

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210301

# 地表地下耦合的水量及溶质运移模拟研究进展

彭辉<sup>1,2</sup>, 孙晓文<sup>1</sup>, 蒋竹青<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;  
2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:**地表水与地下水之间存在强烈的相互作用,构建地表水和地下水耦合的水量和溶质运移模型可以揭示地表水和地下水之间的相互作用机制,并提高地表地下水水质预测的精度。介绍了现有的地表地下耦合的水量及溶质运移模型,对比了各模型的求解方法和适用领域,总结了这些模型的应用现状。其中水量模型中全耦合模型精度较高,是未来模型发展的主流方向,溶质运移模型中溶质反应过程模拟较为欠缺。未来应在优化求解算法、提高溶质反应模拟和加强裂隙介质模拟等方面深入开展相关研究。

**关键词:**地表水-地下水;耦合模型;溶质运移模型

**中图分类号:**P641

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2023)02-0006-07

## 0 引言

地表水和地下水之间的相互作用存在于几乎所有的自然水体中,传统的水资源管理与规划常常将地下水、地表水分开单独模拟分析,往往忽略了地表-地下相互作用,从而降低了模拟的准确度<sup>[1]</sup>。为了反映地表-地下之间的水量水质相互作用关系,构建地表地下耦合的水量及溶质运移模型用于解决水资源和水环境问题已经成为现在研究的热点。

目前,耦合模型主要基于地表、非饱和带和饱和带水流数学模型和溶质运移数学方程进行构建,并采用耦合求解算法将各部分的数学方程进行求解,从而模拟地表-地下的水流、溶质运移交换过程。随着计算性能和数值求解算法的改进,耦合模型的计算精度不断提高,水量耦合模拟的应用主要包括地下水水位预测<sup>[2-3]</sup>、河流与地下水间的相互交换<sup>[4-6]</sup>及洪水预报、极端天气和潮汐活动对地下水影响<sup>[7]</sup>等,溶质耦合模拟主要应用于污染物在地下水中的分布和变化<sup>[8]</sup>、地表到地下渗透过程和河流与地下水之间溶质交换<sup>[9]</sup>

等。本文对比了现有的地表-地下水量和溶质运移耦合模型的求解方法和适用领域,总结了模型的应用情况,展望了未来研究方向,对水资源水环境的开发保护具有重要的参考意义。

## 1 地表水-地下水耦合模型

地表水和地下水的耦合模型都有水量耦合功能,部分模型在水量耦合的基础上进一步开发了溶质耦合功能,因此可以分为水量耦合和溶质耦合两类模型。

### 1.1 水量耦合模型

地表-地下水量耦合模型主要包括地表径流、非饱和带水流和饱和带水流三部分模块。非饱和带是地表水和地下水交换的关键环节,因此地表-地下耦合模拟的关键是非饱和带和其他两部分之间水量交换的实现。某些现有模型对三部分分别求解,再进行方程间的连接,也有一些模型对三部分进行全耦合求解。因此,可以根据耦合方法将地表-地下水量耦合模型分为三类,分别是异步连接耦合模型、顺序迭代耦合模型和全耦合模型(见表1)。

收稿日期:2021-07-26

网络首发日期:2022-05-07

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20220506.1555.001.html>

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41731280, U1906215)

作者简介:彭辉(1984—),女,山东人,博士,副教授,主要从事流域水环境模拟方面的工作。E-mail:pengh@ouc.edu.cn

表1 地表水-地下水水量耦合模型汇总

模型	耦合方法	文献出处
tRIBS-OFM	顺序非迭代	Kim等 <sup>[10]</sup>
PAWS	顺序非迭代	Shen和Phanikumar <sup>[11]</sup> , Niu等 <sup>[12]</sup>
GSSHA	顺序非迭代	Downer等 <sup>[5]</sup>
SWAT-MODFLOW	顺序非迭代	Aliyari等 <sup>[13]</sup>
MIKE-SHE	顺序非迭代	Ma等 <sup>[6]</sup>
CATHY	顺序迭代	Orlandini和Moretti <sup>[14]</sup>
OGS	顺序迭代	Pfeiffer等 <sup>[15]</sup>
GSFLOW	顺序迭代	Markstrom等 <sup>[16]</sup>
PIHM	全耦合	Qu和Duffy <sup>[3]</sup>
ParFlow	全耦合	Maxwell和Miller <sup>[17]</sup>
IRENE	全耦合	Spanoudaki等 <sup>[2]</sup>
HGS	全耦合	Hwang等 <sup>[4]</sup>
InHM	全耦合	Jones等 <sup>[18]</sup>
MODHMS	全耦合	Panday和Huyakorn <sup>[19]</sup>
WASH123D	全耦合	Li等 <sup>[20]</sup>
SHUD	全耦合	Shu等 <sup>[21]</sup>

### 1.1.1 异步连接耦合模型

该类模型通常先求解地表产流过程,再分别求解非饱和带水流和饱和带水流,地表模块和地下模块通过通量交换进行连接。比较典型的模型有tRIBS-OFM<sup>[10]</sup>、PAWS<sup>[11]</sup>、GSSHA<sup>[5]</sup>、SWAT-MODFLOW<sup>[13]</sup>和MIKE-SHE<sup>[6]</sup>等。

tRIBS-OFM模型耦合了水文过程模拟和地表径流数值运算<sup>[22]</sup>,地表径流采用二维圣维南方程描述,非饱和带只考虑一维入渗,地下水运动采用水量平衡和达西定律计算。模型首先利用水文模型tRIBS计算下渗和地下水运动,再将产流输入地表径流模型OFM中计算地表洪水径流。地表径流计算时间步长小于地下水计算步长,入渗只发生在降雨时,且耦合是单向传输的,因此地表和地下耦合相对松散<sup>[10]</sup>。PAWS模型中地表径流使用二维圣维南方程描述,非饱和带水流利用一维Richards方程模拟,地下水流使用二维地下水运动方程描述,并通过非饱和带中的虚拟节点随地下水位变动来模拟地下水对非饱和带的反馈,降低了计算维度,提高了计算速度,因此该模型可应用于中型流域(~1 000 km<sup>2</sup>)或大型流域(>5 000 km<sup>2</sup>)<sup>[11]</sup>。GSSHA模型地表径流采用曼宁公式计算,非饱和带采用一维Richards方程模拟,地下水运动采用二维地下水运动方程描述。模型先进行地表网格的产流和入渗计算,产流进入地表径流模块模拟,非饱和带和饱和带互为边界条件进行耦合计算<sup>[5]</sup>。SWAT-MOD-

FLOW模型是将分布式水文模型SWAT与地下水模型MODFLOW进行耦合,SWAT模型计算地表径流和壤中流过程,MODFLOW模型计算地下水运动过程,耦合过程包括将SWAT计算的土壤底部渗流作为地下水的补给项输入MODFLOW模型,以及将MODFLOW模型计算的河流排泄量导入SWAT河道计算模块<sup>[23]</sup>。MIKE-SHE是一个基于物理的地表-地下耦合的分布式水文模型,通过二维扩散波方程模拟地表水流,利用垂向一维Richards方程模拟非饱和带水流,采用有限差分法求解三维饱和和地下水流<sup>[24]</sup>,非饱和带的上部节点进行显式耦合迭代,若地下水位降低,非饱和带下边界转换为排水边界<sup>[6]</sup>。

此类模型的地表水、非饱和带和饱和带模块都独立求解,各模型求解的时间步长不一致,模块之间的耦合多是单向传输,包括地表水进入非饱和带(下渗)和非饱和带水进入饱和带,长时间步长模块的变量通常采用时间平均的方法输入短时间步长模块。少数模型有双向传输的耦合,但也多是采用简化计算,例如PAWS模型采用虚拟节点来模拟地下水位的变动以反映饱和带对非饱和带的影响。此类模型多采用一维或二维方程来描述水流过程,模拟过程相对简化,通常能够模拟地表水对地下水的影响,但模拟地下水对地表水的反馈能力较弱。总之,该类模型实现了地表水和地下水运动的松散耦合,主要适用于地形和地质结构较为简单、计算精度要求不高以及研究区域较大的情况,不适用于地表和地下交互作用强烈的情况。

### 1.1.2 顺序迭代耦合模型

该类模型是地表和地下模块分别交替求解,交换量作为源汇项带入求解过程,不断迭代直至收敛。比较典型的模型有CATHY<sup>[25]</sup>、OGS<sup>[26]</sup>和GSFLOW<sup>[16]</sup>等模型。

CATHY模型将地表径流概化为基于流路的一维运动,非饱和带和饱和带统一使用三维变饱和Richards方程建模,地表和地下模块交替求解,地表和地下之间的交换量作为源汇项带入求解过程中,地表和地下时间步长不一致的问题通过重复计算地下模块来解决<sup>[27]</sup>,实现了地表和地下水运动交互作用的模拟,但地表水运动模拟相对简单。OGS是一个基于物理和集成的热-水-化学多过程耦合模型,利用二维扩散波方程模拟地表径流,利用Richards方程或两相流耦合方程计算非饱和带水流,利用有限元方法求解地下水方程<sup>[15]</sup>。地表和非饱和带的耦合采用隐式耦合方法,先求解地表水流再求解非饱和带,直至压力值收敛,

非饱和带和饱和带的耦合也采用类似的隐式耦合方法。GSFLOW模型是降水-径流建模系统(PRMS)和地下水流模型MODFLOW的集成,通过PRMS模拟地表径流,通过MODFLOW模拟河流湖泊及地下水的水文过程,地表径流以二维圣维南方程描述,非饱和带水流以Richard方程的运动学波近似来描述,饱和带水流通过三维地下水连续性方程求解,通过PRMS中水文响应单元及MODFLOW中有限差分网格间的水量交换进行耦合<sup>[16]</sup>。

此类模型中地表径流、非饱和带和饱和带模块多为单独求解,再通过相互迭代来实现模块间的耦合,也有模型把非饱和带和饱和带模型直接通过变饱和Richards方程进行耦合(CATHY模型),但地表径流部分还没有进行全耦合。此类模型实现了地表和地下水之间的双向反馈,但大部分模块仍采用一维和二维方程描述,不太适用于地形和地质结构复杂的地区。总之,此类模型在计算复杂度和模型精度之间寻求了平衡,适用于地形简单但地表地下交互作用强烈的情况。

### 1.1.3 全耦合模型

全耦合模型是用全局隐式格式将地表、地下水方程构建统一的微分方程系统,实现了地表、地下水同时求解。比较典型的模型有PIHM<sup>[3]</sup>、ParFlow<sup>[28]</sup>、IRENE<sup>[2]</sup>、HGS (HydroGeoSphere)<sup>[29]</sup>、InHM<sup>[18]</sup>、MODHMS<sup>[19]</sup>、WASH123D<sup>[30]</sup>和SHUD<sup>[21]</sup>等模型。

PIHM模型使用二维圣维南方程描述地表径流,一维圣维南方程描述河道径流,以及基于Richards方程的三维变饱和流方程描述非饱和带和饱和带水流。求解采用有限体积法,将偏微分方程离散化为常微分方程,整个研究区域组合形成一个总常微分方程系统,使用SUNDIALS算法进行求解<sup>[31]</sup>。ParFlow模型地表径流用二维运动波方程描述,利用三维变饱和Richards方程描述非饱和带和饱和带水流,模型利用基于全局隐式的方法在一个时间步骤内求解所有控制方程<sup>[32]</sup>。对于Richards方程的求解,ParFlow在时间上采用隐式后向欧拉式,在空间上采用有限差分方法,以Newton迭代求解线性系统。IRENE模型考虑了地表水体中的三维运动和地下水的三维运动<sup>[2]</sup>,模型以雷诺平均后的三维非稳态Navier Stokes方程描述三维地表水体运动,以地下水连续性方程和达西定律描述三维饱和地下水水流,地表水体采用半隐式格式进行空间离散,地下水采用全隐式格式进行空间离散,两

个控制方程使用有限差分法和Picard迭代方程进行同时求解,地表水和地下水之间的交换速率采用达西定律计算。与MODFLOW相比,IRENE结果更接近解析解<sup>[2]</sup>。HGS使用二维圣维南方程描述地表径流,采用三维变饱和Richards方程模拟非饱和和饱和地下水水流。使用类达西方程以双节点方法模拟交换通量,进而实现地表和地下的水量交换。模型采用有限元法同时求解二维圣维南方程和三维Richards方程<sup>[33]</sup>。InHM模型以圣维南方程描述一维河道水流和二维地表径流,以三维变饱和Richards方程描述非饱和带和饱和带地下水水流,采用类达西方程计算地表和地下通量,通过控制体积有限元方法同时求解地表和地下水运动方程<sup>[34]</sup>。MODHMS模型使用的微分方程和交换水流计算与InHM相同<sup>[19]</sup>,采用有限差分方法对地表和地下水水流进行同时求解<sup>[35]</sup>。WASH123D模型根据连续方程和动量方程得到一维河道水流和二维地表径流方程,以三维变饱和Richards方程描述非饱和及饱和地下水水流,采用伽辽金有限元法求解,将一维河道水流、二维地表径流和三维地下水方程共同求解<sup>[20]</sup>。SHUD模型是对PIHM模型的延续,利用有限体积法进行耦合,地表径流通过二维扩散波求解,非饱和带概化为一维垂向流,通过一维Richards方程描述,饱和带概化为二维流,通过地下水连续方程描述,模型是将偏微分方程简化为常微分方程,并使用全局隐式方法求解来进行耦合<sup>[21]</sup>。

此类模型多采用三维变饱和Richards方程统一描述非饱和带和饱和带的水分运移,并将地表和地下部分的偏微分方程离散为统一的常微分方程进行统一求解,因此可以实现地表和地下的双向反馈。此类模型模拟精度较高,模型结果和解析解差距很小,但计算效率比前两类模型低。随着计算能力的提升,此类模型未来仍有很大的发展空间,是目前地表-地下耦合模型的主流发展方向。

已有研究发现,在模拟地下水位变动较小、非饱和带水流仅垂向运动的案例时,各类模型模拟结果差距很小(5%以内),模拟情况复杂的案例时,模拟结果之间的差距增大,但模型结果仍具有相似的过程<sup>[36]</sup>。综上所述,在进行地表水-地下水模型选择时,应充分考虑研究区情况和研究目标,模拟区域水流情况简单且结果精度要求不高时可以选择前两类模型,以节约建模和计算时间,当区域水流情况复杂且结果精度要求较高时,可以选择全耦合模型。

## 1.2 溶质耦合模型

在地表-地下水量耦合模拟的基础上,部分模型开发了溶质耦合模拟功能。代表模型有HGS<sup>[29]</sup>、PAWS<sup>[37]</sup>、WASH123D<sup>[38]</sup>、BioRT-Flux-PIHM<sup>[39]</sup>模型等。

HGS模型采用二维对流-弥散方程描述溶质在地表水中的运移过程,采用三维对流-弥散方程描述地下水中的溶质运移过程,通过地表水和地下水之间的交换水量计算出溶质的交换通量进行耦合<sup>[29]</sup>。PAWS模型采用二维对流-弥散方程描述地表溶质的运移,一维对流-弥散方程描述河道溶质运移,非饱和带和饱和带分别采用一维和二维对流-弥散方程描述,并采用混合欧拉-拉格朗日方法求解。地表径流和非饱和带间的溶质运移耦合通过互为边界条件以及利用菲克定律实现,非饱和带和饱和带之间溶质的交换通量是补给水量与非饱和带底部的溶质浓度乘积<sup>[37]</sup>。WASH123D模型可耦合一维河道或二维地表径流和三维地下水的溶质运移问题,地表径流与地下水之间的溶质交换量利用溶质梯度计算<sup>[38]</sup>。BioRT-Flux-PIHM模型是将FLUX-Noah(地表模型)、PIHM模型和生物地球化学模型(RT)耦合在一起研究溶质的迁移转化,Flux-PIHM模型计算水量分布和流速<sup>[39]</sup>,BioRT模型使用有限体积法求解对流-弥散方程计算溶质运移,BioRT模型没有模拟地表径流中的溶质运移过程,地表径流所携带的溶质直接进入河道或入渗<sup>[40]</sup>。

地表-地下溶质耦合模型能够模拟溶质在地表、地下之间的交换过程,可以较为准确的预测地表和地下水水质污染状况。但是这些模型目前都更关注溶质运移过程,对溶质反应过程的模拟较为简单。部分模型完全忽略反应过程,另一部分模型只能模拟简单的一阶动力学反应过程。因此现有模型无法准确描述反应性污染物的转化过程,模拟结果存在一定误差。

## 2 地表水-地下水耦合模型的应用

### 2.1 模型在水量预测中的应用

地表-地下耦合模型能够用于模拟和预测土壤水分含量、地下水水位、河流流量、洪水过程及区域水量平衡等问题,可为水资源管理提供科学支撑。

#### 2.1.1 模拟地下水水位变化

耦合模型能够反映水流在地表和地下之间的交换过程,可以较为准确地模拟土壤水分含量及地下水水位变化。SWAT-MODFLOW模型已应用于黑河、海河等流域的地下水水位模拟,反映了不同土地利用、土

壤和人类活动影响下地下水补给量的变化及其对地下水水位的影响<sup>[7,41]</sup>。Spanoudaki等<sup>[2]</sup>利用IRENE模型模拟了均质潜水含水层的地下水水位变化,其结果比MODFLOW模型的结果更为准确。Maxwell和Miller<sup>[17]</sup>将陆面模型CLM(Common Land Model)和ParFlow耦合,模拟预测了Usadievskiy流域的土壤水分含量和地下水水位。

#### 2.1.2 模拟河流和地下水关系

耦合模型可以模拟河流对地下水的补给及地下水向河流的排泄。OGS模型和SWMM模型(地表径流模型)耦合,曾应用于研究乌克兰Poltva流域河流与地下水之间的交换作用<sup>[26]</sup>。GSSHA模型曾应用于美国康涅狄格州的一个小流域,模拟了由超渗产流和蓄满产流机制产生的河流流量以及地下水向河流的排泄,从而确定地表水和地下水对流域总体水量平衡的贡献<sup>[5]</sup>。PAWS模型曾用于美国Grand River流域的水量平衡和地下水水位分析,模拟了不同水文要素对流域地下水水位的影响,还模拟了地下水水向河流的排泄<sup>[12]</sup>。MODHMS模型曾用于模拟澳大利亚的Pioneer Valley地区,研究了河流和含水层的相互作用,模拟了地下水水位及河流流量,并用天然示踪剂氦验证了模拟结果<sup>[35]</sup>。PIHM模型曾用于美国宾夕法尼亚州中部的小流域中,模拟了河流径流和地下水水位变化,并探究了地下水和土壤水对河流洪峰的影响<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.3 其他应用

耦合模型在水量的预测中还可用于洪水预报、极端天气和潮汐活动对地下水的影响等问题。PIHM模型曾用于模拟希腊Koiliaris河流域的地下水水位,同时进行了洪水风险评估,预测了洪泛区位置和洪水发生的时间<sup>[31]</sup>。WASH123D曾用于模拟了中国台湾地区屏东平原经过极端台风和极端降雨后地下水的补给情况,同时预测了长期人工抽取地下水的影响<sup>[42]</sup>,还对兰阳河流域进行了洪水预报<sup>[43]</sup>。HGS曾被用于模拟河流流量和子流域的实际蒸发蒸腾量<sup>[4]</sup>,和潮汐及风暴潮活动对地下水的影响<sup>[44]</sup>。CATHY模型曾应用在大小从0.0027 km<sup>2</sup>到356 km<sup>2</sup>的六个流域,分析了地形坡度、渗透系数、前期土壤湿度和气象输入对地表地下相互作用的影响<sup>[27]</sup>。

综上所述,地表-地下水量耦合模型主要应用于预测不同条件下地下水水位的变化,重点考虑地下水水位与河流流量的关系,也考虑了其他地表水文过程对地下水水位的影响。这些应用案例说明它是揭示水循环

过程机理的有力工具,在水资源管理的很多方面都有应用价值。但由于模型构建的复杂性,耦合模型在实际工作中的应用仍存在较大的困难,还需要科研人员与管理机构共同合作进行实际应用。

## 2.2 模型在水质预测中的应用

地表-地下耦合模型可以整体研究溶质从地表到地下的运移过程,主要应用于水质预测方面,包括污染物在地下中的分布和变化、地表到地下渗透过程和河流域地下水之间溶质交换等,也可以示踪污染物运动轨迹。

HGS模型曾用于研究韩国海安流域中塑膜覆盖和不同施肥量对 $\text{NO}_3^-$ 淋溶的影响<sup>[8]</sup>,也曾用于模拟垃圾填埋场地下总氮的变化和分布特征<sup>[45]</sup>。CATHY模型曾用于模拟乌克兰切尔诺贝尔地区放射性核素 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{90}\text{Sr}$ 的下渗情况,研究结果表明小的地表洼地是区域内的优先下渗路径<sup>[27]</sup>。PAWS模型曾用于模拟动物粪便中的细菌去向和迁移速率,研究中考虑了细菌的衰减过程,将细菌死亡公式和地表径流、河道径流和非饱和带水流结合进行模拟,确定了研究区上游和下游细菌的主要来源<sup>[37]</sup>。OGS模型曾用于对松花江流域地下水污染情况进行风险评估,同时评估了河流污染对地下水的影 响程度<sup>[46]</sup>。

目前溶质运移耦合模型大多关注污染物在地表和地下的迁移过程,可以将地表和地下污染过程之间的联系反映出来,为污染过程预测和污染事件管理提供了科学依据。但目前耦合模型大部分把污染物视为保守物质,溶质反应过程缺失是目前溶质耦合模型的主要不足。

## 3 结论和展望

地表-地下耦合模型主要分为水量耦合和溶质耦合两大类,水量耦合模型根据耦合方法可分为异步连接耦合、顺序迭代和全耦合模型。耦合模型可以用来模拟土壤水分含量、地下水水位变化、河流和地下水的关系、地表-地下水中溶质的运移等问题,为水资源管理和水污染控制提供理论依据和支撑。

未来地表-地下耦合模型的发展方向包括:

(1)优化求解算法,提高计算性能,实现对水文地质条件复杂流域或超大流域的模拟。全耦合模型是未来的主流发展方向,通过计算性能的提高,可以更好的应用于实际问题,服务于管理需求。

(2)开发用户友好的操作界面。目前各模型的操作界面仍存在复杂度高、用户门槛高等问题,开发基于GIS的用户友好的操作界面可以促进模型的广泛应用。

(3)加强溶质运移过程中反应机理的研究,提高溶质模拟的精度,适用于更多污染物的预测模拟。

(4)实现对土壤优先流、裂隙介质中复杂水流过程的模拟,扩展模型的应用范围。

## 参考文献:

- [1] 雷晓辉,刘柏君,权锦,等.地表水与地下水联动关系研究综述[J].中国农村水利水电,2019(5):1-5,11.
- [2] SPANOUDAKI K, STAMOU A I, NANOU-GIANNAROU A. Development and verification of a 3-D integrated surface water-groundwater model[J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3): 410-427.
- [3] QU Y, DUFFY C J. A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation[J]. Water Resources Research, 2007, 43(8): 1-18.
- [4] HWANG H T, PARK Y J, FREY S K, et al. A simple iterative method for estimating evapotranspiration with integrated surface/subsurface flow models[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 949-959.
- [5] DOWNER C W, OGDEN F L. GSSHA: model to simulate diverse stream flow producing processes[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2004, 9(3): 161-174.
- [6] MA L, HE C, BIAN H, et al. MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: merits, applications, and challenges[J]. Ecological Engineering, 2016, 96: 137-149.
- [7] HUO A, DANG J, SONG J, et al. Simulation modeling for water governance in basins based on surface water and groundwater[J]. Agricultural Water Management, 2016, 174: 22-29.
- [8] RUIDISCH M, BARTSCH S, KETTERING J, et al. The effect of fertilizer best management practices on nitrate leaching in a plastic mulched ridge cultivation system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 169: 21-32.
- [9] LANGERGRABER G, ŠIMŮNEK J. Reactive transport modeling of subsurface flow constructed wetlands using the hydrus wetland module[J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(2): 1-14.
- [10] KIM J, WARNOCK A, IVANOV V Y, et al. Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow[J]. Advances in Water Resources, 2012, 37: 104-126.
- [11] SHEN C, PHANIKUMAR M S. A process-based, distributed hydrologic model based on a large-scale method for surface-subsurface coupling[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(12): 1524-1541.
- [12] NIU J, SHEN C, LI S, et al. Quantifying storage changes in regional Great Lakes watersheds using a coupled subsurface-land surface process model and GRACE, MODIS products[J]. Water Resources Research, 2014, 50(9): 7359-7377.
- [13] ALIYARI F, BAILEY R T, TASDIGHI A, et al. Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 115: 200-210.
- [14] ORLANDINI S, MORETTI G. Determination of surface flow paths from gridded elevation data[J]. Water Resources Research, 2009, 45(3): 1-14.
- [15] PFEIFFER W T, GRAUPNER B, BAUER S. The coupled non-iso-

- thermal, multiphase-multicomponent flow and reactive transport simulator OpenGeoSys - ECLIPSE for porous media gas storage[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20): 1-15.
- [16] MARKSTROM S L, NISWONGER R G, STEVEN REGAN R. GS-FLOW-coupled ground-water and surface-water flow model based on the Integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005)[C]//Section D, Ground-Water/Surface-WaterBook 6, Modeling Techniques. United States Geological Survey, 2008: 1-254.
- [17] MAXWELL R M, MILLER N L. Development of a coupled land surface and groundwater model[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(3): 233-247.
- [18] JONES J P, SUDICKY E A, MCLAREN R G. Application of a fully-integrated surface-subsurface flow model at the watershed-scale: A case study[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): 1-13.
- [19] PANDAY S, HUYAKORN P S. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow[J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(4): 361-382.
- [20] LI Y, YEH G (George), WANIELISTA M P. Modeling Wekiva Springshed, Florida with WASH123D[C]//Miller C T, Pinder G F. *Developments in water science*. Elsevier, 2004, 55: 1441-1452.
- [21] SHU L, ULLRICH P A, DUFFY C J. Solver for Hydrologic Unstructured Domain (SHUD): Numerical modeling of watershed hydrology with the finite volume method[J]. *Hydrology*, 2020.
- [22] IVANOV V Y, VIVONI E R, BRAS R L, et al. Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(11): 1-23.
- [23] BAILEY R T, WIBLE T C, ARABI M, et al. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(23): 4420-4433.
- [24] USMANOV S, MITANI Y, KUSUDA T. An integrated hydrological model for water balance estimation in the Chirchik River Basin, Northern Uzbekistan[J]. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, Scientific Research Publishing, 2016, 5(3): 87-97.
- [25] BIXIO A, GAMBOLATI G, PANICONI C, et al. Modeling ground-water-surface water interactions including effects of morphogenetic depressions in the Chernobyl exclusion zone[J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(2-3): 162-177.
- [26] DELFS J-O, BLUMENSAAT F, WANG W, et al. Coupling hydrogeological with surface runoff model in a Poltva case study in Western Ukraine[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(5): 1439-1457.
- [27] CAMPORESE M, PANICONI C, PUTTI M, et al. Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(2): 1-22.
- [28] KOLLET S J, MAXWELL R M. Integrated surface-groundwater flow modeling: a free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(7): 945-958.
- [29] Aquanty Inc.. HGS 2013, HydroGeoSphere User Manual[Z].
- [30] YEH G, SHIH D, CHENG J C. An integrated media, integrated processes watershed model[J]. *Computers & Fluids*, 2011, 45(1): 2-13.
- [31] YUX, MORAETIS D, NIKOLAIDIS N P, et al. A coupled surface-subsurface hydrologic model to assess groundwater flood risk spatially and temporally[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 114: 129-139.
- [32] MAXWELL R M. A terrain-following grid transform and preconditioner for parallel, large-scale, integrated hydrologic modeling[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 53: 109-117.
- [33] ROSENBOM A E, THERRIEN R, REFGAARD J C, et al. Numerical analysis of water and solute transport in variably-saturated fractured clayey till[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104(1): 137-152.
- [34] VANDERKWAAK J E, LOAGUE K. Hydrologic-Response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(4): 999-1013.
- [35] WERNER A D, GALLAGHER M R, WEEKS S W. Regional-scale, fully coupled modelling of stream-aquifer interaction in a tropical catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3): 497-510.
- [36] MAXWELL R M, PUTTI M, MEYERHOFF S, et al. Surface-subsurface model intercomparison: A first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1531 - 1549.
- [37] NIU J, PHANIKUMAR M S. Modeling watershed-scale solute transport using an integrated, process-based hydrologic model with applications to bacterial fate and transport[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 35-48.
- [38] HUANG G, ZHANG F. WASH123D: A numerical model of flow, thermal transport, and salinity, sediment, and water quality transport in watershed systems of 1-D stream-river network, 2-D overland regime, and 3-D subsurface media[R]. The United States, 2005.
- [39] BAO C, LI L, SHI Y, et al. Understanding watershed hydrogeochemistry: 1. Development of RT-Flux-PIHM[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(3): 2328-2345.
- [40] ZHI W, LI L, DONG W, et al. Distinct Source Water Chemistry Shapes Contrasting Concentration-Discharge Patterns[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(5): 4233-4251.
- [41] 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.
- [42] LIN K-P, CHOU P-C, DONG-SIN S. To study hydrological variabilities by using surface and groundwater coupled model-A case study of PingTung Plain, Taiwan[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 1034-1042.
- [43] LIU P C, SHIH D S, CHOU C, et al. Development of a parallel computing watershed model for flood forecasts[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 1043-1049.
- [44] YANG J, GRAF T, HEROLD M, et al. Modelling the effects of tides and storm surges on coastal aquifers using a coupled surface - subsurface approach[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, 149: 61-75.
- [45] 张将伟, 卢文喜, 陈末, 等. 基于HydroGeoSphere的河谷地区地表水地下水水流水质联合模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2018(1): 29-32.
- [46] NIXDORF E, SUN Y, LIN M, et al. Development and application of a novel method for regional assessment of groundwater contamination risk in the Songhua River Basin[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 605-606: 598-609.

## Research Progress on Surface-Subsurface Hydrologic and Solute Transport Models

PENG Hui<sup>1,2</sup>, SUN Xiaowen<sup>1</sup>, JIANG Zhuqing<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** There are strong interactions between surface and subsurface water. Constructing hydrologic and solute transport models that couple surface and subsurface water can study their interaction and improve the modelling accuracy. The existing surface-subsurface hydrologic and solute transport models were introduced. The solving algorithms and application fields of each model were compared, and the model applications were summarized. Global implicit models have the highest accuracy, which would be the hotspot in the future. Solute reaction simulation is lacking in the current coupled solute transport models. In the future, research should be carried out on the optimization of solving algorithms, solute reaction simulations, and fractured porous medium simulations.

**Keywords:** surface-ground water; coupled model; solute transport model

(上接第6页)

反映下垫面条件的变化上要弱于综合要素法,地形指数法介于两者之间。综合要素法考虑了气候、土壤、植被及地形各要素,估算方法分析合理,推求的子流域参数空间差异更大,水文模拟的结果稍优于其他两种方法,然而计算过程更复杂,在实际应用中应结合流域条件合理选用。

### 参考文献:

- [1] 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [2] BEVEN K J, KIRBY M A. Physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979.
- [3] 姚成. 2007. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京: 河海大学.
- [4] 杨哲, 张行南, 夏达忠. 基于包气带厚度的流域蓄水容量计算及水文模拟[J]. 水力发电学报, 2015, 34 (3): 8-13.
- [5] 夏希. 2008. 基于地理学的流域水文模型参数推求研究[D]. 南京: 河海大学.

- [6] LOCH R J. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38 (38): 299-312.
- [7] 孔凡哲, 芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. 地理研究, 2003(6): 709-715.
- [8] GUSWA A J. The influence of climate on root depth: A carbon cost-benefit analysis[J]. Water Resources Research, 2008, 44 (2).
- [9] LEHMANN P, BICKEL S, WEI, Z, et al. Physical Constraints for Improved Soil Hydraulic Parameter Estimation by Pedotransfer Functions[J]. Water Resources Research, 2020, 56 (4): e2019W-e25963W.
- [10] DONOHUE R J, RODERICK M L, MCVICAR T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436-437: 35-50.
- [11] 姚成, 纪益秋, 李致家, 等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40 (1): 6.
- [12] 童冰星, 李致家, 姚成. 基于 SoilGrids 的栅格新安江模型参数空间分布估算[J]. 水科学进展, 2022.

## Estimating the Thickness of the Air Envelope Based on Subsurface Characteristics and Hydrological Simulation

YAO BOWEI<sup>1,2</sup>, ZHANG XINGNAN<sup>1,2</sup>, FANG YUANHAO<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Security and Water Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the physical significance of the unsaturated zone depth in the Xin'an Jiang model, we estimated the unsaturated zone depth by considering the land cover factor, the topographic slope factor and the soil texture structure factor and the climatic conditions, using the land cover correlation method, the topographic index regression method and the integrated elements method. Accordingly, the free water storage capacity of the model parameter basin was calculated and simulated in the Hengjiang River basin of the lower Jinsha River for comparison. In contrast, the integrated element method can calculate the thickness of the air pocket at a specific spatial scale more accurately, and the model simulation is more effective and suitable for quantitative calculation of model parameters and hydrological simulation in this region.

**Keywords:** Xin'anjiang model; land surface characteristics; unsaturated zone depth; free water storage capacity