纯,张人权,史毅虹,等. 水文地质学基础 [M]. 北京 :地质出版社,1995 63-145.

[3] 乔建光. 区域水资源保护探索与实践 [M]. 北京. 中国水利水电出版社,2007 243.

[4] 林木金. 邯邢铁矿田裂隙岩溶地下水运动规律及矿区水文地质勘探、矿坑涌水量预测研究 [R]. 石家庄 :华北冶金地质勘探公司 517 队,1980.

[5] 河北水文工程地质勘察院. 河北省沙河市王窑矿区恒山铁矿矿山地质环境影响评估报告 [R]. 石家庄 :河北水文工程地质勘察院,2003.

[6] 河北地质局十二队. 河北省沙河县王窑铁矿水文地质勘探总结报告 [R]. 邢台 :河北地质局十二 队,1977.

[7] 房佩贤,卫中鼎,廖资生,等. 专门水文地质学 [M]. 北京 :地质出版社,1986 235-236.

[8] 乔建光,张均玲. 邢台市平原区地下水环境问题分析 [J]. 水资源保护,2002,18(4) 25-27.

[9] 卞建民,汤洁,李艳梅,等. 辽河油田地下水资源优化利用方案研究 [J]. 水文地质工程地质,2006(5) 100-102.

(收稿日期 2008-04-19 编辑 彭桃英)

(上接第 85 页)

[6] 董新光,郭西万. 新疆博尔塔拉河干流段地表水地下水转化关系的系统分析法 [J]. 干旱区地理,1996,19(4) 45-50.

[7] MARKSTROM S L, REGAN R S, NISWONGER R G, et al. GSFLOW-A basin-scale model for coupled simulation of ground-water and surface-water flowm, Part A : concepts for modeling surface-water flow with the U S geological survey precipitation-runoff modeling system model [C]//3 rd Federal Hydrologic Modeling Conference. NV, Reno,2006.

[8] 杨建锋. 农田水分运移与 CSPAC 系统的初步建立 [D]. 北京 中国科学院地理科学与资源研究所,2000 69-87.

[9] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价 [J]. 水利学报,2006,37(9) 1051-1055.

[10] 罗金明,邓伟,张晓平. 盐渍土系统土壤水-地下水转化规律研究 [J]. 生态环境,2007,16(6) 1742-1747.

[11] HAMADA H. Analysis of the interaction between surface water and groundwater using Radon - 222 [J]. Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly,1999,33(4) 261-265.

[12] 宋献方,刘相超,夏军,等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究 [J]. 中国科学 :D 辑,2007,37(1) 102-110.

[13] 胡立堂,王忠静,赵建世,等. 地表水和地下水相互作用及集成模型研究 [J]. 水利学报,2007,38(1) 54-59.

[14] ASHU J, AVADHNAM M K. Hybrid neural network models for hydrologic time series forecasting [J]. Applied Soft Computing,2006,247(3) 1-8.

[15] 李艳平,李兰,朱灿,等. 地表水地下水的交互作用与耦合模拟 [J]. 长江科学院院报,2006,23(5) 17-20.

[16] SOPHOCLEOUS M. Interactions between groundwater and

surface water :the state of the science [J]. Hydrogeology Journal,2002,10(1) 52-67.

[17] CAMP D, MCKEE R. Evaluation of integrated surface water and groundwater modeling tools [R]. Project 2 :conjunctive resource management report. USA, Orlands Florida,2001 79-83.

[18] WINTER T C. Recent advances in understanding the interaction of groundwater and surface water [J]. Review of Geophysics,1995,33 985-994.

[19] REFGAARD J C, STORM B. MIKE S. Computer models of watershed hydrology [C]//Water Resources Publications. New Jersey Englewood Cliffs,1995 809-846.

[20] Mc DONALD M G, HARBAUGH A W. A modular three-dimensional finite difference ground-waterflow model [R]. U S Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations. USA, USGS,1988.

[21] LABOLLE E M, AHMED A A, FOGG G E. Review of the integrated groundwater and surface-water model (IGSM) [J]. Groundwater,2003,41(2) 238-246.

[22] 李兰,钟名军. 基于 GIS 的 LL- II 分布式降雨径流模型的结构 [J]. 水电能源科学,2003,21(4) 35-38.

[23] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价 (II) [J]. 水利学报,2006,37(10) 1181-1187.

[24] 张奇. 湖泊集水域地表-地下径流联合模拟 [J]. 地理科学进展,2007,26(5) 1-10.

[25] YOUNG R A, BREDEHOEFT J D. Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water system [J]. Water Resource Research, 1972,8(3) 533-556.

(收稿日期 2008-07-21 编辑 高渭文)