

地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势

郝治福, 康绍忠

(中国农业大学中国农业水问题研究中心 北京 100083)

摘要 综述近几年国内外地下水系统数值模拟领域在思维方法、数学工具和计算机软件技术等方面的研究现状, 分析了国内外在确定地下水系统数值模拟模型的不确定因素、应用 3S 技术和数值模拟软件的情况, 提出了存在的问题, 强调多学科模型的耦合及对水文地质参数研究和基础资料获取的重要性, 指出计算机技术的深入应用、三维数值模型的建立和多种模型的耦合是未来发展方向。

关键词 地下水系统; 地下水资源; 数值模拟

中图分类号 :TV211.1+2

文献标识码 :A

文章编号 :1006-764X(2006)01-0077-05

Current situation and development trend of numerical simulation of groundwater system//HAO Zhi-fu, KANG Shao-zhong
(Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract : A summary was made on some advances in recent years in numerical simulation of groundwater system at home and abroad, with emphasis on the research ideas, mathematic tools, and software techniques. Current situation about the determination of uncertainty factors for the numerical simulation model of groundwater system and the application of 3S technique and software to numerical simulation was analyzed, and some related problems were put forward. The coupling of multidisciplinary models, study of hydrogeologic parameters, and acquisition of basic information were emphasized. Finally, it is pointed out that the future development of the technique will focus on the following aspects, i. e. the wide application of computer technology, the development of three-dimensional numerical models, and the coupling of different models.

Key words : groundwater system; groundwater resources; numerical simulation

地下水系统指在一定的水文地质条件下, 在某一范围内形成的地下含水系统, 水力联系密切并与相邻含水系统相对隔绝。广义上的地下水系统指包括地下含水系统和与之相关的社会、经济、环境要素的总体。实际的水文地质条件是复杂的, 地形起伏多变, 含水层厚度不均一, 非均质, 各向异性, 结构复杂, 多层不连续, 源汇项的时空分布不均, 水文地质参数的时空变异性明显等。数值模型对这些特征有相对合理的表征, 是对真实地下水系统的仿真和模拟。目前数值模拟方法主要有有限差分法(FDM)、有限单元法(FEM)、边界元法(BEM)和有限分析法(FAM)等。20 世纪 60 年代中期以来, 随着快速大容量电子计算机的出现和广泛应用, 数值计算方法在地下水资源分析评价中得到逐步推广, 具有明显的通用性和广泛的适用性。尤其近十几年, 地下水系统数值模拟取得了长足进步。

1 国外地下水系统数值模拟研究现状

目前, 国外该领域的研究主要针对数值模拟法

的薄弱环节, 提出新的思维方法, 采用新的数学工具, 分析不同尺度下的变化情况, 合理地描述地下水系统中大量的不确定性和模糊因素。

a. 该领域科学家在地下水系统数值模拟的工作程序、步骤方面达成了一致, 强调对水文地质条件合理概化的重要性, 并深入探讨尺度转换问题和量化不确定因素问题。

根据 Anderson 等^[1]提出的工作程序, 要建立一个正确且有意义的地下水系统数值模型, 应进行以下工作: 确定模型目标, 建立水文地质概念模型, 建立数学模型, 模型设计及模型求解, 模型校正, 校正灵敏度分析, 模型验证和预报, 预报灵敏度分析, 模型设计与模型结果的给出, 模型后续检查以及模型的再设计。Ewing^[2]提出地下水污染流模拟和建模需要强调 3 方面的问题: ①有效地模拟复杂的流体之间以及流体与岩石之间的相互作用; ②必须发展准确的离散技术, 保留模型重要的物理特性; ③发挥计算机技术体系的潜力, 提供有效的数值求解算

法。针对 Newman 等的推测, Wood^[3]提出了二维地下水运动有限元计算的时间步长条件。Kim 等^[4]对抽取地下水造成的 noordbergum effect (reverse water-level fluctuation)现象进行数值模拟, 阐述了其机理性原因。Scheibe 等^[5]分析了在不同尺度下的地下水流及其运移行为。Ghassemi^[6]指出三维模型可以详细说明含水层系统的三维边界条件以及抽水应力情况, 而二维模型就不能恰当处理。Porter 等^[7]指出 DFM(data fusion modeling)可以量化各种各样的水文学、地质学和地球物理学的数据及模型的不确定性, 可以用于地下水系统数值模拟的数据整合和模型校准。Mazzia 等^[8]提出特别的数值方法用于求解重盐地下水运移模拟的二维非线性动力学控制方程, 效果很好。Li Shu-guang 等^[9]指出数值模型还不能解决预报的不确定性因素问题, 并开创性地提出一种随机地下水模型, 可以解决均值分布和小尺度过程的不同尺度问题。Mehl 等^[10]提出二维局部网格细分法的有限差分地下水模型, 提供了新的插值和错误分析的方法。数值模型模拟结果的可靠性得到了提高。

b. 国外开发了许多功能多样的地下水系统数值模拟软件, 以其模块化、可视化、交互性、求解方法多样化等特点得到广泛的使用, 尤其 MODFLOW 据美国地质调查局统计, MODFLOW 几乎占地下水系统数值模拟软件总应用次数的一半, 这些年其功能更是不断完善。地理信息系统(GIS)与地下水模型的整合强化了数据的输入、传递、方案调整和空间分析等。遥感(RS)提供了判断地质边界、地貌单元和估算地表蒸发等的工具。地下水系统数值模拟模型与相关领域模型的耦合更扩展了其发展空间, 可以解决更多的实际问题。

Juan 等^[11]运用 ARC/INFO 和 MODFLOW 模拟了美国 Jackson Hole 地区的冲积含水层, 并通过补给、排泄和水均衡的评估对模型进行了合理的校准。Winston 在文献[12]中专门介绍了许多 MODFLOW 相关的免费和共享的网络资源, 为人们学习和应用该软件提供了方便。Olsthoorn^[13]指出基于有限差分法的 MODFLOW 与基于解析元法的 MLAEM 模型都各有优势, MODFLOW 的数据结构更易于实现与 GIS 的整合。Harrington 等^[14]运用 CMC(compartmental mixing-cell)和 MODFLOW 模拟区域地下水系统的水化学和同位素变化情况, 并强调了做细致准确的稳态流分析对于瞬时流分析的重要性。Brodie^[15]使用 RDBMS(a relational database management system)存储钻孔资料, 设计 GIS 管理空间数据资料, 有很好的推广价值。Ataie-Ashtiani 等^[16]运用基于有限元的二维数值模型 SUTRA 模拟含水层边界条件周期性变化

的地下水流, 对基本方程和模型进行相应的修改, 得到了很好的模拟结果。Wingle^[17]介绍了 UNCERT 模型, 该模型可用于地下水流和污染物运移模拟, 得到相关行业研究人员的一致认可并广泛使用。Ramireddygarri 等^[18]通过对 POTYLDLDR 地表水模型与 MODFLOW 地下水模型的修改并增强, 用于模拟 Wet Walnut Creek 流域。Osman 等^[19]使用改进的 MODFLOW 代码和 MOBFLOW 模型, 模拟得出地下水渗流和含水层情况, 与用 SWMS_2D 所做结果吻合很好。Samani 等^[20]指出轴对称井流是地下水力学非常重要的课题, 新出版的 MODFLOW 2000 加入了精确模拟轴对称井流的标定方法, 提高了模拟的仿真性。Dahan 等^[21]提出多变量混和单元模型描述水化学过程, MODFLOW 模拟水文地质情况, 两种方法的结合不但可以模拟水头变化, 而且可以模拟反映地球化学特征的地下水流线。Facchi 等^[22]建立渗流地带模拟与基于 MODFLOW 的地下水系统数值模拟耦合模型, 用 GIS 来控制空间分布式参数以及输入和输出值, 与其他类似模型不同的是可以评估作物水分消耗值在时间和空间上的分布情况。

研究人员广泛应用地下水系统数值模拟软件和 3S 技术, 在应用中发现问题的, 使功能不断加强, 并与其他模型耦合发挥其独特优势。

2 国内地下水系统数值模拟研究现状

a. 近几年, 随着新技术、新方法的广泛应用, 我国该领域科学家也做了大量的工作, 在建立地下水系统数值模拟模型中发现问题, 在理论和方法上不断创新, 通过数值模型理论与相关研究方向的理论结合, 不断提高模拟结果的可靠性。陈家军等^[23]指出在进行区域地下水位估值时线性漂移的泛克立格法即可取得很好的效果。卞锦宇等^[24]较好地解决了相对隔水层缺失区越流系数无法调试的问题。王玮^[25]提出了用人工查点法、半自动查点法、数字化地形图提取法等获取数字高程模型(DEM)的方法, 并给出了通过数字高程模型计算节点地面标高的方法。卢文喜^[26]对地下水运动数值模拟中的边界条件进行了分析, 提出在模型预报前要考虑自然因素、人类活动因素及邻区水流条件因素产生的耦合效应问题, 先对边界条件进行预报。武强等^[27]通过对地下水系统数值模拟的研究分析, 抽象出空间类层次结构, 并提出了基于属性关系的宏观拓扑结构和基于同构或异构几何模型关系的微观拓扑结构, 用三维空间拾取技术提供了友好的人机交互环境。张明江等^[28]采用“ 渗流-管流耦合模型 ”、“ 入渗滞后补给法 ”和“ 参数迭代法 ”提高了模型的仿真性及对地下

水资源评价的精度。张祥伟等^[29]根据地质统计、逆问题理论和地下水运动理论提出了大区域地下水系统数值模拟的理论和方法。廖华胜等^[30]指出平稳随机的假定不能真实反映空间小尺度变异性与大尺度非平稳性间的相互作用。薛禹群等^[31]介绍了 Ms-FEM(多尺度有限元法)的基本原理,并将其应用于非均质多孔介质中的流动问题,通过计算结果的比较得出多尺度有限元法比传统有限元法有效的结论。魏连伟等^[32]基于模拟退火算法(SA)这一全局优化技术,耦合地下水系统数值模拟的有限元模型,给出水文地质参数的反演方法。

综上所述,针对数值模拟过程中需要处理的地面标高、初始水位、边界条件、源汇项和水文地质参数等问题,可采取数字高程模型(DEM)及各种耦合模型,结合地球动力学、地质统计、逆问题理论和三维空间拾取技术等来提高模拟效果。

b. 国内在运用地下水系统数值模拟软件以及地理信息系统的强大功能,并结合相邻学科的模式方面,也做了积极的探索。陈锁忠等^[33]以 GIS 为主控模块,选择 GMS 和地面沉降模拟模型系统(compac)进行集成分析和设计。陈劲松等^[34]分析了 MODFLOW 中不同求解方法对精度的影响,选用 PCG2 法或 SIP 法求解结果满足精度要求,而选用 SSOR 法获得结果无法满足精度要求。高佩玲等^[35]采用系统分解合成方法,利用 DevelopStudio 软件编制计算程序,得到了区域地下水系统水文地质参数,参数分布与水文地质勘察所得含水层结构特点及富水区分布基本相符。杨旭等^[36]提出了基于 GIS 的“点”、“线”、“面”的模型拟合技术路线,实现了基于 GIS 的地下水系统数值模拟模型的可视化拟合。陈锁忠等^[37]研究基于 GIS 的孔隙水文地质层三维空间离散实现的技术路线,提出了基于 GIS 的孔隙水文地质层不规则六面体元的三维空间离散方法,具有较高的实用价值。陈喜等^[38]揭示了独特沙丘地形和土壤特性对地下水补排量的影响,利用地下水系统数值模拟模型 MODFLOW 和非饱和带水平衡模型对处于半干旱半湿润沙丘地区(SandHills)的地下水位进行了模拟,效果很好。罗毅^[39]通过对国际上著名的 CERES(WHEAT, MAIZE)作物模型、SWAT 分布式水文模型、MODFLOW 地下水动力学模型的融合、集成和功能扩展,研制出地表水、地下水耦合模型,改进了地下水接受土壤水补给的计算和浅层地下水蒸发的计算。

地下水系统数值模拟软件以其组件化、智能化、可视化和多样化受到普遍欢迎,GIS 与地下水系统数值模拟模型的整合具有整体化、自动化、可视化和实时性的优点,相关领域模型的耦合更使其有了广

泛的发展空间,目前国内外对具体问题的处理方法具有很好的参考应用价值,大量的研究强化了地下水系统数值模拟方法的优势。

3 地下水系统数值模拟中存在的问题

随着计算机技术的飞速发展,国内外关于地下水系统数值模拟的研究有了长足的进步,但由于实际水文地质条件的复杂性,野外试验数据的缺乏,模拟技术的不合理运用,多学科交叉存在的难度等,发展中还存在一些问题:

a. 各学科之间难以沟通,侧重的时间或空间尺度存在较大的差异,地下水、地表状况、土壤、植被、气候变量和土地利用等都存在时空变异性,模型的耦合集成存在较大的难度。该领域研究工作的深入越来越依赖于综合集成和跨学科协同攻关,发挥互补作用,可以解决各学科不同模型存在的一些缺陷,同时,该领域与其他学科合作建立的耦合模型有更好的实用价值,可以综合解决流域管理中存在的复杂问题,如地下水与地表水模型的耦合,陆面过程模拟、分布式水文模型模拟、基于遥感的生态模型与地下水系统数值模拟模型的耦合等。只有模型之间有了充分的交互,对模型的评价才更合理。同时需要指出,面对模型耦合的大问题,地下水系统数值模拟的其他方法也发挥着不可替代的作用。

b. 地下水系统数值模拟模型的水文地质参数可以通过参数优化来调整,但参数调整的范围缺少准确的标准。模型通过参数调整与实测值拟合较好,但应用到其他区域或年份时又会出现较大误差,说明对基本物理过程的描述还不够准确。模型反演求参时,解的不唯一问题一直是水文地质数学模型数学基础薄弱的环节。模型中参数的不确定性将导致计算的水头、流速的不确定性,从而影响到模拟结果的可靠性。如何加强参数的研究,提高地下水系统数值模拟的精度仍是亟待解决的问题。研究者仅仅通过模型参数调整提高参数精度是徒劳的,应加强模型参数的野外原位测定方法的改进、空间变异分析和新数学方法的运用,一个地区、一个流域或一个水文地质单元,应建立自己的标准参数,这个参数应有一定的代表性,应加强标准参数集的制备,这样可以轻松地进行检查、评价和修改。

c. 随着计算机的广泛应用,计算机软件实现了对大量水文地质学及地下水动力学问题的模拟,其计算能力远远超过人们获取数值模型所需野外资料的能力,勘探技术水平需要提高。在地下水系统数值模拟中,对水文地质条件的了解和概化所建立的概念模型是最重要的工作,需要有大量的野外试验

数据和资料,包括地质结构、含水层参数、各类均衡项随时空变化的数据和资料,而这些资料的获取是建立数值模型最困难的工作,需要耗费大量人力、财力和物力,同时国内缺乏三维水头和溶质浓度等资料,因此三维数值模拟的工作受到限制。长期持续的三维观测数据的获取及具有更高实际价值的三维模型的建立是值得重视的工作。另外,在应用外国先进的地下水系统数值模拟软件的同时,要加快研发有我国自主知识产权的通用软件。

d. 根据国民经济发展的需要,在解决地下水不合理利用造成的问题,尤其是日益严重的西部环境和生态问题方面,急需该领域科学家深入研究典型生态环境区域的地下水动力学特征,提供决策依据。重点研究荒漠、岩溶和黄土高原区域地下水运动规律,特别是浅层地下水变化的地表生态效应以及深层地下水的赋存规律,为荒漠、岩溶地区浅层地下水合理利用提供新的途径。西部不同水文地质单元(尤其是干旱区和岩溶山区)地下水系统具有什么样的特征?地下深层水循环与浅层水循环之间的关系是什么?浅层地下水开发对地表生态系统会产生什么影响?^[40]如何运用地下水溶质运移模型分析边界条件的变化、水化学作用和地球化学环境的演变情况?如何从数值法的角度评价并预测地下水的水质?量化气候、土地利用和人类活动对地下水有何影响?如何实现地下水资源的可持续利用?对这些科学问题的回答具有重要的理论和实际意义。同时,地下水系统数值模拟是依据对地下水系统数学模拟模型的数值离散解法,并不能代表整个地下水系统研究,地下水系统数值模拟方法本身也存在问题,如裂隙介质岩溶介质中地下水系统数值模拟的关键技术尚未解决,地下水水质模拟的可靠性问题有待深入分析,所以地下水系统不同模拟方法的结合应用具有更大的价值。

4 地下水系统数值模拟研究展望

随着地下水资源需求的不断增加,与地下水有关问题的范围和复杂性也随之增大。农业活动区和城市地区的人类活动对区域地下水水位、水质的影响日益突出。地下水系统数值模拟可以量化地下水的动态变化与人类活动的关系,可以比较不同开采方案并预报开采对环境带来的影响,以便人们了解采取什么行动来保证含水层的可持续利用,维持合适的生态水位。地下水系统数值模拟模型在国家制定区域水政策和方针中将发挥越来越重要的作用。

近年来,随着计算机的发展和GIS技术的进步,带来了科学决策和管理信息的新方法,有利于水文

水资源工作者了解地下水在时间和空间上的变化情况,并提供良好的数据维护、更新和分析功能,有了完备的数据做支持,一方面可以提高模拟的仿真性,另一方面又可大大减轻处理复杂数据的工作负担。深入挖掘3S技术在地下水系统数值模拟中的功能仍然是今后工作的重要内容。系统论、信息论在地下水研究中也将会越来越重要。

如何将现有的各类计算方法和软件逐步过渡到以栅格为计算空间单元的分布式模型上来,充分利用RS动态监测信息和GIS空间数据管理功能,实现地下水系统数值模拟模型与GIS和RS的集成,是今后的研究重点^[41]。应充分利用“数字地球”和国家空间信息基础设施,将地下水系统纳入“数字地球”、“数字国土”或“数字流域”体系^[42]。数值模拟软件还将不断完善,软件的组件化、可视化、前后处理智能化、离散方法简单化和求解方法多样化等特点^[43]日益增强,将融入更多功能强大的子程序软件包。

地下水系统数值模拟模型结合地表水文模型、作物模型、流域生态模型、区域气候模型、分布式水文模型、水平衡模型和随机法模型等优势,一方面弥补模型的缺陷,实现优势互补,使物理基础更加坚实;另一方面扩展模型的应用范围,综合集成管理模式的模型。

随着勘探手段的提高,含水层特征参数的确定方法将不断丰富,参数精度不断提高,数值模型的标定方法及灵敏度的分析将更规范化。三维数值模型是未来发展趋势,将越来越真实地概化实际的水文地质条件。

新思维方法、数学方法、计算机软件技术的应用将越来越快地提升地下水系统数值模拟方法的功能,有针对性地处理模型中具体的不确定因素,更合理地表征具体的地下水动态变化特征。通过地下水系统不同模拟方法的耦合和多学科的深入交流合作,地下水系统数值模拟方法将会有更广阔的前景。

参考文献:

- [1] ANDERSON M P, WOESSNER W W. Applied groundwater modeling Simulation of flow and advective transport[M]. New York: Academic Press Inc., 1992: 145-152.
- [2] EWING R E. Multidisciplinary interactions in energy and environmental modeling[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1996, 74: 193-215.
- [3] Wood W L. A note on how to avoid spurious oscillation in the finite element solution of the unsaturated flow equation[J]. Journal of Hydrology, 1996, 176: 205-218.
- [4] KIM Jun-mo, PARIZEK R R. Numerical simulation of the Nordbergum effect resulting from groundwater pumping in a layered aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 1997: 231-243.
- [5] SCHEIBE T, YABUSAKI S. Scaling of flow and transport behav-

- ior in heterogeneous groundwatersystems[J]. Advances in Water Resources ,1998 22(3) :223-238.
- [6] GHASSEMI F ,MOLSON J W ,FALKLAND A. Three-dimensional simulation of the Home Island freshwater lens :preliminary results [J]. Environmental Modelling & Software ,1999 ,14 :181-190.
- [7] PORTER D W ,GIBBS B P. Data fusion modeling for groundwater systems[J]. Journal of Contaminant Hydrology ,2000 ,42 :303-335.
- [8] MAZZIA A ,PUTTI M. Mixed-finite element and finite volume discretization for heavy brine simulations in groundwater[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics ,2002 ,147 :191-213.
- [9] LI Shu-guang ,McLANGHLIN D. A computationally practical method for stochastic groundwater modeling[J]. Advances in Water Resources ,2003 ,26 :1137-1148.
- [10] MEHL S ,HILL M C. Development and evaluation of a local grid refinement method for block-centered finite-difference groundwater models using shared nodes[J]. Advances in Water Resources ,2002 ,25 :497-511.
- [11] JUAN C S ,KOLM K E. Conceptualization ,characterization and numerical modeling of the Jackson Hole alluvial aquifer using ARC/INFO and MODFLOW[J]. Engineering Geology ,1996 ,42 :119-137.
- [12] WINSTON R B. MODFLOW—related freeware and shareware resources on the internet[J]. Computers & Geosciences ,1999 ,25 :377-382.
- [13] OLSTHOORN T N. A comparative review of analytic and finite difference models used at the Amsterdam Water Supply[J]. Journal of Hydrology ,1999 ,226 :139-143.
- [14] HARRINGTON G A ,WALKER G R. A compartmental mixing-cell approach for the quantitative assessment of groundwater dynamics in the Otway Basin[J]. Journal of Hydrology ,1999 ,214 :49-63.
- [15] BRODIE R S. Integrating GIS and RDBMS technologies during construction of a regional groundwater model[J]. Environmental Modelling & Software ,1999 ,14 :119-128.
- [16] ATAIE -ASHTIANI B ,VOLKER R E. Numerical and experimental study of seepage in unconfined aquifers with a periodic boundary condition[J]. Journal of Hydrology ,1999 ,222 :165-184.
- [17] WINGLE W L ,POETER E P ,McKENNA S A. UNCERT :geostatistics uncertainty analysis and visualization software applied to groundwater flow and contaminant transport modeling[J]. Computers & Geosciences ,1999 ,25 :365-376.
- [18] RAMIREDDYGARI S R ,SOPHOCLEOUS M A. Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on stream-flow and groundwater :the case of Wet Walnut Creek Watershed , Kansas ,USA[J]. Journal of Hydrology ,2000 ,236 :223-246.
- [19] OSMAN Y Z ,BRUEN M P. Modelling stream-aquifer seepage in an alluvial aquifer :an improved looping-stream package for MODFLOW[J]. Journal of Hydrology ,2002 ,264 :69-86.
- [20] SAMANI N ,KOMPANI-ZARE M ,BARRY D A. MODFLOW equipped with a new method for the accurate simulation of axisymmetric flow[J]. Advances in Water Resources ,2004 ,27 :31-45.
- [21] DAHAN O ,McGRAW D. Multi-variable mixing cell model as a calibration and validation tool for hydrogeologic groundwater modeling[J]. Journal of Hydrology ,2004 ,293 :115-136.
- [22] FACCHI A ,ORTUANI B. Coupled SVAT-groundwater model for water resources simulation in irrigated alluvial plains[J]. Environmental Modelling & Software ,2004 ,19 :1053-1063.
- [23] 陈家军 ,王红旗 ,张征. 地质统计学方法在地下水水位估值中应用[J]. 水文地质工程地质 ,1998(6) :7-10.
- [24] 卞锦宇 ,薛禹群 ,程诚. 上海市浦西地区地下水三维数值模拟[J]. 中国岩溶 ,2002 22(3) :182-187.
- [25] 王玮. 水文地质数值模拟中节点地面标高的获取方法[J]. 长安大学学报 :地球科学版 ,2003 25(2) :41-45.
- [26] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨[J]. 水利学报 ,2003(3) :33-36.
- [27] 武强 ,徐华. 地下水模拟的可视化设计环境[J]. 计算机工程 ,2003 29(6) :69-70.
- [28] 张明江 ,门国发 ,陈崇希 ,等. 渭干河流域三维地下水数值模拟[J]. 新疆地质 ,2004 22(3) :238-243.
- [29] 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.
- [30] 廖华胜 ,李连侠 ,LI Shu-guang ,等. 地下水非平稳随机模型及空间变异性与非均匀性相互关系研究的展望[J]. 水利学报 ,2004(10) :13-21.
- [31] 薛禹群 ,叶淑君 ,谢春红. 多尺度有限元法在地下水模拟中的应用[J]. 水利学报 ,2004(7) :7-13.
- [32] 魏连伟 ,邵景力 ,崔亚莉 ,等. 模拟退火算法反演水文地质参数算例研究[J]. 吉林大学学报 :地球科学版 ,2004 ,34(4) :612-616.
- [33] 陈锁忠 ,马千程. 苏锡常地区 GIS 与地下水开采及地面沉降模型系统集成分析[J]. 水文地质工程地质 ,1999 (5) :26-29.
- [34] 陈劲松 ,万力. MODFLOW 中不同方程组求解方法差异分析[J]. 工程勘察 ,2003(2) :25-32.
- [35] 高佩玲 ,雷廷武 ,张石峰. 新疆阿图什哈拉峻地区地下水系统模型研究[J]. 水利学报 ,2004(4) :61-66.
- [36] 杨旭 ,杨树才 ,黄家柱. 基于 GIS 的地下水数值模拟模型拟合方法[J]. 计算机工程 ,2004 30(11) :50-51.
- [37] 陈锁忠 ,黄家柱 ,张金善. 基于 GIS 的孔隙水文地质层三维空间离散方法[J]. 水科学进展 ,2004 ,15(5) :634-639.
- [38] 陈喜 ,陈洵洪. 美国 SandHills 地区地下水数值模拟及水量平衡分析[J]. 水科学进展 ,2004 ,15(2) :94-99.
- [39] 罗毅. 分布式生态水文学模型研究取得重大进展 :SWATMOD.2K4[J]. 中国西部环境和生态科学简报 ,2004 ,1(6) :2-8.
- [40] 国家自然科学基金委员会科学指导与评估专家组. 中国西部环境和生态科学[R]. 北京 :国家自然科学基金委员会 ,2001 :11-12.
- [41] 何庆成. RS 和 GIS 技术集成及其应用[J]. 水文地质工程地质 ,2000(2) :44-46.
- [42] 魏加华 ,王光谦 ,邵景力 ,等. GIS 在地下水研究中的应用进展[J]. 水文地质工程地质 ,2003(2) :94-98.
- [43] 吴剑锋 ,朱学愚. 由 MODFLOW 浅谈地下水数值模拟软件的发展趋势[J]. 工程勘察 ,2000(2) :12-15

(收稿日期 :2005-02-23 编辑 :熊水斌)