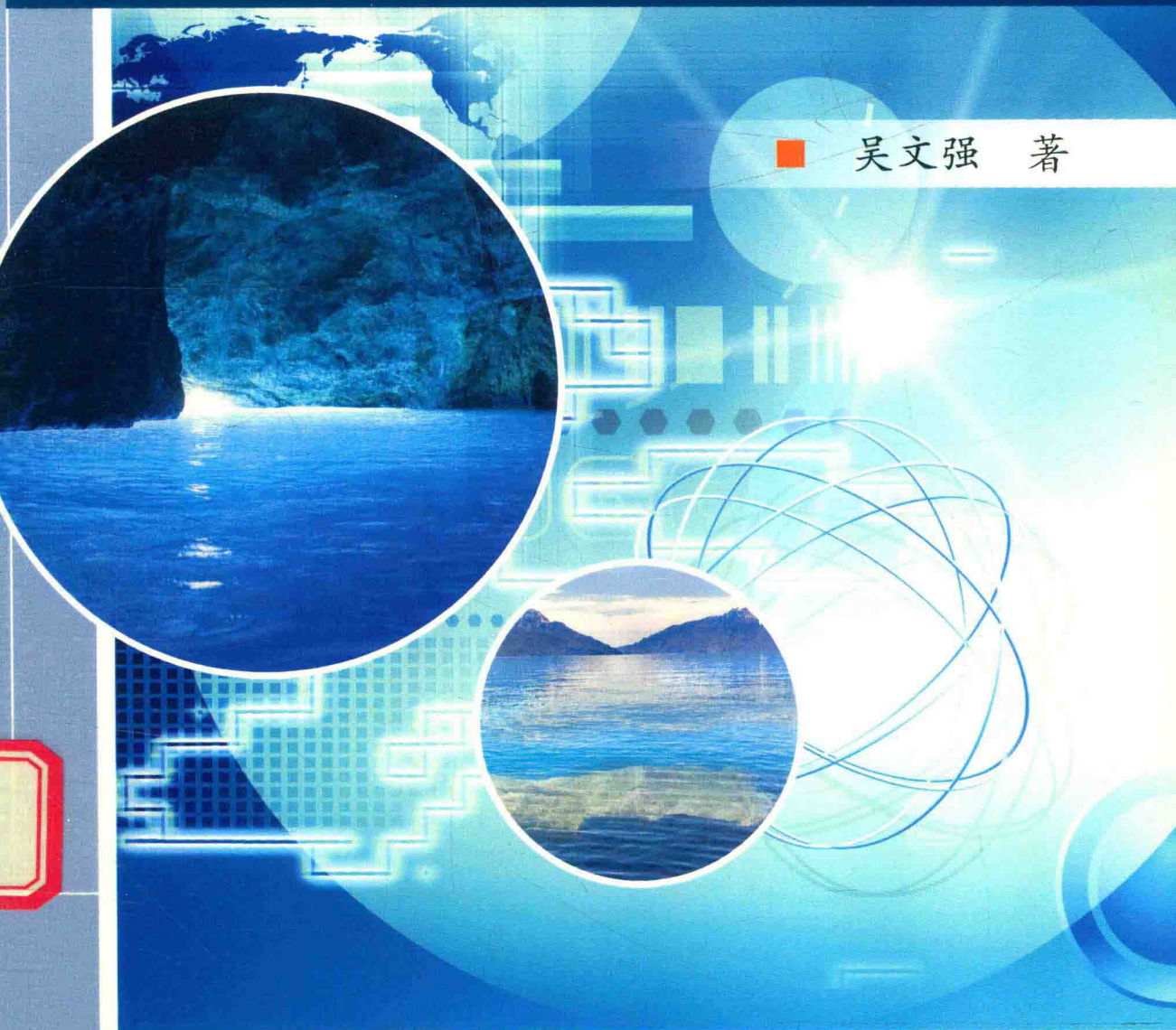


JIYU DIXIASHUI MOXING YU DIBIAOSHUI MOXING SONGSAN OUHE DE
PENDING DIXIASHUI SHUZHIMONI

基于地下水模型与地表水模型松散耦合的 盆地地下水数值模拟

■ 吴文强 著



 黄河水利出版社

基于地下水模型与地表水模型松散耦合的 盆地地下水数值模拟

吴文强 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

地下水数值模型一般难以准确刻画地表水补给边界,尤其是在缺少水文实测资料的地区,区域各河流的降雨产流过程没有资料可以直接利用。由于山区人迹罕至,缺乏实测降雨产流资料,常规水文计算方法难以计算各子流域降雨产流过程及产流量,地下水数值模型边界条件精度难以保证,极大地限制了模型模拟的准确性。本书选取分布式水文模型 HEC-HMS 模型模拟区域各流域的降雨产流过程,为地下水数值模型提供松散耦合河流过程边界条件,不仅较好地模拟了地下水变化过程,同时证明了地下水数值模拟松散耦合分布式流域水文模型的技术可以大幅提高地下水数值模拟精度。

对于模型降雨入渗与灌溉入渗补给边界的处理,基于当前常用的 MODFLOW 软件的特点,本书设计了一个具有分布式概念的专门计算降雨入渗加灌溉入渗的 DRecharge 模块,方便垂向入渗补给模块的输入与调参,也为提高模型模拟精度做出了一定的贡献。

图书在版编目(CIP)数据

基于地下水模型与地表水模型松散耦合的盆地地下水
数值模拟/吴文强著. —郑州:黄河水利出版社,2016. 12
ISBN 978-7-5509-1649-4

I. ①基… II. ①吴… III. ①盆地-地下水-数值
模拟-研究 IV. ①P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 299285 号

组稿编辑:李洪良 电话:0371-66026352 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社 网址:www.yrcp.com
地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003
发行单位:黄河水利出版社
发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)
E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:郑州红火蓝焰印刷有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8.75

字数:202 千字

印数:1—1 000

版次:2016 年 12 月第 1 版

印次:2016 年 12 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

前 言

提高地下水数值模拟精度的前提条件是充分认识水文地质条件,建立符合实际情况的水文地质概念模型,运用准确的计算方法,在水文地质条件约束下进行模型识别。归根结底,边界条件的刻画决定了地下水数值模拟的精度与正确性。

地下水数值模拟中的边界条件从水均衡角度考虑主要包括补给项与排泄项。其中,补给项主要包括降雨入渗、灌溉入渗、河道入渗、其他地表水体入渗、侧向入流、人工回灌等;排泄项主要包括人工开采、潜水蒸发蒸腾、侧向出流、泉水、河道基流、向其他地表水体排泄等。在补排水均衡公式两边,任何一项源汇项刻画不准确都会影响模拟的精度,该源汇项比重越大,导致模拟误差越大。

当前地下水数值模拟模型主要提供水文地质概念模型识别技术及正确的计算方法。各类边界条件前期处理多在模型体外完成,通过模型模拟结果可以反馈证实各类边界条件的正确性与准确程度。因此,模型源汇项的计算精度往往决定了模拟结果的精度。

分布式水文模型与地下水数值模拟模型耦合应用是国内外水文水资源学界研究的热点之一。原因就在于目前分布式水文模型已经发展到可以较准确地计算出流域任意一点的水均衡,这是传统水文模型所办不到的。从分布式水文模型的概念上来说,目前地下水数值模拟技术也是基于物理概念的分布式模型,其边界条件也应该是基于物理概念。但是,很多边界条件难以准确计算,例如在缺乏基础观测资料山区的降雨产流过程,缺乏水文观测资料河道的来水过程,不同地形、地貌、不同降雨量、不同灌溉模式区域上的垂向入渗过程等。目前分布式水文模型已经发展到可以计算缺乏资料区域的降雨产流模拟、河道汇流过程模拟及分布式垂向入渗补给模拟。因此,耦合分布式水文模型的边界条件必将提高地下水数值模拟的精度。

济源盆地位于太行山南麓,黄河小浪底水库左岸,盆地面积 821 km²,其中山区面积占 55%。盆地平原区地下水补给项中河道入渗补给与山前侧向入渗补给占总补给量的 65% 以上。由于山区人迹罕至,缺乏实测降雨产流资料,常规水文计算方法难以计算各子流域降雨产流过程及产流量,地下水数值模型边界条件精度难以保证,极大地限制了模型模拟的准确性。

本书选取较适合济源盆地的分布式水文模型 HEC - HMS 模型与国际流行的地下水数值模拟软件 MODFLOW 耦合应用,在准确模拟区域各流域降雨产流过程的基础上,不仅较好地模拟了济源盆地的地下水变化过程,同时证明了地下水数值模拟耦合分布式流域水文模型的技术可以大幅提高地下水数值模拟精度。

对于模型降雨入渗与灌溉入渗补给边界的处理,基于 MODFLOW 软件的特点,本书设计了一个具有分布式概念的专门计算降雨入渗加灌溉入渗的 DRecharge 模块,方便垂向入渗补给模块的输入与调参,也为提高模型模拟精度做出了一定的贡献。

本书的编写得到了我的博士生导师李国敏先生的悉心指导,谨以此书缅怀我的恩师。
鉴于作者水平有限,疏漏与不妥之处在所难免,敬请专家和读者指正。

吴文强

2016年11月20日于北京

目 录

前 言	
第1章 绪 论	(1)
1.1 研究目的和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.3 研究方法和研究内容	(8)
第2章 济源盆地概况	(10)
2.1 自然地理条件	(10)
2.2 地质构造条件	(11)
2.3 水文地质条件	(12)
2.4 水资源概况及开发利用状况	(24)
2.5 本章小结	(26)
第3章 盆地地下水模型与山区地表水模型耦合方法	(28)
3.1 地下水数值模型与分布式水文模型的理论基础	(28)
3.2 地下水数值模型与分布式水文模型耦合方法	(31)
3.3 本章小结	(35)
第4章 盆地地下水模型与山区地表水模型耦合模拟	(37)
4.1 水文地质概念模型	(37)
4.2 数学模型与数值模型	(40)
4.3 模型识别	(43)
4.4 未应用山区分布式水文模型耦合技术的盆地地下水数值模拟	(55)
4.5 应用山区分布式水文模型耦合技术的盆地地下水数值模拟	(63)
4.6 本章小结	(77)
第5章 应用山区分布式水文模型耦合技术前后地下水模拟结果对比	(78)
5.1 河道入渗补给量对比	(78)
5.2 山前侧向入渗补给量对比	(80)
5.3 观测孔水位拟合效果对比	(82)
5.4 本章小结	(90)
第6章 济源盆地地下水资源分析	(92)
6.1 地下水位动态变化分析	(92)
6.2 地下水资源量评价	(95)
6.3 地下水资源开发利用规划	(101)
6.4 地下水资源管理建议	(109)

第7章 结论与研究展望	(111)
7.1 结论	(111)
7.2 研究展望	(112)
附录	(113)
附录 A 地表高程数据获取	(113)
附录 B DRecharge 模块构建及代码	(114)
参考文献	(127)

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的和意义

陆地上地表水与地下水相互转化,同属于一个陆地水循环系统。众所周知,单独考虑地下水循环模式而忽略地表水循环影响,其结果大多会偏离实际。但是,限于学科发展遗留下来的问题,基于物理模式的真实再现,地表水与地下水相互转化的水资源管理模型目前还属于研究的热点问题。

20 世纪 90 年代前后地下水数值模拟模型已经发展到具有物理意义的三维地下水动力学模型^[1]。广义上的地下水系统包括地下含水系统和与之相关的水文气象要素及社会、经济、环境要素的总体。目前国内外流行的地下水数值模拟软件难以高效地解决系统源汇项时空分布不均匀问题。随着气候条件的变化及人类活动对土地开发利用的影响,地下水系统源汇项时空分布不均匀问题将更加突出,地下水数值模拟的边界条件变化将更加剧烈。要准确计算地下水资源量就需要准确地处理地下水数值模型的边界条件。当前地下水数值模拟工具还没有很好地解决地下水山前侧向入渗补给、河道入渗补给以及降雨灌溉垂向入渗补给问题,三类边界条件计算多通过模型外的各种方法另行计算,再处理成模型可识别的基础数据加以应用,计算方法因人而异,常会造成地下水资源评价从源头上就出现输入误差。

水文模型可以分为确定性模型和随机性模型^[2]:确定性模型应用有限的物理学规律描述水文过程,其预测结果不存在不确定性;随机模型应用概率理论和随机性过程描述水文环节,其预测结果多为条件概率的形式。根据模型对流域是空间集总式的描述还是分布式的描述,以及对水文过程是经验性描述、概念性描述还是完全物理描述,将确定性模型进一步划分为黑箱模型、概念模型和基于物理学的分布式模型。相对集总式水文模型,分布式水文模型应用领域更加广泛。分布式水文模型可以实现流域条件变化以及气候变化响应模拟、缺乏前期观测资料的流域模拟、空间异质性模拟、污染物和沉积物运移模拟等^[3]。

GIS 技术(Geographic Information System,地理信息系统,简称 GIS)已经越来越多地融合到水文计算与水资源管理当中。GIS 是描述、存储、分析和输出空间信息的理论与方法的一门新兴的交叉学科,同时,它还是以地理空间数据库为基础,采用地理模型分析方法,适时提供多种空间和动态的地理信息,为地理研究和地理决策服务的计算机技术系统^[4]。利用 GIS 技术处理遥感图像可提供流域、地区、陆地乃至全球范围的时间和空间信息,在某些不能测量或在非常艰难环境中测量会导致费用很高的情况下,可以获取流域特性(例如土地覆盖、土地利用、坡度、植被等)信息,从这些特性中可以收集到水文模型的参数^[5]。

结合 GIS 技术,可以建设一个分布式流域水文模型与地下水数值模拟技术跨平台、跨学科的松散耦合应用模型。依据分布式流域水文模型计算的山区地表、地下径流产流量,定量刻画地下水数值模拟的山前侧向入渗补给与河道入渗补给边界的时空变异性;根据分布式地下水垂向入渗补给计算模块,定量刻画地下水数值模拟的垂向降雨入渗与灌溉入渗补给边界的时空变异性,以提高地下水数值模拟的准确度。

地下水系统数值模拟模型结合分布式水文模型,弥补模型的缺陷,实现优势互补,使物理基础更加坚实^[6],准确刻画时空分布不均匀的降雨入渗补给、山前侧向入渗补给、河道与地下水体间的交互补给,对提高区域地下水资源均衡数值模拟精度、准确刻画地下水源地保护区范围、地下水体污染物运移规律研究等意义深远,为区域水资源管理提供科学、可靠的依据。

1.2 国内外研究现状

国内目前地下水及地表水数值模拟商业化软件还有待填补空白,尤其是地下水数值模拟软件的开发推广工作进展缓慢。分布式流域水文模型已成为国内外水文学家研究的热点,并得到大量的具体应用,目前已经发展到从小流域模拟向大流域模拟的跨越。国外对地下水补给模块已有研究,在我国,地下水补给模块的研制尚属空白或起步阶段^[7]。

1.2.1 地下水与地表水耦合模拟模型

国外水文工作者已经开展了将地表水与地下水作为一个系统进行数值模拟的研究,并开发出了一些模型。其中,最有名的当属丹麦水利学会(DHI, Danish Hydraulic Institute)开发的分布式水文模型 MIKE SHE 系统,该系统可以模拟水文循环中陆相的所有重要过程,可以应用于地下水抽取对地表水的影响、地下水与地表水联合使用、湿地管理与修复、流域管理与规划等,该模型包含了模拟坡面漫流、非饱和流、溶质输移、农业设施、总蒸发等数值模块,同时还含有一个三维的地下水数值模型,可以与 ArcView 链接进行 GIS 高级应用^[8],但是该软件侧重点为地表水产汇流模拟,对地下水资源数值模拟能力较弱。Sorab Panday 等^[9]开发的基于物理基础的分布式模型,可以进行涵盖城镇与农业用水的地表水与地下水水资源评价,但模型不包括降雨产流部分,其地下水资源模型采用基于有限差分方法的 MODFLOW 模型;地表径流采用与地下径流模型相同的剖分网格,使用二维扩散波方程计算;渠道模型采用有限体积剖分,使用一维圣维南方程计算;Bärbel Tiemeyer 等开发专用于解决人工排水低洼集水区地表地下径流相互转化的分布式水文模型 MHYDAS - DRAIN^[10];Stefan 等^[11]研究了地表水与地下水相互转化模型 ParFlow^[12],实现了对河流、水库、湖泊等地表水体与地下水之间相互转化的数值模拟研究。但是,目前地表水与地下水数值模拟耦合计算还只处于起步阶段,各模型都还存在着不同程度的缺陷;而分布式地表水文数值模拟技术与地下水数值模拟技术目前已经发展得初具规模,在各自的领域中都得到了较好的验证,由此,可以考虑将分布式水文模型与地下水数值模拟模型松散耦合,以达到提高地下水数值模拟精度的目的。

在地表水与地下水相互转化研究领域,国内多属于水均衡概念模型的具体应

用^[13-16],运用基于物理概念的分布式水文模型或分布式水文模型与三维地下水数值模拟的耦合应用成功经验较少。李艳平等^[17]利用一维分布式水文模型 LL - II 模型^[18]与 GIS 技术,对宜昌黄柏河天福庙水库连续日入库径流过程进行地表水和地下水的连续耦合模拟与预测,取得了较好的模拟预测效果;王宏等^[19]运用 SWAT/GMS 耦合系统对华北平原地区地下水系统进行模拟计算,其降雨入渗量采用 SWAT 计算结果作为 GMS 的输入,没有具体介绍其 SWAT 模型参数来源,山前侧向入渗及河道入渗没有采用分布式水文模型计算。近年来,部分学者利用水化学及环境同位素的方法定性研究地表水与地下水转化关系^[20-24],为地表水与地下水相互转化模型提供科学依据。

1.2.2 地下水数值模型

地下水模型不仅仅是一个工具,还是科学探索的过程,过去 30 年成为科学家们寻求地下水系统的有力工具^[25]。目前地下水数值模拟方法主要有有限差分法(FDM)、有限单元法(FEM)、边界元法(BEM)和有限元分析法(FAM)等。国际流行的地下水模拟软件有 MODFLOW、Visual MODFLOW、GMS、FEFLOW、Visual Groundwater、PHREEQC、HST3D、TNTmips、MT3DMS、MT3D99、PEST、MODPATH、UCODE 等^[26-28]。

MODFLOW (Modular Three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model) 是由美国地质调查局(U. S. Geological Survey)的 McDonald 和 Harbaugh 于 20 世纪 80 年代开发出来的一套专门用于孔隙介质中三维有限差分地下水数值模拟的软件^[29]。MODFLOW 已经在全世界范围内,在科研、生产、环境保护、水资源利用等许多行业 and 部门得到了广泛的应用,成为最为普及的地下水运动数值模拟的计算软件。程序设计结构的模块化,离散方法的简单化和求解方法的多样化,代表了未来地下水数值模型大发展趋势,有很强的实用性^[30]。近年来 MODFLOW 不断得到发展和完善,1998 年、2001 年^[31]、2003 年、2004 年、2006 年分别发布新版本^[32]。

基于 MODFLOW,又衍生出很多地下水模拟软件。加拿大 Waterloo 水文地质公司在 MODFLOW 的基础上开发研制的 Visual MODFLOW,是目前国际上最为流行且被各国同行一致认可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,该系统在无缝集成 MODFLOW - 96、MODFLOW - 2000、Win2PEST、RT3D99、MODPATH、MT3D、PH3TD、MIKE11 等软件的基础上,建立了系统合理的 Windows 菜单界面与可视化功能^[33-35],如今 4.2 版本增加了对多种 GIS 工具及多种图形格式文件的支持(支持的数字高程包括 ESRI 的 Grid 文件、Mapinfo 的 Grid 文件、Surfer 的 Grid 文件、USGS 的 DEM 文件、EXCEL 文件及各种文本文件;支持的图形文件包括 AutoCAD 的 dxf 文件、ESRI 的 shape 文件及 TIFF、GIF、JPEP、BMP、png 格式图片),更加无缝集成地表水文模型 MIKE11,得以实现地表径流与地下水数值模拟的完美耦合;GMS 是地下水模拟系统(Groundwater Modeling System)的简称,是综合已有的 MODFLOW、MODPATH、MT3D、FEMWATER、SEEP2D、SEAM3D、RT3D、UTCHEM、PEST、UCODE 等地下水模型而开发的可视化三维地下水模拟软件包,可进行水流模拟、溶质运移模拟、反应运移模拟,建立三维地层实体,进行钻孔数据管理、二维(三维)地质统计,几乎可以用来模拟与地下水相关的所有水流和溶质运移问题^[36-38];PHT3D 是以 MODFLOW、MT3DMS、PHREEQC - 2 所开

发,可以处理各种地下水化学水均衡过程,包括地下水络合作用、矿物质降雨溶解、离子交换等^[39];MF2K-GWM^[40]是以 MODFLOW2000 为核心的地下水动力学可视化模拟计算软件,主要用于地下水均衡计算。MODFLOW 不仅可以解决一般的地下水数值模拟,还可以以 MODFLOW 为基础,通过扩展模块解决多种特殊环境中的地下水数值模拟:例如穿过多层含水层的完整井流的数值模拟^[41];湿地地下水数值模拟^[42];与抽水井相连的含有矿坑、巷道含水层的地下水数值模拟^[25]。

FEFLOW 是由德国水资源规划与系统研究所(WASY)于 1979 年开发出来的地下水流动及物质迁移模拟软件系统,如今已发展到 5.3 版^[43]。它采用以迦辽金法(Kalerkin)为基础的有限单元法,能够解决下列地下水模拟问题:完全瞬时、半瞬时、稳态地下水流动与溶质运移;随时间变化的实体属性和约束边界条件;饱和与不饱和流动;包含栖留潜水面的承压与不承压含水层;带有非线性吸附作用、衰变、对流、弥散的化学质量运移;考虑贮存、对流、热散失、热运移的流体和固体热量运移;密度变化的流动(海水入侵等)。FEFLOW 是目前三维可视化程度最好的地下水模拟软件^[44, 45]。

前述模型皆属于基于物理模型经过多次迭代求解到满足精度要求为止,还有一类模型模拟人类神经网络系统,通过自组织减少迭代次数,达到精度要求。例如 Olaf Arndt 等利用神经元求解有限元的精确解就得到较好的结果,同时节省了运算时间^[46]。

与国外相比,我国的地下水模拟软件的发展比较缓慢,1988 年长春地质学院林学钰等推出《地下水水量水质模拟及管理程序集》^[47];1990 年长春地质学院杨天行等推出《水系统污染数学模型及应用——数学模型·近代数值方法·软件包》^[48];1993 年中国地质大学陈明佑推出《渗流计算程序——附工程地质计算程序》。三个程序集均是 Fortran 语言代码组成,虽然包括了地下水模拟的主要运行程序,但均没有前处理和后处理过程,没有考虑界面问题^[49];1994 年进入三维模拟阶段,李国敏开发了 TSCA 三维有限元数值模拟软件,可以模拟水流、溶质运移及反求模拟参数^[1];1996 年李国敏等开发出专门用于溶质运移的三维有限元数值模拟软件 GTS3D^[50],系统由 Quick Basic 和 Fortran 语言混合编制而成,在 DOS 系统下使用菜单化管理,考虑了前处理和部分图形功能,是当时国内较好的地下水模拟软件;薛禹群等于 1997 年总结了过去中国地下水数值模拟的发展历程及不足,并展望了未来发展方向^[51];1998 年姚磊华等开发出国内首个适用于 Windows 操作系统的三维地下水数值模拟软件 CCRI-GWMIS1.0^[52];2002 年周德亮等开发出面向对象的有限元地下水数值模拟类模块,与传统的地下水有限元程序相比,程序更易重用、维护、扩充,便于与地下水模拟的其他程序集成^[53];2003 年武强等设计出地下水模拟的可视化环境 GSS 系统^[54],系统分为 4 个模块:三维地质体重构模块、地下水前处理设计模块、运行模块以及动态模拟分析模块,提供一个在三维空间上定位、量化的研究方法,采用有限元数值方法,基于可视化设计环境,在处理诸如边界条件、区域划分等问题上更加灵活、准确,为地下水在三维数据场中的模拟分析,提出了崭新的研究方法和有效的技术手段。

国内学者积极引进国际先进地下水数值模拟软件并付诸于实践应用,MODFLOW^[55, 58]、Visual MODFLOW^[59, 60]、FEFLOW^[61, 62]、GMS^[63, 64]等软件在国内使用率较高,对国内地下水数值模拟学科发展起到了积极的推动。

自 21 世纪以来,欧美等国开始研究不同时空尺度的地下水补给的定量估算方法,并

在气候变化对水资源影响的研究中,考虑了气候变化与人类活动对地下水补给的影响^[7]。地下水补给区域基本可以划分为地表水、非饱和带、饱和带,基于三种补给区的地下水补给的估算方法很多,有物理的、化学的,以及数值模型方法^[65]。Keese 等^[66]用非饱和流模型估算了区域尺度在植被根系带下的地下水补给;Okke 研制了一个有物理基础的估算多年平均地下水补给模型 WetSpa^[67],用 Penman - Monteith 方程确定植被系数的方法来确定蒸散发的季节分布值,对于有植被的地下水补给区,考虑了实际蒸散发与地下水埋深、张力饱和高度以及植被根系之间的定量联系,与 ArcView - GIS 集成,土地利用和土壤参数取自它们的属性列表模型,土壤分类采用美国农业部的分类,土地利用类型取自研究区域的植被覆盖图;V. Armbruster 等^[68]运用 SVAT 模型模拟一个不考虑侧向补给研究区月入渗补给量;M. A. Fazal 等^[69]运用 SMAR 概念模型计算污染区域地下水入渗补给量,SMAR 模型是基于降雨量、径流量、地下水位等值线的概念模型,当地下水为高程地表时不适用;HELP(V3.0)^[70]是美国陆军工程兵团开发的二维水均衡模型,Mikko 等^[71]利用 HELP3.0 模拟分布式地下水补给量,并作为 MODFLOW 的补给项耦合应用,得到较好的结果;PRMS^[72]是一款基于分布式参数水文模型,可以根据分布式降雨、蒸发、地表覆被物等计算径流量、蒸发量以及入渗量,Douglas^[73]利用 PRMS 结合 GIS 技术对 7 个中小流域进行入渗补给计算,结果较好,并指出可以用于非闭合盆地;地球化学的方法也可以用于地下水入渗量的计算,Matthew 等^[74]利用氢氧稳定同位素测定非饱和带含水层中硝酸盐补给路径及时间。

1.2.3 分布式地表水文模型

Freeze 和 Harlan 于 1969 年提出分布式水文物理模型的概念和框架^[75],近年来分布式水文模型发展较快,并在世界各地均有较多的应用。国际上著名的分布式流域水文模型除 MIKE SHE 系统外还有很多,例如 TOPMODEL 模型^[76]是 Beven(1986)在与 Kirkby(1979)早期工作的基础上提出的,是一个以地形和土壤为基础的半分布式水文模型,在集总式和分布式流域水文模型之间起到了一个承上启下的作用,其主要特征是利用地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 或地形 - 土壤指数 $\ln(a/T\tan\beta)$ (a 为单位等高线长度的排水面积, $\tan\beta$ 为地表坡度, T 为导水系数) 来反映流域水文现象,特别是径流运动的分布规律;SWMM 模型^[77] (Storm Water Management Model, 暴雨洪水管理模型) 最早是在美国 EPA (Environmental Protection Agency, 环境保护署) 的资助下,由梅特卡夫有限公司 (Metcalf & Eddy, Inc.)、水资源工程师有限公司 (Water Resources Engineers, Inc.)、佛罗里达大学 (University of Florida) 等三家单位组成的联合体,历时两年开发出来的,后又经过多次改进,可以进行城市地区产流相关的各种水文过程的计算,还可以计算径流和外来水流在管道、渠道、蓄水和处理单元以及分水建筑物等排水管网中的流动,重点研究城市水文、水力学,同时可以进行其他区域产汇流计算;SWAT 模型^[78, 79] (Soil and Water Assessment Tool) 是由美国农业部 (USDA) 的农业中心 (ARS, Agricultural Research Service) Jeff Arnold 博士于 1994 年开发的,模型采用日为时间步长,可进行长时间连续计算,但不适合单一洪水过程的详细计算,特点是基于物理机制、使用常规数据、计算效率高、可模拟长期影响等;英国水文研究所开发的 IHDM 模型^[80],利用数学物理方程来描述水分在地表和土壤中的运动,计

算得到暴雨的降雨径流关系;M. Minacapilli 为意大利西西里地区开发的分布式农业 - 水文模型 (SIMODIS), 可专门用于农业灌溉管理^[81]; Rodriguez, F. 等研究了专用于城市降雨产流的分布式水文模型^[82]; L. S. Kuchment 等开发了专用于永久冻土带的分布式融雪、降雨径流生成模型^[83]; David C. Garen 等利用降雨、气温、湿度、露点温度、风速、太阳辐射强度等资料, 开发基于能量守恒的分布式融雪产流模型, 可预测雪水融化量、雪深度、雪覆盖面积等^[84]; Qiang Luo 针对日本托恩河流域中包含大面积天然水体及数条疏水渠道开发专门分布式水文模型^[85]; 澳大利亚 Günter Blöschl 开发专门用于瞬间洪水预报的分布式流域瞬间洪水预报模型^[86]; Greta Moretti 等开发分布式流域水文模型 (AFFDEF), 可以高效模拟以小时为单位长达千万年模拟期降雨产流情况^[87]; 较多人在各领域使用 MIKE SHE 模型, 例如 G. B. Sahoo 应用 MIKE SHE 预测夏威夷群岛中瓦胡岛上夏威夷流域高频率强降雨产流^[88], K. Christiaens 等运用 MIKE SHE 检验了 4 种土壤特性和土壤水力学参数计算方法^[89], Christine E. McMichael 等将 MIKE SHE 模型运用于加利福尼亚中心半干旱地区灌木丛集水区月径流量预测^[90]。基于 GIS 的 WMS (Watershed Modeling System) 模型系统^[91], 是美国 Brigham Young 大学环境模型研究实验室 (EMRL) 开发的专业水文模拟处理软件, 提供水文模拟全过程的工具。它包括流域、子流域的自动生成、几何参数的计算、水文参数的计算等, 并能实现模拟结果的可视化。WMS 可以使用矢量地图、DEM、TIN 等格式的数据来进行地形分析和水文模拟。嵌入了多种传统的概念性水文模型, 包括 HEC - 1、HEC - RAS、NFF、TR - 20、TR - 55、Rational Method、HSPF 等, 根据自动提取的流域参数进行水文模拟, 可用于洪水预报、水库设计、城市规划等。

国内分布式流域水文模型在 20 世纪 90 年代后取得较快的发展。郭生练^[92]、芮孝芳^[93, 94]、王中根^[95]、王书功^[3] 等分析了分布式流域水文模型结构特征及发展方向; 李致家等将国内最著名的水文概念模型新安江模型发展成为分布式新安江水文模型^[96, 97]; 贾仰文等开发的 WEP - L 分布式流域水文模型用于黄河流域水资源评价^[98]; 都金康等开发专用于湿润地区山区分布式流域水文模型^[99]; 刘昌明^[100]、王浩^[101]、夏军^[102, 103]、杨大文^[104]、王中根^[105]、熊立华^[106] 等也提出了不同尺度分布式水文模型, 各种分布式水文模型在长江^[107]、黄河^[108]、黑河^[109]、塔里木河^[110]、黄土高原^[111]、西南岩溶^[112] 等地区得到应用; 国内还有很多人吸收国外先进分布式水文模型, 并加以消化利用, 例如对 TOPMODEL 模型在岩溶地区改进应用^[113]、分析 SWAT 模型特点并提出适合国内使用的建议^[114, 115]、在温带山地应用 TOPOG 模型^[116]、GBHM 模型在中等尺度地区应用^[117]、HEC 模型应用于降雨径流模拟^[118]、分析了 TOPMODEL 特点并加以应用^[119, 120]、结合 TOPMODEL 发展了 GTOPMODEL^[121]; GIS 技术^[122, 123]、RS 技术^[124]、数字高程 (DEM) 技术^[125]、分布式降水模型^[126]、雷达测雨技术^[127] 等新技术均在分布式水文模型中逐渐推广应用, 并取得较好效果。但是, 纵观国内众多分布式水文模型, 与地下水数值模拟模型结合还不够紧密, 没能够将盆地山前侧向入渗补给真实刻画出来并与盆地地下水模型耦合应用。

1.2.4 GIS、RS 技术在地下水及地表水模型中的应用

如今地下水数值模拟与 GIS 结合是地下水数值模拟软件发展的趋势, Visual MODF-

LOW^[35]、GMS、FEFLOW 等与 GIS 结合更加紧密,其地质分层、入渗补给、蒸发排泄等模块均实现与多种 GIS 工具无缝连接;ModTech^[128] 基于有限差分数值算法,水流模拟与 MODFLOW 类似,使用 PCG、SIP、SSOR 和 LMG 等解法,溶质运移模拟使用 MT3DMS,其最大的特点是与 GIS 工具紧密耦合,软件包含一个 GIS 工具包 GeoLink,可以读取多种 GIS 结果,但是目前不支持 ESRI 的 shape 文件及 TIFF、GIF、JPEG、BMP 格式图片,但支持 DXF 格式图片,且可以将 MODFLOW-96 的结果文件作为输入再编辑;Atiqur Rahman^[129] 在 GIS 工具中运用 DRASTIC 模型^[130] 模拟分析了印度 Aligarh 地区浅层含水层受污染的风险程度及分布,得到较好的结果;Ross^[131] 在运用 MODFLOW 构建区域地下水数值模拟过程中,结合 GIS 与关系型数据库系统可以较好地对比分析模拟结果与真实值关系。

GIS、RS 技术在分布式流域地表水文模型得到较多的应用。美国 Sudheer R. Satti 等专门针对农田土壤特性及土地利用分类,开发基于 GIS 技术的分布式干旱水平年需水模型(GWRAPPS)^[132];印度 Manoj K. Jain 等开发基于 GIS 技术的分布式降雨产流模型^[133];Jing M. Chen 等利用 Landsat TM 的 30 m 遥感影像提取研究区蒸发、蒸腾、植被截流等参数作为分布式流域水文模型输入项^[134];Yongqiang Zhang 等运用 MODIS 卫星拍摄植被数据计算分布式土壤水含量及蒸发量^[135];Theresa M. Carpenter 等开发 HRCDHM 模型,利用 GIS 技术以及 WSR-88D 雷达监测每小时降雨、蒸发强度资料,建立 4 km 网格分布式水文模型,在 5 个流域小时降雨径流预报中均得到较精确结果^[136];同样运用 WSR-88D 雷达数据建设分布式水文模型的还有 Theresa M. Carpenter 等^[137];遥感技术在较大面积流域分布式水文模型中有更加突出的优势,J. Andersen 等在塞内加尔盆地 8.2 万 km² 土地上运用遥感观测降雨、植被信息建设分布式水文模型^[138]。

国内地下水数值模拟软件与 GIS 结合工作才刚刚起步,2002 年周德亮等利用国产 GIS 工具 MAPGIS 软件的二次开发函数作为“后台”支持,以 VC++ 作为编程工具,在充分利用 MAPGIS 的可视化功能的基础上,借助于 OpenGL 并应用科学可视化技术开发,更能满足地下水模拟需要的可视化功能^[139];2003 年魏家华等在对北京密怀顺盆地的地下水模型中基于 GIS 建立了一个可以交互式剖分的建模环境^[140];2004 年胡立堂开发出耦合 MAPGIS 的地下水数值模拟模型^[141, 142],杨旭等提出并设计了基于点、线、面的 GIS 技术地下水数值模拟拟合方法^[143];2007 年王仕琴等在 MAPGIS 中二次开发集成 MODFLOW 源代码的地下水数值模拟模型,实现了地下水数值模型与地理信息系统集成,可实时更新系统源汇项,为资源共享与网络化管理提供了依据^[140]。

ARC/INFO 是著名 GIS 厂商 ESRI 公司的代表产品,它是当今世界上最完整的 GIS 系统,它所包含的几千个 GIS 分析工具已经被各个领域所采用,在 GIS 数据处理、属性库建设、属性文件编译等方面功能强大^[144]。

MAPGIS^[145] 是中国地质大学信息工程学院开发的工具型地理信息系统软件,不仅具有比较完善的制图功能,还具有如下特点:

(1) 海量无缝图库管理:提供建立图库、修改、删除及图库漫游等一系列操作;提供图幅输入、显示、修改等功能;图幅接边、图幅提取功能操作简单,可靠性高。

(2) 高性能的空间数据库管理:Client/Server 结构,多用户访问管理;动态外挂数据库的联结;多媒体属性库管理;完善的安全机制。

(3) 完备的空间分析工具:可实现空间叠加分析,属性数据分析,DEM 分析,网络化功能,TIN 模型分析,三维绘制功能,多源图像分析与处理等。

(4) 方便的二次开发:支持 C++、VB、Delphi、ActiveX 等集成开发环境,可提供 API 函数层、C++ 类层、ActiveX 控件层。

1.3 研究方法和研究内容

1.3.1 研究方法

在充分研究现有水文、气象、地质、地下水位观测等资料的基础上,分析研究区区域产汇流模式、水文地质特点、地下水流场特征等,选取适当的分布式流域水文模型与地下水数值模型。以分布式水文模型模拟山前地下水产流量的结果作为地下水数值模型的山前流量边界输入;以分布式水文模型模拟河道产流过程,经过适当处理转换为相应的河道水位过程,作为地下水数值模型的河道入渗边界;以 GIS 技术为支撑开发的分布式概念地下水数值模拟垂向入渗补给模块模拟结果,作为地下水数值模拟的垂向入渗补给量边界。实现分布式水文模型与地下水数值模型的松散耦合,提高地下水数值模拟的精度。结合 GIS 技术与 RS 技术,提取模型所需数字地形,包括地表高程、含水层底板高程、土壤类型分布、土地利用类型分布、雨量站分布等,以供地下水数值模型、分布式流域水文模型、地下水垂向入渗补给模块使用。

准确的地下水数值模拟需要准确的饱和带侧向入渗补给量、地表水水体入渗补给量、非饱和带入渗补给量数据以及合理的地下水数值计算方法。目前还没有一个完整的模型可以同时实现上述目标,国际上有些软件可以实现上述部分目标,有些学者也通过耦合应用的方式实现了地表水体入参与地下水数值模拟的耦合计算或非饱和带入参与地下水数值模拟模型的耦合。但是,国外多数模型计算需要参数繁多,例如温度、湿度、风速、太阳辐射强度、土地利用情况、土壤类型等,国内受资料限制难以具体应用推广;受研究经费限制,相关软件也难以引进;再有,受开发周期及个人模型开发能力限制,个人开发一个基于物理概念的分布式水文模型将是一件十分困难的事情。因此,根据研究区资料及地形地貌特点,本书对山区降雨产流计算采用较易掌握的分布式概念水文模型 HEC-HMS 模型,以 WMS 软件作为分布式水文模型的前处理,对研究区进行流域盆地、河道、SCS-CN 值、分布式雨量站、蒸发量等信息提取,以 HEC-HMS 水文模型做进一步数值模拟分析,得到各流域出山口地表径流与地下径流月分布式水文数据,进行适当处理,地下径流转换为盆地山前侧向补给量,地表径流转换为河道水位过程;开发具有分布式水文概念的人渗补给模块 DRecharge 模块,计算非饱和带降雨与农田灌溉入渗补给量。以地下水数值模拟软件 Visual MODFLOW 作为研究区地下水数值模拟工具,耦合分布式流域水文模型计算的山前侧向入渗补给量边界与地表水体入渗补给量边界,耦合 DRecharge 模块模拟结果作为垂向降雨、灌溉补给边界,实现 Visual MODFLOW 山前侧向入渗补给、河道入渗补给、垂向降雨加灌溉入渗补给项具有物理意义,准确模拟计算地下水水位动态变化过程。

DRecharge 模块建模思路:运用 ENVI 软件对研究区近期卫星影像图片进行影像融

合,结合 GPS 实测校正点,在 MAPGIS 软件下对影像进行校正处理,并结合土地利用类型图,以目视判读的方式提取地物类型,建立地物类型图层;以研究区降雨入渗系数分区图为底图,进行数字化,建立降雨入渗系数分区图;以雨量站群为依据建立研究区降雨量泰森分区图;以灌区分布图为依据,建立灌区分布图(因灌区控制渠系灌溉水量);对各属性图层进行合并得到具有雨量站、降雨入渗系数、地表覆盖物类型、灌区属性等信息的综合降雨加灌溉入渗补给 GIS 属性图层,并提出图层属性作为 DRecharge 模块基本属性库模拟计算分布式垂向入渗补给。结合降雨量、渠系灌溉水量、井灌水量,以 VBA 作为模型开发工具,以 Excel 作为数据库存储数据,开发可供 Visual MODFLOW 使用的 DRecharge 模块,计算分布式垂向入渗补给量。

对比分析方案,建设一个常规方法计算地下水变化动态的地下水数值模型。传统的地下水数值模拟方法对山前侧向入渗补给多采用降雨产流模数法,精确一些的会采用泰森多边形降雨产流或矩形法降雨产流,以提高产流计算精度;对河道入渗多采用渗漏系数法,即按均值稳定入渗;其他参数与采用耦合分布式水文模型模拟的地下水数值模型的参数相同。

1.3.2 研究内容

本书研究区为济源盆地,该盆地地处河南省济源市,盆地三面环山,一面向平原区过渡。通过分布式流域水文模型、三维地下水动力学数值模型、分布式地下水入渗补给模型三个模型的耦合应用,模拟计算济源盆地地下水动态变化过程;通过使用常规方法建设地下水数值模型,模拟计算盆地地下水动态变化过程,对比分析耦合分布式流域水文模型的地下水数值模型的优点。最后根据地下水数值模型与山区分布式地表水文模型耦合的盆地地下水数值模拟结果,分析济源盆地地下水水位动态变化及分区水资源量变化趋势;规划济源盆地未来水平年可开发利用地下水资源量变化趋势;总结济源盆地地下水资源管理应注意的事项。

第 2 章 济源盆地概况

2.1 自然地理条件

2.1.1 自然地理概况

济源市位于河南省西北部,济源盆地位于济源市东部,与沁阳、孟州接壤;南濒黄河,与孟津、新安隔河相望;北枕太行山,与山西省晋城、阳城搭界。如图 2-1 所示,济源盆地地处东经 $112^{\circ}19' \sim 112^{\circ}46'$,北纬 $34^{\circ}53' \sim 35^{\circ}16'$,面积 820.75 km^2 ,平原面积 371.16 km^2 。盆地北部和西部为中低山区,海拔为 $400 \sim 1\,000 \text{ m}$,山势陡峻,切割强烈。南部为基岩及黄土丘陵,其中基岩丘陵地面高程 $200 \sim 500 \text{ m}$,黄土丘陵地面高程 $140 \sim 250 \text{ m}$ 。地面沟壑密布,地形起伏较大。盆地中部和东部为洪冲积平原,地形较平坦,地面高程一般为 $130 \sim 260 \text{ m}$,局部山前坡(洪)积锥顶部高程达 400 m 左右。

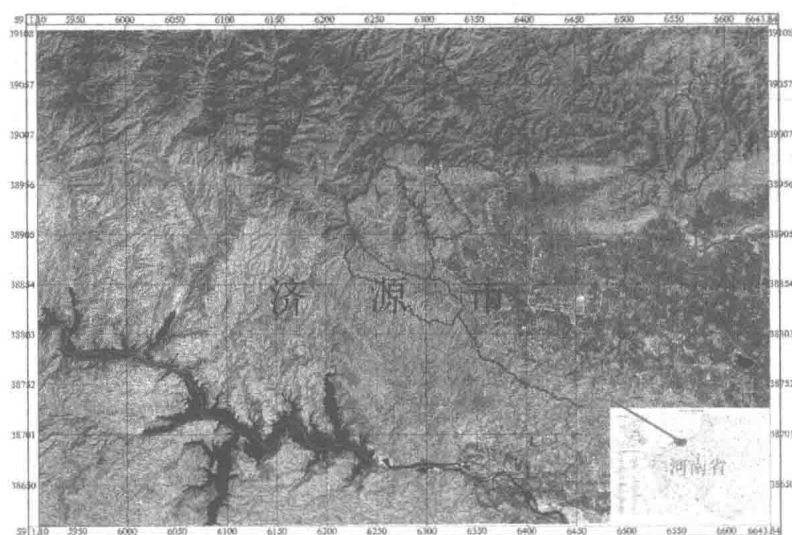


图 2-1 济源盆地地理概况

2.1.2 气象条件

济源盆地属暖湿带半干旱大陆性季风气候,四季分明,由于受地形和季风的影响,气候地区性差异较大,总的特点是春季温暖多风,夏季炎热多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷少雪。年平均气温 14.0°C ,最热为 7 月,平均气温 27.0°C ,最冷为 1 月,平均气温为 -1.0°C ;年均降水量为 630.6 mm ,多集中在夏季,对实测资料序列较长的 4 个气象站(赵礼庄水文站、黄龙庙站、交地站、竹园气象站)的算术平均值分析知,济源盆地降雨量年内分配