

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

蒸散发尺度效应与 时空尺度拓展

许迪 刘钰 杨大文 张宝忠 等著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



国家出版基金项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

蒸散发尺度效应与 时空尺度拓展

许迪 刘钰 杨大文 张宝忠 等著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以 973 计划课题和国家自然科学基金项目研究成果为基础,围绕蒸散发尺度效应与时空尺度拓展,系统构建和阐述相关方法与模型及其应用案例。第 1 章为绪论。全书主要内容分为上、下两篇,第 2~8 章主要阐述不同尺度蒸散发观测和估算方法,描述不同尺度蒸散发变化规律及其尺度效应,对比分析蒸散发时间尺度拓展方法,构建蒸散发空间尺度提升与转换方法,开展区域(灌区)尺度蒸散发估算模型研究;第 9~12 章以华北地区为背景,基于蒸散发尺度效应,借助相关模型开展不同空间尺度下的农业用水效率与效益评价。

本书可供水文学、农田水利、水资源管理等学科的科技人员、教师和管理人员参考,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

蒸散发尺度效应与时空尺度拓展 / 许迪等著. —北京: 科学出版社, 2015. 8

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-041611-7

I. 蒸… II. 许… III. 农业资源-水资源-效用分析-研究 IV. S279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 184199 号

责任编辑: 李 敏 张 菊 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 8 月第一次印刷 印张: 31 1/2 插页: 2

字数: 1 100 000

定价: 288.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在2010年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域973计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步奖一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河973计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011年10月10日

前 言

蒸腾蒸发（简称蒸散发，ET）作为区域水量平衡和能量平衡的主要成分，不仅在水循环和能量循环过程中占有极其重要的地位，也是生态过程与水文过程之间的重要纽带。开展以蒸散发为核心的水资源管理研究，对实现区域社会人水和谐发展具有重要意义和作用。

近年来，虽然蒸散发测定技术与方法不断发展和完善，但对蒸散发尺度效应的模糊认识，仍严重阻碍着人们对不同尺度下水量和能量的平衡特征及其关系的深入理解。其中，大尺度的蒸散发量并非是小尺度值的简单叠加，而小尺度的蒸散发量也不能通过点与点之间的线性插值或从大尺度值分解得到，不同尺度的蒸散发量之间存在复杂的非线性关系。以往人们对蒸散发的研究多集中在田间以下小尺度上，但在实际应用中，农田以上尺度的蒸散发量对评价农业用水效率与效益以及指导科学灌溉管理具有更为重要的价值。为此，亟待客观描述蒸散发的空间异质性和时间变异性的基础上，构建不同尺度蒸散发扩展与提升方法，建立不同尺度蒸散发估算模型，这已成为全面了解农业生态系统信息资源的有效手段和核心内容，也成为贯穿农业用水效率与效益评价的基础性科学命题。

近年来，针对蒸散发尺度效应与时空尺度拓展问题，本书作者开展了大量相关研究工作。2006~2010年，依托973计划课题“基于水循环的水资源利用效用评价基础理论与方法（2006CB403405）”，开展了“基于蒸散发尺度效应的水资源利用效率评价理论与方法”和“湿地耗水规律及水资源利用效率评价理论与方法”等研究，并在2010~2013年完成了多个国家自然科学基金项目，包括“农田变化环境下作物蒸散发时空变异及尺度转换效应研究（50909098）”、“农业用水效用评价方法及其尺度效用研究（50909099）”、“农田蒸散发时空尺度耦合与转换方法研究（51009151）”、“基于耦合互补相关和Penman（Budyko）假设的蒸散发理论与应用研究（50909097）”和“基于水分与能量耦合循环机理的灌区分布式水文模型研究（50679029）”等。以这些研究项目和课题为支撑，系统开展了野外观测、数据分析、理论探讨、模型构建、典型区验证和应用等大量室内外研究，采用试验观测与理论分析相结合的方法，揭示了蒸散发的尺度效应，构建了蒸散发时空尺度扩展与提升方法，建立了不同尺度的蒸散发估算模型，开展了基于蒸散发尺度效应的农业用水效率与效益评价研究，取得的主要创新性成果如下。

1) 揭示并阐释了华北地区主要农作物生长期蒸散发的尺度变异规律与变化趋势，科学辨识出影响蒸散发尺度效应的各类主控因子，为实现蒸散发时空尺度扩展与提升以及合理评价农业用水效率与效益奠定了可靠的基础。

基于华北地区蒸散发长期定位观测试验,刻画了冬小麦和夏玉米作物生长期内的蒸散发尺度效应,阐释了蒸散发尺度效应随陆地下垫面状况差异呈现出的变异演化规律,揭示了作物充分供水条件下微观尺度叶片蒸腾量较大、田块尺度蒸散发量次之、农田尺度蒸散发量相对最小的蒸散发尺度效应变化趋势,量化了冬小麦和夏玉米相邻尺度蒸散发量间的差异,指出冬小麦(夏玉米)典型日的田块尺度要比叶片尺度以及农田尺度要比田块尺度的蒸散发量分别小 20.0%~40.8% (25.5%~39.8%) 和 17.3%~49.8% (4.3%~13.3%),整个生育期的农田平均蒸散发量要比田块尺度小 11.9%~30.5% (10.0%~16.3%);基于通径分析原理与方法,定量辨识出影响蒸散发尺度效应的各类主控因子,指出气象因子主要是净辐射、饱和水汽压差和气温,而作物因子则主要为叶面积指数或作物株高,且不同空间尺度下作物各生育时段的蒸散发量对主控因子的响应程度有所差异。

2) 分析评价了从瞬时到日和从日到全生育期的蒸散发时间尺度扩展方法在华北地区的适用性,建立了基于非线性插值修正函数的蒸散发全生育期时间尺度扩展方法,为基于瞬时遥感蒸散发数据估算日和全生育期蒸散发量提供了时间扩展方法。

以华北地区冬小麦和夏玉米作物为主要对象,系统分析和评价了从瞬时蒸散发到日蒸散发以及从日蒸散发到全生育期蒸散发的两类不同时间尺度扩展方法的区域适用性,建立的基于非线性插值修正函数的蒸散发全生育期时间尺度扩展方法提高了估值精度,指出基于作物系数法、改进的作物系数法和改进的蒸发比法,以中午或下午整点时刻的蒸散发瞬时值开展日时间尺度扩展的效果较好,与当日内基于其他时刻的模拟结果相比,日蒸散发估值精度可提高 3%~20%,而基于作物系数法的蒸散发全生育期时间尺度扩展效果要优于其他方法,且估值精度与典型日是否具有代表性密切相关。

3) 建立了冬小麦和夏玉米作物从叶片气孔导度到冠层导度的半理论空间尺度提升模型,创建了基于权重积分法的阴阳叶冠层导度提升模型,为蒸散发从叶片向田块和农田尺度的空间提升提供了有效方法。

根据冬小麦和夏玉米作物的叶片气孔导度对光合有效辐射、饱和水汽压差、气温等环境要素的非线性响应特征,建立了从叶片气孔导度到冠层导度的半理论尺度提升模型,较好地诠释了田块和农田尺度蒸散发的空间变化规律及其特点;针对作物阴阳叶截获光合有效辐射存在明显差异的事实,在对阴叶气孔导度实施积分运算的基础上,创建了基于权重积分法的阴阳叶冠层导度尺度提升模型,明显降低了现有权重法对阴叶截获的辐射值做均一化处理所产生的估算误差,使冠层导度和蒸散发估值精度分别提高 7.8% 和 7.1%,有效改善了农田尺度蒸散发估算效果。

4) 建立了适用于任意时间尺度的水热耦合平衡方程,构建了基于蒸散发互补相关理论的非线性函数模型,统一了蒸散发研究中对实际与潜在蒸散发之间关系的认识,发展和丰富了水热耦合平衡原理和蒸散发互补相关理论的内容。

从土壤—植被—大气系统中陆面和近地面大气两个子系统出发,分别构建了适用于任意时间尺度的水热耦合平衡方程和蒸散发互补相关非线性函数模型,前者从理论上对 Budyko 假设和 Penman 假设进行了统一阐释,后者则在理论上基于空气动力学项和辐射项的影响作用,分析了不同气候和不同时间尺度下实际与潜在蒸散发之间相关关系的变化

规律及其趋势,即日内小时时间尺度下一般呈正相关性,与气候条件无关,且主要受辐射项影响较大,而对日或年时间尺度而言,湿润气候下多呈正相关性,干燥条件下多呈负相关性,且主要受空气动力学项影响较大;阐析了干旱半干旱地区实际蒸散发与潜在蒸散发和土壤水分、降水及灌溉间的定量关系,揭示了灌溉既影响灌区陆面水分供给又影响区域耗水需求的机制,发现受长期灌溉影响我国多年平均降水量小于400mm地区的潜在蒸散发量年均下降1.94mm,而未受灌溉影响的同类地区年均潜在蒸散发量仅下降0.61mm,因长期灌溉引起的局地小气候变化似乎明显加快了我国干旱半干旱地区潜在蒸散发量下降的速度。

5) 提出了基于蒸散发尺度效应的农业用水效率与效益综合评价方法及其评价指标体系,模拟评价了不同空间尺度的水分利用效率变化规律,为农业高效用水提供了综合评估方法。

基于蒸散发尺度效应,提出了农业用水效率与效益综合评价方法,建立了相应的评价指标体系,以区域(灌区)尺度水循环模型和经济价值评估模型为纽带,将农业用水效率评价和效益价值评估有机连接,实现了农业用水效率与效益的统一评价;基于建立的水动力学模型、生态水文模型、水循环模型等,模拟评价了不同空间尺度下水分利用效率的变化规律,探讨了未来全球气候变化情景下不同灌溉情景对作物生长、灌溉水量、产量和水分利用效率等的定量影响。

全书共分12章,第1章综述蒸散发尺度效应与时空尺度拓展以及农业用水效率与效益评价的研究现状及其发展趋势;第2~8章为上篇,主要阐述蒸散发尺度效应与时空尺度扩展及提升;第9~12章为下篇,主要介绍基于蒸散发尺度效应的农业用水效率与效益评价案例。

全书由参加上述973计划课题和国家自然科学基金项目的科研人员,按照章节内容分工合作撰写,参编者分别来自中国水利水电科学研究院、清华大学、中国农业大学和大连理工大学,负责和参与各章撰写的人员如下。

第1章,张宝忠、雷波、许迪、刘钰;

第2章,蔡甲冰、彭致功、陈鹤、黄权中、许士国、许迪;

第3章,张宝忠、蔡甲冰、雷慧闽、黄权中、许士国、许迪;

第4章,陈鹤、雷慧闽、张宝忠、刘钰、许迪;

第5章,张宝忠、陈鹤、王建东、许迪、刘钰;

第6章,张宝忠、蔡甲冰、魏征、张彦群、许迪、刘钰;

第7章,杨汉波、杨大文、韩松俊;

第8章,韩松俊、胡和平、许迪、杨大文;

第9章,黄权中、黄冠华、刘钰、许迪;

第10章,雷慧闽、陈鹤、杨大文;

第11章,雷波、王蕾、彭致功、杜丽娟、刘钰、许迪;

第12章,马涛、许士国。

全书由许迪、刘钰、杨大文负责各章修改和审定,许迪完成统稿。

除上述编写人员外，先后参加研究工作的人员还有中国水利水电科学研究院刘国水、赵娜娜、白美健等；清华大学易永红等；中国农业大学徐旭、王相等。在完成项目研究过程中，得到了 973 计划项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”负责人王浩院士的指导和其他课题组成员的帮助。此外，在田间试验观测和数据收集工作中，还得到北京大兴区和通州区水务局及试验站、山东位山灌区管理局、河北白洋淀地区水务局等单位的大力协助，在此一并感谢。

由于研究水平所限，本书仅对蒸散发尺度效应与时空尺度拓展方法等相关内容进行了探讨，理论分析尚不够全面，对基于蒸散发尺度效应的农业用水效率与效益评价方法的研究也还处于探索阶段，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请同行专家批评指正，不吝赐教。

作 者
2014 年 12 月

目 录

总序

前言

第1章 绪论	1
1.1 蒸散发测定和估算研究现状与发展趋势	2
1.1.1 ET测定方法	2
1.1.2 ET估算方法	7
1.2 蒸散发尺度效应和时空尺度扩展与提升研究现状及发展趋势	10
1.2.1 ET尺度效应及其主控影响因子识别	11
1.2.2 ET时间尺度扩展	12
1.2.3 ET空间尺度提升与转换	13
1.3 基于蒸散发尺度效应的农业用水效率与效益评价研究现状及发展趋势	15
1.3.1 农业用水效率评价	15
1.3.2 农业用水效益评价	19
1.4 主要研究内容	22
1.4.1 蒸散发尺度效应和时空尺度扩展与提升方法	22
1.4.2 基于蒸散发尺度效应的农业用水效率与效益评价	23

上篇 蒸散发尺度效应与时空尺度扩展及提升

第2章 不同尺度蒸散发测定方法与观测试验	27
2.1 不同尺度蒸散发测定方法	27
2.1.1 叶片尺度	27
2.1.2 植株尺度	29
2.1.3 田块尺度	30
2.1.4 农田尺度	31
2.1.5 区域(灌区)尺度	34
2.2 不同尺度蒸散发观测试验	39

2.2.1	北京大兴试验站	40
2.2.2	北京通州试验站	43
2.2.3	山东位山试验站	48
2.2.4	河北白洋淀试验站	51
2.3	小结	56
第3章	不同尺度蒸散发变化规律与尺度效应	58
3.1	叶片尺度蒸腾变化规律	58
3.1.1	冬小麦	58
3.1.2	夏玉米	62
3.2	植株尺度蒸腾变化规律	69
3.2.1	夏玉米植株蒸腾变化规律	69
3.2.2	夏玉米茎秆直径变化规律	73
3.3	田块尺度蒸散发变化规律	74
3.3.1	冬小麦	74
3.3.2	夏玉米	90
3.3.3	湿地植被	94
3.4	农田尺度蒸散发变化规律	98
3.4.1	井灌区冬小麦-夏玉米轮作	98
3.4.2	渠灌区冬小麦-夏玉米轮作	105
3.5	区域（灌区）尺度蒸散发变化规律	108
3.5.1	冠层气孔导度和 Priestley-Taylor 系数	108
3.5.2	ET 季节变化	108
3.5.3	ET 年际变化	111
3.6	蒸散发尺度效应及其主控影响因子	115
3.6.1	ET 尺度效应	115
3.6.2	影响 ET 尺度效应的主控因子识别	120
3.7	小结	130
第4章	不同尺度蒸散发估算方法	131
4.1	基于双作物系数模型的农田尺度蒸散发估算方法	131
4.1.1	模型基本原理	131
4.1.2	模型率定与验证	133
4.1.3	农田尺度 ET 组分估算	136
4.2	基于遥感反演模型的区域（灌区）尺度蒸散发估算方法	138

4.2.1	模型构建	138
4.2.2	遥感数据及地表植被参数化	143
4.2.3	模型地面验证	146
4.2.4	区域(灌区)尺度 ET 空间分布	150
4.3	基于分布式生态水文模型的区域(灌区)尺度蒸散发估算方法	153
4.3.1	灌区基础数据来源	154
4.3.2	气象数据空间尺度转换	155
4.3.3	模型构建	157
4.3.4	模型验证	161
4.3.5	区域(灌区)尺度水量平衡要素估算	163
4.3.6	基于分布式生态水文模型与遥感反演模型的区域(灌区)尺度 ET 对比	164
4.4	基于数据同化方法优化的区域(灌区)尺度蒸散发估算方法	165
4.4.1	数据同化方法	165
4.4.2	数据同化方法在分布式生态水文模型中的集成应用	169
4.4.3	改善区域(灌区)尺度地表能量通量估算效果	170
4.5	小结	177
第 5 章	蒸散发时间尺度扩展方法	178
5.1	蒸散发时间尺度扩展方法	178
5.1.1	从瞬时到日的 ET 时间尺度扩展方法	178
5.1.2	从日到全生育期的 ET 时间尺度扩展方法	181
5.2	冬小麦和夏玉米生长期从瞬时蒸散发到日的时间尺度扩展	183
5.2.1	位山试验站不同下垫面从瞬时 ET 到日的时间尺度扩展	183
5.2.2	大兴试验站冬小麦生长期从瞬时 ET 到日的时间尺度扩展	187
5.2.3	大兴试验站夏玉米生长期从瞬时 ET 到日的时间尺度扩展	192
5.3	冬小麦和夏玉米生长期从日蒸散发到全生育期的时间尺度扩展	199
5.3.1	大兴试验站冬小麦生长期从日 ET 到全生育期的时间尺度扩展	200
5.3.2	大兴试验站夏玉米生长期从日 ET 到全生育期的时间尺度扩展	206
5.4	小结	211
第 6 章	蒸散发空间尺度提升与转换方法	213
6.1	蒸散发空间尺度提升	213
6.1.1	ET 空间尺度提升方法	213
6.1.2	冬小麦基于冠层导度空间尺度提升模型的 ET 估算	215
6.1.3	夏玉米基于冠层导度空间尺度提升模型的 ET 估算	224

6.2	蒸散发空间尺度提升方法改进	232
6.2.1	阴阳叶冠层导度提升模型	232
6.2.2	夏玉米阴阳叶冠层导度提升模型率定与验证	236
6.2.3	夏玉米基于阴阳叶冠层导度提升模型的 ET 估算	241
6.3	蒸散发空间尺度转换	242
6.3.1	相邻空间尺度 ET 转换	243
6.3.2	跨空间尺度 ET 转换	244
6.3.3	ET 空间尺度转换关联参数	245
6.4	小结	246
第 7 章	基于水热耦合平衡方程的区域 (灌区) 尺度蒸散发估算模型	247
7.1	水热耦合平衡原理与方程	247
7.1.1	多年时间尺度水热耦合平衡方程	248
7.1.2	任意时间尺度水热耦合平衡方程	255
7.2	基于任意时间尺度水热耦合平衡方程的年内实际蒸散发估算	257
7.2.1	年内时间尺度农田实际蒸散发估算	258
7.2.2	年内时间尺度区域 (灌区) 实际蒸散发估算	260
7.3	基于多年时间尺度水热耦合平衡方程的年际实际蒸散发估算	264
7.3.1	估算模型及应用	264
7.3.2	多年时间尺度估算模型率定和验证	266
7.3.3	年时间尺度估算模型率定和验证	268
7.4	小结	269
第 8 章	基于互补相关理论的区域 (灌区) 尺度蒸散发估算模型	271
8.1	蒸散发互补相关理论与模型	271
8.1.1	蒸散发互补相关关系	272
8.1.2	蒸散发互补相关模型及其无量纲化分析	273
8.2	综合考虑平流-干旱和 Granger 模型的蒸散发互补相关模型	275
8.2.1	蒸散发互补相关模型湿润指数合理性分析	276
8.2.2	综合性模型构建与验证	277
8.2.3	综合性模型边界条件与参数稳定性	279
8.3	蒸散发互补相关非线性模型	280
8.3.1	蒸散发互补相关模型边界条件特征	280
8.3.2	非线性模型构建与验证	281
8.3.3	非线性模型与平流-干旱模型和综合性模型的对比分析	282

8.3.4 非线性模型与 P-M-KP 模型的对比分析·····	284
8.4 基于蒸散发互补相关非线性模型分析实际与潜在蒸散发的关系·····	289
8.4.1 基于非线性模型的理論分析·····	289
8.4.2 日和半小时时间尺度验证·····	291
8.4.3 年时间尺度验证·····	293
8.5 基于互补相关理论的潜在蒸散发变化趋势分析·····	295
8.5.1 潜在蒸散发变化趋势特征值与耕地面积占比的相关性·····	295
8.5.2 “农业站点”与“自然站点”潜在蒸散发变化趋势对比·····	296
8.5.3 潜在蒸散发变化趋势分析·····	297
8.6 基于蒸散发互补相关模型的区域(灌区)尺度潜在蒸散发估算·····	300
8.6.1 景泰川灌区概况·····	300
8.6.2 景泰川灌区潜在蒸散发变化规律及其影响因素·····	302
8.6.3 引黄灌溉对景泰川灌区潜在蒸散发的影响·····	304
8.6.4 基于灌溉对蒸散发能力影响的景泰川灌区灌溉需水量预测·····	306
8.7 小结·····	309

下篇 基于蒸散发尺度效应的农业用水效率与效益评价

第9章 基于水氮作物耦合模型的通州大兴井灌区农田水氮利用效率评价·····	313
9.1 水氮作物耦合模型构建·····	313
9.1.1 农田土壤水分运动模型·····	314
9.1.2 土壤溶质运移模型·····	317
9.1.3 土壤氮素迁移转化模型·····	318
9.1.4 土壤热运动模型·····	319
9.1.5 作物生长模型·····	320
9.2 水氮作物耦合模型率定与验证·····	324
9.2.1 耦合模型输入数据及参数·····	324
9.2.2 耦合模型率定·····	324
9.2.3 耦合模型验证·····	329
9.2.4 模拟结果分析·····	341
9.3 基于水氮作物耦合模型的农田水氮利用效率评价·····	344
9.3.1 研究区概况·····	344
9.3.2 土壤、气象、作物基础数据·····	345
9.3.3 初始与边界条件及模型参数确定·····	347

9.3.4 农田水氮管理现状模拟评价	350
9.3.5 农田水氮优化管理模拟评价	354
9.4 小结	358
第 10 章 基于生态水文模型的位山引黄灌区农业用水效率评价	360
10.1 引黄灌区水文气候要素变化规律分析	360
10.1.1 研究区概况	360
10.1.2 地下水位变化规律	361
10.1.3 引黄灌溉水量变化规律	366
10.1.4 气候与灌溉要素变化趋势检验	367
10.2 田间尺度水分利用效率评价	369
10.2.1 改进 Hydrus-1D 模型	369
10.2.2 田间水循环过程模拟	375
10.2.3 田间水分利用效率模拟评价	378
10.3 冠层（农田）尺度水分利用效率	382
10.3.1 水分利用效率定义	382
10.3.2 水分利用效率季节性变化	383
10.3.3 水分利用效率影响因子	386
10.4 未来气候变化下灌区尺度水分利用效率评价	387
10.4.1 气象数据来源	388
10.4.2 未来气候变化对气象要素的影响	388
10.4.3 未来灌溉情景对作物、灌溉、产量和水分利用效率等的影响	392
10.5 小结	397
第 11 章 基于 SWAT 模型的大兴井灌区农业用水效率与效益综合评价	399
11.1 农业用水多功能性与农业用水综合效益	399
11.1.1 农业用水多功能性	399
11.1.2 农业用水综合效益	401
11.2 农业用水效率与效益综合评价框架	403
11.2.1 农业用水效率与效益综合评价	403
11.2.2 综合评价框架	403
11.2.3 综合评价指标体系	404
11.3 基于层次分析法的农业用水效率与效益综合评价方法	405
11.3.1 多目标综合评价方法比较	405
11.3.2 基于层次分析法的综合评价方法	406

11.3.3 综合评价步骤	407
11.4 基于 SWAT 模型的农业用水效率与效益综合评价	409
11.4.1 研究区概况	409
11.4.2 SWAT 模型	412
11.4.3 模拟结果分析	421
11.4.4 农业用水效率与效益综合评价	422
11.5 小结	428
第 12 章 基于生态服务功能评价模型的白洋淀湿地水资源利用效率评价	430
12.1 湿地生态服务功能评价	430
12.1.1 研究区概况	431
12.1.2 气候调节功能分析	433
12.1.3 湿地生态服务功能评价模型	439
12.1.4 湿地生态服务功能价值评估	442
12.2 湿地生态环境需水量估算	448
12.2.1 单元蒸散发总量推求及验证	449
12.2.2 湿地生态环境需水量估算模型与结果	455
12.3 湿地水资源利用效率分析评价	458
12.3.1 湿地水资源利用效率评价方法	459
12.3.2 湿地水资源利用效率评价结果	464
12.4 小结	467
参考文献	468
索引	490

第1章 | 绪 论

在当今世界面临的人口、资源、环境三大问题中，水资源短缺是首要问题之一。由于我国水资源时空分布不均，水土资源布局不相匹配，我国西北、华北和东北部分地区的水资源供需矛盾十分尖锐，而南方部分地区也出现了严重的季节性和水质性缺水问题，农业领域首当其冲。为此，解决或有效缓解农业水资源短缺问题的根本出路在于强化农业水管理发展策略与对策，采用高效节水的水资源利用模式与方法，大幅度提高农业用水效率（许迪等，2010a）。

蒸腾与蒸发（简称蒸散发，ET）作为区域水量平衡和能量平衡的主要组分，不仅在水循环和能量循环过程中起着极其重要的作用，也是连接生态过程与水文过程的重要纽带，更是有效评价农业用水效率的重要基础和关键环节。开展以ET为核心的农业水管理研究，对推动区域社会人水和谐发展具有重要意义。随着对ET测定和估算方法的不断改进与完善，人们发现ET尺度效应正极大地影响着人们对不同时空尺度水量平衡和能量平衡过程的认识。其中，大尺度下的ET并非是小尺度ET值的简单叠加，而小尺度下的ET也不能通过简单的插值或分解得到，两个尺度ET之间存在着复杂的非线性关系。以往人们对ET的研究多集中在田间小尺度，但在实际应用中，区域耗水量的动态变化及其分布对农业水资源配置和灌溉管理具有更重要的价值。因此，监测不同尺度下的ET、客观描述其空间异质性和时间变异性、构建不同时空尺度间的定量转换模型已成为全面了解农业生态系统信息资源的有效手段和核心内容，也成为贯穿农业用水效率评价的基础性科学问题。

ET多时空尺度耦合关系的缺乏会导致人们对农业用水效率评价的片面性，导致灌溉制度确定的不科学性。近年来，国内外不少学者开展了相关研究，但尚未取得突破性进展，这主要是由于一方面ET过程及农业用水效率是涉及作物、气象、土壤等众多因子的复杂异质性系统，有限的财力和资源使得对大多数因子的测定往往被局限在短时间、小范围内，可利用的典型实测值严重不足；另一方面则由于农业用水效率与空间异质性及可重复利用的水量之间关系密切，人们对多时空尺度下的农业用水效率分异规律及其影响机理尚不明晰。

要实现农业高效用水的目标，正确认识农业用水效率与效益的内涵和外延十分必要，而ET作为农田系统水量平衡和能量平衡的最主要组分，具有明显的时空尺度效应。为此，要想科学合理地全面评价农业用水效率与效益就离不开ET尺度效应分析。从ET时空尺度效应的视角出发，构建农业用水效率与效益评价体系，对提高农业水资源管理利用水平具有重要的意义和作用。