

土壤水分与植物生长

刘孝义 依艳丽 张大庚 著

TURANG
SHUIFEN
YU
ZHIWU
SHENGZHANG



辽宁科学技术出版社

LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

图 书 在 册 编 目 (CIP)

土壤水分与植物生长 刘孝义 依艳丽 张大庚 著

土壤水分 与植物生长

刘孝义 依艳丽 张大庚 著

140mm x 203mm

印 张 9.75

插 页 2

字 数 300 千

印 数 1-1000

出 版 时 间 2007 年 11 月 第 1 版

印 刷 时 间 2007 年 11 月 第 1 次 印 刷

责任编辑 姜亚春

封面设计 吕敬人

版式设计 于 康

责任校对 姜亚春

书 号 ISBN 978-7-311-02376-0

定 价 32.00 元

邮 政 电 话 024-23284370

辽宁科学技术出版社

E-mail: dlscs@mail.lnpgc.com.cn

· 沈阳 ·

http://www.lnpgc.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤水分与植物生长/刘孝义, 依艳丽, 张大庚著. 沈阳:
辽宁科学技术出版社, 2007. 11

ISBN 978 - 7 - 5381 - 5276 - 0

I. 土… II. ①刘…②依…③张… III. 土壤含水量 - 关
系 - 植物生长 - 研究 IV. S152.7 Q945.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 165112 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳全成广告印务有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 9.75

插 页: 2

字 数: 300 千字

印 数: 1 ~ 1000

出版时间: 2007 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2007 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 寿亚荷

封面设计: 比格图文

版式设计: 于 浪

责任校对: 李淑敏

书 号: ISBN 978 - 7 - 5381 - 5276 - 0

定 价: 35.00 元

联系电话: 024 - 23284370

邮购热线: 024 - 88493106

E-mail: dlazs@mail.lnpgc.com.cn

http: //www.lnkj.com.cn

内容提要

本书概要地介绍了土壤水分国内外研究的历史和现状。论述了土壤水分的基本物理性质、土壤毛管水行为、土壤水分的能量状态、土壤水和地下水平衡、土壤饱和水和非饱和水运动、土壤 SPAC 体系中水分运动、土壤水分与植物生长以及有关排灌问题。

本书可供从事土壤、农业、水利土壤改良、农业气象、水文地质、农业生态和农业环境等方面的教学、科研及农业技术推广工作者参考。

前言

学海无涯苦作舟，创新务实悦发展。

《沈阳晚报》2006年11月6日报道，我国“十五”期间，平均每年因旱灾减产粮食350亿千克。国家防汛抗旱指挥部统计显示，截至2006年8月26日，全国作物受旱面积1.6亿亩，其中重旱面积5854万亩，干枯面积1696万亩。可见，干旱灾害严重地制约着我国农业生产发展。

土壤水分一直是土壤学学科领域中重点研究内容。近百年来，尤其是近50年来，土壤水分研究已取得了丰硕的研究成果，为农业生产、水利工程建设等诸多领域作出了重大贡献。

《土壤水分与植物生长》一书在概括地介绍土壤水分研究发展史的基础上，论述了土壤水分的基本物理性质、土壤毛管悬着水和毛管支持水的行为、土壤水分的能量状态、土壤水分和地下水平衡、土壤饱和水和非饱和水运动、土壤—植物—大气体系（SPAC）中水分运动、土壤水分与植物生长。

20世纪50年代末，笔者之一于莫斯科大学攻读研究生期间有幸聆听前苏联科学院土壤研究所土壤水分研究室主任、著名土壤学家A. A. 罗代（РОПЭ）教授讲授土壤水分问题，受益匪浅。A. A. 罗戴教授不仅学识渊博，其“土钻”和实干的创新精神激励着笔者的一生，不言虚度。

土壤水分时空变异甚大，难以用所谓某种数学模型来表达。研究土壤水分行为及其与植物生长的关系，必须用静态和动态的方法定量观测土壤水分的“质”和“量”。故在本书中用一定的篇幅介绍了相应的土壤水分研究法，以便读者定量观测有关土壤

水分行为的实际数值。

本书可供土壤学、水利土壤改良学、植物营养学、农业气象学、水文地质学、土质学、作物栽培和耕作学、农业生态学和农业环境学等学科领域中研究生和科学工作者等参考。

《土壤水分与植物生长》一书系由依艳丽、张大庚和我共同撰写而成。另有研究生栗杰、程希雷、袁春龙、樊德祥、张蕾、周咏春、谷微微、崔悦宏和赵妍等参加打字和绘图工作。

本书的出版得到了刘更另院士的关怀和支持，在此深表感谢。

书中不足之处，望读者指正。

刘孝义

于沈阳农业大学土地与环境学院

2007年4月12日

目 录

前言

第一章 绪论

第一节	概述	1
第二节	土壤水分研究历史和现状简介	3
第三节	土壤是植物生长的“自然水库”	7
第四节	土壤水分研究的基本内容和任务	8

第二章 水的基本性质

第一节	水的构造和性质	10
第二节	水的渗透性	12
第三节	水的毛管现象	13
第四节	毛管凝结现象	15
第五节	水的黏滞系数	16
第六节	介电性质	17

第三章 土壤水分的基本物理性质

第一节	土壤水分单位	18
第二节	土壤水分常数	20
第三节	土壤含水量的测定	26

第四节	土壤水分资料整理	36
第五节	土壤水势能的测定法	40

第四章 土壤吸湿水与气态水

第一节	土壤吸湿水	49
第二节	土壤气态水运动	51
第三节	土壤吸湿膜状水	54
第四节	土壤浸润热	57

第五章 土壤毛管水

第一节	概述	61
第二节	土壤毛管悬着水	68
第三节	土壤毛管支持水	74

第六章 土壤水分的能量状态

第一节	概述	83
第二节	总土水势及其分势	85
第三节	土壤水分特征曲线及其影响因素	95
第四节	土壤持水力与土壤水分类型关系	101

第七章 土壤水分运动

第一节	概述	105
第二节	饱和土壤水分运动	107
第三节	非饱和土壤水分运动	117
第四节	土壤气态水运动	136
第五节	土壤水与其他相关物质的并发运动	138
第六节	土壤渗透势的测定	139

第八章 土壤水分循环

第一节	土壤水分平衡·····	143
第二节	土壤蒸发·····	151
第三节	土壤渗透·····	167

第九章 地下水运动

第一节	概述·····	182
第二节	地下水平衡·····	185
第三节	浅层地下水的研究·····	194
第四节	地下水流量的测定·····	211

第十章 土壤水分与植物生长

第一节	概述·····	232
第二节	土壤—植物—大气连续体·····	233
第三节	植物吸水与蒸腾·····	238
第四节	土壤水分与作物产量·····	244
第五节	科学管理和调控土壤水资源·····	250

第十一章 灌溉与排水

第一节	概述·····	253
第二节	灌溉·····	254
第三节	排水·····	275
第四节	洗盐·····	287

参考文献	·····	299
------	-------	-----

第一章

绪论

水是生物物质的重要组成部分；

没有水就没有生命。

没有水则没有土壤；

土壤是“自然水库”。

第一节 概 述

众所周知，阳光、水分、空气、温度和营养物质是植物（生物）生长和发育的必备条件，缺一不可，而水分在土壤形成和发育过程中起着不可代替的主导作用。换言之，没有水分就没有土壤。在土壤形成和发育过程中的岩石矿物的风化、有机物质的矿化、各种类型土壤形成、土壤有机—无机胶体和土壤结构的形成等均与水分的行为有密切关系。

沼泽土和潜育土是在土体中水分过多、长期处于还原状态条件下发育的土壤类型；盐碱土和次生盐渍土是由于含有盐分的地下水经土体或土壤水分向地表运移蒸发所致，正如中国华北盐碱地区农民流传的谚语所述：“盐随水走，水随汽散，汽散盐存。”还有土壤剖面的发育层，如淀积层、碱化层、潜育层、灰化层、白浆层等均与土壤水分运动有关。

谈及土壤，必须了解土壤的基本属性——土壤肥力，而土壤水分状况是土壤肥力的重要组成部分。土壤水分既是植物生理过程营养物质的传递者，又是植物本身的组成部分。植物在生长过程中形成每克干物质大约需要耗水 1 千克，植物生长如此巨大的

耗水量主要来自土壤。因此，为确保植物正常生长发育，土壤必须有相应保水和供水能力。其供水能力是指土壤所贮存的有效水量和土层的导水量。土壤的贮水和供水能力大小主要取决于土壤机械组成（比表面）、物理性状（紧实度、孔性、结构、温度等）。因此，为了确保植物正常的生长发育，必须有良好的土壤水分状况。

土壤中水分具有固态、气态和液态三种形态。在土壤物理和水利土壤学中常将土壤水分分为吸湿水、膜状水、毛管水和重力水，毛管水又分为毛管悬着水和毛管支持水。不同形态的水在土壤中的保持和运移各遵循相应的定律。土壤中各种类型水分有各自的水分常数，这些水分常数在农田水利、土壤改良和耕作学等中已被广泛应用。在土壤物理学中土壤水分还有一种能量观点，认为土壤受许多力场的作用，这些力场来自土壤固相的基质对水分的吸力以及水中的溶质的存在、外界气压、温度和重力场的作用。土壤的这些力场被称之为土壤水势或土水势。土壤水的总势是由基质势、重力势、溶质势、压力势等分势组成。

土壤是一个开放体系，其中土壤水分时空变异甚大，时刻处于动态变化中。在土壤水分平衡体系中，降水、地下水补给、灌溉是土壤水分主要来源，而土壤蒸发、植物蒸腾、渗漏则是土壤耗水主要贡献者。土壤—植物—大气体系和农田生态系统中水分行为占有极其重要地位。在农业生产领域里，就土壤水分“源”而言，有雨水农业和灌排农业，各种作物平产和高产均要求有相应的土壤水分状况。为获农作物优质高产，土壤（耕作层）中水多则排，水亏则补。

近几年来，我国农业生产实践中流传甚广的一句时尚术语曰“节水农业”。笔者认为“节水农业”用词欠妥，或者说，用词不严谨、不科学。“节水农业”原意是指合理灌溉或“节水”灌溉。目前，我国水资源十分欠缺，在旱作地区为了高产丰收，农田需要灌溉补水，而当今灌溉水利用率仅有40%~45%，为了

提高灌溉水利用率弃漫灌、沟灌等落后的灌溉技术,采用浸润灌、涌灌、喷灌、滴灌和微滴灌等先进灌溉技术,实际上是指节约用水或言节水灌溉。须知,在农业生产实践中,每种农作物在一定的环境条件下,形成每克干物质耗量是一定的,实无节水可言。如按“节水农业”推而广之,不难产生“节肥农业”、“节农药农业”等。笔者建议将“节水农业”一词改为“节水灌溉”。

第二节 土壤水分研究历史和现状简介

在土壤水分研究历史长河中,华夏民族曾作出杰出的贡献,如老幼皆知的“大禹治水三过家门而不入”,堪称世界伟绩的李冰父子带领广大群众建筑的都江堰水利工程和成都平原灌溉工程,至今仍有指导意义。

夏禹治水时(4000多年前),按土地颜色、质地及水分状况,将全国九州的土地划分为“壤”、“黄壤”、“白壤”、“赤埴垆”、“白坟”、“黑坟”、“坟垆”、“涂泥”及“青黎”。春秋战国时代(公元前722—221年)、《管子·地员篇》中记述了土壤水与植物生长的关系,如“星植宜稻麦”,其下水位约2.3米;“赤植宜大蒜与麦”,其地下水约4.6米;“黄唐无宜地,只有黍稷”,其地下水为7米;“赤垆历疆肥,五种无不宜”,其地下水为9.3米。汉成帝时期(公元前32—7年)《汜胜之书》记有宜耕期问题,如“春地气通,可耕硬地里垆土,辄平摩其块以生草,草生复耕之,勿令有块以待时,所谓强土弱之也。”“慎无早耕,须生草,至可耕时,有雨即耕,土相亲,苗独生,草秽烂,皆成良田,此一耕而当五也。不如此而早耕。块硬、苗秽同孔出,不可锄治,反为败田。”北魏时(公元386—534年),《齐民要术》中对耕作时间、深度均以土壤水分状况为依据,如“凡耕高田,不问春秋,必须燥隰得所为佳。若水,旱水凋,宁

燥不隔，燥耕虽块，一经得雨，土则分解。隔耕坚硌，二年不佳。”自古九州大地农民对土壤水分就有较高的认识和管理经验，如用墒来表示土壤水分状况，视黑墒土壤含水量高，黄墒土壤含水量则低；耕种镇压，刨格子播种，利于引墒；铲地除草、松土，割断表土毛细管防止土壤蒸发；北方地区春季在冻土层未化透以前，利用冻土层上部的水分（即“桃花水”）播种种麦；盐碱土地，表层压砂，防止土壤水分蒸发和表土积盐；新疆吐鲁番地区表土铺卵石巧种哈密瓜和坎儿井水利工程等均有土壤水分科学的丰富内涵。

可惜，由于种种原因，劳动人民管理土壤水的知识和经验一直没有上升为理论。建国以前我国土壤水分的研究远不及西方国家。20世纪50年代中国大江南北相继开展了水利工程建设和土壤水分研究工作。三北防护林网、治淮和治黄工程、红旗渠工程以及21世纪初进行的“退耕还林还草”重大举措均涉及到土壤水分行为问题。20世纪50年代王守纯根据土壤水盐运动规律，提出了巧种躲盐的种麦技术，将土壤水分运移规律巧妙地应用于生产实际。近30年来我国许多土壤科学家和农田水利科学家相继开展了土壤水分运动规律、土壤供水性能以及土壤—植物—大气体系中水分行为的研究，并取得了一定的研究成果。李玉山和杨文治等学者系统地研究了西北地区土壤水分状况和供水性能。其研究成果不仅为丰富我国土壤水分运动提供了理论内容，也为干旱和半干旱地区农业生产作出了贡献。

自19世纪中叶（1856年）水利工程师亨利·达西（Henri Darcy）提出了达西定律以来，土壤水分研究经历了150年历史，经历了由简单水分的测定到系统的观测，由定性到定量，由经验到理论，由宏观到微观，由静态观测到动态观测的研究，由单一土壤水分研究到土壤水分—植物—大气体系系统研究。应当提及，土壤水分研究伊始，就密切与农业生产和水利建设相结合。

19世纪末俄罗斯、欧洲某地区曾发生了严重的干旱灾害，

道库恰耶夫 (В. В. Докучаев. 1892) 在《我们的草原过去与现在》一书中论述了干旱原因, 提出了俄罗斯改善和调节水经济的方法, 设立了专门地段研究雪覆盖、土壤冻结深度和土壤解冻等有关土壤水分问题。伊兹曼利斯基 (А. А. Измайльский 1894) 详细的研究了俄罗斯土壤水和地下水状况。20 世纪 30 年代开始, 苏联众多的土壤学家系统地研究土壤水分物理性质、土壤水分平衡和地下水平衡以及水利土壤改良, 为全球土壤水分保持、运动理论和应用做出了卓越贡献。威廉斯 (В. Р. Вильямс 1931) 的团粒结构学说认为土壤良好的结构状况 (水稳性结构体 3~5mm 占主体地位), 有利于调节土壤中水气矛盾, 有利于土壤水分保存和增加水分有效性, 并认为团粒结构是土壤肥力的基础。

布利格斯 (Briggs 1877) 根据水土作用后, 水分和土壤间作用力的关系, 提出了毛管假说, 并将土壤水分进行了形态分类。别列捷夫 (А. Ф. Лебедев 1919) 将土壤水分分为: ①气态水; ②吸湿水; ③膜状水; ④毛管水 (与地下水相连); ⑤毛管悬着水; ⑥重力水; ⑦固态水; ⑧结晶水和化学结构水。堪称土壤水分泰斗的苏联科学院土壤研究所土壤水分研究室主任罗代 (А. А. Рого) 将土壤水分类型分为:

1. 束缚水

(1) 紧束缚水;

(2) 松束缚水。

2. 自由水

(1) 膜状—悬着水;

(2) 对接水;

(3) 毛管—悬着水;

(4) 土壤团聚结构内部悬着水;

(5) 毛管—支持水;

(6) 重力水。

在土壤水分类型中均有相应的土壤水分常数, 如单分子水

层、最大吸湿水、最大分子水容量、凋萎湿度、田间持水量、毛管断裂湿度以及饱和湿度等，这些水分常数均可实测求之。

自1907年白金汉（Buckingham）提出土水势以来，研究土壤水分能量状态及其变化规律有了长足的发展。近30年，应用热力学能量概念不断渗入到土壤水分研究领域，建立许多数学模型，进行了土壤水分定量的动态分析，开展了土壤水分运动与土壤—植物—大气体系中物质和能量交换结合起来的动态研究，并取得了显著的研究成果。

于20世纪50—60年代以前，我国研究土壤水分基本上以形态学为主。20世纪60年代我国也相继进行了一些土壤水分能量理论研究，尤其是近20年来，土水势的理论已被广泛采用。述及土壤水的能量概念，认为任何一个土—水平衡系统，均有与之有关的能量。如土壤水由一个平衡系统转移到另一个系统，此时对于每一平衡系统不是输出就是接受能量。也就是说，水从一个系统转入另一个系统时，水能够做功，也就有做功的势，即可将此能量称之为势能。能量观点认为当两个水势不等的平衡系统相接触时，高势能的水就流向低势能的系统，直至两个平衡系统水势相等为止。通过水势梯度来研究土壤—植物—大气体系中水分行为较为实际，可以定量地解释水分运移本质。但是，我们在实际进行土壤水分行为研究时，不应否定土壤水分形态分类和水分有关常数的价值和意义。笔者认为“能量”与“形态”各有其长，持否定一方的观点不可取，将二者相结合研究土壤水分有利于学科发展。

随着学科发展，现代高科技理论和测试手段不断渗透到土壤水分研究领域，如应用水分传感器、遥感技术定位观测土壤水分。随着保护地农业、节水灌溉技术以及耕作制度的改进，土壤水分研究已有了长足的进步，传统的研究方法也在发生着变化。但是，应当指出，土壤水分时空变异甚大，野外田间实测研究仍然很重要。

当今，国内外开展了土壤—植物—大气连续体系中物质与能量交换的研究，其中生态体系中土壤水分行为的研究必将对土壤水分科学产生深远影响，同时也会对持续农业和生态环境建设产生影响。

第三节 土壤是植物生长的“自然水库”

土壤在农业生态系统中是一个很有效的贮水介质，换言之，土壤是一个十分巨大的“自然水库”。例如，0~100厘米土层土壤容积平均含水量为28%，每公顷土壤贮水量应为280万千克，100~200厘米土层土壤容积平均含水量为26%，则该土层单位含水量为260万千克/公顷，每公顷200厘米土层土壤含水量则为540万千克。如果100~200厘米土层为毛管支持带（图1-1），其水分含量与地下水补给有关。此时如0~100厘米土层土壤平均含水量为26%，100~200厘米土层土壤平均含水量为32%（毛管支持水带），故0~200厘米土层单位面积土体水量为580万千克/公顷。可见，土壤贮水量是巨大的，尤其是当毛管支持水带达到植物根层中，植物生长所需水分还可以从地下水经毛管水上升移动源源不断补给。

在农业生产实践中，应该重视和合理开发这一自然水利资源。

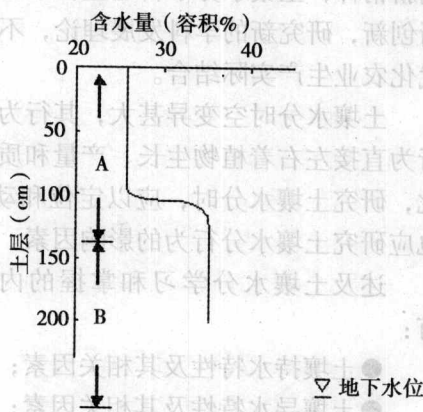


图1-1 0~200厘米土层土壤水分曲线示意图

- A. 毛管支持水（开壁）或毛管悬着水
B. 毛管支持水（封闭）带

第四节 土壤水分研究的基本内容和任务

我国正在执行中央制定的“十一五”国民经济发展规划,对科技和农业发展均提出了要求。可持续农业、生态环境建设、农田水利工程等领域均有水分内容。在干旱和半干旱地区、涝洼农田以及盐碱土等地区土壤水分为研究尤为迫切。目前,我国高产作物栽培、保护地栽培等农业生产模式正在蓬勃发展,其中,土壤水分保持和供水能力的研究占有十分重要的地位。高产优质农作物生产必须有良好的土壤水分状况。

当今,我国经济建设正处于日新月异的发展时期,农业与其他学科一样也处于伟大的变革时代,诸如新兴学科、交叉学科和数字化农业兴起,现代科学理论和研究手段不断更新。根据自主创新精神,土壤水分学科也应在学习传统的学科成就的基础上不断创新,研究新的学科发展理论,不断改进研究手段,密切与现代化农业生产实际结合。

土壤水分时空变异甚大,其行为受诸多因素影响。土壤水分行为直接左右着植物生长、产量和质量,也影响着生态环境。因此,研究土壤水分时,应以定位和动态研究、观测为主,同时,也应研究土壤水分行为的影响因素。

述及土壤水分学习和掌握的内容以及应该研究的问题应有:

- 土壤持水特性及其相关因素;
- 土壤导水特性及其相关因素;
- 土壤水分平衡及与土壤水分相关的浅层地下水平衡;
- 毛管悬着水和毛管支持水运动规律;
- 土壤有效水及其调节;
- 土壤—植物—大气体系中土壤水分行为;