



普通高等教育“十二五”规划教材

# 灌溉排水工程学

主 编 王仰仁  
副主编 段喜明 刘佩茹 邱苑梅  
主 审 刘群昌



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

# 灌溉排水工程学

主 编 王仰仁

副主编 段喜明 刘佩茹 邱苑梅

主 审 刘群昌



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材，是按照国家对工程应用型人才培养的要求及本科教学特点编写完成的。

全书分为十章，系统讲述了农田灌溉原理、灌溉制度与灌溉用水量、灌水方法、灌溉渠道工程、灌溉管道工程、灌溉水源工程、集雨灌溉工程、田间排水与盐碱土改良利用、排水沟道系统规划和灌溉排水管理等。

本书为本科水利工程专业的通用教材，也可供水利部门从事农业水利工程的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

灌溉排水工程学 / 王仰仁主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014.8  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5170-1913-8

I. ①灌… II. ①王… III. ①灌溉系统—高等学校—教材②排灌工程—高等学校—教材 IV. ①S274.2  
②S277

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第191915号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 <b>灌溉排水工程学</b>
作 者	主编 王仰仁 副主编 段喜明 刘佩茹 邱苑梅 主审 刘群昌
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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
刷 印	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19.75印张 468千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>39.00元</b>

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

本书是普通高等教育“十二五”规划教材，是根据国家大力发展应用型人才培  
养要求，以及教育部对普通高等教育“十二五”国家级规划教材建设的  
具体要求组织编写的。

本书紧扣当前应用型人才的培养需求，充分体现以学生为主体的教育理  
念，突出学生能力培养，注重教材的针对性和实用性，注重将新理论、新方  
法、新技术、新设备引入教材。本书在维持灌溉排水工程学教材系统性的基  
础上，适当减少了一些计算公式的推导过程，加大了技术与技能性内容的介  
绍，如微灌技术中施肥、灌水器、压力调节器、过滤器等设施的运行过  
程及工作原理内容，相应地增加了较多的图表，以便于学生更加直观地认识  
和理解；加大了灌溉排水工程效益计算评价及运行维护方面的内容；紧密结  
合国家高效节水灌溉工程建设及其现代化管理要求，加大了自动化、信息化  
和系统工程技术等内容。

全书分为十章，第一章和第二章主要讲解灌溉原理，包括农田土壤水分  
运动、作物需水量和灌溉用水量的计算；第三章介绍田间灌水技术，包括畦  
灌、沟灌、喷灌和微灌，第四章和第五章介绍灌溉输配水技术，包括渠道输  
配水技术和管道输配水技术；第六章为水源工程技术，包括地面水和地下水  
的开发利用方法与规划设计等；第七章简要介绍了用于灌溉的雨水集蓄利用  
工程及其规划设计和管理技术；第八章和第九章系统介绍了农田排水原理和  
沟道、暗管等排水工程规划设计方法；第十章较系统地介绍了灌溉排水工程  
运行和管理技术。全书以培养学生对灌溉排水工程的规划、设计能力为主线，  
系统介绍了灌溉排水工程的规划设计方法及管理技术。

本书编写人员如下：天津农学院王仰仁（绪论，第三章第四节，第六章  
第一节、第二节、第三节，第十章第四节、第五节和第六节），山西农业大  
学段喜明（第一章），山西农业大学郭晓宇（第二章），山西农业大学魏清顺  
（第七章），云南农业大学邱苑梅（第三章第一节、第二节、第三节），云南农  
业大学张刘东、邱苑梅（第四章），青岛农业大学陈明利、刘佩茹（第五章），

刘佩茹、陈明利、张晓光（第八章和第九章），天津农学院叶澜涛（第三章第五节、第十章第一节和第二节），天津农学院王玉飞（第六章第四节），天津农学院韩娜娜（第十章第三节）。本书由王仰仁担任主编并负责全书统稿，由段喜明、刘佩茹和邱苑梅担任副主编，由中国水利水电科学研究院教授级高级工程师刘群昌担任主审。

本教材编写过程中参阅了多本教材和专著等文献，引用了其中的新成果、新方法。同时也得到了各位编审人员所在单位的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2014年7月

# 目 录

## 前言

绪论	1
第一章 农田灌溉原理	9
第一节 农田土壤水分运动基本方程	9
第二节 入渗条件下土壤水分运动	15
第三节 蒸发条件下土壤水分运动	20
第四节 土壤—植物—大气连续体水分运动	29
第五节 作物需水量	33
第六节 非充分灌溉原理与作物水分生产函数	40
第二章 灌溉制度与灌溉用水量	44
第一节 充分供水条件下灌溉制度的确定	44
第二节 非充分供水条件下灌溉制度的优化	52
第三节 灌溉用水量	54
第四节 灌水率	58
第三章 灌水方法	61
第一节 灌水方法的分类及适用条件	61
第二节 地面灌溉技术	63
第三节 喷灌	72
第四节 微灌	84
第五节 设施农业灌溉工程	96
第四章 灌溉渠道工程	99
第一节 灌溉渠道工程的组成	99
第二节 灌溉渠道工程的规划	102
第三节 田间工程及其规划	105
第四节 渠道设计流量的推算	109
第五节 渠道纵横断面的设计	120
第六节 渠道防渗及抗冻胀	131

<b>第五章 灌溉管道工程</b> .....	137
第一节 灌溉管道工程的组成 .....	137
第二节 管材种类及规格 .....	140
第三节 管道的附件 .....	144
第四节 管道输水灌溉系统的规划布置 .....	150
第五节 管道的工作制度及水力计算 .....	154
第六节 灌溉管道工程的结构设计 .....	161
<b>第六章 灌溉水源工程</b> .....	163
第一节 灌溉水源及水质要求 .....	163
第二节 灌溉取水工程的分类及特点 .....	167
第三节 地表水灌溉取水工程的水利计算 .....	176
第四节 地下水资源的开发利用 .....	184
<b>第七章 集雨灌溉工程</b> .....	195
第一节 概述 .....	195
第二节 集雨灌溉工程规划 .....	196
第三节 集雨灌溉水源工程 .....	202
第四节 集雨灌溉田间工程 .....	214
<b>第八章 田间排水与盐碱土改良利用</b> .....	216
第一节 田间排水要求及相关参数 .....	216
第二节 明沟排水 .....	221
第三节 暗管排水 .....	226
第四节 竖井排水 .....	238
第五节 防治盐碱化的灌溉排水技术 .....	240
<b>第九章 排水沟道系统规划设计</b> .....	250
第一节 排水沟道系统的规划布置 .....	250
第二节 排水沟流量和水位的确定 .....	253
第三节 排水沟的纵横断面设计 .....	266
<b>第十章 灌溉排水管理</b> .....	271
第一节 灌溉用水计划的编制及执行 .....	271
第二节 灌溉排水管理的自动化 .....	275
第三节 灌溉排水管理的信息化 .....	279
第四节 灌溉排水效益评价与水费计收管理 .....	286
第五节 灌溉排水试验 .....	291
第六节 灌溉排水工程常见病害及其处理 .....	299
<b>参考文献</b> .....	308

# 绪 论

## 一、灌溉排水工程在农业生产中的地位和作用

灌溉与排水是用人工手段克服自然降水不足或过多而给农业生产带来不利影响的技术措施，包括调节区域水资源和土壤水分状况，防治旱、涝、渍、盐碱等灾害，以促进农业高产、优质、稳产。受季风气候影响，中国洪涝干旱灾害频繁，灌溉排水事业在促进农业和农村经济发展中发挥了重要作用。

我国地处亚洲大陆东部。受季风气候和地形条件影响，降水在地域空间和年际之间、年内季节之间分配极不均匀。多数地区农作物生长期都存在不同程度的因降水过分集中造成的洪涝灾害，或降水过少产生的干旱问题。从总体上说我国农业对灌溉有较强的依赖性。具体到东、中、西三个不同地带，它们对灌溉的依赖程度又有所不同。

年降水量低于 400mm 的西北内陆和黄河上中游等地区，地域辽阔，土地资源丰富。这里位于大陆腹地，降水稀少，最少的只有一二百毫米，甚至几十毫米，而蒸发量是降水量的几倍、十几倍。在该地区兴建灌溉设施进行常年灌溉或季节性补充灌溉，是保证农业生产正常进行，获取高产稳产的必要条件。除此之外，人工林地、饲草料地也需要灌溉，否则生长发育不良，严重时干枯死亡。西北地区建有大量的引水、蓄水、提水等灌溉工程，多数地方灌溉面积占耕地面积比例在 30%~50%。新疆的比例高达 98%，是我国灌溉事业发达的地区之一，其灌溉设施维护管理较好。该地区的灌溉水源主要来自高山降水和融雪形成的地表径流或地表水渗入地下转换而成的地下水。

年降水量在 400~1000mm 之间的黄淮海及东北等地区，人口密集，经济发达，是我国农业发达地区之一，受强烈季风气候影响，降水在年际、年内之间变化很大，造成农业对灌溉的需求很不稳定。黄淮海地区小麦生产必须有灌溉条件的保障，否则产量低而不稳，甚至无法种植。玉米、棉花、豆类等秋熟作物则只在干旱季节或干旱年份需要适当灌溉补水，一般年份对灌溉需求不大。东北地区水稻生产必须有灌溉条件保障，才能确保优质高产；玉米、大豆等作物，在春季播种和苗期容易遭受干旱，出苗率和幼苗存活率低导致减产，需要人工补水抗旱播种，当地称“坐水种”。但是多数年份的作物生长期靠天然降雨就可以基本满足需求，黄淮海地区是我国农田灌溉事业最发达的地区之一，灌溉面积占耕地面积的比例约在 2/3 左右。黄淮海地区和东北地区的灌溉水源，一部分来自山区水库蓄水、平原河道引水，一部分来自地下水。黄淮海地区是我国水资源最紧缺的地方之一，地下水开发利用成为发展农业活动的主要途径，建成了全国规模最大，集中连片的机井灌区。有些灌区采用井渠结合方式，实现地表水与地下水互相补充，联合调配运用。

年降水量超过 1000mm 的长江流域及以南广大地区，国土面积占全国总面积的 36%。多数地方降水充沛，为水稻种植提供了良好的自然条件，成为我国主要稻谷产区。但是，在水稻栽插、抽穗扬花等生长关键期，经常出现季节性干旱，对水稻生长构成一定威胁。



连续几十天不下雨的大旱,也会给农业生产带来严重影响、甚至绝收的灾难性后果。灌溉、防洪、除涝和防渍是这一地区发展高产优质高效农业不可缺少的基础保障条件。长江、珠江等河流下游三角洲,洞庭湖、太湖等湖泊四周,山地丘陵之间的盆地,地势平坦,河网密布,水资源丰富,易于发展灌溉,大多数地区已建成比较完善的灌排体系。山地和丘陵冈地的农田,受地形和水源条件限制,发展灌溉难度较大。华东和湖南、湖北、广东等省灌溉面积占耕地面积比例多在80%~90%,上海高达96%。以山地丘陵为主的西南各省,水利化程度较低,灌溉面积只占耕地的40%~50%。南方地区灌溉水源主要取自河道、水库或塘坝。江河三角洲和河网湖区多依靠泵站和流动排灌机械进行排涝和灌溉,是我国机电排灌事业最发达的地区。

我国人口众多,耕地资源少,人均占有耕地面积只有 $0.1\text{hm}^2$ ,为世界人均占有耕地的 $1/3$ ,人均占有水资源量也少,只相当世界平均水平的 $1/4$ 。要用有限的耕地和可用的淡水资源,生产出数量多、质量优的农产品,满足13亿人不断提高生活水平的需要,为经济社会持续、快速、协调、健康发展提供可靠的保障,有效的途径之一是发展灌溉排水,不断增强农业抗御自然灾害能力,改善农业生产的不利自然条件,提高单位面积产量和效益。

## 二、灌溉排水工程的性质和特点

建设灌溉排水工程是巩固农业基础地位、保障国家粮食安全的需要。为了统筹协调社会全体成员的利益关系,灌溉排水设施的建设必须由政府动员社会的力量,以集体的形式组织实施。政府在发展灌溉排水事业中起着主导的作用,农民是发展灌溉排水事业的主体。灌溉排水工程的管理机构是准公益性质的社会服务组织。

灌溉排水工程建设与管理有以下特点:

(1) 灌溉排水工程有较强的公益性。它承担着保障国家粮食安全的任务。它的服务对象是国民经济中的弱势产业——农业,社会中的弱势群体——农民。它所承担的防洪除涝抗旱减灾任务和改善生态环境等多种任务都属于满足社会存在与发展的共同需求。

(2) 灌溉排水工程具有一定的可经营性。灌溉能改善农业生产条件,促使农作物增加产量,提高农产品品质,增加农民收入。灌溉供水和灌溉服务具有商品属性,应当按照商品交换价值规律,由受益者向提供者付费,补偿灌溉供水和灌溉服务过程中的损耗。

(3) 灌溉排水工程服务具有天然垄断性。灌区所用的灌溉水源、引水枢纽和渠道线路的地理位置和走向布置等,在一定条件下都是唯一的,不可能在同一个地方建多个灌区相互竞争;灌溉排水工程的受益范围、服务对象相对固定,用水户对灌溉供水和灌溉服务没有选择余地。

(4) 灌溉排水事业具有很强的政策性。几乎世界上所有国家的政府都对灌溉排水事业发展给予强有力的资金扶持,实行保护政策。世界银行等国际金融机构把支持灌溉项目作为解决发展中国家粮食短缺、农村贫困的主要措施之一,实行免收利息、延长还贷款限期(还款期限长达30年)等优惠金融政策。

(5) 灌溉排水活动有较强的不确定性和一定的风险性。农作物栽培管理的季节相对固

定,而灌溉用水的来源、灌水时间、灌水次数都与天然降水有密切关系,存在着很多不确定因素。

(6) 灌溉排水设施的维护管理困难。灌溉设施建在远离村镇的荒郊野外,渠道线路长,渠系建筑物多,田间灌溉设施覆盖面广,风吹、日晒、雨淋、冻融、水流冲刷,季节性间断使用,容易自然老化,雨季洪水、泥石流经常造成毁灭性破坏。

(7) 灌溉排水工程建设和管理跨多个学科专业,有较强的综合性。灌溉排水工程建设涉及水文、水资源、生态环境、工程地质与水文地质、水工建筑、机电设备、土壤、农作物栽培等许多学科领域和专业技术,其管理涉及法律、政策、企业经营、市场销售、社会、历史、心理等多个方面,需要采用系统工程的方法,综合治理,实现节水高效,促进农业的可持续发展。

### 三、灌溉排水工程的发展历程

#### (一) 国外灌溉排水工程的发展

灌溉排水这一古老工程技术可以追溯至新石器时代。从世界范围而言,有文字记载的最早的灌溉工程,是公元前 3400 年左右美尼斯王朝修建在埃及孟菲斯城附近截引尼罗河洪水的淤灌工程。约公元前 2200 年巴比伦在底格里斯和幼发拉底河河谷建造了当时世界上规模最大的奈赫赖万灌溉渠道。印度、古罗马、古波斯等国的灌溉,起源也都很早。公元前 2500 年左右,印度就有引洪淤灌,到 20 世纪 30 年代,印度开始应用现代工程技术修建大型自流灌溉工程,同时发展小型提水灌溉与井灌。伊朗、叙利亚、意大利等国的灌溉,也有几千年的历史,其中伊朗和亚美尼亚等国,以坎儿井众多闻名。19 世纪中叶,在美国西部大盐湖河谷地带,开始了移民垦殖,发展灌溉。20 世纪初,美国联邦政府开始在西部 17 个州进行以灌溉为主的水利综合开发,1985 年全美喷灌面积达 0.089 亿  $\text{hm}^2$ ,占其总灌溉面积 (0.243 亿  $\text{hm}^2$ ) 的 37%。苏联的灌溉农业也有较长的历史,公元前 6 世纪阿姆河和锡尔河流域就开始了灌溉。十月革命后,灌溉事业有了较大的发展,主要灌区集中在中亚细亚。

全世界灌溉面积 1950 年为 9600 万  $\text{hm}^2$ ,1985 年为 2.2 亿  $\text{hm}^2$ ,增加 1.2 倍,到 2002 年增加到了 2.77 亿  $\text{hm}^2$ 。灌溉面积占耕地面积的比例由 1950 年的 7% 增加到 1985 年 16%,2002 年超过了 20%;灌溉农田的农产品产值约占全部农产值的一半。世界上灌溉面积最多的国家为中国和印度,其次为美国和巴基斯坦(表 0-1)。欧洲西部一些国家,因雨量较丰沛,且分布较均匀,灌溉设施一般较少。据预测,全世界人口到 21 世纪中叶,将增加 47%,而耕地只能增加 4%,为满足未来对粮食的需求,主要靠提高单位面积产量,因此,发展灌溉仍将是今后发展农业的重要措施之一。今后世界灌溉发展的趋势是:①灌溉方法仍将以地面灌溉为主,喷、微灌面积会有较大的发展;②为提高灌溉水的利用系数,缓解水资源紧缺程度,渠道防渗、管道输水和非充分灌溉等节水灌溉技术将日益发展;③改进灌溉管理,提高灌溉自动化程度。计算机、遥测、遥控和 3S 等新技术将得到广泛应用。

#### (二) 国内灌溉排水工程的发展

##### 1. 新中国成立前的灌溉排水事业

我国有悠久的灌溉发展历史,在人类文明史上有着辉煌灿烂的成就。早在 3000 多年

表 0-1 世界灌溉面积 (处于前 25 位的国家, 2002 年, 引用于 FAOSTAT 2005)

国家和地区	灌溉面积占耕地的比例 /%	灌溉面积 /10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup>	国家和地区	灌溉面积占耕地的比例 /%	灌溉面积 /10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup>
埃及	100	3.4	西班牙	28	3.8
乌兹别克斯坦	96	4.3	墨西哥	25	6.3
巴基斯坦	83	17.9	印度尼西亚	23	4.8
伊拉克	60	3.5	土耳其	20	5.2
日本	59	2.6	法国	14	2.6
孟加拉国	58	4.6	美国	13	22.5
伊朗	50	7.5	哈萨克斯坦	11	2.4
越南	45	3.0	乌克兰	7	2.3
中国	38	54.9	巴西	5	2.9
印度	35	57.2	澳大利亚	5	2.5
意大利	34	2.8	俄罗斯	4	4.6
罗马尼亚	33	3.1	前 25 位国家合计		232.1
泰国	31	5.0	全世界合计		276.7
阿富汗	30	2.4			

前的商周时期,就有了蓄水、输水、分水、灌水、排水不同功能的人工灌排系统,称为“井田沟洫”制度。公元前 591 年就建成了芍陂蓄水灌溉工程(位于今天的安徽省寿县,现在叫安丰塘),灌溉农田数十万亩(1 亩=1/15hm<sup>2</sup>),至今仍在发挥着效益。公元前 251 年建成的无坝引水工程都江堰,引岷江水灌溉川西平原沃野良田,使之成为“水旱从人,不知饥荒”的天府之国。在人们精心维护管理和改造扩建下,历经 2000 多年而不衰,并且灌溉面积扩大到目前的 1130 万亩,这在世界灌溉史上是绝无仅有的奇迹。公元前 246 年秦国在陕西泾水上修建了无坝引水的郑国渠,以后改建成今天的泾惠渠。古代灌溉事业的发展,提高了作物产量,发展了区域经济,使灌区成为当时的经济繁荣发达地区,促进了古代农耕文明和社会进步,也为封建王朝统一中国,扩大疆域,巩固政权创造了条件。但是受历史条件的局限,几千年来我国农田灌溉事业发展缓慢。20 世纪 30~40 年代,近代水利先驱李仪祉先生等,学习、引进、吸收西方先进水利科技,规划和兴建了如陕西关中泾惠渠、渭惠渠等一批著名灌溉工程,缩小了我国灌溉工程技术与西方工业发达国家的差距。到新中国成立的 1949 年,全国有标准不高的农田灌溉面积 2.4 亿亩,占耕地面积的 16.3%。利用近代工业和科技成果发展起来的机电排灌,起步于 20 世纪 20~30 年代的东南沿海地区,到 1949 年新中国成立前,动力设备保有量只有 7 万 kW,灌排面积 380 万亩,其中 2/3 集中于江苏南部。在漫长的封建社会和半封建半殖民地社会,我国农业基础设施十分脆弱,农业生产水平低下,大部分地方的农业“靠天吃饭”,粮食不能自给,几亿农民长期处于缺吃少穿、不得温饱的贫困状态。农业基础的不稳,制约着整个经济社会的发展。

## 2. 新中国成立后灌溉排水事业的发展

新中国成立以后，国家提出了“农业是国民经济的基础”、“水利是农业的命脉”等方针，对兴建水利、发展灌溉排水给予高度重视，采取了一系列促进灌溉排水事业发展的政策和措施，组织广大农民坚持不懈地兴修水利，先后建成了上千万处多种类型的蓄水、引水、提水灌溉工程，几十年发展的灌溉面积超过了以往数千年的总和。截至 2012 年年底，全国灌溉面积 10.16 亿亩，其中节水灌溉面积 4.68 亿亩，包括渠道防渗节水灌溉面积 1.92 亿亩，占 41.1%；低压管道输水灌溉面积 1.13 亿亩，占 24%；喷微灌面积 0.99 亿亩，占 21%；其他节水灌溉面积 0.64 亿亩，占 16.5%。全国有大型灌区 447 处，控制有效灌溉面积 2.51 亿亩；大型灌溉排水泵站 450 处，装机功率 563 万 kW，控制有效灌溉面积 1.47 亿亩、总有效排涝面积 1.37 亿亩；中型灌区约 7300 多处，控制有效灌溉面积 2.31 亿亩；全国拥有塘坝、小型泵站、机井、水池水窖等独立运行的小型农田水利工程 2000 多万处，包括塘坝 600 多万处，引水堰（闸）110 多万处，小型排灌泵站 47 多万处，灌溉机电井 430 多万眼，水池、水窖（柜）等小型集雨工程 600 多万处。大中型灌区末级渠道、小型灌区固定渠道近 300 万 km，固定灌溉管道约 180 万 km，相应的配套建筑物近 700 万座。

2012 年全国总供水量 6131.2 亿  $m^3$ ，其中地表水源占 80.8%，地下水源占 18.5%，其他水源占 0.7%。总供水量中：生活用水 739.7 亿  $m^3$ （其中城镇生活用水占 74.3%），占总供水量的 12.1%；工业用水 1380.7 亿  $m^3$ ，占总供水量的 22.5%；农业用水 3902.5 亿  $m^3$ ，占总供水量的 63.6%；生态环境补水 108.3 亿  $m^3$ ，占总供水量的 1.8%。中国以占全国耕地 50% 的灌溉面积生产了占全国总产量 75% 的粮食，80% 的经济产品和 90% 的蔬菜。中国以占全世界 9% 的耕地，养活了占世界 22% 的人口，重要原因之一是有较发达的灌溉排水基础设施。

伴随着大规模的灌溉排水工程建设与改造，灌溉排水新技术的研究开发和应用推广也取得了很大成绩。如地表水与地下水互补、联合调配使用的井渠结合技术，丘陵山区蓄引提结合多水源综合开发、联合调度利用技术，灌区中低产田旱涝碱综合治理技术，渍害低产田改造技术，喷灌技术，微灌技术，沟畦地面灌溉改进技术，水稻控制灌溉技术，旱作物非充分灌溉技术，雨水集蓄利用技术，计划用水优化调配管理技术等。与此同时，在灌溉排水基础理论和应用技术基础研究方面也取得了一批有价值的成果，如节水灌溉条件下农作物需水规律、作物水分生产函数与节水机理，大气水、地表水、地下水、土壤水四水转化，饱和—非饱和土壤水和溶质运移规律，土壤—作物—大气连续体水分传输机理与计算模型等。

为了适应新形势、新任务、新要求，今后灌溉排水事业发展的工作重点将放在已有灌溉设施的改造和管理体制的改革上，使灌溉水利用率大幅度提高，达到 60% 以上。充分考虑水资源承载力和供水条件，以非充分灌溉、节水灌溉为主，既重视提高用水效率，同时更重视提高水分生产率、单位水量创造的价值和纯收益；既重视生产实践经验，更重视科学技术的应用。

## 四、灌溉排水工程学研究对象及主要内容

灌溉排水工程学的研究对象主要包括认识农田水旱灾害发生发展规律，采取适宜措

施,如调节农田水分状况以及改变和调节地区水情等,最大程度地减小水旱灾害造成的损失,实现区域光、热、水、土资源的高效利用。

### 1. 农田水旱灾害

农田水旱灾害主要包括涝、渍、干旱、洪水和盐碱化。不同区域,发生的水旱灾害类型不同,发生的程度也有所不同。要分类分区研究农田水旱灾害,以便针对不同情况采取相应的措施。

(1) 涝。降水过多、排水不畅,发生旱地积水,水田淹水过深,造成农作物歉收的现象。单纯由于当地雨水过多,久久不能外排而产生的涝灾,叫做内涝,也称沥涝。实际发生的涝灾,往往伴有来自上游的地面径流和河水漫溢,以至洪涝难分。有涝必有渍,合称渍涝,或统称为涝。涝的危害,在于恶化土壤通气条件,造成作物根部缺氧。

(2) 渍。地下水位过高或土壤上层滞水,因而土壤过湿,影响作物生长发育,导致作物减产的现象。渍水导致土壤中气体交换受阻,妨碍作物根系的呼吸作用。长期渍水的土壤,氧的供应不足,好气性细菌活动减弱,嫌气性细菌活动加强,有机物分解缓慢,养分供应失调,土壤中还原作用增强,产生沼气,一氧化碳、亚硝酸盐、硫化氢、低价铁等有毒物质,抑制种子发芽,阻碍根系正常发育。持续的通气不良,会导致根的死亡。

(3) 干旱。植物耗水大于根系吸水,体内水分不足,甚至过度亏缺而受害的现象。根据干旱发生的原因,可分为大气干旱、土壤干旱和生理干旱三种。大气干旱的主要特征是大气相对湿度低,阳光强,温度高,有时还伴随干热风。在这种情况下,植物的蒸腾作用加速,甚至气孔失去控制能力,不正常地持续张开,以致植物在短期内大量失水,造成蒸腾失水和根系吸水的极不平衡,严重危害植物的生长发育。土壤干旱是土壤水分不能满足植物需要的一种干旱现象。当土壤中速效水分丧失殆尽时,植物因水分不足而出现旱象。生理干旱是由于土壤温度过低或土壤溶液的浓度过高等原因,使植物根部生理机能受扰不能正常吸水出现的干旱现象。

(4) 洪水灾害。洪水泛指大水,通常是指超过江河湖库等容水体的承纳能力,造成水量剧增或水位急涨的水文现象。洪水会给人类的生存和社会发展造成损失与祸患,称为洪水灾害。由于用水与交通的要求,自古以来沿河、滨湖、近海地区,就是人民的聚居区,而附近平坦的沃土,又是主要的农业区,工业也多在这些地带布设、发展。这些地区是最易遭受洪水威胁和发生洪灾的地区。洪灾发生频率高、范围广,而且影响比较深远。洪水灾害的主要防治措施包括工程措施和非工程措施。工程措施有水土保持措施、分(蓄)洪工程措施、堤防工程措施、以及河道整治等。非工程措施主要有洪水灾害检测与预警、洪水灾害救济与社会捐助以及设立洪水灾害保险与基金等。

(5) 盐碱化。土壤中含有过多的盐碱成分,对农作物有危害。在土壤学中,把这类土壤称为盐渍土或盐碱土。土壤中的盐碱成分,主要由钾、钠、钙、镁等阳离子和氯、硫酸根、碳酸根、碳酸氢根等阴离子结合成多种盐组成。其中氯盐和硫酸盐类为中性盐,碳酸钠(苏打)和碳酸氢钠(小苏打)为碱性盐。盐分在土壤和地下水中大部分以溶液状态存在。溶液在蒸发作用下浓缩,当浓度超过饱和点时,则有一部分盐析出沉淀,变成固体状态。土壤盐碱化的主要原因是地下水埋深过浅、地下水矿化度(水中含盐量大小称为矿化度)高,气候干旱。

## 2. 调节农田水分状况

农田水分状况一般是指农田土壤水、地面水和地下水的状况及其相关的养分、通气、热状况。农田水分的不足或过多，都会影响作物的正常生长和作物的产量。调节农田水分状况的水利措施主要有灌溉和排水。灌溉措施是按照作物的需水要求，通过灌溉系统有计划地将水量输送和分配到田间，以补充农田水分的不足；排水措施包括控制水量和水质两个方面，一个是通过修建排水工程将农田内多余的水分排入容泄区，使农田土壤处于适宜的水分状况。一个是在易涝易碱地区，利用排水工程控制地下水位和排除土壤盐分。

调节农田水分状况方面需要研究如下几方面的问题。

(1) 研究农田水、盐运动规律，探求土壤、作物和水分、盐分之间的内在联系，以指导排灌和改造中、低产田，控制适宜的土壤水分和地下水位，促进农业高产、优质、高效。

(2) 研究节水灌溉的技术和理论。节水灌溉是充分利用水资源、提高灌溉效益，促进农业可持续发展的重要措施，在国内外均得到了普遍重视，已开展了多种节水灌溉技术的试验研究和示范推广，如渠道防渗、低压管道输水、喷灌、微灌、膜上灌、节水灌溉制度、井渠结合灌溉以及工程节水与农艺节水相结合的措施等。但是各种节水灌溉措施都有一定的适用条件，在不同地区和不同情况下应采取哪种或哪些措施，还需要进行深入研究；而且每一种节水灌溉技术和节水灌溉理论，例如非充分灌溉的节水理论、高产高效的作物需水规律和作物水分生产函数等，都有待进一步开展试验研究。

(3) 研究不同地区灌排工程的合理布置，做到山、水、田、林、路综合治理，既便于灌排和控制地下水位，又适应机耕。目前国外灌排工程的发展趋势是地下管道化。暗管排水在我国有些地区也有一定的发展，但地下排灌面积还不到耕地面积的5%。因此如何进一步提高地下排灌理论，发展灌排新技术、寻求合适的管材和降低费用等，亟待研究。

(4) 研究灌排工程施工机械化。灌排工程是面广量大的水利工程，实现机械化施工，对加速灌排工程的兴建与配套具有重要的意义。目前我国主要依靠人力施工，与技术先进的国家相比，差距很大，今后应在发展运输、浇筑、凿岩和机电排灌等机械的同时，研究发展开沟、衬砌、铺管等各种专用机械，以逐步实现农田水利施工机械化。

(5) 研究灌排工程管理。加强灌排工程管理工作是当前首要任务之一，管理好坏直接影响灌排工程效益的发挥，因此必须针对当前灌排系统实际存在的问题，改革管理体制，研究切实的工程管理和用水管理措施，做到适时适量灌水，及时排水和控制地下水位，减少渠道渗漏，防止次生盐碱化，充分发挥工程效益。除少数试点外，我国目前尚无完善的自动化灌排系统。今后须加强遥测、遥控等自动化管理新技术的研究，实现灌排管理现代化。

(6) 研究系统工程和电子计算技术在灌排水方面的应用，提高灌排工程规划设计和运行管理的技术水平。

## 3. 改变和调节地区水情

随着农业生产的发展和需要，人类改造自然的范围越来越广，农田水利措施不仅限于改变和调节农田本身的水分状况，而且要求改变和调节更大范围的地区水情。

地区水情主要是指地区水资源的数量、分布情况及其动态。我国幅员辽阔，水资源在不同地区以及不同年份和季节分配不均，供水与需水在时间和空间上亦常不一致，时旱、

时涝或涝旱交替出现。这是影响农业高产稳产的一个重要原因，因此，发展灌溉，首先要根据水土资源条件，通过各工程措施，改变和调节地区水情。

改变和调节地区水情的措施，一般可分为以下两种：

(1) 蓄水保水措施。通过修建水库、河网和控制利用湖泊、地下水库以及大面积的水土保持和田间蓄水措施，拦蓄当地径流和河流来水，改变水量在时间上（季节或多年范围内）和地区上（河流上下游之间、高低地之间）的分布状况，通过蓄水措施可以减少汛期洪水流量，避免暴雨径流向低地汇集，可以增加枯水时期河水流量以及干旱年份地区水量贮备。

(2) 调水排水措施。调水排水措施主要是通过引水渠道，使地区之间或流域之间的水量互相调剂，从而改变水量在地区上的分布状况。某一地区水源缺乏时，可借引水渠道及取水设备人工河道自水源（河流、水库、河网、地下含水层等）充足地区调配水量，我国已建成的引滦入津工程和引黄济青工程及在建的南水北调工程（东线、中线）等，都是调水工程的典型例子。汛期某一地区水量过多时，则可通过排水河道将多余水量调送至地区内部的蓄水设施存蓄，或调送至水量较少的其他地区。

随着我国社会经济的快速发展和城乡人民生活水平的提高，工业、农业、生活以及生态环境用水量日益增长，因此，研究最有效地利用水资源的科学理论，合理调配水资源，最大限度地保证各部门用水要求，同时解决好洪涝等灾害，便成为我国水资源工程现代化的一个重要内容。在这方面需要研究以下一些问题：

(1) 在深入调查水量供、需情况的基础上，研究制定地区长远的水资源规划及水土资源平衡措施。

(2) 研究当地地面水、地下水和外来水的统一开发及联合运用，应用系统工程的理论与方法，寻求水资源系统的最优规划和运行方案。

(3) 研究洪涝规律，采取有效措施，解除洪涝威胁，并同水资源开发利用结合起来统一规划，做到洪涝旱碱综合治理。

(4) 研究水资源开发、利用和保护等方面的经济效益、生态环境和社会福利问题，探求符合社会主义市场经济原则的水资源系统规划、管理的经济论证方法。

总之，无论是调节农田水分状况还是地区水情，都是要认识自然规律，总结农田水利建设的经验，坚持科学态度，讲究经济效益，并从理论和技术上解决农田水利现代化中出现的新问题，把农田水利科学技术不断推向前进。

# 第一章 农田灌溉原理

## 第一节 农田土壤水分运动基本方程

在陆地水循环过程中，依地表下水分存储状况，将储存水分的区域分为非饱和带（或称为包气带）和饱和带。通常将存在于非饱和带的水分称为土壤水，储存于饱和带的水分称为地下水，土壤水是联系农田地表水和地下水的纽带。地面水和地下水只有通过一定的转化关系转化为土壤水分，才能为作物吸收利用。农田土壤水直接影响作物生长的水、气、热、养分等状况，与作物生长关系密切，是作物生长环境的核心要素之一。

### 一、田间土壤水分的表示

田间土壤水分的表示通常有土壤含水率和土壤水势两种方法，其中土壤含水率又有重量含水率和体积含水率之分。

#### 1. 土壤含水率

土壤含水率（习惯上称为含水量）是指一定量的土壤中所含有水分数量的多少，又称土壤湿度。土壤含水率是土壤的一个重要物理性质指标，是分析土壤的各种物理和力学特性与土壤水分运动和保持的重要参数。

土壤含水率是土壤所含水分数量占干土重量的百分比，用以表示土壤的湿度，有以下两种表示方法。

#### (1) 土壤重量含水率。

$$\theta_m = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% = \frac{M - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中： $\theta_m$  为土壤重量含水率； $M_w$  为水的质量； $M_s$  为干土质量； $M$  为原土样质量（湿土质量）。

由于  $M_w$  及  $M_s$  可利用称重法得到，因此利用质量的百分比来表示土壤的含水率容易求得。但它是相对指标，不能表示含水率的绝对值，难以对不同土壤质地含水率做比较。

#### (2) 土壤容积含水率。

$$\theta_v = \frac{V_w}{V} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： $\theta_v$  为土壤容积含水率； $V_w$  为水的容积； $V$  为土样总容积。

因土壤水分容积不易在现场直接测定，故先求土壤水分重量百分比，再转换为体积百分比：

$$\theta_v = \frac{V_w}{V} = \frac{\frac{M_w}{\gamma_w}}{\frac{M_s}{\gamma_s}} = \frac{M_w M_s}{V \gamma_w M_s} = \gamma_0 \theta_m \quad (1-3)$$

式中： $\gamma_w$  为水的容重，一般取  $\gamma_w = 1.0$ ； $\gamma_0$  为土壤容重 ( $M_s/V$ )（也称干容重）。 $\theta_v$  对砂性土壤，一般为 40%~50%，中等质地土壤为 50%，黏性土壤约为 60%。



如用土层中的水深表示土层含水总量，则用

$$h = Z\theta_v \quad (1-4)$$

式中： $Z$ 为土层厚度，mm。

## 2. 土水势

根据国际土壤学会的定义，土壤水势为：在标准大气压下，将单位数量的水等温可逆地移动到相应点（标准参照状态）时所做的功。水分从土壤移动做功所需要的能量即为该系统的土壤水势能或简称土水势。在势的概念中，所谓相应点一般是指在大气压下具有相同温度的自由水表面。在自由水面的选定方面，常常是选择空旷的水池的自由水表面或是地下水的水表面作为自由水面。用这些水表面作为相应水位，其水势为零。

土水势在决定土壤中水的状态和运动上有着极为重要的作用。可应用于土壤中水分运动的所有过程，如渗透、排水以及毛管水上升等。土壤中两点间水的势能差造成水分在土壤中流动的趋势，土壤水分就是从势能较高的部位向势能较低的部位运动，并在这一移动过程中释放能量。这个运动一直持续到其总土水势在土壤中所有部分都相等为止。了解等温系统中势能的差，就可决定水流的方向，而且还能定量地计算出使水流动所必须做的功。这就是用势能观点来研究土壤水分的优点。

标准参照状态是指一定高度处、某一特定温度（常温或与土壤水相同温度）下，承受标准大气压（或当地大气压）的纯自由水（不含溶质、不受固相介质作用）。

土壤水势用公式表示如下：

$$\varphi = ah \quad (1-5)$$

式中： $\varphi$ 为水势，J/kg； $a$ 为加速度， $m/s^2$ ； $h$ 为距相应水位处的高度，m。

从定义上来讲，土壤水受到若干力的作用，这些力都不同程度地改变了土壤水的能量状态。因此，总土水势是土壤中所有各种作用力产生的分势的总和，即

$$\varphi = \varphi_m + \varphi_s + \varphi_p + \varphi_g + \varphi_T \quad (1-6)$$

式中： $\varphi$ 为总土水势； $\varphi_m$ 为基质势； $\varphi_s$ 为溶质势； $\varphi_p$ 为压力势； $\varphi_g$ 为重力势； $\varphi_T$ 为温度势。

重力势是将单位数量的土壤水从某一点移动到标准参照状态（或参考状态）处，而其他各项维持不变时，土壤水所做的功。基质势是指土壤基质对水分的吸持作用，相对于大气压力所存在的势能差称为压力势。由于溶质对水分子具有吸引力，将水分移动到标准参照状态时，必须对土壤水做功，这种溶液与纯自由水之间的势能差称为溶质势，又可称为渗透势。温度势系由温度场的温差引起。

## 二、土壤水分常数

土壤中所保持的水分依其所受力的不同，可分为吸湿水、膜状水、毛管水和重力水。其

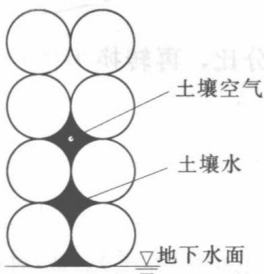


图 1-1 上升毛管水

中吸湿水和膜状水主要受土壤吸附力作用，毛管水是受土壤毛管力作用保持在土壤中的水分。重力水受重力支配，在重力作用下，重力水进一步向土壤剖面深层移动。其中，毛管水依其在土体中的分布又可分为毛管悬着水和毛管上升水。在地下水埋深较大情况下，降水或灌溉水等地面水进入土壤，借助毛管力保持在上层土壤毛管孔隙中的水分，称为毛管悬着水；借助毛管力的作用，由地下水上升进入上层土体的水，称为毛管上升水（图 1-1）。毛管水上升高