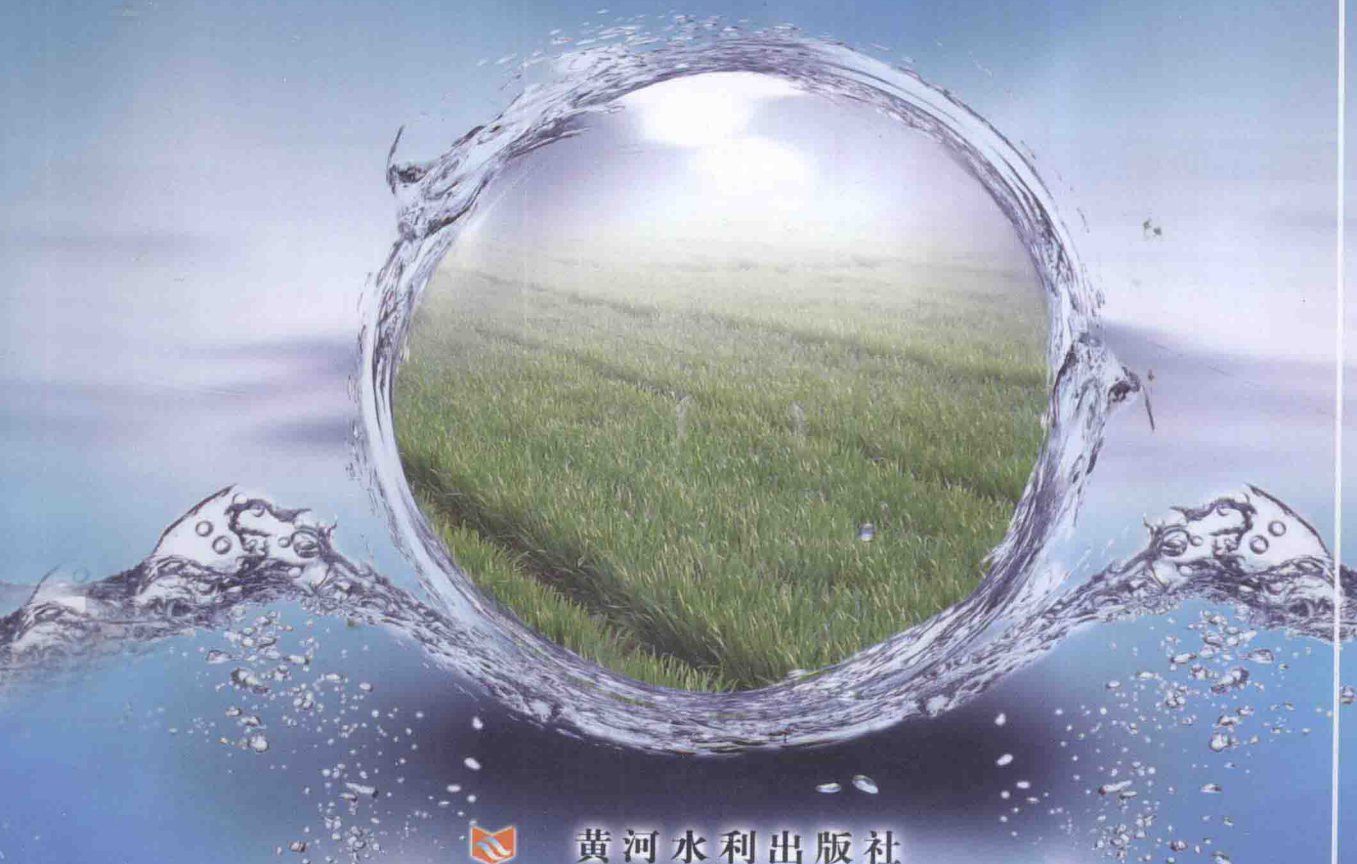


国家科技支撑计划项目专著

灌区地下水开发利用 关键技术研究与应用

黄修桥 徐建新 刘俊民 冯俊杰 等编著



黄河水利出版社

国家科技支撑计划项目专著

灌区地下水开发利用关键技术 研究与应用

黄修桥 徐建新 刘俊民 冯俊杰 等编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是国家科技支撑计划项目“大型农业灌区节水改造工程关键支撑技术研究”中“灌区地下水开发利用关键技术研究”课题的研究成果,主要针对大多数灌区都面临的水资源短缺、地下水不合理或无计划的开采、管理水平不高、地下水公害和环境恶化等问题,提出和形成了灌区水资源及环境承载力评价量化指标体系、适用于不同类型灌区的井群布局技术、不同成井条件的井型结构标准、新型成井技术规程和机井诊断与改造修复技术规程,以及地下水与地表水优化调度技术体系及地下水保护技术体系等5套有关灌区地下水开发利用的技术指标体系或方法、技术标准和规程等,并开发出灌区地下水承载力评价与预测系统、灌区地下水与地表水联合调度智能监控系统2套系统平台和相应的配套设备。

本书是有关农业节水灌溉学科中灌区地下水和地表水资源合理开发利用的理论研究和关键技术、设备研制的科技学术著作,可供从事农业水资源合理开发利用的科技工作者和农业灌区技术管理者、推广者以及相关专业的大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

灌区地下水开发利用关键技术研究与应用/黄修桥等
编著. —郑州:黄河水利出版社,2013. 12

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0659 - 4

I. ①灌… II. ①黄… III. ①灌区 - 地下水资源 - 资源
开发 - 研究 ②灌区 - 地下水资源 - 水资源利用 - 研究
IV. ①P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 299879 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@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:hhsllwlp@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:18.75

字数:430千字

印数:1—1 000

版次:2013年12月第1版

印次:2013年12月第1次印刷

定价:66.00元

灌区地下水开发利用关键技术 研究与应用

编著人员

主 编:黄修桥

副 主 编:徐建新 刘俊民 冯俊杰

主要编著人员:(以姓氏笔画为序)

王桂芬	邓 忠	叶水根	冯绍元
冯俊杰	朱崇辉	仵 峰	任志远
刘 杨	刘俊民	米 宁	孙 浩
严宝文	李金山	李彦刚	杨宝中
张治晖	陈南祥	陈 震	范永申
郑文刚	降亚楠	胡笑涛	段福义
贾艳辉	徐建新	徐景东	高胜国
郭志新	唐泽军	黄修桥	黄 斌
韩启彪	蔡明科	翟国亮	魏晓妹

前 言

农业是我国的用水大户,年用水总量 4 000 亿 m^3 ,占全国总用水量的 70%,其中农田灌溉用水量 3 600 亿 ~ 3 800 亿 m^3 ,占农业用水量的 90% ~ 95%。农业用水中,地下水约占 20%,北方地区仍以地下水作为主要的灌溉供水水源。我国地下水年开采量中用于农田灌溉的约占 54%。据统计,截至 2003 年底,我国机井数达 470 万眼,井灌面积为 1 651.26 万 hm^2 ,占全国有效灌溉面积的 29.5%。井灌区是我国重要的粮食和经济作物高产、稳产区,对我国粮食的贡献超过全国总量的 25%,其经济作物和蔬菜产量超过全国总量的 50%,为社会经济的发展作出了巨大的贡献。另外,机井的灌排双重功能,也对降低地下水位、防止土壤次生盐碱化起到了重要的调控作用。

地下水资源作为水资源的重要组成部分,是灌区社会经济发展的基础资源之一。但是,随着我国社会经济的不断发展,地下水资源开采量日益增加,在灌区地下水开发宏观管理方面,由于缺乏科学合理的开采布局和调蓄,缺乏操作性强的地下水动态信息采集的监测手段,各地开采程度不均衡,有些地区严重超采,甚至引发了严重的生态环境问题。而有些地区则尚未合理开发,使得有限的地下水资源无法得到充分有效的开发利用。在灌区地下水开发利用的微观技术方面,近些年对机井的井型结构和成井技术的研究重视不够,原有技术已显得落后,不能满足井灌建设发展的需求,特别是我国井灌区每年需要修复的机井大约占到当年机井保有量的 3.35% (约 15 万眼),但至今还没有形成一整套行之有效的受损机井诊断与改造修复技术及方法。大多数灌区都面临着水资源短缺、水的利用率和利用效率较低、管理水平不高、环境恶化等问题,特别是许多灌区,由于对地下水不合理或无计划的开采,地下水位大幅度下降,提水成本成倍增长,更严重的是,使地下水环境产生了一系列的问题,已经造成了地下水公害,如地面沉降、水质污染、咸水入侵等,而对生态环境造成的潜在危害,一旦出现就很难挽回。因此,如何合理开发利用地下水资源,并渠结合灌区地表水与地下水如何调度,应该采取哪些技术,如何实现地下水资源的采补平衡就显得尤为重要与迫切。

为此,2006 年科技部设立了“十一五”国家科技支撑计划“大型农业灌区节水改造工程关键支撑技术研究”项目,由水利部组织实施。该项目中的“灌区地下水开发利用关键技术研究”课题由中国农业科学院农田灌溉研究所主持,西北农林科技大学、中国农业大学、中国水利水电科学研究院和华北水利水电大学参加共同完成。在课题组负责人的组织带领下,全体人员共同努力和不懈工作,在大量查阅国内外有关灌区水资源利用情况、机井布局结构、成井技术、地下水与地表水联合调度和优化管理模式及整体对生态环境的影响等文献的基础上,根据灌区存在的实际情况,结合灌区地下水开发利用过程中存在的井型结构和成井技术落后、缺乏地下水动态信息监测、地下水资源开采程度不均衡,并引发严重生态环境等实际问题,在整合现有的地下水开发利用技术的基础上,依据灌区地下水开发利用情况、水资源时空分布状况和不同类型灌区地下水资源的特点进行科学分类,

制订科学合理的研究措施、手段和试验方案,将科研机构的技术研究优势和生产单位进行有机结合、相互支撑、相互促进,采取产、学、研相结合的模式,分别从灌区水资源及环境承载力评价量化标准、指标体系和评价方法,不同类型灌区的地下水开采模式和机井合理布局;灌区地下水资源合理开发利用的最优管理模式,基于“3S”技术的地下水动态观测可视化平台;水资源可持续利用的地下水与地表水联合利用技术,相关的优化管理运行模式;受损机井诊断与改造修复技术及方法,不同成井条件下的适宜井型结构和成井工艺这四个方 面展开相关的技术研究。通过对灌区的实地调查、田间具体试验和相关设备的短期应用考核,有针对性地进行机井合理布局、修复与井型结构及成井技术的改进,提出灌区水资源及环境承载力评价量化指标体系、不同成井条件的井型结构标准、新型成井技术规程和机井诊断与改造修复技术规程、地下水与地表水优化调度及地下水保护等与之适应的地下水开发利用关键技术和技术体系,形成适用于不同类型灌区的井群布局技术,并研究地下水与地表水联合应用的时空调度和监控技术,开发和制定出地下水动态监测数据自动观测、记录、采集、传输的系统软件和工具等各项技术成果。

课题实施后,形成的各项技术先进,针对性强,应用考核过程中,可明显降低大型灌区机井报废率,提高井灌效益;稳定或增加井灌面积,节约灌溉用水,促进灌区地下水开发利用步入良性循环,具有广阔的市场应用前景和巨大的社会、经济、生态环境效益。从而突破了制约灌区地下水合理开发利用的关键技术,构建出灌区尺度地下水可持续利用技术体系和长效利用机制,为灌区地下水资源的合理、高效开发和可持续利用提供技术支撑。

本书是一本关于农业节水灌溉学科中灌区地下水和地表水资源合理开发利用的理论研究和关键技术、设备研制的科技学术著作,由黄修桥、徐建新、刘俊民、冯俊杰等编著。全书主要内容共分八章,其中:第一章、第五章和第八章由中国农业科学院农田灌溉研究所主笔撰写,主要是课题任务的研究现状和发展趋势、灌区各关键技术的应用考核和推广前景,以及灌区地下水和地表水联合利用技术部分;第二章、第三章由华北水利水电大学主笔撰写,主要是灌区地下水资源承载力理论及评价方法、指标体系等部分;第四章、第七章由西北农林科技大学主笔撰写,主要是灌区地下水开采模式和机井布局、受损井诊断与修复技术部分;第六章由中国水利水电科学研究院主笔撰写,主要是灌区机井的成井方法和工艺等技术部分。

在本书编写过程中,许多专家、学者给予了大力支持和指导。在此,对各位的热情帮助,我们谨致以深切的谢意!

鉴于本书编著时间仓促,加上作者水平有限,书中还存在许多欠妥、错误之处,恳请广大读者批评指正,并不吝赐教。

作 者

2013 年 6 月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 研究背景和意义	(1)
第二节 国内外研究现状和发展趋势	(4)
第三节 研究内容与目标	(14)
第四节 研究方法与技术路线	(18)
第二章 灌区地下水承载力理论	(20)
第一节 灌区地下水承载力的概念、内涵和特征	(20)
第二节 灌区地下水承载力影响因素	(26)
第三节 灌区地下水承载力研究的理论基础	(29)
第四节 灌区水文循环模式的基本理论与模型	(32)
第三章 灌区地下水承载力评价方法与指标体系	(61)
第一节 灌区地下水评价方法和模型	(61)
第二节 灌区地下水承载力评价指标体系	(75)
第三节 灌区地下水承载力评价与预测系统	(78)
第四章 灌区地下水开采模式及机井合理布局	(114)
第一节 典型研究区的选择及灌区机井现状调查	(114)
第二节 系统研发及类型区的划分	(117)
第三节 灌区供需水量平衡分析	(119)
第四节 灌区机井合理布局方案	(131)
第五节 灌区机井布局调整的策略	(135)
第五章 灌区地下水与地表水联合利用技术	(137)
第一节 人民胜利渠灌区的运行特点与存在问题	(137)
第二节 灌区水盐与水资源的调控管理	(139)
第三节 灌区地下水与地表水联合调度数值模拟和运用技术研究	(142)
第四节 灌区地下水与地表水联合调度智能监控系统	(164)
第六章 灌区机井新技术	(167)
第一节 机井技术综述	(167)
第二节 新型塑料井管力学性能与水力学特性	(175)
第三节 弱透水性含水层增大出水量的成井方法	(190)
第四节 卵砾石含水层辐射井技术	(206)
第七章 灌区受损机井诊断与修复技术	(220)
第一节 灌区机井受损类型	(220)

第二节 受损机井诊断技术	(223)
第三节 受损机井修复技术	(228)
第四节 遗物打捞	(239)
第五节 旧井修复增水技术	(244)
第八章 灌区地下水开发利用关键技术应用	(246)
第一节 应用实例	(246)
第二节 推广应用前景	(287)
参考文献	(288)

第一章 绪 论

第一节 研究背景和意义

一、研究背景

地下水资源作为水资源的重要组成部分,是灌区社会经济发展的基础资源之一。我国现有灌溉面积在 2 万 hm^2 以上的大型灌区 402 处,生产了占全国总量 1/4 以上的粮食,创造了占全国总量 1/3 以上的农业生产总值,提供了占全国 1/7 以上的工业及城市生活用水,受益人口达到 2 亿多人。但是,由于我国大部分灌区位于水资源短缺地区,水资源严重不足,灌区内生态环境遭到不同程度的破坏,农业生态和人类生存环境呈恶化趋势,严重制约了灌区经济社会的可持续发展。

水资源具有灌区环境和资源要素的双重身份,对自然、生态环境保护起到核心作用,人与自然和谐共处的关键问题在于人类社会的发展不能超过资源和环境的承载能力,正确评价灌区地下水资源承载力,对灌区社会经济的可持续发展、生态环境的良性循环和地下水资源的可持续利用具有重要作用。作为可持续发展研究和水资源安全战略研究中的一个基础课题,水资源承载力研究已引起学术界高度关注,并成为当前水资源科学中的一个重点和热点研究问题。众多学者对水资源承载力展开了多种形式的研究,从基本理论、研究方法到实际应用均进行了积极的探索。但是,对水资源承载力的研究,特别是地下水承载力的研究,还处于探索阶段,没有形成成熟的研究理论和方法。水文循环决定了水资源的形成和演变规律,任何水资源问题的研究都不能脱离水文循环的研究,水资源承载力的研究也不例外。近 50 年来,全球许多地区发生了严重的水问题和水危机,严重制约了社会经济发展。各种水问题和水危机的产生,追究其根源,除近 50 年来气候变暖、人口剧增、城市和经济生产规模迅猛发展等原因外,关键是人们对水文水资源循环演化规律认识不足。为探索变化环境下的水资源演变规律,解决日益严重的水问题和水危机,国际水文计划(IHP)、世界气候研究计划(WCRP)等,开展了一系列全球变化问题的前沿性研究,气候变化与人类活动对水循环过程的影响已成为全球变化研究中的重大问题和核心内容之一。分布式水文模型已成为当前面向多种目标水文研究的重要工具,是解决水问题的重要技术支撑,也是现代水文模型发展的一个趋势和方向。灌区中的水文循环,除包括自然流域中的降水、蒸发、入渗和径流外,还受农田耕作、引水、灌溉、排水、蓄水以及地下水开采等人为活动的影响,在人类活动干扰下,自然水循环系统发生了变化,取而代之的是人工与自然共同作用下的自然-人工复合水循环系统。正是由于人们对灌区大气水-地

表水-土壤水-地下水的转换机制缺乏系统、深入的认识,致使灌区内生态环境遭到不同程度的破坏。

地下水又是北方灌区重要的灌溉水源,机井建设在保障国家粮食安全、改善农田生态环境和促进灌溉农业的持续发展中起到了极其重要的作用。我国地下水年开采量约 1 000 亿 m^3 ,用于农田灌溉的约占 54%。据统计,到 2003 年底,我国机井数达 470.94 万眼,井灌面积为 1 651.26 万 hm^2 ,占全国有效灌溉面积的 29.5%。其中纯井灌区约占井灌总面积的 4/5,配套机井占总井数的 89.7%,深井约占总井数的 8.5%。然而,由于多方面的原因,灌区在机井建设方面缺乏科学合理的规划和有效的监管,致使一些区域出现了机井密度过大、地下水位大幅度下降、提水费用增加、机井报废等问题;而在另外一些区域,由于机井密度较疏,地下水资源尚未得到有效利用,降低了灌区抗御旱灾的能力。尤其是灌区近 40% 的机井属于 20 世纪 60~70 年代初建成的,大部分机井已超期服役,机井老化及报废情况严重,更新改造速度缓慢,使灌溉保证率降低,严重影响了灌区地下水资源的可持续开发利用,机井建设现状已不能适应新时期大型灌区持续发展的要求。因此,研究大型灌区地下水开采模式及机井合理布局技术和受损机井诊断与修复技术显得十分迫切和必要。

随着计算机技术、“3S”技术等新技术的迅速发展和广泛应用,地下水资源管理模型从结构简单、建模考虑的因素较少、管理目标单一,发展到结构更为复杂的大系统、多层面、多目标、多级优化的综合管理模型。但是,最优管理模型尚未在灌区地下水开发利用中得到充分利用,特别是在考虑灌溉条件下,如何结合“3S”技术建立地下水系统与作物、生态系统之间的耦合模型,以实现地下水资源最优管理模式还需要进一步的研究。建设灌区地下水监测网络,完善地下水资源评价技术体系,是灌区科学管理和合理利用地下水资源的重要基础。目前我国的地下水监测技术还沿用传统的人工观测方法,工作量大、覆盖面小、监测费用大,且只能静态观测。因此,迫切需要开发出基于现代“3S”技术的地下水动态监测可视化平台,把我国地下水监控技术提升到一个新的水平,实现灌区地下水动态观测的可视化,为灌区正确管理和合理利用地下水资源提供可靠的地下水动态监测数据和决策依据。

二、研究意义

水资源和环境承载力关系到灌区水资源可持续利用和经济社会及生态环境的可持续发展。目前,水资源及环境承载力的评价方法和指标体系仍处于探索之中,还没有形成统一的评价方法和指标体系,对灌区水环境承载力的研究只有对其承载力特征及评价方法的论述,而尚未有具体的应用研究。对大型灌区水资源及环境承载力的研究基本上处于起步阶段,大多集中于水资源承载力的概念和评价方法的具体应用方面,尚未形成灌区水资源承载力研究的成熟理论和方法体系。因此,准确把握大型灌区水资源的承载能力和水环境容量,提出科学系统的灌区水资源及环境承载力评价的量化标准、评价指标体系和评价方法,可为灌区改造中地下水的合理开发利用提供技术支持。

地下水资源开发利用的主要途径之一是发展井灌。近年来,国外有关机井布局研究工作的进展报道较少。我国从 20 世纪 60 年代开始大规模发展井灌,随着经济社会和农业生产的发展,地下水的开采量迅速增加。但由于机井布局不合理、无序打井,不少地方出现了地下水漏斗,引发了一系列生态环境问题。合理的机井布局对灌区地下水资源的采补平衡有着重要的作用,不同的井群布局直接关系到能否对当地水资源进行合理利用。当前井群合理布局问题的研究尚未得到足够的重视,已不能适应新时期大型灌区持续发展的要求。因此,提出适用于不同类型灌区的地下水开采模式和机井合理布局,可为大型灌区的技术改造,合理开发利用地下水资源,并保护水生态环境奠定基础。

通过建立灌溉水入渗的土壤水-地下水转换过程及相应的数学模型,研究灌区地下水监测体系最优建立方案和地下水各项动态要素(水位、水量、水质等)的自动观测、记录、数据采集和传输的方法,研究灌区地下水资源合理开发利用的最优管理模式,建立以地下水位、作物需水以及生态环境为约束条件的地下水资源优化管理模型和主要含水层三维地质结构模型;通过模拟数据管理和一体化系统建设、BS 模式的三维显示系统开发,提出地下水实施评价方法和预警方法,并利用“3S”技术,集成先进的传感器技术、计算机技术、通信技术等,开发基于“3S”技术的地下水动态观测可视化平台,实现自动观测、数据传输和管理分析、模拟结果可视化表达及网页实时发布,并能动画演示地下水位的变化情况,进行灌区尺度上的地下水开发利用综合技术研究。

我国北方许多大型灌区采取井渠结合的灌溉模式,如何在时空上合理配置地表水和地下水,在维系良好生态环境的前提下,使灌区水资源得到最优利用,一直是研究的热点和难点。要对井渠结合灌区水资源进行优化配置,必须定时定量地安排使用好各种水源,并对他们的相互转化关系进行人为的调控,其核心是合理调控地下水位,保持采补平衡,以实现水资源高效利用。但目前有关地下水和地表水联合利用的技术还不够成熟,不具有可持续性,需要针对地表水与地下水具有多次相互转化可重复利用和地表水与地下水存在显著的时空差异的特点,进一步开展地下水与地表水联合应用的优化调度和动态监测、监控技术研究,建立并形成地下水与地表水优化调度、涵养保护地下水的技术体系和水资源开发利用良性循环机制,为灌区水资源的合理调配和可持续利用奠定基础。

20 世纪 90 年代以来,随着灌溉水量的逐渐增加,出现了井灌区地下水超采、地下水位下降、机井损坏及报废严重、井灌工程灌溉效率低等问题,严重影响着大型灌区地下水资源的可持续利用与灌区的健康发展。在井型结构和成井技术方面,大多沿用比较传统的技术与方法,迫切需要引入现代技术。在机井诊断与改造修复技术方面,尚未形成成熟的集成技术。根据有关部门预测,开展井型结构与成井技术研究以及机井诊断与改造修复技术和方法研究,不但可为我国的井灌建设提供先进的科技支撑,而且还可以节能降耗,显著提高灌区地下水开发利用工程的综合效益。

因此,针对我国灌区地下水开发利用中存在的上述问题,在整合现有的地下水开发利用技术的基础上,依据灌区地下水开发利用情况和水资源时空分布状况进行科学分类,依据不同类型灌区地下水资源的特点,有针对性地从以下四个方面进行研究:①灌区水资源

及环境承载力评价量化标准、指标体系和评价方法,不同类型灌区的地下水开采模式和机井合理布局;②灌区地下水资源合理开发利用的最优管理模式,基于“3S”技术的地下水动态观测可视化平台;③水资源可持续利用的地下水与地表水联合利用技术,相关的优化管理运行模式;④受损机井诊断与改造修复技术及方法,不同成井条件下的适宜井型结构和成井工艺。突破制约灌区地下水合理开发利用的关键技术,并通过各阶段成果和配套产品的示范、应用考核,构建灌区尺度地下水可持续利用技术体系和地下水资源长效利用机制,为灌区地下水资源的合理、高效开发和可持续利用提供技术支撑。

第二节 国内外研究现状和发展趋势

一、国内外研究现状

灌区地下水开发利用是一项系统工程,地表水与地下水具有多次相互转化及重复利用的特点,在灌区尺度上处理好经济效益和环境效益、眼前利益和长远利益的关系,充分了解灌区水资源的内在联系的基础上,国内外在地下水开发利用理论与技术方面的研究已经取得了丰硕的成果。许多学者、专家不但有丰富的理论研究成果,而且也积累了成熟的生产实践经验,形成了卓有成效的专家群体,培育了大量的中青年专家团队,活跃在科研和生产第一线。有关地下水开发利用理论与技术方面的研究现状如下:

(一) 灌区水资源及环境承载力评价量化标准和指标体系研究

国际上很少有专门以水资源承载力及水环境承载力为专题的研究,大都将其纳入可持续发展的范畴。我国由于面临巨大的人口和水资源短缺的压力,因此专门提出了“水资源承载力”的问题,并成为水资源领域的一个新的研究热点。研究重点大都集中在流域或区域尺度水资源承载力概念、水资源承载力评价指标体系和评价方法方面,取得了许多有价值的研究成果。而关于灌区水资源及环境承载力的研究起步比较晚,近几年来,一些研究者借鉴流域或区域水资源承载力研究的思路或方法,从不同方面进行灌区水资源承载力的研究,也取得了一定进展。目前对水资源承载力的研究方法较多,概括起来主要有三类:经验公式法、综合评价法和系统分析法。代表性的研究主要有:杨晴等(2002)从灌区水资源禀赋特性、供需水量及水环境三个方面建立了五个指标,通过指标定值分析对大型灌区现状水资源利用特性(水资源余缺情况、开发程度和可持续利用能力)进行了分类,提出了各类灌区节水改造的方向;周维博(2002)采用模糊综合评判方法,对河西走廊灌溉农业发展的水资源承载力进行了分析;段青旺等(2005)在前人承载力研究的基础上,根据农业生产的实际情况,提出了灌区农业水资源承载力的概念,建立了基于各种作物被承载能力和作物、需供水过程的农业水资源承载力模型;杜新发等(2005)在分析灌区水资源承载力影响因素的基础上,提出了水资源承载力评价的多级综合评判方法,并将该方法用于四川都江堰灌区水资源承载力的研究;李清河等(2005)以乌兰布和沙漠东北部绿洲灌区水资源供需平衡为基础,通过不同供水方案水资源承载力平衡指数及绿洲规

模、人口和人均 GDP 承载力分量指数的度测,综合研究了绿洲灌区的水资源承载力。对灌区水环境承载力的研究只有对其承载力特征及评价方法的论述,而尚未有具体的应用研究。

采用地下水系统数值模拟和预测预报等先进的技术,正确分析和确定地下水资源的承载能力与开采量,是建立灌区水资源及环境承载力评价量化标准和指标体系以及机井合理布局的难点之一。地下水系统数值模拟模型在制定区域水政策和方针中发挥了越来越重要的作用。近年来,国外开发了许多功能多样的地下水系统数值模拟软件,以其模块化、可视化、交互性、求解方法多样化等特点得到广泛的使用,尤其是 MODFLOW,据美国地质调查局统计,MODFLOW 几乎占地下水系统数值模拟软件总应用次数的一半,其功能更是不断完善。地理信息系统(GIS)与地下水模型的整合强化了数据的输入、传递、方案调整和空间分析等。地下水系统数值模拟模型与相关领域模型的耦合扩展了应用领域,解决了更多的实际问题。需要对 MODFLOW 软件进行二次开发或自主开发实用性强的地下水研究模型,更深入地研究大型灌区地下水的合理开发利用。

在灌区水文循环研究方面,主要集中在针对田间尺度的水文循环和灌区循环过程及水量转化。对于田间尺度的水文循环,近一个世纪以来,随着土壤物理学、植物生理学、农田水利学的发展和农业生产的需要,人们一直在通过各种途径致力于研究土壤与水、水与植物以及土壤、植物、大气与水之间的相互关系,并已取得较大的进展。1966 年,澳大利亚水文与土壤物理学家 Philip 提出了较完整的关于“土壤-植物-大气连续体”(Soil-Plant-Atmosphere Continuum,SPAC)的概念,认为 SPAC 系统虽然界面介质不同、界面不一,但在物理上却是一个统一的连续体,水在该系统中运动的各种流过程,就像链一样互相衔接,而且完全可以应用统一的能量指标——水势来定量地研究整个系统中各个环节的能量水平的变化,并计算出水分运动的能量。这在土壤-植物-水关系研究方面是一次重要的突破,奠定了现代农田水分研究的理论基础。SPAC 系统涉及土壤学、气象学、植物学和水文学等学科,以包气带水、近地表大气水和植物体内水之间的转化关系为研究对象,充分考虑了水分运移的动力学机制及其生态学效应。SPAC 中的水分、能量和盐分传输属于国际前沿的课题之一。20 世纪 90 年代初期,国际地圈生物圈计划(IGBP)将水文循环生物圈(Biospheric Aspects of Hydrological Cycle,BAHC)列为其四大核心课题之一,并将其归结为土壤-植被-大气传输过程(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer,SVAT);20 世纪 90 年代,世界气候研究计划(WCRP)研究了地表植被-大气间的相互作用,以期预测全球与区域的水分过程、水资源及其对环境的影响,并将这些陆面过程结合到气候模式中去。国内外许多学者对 SPAC 进行了相关研究,毛晓敏等对新疆叶尔羌河流域地下水均衡场 1995 年 3~6 月冬小麦返青至成熟期的田间水热状况进行了模拟;王少丽等将改进的有机氮肥管理模型(MANIMEA)与土壤水流运动模型(SWAP)相耦合,模拟评价施用猪粪条件下硝态氮通过地下排水的流失量;杨树青等运用 MODFLOW 及 SWAP 模型对微咸水灌溉的水-土环境效应进行了预测;王根绪等采用潜水蒸发公式和直接植物蒸腾估算等方法,对黑河流域中游防护林生态系统和下游荒漠绿洲生态系统的需水量进行了初步估算。SPAC 理论的提出,改变了以往孤立、静止的研究观点。由于采

用了统一水势,为定量研究灌区水分的运移、转换及能量转化规律奠定了理论基础。将土壤-植物-大气连续体作为一个整体,用连续、系统、动态的观点和定量的方法去研究系统中水分运移、热能传输的物理学和生理学机理及其调控理论,可弄清土壤水分循环与平衡、土壤-植物水分关系以及地下水-土壤水-地表水-大气水转化关系等问题。

对于灌区循环过程和水量转化,胡和平等针对干旱地区平原绿洲水土资源利用的特点,建立了以农区土壤水为中心的干旱区平原绿洲散耗型水文模型,模型考虑了水在不同介质和不同形态之间的交换或转化,并重点考虑人类活动如引水灌溉、地下水的开采等对水平衡的影响。模型将研究区划分为河段、泉井、水库湖泊、农区和非农区五类水均衡模块,水均衡模块之间通过地表渠系、地下水侧渗进行水量交换。齐学斌等在对灌区水资源系统进行概化分析的基础上,建立了区域水量平衡方程、区域地下水平衡方程,利用实测与调查资料对平衡方程各要素进行了分析计算,并对现状条件下及节水灌溉实施后两种情况不同水平年水资源进行了模拟分析。秦大庸等(2003)根据宁夏引黄灌区作物生育过程需水、耗水机理和灌区的水循环规律,建立起基于灌溉动态需水量计算的灌区水均衡模型,对宁夏引扬黄灌区的引水、耗水、排水进行了系统分析和精确计算。陈喜等利用地下水数值模型 MODFLOW 和非饱和带水平衡模型,模拟半干旱半湿润沙丘地区的地下水位,分析了含水层补排水量,河流与地下水补排关系,以及区域水平衡过程。王旭升等提出的一个适用于大型灌区陆地水循环模式的参数化方案(LWCMPS_ID),采用分块集中参数模型简明地实现了地表水、地下水和土壤水的动力学耦合分析,并且包含了一个土壤水冻结融化的简化模型,对内蒙古河套灌区进行20年水文动态的模拟。Venn等应用质量平衡分析方法研究灌溉方式从淹灌改变为喷灌后,流域水分循环过程的变化。Gosain等应用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型,研究了因灌溉而引起的地下水回归量的时空变异特点,并预测了流域在没有人干预(水库管理、灌溉)条件下的产流量,评价了灌溉等人类活动对区域水量平衡的影响。罗毅等将 SWAT2000、MODFLOW 以及 CERES-WHEAT 和 MAIZE 作物模型生长模块进行集成,对内蒙古河套灌区的水循环特征进行了模拟,分析了灌区的水循环特征。代俊峰等针对我国南方丘陵水稻灌区水文特点,通过对 SWAT 模型的灌溉水运动、稻田水分循环等模块的改进,构建了灌区分布式水文模型,并运用于漳河灌区。

(二) 灌区机井布局、井型结构设计和成井工艺研究

机井分为管井、大口井、辐射井和其他井型等类型,是我国北方农田灌溉的主要水利设施,而机井中又以管井为主。工业的发展,建筑材料的种类、规格的增加,为凿井提供了多种多样可供选择的管材,出现了混凝土井管、钢筋混凝土井管、钢管、铸铁井管、石棉水泥井管等。目前用于凿井的井管主要有混凝土管、钢筋混凝土管、钢管、铸铁管等,这些管材具有力学强度指标高、结实耐碰撞摔打等优点,能相当安全地承受成井工艺过程中的非正常力和使用过程中的正常力。但是,这些管材有其缺点,主要是管材自重大,运输困难;下管难度大,成井工艺麻烦;井管在水下耐久性差,易受各种腐蚀,井的使用寿命短等。

20世纪50年代以来,随着石油化学工业的飞速发展,石油深加工技术日趋完善,塑

料制品种类多样化,产量迅速增长,使之逐步发展成为一种新型工程材料。与目前常用的其他井管比较,塑料井管有许多优点:

(1)质量轻,运输和安装方便。普通塑料管的相对密度在 1.2~1.4,下入井孔后井管自重接近泥浆水的浮力,井管处于漂浮状态。因此,下井管时无需很大的提吊力即可顺利下管,安全可靠,劳动强度小,下管速度快。同时井管的搬运更为省力、方便。

(2)单根长度大,井管接头少。塑料管的单根长度一般为 6.0 m,管径较小的单壁波纹管长度可超过 50 m,用于造井,大大地减少了井管接头数量。不但节省了下管时间和接头材料,更重要的是,减少了因接头连接不佳出现的错口、漏砂、漏砾而报废的机会,延长了机井的使用寿命。

(3)抗腐蚀能力强,耐久性好。塑料是一种十分稳定的高分子聚合物,几乎不与酸、碱、盐等所有化学物质反应。在太阳紫外线照射不到的水井里,其理论寿命可以说是无限的,这是目前其他井管无法相比的,因此可用于各种水质的水井中。近年来研究表明,潜水泵在井下运行时,在水中产生的感应电流,对井管有电化学腐蚀作用,塑料井管却不受影响。

(4)塑料管材质、品种和规格系列多,便于根据不同需要选用。

鉴于塑料井管具有以上特点,国外已广泛应用塑料造井,美国应用塑料井管已超过 50 年,在相当多的州, $\phi 250$ mm 以下的井管基本以塑料井管为标准管材。美国已制定了塑料井管及接头的标准(ASTM F-480),美国 50 个州中已有 48 个州采用塑料井管,已有一套完整的塑料井管成井的工艺规范。

我国使用塑料井管也有 30 多年的历史,起初是应用国家标准的单壁 PVC 管,由于壁厚较大,单壁塑料管用于造井中一般在 $\phi 250$ mm 以下,目前的成井深度已达 300 m,山东省聊城地区水利局于 1997 年试验成功 300 m 井深的 UPVC 机井。内蒙古乌拉特前旗于 2001 年试验成功井深 250 m 的 UPVC 机井。

20 世纪 80 年代初,由上海塑料制品研究所和中国水利水电科学研究院共同研制开发的单壁波纹塑料管,在保证刚度的情况下大大减小了管的壁厚,且有超过 50 m 的连续长度,因此此管在城市建设中得到广泛成功应用,将两根小波纹管并联用作轻型井管也取得了不错的效果,特别是代替钢管在辐射井中作为水平滤水管的成功应用更是促进了辐射井的发展。随着塑料工业的发展,口径大、刚度大、质量轻的双壁波纹塑料管生产线被愈来愈多的生产厂家从国外引进,国产大口径缠绕双壁管也已通过检测生产,性能较好。这些大口径双壁波纹管已用于机井的更新改造中,不打眼的用作井壁管,打眼管与土工织物组合作为滤水管,河北、辽宁、山东、陕西、山西、北京、天津等地已有成功的应用实例。辽宁苏家屯、海城等地自 1990 年至今,应用内径 400 mm 的 PE 双壁螺旋塑料管成井超百眼。河北省迁安县 1992 年开始应用外径 315 mm 的 PVC 双壁波纹塑料管成井数十眼,井深 30~120 m,至今运行良好。

在应用研究方面,西北农林科技大学在轻型井研发成功后,进行了用 $\phi 200$ mm 以内的双壁波纹塑料管建造中深井和深井的试验研究,对井用塑料管的类型、规格性能、塑料

滤水管及滤水结构形式、加工制作方法以及塑料管水井的设计、成井工艺进行了深入总结,出版了《塑料管成井理论与实践》专著。中国水利水电科学研究院和唐山市水利局、迁安县水利局合作,进行了大口径双壁波纹管塑料管和选用 100 g/m^2 的涤纶无纺布物作为反滤层组合成井试验,研究了双壁波纹管孔眼位置、形状、孔隙率大小对管子强度的影响,为塑料波纹井管的形状、结构设计提供了参考。

虽然我国使用塑料井管已有 30 多年,但至今塑料井管未能广泛应用,原因之一是塑料机井的应用研究较实践应用滞后,缺少技术指导。普通塑料材料的力学指标较传统井管材料偏低,用塑料管做滤水管,必然要降低其力学强度指标。从力学性能方面考虑塑料管能否作为井管,塑料管做滤水管如何保证既满足滤水管要求,又保证塑料管的力学强度指标不致过分降低,一直是塑料管做井管应用研究的重要课题。特别是对较大口径的塑料井管,这些方面的研究甚少。为了推广塑料井管的应用,对大口径塑料井管的力学性能和水力学特性进行研究就十分紧迫和必要。

针对我国地形地貌多样、水文地质条件复杂、技术经济各异的实际,国内研究者已对不同类型灌区的机井合理布局的理论与方法、适用于不同水文地质条件的井型结构和先进的成井工艺与技术等进行了研究,取得的主要研究成果如下:

(1) 灌区机井合理布局的理论与方法,为合理开发、利用、保护和科学管理地下水资源提供了科学依据。1998 年水利部也对原《农用机井技术规范》进行了修订,2000 年颁布了《机井技术规范》(SL 256—2000),进一步规范机井规划与布局工作。与此同时,一些科研院所和大专院校也开展了灌区地下水资源的合理利用问题研究。全达人(1991)进行了井灌(排)设计的计算问题;郭西万等(1994)运用系统理论和方法,进行了井群优化布局的研究;魏晓妹等(1994)研究了基于非稳定流理论的灌区井群布局方法;王红雨等(1995)研究了井灌区规划中最佳井距的确定方法。20 世纪 60 年代,我国就提出了灌区降水、地表水和地下水(“三水”)统管的观点,并从灌排井群的渗流特性出发,研究了灌区地下水的渗流计算问题,出版了学术专著《地下水非稳定流计算和地下水资源评价》、《地下水渗流解析解法》等。90 年代初,北方灌区地下水“采补失调”或“补排失调”的问题影响着灌区地下水资源的持续利用,结合渭北黄土原灌区的特点,研究了灌区“三水”转化机理和水资源调控问题,出版了学术专著《黄土原灌区三水转化机理及调控研究》。在井灌理论的指导下,提出了基于稳定流和非稳定流理论的井群布局设计方法。

(2) 成井技术。在成井技术方面,我国创造了锅锥这种适合我国流沙地层情况的廉价适用的半机械化打井工具,已被北方地区广泛采用,并输出国外。同时还改进并普及了冲击钻、转盘钻、水平钻等多种打井机具,发展了辐射井、虹吸井等多种井型结构,促进了地下水的开发利用。

适用于黄土原灌区潜水浅埋区的灌排两用的“轻型井”技术在内蒙古河套灌区以及黄淮海灌区得到了广泛推广。由西北农林科技大学于 1986 年 12 月完成,1989 年 12 月获国家发明奖。

(3) 国内外农用机井的井管和滤水管一般采用混凝土管。20 世纪 60 年代,我国开始

试验利用塑料管成井,但由于各方面原因,应用并不普遍。继“轻型井”研发成功后,西北农林科技大学进行了用大口径的双壁波纹塑料管建造中深井和深井的试验研究,并取得成功。该项研究对井用塑料管的类型、规格性能、塑料滤水管及滤水结构形式、加工制作方法以及塑料管水井的设计、成井工艺进行了深入总结,出版了《塑料管成井理论与实践》专著。

在机井管理方面,“九五”期间,水利部启动了300个节水增效示范县项目,提出了新建井灌区节水增效灌溉工程技术模式。按照“以水定井,统一规划,合理开采,严格管理”的原则,在新建的井灌区发展节水增效灌溉。以开采有稳定可靠补给来源的浅层地下水为主,将井灌建设和节水灌溉结合起来,建设成节水型井灌区,做到既促进农业的发展,又防止地下水超采、环境恶化。

井渠结合型灌区的特点是单一依靠渠灌还是单一依靠井灌都存在水资源不足,或引起其他生态环境问题,必须实行井渠结合灌溉。中国农业科学院农田灌溉研究所在总理基金的资助下,在河南清丰县开展了研究,提出的北方井渠结合灌区节水灌溉工程技术模式为:开展地表水与地下水在时空上的联合调度,渠灌部分进行适度防渗,井灌部分采用管道输水;田间采取长畦改短,实施小畦灌溉,辅以覆盖保墒、化学节水、节水灌溉制度等节水措施,实现水资源的优化调度和农业高效用水。“十五”期间,在国家重大科技产业工程示范项目和“国家863”重大专项以及重大科技攻关项目的支持下,对井渠结合灌溉类型区的农业高效用水模式、节水农业综合技术体系、水资源联合调控与保护技术等开展了专项研究,在“水资源优化调度、配置与保护技术”、“井渠结合灌溉类型区农业高效用水模式”、“地下水限量开采无线自动控制系统的研制”和“水资源联合调控与保护技术”等方面取得了许多研究成果。

(三) 灌区地下水开采模式及受损机井诊断修复技术研究

我国北方大型灌区大多数分布在平原区或盆地区,按水源条件可分为纯井灌区、井渠结合灌区和纯渠灌区三种类型。地下水补给比较充沛,地下水资源能满足农作物需水要求、全部采用地下水灌溉的灌区,即纯井灌区;广义的井渠结合灌区实际上是渠井结合灌区和井渠结合灌区的统称,渠井结合灌区是以利用渠道地表水为主,而以开采地下水为辅的以渠补井的灌区,井渠结合灌区是指以利用地下水为主,采用渠道引蓄地表水进行灌溉和补充地下水为辅的井渠双灌区;纯渠灌区是单纯利用渠道系统引用地表水进行灌溉的灌区。在北方灌区中,渠井结合的方式一方面可以利用地下含水层对降水入渗及地表水灌溉入渗补给进行调蓄,重复利用地表水渠道渗漏和田间灌溉入渗补给量进行灌溉,以解决地表水供水与作物需水在季节上的矛盾,增加水资源可利用量,提高灌溉用水保证率;另一方面通过“井灌井排”的功能,可以合理调控地下水位,达到既利用地下水资源,又防止土壤盐碱化的目的。

鉴于我国北方大型灌区大多存在着机井缺乏科学规划、机井布局不合理、地下水采补失调、机井报废率高、地下水资源开采不合理等问题,结合灌区类型(渠井双灌区和井渠双灌区)、地形地貌、灌溉水源条件、机井布局与运行现状、作物种植结构、节水灌溉水平