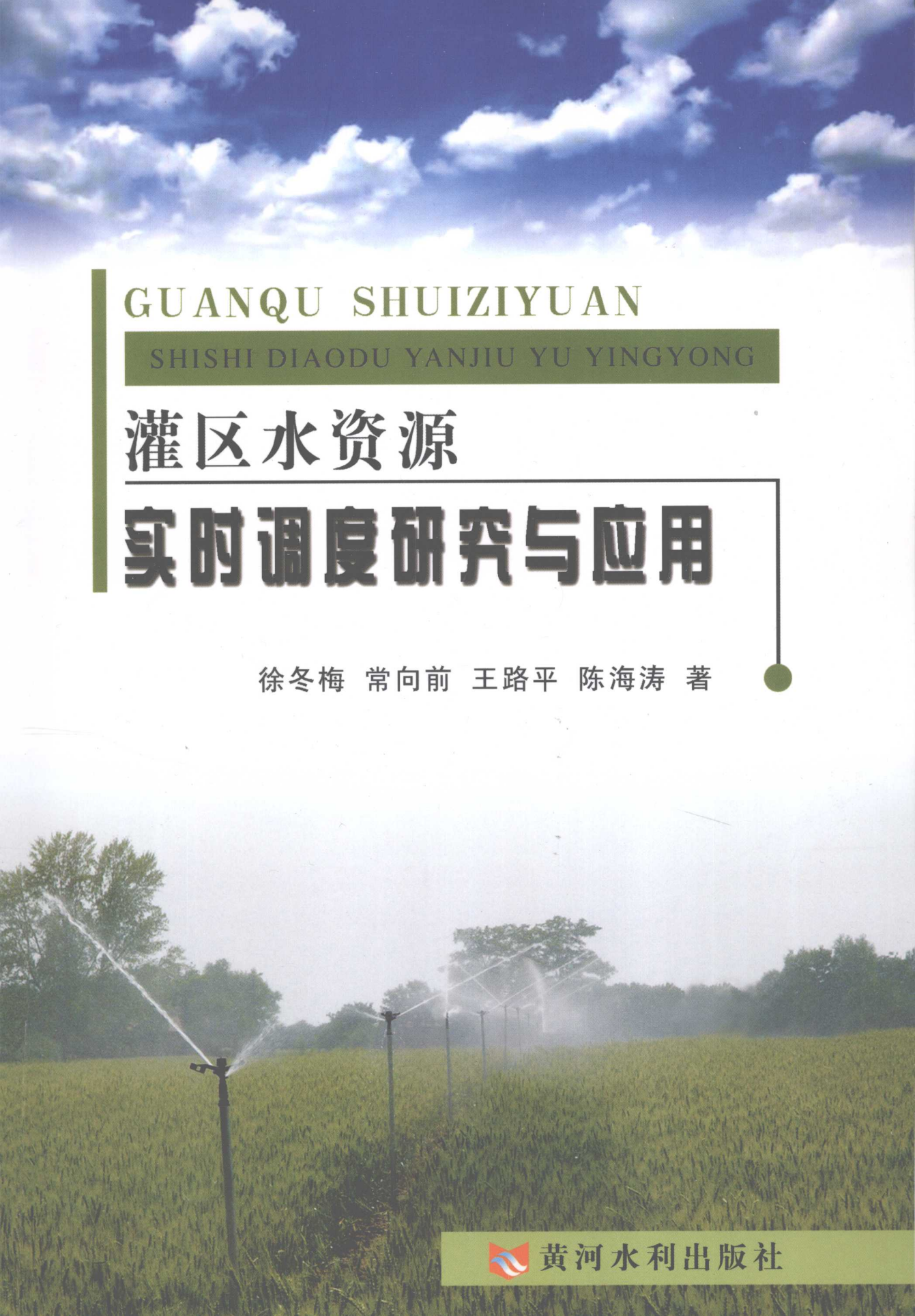




GUANQU SHUIZIYUAN

SHISHI DIAODU YANJIU YU YINGYONG

灌区水资源

实时调度研究与应用

徐冬梅 常向前 王路平 陈海涛 著



黄河水利出版社

灌区水资源实时调度 研究与应用

徐冬梅 常向前 王路平 陈海涛 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书结合我国灌区水资源管理的需要与现状,依据近年来多项节水灌溉管理课题的研究资料和研究成果,比较全面、系统地介绍了灌区水资源实时调度的理论、方法和技术。本书以河南省渠村灌区基本资料为依托,详尽论述了灌区水资源实时调度的理论、方法及数学模型,并将理论应用于渠村灌区实际。研究理论主要包括灌区水资源中长期来需水预报及优化调度、灌溉实时需水预报、预报误差实时修正、水资源实时调度模型与求解方法、实时动态渠系配水模型等。以理论研究为基础并结合数据库、GIS等现代化计算机技术,研发了渠村灌区水资源实时调度管理决策支持系统,为灌区水资源调度科学化、实时化、现代化的实现提供理论及技术支持。

本书在内容上力求浅显易懂、实用易学,可作为高等院校水资源、农田水利或其他相近专业的教材,也可供从事节水灌溉工作的工程技术人员或相关领域的科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

灌区水资源实时调度研究与应用/徐冬梅等著. —郑州:
黄河水利出版社, 2007. 12
ISBN 978 - 7 - 80734 - 328 - 8

I. 灌… II. 徐… III. 灌区 - 水资源管理 - 研究
IV. S274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 205888 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

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: hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11.5

字数:260 千字

印数:1—1 000

版次:2007 年 12 月第 1 版

印次:2007 年 12 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978 - 7 - 80734 - 328 - 8

定价:29.00 元

前 言

进入 21 世纪以来,水资源问题已经成为制约我国经济迅速发展的瓶颈,特别是农业缺水更为严重,农业水资源短缺严重地制约着我国国民经济的发展。长期以来,我国农业水资源的开发利用缺乏科学有效的管理。面对前所未有的水资源危机,占总消耗用水约 75% 的农业如何应对这一危机,科学合理地利用农业水资源,对于从根本上解决我国“三农”问题,稳定国民经济基础,有着至关重要的作用。

水利现代化,首先是水资源调控现代化,实现水资源的优化配置是水利现代化的主要目标,应用当代先进的科学理论与高新技术对水资源进行实时监控、优化调度和统一管理,最终实现水资源的优化配置和可持续利用是我国水资源现代化管理发展的趋势,因此水资源实时优化调度研究的意义重大。

本书以可持续发展理论为指导,以区域水资源可持续利用为目标,针对我国区域农业用水特点,以渠村、东石岭、宁陵引黄补源等灌区和郑州市邙山区生态园的水资源优化配置研究及相关软件系统研制课题为依托,对灌区水资源实时优化调度理论进行了深入研究,利用实时动态配水计划真正指导灌溉用水,实现水资源的实时优化配置,最终达到“节水、高产、高效”的目的。本书内容主要包括灌区水资源中长期来需水预报及优化调度、灌溉实时需水预报、预报误差实时修正、水资源实时调度模型与求解方法、实时动态渠系配水、GIS 技术应用、灌区水资源实时调度管理决策支持系统研制等。

本书由华北水利水电学院徐冬梅、陈海涛,黄河水利科学研究院常向前,黄河水利出版社王路平共同编著。

本书凝结了集体的智慧,是作者近年来在水资源开发利用、水资源优化配置等方面部分研究成果的总结,书中基本资料的收集得到了黄河水利委员会河南黄河河务局、濮阳黄河河务局以及河南省水文水资源局、郑州市水利局等单位领导和专家的指导与帮助,得到了河南省高校创新人才培养工程项目和河南省科技攻关项目的资助。本书能够得以问世,要特别感谢华北水利水电学院邱林教授的帮助与指导。另外,本书在编写过程中,得到了黄鑫、柴福鑫、王文川、和吉、陈晓楠、段春青、周波等人的帮助,参阅引用了相关文献及研究成果。在本书正式出版之际,特向有关领导、专家以及为本书付出劳动的各位同仁表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中谬误及不当之处在所难免,恳望读者不吝指正。

作 者

2007 年 10 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状及发展趋势	(4)
1.3 研究的主要内容	(12)
第2章 区域水资源与研究区域概况	(15)
2.1 水资源及区域水资源	(15)
2.2 地表水资源评价	(17)
2.3 地下水资源评价	(27)
2.4 河南省渠村灌区基本情况介绍	(35)
第3章 灌区中长期来需水量预测	(48)
3.1 中长期降水量预测	(48)
3.2 地下水预测	(56)
3.3 灌区需水量的预测	(59)
3.4 灌区需水量中长期预报	(66)
3.5 相应内容计算	(66)
第4章 灌区水资源中长期优化配置	(71)
4.1 作物水分亏缺及水分胁迫	(71)
4.2 作物水分生产函数	(73)
4.3 单一作物的最优灌溉制度	(75)
4.4 基于现代优化技术的作物灌溉制度优化设计	(80)
4.5 作物间的优化配水	(86)
4.6 灌区中长期最优运行调度	(87)
4.7 相应部分计算	(90)
第5章 灌区水资源实时优化调度	(94)
5.1 实时调度研究现状	(94)
5.2 实时灌溉预报	(95)
5.3 实时优化调度模型	(105)
5.4 实时预报系统	(110)
5.5 实时修正系统	(110)
5.6 相应内容计算	(111)
第6章 灌区水资源数据库管理系统	(117)
6.1 管理信息系统概述	(117)

6.2	管理信息系统在我国水资源管理中的应用	(120)
6.3	系统的总体设计研究	(122)
6.4	数据库设计流程和原则	(127)
6.5	灌区水资源实时调度系统	(129)
第7章	GIS 技术在水资源管理中的应用	(133)
7.1	地理信息系统概念及功能	(133)
7.2	地理信息系统在国内外的发 展概况	(135)
7.3	应用型地理信息系统的开发	(137)
7.4	基于 GIS 技术的水资源管理决策支持系统的设计	(140)
7.5	GIS 的系统功能实现	(147)
7.6	结语	(156)
第8章	软件系统结构及使用说明	(157)
8.1	概述	(157)
8.2	系统结构及组成	(157)
8.3	数据库管理操作	(162)
8.4	优化调度操作	(167)
参考文献		(172)

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

水是整个国民经济和人类生活的命脉,水资源的状况和利用水平已成为评价一个国家、一个地区经济能否持续发展的重要指标。水是人类赖以生存和发展不可替代的宝贵资源,是保障国民经济持续健康发展的重要基础。早在1977年联合国就公开向全世界宣告:水资源危机不久就成为一个极其严重的社会危机,继石油危机之后,接踵而至的便是水危机。随着社会经济的发展,特别是工业化、城市化进程的加快,水资源短缺已成为全球性危机。1992年初,有156个国家的代表参加的“世界水资源与环境大会”提出了警告:水资源短缺已成为当今人类面临的最严峻的挑战之一。至20世纪末及21世纪初,此种情况更令人忧虑。

1.1.1 我国水资源存在的问题及对策

水的利用涉及减轻贫困、粮食安全、能源生产和生态环境保护等多方面的重要问题。随着社会经济的迅速发展,水资源问题已成为世界各国政府和学者广泛关注的问题。目前,无论是发达国家还是发展中国家,无论是贫水国家还是水资源比较丰富的国家,都在全方位地进行水问题的研究。而我国作为世界上最大的发展中国家,人口多,水资源紧缺,水问题十分突出。

1.1.1.1 供需矛盾日益突出

我国水资源人均占有量 $2\,300\text{ m}^3$,只有世界人均水平的 $1/4$,居世界第109位;平均每公顷水资源占有量 $27\,000\text{ m}^3$,只有世界平均水平的 $2/3$,是世界上13个贫水国之一。按现状用水量统计,全国中等干旱年缺水 358 亿 m^3 。其中农业灌溉每年平均缺水300多亿 m^3 ,平均每年受旱面积 $2\,146.7\text{ 万 hm}^2$,每年因旱灾减产粮食约200亿kg。668个城市中,有400多个城市缺水,其中严重缺水的城市有110多个,全国城市日缺水量为1600万 m^3 ,每年因城市缺水影响产值2000亿元以上,影响城市人口约4000万人。水资源短缺已成为我国社会发展的重要制约因素。

按照国际经验,一个国家用水量超过其水资源总量的20%就很可能发生水资源危机。从我国1997~2001年5年的水资源状况分析(见表1-1),1997年全国水资源总量为27855亿 m^3 ,用水总量为5566亿 m^3 ,利用程度已达到水资源总量的20%;1998年全国水资源总量为34017亿 m^3 ,用水总量为5435亿 m^3 ,利用程度达到水资源总量的16%,1999年、2000年均均为20%,2001年为21%。这表明我国水资源在丰水年利用量接近水资源危机的边缘,平水和枯水年份已超过了国际上公认的水资源危机临界值。

表 1-1 1997 ~ 2001 年全国水资源总量及用水状况

(单位:亿 m³)

年份	降水量	地表水资源量	地下水资源量	地表与地下水重复量	水资源总量	总供水量	总用水量	总用水量占水资源总量的百分比 (%)	类别
1997	58 169	26 835	6 942	5 923	27 855	5 623	5 566	20	平水年
1998	67 631	327 216	9 400	8 109	34 017	5 470	5 435	16	丰水年
1999	59 702	27 204	8 387	7 395	28 196	5 613	5 591	20	平水年
2000	60 092	26 562	8 502	7 363	27 701	5 531	5 498	20	平水年
2001	58 122	25 933	8 390	7 455	26 868	5 567	5 567	21	平水年

资料来源:水资源公报,总用水量占水资源总量的百分比由作者计算所得。

随着社会经济的发展,对水资源需求量也越来越大,根据《中国 21 世纪议程》估计,2010 年我国人口将达到 14 亿人,2050 年 16 亿人,城市化将达到 56% 左右,届时城镇人口为 9 亿人,农村人口为 7 亿人,工业化与城市化的发展,必将挤占农业用水。据估计,2050 年用水总需求量将达到 7 000 亿 ~ 7 500 亿 m³,其中农业用水将达 4 200 亿 m³,而目前我国年总供水量约为 5 600 亿 m³,在现有供水能力基础上增加 1 400 亿 ~ 1 900 亿 m³ 的供水量,其前景是不容乐观的。若农业水资源不实现可持续利用,农业将难以发展。

与世界其他国家的水资源问题相比,中国的水资源问题既有共性,又有特性。中国幅员辽阔,东、西、南、北地理和气候等自然特征存在较大的差异,经济发展水平也不相同,从而使中国的水资源问题呈现多样性,大体格局是东南多、西北少,山区多、平原少;降水量大致由东南向西北递减,另外降水量年内分配也极不均匀,汛期水量过于集中,利用难度很大,非汛期又往往缺乏水量,同时降水量的年际变化大,丰水年与枯水年的水量相差悬殊,极易造成水旱灾害。

进入 21 世纪以来,水资源问题已经成为制约我国经济迅速发展的瓶颈,特别是农业缺水更为严重。我国是农业大国,农业是国民经济的基础,水是农业发展的命脉,水对农业有特殊重要的意义。农业是用水大户,灌溉用水量占总用水量的比值很大,新中国成立初农业用水量占总用水量的 97% 以上。自新中国成立以来,我国农业灌溉面积呈上升趋势,农业灌溉面积已从 1950 年的 1 600 万 hm² 增加到 1993 年 5 000 万 hm²,目前全国已建成的大中型灌区有 5 600 多处,全国有效灌溉面积发展到 5 660 万 hm²,在大中型灌区中,设计灌溉面积在 2 万 hm² 以上的大型灌区共有 402 处,总规划灌溉面积 1 920 万 hm²,约占全国有效灌溉面积的 35%,占耕地总面积的 14.7%。随着国民经济的发展,农业用水量在全国总用水量中的比重不断下降:1949 年我国农业用水量约为 1 001 亿 m³,占全国总用水量 1 030 亿 m³ 的 97.1%,到 1997 年该比例下降到 75.5%,据有关专家预测,到 2050 年我国农业用水量将降至 54%。干旱缺水已成为影响我国农业生产最大的且不断加剧的自然灾害,全国受旱成灾面积呈上升趋势。据有关资料分析,我国目前年均缺水总量(不超采地下水的情况下)为 300 亿 ~ 400 亿 m³,其中农业缺水占 80% 以上,因缺水少生产粮食 350 亿 kg 以上。

1.1.1.2 水资源浪费严重

我国灌溉用水一方面存在着短缺,另一方面存在着严重浪费的现象。目前我国许多农村地区仍采用大水漫灌的方式进行灌溉,灌溉定额过大,例如黄河上游的河套灌区引水量高达 $8\,000 \sim 10\,000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;同时灌区中灌溉工程老化问题突出,农田灌溉大多是采用土渠输送,渠道输水损失大,跑、冒、滴、漏等问题严重,造成灌溉水的利用率相当低,灌区灌溉水的有效利用率仅为 $0.3 \sim 0.4$,井灌区的灌溉水利用率也只有 0.6 左右,灌溉用水浪费,远低于发达国家农业灌溉水资源有效利用率 0.8 左右的水平。面对水危机,要使农业持续发展就要发展节水型农业,以便合理开发利用水资源,使有限的水资源发挥更大的效用。节水型农业可充分利用降水和水利与农业措施,节约水资源,提高水的利用率和经济效益。

1.1.1.3 水污染问题日益突出

目前,我国无论是地表水还是地下水,水质污染都非常严重。根据 1998 年对全国 $109\,700 \text{ km}$ 河流进行的评价,我国河流有 70.6% 被污染,约占监测河流长度的 $2/3$ 以上,可见我国地表水资源污染非常严重。“八五”期间水利部组织有关部门完成了《中国水资源质量评价》,结果表明,我国地下水资源,无论是农村还是城市,浅层水或深层水均遭到不同程度的污染;且污染呈上升趋势。水污染日益严重必将导致水资源可利用量的减少,从而加剧水资源危机。

1.1.1.4 水资源“农转非”严重

水资源“农转非”是指农业水资源通过不同的途径改作它用。从世界角度来看,这是一种趋势,产生这种现象的根本原因是比较效益在发挥导向作用,可以估算,单位水资源所产生的农业效益远远低于工业所产生的效益。我国水资源“农转非”现象也很普遍,而且随着时间的推移趋势更加明显。随着水资源的“农转非”,水资源配置逐步走向市场化,各行各业都面临着残酷的竞争问题。农业用水的形势最为严峻,竞争导致的优胜劣汰,使提高水资源的利用效率成为一种必然趋势。

1.1.1.5 生态环境问题

水资源过度开发,导致生态环境的进一步恶化。在目前地下水资源开发条件下,全国已经出现区域性地下水漏斗 56 个,总面积大于 8.2 万 km^2 ,地层沉陷的城市达 50 余个,其中北京的沉降面积达 800 km^2 ,环渤海平原区由于海水倒灌影响面积已达 $1\,240 \text{ km}^2$ 。

解决我国水资源安全问题的基本出路是开源、节流和加强管理。现在进一步开源的难度越来越大,潜力有限,即使实施几大跨流域调水工程后,其总调水量也不会超过 $400 \text{ 亿} \sim 500 \text{ 亿 m}^3$ 。节水却有很大的潜力可挖,据专家测算,运用先进的节水技术,我国农业可减少 $10\% \sim 50\%$ 的需水,工业可减少 $40\% \sim 90\%$ 的需水,城市减少 30% 的需水。如果我国农业用水的利用率提高 10 个百分点,就意味着每年可节水 400 亿 m^3 。由此可见,实现水资源的高效利用是解决我国水问题、缓解水资源危机的根本出路。

目前我国水资源的利用效率与国际上相比较还很低。据有关资料分析,美国 1990 年用水效率为 $10.3 \text{ 美元}/\text{m}^3$,1989 年日本为 $32.4 \text{ 美元}/\text{m}^3$,我国 1995 年用水效率为 $10.7 \text{ 元}/\text{m}^3$,只有美国的 $1/8$,日本的 $1/25$ 。由此可见,提高我国水资源的利用效率还有很大的潜力。农业是我国用水大户,其节水潜力巨大,针对我国目前的水资源现状,只有加快节

水工作的步伐,优化配置水资源,进行科学灌溉,提高灌溉水利用效率,才能从根本上缓解农业水危机,乃至解决我国水问题。

1.1.2 水资源实时调度研究意义

如何提高灌区管理水平和灌溉水资源的利用效率,是关系到我国农业是否能可持续发展的重大问题之一。灌溉用水管理的核心是实行计划用水。而指导计划用水的依据是用水计划,但常用的用水计划是静态的用水计划,难以指导实际用水管理。实际的用水过程总是要随着当时的水文、气象、作物需水状况的变化而变化的,因此只有动态用水计划才能更好地指导实际用水管理,真正实现“适时”、“适量”灌溉,达到节约用水、提高灌溉水资源利用效率的目的。

水利现代化,首先是水资源调控现代化,实现水资源的优化配置是水利现代化的主要目标,应用当代先进的科学理论与高新技术对水资源进行实时监控、优化调度和统一管理,最终实现水资源的优化配置和可持续利用是我国水资源现代化管理的发展趋势,水资源实时优化调度研究的意义重大。灌区水资源实时优化调度研究的目的在于,真正能指导灌区管理者或农民改善灌溉方法,做到适时适量灌溉,提高水资源利用效率,降低灌溉成本,缓解农业水危机。农业水资源的可持续利用缺乏科学有效的管理;有许多问题需要尽快解决。面对前所未有的水资源危机,占总消耗用水约 75% 的农业如何应对这一危机,科学合理地利用农业水资源,对于从根本上解决我国“三农”问题,稳定国民经济基础,有着至关重要的作用。

灌区水资源实时优化是以大量的基础资料和实时信息为基础依据的,这些信息除包含大量与时间有关的资料外,还涉及较多空间特性的信息,任一时间序列资料(诸如降雨、水位、流量)和文档资料(如渠系概况、闸坝资料)等都产生一个特定的空间位置。各信息所具有的影响和可能发挥的作用都与它所处的空间位置息息相关,运用传统的数据库管理系统难以同时对时间和空间信息进行分析与处理,而利用 GIS 技术来处理则能做到方便自如、形象直观,它不仅可以将此类信息看做许多具有空间特性的对象,而且能将这些对象的特征理解成数据自身的属性,进而分析研究它们自身和相互之间的关系及形象表示。引入地理信息系统平台技术将使系统的功能更加完善,实用性更强。

基于我国目前动态用水计划研究水平不高,灌区水资源实时优化调度模型还不完善,而提高农业水资源的利用效率又刻不容缓等特点,对实时优化调度模型的研究极具现实意义。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 农业用水研究

1.2.1.1 农业用水管理的发展

1) 从静态用水管理到动态用水管理

目前我国大部分灌区编制的用水计划都是以 20 世纪 70 年代水利部农水司颁布的

《灌溉管理手册》为依据。其做法是:在灌溉季节前根据作物高产对水分的要求,进行中长期灌溉预报,同时考虑水源的情况、工程条件以及农业生产的安排等,编制好用水计划,即确定各时期渠首的引取水量和各级渠道(或各用水单位)的配水流量、配水次序及配水时间等。其主要灌溉预报方法有两种:实际年法和频率年法。实际年法是参照过去某一特定年份的降雨量、作物需水量及其他水文气象特征,预先进行灌溉制度分析,确定灌水日期和灌水量;频率年法是以某一频率年的降雨和需水为依据进行水量平衡演算,预测灌水日期和灌水量。由于实际年法和频率年法都是只根据历史资料编制,不考虑不同年份的实际情况变化,故称为“静态用水计划”。

现实的灌溉用水过程和来水过程总是随着气象因素、土壤因素、作物因素、灌区内水资源状况及渠系工作状态而变化,不可能与历史上某一时期完全相同。“静态用水计划”往往与实际情况相距甚远,难以指导灌区的实际水资源调度工作。

“动态用水计划”是以历史资料和当前与来水及作物需水相关的资料为基础编制的。一个初步用水计划,在动态用水计划中,特别强调计划执行过程应随着来水与需水情况的变化而变化,实时调整用水计划,用水计划的执行过程是一个实时调整、逐步优化逼近的过程。

2) 灌溉管理向自动化发展

国际上公认,灌溉节水的潜力 50% 在管理方面,管理水平的提高对实现农业灌溉节水具有重要意义,因此实现灌溉用水的科学化管理至关重要。实际上,将计算机技术引入灌区用水管理工作,以提高用水管理水平和用水效率,也是实现农田灌溉现代化的客观要求。

1.2.1.2 动态用水管理研究及软件开发现状

动态用水管理在印度、巴基斯坦等一些国家的用水管理中已得到一定程度的应用。在以色列、日本、美国、澳大利亚及其他西方发达国家,均已采用先进的节水灌溉制度,由传统的充分灌溉向非充分灌溉发展。利用国际最先进的计算机技术和现代优化控制理论,对灌区用水实行动态管理,对不同类型的灌区,根据不同的目标进行实时自动控制,并进行多目标的优化,实现最优运行;灌区的节水率都在 30% 以上,充分发挥了灌区自动化系统的效益,有许多成功的先进经验值得我国借鉴和学习。

动态用水在国外已有几十年的发展历史,20 世纪 80 年代末联合国粮农组织就向我国推荐了灌区动态用水技术,1989 年亚洲开发银行对中国的援助项目“改进灌区管理与费用回收”中,极力推荐应用现代技术改进灌区管理。但在我国却是近几年才开始得到重视。

我国灌区水资源动态用水管理在理论方面已经取得了一定的成果。汪加权以水量平衡为理论依据,建立了多水源、多工程、多用户的动态用水管理模型;吴玉柏等以昭关灌区为背景,提出了水稻灌区实时预报优化调度的基本思想、逻辑程序和数学模型,并且建立了求解数学模型的线性逼近方法和网格搜索方法;李远华、贺前进等结合漳河灌溉用水微机管理的初步尝试,提出了进行实时灌溉预报和编制渠系动态用水计划的原理、方法与模型;周振民研究了灌溉系统供水计算模型,将灌区内作物概化为水稻和旱作物两种,分别以水量平衡原理和土壤水分模拟理论为基础建立稻田与旱作物灌溉供水计算模型;茆智

等提出了根据天气类型、作物绿叶覆盖率和土壤有效含水率 3 项因素,进行作物需水量实时预报的方法与模型,并介绍了具体的预报步骤与计算框图。上述研究在实时需水量预测方法和实时调度理论等方面进行了有益的探讨,取得了许多成果。但是,还存在一定的问题,如在制定某日用水方案时,是在假定调度日后作物需水量能够完全满足的基础上进行优化配水的,这一假定显然不适用于水资源严重短缺的情况。在考虑未来的变化因素时,仅简单地用资料的均值来代表,不符合实际情况,用以指导水资源调度缺乏针对性,也不安全。

在实际应用方面,建立了灌区用水管理系统,如陕西洛惠渠的用水管理信息系统、湖南韶山灌区的微机自动监控系统、山西晋祠灌区的灌溉管理数据库系统、广西桂林青狮潭灌区节水决策软件、湖北江汉平原漳河灌区实时灌溉预报软件、山西洪洞霍泉灌区灌溉用水决策支持系统。范昊明、夏继红为了使资料显示更加直观化,对决策支持系统与地理信息系统的集成化技术进行研究,探求了灌区用水管理的新模式。

实时调度正随着计算机进入人们的日常工作和生活,与此同时,实时调度理论和技术将在实践中不断深入与发展。

1.2.2 中长期降水预测

降水预测是实时调度中的一个重要部分,对于指导灌区制定合理的灌水计划及确定未来年份的丰枯类型有至关重要的作用,因此确保实时调度顺利进行的关键之一在于中长期降水的准确预报。中长期降水预测是自然与技术领域内的一项研究难题,有着十分重要的理论和实际意义,目前就国内外的研究现状而言,由于其复杂性还处于探索阶段,其存在的主要问题是预报精度较低,在实际工作中难以有效地指导生产实践。早期降水预测的方法主要有数理统计预测方法、数学物理模型预报方法,随着数值计算技术的发展,水文预测同其他学科也有了交叉并产生了一些新方法,如人工神经网络方法、灰色系统预测方法、投影寻踪方法及均生函数预测方法等。降水预测从传统的线性回归预测、确定型时间序列预测、随机型时间序列预测、随机预测技术发展 to 模糊预测、灰色预测、神经网络预测、混沌时间序列预测以及这些方法的组合混合预测方法。以上预测方法均有各自的优缺点及适用条件,但由于影响降水的因素众多且它们之间的关系难以确定,因此如何提高它们的预测精度是目前研究的热点之一。

1.2.2.1 成因分析法

河川径流主要来源于大气降水,与大气环流有密切关系。一个流域或地区发生旱涝是与环流联系在一起的。分析研究大气环流与水文要素之间的关系一直是水文气象工作者深入探讨的课题。黄忠恕等分析了北太平洋和青藏高原下垫面热状况变化与长江流域汛期旱涝之间的关系,初步揭示出一些相关性。刘清仁以太阳活动为中心,以长期和超长期水文预报为目标,用数理统计分析方法,分析了太阳黑子和厄尔尼诺事件对松花江区域水文影响特征及其水、旱灾害发生的基本规律,揭示了降水量按磁周期呈丰、枯水变化的规律。章淹从水文气象学角度论述了近年国内在暴雨中期预报研究方面的若干新进展,探索了中期预报的方法。

1.2.2.2 水文统计方法

水文统计方法是通过对水文资料的统计分析进行概率预测,可分为两大类:一类是分析水文要素自身随时间变化的统计规律,然后用这种规律进行预报,如历史演变法、时间序列分析法等;另一类是用多元回归分析法,建立预报方案,进行预报。目前应用较广的水文统计预报方法主要有多元分析法与时间序列法两种。多元回归分析常用的方法主要有逐步回归法、聚类分析法、主成分分析法等。这种方法的主要问题有如何合理选择因子个数,解决拟合效果与预报效果不一致的矛盾;由于预报值是取各个因子数据的均值,难以预报出极大或极小值的水文现象。时间序列分析是应用水文要素的观测记录,寻找其自身的演变规律来进行预报。常用的方法有平稳时间序列中的自回归模型法、周期均值迭加法、马尔可夫链法等。20世纪60年代以前主要采取把序列分解成趋势、周期、平稳等项,然后再分项预测后进行迭加而得到预报结果。20世纪70年代后,BOX等提出的AR-MA类模型逐步应用于中长期水文预报。同时,具有非线性特点的TAR模型也开始用于中长期水文预报。

1.2.2.3 模糊分析

20世纪80年代初,陈守煜等在水利、水文、水资源与环境科学领域中进行了模糊集的应用研究,并将模糊集分析与系统分析结合起来,形成了一个新的模糊随机系统分析体系;1997年陈守煜又提出了中长期水文预报的综合分析理论模式与方法,该方法将水文成因分析、统计分析、模糊集分析有机地结合起来,为提高中长期水文预报的精度提供了一条新途径。

1.2.2.4 人工神经网络

人工神经网络是基于连接学说构造的智能仿生模型,是由大量神经元组成的非线性动力学系统,具有并行分布处理、自组织、自适应、自学习和容错性等特点。20世纪90年代以来,人工神经网络在水文预报中的应用逐渐增多。蔡煜东等采用Kohonen自组织神经网络模型研究了鄱阳湖年最高水位的分类预报问题。吴超羽等认为人工神经网络模型具有生物神经网络的一些特性,能够“学习”,因此易于应用在各种类型的流域系统;人工神经网络模型是高度非线性模型,能够有效地模拟本质为非线性的实际水文系统;人工神经网络模型在预报期和预报精度上较对比性模型(CAR、RWTL、AR)有明显的优越性。钟登华等提出了水文预报的时间序列神经网络模型,并指出探索利用输入输出数据进行建模的方法是十分必要的。胡铁松等对人工神经网络在水文水资源中的应用现状作了全面的介绍,并认为神经网络为一些复杂水文水资源问题的研究提供了一条有效的途径。Hsu等提出了确定三层BP网络模型结构和参数的线性最小二乘单纯形法(LLSSIM),并认为三层结构的BP网络就能满足水文预报的一般需要。丁晶等认为当前单纯地分别应用确定性和不确定性的方法,面临着许多无法妥善处理的困难,因此有必要探索一种新思路和新途径。新思路就是模拟人脑思维方式来处理极端复杂系统中出现的各种各样的问题(判别、分析、预测、控制、调度等);新途径就是在人工神经网络理论的基础上,通过分析和计算,建立适应性很强的人工神经网络模型。过渡期(5、6月份)的径流预测是个难题,丁晶等尝试应用人工神经网络模型预报兰州站过渡期的月径流量,结果表明,人工神经网络模型用做过渡期径流预报可行,且效果优于多元回归方法。胡铁松等提出了径流

长期分级预报的 Kohonen 网络方法,有效地克服了人为给定监督信号进行径流分级预报存在的不确定性给预报精度带来的影响。冯国章等提出了基于径流形成机理的以时段降水量与前期径流量为预报因子的前向多层人工神经网络径流预报模型,分析了网络结构对预报精度的影响。邱林等提出了模糊模式识别神经网络预测模型,开创了神经网络拓扑结构建模的新思路。

1.2.2.5 灰色系统理论

灰色系统理论是邓聚龙于 1982 年创立的,十几年来发展较快。李正最认为灰色静态模型 $GM(0, h)$ 与多元线性回归模型在模型形式和参数辨识、方法处理等方面是相同的,因此两种模型用于水文变量相关分析所得结果一致。谢科范认为灰色系统理论在某些方面存在不少缺陷,与回归分析相比短期预测结果较好,长期预测结果欠佳。冯平等采用灰色系统理论中灰关联度分析方法,对枯水期径流量的预估模式进行了探讨。夏军基于时间序列多重信息利用的扩维原理和灰色系统理论的关联分析思想,提出一种适合于缺乏输入因子资料或选择影响因子有困难条件下的中长期水文预报方法。陈意平等认为 $GM(1, 1)$ 模型为水利系统的中长期预报提供了一种新方法。钟桂芳尝试应用灰色变基模型进行水库的长期水文预报。

1.2.2.6 其他预测

随着遗传算法及混沌分析的广泛应用,它们也被运用到了中长期降水预测中。针对流域降水时间序列的混沌性和随机性,黄国如等采用基于混沌识别的时间序列模型对降水预测进行了研究;张双虎等基于混沌时间序列的重构相空间、遗传算法的良好全局搜索和神经网络精确的局部搜索特性,以重构相空间中的饱和嵌入维数作为神经网络输入层节点数,通过采用遗传算法优化神经网络初始权重,将重构相空间、遗传算法、神经网络三者有机地结合,建立了相空间遗传 BP 神经网络预测模型。由于影响降水的因素众多,有时一种预测方法并不能将预测结果达到一定精度,因此需要几种方法结合来进行预测。Takasao 和 Nakakita 等提出了基于云物理学概念的降水预测模型,模型利用雷达反馈的三维分布信息来估计水蒸气转化为液态水的转化率,预测了降水分布的产生、发展、衰退和雨带的推移等主要特征;Wong 在已有观测资料的基础上,利用每日降水信息,采用空间内插的方法预测未知的降水,提出了自组织地图、反馈神经网络以及模糊系统相结合的方法预测降水;Fi - John 等将成因分析、统计分析以及模糊集理论同神经网络系统有机地结合起来,建立了基于神经网络的模糊系统径流预测模型。

1.2.3 作物需水量预测

作物需水量预测是实时灌溉预报的基础,也是拟定渠系动态配水计划的基础,由于作物需水量和参照作物需水量之间的比值可以通过作物系数与土壤水分修正系数来表示,而作物系数和土壤水分修正系数目前研究比较成熟,因此作物需水量的预测实际也就是参考作物需水量的预测,因此其关键在于参考作物腾发量的预测。对于作物腾发量的中长期预报,一般根据其与气象因素的关系,采用线性回归预测法,对于作物腾发量短期实时预报以前常用指数平滑预测技术,也有在短期气象预报的基础上采用线性回归预测方法。计算参考作物腾发量的方法很多,主要有经验公式法、水汽扩散法、能量平衡法和综

合法等,其中以FAO定义彭曼-蒙特斯方法为计算 ET_0 的首选方法,其具有较充分的理论依据和较高的计算精度。为了使公式统一标准化,FAO给出了参考作物的新定义,目前的研究均在此基础上进行。

由于影响作物需水量的因素较多,并且对于计算短时段内作物需水量时公式中的计算参数难以准确测定,因此目前多是利用人工神经网络或其他方法对作物需水量进行预测。国外,Alexandris提出了仅需要太阳辐射、空气温度和相对湿度3个参数的逐小时的参考作物腾发量计算经验公式;Trajkovic利用人工神经网络建立了参考作物需水量的预测模型,结果表明人工神经网络预测模型有较高的精度;Odhiambo应用模糊数学的方法建立了作物需水量模型。

由于我国近几年内模糊理论和神经网络的研究有了突破性进展,我国学者也将这些理论运用到作物需水量预测中。郭宗楼等利用灰色关联空间对影响作物需水量的主要气象因子进行了分析,并通过GM(1,1)建立作物潜在需水量灰色预测模型,取得了满意的精度;刘钰等根据1979年联合国粮农组织推荐的改进彭曼公式存在的一些弱点,采用彭曼-蒙特斯方程及参照作物的新定义计算了作物的参考需水量,并将修正彭曼公式和彭曼-蒙特斯两种公式进行对比,建议国内应推广使用标准化的彭曼-蒙特斯公式;董斌等根据彭曼公式中所需气象因素多数不能准确定量预报的缺点,采用天气修正系数在多年平均最大旬参考作物需水量的基础上进行修改计算,对汉江平原棉花需水量进行实时预报计算;李远华等采用联合国粮农组织推荐的修正彭曼公式分析计算了霍泉灌区长系列参考作物的腾发量及其变化规律,在此基础上提出了该灌区作物需水量预测模型,分析了预测模型中参数 A_0 的变化规律,并在预报中进行修改;顾世祥等在充分利用实时信息的基础上,利用径向基函数法对参考作物腾发量进行了预测,取得了较精确的结果;崔远来等建立了基于进化神经网络的参考作物腾发量预测模型;张兵等应用L-M优化算法的BP神经网络,通过多维气象数据(太阳辐射、空气温度、湿度)与作物需水量的相关分析,确定网络的拓扑结构,建立作物需水量的人工神经网络模型;对作物需水量进行实时预测时,崑智等根据同一地区和相同年份内,相同天气类型条件下的 ET_0 数值十分稳定这一理论,对于一个地区根据长系列气象记录,计算出各月晴、云、阴、雨4种天气类型条件下的多年平均 ET_0 数值,在实时预报时可以直接利用多年平均值进行预报;崑智等提出了根据天气类型、作物绿叶覆盖率、土壤有效含水率3项因素进行作物需水量实时预报的方法和模型,介绍了具体的预报步骤与计算框图,改进了常规的预报方法,为实时预报提供了准确的依据。

1.2.4 灌区水资源实时调度

目前我国灌区农业灌溉水量还是依据历史资料,制定出典型年作物灌溉制度,以静态的灌水计划为指导,这与作物实际所需水量有较大的出入,既没有达到高产高效的原则又浪费了水资源量。水资源实时优化调度是根据短期的来水和用水预报,进行水资源系统的科学调度,以确定短期的管理运行策略,并使其与中长期最优运行策略偏离最小。这就要求我们兼顾中长期优化调度的规划指导作用和短期调度比较精确的特点,在中长期优化调度的基础上建立短期实时调度优化模型,二者相互渗透、互为前提和约束条件。

水资源实时优化配置是在中长期优化配置的基础上进行的,中长期水资源优化配置即是典型年水资源优化配置。对典型年水资源优化配置主要是研究在作物种植比例一定的条件下,对于非充分灌溉条件下的农作物间最优水量分配,也就是作物之间在全生长期及生长期各个阶段的水量最优分配问题。目前该类问题的研究方法比较成熟,主要有线性规划、非线性规划、动态规划、网络技术、多目标优化以及系统分解协调理论,随着现代科学方法的不断发展,混沌及遗传算法也被运用到优化计算中。

国外对水资源优化配置的研究始于20世纪60年代初期,1960年科罗拉夫的几所大学对计划需水量的估算及满足未来需水量的途径进行了研究,体现了水资源优化配置的思想。Jamieson 和 Wilkinson(1972)建立了水库防洪预报调度系统,根据系统的来水量进行实时调度,揭开了实时调度的新篇章;Willian W - G. Yeh 等(1979)研究了水库系统的实时优化调度问题,并提出了水库系统优化调度的三级框套模型;S. A. Wasimi 等(1983)用线性二次高斯控制研究了水库实时优化调度;B. Datta 等(1984)基于机遇约束规划和线性决策规划,利用径流预报误差的条件分布,提出了以既定的防水、蓄水量加权偏差和最小为目标的水库实时调度随机优化模型;A. P. Georgakakos 等(1987)用线性二次控制概念提出了求解水库实时调度问题的迭代搜索法。

我国从20世纪60年代就开始研究水库实时优化调度问题,80年代中期水利部水利调度中心开始研究水库防洪系统实时调度;胡振鹏、冯尚友(1988)研究汉江中下游防洪系统实时优化调度问题,提出了前向滚动决策与DP相结合的决策方法;进入90年代,国内的研究迅速发展,白宪台、龙子泉等(1990)采用随机方法对平原湖区除涝系统的实时调度进行了研究;李占瑛等(1991)针对湖区除涝排水系统的实时优化调度问题,考虑圩区径流和外河水位的长、短期预报,建立了随机DP和确定性DP相结合的实时优化调度模型。

实时调度应用于农业中,是在20世纪90年代以后,开始主要应用于水库灌区的调度当中,把灌溉效益作为一个效益函数,实质上还是水库调度问题;而后主要是侧重于实时灌溉预报理论的研究。吴玉柏等(1994)以昭关灌区为背景,提出了水稻灌区实时预报优化调度的基本思想、逻辑程序和数学模型,并且建立了求解数学模型的线性逼近方法和网格搜索方法;李远华等(1995)结合漳河灌溉用水微机管理的初步尝试,提出了进行实时灌溉预报和编制渠系动态用水计划的原理、方法及主要模型;雷晓云等(1996)对水库群供水系统优化和实时调度进行了研究;周振民(1997)研究了灌溉系统供水计算模型,将灌区内作物概化为水稻和旱作物两种,分别以水量平衡原理和土壤水分模拟理论为基础建立稻田和旱作物灌溉供水计算模型;茆智等(2002)提出了根据天气类型、作物绿叶覆盖率和土壤有效含水率3项因素进行作物需水量实时预报的方法与模型,介绍了具体的预报步骤与计算框图,改进了常规的预报方法,为实时预报提供了准确的依据。

国内外学者在典型年最优灌溉制度的研究上虽然已取得了不少成果,但由于影响农业灌溉的因素,如降水等气象因素、土壤水分状况以及作物长势等复杂多变,因此典型年的优化灌溉制度不能直接指导实际农业灌溉。确定条件下得出的代表年的优化灌溉制度,只能作为“静态用水计划”的基础和一种参考。正因如此,广大学者才开始研究灌区水资源的实时优化调度问题。由于灌区水资源的实时优化调度问题远比典型年的水资源

优化调度问题复杂得多,要制定出真正能够指导生产实际的用水计划,实现适时适量灌溉,尽可能地提高灌溉水资源的利用效率,目前还有很多问题有待研究解决。如寻求更好的方法对 ET 进行更可靠、准确又便于应用的实时预报;由于实际降水、气象以及作物等众多复杂因素的影响,灌溉制度的优化设计问题中存在着很强的随机性和模糊性,需要系统地从不确定性以及不完备性角度进行详细的研究,这一研究涉及优化、预测、控制、决策等多方面技术问题。

灌溉水资源实时调度是农业水资源管理走向智能化、自动化和现代化的重要标志。灌区现代化管理的发展趋势是数字化、网络化、智能化、可视化和自动化,即降水资料、土壤墒情、作物生长状况等的实时监控采集自动化;资料传输和共享网络化;资料处理数字化,各种现代优化理论与技术的应用;优化方案的形成、筛选与智能化,计算结果的可视化等。建立的管理系统是计算机科学、地理信息科学、计算数学以及控制论等相关科学的有机融合,其发展方向是自动化和智能化。综合地利用地理信息系统、卫星遥感技术、全球定位系统、计算机、人工智能、信息技术,以及农业灌溉、气象学、系统工程等多学科的最新成果,提高调度的灵活性、可靠性、实用性,是灌溉实时调度今后的发展趋势。

灌溉实时调度是农业灌溉现代化管理的核心及重要组成部分,也是我国正在提倡的水利现代化的一个重要方面。在设施农业、精确农业和水利信息化蓬勃发展的今天,它具有更加广阔的应用前景。

1.2.5 GIS 在水资源管理决策中的应用

GIS 以其显著的多学科交叉特征和处理空间数据的独特功能,被广泛应用于众多研究和应用领域,其中在水资源综合开发利用中的应用也很迅速。荷兰政府自 1990 年开始组织有关单位合作研究开发“区域水文地质信息系统”(REGIS),可用于评价全国和省级规模水文地质状况,使用 REGIS 可以查询基本图形、水文地质数据、时间序列数据、地质和水文地质空间模型;美国休斯敦利用 GIS 数据库识别水源保护区内的潜在污染源;博茨瓦纳在其东南部的半干旱地区利用 GIS 结合野外数据和地理研究来识别地下水开采的目标区;美国阿肯色州利用地理信息系统开发一个自动程序,识别该州东部向单井供水的基本含水层,经过判别,确定了 23 500 口井。

陈刚等应用 ArcView 构建了山西临汾县的水资源管理信息系统;陈建耀等以地理信息系统软件 ArcView 为工具,集成了相关的图形、图像、报表、文档等数据和以往的研究成果,建立了柴达木盆地水资源信息系统,系统具有友好的界面和便利的查询、检索功能;张卫等将 GIS 应用于遵义红花岗区水资源管理,在充分研究遵义市红花岗区水文地质条件、水资源优化管理基础上,综合工作中所需图件、水文地质及其有关资料数据、模拟及优化结果、地下水渗流计算模型等多种信息集成一个地下水资源管理及辅助决策地理信息系统;杨健强等以地理信息系统 MapInfo 作为开发平台,设计并建立了松嫩盆地水资源开发管理信息系统,该系统的建立对松嫩盆地水资源一切管理状况和相关信息的查询、检索提供了方便,同时对松嫩盆地水资源的一切合理利用及其管理决策提供了科学依据;保翰璋等以“3S”技术及水资源管理专业模型为支撑,建立了集数据的采集、传输、存储、管理、分析、决策、输入、输出为一体的疏勒河流域水资源管理决策支持信息系统,为流域水资源优