



人民胜利渠灌区 地下水演变特征与预测

张先起 赵文举 穆玉珠 王燕鹏 冯利 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

人民胜利渠灌区 地下水演变特征与预测

张先起 赵文举 穆玉珠 王燕鹏 冯利 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是一部关于黄河下游人民胜利渠灌区地下水演变特征与预测的著作。全书共有七章，包含绪论、研究区域概况、地下水监测体系、地下水水位时空变化特征、地下水水质变化特征、地下水水分运移研究、地下水埋深预测等。

本书可作为水利、农业高等院校、科研院所、相关管理部门等的科技人员与本科生、研究生等参考使用。

图书在版编目（C I P）数据

人民胜利渠灌区地下水演变特征与预测 / 张先起等著. -- 北京：中国水利水电出版社，2019.11
ISBN 978-7-5170-3585-5

I. ①人... II. ①张... III. ①黄河—引水—灌区—地下水—资源—研究—河南 IV. ①TV67②P641.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第294937号

书 名	人民胜利渠灌区地下水演变特征与预测 RENMIN SHENGLI QU GUANQU DIXIASHUI YANBIAN TEZHENG YU YUCE
作 者	张先起 赵文举 穆玉珠 王燕鹏 冯利 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 208千字
版 次	2019年11月第1版 2019年11月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



水是一种有限的、不可替代的自然资源，是人类进行工农业生产、生活和生态环境保护必不可少的基础性资源。地下水资源与人类社会息息相关，尤其是在我国干旱、半干旱地区，地表水资源相对比较匮乏，地下水资源更是成为了这些地区的主要供水水源，在生活用水和农业灌溉等方面起到了重要的作用。人民胜利渠灌区位于河南省黄河下游的北岸，是中华人民共和国成立后在黄河下游建立的首个引取黄河水进行灌溉的大型自流灌区，是我国重要的粮食主产区，对促进区域社会经济发展，保障粮食安全具有重要的作用。随着区域社会经济的发展，生活与生产用水需求增加，再加上灌区内地下水资源在时空分布上的不均匀，造成了一些地区地下水的超量开采，形成了地下水漏斗。

人民胜利渠灌区地下水演变具有复杂性、缓慢性、模糊性和不确定性等特点，其演变特征与灌区内工农业生产、区域环境特征、地下水补给条件及其他的人类活动等因素息息相关。人民胜利渠灌区地下水演变的研究是一项长期的、复杂的基础性工作。开展人民胜利渠灌区地下水演变的研究，分析灌区地下水动态特征、分布情况和变化趋势，揭示地下水演变的机制，可为灌区水土资源开发利用、水资源和生态环境保护提供理论基础。

本书共有7章，第1章绪论，第2章研究区概况，第3章地下水监测体系，第4章地下水水位时空变化特征，第5章地下水水质变化特征，第6章地下水水分运移研究，第7章地下水埋深预测。主要内容以人民胜利渠灌区地下水演变特征为主线，首先，分析了人民胜利渠灌区地下水演变研究的背景与意义，结合国内外相关研究的状况与人民胜利渠灌区地下水实际情况提出了研究的内容和目标；然后，在

构建灌区地下水监测体系与地下水实测数据统计、整理与分析的基础上,分析了灌区地下水水位年际、年内变化特征以及地下水演变的趋势性、周期性、突变性和混沌性,构建了灌区地下水水质评价体系,并对地下水水质进行了综合评价;其次,利用 HYDRUS-2D 模型对灌区地下水水分的运移进行了模拟;最后,构建了基于非线性多尺度的灌区地下水水预测模型、基于相空间重构与 BP 神经网络的地下水预测模型、基于小波分解与 Elman 神经网络的地下水预测模型、基于 CEEMD-NAR 耦合的灌区地下水埋深预测模型 4 个模型,对人民胜利渠灌区地下水水位变化进行了预测。

本书是作者在近年来关于人民胜利渠灌区地下水、水文要素时间序列演变等方面研究成果与王臣博、韩伟伟硕士论文的基础上凝练而成的,由华北水利水电大学的张先起、河南省新乡水文水资源勘测局的赵文举、穆玉珠、王燕鹏和信阳市南湾水库管理局的冯利等共同完成。全书由张先起统稿,其中,第 1 章、第 6 章、第 7 章由张先起、冯利主笔,第 2 章、第 3 章、第 4 章和第 5 章由赵文举、穆玉珠、王燕鹏主笔。另外,本书部分理论、方法参考和借鉴了国内外相关的研究成果,也得到了许多同仁的大力支持与帮助,在此一并表示感谢。本书的出版得到华北水利水电大学水利工程重点学科、水利部 948 项目“粮食主产区地下水实时评价关键技术与示范”(2013028)、河南省国际科技合作计划项目“河南省粮食主产区地下水环境演变特性模拟与调控研究”(152102410052)等的联合资助。

由于作者水平有限,书中不当和错误之处恳请不吝指正。

笔者

2019 年 9 月



目录

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.3 主要研究内容	9
2 研究区域概况	11
2.1 引黄灌区发展历程	11
2.2 人民胜利渠灌区	12
2.3 灌区地下水存在的主要问题	15
3 地下水监测体系	16
3.1 监测设备	17
3.2 监测点布置	21
4 地下水水位时空变化特征	32
4.1 地下水埋深空间分布	33
4.2 地下水埋深时间变化	37
4.3 地下水埋深演变特征	44
5 地下水水质变化特征	69
5.1 水质状况分析	69
5.2 地下水水质综合评价	75
6 地下水水分运移研究	99
6.1 基本理论	100
6.2 模型构建	102
6.3 水分运移模拟	104

7 地下水埋深预测	113
7.1 基于非线性多尺度的地下水预测模型	114
7.2 基于相空间重构与 BP 神经网络的地下水预测模型	118
7.3 基于小波分解与 Elman 神经网络的地下水预测模型	126
7.4 基于 CEEMD—NAR 耦合模型的灌区地下水埋深预测	135
参考文献	146



绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

水是人类赖以生存的宝贵的自然资源，是人类进行工农业生产、生活和生态环境保护必不可少的物质基础，是任何物质都无法替代的。地表水经由含水层的补给进入地层并储存于其中形成地下水，作为水资源的重要组成部分，地下水具有水质好、分布范围广、水温恒定、不易被污染、供水量较稳定且可持续开发利用等优势。地下水资源与人类社会息息相关，在生活、工业建设以及农田灌溉等方面起到尤为重要的作用，尤其在干旱、半干旱地区，地表水相对比较匮乏，地下水便成了这些地区的主要供水水源。

我国经济正处在快速持续的发展时期，人口数量稳步增加，人们对地下水资源的需求量也在不断增加。一些地区过度地开采地下水，已经引起了地下水水位下降、地下水水质恶化等环境问题，从而导致了地面沉降、地裂、海水入侵、生态系统恶化以及生物多样性的破坏等一系列生态灾害。近年来，为解决我国饮水安全与保证农业灌溉，全国地下水开采量平均以每年约 25 亿 m^3 的速度递增，已形成大型地下水降落漏斗 100 多个，面积达数千平方公里。如何遏制地下水的过度开采，提出科学、高效的管理措施，合理配置地下水资源，实现

地下水资源的可持续利用,已经成为我国社会经济发展与生态环境保护的重要问题。

河南省是我国第一人口大省和农业大省,耕地面积仅占全国的6%,却生产出了全国10%以上的粮食,是我国粮食的主要核心产区之一。多年来,河南省粮食产量均位居全国前茅,不仅解决了上亿人的吃饭问题,每年还调出约150亿kg的原粮及加工制品,为维护国家粮食安全做出了突出贡献。与此同时,河南省是水资源比较匮乏的省份,全省水资源总量在全国居第19位,人均水资源占有量仅414.5m³,为全国水平的1/5,属于严重缺水地区。近年来,河南省经济飞速增长,工农业生产迅速发展,城市化进程不断加快,工业和生活用水需求量巨大,农业水土资源供需矛盾加剧,农业供水保证率低,农业灌溉用水短缺已成为农业发展和粮食安全的重要制约因素。由于地下水资源在时空分布上的不均匀,再加上用水在不同地区与行业上的不协调,而且缺少合理的调配与调度,造成了某些地区地下水的超量开采,形成了大面积漏斗区。由于地表水源不足、水质不好等一系列原因,在河南省的一部分地区,中深层地下水也被大量开采,形成了不同面积、不同深度的漏斗区,有些地方由于漏斗面积与深度比较大,甚至已经产生了地面下陷、开裂等环境地质问题。

人民胜利渠灌区地处河南省境内,位于黄河的北岸,是中华人民共和国成立后在黄河中下游建立的首个引取黄河水进行灌溉的大型自流灌区,是我国重要的粮、棉、油生产基地,对促进区域社会经济发展、保障粮食安全具有重要的作用。人民胜利渠灌区不但对灌区内及周边进行农业灌溉,而且还肩负着推广现代农业、保护灌区生态环境、城乡生活水源和工业用水供给等使命。但是随着区域社会经济的发展,人口增加和人民生活水平的提高,国民经济各部门用水需求增加,人们不断加大了对水资源的利用,造成灌区地下水开采量日益增加,地下水埋深不断增大。人民胜利渠灌区地下水埋深差别较为明显,灌区上游临近黄河,渠灌取水方便,地下水开发利用程度较低,地下水埋深较小,地下水蒸发的损耗大;下游远离黄河,渠灌取水不方便,以井灌为主,地下水超采严重,地下水埋深较大,甚至形成了地下水漏斗。

结合人民胜利渠灌区水资源利用状况,针对灌区地下水资源开发利用过程中所存在的问题,如何充分发挥灌区的经济与社会效益,改善灌区生态环境,促进区域水土资源的可持续利用,这就需要加强灌区地下水的监测,摸清地下水水位动态变化特征,揭示地下水演变机制,科学预测其发展趋势。

1.1.2 研究意义

人民胜利渠灌区内地下水环境的变化与灌区内引黄灌溉、自然环境及其他的人类生产耕作活动息息相关,且灌区内地下水环境的变化具有复杂性、缓慢

性、难恢复性等特点,加之近些年的农业灌溉需水量增加,地下水环境恶化,引发人们对其关联性的高度关注和思考。做好地下水监测是灌区地下水合理开发利用、水环境保护与治理、促进灌区水土资源可持续利用的必备基础工作。

通过对地下水要素变化规律进行研究,可以了解地下水资源的演变过程,在一定程度上可以实现对地下水动态变化趋势的预测。正确预测地下水水位,合理开采地下水资源,可以有效遏制地下水的过量开采,防止由于过量开采引起的地质灾害问题的发生。掌握地下水动态特征和了解其分布情况是实现地下水资源可持续利用和灌区发展规划制定的前提。

人民胜利渠灌区作为河南省重要的粮食主产区,不但可以为我国的粮食安全提供保障,还在一定程度上促进了区域经济的发展,并且对灌区生态环境的保护也起到了一定的作用。通过对人民胜利渠灌区地下水进行全面科学的监测,对灌区地下水动态特征进行研究,了解灌区地下水时空演变规律,掌握其动态变化特征,并在此基础上对地下水埋深进行预测,分析地下水水位变化趋势,可以为灌区地下水资源可持续利用、生态环境安全,以及社会经济持续健康发展提供理论基础,为各级行政部门制定灌区地下水资源规划、农业发展规划、生态环境保护与治理、社会经济发展规划提供决策依据。

1.2 国内外研究进展

一般来说,地下水动态是指地下水的各要素(水量、水位、水质等)随时间的变化状态,当人们开发利用地下水资源或者进行与地下水有关的生产、生活和科学研究时,必将面对这一课题。地下水动态研究的主要工作是对地下水信息进行提取和分析,帮助人们了解地下水资源的形成及演化,揭示地下水系统内部状态特征等。地下水动态预测使人们能够正确地认识地下水条件及变化(包括对地下水资源性质的认识及数量评价),合理开发与利用地下水资源。国内外相关的研究主要集中在地下水监测、地下水水质评价、地下水演变特征与地下水预测等方面。

1.2.1 地下水监测

地下水监测是为了及时掌握地下水各要素的变化,有效地反映地下水埋藏情况,全面反映地下水埋藏形成条件,充分认识地下水水质、水量,为地下水开发与利用提供基础依据。

早在19世纪40年代,国外就已经开展了地下水的监测工作。英格兰在19世纪40年代已经搭建了地下水水位的监测网。国外在地下水监测方面,主要是利用存储空间较大且体积较小专用于地下水监测的设备进行地下水的自动化监

测,有的设备可以直接安装在监测井的侧壁上,由于体积较小可以利用直径较小的监测井进行仪器的安装,仪器的适应性较高,加之设备集成无线传输模块,将监测和存储的数据实时传送到用户端。国外的记录仪器比较可靠,其高度集成、小型化、低功耗的性能使得记录部分和传感器可以成为小型一体化的整体,非常适用于地下水监测。另外国外产品都是一体化的,数据存储部分基本包含在传感器内;国外产品可以装在测井口上,防护性能较好,也便于建设、维护,并可以有多种安装方式;国外产品基本上都只依靠电池供电工作,一般工作状况下,工作时间都不低于2年,也有用太阳能电池或交流电充电方式由蓄电池供电的。

20世纪50年代至60年代,是我国地下水监测工作的起步阶段,水利、国土资源等部门在部分区域逐渐开始了系统的地下水监测工作。这一时期,地下水监测工作主要为工农业生产及城市生活供水服务。这一时期,在黄河宁夏灌区、河南省一些大型灌区以及安徽、江苏、湖北、江西等地开展了系统的地下水观测。

20世纪70年代初至80年代,是我国地下水监测的快速发展阶段,北方大部分省份已初步形成了一定规模的地下水监测网络,监测内容也从单一的水位扩展到水位、水温、水量、水质等多个要素的监测。我国北方以地下水供水为主的17个省(直辖市)已建立了初步的地下水水位监测网。随着社会经济的快速发展,对地下水相关数据的需求也越来越多,地下水监测工作服务的范围也逐渐扩大,其重要性也日益明显。

20世纪90年代至今,是我国地下水监测工作的积极探索阶段。由于一些区域地下水的不合理开发造成的地下水水位持续下降、地面塌陷和沉降、泉水干涸、湿地萎缩、海水入侵、地下水污染等问题越来越严重,对我国地下水资源可持续利用和生态环境保护带来了一系列严峻挑战。早期建设的地下水监测站网已不能满足现阶段经济发展的需要,因此,近年来,在部分恢复原有监测站的基础上规划并新建了一些监测站。与此同时,有关单位与部门不断研制出多种新型的地下水监测仪器设备,积极探索尝试采用更为先进的监测手段,初步形成数据采集、传输、分析、信息发布的工作框架。

地下水监测的主要内容是水位和水质。监测地下水水位的方法可以分为人工观测和自动观测,使用相应的人工和自动观测设备。人工观测地下水水位的观测设备一般是测盅和电接触悬锤式水尺。利用测盅进行地下水水位观测,操作简单,应用范围较广,但测量水位值准确性较差;自动观测在用电保证上一直存在问题。国内的此类产品主要是兼用于地表水位测量的仪器,特点是:浮子较小,直径一般为6~10cm;水位记录装置或编码器体积较大,阻力也偏大,

都要安装在地面上。地下水水质监测方法也可以分为人工采样分析和自动监测两种方法。地下水水质自动监测基本上都采用电极法水质自动测量仪器,人工测量时一般都只在现场采集水样,带回实验室分析。另外,也可以使用便携式自动测量仪在现场进行人工自动测量和采样分析。

当前,国内已经在一些领域,如地质调查和地震预测等方面,应用了一些地下水数据监测仪器,一些设备的生产制造公司也开始重视开发地下水监测方面的传输仪器。地下水和地表水有所不同,国内水文系统用的产品基本都是地表水用的遥测设备,小型化程度较差,要建站房或仪器箱。能耗方面,国内的产品大部分是以太阳能电池浮充蓄电池供电方式为主,功耗偏高,仪器的监测探头以及仪器总体的智能化、自动化水平相对较低。随着国内对地下水水质监测的认识和重视程度不断加大,人们对地下水水质评价的量化水平要求越来越高,对地下水水质监测仪器的要求也不断提升,已引领电极原理的水质监测探头以及无线自动传输设备的不断改进,并在逐步实现监测数据的自动化传输。但地下水水质与水位的监测仪器发展应充分考虑我国不同地区的实际情况,在需要自动监测地下水水位与水质的区域,一般周边环境相对恶劣,这就要求监测仪器的发展方向应以适应恶劣的环境条件为前提,引进国外先进仪器,消化吸收,促进地下水监测水平。

从2014年起,水利部和财政部等有关部门在河北启动了地下水超采综合治理试点。通过采取置换水源、调整农业种植结构、推广节水灌溉、加强地下水管理等措施压采地下水。2015年,水利部与国土资源部联合启动了国家地下水监测工程,新建、改建地下水监测站点20401个,建设期为3年,该项工程完工后,将大大提高地下水监测能力和水平。

由上可以看出,在地下水的监测方面,我国虽然积累了大量的地下水观测资料,在指导国家饮水安全、工农业生产等方面发挥了重要作用,也在有效控制地下水超采、涵养地下水源,改善生态环境,延缓和防止地质灾害等方面起到了积极作用,但现有的地下水监测体系,无论对国家及流域的宏观监测管理,还是与地方的开发利用管理要求均存在很大差距。主要表现在地下水监测专用井不足、观测数据代表性差、监测及传输手段落后、数据的可靠性和时效性差、地下水监测站网布局不完善等问题。

1.2.2 地下水水质评价

地下水水质评价就是评价地下水的状况,及时发现水质污染并采取防治措施,这是一项基础性、前期性工作。地下水水质评价的目的来自人类生活以及生产的需求,基于不同的用途。地下水水质评价选择的指标以及对评价标准、分类结果的判断都存在差异,这决定了地下水水质评价与分析方法的多

样性。

1997年, H. K. Lee 等将灰色系统理论与专家系统相结合建立了水环境质量生态评价模型; 2000年, Bin Zhang 等利用贝叶概念和神经网络组合进行了区域非点源污染的评价等。20世纪80年代初, 原地质矿产部组织开展了第一轮全国地下水资源评价工作; 2000—2002年, 国土资源部又组织开展了新一轮全国地下水评价工作, 对全国地下水进行了重新计算和评价。1974年, 我国提出第一个表示水质污染情况的综合指数, 期望用一种简单、易行的统计数值来评价在多个污染因子条件下水环境质量的综合污染情况; 1979年, 唐永鑫系统介绍了环境质量综合指数, 并加以剖析。1979年, 王华东阐述了环境质量预测评价及其方法, 并指出应该把环境保护工作做在环境污染之前, 摆脱环境保护工作的被动状态。1982年, 邓聚龙在国际性杂志《系统和控制通信》上发表了论文《灰色系统控制问题》, 宣告了灰色系统理论的诞生, 并在地下水环境质量评价方面得到了应用。1985年, 林宗振提出环境质量综合指数的计算可采用混合加权模式。1994年, 林衍根据各种污染因子对环境质量的的不同影响, 将混合加权模式和灰色局势决策法相结合, 用于环境质量评价。1994年, 曹毅军、林宗振提出一个比较完善的计算环境质量综合指数的K一级混合加权模型, 解决了在单项分指数超过9个时普通混合加权模式的不完善之处。1998年, 孙才志、廖资生针对常规的水环境质量评价及污染因子赋权方法存在的不足, 提出了两种改进污染因子赋权方法, 在此基础上应用模糊识别方法进行水环境质量评价。2004年, 张志祥、陆晓华运用因子分析法对汉江各主要水质断面进行水质污染因子分析及综合评价。2006年, 谢武、王旭根据物元分析理论, 探讨了水库水质的综合评价模型。2007年, 叶招莲利用幂函数法、向量模法和加权平均法等3种综合指数评价法与模糊评价法相结合的综合集成法——模糊综合指数法和综合加权法对常州市区几条主要河水环境现状进行了评价。2007年, 王娟、高原从众多水环境质量评价方法中选取单项指数法、加权均值型指数法、模糊数学法进行介绍, 并运用这三种方法对大汶河某年监测数据进行评价。2004年, 薛巧英综述了各种水环境质量评价方法, 对目前水环境质量评价中的不同方法进行了比较分析, 对各种评价方法的优点和不足做出评述。2007年, 苏耀明、苏小四详细综述了水质评价方法、评价指标与水质标准。2008年, 冯梅讨论了水环境质量评价、预测的数学模型及其应用。2008年, 刘金生等通过构建基于BP(反向传播)神经网络模型对抚河水质进行评价。2009年, 李俊、卢文喜等采用主成分分析法, 对长春市石头口门水库汇水区的主要河流进行了水环境质量综合评价。20世纪80年代以来, 水环境质量评价的方法较为简单, 多为指数法, 有单因子指数法和综合指数法等。80年代后期, 随着计算机技术的发展、

数学理论的深入研究,使现代数学理论应用于水环境质量评价得以实现,有基于模糊理论的水环境质量评价法,具有代表性的有模糊概率法、模糊综合评判法、模糊综合指数法等。有基于灰色系统理论的水环境质量评价法,代表性评价方法有:灰色关联评价法、灰色聚类法、灰色贴近度分析法;基于统计理论的主成分分析法;基于神经网络的水环境质量评价法;基于地理信息系统(GIS)的水环境质量评价法。

综上所述,我国的地下水环境质量评价工作开展较晚,在评价体系上难以形成统一的优劣判断,在实际应用中应该更加注重方法与实际的融合,所采用方法与假设是否与地下水水质评价一致。地下水水质评价的方法众多,但难以形成统一的优劣判断,主要原因有以下三个方面:一是在判断和筛选对环境影响较大的特征污染物方面,由于水质检测、样本数据方面的限制,使得由于出现重大遗漏而导致地下水水质评价不实。二是数学方法的使用在一定程度上可以减少人为评价的主观性,但在实际应用中应该更加注重方法与实际的结合,所采用方法的前提与假设是否与地下水水质具体情况一致。每一种方法都有其优点和缺点,并不是所有的数学方法都适合于地下水水质评价,因此,在数学方法与计算模型选择上应该更加趋于谨慎。三是专家具有丰富的经验与知识,以及对评价对象的了解,采用专家决策支持的方法更快更容易获得分类结果,但同时这也存在不客观、不全面等人为因素的影响。

1.2.3 地下水演变特征研究

地下水动态研究是水文地质和农田水利领域的重要研究内容,对地下水的动态进行分析,是地下水动态研究的主要内容,早就引起国内外学者们的重视。卡明斯基、阿维里杨诺夫、巴鲁巴琳诺娃-柯琴娜等众多学者都先后对这类问题做了深入的研究。早在20世纪初,国外一些学者就对地下水动态变化进行了系统的研究,他们采用的方法是水均衡方法和水文地质比拟法。20世纪40年代,苏联水文地质学家Kamenski就曾将其建立的地下水运动差分方程应用于地下潜水动态预报。20世纪60年代初,苏联的水文地质学家康诺普梁采夫等出版了《地下水天然动态及其规律》一书,随后,通过研究地下水动态与演变特征来了解地下水资源形成及其性质这一十分有效的方法,得到了许多国家的共识,他们相继开始了对地下水动态与演变特征的研究。1978年, Hodgson Frank D. I. 提出将多元线性回归方法应用于模拟地下水动态研究的思路,之后, E. Zaltsberg于1982年采用多元回归方程对苏联地下水进行动态预报。1983年 Young 分析了土壤水和地下水流通边界问题中的时空变量标度问题,为当时一维空间内土壤水吸附以及与地下水的交换研究提供了依据,同时也为类似于水向植物根部运动和抽水井的放射性问题的研究提供了参考。

国外对地下水动态模拟的研究和应用较早,且理论、技术等各方面相对成熟,目前已经从“水量问题”的应用研究逐步过渡到“水质问题”的应用研究上,以解决各种更复杂的地下水问题。早期主要采用比较简单的水均衡法和水文地质模拟法对地下水动态特征进行分析,其后随机方法与数值模拟方法的应用迅速发展。与国外相比,我国的水文地质工作开始的相对较晚,直到1958年水文地质长期观测站才建立起来,因此,长期的动态观测资料也比较缺乏。1970年以前,我国很少有人进行地下水动态方面的研究,直到70年代后期,地下水动态问题才引起了一些专家学者的重视,他们相继开始对地下水动态进行系统的研究。一大批专家学者针对我国各地区地下水资源的特征,使用不同方法对地下水动态与演变特征进行了系统研究,取得了丰硕的成果。1976年,原河北水文地质局水文地质第四大队、河北大学数学系运用回归法对太行山地区大清河流域的地下径流进行了分析和预报。20世纪80年代,杨成田归纳总结了国外地下水动态的成因及类型。颇志俊在1991年提出地表水与地下水联合运用的算法,通过迭代方式以掌握地下水埋深的变化,合理分配供水量,并保持地下水处于动态平衡状态。

已有的大量研究表明地下水水位数据具有趋势性、周期性,一些非稳定的时间序列模型便被广泛用于地下水水位的分析,例如运移函数(TF)模型、自回归的综合移动平均(ARIMA)模型。Scheibe等分析了在不同尺度下的地下水流及其运移行为。Juan等运用ARC/INFO和MODFLOW模拟了美国Jackson Hole地区的冲积含水层。国内相关研究主要是采用模拟模型或回归方程,例如赵传燕等国内学者利用FEFLOW模型模拟黄河流域上游干旱区地下水水位动态变化,分析了不同时空条件下地下水水位的变化规律。1992年周仰效通过构建联合模型对地下水水位时间序列进行分析等。

我国关于地下水动态演变特征的研究主要是使用确定性的方法进行分析,随机性方法应用比较有限。近些年来,应用一些数值模拟的新方法、新理论进行地下水动态演变方面的研究在我国发展迅速。我国对地下水动态研究的工作在不断加深与进步中,地下水动态演变研究工作在整個水文地质工作中所占的比重将会进一步增加。

1.2.4 地下水预测

1999年,翟国静、王瑞恩通过对地下水动态与开采量之间的关系进行分析,运用灰色系统方程对沧州市地下水水位进行了预测,得出较为理想的结果。2002年,郑书彦、李占斌、李喜安将人工神经网络方法应用于地下水水位动态的预测中,结果表明此方法的预测精度较高。2004年,齐学斌、樊向阳等在进行水资源平衡分析基础上,对井渠结合灌区的地表水和地下水进行联合优化调度,

提出引洪补给方案,并采取地膜覆盖集雨种植节水技术和引洪补源技术,实现灌区水资源的高效可持续利用。2008年,根据对山东省淄博市地下水水位动态特征的研究,杨丽丽等建立了关于地下水水位和开采量、降水量的二元非线性回归模型,同时对模拟精度进行分析。卢文喜对地下水运动数值模拟中的边界条件进行了分析,提出在模型预报前要考虑自然因素、人类活动因素及邻区水流条件因素产生的耦合效应问题,先对边界条件进行预报。

Nan Zhang等运用GSM、RBF和ANFIS模型对吉林市的非承压含水层地下水埋深进行了预测;Adhikary等采用交叉验证方法比较了IDW、RBF、OK、UK插值方法在地下水水位预测中的效果;Al-Mahallawi等利用神经网络预测了农村农业地区的地下水硝酸盐污染的变化;Maiti等运用三种神经网络模型对地下水水位进行了预测;杨忠平等运用时间序列模型预测了吉林省地下水的动态变化;沈冰等利用灰色记忆模型对新疆和田地下水埋深进行了预测;李荣峰等采用自记忆模型对山西晋中地下水埋深进行了预测。

随着人们对地下水资源开发利用的增加,与地下水演变有关问题的范围和复杂性也随之越来越大。工农业生产和人类活动对区域地下水水位、水质的影响日益突出。地下水动态演变的模拟可以量化地下水的动态变化与人类活动的关系,可以比较不同开发利用情景,并分析其地下水环境带来的影响,以便人们了解采取什么行动来保证地下水的可持续利用,维持合适的生态水位。

1.3 主要研究内容

(1) 人民胜利渠灌区地下水水位动态变化特征研究。对人民胜利渠灌区及各分区的多年地下水埋深观测数据进行统计分析,使用Surfer软件,运用克里格(Kriging)插值法,对人民胜利渠灌区1993年、1998年、2003年、2008年和2013年5个年份地下水年平均埋深的监测数据进行分析,绘制灌区地下水埋深的等值线图。利用灌区及各分区现有1993—2013年21年地下水埋深数据,绘制灌区及各分区多年地下水平均埋深变化曲线,根据所得到的曲线以及变化速率分析灌区及各分区地下水埋深年际变化特征。

(2) 人民胜利渠灌区地下水埋深演变研究。采用趋势系数法、Mann-Kendall秩相关法对人民胜利渠灌区1976—2013年38年地下水序列进行趋势性分析,并通过直线趋势法进行作图检验,验证结果的准确性。利用最大熵谱估计对地下水埋深作周期分析,利用Mann-Kendall秩相关法对地下水埋深作突变分析。在相空间重构理论基础上,通过自相关函数法求出灌区及各分区的延迟时间,利用G-P算法求出关联维数,并利用小数据量法计算出最大Lyapunov

指数研究灌区地下水埋深时间序列的混沌性。

(3) 人民胜利渠灌区地下水水质评价。根据河南省人民胜利渠灌区具体情况,针对灌区内不同区域的引用水方式以及区域耕作模式和作物,对人民胜利渠进行分区,筛选出影响灌区内地下水水质的主要指标,对灌区内地下水水质的空间发展趋势进行评价。分析灌区内地下水环境变化机理,通过对影响地下水环境的不同系统及因素的分析,构建地下水水质评价体系,遵循评价过程中指标的量化、科学、实用性等原则,结合现有的标准、规范等分别制定灌区内地下水水质评价的基于模糊物元模型和改进熵权属性识别模型的评价指标和评价指标标准,并利用模型进行水质综合评价。

(4) 人民胜利渠灌区地下水水分运移特性研究。利用 Hydrus 软件模拟地表水力活动因子与地下水环境的相互作用过程,阐释灌区内地下水水分传输的机理,揭示农业生产活动对地下水的相互影响机制,为灌区水资源合理利用与优化配置、灌溉模式的制定、运行管理提供决策依据。

(5) 人民胜利渠灌区地下水埋深预测研究。通过对灌区 1993—2012 年 20 年 240 个月的地下水埋深序列进行 EMD 分解,得到 6 个 IMF 分量和 1 个残余分量,在对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换的基础上,确定了建模所需的参数,根据是否考虑 IMF 初相位的情况,建立了两个地下水埋深的预测模型。在对灌区地下水埋深时间序列混沌特性分析的基础上,利用嵌入相空间来确定前期影响因子,结合神经网络,建立基于混沌相空间技术的 BP 网络模型,对人民胜利渠灌区及各分区地下水埋深进行预测。通过降低序列的非平稳性,构建序列分解—重构的预测模型来提高预测精度,将小波分解和 Elman 网络结合构建地下水埋深预测模型。利用互补集合经验模态分解可通过从原信号中提取固有模态函数 (IMF),从而分离信号的低频与高频部分,来实现对非平稳化序列的平稳化处理,以及 NAR 神经网络具有较强的自主学习适应能力及泛化能力的优势,构建基于 CEEMD 和 NAR 网络的灌区地下水埋深预测耦合模型。