

地下水数值模拟研究与应用进展

李凡¹, 李家科¹, 马越², 李怀恩¹, 姬国强², 袁萌²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设有限公司海绵城市技术中心, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 工农业的快速发展,使得大量污染物随着降雨径流入渗入地下水,对地下水资源产生了严重威胁。由于对地下水污染物的实时监测具有一定难度和较高的经济成本,地下水模拟软件应运而生。系统分析了 GMS、FE-FLOW、Visual MODFLOW、Visual groundwater、MT3DMS、TOUGH2 等地下水模拟软件的结构、模型求解方法、功能及优缺点等,总结了软件在水流、地下水水位和污染物运移数值模拟的应用进展。最后,进行了展望,提出地下水数值模拟软件与 3S 技术集成、与人工神经网络等系统预测方法结合、气候变化模型与多相模型及地表水-地下水模型等耦合开发以及结构优化等发展趋势。以期为地下水动力学和污染物运移模拟及海绵城市建设提供参考。

关键词: 地下水; 污染物运移; 模拟软件; 数值模拟; 发展趋势

中图分类号:TV138

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)01-0099-06

The research and application progress of numerical simulation on groundwater

LI Fan¹, LI Jiake¹, MA Yue², LI Huaen¹, JI Guoqiang², YUAN Meng²

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of

Technology, Xi'an 710048, China; 2. The Technology Research Center for Sponge City, Fengxi New City

Development and Construction Group Co., Ltd. of Shaanxi Xixian New Area, Xianyang 712000, China)

Abstract: A large number of pollutants infiltrate into the groundwater with the rainfall runoff due to the rapid development of industry and agriculture. Due to certain difficulty and high economic cost of the real-time monitoring, groundwater simulation software is developed. This paper systematically analyzes the structure, solution methods, function, and advantages and disadvantages of such groundwater simulation software as GMS, FEFLOW, Visual MODFLOW, MT3DMS, and TOUGH2. The numerical simulation application of this software in the field of groundwater flow, water level and migration of pollutants is summarized. Finally, the development trends of the software are put forward, which are the integration with 3S technology, the combination with artificial neural network prediction method, climate change model, multiphase model, the development of the coupling model of surface water-groundwater and the optimization of model structure. This paper can provide supports for the simulation of groundwater hydrodynamic and pollutant transport and the construction of the sponge city in China.

Key words: groundwater; pollutant transport; simulation software; numerical simulation; development tendency

1 研究背景

地下水是人类经济社会发展中不可或缺的物质条件,由于工业化和农业高度集中化的发展,人们通

过垃圾填埋、污水排放、废弃物堆积、施药施肥、有机污染物与石油泄露等方式使大量污染物质渗入到地下水中,对地下水资源产生严重危机^[1-3]。地下水污染已引起了许多国家的重视,为了协调好资源

收稿日期:2017-08-04; 修回日期:2017-08-30

基金项目:陕西省自然科学基金重点项目(2015JZ013); 西咸新区沣西新城海绵城市基础研究项目(2017610002000088)

作者简介:李凡(1994-),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事水资源保护的研究。

通讯作者:李家科(1975-),男,湖北荆门人,博士,教授,博士生导师,主要从事非点源污染与水资源保护研究。

利用与生态环境之间的关系,进行数值模拟研究对保护地下水资源具有一定指导意义。自 20 世纪 60 年代以来,数值模拟开始应用于地下水计算中,地下水数值模拟的理论与方法得到了长足的发展。地下水模拟软件不仅可以解决地下水污染评估、地下水最优管理,还能解决资源开采安全性问题^[4-5]。通过近几十年的研究与发展,国际上已形成了一批极具影响力的地下水模拟软件,如 GMS^[6-7]、FEFLOW^[7-8]、VISUAL MODFLOW^[7-9]、Visual groundwater、MIKE SHE^[10-11]、MT3DMS^[12-14]、TOUGH2^[15]等。国内地下水数值模拟始于 20 世纪 70 年代初,分别是河北保定水文地质工程地质研究所 GWMS1.0 和清华兴达地下水地理信息系统软件^[16]。数值模拟方法方便灵活,适用于各种复杂水文地质条件,已广泛应用于地下水资源预测、水资源环境分析、水流影响评价之中^[17-21]。研究范围包括饱和带、非饱和带和饱和-非饱和带。但不同地下水数值模拟软件的使用条件与应用范围并未明确分析比较。本文主要从地下水模拟软件的功能、模型求解方法、软件的应用发展、存在问题和发展趋势进行综述,以期为我国地下水保护提供参考和依据。

2 地下水模拟软件概述

国际上比较盛行的地下水模拟软件有 GMS、FEFLOW、Visual MODFLOW、Visual Groundwater、MIKE SHE、MT3DMS、TOUGH2 等。地下水模型是模拟软件的核心,即软件的主要模拟功能依赖于模型或模型耦合,目前 MODFLOW、MT3D、PEST、MODPATH、UCODE 等模型已经被国际上很多专业机构和研究学者使用,并运用到具体的地下水模拟软件中,为解决不同水文地质条件提供模型参考。地下水模拟软件常用的两种数值模拟方法是有限差分法和有限单元法,包括使用比较广泛和功能比较强大的基于有限差分法的 GMS 和基于有限单元法的 FEFLOW^[22]。

2.1 地下水模拟软件简介

随着计算机技术的发展,地下水模拟软件发展迅速,目前已经占据地下水系统数值模拟的主要地位。GMS、FEFLOW、Visual MODFLOW、Visual Groundwater、MIKE SHE、MT3DMS、TOUGH2 等软件已越来越成熟地被应用于各类地下水数值模拟中。表 1 从模型的数据输入方式、功能及不足等方面对地下水模拟软件进行分析和比较。

表 1 中不同地下水模拟软件各有其优缺点。

GMS 是由多种模块构成的一款可视化地下水数值模拟软件,版本和功能不断更新与完善,数据处理功能更强,适用范围更广,相较而言优越于其他同类地下水模拟软件。FEFLOW 主要解决复杂的水文地质条件、密度变化流动、热对流等棘手问题,且具有良好的 GIS 数据接口和网格剖分技术,同时加快了建模速率。Visual MODFLOW 相较其他模型而言,可视化功能强大、求解方法简单、适用范围广泛、数值模拟能力出色且三维建模简单。Visual Groundwater 是由 MODFLOW、MT3D 等模块构成的唯一一个用于地下水模拟后处理的三维可视化软件,但是,在国内对其的应用仍需进一步探索。MIKE SHE 主要综合了地下水-地表水模型,涵盖了丰富的水文气候环境,适用于地表水-地下水频换交替及各种尺度空间。HST3D 是一款专门用来模拟热和溶质运移的模型软件。TOUGH2 主要模拟各种不同条件下地下水水流和热运移,其具有程序结构模块化、程序代码公开化、离散方法通用、求解方法高效的特点,为使用和改进此程序提供了很大方便并在多个领域得到广泛应用。

2.2 模型的主要求解方法

地下水模拟软件的主要求解方法包括解析法、数值法和物理模拟法。然而绝大部分数学模型是无法用解析法求解的,数值法是目前求解模型所用的主要方法。常用的数值法主要有有限差分法、有限单元法、积分有限差分法、半解析半数值法和边界元法,地下水数值模型中常采用有限差分法和有限单元法^[25]。表 2 对有限差分法和有限单元法的基本原理、优缺点进行分析比较,以期对相关地下水工作者建立地下水模型提供参考。

上述两种方法的共同特点均是将定解问题转化成简单的代数问题,求出有限点上不同时刻的数值解。有限差分法易于程序的普及和数据文件的规范,缺点是难以处理复杂边界条件下的地下水运动。有限单元法计算过程简单方便,缺点是若输入的结点位置有偏差,则模型出现的错误将很难发现。相较而言,有限单元法的大小和形状可以变化且可以适应不同水头分布情况。但是有限单元法占用计算机的内存大,准备工作及计算工作量均较大^[28]。

3 地下水数值模拟应用进展

地下水模拟软件模拟任务主要有地下水水流模拟、地下水水位模拟、地下水污染物运移模拟等^[17]。Toth(2009)认为,流动的地下水是一种普遍的地质营

力,以自组织的地下水流系统模式,控制着与地下水有关的各种自然现象和自然作用的空间有序分布^[29]。因此,地下水水流对地下水时空分布起着关键性作用。

在干旱条件下,降雨时空分布不均、农业集中发展、过度开采、海绵城市建设等气候与人类活动导致流域地下水循环条件发生明显变化^[30-32],地下水位的波动将直接影响该地区的生态环境。故地下水水流和水位预测在流域地表水和地下水资源的综合管

理中起着重要作用。城市非点源污染、农业非点源污染、垃圾填埋和石油泄漏是地下水污染的主要来源^[33],随着 TOUGH2、FEFLOW、GMS、VISUAL MODFLOW 等地下水模型软件对地下水数值模拟的研究越来越多,伴随地下水水流过程的溶质运移和水质评估等研究也取得了很大的进展。用地下水数值模拟软件研究地下水相关问题,可为研究地下水时空分布、地下水开采以及地下水环境问题、地下水资源的科学评价和合理开发利用提供参考依据。

表 1 地下水模拟软件介绍

软件名称	开发者	数据输入方式	功能	不足	参考文献
GMS	美 国 Brigham Young University 环境模型研究实验室和军工部排水工程实验站	模块数据输入、外部 GIS 数据输入、工具性辅助模块数据输入	综 合 MODFLOW、MODPATH、MTSD、SEEP2D、PEST、UCODE 等地下水模型功能,可进行水动力学运移模拟和水质运移模拟 ;建立三维地层实体 ,进行钻孔数据管理、二维(三维)地质统计;界面可视化和打印二维(三维)模拟结果。	目前 GIS 模块只能应用于稳态数据。	[6-7,23]
FEFLOW	德国 WASY 公司	具备地理信息系统数据接口、基于地图用鼠标设计	用于饱和(非饱和)流场,二维(三维)水流、热、溶质运移模拟。是一款专门从事复杂地下水模拟工程的软件。	补排项无单独子程序包,调参比较麻烦。	[7-8]
Visual MODE- FLOW	加拿大 Waterloo 水文地质公司开发	工具性辅助模块数据输入	在 MODFLOW 模型基础上,综合已有的 MODPATH、MT3D、RT3D 和 Win PEST 等模型开发的综合软件,可以进行水流模拟、溶质运移模拟、反应运移模拟。	无法解决混和并流问题,不适合某些复杂的地质条件、不饱和、密度变化、热对流等问题。	[7-9,23-24]
Visual Groundw- ater	美 国 Environmental Simulation, Inc. 公司	人工输入,也可以由 ASC II 文件	饱和状态水流模拟、溶质运移模拟、实时动画功能,可以将复杂的技术数据以一种能够被任何人所理解的形式展现在公众面前。	目前应用研究不足	
MIKE SHE	丹麦 DHI 国际咨询研究机构	GIS 格式输入,链接原始数据	一维非饱和带,二、三维饱水带水量模拟模型和对流弥散模型、水质模型。	模型建立较难。	[10-11]
HST3D	美国地质调查局	工具性辅助模块数据输入	饱和带地下水热运移模拟,处理地质废物处置、填埋物浸出、盐水入侵、放射性废物、水中地热系统和能量储藏等问题。	模拟的范围只能是规则的矩形区域或圆柱状区。	[12]
MT3DS	C. Zheng(郑春苗)和 P. Wang	工具性辅助模块数据输入	地下水溶质运移,模拟高度非均质裂隙介质中的污染物运移。	只能进行溶质运移模拟。	[12-14]
TOUGH2	美国劳伦斯伯克利实验室	子程序输入数据	模拟各种不同条件下地下水水流和热运移。	模型不易校正。	[15]

表 2 有限差分法与有限单元法的原理及优缺点^[26]

模型求解方法	基本原理	优点	缺点	典型软件
有限差分法	以地下水流基本微分方程及其定解条件为基础,在渗流区剖分基础上,用差商代替微商,将地下水流微分方程的求解转化为差分方程。	(1)物理概念清晰、直观、易懂;(2)算法效率高,运算速度快,占用内存少;(3)对于解决地下水流问题而言,有限差分法的精度比较好;(4)有丰富可借鉴的实践经验;(5)计算程序编制容易。	(1)难以处理不规则或者曲线状含水层边界、各向异性和非均质含水层或者倾斜的岩层等复杂条件;(2)对于溶质运移、热运移等问题,解的精确度不高。	GMS、Visual MODFLOW、Visual Groundwater、MIKE SHE、HST3D、MT3DS、TOUGH2
有限单元法	把计算域划分为有限个互不重叠的单元,在每个单元内通过剖分和插值的方法将描述地下水流动的定解问题转化为微分方程进行离散求解 ^[27] 。	(1)程序有较好的统一性和灵活性;(2)处理地下水流及污染物运移问题的计算过程简单方便且精确度较高。	(1)局部质量不守恒,有时会影响计算精度;(2)计算机所需内存和运算量较大。	GMS、FEFLW、Visual Groundwater

3.1 地下水水流数值模拟

Freeze 等^[34]于 1966 年首次应用稳定流数值模型模拟层状含水层中的区域地下水流系统。Freeze 等^[35]又在 1967 年提出非稳定饱和-非饱和流的数值模型,分析入渗补给量、潜水位上升和河流基流量之间的关系,预测地下水盆地的最大产水量,指出盆地产水量是开采形式、地下水补给和排泄特征的函数。我国对地下水流数值模拟的应用与研究始于 1973 年。近年来,水流数值模拟的研究成果已达到国际先进水平^[36-37]。郝奇琛^[29]在我国典型缺水、水化学组分差异明显的西北盆地区域运用 TOUGH2 建立有限差分数值模型,通过查阅资料和收集文献对程序进行修改和完善,建立水文地质概念模型和网格模型进行地下水流研究并初步研究了楔形淡水体的形成过程。结果表明,地质构造作用对地下水流的影响是不可忽视的。但水溶组分垂直方向具有典型分带性以及深层地质条件认识的缺失造成部分模拟结果出现偏差且并未对模型进行校正。姚怡光等^[38]运用 GMS 在天津滨海新区某人工渗流场通过建立三维有限差分数学模型模拟水流动态,确定水流开采量,并通过实测资料对模型检验与校正。张鑫等^[39]以 GMS 为操作平台对云南文山州某水库地下水水流进行了数值模拟。主要分析水库建设对地下水水流场的影响并合理调整渗透系数对模型进行校正,输出结果较为理想。可见地下水时空分布与地下水水流相互影响,研究地下水水流运动有利于深入了解该区域的水文地质状况,并且地下水流数

值模拟对研究地下水时空分布、水动力场、水风险与资源评价以及参数确定等有重大意义。

3.2 地下水水位模拟

刘建峰等^[40]运用 Visual MODFLOW 软件预测马城铁矿床地下水涌水量,可为排水系统设计提供可靠依据,保障矿场安全。并利用实测资料与地下水位模拟结果进行对比分析和检验,进行模型模拟与识别。赵晓玲等^[41]利用 Visual MODFLOW 在安徽省淮北市城东北境内复杂的第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水为研究的煤炭开采区进行地下水位数值模拟研究,以同时满足人为对煤矿资源的合理开采及地下水资源保护,并利用试估法对模型进行识别校正。徐如超等^[42]采用 Visual MODFLOW 软件构建三维有限差分模型对典型小流域的太湖地区地下水储量进行了动态模拟。模型表明了研究区地表水和地下水交互量关系且为滨湖区地下水潜流计算研究提供依据,并通过实测资料验证模拟结果的可靠性。但并未考虑由于地下水-地表水的频繁转换带来的水力联系密切问题。魏光辉^[43]在缺乏水文地质资料的新疆库尔勒市境内的希尼尔水库采用人工神经网络模型进行地下水位动态变化模拟。结果表明,遗传训练算法可以预测研究区的地下水位。因此,地下水位数值模拟有利于地下水资源的可持续管理。以上表明,地下水模型不仅可以预测大区域地下水资源、煤炭及矿产开采区,也可以预测小区域地下水与地表水交互频繁区域的水位变化,为水资源的合理开发利用及长期地下水资源管理提

供定量依据。同时,在水文地质参数缺乏的地区除不断改进勘测技术外也可应用人工神经网络技术等系统预测方法或进一步集成3S技术进行地下水水位预测。

3.3 地下水污染物运移模拟

从20世纪70年代开始,地下水污染物运移数值模拟有了系统性发展。但不足之处在于面对不同模拟对象时需使用不同形式的模型和计算方法,缺乏统一性^[44]。国外学者 Hsieh 等^[45]运用 GMS 建立有限单元数值模型,模拟了美国南卡罗莱纳州的 Savannah River 原子能基地地下水污染物运移,并与野外实地观测资料进行对比分析与模型验证,为当地地下水污染防治提供科学依据。但未考虑不同污染物之间的相互作用,使模拟结果不够准确。Vallner 等^[46]在爱沙尼亚 Kohtla-Järve 油页岩区废弃物垃圾填埋场建立了概念模型,通过污染物运移数值模拟,以三维可视化立体角度显示了地下真实的含水层,降低了地下水环境污染风险,优化了地下水资源管理,并且在模拟过程中考虑了水动力场与水化学场的双向耦合作用,有利于解决实际问题。郑玉虎等^[47]运用 GMS 考虑了土壤吸附作用研究地下水污染物运移状况,主要模拟 COD 和氨氮在地下水中的运移过程。模拟结果良好,但在模拟的过程并未考虑不同溶质之间的相互作用。钱伟等^[48]运用 Visual modflow 对金属矿山开发进行地下水三维溶质运移模拟,预测了有、无防渗条件下的氨氮浓度场,并利用实测浓度与计算浓度相拟合来验证模型,该方法对于多种污染浓度场的模拟能有效识别不同污染场的水质状况,便于采取不同方式改善水质问题。钱程等^[49]运用 GMS 对西北某气田开发区地下石油储罐破裂泄漏场地进行了水质数值模拟以用来研究石油泄漏对水质浓度及扩散范围的影响,但并未进行动态观测数据的耦合,模型不易验证。高小文等^[50]运用 Visual modflow 对小型铜矿尾矿库进行地下水溶质运移模拟,确定污染物的影响范围及运移距离。目前,地下水模拟软件对于重金属场、垃圾填埋场和石油泄漏场库等污染场普遍适用,通过预测污染物浓度变化趋势及污染扩散范围,能为防治地下水被渗滤液污染及地下水环境影响评价提供科学依据。

4 存在问题

从理论方面来讲,地下水模型对于地下水问题均能给出比较精确的解。然而随着研究的不断深入,在信息获取、信息预测、模型应用与模型操作等

方面出现了许多新的科学问题。概括而言,地下水模拟软件存在以下4方面的问题。

(1)地下水模型与实际观测、3S、环境同位素等技术的集成不够紧密,地下水模型在水文地质领域的应用研究应加强与GIS及分布式水文模型网络GIS技术集成研究的应用,这是今后地下水模型在地下水水资源综合管理和水文地质领域的重点研究方向^[51-52]。

(2)应用模型时,由于水文地质资料不够充足,很难定义模型边界,人为定义边界时容易造成模拟结果出现偏差且实际应用中的介质特性以及水流和溶质运动过程极其复杂,溶质迁移模拟中对过程和机理的分析研究不够细化,很难考虑到水动力场和水化学场相互耦合作用产生的影响。

(3)过多重视模拟化结果。随着人们对软件的依赖性增强而忽略理论研究,弱化了对实际地质条件的研究。

(4)模型的理论是复杂的,但操作应尽量做到简单、灵活、便于理解和掌握。

5 结论与展望

国际上应用地下水数值模型解决实际地下水问题迄今约有30多年时间,从大、小区域地下水数值模拟到目前对盆地级复杂地下水系统的研究,该领域取得了非凡的科学成就。一方面,各种信息获取技术和水资源信息预测技术得到长足发展,极大提高了人们对更大尺度、更深层次地下水运动规律的认知能力;另一方面,不断涌现出新的地下水模拟问题对现有技术提出了挑战。从目前存在的问题与发展动向来看,地下水数值模拟将有以下发展趋势。

(1)信息获取。除了不断改进勘测技术外可进一步集成系统预测的理论与方法或3S技术获取水文地质信息,优化网络GIS技术,提高模型精度。

(2)模型耦合开发。综合考虑人类活动与土地利用、环境气候因素和水热特征参数,中湿热耦合作用模型、气候变化模拟预测与典型流域水文水质相应研究、分布式水文模型和物理模型与地下水数值模型相耦合、信息系统和地下水流数值模型相耦合、随机-模糊模型与地下水数值模型相耦合、地表水与地下水多模型相耦合等耦合模型的开发将有利于研究地下水水流状况。

(3)进一步加强地下水地球化学与地球物理勘探技术。将数学、化学、地质、地球物理模型联系起来,建立多种地球物理勘探方法,更好刻画地层结构。

(4) 模型结构优化。在不占用内存条件下,扩充软件的模型组成,使功能更完备、更强大或留有调用外部程序接口以弥补自身不足以及增加 GPU 提高模拟计算效率,是未来模型发展的一大方向。

参考文献:

- [1] 屈永清,陈建信,任书影.我国地下水污染现状与防治对策[J].西部资源,2016(4):125-126.
- [2] 王凤瑞,王玉智.沧州市地下水污染现状分析及防治对策探析[J].地下水,2017,39(1):59-61.
- [3] 刘姝媛,王红旗.某水源地地下水中石油烃分布特征研究[J].环境科学与技术,2016,39(S2):418-421.
- [4] 雷洁宇,莫辉艳,潘晓雯,等.常用地下水模拟软件的特点及在我国的应用[J].南方农机,2017(14):115-116.
- [5] 李广来,倪艳芳,孙宏亮等.典型案例地下水污染模拟预测评估[J].环境科学与管理,2017,42(7):16-18.
- [6] 刚什婷,邓英尔.基于GMS在地下水资源评价与管理中的应用综述[J].地下水,2015,37(2):33-36.
- [7] 孙丽凤,王闯.基于GMS应用的化工区地下水污染模拟与分析[J].科技导报,2016,34(18):176-181.
- [8] 李晖,李士锦.浅析Feflow在煤矿地下水预测中的应用[J].中国煤炭工业,2016(6):56-57.
- [9] SINGH R M, SHNKLA P. Groundwater system simulation and management using visual MODFLOW and Arc-SWAT[J]. Journal of Water Resources and Hydraulic Engineering, 2016, 5(1): 29-35.
- [10] 田开迪,沈冰,贾宪. MIKE SHE 模型在瀾河径流模拟中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 92-95.
- [11] 姜凌峰,薛联青,刘远洪,等.基于MIKE SHE模型的干旱区节水灌溉对地下水水位的影响研究[J].灌溉排水学报,2016,35(2):59-65.
- [12] 赵静,闫振鹏,崔亚莉等. HST3D 程序及其在热运移模拟方面的实际应用[J]. 资源与产业, 2009, 11(4): 137-140.
- [13] 朱玉水,段存俊. MT3D-通用的三维地下水污染物运移数值模型[J]. 东华理工学报, 2005, 28(1): 26-29.
- [14] 周义朋,孙占学,马新林等. MT3DMS 中混合欧拉-拉格朗日数值解法分析[J]. 水文, 2006, 26(6): 39-41.
- [15] 陈卓,杨瑞琰,胡志高. 基于TOUGH2模拟CO₂地质封存对地层温度的影响[J]. 辽宁化工石油大学学报, 2017, 37(4): 29-33.
- [16] 胡立堂. 地下水三维流多边形有限差分模拟软件开发研究及实例应用[D]. 北京:中国地质大学, 2004.
- [17] 白福高,刘伟江,文一,等. 地下水溶质迁移规律研究概述[J]. 环境保护科学, 2015(6): 86-89.
- [18] 邢译心,鲍新华,吴永东,等. 基于Visual MODFLOW的尚志市水源地地下水资源预测与开采利用[J]. 水电能源科学, 2015(2): 42-45.
- [19] 张鑫,徐世光,黄建国,等. GMS 在地下水数值模拟中的应用——以云南文山州某水库为例[J]. 河南科学, 2015, 33(11): 1994-1997.
- [20] 梁丽青,刘喜峰,常颖. 地下水资源评价发展及现状研究[J]. 江西建材, 2016(20): 222-222.
- [21] 魏加华,郭亚娇,王荣,等. 复杂岩溶介质地下水模拟研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 27-34.
- [22] 陈松. 基于三维地质结构模型的宿南矿区地下水演化与识别[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.
- [23] 赵宪女. Visual Modflow 在地下水数值模拟研究中的应用介绍[J]. 科技创新与应用, 2017(16): 21-22.
- [24] 王建红,余启明,杨俊仓. 基于ArcGIS和Visual MODFLOW的黑河流域中游平原区地下水数值模拟与预测[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(1): 80-87.
- [25] 韩正元. 新疆乌苏市地下水资源可利用量计算中数值法的应用分析[J]. 地下水, 2016, 38(4): 66-67.
- [26] 孙从军,韩振波,赵振等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, 31(5): 9-13.
- [27] 金云龙,邱锦安,刘远锋,等. 地下水污染物运移数值模拟研究及应用综述[J]. 地下水, 2016, 38(3): 21-23.
- [28] 郭瑞. 兴平市地下水动态特征及数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- [29] 郝奇琛. 中国内陆盆地地下水流与水盐运移耦合模拟研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015.
- [30] 王利书,悦琳琳,唐泽军,等. 气候变化和农业发展对石羊河流域地下水水位的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 121-128.
- [31] 李慧,周维博,马聪,等. 西安市区地下水位动态特征与影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 149-154.
- [32] 王芳,张晓明,郑涵之. 抽灌井的布置方式对地下水流场和温度场的影响[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(8): 31-35.
- [33] 吕倩,魏洁云. 中国地下水污染现状及治理[J]. 生态经济(中文版), 2016, 32(10): 10-13.
- [34] FREEZE R A, WITHERSPOON P A. Theoretical analysis of regional groundwater flow: Analytical and numerical solutions to the mathematical model[J]. Water Resources research, 1966, 2(4): 641-656.
- [35] FREEZE R A, WITHERSPOON P A. Theoretical analysis of regional groundwater flow: Effect of water table configuration and subsurface permeability variation[J]. Water Resources research, 1967, 3(2): 623-634.
- [36] 潘玥,刘勇,曾献奎,等. 徐州东部废弃矿井地下水流场演化模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 52-56.
- [37] 刘中平,舒辉,刘迁顺,等. 基于MODFLOW对某铀尾矿库地下水中核素迁移模拟[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(1): 4-8.

(下转第110页)

算得到的贾鲁河中牟站生态需水量计算结果相近,与扶沟站生态需水量计算结果($Q_{2005} = 5.86 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{1992} = 5.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{1991} = 5.53 \text{ m}^3/\text{s}$)相比偏小,这是两种方法计算结果选取标准不同造成的,对计算结果的合理性的判定还需开展深入研究。

参考文献:

- [1] THAME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(5-6): 397-441.
- [2] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水[J]. *水利学报*, 2002, 33(9): 14-19+26.
- [3] 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J]. *水利学报*, 2002, 33(10): 1-7.
- [4] 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2003, 18(3): 294-301.
- [5] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10.
- [6] 冯宝平, 张展羽, 陈守伦. 生态环境需水量计算方法研究现状[J]. *水利水电科技进展*, 2004, 24(6): 59-62+73.
- [7] 潘扎荣, 阮晓红, 周金金, 等. 河道生态需水量研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(4): 89-94.
- [8] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. *River Research & Applications*, 2015, 14(1): 53-67.
- [9] 吉利娜, 刘苏峡, 王新春. 湿周法估算河道内最小生态需水量——以滦河水系为例[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(3): 287-291.
- [10] 刘昌明, 门宝辉, 宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 42-48.
- [11] 马育军, 李小雁. 生态水力半径法改进及其在青海湖流域的应用[J]. *科技导报*, 2011, 29(17): 22-28.
- [12] 郑小康, 侯红雨, 付永锋. 基于改进 Tennant 法的湟水流域河道内生态环境需水量分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(4): 681-685+690.
- [13] 孙义, 邵东国, 顾文权. 基于关键物种繁殖的汉江中游生态需水量计算方法[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, 6(3): 97-100.
- [14] 门宝辉, 刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(3): 479-482.
- [15] 刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策[J]. *长江流域资源与环境*, 1992, 1(1): 17-23.
- [16] 于鲁冀, 陈慧敏, 王莉, 等. 基于改进湿周法的贾鲁河河道内生态需水量计算[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(3): 5-9+94.
- [17] 姚怡光, 张云, 孙铁, 等. 人工渗流场中的地下水数值模拟[J]. *水力发电*, 2017, 43(5): 25-29.
- [18] 张鑫, 徐世光, 黄建国, 等. GMS 在地下水数值模拟中的应用——以云南文山州某水库为例[J]. *河南科学*, 2015, 33(11): 1994-1997.
- [19] 刘建峰, 张妨, 邬立, 等. Visual Modflow 模型在马城铁矿床地下水数值模拟中的应用[J]. *矿业工程*, 2016, 14(2): 49-52.
- [20] 赵晓玲, 王博. 基于 Visual MODFLOW 的煤矿开采对地下水影响的数值模拟研究[J]. *西部勘探工程*, 2016(7): 124-128.
- [21] 徐如超, 向龙, 崔光柏等. 太湖地区典型小流域地下水储量动态模拟与分析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(2): 51-56.
- [22] 魏光辉. 基于人工神经网络模型的地下水水位动态变化模拟[J]. *西北水电*, 2015(3): 6-9.
- [23] 魏恒, 肖洪浪. 地下水溶质迁移模拟研究进展[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1582-1589.
- [24] HSIEH B B, ZAKIKHANI M, MARTIN W D. Development of a regional 3-D groundwater modeling system for the Savannah River nuclear site, South Carolina[J]. *Groundwater Management*, 2014, 37(7): 315-319.
- [25] VALLNER L, GAVRILOVA O, VILU R. Environmental risks and problems of the optimal management of an oil shale semi-coke and ash landfill in Kohtla-Järve, Estonia. [J]. *Science of the Total Environment*, 2015: 524-525; 400-415.
- [26] 郑玉虎, 吴明洲, 徐爱兰, 等. 考虑土壤吸附作用的地下水污染物运移特征研究[J]. *地下水*, 2017, 39(3): 4-7.
- [27] 钱伟, 王玮, 任宇泽, 等. 甘肃格宏道金矿尾矿库污染物运移规律[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 78-83.
- [28] 钱程, 穆文平, 邢渊, 等. 某气田石油类污染物运移数值模拟研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(4): 68-72.
- [29] 高小文, 吕敬, 李秀娟, 等. 铜矿尾矿库污染物在地下水中运移规律数值模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2): 120-125.
- [30] 钱程, 武雄, 穆文平, 等. GIS 技术在水文地质领域的应用进展[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 115-122, 131.
- [31] 马钧霆, 陈锁忠, 朱晓婷, 等. 3D GIS 下地下水有限元数值模拟方法与应用[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(6): 749-757.

(上接第 104 页)