

不同尺度灌溉水 高效利用理论与技术

● 李远华 崔远来 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

不同尺度灌溉水 高效利用理论与技术

李远华 崔远来 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是作者等对所承担的多项有关不同尺度灌溉水高效利用理论与技术方面的国家自然科学基金等项目研究工作的总结,是国内外第一部论述不同尺度灌溉水高效利用理论与技术的专著。

针对不同尺度灌溉水高效利用理论与技术问题,本书作者于1998~2007年以位于长江流域的湖北省漳河灌区及位于黄河流域的河南省柳园口灌区为研究示范区,开展了大量野外田间试验、样本采集、实验室数据化验分析工作,进行了全面的室内数据分析、数值模拟研究以及理论分析和机理探讨,同时对主要研究成果进行大面积的推广应用,提出了不同尺度灌溉水高效利用的理论及其应用的综合技术。

本书分节水灌溉的尺度效应、节水灌溉条件下水肥耦合及综合调控、节水灌溉的社会经济影响分析3篇,共16章,主要内容包括:不同空间尺度及水文年度水分生产率等指标的变化规律及其提高的机理,不同尺度之间水分转换规律和节水灌溉的尺度效应,指导不同尺度、不同类型灌区节水灌溉的宏观决策理论与方法及其综合技术;不同灌溉条件下稻田氮肥运移及转化规律,水稻水肥耦合机理及高效利用水肥的综合调控模式;节水灌溉的投入产出分析,灌区农业政策对节水灌溉的影响分析,灌区塘堰在节水灌溉中的作用分析,引黄灌区地下水利用经济分析,大型灌区节水改造投资效益分析,灌区高效用水的综合策略。

本书可供从事或涉及节水灌溉、灌区水管理的科技人员、管理人员及大专院校师生参考应用。

图书在版编目(CIP)数据

不同尺度灌溉水高效利用理论与技术/李远华,崔远
来著. —北京:中国水利水电出版社,2009

ISBN 978-7-5084-6489-3

I. 不… II. ①李…②崔… III. 农田灌溉-节约用水-
研究 IV. S275

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第064725号

书 名	不同尺度灌溉水高效利用理论与技术
作 者	李远华 崔远来 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 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 22印张 522千字
版 次	2009年6月第1版 2009年6月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	58.00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

各章节编写人员名单

前 言	李远华	崔远来	
第 1 章	崔远来	李远华	洪 林
第 2 章	李远华	崔远来	董 斌
第 3 章	董 斌		
第 4 章	董 斌	崔远来	
第 5 章	董 斌	李远华	
第 6 章	崔远来	罗玉峰	蔡学良
第 7 章	崔远来	代俊峰	
第 8 章	吕国安	李远华	崔远来
第 9 章	吕国安	李远华	
第 10 章	崔远来	李亚龙	李远华
第 11 章	洪 林	李远华	
第 12 章	洪 林	李远华	
第 13 章	洪 林	李远华	
第 14 章	洪 林		
第 15 章	洪 林		
第 16 章	李远华	崔远来	

前言

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》将灌溉水利用系数达到50%作为“十一五”末经济社会发展的主要目标之一（“预期性”指标）。根据《全国节水灌溉规划》，以提高灌溉水利用效率和效益为中心的大、中型灌区续建配套与技术改造将是我国今后相当长时间的一项战略任务，节水灌溉发展将由小面积示范向大面积集中连片转变，从输水过程节水向灌溉用水全过程节水转变，从以工程措施为主向工程、管理及农艺等综合措施转变。

虽然小面积上节水灌溉技术成果很多，实践中也往往依据小面积上节水的效果来计算和评估灌区及流域尺度的节水潜力，同时依据这种节水潜力估算来制定水利、农业及国民经济发展规划。由于过去的研究大都侧重于田间尺度的节水，并且只是孤立地看待田间，没有考虑水具有可重复利用性以及重复利用过程中十分复杂的尺度效应，导致了节水效果评估及节水灌溉技术推广中存在诸多争论。比如田间尺度的节水灌溉技术推广到灌溉系统及灌区尺度上到底能否真正节水？潜力又有多大？能否依据田间尺度节水灌溉技术或小范围的节水灌溉试验成果来指导灌区节水改造措施？在推广田间节水灌溉技术时，什么是导致灌溉系统及灌区尺度水分生产率及水分利用率提高和达到整个系统真正节水的因素？

另外，单纯从水利的角度研究节水的成果较多，但节水灌溉条件下相应的农业耕作措施是否应当改变、如何改变等研究较少。对于水稻，采用节水灌溉意味着改变长期以来形成的水稻淹水的习惯。在水分条件改变后，又如何高效利用肥料，水和肥如何交互作用等有待探讨。

此外，对节水灌溉实施后农民的投入产出经济分析不够，往往一味地强调节水的好处。由于节水灌溉的实施，农民的耕作习惯在一定的程度上会改变，那么农民的纯收益是增加了还是减少了？这对农民接受节水灌溉的程度有很大影响。

以上内容对于节水灌溉的推广应用、评价节水潜力、开展大型灌区节水改造和制定节水灌溉发展策略及水资源利用策略具有重要的理论与实践价值。

为此,本书作者于1998~2007年以位于长江流域的湖北省漳河灌区及位于黄河流域的河南省柳园口灌区为研究示范区,针对节水灌溉的尺度效应、节水灌溉条件下水肥耦合及综合调控、节水灌溉的经济分析等与不同尺度条件下灌溉水高效利用有关的三方面内容,开展了大量野外田间试验、样本采集、实验室数据化验分析工作,进行了全面的室内数据分析、数值模拟研究以及理论分析和机理探讨,同时对主要研究成果进行大面积的推广应用。涉及的主要项目如下。

(1) 国家自然科学基金,第50109004号,水稻灌区节水灌溉技术的不同尺度影响,2002~2005年。

(2) 国家自然科学基金,第50579059号,水稻灌区节水灌溉对灌区尺度水平衡影响规律及其机理研究,2006~2008年。

(3) 澳大利亚国际农业研究基金,第LWR1/2000/30号,用更少的水生产更多的稻谷:提高水稻种植区水分利用效率综合技术,2001~2005年。

(4) 澳大利亚国际农业研究基金,第LWR1/98/66号,中国节水灌溉技术的影响,1998~1999年。

(5) 863计划,第2001AA242032-4号,现代灌溉条件下水肥耦合与高效利用技术(水稻部分),2001~2003年。

通过这些项目的研究和示范应用,系统地研究了不同空间尺度及水文年度水分生产率等指标的变化及其提高的机理,揭示了不同尺度之间水分转换规律和节水灌溉的尺度效应;基于节水灌溉的尺度效应和灌区水循环规律,提出了指导不同尺度、不同类型灌区节水灌溉的宏观决策理论与方法及其综合技术;综合考虑不同灌水方法与技术、不同肥料用量、不同施肥次数,研究提出了简便实用的水稻干湿交替节水灌溉技术与配套的施肥技术;同时考虑农民习惯和意愿、不同灌水技术的投入、体制与机制、节水灌溉的社会经济影响等因素,提出了灌区高效用水的综合策略。

相关研究成果除在多次国际、国内会议上进行交流外,还分别以论文及论著的形式在国内外多家主要刊物进行发表。有关理论、方法与指标在《灌溉试验规范》(SL 13—2004)、《全国节水灌溉规划》等规范、规划和研究生教材中采用。此外,主要成果在湖北、河南、山东、安徽的21个灌区进行推广应用,同时,在全国灌溉用水有效利用系数测算中得到应用,对全国其他大型灌区续建配套与节水改造起到重要指导作用。

本书有关项目在实施过程中,得到了国家自然科学基金委、科技部“863”项目办、澳大利亚国际农业研究中心、教育部科技发展中心等单位的

支助；项目区所在的湖北省水利厅、湖北省漳河工程管理局、河南省水利厅、河南省水利水电科学研究院、开封市水利局、开封市引黄灌溉管理处、河南省惠北灌溉试验站等单位的领导和科技人员对项目的完成给予了大力支持，在此一并表示衷心的感谢。此外，参加研究和管理工作的还有：武汉大学，黄汉生、余峰、邓莉、朱秀珍、刘小花、谢先红、熊佳、周玉桃、王建鹏、张新、时训柳、湛芸、赵得军、李明翌、牛起飞；华中农业大学，龙生荣、李顺江、刘晗、屈晓芳；湖北省漳河工程管理局，张笑天、赵金河、陈崇德、王建漳、陈祖梅、张士菊、郑权举；河南省水利水电科学研究院，张志川、杨宝中、梁志震；开封市引黄灌溉管理处，郭茂、王付瑞、马绍君、方兴华；河南省惠北灌溉试验站，冯跃华、高岩；开封市水文局，宋铁岭、荣晓明。

特别感谢茆智院士在有关项目实施及成果总结中给予的支持和帮助。

在本书的编写过程中，参考和引用了许多国内外文献，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

随着节水灌溉研究的深入以及节水灌溉推广面积的扩大，灌溉水高效利用的尺度问题无疑已成为当前研究的热点领域，但却刚刚起步，不仅缺乏生产需要的成果，也缺乏理论方面的分析与探讨。编写本书虽试图弥补这方面的不足，在理论与应用方面均有所贡献，但由于我们水平有限，开展此专项研究的时间不长，亦缺乏经验，很多问题属于探索性内容，定会存在不少错误或不当、不成熟之处，请有关专家多加批评指正。

作者

2008年12月

目 录

.....

前言

第 1 篇 节水灌溉的尺度效应

第 1 章 绪论.....	3
1.1 不同尺度灌溉水高效利用研究的意义.....	3
1.2 研究现状	4
1.3 本书主要内容	16
参考文献.....	17
第 2 章 节水灌溉、尺度效应与评价指标	24
2.1 节水——不同对象的不同内涵	24
2.2 尺度及尺度效应	25
2.3 灌溉水利用效率指标研究进展	29
2.4 IWMl 的水量平衡计算框架和相关评价指标	36
2.5 本章小结	40
参考文献.....	40
第 3 章 田间试验及数据获取	44
3.1 漳河灌区的特点	44
3.2 柳园口灌区的特点	45
3.3 田间试验与观测方法	47
第 4 章 漳河灌区水分生产率的时、空尺度变化规律	52
4.1 水分生产率随时间的变化规律	52
4.2 水分生产率随空间尺度的变化规律	62
4.3 水分生产率的影响因素及机理分析	71
4.4 本章小结	77
参考文献.....	78
第 5 章 柳园口灌区水分生产率的时、空尺度变化	80
5.1 水分生产率随时间的变化规律	80
5.2 水分生产率随空间尺度的变化规律	85
5.3 水分生产率的影响因素及机理分析	88
5.4 本章小结	90

参考文献	90
第 6 章 不同尺度灌区水管理模拟技术研究	91
6.1 引言	91
6.2 旱稻田间水量平衡的系统动力学模型	92
6.3 柳园口灌区灌溉水可持续管理的系统动力学模型	97
6.4 稻田回归水模拟的系统动力学模型	103
6.5 柳园口灌区地下水数值模拟和水资源可持续利用	114
6.6 本章小结	120
参考文献	121
第 7 章 基于分布式水文模型的灌区水管理技术研究	124
7.1 引言	124
7.2 灌溉水文学	125
7.3 灌区分布式水文模型的构建	128
7.4 灌区分布式水文模型的应用	138
7.5 本章小结	152
参考文献	153
 第 2 篇 节水灌溉条件下水肥耦合及综合调控技术研究	
第 8 章 漳河灌区水稻节水灌溉条件下水肥耦合及综合调控技术研究	157
8.1 引言	157
8.2 试验的设计与方法	158
8.3 土壤及土壤溶液有效氮的时空分布	162
8.4 不同水肥处理下稻田氮的挥发损失	168
8.5 不同水肥处理下水稻的生物学特性及产量效应	171
8.6 不同水肥处理下氮肥利用率和水分生产率的变化	174
8.7 本章小结	176
参考文献	178
第 9 章 柳园口灌区旱稻节水灌溉条件下水肥耦合及综合调控技术研究	180
9.1 引言	180
9.2 试验的设计与方法	181
9.3 不同处理对旱稻生长状况的影响	183
9.4 不同处理旱稻各器官的氮素累积量	193
9.5 不同处理旱稻产量与水分生产率	198
9.6 本章小结	202
参考文献	203
第 10 章 田间尺度水稻及旱稻生长数值模拟技术研究	205
10.1 引言	205

10.2	漳河灌区水稻生产模拟	206
10.3	柳园口灌区水稻生产模拟	216
10.4	柳园口灌区旱稻 HD502 生产模拟	219
10.5	柳园口灌区旱稻 HD297 生长模拟及氮肥管理研究	222
10.6	本章小结	227
	参考文献	228

第 3 篇 节水灌溉的社会经济影响

第 11 章	节水灌溉影响及潜力分析	233
11.1	引言	233
11.2	研究现状	233
11.3	调查试验基本情况	235
11.4	间歇式灌溉投入产出分析	238
11.5	间歇式灌溉效益评价	242
11.6	节水灌溉的社会影响	245
11.7	节水灌溉的环境影响	245
11.8	本章小结	247
	参考文献	247
第 12 章	农业政策对灌区节水的影响分析	250
12.1	农业费改税的基本情况	250
12.2	费改税的调查研究	252
12.3	费改税影响的经济分析	257
12.4	费改税的影响因素分析	261
12.5	本章小结	262
	参考文献	262
第 13 章	塘堰在节水灌溉中的作用分析	264
13.1	塘堰作用的调查	265
13.2	塘堰调查的结果分析	269
13.3	影响塘堰作用发挥的因素	272
13.4	塘堰灌溉作用的经济分析	274
13.5	存在的问题及改进措施	277
13.6	本章小结	278
	参考文献	279
第 14 章	引黄灌区地下水利用经济分析	280
14.1	引言	280
14.2	柳园口灌区地下水的利用状况	283
14.3	柳园口灌区地下水利用的经济分析	285

14.4 本章小结	293
参考文献	293
第 15 章 大型灌区节水改造投资效益分析	294
15.1 大型灌区节水改造基本情况	294
15.2 节水改造投资效益分析的理论基础	302
15.3 节水改造投资效益分析模型	312
15.4 典型灌区节水改造的投资效益分析	318
15.5 本章小结	325
参考文献	326
第 16 章 结语	327
16.1 主要结论	327
16.2 特点及创新成果	334
16.3 项目实施及应用效果	337

第 1 篇

第 1 章 绪 论

1.1 不同尺度灌溉水高效利用研究的意义

实践中,为追求灌溉水的高效利用,需要提出节水灌溉的评价指标,而这些指标往往是争论的焦点,即真实的节水量不能被公认。事实上,节水灌溉是相对的概念。不同的水源条件、不同的自然条件和社会经济发展水平,对节水灌溉有不同的要求;不同国家、不同地区、不同历史发展阶段、节水标准也不同。另一方面,农业节水也有空间上的相对性。农田的渗漏量可能有部分水量直接被相邻田块的作物利用;渠道的渗漏水量有一部分可能通过地表或地下进入渠道或田间被作物直接利用。显然,对于不同尺度而言,水量损失或水的利用率是相对的,分析计算方法也不同。

不同的对象和主体对节水的要求也不同。对于农民,只要能减少水费支出或抽水费用即为节水;对于灌区管理部门,一定的水量产生最大经济效益即为节水;对于整个社会,节水的目标是以水资源的可持续利用支撑经济社会的可持续发展。由于不同主体所处的角度不同、所关心的尺度不同,节水的动力、途径和手段也不同。因此,在采用节水灌溉技术和制定节水灌溉发展策略时,必须考虑节水灌溉的相对性和尺度效应。

在灌溉过程中,输水、配水和灌水的每一个环节都会存在水量损失。对于田间尺度,农田的渗漏量、地表排水和径流为损失水量,但其中可能有部分水量直接被相邻田块的作物利用,尺度放大后,这部分水量则不被计入损失量。对于一个灌区,从灌溉水利用系数的概念出发,各级渠道的渗漏、灌溉所产生的地面径流和深层渗漏等均为损失水量,但若有一部分渗漏水或地面径流通过地表或地下进入渠道或田间,这部分水量不算损失;此外,灌区的排水、灌溉渠道泄(弃)水,若部分或全部被其他灌区利用,尺度放大后,这部分水量也不算损失。由于回归水的相当部分可以在其他尺度被直接重新利用(无需二次耗能),使得灌溉系统及流域尺度的节水量并不会是田间尺度节水量的简单累加,于是就产生了水分利用的尺度效应。正是由于水在不同尺度上的重复利用性,产生了节水的尺度问题。在不同的尺度,水量平衡各要素之间又相互影响和制约,所以产生实际节水的潜力是不一样的。如果以田间尺度的结果经简单的倍比放大来评估更大尺度的节水潜力,将得出错误的结论。

目前常用的评价灌溉管理水平和节水效果的指标,如渠系水利用系数、田间水利用系数、灌溉水利用系数、渠道防渗率等有一定的局限性。因为灌溉水利用系数特指一个灌区实际灌入田间可被作物利用的有效水量与渠首引入的总水量的比值。区间没有水量“进”或“出”,且与作物对水分的利用无关、与作物产出无关。在追求提高灌溉水利用系数时,各灌区只能将渠道防渗作为节水的最主要措施,甚至是唯一措施。因此,必须寻求合理的适合不同尺度节水效果的评价指标。

为了使农田尺度上水分生产率的提高与灌溉系统及流域尺度上水分生产率的提高相一致、局部水分生产率提高与全局水分生产率提高相一致，应分别从田间、灌溉系统、灌区及流域等多个不同的尺度上，研究水分生产率提高的机理，评估不同尺度节水的效果及其相互影响和内在联系，从而减少非生产性消耗或不可重复利用水量。

另外，单纯从水利的角度研究节水的成果较多，但节水灌溉条件下相应的农业耕作措施是否应当改变、如何改变等研究较少。水和肥是作物高产中两大重要因素，田间水分（土壤水分）影响土壤养分的溶解、转化和移动，以及作物吸收利用养分的能力。在一定范围内，肥料效应随田间水分（土壤含水量）的增加而提高，同时合理施肥又可提高水分的利用效率，作物生产中水与氮存在明显交互作用。因此应分别从田间灌水方式、施肥模式两个方面，研究节水灌溉条件下水分生产率、肥料养分利用率变化的机理，以及田间水分状况改变后水肥之间的相互作用、内在联系及其对产量的影响。对于水稻，采用节水灌溉意味着改变长期以来形成的水稻淹水的习惯，田间水分发生了质的变化。在水分条件改变后，又如何高效利用肥料、水和肥如何交互作用等有待探讨。

此外，实施节水灌溉不能影响农民收入，否则，没有生命力。目前对节水灌溉实施后农民的投入产出经济分析不够，往往一味地强调节水的好处。由于节水灌溉的实施，农民的耕作习惯在一定的程度上会改变，那么农民的纯收益是增加了还是减少了？这对农民接受节水灌溉的程度有很大影响。

当前，我国正致力于两型社会和社会主义新农村建设。其中一项重要的任务就是和谐灌区建设。一个和谐的灌区应该实现：水土资源供需平衡，灌区水利基础建筑物和渠系运行良好，管理体制合乎时代要求，运行机制满足社会主义市场经济要求，有很强的自我运行能力；灌区农民生活富足，社会安定，生态环境适合人民生活 and 动植物生长；灌区内水利利用效率相对较高，节水灌溉技术得到普遍采用，并发挥巨大作用；灌区内的资源、环境、经济和谐发展。大型灌区续建配套与节水改造投资效益分析在有力的推动工程顺利进行的同时，也在努力地构建一个和谐的灌区。只有这样，才能保证我国的粮食安全和人民的安居乐业，才会促进我国在和平崛起的道路上稳步向前。

以上内容对于节水灌溉的推广应用、评价节水潜力、开展大型灌区节水改造和制定节水灌溉发展策略及水资源利用策略具有重要的理论与实践价值，故开展研究。

1.2 研究现状

1.2.1 节水灌溉的尺度效应及评价指标

目前，田间尺度的节水灌溉技术已有很多研究成果，且有大面积推广应用的报告。但他们对灌溉系统及灌区尺度水分生产率及水分利用率的影响却很少有定量研究。一般而言，这依赖于渗漏和排水的重复利用情况，例如提高水的重复利用率将提高灌区（流域）尺度水的整体使用效率。但是，目前国内外对灌区的量水，主要集中在各级进水闸，很少量测灌溉退水量及其过程。由于没有准确的水量平衡计量，就无法评估渗漏及排水等带来的所谓“损失”及灌溉系统和灌区尺度上的水分生产率等状况。Willardson（1994）注意到在不考虑水质时，田间尺度的效率对流域水文过程无影响，并指出提高田间和灌溉系统效率对流域尺度的影响可能是正的也可能是负的。Keller等（1996）指出，如果渗漏或排

水被下游重新利用的话,在上游的农田减少渗漏损失将不会导致整个系统水分利用率提高。如果一个灌溉系统的出流是下游一个或多个系统的水源的话,上游节水导致水分利用率的提高可能对下游造成更大的损失,从而整个系统将出现节水的负效应。同样的,如果供给城镇生活用水及下游灌区用水的地下含水层的补给源来自灌溉系统的渗漏,采用节水灌溉技术减少渗漏损失将使地下水补给减少,破坏地下水的供需平衡,最终导致地下水位下降甚至无水可取。许多学者(如 Seckler, 1996; Keller 等, 1996; Barker 等, 1999; 沈振荣等, 2000)都指出只有节约无效流失量(主要指流入海洋、沼泽、咸水体或其他无效流失区域的水量)及净耗水量才属于真正的节水量。而节约的可被下游重新利用的可回收水量对上游田块可能认为是损失(节水),但对整个系统则不是真正意义上的节水量。Guerra 等(1998)则认为虽然不会损失总水量,但人们在特定目的上失去了对水的控制,并且在下游对水的重新利用需要附加的投入,因而上游节水至少是一种节能措施。

长期以来,人们用灌溉效率、灌溉水利用系数、渠系水利用系数、田间水利用系数等来评价节水的效果。这些指标用来指导灌溉工程设计及评价工程管理是合适的,但用来评价节水效果及调配水决策将产生严重的错误。因为传统的灌溉效率指标忽视了水的重复利用,因而基于它们试图提高水的使用效率的决策往往不能得到真实的节水。

比如我国一般地面灌溉系统的灌溉水利用系数平均为 46%,而喷、微灌的灌溉水利用系数却可达 70%~90%。由此推断从地面自流灌溉转换到喷微灌可节约大量的灌溉用水并可转为其他用途,这种推断并不一定正确。答案取决于对研究区域尺度出流的有益使用为正数(有水的重复利用)或是负数(无水的重复利用)。比如在“一个农户的排水是另一个农户的供水”系统中,如果上游农户过度强调有效用水进而减少排水,依赖于其排水而灌溉的下游农户将遭受缺水。这样势必要为下游农户建立另一单独供水系统,提高灌溉成本,同时也没有提高整个系统的整体效率。另外一个重要的出流的有益使用为负的情形是供水的出流被用于补给地下水。比如在我国黄河中下游的渠井结合引黄灌区,井灌区有一半的地下水源是由渠灌区灌溉退水或渗漏补给的,另一半由降雨补给。因此,如果渠灌区灌溉系统效率提高,补给将减少,引起地下水位下降,甚至无水可采而使井灌区废弃。

沈荣开等(2001)研究表明,内蒙古河套灌区干渠、支渠、斗渠、农渠渠道全部防渗后,渠系水利用系数可由 0.42 提高到 0.70,灌溉水利用系数由 0.35 提高到 0.60,但去掉渠水蒸发、尾水排泄、渠旁侧渗潜水蒸发后,补给地下水量甚微;而在局部实行衬砌后,地下水的重复利用率可增加 26.4%,灌溉水有效利用率提高到 72.4%,灌溉水有效利用率比全面推行渠道衬砌后提高 12.4%。Molden 等(1999)在埃及某灌区多年调查与试验发现田间灌溉效率只有 40%~50%,但是由于水在系统内部的重复利用使得整个系统的灌溉效率接近 80%,并且剩余的 20%的水在各用水部门内也得到了有效的利用。湖北省漳河灌区平均灌溉水利用系数只有 0.43,从传统的观点看 57%的灌溉水损失了,然而实际上在水稻灌溉季节只有 12%的降雨和灌水形成径流流出灌区(李远华等, 2005)。因此,在灌区尺度上通过减少出流能够达到的最大节水潜力为 12%。分析表明,上述 57%的损失量中的大部分被小尺度的塘、水库和排水沟收集并且再利用。

由此可见,节水灌溉存在尺度效应,即节水灌溉措施在各个尺度上的节水效果存在差

异, 以及一种尺度上的节水效果对其他尺度节水效果的影响是不同的(董斌等, 2005; 崔远来等, 2007)。由于回归水的相当部分可以在其他尺度被重新利用, 使得灌溉系统及流域尺度的节水量并不会是田间尺度节水量的简单累加, 同时由于回归水在不同的尺度上所包括的内容及其值不同, 存在某种复杂的转化关系, 由此产生了尺度效应。

早在 1977 年 Jensen 等就注意到传统灌溉效率指标在水管理方面使用的局限性, 并建议采用考虑水的重复利用的净灌溉效率指标。1995 年 Keller 等推导了一个称为有效效率的指标, 并认为它可用于任何尺度而不会导致概念错误。Willardson 等(1994)则建议放弃灌溉效率而采用“比例”的概念, 如消耗性使用比例、可重复利用比例、不可重复利用比例等。Molden(1996)在其提出的框架中采用水分生产率、总消耗比例及生产性消耗比例指标; Perry(2007)建议采用水的消耗量、取用量、储存变化量以及消耗与非消耗比例为评价指标, 并认为可保持与水资源管理的一致性。水分生产率指标用简单和易于理解的方式表达了水的产出效率, 被广泛用于水管理评估。由于水分生产率的数据来自水平衡分析的各要素, 数据量大, 并且有些要素测定较为复杂, 限制了它在大尺度及长时段的应用。另外, 水分生产率的提高可能来自其他因素提高了单位面积的产量, 因此单独使用水分生产率来评估节水效果也不一定合适。Guerra(1998)等认为应联合使用水分生产率及水分利用率来评估水管理策略和措施。

与此同时, 国内一些学者已经开始认识到灌溉水利用系数内涵的局限, 提出了一些考虑回归水利用的指标。蔡守华等(2004)综合分析了现有指标体系的缺陷, 建议用“效率”来代替“系数”, 并在渠道水利用效率、渠系水利用效率、田间水利用效率之外增加了一个作物水利用效率。陈伟等(2005)认识到用现有灌溉水利用系数等指标计算节水量的局限性, 指出计算灌溉节水量时应扣除区域内损失后可重复利用水量, 并提出了考虑回归水重复利用的节水灌溉水资源利用系数的概念。但并没有明确计算中涉及的参数如渠系渗漏转化率为地下水百分比、地下水开发利用率、扣除蒸发损失的系数等如何确定。

就灌区节水效果评价的数学手段及模型方面, Molden 等(1997, 1999)提出了一个基于水量平衡的分析框架, 希望用包括所有水量平衡要素的分析方法来推导不同尺度的真实节水量。Molden 等(2001)在印度等国的灌区使用该方法, 得到的主要结论是随着尺度增大水分生产率指标提高。但他们以收集他人资料为主, 并没有进行具体的田间试验。另外, 他们研究的对象基本为平原灌区。我国南方水稻灌区的基本特点是: 灌区内各种大中小型蓄水设施彼此连接, 形成长藤结瓜灌溉系统, 水资源的重复利用十分重要又极其复杂。在不同尺度水量平衡要素的获取方法, 水量转换的规律, 水分利用效率变化规律等方面的研究都具有挑战意义。

由于大尺度、长时间获取有关水平衡要素的困难性, 近年来数值模拟技术被应用于各种条件下不同尺度水量平衡要素的模拟以及作物产量的模拟, 进行灌溉水利用效率指标的计算和用水管理策略的分析评价。在田间尺度模型方面, ORYZA 2000(Bouman 等, 2001)可用来模拟水稻在不同灌溉及施肥措施下的田间水分、养分运移及生长过程和产量。但该模型在水氮联合限制条件下对水稻生长模拟的适应性还有待检验。SWAP(Dam 等, 1997)则被广泛应用于旱作水分运移及产量的模拟。

分布式流域水文模型近年来得到了广泛的应用, 其中有代表性的模型有 SWAT。由