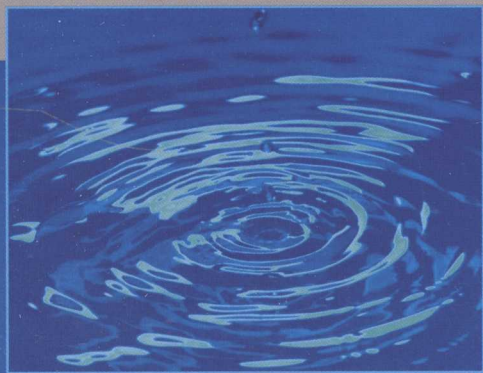


河套灌区 水平衡机制及耗水量研究

阮本清 张仁铎 李会安 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家自然科学基金重点项目研究成果

河套灌区水平衡机制 及耗水量研究

阮本清 张仁铎 李会安 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在国家自然科学基金重点项目“宁蒙河套灌区水平衡机制及耗水量研究”课题成果的基础上编纂而成的。针对河套灌区水资源的特点,本书选择不同典型区,采用微观与宏观相结合、历史资料与原型观测和室内实验相结合、小尺度观测与区域尺度研究相结合等研究方法,重点研究了作物地下水的利用、区域水平衡要素间的相互制约和转化、生态脆弱地区适宜的节水强度、灌区水平衡要素的空间变异、大型灌区尺度的水平衡机制及耗水量模型等,揭示了人类活动影响下引黄灌区的耗水规律和水平衡机制。

本书可供从事水文水资源、农田水利、生态、环境等相关专业的科研与管理人员、高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

河套灌区水平衡机制及耗水量研究/阮本清,张仁铎,李会安著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020388-5

I. 河… II. ①阮…②张…③李… III. ①河套-灌区-水量平衡-研究
②河套-灌区-需水量-研究 IV. S276

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第030912号

责任编辑:赵 峰 朱海燕 沈晓晶 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年4月第一次印刷 印张:19 1/4

印数:1—1 500 字数:442 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

河套灌区是对黄河水资源量影响较大的灌区之一,它地处我国干旱半干旱地区,地表水资源匮乏,属于多风少雨、气候干燥、蒸发强烈的生态、环境脆弱区,是黄河水孕育了该地区特殊的生态和生产景观,引黄灌溉除满足正常的作物需水外,还兼有调节盐分、维持生态平衡的作用。目前,国内外对于流域尺度天然状态下的水量平衡研究成果很多,但是,像河套灌区这样一个受人类活动强烈干扰的地区,其水平衡机制及水平衡要素的转换关系有别于天然状态,它受到自然环境和人类活动的双重影响,是典型的自然-人工二元水循环系统,各种水量转化关系和水平衡机制极其复杂。比如人类活动对于区域地下水位及生态、环境的影响问题,灌区水盐平衡问题,适宜节水强度问题,各水平衡要素的时空变异性问题等都亟待解决。所以研究河套灌区的水平衡机制及耗水量,无论是对实现黄河水资源的可持续利用,还是对响应国家西部大开发战略,促进当地经济、社会、生态的和谐发展都具有重要的现实意义。鉴于上述认识,依托国家自然科学基金重点项目“宁蒙河套灌区水平衡机制及耗水量研究”(编号:50239090),本书通过对河套灌区水平衡要素及其影响因素的实地调查,结合对有关参数的实验观测,研究了灌区尺度上的水平衡、转化、运移、分配过程和机制,定量分析了区域水平衡要素间的相互制约和转化关系,研究大型灌区尺度水平衡参数和变量的时空变异特性,揭示了人类活动影响下引黄灌区的耗水机制和水平衡机制。这不仅对于弄清黄河流域用水状况,加强黄河水资源管理,实现黄河水资源的可持续利用具有重要的现实意义和广阔的生产应用前景,而且通过本研究可以提高引黄灌区水平衡研究水平,促进区域尺度的水循环研究,因而也具有重要的理论研究意义。

全书共包括 13 章内容,主要研究内容和取得的成果涵盖以下几个方面:

第一章 绪论:着重论述选题背景和意义以及灌区水平衡机制和耗水量研究的相关进展。

第二章 河套灌区水资源供需现状评价及耗水类型:研究了灌区供用水的历史演变过程,分析了灌区的耗水类型、耗水组成及耗水特点。结合实际情况,建立了灌区生态、环境评价指标体系及评价标准,并对灌区生态、环境现状进行了评价。

第三章 潜水蒸发与作物的地下水有效利用率:以冬小麦和夏玉米为典型作物,研究探明了作物在不同生育阶段、不同地下水埋深等情况下地下水的有效利用率及分别在有无作物情况下的潜水蒸发现律,建立了非等温条件下潜水蒸发的数学模型。模型考虑了土壤表面水汽对热、水分传输的影响和地下水汽的流动,讨论了潜水蒸发过程中温度对水分运移的影响。引入作物累积温度(GDD)来表示作物生长发育程度,确定影响潜水蒸发的三个主要因子为作物腾发强度(ET)、地下水埋深(H)与作物累积温度(GDD),并以测坑试验和数值模拟试验为基础,推求了作物生长条件下的潜水蒸发经

验公式。同现有的潜水蒸发公式相比,引入 GDD 因子建立的潜水蒸发计算公式具有明确的物理意义,能更好地反映作物生长条件下的潜水蒸发规律,具有一定的创新性和实用价值。

第四章 区域作物耗水量及水平衡机制的水均衡场试验研究:以内蒙古河套灌区义长灌域永联水均衡试验区为研究区,进行了为期两年的试验,探明了该区域地下水位的变化特征与区域耗水特征,认识到秋浇是该区域耗水的重要补给源。并利用试验场实测数据资料,建立了不同耕地率条件下作物的腾发量统计模型,在此基础上,根据拟定的不同灌溉方案,采用率定和验证后的 SWAP 模型,开展了基于农田耗水机制的田间水管理研究,为灌区农田水管理决策提供了依据。

第五章 宁夏引黄灌区生态耗水规律:本章在大量调查和掌握相关数据的基础上,以定量分析为主导,全面结合遥感、地理信息系统等新技术手段,对宁夏引黄灌区生态耗水问题进行了深入细致的研究,系统地提出了灌区周边生态适宜用水量,并通过地下水模拟提出了灌区适宜节水强度的推荐方案。

第六章 典型区域节水灌溉对地下水的影响:选择内蒙古河套灌区内的隆胜节水示范区作为典型研究区,通过对典型区域实施节水改造工程前后灌区引黄水、地下水、各种耗水量等水平衡要素的观测分析,以年为均衡时段,建立了地下水平衡集中参数模型,模拟了不同情景渠系防渗、田间节水灌溉对地下水的影响,定量分析了不同节水方案下入渗量与地下水埋深的关系,探讨了节水技术及节水工程对灌区地下水的影响,以及典型区域水平衡要素间的相互制约和转化关系,为灌区水盐调控提供了技术支持。

第七章 田间灌水有效性试验研究:本章根据河套灌区具有浅地下水位的特点,通过田间试验综合观测,应用土壤水盐动力学理论与 SPAC 水盐转化理论,研究包括作物生长季(夏灌)和非生长季(秋浇)在内的完整水文年的田间灌溉水有效性。所选灌区具有代表性的种植模式——春小麦套种夏玉米,在当前实际灌溉条件下,对其田间灌溉水有效性进行评价,科学全面地分析田间灌水的节水潜力,为当前河套灌区正在实施的以节水为中心的灌区改造提供了科学依据。

第八章 大型灌区水平衡要素的时空变异性:灌区区域水平衡机制是一个极其复杂的动态过程,比如区域地下水资源与地下水开采和补给量、灌区农作物需水量、灌溉水量、蒸发和渗漏量、降水量,以及其他用水量都是随时间和空间变化的,具有很强的时空变异性,并且这种时空变异性随灌区面积的增大而增大,因此对大型灌区水平衡及耗水量的准确计算十分困难。本章分别选择对黄河水资源影响较大的内蒙古河套灌区和宁夏青铜峡引黄灌区为研究对象,综合运用小波分析、地质统计学、随机模拟等理论与方法,摸清水平衡要素的时空变异规律及其尺度效应。

第九章 区域饱和-非饱和地下水数值模拟模型:本章首先根据多孔介质中区域饱和-非饱和水分运动的特征,建立了基于迦辽金有限元法的拟三维数学模型以及基于多尺度有限元法的拟三维数学模型,并对模型进行了验证。然后利用模型对非均质多孔介质中的三维地下水流进行了模拟。结果表明,多尺度有限元法比传统有限元法好,既节省计算量又有较高的精度。在迭代求解区域饱和-非饱和拟三维渗流模型的基础上,又建立了区域溶质运移简化模型。该模型采用有限元法的数值处理技巧,在同一个矩阵方

程中求解饱和与非饱和含水层的浓度变化,无需迭代计算,大大减少了工作量,为解决区域溶质运移问题提供了新思路。

第十章 内蒙古河套灌区水盐平衡研究:本章以地处内蒙古河套灌区的义长灌域为研究区,针对义长灌域土地利用的主要特点,分别建立了灌域总体水均衡模型、地下水均衡模型以及农区-非农区-水域水盐均衡模型,并利用模型对义长灌域农区、非农区、水域之间的水分和盐分迁移转化进行了定量分析。在此基础上,根据内蒙古河套灌区水文过程的基本特点,建立了内蒙古河套灌区的陆地水循环和盐分运输模型,对1980~2000年内蒙古河套灌区的陆地水循环和盐分输运进行了动态模拟和敏感性分析,并根据节水改造长期规划,对2000~2020年内蒙古河套灌区陆地水循环以及盐分运输的变化趋势进行了预测。

第十一章 大型引黄灌区耗水量计算方法:针对以往灌区耗水量研究的不足,本章从灌区水循环角度出发,全面考虑灌区的各个耗水类型,将灌区供水系统、耗水系统、排水系统相结合,从各种水量消耗过程入手,考虑地表水平衡、土壤水平衡、地下水水平衡,通过蒸发、入渗以及单元间的水量水平交换将各个平衡系统耦合起来,建立了基于四水转化的区域耗水量计算模型。选择对黄河影响较大的引黄灌区为研究区,应用本章所建模型可详细计算研究区2004年各耗水类型的总耗水量以及黄河水的消耗量,并能对灌区各水均衡模块之间的水量交换进行分析计算,从而解决以往方法中出现的区域水量估算“不平衡”的问题。

第十二章 基于数值模拟的内蒙古河套灌区水资源合理配置研究:本章首先根据河套灌区的水文地质条件,建立了基于迦辽金有限元法的河套灌区地下水数学数值模拟模型,并对模型进行了识别和验证。然后以2000年为研究水平年,分析了在不同引黄水量以及地下水补给量下灌区地下水的合理开采量。其次建立了河套灌区地表、地下水资源联合优化配置模型。最后通过对地下水数值模拟模型与水资源优化配置模型进行耦合,建立了灌区地表、地下水联合评价耦合模型,并利用该模型对研究区2010、2020和2030年的水资源进行了优化配置,本模型可为河套灌区水资源的有效利用、盐碱化防治等提供有价值的参考。

第十三章 结论:指出了该研究领域未来的发展方向。

本书是在国家自然科学基金重点项目(编号:50239090)研究成果的基础上撰写而成的,项目和书稿的顺利完成是各位成员共同努力的结果。各章编写分工如下:第一章由阮本清编写,第二章由李会安、蒋晓辉、张文鸽、张霞、张会敏、蔡大应、李恩宽编写,第三、四章由王修贵、沈荣开、王晓红、武夏宁、徐建新、夏玉红编写,第五章由阮本清、韩宇平、蒋任飞编写,第六章由李会安、蒋晓辉、张文鸽、蔡大应、李恩宽编写,第七章由张仁铎、黄爽、王卫光、屈忠义、邹朝望、武夏宁编写,第八章由张仁铎、许凤冉、王卫光编写,第九、十二章由杨金忠、岳卫峰编写,第十章由杨金忠、沈荣开、岳卫峰编写,第十一章由阮本清、蒋任飞、王成丽、黄诗峰、徐美、张春玲、孙静编写,第十三章由阮本清、蒋任飞编写。

随着研究工作的逐渐深入,我们深刻地认识到大型灌区的水平衡机制及耗水量研究是一个极其复杂的系统工程,涉及面非常广泛,虽然本书取得了一定的成果,但尚有许多

多内容需要深入研究,且限于研究者的水平和其他客观原因,书中难免会存在许多不足甚至纰漏,敬请读者批评指正。此外,书中对于他人的论点和成果都尽量给予了引证,如有不慎遗漏之处,恳请相关专家谅解。

作者

2007年5月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
1.1 大型灌区水平衡研究意义	1
1.2 相关研究进展	2
第二章 河套灌区水资源供需现状评价及耗水类型	9
2.1 研究区基本概况	9
2.2 研究区水资源供需历史演变规律	12
2.3 研究区生态、环境现状评价	17
2.4 河套灌区耗水类型	22
第三章 潜水蒸发与作物的地下水有效利用率	30
3.1 有作物生长条件下潜水蒸发的蒸渗仪试验	30
3.2 有作物生长条件下潜水蒸发的数值模拟	43
3.3 有作物生长的农田潜水蒸发经验公式的推求	57
第四章 区域作物耗水量及水平衡机制的水均衡场试验研究	67
4.1 试验区介绍	67
4.2 永联水均衡试验区的水均衡分析	70
4.3 基于农田耗水机制的田间水管理模拟	89
第五章 宁夏引黄灌区生态耗水规律	99
5.1 灌区生态耗水要素分析	99
5.2 灌区生态适宜用水量计算	100
5.3 基于地下水模型的适宜节水强度研究	109
第六章 典型区域节水灌溉对地下水的影响	124
6.1 典型区域概况	124
6.2 典型区域节水灌溉实施前后引黄水量变化分析	126
6.3 节水灌溉实施前后地下水动态分析	127
6.4 节水灌溉对地下水的影响研究	128
第七章 田间灌水有效性试验研究	134
7.1 试验区概况	134
7.2 土壤性质及其水分运动参数的推求	139
7.3 SPAC 农田水分循环	142
7.4 基于 SPAC 的作物生长季田间灌溉水有效性评估	151
第八章 大型灌区水平衡要素的时空变异性	155

8.1	大型灌区水平衡要素分析	155
8.2	气象因素的时空变异规律	156
8.3	人类活动的时空变异规律	162
8.4	基于小波分析的地下水位时间演变规律	164
8.5	内蒙古河套灌区地下水位的空间变异性	169
8.6	内蒙古河套灌区水平衡要素的尺度效应	174
第九章	区域饱和-非饱和地下水数值模拟模型	182
9.1	区域饱和-非饱和地下水流运动数值模拟	182
9.2	多尺度有限元法在地下水拟三维数值模拟中的应用	188
9.3	区域饱和-非饱和和多孔介质溶质运移简化模型	193
第十章	内蒙古河套灌区水盐平衡研究	201
10.1	义长灌域概况	201
10.2	内蒙古河套灌区义长灌域总体水均衡分析	201
10.3	内蒙古河套灌区义长灌域分区水均衡分析	207
10.4	内蒙古河套灌区义长灌域盐分均衡分析	212
10.5	内蒙古河套灌区陆地水循环和盐分输运模拟分析	217
第十一章	大型引黄灌区耗水量计算方法	231
11.1	研究区概况	231
11.2	基于“四水”转化的灌区耗水量计算模型	233
11.3	作物种植结构遥感估测及基础数据准备	252
11.4	模型验证和计算结果分析	265
11.5	研究区 2004 年耗水量分析	270
第十二章	基于数值模拟的内蒙古河套灌区水资源合理配置研究	274
12.1	基于数值模拟的内蒙古河套灌区地下水合理开采研究	274
12.2	内蒙古河套灌区地表和地下水联合利用研究	282
第十三章	结论	289
	主要参考文献	292

第一章 绪 论

1.1 大型灌区水平衡研究意义

史称“四渎之宗”的黄河是孕育中华民族伟大文明的摇篮。黄河流域上游半荒漠地区是黄河水资源形成的主要源地,中游黄土高原水土流失区使黄河成为举世闻名的多泥沙河流,下游 700km 长的地上悬河为海河与淮河流域的分水岭,河口因淤积而不断延伸,导致河道纵坡降不断减缓。正是由于这种独特的自然地理条件以及历史上对黄河有限的治理力度,使黄河曾被喻为有名的“害河”。新中国成立以来,党和人民非常重视黄河的治理与开发,取得了确保黄河岁岁安澜的伟大成就。但近年来随着流域内社会经济的高速发展,黄河水资源供需失衡问题越来越严重,“水少沙多,地上悬河”的状况日益严峻,导致洪水泛滥严重,生态、环境恶化,已引起社会各界的广泛关注。

黄河流域自然环境脆弱,水资源匮乏,人均水资源占有量仅为全国人均的 $1/4$,耕地亩均水量不足全国的 $1/5$ 。既存在总量上的匮乏,也有区域间的不均衡。据统计,黄河流域多年平均天然径流量 580 亿 m^3 ,目前流域及下游沿黄地区年均引用黄河河川径流 395 亿 m^3 ,耗用水量 307 亿 m^3 ,河川径流利用率达 53%,其中,农业灌溉耗用水量占 92%,是流域用水的大户。目前黄河流域有效灌溉面积约 1.1 亿亩 ($1 \text{ 亩} = 1/15 \text{ hm}^2$),其中,宁蒙平原、汾渭河盆地和下游沿黄地区的灌溉面积约占全河灌溉面积的 65%,用水量占全河总用水量的 70%,是引黄灌溉的主体。但目前流域农业灌溉用水的利用率较低,灌溉水的利用系数仅 $0.3 \sim 0.45$,综合毛灌溉定额在 $300 \sim 600 \text{ m}^3/\text{亩}$ 范围内。尤其是河套灌区,灌溉面积已达 1300 万亩,用水量高达 $600 \sim 1300 \text{ m}^3/\text{亩}$ 。由此可见,欲实现黄河水资源的可持续利用,合理配置有限的水资源,上述黄河流域大型灌区的地位举足轻重。但目前黄河水资源管理的基础工作还很薄弱,尤其是在大型灌区的用水管理上,存在人类干扰强烈、耗水机制不清、水平衡要素空间变异性强、作物地下水利用率低、生态耗用水管理不系统、田间灌水管理水平差、区域耗水量计算水量不平衡、用水资料不系统、引黄灌溉水的利用率低等许多问题。鉴于此,本书选择对黄河水资源影响较大的河套灌区,依托国家自然科学基金委员会与黄河水利委员会联合设置的“黄河联合基金”项目“宁蒙河套灌区水平衡机制及耗水量研究(编号:50239090)”,根据宁蒙灌区的用水(包括生态用水)特点,在已有研究成果的基础上,通过典型调查和试验观测,突破传统思路,创新研究灌区尺度上的水量平衡、转化、运移、分配的过程和机制,研究大型灌区区域水平衡参数和变量的时空变异特性,定量研究区域水平衡要素间的相互制约和转化关系,揭示人类活动影响下引黄灌区耗水规律和水平衡机制,完善现有水平衡的计算方法,为黄河水资源的现代化管理提供技术支撑,使有限的黄河水资源发挥更大的社会效益。这不仅对于弄清黄河流域用水状况,加

强黄河水资源管理,实现黄河水资源的可持续利用具有重要的现实意义和广阔的生产应用前景,而且还可以提高引黄灌区水平衡研究水平,促进区域尺度的水循环研究,因此具有重要的理论研究意义。

1.2 相关研究进展

1.2.1 水循环研究

水循环研究最初开始于单个水文系统的研究,如地表水系统、地下水系统等,而对于整个流域特别是像黄河这样的大流域的水文过程的研究则受囿于技术手段和认识水平的限制而研究甚少。随着人们对系统间物质、能量与信息交换认识的逐步深入,水循环的研究也开始突破传统的单个水文系统研究的局限,开始着眼于整个水循环过程。从机制角度来看,水循环的研究经历了从“三水转化”(SPAC)到“四水转化”(GSPAC)等研究阶段。在研究水循环的整个过程中,水分从一个子系统向另一个子系统过渡的水文界面过程能最有效地反映开放系统间的物质、能量与信息交换。因此,水文界面过程成为水循环过程研究的关键问题之一。目前,水循环研究的重点不仅在于界面过程,界面本身的能量与物质运移规律的研究也日益受到人们的重视。

从研究手段和方法看,在传统的野外观测和室内实验的基础上,遥感手段已成为水循环研究中必不可少的工具。其次,GIS在水循环的研究中也发挥了越来越重要的作用。GIS对于存储、管理和处理大量的水循环数据有着明显的优势,已成为水循环研究中举足轻重的手段和工具,同时也是水循环研究的一个重要领域。水循环模型一方面是水循环过程和机制研究成果的总结和应用,同时通过水循环模型的应用又可以解决、发现相当一部分水循环问题。目前,这方面的研究突出地表现在GCMs系列模型的应用及分布式水文模型的开发和应用上。除了上述三方面的内容外,示踪等新的水文测验方法的集成应用也已成为当前水循环研究的重要特色。

在田间尺度的水循环方面,大气降水或灌溉水渗入土壤、土壤水向根系运动、根系水分重新分配、根系吸水与蒸发蒸腾,构成了田间水分的微循环。1966年,澳大利亚著名的水文学家Philip提出,微循环系统中的各运动过程是相互关联的,并将此系统命名为“Soil-Plant-Atmosphere Continuum”,即SPAC。这一系统概念不仅指明了微观研究的方向,而且加强了水文学的跨学科研究。SPAC系统中的水分、能量和盐分的传输属于国际前沿课题之一,其中的水分运动通常分为三个方面:土壤中的水分运动、植物体内的水分运动、植物或土壤与大气之间的水分扩散运动。但在地下水埋深较浅的地区,SPAC系统中的水分必然和地下水发生联系,在这种情况下,SPAC系统应延展到地下水水面,形成地下水-土壤-作物-大气的系统(GSPAC),即在研究农田水循环时应考虑浅层地下水(潜水)动态在其中的作用和影响。

在我国,有关水资源及其循环、转化一直是个热门课题。20世纪80年代以来陆续提出了区域“三水”、“四水”乃至考虑植物水的“五水”转化理论。“六五”期间,国家重点科技攻关项目“华北地区水资源评价和开发利用研究”解决了地下水资源评价方

法中的一些重要问题,但这期间的研究仍处于将地表水与地下水割裂开来分别加以研究的状态,忽略了包气带水问题。“七五”期间,国家重点科技攻关项目“华北地区及山西能源基地水资源研究”,突破了地下水与地表水分割研究的理念,较广泛地开展了自然状态下“大气水-地表水-地下水”的“三水”转化实验研究及其成果的应用。1982年,原地矿部水文地质工程地质研究所开始与联合国开发计划署合作,在河北省石家庄地区建立了水文地质实验中心与实验场,在河北省南宫与南皮地区分别建立了野外地下水均衡试验场,系统地开展了“大气水-地表水-土壤水-地下水”的“四水”转化实验研究。

1.2.2 作物地下水有效利用率研究

在地下水浅埋地区,地下水和土壤水联系紧密,转化频繁,地下水-土壤水界面水分转化量是农田水分平衡的重要组成部分。在制定灌溉计划时,通常都存在着考虑地下水对土壤水的补给作用不够合理的情况,过高的灌水定额导致深层渗漏损失的增加,国内外许多学者(Grismer *et al.*, 1988; Ayars *et al.*, 1984; Hutmacher *et al.*, 1996; 毛晓敏, 1997)通过研究证明,浅埋地下水对作物需水量的补给作用非常大。

当前,在北方节水改造的规划中,对有无作物生长条件下的潜水蒸发、地下水补给量等方面存在什么差异问题等的认识比较模糊。如将裸地(无作物生长或无植被)的潜水蒸发参数直接用于有作物生长的情况,或仅作简单的处理(下降蒸发面);将某一种作物所测得的潜水蒸发经验关系随意套用于其他作物;将作物生长条件下的潜水蒸发分成对作物有效和无效的部分。事实上,认为作物生长期内的潜水蒸发量就是作物的地下水利用量,忽略了棵间蒸发同样是作物田间耗水的一个组成部分,这是错误的。目前,大多数灌区在计算灌溉用水时,对地下水的利用量大多数采用经验值,甚至将裸地条件下所获得的潜水蒸发直接用于估算有作物生长时的潜水蒸发,所造成的误差是不容忽略的。

1969年, Namken 等用蒸渗仪研究了棉花用水,发现在地下水埋深 0.91m、1.83m 和 2.74m 时,所利用的地下水分别占农作物总用水的 54%、26% 和 17%。研究表明,在一定的条件下,农作物能够从埋深 2m 或更深的地下水获取水分。张朝新(1984)对我国安徽省五道沟的研究表明,在适宜的地下水埋深范围内,早作物(小麦、玉米和大豆)对地下水的利用量一般占农作物总用水的 50%~70%。Benz 等(1984, 1985)认为即使在灌溉条件下,地下水对作物用水的贡献也可能相当显著。Benz 等通过研究不同灌溉水平下的地下水对首稽腾发的贡献发现,随着灌溉的增加,地下水对首稽腾发量贡献的份额由 38.4% 降至 0.6%。对于低灌溉水平,即使深达 2.1m,地下水对土壤水补给量也超过了总腾发量的 50%。Hutmacher 等(1996)在美国农业部加利福尼亚州实验室,进行了为期三年的玉米潜水蒸发实验,实验结果表明,在玉米生育阶段内,潜水蒸发量占 ET 的 30%~42%,即使在含盐高的条件下潜水蒸发量也占到 ET 的 12%~19%。毛晓敏(1997)在叶尔羌河试验站,测得的小麦在 1m 埋深情况下的地下水补给量达 98.4%, 1.5m 埋深情况下的补给量占 95.7%, 2m 埋深情况下的占 57%, 2.5m

由于灌水量加大发生了深层渗漏,但仍有 3.2% 的补给量。杨建锋等(2000)在中国科学院山东禹城试验站进行了变地下水位 1.6~2.4m 的冬小麦农田蒸发实验,实验结果表明,地下水的补给在冬小麦的耗水量中占有相当比例,约占农田蒸发量的 16.6%~26.4%。在小麦生长旺盛期补给量占到了 46.2%,一定程度上缓解了冬小麦需水的紧张程度。

上述国内外实验结果表明,在地下水浅埋的条件下(埋深 3m 以内),潜水蒸发(作物可获得的地下水的补给)可以达到相当大的数量,这一点对于水资源短缺地区计算水土资源平衡和制定灌溉季节灌溉用水计划尤为重要。

1.2.3 时空变异研究

由于水平衡要素在不同尺度上的作用不同,使得水平衡的尺度效应成为当前一个热点研究领域。此外,水平衡要素计算中的参数,由于尺度的改变而出现的不确定性和变异性,也使得如何正确估算这些参数成为研究的热点。考虑到灌区水平衡要素在特定区域上的演化过程在时间上存在的不确定性和随机性,通常采取时间序列分析方法对不同时间尺度上的变化规律进行分析;在空间上,水文气象等要素既存在着独立性,又存在着相依性,地质统计学方法是研究变量空间变异的有效方法。这两方面的研究开展得较为广泛,很多学者采取不同的方式将两者相结合进行了研究,但时空综合分析的理论和方法还不够成熟,有待深入。

一般而言,时间序列主要包括趋势、周期和随机三种成分,随机项中又包括相依和独立两个部分,因而,需要对时间序列不同尺度下的趋势性、突变性、相依性和周期性进行分析。很多学者针对流域水循环过程中水文、气象等要素的演变规律,采取时间序列分析方法进行研究,对不同地区的水文要素的变化特征进行了探讨。许全喜等(2004)采用滑动平均法、Spearman 秩次相关检验和线性趋势回归检验对屏山、宜昌等站的水沙变化趋势进行了分析。徐宗学等(2005)利用 Mann-Kendall 法分析了黄河流域 77 个气象站 1958~2001 年日照时数的长期变化趋势,并用参数检验法对其结果进行了验证。王文圣等(2003)基于小波分析给出了水文序列的突变特征,以三峡宜昌站年最大洪峰序列和金沙江屏山站年平均流量序列为例,利用小波变换时频局部化功能,将水文序列的频率特征在时间域上展现出来,清晰地给出了各种周期的强弱和分布情况以及突变点。张新民等(2003)利用谱分析的方法对甘肃省降水量、径流量的变化周期进行了分析。李栋梁等(2000)采用谐波分析和小波分析的方法,利用甘肃河东建站最早的 9 个代表站的年降水量资料,计算了年降水量序列在各时间尺度上的变化周期,结果发现存在显著的 3 年和 9 年的周期,但这种振荡不是均匀地出现在整个序列之中。许月卿等(2004)采用墨西哥帽小波函数,对河北平原近 45 年来降水的季节变化和年际变化序列进行了小波分析,揭示了河北平原降水变化的多时间尺度的复杂结构,分析了不同时间尺度下降水序列变化的周期和突变点,发现各季节和年降水均存在 8~12 年左右的周期特征,4~6 年左右的周期特征也较明显。

当前的空间异质性研究方法,主要以所研究要素在空间点上的实测值为基础,通过

空间插值方法实现空间上的尺度转换,得到所研究的水平衡要素的空间分布情况。根据对已知数值点的使用,可以将空间插值方法分为全局方法和局部方法。全局方法利用每个可利用的控制点来估算未知点的数值,主要包括趋势面分析、回归模型等方法;局部方法是利用已知数据点的样本进行估算,主要有泰森多边形法、密度估算法、反距离平方法、薄板样条函数法、克里金法等方法,其中,反距离平方法、克里金法等基于空间自相关的局部方法应用较广,基于地质统计学的克里金法可分析插值误差与插值表面的不确定性,且不产生反距离加权方法那样的边缘效应,因此在国内应用极为广泛。

许迪等(1996)对河北省雄县试验区实验田的土壤特性空间变异性进行了经典统计分析,并利用地质统计学半方差分析方法定量描述了土壤特性的空间相关结构,用克里金最优插值法得到了田间土壤特性参数的空间分布等值线图。王景雷等(2004)利用GIS软件和IDW、地质统计学等多种插值方法绘制了山东省冬小麦需水量等值线图,并对不同的插值方法进行了比较。胡克林等(2000)对华北冲积平原曲周县的139个采样点的地下水埋深、土壤含盐量和硝酸盐含量进行了分析,通过半方差函数分析,发现三者在一定范围内存在空间相关性,利用克里金方法进行了估值,绘制了等值线图。朱奎等(2004)提出了利用DEM中的地形标高作为辅助信息修正地下水位趋势面的RK(Residual Kriging)法,并将此方法运用到华北平原滏阳河平原区,使估计更为精确。

有的学者通过建立时间空间相结合的坐标系提出了时空结合的分析方法。Shahr-okh等(1990)认为,分析时空变量的最好方法是将时间视作一个维度加入到空间维度中,形成一个时空坐标系 (x, y, t) ,在时空坐标系中运用地质统计学方法对时空变量进行分析,这种时空动态地质统计学法已经在多个领域得到认可。Steir(1999)和Bechini等(2000)在研究中应用了时空地质统计学法,但是都没有解决时空异向系数问题。侯景儒等(1995)提出了时间-空间域中多元信息的地质统计学,也是将时间作为一个维度加入到空间维度中,将研究的变量看成是时空域的随机函数,以时空域多元信息的互变异函数为工具,利用协同Kriging等插值方法可以对时空变量进行多元分析。余先川等(2003)考虑时间序列因素,在多元空间信息统计学的基础上,把时空多元信息统计学定义为:它是以协同区域化理论为基础,以互变异函数为基本工具,研究那些定义于同一时空域中既有统计相关,又有空间位置和时间序列相关的自然现象的科学。然而,这类方法很难充分地反映时间变异和空间变异的区别,弱化了时间与空间的各向异性,因此还只是限于定性研究变量的时空变异性,而在变量预报和未知点的插值研究中并没有得到广泛的应用。

有的学者则通过提出多时段的克里金方法来研究时空变异问题。刘廷玺等(1995)将随机水文学理论和地质统计学理论相结合,提出了用于降水量等水文随机函数最优估计和区外预报的多时段泛克里金方法,可以对多时段水文变量进行空间最优估计。在此基础上,刘小燕等(2001)提出了多时段空间剩余协克里金模型,以解决小流域或局部区域内少站点情况下多个水文变量的最优估计问题。

1.2.4 田间灌水有效性研究

农业灌溉用水在水资源供需平衡中占有重要地位,因此提高农业灌溉水利用率,节约农业用水,对整个用水供需平衡具有毋庸置疑的重大意义。节约灌溉用水的关键在于减少灌溉水从水源进入农田直至被作物吸收利用整个过程中的水量损失。这些水量损失包括输水过程中的渗漏和蒸发损失、田间的渗漏和蒸发损失、农作物的蒸腾损失。提高水的利用率和水分生产率就是要尽量减少灌溉水在上述各个环节中的损失和无效消耗,最大限度地将灌溉水用于作物的生长需要,在保证作物产量的同时,节约宝贵的水资源,获得最大的灌溉经济效益。

在田间灌溉水的有效性评价中,到达田间的灌水量可较容易和准确地通过末级固定渠道出水口实测或用渠首引水量和渠系水利用率的乘积估算而得到。然而,由于作物生长期田间灌溉水、降水、作物水、土壤水和地下水间相互联系、相互制约,总是处于连续不断地动态转化过程之中,构成所谓 SPAC 水分循环,作物对灌溉水的吸收利用过程和机制甚为复杂,有效灌水量的确定相当困难,至今从理论上和计算方法上均未得到科学、全面的解决。田间灌溉水的有效性评价取决于如何科学地确定有效灌水量这一核心问题。

20 世纪 70 年代后,国内外学者对有效灌水量进行了诸多研究,力图从“有效”角度加以具体化,探讨有效灌水量的计算方法。这些研究一般将有效灌水量视为灌水前后作物根系层深度内土壤存储的水量,通过量测各次灌水前后土壤的含水量来计算,即土层静态切割法,我国田间灌溉水有效性评价中有效灌水量的计算至今仍沿用该方法。土层静态切割法实际上是将深层渗漏全部归为灌溉水损失,且认为存储在根系层的灌溉水又能够全部为作物所利用,但从田间灌溉水相互转化的动态过程来考察,实际情况并非如此。该方法由于仅局限于管理过程中灌溉水一次存储的有效性,而忽略了作物对灌溉水再利用的有效性,没有从 SPAC 系统水分相互转化的动态角度在时间尺度上考虑灌溉水对作物的有效性,计算得到的田间灌溉水利用率往往偏低。对于盐渍化土壤,为了保证作物正常生长发育,农业生产中一般采用较大灌溉定额提供一定量的额外水分淋洗盐分,深层渗漏较大。这部分水分虽未被作物直接吸收利用,但改善了作物的根系环境,减轻或消除了盐分危害,故不应视为灌溉水量损失。土壤盐分与灌溉排水、作物耗水具有强烈的耦合,在作物生长期随水分变化也呈动态变化。该方法并未反映土壤盐分及其动态变化对灌溉水有效性的影响,同时又将淋洗水分排除在有效水分之外。因此,传统的土层静态切割法的计算理论存在明显缺陷,不能对灌区田间灌溉水的有效性做出科学评价。

陈亚新等(1998)将地面水、土壤水和地下水视为连续系统(SSGC 系统),并通过在河套灌区的田间试验对传统田间灌溉水有效性的评价方法进行了改进,将按传统方法得到的田间灌溉水利用率由 43% 提高到 71%。Keller 在 1994 年针对区域水资源调度管理,以区域水量平衡为基础对传统田间灌溉水利用率的计算进行了研究。周宏飞等(1996)对绿洲农田和裸地的土壤水分动态进行了初步分析,并用水量平衡法计算和对

比了农田和裸地的蒸发量,分析了田间灌溉水的有效利用率最后给出了提高措施。Jensen 在 1997 年针对传统田间灌溉水利用率没有考虑地下水的回归利用问题,引入回收效率修正田间灌溉水利用率。傅国斌等 2001 年从作物需水量出发,考虑经济需水量、有效降水补给、生育期作物地下水利用量、输水损失、田间损失、无效蒸腾等因素后,建立了一个节水潜力的理论计算公式,对河套灌区近、中、远期的节水潜力进行了估算。魏占民(2003)在综合分析 SPAC 系统农田水分运移转化的基础上,提出了基于 SPAC 模型模拟的田间灌溉水有效性的评价方法,并且应用 SWAP 模型模拟了“四水”相互转化关系,研究得到河套灌区沙壕渠灌域春小麦的田间灌水利用率达 89.3%。李会安 2003 年综述了黄河灌区的发展过程,分析了灌区用水及节水现状,指出了灌区节水存在的问题,提出了灌区节水的途径和措施,并估算了黄河灌区的节水潜力。

1.2.5 区域蒸散发研究

蒸散发是土壤-植物-大气连续系统中水分运动重要而复杂的过程,其强度与土壤状况、作物状况、大气环境密切相关。对其研究不仅涉及土壤学、植物学、气象学和气候学,而且还与水文学、地球物理学等其他学科密切相关。自 1802 年 Dalton 提出计算蒸发的公式以来,蒸散发理论取得了一些重要成果,如波文比能量平衡法、空气动力学方法、涡度相关法、Penman-Monteith 公式等,但是这些理论主要是在点尺度上提出的,因而在区域尺度上应用仍有很大局限性。从 20 世纪 70 年代起,遥感不仅作为获取区域信息的手段,而且开始作为一门独立的学科给出了一些估算区域蒸散发的方法。估算区域蒸散发的方法很多,可将其分为两大类,一类是以水文学和气象学为主,一类是以遥感技术为主。在以水文学和气象学为基础的方法中,主要有水量平衡原理、互补相关理论、SPAC 理论、参考作物腾发量思想等方法;在以遥感技术为基础的方法中,主要有统计经验法、能量余项法、数值模型、全遥感信息模型等方法。

水量平衡原理的基本思想是先明确均衡体及各水均衡要素,然后测定或估算各计算时段内除蒸散发外的其他水均衡要素,最后求出水均衡余项蒸散发量。井涌(2003)应用水量平衡法计算了陕西渭河流域耗水量,并进行了讨论。互补相关理论最早由 Bouchet(1963)提出,他认为,当区域全部为湿润时,实际蒸散发 E_T 和可能蒸散发 E_{TP} 均等于湿润条件下的陆面蒸散发量 E_{TW} (即 $E_T = E_{TP} = E_{TW}$),当实际蒸散发 E_T 少于 E_{TW} 时,可能蒸散发 E_{TP} 就会增加,而且增加量等于减少量,因为实际蒸散发 E_T 降低时会释放一些能量 Q ,进而影响地面上的空气状态,特别是空气温度、湿度和湍流,导致可能蒸散发 E_{TP} 有等量的增加。Morton(1983)用大量的实验数据证明了局地蒸发潜力与实际蒸散发之间存在互补关系。在应用互补相关方法计算实际蒸散发量 E_T 时,由于推求 E_{TW} 和 E_{TP} 的思想不同,形成了不同的模型,如 Morton(1983)提出的 CRAE (Complementary Relationship Area Evapotranspiration) 模型、Brutsaert 等(1979)提出的 AA (Advection-Aridity) 模型、Granger(1989)提出的 Granger 模型。一些学者如 Hobbins 等(1999)、刘绍民等(2004)、Xu 等(2005)将上面三种有代表性的互补相关模型进行了精度比较和地域适用分析,认为 CRAE 模型的结果比另两种模型要好,

三个模型在温带湿润地区应用都较好，而在半干旱和干旱地区均不太理想。

在估算农作物蒸散发量的研究中，一些方法以参考作物腾发量为基础。其中，比较简单实用的方法是作物系数法，将参考作物腾发量直接乘以相关的影响因子或系数估算出作物腾发量。为了使估算蒸散发的方法具有普遍性，以作物生长机制为基础的作物生长模型于 20 世纪 60 年代被提出，目前各国学者根据研究问题的需要开发了不同模型。其基本思想是，先计算潜在蒸散发，再基于叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）划分植被和裸地之间的引入能量，然后计算潜在蒸腾和潜在蒸发。最后，土壤表面的实际水分损失率取决于上层土壤的含水量，土壤根系剖面的含水量影响作物实际蒸腾。

对于流域尺度的蒸散发模拟，通过分布式流域水文模型结合遥感和地理信息系统等技术手段，模拟出水循环的各要素过程，同时模拟出流域蒸散发量。在流域水文模型中，先计算潜在蒸散发，然后考虑土壤水分、植被叶面截雨、根系吸水等因素，估算出流域蒸散发量。由于在降水径流过程中，蒸散发不是影响径流量的决定因素，故水文模型对其估算的精度要求不高。因此，在估算区域蒸散发的研究中，水文模型应用较少（贾仰文等，2005）。

能量平衡原理是遥感技术应用的重要理论基础。随着遥感技术的发展和利用，利用遥感技术估算蒸散发已成为研究的热点和趋势。遥感技术不能直接测量蒸散发，但比起传统的气象学和水文学方法，遥感技术有两方面重要作用：①遥感技术提供了外推站点测量，即将经验公式应用到更大区域的方法，包括气象资料极其稀少的地区；②遥感资料可以用于计算能量和水分平衡中的变量，如温度等。因此，利用遥感方法计算区域尺度上的日蒸散发量能得到更准确的结果。陈云浩等 2002 年利用遥感资料求取地表特征参数，进而建立了裸露地表条件下的裸土蒸发和全植被覆盖条件下的植被蒸腾计算模型，并对我国北方地区的蒸散量进行了计算。郭晓寅等（2004）利用 NOAA AVHRR 资料，结合 Priestley-Taylor 公式，建立了蒸散发分布的遥感模型，对黑河流域的蒸散发进行了研究。乔平林等 2006 年建立了基于 MODIS 遥感数据的大区域蒸散发遥感反演模型，并应用到石羊河流域。