

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0130

张琳琳,崔亚莉,梁桂星,等. SWAT-MODFLOW耦合模型在地下水量均衡分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(6): 176-183. ZHANG L L, CUI Y L, LIANG G X, et al. Application of SWAT-MODFLOW coupling model in groundwater balance analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 176-183. (in Chinese)

SWAT-MODFLOW 耦合模型 在地下水量均衡分析中的应用

张琳琳¹, 崔亚莉¹, 梁桂星^{1,2}, 梁灵君³, 王晓阳¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北京市地热研究院, 北京 102218;
3. 北京市水文总站, 北京 100089)

摘要:利用地下水-地表水半松散耦合数值模拟方法,选取北京市苏密怀地区为典型地区,以长时间序列 SWAT 模型获取的平原区地下水补给量和山区对平原区地下水补给量作为传递变量,分别代替 MODFLOW 模型中降雨入渗补给量和山前侧向补给量的研究思路,建立半松散式 SWAT-MODFLOW 耦合模型,利用地下水位校验耦合模型并对苏密怀地区地下水水量平衡进行分析。结果表明:该方法可以提高地下水模型的精度,耦合模型较传统算法计算得到的降雨入渗补给量减少了 0.54 亿 m³/a,反映出当下垫面条件发生变化和包气带厚度增加时,含水层的降水补给量减少。本研究为水资源的准确评价提供技术支持。

关键词:苏密怀地区; SWAT 模型; MODFLOW 模型; 半松散耦合模型; 水量平衡

中图分类号: TV211 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Application of SWAT-MODFLOW coupling model in groundwater balance analysis

ZHANG Linlin¹, CUI Yali¹, LIANG Guixing^{1,2}, LIANG Lingjun³, WANG Xiaoyang¹

(1. School of Water Resource and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Beijing Geothermal Research Institute, Beijing 102218, China; 3. Beijing Hydrological Center, Beijing 100089, China)

Abstract: Using the semi-loose coupling numerical simulation method of groundwater and surface water, the Su-Mi-Huai area of Beijing is selected, and the groundwater recharge in the plain was taken and the groundwater recharge in the mountain area was obtained from the long time series SWAT model as transfer variables to replace the research ideas of rainfall infiltration supply and mountain front lateral supply in MODFLOW model, and the semi-loose SWAT-MODFLOW coupling model was established to verify the coupling model of groundwater level and the groundwater balance in Su-Mi-Huai area was analyzed. The results showed that this method could improve the accuracy of the groundwater model, and the rainfall infiltration recharge calculated by the coupled model that was reduced by $0.54 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ when compared with the traditional method. This reflected that with the increase of underlying surface conditions and the thickness of the vadose zone, the rainfall recharge of the aquifer was decreased. This study may provide technical support for the accurate evaluation of water resources.

Key words: Su-Mi-Huai area; SWAT model; MODFLOW model; semi-loose coupling model; water balance

收稿日期: 2020-02-11 修回日期: 2020-04-13 网络出版时间: 2020-04-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200428.0943.006.html>

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2017FY100405); 全国第三次水资源调查评价技术要求重大专题研究-专题 12

作者简介: 张琳琳(1995—), 女(回族), 河北邯郸人, 主要从事水利工程研究。E-mail: zllcugb@126.com

通信作者: 崔亚莉(1962—), 女, 北京人, 教授, 博士, 主要从事水资源评价、数值模拟等研究。E-mail: cuiyl@cugb.edu.cn

近年来,在中国经济社会快速发展的背景下,北京城市化进程加快,土地使用和植被特征发生改变,下垫面也随之发生了改变,对水文循环产生了明显影响,导致地表水和地下水的交互过程变得更加复杂^[1-3],如何考虑水文、生态、气候和人类活动之间的相互作用规律^[4]已成为水资源评价研究的难点和热点。为此,借助地表水-地下水耦合数值模型研究复杂条件下水文循环和转化规律是此类研究中的重要手段之一。

国内外众多学者对耦合模型进行了研究。王蕊等^[5]根据耦合方式的不同,将众多耦合模型在归纳总结的基础上分为了3类:①松散耦合型,主要基于流域水循环和平衡原理,如“四水”转化模型^[6];②半松散耦合型,即借助模型中的公共参量的传输和反馈,将分布式水文模型中的地下水模块用成熟的地下水模型替代,如GSFLOW模型^[7-8]、HEC-RAS和MODFLOW耦合模型^[9-11]等、SWAT-MODFLOW耦合模型^[12-14];③紧密耦合型,这类模型主要应用数值分析建立相邻单元之间的时空变化关系,并利用其水量交换量作为源汇项处理,如MIKE-SHE模型等。紧密耦合型模型模拟结果精度较高,但建模过程需要大量精确的参数和数据支持,在实际应用中有一定难度;而松散耦合模型则过于简化了地表水与地下水之间的相互转化,故在应用方面具有局限性^[5]。半松散耦合模型因其建模较容易且在实际应用方面具有较高灵活性而被广泛使用。Sophocleous等^[15]和Kim等^[16]分别将SWATMOD模型应用在美国堪萨斯州和韩国的不同自然流域,并对模拟结果进行验证且取得了较理想效果。Perkins等^[17]对SWAT软件的部分源代码进行修改,解决了SWAT和MODFLOW这两个模型在耦合过程中存在的计算单元不匹配等问题。Kim等^[16]建立了SWAT模型中水文响应单元(hydrological response unit, HRU)和MODFLOW模型中网格(CELL)的交互界面,提出了两个模型耦合的新方法,并在韩国的Musimcheon流域进行了应用。目前,半松散耦合模型在河流-地下水系统水量转换^[11]、灌区地表-地下水转换关系^[13]、煤矿开采区降水入渗补给-地下水的转换关系^[18]、海绵城市建设中地表水-地下水垂向水交换耦合模型^[19]等方面的研究,为耦合模型从自然流域向受人类活动影响较大区域研究的发展提供依据。

选取SWAT构建长时间序列地表径流模型,并将平原区地下水补给量和山区对平原区地下水补给量作为传递变量,实现SWAT-MODFLOW半松散

耦合,进一步将耦合模型应用于北京市苏密怀地区,分析下垫面变化对地下水水量平衡的影响,以期为水资源准确评价提供技术支持。

1 方法

1.1 降雨入渗量与山前侧向量计算方法

通常运用降水入渗系数法^[20]计算大气降水入渗补给地下水

$$Q'_{p,i} = Q_{p,i} \times F_i \times \alpha_i \times 10^3 \quad (1)$$

式中: $Q'_{p,i}$ 为某一时期内(如1个月、1年)第*i*个分区降水入渗补给量, m^3 ; $Q_{p,i}$ 为同时期第*i*个分区的降水量, mm ; F_i 为第*i*个分区的面积, km^2 ; α_i 为第*i*个分区的降水入渗系数,它与包气带岩性、结构、厚度等因素有关。在MODFLOW中,上式得到的人渗量用RCH子程序包作为面状补给源代入模型。

断面法^[21]是计算山前侧向量的常用方法为

$$Q_c = K \times J \times H \times L \times T \quad (2)$$

式中: Q_c 为某一时期内山前侧向补给量, m^3 ; K 为断面处含水层渗透系数, m/d ; J 为垂直于断面的水力梯度; H 为断面处含水层厚度, m ; L 为断面的长度, m ; T 为径流补给时间, d 。在MODFLOW中,以上断面法所求的山前侧向补给量,通常以井(Well)的形式代入模型计算。

由于近山前地带的水文地质研究程度较低,难以获得精准的水力坡度 J 、含水层厚度 H 、渗透系数 K 等参数,这些因素都会导致地下水模型的准确性降低。SWAT模型应用Green&Ampt公式计算下渗量(即降雨入渗补给量):对于山区,人类活动影响较小时(例如人工开采很少),可以认为山区的下渗量全部侧向补给平原区;对于平原区,计算得到的下渗量即为含水层获得的降水入渗补给量。该模型计算含水层补给量时无需求取水力坡度等参数并综合考虑了下垫面等条件,可以用来弥补MODFLOW模型的缺点。

1.2 半松散耦合模型

主要应用3个部分来完成研究区地表-地下水的半松散耦合:基于SWAT2005软件构建的地表水径流模型;基于MODFLOW-2005构建地下水流模型;利用GIS平台进行数据传递建立的地表-地下水半松散耦合模型。其中,SWAT模型以日为时间步长,选取SWAT-CUP(calibration and uncertainty programs)2012中*t*检验和*p*因子方法来判断参数的敏感性^[22],选取决定系数(R^2)和纳什系数(E_{ns})这两种因子作为评价模型参数优化的评价标准。在

一般情况下, E_{ns} 与 R^2 都在 0.5 以上的月径流模拟即可满足精度要求^[23]。

MODFLOW 模型应用外部构建模型的方法, 将各源汇项处理成相应的格式, 应用无可视化界面的 MODFLOW-2005 运行模型。该模型模块化的特点有利于数据的增减^[24] 与后期耦合时数据的处理问题, 选取韩忠等^[25] 优化后的 RCH 子程序包和新开发的 RAW(recharge and well) 子程序包处理源汇项数据, 这两个子程序包均为面状处理数据原理。应用面状处理补排项文件有利于在进行耦合时将 SWAT 模型中面状补给到含水层的水量以同样面状分布的方式代入模型。模型中主要的源汇项文件主要包括 3 部分: 降水入渗补给(RCH)、面状补排文件(RAW) 和井文件(WELL)。研究区内地下水埋深大于 4 m, 故忽略潜水蒸发。

应用 SWAT 模型中计算得到的平原区地下水补给量代替 MODFLOW 模型中降雨入渗量补给量, 选取优化后的 RCH 子程序包作为面状补给项代入模型; 应用 SWAT 模型中计算得到的山区含水层补给量代替 MODFLOW 模型中山前侧向补给量, 以井(WELL) 的形式代入模型, 从而建立 SWAT-MODFLOW 半松散耦合模型。耦合模型

建立过程中主要的问题为 MODFLOW 模型的基本计算单元为有限差分的网格(CELL), 具有空间信息, 而 SWAT 模型的最基本计算单元为水文响应单元(HRU), 每个 HRU 都代表着在该流域的特定的土地利用、土壤类型及坡度的组合, 是模型模拟计算的基础^[26-27], 具有矢量信息, 但其数据不能直接传递至网格(CELL)。因此, 需要通过 ARCGIS 建立一个 HRU-CELL 的交互界面^[16] (图 1), 让每一个水文响应单元对应一个或多个网格, 将每个 HRU 上的值传递到相应 CELL 中, 即实现 SWAT-MODFLOW 的半松散耦合。模型建立具体方法见图 2。

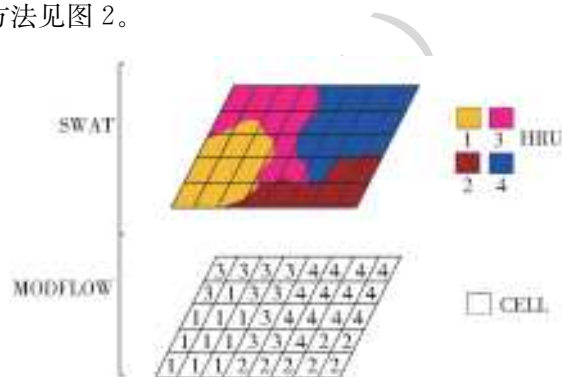


图 1 HRU-CELL 交互界面

Fig. 1 The interactive interface of HRU-CELL

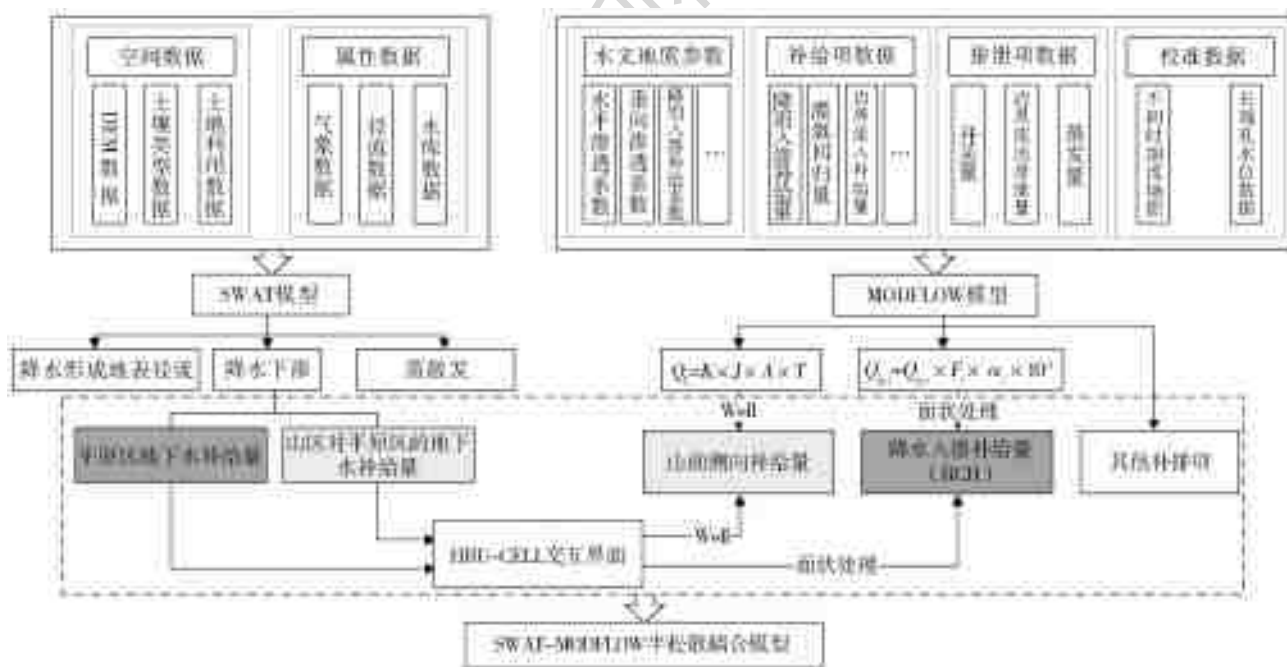


图 2 模型建立流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model building process

2 模型建立

2.1 研究区概况

苏密怀地区是北京市主要水源地之一, 位于北京市的东北部(图 3), 研究区面积为 1 078 km², 其

中平原区面积约为 680 km²。研究区北部的密云水库位于河道出山口处, 最大库容为 43.75 亿 m³, 自密云水库流出的潮河和白河在密云区河槽村汇合成为潮白河, 怀河在顺义区牛栏山处汇入潮白河。密云水库流域植被主要为杂草、灌木丛和森林等, 土壤

具有垂直分布特征,自高而低分布有草甸土、棕壤和淋溶褐土。山前到平原地区的水文地质条件见图4,区内平原区地下水主要是松散岩类孔隙水,从山前到平原含水层由单层变为多层,山区地下水主要是基岩裂隙水。



图3 研究区范围

Fig. 3 Schematic diagram of study area

研究区属典型暖温带半湿润半干旱大陆性季风

气候,年均降水量 588.82 mm,雨量年内分配不均,集中在 6—9 月的降水量占年降水量的 82% 以上。降水量年际变化较大,常出现连续枯水年份。区内地下水主要来源于大气降水入渗,随着开采强度的增加,地下水超采严重,导致地下水位埋深加大,包气带厚度增加,下垫面条件发生改变,同时导致原溢出带消失,地下水位埋深大于蒸发极限,地下水排泄以人工开采为主。

2.2 数据准备

SWAT 模型构建主要需要两类数据,分别为空间数据(DEM、土地利用和土壤类型图)与属性数据(气象、径流等),具体数据格式见表 1。

MODFLOW 模型构建主要需要参数、补给项、排泄项和校准数据(流场图、长观孔水位数据),其中,降雨数据采用与 SWAT 模型中相同的测站数据进行计算,其他农业回灌入渗补给量、渠系管网渗漏补给量、山前侧向补给量、开采量等均应用 2000—2016 年数据。

表 1 SWAT 模型数据

Tab. 1 Data of SWAT model

数据类型	尺度	年份
DEM	90 m×90 m	—
土壤类型图	1 000 m×1 000 m	2010
土地利用类型图	1 000 m×1 000 m	2015
气象数据	日尺度	2000—2016
径流数据	月尺度	2000—2016
水库数据	月尺度	2000—2016

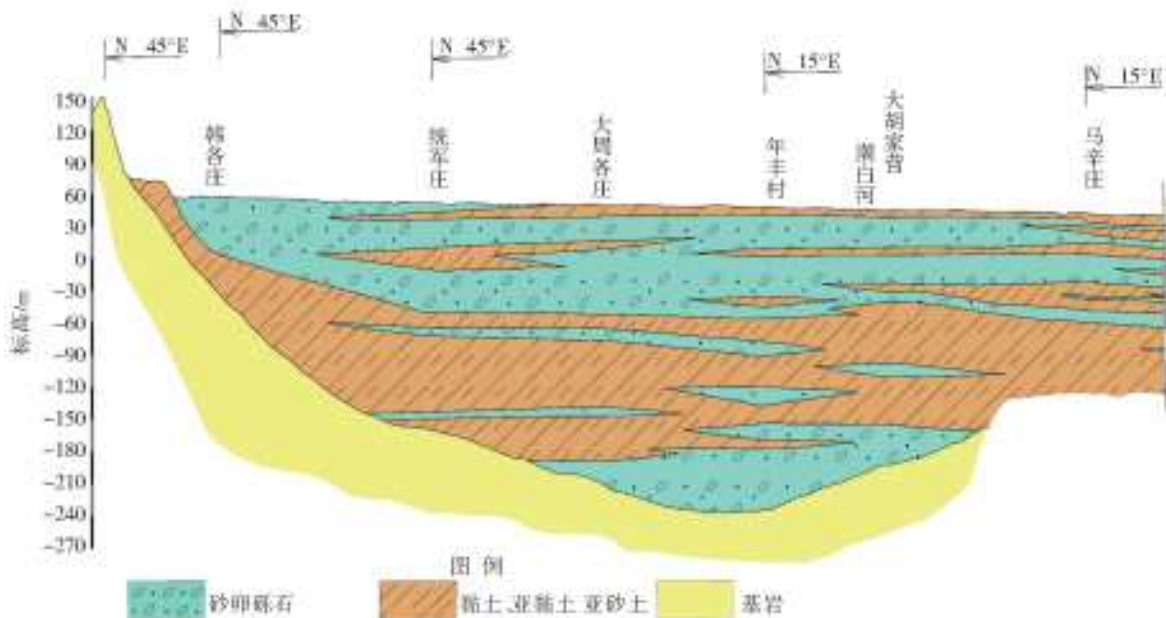


图4 A-A'水文地质剖面简图(根据《华北平原地下水可持续利用图集》进行修改清绘)

Fig. 4 Schematic diagram of hydrogeological profile (To modify the drawing according to the Atlas of Groundwater Sustainable Utilization in North China Plain)

2.3 耦合模型的建立

在选取 SWAT 软件构建地表径流模型时,为得到山区对平原区的地下水补给量,模型范围包括了苏密怀地区北部部分山区。山区部分根据地表分水岭所在划定其具体范围,包含了怀柔水库、大水峪水库,区内主要河流潮白河整体自北向南流至下游苏庄水文站这一流域出口(图 3),故认为 SWAT 模型范围为完整流域。选取 2000—2012 年为 SWAT 模型参数率定期,2013—2016 年为模型验证期。研究中采用通过 ARCGIS 软件处理后的高精度 DEM 数据和实际水系矢量图导入模型以提高模型精度。选择流域的最小集水面积阈值为 1 400 hm² (14 km²),并选择模型自动生成的河流最下游附近的 1 个流域总出水口,将流域划分为 41 个子流域。为方便后期与 MODFLOW 模型进行耦合,在构建 SWAT 模型过程中进行“HRU Analysis-HRU Definition”中的定义水文响应单元(HRU)时,使每一个 HRU Feature Class 对应一个 HRU,即让每个 HRU 都有唯一标识,便于后期与网格的对应,模型最终被划分为 638 个 HRU。

通过对苏密怀地区水文地质条件进行概化,在垂向上分为 4 个含水层。选取该区平原部分构建 MODFLOW 地下水流模型(图 3),剖分网格大小为

200 m×200 m。选取 2000 年 1 月至 2016 年 12 月为模拟期,以月为应力期(抽水时期),2000 年 1 月初地下水水流场作为模型的初始水位。该模型北部山前侧向边界按定流量边界进行处理,南部人为边界处理为通用水头边界。

利用 ARCGIS 交互界面,使 MODFLOW 模型中每个网格均对应 1 个 HRU,并将 SWAT 模型计算得到的平原区地下水补给量和山区地下水补给量分别代入 MODFLOW 模型中的地下水补给模块(RCH)与山前侧向补给量(WELL)中,即进行 SWAT-MODFLOW 半松散耦合模型的构建。将该耦合模型应用在苏密怀地区,除降雨入渗补给量和山前侧向补给量数据来源不同以外,其余边界条件处理方式与 MODFLOW 模型相同,模型模拟期为 2000—2016 年,以月为应力期,共 204 个应力期。

SWAT 模型中主要参数的率定结果见表 2。选取苏庄一个水文站的实测径流数据进行径流参数率定,径流模拟值和实测值拟合情况见图 5。决定性系数 R² 和纳什系数 E_{ns} 分别为 0.64 和 0.60。模型验证结果如图 5 所示,决定性系数 R² 和纳什系数 E_{ns} 分别为 0.78 和 0.67。模型结果满足精度要求,可代入地下水模型中进行下一步耦合计算。

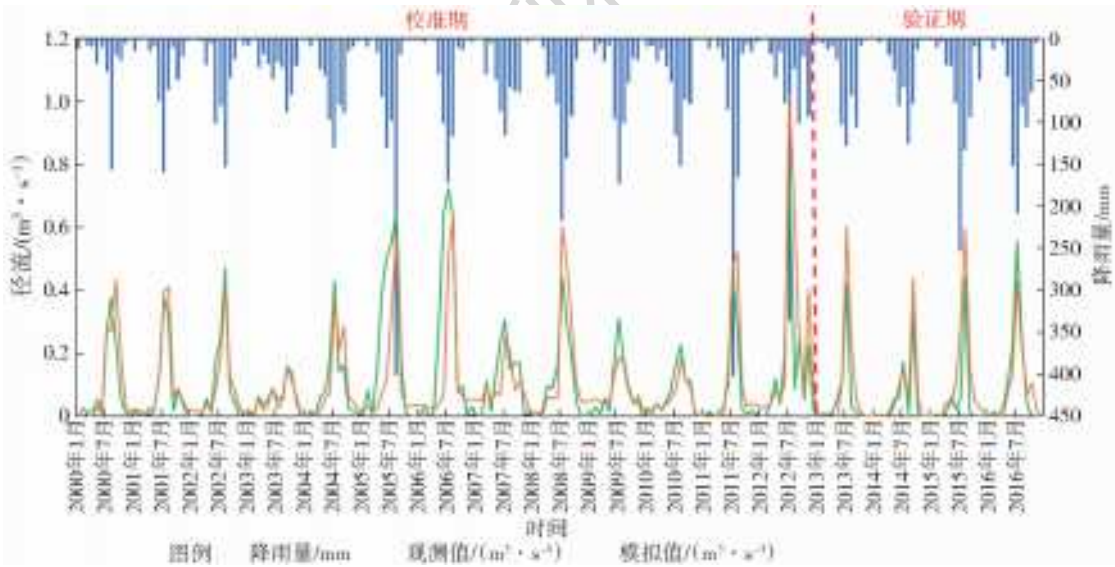


图 5 SWAT 模型苏庄站径流拟合图

Fig. 5 Runoff fitting diagram of Su Zhuang station based on SWAT model

表 2 SWAT 模型主要参数率定结果

Tab. 2 Calibration results for main parameters of SWAT model

参数名称	参数初始范围	参数最终范围	参数含义
CN2	35~98	54~58	SCS 径流曲线数
ALPHA_BF	0~1	0.08~0.11	地下水退水常数
REVAPMN	0~600	487~501	浅层地下水再蒸发系数
RCHRG_DP	0~1	0.002~0.007	深蓄水层渗透系数
ESCO	0~1	0.38~0.54	土壤蒸发补偿系数
SOL_AWC	0~1	0.009~0.020	土壤有效含水量

根据已有实测流场对 MODFLOW 模型进行拟合和验证,确定研究区相关水文地质参数范围:潜水含水层水平渗透系数变化范围为 5~150 m/d,垂向渗透系数一般为水平渗透系数的 10⁻¹~10⁻³,给水度变化范围为 0.10~0.27;承压含水层水平渗透系数变化范围为 8~150 m/d;垂向渗透系数一般为水平渗透系数的 10⁻³~10⁻⁵;储水率变化范围为 2×10⁻⁷~1.8×10⁻⁶;降水入渗补给系数范围为 0.14~0.65。

由于使用半松散耦合方式建立地表水-地下水耦合模型,其输出结果格式与 MODFLOW 模型相同,故可应用区内长观孔数据对两个模型中水位进行对比分析。长观孔 No. 8 与 No. 18(图 3)分别位于怀柔应急水源地附近和京密引水渠南侧,其地下水水位观测数据可较直接反映南水回补对地下水水位的影响,因而选取这两个长观孔数据分析耦合模型中地下水位与 MODFLOW 模型中地下水位。2000 年 1 月至 2016 年 12 月观测孔水位过程线拟合效果

见图 6。对比研究区内 No. 18 和 No. 8 两个长观孔水位拟合情况(图 6):MODFLOW 模型计算得到的水位高于实际观测水位,而耦合模型计算得到的水位更加接近实际观测水位;MODFLOW 模型中地下水位模拟值与实测值的相关系数均大于 0.96,均方根误差(RMSE)分别为 4.12 和 4.86;耦合模型中地下水位模拟值与实测值的相关系数均大于 0.96,均方根误差(RMSE)分别为 3.38 和 2.70,水位拟合效果较 MODFLOW 模型理想。

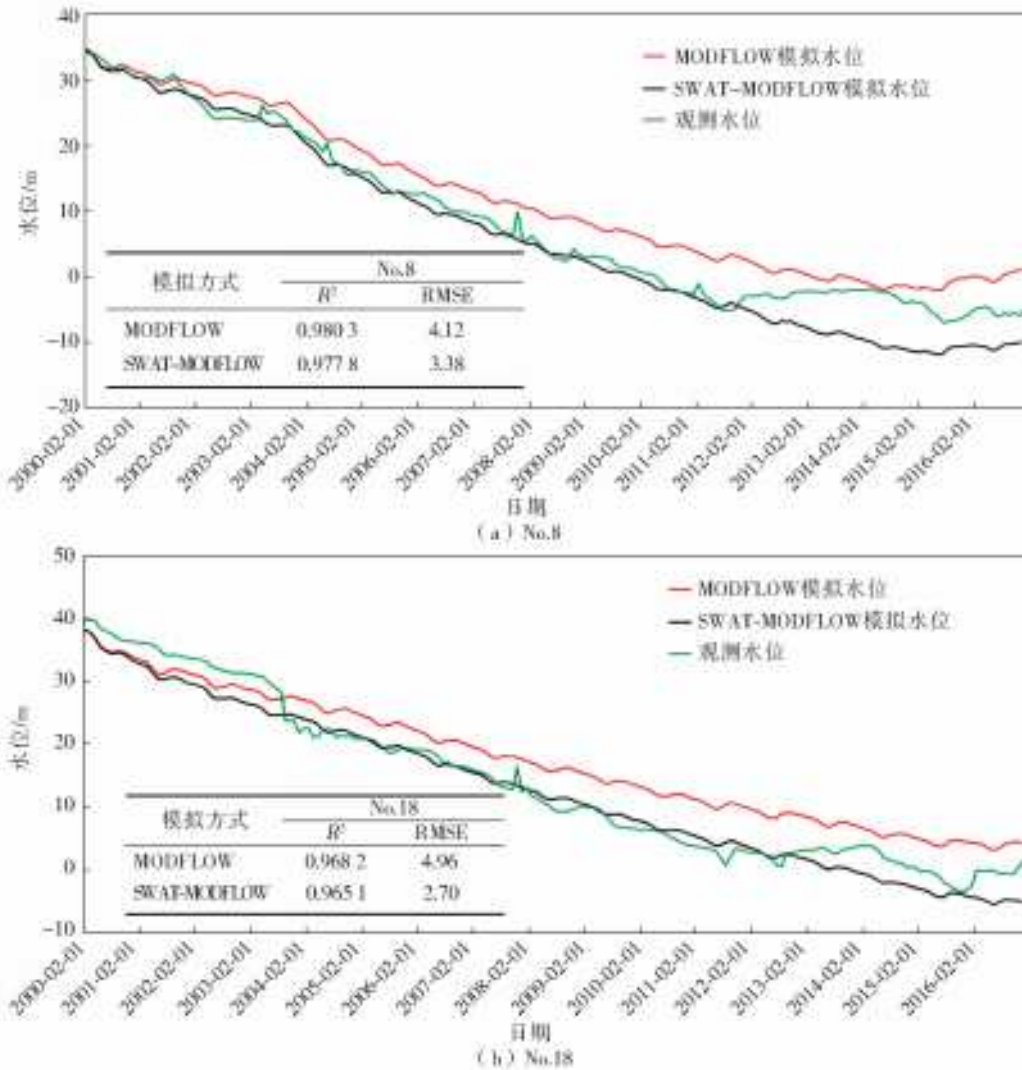


图 6 地下水位验证结果

Fig. 6 Validation results of groundwater level

3 讨论

对比 MODFLOW 模型与耦合模型潜水含水层多年平均水量(表 3)及水位拟合情况,耦合模型中降雨入渗补给量较 MODFLOW 模型中减少了 0.54 亿 m^3/a ,边界流入补给量较 MODFLOW 模型中增加 0.04 亿 m^3/a ,山前侧向补给量与 MODFLOW 模型计算结果相近,耦合模型模拟得到的地下水位

较 MODFLOW 模型更加接近实际地下水位。

在应用 MODFLOW 模型计算,未进行人为分析下垫面变化情况下,研究区潜水层的多年平均均衡情况见表 3:降雨入渗补给量为 1.85 亿 m^3/a ,占总补给水量的 54.25%;山前侧向补给量为 0.42 亿 m^3/a ,占总补给水量的 12.32%;开采量为 5.45 亿 m^3/a ,占总排泄水量的 99.27%,潜水含水层多年平均水量平衡呈现负均衡。在应用耦合模型计算,考虑了下垫面变

化条件下,研究区的降雨入渗补给量和山前侧向补给量发生变化,分别为 1.31 亿和 0.48 亿 m^3/a ,分别占

总补给水量的 44.11% 和 16.16%,潜水含水层多年平均水量平衡呈现负均衡。

表 3 研究区潜水层 MODFLOW 模型和耦合模型多年平均水量平衡计算

Tab. 3 Calculation of multi-year average water balance of phreatic layer with MODFLOW model and coupling model in the study area

项目	MODFLOW 模型		SWAT-MODFLOW 耦合模型		
	数量/(亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	占比/%	数量/(亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	占比/%	
补给	降雨入渗补给量	1.85	54.25	1.31	44.11
	地下水灌溉回归量	0.29	8.50	0.29	9.76
	地表水灌溉回归量	0.06	1.76	0.06	2.02
	渠系管网入渗补给量	0.56	16.42	0.56	18.86
	山前侧向补给量	0.42	12.32	0.48	16.16
	边界流入补给量	0.23	6.75	0.27	9.09
	小计	3.41	100.00	2.97	100.00
排泄	开采量	5.45	99.27	5.45	99.27
	边界流出排泄量	0.04	0.73	0.04	0.73
	小计	5.49	100.00	5.49	100.00
总计	总补排差	-2.08	—	-2.524	—

综合分析两个模型的水位拟合及潜水含水层多年平均水量的差异可知:耦合模型中降雨入渗补给量是应用 SWAT 模型计算得到的,即考虑了下垫面现状条件下根据气象数据计算得到含水层补给量,此方法得到的垂向补给量比 MODFLOW 模型中应用降雨入渗系数计算的传统方法更准确;在山前侧向补给量的计算中,耦合模型代入的是 SWAT 模型中考虑土壤、坡度、土地利用条件等计算得到山区含水层获得的水量,MODFLOW 模型中代入的是断面法计算结果,由于北京地区山前研究程度深且钻孔分布多,故本区得到的水位观测值多,地下水流场较准确,应用断面法得到的山前侧向补给量也较为准确,与 SWAT 模型计算结果相差不多。此次研究中应用耦合模型计算地下水补给量的方法更加贴合实际,对地下水均衡的分析也更为准确,有利于对地下水资源的准确评价。

4 结 论

利用构建的 HRU-CELL 交互界面以半松散耦合方式建立了 SWAT-MODFLOW 耦合模型,并将其应用于北京市苏密怀地区,得到了如下结论:

(1)研究提出应用 SWAT 模型中山区含水层获得的水量代替 MODFLOW 模型中达西定律计算得到的山前侧向补给量的方法,并在研究区取得较好的模拟效果,验证了其可行性。

(2)MODFLOW 模型中降雨入渗补给量主要根据降雨入渗系数 α 计算得到,无法考虑下垫面变化包气带加厚对地下水获得补给能力的影响,本次

研究结合 SWAT 模型所建立的耦合模型提高了地下水模拟的精度,计算得到研究区降雨入渗补给量为 1.31 亿 m^3/a 。

(3)利用耦合模型分析研究区多年平均水量平衡情况,当研究区包气带厚度增加时地下含水层获得的补给量较改变前减少了 0.54 亿 m^3/a 。

参考文献:

- [1] WOESSNER W W. Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought [J]. Ground Water, 2000, 38(3): 423-429. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2000.tb00228.x.
- [2] SOPHOCLEOUS M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science [J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(2): 52-67. DOI: 10.1007/s10040-002-0204-x.
- [3] 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. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2007.01.008.
- [4] 徐力刚,张奇,左海军.地表水地下水的交互与耦合模拟研究现状与进展[J].水资源保护,2009,25(5):82-85. DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2009.05.020.
- [5] 王蕊,王中根,夏军.地表水和地下水耦合模型研究进展[J].地理科学进展,2008(4):37-41. DOI:10.11820/dlkxjz.2008.04.006.
- [6] 王成丽,蒋任飞,阮本清,等.基于四水转化的灌区耗水量计算模型[J].水利学报,2009,40(10):1196-1203. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2009.10.015.
- [7] 张多纯,张幼宽. GSFLOW 在沙颖河流域地表水与地下水联合模拟的应用[J].水文地质工程地质,2015,

- 42(2): 1-9. DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2015. 02. 01.
- [8] 张浩佳,吴剑锋,林锦,等. GSFLOW 在干旱区地表水与地下水耦合模拟中的应用[J]. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(3): 596-603. DOI: 10. 13232/j. cnki. jnju. 2015. 03. 016.
- [9] CHEN X, LING M H, ZHOU Q, et al. Numerical modeling the role of rubber dams on groundwater recharge and phreatic evaporation loss in riparian zones[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(1): 345-352. DOI: 10. 1007/s12665-011-1094-9.
- [10] WORAKIJTHAMRONG S, CLUCKIE I. Groundwater-river interaction and management in the context of inter-basin transfers[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(5): 2039-2045. DOI: 10. 1007/s12665-013-2714-3.
- [11] 高学平,王喆,孙博闻,等. 河流-地下水系统水量平衡耦合模型分析:以海河流域黎河下游为例[J]. 水力发电学报, 2018, 37(4): 36-48. DOI: 10. 11660/slfdbx. 20180404.
- [12] 王中根,朱新军,李尉,等. 海河流域地表水与地下水耦合模拟[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1345-1353. DOI: 10. 11820/dlkxjz. 2011. 11. 003.
- [13] 刘路广,崔远来. 灌区地表水-地下水耦合模型的构建[J]. 水利学报, 2012, 43(7): 826-833. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2012. 07. 012.
- [14] GUZMAN J A, MORIASI D N, GOWDA P H, et al. A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW[J]. Environmental Modelling & Software, 2015: 103-116. DOI: 10. 1016/j. envsoft. 2015. 08. 011.
- [15] SOPHOCLEOUS M A, KOELLIKER J K, GOVINDARAJU R S, et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1999, 214(1-4): 179-196. DOI: 10. 1016/S0022-1694(98)00289-3.
- [16] KIM N W, CHUNG I M, WON Y S, et al. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model[J]. Journal of Hydrology, 2008, 356(1-2): 1-16. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2008. 02. 024.
- [17] PERKINS S P, SOPHOCLEOUS M. Development of a comprehensive watershed model applied to study stream yield under drought conditions[J]. Ground Water, 1999, 37(3): 418-426. DOI: 10. 1111/j. 1745-6584. 1999. tb01121. x.
- [18] 白乐,李怀恩,何宏谋,等. 煤矿开采区地表水-地下水耦合模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 931-937. DOI: 10. 13225/j. cnki. jccs. 2014. 1655.
- [19] 冯艳如,肖鸿,彭引,等. 地表水与地下水耦合模型开发与验证[J]. 水电能源科学, 2018, 36(5): 31-34. DOI: CNKI: SUN: SDNY. 0. 2018-05-008.
- [20] 许昆. 降水量与地下水补给量的关系分析[J]. 地下水, 2004, 26(4): 272-274. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2004. 04. 013.
- [21] 韩明超,李鸿娟. 截潜工程在计算山前侧向补给量中的应用[J]. 地下水, 2012, 34(5): 12-13. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2012. 05. 006.
- [22] 刘闻. 基于 SWAT 模型的水文模拟及径流响应分析[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [23] SANTHI C, ARNOLD J G, WILLIAMS J R, et al. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(6): 1559-1570. DOI: 10. 13031/2013. 7041.
- [24] 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. DOI: 10. 1007/s11769-000-0027-4.
- [25] 韩忠,邵景力,崔亚莉,等. 基于 MODFLOW 的地下水流模型前处理优化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1290-1296. DOI: 10. 13278/j. cnki. jjuese. 201404207.
- [26] 初京刚,张弛,周惠成. SWAT 与 MODFLOW 模型耦合的接口及框架结构研究及应用[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3): 335-342. DOI: 10. 11820/dlkxjz. 2011. 03. 012.
- [27] 张雪刚,毛媛媛,董家瑞,等. SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算及应用[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 49-52. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2010. 03. 013.