

土壤和地下水耦合数值模拟研究进展

殷乐宜, 魏亚强, 陈 坚, 文 一, 李 璐, 牛浩博
(生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 土壤和地下水在水分运移、污染物迁移转化等方面高度相关, 基于数值模拟预测土壤和地下水耦合污染趋势可以为土壤与地下水污染协同防治工作提供量化技术支持。文章综述了土壤和地下水数值模拟方法, 总结了土壤和地下水中水流和溶质运移的耦合数值模拟研究进展, 并对耦合数值模拟研究的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 土壤; 地下水; 运移; 耦合; 数值模拟

中图分类号: X53

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.03.022

Research Progress of Coupled Numerical Simulation of Soil and Groundwater

YIN Leyi, WEI Yaqiang, CHEN Jian, WEN Yi, LI Lu, NIU Haobo
(Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: There is a great correlation between soil and groundwater in terms of the moisture and pollutant migration. The prediction of the coupling pollution trend of soil and groundwater based on numerical simulation can provide a quantitative technical support for the pollutant synergistic control. This paper reviewed the numerical simulation methods of the soil and groundwater, summarized the research progress of the coupled numerical simulation of flow and solute migration in the soil and groundwater system. And the development direction of the coupled numerical simulation in the future was proposed.

Keywords: Soil; Groundwater; Migration; Coupled Modeling; Numerical Simulation

CLC number: X53

近年来,土壤及地下水污染事件频发,其污染问题逐渐受到重视。土壤和地下水污染具有隐蔽性和滞后性,除了传统土壤和地下水采样分析,数值模拟方法是定量刻画土壤和地下水中污染物的运移的主要手段。通过数值模拟方法可以科学、可靠地预测土壤和地下水污染趋势,为污染防治工作提供技术支持。

目前,土壤和地下水数值模拟研究分别形成成熟的研究方法和配套软件,取得了大量研究成果,在工程实践中广为运用。但已有研究大多数仅考虑单独介质开展数值模拟研究,少有研究将土壤和地下水作为一个整体看待。大量研究表明,土壤和地下水两者联系紧密,地表污染源通常在淋滤作用下通过土壤进而污染地下水含水层,土壤污染极易导致地下水污染,但土壤和地下水耦合数值模拟研究进展缓慢,对土壤和地下水交界面的污染物运移

情况尚未摸清。本文对现有土壤和地下水水流及污染物运移的耦合模拟进展进行总结,旨在为进一步开展相关研究提供科学依据,为我国早日实现土壤与地下水污染协同防治奠定理论科学基础。

1 土壤和地下水数值模拟方法

开展土壤和地下水数值模拟目的在于预测水流及污染物运移趋势,为提出相应的防控治理措施提供定量依据。数值模拟的基本步骤是构建水文地质概念模型、建立数学模型,通过解析解或数值方法求解描述水流及污染物状态的偏微分方程,常用的数值求解方法为有限差分法、有限单元法、边界元法等,计算机模拟软件的发展也使大规模数值处理成为可能^[1]。目前,土壤和地下水中水流与污染物迁移预测模拟方法不同,大部分研究是分别基于两套模拟预测系统开展的。而我国土壤和地下水

收稿日期: 2019-10-08

基金项目: 国家重点研发计划资助; 场地土壤与地下水污染评估与风险预测方法研究(2018YFC1800204)

作者简介: 殷乐宜(1994-),女,硕士。研究方向: 地下水污染防治政策与地下水修复。E-mail: yinly@caep.org.cn

通信作者: 魏亚强(1990-),男,博士、助理研究员。研究方向: 地下水模拟预测与地下水修复。E-mail: weiyang0000@126.com

引用格式: 殷乐宜,魏亚强,陈 坚,等. 土壤和地下水耦合数值模拟研究进展[J]. 环境保护科学, 2020, 46(3): 127-131.

模拟预测研究基础薄弱,受整体技术水平发展滞后和基础资料不完善的影响,针对土壤与地下水污染评估与风险预测相关研究,主要集中在基于采样结果的土壤或地下水现状评估,尚未建立基于模拟预测结果的动态风险预测系统。

1.1 土壤水分和污染物运移数值模拟

非饱和水流和溶质运移研究是土壤水分和污染物运移的基础研究内容。在达西定律的基础上,1907年 Buckingham 考虑土壤基质势、含水量等因素,修正达西定律得到白金汉-达西定律;通过将白金汉-达西定律带入连续方程可以得到 Richards 方程^[2]。目前,土壤非饱和带模拟预测主要是基于 Richards 方程构建水流模型和对流-弥散方程构建的溶质运移模型开展研究^[2-3],而 Hydrus 系列软件是非饱和带水流和溶质运移的主要模拟工具,方程求解采用伽辽金线性有限元法,综合考虑了非饱和带中植物根茎吸收、溶质在液态下的对流-弥散现象和气态下的扩散现象、固液态和气液态转化、合成和降解等情况^[4]。徐丽萍等^[5]对室内有机玻璃箱滴灌条件下土壤水分运动进行了模拟,证明 Hydrus 能够以较高的精度模拟土壤水分运移。杨洋等^[6]利用 HYDRUS-1D 模拟垃圾填埋场渗滤液中的氨氮在不同包气带结构和不同污染源特征下的迁移转化规律,预测场地污染物污染程度。

大量研究证明土壤固体颗粒的吸附解析作用对溶质运移产生影响。彭盼盼等^[7]在对天津市某区域未来 30 年污染物六价铬在浅层土壤中运移规律进行数值模拟和分析预测,发现在降雨入渗淋洗和土壤颗粒吸附作用下,土壤中六价铬含量将处于较低状态,不造成污染。尹芝华等^[8]则利用 HYDRUS-2D 软件构建土壤水分运动和溶质运移模型,模拟三氮在该场地非饱和带垂向以及向下游地表水体的迁移转化过程,发现非饱和带介质是氮污染负荷的有效缓冲区,但对硝态氮的吸附能力相对较弱,因此硝态氮为主要污染物。

除 HYDRUS 外,还有 SWAP、COMSOL 等成熟商业软件可用于模拟非饱和带水流和溶质运移。总体来看,单独针对土壤介质的水流和溶质运移研究已较为成熟,商用软件可以涵盖运移过程中可能发生各种反应,取得了大量研究结果。

1.2 地下水渗流和污染物运移数值模拟

在现阶段地下水污染模拟预测模型的研究中,利用达西定律、质量守恒方程和水流连续性方程建立地

下水水流模型、利用溶质运移理论构建地下水污染预测模型,是地下水模拟研究人员使用的主要方式。

美国材料与试验协会(ASTM)在地下水模拟预测的不同阶段制定了行业系列标准^[9-11],如《场地问题地下水水流模拟应用标准指南》(ASTM D5447-04(2010))《地下水水流与溶质运移建模标准指南》(ASTM D5880-95(2006))《污染场地概念模型创建标准指南》(ASTM E1689-95(2008))等。英国环保署对地下水模拟预测工作制定了不同尺度的规范,分别颁布了针对大尺度地下水模拟的《地下水资源模拟指南》(2002)^[12]、针对污染场地和污染物迁移模拟制定的《概念模型创建及数学模型选择与应用实用指南》(2001)^[13]等。中国也于 2014 年发布《地下水污染模拟预测评估工作指南》,奠定了我国地下水污染模拟预测评估工作的基础。地下水模拟预测行业制度要求严,标准高,未来该学科的研究将逐渐细分,并呈现多学科融合的趋势。

目前最广为运用的三维地下水水流模拟软件是 MODFLOW,采用网格中心点有限差分法求解,可以模拟各种条件下水流在地下含水层中的运动,同时允许用户开发外部程序强化主程序功能^[14-15]。在 MODFLOW 模型基础上,综合三维地下水溶质运移数值模拟软件 MT3DMS 等开发的 Visual MODFLOW 可模拟地下水中水流和污染物的物理迁移和化学反应过程,展现三维可视化地下水水流模型^[1,10]。魏亚强等^[16]采用 MODFLOW 中的 SEAWAT 模块,对压裂液突破页岩储层以多点状同时进入地层的情形进行了变密度流的模拟,并分析了不同渗漏点与断层底部距离、不同断层倾角对压裂液运移的影响。陈喜等^[17]用 MODFLOW 和水平衡模型对美国某地区地下水位进行了模拟,并分析了含水层补排水量,河流与地下水补排关系以及区域水平衡过程,揭示了独特沙丘地形和土壤特性对地下水补排量的影响。克热木·阿布都米吉提等^[18]模拟某垃圾填埋场在无控制措施、防渗墙和抽水井单独及同时运用时的地下水渗滤液运移过程,给出抽水井和防渗墙最佳布设方位建议。饶磊等^[19]利用 Visual MODFLOW 建立地下水水流概念模型,以化学需氧量(COD)和氨氮质量浓度做为污染物运移模拟研究的主要指标,对污水处理站发生泄漏后进入地下水中的主要污染物进行溶质运移模拟,发现 7 300 d 后污染物将进入长江。但 MODFLOW 不考虑非饱和带模拟预测,无法准确表现饱和带与非饱和带的水流运动关系^[20]。

除 MODFLOW 之外,常用的软件平台还有 Feflow、GMS、Visual Groundwater 等^[1]。GMS 综合 Modflow、MT3DMS、Modpath 等软件主要计算模块和 PEST、UCODE、MAP 等辅助模块,功能齐全,可以概念化建立水文地质概念模型,前、后处理功能更强大,能用来模拟绝大部分地下水水流和溶质运移^[21]。

2 耦合数值模拟研究进展

随着将土壤和地下水作为一个整体看待的意识增强,关于土壤和地下水耦合模拟的研究成为近年来的热门话题,截止目前,针对土壤和地下水中水流运动耦合方法研究较多,而污染物运移研究还处于初步阶段。

2.1 水流耦合数值模拟

针对土壤和地下水中水流运动的耦合方法研究大多关注地下水埋深和入渗补给关系。孟宪萌^[22]分别对河流和地下水建模,通过动态水量交换机制实现耦合,对地块进行水均衡分析。韩双平等^[23]通过人为控制潜水埋深开展农作物实验,发现包气带-潜水系统水分转化率均衡临界深度对土壤水-潜水转化系统起主导作用,进而决定了土壤水和潜水对农作物需水的调节作用。牛赟等^[24]分析降水-土壤水和地下水相关性,构建回归模型,表明 5 cm 土壤体含水量和地下水埋深高度相关。邓洁等^[25]则总结了河渠与地下水相互转化耦合模型研究进展,分析了国外典型数值模拟软件在模拟河渠与地下水相互转化的特点。

综上,已有水流模拟数值耦合方法研究主要关注水分在包气带和潜水带中的水分运移转化关系以及地下水埋深在两个系统中的同步性,模拟耦合过程中需要考虑的参数包括土壤含水量、渗透系数、潜水埋深、水流量等。

2.2 污染物运移耦合数值模拟

虽然关于水流在包气带和潜水带之间运动的模拟研究已较为成熟,但对于其中的污染物运移研究还处于初步阶段,相关研究主要集中于表明土壤和地下水对污染物的运移存在耦合作用,目前常见于国外文献,国内较少见。KEESSTRA et al^[26]通过大量案例表明土壤优先流(指土壤在整个入流边界上接受补给,但水分和溶质绕过土壤基质,只通过少部分土壤体的快速运移)中溶解的污染物对地下水有显著影响,同时土壤也对可能迁移至地下水的污染物起到过滤和缓冲作用,但土壤污染物迁移模型有待进一步研究。曾献奎^[27]构建凌海市地下水-地表水耦合数值

模拟,基于 HydroGeoSphere 进行求解,分析总氮迁移规律。ARIAS-ESTEVEZ et al^[28]指出污染物从土壤迁移至地下水主要是由于土壤优先流和胶态共输的作用,土壤和污染物的理化性质均对迁移速率起到重要作用,但目前地下水脆弱性仅考虑了土壤而未考虑污染物类型,对土壤和地下水的关联关系考虑不充分。WANG et al^[29]发现天然有机物(NOM)对土壤中砷元素的移动性有重要影响,进而影响地下水砷污染的可能性。HOSSAIN et al^[30]通过大数据挖掘,运用二分树法构建土壤理化性质与地下水砷污染浓度关系模型,较准确的预测了孟加拉国地下水砷浓度分布。

土壤和地下水中污染物运移模拟大多数还停留在定性研究上,有待进一步开展针对包气带和潜水带渗透系数、理化性质等差异及其对土壤水中污染物在迁移进入地下水过程中的过滤、缓冲、稀释和转化作用的影响的定量研究。模拟耦合过程中需要考虑的参数包括土壤和污染物理化性质、污染物浓度等,特别应注意在介质交界面上参数的瞬时变化对污染物迁移路径和性质的影响。

2.3 HYDRUS for MODFLOW 的发展

目前已有部分软件可以针对土壤和地下水开展水流和溶质运移耦合数值模拟。Feflow 采用有限元法进行非稳定水流和污染物运移三维模拟,对非承压含水层采用变动上边界的办法,根据水文地质条件生成有限单元网格,视具体情况定义所有边界条件及其限制条件、渗透系数、补排量等为常数或者变量,可用于模拟饱和带和非饱和带地下水流场变化和污染物在地下水中的迁移过程及其时间空间分布模式^[31]。SUTRA 是用于饱和带或非饱和带水流、溶质和能量运移的三维专业模型,广泛应用于模拟海水入侵过程^[1]。下面主要以 HYDRUS Package for MODFLOW(以下称 HPM)为例介绍土壤和地下水耦合模拟过程。

HPM 是较成熟的土壤和地下水中水流和溶质运移模拟耦合模块,由 BEEGUM et al^[32]自 2007 年起研发,于 2008 年正式向大众开放下载应用,并于 2018 年更新。张旭洋等^[33]结合 HPM 软件和 GIS 技术,构建大沽河流域土壤水和地下水耦合模型,较好地预测了土壤水和地下水的时空变化状况和地下水补给量。

HPM 将非饱和带 Hydrus 模块与饱和带 MODFLOW 模型关联,在 MODFLOW 中,整个区域被分为若干个单元格,整个模拟周期被分为若干

个时段,在每个时段内,单元格遭受的外界影响被假设是恒定的^[34]。HYDRUS 则采用不同的分段方法,通常分段时长小于 MODFLOW^[32]。考虑耦合过程, HYDRUS 将 MODFLOW 上一个时段计算得到的地下水埋深值 H 作为下个时段的底部边界条件,而 Modflow 则将 Hydrus 该时段计算得到的底部渗流量作为下个时段的补给量。模型流程见图 1^[33]。

该耦合方法的缺陷在于它假设每个 MODFLOW 时段土壤剖面底部水头压力是恒定的,忽略了时段中水流通过包气带到达饱和带带来的水头变化,可能导致土壤剖面底部产生突然的水流量,使总通量计算结果不准确^[32]。这个缺陷可以通过调整水头高度算

法改善,新算法下的水头高度剖面示意图见图 2。

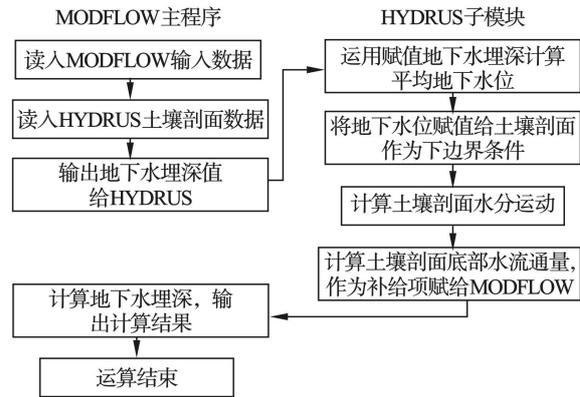


图 1 HYDRUS Package for MODFLOW 单个步长内计算流程图

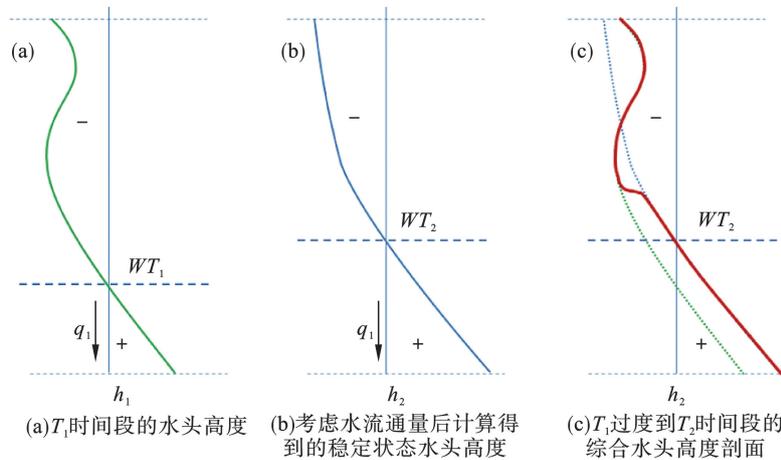


图 2 新算法下的水头高度剖面示意图

2018 年, HPM 升级到可模拟包气带和潜水带中污染物溶质运移。耦合过程中, HYDRUS 模拟包气带中的水流和溶质运移情况, 计算得到的土壤底部水流和溶质浓度通量被分别作为 Modflow 的地下水补给量和 MT3DMS 的入渗浓度^[34]。但该模型对污染物在土壤和地下水界面的转换、过滤、稀释和缓冲关系未予考虑, 有待进一步研究。

2.4 拓展耦合数值模拟

除了对水流和污染物溶质运移进行耦合模拟, 已有研究和软件关注土壤和地下水耦合过程中热、压力等其他性质的变化和对水循环系统的影响以提高系统模拟精度。GSFLOW 在 MODFLOW 的基础上, 考虑天气、用地、补给等因素, 可以综合模拟地下水和地表水径流。Parflow 是伯克利劳伦斯实验室开发的地球水循环系统模拟预测软件, 集成地下水和地表水、生态水, 考虑水流与土壤、大气之间的联系, 通过将陆面-底层包气带模型替换为地下水-顶层包气带模型耦合通用陆面模型(Common Land Model, 土壤含水量单位时间变化率考虑光

照、温度、水在液态和固态间的转化率、水的密度、蒸发量等)和地下水径流模型, 更加真实地模拟了地球水活动^[35]。MAXWELL et al^[35] 运用 Parflow 对比了耦合条件和非耦合条件下对某场地降雨量、径流量、热通量和蒸发量的模拟结果, 发现耦合模型预测结果更加准确。这些拓展性质及参数对土壤和地下水系统的影响应在耦合过程给予适当的考虑, 同时在数值模拟的过程当中应考虑流场、浓度场、温度场、应力场等多场耦合的复杂交互作用。

3 结论和发展趋势

目前对于土壤和地下水的数值预测模拟研究均过于独立, 耦合系统研究大多关注水分运移, 也考虑了土壤和地下水污染的同步性, 关于污染物在土壤和地下水交界面的迁移转化研究较少, 未建立成熟的土壤和地下水耦合数值模拟方法。当下我国土壤和地下水存在大量同步污染的情景, 在土壤和地下水污染协同防治的新时代管理模式的背景下, 对二者的耦合研究显得尤为重要, 本文对土壤和地下水

耦合数值模拟研究的发展方向进行了展望。

1) 将数值模拟与大数据结合, 利用统计学方法和人工智能技术确定不同类型场地土壤和地下水污染的关键参数, 并分析关键参数对污染物空间分布规律的影响, 剖析不同类型土壤和地下水污染中污染物的分布情况, 探索污染物在土壤和地下水中分布的一致性和差异性, 有助于进一步明确耦合作用关系。

2) 在现有耦合方法的基础上, 进一步分析土壤和地下水渗透系数、理化性质等差异对水流和溶质运移的影响, 考虑耦合过程中污染物在包气带和潜水带交界面上复杂的输移转化关系, 更精细地描绘污染物在运移过程中的浓度和路径变化, 提高土壤和地下水耦合水流和溶质运移方法的准确性。

3) 完善土壤和地下水耦合数值模拟系统。随着土壤和地下水耦合方法研究的进展, 完善污染物在土壤和地下水耦合系统中的迁移模型, 考虑整个土壤-地下水系统的输入-响应关系, 整合现有模拟软件的部分功能, 开发土壤-地下水耦合数值预测模拟系统, 实现水流和溶质在土壤-地下水系统中的全路径动态模拟, 同时配合污染评估和风险预测模块, 形成基于模拟预测结果的动态污染评估和风险预测系统。

参考文献

- 王浩, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 1-12.
- 陈晓冰, 李阳芳. 土壤水分运动方程与参数研究进展[J]. 现代农业科技, 2011(20): 265-268.
- DAM J C V, FEDDES R A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 233(1/4): 72-85.
- NEGM A M, ELTARABILY M. G. A. Modeling of fertilizer transport through soil, case study: Nile Delta[M]. The Handbook of Environmental Chemistry: Springer, 2016.
- 徐丽萍, 张朝晖. 基于 HYDRUS-1D 的滴灌土壤水分运移数值模拟[J]. 节水灌溉, 2019(2): 64-67.
- 杨洋, 李娟, 李鸣晓, 等. HYDRUS-1D 软件在地下水污染源强定量评价中的应用[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5293-5298.
- 彭盼盼, 伍靖伟, 刘聪, 等. 基于数值模拟的土壤重金属铬污染预测分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 196-200.
- 尹芝华, 杜青青, 翟远征, 等. 利用 HYDRUS-2D 软件模拟污染事故后三氮污染物的迁移转化规律[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(10): 1071-1076.
- Standard guide for application of a groundwater flow model to a site-specific problem: ASTM: D5447-04: 2010[S/OL]. [2020-05-13]. <https://www.astm.org/Standards/D5447.htm>.
- Standard guide for subsurface flow and transport modeling: ASTM D5880-95: 2006[S/OL]. [2020-05-13]. <https://www.astm.org/Standards/D5880.htm>.
- Standard guide for developing conceptual site models for contaminated sites: ASTM E1689-95: 2014[S/OL]. [2020-05-13]. <https://www.astm.org/Standards/E1680.htm>.
- Environment Agency, UK. Groundwater resources modelling: guidance notes and template project brief[S/OL]. [2020-05-26]. <https://products.ihf.com/Ohsis-SEO/673275.html>.
- National groundwater & contaminated land centre. Guide to good practice for the development of conceptual models and the selection and application of mathematical models of contaminant transport processes in the subsurface[S/OL]. [2020-05-26]. <https://www.sepa.org.uk/media/147777/csm-guidance-from-ea.pdf>.
- 林坊. 大区域地下水流模拟研究及 FEFLOW 的建模方法[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- Waterloo Hydrogeologic. Visual MODFLOW Flex 6.1[EB/OL]. [2020-5-26]. <https://www.waterloohydrogeologic.com/help/vmod-flex/>.
- 魏亚强, 董艳辉, 李国敏. 断层对压裂液运移影响的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 117-123.
- 陈喜, 陈淘洪. 美国 Sand Hills 地区地下水数值模拟及水量平衡分析[J]. 水科学进展, 2004(1): 94-99.
- 克热木·阿布都米吉提, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 某垃圾填埋场地下水污染运移预测及控制方案模拟[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 46-49.
- 饶磊, 魏兴萍, 刘迅. 基于 Visual Modflow 的重庆某工业园区地下水污染物运移模拟[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 35(5): 72-78.
- 查元源, 朱焱, 杨金忠. 基于改进积分型 Richards 方程的区域地下水饱和-非饱和水流耦合模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 107-115.
- 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质, 2003(5): 53-55.
- 孟宪萌. 济宁市地表河流与地下水流耦合模拟与预测模型[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- 韩双平, 荆恩春, 王新忠, 等. 种植条件下土壤水与地下水相互转化研究[J]. 水文, 2005, 25(2): 9-14.
- 牛赞, 刘建海, 张虎, 等. 黑河中游绿洲荒漠过渡带降水-土壤水-地下水相关性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 59-64.
- 邓洁, 魏加华, 邵景力. 河渠与地下水相互转化耦合模型研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2008(2): 75-79.
- KEESSTRA S D, GEISSEN V, MOSSE K, et al. Soil as a filter for groundwater quality[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4(5): 507-516.
- 曾献奎. 基于 HydroGeoSphere 的凌海市大、小凌河扇地地下水-地表水耦合数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- ARIAS-ESTEVEZ M, LOPEZPERIAGO E, MARTINEZCARBALLO E, et al. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 123(4): 247-260.
- WANG S, MULLIGAN C N. Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater[J]. Environ Geochem Health, 2006, 28(3): 197-214.
- HOSSAIN M M, PIANTANAKULCHAI M. Groundwater arsenic contamination risk prediction using GIS and classification tree method[J]. Engineering Geology, 2013, 156: 37-45.
- 贺国平, 邵景力, 崔亚莉, 等. FEFLOW 在地下水流模拟方面的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003(4): 356-361.
- BEEGUM S, SIMŮNEK J, SZYMKIEWICZ A, et al. Updating the coupling algorithm between HYDRUS and MODFLOW in the HYDRUS package for MODFLOW[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-8.
- 张旭洋, 林青, 黄修东, 等. 大沽河流域土壤水-地下水流耦合模拟及补给量估算[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 101-113.
- BEEGUM S, SIMŮNEK J, SZYMKIEWICZ A, et al. Implementation of solute transport in the vadose zone into the "HYDRUS package for MODFLOW"[J]. Ground Water, 2019, 57(3): 392-408.
- MAXWELL R M, MILLER N L. Development of a coupled land surface and groundwater model[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(3): 233-247.