

环境与资源博士文库 [第2辑]



地表水和地下水集成模型中 包气带土壤湿度动力学研究

张 静 宫辉力 李小娟 著

VADOSE ZONE MOISTURE DYNAMICS OF
INTEGRATED SURFACE AND GROUND WATER MODEL

中国环境科学出版社

环境与资源博士文库（第2辑）

国家自然科学基金项目（40901026）

地表水和地下水集成模型中 包气带土壤水分动态研究

**Vadose Zone Moisture Dynamics of Integrated
Surface and Ground Water Model**

张静 宫辉力 李小娟 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

地表水和地下水集成模型中包气带土壤水分动态研究/张静, 宫辉力, 李小娟著. 北京: 中国环境科学出版社, 2009
(环境与资源博士文库. 第2辑)
ISBN 978-7-80209-941-8

I. 地… II. ①张… ②宫… ③李… III. 包气带水—土壤湿度—动力学—研究 IV. P641.131

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 022281 号

责任编辑 肖 伊
责任校对 尹 芳
封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2010 年 1 月第 1 版
印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/32
印 张 7.75
字 数 165 千字
定 价 80.00 元 (全套 4 册)

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序

PREFACE

Competing demands for water, potable water supply, agricultural and industrial uses, and natural systems, have reached critical levels in many parts of the world. The importance of understanding and developing modeling capability for surface water and groundwater interaction has become more evident. Surface water - ground water interaction plays an important role in highly permeable streambeds and aquifers. The interaction of groundwater with surface water is a commonly encountered issue in hydrologic and water quality modeling.

For a shallow water table, the interaction between unsaturated and saturated zone becomes very significant. The groundwater table strongly influences the water content in the unsaturated part of the root zone and also represents a moving boundary between saturated and unsaturated conditions.

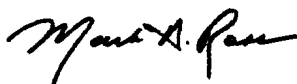
Tampa Bay Area in United States and Beijing, China are both faced the same problem: is highly urbanized and is affected by the impacts from commercial, industrial, and residential development,

including wastewater and industrial discharges, historic loss of wetlands, stream modification for flood control and urban development, and surface water and groundwater pollution from industrial solvents, petroleum hydrocarbons, pesticides, and legacy pollutants like mercury and PCBs. The region has seen an expansion of residential development in the past twenty years, leading to the covering of natural recharge areas, greater storm water runoff, and alteration of stream channels and riparian zones.

Increased awareness of groundwater and surface water interactions can lead to improved water quality in the region area. Integration of groundwater and surface water programs can help avoid problems that arise from managing one resource at the expense of the other particularly as solutions are sought.

The goal of this book is to preserve, enhance, and restore water resources, water quality through a comprehensive understanding of the hydrologic cycle, with particular focus on collaborative engagement between surface water and groundwater modeling, facilitating an increased knowledge of surface water and groundwater interaction.

Director of Center for Modeling
Hydrologic and Aquatic Systems,
Florida, U.S.A



November 3, 2008

前言

目前用到的大部分水文模拟模型只针对地下水或者地表水资源。但是，现在很多最重要的问题都与供水、水质和水生生态系统的健康状态相关，如果没有正确考虑地表-地下水文系统中所有影响水流的作用，就不可能充分解决上述问题。

最近通过实地研究已发现在集成模型研究中有四个重要问题需要注意：① 径流、蒸发散和地下水补给的水文过程被包气带水分动态控制，而包气带水分显现出强烈非均匀性。观察表明，土壤中区需要分化成至少有两个独立的分区。② 对于任意给定的深度，土壤内水分保持区对水文响应的特性。③ 此外，土壤水分野外尺度变异（保持区具有很强的不均匀性）存在于浅层地下水位以上环境非常小的空间尺度（ $<100\text{ m}$ ），需要不同的水分保持模式。④ 空气滞留在浅水表的环境中对控制入渗和观测地下水位发挥了重要作用。在本书的研究中，对建立浅层包气带水分动态集成模型建模所需要考虑的这四个问题进行了深入研究。

此外，本研究旨在运用集成水文模型，严格地对美国西佛罗里达中部地区一个具有详细的大规模实地数据采集基础的流

域，进行模拟测试，测试过程包括土壤水分动态、ET 分配（即蒸发散对植被截流、包气带上层、包气带下层和地下水的分配）和地下水位波动及入渗的测试。集成水文模型（IHM）采用独特的土壤相对湿度的方法对土地分割一体化，目的是模拟复杂的地表水和地下水相互作用过程。在这项研究中，实地连续观测的土壤水分和土壤特性数据被用来制定包气带的上层和下层新的物理基础，并在 IHM 测试和应用。完整的测试充分显示了新的概念模型在土壤水分行为方面是如何降低场地尺度变异，并是如何增强前期土壤湿度条件的代表性。长期（许多天）空气滞留和超孔隙压力的现象在所研究区域被发现和记录，这一现象对土壤贮水和观察水位均有很深的影响。目前的研究运用野外数据和数值模拟方法来量化变化空气加压值。同时，一个基于理想气体原理的分析试算法也用来帮助理解空气加压的影响效果。

最后，敏感性测试被用于 IHM 模型调查依赖水文过程的反应，包括 ET 分布通量，地下水位深度和补给。预期通过校准模型和参数敏感性测试能够模拟重现实地数据，进一步提高对于模型的可靠性和可校准性在区域尺度的认识。此外，在浅水表的环境中，模拟重现包气带的上层和下层的水分保持行为对集成（结合地表水和地下水）水文模型提出了独特的挑战性。IHM 的理论和包气带的垂直行为是通过与在西佛罗里达中部采集的实地数据相比较进行研究。此研究目标是：① 测试 IHM 模型的垂直过程控制地下水位的行为，ET 和补给；② 调查模型参数垂直过程行为的敏感性；③ 提出改进建议和参数在区域流域的示范应用。严格的测试是为了更好地了解 IHM 方法的适应性和/或限制。

本书共有七章：第一章绪论，讲述本书主要研究内容；第二章，详细介绍了现有的几种地表水与地下水集成模型；第三章，介绍 IHM 集成模型包气带的垂直行为；第四章，介绍 IHM 双层包气带模型；第五章，介绍包气带中空气滞留/加压的模拟方法；第六章，介绍地表水与地下水集成模型（IHM）中包气带的土壤水分动态研究、应用与测试；第七章，介绍地表水与地下水集成模型的未来展望。

地表水和地下水集成模型是分析两者相互作用运用较多的方法，而对于集成模型中不同时空尺度的整合、不确定性参数的确定及如何处理水文系统的非线性是亟待解决的关键问题；集成模型结构的严谨和实际运用的困难是集成模型应用和通用化时须及时解决的障碍；伴随着 3S 信息技术（RS，GIS 和 GPS）的快速发展和应用，集成模型如何最大限度地应用 3S 数据也是发展的方向之一；其他的研究方法，如水化学和智能化方法的应用，可能是分析两者相互作用的新的发展方向之一。作者希望借此书为地表水与地下水集成模型研究提供多侧面的理论研究方法，但是由于各种主客观条件的限制，研究成果中难免会有各种不足，某些文字术语的表达还不够流畅，众多不完善之处敬请批评指正。

目 录

第一章 绪 论.....	1
第一节 引言.....	1
第二节 水循环过程.....	2
第三节 地表水研究现状.....	4
第四节 地下水研究.....	6
第五节 地表水与地下水集成模型研究.....	15
第二章 典型地表水和地下水集成模型研究.....	23
第一节 SHE 和 MIKE-SHE 模型.....	25
第二节 tRIBS 模型.....	28
第三节 MODHMS 模型.....	30
第四节 SWATMOD 模型.....	32
第五节 FHM 模型.....	33
第六节 IHM 模型.....	34

第三章 IHM 集成模型理论	39
第一节 IHM 两层-三区土壤水分模型.....	42
第二节 地表水.....	43
第三节 地下水.....	45
第四节 地表水和地下水集成途径.....	46
第五节 模型数据库和 IT 支持.....	68
 第四章 IHM 模拟双层包气带水分运移的理论及方法	71
第一节 双层包气带理论的提出.....	72
第二节 双层包气带理论应用及讨论.....	88
第三节 小结.....	96
 第五章 包气带中空气滞留/加压的模拟方法	99
第一节 空气滞留/加压的背景知识.....	100
第二节 研究地点和数据采集.....	103
第三节 数值模型.....	104
第四节 使用理想气体定律计算过量加压.....	113
第五节 空气滞留研究结果.....	116
第六节 土壤包气带空气滞留结果的讨论.....	128
第七节 对地下水模型的影响.....	130
第八节 小结.....	131
 第六章 IHM 集成模型包气带的土壤水分动态研究与应用 ...	133
第一节 IHM 测试的重要性.....	133
第二节 研究区域概况.....	136

第三节	数据采集.....	139
第四节	实测数据整合.....	159
第五节	模型建立.....	175
第六节	模型校准.....	176
第七节	IHM 测试.....	178
第八节	小结.....	199
第七章	地表水与地下水集成模型的趋势与展望.....	200
第一节	水资源评价现状.....	200
第二节	集成模型在水资源评价中的应用.....	202
第三节	集成模型在水污染评价中的展望.....	205
第四节	未来集成模型的应用展望.....	208
研究结论		210
参考文献		214
附录：变量说明表		232
后记		236

第一章 绪 论

第一节 引 言

由于地表水和地下水密切联系且互相转化，这直接影响着地表水和地下水体的水质和水量。单一的地表水或地下水模型均不能满足研究需求。随着水资源供需矛盾的日趋尖锐，单纯考虑和研究地表水或地下水均不能有效解决水资源紧缺问题，需要将地表水与地下水统一考虑。最近的实地调查数据表明：径流、蒸发散和地下水补给等重要水文过程被包气带水分动态控制，而包气带水分显现出强烈非均匀性（Rahgozar et al., 2005）。例如，从实地观测数据表明，在美国佛罗里达州，占 50%~70% 的总蒸发散量来自一个明确可识别且独特的土壤区，这一土壤区非常接近陆地表面（Rahgozar et al., 2005）。蒸发散（ET）是水文循环的一个重要组成部分，在大部分地区其占年均降雨量的主导地位，例如在美国佛罗里达州，总蒸发散量占年均降雨量高达 70% 或 80%（Bidlake, et al., 1993）。可惜的是，蒸发散量可以说是最困难的水文过程的分析。因此，有一种强烈的

需求,就是寻求一种水文模型,特别是浅水层环境下能正确模拟蒸发散过程,合理地预测径流和持续补给行为。因为蒸发散同时依赖于地表水和地下水的条件,这也引起了对地表水和地下水集成模型的广泛研究。

在过去的几十年里,国际上一些地表水和地下水集成模型已经相继出现。例如 MIKE-SHE (Refsgaard & Storm, 1995; DHI, 1998), MOD-HMS (HydroGeoLogic Inc., 2003; Panday and Huyakorn, 2004), SWATMOD (Sophocleous et al., 1999), tRIBS (Vivoni et al., 2003), FHM (Ross et al., 1997) 和 IHM (Ross et al., 2004)。这些模型提供了不同的方法去定性和定量描述包气带的垂直行为。

第二节 水循环过程

水资源是人类生产和生活不可缺少的自然资源,也是生物赖以生存的环境资源,随着水资源危机的加剧和水环境质量不断恶化,水资源短缺已演变成世界备受关注的资源环境问题之一,甚至有人预言,未来战争的起因很可能就是由于对水资源的争夺。

地球上的水量是极其丰富的,其总储水量约为 13.86 亿 km^3 ,大部分水储存在低洼的海洋中,占 96.54%,地球上的水量 97.47% (分布于海洋、地下水和湖泊水中) 为咸水,淡水仅占总水量的 2.53%,且主要分布在冰川与永久积雪之中 (占 68.70%) 和地下 (占 30.36%)。如果考虑现有的经济、技术能力,扣除无法取用的冰川和高山顶上的冰雪水储量,理论上可以开发利用的淡水不到地球总水量的 1%。实际上,人类可以利用的淡水量远低于

此理论值，主要是因为在总降水量中，有些是落在无人居住的地区如南极洲，或者降水集中于很短的时间内，由于缺乏有效的水利工程措施，很快地流入海洋之中。由此可见，尽管地球上的水是取之不尽的，但适合饮用的淡水水源则是十分有限的。

水循环是多环节的自然过程，全球性的水循环涉及蒸发、大气水分输送、地表水和地下水循环以及多种形式的水量贮蓄。降水、蒸发和径流是水循环过程的三个最主要环节，这三者构成的水循环途径决定着全球的水量平衡，也决定着一个地区的水资源总量。

蒸发是水循环中最重要的一环之一。由蒸发产生的水汽进入大气并随大气活动而运动。大气中的水汽主要来自海洋，一部分还来自大陆表面的蒸发散。大气层中水汽的循环是蒸发—凝结—降水—蒸发的周而复始的过程。海洋上空的水汽可被输送到陆地上空凝结降水，称为外来水汽降水；陆地上空的水汽直接凝结降水，称内部水汽降水。总降水量与外来水汽降水量的比值称该地的水分循环系数。全球的大气水分交换的周期为 10 天。在水循环中水汽输送是最活跃的环节之一。

径流是一个地区（流域）的降水量与蒸发量的差值。多年平均的大洋水量平衡方程为：蒸发量=降水量+径流量；多年平均的陆地水量平衡方程是：降水量=径流量+蒸发量。但是，无论是海洋还是陆地，降水量和蒸发量的地理分布都是不均匀的，这种差异最明显的就是不同纬度的差异。

陆地上（或一个流域内）发生的水循环是降水—地表和地下径流—蒸发的复杂过程。陆地上的大气降水、地表径流及地下径流之间的交换又称三水转化。流域径流是陆地水循环中最重要的现象之一。

地下水的运动主要与分子力、热力、重力及空隙性质有关，其运动是多维的。通过土壤和植被的蒸发、蒸腾向上运动成为大气水分；通过入渗向下运动可补给地下水；通过水平方向运动又可成为河湖水的一部分。地下水储量虽然很大，但却是经过长年累月甚至上千年蓄积而成的，水量交换周期很长，循环极其缓慢。地下水和地表水的相互转换是研究水量关系的主要内容之一，也是现代水资源计算的重要问题。

同世界主要国家比较，我国水资源总量是可观的，但是由于人口众多，导致人均水资源量远远低于多数国家，也大大低于全世界的平均水平。如果从单位耕地面积水量来看，我国也远远小于世界的平均水平，我们用全世界 7.2% 的耕地，养育了全球 1/5 的人口，从中可以看出我国的水土资源是多么稀缺。应该特别强调的是，由于我国国土辽阔，各地区之间自然条件存在很大差异，导致水资源丰富程度出现显著的差别。全国水资源 80% 分布在长江流域及其以南地区，人均水资源量为 $3\,490\text{ m}^3$ ，公顷水资源量约 $64\,500\text{ m}^3$ ，属于人多、地少，经济发达，水资源相对丰富的地区。长江流域以北广大地区的水资源量仅占全国 14.7%，人均水资源量约 770 m^3 ，公顷约 $7\,065\text{ m}^3$ ，属于人多、地多，经济相对发达，水资源短缺的地区，其中黄淮海流域水资源短缺尤为突出。

第三节 地表水研究现状

地表水是河流、冰川、湖泊、沼泽四种水体的总称，亦称“陆地水”。它是人类生活用水的重要来源之一，也是各国水资源的主要组成部分。

中国大小河流的总长度约为 42 万 km, 径流总量达 27 115 亿 m^3 , 占全世界径流量的 5.8%。中国的河流数量虽多, 但地区分布却很不均匀, 全国径流总量的 96% 都集中在外流流域, 面积占全国总面积的 64%, 内陆流域仅占 4%, 面积占全国总面积的 36%。冬季是中国河川径流枯水季节, 夏季则为丰水季节。

中国冰川的总面积约为 5.65 万 km^2 , 总储水量约 29 640 亿 m^3 , 年融水量达 504.6 亿 m^3 , 多分布于江河源头。冰川融水是中国河流水量的重要补给来源, 对西北干旱区河流水量的补给影响尤大。中国的冰川都是山岳冰川, 可分为大陆性冰川与海洋性冰川两大类, 其中大陆性冰川约占全国冰川面积的 80% 以上。

在地表水评价和研究中郭洪宇(2001)作了较全面的总结: 确定性模型可分为两大类: 第一种是根据质量守恒定律和能量守恒定律建立模型的方法, 它是具有严密物理概念和数学公式的数学物理方法。这种方法需对水文循环过程中的物理机制进行系统的科学研究, 如果水循环各子过程都能用物理定理来描述, 则可对各个水文过程建立具有严格物理基础的数学模型。这样的模型由偏微分方程和初始条件、边界条件组成的边界值问题, 如河道不稳定流的圣维南方程等。这类方法只有在边界条件简单, 资料比较充分的小范围区域得以应用。由于水文现象本身的复杂性及人们对它们认识的局限性, 自然流域一般很难满足这些条件。第一种是目前应用最广泛的概念性流域水文模型, 这种模拟方法从概念上把组成水文循环的各个子过程结合起来。模型以径流试验成果为基础, 强调整体性和内部协调性及逻辑上严密完整的思想。概念性水文模型的计算步骤与方法, 称为模型结构。在研究模型结构时, 要分析流域相应的各

组成部分, 根据我们的理性认识用流程图把各个部分相互连接起来。在模型结构中的参数规定了流域的水文特性, 有了结构与参数之后, 流域的水文规律与水文特性就完整地描述出来了。

在进行地表水资源评价时, 为使成果更能客观反映区域水资源现状情况, 应将年径流量系列向现状还原。由于人类活动影响使流域下垫面条件显著改变, 今后的地表产流量再也不会回到天然的情况。而水资源规划、管理和保护等工作需要以符合客观实际的地表水资源量作为依据。因此, 将年径流量向现状还原更具有实际意义。

地表水资源的评价计算方法有待改进。降水径流关系法虽然较为实用, 但所得成果在某些流域和分区的精度稍低。因此, 在资料具备的流域或分区, 可采用流域模型如新安江模型、四水转化模型等进行水资源评价计算, 从而得到相应区域地表水资源量。

分项还原法进行径流量还原计算时, 若水库蒸发量及渗漏量不予还原, 则水库断面以上区间的降水径流关系就不能得到正确反映。特别对于蒸发量及渗漏量较大的水库, 其区间的降水径流关系与附近流域的降水径流关系不能协调一致, 并影响年径流深等值线的绘制。

第四节 地下水研究

地下水数学模拟模型, 就是将复杂的水文地质条件概化为水文地质概念模型, 并在此基础上抽象为数学模拟模型, 用以定量描述地下水系统各变量和参数之间的关系, 并通过对模型的识别和验证, 进一步检验模型对地下水系统的行为和功能的