

“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

海河流域农田水循环过程与 农业高效用水机制

康绍忠 杨金忠 裴源生 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
NATIONAL PUBLICATION FUND PROJECT

海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

海河流域农田水循环过程与 农业高效用水机制



康绍忠 杨金忠 裴源生 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

海河流域水资源匮乏,而且与人口和耕地分布、生产力布局极不匹配,该地区水量供需情况及变化趋势历来受人关注。农业是该流域用水大户,发展节水高效农业是必然选择。全书共分6章,包括概述、农田土壤水分运移转化规律与作物-水分响应机理研究、用水竞争型缺水地区作物高效用水理论与技术研究、水分利用效率的尺度效应与计算方法、“作物生理-农田-农业”节水潜力计算方法与海河流域农业节水潜力评价、海河流域农业高效用水标准与模式。

本书可供农田水利、水文水资源、生态环境等领域的生产、教学、科研、管理及决策者使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

海河流域农田水循环过程与农业高效用水机制 / 康绍忠等著. —北京: 科学出版社, 2013. 3

(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 978-7-03-036801-0

I. 海… II. 康… III. 海河-流域-农田水利-研究 IV. S27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 037850 号

责任编辑: 李 敏 张 震 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 钱玉芬 / 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

*

2013 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 3 月第一次印刷 印张: 21 1/2 插页: 2

字数: 500 000

定价: 90.00 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

序

水资源紧缺是一个世界性的问题。缺水不仅对我国的经济社会发展造成了重要影响，而且引发了严峻的生态环境问题，成为国家可持续发展的制约因素。农业是用水大户，在我国用水总量中其用水量要占 65% 左右，但是农业灌溉水有效利用系数为 0.50，灌溉水生产效率仅为 $1.1\text{kg}/\text{m}^3$ 左右。气候变化导致极端天气频发，更加剧了水资源的短缺程度。为了应对日趋严重的缺水形势，大幅度提高农业用水效率，发展节水高效农业是一种必然选择，也是保障国家粮食安全、水安全、生态安全的根本措施，同时还具有保护环境、生态及降低生产成本、增加效益等“一箭多雕”之功能。2011 年和 2012 年的中共中央一号文件以及国家自然科学基金委员会“十二五”发展规划都对农业水资源高效利用给予了高度重视。国际相关学科领域工作者对农业高效用水也给予了高度关注。

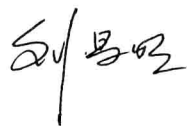
农田水循环过程与农业高效用水机制涉及土壤-植物-大气连续体（SPAC）水分传输与产量形成、田间水分精量配送、区域水资源高效配置等多个过程。该书针对我国海河流域水资源紧缺和发展节水高效农业的重大需求，以认识农田尺度水循环过程与建立农业高效用水理论为核心，在海河流域的 9 个野外试验站（点）开展了农田 SPAC 水分运移转化规律与作物-水分响应理论、作物非充分灌溉与调亏灌溉等高效用水理论及技术、水分利用效率尺度效应、农业节水潜力计算方法、海河流域农业高效用水模式等研究工作，通过不同水分环境下 SPAC 水分运转与调控理论、作物适度缺水的补偿效应和作物水分响应模型等问题的研究，建立了作物高效用水调控与非充分灌溉的新理论；通过节水灌溉条件下不同尺度作物需水估算模型及节水潜力计算方法的研究，建立了农业高效用水的可控指标体系；通过节水灌溉条件下农田水循环理论及尺度效应的研究，把单点的 SPAC 水分运行动力学模式扩展为农田尺度水转化动力学模式，为农田尺度水转化过程的定量模拟和节水调控提供了有力的工具；通过不同节水技术措施节水效果和经济比较研究，建立了水资源有限条件下节水、高效、经济和对环境友好的农业用水调控新模式，实现了我国农业高效用水前沿应用基础理论的创新，为区域农业水资源高效利用提供了科学依据和新的途径。

农业节水不是一个简单的灌溉节水的问题，而是一个包含农田水循环过程与农业水资源高效利用理论与技术研究的十分复杂的系统工程。该书在大量室内外试验、理论分析和

数值模拟的基础上，揭示了不同水分条件下农田 SPAC 中水分运移转化规律及其作物-水分响应过程与调节机理；初步形成了适用于我国北方缺水流域的作物高效用水调控理论及其非充分灌溉、调亏灌溉与控制灌溉等高效用水理论与技术体系；建立了海河流域不同尺度条件下水分利用效率和农业节水潜力计算方法；提出了海河流域农业高效用水定量标准与模式；为完成认识海河流域的水循环演变机理，探索水资源高效利用理论与途径的项目总体目标做出了重要贡献，并为海河流域农业高效用水标准和模式制订、节水灌溉工程的规划与建设、水资源优化调配与管理提供了理论依据与基础数据的支撑。

该书面向国际学术前沿，提出了估算不同尺度地表含水量合理取样数目的随机组合研究方法，建立了根系吸水速率和根氮质量密度分布模拟模型；揭示了不同地下水埋深条件下非充分灌溉麦田的土壤水-地下水转化规律以及土壤剖面水分通量与地下水埋深对作物耗水的补给作用；研发了土壤水分多尺度数值模拟计算问题的有效算法，提出了土壤饱和水力传导度多尺度数据整合方法；阐明了海河流域农业用水效率的尺度效应及其机理；分析了不同尺度农业节水潜力的相互关系。该书针对地球科学国际热点，展现了研究取得的创新性进展，对促进农田水循环过程与农业高效用水机理研究领域的理论创新与技术应用有重要意义与价值。

中国科学院院士



2013 年 3 月

前 言

海河流域是中国七大流域之一，流域面积 32 万 km^2 ；人口 1.3 亿，占全国总人口的 10% 左右；耕地面积为 1.6 亿多亩^①，占全国耕地面积的 11%；流域多年平均降水量 539mm，年平均陆面蒸发量 470mm，年平均水面蒸发量 1100mm。该流域水资源匮乏，而且与人口和耕地分布、生产力布局极不匹配，所以该地区水量供需情况及变化趋势历来受人关注。在该流域，农业是用水大户，发展节水高效农业是必然选择。

在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”资助下，以认识节水条件下不同尺度的农田水分运行转化规律与作物响应过程以及建立区域节水、高效和对环境友好为目标的农业用水新模式为主线，我们 2006 ~ 2010 年分别在中国农业大学土壤和水农业部重点实验室、中国农业大学曲周试验站、中国科学院栾城试验站（河北栾城）、中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场（河南新乡）、石津灌区试验站王家井试验区、河北省灌溉试验总站试验场、徒骇马颊河流域位山灌区、大兴区团河农场、北京市通州永乐店节水灌溉试验站 9 个地点，开展了不同水分条件下的农田 SPAC 水分运移转化规律与作物-水分响应理论、用水竞争型缺水地区作物非充分灌溉与调亏灌溉等高效用水理论及技术、“单株—群体—农田—农业”水分利用效率的尺度效应与不同尺度灌溉水利用效率的计算方法、“作物生理—农田—农业”等节水潜力计算方法与海河流域农业节水潜力评价、海河流域水资源有限条件下农业高效用水标准与节水高效和环境友好型用水模式研究。

在不同水分条件下的农田 SPAC 水分运移转化规律与作物-水分响应理论研究方面，揭示了冬小麦根系吸收水分、养分的机理，建立了相关的根系吸收模型并模拟了土壤水分与氮、磷的运移，在北京地区开展了冬小麦非充分灌溉农田水分运动试验，探索了非充分灌溉条件下不同地下水埋深农田土壤水-地下水的转化关系；发展了土壤水分运动的多尺度数值模拟的有效数值算法和一种对土壤中饱和水力传导度进行多尺度数据整合的方法。

在用水竞争型缺水地区作物非充分灌溉与调亏灌溉等高效用水理论及技术研究方面，

^① 1 亩 $\approx 666.7\text{m}^2$ ，后同

主要研究了海河流域华北高产农业区主要作物节水高效灌溉机理与技术、海河流域中原高产农业区主要作物节水高效灌溉机理与技术，明确了外界环境条件对作物耗水的影响以及作物不同生长阶段对水分亏缺的响应，建立了提高产量和水分利用效率的作物非充分灌溉制度和调亏灌溉制度，提出了海河流域华北高产农业区和中原高产农业区冬小麦、夏玉米、温室蔬菜等主要作物的非充分灌溉和调亏灌溉技术模式。

在“单株—群体—农田—农业”水分利用效率的尺度效应与不同尺度灌溉水利用效率的计算方法方面，开展了灌区及灌区以下尺度农业用水效率的野外试验与调查研究，较为完整地得到了海河流域“作物—田间—斗渠—支渠—分干—干渠—灌区—省市行政区—海河流域”多个尺度，以及“农田总供水的水分生产率、灌溉水分生产率和灌溉水利用系数”等多个指标表示的农业用水效率；阐明了海河流域农业用水效率的尺度效应，并基于机理模型模拟揭示了海河流域农业用水效率尺度效应产生的机理；系统构建了综合考虑空间变异性和水循环通量的农业用水效率尺度转换方法，为农业用水效率的尺度转换提供了理论依据和可能的解决途径，为不同尺度农业用水效率计算的深化奠定了重要基础，为尺度效应的理论分析提供了基础数据。

在“作物生理—农田—农业”等节水潜力计算方法与海河流域农业节水潜力评价方面，选择海河流域二级子流域徒骇马颊河流域为典型流域，全面收集整理典型区和海河流域基本资料，在典型流域水资源分配与水循环模拟的基础上，探讨了不同尺度农业节水潜力理论，完善了不同尺度节水潜力评价方法，评价了典型区作物、田间、灌区和流域不同尺度的农业节水潜力，在考虑尺度效应和实现可行性的基础上计算获得海河流域农业节水潜力，为科学布局海河流域农业节水措施提供了支撑。

在海河流域水资源有限条件下农业高效用水标准与节水高效和环境友好型用水模式研究方面，分析了海河流域 50 多年的作物需水量的时空变异规律以及影响因子，获得海河流域 4 种典型年份和多年平均的冬小麦、夏玉米生育期需水量的空间分异规律；分析了冬小麦产量反应系数 (K_y) 的空间分异特征，进行了 K_y 的县域差异分析以及 K_y 的空间相关性和集聚性分析；运用系统聚类分析方法，选择海拔、坡度、湿润指数、缺水程度、亩均灌溉可用水量作为分区指标，将海河流域分为 15 个节水灌溉区，以净效益最大为优化准则，确定了作物经济需水量及经济灌溉定额；基于 CERES-Wheat 模型设计了海河流域 4 个站点的优化灌溉制度；开发了基于 WebGIS 的海河流域作物需水量信息查询和非充分灌溉预报管理系统。在此基础上完成的“一种区域作物需水量测算方法”已获得发明专利授权 (ZL 200810098243.8)，开发的海河流域主要作物生命健康需水量信息管理系统 (登记号：2009SR07015)、海河流域主要农作物非充分灌溉管理系统 [HhrDIS] V1.0 (2009SRBJ4616) 等获软件著作权登记。

本项成果在 *Water Resources Research*、*Journal of Hydrology*、*Field Crops Research*、*Soil Science Society of America Journal*、*Agricultural Water Management*、*Irrigation Science*、*Irrigation and Drainage*、《水利学报》、《农业工程学报》、《武汉大学学报 (工学版)》等国内外重要学术刊物和重要学术会议上公开发表高水平学术论文 70 篇, 其中 SCI 收录论文 41 篇, EI 收录论文 36 篇; 获发明专利 3 件、实用新型专利 1 件, 软件著作权登记 3 项。

先后参加本项研究的有: 中国农业大学中国农业水问题研究中心康绍忠、冯绍元、任理、左强、杜太生、佟玲、霍再林、石建初、陆红娜、王素芬、汤博、李小娟、李娜、高光耀、马英、关雪、辛儒、陈福来、贺新光、王春梅、郑艳侠、侯立柱、郑燕燕、王雅慧等; 武汉大学杨金忠、黄介生、伍靖伟、陈皓锐、王静、张晓春、范岳、杨迎; 中国水利水电科学研究院裴源生、赵勇、陆垂裕、秦长海、张金萍、肖伟华、刘建刚; 中国农业科学院农田灌溉研究所孙景生、王景雷、刘祖贵、张寄阳、陈智芳、高阳、张俊鹏、刘浩、宋妮等; 中国科学院遗传与发育生物学研究所张喜英、陈素英、孙宏勇、邵立威、王彦梅等。

本书由上述研究人员集体撰写。具体分工如下: 第 1 章由康绍忠、李小娟、汤博撰写; 第 2 章的 2.1 节由石建初、左强撰写, 2.2 节由霍再林、冯绍元、马英、郑燕燕、王雅慧撰写, 2.3 节由李娜、任理撰写; 第 3 章的 3.1 节由张喜英、陈素英、孙宏勇、邵立威撰写, 3.2 节由孙景生、张俊鹏、刘祖贵撰写; 第 4 章由伍靖伟、杨金忠、黄介生、陈皓锐撰写; 第 5 章由裴源生、赵勇撰写; 第 6 章的 6.1 节由康绍忠、李小娟撰写, 6.2 节由康绍忠、关雪、辛儒撰写, 6.3 节由王景雷、冯绍元、陈智芳、郑艳侠撰写。全书由康绍忠、佟玲汇统稿。

由于研究者水平和时间及经费所限, 所取得的成果仅仅是海河流域农田水循环过程与农业高效用水机制研究领域中的某几个方面, 对有些问题的认识和研究还有待于进一步深化, 不足之处在所难免, 恳请读者批评指正。

康绍忠 杨金忠

2013 年 1 月

目 录

总序
序
前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 海河流域基本概况	1
1.2.1 自然地理与行政区划	1
1.2.2 气候特征	3
1.2.3 河流水系	3
1.2.4 土壤与生态植被	4
1.2.5 社会经济概况	6
1.3 海河流域水资源状况	7
1.3.1 降水资源	7
1.3.2 地表水资源	8
1.3.3 地下水资源	9
1.3.4 水资源总量	9
1.3.5 水质状况	10
1.4 海河流域水资源开发利用现状	10
1.4.1 水利工程建设现状	10
1.4.2 供用水现状	11
1.4.3 水资源开发利用现状	12
1.5 海河流域农业节水现状	13
1.5.1 农业用水现状	13
1.5.2 农业节水现状	13
第 2 章 农田土壤水分运移转化规律与作物-水分响应机理研究	15
2.1 冬小麦根系水分吸收与土壤水分动态模拟	15
2.1.1 引言	15

2.1.2	苗期冬小麦根系吸水机理	17
2.1.3	土壤水分动态模拟	23
2.1.4	总结	36
2.2	不同地下水埋深条件下非充分灌溉农田水分运动试验研究	36
2.2.1	地下水深埋条件下冬小麦-夏玉米农田水循环试验及模拟研究	37
2.2.2	地下水浅埋条件下冬小麦农田水循环试验及模拟研究	41
2.3	土壤饱和和水力传导度的多尺度数据整合方法与应用	52
2.3.1	引言	53
2.3.2	方法	56
2.3.3	示范算例	61
2.3.4	数值研究与讨论	69
2.3.5	结语	82
第3章	用水竞争型缺水地区作物高效用水理论与技术研究	84
3.1	海河流域华北高产农业区主要作物节水高效灌溉机理与技术研究	84
3.1.1	小麦玉米周年农田耗水和灌溉需水规律	85
3.1.2	作物节水高效灌溉调控机理	87
3.1.3	针对不同目标的灌溉制度	95
3.1.4	主要结论	102
3.2	海河流域中原高产农业区主要作物节水高效灌溉机理与技术研究	103
3.2.1	水分调控对中原高产农业区主要作物形态指标的影响	103
3.2.2	水分调控对中原高产农业区主要作物生理特性的影响	109
3.2.3	水分调控对中原高产农业区主要作物产量和品质性状的影响	114
3.2.4	水分调控对中原高产农业区主要作物耗水量和水分利用效率的影响	121
3.2.5	中原高产农业区主要作物节水高效灌溉技术	130
第4章	水分利用效率的尺度效应与计算方法	138
4.1	水分利用效率的研究思路和方法	138
4.2	海河流域农业用水特征	139
4.2.1	农业种植	139
4.2.2	农业水源	139
4.2.3	用水方式和效率	140
4.2.4	农业节水措施	140
4.3	海河农业用水效率尺度效应研究思路和指标选择	140
4.3.1	研究思路	140

4.3.2	农业用水效率指标选择	141
4.3.3	不同尺度农业用水效率资料收集与整理分析	143
4.4	不同尺度农业用水效率研究	145
4.4.1	灌区及灌区以下尺度农业用水效率的试验研究	145
4.4.2	灌区及灌区以下尺度农业用水效率的调查研究	157
4.4.3	灌区以上尺度农田灌溉用水效率的统计分析研究	163
4.4.4	海河流域尺度农业用水效率的遥感分析研究	168
4.4.5	海河流域农业用水效率的尺度效应	174
4.5	农业用水效率尺度效应机理分析与转换方法研究	177
4.5.1	尺度效应机理研究思路	177
4.5.2	尺度效应机理研究的具体方法	179
4.5.3	结果分析	185
4.6	主要结论与存在的主要问题	202
4.6.1	主要结论	202
4.6.2	存在的主要问题	203
第5章	“作物生理-农田-农业”节水潜力计算方法与海河流域农业节水潜力评价	204
5.1	不同尺度农业节水潜力的概念及计算方法	204
5.1.1	不同尺度农业节水潜力	204
5.1.2	灌溉节水潜力和资源节水潜力	206
5.1.3	不同尺度农业节水潜力评价框架	206
5.1.4	不同尺度农业节水潜力评价方法	207
5.2	徒骇马颊河流域农业节水潜力	212
5.2.1	WACM 参数设置与模型验证	212
5.2.2	WACM 模型现状模拟	225
5.2.3	徒骇马颊河流域不同尺度农业节水潜力	235
5.3	海河流域农业节水潜力评估	247
5.3.1	海河流域农业耗用水与节水现状	247
5.3.2	海河流域农业节水基本思路	250
5.3.3	海河流域农业节水潜力预测	252
第6章	海河流域农业高效用水标准与模式	258
6.1	海河流域作物需水量和冬小麦产量反应系数的空间分异规律	258
6.1.1	海河流域参考作物需水量与冬小麦和夏玉米需水量的空间分异规律	258

6.1.2 作物产量反应系数 (K_y) 及其空间分异规律	261
6.2 海河流域不同灌溉分区的农业高效用水标准与模式	268
6.2.1 海河流域节水灌溉分区	268
6.2.2 海河流域不同分区的作物经济耗水量与经济灌溉定额研究	278
6.2.3 基于冬小麦生长与产量模拟的经济灌溉制度设计	286
6.3 海河流域作物需水信息查询和灌溉决策支持系统	289
6.3.1 技术开发流程	290
6.3.2 系统体系结构	291
6.3.3 系统总体设计	291
6.3.4 数据库设计	291
6.3.5 技术特点	310
参考文献	312

第 1 章 | 概 述

1.1 研究背景与意义

海河流域是中国七大流域之一，流域面积 32 万 km^2 ；人口 1.3 亿，占全国总人口约 10%；耕地面积为 1.6 亿多亩，占全国耕地面积的 11%；流域多年平均降水量 539mm，年平均陆面蒸发量 470mm，年平均水面蒸发量 1100mm。该流域水资源匮乏，而且与人口和耕地分布、生产力布局极不匹配，所以该地区水量供需情况及变化趋势历来受人关注。在该流域，农业是用水大户，发展节水高效农业是必然选择。本书正是针对我国海河流域水资源紧缺的现状，面向该区域发展节水高效农业的需求，以认识农田尺度水循环过程与建立农业高效用水理论为核心，通过不同水分环境下 SPAC 水分运转与调控理论、作物适度缺水的补偿效应和作物水分响应模型等问题的研究，建立作物高效用水调控与非充分灌溉的新理论；通过节水灌溉条件下不同尺度作物需水估算模型及节水潜力计算方法的研究，建立农业高效用水的可控指标体系；通过节水灌溉条件下农田水循环理论及尺度效应的研究，把单点的 SPAC 水分运行动力学模式扩展为农田尺度水转化动力学模式，为农田尺度水转化过程的定量模拟和节水调控提供有力的工具；通过不同节水技术措施节水效果和经济比较研究，建立水资源有限条件下有利于节水、高效、经济和对环境友好的农业用水调控新模式，实现我国农业高效用水前沿应用基础理论的创新，为区域农业水资源高效利用提供科学依据和新的途径。

1.2 海河流域基本概况

1.2.1 自然地理与行政区划

海河流域是我国七大流域之一，地处华北地区，位于东经 $112^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 、北纬 $35^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 。东临渤海，西以山西高原和黄河流域接界，南界黄河，北以内蒙古高原与内陆河流域接壤，东北与辽河流域接界。流域总面积 32 万 km^2 ，占全国总面积的 3.3%。其中山区和平原面积分别占 60% 和 40%。地跨 8 个省（自治区、直辖市），包括北京、天津两市，河北省大部分，山西省东部、北部，山东、河南两省北部，以及内蒙古自治区、辽宁省的一小部分，流域内共有 31 个地级市、2 个盟、256 个县（区），其中含 35 个县级市（水利部海河水利委员会，2003），如图 1-1 所示。流域内各省级行政区所占的面积及比例见表 1-1。

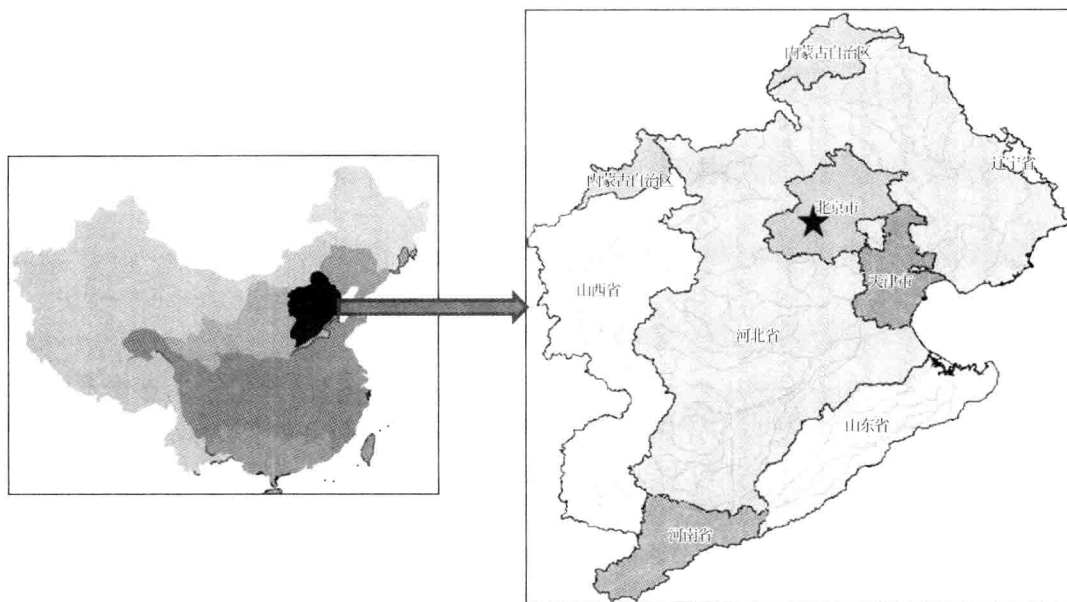


图 1-1 海河流域位置示意图

表 1-1 海河流域省级行政区在流域内的面积和所占比例

行政区	面积/km ²	所占比例/%
北京市	16 800	5.25
天津市	11 920	3.72
河北省	171 624	53.63
河南省	15 336	4.79
山东省	30 942	9.67
山西省	59 133	18.48
内蒙古自治区	12 576	3.93
辽宁省	1 710	0.53
流域合计	320 041	100

资料来源：任宪韶，2007

海河流域总体地势呈西北高东南低。全流域大致分为高原、山地及平原三种地貌类型，其中西部为山西高原和太行山区，北部为内蒙古高原和燕山山区，东部和东南部为平原，山区和平原几近直交，丘陵过渡带很窄。平原区按成因可分为山前平原、中部平原和滨海平原，总体地势由西南、西、北三个方向向渤海湾倾斜，其坡降由山前平原的 1/2000 ~ 1/300 渐变为东部平原的 1/15 000 ~ 1/10 000。主要山脉有西部的五台山和太行山、北部的燕山山脉、西北的军都山，海拔均在 1000m 以上，最高的五台山达 3058m，这些山脉像一道高耸的屏障环抱着平原（水利部海河水利委员会，2003；任宪韶，2007）。图 1-2 是空间分辨率为 1000m×1000m 的海河流域数字高程模型。

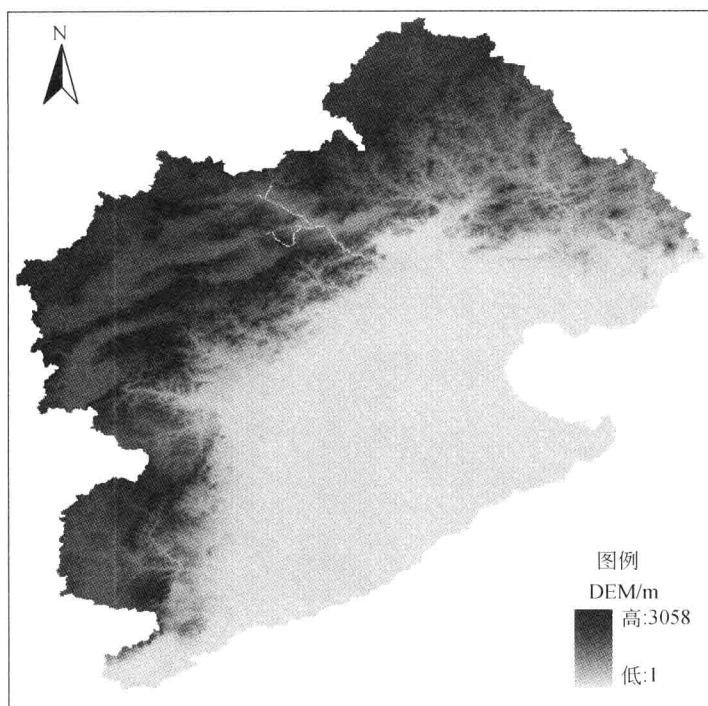


图 1-2 海河流域数字高程模型

1.2.2 气候特征

海河流域地处温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区。流域年平均气温为 $1.5 \sim 14^{\circ}\text{C}$ ，从平原到山地、南部到北部呈递减的趋势。一年当中 6 月、7 月温度最高，1 月、2 月温度最低。全流域最冷的地区位于五台山，最暖区位于漳河平原南部，五台山 1958 年极端最低气温低至 -44.8°C ，山东省高唐 1934 年 7 月 14 日极端最高气温达 45.8°C （任宪韶，2007）。

全流域多年平均降水量仅 539mm，是我国东部沿海降水最少的地区，且降水时空分布不均。冬季寒冷少雪，盛行北风和西北风；春季气候干燥，多风沙；夏季暴雨集中，洪涝时有发生，多东南风；秋季降雨量较少。年平均日照时数 2500 ~ 3000 小时，年平均相对湿度 50% ~ 70%，年平均陆面蒸发量 470mm，水面蒸发量 1100mm，蒸发量山区比平原小，随气温上升而增加，随纬度增加而减小。无霜期随海拔和纬度的减小而增大，平原地区比山区大，沿海地区最大，达 200 天以上（水利部海河水利委员会，2003；任宪韶，2007）。

1.2.3 河流水系

海河流域包括海河、滦河、徒骇马颊河三大水系，发源于内蒙古高原、黄土高原、燕