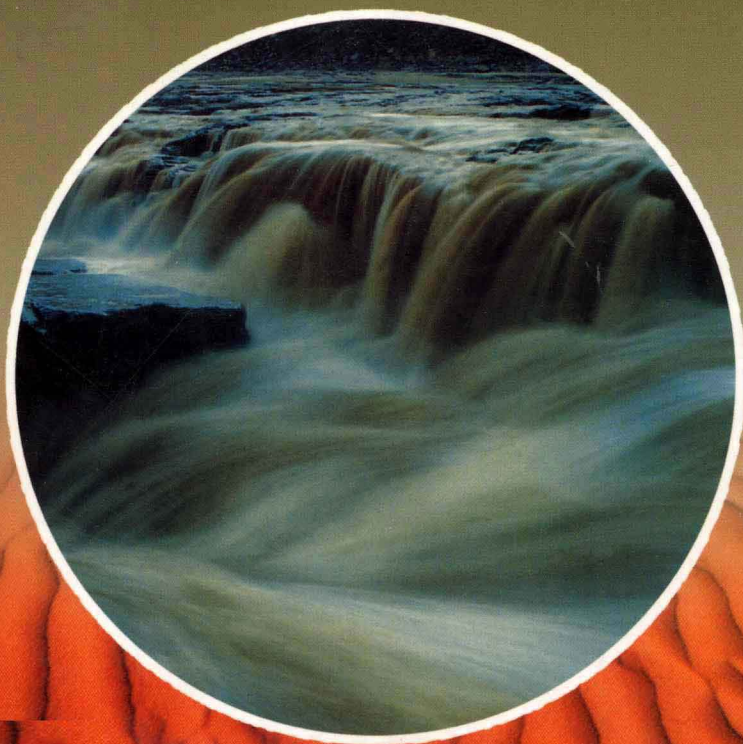


河南省发展计划科技攻关项目
中国地质大调查 I 类项目 联合资助
国家重点基础发展规划(973)项目

黄河下游影响带地下水资源 评价及可持续开发利用

赵云章 邵景力 阎振鹏 等著
焦红军 崔亚莉 刘新号



中国大地出版社

河南省发展计划科技攻关项目
中国地质大调查 I 类项目 联合资助
国家重点基础发展规划 (973) 项目

黄河下游影响带地下水资源 评价及可持续开发利用

赵云章 邵景力 阎振鹏 等著
焦红军 崔亚莉 刘新号

中国大地出版社
· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

黄河下游影响带地下水资源评价及可持续开发利用/赵云章等著. —北京:中国大地出版社, 2002. 12

ISBN 7—80097—537—1

I. 黄... II. 赵... III. ①黄河—下游河段—地下水资源—评价②黄河—下游河段—地下水资源—资源利用 IV. TV213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 104437 号

责任编辑: 陈维平

出版发行: 中国大地出版社

社址邮编: 北京市海淀区大柳树路 19 号 100081

电 话: (010) 62183493 (发行部)

传 真: (010) 62183493

印 刷: 北京京通印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 12.25

字 数: 280 千字

版 次: 2002 年 12 月第 1 版

印 次: 2002 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1~400 册

书 号: ISBN 7—80097—537—1/P·20

定 价: 30.00 元

(凡购买中国大地出版社的图书,如发现印装质量问题,本社发行部负责调换)

序

黄河是个有名的多泥沙河流，千百年来黄河的泥沙缔造了广阔的华北大平原，黄河的水和它的泥沙为我国祖祖辈辈的人民建造了肥沃的土地，养育着代代华夏儿女。黄河的水流向河道两侧渗流，形成较宽的河流对地下水的影响地带，使两岸的地下水得到充分的补给，给黄河两岸的农业经济发展带来了非常有利的条件。

黄河河流两侧的地表水与地下水的转化规律的研究，是水利开发和资源评价的重要科学问题。《黄河下游影响带地下水资源评价及可持续开发利用》一书资料翔实、内容丰富、重点突出、研究方法先进、技术路线正确，深入探讨了黄河冲积扇的形成演化，区域含水层结构，计算了天然状态下黄河侧渗补给地下水资源的数量。在系统调查和总结了黄河干流河南段环境地质背景，水文地质特征等环境地质问题的基础上，采用地下水流场分析、水动力学、地下水动态类型比拟及同位素技术等方法综合研究，首次确定了黄河下游两侧入渗补给宽度和循环深度。同时建立了河南段干流附近地下水三维数值模拟模型，计算了不同条件下黄河侧向入渗量，并预测了开采条件下主要水源地的流场特征。

这一成果的实用意义很高，它为黄河两侧建立地表水与地下水联合调蓄系统、水资源的合理利用以及两岸井、渠结合方式发展农田灌溉、水源地开发、水资源管理等都将产生积极作用。在本书即将出版之际，特写此短序，表示祝贺！希望作者继续关注黄河、关注地下水资源，在黄河水与地下水转化机制及循环深度研究和地下水优化配置研究方面作出更大贡献。

中国科学院院士

中国工程院院士

张宗让

2002年9月

前 言

黄河水资源是中国西北、华北地区的主要水资源,是我国北方地区最大的供水水源。黄河不仅对缓解华北水资源短缺,促进该地区社会可持续发展起着重要作用,而且在全国经济发展中也占有重要位置。但是黄河流域水资源匮乏,人均水资源占有量仅为全国人均的 $1/4$,单位耕地面积水资源不足全国平均的 $1/5$ 。另外,黄河流域降雨时空分布极不均匀,全年降雨量的 $60\% \sim 70\%$ 集中在 $6 \sim 7$ 月份,极易产生春旱秋涝。黄河又是一条著名的多泥沙河流,黄河水含沙量极高,水处理费用昂贵,加上近年来黄河断流和水质污染事件不断发生,直接威胁着黄河下游沿黄城市和黄灌区的供水安全。

黄河两岸地下水与黄河水关系密切,地下水资源丰富,是目前华北地区惟一有地下水潜力的地带。但是,由于没有对该地区地下水进行系统评价,地下水资源不清,严重制约着地下水勘查开发和这一地区经济的持续发展。

鉴此,1999年,河南省地调院水工环中心和中国地质大学(北京)水资源与环境工程系提出了“黄河下游影响带地下水资源评价及可持续开发利用研究”立项申请,2000年河南省科技厅以豫科计字(2000)2号第001190109项列入河南省2000年发展计划科技攻关项目,同年5月得到了中国地质调查局I类项目“黄河中下游主要环境地质问题调查评价”的资助,同时得到了国家重点基础研究发展规划(973)项目(G19990436)的资助。

本研究课题系统调查和总结了黄河影响带环境地质背景、水文地质特征、水资源开发利用现状及主要环境地质问题。采用地下水流场分析、水动力学解析、地下水动态类型比拟及同位素测试分析等综合研究手段,首次确定了黄河水补给范围及循环深度。利用R—C型电网模拟技术和水动力学解析法计算了黄河水天然状态下的侧渗量。首次利用三维数值模拟技术,对近 1 万 km^2 的黄河影响带系统进行了地下水补给资源、开采资源、储存资源计算评价,报告还对几个重要的远景水源地进行了预测评价,在此基础上对地下水资源潜力进行了计算评价,共发现并计算了13个远景水源地和9个地下水调蓄库,对黄河影响带地下水资源进行了保护规划。从而使本书具有较广泛的实用价值和理论意义。

本研究课题由赵云章拟定编写提纲,撰写分工如下:赵云章、邵景力,绪言;闫震鹏、赵云章,第一章;闫震鹏、杨国平、刘洪战,第二章;赵云章、邵景力、贺国平,第三章;许世民、赵云章,第四章;焦红军、刘新号,第五章;邵景力、崔亚莉、贺国平,第六章;邵景力、崔亚莉、贺国平,第七章;焦红军、刘新号、张古彬、田良河,第八章;赵云章,结语;王莉、侯海燕制图。全书由赵云章统编定稿。

在课题研究过程中,得到了中国科学院院士林学钰教授,河南省地调院院长王建平教授级高工、燕长海总工,河南省国土资源厅张克伟教授级高工、杨文智教授级高工的热情帮助和指导。在此一并致谢!

由于水平有限,不妥和错误之处,敬请专家和读者批评指教!

著 者

2002年8月

目 录

绪 论	(1)
一、研究的立题依据和思考	(1)
二、地下水模拟模型的研究现状及其发展趋势	(2)
三、环境同位素在水文地质学上的应用	(11)
四、黄河下游影响带地下水资源评价研究简史	(12)
五、研究方法 with 内容	(13)
第一章 研究区环境地质背景	(15)
第一节 气象特征	(15)
第二节 水文及泥沙特征	(16)
一、黄河水系	(16)
二、淮河水系	(18)
三、海河水系	(18)
第三节 地貌特征	(19)
一、黄河下游河流地貌特征	(19)
二、研究区地貌类型及分区	(22)
第四节 河道带遥感影像特征	(22)
一、河道地貌景观特征	(24)
二、黄河河道带地貌景观演变特征	(27)
第五节 地 层	(29)
一、上第三系 (N)	(29)
二、第四系 (Q)	(30)
第六节 黄河冲积扇演化	(33)
一、中更新世晚期冲积扇	(33)
二、晚更新世冲积扇	(35)
三、全新世冲积扇	(36)
第七节 基底构造及新构造运动	(36)
一、大地构造单元	(36)
二、断裂构造	(40)
三、新构造运动	(41)
第八节 黄河堤坝加固的历史与现状	(42)
一、黄河下游堤防概况	(42)
二、黄河下游堤防的发展历史	(42)
三、黄河堤坝加固的历史与现状	(43)
第二章 水文地质特征	(45)

第一节	区域含水层结构及分布	(45)
一、	浅层潜水含水层组	(45)
二、	深层承压水含水层组	(46)
三、	超深层承压水含水层组	(46)
第二节	地下水分布及其富水性特征	(46)
一、	区域含水层分布及富水性分区	(46)
二、	研究区含水层特征及富水性	(48)
第三节	地下水流动系统特征	(51)
一、	浅层潜水的补给、径流、排泄	(51)
二、	深层承压水的补给、径流、排泄条件	(52)
三、	地下水动态特征	(53)
第四节	地下水水化学特征及水质评价	(58)
一、	浅层地下水水化学特征及其分布规律	(58)
二、	深层地下水水化学特征及其分布规律	(58)
三、	水质评价	(59)
第五节	水资源开发利用现状与环境地质问题	(59)
一、	地表水资源开发利用现状	(59)
二、	地下水开发利用现状	(61)
三、	水环境问题	(63)
第三章	黄河影响范围的确定	(65)
第一节	黄河水影响宽度的确定	(65)
一、	浅层地下水水流场分析法	(65)
二、	水动力学解析法	(65)
三、	地下水动态类型比拟法	(67)
四、	同位素分析法	(71)
第二节	黄河影响深度的确定	(77)
第四章	天然状态下黄河侧渗补给地下水资源量计算	(82)
第一节	R—C 型电网络模拟法	(82)
一、	概化水文地质模型	(82)
二、	建立数学模型	(82)
三、	R 网络模拟	(83)
第二节	水动力学解析法	(86)
一、	一维渗流系统	(86)
二、	一维渗流公式	(87)
三、	确定计算参数	(89)
四、	验证计算参数	(89)
五、	解析渗流量	(89)
第三节	黄河下游河南段黄河水侧渗量	(91)
一、	分析单位黄河水侧渗量	(91)

二、计算河南段的侧渗量	(91)
第五章 水均衡法计算地下水资源	(92)
第一节 参数确定与选取	(92)
一、重力给水度	(92)
二、渗透系数	(93)
三、地下水蒸发强度	(93)
四、降水入渗系数 (α)	(93)
五、灌溉回渗系数	(93)
六、引黄渠道渗漏强度	(95)
第二节 水量均衡计算	(96)
一、均衡区的确定及均衡时段划分	(96)
二、均衡方程的建立	(96)
三、补给量计算	(98)
四、排泄量计算	(102)
五、地下水量均衡分析	(104)
第三节 地下水可开采资源量确定	(105)
一、多年平均补给量资源	(105)
二、不可袭夺的排泄量确定	(105)
三、可开采资源量的确定	(105)
第六章 地下水三维流数学模型	(110)
第一节 水文地质概念模型	(110)
一、含水层的结构特征	(110)
二、地下水流动特征	(110)
三、研究区边界条件的概化	(110)
第二节 地下水数值模拟模型	(111)
一、数学模型	(111)
二、地下水系统均衡要素计算	(114)
三、FEFLOW 软件简介	(118)
四、研究区剖分	(120)
五、定解条件的处理	(120)
六、模拟期的选择	(121)
七、源汇项的处理	(121)
八、水文地质参数	(121)
九、模型的识别和检验	(122)
第三节 地下水系统均衡分析	(124)
第七章 三维流数值法评价地下水资源	(130)
第一节 浅层地下水资源评价	(130)
一、补给资源量	(130)
二、储存量	(132)

三、开采潜力分析·····	(132)
第二节 深层地下水资源评价·····	(135)
一、均衡分析·····	(135)
二、深层水资源量·····	(136)
三、深层水允许开采量·····	(136)
第三节 人工影响条件下的地下水资源评价·····	(136)
一、北郊水源地·····	(137)
二、东漳水源地·····	(141)
三、中牟水源地·····	(144)
四、袁坊水源地·····	(145)
五、原阳水源地·····	(148)
六、荆隆宫水源地·····	(151)
七、芦岗水源地·····	(153)
八、渠村水源地·····	(155)
九、李子园水源地·····	(157)
十、沿黄河水源地同时开采·····	(158)
第四节 可开采资源量·····	(161)
第五节 截渗墙对地下水补给的影响·····	(163)
一、截渗墙简介·····	(163)
二、截渗墙的概化·····	(163)
第八章 地下水资源可持续利用与保护规划·····	(166)
第一节 地下水资源潜力计算与评价·····	(166)
一、地下水资源潜力分析方法·····	(166)
二、地下水资源潜力计算与评价·····	(166)
第二节 已有水源地的运行状况分析评价·····	(168)
一、郑州“九五”滩水源地·····	(168)
二、郑州北郊水源地·····	(168)
三、开封东北郊“袁坊—刘店”滩区水源地·····	(168)
第三节 远景水源地的选择与评价·····	(171)
一、远景水源地选择的原则与依据·····	(171)
二、河南远景水源地的选择与评价·····	(171)
第四节 地下调蓄水库的选择·····	(174)
第五节 黄河影响带地下水资源保护·····	(177)
一、地下水不合理开发造成的主要环境地质问题·····	(177)
二、地下水资源开发与保护区划·····	(177)
三、卫生防护·····	(178)
结论与建议·····	(180)
一、主要结论·····	(180)
二、存在问题及建议·····	(181)

绪 论

一、研究的立题依据和思考

水资源在全球经济和社会可持续发展过程中占有相当重要的地位,是人类赖以生存的不可代替的物质基础。缺水和由于不合理使用水资源而产生的环境问题是当前人类面临的重大课题之一。中国目前人均水资源量仅为世界人均水资源量的 $1/4$ (《中国 21 世纪议程》编制小组, 1994), 此外, 我国大部分城市和地区的淡水资源供给已受到水质恶化和水生态系统破坏的威胁。缓解水资源短缺对社会经济发展制约和水环境保护与治理, 已成为我国急迫解决的战略问题。

地下水是我国城市生活和工农业用水的重要供水水源。全国约有 $2/3$ 的城市和部分农田以地下水作为重要供水水源。目前, 地下水资源开发利用过程中缺乏宏观规划和科学、严格管理, 导致局部地下水严重超采、水位持续下降、漏斗面积不断扩大、地下水受到普遍污染等问题。此外, 在有些城市和地区, 与地下水有关的环境、生态问题日益严重, 如地面沉降、地面塌陷、土壤沙漠化和盐渍化等。因此, 以社会经济可持续发展, 地下水资源可持续利用, 社会经济与环境协调发展为原则, 对地下水资源进行科学管理, 是 21 世纪我国面临的重要任务。

河南省位于我国的中部, 地处中西部的前缘地带, 发展中西部经济具有承东启西的重要战略地位。河南是个农业大省, 工业基础薄弱, 水资源浪费, 部分地区仅农业用水开采量就已接近或超过地下水的资源补给量, 水资源匮乏成了制约经济发展的重要因素。据统计, 20 世纪 90 年代以来, 全省每年地下水的开采量为 $100 \times 10^8 \sim 120 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右, 且大部分集中在平原地区。开采量较大的中、东部地区已超采或达采补平衡, 开采潜力不大。根据环境监测资料, 全省地下水水位总体呈持续下降的趋势, 主要城市如安阳、濮阳、新乡、许昌—漯河、商丘等城市均已形成较大面积的地下水降落漏斗, 显示补不及出。随着经济的发展、人口的增加、城市化水平的提高, 用水量的增加同水资源短缺的矛盾变得越来越突出。

众所周知, 黄河是中国的第二大河, 黄河水资源是中国西北、华北地区的主要水资源, 是北方地区最大的供水水源。不仅对缓解华北水资源短缺、促进该地区社会可持续发展起着重要的作用, 而且在全国经济发展中占有重要位置。黄河又是举世闻名的多泥沙河流, 黄河泥砂含量极高, 作为城市供水, 处理工艺复杂, 处理费用昂贵。特别是 20 世纪 70 年代以来, 黄河下游出现断流, 进入 20 世纪 90 年代后, 几乎年年断流, 而且断流时段、河长持续增长。1972 年断流 19 天, 河长为 318km, 到了 1997 年, 断流为 226 天, 河长为 700km, 有 330 天无水入海, 直接威胁河南省的濮阳、开封、新乡、郑州等城市和黄灌区的供水安全。据郑州花园口水文站资料, 1990~1997 年 8 年平均径流量较多年平均径流量减少为 40.8%, 向世人发出了黄河水资源危机的强烈信号。与此同时, 由于黄

河中上游矿业、工业、农业和生活废污水的大量排入,使黄河干支流的水质污染日益严重,生态环境恶化,加剧了华北地区水资源的危机。20世纪70年代末,年排入黄河废污水约为 $18.5 \times 10^8 \text{t}$,到20世纪90年代初增至为 $32.6 \times 10^8 \text{t}$,1998年干流三门峡以上河段为Ⅴ类水质,以下为Ⅳ类。近年来,黄河下游突发性水污染事件频频发生,不仅增加了水处理费用,水质下降,而且造成城市供水水源的短期关闭。使得本来就十分严重的水资源形势更是雪上加霜。为了该地区水资源的可持续开发利用,人们不得不对该流域水资源的形成、分布、演化规律、再生性机理和优化调控引起重视和进行研究,同时,人们把目光逐步转移到了与此关系密切的地下水资源上来。黄河从郑州的桃花峪进入下游,至山东的利津入海口,主河道长为786km,其中河南省段长为372km。下游堆积了巨厚的松散沉积物,形成黄河冲积扇。从黄河冲积扇顶部的漂石、卵砾石与砂混杂堆积逐渐过度为中砂、细砂与粉土互层堆积,构成了巨大的地下水库,地下水资源丰富。河床、滩区及两岸平原区,均为近代黄河堆积的多孔介质土层,地表水与地下水水力联系密切,同时,黄河下游为著名的地上悬河,黄河水位高出两岸平原区地下水水位为3~8m,在其影响带开发地下水有利于地表水的补给,同时避开了水质污染,水源工程处理费用将大大降低。

黄河作为海淮平原的地下水分水岭,它的补给宽度和循环深度的确定,在其范围内,地表水和地下水的转化机理研究,不同条件下的地下水资源计算与评价,最大限度地巧取黄河水,为沿黄城市寻找备用水源地,已成为沿黄城市实现可持续发展十分重要的基础条件和水文地质工作者的重要研究内容。鉴此,河南省科技厅将“多泥沙河流影响带地下水资源评价及开发利用”列为2000年发展计划科技攻关项目,编号为豫科计字(2000)2号第001190109项。2000年5月列入中国地调局大调查Ⅰ类项目“黄河中下游主要环境地质问题调查评价”的第三课题“黄河下游断流区地下水资源评价”的专题研究课题。项目编号为199916000118。同时得到了国家重点基础研究发展规划(973)项目(G19990436)的大力协助和支持。

二、地下水模拟模型的研究现状及其发展趋势

(一) 地下水资源定量评价的发展历史

地下水模拟模型是伴随着人类对地下水定量评价的发展而发展的。人类开发利用地下水的历史十分悠久,但对地下水运动规律的认识进展却很缓慢。在19世纪以前,还谈不上对地下水进行定量计算的问题。

1856年达西(Darcy)通过实验提出了水在孔隙介质中运动的达西定律,这个定律是对地下水渗流运动定量认识的开始,直到今天它仍然是地下水计算的基础。随后裘布依(Dupuit)在达西定律的基础上,建立了一个关于单井的稳定流公式——Dupuit公式。到了20世纪30年代,美国对地下水的开采规模越来越大,人们才开始注意到地下水的非稳定流动和承压含水层的贮水性质。1935年泰斯(Theis)公式的出现开创了现代水文地质计算的新纪元。地下水资源定量评价的发展可分为3个时期(Bredehoeft, 1976)。

第一时期自1935~1950年,重点是解析解法。1940年雅各布(Jacob)参照热传导理论建立了地下水渗流运动的基本微分方程,这实际上是用数学模型来研究地下水的开端。此后,非稳定流解析解法得到了很大的发展,对泰斯公式的使用条件也做了推广,特别是越流和延迟给水理论。当把解析解法应用于实际含水层系统时,其局限性就暴露出来了。

解析解法都假设含水层是均质的和形状规则的,而任何一个真正的含水层都不会那么理想。如果开采规模较大,就必须对地下水进行区域性研究,不可避免的要遇到多层的和非均质的含水层系统以及复杂的边界条件,而这些与解析解法的使用前提都是相违背的。

第二个时期自 1950~1965 年,重点是电网络模拟。电网络模拟依据的原理是达西定律与欧姆定律之间的类似以及对地下水流基本微分方程的有限差分近似。20 世纪 50 年代出现了用于模拟非稳定流的电阻—电容网络模型,60 年代中期出现了混合模型。电网络模型的主要缺点是缺少通用性,难以处理潜水问题,而且只能用于地下水流的模拟,不能用于水质模拟。

第三个时期自 1965 年到现在,重点是数值模拟。20 世纪 50 年代,当时计算机的容量非常小,速度非常慢,也缺乏有效的计算方法,因此没有用于实际含水层的计算。60 年代,随着计算机的进步,成千上万结点的复杂系统都能用数字计算机进行模拟,有着电网络模拟无法比拟的优越性。而且数值方法不仅可以有效地解决地下水流问题,也能解决地下水水质和热运移问题,如海水入侵、由于弥散所引起污染物的传播问题、地热系统的模拟等等。

(二) 模型的种类

模型是某些复杂的物理实体及其内部流程的一种简化或概化(许涓铭,1985),它能复制或再现一个实际系统的状态(孙讷正,1981)。模拟地下水系统指的就是建立(Construct)和运行(Operate)能代表实际含水层行为的模型(James W. Mercer & Charles R. Faust, 1981)。地下水模型是一种能帮助分析许多地下水问题的工具。模型可以分为物理比例模型(Physical scale model)、类比模型(Analog model)和数学模型(Mathematical model)(Fetter C W, 1994)。

物理比例模型其实是实际自然系统的缩影,根据实际含水层的参数来组建模型中含水层的参数。例如,把一个塑料容器加工成一定的比例,用砂或者玻璃珠填充使它和实际含水层的水力传导条件一样。往水中添加颜料,观察水流的踪迹;向含水层中注水以模拟补给,在模型中设置抽水井以模拟排泄。Schwille (1988) 曾经使用含砂蓄水池比例模型来研究稠密非水相的液体,在多孔和裂隙介质中的运动。含砂蓄水池模型在向非专业技术人员阐述地下水流的基本原理时非常有用。

类比模型认为通过多孔介质的水流类似于通过导体的电流,模型通过电路或者粘性液体来模拟理想的含水层。类比模型典型用于二维水流的模拟,组建的模型可以是水平的也可以是垂直的。水平模型适用于研究面状水流,横截面或者垂直模型适用于研究垂直水流。类比模型主要有两类:电网络模型和粘性流体模型。

电网络模型是用网络电阻来类比含水层结构。通过模型的电流类似于通过含水层的水流,电路的电压类似于含水层的测压水位,电阻反比于含水层的水力传导系数,网络的电容类比于含水层的储存能力,模型中各点的电流和电压分别代表含水层中的水流和水头。通过和一系列水平模型组合,电网络模型可以用来模拟三维流。如,20 世纪 80 年代河南省地质矿产局环境水文地质总站开展了“黄河水侧渗补给地下水试验研究”,采用电网络模型分别计算了二维、三维状态下,黄河侧渗的单宽流量。武汉地质学院万力(1985)用 RC 电网络模拟方法预测山东省金岭铁矿北金台—西台口矿床疏干涌水量;武汉地质学院陈明征(1985)采用直角正交电网络模型对裂隙和岩溶含水层的模拟;成都地质学院贾疏

源等(1988)采用电物理模型对川南古宋煤矿区阳新统深岩溶水系统进行过研究。电网络模型不能模拟潜水含水层,因为潜水含水层在抽水时水位下降,导水系数减小;它也不能模拟地下水中物质的运移、弥散和扩散,所以电网络模型最终被数学模型取代。

粘性流体模型也叫做 Hele-Shaw 模型。粘性流体模型适用于研究不同密度、不混溶的流体,如海水入侵、废水注入水域等问题。Conrad 等(1992)用粘性流体模型研究滞留在含水层中的有机液体的运动。

所有的类比模型和物理比例模型都有相同的缺点:这些模型一般需要定制容器,对于组建大的模型,所需的时间和材料相当大,占用的空间也相当大。当它们不使用时必须有足够的空间来保存模型,所以模型非常不灵活。如果一个模型已经成形,很难改变含水层的几何性质和水力特性。

数学模型实际上是用来刻画实际系统的数量关系和空间形式的一组关系式,因而它有复制或再现实际系统的能力,而且更加灵活,更加通用。数学模型建立在地下水流、热流和物质迁移方程的基础上。为了求解数学模型,我们必须知道问题的初始和边界条件,而且这些条件必须是足够的简单,以致于水流方程可以直接用微积分求解。Walton (1984)用数学模型模拟水流向井和小溪的运动;Javandel, Doughty & Tsang (1984)用数学模型模拟热和物质的迁移。

(三) 数值模拟模型

一旦建立了数学模型,剩下的步骤就是要得到方程的解。描述地下水系统的偏微分方程通常非常复杂,一般很难求得解析解,因而大大限制了它的应用。而数值法求助于高速度的数字计算机,为偏微分方程提供了另外一种逻辑解法,它已经成为求解大型地下水流问题的主要工具。数值解法最大的优点是不受含水层形状、性质的限制。

根据所采用的数值方法可把数值模拟模型分为有限差分模型和有限元模型。

如果采用有限差分或者有限元方法求解,那么在研究单元中(或结点上)连续的变量就成了离散的变量。因此,定义含水层中任意一点水头的连续性微分方程,被数量有限点水头的代数方程所代替,而这些代数方程通常使用矩阵方法求解,这就是数值模型。

为了比较两种模型的优缺点,Pinder 和 Bredehoeft (1968)用有限差分法研究新斯科舍省(Nova Scotia 加拿大省名)Musquodoboit Harbour 山庄的冰水沉积物含水层,进行了水量模拟。Pinder 和 Frind (1972)用有限元方法对同一问题进行了研究,得出如下结论:①有限差分需要更多的结点,有限元使用较少的结点也能提供同样的精度;②以加辽金为基础的有限元理论比有限差分理论更抽象,所需计算机代码更繁琐;③经验表明,用有限元模拟,如果输入的结点位置或编号有误的话,模型出现的错误将很难发现;④有限元模型的主要优点是比较灵活的处理含水层。

根据用途可以把数值模拟模型分为预测模型和管理模型。预测模型可分为地下水流模型(Ground Water Flow)、溶质运移模型(Solute Transport)、热传导模型(Heat Transport)、地面沉降模型(Deformation)(Mercer & Faust, 1981; Wang & Anderson, 1982; Trescott, Pinder & Larson, 1976; McDonald & Harbaugh, 1984; Pinder & Gray, 1977; Konikow & Bredehoeft, 1978; Prickett & Lonquist, 1971)。而管理模型可分为水量管理模型和水量水质管理模型等。

(四) 建模的一般步骤

建什么样的模型取决于研究的目的和可利用的资料。建模一般遵循如下的步骤：

(1) 建立地下水系统的概念模型。建立概念模型是整个建模过程中最基本的也是最重要的一步。在仔细分析水文地质条件的基础上，通过一系列假设来描述地下水系统。比如，研究区边界的几何形状、稳定流还是非稳定流、均质还是非均质、各向同性还是各向异性等。

(2) 建立地下水系统的数学模型。用简洁的数学语言，即用一组数学关系式来刻画系统的数量关系和空间形式，把上述概念模型转变为数学模型。比如，基于质量守恒建立水量平衡方程，初始条件、边界条件的描述、源汇项等。

(3) 建立数值模拟模型。由于数值法有很多解析解法无法比拟的优点，特别是处理非饱和带和物质的迁移等问题。事实上，数值法是最常用的方法。

(4) 模型的识别和调参。为了使建立的模型能代表实际含水层的状态和行为，必须进行模型的识别和调参。其依据：①模拟的地下水流动场要与实际地下水流动场基本一致；②模拟地下水的动态过程要与实测的动态过程基本相似；③从均衡的角度出发，模拟的地下水均衡变化与实际要基本相符；④识别的水文地质参数要符合实际水文地质条件。

(5) 预报。用已经建好的模型预报不同条件下地下水系统的状态和行为。

(五) 国外地下水模拟软件的发展历史

利用模拟模型对地下水流和溶质运移等问题进行模拟的方法以其有效性、灵活性和相对廉价性逐渐成为地下水研究领域的一种不可缺少的重要方法，得到了广泛的应用。模型计算指的是进行地下水流或溶质运移正反演计算，常用的方法主要是有限差分法、有限元法、边界元法等。随着计算机技术的快速发展，使得复杂含水层系统中的地下水流运动及溶质运移的数值模拟变为可能。近年来，在人机交互、计算机图形学和科学可视化等技术的推动下，国外地下水模拟软件在质量上有了较大的发展和提高。

1. 最有影响的几个传统地下水模拟软件

通过近 20 年的研究与发展，国际上已经形成了一批非常有影响力的地下水模拟 DOS 版本的软件，今天它们在国际地下水模拟研究领域依旧非常活跃，如 MODFLOW、MODPATH、MT3DMS、MT3D99、PEST 等。这里主要介绍 MODFLOW。

MODFLOW 是由美国地质调查局 McDonald 和 Harbaugh 于 20 世纪 80 年代开发的一套专门用于孔隙介质中三维有限差分地下水流数值模拟软件。自从它问世以来，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，这种普及性是由如下的特点决定的。

(1) 程序结构的模块化。MODFLOW 包括一个主程序和若干个相对独立的子程序包(package)。每个子程序中有数个模块，每个模块完成数值模拟的一部分。例如河流子程序包用来模拟河流与含水层之间的水力联系；井流子程序包用来模拟抽水井和注水井对含水层的影响。MODFLOW 的这种模块化结构使得其程序易于理解、操作、修改和添加。MODFLOW 问世以来，不断有新的子程序包被开发出来。例如，用来模拟水位下降引起地面沉降的子程序包(Leake S A & Prudic D E, 1988)，用来模拟水平流动障碍(Horizontal flow-barrier)的子程序包(Hsieh & Freckleton, 1993)等。新子程序包的加入，使 MODFLOW 的应用范围不断扩大。

(2) 离散方法的简单化。MODFLOW 采用有限差分法对地下水流进行数值离散, 有限差分方法曾经是解决地下水流动问题占统治地位的一种数值方法。近二三十年来, 有限单元法受到越来越多人的注意, 被认为是 20 世纪最有影响的数值方法, 并大有取代有限差分之势。这种趋势的发展并不是基于对这两种数值方法理论上的对比分析, 而更多的是出于对有限单元法中广泛使用的比较灵活的网格剖分的爱好, 以及对复杂而抽象的数学推导所产生的数值方法的期望。实际上, 有限单元法和有限差分法没有太大的差别, 两者可以统一起来, 但是有限单元解决非稳定的地下水流问题, 在时间步长 Δt 较小的情况下, 某些单元可能出现质量不守恒, 因此会引起个别点的水头反常 (张宏仁, 1997)。差分法易于程序的普及和数据文件的规范。其主要缺点是当对某些单元网格加密时, 会增加许多额外不必要的计算单元, 延长程序的运行时间。当然随着计算机运算速度的大大提高, 额外的计算单元所需的时间是较少的。

(3) 引进了应力期 (stress period) 概念。它将整个模拟时间分为若干个应力期, 每个应力期又可再分为若干个时间段。在同一应力期, 各时间段既可以按等步长, 也可以按一个规定的几何序列逐渐增长。在每个应力期内, 所有外部源汇项的强度保持不变, 这样就简化和规范了数据文件的输入, 而且使得物理概念更为明确。

(4) 求解方法的多样化。迄今为止, MODFLOW 已经含有强隐式法、逐次超松弛迭代法、预调共轭梯度法等子程序包。可以预见, MODFLOW 的求解子程序包必将更加多样化, 应用范围也更为广泛。大量实际工作表明, 只要恰当使用, MODFLOW 也可以用来解决裂隙介质中的地下水流动问题。不仅如此, 经过合理的概化, MODFLOW 还可以用来解决空气在土壤中的流动 (Guo, 1995), 将 MODFLOW 与溶质运移模型的软件结合起来, 还可以用来模拟诸如海水入侵等地下水密度发生变化的问题 (Guo, Christian D. Langevin, 2001)。

经过近 20 年的发展, MODFLOW、MODPATH、MT3D、PEST 等软件几乎成为三维地下水流动和污染物质运移模拟的世界标准, 特别是 MODFLOW。据统计, 自 1992 年底以来, 美国地质调查局运行的 22 种有关地下水流量水质数值模拟计算的程序中, MODFLOW 约占总应用次数的 41.6%, 而其它的绝大多数模拟软件使用率都不超过 5.0%, MODFLOW 已经占据了最权威的地位, 并且获得政府部门的认同。MODFLOW 能得到广泛的应用, 一个很重要的因素就在于其设计上的合理性。参与 MODFLOW 设计、编程的工作人员大多数都是具有丰富经验的著名的水文地质专家, MODFLOW 的使用说明书本身就是一部很好的关于地下水数值模拟方面的教科书。但是这些软件都仅仅适用于地下水模拟过程中的特定问题, 并且软件的界面、交互性、前后处理等方面都还存在不小的差距。因此, 开发这些软件的集成系统, 谋求对这些软件缺陷的改进就成为地下水模拟软件开发研究的一个重要方向, 由此产生了如 PMWIN、Visual MODFLOW、GMS、FEFLOW 等基于 Windows 平台的软件。

2. 可视化模拟平台软件的发展

随着 Windows 在操作系统中统治地位的确立, 传统的地下水模拟软件纷纷在 Windows 的基础上进行修改、扩充与功能增强, 特别是在人机交互、计算机图形学和科学可视化等计算机技术的推动下, 带有可视化功能的地下水模拟软件迅速发展, 目前已经占据国际地下水模拟软件市场的主流地位。它们的共同特点是适应的问题广, 将数值模拟的前

处理、模型计算和后处理全过程中的各个步骤很好地连接起来,从建模、网格剖分、输入和修改各类水文地质参数和几何参数、运行模型、反演校正参数,一直到显示输出结果,整个过程从头至尾寻求计算机化。其中较有影响的有 Visual MODFLOW、GMS 和 FEFLOW。

(1) Visual MODFLOW 是由加拿大 Waterloo 水文地质公司在 MODFLOW 的基础上开发研制的。Visual MODFLOW (1996) 曾是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、WinPEST、MT3D99、MODPATH、MT3D 等软件的基础上,建立了合理的 Windows 菜单界面与可视化功能,增强了模型数值模拟能力、简化了三维建模的复杂性。界面设计包括三大彼此联系但又相对独立的模块,即前处理模块、计算模块和后处理模块。

前处理模块允许用户直接在计算机上为构建一个三维模型而赋值所有必要的几何参数、水文地质参数、计算方法参数和边界条件等信息。前处理输入菜单把 MODFLOW、MODPATH 和 MT3D 的数据输入作为一个基本模块,这些菜单以一定的逻辑顺序可视排列,引导用户逐步完成建模和数据输入工作。用户可以在计算机上用直线、折线、矩形、多边形定义和剖分模拟区域,通过平面视图和剖面图以交互方式显示模型的剖分网格、输入参数和输入结果,可以随意增减剖分网格和模拟层数,方便地确定边界的几何形状和边界性质,定义抽(注)水井的空间位置以及抽水量。参数菜单允许用户直接圈定各个水文地质参数的分区范围并赋值相应参数,同时上、下层所有参数可相互复制拷贝。用户在前处理模块中还可预先定义观察孔的具体空间位置和观测层位,并输入其观测数据,以便在后续的模式识别工作中校正使用。

计算模块允许用户修改 MODFLOW、MODPATH 和 MT3D 的各类参数与数值,包括初始估计值、各种计算方法的控制参数和设计的输出参数等。这些均已设计了缺省背景值,用户可根据自己模拟计算的需要,做适当的调整。Visual MODFLOW 允许用户单独或共同执行水流模拟(MODFLOW)、流线示踪模型(MODPATH)和溶质运移模型(MT3D),各部分均设计了模型识别和校正的菜单。

后处理模块允许用户以 3 种方式展示模拟结果:在屏幕上彩色立体显示模拟结果;在打印机上输出模拟结果的表格和图件;以图形或文本格式输出模拟结果。输出和显示的图形包括可以标记显示水头、降深、浓度、含水层顶底板标高、含水层厚度、渗流速度矢量等的平面、剖面等值线和平面、剖面示踪流线图以及局部区域水均衡图等。

(2) GMS (Groundwater Modeling System) 是由 Brigham Young 大学环境模拟研究实验室(Environmental Modeling Research Laboratory)开发的最先进的、基于概念模型的地下水环境模拟软件。今天它的使用已经遍布全球。GMS 全面包容了模拟地下水流每一个阶段所需的工具,如边界概化、建模、后处理、调参、可视化。GMS 是惟一支持 TINs、Solids、钻孔数据、2D 或者 3D 地质统计学的系统,它也包括 2D 和 3D 的有限单元和有限差分模型。现有的 GMS3.1 版本包括 MODFLOW 水流模型、基于 MODFLOW 的溶质运移模型、基于有限单元法的 FEMWATER 模型、模拟渗流的 SEEP2D 模型和用于参数估计的 PEST、UCODE 模型。

MODFLOW 是世界上使用最广的三维地下水流模型。它可以在非均质含水层和复杂

边界条件下模拟井、河流、水平流障碍、土壤水分蒸发蒸腾、地下水流系统的补给排泄。

GMS 包括的溶质运移模型包括基于 MODFLOW 水流计算的 MODPATH、MT3D、RT3D、SEAM3D 模型。

MODPATH 是一个 3D 粒子追踪模型，它可以计算出一段时间内粒子在稳定流或者非稳定流中的轨迹。MODPATH 利用由 MODFLOW 计算出的逐个单元的水头联合土壤的孔隙度，来计算每个粒子通过水流区域的轨迹。通过指定某一粒子的位置，MODPATH 可以计算出任一时刻粒子所在的位置。MODPATH 可以使用向前或向后追踪技术来模拟单井抽水的影响范围和研究水源地的保护。

MT3D99 是美国 S. S. Papadopoulos & Associates 公司的 Zheng 博士设计的模拟三维地下水溶质运移程序，是目前世界上首屈一指的溶质运移模拟软件。MT3D⁹⁹能够模拟地下水系统中的平流、扩散、衰减、溶质化学反应、线性与非线性吸附作用等现象，能够对承压含水层，非承压含水层，承压与非承压交替的含水层以及倾斜的和单元厚度变化的含水层进行空间离散。MT3D⁹⁹提供了丰富的求解方法：基于带高效 Lanczos/ORTHOMIN 加速格式广义共轭梯度法的叠代求解方法；采用三阶 TVD (Total - Variation - Diminishing) 格式求解对流项，具有保持质量守恒、使数值弥散和人为振动最小化的特点；MT3D⁹⁹将三种常用的运移求解技术（标准有限差分法、基于 Eulerian - Lagrangian 的粒子跟踪方法和高阶有限体积 TVD 方法）结合在统一的代码中。

RT3D 是用来模拟三维条件下复杂组分在地下水中的迁移模型，其代码是在 MT3D (1997) 上经过了一些扩展和校正。RT3D 能够模拟大多数的物质迁移。如自然界的衰变过程，含水层积极的补救过程，重金属、石油烃等在地下水中的迁移。软件具有较高的灵活性，用户可以自己指定反应动力学表达式或者从 8 个预先编好的程序包中选择一套。这些预先编好的程序包包括：①两种物质的瞬时反应（烃和氧）；②使用电子接收器 (O_2 , NO_3^- , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , CH_4) 模拟瞬时烃的生物降解；③使用复杂电子接收器 (O_2 , NO_3^- , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , CH_4) 模拟惰性烃的生物降解；④伴随细菌运移（烃、氧和细菌）的不容易发生的反应；⑤非平衡吸附和反吸附（也适用于非水相的液态溶解作用）；⑥PCE/TCE/DCE/VC 的还原、厌氧生物降解。

SEAM3D 是由维吉尼亚工学院 (Virginia Tech University) 开发的先进的烃降解模型。它是建立在 MT3DMS 模型上，提供了 27 种不同物质的迁移程序包，同时也包含一个先进的生物降解程序包和一个 NAPL 分解程序包。通过指定每一种污染羽的浓度和分解速率，NAPL 程序包可以模拟飘浮在地下水水面上的 NAPL 污染羽在含水层中的迁移。

FEMWATER 是基于有限单元法、模拟饱和或非饱和条件下、密度可变的三维水流或污染物运移模型。

SEEP2D 是用来计算诸如土坝和防洪堤渗流的二维有限单元水流模型。可以模拟承压、部分承压、非承压水流；饱和、非饱和水流。SEEP2D 也可以模拟非均质、各向异性、复杂的几何体或土壤的二维渗漏。SEEP2D 是稳定流模型，能计算有限单元网格每一结点的水头，从计算出的水头可以画出表明渗流网格的流线、等水位线。

PEST 是由澳大利亚 Watermark Computing 公司开发的、功能强大的、独立的参数估计程序。它利用一个强有力的数值反演算法来“控制”运行中的模型，程序在每次模拟之后自动调整所选择的模型参数，直到将校正的目标最小化为止，其灵活性、稳定性和可靠