

农业节水与水资源 高效利用

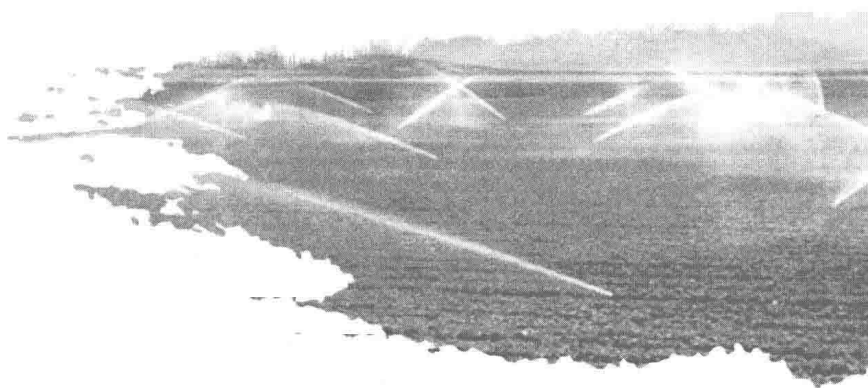


*Nongye Jieshui yu Shuiziyuan
Gaoxiao Liyong*

● 刘淑慧 © 著

中国城市出版社
CHINA CITY PRESS

农业节水与水资源 高效利用



● 刘淑慧 ◎ 著

中国城市出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

农业节水与水资源高效利用 / 刘淑慧著. —北京:
中国城市出版社, 2014.11

ISBN 978-7-5074-3000-4

I. ①农… II. ①刘… III. 农田灌溉—节约用水—
研究②农田水利—水资源利用—研究 IV. ①S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 004202 号

责任编辑	吕洪梅
装帧设计	美信书装设计工作室
责任技术编辑	张建军
出版发行	中国城市出版社
地 址	北京市西城区广安门南街甲 30 号 (邮编 100053)
网 址	www.citypress.cn
发行部电话	(010) 63454857 63289949
发行部传真	(010) 63421417 63400635
总编室电话	(010) 68171928
总编室信箱	citypress@sina.com
经 销	新华书店
印 刷	廊坊市海涛印刷有限公司
字 数	160 千字 印张 12
开 本	710×1000 (毫米) 1/16
版 次	2015 年 4 月第 1 版
印 次	2015 年 4 月第 1 次印刷
定 价	45.00 元

版权所有, 盗印必究。举报电话: (010) 68171928

前言

水是一切生命过程中不可替代的基本要素，也是维系国民经济和社会发展的基础资源。节约用水，既是关系到人口、资源、环境可持续发展的长远战略，也是当前经济和社会发展的一项紧迫任务。我国是世界上 13 个贫水国之一，人均水资源占有量只有世界人均水平的 1/4。同时，有限的水资源在时空分布上也很不均匀，占国土面积 50% 以上的华北、西北、东北地区的水资源量仅占全国总量的 20% 左右。水资源短缺已成为制约国民经济和社会发展的瓶颈。

农业灌溉是用水大户，但由于灌溉方式和管理方式落后，农业灌溉水利用率非常低，水的浪费现象非常严重。解决农业水资源短缺问题的出路就是发展农业节水，在全国范围内推广节水农业。农业节水包括农业水资源的合理开发利用与优化配置、输配水系统的节水、田间灌溉过程的节水、用水管理节水以及农艺节水等方面，贯穿于从水源到形成作物产量的各个环节。其中，输配水和田间灌溉过程中的节水潜力较大，是当前工程技术节水的主要方向之一。

针对我国农业用水的特点，基于以上的问题，本书在以下方面进行了探索：

在已经开展的节水灌溉措施中，究竟节约了多少水，这些节水措施对于解决国家和区域缺水究竟起了什么作用，以及如何建立适合地区发



展的农业高效用水体系。本书内容分为六章：第1章介绍水资源、农业水资源的概念，以及国内外水资源状况；第2章介绍国内外农业用水情况、农业节水理论以及我国农业节水技术存在的问题；第3章针对节水潜力较大的节水农业工程措施，研究节水农业工程措施节水量（灌溉取水节水量以及真实节水量）和土壤水资源利用量；第4章提出节水农业工程措施节水量以及土壤水资源利用量的计算方法；第5章以河北省坝上高原区为例，进行灌溉取水节水量、资源型节水量、效率型节水量和土壤水资源利用量的计算，提出适合该区的节水灌溉措施；第6章介绍综合农业节水技术体系，并提出今后我国节水农业重点技术发展方向。

在本书的构思和写作过程中得到了河北农业大学程伍群教授的启发和指导，另外，太原理工大学研究生孙杨、李森、郭建忠帮助完成了部分资料收集和整理工作，在此表示衷心的感谢。同时对给予帮助及关心本书编著的所有亲人和朋友表示深深的谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者和有关专家予以批评指正，以利于本书的修正完善及作者研究水平的提高。

著者

2014年11月

目 录

前言	001
1 水资源现状	001
1.1 水资源与农业水资源	001
1.1.1 水	001
1.1.2 水资源	003
1.1.3 农业水资源	005
1.1.4 土壤水资源	010
1.2 世界水资源状况	012
1.2.1 世界水资源总量和分布	012
1.2.2 世界水资源形势	014
1.3 我国水资源状况	016
1.3.1 我国水资源特点	016
1.3.2 我国水资源开发利用情况	023
1.3.3 河北省水资源状况	023
2 农业用水与节水农业	026
2.1 国内外农业用水情况	026
2.1.1 世界农业用水情况	027



2.1.2	我国农业用水情况	029
2.1.3	河北省农业用水情况	040
2.2	农业节水理论	045
2.3	农业高效节水灌溉理论	051
2.3.1	研究动态	051
2.3.2	节水灌溉的必要性及节水潜力分析	055
2.4	我国农业节水技术及存在的主要问题	057
2.4.1	我国农田推广应用的先进节水技术	057
2.4.2	存在的主要问题	061
3	节水农业工程措施	073
3.1	节水农业工程内涵与技术措施	073
3.1.1	节水农业工程内涵	073
3.1.2	节水农业工程技术措施	074
3.2	不同节水农业工程措施及发展概况	075
3.2.1	节水农业工程措施	076
3.2.2	节水农业工程发展现状	081
3.3	节水灌溉工程措施节水量研究	083
3.3.1	节水量计算研究进展	084
3.3.2	灌溉取水节水量的内涵	086
3.3.3	真实节水量的内涵	088
3.4	节水灌溉工程措施土壤水资源利用量	089
3.4.1	土壤水资源利用研究进展	089
3.4.2	土壤水资源利用量的内涵	092
4	灌溉工程节水量及土壤水资源利用量的计算	096
4.1	灌溉工程措施的水量平衡分析	096

4.2	灌溉取水节水量计算	099
4.2.1	灌溉取水节水量的合成与分解	099
4.2.2	灌溉取水节水量的分析与计算	100
4.3	真实节水量计算	101
4.3.1	真实节水量计算涉及的物理机制	101
4.3.2	真实节水量的构成	103
4.3.3	“资源型”节水量的计算方法	104
4.3.4	“效率型”节水量的计算方法	108
4.4	土壤水资源利用量的计算	110
4.4.1	节水灌溉措施对田间土壤水调控机制	110
4.4.2	田间土壤水资源利用量计算方法的确定	111
4.4.3	模型中参数的确定	112
5	灌溉工程节水量计算——以坝上高原区为例	114
5.1	坝上高原区分区及水资源状况	115
5.1.1	分区情况	115
5.1.2	水资源状况	115
5.2	分区灌溉情况、作物种植情况	117
5.2.1	塞罕坝、御道口片	117
5.2.2	平安堡片	120
5.2.3	康保、张北、沽源片	123
5.3	灌溉取水节水量的计算	126
5.3.1	毛灌溉定额的确定	126
5.3.2	灌溉取水节水量的计算	128
5.4	“资源型”节水量的计算	132
5.4.1	净灌溉定额的确定	132
5.4.2	“资源型”节水量灌溉水损失系数的确定	135

5.4.3	现状年“资源型”节水数量分析	136
5.5	“效率型”节水量的计算	140
5.6	土壤水资源利用量的计算	143
6	农业高效用水体系	147
6.1	农业节水技术体系构成	147
6.2	国际现代节水高效农业发展趋势	152
6.3	我国节水农业重点技术发展方向	161
	参考文献	177





水资源现状

1.1 水资源与农业水资源

1.1.1 水

水是生命之源,原始生命起源于水(海洋),生命的组成和生命过程,不管是水生生物还是陆生生物,无论是动物还是植物,都离不开水。水的生物学意义在于,它是有机体最重要的组成部分和任何新陈代谢不可缺少的物质,生物体的物质运输和发生的一切生物学变化都离不开水。地球上水的总储量约 13.86 亿立方千米,71% 的地球表面被水体覆盖,若将这些水均匀地分布在地球表面,则平均水深达 2718 米,全球人均占有水量 2.31 亿立方米。

自然界中的水是以不同水体的方式存在的。水体是自然界中具有相同形态、相同性质水的集合,如大气水、土壤水、生物体内水(生物水)、冰川水、海洋水等均可归结为不同的自然界水体。不同的水体分布在地球不同的区域,其数量、质量有很大差异,对自然界及人类社会的意义也各不相同。各种不同的水体通过水文循环相互联系,此消彼长,造成环境生态及人类社会面临的各种复杂的水问题。



大气水体是自然界最活跃的水体，它受到地球上其他水体分布特别是海洋水体的制约，并直接与太阳辐射能量和气候条件紧密相关。生物和人类的生产活动较少直接利用大气水，但大气含水量是最重要的环境因素，也是陆地上其他水体的源泉（陆地上一切可持续利用的水都来源于大气降水）。

土壤水是地球陆地上分布最广的水体，它存在于土壤颗粒四周（薄膜水）和土壤颗粒之间形成的细小空隙之中（毛管水），受土壤颗粒的分子引力和毛管力作用，主要来源于大气降水（陆地上超过 60% 的大气降水转化为土壤水），虽然某时刻的土壤中储量并不大，但代谢迅速，周年总量可观。土壤水消耗于土壤表面蒸发和植物蒸腾，是陆地生态环境和农业生产的决定性因素。它不可被直接开采和输移，但可以通过人工灌溉等措施来进行调控。一个区域的生态环境和农业生产潜力，直接决定于该区域土壤水数量和区域土壤水量的周年平衡，如果土壤水量偏离区域多年平均状态，过少则会造成干旱，长期过少会引发沙漠化，过多则会造成涝灾，长期过多还会引发沼泽化。

动植物体内的水分，虽然总量有限（只占地球总淡水量的 0.003%），但却是地球上最重要的水体。在组成生物体的成分中，水占的比例最大，据测定，植物体内的含水量一般为 60% ~ 80%，有的高达 90% 以上。动物体内的含水量也大致类似，鱼类体内的含水量为 70%。人的胚胎发育到 3 天时，所含水量达 97%，发育到 3 个月时，含水量为 91%；到 8 个月时含水量为 81%；新生儿的含水量为 80%，一岁时的含水量已和成人差不多，成人的含水量为 65%。生物在生命活动过程中都离不开水，没有水生物体就不能进行新陈代谢和吐故纳新，生命即宣告结束。

冰川是以固态形式存在的地球上最大的淡水水体，地球上 68.7% 的淡水存在于冰川之中，水量代谢缓慢，相对稳定，虽然很少被直接利用，但地球确实需要维持一个相对稳定的冰川水量。目前，由于气候有变暖趋势，冰川储水量也有减少趋势，这样不仅减少了人类发展所需要

的淡水战略储存,也使人类面临海平面上升、水文循环变异、地球水体重新分布等棘手问题。

地下水是存在于地球土壤颗粒形成的较大孔隙、岩石裂隙或溶洞中,在地球引力作用下可以流动的水体,可以被开采和输移。地下水分为浅层地下水和深层地下水两类,浅层地下水可以直接接受大气降水通过土壤入渗补给,是人类可适量开采利用的重要水源;深层地下水(也叫承压水)循环缓慢,补给困难,但总储水量巨大,是人类发展重要的后备水源。目前,世界许多地区面临地下水超量开采问题,造成了诸多水文地质灾害,也极大影响了陆地水文循环和水体分布,是水资源可持续利用面临的一个重大挑战。

地表水体存在于江河湖海之中,但我们关心的主要是其中的淡水。地球上地表淡水量只占地球总淡水量的 0.3%,但更新较快,世界平均更新速度为 16 天。地表淡水为人类社会发展提供了最直接的水源,同时也是最重要的环境要素。人类对地表淡水开采利用最充分,目前世界最大的水利工程均是对地表淡水进行调控利用。短时超量的地表淡水也会造成洪涝灾害,而且,地表淡水数量和质量的变化的变化,是水资源危机的重要诱因。

全球淡水储量 0.35 亿立方千米,占地球水总储量的 2.53%。绝大部分淡水被固定在两极冰盖、高山冰川、永久冻土底冰以及深层地下含水层中,其余约占全球水量的 0.3%,但与人类生活、生产活动最密切可以利用的河流、湖泊、土壤水和浅层地下淡水,只占这 0.3% 淡水中的 1%。

1.1.2 水资源

“水”和“水资源”两词在含义上是有所区别的。就太阳系来说,地球是唯一有生命的星球,非常重要的原因是地球上存在着水。地球的表面约有 70% 以上面积为水所覆盖,若从地球的外层空间看地球,地球

是一颗闪耀着蔚蓝色光辉的美丽球体。地球享有“蓝色的星球或水的星球”之美称，是因为其表面绝大部分被水体包围，这只能说明水体的储量很大，但“水”不等于“水资源”。

“资源”的概念源自经济学科，是作为生产实践的自然条件和物质基础提出来的。从经济学角度而言，凡是对人类有用且数量有限（稀缺）的东西均可视为资源。传统上将资源分为自然资源、人力资源和资本资源三类，近年来也有人将信息视为第四类资源。自然资源一般指天然存在的自然物，如土地、矿藏、水资源等，不包括人类加工制造的原材料。自然资源分为可再生资源及不可再生资源两类。水资源是自然资源中的重要一类，是基础性自然资源和经济资源，也是人类赖以生存的环境资源。

目前关于水资源的定义，学术界尚无公认定论。《英国大不列颠大百科全书》将水资源（Water Resources）定义为“全部自然界任何形态的水，包括气态水、液态水和固态水”。这种解释适用于地球上的全部水，但在实际应用中对此种定义感到无所适从，因此1963年的《英国水资源法》将水资源定义为（地球上）具有足够数量的可用水源，该解释虽然较前者科学，但仍然有泛谈之感。1988年联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）给水资源下的定义是“作为资源的水应该是可供利用或可能被利用，具有足够数量与质量，并可为满足某地对水的需要而能长期、适当地供应的水源”。《中国大百科全书》的“大气科学、海洋科学”卷中的定义是“地球表层可供人类利用的水，包括水量（水质）、水能和水能资源，一般指每年可更新的水量资源”。《中华人民共和国水法》第二条规定：“本法所称水资源，是指地表水和地下水。”由此可见，水资源的定义有广义和狭义之分。

广义的水资源，指地球上水的总和。即以固态、液态和气态的形式，存在于地球表面和地球岩石圈、大气圈、生物圈之中的全部的水。水的固态、液态和气态在太阳能驱使和日地运行规律的支配下，处于变化运



动之中，存在着大体上以年为周期的水循环。水循环中最活跃的为大气降水、蒸（散）发、入渗和河川径流等，它们的年动态水量比静储量大多得多。水循环中相对不活跃的为：海洋水、冰盖和深层地下水等，年动态水量只占其巨大静储量的极小部分。广义的水资源概念表达了地球上的全部水量，但忽略了水在时间、空间与质量上的差别。

狭义的水资源指在现有人类社会和技术条件下能被人类利用和对人类有价值的淡水。人类比较容易利用的淡水资源，主要是河流水、淡水湖泊水，以及浅层地下水，储量约占全球淡水总储量的 0.3%，是直接关系人类社会生存与发展的命脉之源。地表水指河流、湖泊、水库蓄水、冰雪融水等地表水体，其输入为大气降水，输出为河川径流、水面蒸发和土壤入渗。浅层地下水包括空隙水、裂隙水、岩溶水等，是赋存于地下含水层的水体，其输入为降水和地表水的入渗，输出为河川基流、潜水蒸发和地下潜流。土壤水指赋存于土壤包气带的水量，土壤包气带处于地表和地下水面之间，其厚度是随地下水水位升降而变化的，土壤水的输入为降水和地表水的土壤入渗，输出为土壤蒸发、河川径流（土壤中流）和入渗补给地下水。陆地的地表水、土壤水和地下水，在水循环的背景下相互转化。狭义的概念考虑水资源的时间与空间、数量与质量差别，界定水资源是在现有人类社会经济和技术条件下能被人类利用和对人类有价值的淡水，强调了水资源的经济属性和社会属性。

1.1.3 农业水资源

农业是指以土地资源为生产对象的部门，利用土地资源进行种植的活动部门是种植业；利用土地空间进行水产养殖的是水产业，又叫渔业；利用土地资源培育采伐林木的部门是林业；利用土地资源培育或者直接利用草地发展畜牧的是畜牧业；对这些产品进行小规模加工或者制作的是副业，这些都是农业的有机组成部分；对这些景观或者所在地域资源



进行开发展出的是观光业,又称休闲农业。广义农业包括种植业、林业、畜牧业、渔业、副业五种产业形式。狭义农业是指种植业,包括生产粮食作物、经济作物、饲料作物和绿肥等农作物的生产活动。

本文采用狭义农业的概念,因此,农业水资源是可为农业生产使用的水资源,包括地表水、地下水和土壤水。其中,土壤水是可被作物直接吸收利用的唯一水资源形式,地表水、地下水只有被转化为土壤水后才能被作物利用。经净化处理的废污水也是一种重要的农业用水水源。大气降水被植物截留的部分也可视作农业水资源,但因其量较小(仅占全年降水量的2.5%左右),通常被忽略。降水、地表水、地下水对农业的补给具体表现如下:

(1) 降水

降水对农田是一种间断性的直接补给,也是农业水资源最基本的部分。在中国,年降水量大于800毫米的地区是湿润带,除降水直接提供作物生长需水外,仍需发展水利灌溉,在时间上补充雨水的不足。年降水量为400~800毫米的地区是半干旱半湿润带,降水量多集中在7~8月,需要调蓄汛期雨水所形成的地表径流,以供早期灌溉之用。年降水量为200~400毫米的地区是干旱半干旱地带,在这类地区农业须依赖于蓄水、引水或提水工程。

(2) 地表水

地表水主要是河川湖泊径流。江河在其水文动态许可范围内可为沿途提供农业用水,江河中下游平原是农业用水集中的地区,常需在河道上游修建蓄水工程,以调节水资源在时空上的不均衡。必要时可实施跨流域调水,以调剂流域间水资源的不平衡。

(3) 地下水

地下水包括丘陵山区的泉水、基岩裂隙水、冲积平原地区的浅层地下水、南方喀斯特地区的岩溶水等。农业用水以开采浅层地下水为主,深层地下水一般作为应急备用水源。



(一) 水与农作物生理活动的关系

水和农作物的生长发育有着极其密切的关系，这是因为水是农作物生理活动的必备条件，水对农作物的生活环境也有着直接或间接的影响。

(1) 水是作物体的重要成分

作物体内含有大量的水，通常占鲜重的 60% ~ 80%，蔬菜体重的 90% 都是水。作物体内只有水分充足时才能保持其固有的形态，植株挺立，叶片舒展，有利于接受阳光照射和与周围环境进行气体交换，进行旺盛的生理代谢活动。

(2) 水是作物制造有机质的重要原料

作物的生长过程就是作物体内有机质积累的过程。这个过程是靠作物叶片的光合作用完成的，作物叶片好比是一座光合作用的工厂，叶绿体是这座工厂中的机器，太阳光是开动机器的动力，而水和二氧化碳则是光合作用的原料，加工生产出来的产品是以淀粉为主的有机物质。淀粉在酶的作用下转变为脂肪，在无机盐的参与下合成蛋白质，所有这些过程都离不开水。

(3) 水是作物所需养料的溶剂

第一，作物种子里贮藏的供种子发芽和幼苗生长所需的营养物质，只有在被水溶解后才变得有效，所以种子萌发期不能缺少水。第二，施入土壤中的肥料，只有被水溶解变为土壤溶液，才能被作物根系吸收并输送到作物体的各部位，保证作物的正常生长发育。第三，作为光合作用重要原料之一的二氧化碳，也要首先溶解于水，以碳酸的形式渗入叶肉细胞内；同时，作物叶片通过光合作用形成的有机质，也要以水溶液状态向作物的消费器官和贮藏器官等各部分转移。可以形象地说，水是作物的“血液”。

(4) 水是维持作物叶面蒸腾的必备条件

作物根系从土壤中吸取的水分，一小部分用作光合作用的原料，而



绝大部分通过叶片的气孔以蒸汽的形式扩散到大气中去，这就是作物的蒸腾作用。蒸腾作用对作物生活有着重要意义。第一，蒸腾作用调节着作物体温，因为作物叶片大量接受阳光，体温不断升高，当高到一定程度就会使作物无法生活，而叶片的蒸腾可带走大量的热，使作物体温得到调节。第二，蒸腾作用还促进了作物体内水分和无机盐的上升流动。作物根毛吸水后通过根、茎、叶的导管输送水分，在导管中形成一股连续不断的水柱。叶片蒸腾，叶内细胞失水，就使导管的吸力加大，促使根毛不断从土壤中吸收水分。第三，叶片蒸腾时，气孔开启，对吸收二氧化碳制造有机物质也是有利的。

（二）水与作物生活环境的关系

水对作物生活环境有着深刻的影响，它不仅影响着土壤环境，如土壤温度、空气和养分等状况，而且对农田的小气候也有一定影响。

（1）水与土壤温度的关系

作物生长发育需要一定的土壤温度条件，土壤温度过高、过低或急剧变化对作物生长发育都是不利的。土壤水分的多少对于土壤温度有着明显的调节作用。这是因为水的热容量比空气的热容量约高 3300 倍，比土粒的热容量高 5 倍左右，水的导热率也高，比空气的导热率高 25 ~ 30 倍。在白天，湿润的土壤比干燥的土壤更能大量吸收太阳的辐射热，并将热量向土壤深层传导，表土的温度不会急剧升高；而在夜间气温下降时，湿润的土壤较干燥的土壤释放热量慢，而且深层土壤的热量又能较快地向上输送，这样表土的温度就不会急剧下降。但是，土壤过湿对土壤的温度状况是不利的。

（2）水与土壤空气的关系

土壤由固体、液体、气体三类物质组成，固体物质包括粗细不等的矿物颗粒、有机物质和微生物。在土壤颗粒之间的孔隙里充满水和空气，水来气去，水去气来，二者此消彼长。为了保证根系很好地吸水吸肥和