

SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算及应用

张雪刚¹, 毛媛媛², 董家瑞¹, 李致家¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利工程规划办公室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为了准确模拟区域地下水动态变化, 将地表水 SWAT 模型与地下水 MODFLOW 模型进行耦合计算。根据 SWAT 分布式模型的特点, 以其水文响应单元 (HRU) 和 MODFLOW 模型的有限差分网格 (cell) 作为基本交换单元, 将 SWAT 模型计算的地下水补给量和潜水蒸发量引入 MODFLOW 模型的地下水补给 (RCH) 模块和潜水蒸发 (EVT) 模块中, 并将其应用于徐州市张集地区的地下水模拟计算。结果表明, SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算能准确模拟和预测该地区的地下水水情及其地表水和地下水之间的相互作用。

关键词 地表水; 地下水; SWAT 模型; MODFLOW 模型; 模型耦合; 徐州市

中图分类号: P339 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2010)03-0049-04

A coupled model simulation and application of SWAT-MODFLOW

ZHANG Xue-gang¹, MAO Yuan-yuan², DONG Jia-rui¹, LI Zhi-jia¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Water Resources Planning Office, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to simulate change in regional groundwater, the quasi-distributed watershed model, SWAT was coupled with the fully-distributed groundwater model MODFLOW, in simulation. The hydrologic response units (HRU) in the SWAT model, its basic elements, were exchanged with cells in the MODFLOW model. By using the HRU—cell conversion interface, the distributed groundwater recharge rate and the groundwater evapotranspiration calculated by SWAT were introduced into the RCH and EVT modules of MODFLOW. The application of groundwater simulation in the Zhangji area of Xuzhou demonstrated that the coupled SWAT-MODFLOW was capable of predicting the groundwater situation, and of being used for investigating the interaction between surface water and groundwater.

Key words: surface water; groundwater; SWAT model; MODFLOW model; model coupled; Xuzhou City

地表水和地下水之间存在密切的联系和相互作用, 地表水和地下水之间的相互作用规律一直是水文学和水文地质学研究的热点和难点。目前, 国内外有关地表水和地下水模拟的模型很多, 如以模拟地表径流为主的 TOPMODEL^[1]、SWAT 模型^[2-3]、新安江模型等^[4], 以模拟饱和地下水流为主的 MODFLOW^[5]、FEFLOW^[6]等, 在不同区域的水资源管理和规划中得到了广泛应用。在地表水和地下水的联合模拟方面也有许多相关研究, 开发的模型有 SWATMOD^[7-8]、IGSM^[9]、MODHMS^[10]、MIKE-SHE^[11] 模型等。这些耦合与集成模型功能完善, 但是由于

结构复杂, 同时需要大量参数和数据支撑, 模型建立和率定非常耗时, 在应用上受到一定限制。因此根据实际情况, 研究简单、实用的地表水与地下水模型耦合计算的方法, 准确、有效地模拟地表水与地下水系统之间的相互作用, 对于水资源的准确评价、科学开发利用、有效管理以及生态环境的保护具有重要意义。

张集地区位于江苏省徐州市, 区内地下水资源丰富, 建有日供水量 10 万 t 的地下水水源地, 是向徐州市提供饮用水的水源地之一。由于地区内地质条件特点, 地表水渗漏作用强烈, 对地下水存在很强

的补给作用。准确模拟和预测地区地下水的动态变化,对保障徐州市供水至关重要,也是实现区域水资源有效保护和可持续利用的关键。

在地下水模型的模拟计算中,地下水的补给量和潜水蒸发量直接影响地下水动态模拟的结果,但是通常很难对其进行准确估算和赋值。笔者根据张集地区地下水模拟的要求,在地区 SWAT 模型模拟和 MODFLOW 模型建立的基础上,根据 SWAT 分布式模型的特点,通过 SWAT 模型水文响应单元(HRU)与 MODFLOW 差分网格(cell)的对应,构建 SWAT-MODFLOW 的交互界面。应用 ARCGIS 软件,将 SWAT 模型地下水补给量与潜水蒸发量的模拟计算结果及空间分布引入 MODFLOW 相应的地下水补给子模块 RCH 和潜水蒸发子模块 EVT 中,实现模型的耦合计算。对张集地区地下水水位进行模拟,并与实测结果进行对比分析。

1 模型方法

1.1 SWAT 模型

SWAT(soil and water assessment tool)模型是美国农业部(USDA)农业研究所(ARS)开发的适用于大流域尺度的分布式非点源污染计算模型,用于模拟预测在具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大尺度流域里,土地管理措施对水、沙和化学物质的长期影响。SWAT 是基于物理过程的模拟模型,模型主要输入要素包括气象、水文、土壤特性、植被覆盖、化学物质和土地利用情况等。SWAT 模型计算效率较高,可以模拟和研究长期的变化过程。在国外水资源管理、水土流失等方面得到了成功应用,在国内的研究和应用主要侧重于水文模拟方面。

SWAT 模型是具有很强物理机制的半分布式流域水文模型,在 SWAT 模型中,流域被划分为多个子流域,在每个子流域内,根据不同的土地利用和土壤类型,再将每个子流域划分为 1 个或多个下垫面相对单一的水文响应单元(HRU),作为模型的基本计算单元。每个 HRU 的计算结果在子流域范围内进行累加,并演算到支流,最后通过河道汇流计算得到流域出口处的结果。笔者应用 AVSWAT 2000 进行计算。

1.2 MODFLOW

MODFLOW(the modular finite-difference groundwater flow model)是由美国地质调查局(USGS)开发的、用来模拟地下水流动和地下水中污染物迁移等特性的计算机程序,是基于达西定律和地下水质量平衡的具有物理意义的三维地下水模拟模型,使用有限差分方法,采用模块化的程序结构。Visual MODFLOW^[12]是由加拿大 waterloo 水文地质公司在 MODFLOW 软

件的基础上,综合已有的 MODFLOW、MODPATH、MT3D、RT3D 和 WinPEST 等地下水模型软件开发的,可进行三维水流模拟和溶质运移模拟。

Visual MODFLOW 以其简单实用的求解方法、广泛的适用范围及强大的可视化功能等特点,成为目前国际上应用最广泛的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标准可视化专业软件系统。笔者应用 Visual MODFLOW4.0 进行地下水模拟计算。

1.3 SWAT-MODFLOW 耦合方法

在 SWAT 模型中,水文响应单元(HRU)是模型最基本的计算单元,反映了子流域内土地利用和土壤覆盖情况的综合影响,是分布式模拟计算的基础。通过模拟,可以得到每个 HRU 内的地表径流、地下径流、壤中流、蒸发、渗漏量、地下水的补给量等计算结果,将 HRU 计算结果在子流域和整个流域进行累加,就得到计算模型要素在整个流域的空间分布。MODFLOW 的基本计算单元是有限差分网格(cell),根据 SWAT 中 HRU 和 MODFLOW 中有限差分网格的特点,构建 HRU-cell 的交互界面^[13](图 1)。图 1 中上半部分显示了 SWAT 模型 1 个子流域中 HRU 的空间分布,下半部分显示了 MODFLOW 中有限差分网格(cell)的划分情况,网格中的数字分别对应 SWAT 模型中 HRU 的编号。通过这种对应,可以将 SWAT 模型计算的模型要素的空间分布赋值给 MODFLOW,从而实现 SWAT 与 MODFLOW 的耦合计算。

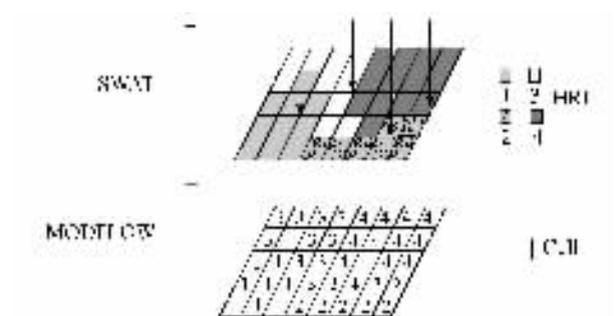


图 1 SWAT 模型与 MODFLOW 的 HRU-cell 耦合示意图

2 SWAT-MODFLOW 耦合计算在张集地区的应用

2.1 研究区域概况

张集地区位于江苏省徐州市东南,距徐州市中心 25 km,总面积 360 km²。地区地下水储量丰富。地区总体地形西北高、东南低,黄泛冲击平原是区内主要地貌形态,在水源地北部及南部边界地区有碳酸岩盐组成的低山丘陵区,山峰海拔高 60~237 m,其余地区为平原区,高程 28~38 m。张集地区数字高程模型 DEM 及其地理位置见图 2。

张集地区的地下水主要有孔隙水含水层和岩溶

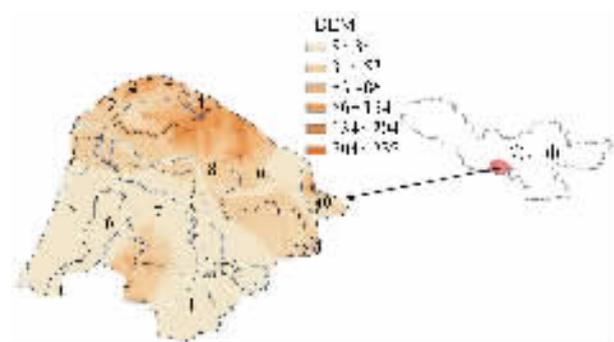


图2 张集地区 DEM 及其在徐州市的地理位置示意图
水含水层两种。孔隙含水层广泛分布在平原区,组成以砂土、粉土、黏性土为主,厚度一般不足 40 m。水源地的岩溶含水层以震旦系和寒武系的碳酸盐岩为主,岩性多变,厚度大、范围广,是水源地地下水的主要开采层区。

2.2 SWAT 模型率定及模拟计算

张集地区面积较小,且缺少实测地表水径流站,因此选择与张集地区相邻的具有相似条件的栏杆集地区,采用栏杆集水文站 1980—1987 年 8 年的月实测流量对模型参数进行率定。

栏杆集地区位于张集水源地西部,流域面积 600 km²,与张集地区同属淮河流域,地区内的气候条件、土地利用及土壤覆盖情况与张集地区基本相同。模型率定的参数及地表径流量的拟合情况见表 1 和图 3。

表 1 SWAT 模型率定的主要参数值

名称	含义	数值	名称	含义	数值
CN ₂	径流曲线系数	-7	GW_REVAP	地下水蒸发系数	0.1
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.8	GWQMN	回归流产生所需地下水深阈值	100 mm
ALPHA_BF	基流 α 因子	0.7	REVAPMN	浅层含水层中再蒸发或下渗的地下水深度阈值	2 mm
SOL_AWC	土壤有效含水率	0.035			

引用 Nash Sutcliffe 模型效率系数 E_{ns} 和线性回归系数 R^2 评估模型的模拟效果。模型率定结果的确定性系数为 0.85,相关系数为 0.86。

将率定的 SWAT 模型应用于张集地区。根据地区土地利用和土壤类型,共划分 12 个子流域。由于张集区域面积较小,且土地利用以农田为主,土地开发利用方式及土壤覆盖情况比较单一,因此 HRU 划分采用优势土被占有法,每个子流域对应 1 个 HRU,共分为 12 个 HRU(图 3)。选用地区 2005 年的实测降雨和蒸发资料,进行 SWAT 月模拟计算,得到区域内每个 HRU 的地下水补给量和潜水蒸发量值。

2.3 SWAT 与 MODFLOW 的耦合计算

根据张集地区的水文地质条件,建立区域的 MODFLOW 地下水模型。模型分为 3 层,第 1 层为非承压的孔隙含水层,第 2 层和第 3 层为承压岩溶含水层。模型网格划分为每层 46 行 × 60 列,每个单元格 (cell) 的大小为 500 m × 500 m。对每个含水层,设置其渗透系数、地下水贮水率、给水度等参数和模型的边界条件^[4]。应用 ARCGIS 软件,将 SWAT 模型计算的地下水补给量和潜水蒸发量结果引入 MODFLOW 模型边界条件中的地下水补给子模块 RCH 和潜水蒸发子模块 EVT 中,进行地下水模拟计算。

图 4 为模拟得到的区域内 35 口地下水观测井 2005 年 4 月 5 日的实测地下水位与模型计算地下水水位的散点图,模拟结果的确定性系数为 0.78,模拟结果与实测值的相关系数 R^2 为 0.81。图 5 显示了位于第 7 个 HRU 内的孔隙含水层一观测井实测与计算地下水水位过程线,计算得到的地下水水位随地下水补给量的变化趋势与实测地下水水位的变化基本吻合。

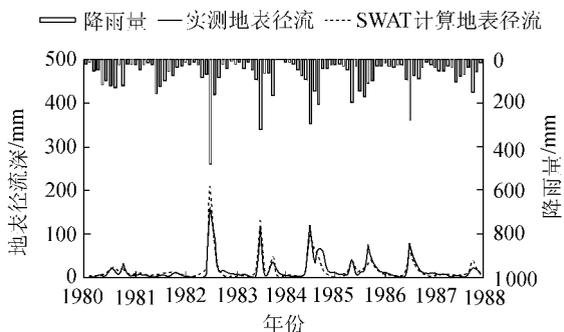


图 3 SWAT 模型率定的栏杆集月径流量与实测流量对比

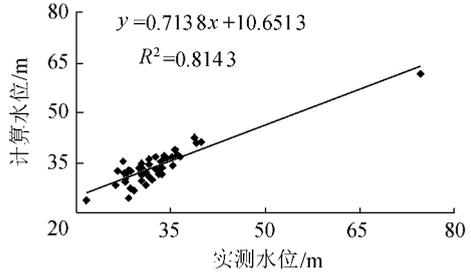


图 4 张集地区 2005 年 4 月 5 日观测井计算水位与实测水位散点拟合图

3 结 论

本文将地表水 SWAT 模型与地下水 MODFLOW 模型进行耦合并应用于徐州张集地区的地下水水位模拟计算。根据张集地区地下水模拟的要求,在地区 SWAT 模型模拟和 MODFLOW 模型建立的基础上,根据 SWAT 分布式模型的特点,将其水文响应单元 (HRU) 和 MODFLOW 的有限差分网格 (cell) 相对

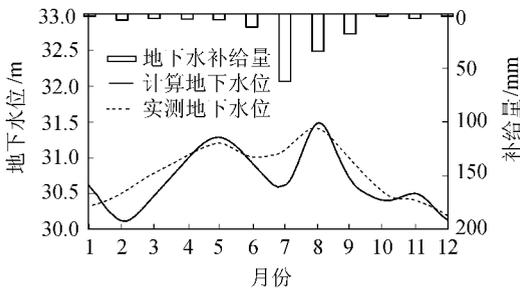


图5 张集地区孔隙含水层观测井2005年地下水水位过程线

应用 ARCGIS 软件,将 SWAT 模型计算的具有空间分布特征的模型要素地下水补给量和潜水蒸发量引入 MODFLOW 的地下水补给模块(RCH)和蒸发模块(EVT)中,实现模型的耦合计算。

对区域2005年地下水模拟计算结果表明,计算得到的区域地下水位与实测结果基本吻合。SWAT 模型与 MODFLOW 的耦合计算对于更准确地模拟和预测地下水水情,进一步研究地表水与地下水之间的相互作用提供了科学方法,对于区域水资源的科学规划和管理,实现区域水资源的可持续利用具有实际意义。

参考文献:

[1] BEVEN K. Topmodel :a critique[J]. Hydrological Processes , 1997 ,11 :1069-1085.

[2] 张银辉. SWAT 模型及其研究进展[J]. 地理科学进展 , 2005(5) :121-130.

[3] 王中根, 刘昌明. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展 , 2003(1) :21-24.

[4] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1984.

[5] MCDONALD M G, HARBAUGH A W. A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model[R]. Washington :U S Geological Survey Open-File Report ,1988.

[6] DIERRSCH H J G ,FEFLOW users manual [M]. Berlin :Institute for Water Resources Planning and System Research Ltd ,1998.

[7] JOBSON H E ,HARBAUGH A W. Modifications to the diffusion analogy surface-water flow model (DAFLOW)for coupling to the modular finite difference ground-water flow model (MODFLOW) [R]. Washington :U S Geological Survey Open-File Report ,1999.

[8] SOPHOELEOUS M A ,KOELIKER J K ,GOVINDARAJU R S ,et al. Integrated numerical modeling for basin-wide watermanagement :the case of the Rattlesnake Creek basin in south central Kansas[J]. Journal of Hydrology ,1999 ,214(1-4) :179-196.

[9] 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.

[10] PANDAY S ,HUYAKORN P S. A fully coupled physically-

based spatially-distributed model for evaluating surface flow [J]. Advances in Water Resources 2004 ,27(4) :361-382.

[11] 贾仰文,王浩,倪广恒,等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.

[12] Anon. Visual MODFLOW V. 2.8.2 user's manual for professional application in three-dimensional groundwater flow and contaminant transport modeling[M]. Ontario :Waterloo Hydro Geologic Inc 2000.

[13] NAM W K ,MOON C , YOO S W ,et al. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model[J]. Journal of Hydrology 2008 (356) :1-16.

[14] 江苏省水文地质工程地质勘察院. 江苏省徐州市张集水源地供水水文地质详查报告[R]. 南京:江苏省水文地质工程地质勘察院, 2001.

(收稿日期 2009-10-22 编辑 高渭文)

(上接第44页)

[9] WANG Yuan-yuan , CHEN Fei-zhou. Decomposition and phosphorus release from four different size fractions of microcystis spp. take from Lake Taihu ,China[J]. Journal of Environmental Science 2007 ,7 :892-899.

[10] 谢平, 陈宜瑜. 加强淡水生态系统中生物多样性的研究与保护[C]//中国环境与发展国际合作委员会. 保护中国的生物多样性. 北京:中国环境科学出版社, 1996 :208-217.

[11] 丁笑生, 段红英. 微囊藻毒素及其生殖毒性的研究进展[J]. 水产科学 2007 ,26(1) :61-62.

[12] 左金龙, 崔福义, 刘智晓, 等. 饮用水中蓝藻毒素污染研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备 2006 ,7(3) :8-13.

(收稿日期 2008-11-02 编辑 高渭文)

勘 误

2010年第2期第76页图1(a)(b)横坐标标值有误,正确标值见下图。特此更正。

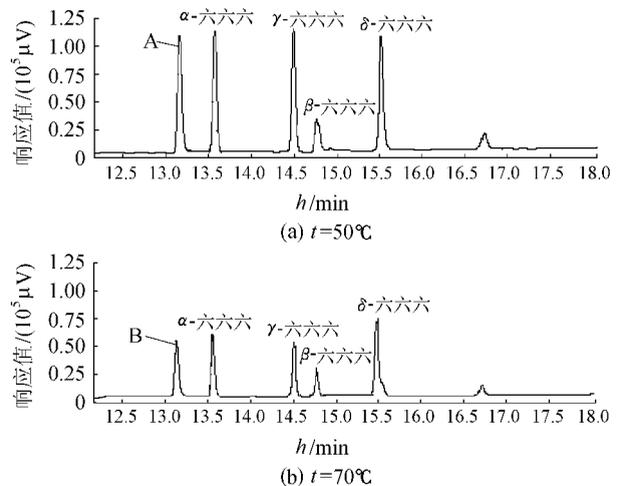


图1 进样温度对待测物响应值的影响