



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



水稻水分生产函数及其 时空变异理论与应用

昝 智 崔远来 李远华 著

E & M
Engineering Material
科学出版社



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

水稻水分生产函数及其 时空变异理论与应用

茆智 崔远来 李远华 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是作者对所承担的两项有关水稻水分生产函数国家自然科学基金项目研究工作的总结,是国内外第一部论述水稻水分生产函数的专著,由国家自然科学基金研究专著出版基金资助出版。

全书共分9章,主要包括:水分亏缺对水稻腾发、生长发育、生理活动及产量的影响,我国北方及南方各类水稻水分生产函数模型及模型中参数数值,水稻水分生产函数随时间(生育阶段、水文年度)的变化规律,水稻水分生产函数随空间(地域)的变化规律,水稻水分生产函数及其时空变异性在指导水稻节水灌溉、非充分灌溉中的应用。

书中内容是以多点多年的专项田间试验资料为依据,通过理论分析、计算,提出一些规律性成果,既进行理论探讨,又结合实际提出可操作的技术,并举出实例。

本书可供从事或涉及节水灌溉、特别是水稻节水灌溉的科技人员及大专院校师生参考应用。

图书在版编目(CIP)数据

水稻水分生产函数及其时空变异理论与应用/茆智,崔远来,李远华著.
—北京:科学出版社,2003
ISBN 7-03-011438-8

I. 水… II. ①茆…②崔…③李… III. 水稻水分-时空变异-应用
IV. K878.85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 26447 号

责任编辑:谢洪源/责任校对:包志虹
责任印制:刘秀平/封面设计:陈 敬

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2003年5月第一次印刷 印张:8 3/4 插页:2
印数:1—1 200 字数:199 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

作物水分生产函数反映作物产量随水量变化的规律。在水源不充足的条件下,灌溉工程的评估、规划、设计、用水管理以及水资源开发利用规划、地区水利规划和灌溉经济效益分析计算,都要以它为基础依据。因此,发达国家从 20 世纪 60 年代起就对此课题进行专门研究,70 年代以后,此项研究已成为农田灌溉试验研究中的最主要课题。我国从 80 年代起陆续有数省开展此项研究。但是,国外至今基本上未研究水稻水分生产函数,我国以往对作物水分生产函数全集中于研究旱作物,因此对于水稻水分生产函数的研究,在国内外几乎成为空白。

水稻是我国主要粮食作物之一,也是耗水量最大的灌溉作物。我国水稻小部分分布在北方,虽然占全国比重不大,但绝对面积可观。北方稻区处于干旱半干旱地区,水资源不足,水量供需矛盾问题日益严重,甚至有些灌区由于缺水而难以维持继续种稻。全国绝大多数的稻田分布在南方,虽然南方降水及水资源比北方丰富,但由于降水在年际、特别是年内分布极不均匀,水资源在地区间的分布亦不均匀,南方每个省份都有数百万亩甚至上千万亩的稻田水源不足,加之工业及城镇生活用水的急剧增长,缺水问题也日益突出,在南方水稻节水也成为当前发展高产、优质、高效农业的最重要问题之一。因而,无论北方还是南方,对稻田实行节水灌溉甚至非充分灌溉,已成为当地水稻地区保障农业可持续发展的最重要措施之一。水稻的节水灌溉、非充分灌溉,需要以水稻水分生产函数为依据,因国内外均缺乏水稻水分生产函数的研究成果,旱作物的研究成果不能用于水稻,故水稻水分生产函数及其时空变异性的研究,在当前及今后对我国以及在国际上均有重要实用意义;同时开展此问题的试验研究,对提高水稻节水灌溉的科学理论水平亦有重要价值。

有鉴于此,武汉水利电力大学(现武汉大学水利水电工程学院)的水稻节水灌溉研究组于 1991 年申请并获得批准,开展国家自然科学基金项目“水稻水分生产函数及稻田非充分灌溉原理研究”(第 59079380 号)的研究工作。针对此项目,1991 年至 1994 年,由武汉水利电力大学主持,与河北省灌溉中心试验站及广西桂林地区(现桂林市)农田灌溉试验中心站合作,分别于河北唐山市及广西桂林市开展北方中稻及南方双季早、晚稻水分生产函数的专项田间试验及机理性精密实验,根据这些试验及实验成果,通过理论分析计算,提出了适合于我国北方及南方不同类型水稻的水分生产函数,填补了国内外空白。在国内外首次提出了水稻水分生产函数随气象条件呈规律性变化的概念,揭示了其变化规律,提出了 Jensen 模型中水稻的水分敏感指数与参照作物需水量及其频率建立关系的数学模型,并根据此模型提出了水稻水分生产函数在时、空两方面插补、延长、移用与扩展的理论与方法,提高了点上及个别年份水分生产函数资料的实用价值。以水稻水分生产函数及其时空变异规律为基础,运用动态规划原则,提出了确定不同水资源条件下优化灌溉制度的方法,并运用此方法,提出了北方与南方典型稻区不同水资源条件下优化灌溉制度,经河北省唐山市、广西桂林市较大面积上的应用,取得了明显的节水、增产效益。该项

目成果 1995 年被水利部鉴定为国际先进水平,获 1995 年水利部科技进步二等奖以及 1996 年国家科技进步二等奖。

为了进一步深入地研究水稻水分生产函数,特别是深入研究国内外从未开展过的水稻水分生产函数时空变化规律,武汉水利电力大学水稻节水灌溉研究组又于 1996 年申请并获得批准,开展国家自然科学基金项目“水稻水分生产函数时空变化规律的研究”(第 59479024 号)的研究工作。对于该项研究,1996~1999 年,继续与原来两个合作单位合作,又在原来两个基地上开展田间试验与机理实验,以延长试验成果的年份系列,并分析广西、河北等地土壤、地形及 20 世纪 60 年代以来历年水稻需水量、产量的资料,进一步深化与扩展了上一个国家自然科学基金项目的内容,特别是在水稻水分生产函数的时空变化规律方面,提出了全生育期累积函数及分阶段函数的时空变化规律,在国内外首次提出了制定水稻水分生产函数等值线图的原理与方法,并首次绘出了以省(自治区)为范围的水稻水分生产函数等值线图。此外,在水稻水分生产函数及其时空变化规律的应用方面,又以水分生产函数为依据,对于多种作物供水条件,提出确定各种作物最优灌溉制度及灌溉水量最优分配的原理及方法,以及确定降雨随机条件下,稻田最优灌溉制度与灌水量最优分配的原理与方法,并举出应用实例。在 1996~1998 年,武汉水利电力大学水稻节水灌溉研究组又与湖北省水利水电科学研究所合作,开展“湖北省水稻节水高产灌溉技术与水分生产函数研究”,针对湖北省的自然与水稻生产条件,提出该省水稻水分生产函数及其时空变异性,绘出该省水稻水分生产函数等值线图,并应用于全省水稻节水灌溉。“水稻水分生产函数时空变化规律研究”的成果,于 2002 年被水利部鉴定为国际先进水平,并获 2002 年教育部提名国家科学技术奖科技进步一等奖。

本书的主要内容,是作者们对其主持的有关水稻水分生产函数上述两项国家自然科学基金项目和一项湖北省科学基金项目试验研究成果的系统总结,以期本书的出版对于提高我国作物水分生产函数、水稻节水灌溉与优化灌溉方面的学术理论有所促进,并发挥指导水稻节水灌溉的实际作用。本书可供从事水稻节水灌溉试验研究的科技人员、大专院校教师及硕士、博士研究生以及从事水稻节水灌溉工程规划、设计、管理的科技人员参考、使用。对于从事旱作物节水灌溉,特别是非充分灌溉的试验研究人员、大专院校师生及生产实践科技人员亦有参考价值。

在开展水稻水分生产函数及其时空变化规律各个研究项目的试验研究工作中,得到广西桂林市灌溉试验中心站、河北省灌溉中心试验站及河北省唐海县农业科研所、河北滦河下游灌区管理处、湖北省水利水电科学研究所以及湖北省漳河灌区灌溉试验站的全力合作,这些单位参加合作的主要人员有:李新建、方荣杰、王春日、粟有科(桂林市灌溉试验中心站),谢礼贵、武兰春、郭建民(河北省灌溉中心试验站),赵春民、马子峰(河北唐海县农业科研所),董长山(河北滦河下游灌区管理处),张祖莲、薛继亮(湖北省水利水电科研所),陈崇德、赵长友、王建章、吴化南(湖北漳河灌区灌溉试验站)。此外,在开展研究工作及编写本书的过程中,还得到河海大学房宽厚教授、华中农业大学陈明亮教授和中国水利水电科学院蔡林根教授的指导和帮助。在此,对这些单位及所有关心、支持与帮助本研究及本书的专家及同志们表示深切的谢意。

本书的出版,得到国家自然科学基金研究专著出版基金资助,科学出版社为本书的出版做了很大的努力,著者们亦表示衷心的感谢。

本书共分 9 章,各章节撰写的分工如下:第一章:茆智;第二章:崔远来;第三章:李远华;第四章:李远华、张明柱;第五章:茆智;第六章:茆智;第七章:崔远来;第八章:崔远来;第九章:茆智。茆智负责全书的统稿工作。

至今,国内外对水稻水分生产函数,特别是生产函数的时空变异性缺乏深入、系统的研究,不仅缺乏生产需要的成果,而且也缺乏理论方面的分析与探讨,编写本书虽试图弥补这方面的不足,在理论与应用方面均有所贡献,但由于我们水平有限,开展此专项研究的时间不长,亦缺乏经验,很多问题属于探索性内容,定会存在不少缺点以及不当与不成熟之处,请有关专家多加批评指正,也希望今后能在全中国汇集更强的技术力量,针对水稻水分生产函数及其应用的问题,开展进一步研究。

著 者

2003 年 1 月

· 工 · 程 · 与 · 材 · 料 · 科 · 学 · 系 · 列 ·



国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
1.1 水稻水分生产函数及其时空变异性研究的意义	(1)
1.2 水稻水分生产函数及水分生产函数时空变异性研究的现状	(2)
1.3 本书主要内容	(4)
第二章 作物水分生产函数概念及数学模型	(5)
2.1 充分灌溉与非充分灌溉概念	(5)
2.2 作物水分生产函数概念	(7)
2.3 作物水分生产函数的数学模型	(11)
第三章 水稻水分生产函数田间试验方法及主要观测成果	(23)
3.1 试验站自然地理条件	(23)
3.2 试验处理	(24)
3.3 试验与观测方法	(27)
3.4 腾发量及产量的典型试验成果	(30)
第四章 水分亏缺对水稻腾发和生长发育以及产量的影响	(37)
4.1 水分亏缺对水稻腾发影响	(37)
4.2 水分亏缺对水稻生长发育和生理活动以及产量的影响	(46)
第五章 水稻水分生产函数模型	(57)
5.1 按全生育期总腾发量建立的水稻水分生产函数模型	(57)
5.2 考虑各生育阶段腾发量影响的水稻水分生产函数模型	(60)
第六章 水稻水分生产函数随时间变化规律	(71)
6.1 Jensen 模型敏感指数 λ 在全生育期内的变化规律	(71)
6.2 水稻水分敏感指标随水文年度的变化规律	(75)
第七章 水稻水分生产函数空间变化规律	(85)
7.1 敏感指数随不同地域变化规律	(85)
7.2 水稻敏感指标 K_s 等值线图研究	(87)
第八章 水稻水分生产函数及其时空变异性的应用——水源充足与不足条件下水稻地区优化配水技术	(97)
8.1 非充分灌溉优化配水技术研究动态及评述	(97)
8.2 非充分与充分灌溉条件下稻田最优灌溉制度	(104)
8.3 多种作物供水条件下农作物最优灌溉制度及灌溉水量最优分配	(114)
8.4 降雨随机条件下稻田非充分灌溉的最优灌溉制度及灌溉水量最优分配	(120)

第九章 结 语.....	(125)
9.1 主要结论	(125)
9.2 主要特点	(128)
9.3 有待进一步解决的问题	(128)
主要参考文献.....	(130)

第一章 绪 论

1.1 水稻水分生产函数及其时空变异性研究的意义

作物水分生产函数反映作物产量随水量变化的规律,是进行科学的节水灌溉的最基本、最重要的函数。在水源不充足的条件下,灌溉工程的评估、规划、设计、用水管理以及水资源开发利用规划、地区水利规划和灌溉经济效益分析计算,都要以它为依据,否则,这些工作就带有盲目性,难以达到节水、高产、高效益的目的。因此,发达国家从 20 世纪 60 年代起就进行专门研究,至 70 年代,已成为农田灌溉试验研究中的最主要课题。我国从 80 年代起陆续有数省开展此项研究。但是,国外的发达国家,认为只有水资源充分地区才宜种水稻,实际上这些国家的水稻也只分布于水源丰富地区,故他们未开展水稻水分生产函数的研究。亚洲发展中国家种稻面积较大,有些地区水资源匮乏,由于科技条件所限,因此也基本上未研究水稻水分生产函数。我国以往对作物水分生产函数的研究,全集中于研究旱作物。对于水稻水分生产函数的研究,以往国内外几乎成为空白。

我国是世界上种稻第一大国,稻田面积达 3172 万 hm^2 (4.758 亿亩),水稻面积及水稻总产量分别占世界的 20.7% 及 33.8%。水稻是我国主要粮食作物之一,也是耗水量最大的灌溉作物之一。全国水稻产量约占粮食作物总产量的 40%,稻田面积约占全国粮食作物的 28%。我国水稻约 8% (近 4000 万亩) 分布在北方(淮河—秦岭—白龙江以北),虽然占全国比重不大,但绝对面积可观。北方稻区处于干旱半干旱地区,水资源不足,水量供需矛盾问题日益严重,甚至有些灌区由于缺水而难以维持继续种稻。全国 92% 以上的稻田分布在南方,在该区域,水稻的灌溉用水量占总灌溉用水量的 90% 以上,虽然南方降水及水资源比北方丰富,但由于降水在年际、特别是年内分布极不均匀,水资源在地区间的分布亦不均匀,南方每个省份都有数百万亩甚至上千万亩的稻田水源不足,加之工业及城镇生活用水的急剧增长,缺水问题也日益突出,在南方水稻节水也成为当前发展高产、优质、高效农业的最重要问题之一。因而,无论北方还是南方,对稻田实行节水灌溉甚至非充分灌溉,已成为当地水稻地区保障农业可持续发展的最重要措施之一。节水灌溉、非充分灌溉,需要以水分生产函数为依据,但水稻与旱作物在水分生理性状、农田水分状况及其调控方式等方面均有差异,导致两者的水分生产函数具有不同的特点,旱作物的研究成果不能直接用于水稻,故水稻水分生产函数及其时空变化的研究,当前对我国有重要实用意义。鉴于以往国内外对此问题尚未研究,开展此问题的试验研究对提高水稻节水灌溉的科学理论水平亦有重要价值。

对于任何一种作物,其水分生产函数的主要参数在时间(水文年度)及空间(地域)两方面均存在很显著的变异性,一个地域、一个年份的成果,不能任意地应用于其他地域、其他年份。为解决此问题,应研究作物水分生产函数时空变化的规律,使一些具体地区、具体年份的研究成果,经过一定的修正或数学处理,能在其他地区和在不同的水文年度,得到合理地应用,从而极大地扩展了水分生产函数成果的应用价值。但是,以往国内外均未

对作物水分生产函数的时空变化规律进行过系统、深入的研究。随着水资源经济价值的不断提高以及非充分灌溉理论与实践的发展,我国需要实行非充分灌溉与优化灌溉的水稻灌溉地域不断扩大,从而需要应用水稻水分生产函数成果的地域不断扩大。一个地方,为取得水分生产函数成果,需进行4~5年以上的试验,试验期长,投资大,但又不可能在需要该项成果的地方均取得试验成果。因而,研究水稻水分生产函数的时空变化规律,解决水稻水分生产函数中主要参数在不同地域、不同水文年度的移用问题,无论从揭示水稻水分生产函数模型的机理方面,还是在解决水稻非充分灌溉工程管理与规划设计的实际问题方面,均有重要意义。

1.2 水稻水分生产函数及水分生产函数时空变异性研究的现状

20世纪60年代以前,国内外对产量与全生育期作物需水量关系进行了大量研究,提出了几十种数学模型,我国至今仍有成百的灌溉试验站开展这种试验研究。但这类研究未考虑在作物不同生育阶段之间水分对产量影响的差异性,因而成果的规律性不强,难以应用。60年代后,美、英、苏等国,开始分阶段地研究水与产量的关系,在此基础上建立生育阶段作物水分生产函数。其中,有两种建立数学模型的途径:①寻求产量与田间供水量(灌溉水量与有效降水量之和)关系;②寻求产量与作物耗水量(蒸发蒸腾量)关系。因前者忽视了土壤水、地下水的调节、补给作用,故发展的趋势是采用后者。产量不单与水分有关,而且也是许多气象因素与非气象因素综合作用的结果,为消去其他因素的影响,真实地反映水与产量关系,在第②途径中,研究的方向是探求相对产量(即实际产量与供水充足条件下产量之比)与相对耗水量(即实际耗水量与供水充足条件下的耗水量之比)关系,或是水分不足条件下的减产率与耗水量降低率之关系。70年代以后,美国、英国、法国、西班牙、保加利亚和前苏联均按照这一途径系统地开展了旱作物水分生产函数的研究,取得大量成果,提出的生产函数模型有30多种,可归为两大类:①相加模型,以Blank模型为代表;②相乘模型,以Jensen模型为代表。在这两类模型的基础上,70年代后期与80年代,又产生了一些改进相加模型与乘加结合模型,其中被采用得较广泛的有Stewart模型,Minhas模型与Singh模型等。这些成果,在国外处于领先地位,也用于实践之中。

以上所论述的各类水分生产函数模型,只是描述作物最终产量(籽粒或干物质产量)与水分的关系,而不考虑作物生长发育过程中干物质累积过程与水分的关系,属于静态模型。为了描述作物生长发育过程中水分对干物质累积过程的影响,并根据这种影响来预测不同时期干物质累积量及最终产量,从20世纪70年代末起,美、欧等国家和地区相继提出水分生产函数的动态模型。这类模型是根据作物干物质累积过程的水分生理作用或是直接根据试验的数据,建立起的描述不同时期干物质累积速率与水分条件关系的模型。静态模型比较直接、简便地模拟与预测作物最终产量,包括籽粒产量及干物质产量,动态模型可以逐时段地模拟与预测作物干物质累积过程,以及最终干物质产量。

由于对水稻水分生产函数研究的最终目的是促进水稻节水与高产,关系密切的是水稻最终的籽粒产量而不是生长过程中干物质累积量,因此,本书亦只涉及静态模型问题。

水分生产函数的研究成果是根据一定地点与一定年份条件下的田间试验成果而取得

的,各类模型,特别是其中的参数,只能用于条件类似的地区与年份。20 世纪 80 年代以来,许多发达国家水资源紧缺问题日益严重,需要进行非充分灌溉的地域日益增多,原有的一定地区与水文年份所取得的成果,已不能满足各地生产上的普遍需要。因而 80 年代后期起,美国开始以州为对象(如加利福尼亚州),大量布点,连续进行多年观测,取得多点的长系列生产函数及其中参数的成果,直接供生产上应用,并未研究作物水分生产函数随时空变化规律。

我国从 20 世纪 80 年代起,有山西、河北、内蒙古、陕西、新疆、宁夏、河南、山东等省、区以及一些院校与中央科研单位陆续开展小麦、玉米、棉花、大豆、牧草等近 10 种作物水分生产函数的试验研究,基本上是采用上述几种有代表性的模型,针对具体地区,确定最适合于本地区的模型,取得模型中的各种系数与指数,并用以进行确定优化灌溉制度。相乘模型考虑各阶段缺水对减产的交互影响较全面,理论上较合理,但国内的试验结果是有些条件下相乘模型较符合实际,另一些条件相加模型更好。至今,这些旱作物水分生产函数模型中参数,只有 1~5 年左右的数值,未能研究我国主要作物水分生产函数时、空变化规律,或是生产函数中参数随时、空变化规律,故成果的应用有很大局限性。

以往,对于水稻水分生产函数,国内外均很少研究。20 世纪 70 年代后期及 80 年代,美国 Doorenbos 运用 Stewart 模型,针对水稻提出一组(不同生育阶段)系数,De Datts 等用盆栽法在温室中进行了系统的水稻分阶段受旱试验,得到相对产量与干旱天数成负相关、与蒸发蒸腾量成正相关的定量关系,属于水稻水分生产函数模型的初始成果,可惜仅是温室中盆栽成果,未开展田间小区考核试验,以后未分析出相应的生产函数模型。国外一些著名的农田灌溉试验研究中心以及国际水稻研究所,近十几年来进行了大量的水稻灌溉制度、灌水方法、需水规律等试验研究,但未开展水分生产函数研究。在我国,80 年代初,安徽、湖北等地开展了较系统的水稻耐旱能力田间试验研究,分析了不同受旱天数与水稻产量的关系,但由于未能揭示水稻产量与分阶段耗水量之间的关系,因而不能被推广应用。进入 80 年代后期及 90 年代初,水利部农田灌溉研究所以及辽宁、山东、安徽、河北、广西等省(区),相继开展了水稻旱管试验、受旱试验、节水灌溉制度试验等,并总结出了许多行之有效的水稻节水灌溉技术,如广西、浙江、湖南、辽宁、河北、安徽、山东、湖北、江苏等省区推广采用的“薄浅湿晒”、“薄露”、“浅湿晒”、“间歇灌溉”、“控制湿润”、“半旱栽培”等等;与此同时,由国际水稻研究所试验研究的水稻间歇灌溉技术也在东南亚一些国家推广应用。以上这类研究,突破了水稻长期淹灌的禁区,并证明水稻短期受旱不会导致产量的明显降低,有时甚至增产。但所有这些成果基本上还仅局限于对丰产条件下的水稻节水进行研究,并未研究水稻水分生产函数及非充分灌溉条件下稻田优化配水技术,更未涉及水稻水分生产函数的时空变化规律。

1987~1988 年,武汉水利电力大学在湖北省的两个试验站开展了水稻水分生产函数试验研究,通过修正 Jensen 模型,取得了水稻水分生产函数的初步成果,并将其应用于湖北省水稻灌溉效益分析计算中。1991~1994 年,由武汉水利电力大学主持并与河北省灌溉中心试验站、广西桂林地区农田灌溉试验中心站合作,承担了国家自然科学基金项目“水稻水分生产函数及稻田非充分灌溉原理研究”,取得了水稻水分生产函数以及稻田非充分灌溉原理比较系统的成果。该项研究成果获 1995 年水利部科技进步二等奖和 1996 年国家科技进步二等奖。

1996~1999年,为进一步深化与扩展上述研究,由武汉水利电力大学主持,亦与广西桂林地区农田灌溉试验中心站合作,又承担了国家自然科学基金项目“水稻水分生产函数时空变化规律研究”的研究工作,1999年后,主要结果在广西、湖北、河北的一些地区推广应用,取得了显著的节水、增产效果,该项研究的成果获2002年教育部提名国家科学技术奖科技进步一等奖。本书中的内容是上述两项国家自然科学基金资助项目主要研究成果的总结。

1.3 本书主要内容

本书主要包括以下内容:

1) 以田间试验成果为主要依据,论述水分亏缺对水稻耗水(蒸发蒸腾)、生长发育及产量的影响;

2) 在田间试验的基础上,提出适用于我国北、南方典型稻作区不同类别水稻的水分生产函数模型;

3) 论述水稻水分生产函数中主要参数随生育阶段及时(水文年)、空(不同地域)的变化规律。介绍依据气象因子及土壤因子预报水稻水分敏感指标的原理、方法及预报数学模型;

4) 提出水稻水分生产函数敏感指数累积函数模型的概念,分析其应用原理和方法,建立不同稻类的水分敏感指数累积函数模型,论述累积函数模型中参数随时空的变化规律;

5) 提出水稻水分生产函数在不同水文年度间插补、延长和在不同地域插补、扩展的原理与方法,介绍水稻水分生产函数中水分敏感指标等值线图绘制原理及方法;

6) 应用水稻水分生产函数及其时空变化规律,以确定水稻优化灌溉制度和水稻地区多种作物之间最优水量分配的原理与方法。

第二章 作物水分生产函数概念及数学模型

2.1 充分灌溉与非充分灌溉概念

作物水分生产函数是各种水源供水能力不足而采用非充分灌溉条件下确定最优灌溉制度与最优配水方案的基本依据,也是确定充分灌溉条件下节水灌溉制度的主要依据。对于作物水分生产函数的研究与应用,首先必须了解充分灌溉与非充分灌溉的概念。

传统的灌溉,目标是通过灌溉使农田获得单位面积最高产量所需要的水分条件,从对农田供水的角度上讲,这种灌溉必须按作物各个生育阶段对水分需求向农田进行充分供水,故称充分灌溉。按照以上的概念及目的,充分灌溉要求作物生长期各个阶段田间水分均能控制在其适宜高产的范围之内。控制田间水分的约束条件如下:

对于旱作物或水稻无水层阶段

$$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \quad (2.1.1)$$

式中: θ 为作物土壤计划湿润层内土壤含水率平均值;

$\theta_{\min}$ 为土壤计划湿润层中允许土壤最低含水率平均值;

$\theta_{\max}$ 为土壤计划湿润层中允许土壤最高含水率平均值;

各种土壤含水率均以占干土重百分比(%)表示。

随着土壤含水率下降,土壤水分吸力增加,土壤含水率降到 $\theta_{\min}$ 时,土壤水分吸力大到开始较显著制约土壤水分向根系的运移以及根系吸水能力,从而较显著抑制作物蒸发蒸腾,以致开始影响产量。 $\theta_{\min}$ 数值与土质、作物及作物生育阶段有关,对于旱作物, $\theta_{\min}$ 一般为田间持水率的 50%~60%,对于水稻,一般为饱和含水率的 50%~60%。不同地区、不同作物、不同阶段的 $\theta_{\min}$ 值,一般由灌溉试验与灌溉实践经验的成果中取得。

对于水稻田无水层阶段, $\theta_{\max}$ 一般采用土壤饱和含水率,对于旱作物,为了避免产生深层渗漏, $\theta_{\max}$ 一般采用田间持水率。

对于水稻有水层阶段,充分灌溉对田间水分的约束条件如下:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \quad (2.1.2)$$

式中: h 为稻田淹水层实际水深;

$h_{\min}$ 为淹水层允许最低水深;

$h_{\max}$ 为淹水层允许最高水深;

各种水层深度单位均以 mm 或 cm 表示。

稻田淹灌水层主要是高产生态条件所需,不同地区,其气象、土壤、水文地质等条件不同, $h_{\min}$ 与 $h_{\max}$ 也不同,一般由灌溉试验与灌溉实践经验确定。

$h_{\min}$ 与 $h_{\max}$ 的大小与水稻蒸发蒸腾量基本无关,但与稻田渗漏量关系密切。当前,在充分灌溉条件下所采用的水稻节水灌溉模式,如间歇灌溉、浅湿晒灌溉、湿润灌溉、半旱栽

培等,多是干湿交替出现,即田间有水层、无水层和土壤含水率低于饱和含水率交替出现,故其田间水分约束条件是综合采用式(2.1.1)与式(2.1.2)。

达不到充分灌溉所要求灌溉定额的灌溉是非充分灌溉,亦称亏水灌溉或限水灌溉。对于旱作物及水稻,非充分灌溉对田间水分的约束条件均是

$$C\theta_p \leq \theta < \theta_{\min} \quad (2.1.3)$$

式中: θ_p 为土壤凋萎系数,单位与 θ 相同;

C 为影响系数,一般为 1.5~3。

可以进一步从作物蒸发蒸腾条件来分析充分灌溉与非充分灌溉的概念。当作物在各个生育阶段所需水分都得到充分满足,配合相应的农业技术,使作物单位面积产量达到最高,此时作物的实际蒸发蒸腾量(腾发量)是产生最高产量的腾发量,称最佳腾发量。充分灌溉是使作物腾发量在各阶段均达到当时最佳腾发量的灌溉。按照腾发量情况,充分灌溉应符合以下约束条件:

$$ET = ET_m \quad (2.1.4)$$

式中: ET 为实际腾发量;

ET_m 为作物最佳腾发量,即作物单位面积产量最高相应的腾发量;

ET 及 ET_m 单位用深度(mm 或 cm)表示,或单位面积上的水量(m^3 /亩或 m^3/hm^2)表示。

充分灌溉能为农作物提供最高单位面积产量要求的农田水分条件,但采用充分灌溉的灌水次数多、每次灌水定额大、作物全生育期单位面积灌溉用水量(灌溉定额)大,在水资源紧缺的条件下,难以满足在所有需要灌溉的耕地上均采用充分灌溉对水量的要求。在这种情况下,有两种出路:一是减少灌溉面积,根据水资源供水能力,使其总面积中一部分面积采用充分灌溉,其余面积不灌溉;另一种是不减少灌溉面积,但限于水资源供水能力,不能按充分灌溉的要求进行灌溉,只能降低单位面积的灌水量,进行非充分灌溉,使单位面积总灌溉水量(灌溉定额)低于充分灌溉所要求的数量。无论是对旱作物还是水稻,在腾发量方面,非充分灌溉的约束条件是

$$ET < ET_m \quad (2.1.5)$$

作物与水关系中有一特性是,在亏水不超过一定限度的条件下,若灌水时间与定额掌握得当,作物产量下降幅度低于灌溉供水量下降幅度,或低于作物蒸发蒸腾量下降幅度。这种关系表明,在水资源不足、灌溉供水量受到限制的条件下,与采用充分灌溉相比,采用非充分灌溉的农业总产量与总的经济效益较高。

在当今水资源紧缺问题日益严重的条件下,我国正大力发展节水灌溉。节水灌溉的目的是取得一定农业经济效益、社会效益与生态环境效益条件下消耗最少的水资源;或者,消耗一定水资源条件下取得最高的农业经济效益、社会效益与生态环境效益。节水灌溉的技术措施是一个综合的体系,包括水资源合理开发利用、减少输水与田间灌水损失、采用节水灌溉制度与合理水量调配方案以及采用节水高产农业技术等。这些技术措施无论在充分灌溉还是非充分灌溉条件下均可采用。充分灌溉与非充分灌溉是属于灌溉制度

与水量调配范畴的用水管理技术。非充分灌溉是水源供水能力不足条件下有效的节水、增产与提高农业经济效益的手段,是节水灌溉中一项有效措施。

我国约有数千万亩稻田分布于北方(淮河—秦岭—黑龙江以北),虽然所占比例不大,但绝对面积可观。北方稻区处于干旱、半干旱地区,水资源亏缺,水量供需矛盾问题日益严重,甚至有些地区由于缺水而难以维持继续种稻,因此该地区水稻不仅必须实行节水灌溉,而且其中许多地区有必要采用非充分灌溉。全国约4亿亩稻田分布在南方,该区域水稻灌溉用水量占总灌溉用水量的90%以上。虽然南方降水与水资源比北方丰富,但由于降水在年际特别是年内分布极不均匀,水资源在地区间分布亦不均匀,南方每个省(自治区)都有数百万亩甚至上千万亩的稻田水源不足,加之工业及城镇生活用水急剧增长,缺水问题也日益突出,水稻灌区不仅需要进行节水灌溉,其中一些特别干旱、缺水地区或是许多地区在干旱缺水年份,也可采用非充分灌溉。水稻的节水灌溉,特别是采用非充分灌溉,需要以水稻水分生产函数作为其确定灌溉制度、用水调配、水资源合理利用决策的依据。

2.2 作物水分生产函数概念

2.2.1 生产函数概念

同其他生产过程一样,农作物在其生产过程中必须有一定的投入,才能获得相应的产出。反映这种投入与产出之间技术经济之数量关系的函数称为生产函数。设 $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ 为投入的资源量(自变量), Y 为作物产量(因变量),则生产函数可写为

$$Y = f(X) \quad (2.2.1)$$

由于生产过程有时带无效性,即考虑生产中难免存在浪费现象,因此一般意义下的生产函数中 Y 与 X 不是一一对应的,即同一投入资源 X 下,可获得多个产出 Y 。或者产出为一个数字区间。一般研究中,常以总体残差平方和最小为准则,通过回归分析方法,得到产出与投入的函数关系,这样得到的生产函数所提供的产出是“平均”意义下的产出。从经济意义上说,希望投入都是有效的,即寻求一定投入资源 X 与最大产出量之间的函数关系。为区别一般意义下的生产函数,后者又被称为前沿生产函数。

农业生产系统是一个十分复杂的大系统。在投入的生产资源中,有些是可以控制的(如水量、种子、肥料等),有些是不可控制的(如气候),甚至不能计量的。许多不可控因素与产量的因果关系至今并不完全清楚,所以想构造一个完整的生产函数是一件十分困难的事。实际上,研究某一生产函数时,主要目的是探求某些可控的、其数量又是有限的资源与产量的关系,如作物水分生产函数、作物水肥生产函数、作物水盐生产函数等。对于不能控制的或者可以供应量十分丰富的因素都不予考虑,而将其看成为特定条件下保持一致的因素,或者是固定因素。

2.2.2 作物水分生产函数概念

影响作物产量的众多因素中,水分是关键因素之一,土壤水分的高低、灌水量、降水量

的大小等都将直接影响到作物产量的高低。在其他因素保持一致或固定不变的条件下,反映作物产量与水分投入量之间的数学关系的函数称为作物水分生产函数(Water Production Function),即

$$Y = f(W) \quad (2.2.2)$$

式中: W 为水的投入量(包括降水、灌溉、土壤储水、地下水补给等),或能反映水分状况的某种物理量(如蒸腾量、腾发量、土壤含水率等)。

作物水分生产函数反映作物产量随水量变化的规律,是进行科学的节水灌溉最基本、最重要的函数。在水源不充分的条件下、灌溉工程的评估、规划、设计、用水管理以及水资源开发利用规划、地区水利规划和灌溉经济效益分析计算,都要以它为基础依据,否则,这些工作就带有盲目性,难以达到节水、高效益的目的。

2.2.3 作物水分生产函数中自变量和因变量

自变量应能反映作物水分状况,一般用三种指标表示:灌水量、田间总供水量(=灌水量+有效降水量+土壤储水量)、腾发量。由于前两种指标代表的水量不一定都能被作物所利用,同时不能反映土壤水、地下水的调节、补给作用,因此,目前最常用的自变量是作物腾发量。

由于作物产量不仅与水分有关,而且它是许多气象因素与非气象因素综合影响的结果,为消去其他因素的影响,真实地反映水分与产量的关系,因此使不同气象条件下试验的结果更具有可比性,用相对腾发量(实际腾发量与供水充分条件下最佳腾发量之比)代表自变量,相对产量(实际产量与供水充分条件下最高产量之比)代表因变量,或者用水分不足条件下的腾发量降低率和减产率分别代表自变量和因变量。按经济目标不同,产量可以是籽粒、根茎、果实或整个地上部分(如牧草)等。

2.2.4 作物水分生产函数边际效益分析及相应的灌溉供水准则

为了消除作物面积的影响,常以相对的单位面积产量与水量代表产量与水量。一般投入水量(W)与产量(Y)的关系曲线如图 2.2.1(a)所示,写成函数形式即式(2.2.2)。

图 2.2.1(a)中, $Y-W$ 曲线包括递增部分和递减部分,在 $D(Y_m)$ 点之前,水分成为产量 Y 的限制因素, Y 随 W 的增加而增加;在 D 点之后,水分成为非限制因素或由于过量施加而造成减产,因此 Y 随 W 的增加而减少。

单位水量之产量(F)是指单位水量投入的平均可获得产量,也称为供水生产率,即

$$F = Y/W \quad (2.2.3)$$

如图 2.2.1(b),单位水量之产量(F)并非固定值,而是随着投入的水量 W 的多少而变化。在阶段 1, F 随 W 的增大而增大;从阶段 2 起, F 则随 W 增大而减小。

边际产量 M 是指每增加单位供水量所引起的产量(Y)的增加量,其值等于水分生产函数的一阶导数,即产量特征曲线 $Y-W$ 上任意一点的斜率,