

水文水资源系列丛书

变化条件下流域水循环 影响机理及其生态响应过程

BIANHUA TIAOJIANXIA LIUYU SHUIXUNHUAN
YINGXIANG JILI JIQI SHENGTAI XIANGYING GUOCHENG

薛联青 何新林 冯 起 杨 广 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

水文水资源系列丛书

变化条件下流域水循环影响机理 及其生态响应过程

薛联青 何新林 冯 起 杨 广 著

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 提 要

本书重点分析了变化环境下的干旱内陆河流域的水循环及绿洲化荒漠化生态响应过程。深入开展了变化环境下生态-水文过程中不同要素间相互作用关系研究,揭示了强人类活动对流域水循环过程及生态的影响机理,是国家自然科学基金项目多项研究成果的系统总结。本书内容主要涉及典型干旱流域人类活动对水循环和环境因子的影响及变化过程研究,通过研究平原、山区水库、大面积节水灌溉对区域小气候、流域水循环要素及生态的影响,流域中下游植被蒸散耗水在环境变化特征及其影响机制,提出流域合理的水资源配置方案。考虑生态和人类需水的互相协调作用,确定合理的生态承载位,提出水资源开发利用适应性对策,为变化环境下流域生态安全维护提供科学依据和技术支撑,对干旱区绿洲适宜发展规模确立、水资源复合生态系统的综合治理及生态-环境-经济的可持续发展具有重要参考。

本文可供水文水资源学科、环境科学、地理科学、资源科学、农业工程及水利工程等学科的科研人员、大学教师和相关专业的研究生和本科生,以及从事水资源管理、水土保持工程及环境保护方面的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变化条件下流域水循环影响机理及其生态响应过程/薛联青等著. —南京:东南大学出版社,2018.9

水文水资源系列丛书

ISBN 978-7-5641-7788-1

I. ①变… II. ①薛… III. ①流域—水循环—影响—生态环境—研究 IV. ①X171.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 215707 号

变化条件下流域水循环影响机理及其生态响应过程

出版发行 东南大学出版社

出版人 江建中

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 700 mm×1000 mm 1/16

印 张 15.75

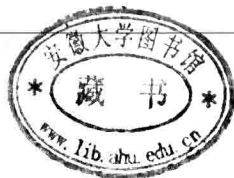
字 数 310 千字

版 次 2018 年 9 月第 1 版

印 次 2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-7788-1

定 价 62.00 元



(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

前 言

干旱区在世界上广泛分布,是全球环境变化与可持续发展研究中的重点区域之一。由于干旱区水资源缺乏以及水循环系统的独特性,水循环各环节受陆表和气候影响显著,且受地形起伏和热量分布巨大差异的影响,水循环过程在很小尺度的时空变异性显著,生态环境极其脆弱。大多干旱区流域所经历的“先开发地表水、后大规模开发地下水,先大规模开发农业用水、后逐渐重视城市和工业用水”的过程,使得水资源开发利用所引起的生态环境问题更为普遍和突出,越来越受到关注。

玛纳斯河流域属于西部典型的干旱半干旱内陆河流域,流域平均年降水量不足 200 mm,蒸发能力为降水量的 8—10 倍。流域所有水资源被流域内生产、生活、生态所消耗,三者消耗的结构和水资源总量及分布的变化直接决定了生态系统的不稳定性与脆弱性,水资源是玛纳斯河流域基本保障性自然资源和战略性经济资源,是制约经济社会发展、生态环境建设的最关键因素。近 50 年来,人类大规模水资源开发利用活动,改变了流域水循环自然变化的时空格局和过程,造成下游水量减少、河道缩短、尾间湖干涸,流域水文系统的整体性及自然水循环过程发生巨大变化,原有脆弱的生态平衡被打破,生态环境质量下降,最终产生了以土地荒漠化为典型特征的生态问题。由此,变化环境下引起的水资源无论在量上还是时空分布上的变化,都使得流域水资源开发利用过程中生态维护与经济矛盾的矛盾尤为突出。因此,开展变化环境下玛纳斯河流域的生态-水文过程作用机制研究,对气候和人类活动影响下的区域水循环研究有着重大的学术价值,对解决干旱区生态系统的不稳定性与脆

弱性,支撑以绿洲农业为基础的干旱区经济社会发展将产生重要影响。

本书是作者在水资源演变规律、流域水文模拟和生态保护领域研究的积累,汇集了国家重点研发计划水资源高效开发利用专项“西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用”项目(2017YFC0404304)、国家自然科学基金项目“玛纳斯河流域绿洲水文生态格局演变机理及适宜发展模式研究”(51779074)、“节水灌溉条件下玛纳斯河流域绿洲化盐漠化响应机理研究(U1203282)等部分研究理论与技术成果。全书由薛联青、何新林、冯起、杨广统稿。廖淑敏、杨帆、杨文新、任磊、祝薄丽、冯怡、杜玉娇、李文倩等研究生参与了本书整编及校验工作,在此表示感谢。同时对作者所引用的参考文献的作者及不甚疏漏的引文作者也一并致谢!

本书的出版得到国家重点研发计划水资源高效开发利用专项(2017YFC0404304)及国家自然科学基金 51779074、U1203282 的资助,在此表示感谢!由于作者水平有限,编写过程中难免存在很多不足及顾此失彼之处,敬请读者给予批评指正!

著 者

2018 年 5 月

目 录

1	绪论	(1)
1.1	干旱内陆河水循环模拟研究	(1)
1.1.1	山区模拟	(1)
1.1.2	包气带模拟	(2)
1.1.3	地下水模拟	(3)
1.2	干旱内陆河地表水与地下水转化研究	(6)
1.2.1	地表水和地下水耦合模拟	(6)
1.2.2	分布式水文模型模拟	(9)
1.2.3	地下水数值模型模拟	(11)
1.3	干旱内陆河生态水文响应研究	(14)
1.3.1	绿洲生态系统与水资源的关系	(14)
1.3.2	干旱区荒漠生态系统与地下水的关系	(14)
1.3.3	玛纳斯河流域生态水文过程	(15)
1.4	本章小结	(17)
2	研究区概况	(18)
2.1	自然地理状况	(18)
2.1.1	地理位置	(18)
2.1.2	地形地貌	(19)
2.1.3	气候特征	(20)
2.1.4	土壤植被	(22)
2.1.5	水文地质	(22)
2.1.6	水资源特征	(25)
2.2	水循环特征	(25)
2.2.1	流域水循环特征概化	(26)
2.2.2	地下水循环及特征	(27)
2.3	土地利用变化特征	(28)
2.4	水土资源开发利用特征	(30)
2.5	本章小结	(31)

3	流域水资源演变规律分析	(32)
3.1	研究方法	(32)
3.1.1	Mann-Kendall 非参数检验法	(32)
3.1.2	集合经验模态分解	(33)
3.1.3	小波分析	(35)
3.2	降水变化	(36)
3.2.1	降水年内变化特征	(36)
3.2.2	降水年际变化特征	(37)
3.3	气温变化	(39)
3.3.1	气温年内变化特征	(39)
3.3.2	气温年际变化特征	(39)
3.4	蒸散发变化	(42)
3.4.1	站点尺度蒸散发量变化	(42)
3.4.2	区域尺度蒸散发量变化	(45)
3.4.3	绿洲区蒸散发量变化	(51)
3.4.4	不同土地类型蒸散发量分析	(52)
3.5	径流变化	(54)
3.5.1	径流年内变化特征	(54)
3.5.2	径流年际变化特征	(55)
3.6	入渗变化	(58)
3.6.1	土壤入渗	(58)
3.6.2	河道入渗	(58)
3.6.3	渠系入渗	(59)
3.7	地下水水位变化	(60)
3.7.1	年内变化	(60)
3.7.2	年际变化	(61)
3.8	气候因子预测	(61)
3.9	本章小结	(64)
4	流域生态水文景观格局分析	(65)
4.1	研究方法	(65)
4.1.1	数据处理	(65)
4.1.2	土地利用类型信息提取	(65)
4.1.3	土地利用时空格局分析	(66)
4.2	流域土地利用/植被覆盖动态演变分析	(68)
4.2.1	近 50 年玛纳斯河流域土地利用/土地覆被变化特征	(68)

4.2.2	土地利用动态度分析	(71)
4.2.3	土地利用结构变化分析	(72)
4.2.4	土地利用综合程度分析	(74)
4.3	景观格局变化及其驱动机制	(75)
4.3.1	景观格局指数分析	(75)
4.3.2	驱动机制分析	(76)
4.4	本章小结	(77)
5	流域水循环过程模拟研究	(78)
5.1	流域降雨径流模型建立	(78)
5.1.1	NAM 模型	(78)
5.1.2	融雪径流模型	(83)
5.2	平原区包气带水流模拟	(83)
5.2.1	Hydrus-1D 模型	(83)
5.2.2	模型构建	(84)
5.2.3	模型验证	(90)
5.2.4	包气带水流模拟	(90)
5.3	流域一维水动力模型构建	(96)
5.3.1	连续方程与动量方程	(96)
5.3.2	模型初始条件和边界条件	(96)
5.3.3	河网概化	(96)
5.3.4	断面文件	(97)
5.3.5	初始、边界条件	(99)
5.3.6	模型参数	(99)
5.4	流域 MIKE11/NAM 和 MIKE11/HD 模型计算结果及分析	(99)
5.5	平原区地下水补排关系模拟	(101)
5.5.1	模型参数率定	(101)
5.5.2	数值模型的拟合	(102)
5.5.3	数值模型的检验	(105)
5.5.4	模型效果评价	(106)
5.5.5	地下水补排响应动态模拟	(107)
5.6	本章小结	(116)
6	玛纳斯河流域地下水数值模拟及其变化规律分析	(118)
6.1	地下水系统数值模型	(118)
6.1.1	Visual-MODFLOW 模型	(118)
6.1.2	数值模型的求解	(118)

6.2	流域地下水数值模型建立	(121)
6.2.1	研究区水文地质勘探结果分析	(121)
6.2.2	研究区含水层系统概化	(122)
6.2.3	研究区地下水数值模型边界条件设定	(124)
6.2.4	研究区地下水数学模型	(126)
6.2.5	抽水井及观测井的设定	(126)
6.2.6	模型率定与验证	(128)
6.3	地下水系统数值模型模拟与验证	(132)
6.3.1	研究区地下水水位动态变化模拟结果及分析	(132)
6.3.2	研究区地下水水位降深模拟结果及分析	(133)
6.3.3	气温对研究区地下水埋深影响分析	(133)
6.3.4	研究区地下水水均衡计算及分析	(135)
6.4	本章小结	(136)
7	人类活动对水循环过程的影响研究	(137)
7.1	上游山区水库的修建对流域地表-地下水转化影响研究	(137)
7.1.1	基于稳定同位素流域地表-地下水转化过程分析	(137)
7.1.2	山区水库的兴建对流域地表-地下水转化过程的影响分析	(143)
7.2	输配水渠道防渗对水循环影响机理研究	(147)
7.2.1	研究区输配水渠道概况	(147)
7.2.2	数据与方法	(148)
7.2.3	灌区地下水均衡计算结果与分析	(149)
7.3	大面积滴灌措施对绿洲农田水循环的影响机理研究	(152)
7.3.1	膜下滴灌对农田蒸散发的影响	(152)
7.3.2	膜下滴灌对农田水分下渗的影响	(155)
7.4	节水措施对水循环过程的影响研究	(161)
7.4.1	MIKE SHE 模型	(161)
7.4.2	模型建立	(162)
7.4.3	模型参数率定及验证	(163)
7.4.4	节水灌溉情况模拟分析	(166)
7.5	本章小结	(167)
8	节水条件下玛纳斯河流域生态水文响应研究	(169)
8.1	节水条件下绿洲化、盐漠化植被演化对水-盐动态响应	(169)
8.1.1	蒸腾发与土壤盐分空间分布的动态响应关系	(169)
8.1.2	土壤-地下水水盐传输过程机理	(170)
8.1.3	地下水与土壤盐分空间分布的动态关系	(176)

8.2	节水条件下水-土-植被系统对绿洲化盐漠化动态响应	(176)
8.2.1	数值模型模拟	(177)
8.2.2	土壤水盐运移模拟及规律分析	(179)
8.3	节水条件下植被水分传输过程对潜水埋深的响应	(180)
8.3.1	研究方法	(180)
8.3.2	不同潜水埋深下梭梭、柽柳茎流特性和光合蒸腾特性分析	(181)
8.3.3	不同潜水埋深下梭梭、柽柳生长生理指标分析	(195)
8.4	本章小结	(205)
9	节水条件下流域生态适应性调控机制研究	(207)
9.1	节水措施下流域生态系统适应性分析	(207)
9.1.1	压力-状态-响应模型	(207)
9.1.2	生态系统适应性评价标准	(209)
9.1.3	生态系统适应性评价	(210)
9.2	节水措施下基于生态安全的水资源合理配置研究	(213)
9.2.1	灌区水利工程基本概况	(213)
9.2.2	水库群配水和各灌区规模确定	(214)
9.2.3	节水条件下玛纳斯河灌区水资源优化配置模型构建	(215)
9.2.4	地下水及泉水利用方案	(218)
9.2.5	优化结果分析	(219)
9.3	本章小结	(223)
参考文献		(224)

1.1 干旱内陆河水循环模拟研究

1.1.1 山区模拟

水循环是指地球表面各种形式的水体以气态、固态、液态的形式在海洋、大气和陆地间不断循环,并在外界环境因子的作用下不断相互转化的过程。山区是径流的产生和交汇区,模拟山区径流是研究流域水循环的基础。人为因素和自然因素共同以间接和直接的方式影响着山区水循环。土地利用和土地覆被影响了地表产流条件,改变了土地利用结构和下垫面条件,造成糙率变化和地表坡度变化,引起地表径流、入渗能力、地表截留量和地表蒸发的改变。在全球变化研究中土地利用/覆盖变化 LUCC(Land-Use and Land-Cover Change)变得越来越重要,相关的研究项目在各国陆续启动。1995 年一个详细的 LUCC 研究计划被国际全球环境变化人文因素计划 IHDP 和 IGBP 共同推出,并为世界各国的研究确定了方向。1967 年 Hewlett 和 Hibbert 在 LUCC 水文效应研究方面大都采用实验流域的方法,并分析了实验流域的年径流。在 1970 年以后,土地利用/覆被变化的水文响应研究,逐渐从实验流域观测统计分析转向水文模型方法,不能处理不同水文过程和土地利用类型是概念模型的缺陷,比如 CHARM、HBV、HSPF、SCS 与 CELIHYM 模型等。相比较而言,分布式物理模型能够清晰反映地表土地特征如坡度、地貌、地形高程和形态等,能够将模型参数和土地地表特征直接联系,在预测和解释气候变化和土地利用变化的影响方面具有很大应用前景。我国学者在 LUCC 对水循环演变影响方面也做了大量的研究。刘昌明等在黄土高原区曾分析了不同下垫面条件对产流的影响。郝芳华在黄河下游区采用基于 Arcview 的 SWAT 模型研究了不同下垫面条件对产流的影响。在 1988—1996 年中,水保法和水文法被许多研究机构采用,研究水土保持在黄河中游多沙粗砂区对河川径流量的影响,根据各支流蓄水指标及其水土保持措施的数量反映径流量的变化量,采用流域内水文站的降雨径流基本规律和水文观测资料,研究水土保持对径流变化的影响。张玲、张胜利、朱劲伟、高人、杨海军等均从不同角度研究了森林植被对水文过程的影响。以不透水比为

综合参数,依据北京城区及近郊大量实测雨洪资料,建立了城市综合产流模型。目前,在森林、城市化建设、水土保持对蒸发及径流的影响上,主要集中于土地利用/覆被变化对水资源演变的影响研究,而对整个水资源量变化和水循环过程的研究则比较少。

水循环和水资源已成为世界范围研究和关注的重大研究课题,世界各国对此高度重视。有关全球水文循环的物理图像,早在 20 世纪 70 年代就已经提出来了,但由于缺少观测资料,尚不能给出全球水文循环的定量结果。直到 80 年代,资料有了明显改进,水文学家才开始对全球水文循环进行研究计算。由于人类排灌活动的产物就是平原灌区,开放性的自然-人工复合水循环是其水循环的主要组成部分,可以说是人类活动直接影响着水循环,直接改变了水文循环过程,所以平原灌区水循环的研究有别于流域或者大区域尺度上的水循环研究。为了给水资源合理配置提供科学依据,针对平原灌区小尺度水循环的研究适合建立水文模型,从而分析平原灌区的水文演变规律,主要是通过对平原灌区水利工程的运行和建设、城市化、土地利用类型的改变、人工取用水等典型的人类活动对水循环整体过程及分项的作用机制,进行分析,总结其演变规律。平原灌区水文模型也就是将整个平原灌区作为研究单元,把超渗产流、汇流及蓄满产流等概念考虑进去,并依据流域观测流量来率定模型参数及模拟平原灌区产汇流过程;自然-人工复合型的地表水系统和地下水系统的研究是平原灌区陆地水循环的主体部分,该系统的必要组成部分就是人类。在以往的国内外研究当中,水分在不同系统之间的传输已经作为重要的科学领域,并成为盐分控制的主要因素。张银辉、罗毅利用分布式水文模型研究了内蒙古河套灌区的水循环特征;岳勇、郝芳华等通过河套灌区陆面水循环模拟研究,得出河套灌区水循环过程是一种“负水平衡”的垂向水循环。

干旱区内陆河流域的地表水为地下水的最主要补给来源,地表水、地下水相互转化频繁,其中地下水作为地表水资源不足时的补给水源,具有非常重要的生态地质作用(Abu Jaber N 等;金晓媚,杨泽元等)。张军民在玛纳斯河流域水文循环及水资源二元划分研究中指出,平原区水循环发生着以人工水循环为主导的二元分化,人工绿洲水分使垂向循环加强,且天然绿洲及过渡带的水平方向径流量相对减少;邵景力通过建立数值模拟模型对玛纳斯河流域山前平原区地下水系统进行了分析;刘志明在分析研究玛纳斯河流域平原区水循环和水资源组成时采用了同位素混合模型;李文鹏分析了在西北内陆干旱盆地一带的地下水排泄方式。

1.1.2 包气带模拟

包气带在水文循环中处于重要的位置,并与地表降水入渗、潜水蒸发、地表蒸发、地下补给等主要水文过程密切相关,包气带对于研究地下水来源具有非常重要

的作用。在西部干旱半干旱地区,包气带中的水分主要是以液态水流动为主,但是也有部分水分是以气态形式进行运移,说明包气带中的水分不是静止不动的。

人们很早就开始研究包气带水分的运移,并且有了一定的论述和观测结果。法国工程师 Darcy 做了一个简单的均匀砂质滤层的渗透试验,并从中提出了达西定律,从而开启了近现代的包气带定性定量研究篇章。自然界物质运动的基本规律是质量守恒定律,当然包气带的水分运动一样适用于质量守恒定律。在连续方程和达西定律的基础上, L. A. Richard 提出了 Richards 方程,并把含水量当作因变量来表示。目前的包气带水分动态变化特征大都指的是 Richards 方程,该方程是把数学物理的方法引入了包气带水分运移研究,对包气带水分的动态变化特征进行了定量分析,从而使得包气带水分研究由静态到动态、定性到定量。随着包气带水分运动的理论不断成熟,使得包气带数值模拟的研究方法也得到了迅速发展。Philip 在非恒温条件下提出了土壤水流运动方程。随着深入研究包气带水分数值模拟,各国专家学者更为细致全面地对包气带水分运移进行了研究。

包气带水分动态模拟模型主要可以分为概念性、机理性和经验性,其中概念性模型主要是指农田水量平衡模型,机理性模型主要是指不同条件下的包气带水分动态模型,经验性主要是指 BP 网络模型和指数消退模型,如根系吸水条件下的水分运移模型、水热耦合运移模型、等温蒸发情况下水分运移模型以及水盐运移模型等。周维博在野外试验的基础上推导出了裸地土壤水动力模型,并分析了在蒸发和降雨条件下裸土包气带水分运移及转化;彭建萍等在植物根系吸水条件下提出了一维包气带水分运移模型;吕华芳等在其十余年对土壤水动力学领域研究的基础上,总结介绍了国内外主要的包气带水分运移规律。

不同的研究地理条件下包气带水分运动模型的提出,使如何快速简洁地对不同模型进行运算模拟提出了紧迫的要求,所以多种包气带水分运移模型软件也相应而生。当前国内外比较常用并且已较成熟的模拟包气带水分运移的软件主要包含 SESOIL、SWAC - ROP、VADOSE/W、HYDRUS - 1D (2D、3D) 等。其中 HYDRUS - 1D 是由美国盐土实验室开发的软件,这是一款专门模拟一维包气带水分运移、热运移和溶质运移,并且同时考虑大气、地下水、地表和植被等因素,并且是一款应用非常广泛的包气带水分运移模拟商业软件。国内外许多专家学者利用 HYDRUS - 1D 软件对包气带进行了多方面的研究,本书将采用 HYDRUS - 1D 软件对玛纳斯河流域平原区包气带水分运移进行模拟研究。

1.1.3 地下水模拟

地下水在干旱内陆河流域的水资源中占重要地位,其模拟的准确性对于地下水资源演变规律的影响巨大,故而需要选择合适的地下水模拟方法。地下水数值

模拟能达到很高的精度,其发展大致如下:

19 世纪中叶,达西(Henry Darcy)进行了多年的实验,发现了在层流状态下,不同水头差和不同介质中,水流运动不同,并总结成了达西定律(Darcy's Law)。达西 150 年前的反复实验所得到的理论是目前地下水运动研究的基础。十多年后,将达西定律运用于实际地下水流计算的是裘布依(Dupuit),他将潜水流动状态概化,提出了只考虑水平分速度的计算方程,地下水稳定流理论由此发源。1886 年,F. Hanm 将等势面引入地下水运动的描述中,并用调和方程变换求解,为地下水运动的数学描述打开了新篇章。1904 年布西涅斯克提出了一个非线性抛物型偏微分方程描述潜水流动,潜水在各个维度,渗透性不一的岩层的流动也可以用此方程描述,稳定流理论有了发展。经过近百年的发展,各种地下水运动情况受到不同学者的关注研究,并结合具体的实际情况,得到了针对不同情况的稳定流计算公式,稳定流理论适应性增强。

地下水非稳定流相对于稳定流更难以描述和计算,其发展主要从 1935 年开始。泰斯(C. V. Theis)为了解决更加实际的井流问题,研究了在均质含水层中,井水位降深贮水系数、导水系数、抽水量以及抽水延续时间之间的关系,提出了泰斯方程,成为非稳定流计算的先驱。

到了 20 世纪 50 年代,雅克布(C. E. Jacobo)、汉上什(M. S. Hantuooh)等人,建立了非均匀介质的地下水非稳定井流的模型,地下水在不同含水层间越流补给的问题开始得到解决。从此,地下水非稳定流理论更加接近实际,能解决更多问题,发展加快。

20 世纪 60 年代以来,计算机运算能力增强,在其辅助下,偏微分方程能够得到更接近实际的数值解,能解决一些解析解法无法解决的问题。最早出现的数值解法是有限差分法(FDM),在划分网格后,用差商代替偏导数,在此基础上发展出有限元法(FEM)、边界单元法(BEM)和有限分析法(FAM)等多种方法。

在地下水数值模拟中,国内外目前应用最广泛的主要是有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)两种方法。有限差分法的基本思想是将方程边界内的区域按一定步长得到有限个离散点,用这些点的集合代替整个范围,这些点的差商近似等于偏导数,进而将偏微分方程转变为线性方程求解。有限差分法最早应用于地下水问题应追溯到 60 年代中期,凭借其简单、所需资源少的优势,在计算机平台上得到了广泛应用。

有限差分法的优点:简明,易操作,计算快,易实现。但受到其离散和网格划分的制约,在地下水溶质运移、非均质含水层及不规则含水边界的处理较难。

有限元法是我国数学家冯康 1965 年创建的,其基本思想是采用插值近似使控制方程通过积分形式在不同意义下得到近似的满足,把研究区域转化为有限数目

的单元而列出计算格式。该方法自 20 世纪 60 年代引入地下水计算领域后,在数十年时间内得到长足的发展;1968 年 Jevendal 等人用有限元法求解非稳定流问题,1976 年 Capta 等人用三维等参数有限元法对多层地下水进行数值模拟。

有限差分法的代表软件:Visual MODFLOW(Modular Three-dimensional Finite Difference Ground-water Flow Model,模块化三维有限差分地下水流动模型)。Visual MODFLOW 是加拿大 WATERLOO 水文地质公司在美国地质调查局发布的 MODFLOW 基础上研发而成的。其界面可操作性得到加强,二维地质建模过程得到简化,在国内外得到广泛的应用。Visual MODFLOW 是有限差分的流行软件,在国内外得到广泛的应用。A Facchi 在波河平原(Padana Plain)将包气带模型与 MODFLOW 相耦合,更好地模拟了灌溉用水对于地下的影响。Saghra-vani 和 Seyed Reza 等在马来西亚大学工程实验区,人工控制施肥,利用 Visual MODFLOW 模拟了磷在地下潜水中的运移,得到了施肥与地下水磷运移的关系。N. C. Mondal 和 V. S. Singh 2012 年利用 Visual MODFLOW 和 MODPATH 相结合,模拟了 Kodaganar 流域上游的地下水函数层溶质运移,预测了 20 年后的污染物浓度。Carma San Juan 等采用该软件对 Jackson Hole 的冲积含水层进行了地下水数值模拟,并通过地下水均衡项对比分析校准该数值模拟模型。

我国在 1999 年引入 Visual MODFLOW 软件,武强等在《水文地质工程地质》中详细介绍了这个软件的特点,并在开滦东欢坨矿进行了涌水模拟,取得了较好的效果。2002 年,束龙仓等通过该软件,计算了普拉特河(Platte River)与周边地下水的水量交换,得到了地下水补排差异。贾金生等建立了栗城县的地下水数值模型,计算了农业开采量变化下的地下水水位变化,得到了华北平原地下水的动态规律。干旱灌区在地下水大量开采情况下,出现许多问题,受到大量学者的关注。尹大凯等采用该软件对于宁夏银北灌区建立了数值模型,采用了三维数值模拟,得到了地下水对于该灌区渠道引水和机井抽水的响应。类似的研究还有马明在 2004 年对于甘肃疏勒河项目昌马灌区的地下水动态模拟,余维在河北省三河市井灌示范区建立的数值模型,并进一步进行了当地水资源优化配置的研究。近年来,西北农林科技大学的黄一帆、刘俊民、刘平等利用该软件建立了泾惠渠灌区的地下水三维数值模拟模型。刘平平还利用此模型与水资源优化模型耦合,建立起了井渠结合灌区水资源联合调控模型。该软件广泛运用于模拟灌区地下水运动,同时城市地下水以及溶质运移模拟的研究也成为热点。2004 年,葛伟亚进行了盐城市地下水数值模拟,较好地处理了海洋边界。张建伟模拟了松原市地下水运动补排以及溶质运移情况,并建立了当地环境综合信息系统。济南泉水经济比重较大,该地区地下水模拟研究较多。刘波采用该软件建立地下水模型后分析了当地漏斗情况;吴夏懿以 Visual MODFLOW 建立的模型为基础评价了当地地下水的脆弱性;

近年来,王津津在建模基础上提出了补给方案;祁元昊分析了南水北调下当地地下水的水位变化。Visual MODFLOW 适应各尺度模拟,在流域尺度上的模拟精度高。任加国利用该软件建立了叶尔羌河流域地下水模型,并成功分析了三水转化。卢文喜等建立了饶力河流域的三维数学模拟模型,进行了地下水水位预测。同时在溶质运移方面,该软件有较强的模拟功能。全爽利用该软件建立了白沙河—墨水河流域的地下水及溶质的模型,计算了入海水量和盐量,分析了地下水污染对于海洋的影响。杨楠楠利用该软件建立了青岛大沽河流域地下水二维模型,并成功分析了水利工程对于地下水水位及硝酸盐污染的影响。综上,Visual MODFLOW 在各尺度,各地区均能建立起符合实际的地下水模型进行数值模拟,是研究地下水资源演变规律的较为合适的软件。

1.2 干旱内陆河地表水与地下水转化研究

1.2.1 地表水和地下水耦合模拟

依据水文循环的系统性和特殊性,很早就有学者把视角放在了地表水和地下水联合模拟上,以水资源可持续利用为重点研究目标,将流域看作是一个地表水与地下水联合利用的整体来研究。

国外在这方面的研究比较早,Buras 等最初建立了地表水和地下水联合利用模型,用以计算地表水和地下水转化通量,并且依据所建模型预测地下水的动态变化,为区域水资源和合理规划提供参考;Morelseytoux H. J. 为了计算流域的地下水可开采率,建立了河流和地下水含水层耦合模型,计算地表水补给地下水水资源量,计算最大地下水可开采率,为维持地下水恒定水位提供有力参考;Cunningham A. B. 等在美国内华达州 Truckee 流域利用有限单元法求解一维水动力和二维地下水耦合模型,通过参数敏感性分析和模型不同条件下的预测研究,求解河流和地下水之间的转化关系;Jamshidi M. 等建立了用于规划流域水资源合理规划的模型,通过地表水和地下水的联合利用制定流域水资源合理利用模式,提高水资源的可持续利用率;Miles J. C. 等针对英国中部流域的水资源利用现状,建立河流和地下水耦合模型,并利用有限差分方法求解模型,用来预测流域地下水动态变化规律;Willis Robert 建立了地表水和地下水联合利用模型,结合有限单元法和矩阵指数计算方法探求农业用水效率的提高,为地区社会经济的发展提供更多的可利用水量;Ackerer Ph. 等建立了地表水和地下水耦合模型,并利用试验得到河流水位数据和地下水埋深数据计算地表水和地下水交换通量,并且用地下水水位验证所建模型的模拟效率,试验取得了不错的效果;Swain Eric D. 等探讨了不同的影响

因素对于地表-地下水耦合模型模拟精度的影响,分析不同时间尺度下模型模拟效果的差异性,对于模型不确定性也给出了一些建议;Matsukawa Joy 在 Mad 流域用系统动力学理论建立地表-地下水利用模型,设定不同的控制条件,例如人口数量,社会经济指标等来求解模型,为流域的水资源合理规划给出建议;Swain Eric D. 等将地表水模型 BRANCH 的计算结果耦合作为地下水数值模型 MODFLOW 的初始输入数据,实现地表水和地下水的松散耦合,使得两个模型更加适用于当地流域,为流域水资源的可持续利用提供更多参考;Basaqoqlu Hakan 等构建地表水和地下水相互作用模型,综合考虑水库蓄水泄水、河道及渠系渗透,农业用水和城市用水等建立目标函数,用模型的计算结果制定区域水资源合理利用规划;Halford Keith J. 等依据前期收集的流域水文数据建立地表水和地下水联合利用模型,并利用退水曲线分析地表水与地下水之间的转化关系,分析模型不确定性,找出对模型影响较大的参数,提高了模型的模拟精度;Cosgrove Donna M. 等在 Snake 流域运用瞬时响应函数建立地表水和地下水综合管理模型,提高流域的水资源综合利用效率,为流域水资源可持续利用提供参考;Käser D. 等运用三维地下水模型和二维坡面流耦合模型量化复杂的地下水/地表水流相互作用,并评估其对流域过程的影响。认为在所有空间尺度上,地形和河道参数对模型精度最为重要;Maxwell R. M. 等在北美大陆综合运用地表和地下径流耦合水文模型模拟为地区提供了水文通量的综合预测。研究表明,大陆规模的集成模型和实用程序,提高了我们理解大型水文系统的可行性,高分辨率和大空间范围的结合,有利于使用模型输出的比例关系分析;Bailey R. T. 等在俄勒冈上克拉马斯盆地内,建立 SWAT-MODFLOW 地表水和地下水耦合模型研究 1970—2003 年时间段的径流过程,结果表明,高空间变异性地下水补给,在几个地点没有地下水/地表水相互作用。年平均地下水流量为 $20.5 \text{ m}^3/\text{s}$,最大和最小速率发生在九月到十月和三月到四月。

国内对于地表水与地下水耦合模拟的研究比国外晚,但在水文学者的不断努力追赶下已经取得不错的成绩。最早的地表水和地下水耦合模型总是关注在河流和地下水之间的转化关系上,对于农业灌溉水和地下水的相互作用关系研究甚少,这也和灌区水资源利用过程复杂有直接关系。蒋业放等人依据流域的水资源利用特点和含水层结构建立了河流和地下水的水量均衡模型,用以求解两者之间的转化关系,模拟结果显示方法很好地用于流域的水循环过程的解读;易云华等根据河流入渗规律,建立相应的数学表达式,在此基础上建立地表/地下水转化模型,分析河流和地下水含水层之间的相互转化规律,模型效果显著;李致家等将一维水动力模型的迭代方法和地下水含水层的水量交换方式结合起来建立相应的地表水和地下水耦合模型,求解地表水和地下水之间的转化通量,并用流域实测水位数据验证模型的有效性;刘国东等比较分析了饱和流和变饱和流模型的理论模拟与运用砂