



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

灌区尺度潜水蒸发 有效性调控

Regulating the Effectiveness of Phreatic Evaporation at the Irrigation Area Scale

罗玉峰◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

灌区尺度潜水蒸发 有效性调控

Regulating the Effectiveness of Phreatic Evaporation at the Irrigation Area Scale

罗玉峰◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书针对我国北方潜水蒸发引起的大量水量损失,同时又存在严重的干旱缺水问题,以降低潜水蒸发损失为目标,开展灌区尺度的潜水蒸发有效性调控机理研究。本书主要内容包括:多种因素共同作用条件下的区域潜水蒸发计算方法、潜水蒸发的空间变异规律、潜水蒸发有效性评价及灌区尺度的潜水蒸发高效利用调控模式。

本书可供水利、农业、环境等领域从事节水农业、灌区管理及水资源管理研究的科技人员、教师参考,也可作为相关专业研究生与本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

灌区尺度潜水蒸发有效性调控/罗玉峰著. —南京:
河海大学出版社,2012. 11

ISBN 978-7-5630-3202-0

I. ①灌… II. ①罗… III. ①灌区—潜水蒸发—调控
IV. ①S274. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 268979 号

书 名 / 灌区尺度潜水蒸发有效性调控

书 号 / ISBN 978-7-5630-3202-0/S·71

责任编辑 / 代江滨 张 砾

封面设计 / 黄 煜

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

网 址 / <http://www.hhup.com>

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 / 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 / 南京溧水秦源印务有限公司

开 本 / 720×1000 1/16

印 张 / 10.25

字 数 / 200 千字

版 次 / 2012 年 11 月第 1 版

印 次 / 2012 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 28.00 元

前言

粮食安全始终是关系我国国民经济发展、社会稳定和国家自立的全局性重大战略问题。保障我国粮食安全,对实现全面建设小康社会的目标、构建和谐社会和推进新农村建设均具有十分重要的意义。我国水资源短缺问题日益严重,旱涝灾害特别是极端水灾害事件呈加重趋势,给农业生产带来诸多不利影响,农业水危机对我国中长期粮食安全战略构成极大威胁。为保证我国粮食安全,《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020年)》提出,必须大力加强农业基础设施特别是农田水利设施建设,稳步提高耕地基础地力和产出能力。灌区水循环过程研究可为农田水利工程规划、设计与灌区水资源管理提供科学依据。

001

潜水蒸发是水循环过程的一个重要环节。潜水蒸发可以为作物或生态植被提供水分,但也会引起大量的水分损失。海河流域东部平原的无效潜水蒸发达 80 亿 m^3/a ,约为该地区水资源总量的 1/5。如果能有效利用这部分潜水,华北地区的水资源供需状况将大为改善。在黄河下游的柳园口灌区,由于潜水蒸发引起的水量损失约为 0.35 亿 m^3/a ,为引黄水量的 44%。河套灌区义长灌域多年平均潜水蒸发量达 355.5 万 m^3 ,其中至少有 36.6%不能被作物利用。另外,宁夏引黄灌区也有农田地下水位过高和潜水蒸发严重的问题;新疆的焉耆盆地地下水排泄量中,潜水蒸发占 50%以上,其中不可避免地具有水量损失。在农业用水日益紧缺的形势下,减少潜水蒸发损失,提高灌区潜水蒸发有效性是一个迫切需要研究的问题。

本书针对潜水蒸发的有效性问题,从潜水蒸发的空间变异性入手,从灌区角度研究作物分布调整和地表水-地下水联合应用方案调整对潜水蒸发有效性的影响机理,提出潜水蒸发有效性调控模式。研究成果将小尺度的潜水蒸发规律及调控研究提升到灌区尺度,为灌区尺度的潜水蒸发有效性调控提供理论基础;同时调控模式的应用也有利于减少潜水蒸发无效损失,进一步挖掘农业节水潜力,为灌区的地下水资源高效利用和农业节水提供了新的途径。

本书系统总结了国家自然科学基金项目“灌区尺度潜水蒸发有效性调控机理研究(50809021)”和河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室自主研究项目“潜水蒸发对区域水分生产率的影响及评价系统开发(2010585412)”的

相关研究成果,包括多种因素共同作用条件下的区域潜水蒸发计算方法、潜水蒸发的空间变异规律、潜水蒸发有效性评价及灌区尺度的潜水蒸发高效利用调控模式等内容,展示了灌区尺度潜水蒸发有效性调控领域最新的研究成果。

全书共分八章:第一章介绍研究背景与意义,并系统总结了相关的研究进展;第二章简要介绍了研究区——河南省柳园口灌区的基本情况;第三章分析气象、土壤、地下水埋深、作物以及降雨对潜水蒸发的影响规律,提出了考虑作物影响的改进阿维里扬诺夫公式;第四章分析与灌区潜水蒸发密切相关的灌区地下水埋深时空变化规律以及土地利用变化过程;第五章提出了基于 GIS 的区域潜水蒸发计算方法,并分析潜水蒸发时空变化规律以及对灌区水分生产率的影响;第六章提出了灌区潜水蒸发有效性评价方法,分析无效潜水蒸发对灌区水分生产率的影响;第七章通过模型模拟得到了提高区域潜水蒸发有效性的调控模式;第八章对本书进行总结,并对后续的研究进行了展望。

研究工作得到河南省豫东水利工程管理局惠北水利科学试验站、河南省开封水文水资源勘测局等单位的领导和科技人员的大力支持。惠北水利科学试验站站长冯跃华、开封水文水资源勘测局总工程师荣晓明为本书的研究工作提供了大量基础数据。我在武汉大学攻读硕士、博士学位的导师崔远来教授把我领进了学术研究的殿堂,并给予我极大的信任、鼓励和耐心的指导。河海大学彭世彰教授及其领导的节水灌溉与水资源高效利用研究团队对我的研究工作也给予了各方面的支持,团队的支持是完成本项研究的重要保证。联合国教科文组织水与可持续发展计划部主任、澳大利亚联邦科学与工业研究组织水土研究所(CSIRO Land and Water)教授 Shahbaz Khan 博士多次邀请并资助我前往澳大利亚参与项目合作研究,这对提高本书的研究水平具有重要作用。研究生韩冰、毛怡雷、李思、姜云鹭承担了大量繁琐的数据处理任务,开展了富有创新性的研究工作;郑强同学编写了基于 GIS 的区域潜水蒸发计算程序。正是大家的共同努力才取得了本书的成果。

本书参考和引用了大量国内外专家学者的有关研究成果,作者从中获得了很大的教益和启迪,在此一并表示衷心的感谢!本书的出版得到了河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室的资助,在此表示衷心的感谢!

由于研究水平有限,书中尚存不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012年8月于南京

目 录

第一章 绪论	001
1.1 背景与意义	001
1.2 潜水蒸发的基本概念	002
1.3 点尺度潜水蒸发研究方法	002
1.3.1 试验观测方法	002
1.3.2 机理分析方法	003
1.3.3 数值模拟方法	003
1.4 点尺度潜水蒸发估算方法	003
1.5 灌区尺度潜水蒸发现规律	005
1.6 潜水蒸发的有效性	006
1.7 灌区尺度的潜水蒸发有效性调控	007
1.8 有待研究的问题和本书主要内容	007
第二章 研究区简介	009
2.1 地理位置	009
2.2 气候	010
2.3 水文地质	011
2.4 灌区发展过程	013
2.5 作物种植结构	014
第三章 潜水蒸发影响因素分析及考虑作物影响的改进阿维里扬诺夫公式	016
3.1 试验与数据	016
3.2 潜水蒸发的影响因素分析	017
3.2.1 气象因素对潜水蒸发的影响	017
3.2.2 土壤因素对潜水蒸发的影响	018
3.2.3 地下水埋深对潜水蒸发的影响	018
3.2.4 降雨量对潜水蒸发的影响	019
3.2.5 作物生长对潜水蒸发的影响	020

3.2.5.1	相同埋深条件下作物对潜水蒸发的影响	020
3.2.5.2	相同土壤条件下作物对极限埋深的影响	021
3.2.5.3	作物不同生育阶段潜水蒸发量随埋深变化	022
3.3	考虑作物生长影响的改进阿维里扬诺夫公式	023
3.3.1	阿维里扬诺夫公式改进	023
3.3.2	改进公式的精度评价	025
3.4	本章小结	029

第四章 柳园口灌区地下水埋深时空变化及土地利用变化分析 030

4.1	区域地下水埋深空间插值方法比较	030
4.1.1	区域地下水埋深空间插值方法	031
4.1.2	交叉验证法	034
4.1.3	基于 ArcGIS 空间插值	035
4.1.4	地下水位观测数据	041
4.1.5	地下水埋深直接插值结果与分析	041
4.1.6	地下水埋深间接插值结果与分析	047
4.1.7	柳园口灌区地下水埋深空间插值方法选择	054
4.2	柳园口灌区地下水埋深时空变化	054
4.2.1	地下水埋深长期变化趋势分析	057
4.2.2	地下水埋深 30 年不同时段的变化过程	061
4.2.3	地下水埋深的空间分布	066
4.2.4	地下水埋深季节变化	068
4.2.5	地下水埋深随时间变化	070
4.3	柳园口灌区土地利用变化	074
4.3.1	Landsat TM/ETM+ 数据及其它辅助数据	074
4.3.2	遥感土地利用/覆被解译	075
4.3.3	水田、旱地相互转化关系及驱动力分析	078
4.4	本章小结	079

第五章 基于 GIS 的区域潜水蒸发计算及时空变化规律分析 080

5.1	区域潜水蒸发量计算方法	080
5.1.1	基本原理	080
5.1.2	基于 VBA 的 Arcobjects 编程计算区域潜水蒸发	081
5.2	基本数据	082
5.2.1	各种条件下潜水蒸发公式参数	082

5.2.2 地下水埋深图	083
5.2.3 土地利用图	083
5.2.4 土壤类型图	083
5.3 计算结果精度评价	084
5.4 灌区潜水蒸发长期变化趋势	085
5.5 灌区潜水蒸发季节变化规律	085
5.6 潜水蒸发空间分布规律	089
5.6.1 潜水蒸发总体空间分布特征	089
5.6.2 潜水蒸发空间分布的年内变化规律	090
5.6.3 潜水蒸发年代际空间变化规律	092
第六章 灌区潜水蒸发的有效性评价及对区域水分生产率的影响	097
6.1 潜水蒸发有效性评价方法	097
6.2 柳园口灌区潜水蒸发有效性变化	099
6.2.1 年际间有效/无效潜水蒸发变化	099
6.2.2 年内有效/无效潜水蒸发变化	100
6.2.3 有效/无效潜水蒸发的空间分布	101
6.3 潜水蒸发有效性对区域水分生产率的影响	103
6.3.1 农业灌溉随时间的变化	103
6.3.2 种植结构及产量变化	105
6.3.3 潜水蒸发有效性对灌区尺度水分生产率的影响	106
第七章 灌区潜水蒸发调控模式	110
7.1 概述	110
7.2 灌区分布式地下水模型	110
7.2.1 模型构建	110
7.2.2 模型验证	113
7.3 潜水蒸发有效性调控方案	120
7.3.1 潜水蒸发有效性调控措施	120
7.3.2 灌区潜水蒸发有效性调控方案	122
7.4 基于地下水模型的潜水蒸发有效性调控情景分析	123
7.5 本章小结	124
第八章 结语	126
8.1 主要结论	126

8.2 特点与创新成果	127
8.3 展望	127
参考文献.....	129
附录 1 基于 VBA 的 Arcobjects 编程估算区域潜水蒸发量操作过程图	137
附录 2 基于 VBA 的 Arcobjects 编程估算区域潜水蒸发量程序代码	145

第一章 绪 论

001

1.1 背景与意义

潜水蒸发可以为作物或生态植被提供水分,但同时也会引起大量的水分损失。海河流域东部平原的无效潜水蒸发达 80 亿 m^3/a ,约为该地区水资源总量的 1/5。如果能有效利用这部分潜水,华北地区的水资源供需状况将大为改善(贾绍凤和张士锋,2003)。在黄河下游的柳园口灌区,由于潜水蒸发引起的水量损失约为 0.35 亿 m^3/a ,为引黄水量的 44%(罗玉峰,2006)。河套灌区义长灌域多年平均潜水蒸发量达 355.5 万 m^3 ,至少有 36.6%不能被作物利用(岳卫峰等,2004)。在西北地区,灌区由于田间和渠道渗漏,相当一部分补充了地下水,所以这些灌区的地下水很丰富,且埋深浅,开采容易。黄河流域的湟水盆地、渭河盆地、银川平原、河套平原都有丰富的地下水贮存,且 80%以上为淡水。目前,这些地下水尚未得到有效的开发利用,大部分都以潜水蒸发的形式损失掉了。宁夏和内蒙古引黄灌区的地下水分别有 73.4%和 99%的水量是通过潜水蒸发损失的。新疆全区地下水埋深小于 2 m 的面积有 3.9 万 km^2 ,年潜水蒸发量达 269 亿 m^3 ,占地下水补给总量的 68%。仅银川平原就可开采地下水 10.4 亿 m^3 ,可减少引黄河水量 6.2 亿 m^3 。内蒙古沿黄地带平原引水灌区可利用的地下水约有 20 亿~22 亿 m^3 (已考虑渠道防渗后灌溉水对地下水补给的减少),可相应减少引黄河水量 20 亿 m^3 左右,能基本满足晋陕蒙接壤地区黄河沿岸 21 世纪初能源基地的建设用水要求。新疆的山前平原地下水不仅贮量丰富,且水质好,易开采,单井出水量一般在 50 L/s 以上,最高的可达 130 L/s。新疆的平均单井效益也是全国最高的。所以,灌区地下水的开采潜力很大,利用地下水不仅可以少用河水,而且还可解决季节性缺水的困难(姚建华等,2000)。近年来,潜水蒸发引起的水量损失问题越来越多地受到重视,如宁夏引黄灌区也有农田地下水位过高和潜水蒸发严重的问题(秦大庸等,2004);新疆的焉耆盆地地下水排泄量中,潜水蒸发占 50%以上(靳孟贵等,2002; Brunner, 2005),其中不可避免地具有水量损失;Foster (2006)发现在也门的 Sana'a 流域存在大量无效潜水蒸发。在农业用水日益紧缺的形势下,减少潜水蒸发损失,提高灌区潜水蒸发有效性是一个迫切需要研究的问题。

因此,本书针对潜水蒸发的有效性问题,从潜水蒸发的空间变异性入手,从灌

区角度研究作物分布调整和地表水-地下水联合应用方案调整对潜水蒸发有效性的影响机理,提出潜水蒸发有效性调控模式。研究成果将小尺度的潜水蒸发规律及调控研究提升到灌区尺度,为灌区尺度的潜水蒸发有效性调控提供了理论基础;同时调控模式的应用也有利于减少潜水蒸发无效损失,进一步挖掘农业节水潜力,为灌区的地下水资源高效利用和农业节水提供了新的途径。

1.2 潜水蒸发的基本概念

潜水蒸发是在热力作用下,水分从潜水面上升到土壤表面进入大气的过程,也可描述为潜水向包气带输送水分,并通过土壤蒸发或(和)植物蒸腾进入大气的过程。英文文献中多用毛管上升(Capillary rise)水来描述地下水对土壤水的补给。尚松浩和毛晓敏(2010)认为,由于土壤水、地下水处于动态变化之中,土壤水与地下水的交换是双向的,即土壤水向下补给地下水和地下水向上补给土壤水交替出现。因此潜水蒸发并不是地下水的蒸发(液态变为气态),而是土壤水与地下水之间交换量的一部分。但潜水蒸发这一术语在国内使用已比较普遍,使用时需要将其理解为地下水对土壤水的补给。引起地下水向上补给的原因可能是土壤蒸发、植物蒸腾,也可能是土壤冻结、温度梯度等因素。

在潜水埋藏较浅的地区,潜水蒸发量很大,在地下水平衡中是主要支出项。潜水蒸发量与大气蒸发强度、地下水埋深、土壤质地和气候条件等有密切关系。蒸发强度主要决定于水分蒸发能力,潜水埋藏深度决定水分输送到地面的距离,土壤质地决定毛细管上升高度,即水分输送的高度。当地下水位埋藏达到一定深度时,潜水蒸发量将减少到很小或接近于零,该深度称为潜水蒸发极限埋深。根据观测资料,从砂砾到亚粘土的潜水蒸发极限埋深为2~5 m。

1.3 点尺度潜水蒸发研究方法

尚松浩和毛晓敏(2010)对点尺度潜水蒸发研究方法进行了系统的总结,这里作一简要介绍。

1.3.1 试验观测方法

试验观测法是潜水蒸发研究的基本方法,利用蒸渗仪可以测定不同土壤、不同地下水埋深、不同作物在不同时期的潜水蒸发强度。国内在不同地区先后建成了一系列地下水均衡场,对潜水蒸发进行试验观测,如位于湿润、半湿润地区的山东禹城、河北石家庄、河南商丘、江苏汉王、河南惠北等地下水均衡场,位于干旱地区的新疆昌吉、三工河、乌拉泊、吐鲁番、叶尔羌河等地下水均衡场。目前的试验观测

多是针对裸地条件进行的。根据试验观测结果,分析潜水蒸发的主要影响因素及规律,进一步建立潜水蒸发与其主要影响因素间的经验关系,这一研究在盐渍化防治、地下水资源评价、干旱区生态需水分析中得到了广泛应用。此外,利用长期地下水动态观测资料也可以对潜水蒸发规律进行分析。

1.3.2 机理分析方法

由于潜水蒸发涉及地下水向土壤水的补给、土壤水运动、根系吸水及土壤蒸发等诸多过程,可以通过土壤水动力学理论对潜水蒸发过程进行理论分析。但由于土壤水运动过程的复杂性,理论分析一般是针对稳定蒸发条件进行的,如 Gardner (1958)对均质土壤稳定蒸发条件下潜水蒸发规律的分析,Willis(1960)对层状土壤稳定蒸发条件下潜水蒸发规律的分析,程先军(1993)对作物生长条件下稳定潜水蒸发规律的分析。Raes 等(1982)提出了作物生长条件下稳定潜水蒸发的计算模式。由于这些理论分析多是在地下水位恒定、稳定蒸发条件下进行的,而在实际气象条件下很难发生稳定蒸发,因此理论分析的结果与实际情况不一定完全相符。

1.3.3 数值模拟方法

由于土壤水分运动过程的复杂性,数值模拟是研究不同条件下土壤水分运动规律的主要手段(毛晓敏等,1998),目前已应用于潜水蒸发规律的模拟分析中。这类方法将潜水蒸发作为地下水-土壤-植物-大气连续体(GSPAC)水分运动的一个环节,通过不同条件下的 GSPAC 水分运动模型来模拟分析相应的潜水蒸发过程及规律,如裸地潜水蒸发模拟分析(岳卫峰,2004)、土壤冻结过程中潜水蒸发模拟分析(Tyler 等,1997)、农田潜水蒸发模拟分析(Foster 等,2006;秦大庸等,2004;史文娟等,2007)。数值模拟方法不局限于稳定蒸发状况,可以对不同条件下的潜水蒸发过程和规律进行深入分析。

以上 3 种方法中,试验观测方法是基本方法,根据试验观测结果可以建立估算不同土质潜水蒸发的各种经验公式,但试验结果应用于实际情况下复杂的土质结构、植物、降水入渗等条件时还存在一定的困难。机理分析方法以土壤水动力学理论为基础,主要针对恒定地下水位下的稳定蒸发进行分析,与实际情况存在一定差别。数值模拟方法将潜水蒸发作为 GSPAC 水分运动的一个环节来考虑,能够模拟不同外界条件下的潜水蒸发和土壤水分运动过程,但模拟一般需要较多的输入和参数,限制了该方法的普遍应用。

1.4 点尺度潜水蒸发估算方法

在试验观测及机理分析的基础上,前人提出了不同类型的潜水蒸发估算公式,

这些公式反映了潜水蒸发与其主要影响因素(如大气蒸发能力、地下水埋深等)的关系,大致可以分为经验公式、半经验-半机理公式、机理公式等3类。此外,利用数值模拟方法也可以对潜水蒸发规律进行模拟分析。

裸土的潜水蒸发估算方法是最基本的,有植被情况下的潜水蒸发估算方法一般是在此基础上发展的,这里简单介绍估算裸土潜水蒸发经验公式。根据裸土潜水蒸发试验结果可以分析一定时段内裸土潜水蒸发强度与其主要影响因素的关系,进而用合适的经验公式拟合试验数据,用于不同条件下潜水蒸发量的估算。经验公式中的自变量一般为大气蒸发强度(以水面蒸发强度 E_0 表征)、地下水埋深 h ,其他因素的作用则用经验参数来描述。比较常见的有阿维里扬诺夫公式(也称为柯夫达公式)、线性公式、幂函数公式、对数公式、指数公式、反 Logistic 公式,等等。

阿维里扬诺夫公式

$$E = E_0 \cdot \left(1 - \frac{h}{h_0}\right)^n \quad (1.1)$$

式中 n 为经验常数(取决于土质等因素); h_0 为潜水极限蒸发深度(Extinction depth)。根据式(1.1),潜水埋深为零时潜水蒸发强度为水面蒸发强度,与实际情况不完全一致,可以在公式中增加系数来改进。

线性公式则认为存在一个潜水蒸发面(ET surface)的深度 h_1 ,当 $h < h_1$ 时,潜水蒸发强度为水面蒸发强度。当 $h_1 \leq h \leq h_0$ 时,潜水蒸发强度随埋深增加而线性增加,即

$$E = E_0 \cdot \frac{h - h_1}{h_0 - h_1} \quad (1.2)$$

幂函数公式为

$$E = a \cdot E_0 \cdot h^{-b} \quad (1.3)$$

式中 a, b 为经验常数; h_0 为潜水极限蒸发深度(Extinction depth); h_1 为潜水蒸发面(ET surface)的深度。幂函数公式不适用于潜水埋深很浅的情况。

对数公式为

$$E = (-a \cdot \ln h + b) \cdot E_0 \quad (1.4)$$

指数公式(叶水庭公式的扩展)为

$$E = a \cdot E_0 \cdot \exp(-b \cdot h) \quad (1.5)$$

反 Logistic 公式为

$$E = \frac{a}{1 + b \cdot \exp(r \cdot h)} \cdot E_0 \quad (1.6)$$

式中 r 为经验常数。

以上公式相对比较简单,因此在实际中较为常用,特别是式(1.2)中的正比假定一般只在埋深较浅或大气蒸发能力较小时近似成立,因此与实际情况有一定的差别。式(1.3)和式(1.5)不适用于埋深很浅的情况。但由于这类公式相对比较简单,因此在实际中应用较为普遍,特别是阿维里扬诺夫公式应用最为广泛。

在点尺度,另外还有一些有关估算裸地潜水蒸发的半经验-半机理公式、机理公式、基于土壤水动力学原理的潜水蒸发模拟,以及植被生长条件下潜水蒸发估算方法的研究,关于这些研究进展可参见尚松浩和毛晓敏(2010)。

1.5 灌区尺度潜水蒸发现律

由于土地利用、地下水埋深、土壤类型等影响因素的空间变异性,潜水蒸发也存在显著的空间变异性。刘廷玺等(1994)首先在国内应用地统计学方法研究潜水蒸发极限埋深的空间变异性,现有的区域潜水蒸发计算中一般也注意到潜水蒸发的空间变异性,但大多只对不同土地利用进行分类。Tyler 等(1997)把美国加利福尼亚东部的 Owens 湖地区沙漠盆地分成沙地、粘土覆盖地、水面和盐水池等土地覆盖和土壤类型,然后分别估算地下水蒸发量(即潜水蒸发量),并与各自的面积相乘得到整个区域的潜水蒸发量。岳卫峰等(2004)以年为时间步长,把河套灌区义长灌域划分成农区、村庄路和盐荒地,然后分别估算各自的潜水蒸发系数,由此得到整个灌域的潜水蒸发量。胡和平等(1999)采用遥感(RS)技术将叶河灌区土地利用分为农区、沼泽、沙地、荒地和水面,并注意到将土壤作为单一的土壤土处理,且用大体为一年的平均地下水位埋深,而不是分时段的估算,这对潜水蒸发量估算结果的准确性无疑会有一定的影响,但没有提出解决的方案。以上研究一般都对土地利用进行了分区,但对土壤类型、地下水埋深的空间变异性考虑尚不够深入细致。实际上,根据刘廷玺等(1994)的研究,潜水极限蒸发埋深的半变异函数变程为 5 km。而潜水蒸发又受多种因素的共同影响,潜水蒸发的空间变异规律将更加复杂,对于我国的大中型灌区来说,仅按不同的土地利用分区域进行研究还不能充分反映潜水蒸发在空间上的分布情况。因此,虽然现有的区域潜水蒸发量计算研究中已经注意到潜水蒸发空间变异性问题,但为了更好地评价地下水资源和利用潜水蒸发水量,这方面的研究还有待深入。

1.6 潜水蒸发的有效性

由于潜水蒸发能被作物和生态植被利用,为了达到减少灌溉水量(Feng 等, 2006)和保持生态平衡的效果(胡顺军等, 2004; 胡顺军等, 2006),潜水蒸发的有效利用较早便受到人们关注。如前所述,当水资源日益紧缺时,潜水蒸发引起的无效损失也越来越得到重视。对潜水蒸发有效利用或减少无效损失,学者们目前也提出了一些调控措施,对于调控机理也有了初步的研究。

区分有效和无效潜水蒸发是进行调控机理研究的基础。王晓赞(1999)以小麦为例,认为有效潜水蒸发是指能被小麦吸收利用蒸腾掉的那部分潜水蒸发量,并注意到土壤蒸发和小麦的蒸腾是同时存在的,在实验过程中无法将二者区分开,因此提出了有效潜水蒸发系数的概念,并以此指导小麦灌溉。这种方法需要大量试验数据支撑,在实际中由于作物种类多样和地下水位的时空变化,采用这种方法需要在灌区内布置众多试验点,不可避免地产生大量的试验成本。地下水埋深是潜水蒸发调控的重要指标之一。Horton 等(2001)针对植物在不同地下水埋深的生理反应进行了研究,提出了植物进行光合等生理作用的地下水埋深阈值。崔亚莉和邵景力(2001)针对西北干旱区特定的生态环境条件,通过凝结水对沙生植物作用的分析以及地下水埋深对植物生长和土壤盐渍化影响的分析,探讨了地下水对生态环境的控制作用,认为保持合理的生态地下水位是防止植物死亡和土地荒漠化的关键。王晓红和候浩波(2006)通过开展不同地下水埋深条件下冬小麦和玉米全生育期潜水蒸发试验,认为不同埋深的地下水对作物的生长发育过程有着很大影响。张长春等(2003)的研究表明,地下水生态环境指标临界值受气候、土壤质地、地形地貌等的影响,随时间、空间的变化而变化,地下水位调控指标临界值也因地区而异。因此,需要从更大的尺度来进行潜水蒸发调控,才可能避免“以点代面”的局限性。从灌区角度,合理的地表水-地下水联合应用是减少潜水蒸发损失的有效措施,这已经是很多学者的共识(王浩, 2004; 韩素华等, 2004; 秦大庸等, 2004),但对于特定的灌区,只有充分了解地表水-地下水联合应用对灌区地下水埋深分布的影响,才能制定出整个灌区全局最优的调控措施。另外,潜水蒸发也可以通过调整作物种植布局来提高潜水蒸发有效性,例如在潜水蒸发严重的区域种植水稻来提高潜水利用率,但这方面的研究还未见报道。

综上所述,虽然目前关于潜水蒸发调控机理已经有了一些研究,也认识到潜水蒸发空间变异性的影响,但对于通过作物种植布局、地表水-地下水联合应用这些措施对潜水蒸发有效性影响的机理目前还并不明确。

1.7 灌区尺度的潜水蒸发有效性调控

合理的调控模式是提高潜水蒸发有效性的关键。在潜水蒸发的影响因素中,大气蒸发能力和土壤类型分布一般被认为是难以人为改变的,因此可以从土地利用(即作物分布)和地下水埋深来对潜水蒸发有效性进行调控,而地下水埋深又可通过地表水-地下水联合应用方案的调整来调节。王胜利等(2000)以改良盐渍土为目标,设想在作物根系层下部铺设一层作物秸秆,以此破坏毛细管的连续性,隔断潜水蒸发。但这种方法一方面没有经过深入的机理研究和实验验证,另一方面只考虑了潜水蒸发引起的盐渍化问题,而没有考虑到这样也失去了潜水蒸发被作物有效利用的可能。张长春等(2003)以防止土壤积盐和维持天然植被的生长为目标,提出通过调节地下水埋深来提高新疆地区潜水蒸发有效性,具体指标为地下水埋深上限不小于 $0.5\sim 1.0\text{ m}$,下限一般不超过 $4.5\sim 5.0\text{ m}$ 。孙宝林等(2005)认为新疆三工河流域冲洪积平原区的地下水埋深控制在 $2\sim 3\text{ m}$ 范围内,可显著地减少潜水蒸发并可维持保护生态环境用水。需要指出的是,虽然地下水位临界埋深指标具有一定的指导意义,但由于新疆地形地貌、气候条件的复杂性,以此作为潜水蒸发有效性的调控依据离实际应用还有较大的差距。韩素华等(2004)认为,地表水-地下水联合应用对节水的主要贡献在于可减少联合应用区的无效潜水蒸发量。秦大庸等(2004)提出在宁夏引黄灌区开发利用地下水,地表水-地下水联合应用,可减少无效潜水蒸发,同时减少引黄灌溉水量,达到节水的目的,并对多种地下水开采方案进行了模型模拟分析,但采用的水均衡模型,以灌区为单元,而没有考虑灌区内部潜水蒸发等因素的空间变异性。罗玉峰(2006)将柳园口灌区以陇海铁路分为上游和下游两部分,提出改变现有地表水-地下水联合应用模式,使地表水和地下水在灌区上游和下游进行重新分配,在现有种植水稻的上游部分开采地下水,降低地下水位以减少潜水蒸发损失,把黄河水输送到种植旱作物的下游,减少下游的地下水开采量,抑制地下水位下降。但这种分区仍十分粗略,并不能较细致地反映潜水蒸发在灌区内的空间变异性;若通过分布式模型考虑地下水埋深的空间变异性,结果将会更加合理。从上述分析可知,考虑潜水蒸发的空间变异性,从调整作物分布来进行灌区尺度潜水蒸发有效性调控的研究还未见报道,而从地表水-地下水联合应用入手对灌区尺度潜水蒸发有效性调控有了初步探索,但还有待进一步研究。

1.8 有待研究的问题和本书主要内容

通过以上对相关研究进展的分析,现有的研究中还存在以下问题:

(1) 虽然关于潜水蒸发规律及计算方法有很多研究,但主要针对点尺度;虽然对区域内不同土地利用也作过分区,RS 和 GIS 技术也已经被引入到区域潜水蒸发量计算中,但充分考虑区域内土地利用、地下水埋深、大气蒸发能力和土壤类型等因素共同作用的潜水蒸发的空间变异规律还有待加强。

(2) 潜水蒸发的有效利用和引起的无效损失都已经得到关注,对有效和无效潜水蒸发量的区分、地下水埋深与作物利用、生态环境的关系等机理问题也有初步的研究,也认识到有必要考虑潜水蒸发空间变异性的影响;但如何在实际区域内定量区分有效和无效潜水蒸发量问题仍没有得到很好的解决,灌区尺度的潜水蒸发有效利用机理还不明确。

(3) 学者在提高潜水蒸发有效性调控方面已经有一些有益的探索,并提出了一些地下水埋深控制指标,地表水-地下水联合应用作为减少潜水蒸发水量损失的有效手段也已经被广泛认可,但“以点代面”问题仍普遍存在,从灌区尺度考虑潜水蒸发空间变异性的调控模式还有待深入研究。

本书的研究内容包括以下三个方面。

(1) 潜水蒸发的空间变异规律。分析影响区域潜水蒸发的地下水埋深、土地利用状况、土壤质地和大气蒸发能力的空间变异性及其对潜水蒸发的影响规律,提出受以上各种因素共同作用条件下的区域潜水蒸发计算方法,分析潜水蒸发的空间变异规律,为灌区尺度的潜水蒸发有效性评价提供基础。

(2) 作物分布、地表水-地下水联合应用调整对潜水蒸发有效性的影响机理。针对潜水蒸发中既有被有效利用的部分,也有无效损失的部分,分析潜水蒸发有效利用规律,得出有效/无效潜水蒸发评价标准,从灌区尺度研究作物分布、地表水-地下水联合应用对潜水蒸发有效性的影响机理。

(3) 灌区尺度的潜水蒸发高效利用调控模式。建立作物分布、地表水-地下水联合应用与潜水蒸发有效性之间的定量关系模型,评价区域尺度的调控策略,提出灌区尺度潜水蒸发有效性调控模式。