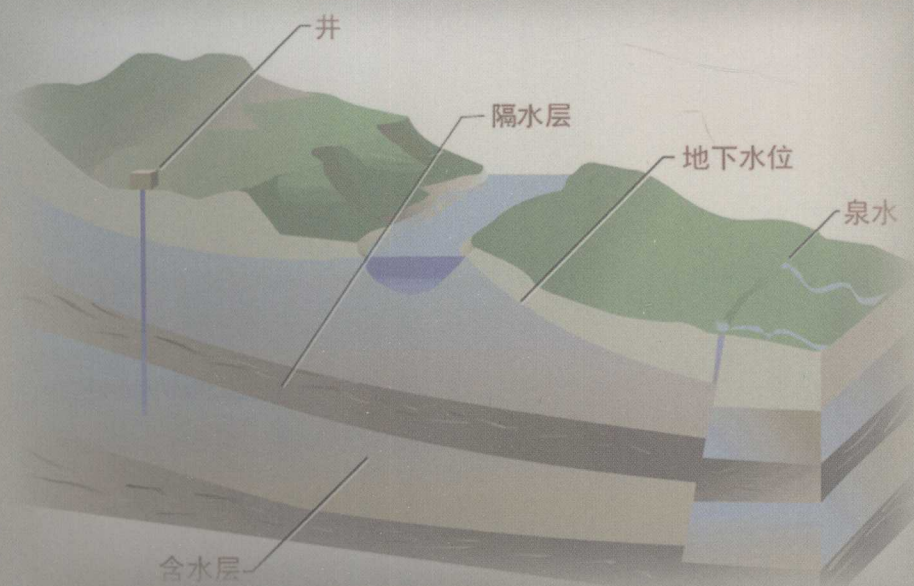




黄河下游沿黄城市 地下水循环过程模拟及其环境演化

王现国 吴东民 郭友琴 编著
董永志 邓晓颖 强山峰



黄河水利出版社

黄河下游沿黄城市地下水循环 过程模拟及其环境演化

王现国 吴东民 郭友琴
董永志 邓晓颖 强山峰 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书较为详细地阐明了地表水与地下水相互转化以及地下水资源评价的国内外相关研究现状,结合郑州市对水资源规划与管理的实践需求,分析了黄河下游沿黄城市地下水系统的特征、水循环条件,构建了区域地下水水文地质概念模型,应用国际上先进的地下水评价软件进行长系列、大面积模拟预报,对地下水资源及其变化进行了定量评价,同时对地下水环境演化进行了初步研究。

本书可供从事水资源、水文地质、环境地质领域的科研人员、专业技术人员、管理人员以及高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

黄河下游沿黄城市地下水循环过程模拟及其环境
演化 / 王现国等编著. — 郑州: 黄河水利出版社,
2009.6

ISBN 978-7-80734-662-3

I. 黄… II. 王… III. 黄河流域—下游河段—城市—地
下水资源—水循环—研究 IV. P641.622

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 100506 号

组稿编辑: 王路平 电话: 0371-66022212 E-mail: hhslwlp@126.com

出 版 社: 黄河水利出版社

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: hhslcbs@126.com

承印单位: 河南省瑞光印务股份有限公司

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印张: 14

字数: 320 千字

印数: 1—1 000

版次: 2009 年 6 月第 1 版

印次: 2009 年 6 月第 1 次印刷

定价: 38.00 元

前 言

水是生命之源,是社会发展和人类进步必不可少的自然资源,是生态环境系统中最活跃和影响最广泛的因素。随着人类进步和社会经济迅速发展,水资源需求不断增长,供需矛盾日益突出,水资源危机日趋严重,已经严重影响社会经济的发展 and 人类的生存。进入 20 世纪以来,随着世界人口的骤增和工农业及城市化的迅猛发展,用水量急剧增长,需水量激增和可用水量不断减少的矛盾已成为当今世界各国面临的重大问题之一,水资源研究已成为世界各国科学研究中的重大课题。1987 年,世界环境与发展委员会在《我们共同的未来》中明确提出“可持续发展”的概念;1992 年,里约热内卢“世界环境与发展”大会上,“可持续发展”得到了国际社会和各国政府高层的承诺。随着人们对社会进步、经济发展和环境改善问题认识的提高,走可持续发展之路已经得到了各行业和各部门的广泛认同。1992 年,在爱尔兰召开的“国际水和环境大会:21 世纪的发展和展望”(ICWE),提出了水资源系统及可持续研究问题。

地下水是人类最主要的供水水源之一,也是全球水循环的重要环节,开发利用地下水、研究地下水、保护地下水自然就成为地球科学工作者永恒的主题。

一个地区的水资源是难以分割的,撇开水资源系统的整体分析,孤立地研究其中的一个组成成份——地下水系统,是无法进行正确评价与科学管理的。在分析和处理与地下水密切相关的地质环境损害、地质灾害与生态退化时,需要涉及地球化学、物理学、生物学、微生物学、生态学、岩土力学、土壤学,以及相关的修复技术和处理技术等。在分析与水土有关的各种地方性疾病时,水文地质学家不仅需要了解元素在水土中的迁移积聚规律,还需要了解元素的生物学功能以及有关的医学知识。从事城市地质工作的水文地质学家,需要对城市规划与管理有所了解。有效利用土壤水的研究是解决水资源短缺的重要途径,需要将地下水科学与农学、土壤学,乃至基因改良技术相结合。包括地下水在内的水循环及其所支撑的生态系统对全球变化的响应是当代水文地质学需要关注的课题。作为水循环组成以及生态系统支撑的地下水,可与地球各圈层(大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、地幔、地核)以及人类活动构成的地球系统有着千丝万缕的联系,以地球科学系统理论为指导,推动水文地质学的发展,是一个必然趋势。

地下水环境演化是国际水文地质、环境科学研究的前沿和热点领域,主要通过研究地下水化学特性的时空分布规律,刻画地下水化学分区和各种水文地球化学过程,重建和预测地下水系统地球化学演化过程。因此,在大时间尺度上确定地下水化学演化的总体格局,研究处于不同地质条件下的地下水系统地球化学演化规律,进而科学认识天然过程和人为扰动对地下水环境的影响,合理解释各种水文地球化学现象(包括地下水化学异常、人为活动对水环境的影响等)是地下水环境演化研究的发展趋势。在地下水地球化学演化由定性研究到定量研究的发展过程中,水文地球化学模拟起到了重要的推动作用。水文地球化学模拟的研究对象为水-岩之间相互作用的地球化学过程,目前主要以化学热

力学为理论基础。它可以定量模拟各种天然过程和人类活动影响下的水-岩相互作用,研究地下水系统在不同时间尺度上的演化过程;也可以模拟地下水中污染物的运移过程,分析地下水污染的产生原因与发展趋势(陈宗宇, 1995)。水文地球化学模拟方法可分为物理模拟与计算机模拟两大类。其中,物理模拟通过试验条件来恢复现实水-岩反应系统中化学组分的迁移和转化,并可在不同的模拟条件下实现一系列特定的水-岩反应,以分析实际地下水化学组分的形成机理。近几十年来,人类活动强烈介入地下水化学组分的形成过程,地下水地球化学环境的研究渐趋复杂化,控制水岩相互作用的因素也趋于多样化,物理模拟已经难以再现复杂的水-岩反应,于是基于计算机数值模型的水文地球化学模拟应运而生。自 1962 年 Garrets 等对建立海水离子缔合模型以来,水-岩相互作用的计算机模拟技术得到了迅速发展,已经先后出现了几十种模拟软件。

本书以郑州市为例,阐述了郑州市地下水形成的环境条件,对地下水系统进行了划分,并详细地论述了地下水系统的特征及边界条件,构建了区域地下水水文地质概念模型,建立了数值计算模型,对地下水资源及其变化进行了定量模拟和评价。

本书共分 9 章,第 1、4、5、6 章由王现国、吴东民、王二军、强山峰执笔,第 2、3 章由吴东民、王二军、郭友琴执笔,第 7 章由邓晓颖、刘记成、董永志、赵目军执笔,第 8 章由刘记成、董永志、赵目军执笔,第 9 章由王现国执笔,插图由王艳霞、张晋等编绘,全书由王现国统稿。

在本书的撰写过程中,得到了郑州市水利局总工程师韩乾坤以及有关单位的领导和专家的大力支持,在此深表谢忱!

最后,对本书引用的有关资料的管理、科研、生产单位和工作者表示感谢和敬意!由于撰稿仓促及受作者水平的限制,书中不当和错误之处,敬请读者批评斧正。

作者

2009 年 2 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景、目的与意义	(1)
1.2 国内外研究状况与发展趋势	(2)
1.3 研究目标与内容	(12)
1.4 技术路线与工作方法	(13)
第 2 章 自然环境条件	(15)
2.1 气象、水文	(15)
2.2 地形地貌	(22)
2.3 地层岩性	(25)
2.4 地质构造	(33)
第 3 章 地下水开发利用现状	(38)
3.1 地下水开发利用现状	(38)
3.2 主要环境地质问题	(40)
3.3 已开采水源地开发利用现状	(44)
3.4 已评价水源地及规划水源地概况	(48)
第 4 章 地下水系统分析	(50)
4.1 含水层系统分析	(50)
4.2 地下水系统划分	(56)
4.3 地下水系统分论	(59)
4.4 地下水动态类型及特征	(64)
第 5 章 地下水资源量计算评价	(69)
5.1 地下水资源量均衡法计算评价	(69)
5.2 地下水资源量数值模拟法计算评价	(103)
第 6 章 典型水源地地下水资源评价	(123)
6.1 郑州沿黄水源地地下水资源评价	(123)
6.2 巩义市小菅殿水源地地下水资源评价	(136)
第 7 章 地下水环境演化	(150)
7.1 地表水环境质量评价	(150)
7.2 地下水水化学类型及特征	(154)
7.3 地下水质量现状评价	(168)
7.4 地下水水质变化趋势分析	(188)
7.5 地下水污染分析	(188)

7.6 大型地下水水源地水质评价..... (198)

第 8 章 人类活动对地下水的影响..... (207)

8.1 地下水位下降对降雨入渗补给量的影响分析 (207)

8.2 南水北调中线引水对地下水资源量的影响 (207)

8.3 引黄灌溉引起地下水资源量的变化 (209)

第 9 章 结论和建议 (211)

9.1 结 论..... (211)

9.2 存在问题及建议..... (212)

参考文献.....(214)

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景、目的与意义

1.1.1 研究背景

郑州市位于河南省中部，北临黄河、西依嵩山、东南为广阔的黄河冲积平原。下辖 6 区、5 市、1 县，其交通位置图如图 1-1 所示。本次研究范围为整个郑州市，总面积 7446.2 km^2 ，其中市区面积 1013.3 km^2 ，其地理坐标为东经 $112^\circ 42' \sim 114^\circ 14'$ ，北纬 $34^\circ 17' \sim 34^\circ 58'$ 。

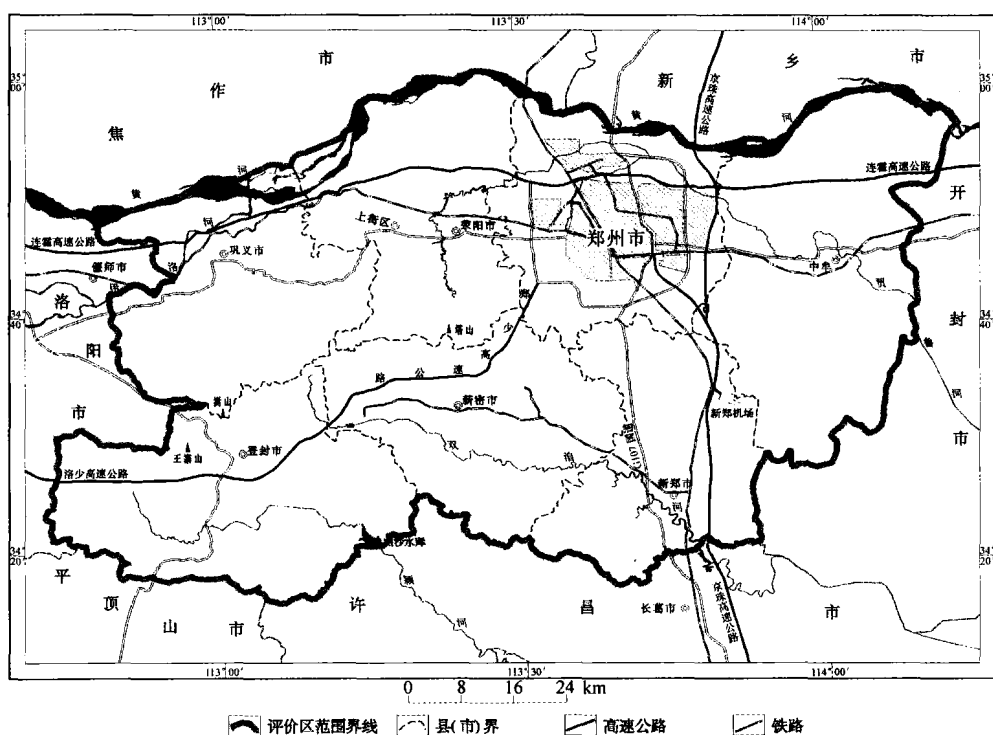


图 1-1 郑州市交通位置图

郑州市 2004 年末全市总人口 708.2 万人，其中城镇人口 411.1 万人，乡村人口 297.1 万人。全年国内生产总值达到 1 377.9 亿元，其中第一产业 63.1 亿元，第二产业 738.0 亿元，第三产业 576.8 亿元。人均生产总值达到 2 350 美元。

郑州市自然资源丰富，已探明矿藏 34 种，主要有煤、耐火黏土、铝矾土、水泥灰

岩、天然油石、硫铁矿和石英砂等。其中煤炭储量达 50 亿 t，居全省第一位；耐火黏土品种齐全，储量达 1.08 亿 t，约占全省总储量的 50%；铝土储量 1 亿余 t，占全省总储量的 30%；天然油石矿质优良，是全国最大的油石基地之一。

郑州市盛产小麦、玉米、水稻等粮食作物和苹果、梨、红枣、柿饼、葡萄、西瓜、大蒜、金银花和黄河鲤鱼等经济林果和农副土特产品。郑州市工业经济发展迅速，在纺织、机械、建材、耐火材料、能源和原辅材料产业上具有明显优势，有色金属、食品、煤炭、卷烟等为主导产业，是全国纺织工业基地之一，是全国重要的冶金建材工业基地，氧化铝产量占全国总产量的 1/2 左右。

自 20 世纪 80 年代以来，随着经济和社会的快速发展，郑州市水资源开发利用过程中的供、用、耗、排关系等发生了较大的变化，生活、生产、生态环境用水需求量迅速增加，造成水资源严重短缺。郑州市人均水资源量仅有 212 m^3 ，不足全国人均水资源量的 1/10、全省的 1/2，且时空分布不均。地下水资源是水资源主要组成部分，郑州市供水主要以地下水资源为主，占全市总供水量的 70% 左右，在郑州市经济和社会发展中占有举足轻重的地位。

长期以来，由于人们对地下水资源的有限性认识不足，缺乏对地表水和地下水的统筹规划及科学开发利用，在水资源供需矛盾日益突出的情况下，不合理开发利用已引起地下水位持续下降，形成地下水位降落漏斗，引发了部分地区含水层疏干、地下水水质污染等一系列生态环境问题，使郑州市水资源的战略储备和供水能力受到了较大影响。水资源的供需矛盾已成为郑州市可持续发展的重要制约因素之一。

1.1.2 目的与意义

为了贯彻落实国家新时期的治水方针，实现人与自然和谐相处；为了给全面建设小康社会提供安全可靠的水资源和水环境保障；为了实现郑州市经济社会可持续发展目标，适应水资源供求状况的变化，合理地开发利用水资源，开展沿黄城市水资源综合研究和可持续利用综合规划、开展郑州市地下水循环过程模拟及其环境演化研究意义十分重大。

1.2 国内外研究状况与发展趋势

1.2.1 地表水与地下水相互转换及其联合调度的研究现状

地表水与地下水相互转换是水循环的主要组成部分之一，是水资源评价的主要工作之一。地表水与地下水之间的转换主要包括河流与地下水之间的相互转换以及灌溉水、土壤水、地下水之间的相互转换，尤其是在干旱内陆盆地，由于农业离不开灌溉，灌溉回渗补给是地下水的主要补给来源之一。水资源是一种基础的自然资源，是社会经济发展的基础，要实现社会经济的可持续发展，必须将地表水和地下水联合调度，优化配置水资源，从而实现水资源的可持续利用。作者根据研究课题的需要，对河流与地下水交互作用，灌溉水、土壤水、地下水相互转换和水资源优化配置方面的研究

进展进行了评述。

河流(包括渠系)与地下水通常有着密切的水力联系,河水往往是地下水的主要补给来源或排泄去处。傍河水井开采往往能够获得河流补给的增加量或排泄量的减少量,容易形成稳定井流,增大了允许开采量。此外,河流的存在还对矿坑突水、基坑降水等存在重要的影响。因此,正确地刻画和处理河流与地下水的补排关系及其交换量对水资源的正确评价具有重要意义。河流与地下水交互作用的研究主要有以下几个方面:①傍河水井开采量或矿坑降水量的确定;②河流与地下水的污染物交换;③计算灌渠入渗;④计算地下水对河流的补给量(即基流量);⑤河流对地下水的补给量等。

1.2.1.1 河流与地下水系统的类型划分

从地下水动力学的角度出发,根据河流切割含水层的情况,可以将河流分为完整河和非完整河(陈崇希, 1999)。完整河指河流完全切穿含水层,地表水和地下水沟通,二者进行水量交换不受任何阻力;非完整河指河流与含水层有一定的水力联系,河流未切穿含水层,地表水与地下水水力交换受到渗透阻力,倘若河流是多泥沙河流,河床底部沉积一薄层淤泥,水量交换阻力更大(蒋业放, 1994)。含水层分为承压水含水层和潜水含水层,由于河流大多直接与潜水含水层相联系,所以此处仅以潜水含水层为例对河流-地下水系统进行类型划分。结合河流与地下水位的关系,河流-地下水系统可以分为如图 1-2 所示的 5 种类型。图 1-2(a)、(b)均为完整河,分为两种类型,即图 1-2(a)所示的河流排泄地下水;图 1-2(b)所示的河流补给地下水,河流与含水层之间为饱和流。图 1-2(c)~(e)为非完整河,分为三种类型,即图 1-2(c)所示为河流排泄地下水;图 1-2(d)所示为河流补给地下水,河流与含水层之间为饱和流;图 1-2(e)所示为河流补给地下水,地下水位低于河床底部,二者之间为非饱和流,随着地下水位的变化,河流对地下水的补给量不再随深度而变化,所以图 1-2(e)所示又可以分为河流补给地下水量随深度变化和随深度变化两种类型。由于河水和地下水直接联系,因此前 4 种类型可以称为水力连续型河流,而图 1-2(e)所示河流与地下水没有直接接触,可以称为非连续型河流。

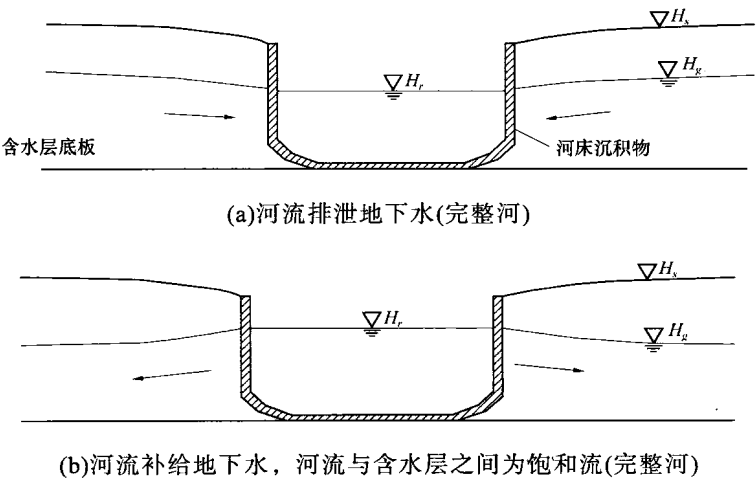
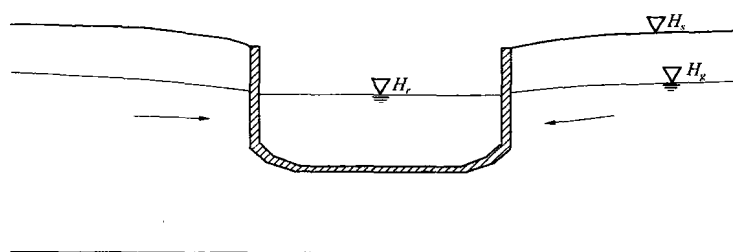
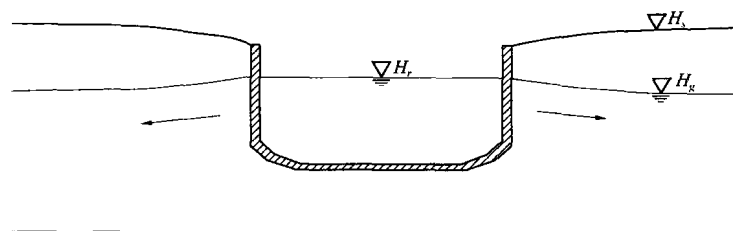


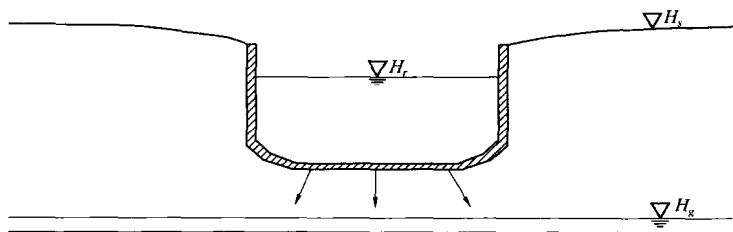
图 1-2 河流与地下水关系图



(c)河流排泄地下水(非完整河)



(d)河流补给地下水, 河流与含水层之间为饱和流(非完整河)



(e)河流补给地下水, 地下水低于河床底部, 二者之间为非饱和流(非完整河)

续图 1-2

1.2.1.2 河流补给地下水量的计算

目前常见的确定河(渠)渗漏补给量的方法可分为水文法、地下水动力学法、测量法和数值模拟法以及示踪法等。

1. 水文法

水文法是通过测定河流某段上下游断面的流量过程来建立该河段上的渗漏量与河床岩性、河流流量以及河水位与地下水位之差等参数间关系。该方法不仅花费多、工作量大, 而且得到的公式都是经验性的。

2. 地下水动力学法

地下水动力学法是根据地下水动力学理论来计算河流的渗流量的。目前常用基于裘布依(Dupuit)假定的布西涅斯克(Boussinesq)微分方程来求解, 则有

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + W = \mu_d \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1-1)$$

在地下水动力学中通常采用对式(1-1)进行线性化, 然后分离变量进行来求解(陈崇

希,《地下水动力学》)。苏联学者柯琴娜、威立根、阿威梁诺夫,德国学者傅希海门以及我国学者张蔚榛、李文渊等,先后基于裘布依假设的布西涅斯克方程,讨论了河渠水位突然上升、均匀上升与按正弦变化、按折线变化以及呈阶梯状变化时,一维及二维非稳定顶托渗漏量计算问题;苏联学者柯琴娜和阿威梁诺夫曾用保角变换方法分别推出了自由渗漏情况下梯形断面河渠的渗漏公式和稳定顶托渗漏情况下的宽浅型河流的渗漏公式。近年来,随着新的数学方法及计算工具的发展,许多学者利用新的理论对布西涅斯克方程进行求解。如,Workman 等(1997)利用解析半群(analytic semigroups)的理论对线性布西涅斯克方程进行求解。在河流水位波动不大的情况下,线性布西涅斯克方程的解与地下水位观测值比较符合。但是,当河水位变化很大时,河流附近含水层的导水系数是水头的函数,布西涅斯克线性方程的解就不能符合实际了,而应该用非线性方程。Serrano 等(1998)利用 Adomian 等在 1994 年提出的分离变量的改进方法对非线性布西涅斯克方程进行了求解,计算结果则比较准确。P. G. Grebenyukov (2001)对影响地表水和潜水含水层之间水力联系的因素进行了野外试验研究,指出在河水位变动情况下,河水与地下水之间的相互作用不能简单地用线性地下水运动方程和含水层介质的弹性储存量来刻画,在考虑静水压力和地下水流水平及垂向分量的基础上,给出了河水波动情况下静水压力的垂向和水平向的传导速率公式和地下水位计算公式,并获得了比较好的效果。

3. 测量法

近年来,研究地下水与地表水相互作用的方法有很多,Silliman 等(1995)通过测量水体和河床沉积物的温度序列确定通过河床沉积物的流量;Cey 等(1998)讨论了大尺度测量地下水补给河流相对于点测量的优点,结合同位素方法和地球物理技术估算水体之间的交互作用;Lyons 等(1995)利用铈同位素研究一干盐湖泉域的地下水混合及盐水圈划;Criss 等(1996)利用氢氧同位素和地球物理分析方法确定了地下水的补给源,并计算了地下水的运移速率;Yehdegho 等(1997)利用同位素平衡方法研究了疏浚湖与邻近地下水流场的相互作用;Cook 等(2003)利用氢同位素研究了澳大利亚北部地下水向某热带河流的排泄量;Beyerle 等(1999)利用 $^3\text{H}/^3\text{He}$ 、惰性气体和 CFCs 研究了河流向浅部含水层的入渗。

4. 数值模拟法

地表水与地下水转化量的模拟预测一直是区域水资源评价和管理中的一个棘手问题,尤其是在有人工补给和开采影响条件下,河流-地下水系统中的地表水与地下水转化量计算精度直接影响区域水资源评价的准确性。对于完整河,数值模拟则比较简单,可以作为已知水头边界进行刻画。但是,对于非完整河,河流与地下水相互转化的机理比较复杂,转换量的大小,除与河床岩性结构有关外,还与二者水位差有关,不能直接概化为已知水头边界。

在傍河地区建立地下水资源评价和管理的数学模型,非完整河的处理一直引起众多专家的关注。J. Bear(1979)在讨论傍河地区地下水数学模型时,把非完整河当做三类边界,该方法不能反映河流补给地下水有压力式向淋滤式转变的全过程,特别是当河流径流量与水位受地下水开采影响较大时,该法不适用。Morel-Seytoux 等早在 20 世纪 70 年代就开始了河流-含水层系统的研究,其做法是:用系统分析方法分别建立河流子系统和

含水层子系统的状态方程,然后将二者耦合构造河流-含水层离散核函数模型,但是该模型无法刻画地表水与地下水之间不存在连续浸润面的淋滤补给情形,而且不适用于自然界广泛存在的河床底部有淤泥层的多沙河流。张福生(1991)在分析非完整河地表水与地下水相互作用机理的前提下,提出了非完整河地表水与地下水转换近似计算式。赵耀东(1991)在室内做了傍河水源地诱发补给试验,证明在河水位固定的情况下,地下水开采量增加,不管是粗砂含水层还是中砂含水层,均可出现淋滤补给现象,并且给出了河流补给地下水有压力式向淋滤式转变的判别式。

目前,常见对河流-地下水系统模拟的研究主要有:蒋业放等(1999)运用动态水量交换机制,将河水模型和二维地下水模型进行耦合,分别用欧拉法和三角网格差分法来求解。Illangasekare T.等(1982)用河流损失函数描述河流与含水层之间的水量交换,提出的算法形式繁杂,较难实现。Barlow P. M.等(2000)采用解析分步响应函数和叠加原理研究含水层系统对河流水位及区域补给变化的响应。以往研究更多涉及单层含水层和二维水流情形,多层含水层系统的地表水与地下水转化量模拟预报有待探讨。

1)MODFLOW 中的河流-地下水渗流模拟

在 MODFLOW 中的河流模块(McDonald 和 Harbaugh, 1996),将河流分段,每一段为一个单元,假设每个河流单元水位在一个计算应力期内是保持不变的,河流与含水层的交换量可以通过下式计算

$$Q_s = \frac{K_b LW}{M}(H_r - h) = C_r(H_r - h) \quad (h \geq Y_{bot}) \quad (1-2)$$

$$Q_s = C_r(H_r - Y_{bot}) \quad (h < Y_{bot}) \quad (1-3)$$

式中: Q_s 为长度为 L [L]的河段的渗漏量[L³/T],正值表示河流入渗补给地下水,负值表示河流排泄地下水; K_b 为河床沉积物的渗透系数[L/T²]; H_r 为河水位[L]; h 为地下水位[L]; Y_{bot} 为河床沉积物的底面高程[L]。

当地下水位低于河床沉积物底面高程时,利用公式(1-3)进行计算。此后,随着地下水位的下降,河流的入渗量保持不变。

潘世兵等(2002)提出了类似的方法,他以河流越流系数来计算河流补给地下水的量,并与三维地下水数值模拟模型相耦合,分析了不同河流水位和地下水位组合情况下的计算公式

$$q_i = \begin{cases} \alpha_i(h_i - h_0) & [h_0 \geq \max(zb_i, h_r), h_i \geq h_r] \\ -\alpha_i[h_0 - \max(zb_i, h_r)] & [h_0 \leq \max(zb_i, h_r), h_i \leq h_r] \\ \alpha_i[h_i - \max(zb_i, h_r)] & [h_0 < \max(zb_i, h_r), h_i \geq h_r] \\ 0 & [h_0 < \max(zb_i, h_r), h_i < h_r] \end{cases} \quad (1-4)$$

式中: i 表示含水层层号; $\max()$ 表示取最大值; $\alpha = \frac{kpl}{m}$, 其中 k 为河床底积层的渗透系数, p 为河流湿周, l 为河段长度, m 为河床底积层厚度。

2)Rovey 模型

Rovey 等 1975 年构建了一饱和三维有限差分地下水模型来模拟包括河流-地下水相互作用的渗流场。他对达西定律进行扩展来计算图 1-2(e)所示的问题。

$$Q_s = C_r(H_r - Y_{bot} - h_a) \quad (h < Y_{bot}) \quad (1-5)$$

式中： h_a 为河床沉积层的进气水头值。

3) Bouwer 模型

Bouwer 在 1969 年利用类似式(1-5)的公式计算了非连续型河流的渗漏量。他利用了河下含水层的平均吸力水头来代替式(1-5)中的 h_a ，可以用式(1-6)来计算最大河流的渗漏量，即

$$Q_s = C_r(H_r - Y_{bot} - h_{cr}) \quad (1-6)$$

式中： h_{cr} 称为临界压力水头，可以用下式计算

$$h_{cr} = \int_0^{p_w} \frac{K(\phi)}{K_s} d\phi \quad (1-7)$$

其中， $K(\phi)$ 为含水层非饱和渗透系数[L/T]； K_s 为含水层饱和渗透系数[L/T]； ϕ 为非饱和带的压力水头[L]。

Bouwer(1964)通过室内试验研究发现，式(1-6)可以用来计算河流高于毛细带时地表水体通过下伏弱透水层的最大稳定流流量。式(1-6)中的 h_{cr} 也可以用河床底面到地下水面的距离来代替。因此，Bouwer 法计算的河流渗漏量仅与 h_{cr} 有关，也就是说仅与河下含水层的渗透性有关。

尽管 Bouwer 模型比 Rovey 模型有所改进，但是仍然没有考虑河水位和河川沉积层岩性的作用。

4) Dillon - Liggett 模型

Dillon 和 Liggett(1983)模拟了一暂时性非连续型河流与潜水含水层之间的水量交换。他们模拟了负压水头，并称之为“转换水头”，然后代入 Green-Ampt(Green 和 Ampt, 1911)模型来确定河流从开始入渗到补给地下水的滞后时间。与前几个模型一样，该模型仍然没有考虑河流水位波动的影响，而且也没有说明如何计算吸力水头。

5) 水力耦合模型

蒋业放(1999)运用动态水量交换机制建立了河流-含水层水力耦合模型。将河水和地下水视为一个水文系统，该系统由河流子系统和地下水子系统构成，两子系统通过水量交换而发生作用，交换量的大小和方式受到水位差、含水介质渗透性以及水流状态的影响。将有限的河流概化成一维流，河流两侧不透水，底部存在弱透水层，河水与地下水可相互转化，忽略河槽调蓄。总的河流-地下水系统模型描述如下。

河流与地下水转化有三种形式：顶托排泄、压力渗漏和淋滤渗漏。水量交换的数学方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_r}{\partial t} = \sum_j R_j \delta(l - l_j) - EW \\ E = \begin{cases} \min[\gamma(H_r - H)\eta, E_m, q_u] & (H < H_r) \\ \gamma(H_r - H) & (H \geq H_r) \end{cases} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[k(H - H_d) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(H - H_d) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \varepsilon + f(x, y)E - \sum_i Q_c \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \end{cases}$$

式中： Q_r 为河流流量[L³/T]； t 为时间[T]； E 为河流与含水层水量交换强度，漏为正，泄

为负[L/T]; W 为河水淹没宽度[L]; R 为沿途汇入(正)或引出(负)流量[L³/T], 为狄拉克单位脉冲函数; H_r 为河水位[L]; H 为地下水位[L]; η 为反映泥沙对渗漏孔隙淤塞情况的经验系数(其大小由河水浑浊度决定, 越浑浊越小); γ 为河床渗漏系数, $\gamma = k_z / m$, 其中 k_z 和 m 分别为河床底积层垂向渗透系数[L/T]和厚度[L]; H_d 为含水层底板标高[L]; k 和 μ 分别为含水层渗透系数[L/T]和给水度; ε 为除河水与地下水交换外的其他垂向交换量[L/T]; Q_c 为生产井开采量[L³/T]; $f(x, y)$ 为河流识别函数, 河流区为 1, 非河流区为 0。

6) MOBFLOW 模型

Osman 和 Bruen(2002)在 Rovey 模型、Bouwer 模型和 Dillon-Liggett 模型的基础上, 对 MODFLOW 进行了修正, 提出了 MOBFLOW 模型。尽管仍然假设地下水弱透水层中渗流为一维饱和垂向流动, 但是最大渗流量不单独依赖于弱透水层, 最大吸力水头也不仅依赖于含水层参数, 当地下水位埋深较浅时, 最大吸力水头为地下水面到河底距离的函数。该函数的特点是需要确定特定河水位、弱透水层、含水层结构条件下的有限潜水面 H_{shw} 。

$$Q_r = \begin{cases} C_r(H_r - h) & (h > Y_{bot}) \\ C_r(H_r - Y_{bot} + H_{suc}) & (H_{shw} \leq h \leq Y_{bot}) \\ C_r(H_r - H_{shw}) & (h < H_{shw}) \end{cases}$$

7) 非饱和模型

Osman 和 Bruen(2002)利用非饱和模型 SWMS-2D 对河床不同岩性组合情况下的河流入渗进行了模拟。

1.2.2 地下水环境演化研究进展

地下水环境演化是国际水文地质、环境科学研究的前沿和热点领域, 主要通过研究地下水化学特性的时空分布规律, 刻画地下水化学分区和各种水文地球化学过程, 重建和预测地下水系统地球化学演化过程。因此, 在大时间尺度上确定地下水化学演化的总体格局, 研究处于不同地质条件下的地下水系统地球化学演化规律, 进而科学地认识天然过程和人为扰动对地下水环境的影响, 合理解释各种水文地球化学现象(包括地下水化学异常、人为活动对水环境的影响等), 是地下水环境演化研究的发展趋势。

地下水环境演化研究是全球变化和全球水循环演化研究的重要组成部分。Emunds(1995)提出把地下水作为可量测环境变化的介质, 划分出天然的水文地球化学作用及人为污染带来的特征, 并给出了它们相应的指标体系。这些指标大多对应某种或某些水-岩相互作用: 饱和带的指标包括水位、 HCO_3^- 、 O_2 、 Cl 、 $\delta^3\text{H}$ 、 NO_3 、DOC、Si、Si 方解石、主要离子、Eh、Fe、Mg/Ca、 $\delta^2\text{H}$ 、Br、 $\delta^{14}\text{C}$ 、 $\delta^{36}\text{Cl}$ 、K、杀虫剂、B 等指标; 非饱和带的指标包括 Cl、pH 值、 NO_3 、 $\delta^3\text{H}$ 、 $\delta^{14}\text{C}$ 、 $\delta^{36}\text{Cl}$ 、Al 和碱金属离子。

从研究内容和研究方法来看, 地下水环境演化可以分为以下几个方面: 天然条件下地下水环境演化、天然-人为条件下地下水环境演化、人为强烈活动影响下地下水化学演化。天然条件下地下水环境演化研究重点集中在天然条件下各种水文地球化学过程上, 通过地下水中常量组分、微量组分、稳定同位素以及水化学指标的分析来研究地下水来源、形成过程以及分布规律(Condesso de Melo M. T. 等, 1999; Kretzschmar T. 等, 1995; Adams S. 等, 2001)。研究的手段主要为水-岩相互作用模拟、水文地球化学图解及多元

统计分析。个别研究涉及放射性同位素和微量元素地球化学,利用这些信息有助于查明地下水的来源、确定地下水化学过程以及演化速度(Edmunds W. M. 等,2002;Rademacher L. K. 等,2001;Plummer L. N. 等,1990)。

天然-人为条件下地下水环境演化研究是探讨由于人类过度利用地下水,导致地下水动力场发生改变,使不同成因或不同水化学组成的地下水发生相互作用的情况下,地下水化学场的重新分布和水文地球化学过程的变化规律。这方面最典型的例子是开采地下水引起的海水入侵。通过对不同化学成分的地下水指标分析,这些指标包括常量元素、微量元素,以及同位素,利用某些水的化学特征、多元统计分析、同位素组成或水化学手段划分不同地下水化学带,然后通过水-岩相互作用模拟或矿物相平衡计算揭示地下水的演化过程(Barbecot F. 等,2000;Beaucaire C. 等,1995;Sikdar P. K. 等,2001;Xue Y. 等,2000)。

人为强烈活动影响下地下水化学演化研究,针对由人类活动作为新的强大地质营力正在加速改变全球环境的情况,研究改变地下水系统地球化学演化路径污染物水文地球化学作用,以及技术成因水文地球化学场的时空分布与演化。张宗祜等(2000)在华北平原的工作表明,人类活动已成为现今控制某些地区地下水环境演化的主导力量,地下水演化已进入由量变到质变的新阶段。目前,地下水环境演化的研究主要集中在研究人为活动介入的污染物类型和人为活动对各种水文地球化学过程的影响。

时间尺度是地下水环境演化研究的基本特征。Laaksoharjn(1999)在研究瑞典 AsPoHPL 试验场的地下水化学状况和演化时,通过 13ka 以前的各种重要环境地质事件的重建,提出一末次冰期以来地下水形成、演化的概念模型,并在这种基本格局下应用多元统计分析和水-岩相互作用模拟,获得以下认识:各环境地质事件中形成的水的混合作用、方解石的溶解与沉淀、氧化还原反应以及生物作用是现今地下水形成与演化的主要控制因素。张宗祜等(2000)也在不同时间尺度上研究了华北平原地下水环境演化。这些在不同时间尺度上研究地下水形成和演化的范例为水文地质作用研究提出了一种全新的思路和方法。

地下水水质演变的研究是一个由来已久的课题。早期的环境水文地质工作一般把重点集中在自然作用下地下水化学成分的形成与演化及人类活动导致地下水水质恶化-地下水污染方面(沈照理等,1993);在国际上,20 世纪 50 年代主要集中在污染检测和控制措施方面,但并未能解决地下水实际问题;60 年代,尤其是 70 年代,国外仍着眼于地下水污染控制措施方面的研究;70 年代以后,随着工业化和都市化进程的加快,出现世界范围的地下水水量误差和地下水水质恶化,一些发达国家开始意识到要从根本上解决地下水实际污染问题,必须加强地下水污染的基础理论的研究(沈照理等,1985;Ratzlaff S.A. 等,1992);70 年代后期至 80 年代,地下水污染形成条件、地下水污染机理等成为主要研究方向,开展了大量的地下水污染检测方法、评价方法、污染物迁移转化规律及污染机理研究,不仅研究工农业及城市生活等方面产生的常规污染物对地下水造成的污染机理,而且在研究重金属、氮及微量有机毒物污染机理等方面取得较大进展,并开始利用计算机技术开展污染物在地下水中运移的数值模拟研究(陈金秀等,1986;刘兆昌等,1991);90 年代,地下水污染研究的热点逐渐转向地下水有机物、海水入侵及氮污染问题,并积极开展地下水污染治理技术研究(刘吉成,1997、1998;良可译,1998),就目

前研究水平和技术水平而言,距离真正解决地下水实际问题可能还相当遥远。地下水污染及其防治是目前水文地质乃至地球科学研究的前缘之一。

随着地下水环境问题的逐步深入,近几十年来,环境水文地质学的研究领域亦不断拓宽。诸如因地下水超采引起的区域地下水位下降、地下水水量衰竭、地下水水质恶化以及地面沉降、地面塌陷等环境地质问题均已成为环境水文地质研究的重点,但研究应把哪些问题列为环境水文地质研究范畴目前还未定论。一般来说,把地下水水质的恶化、地下水位下降等与水文地质因素及人类活动密切相关的问题作为环境水文地质的重点研究领域已得到多数学者的认可。综合前人的研究成果,可以认为:地下水环境应包括两个方面,即地下水动力场和地下水化学环境。地下水动力场体现了地下水的“量”,受含水系统水文地质结构,地下水补、径、排条件及地下水循环交替条件等所控制;地下水化学环境反映了地下水的“质”,受含水系统岩土性质、氧化还原条件、酸碱度等所控制。从水文地质角度讲,上述概念比较符合地下水系统本身的规律,因为地下水系统的“量”和“质”之间存在密切的有机联系。因此,地下水环境演化也必然包括两个方面,即地下水动力场演化及地下水化学演化。地下水环境是地下水水流场和地下水化学环境综合作用的结果,地下水环境的演化则是地下水系统一个复杂的地下水动力场时空演化和水岩作用过程。

地下水环境演化与人类活动密不可分,尤其近几十年来,从某种意义上说,人类活动的强度决定了地下水环境演化的性质和速度,因此地下水环境演化与社会、经济的发展存在着有机的联系(沈照理,1993;张宗祜,1992;郭永海,1994)。20世纪80年代以前,地下水水量、水质管理往往忽视了与地下水有关的社会、经济、环境等因素,因而大大削弱了地下水资源的实用价值;80年代中期以后,随着人们对环境问题的重视以及受可持续发展思想的影响,在对地下水开发利用的过程中越来越多地综合考虑资源、社会、经济、环境等制约因素,地下水水资源管理更多地体现了社会、经济、环境协调发展的原则,但从国内外的文献收集、检索来看,地下水资源的开发利用和管理只是考虑现实的社会、经济、环境条件,没有从历史的角度考虑地下水环境的演化对地下水使用价值控制的制约作用(曲焕林等,1998;陈崇希等,1996)。

1.2.3 研究区水文地质研究现状

自20世纪60年代以来,水利部门、地矿部门在郑州地区曾先后开展过不同目的的地质、水文地质、工程地质、地下水资源勘察评价工作,为郑州市城市建设、工农业生产提供了基础性信息资料,取得了显著的成效,亦为本次水资源调查评价工作积累了较丰富的基础资料,以往进行的主要工作有基础地质普查、水文地质普查、农田供水水文地质勘察、水资源开发利用规划及水源地供水水文地质勘探等,郑州市多数地方水文地质研究程度较高。现把主要工作成果简述如下(见图1-3)。

1.2.3.1 基础地质普查

自20世纪五六十年代开始,河南省地质局区调队、水文队等单位先后完成了1:20万洛阳幅、临汝幅、郑州幅、许昌幅、开封幅地质普查报告,河南省1:50万地质图及其说明书,郑州市城市地质系列图及说明书等。上述成果对郑州市地层岩性特征、地层