



关中灌区作物灌溉理论与技术研究

蔡焕杰 陈新明 王健 等/著

 科学出版社

关中灌区作物灌溉理论与技术研究

蔡焕杰 陈新明 王健等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了研究团队近 20 年对关中灌区主要粮食作物在灌溉理论与技术方面的研究成果,包括主要作物水分亏缺响应与非充分灌溉制度,作物蒸发蒸腾量测量方法,冬小麦高光谱特征及其生理生态参数估算模型,夏玉米农田 SPAC 系统水热传输与动态生长模拟,冬小麦水分产量效应及气候变化条件下产量响应模拟,冬小麦水氮产量效应、产差与灌溉预报,灌区主要作物需水量与灌溉制度研究,泾惠渠灌区地面灌溉农田土壤水氮时空分布及其对冬小麦产量的影响,泾惠渠灌区地面灌溉技术参数与田间工程技术,泾惠渠灌区地下水时空分布与合理开发利用,泾惠渠灌区地下水水质对不同水源灌溉的响应及评价等。

本书可供水利和农业行业从事与农业高 eff 用水相关工作的专业技术人员 and 高等院校相关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

关中灌区作物灌溉理论与技术研究 / 蔡焕杰等著. —北京: 科学出版社, 2019. 5

ISBN 978-7-03-060833-8

I. ①关… II. ①蔡… III. ①作物-灌溉-技术-研究-陕西 IV. ①S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 047491 号

责任编辑: 李轶冰 / 责任校对: 樊雅琼

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 37 1/4

字数: 900 000

定价: 380.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

关中地区或关中平原位于陕西中部，号称“八百里秦川”，总面积为 5.6 万 km²，包括西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南五个省辖地级市及杨凌农业高新技术产业示范区，共 54 个县（市、区）。关中平原位于黄河支流渭河的下流冲积平原，土地肥沃，物产富饶。关中地区人口占陕西省总人口数的 60%，国民经济产值占陕西省经济总产值的 70%，工业产值占陕西省工业总产值的 80%，农业产量占陕西省农业总产量的 2/3 以上，在陕西省的社会经济发展中起着举足轻重的作用。关中地区是我国灌溉农业发展最早的地区之一，但面临水资源贫乏、生态环境脆弱的问题，水资源人均占有量仅为全国水资源人均占有量的 17%，全省水资源人均占有量的 30%，且时空分布不均。因此，研究关中地区作物灌溉理论与技术，提高农业用水效率，实现农业节水，对区域的可持续发展有着十分重要的意义。

2000 年以来，在国家科技支撑计划项目“旱区节水型生态灌区关键技术研究与应用”（2011BAD29B01），国家高技术研究发展计划（863 计划）项目“作物生理节水调控与非充分灌溉技术”（2001AA242051）、“作物高效用水生理调控与非充分灌溉技术”（2002AA2Z4031）、“作物水分亏缺补偿技术”（2006AA100202），国家自然科学基金项目“作物非充分灌溉健康生长需水量计算与生理节水潜力”（51179162），国家重点研发计划项目“西北典型农区节水高效灌溉技术与集成应用”（2016YFC0400200）等项目的支持下，针对关中地区主要农作物蒸发蒸腾规律、作物节水机理和灌水模式、生态节水灌区的田间工程技术和水资源高效调控模式等开展了比较系统的研究。本书是在以上研究成果总结的基础上，力求全面系统地反映项目团队关于关中地区主要粮食作物在灌溉理论与技术方面的最新研究进展。

本书由蔡焕杰项目团队的部分专家和研究生编写，由蔡焕杰和陈新明统稿，共分 12 章，各章编写人员和参加研究工作的人员如下。

第 1 章作物灌溉理论与技术研究进展，蔡焕杰、陈新明；

第 2 章主要作物水分亏缺响应与非充分灌溉制度，王健、陈新明、杨敬静、赵永、丁端锋、王伟、刘培；

第 3 章作物蒸发蒸腾量测量方法研究，强小嫚、康燕霞、陈凤、韩娟、樊引琴、梁文清、李志军；

第 4 章冬小麦高光谱特征及其生理生态参数估算模型，姚付启、范梅凤、张超、李志军；

第 5 章夏玉米农田 SPAC 系统水热传输与动态生长模拟，虞连玉、张旭东、王晓文；

第 6 章冬小麦水分产量效应及气候变化条件下产量响应模拟，郑珍、王子申、虞连玉；

第7章冬小麦水氮产量效应、产差与灌溉预报, 姬建梅、张倩;

第8章灌区主要作物需水量与灌溉制度研究, 杨佩、王健、高振晓、宋同、刘泉斌、刘彦平、杨娟、王宇明;

第9章泾惠渠灌区地面灌溉农田土壤水氮时空分布及其对冬小麦产量的影响, 徐家屯、赵春晓、胡雅;

第10章泾惠渠灌区地面灌溉技术参数与田间工程技术, 李世瑶、陈新明、朱大炯、王文娥、党永仁、刘璇、蒋沛、王世龙;

第11章泾惠渠灌区地下水时空分布与合理开发利用, 代锋刚、蔡焕杰;

第12章泾惠渠灌区地下水水质对不同水源灌溉的响应及评价, 谢菲、黄晓蕙、陈新明。

感谢科学技术部、中国21世纪议程管理中心、国家自然科学基金委员会、陕西省水利厅给予研究资助, 感谢西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院和水利与建筑工程学院、陕西省泾惠渠管理局等单位以及相关专家学者在项目实施过程中的大力支持与帮助。蔡晓东、王一腾参加了本书的整理, 许多研究生和本科生参与了试验和研究工作, 书中也引用了许多学者的研究数据, 在这里一并表示感谢。

由于编者水平有限, 对有些问题的认识不足, 书中难免存在不足之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2018年6月

目 录

前言

第 1 章 作物灌溉理论与技术研究进展	1
1.1 作物灌溉理论研究	1
1.2 农田水分信息的高光谱遥感技术研究	5
1.3 作物模型方面的研究	8
1.4 作物产差及水氮耦合理论的研究	9
1.5 灌区生态环境与质量评价研究	11
第 2 章 主要作物水分亏缺响应与非充分灌溉制度	14
2.1 试验方案	14
2.2 水分胁迫对冬小麦生理生态及产量的影响	16
2.3 水分胁迫对夏玉米生理生态及产量的影响	30
2.4 关中灌区主要农作物非充分灌溉制度	41
2.5 小结	44
第 3 章 作物蒸发蒸腾量测量方法研究	46
3.1 试验方案	46
3.2 波文比能量平衡法测量农田蒸发蒸腾量研究	47
3.3 蒸渗仪法测量作物蒸发蒸腾量研究	59
3.4 波文比法与蒸渗仪法测量作物蒸发蒸腾量的比较	65
3.5 主要作物蒸发蒸腾量计算方法	74
3.6 作物系数	81
3.7 缺水条件下作物蒸发蒸腾量的计算	94
3.8 小结	97
第 4 章 冬小麦高光谱特征及其生理生态参数估算模型	98
4.1 试验方案	98
4.2 冬小麦冠层光谱特征的变化	100
4.3 基于高光谱遥感的冬小麦叶绿素监测	119
4.4 基于高光谱遥感的冬小麦覆盖度监测	129
4.5 基于高光谱遥感的冬小麦叶面积指数监测	141
4.6 基于高光谱遥感水分指数的叶片及土壤含水量的反演模型	149
4.7 基于 ETM+数据的冬小麦生理生态参数提取	153

4.8	小结	160
第5章	夏玉米农田 SPAC 系统水热传输与动态生长模拟	162
5.1	试验方案	162
5.2	土壤-植物-大气系统水热传输模型构建	163
5.3	充分灌溉条件下 SPAC 系统水热传输模拟	173
5.4	非充分灌溉条件下 SPAC 系统水热传输模拟	180
5.5	夏玉米动态生长模型的构建	184
5.6	小结	211
第6章	冬小麦水分产量效应及气候变化条件下产量响应模拟	213
6.1	试验方案	213
6.2	不同水分处理对冬小麦蒸发蒸腾及土壤蒸发的影响	215
6.3	不同水分处理的冬小麦生长动态模拟	224
6.4	CERES-Wheat 模型中两种蒸发蒸腾量估算方法比较	238
6.5	冬小麦灌水上、下限的模拟	246
6.6	冬小麦物候期及产量对气候变化的响应	252
6.7	小结	275
第7章	冬小麦水氮产量效应、产差与灌溉预报	277
7.1	试验方案	277
7.2	不同水氮对冬小麦耗水的影响	278
7.3	不同水氮下对冬小麦生长动态模拟	283
7.4	水氮限制条件下冬小麦产差分析	292
7.5	水分限制条件下冬小麦产差分析	304
7.6	冬小麦灌溉预报	309
7.7	小结	314
第8章	灌区主要作物需水量与灌溉制度研究	316
8.1	试验方案	316
8.2	泾惠渠灌区井灌区不同生育期灌水对冬小麦耗水量的影响	320
8.3	泾惠渠灌区渠灌区不同灌水处理对冬小麦耗水量的影响	325
8.4	泾惠渠灌区不同水氮供应对冬小麦需水量的影响	329
8.5	不同水氮耦合对冬小麦、夏玉米需水量的影响	339
8.6	不同干旱年型泾惠渠灌区冬小麦和夏玉米灌溉需水量	348
8.7	冬小麦辣椒间套作条件下作物需水规律与灌溉制度	353
8.8	小结	371
第9章	泾惠渠灌区地面灌溉农田土壤水氮时空分布及其对冬小麦产量的影响	372
9.1	试验方案	372
9.2	冬小麦农田土壤水分全生育期的变化	374

9.3	冬小麦土壤硝态氮含量全生育期变化	389
9.4	冬小麦产量与土壤硝态氮含量的关系	401
9.5	小结	407
第 10 章	泾惠渠灌区地面灌溉技术参数与田间工程技术	409
10.1	试验方案	409
10.2	土壤入渗参数及田面综合糙率系数优化求解	411
10.3	畦灌灌水质量影响因素分析与评价	416
10.4	泾惠渠灌区地面灌溉合理灌水技术参数	423
10.5	田间工程技术	446
10.6	泾惠渠灌区田间量水技术	447
	小结	465
第 11 章	泾惠渠灌区地下水时空分布与合理开发利用	467
11.1	灌区地下水循环要素演变规律分析	467
11.2	灌区农业节水对地下水影响分析	476
11.3	灌区地下水埋深时空变化规律	488
11.4	灌区适宜农业节水方案及地下水资源合理开采模式	492
11.5	小结	503
第 12 章	泾惠渠灌区地下水水质对不同水源灌溉的响应及评价	504
12.1	泾惠渠灌区地下水水质现状	504
12.2	浅层地下水离子相关性和化学成分成因分析	515
12.3	灌溉水水质适应性适宜性分析	524
12.4	泾惠渠灌区生态环境质量评价体系及方法	529
12.5	泾惠渠灌区生态环境质量现状	534
12.6	泾惠渠灌区生态环境质量评价	547
12.7	小结	556
	参考文献	559

第 1 章 作物灌溉理论与技术研究进展

1.1 作物灌溉理论研究

1.1.1 作物需水规律及灌溉制度研究

作物需水量从理论上说是指生长在大面积上的无病虫害作物，土壤水分和肥力适宜时，在给定的生长环境中能取得高产潜力的条件下为满足植株蒸腾和棵间蒸发组成植株所需的水量。

首先考虑天气条件对作物蒸发蒸腾量的影响，降水是天气条件对作物蒸发蒸腾发生影响的表现形式之一，但是这一影响可通过土壤含水量的变化或空气湿度等因素的变化来考虑；其次天气条件对作物蒸发蒸腾的影响是通过辐射和风的作用使近地层空气逐渐变干，加大蒸发面以上的湿度梯度，从而使蒸发蒸腾加快。从物理角度来讲，最有理论依据又最便于使用的表示天气条件对作物蒸发蒸腾影响的参数是蒸发力。

节水高效的灌溉制度并不是盲目降低作物的灌溉定额，而是以作物的实际水分需求为准绳，将有限的农业灌溉水资源根据不同作物不同时期的需求进行分配，提高灌溉水的利用率和作物产量。依据作物的生长发育规律及生产的实际需要，适当减少灌溉定额，将适量水资源进行科学分配以达到既节水又增产的双重目标（孙景生等，2000）。申孝军等（2014）研究发现适宜的水分胁迫有利于麦后移栽棉的高产和水分利用效率（water use efficiency, WUE）的提高。改进田间灌溉技术，改善灌水质量，增加灌水的均匀度和提高灌溉水利用率，降低灌水定额是一项低投资、易操作、收益大的节水增产措施（赵竞成，1998）。灌水均匀度是评价灌水质量的重要指标之一，其大小关系到作物的生理生长以及产量水平（樊志升等，1997）。

张喜英等（2001）对太行山山前平原的冬小麦灌溉制度进行了研究，结果表明，太行山山前平原高产冬小麦在实施合理的灌溉制度情况下可以将灌溉次数由原来的3~4次减少至2~3次，灌溉次数的减少既能保证冬小麦高产，又能大大提高农田水分利用效率，能够有效减缓太行山山前平原地区地下水水位的下降。

任三学等（2010）试验研究不同供水周期对小麦籽粒产量、产量构成要素及水分利用率的影响，确定了冬小麦的整个生育阶段内，进行3~4次灌水的灌溉制度，冬小麦生长季降水较多的年份灌3次水，降水较少的年份灌4次水。王文佳等（2013）开展了杨凌地区冬小麦灌水研究，结果表明，冬小麦在苗期、返青—拔节期和籽粒期3次灌水中以返青水和拔节水最为关键，其次为越冬水和灌浆水。韩娜娜等（2010）开展了小麦整个生育阶

段耗水特性的研究,结果显示,全生育期消耗土壤水分达到 380~440mm 时,可在获得较高收获指数的同时提高水分利用效率。王文佳和冯浩(2012)通过了解咸阳地区作物的需水规律,利用 CROPWAT-DSSAT 模型,模拟了当地不同降水年型和不同灌溉制度下作物产量的变化过程。作物产量和水分利用效率的研究,对减缓水资源紧缺有重要的意义。

1.1.2 调亏灌溉的研究

调亏灌溉(regulated deficit irrigation, RDI)的概念最早出现在 20 世纪 70 年代,由澳大利亚持续灌溉农业研究所的科学家针对水资源日趋短缺和灌溉水利用效率不高的情况,在研究提高密植果园(桃树)生产率的过程中首次提出并得到实际验证的一种节水灌溉管理技术(蔡大鑫等,2004)。与传统充分灌溉的观念不同,调亏灌溉不以获取单位面积产量最高为目标,而以单位用水经济效益最高为目标。从作物生理角度出发,当某些作物自身的生理或生化作用受到遗传因素或生长激素的影响时,在其某个特定的生育期,人为主动地施加一定程度的水分胁迫,以影响其光合产物向不同组织器官的分配。作物对水分亏缺有其自身的适应机制和响应机制,导致其可以将同化物分配从营养器官向生殖器官增加,达到节水增产、改善农产品品质的目的(李远华和罗金耀,2003;张修宇等,2006),即作物在受到水分胁迫时具有自我保护作用,而在水分胁迫消除后,作物对自身以前在胁迫条件下所遭受的损失具有“补偿作用”。

大量试验结果表明,调亏灌溉与传统充分灌溉相比,可以不明显降低产量甚至增产、提高水分利用效率,起到了显著的节水和改善作物品质的作用。

1.1.2.1 作物对水分亏缺的反应

作物对水分亏缺的反应可以从单株与群体两个层次予以表达。从单株层次来看,水分亏缺对与产量相关的生理过程的影响顺序为:生长>蒸腾>光合>运输。水分亏缺首先会影响植株的叶片扩张与嫩芽生长,当水分亏缺程度继续加深至影响气孔开度的程度时,气孔阻力增加,蒸腾速率与光合速率下降,但是对蒸腾的影响大于对光合的影响。同时,干旱胁迫能够改变光合同化物在植株内部的分配,把光合同化物更多地输送给能够维持产量的器官。从群体层次来看,受到干旱胁迫的植株群体会减少分枝或分蘖的发生,降低单位面积作物的耗水量,如苗期受到水分胁迫的冬小麦会主动调整群体结构,减少分蘖,在降低叶面积指数(蒸腾源)的同时,改善作物底层叶片的光合性能。这种有限缺水理论的研究为生物节水技术打下了理论基础。

1.1.2.2 作物水分胁迫后复水产生的补偿效应

同一植株不同的组织和器官对水势的敏感性不同,因而在亏水期对水分的竞争力也不同,细胞膨大对水分亏缺最敏感,而光合作用和从叶片向籽粒器官的有机物运输过程对水分亏缺的敏感性次之。因而在营养生长受到抑制时,籽粒器官可以积累有机物以维持自身的膨大,使其在亏水期的生长不明显降低,在籽粒的快速膨大期,即亏水结束重新复水期,由于亏水期细胞的扩张以及因亏水而受抑制时积累的代谢产物,在水分供应恢复后可

用于细胞壁的合成以及其他与籽粒生长相关的过程，起到补偿生长的效应，不会因适度胁迫而引起产量下降；如果胁迫程度过大或历时过长，细胞壁可能变得太坚固以至当供水增加时不能恢复扩张，从而引起产量下降。这些机理的阐明，使调亏灌溉的功效在分子水平上得到解释，为调亏灌溉研究向定量化和可操作化的深层次发展提供了理论依据。

1.1.2.3 水分亏缺的滞后效应

作物对缺水的抗逆过程是一个受环境影响的连续系统，某阶段缺水不仅影响本生育阶段，还会对其后生长发育阶段和干物质积累产生“后遗性”影响，称为滞后效应。研究表明，水分胁迫对叶面积的滞后影响大于对冠层生长的滞后影响，对冠层生长的滞后影响又大于对根系生长的滞后影响。对水分胁迫越敏感的作物，在生长过程中水分胁迫对它的影响也越大，生长早期的水分胁迫影响后面整个生育期。

1.1.2.4 水分胁迫下作物光合特性

光合作用是作物将自然界中的太阳能转化为化学能，把二氧化碳和水合成为有机碳水化合物并释放氧气的过程。当作物遭遇到水分胁迫后，各个生理过程均会受到不同程度的影响，其中受影响最明显的生理过程之一就是光合作用。随着土壤水分胁迫的进一步加剧，作物叶片光合速率下降，气孔导度和叶绿素降低，从而限制了作物产量的提高（石岩等，1997；武玉叶和李德全，2001）。因此，光合特性随土壤水分条件的变化是作物对水分状况反应的一个重要方面，水分胁迫使得作物的光合速率、蒸腾速率以及气孔行为等均发生了不同程度的变化，进而影响光合产物的积累、转运及分配，最终影响产量水平。

1.1.2.5 水分胁迫下作物形态结构特性

水分胁迫能引起作物叶片内和体内水势降低，且降低幅度取决于水分胁迫程度和作物本身抗旱性的强弱。水分胁迫通过使植株细胞分裂和增大受到抑制，从而影响作物的生长，而作物生长受到抑制则是降低作物产量的主要原因。作物的形态结构是人们早期对作物抗旱性研究较多的方面（张正斌和王德轩，1992）。一般认为株高、叶面积系数、有效分蘖数等可作为抗旱形态结构指标。有研究指出土壤干旱使茎、叶生长受抑，株高降低，叶面积系数减小（王晨阳，1992）。水分胁迫对小麦地上部的影响大于地下部，干物质向根的配比比例升高，从而引起根冠比增大。根和冠既作为一种形态结构，构成作物整体的一部分，同时又对对方发生着作用，在干旱缺水的条件下，作物正是依靠自身各部分间的相互作用，对外界环境作出响应，以适应环境的改变（Schulze，1986；陈晓远等，2003）。

1.1.2.6 水分胁迫对作物产量影响

一般来讲，作物产量是随灌水量的增加而增加，但当产量达到一定水平时，再增加供水，作物产量不再增加或增幅极小。关于作物需水量与产量之间的变化关系有两种看法：一种看法认为，作物任一生育时期的干旱缺水都将会使产量降低，要想获取高产量必须在整个生长过程中保持充足供水（Jordan and Ritchie，1971）；另一种看法认为，应当充分灌

溉与适度水分胁迫交替进行，即一定程度的水分胁迫有利于提高作物的产量（Turner, 1990）。显然，第二种看法因为其节水的经济价值更具有实际意义。研究表明，冬小麦产量会受到不同生育时期灌水的重要影响：返青期灌水主要是提升小麦穗数，拔节期灌水可显著提升小麦穗粒数，孕穗期或开花期灌水对提高小麦千粒重有重要作用（李建民等, 1999），而在灌浆期灌水却使小麦千粒重降低（王俊儒和李生秀, 2000）。还有研究发现，在高产范围内，适当减少灌水量和灌水次数可保证产量及水分利用效率同时稳定在一定水平上，并获得最好的经济效益（程宪国等, 1996）。

1.1.3 间套作技术的研究

间套作种类繁多，主要有以下方式：小麦玉米间作、小麦玉米套作、小麦棉花套作、小麦辣椒间套种、西瓜辣椒间套种，另外还有小麦/玉米/甘薯、小麦/春玉米/夏玉米、稻田复合作、蒜/棉花、棉花/西瓜、林果间作，粮饲间套作、粮菜间套作等。

Wiley（1990）研究认为，间作的大豆与高粱的干物重较高，而总的耗水量没有较大的变化。Natarjar 和 Wiley（1986）认为，花生、珍珠粟、高粱 3 种作物组成的 6 种间套作与单作相比，间套作方式表现出随水分胁迫增加相对优势增加的趋势；水分胁迫对干物质优势无连续的影响。孙景生等（2000）研究得出山西霍泉灌区夏玉米、冬小麦连作套种的有限水量在作物生育期内的最优分配方案及高产节水灌溉定额。

研究表明，作物间套种能够提高土壤肥力。van Kessel 等（1985）采用分根技术研究氮素转移，其结果表明，与玉米间作的大豆接种丛枝菌根能使大豆在施用氮肥后 48h 向玉米转移氮素。朱树秀和杨志忠（1992）研究指出，苜蓿和老芒麦混作使其固氮效率比苜蓿单作提高了 19.5%，也证明了混作可以提高豆科作物的生物固氮量。Morris 和 Garrity（1993）对 16 种间套作种植方式进行分析发现，间作总吸磷量与按间比例加权平均单作总吸磷量相比，前者比后者高 11% ~ 83%，只有高粱间作绿豆例外，为 -4%。郝艳茹等（2003）研究表明，玉米和小麦间作对作物所处生长根系微环境介质中的土壤有效养分的营养有两方面：一是间作使玉米根际土 N 含量增加，P、K 含量降低；二是使小麦根际土 N 含量降低，P、K 含量提高。何承刚等（2003）研究表明，间套作小麦总氮同化量与花前氮同化量均大于单作小麦，而间套作小麦花后氮同化量却小于相应单作小麦。Jeasen（1996）采用分根技术研究表明，与豌豆混作的大麦总氮中有 19% 是从豌豆植株转移过来的，而大麦不向豌豆转移氮素。

综上所述，国内外学者对间套作种植模式的理论方面进行了大量研究，取得了很多研究成果，但有些研究成果主要集中在以一味地追求产量为主体的框架内，即以高水、高肥投入为主要措施。在陕西，许多专家对关中地区冬小麦、夏玉米高产节水灌溉制度以及二者立体套种技术进行了研究，如王宝英和张学（1993）、陈新明和张学（2003）提出了关中地区小麦玉米节水灌溉模式与节水增产高效农业技术要点，蔡焕杰和王健（2010）提出小麦辣椒间套作最优种植模式及高效节水灌溉模式，为陕西关中西部小麦辣椒间套作种植与农业节水提供了理论依据。以前对间作农业中作物灌溉制度很少考虑灌溉对作物品质的影响。

1.2 农田水分信息的高光谱遥感技术研究

高光谱分辨率遥感, 简称高光谱遥感 (hyperspectral remote sensing) 是指利用很多很窄的电磁波波段 (一般光谱分辨率在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \lambda$, 即纳米级) 从感兴趣的物体获取有关数据, 产生一条完整而连续的光谱曲线 (Vane and Goetz, 1993), 其基础是光谱学。

植物光谱监测便是基于植物的光谱特性进行的。植物叶片组分的光谱诊断原理是植物中这些化学组分分子结构中的化学键在一定辐射水平的照射下发生振动, 引起某些波长的光谱发射和吸收产生差异, 从而产生不同的光谱反射率, 且该波长的光谱反射率变化对该化学组分的多少非常敏感 (故称敏感光谱)。植被生物化学组分光谱诊断的实现便是以植被生物化学组分敏感光谱的反射率与该组分含量或浓度的相关关系为基础的。大量的研究表明, 作物体内的叶绿素含量、含水量、含氮量、各种碳水化合物等与其特定光谱波段反射率有较显著的关系, 同时作物叶面积指数、覆盖度、生物量等生态指标也与其特定光谱波段反射率有较显著的关系。而这些作物生理生态指标是衡量作物田间生长状态的重要参考内容, 可以为作物生产提供重要依据。进一步利用作物生理生态参数与高光谱反射率的关系, 建立基于叶片或冠层反射光谱的作物生理生态参数估算模型。

植物的光谱特性是由其组织结构、生物化学成分和形态学特征决定的, 主要包括叶片的颜色、细胞结构和植物含水量等, 而这些特征与植物的生长发育阶段、物候现象和健康状况等因素密切相关, 使光谱曲线存在许多差异 (陈维君, 2006)。但总体来说, 健康的绿色植被的光谱曲线规律性明显而独特, 在 350 ~ 2500nm 光谱区域内的反射光谱特征非常相似。

1.2.1 作物光谱特征监测

作物的光谱特征差异是遥感技术区分作物信息的理论基础, 是建立地面光谱与遥感图像之间关系的桥梁, 是对作物进行遥感研究和各种模拟的基础数据。在实际生产中, 作物光谱特征研究对于应用高光谱遥感技术监测作物病虫害以及了解农田养分供应状况, 采取有效增肥措施和加强农田管理具有积极意义。

地物波谱特性的观测自 1948 年苏联的克里诺夫出版有关地物波谱特性研究的著作以来, 人们开展了大量的地物波谱特性研究。Kanemasu (1974) 研究了小麦、高粱和大豆 3 种作物在不同时期的冠层光谱特征。Thomas 等 (1977) 研究 7 种植物在不同氮素水平下叶片光谱特征, 得出植物在缺氮时可见光波段的反射率增加。Dobrowski 等 (2005) 发现 690nm、740nm 处的冠层光谱能够反映植株的水分胁迫状态。

近年来, 我国科研工作者对作物光谱特征开展了深入细致的研究, 目前研究的波段基本覆盖了遥感所使用的所有波段。程一松等 (2003) 提取与分析了氮素胁迫下的冬小麦高光谱特征。孙红等 (2010) 研究了冬小麦生长期光谱变化特征, 认为从小麦拔节期开始, 在可见光区 (400 ~ 750nm) 的冠层反射率先降低后升高, 以孕穗期反射率最低; 在近红外区 (750 ~ 1000nm) 冠层反射率由拔节期—孕穗期反射率降低, 然后开始上升。扬花期

上升至最高点后又开始下降，直至乳熟期降至最低。陈国庆等（2010）对不同生育期、不同氮肥处理下普通玉米与超高产夏玉米冠层高光谱特性进行了比较。王进等（2012）研究了不同灌水量、氮素营养条件及品种对棉花冠层光谱反射特性的影响，结果表明，随着灌水量的增加，在近红外波段（700~800nm），棉花冠层光谱反射率呈上升趋势，在盛蕾期和盛花期不同灌水量处理的光谱反射率差异明显。

1.2.2 作物叶绿素含量的高光谱遥感监测

光合作用过程中起吸收光能作用的色素有叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素。其中叶绿素是吸收光能的物质，对作物的光能利用有直接的关系。叶绿素与作物的光合能力、发育阶段以及氮素状况有较好的相关性，常作为作物氮素胁迫、光合作用能力和作物发育阶段的指示器。

用高光谱分辨率数据能够较好地估算叶片色素含量（Johnson and Highley, 1994; Kokaly and Clark, 1999）；另外，红边也是叶绿素含量的一种较好评价指标。

吴长山等（2000）分析了作物群体光谱反射率、导数光谱数据与叶绿素密度的关系，并对作物群体叶绿素密度进行了估算。王秀珍等（2002）研究指出，红边位置与上层叶片的叶绿素含量有着密切的关系。谢瑞芝等（2006）分析了玉米高光谱反射率与色素含量的关系，得出近红外波段和叶绿素吸收波段（红波段）或叶绿素反射波段（绿波段）构建的 8 个高光谱参量只有以反射率为基础计算时才与色素含量间存在相关性。杨峰等（2010）利用高光谱遥感技术分析水稻和小麦两种作物不同生育期的冠层光谱和叶绿素密度的变化，比较高光谱植被指数与两种作物叶绿素密度之间的关系，进而确定估算两种作物叶绿素密度最佳植被指数。

1.2.3 作物覆盖度的高光谱遥感监测

植被覆盖度是许多学科的重要参数，随着遥感技术的发展，可以得到准确的植被覆盖度信息，满足多个领域的需要。

Bunnik（1978）证实了应用遥感技术提取植被覆盖度的可能性。Vaesen 等（2001）以水稻为对象研究了红光近红外组合的四种植被指数对覆盖度的预测能力，评价了这些指数对水体的浑浊度、背景、品种及氮肥处理的敏感性。Gitelson 等（2002）将 NDVI、GreenNDVI、VARI 三种植被指数分别与小麦的植被覆盖度回归，其中前两者采用非线性回归，后者采用线性回归，分析比较的结果表明，使用 VARI 线性回归模型估算植被覆盖度精度更高。

李存军等（2004）研究了利用近红外和短波红外光谱指数估测覆盖度的可行性，并评价了这些指数对品种、肥水处理和叶色的敏感性，指出短波红外光谱指数 R_{1690}/R_{1450} 、 R_{1450}/R_{1690} 及 $(R_{1450}-R_{1690}) / (R_{1450}+R_{1690})$ 等不易受品种、肥水管理及叶色的影响，能很好地预测大田冬小麦覆盖度。朱蕾等（2008）测量了油菜、玉米、水稻三种作物不同覆盖度水平下的冠层光谱，利用三种作物光谱求算红边变量，并对波段两两组合求

算归一化植被指数 (normalized differential vegetation index, NDVI), 建立这些光谱变量与覆盖度之间的估算模型, 得到适用于三种作物的最优估算模型和最佳的 NDVI 波段组合。陈江鲁等 (2011) 采用高光谱仪获取棉花不同时期不同覆盖度的冠层光谱反射率, 通过对构成归一化差值植被指数的近红外波段反射率引入系数 α 来提高修正后的植被指数随棉花覆盖度变化的动态范围。

1.2.4 作物叶面积指数高光谱遥感监测

叶面积指数与植物的光合能力密切相关, 估算农作物的叶面积指数对作物的生长状况与病虫害监测、产量估算以及田间管理具有重要意义 (Haboudane et al., 2004)。

Wiegand 等 (1992) 认为, 比值植被指数 (RVI) 和转换型土壤调整指数 (TSAVI) 与小麦叶面积指数线性相关, 绿度植被指数 (GVI) 和垂直植被指数 (PVI) 与小麦叶面积指数的关系则用幂函数和二次方程拟合最佳, 相关系数达 0.72 ~ 0.86。Gitelson 和 Merzlyak (1996) 比较红边位置和 NDVI 与叶面积指数的相关性, 认为红边位置更能反映叶面积指数。Patel 等 (2001) 利用植被反射光谱波形特征反演了作物的叶面积指数。Araus 等 (2002) 提出了对小麦叶面积指数反应敏感的植被指数。Hansen 和 Schjoerring (2003) 研究结果表明, 小麦 680 ~ 750nm 的高光谱反射率与叶面积指数等变量有较好的相关性。Nguyen 和 Lee (2006) 建立的水稻近红外 800nm 和红光 670nm 波段的反射率组成的 NDVI、土壤调节植被指数和修改的土壤调节植被指数与水稻的叶面积有较好的相关性。

国内王秀珍等 (2004) 用水稻红边和蓝边内一阶微分总和为变量建立了叶面积指数光谱预测模型, 预测效果良好。宋开山等 (2006) 研究了大豆叶面积指数与光谱反射率的相关性, 得出在可见光波段呈负相关, 在近红外波段呈正相关, 微分光谱在红边处与大豆叶面积指数密切相关。梁亮等 (2011) 对 18 种高光谱指数进行了比较分析, 筛选出了可以敏感反映小麦叶面积指数的高光谱指数 OSAVI (优化土壤调节植被指数, optimization of soil-adjusted vegetation index), 并以地面光谱数据为样本建立了小麦叶面积指数的反演模型。陈江鲁等 (2011) 研究表明, 694nm 和 1099nm 分别为可见光和近红外波段区域内与叶面积指数相关性最好的波段。

1.2.5 作物冠层及叶片水分高光谱遥感监测

蒋金豹等 (2010) 利用 1300nm 除以 1200nm 波段构建比值指数, 认为小麦可以反演冠层相对含水量 (relative water content, RWC)。金林雪等 (2012) 通过分析不同的植被指数与叶片含水量的相关性, 指出水分指数 (water index, WI) 和水分胁迫指数 (water stress index, WSI) 都与叶片含水量有显著相关关系, 可以利用光谱数据对小麦叶片含水情况进行监测。苏毅等 (2010) 研究发现, 一定灌水量内, 棉花叶片含水量与灌水量呈正相关, 通过叶片含水量情况可以辨别棉花受旱情况, 并利用几个植被指数构建叶片含水量监测模型。王强等 (2013) 利用光谱数据构建植被指数, 并将其用于构建棉花水分含量的

模型,认为其具有较高的精度。王圆圆等(2010)利用偏最小二乘回归方法,建立冬小麦叶片含水量的回归模型。朱西存等(2014)通过主成分分析法,利用水分指数建立的估算模型可准确地测量苹果叶片含水量。

1.2.6 土壤水分的高光谱特征研究

20世纪60年代末,遥感技术开始应用于土壤水分的监测研究中,经过几十年的探索研究,该项技术随着时间推移不断发展和完善。吴见等(2014)通过众多模型的对比,发现在土壤水估测效果方面,光谱特征空间模型最佳。刘伟东等(2004)通过几种方法对比分析,发现反射率倒数的对数的一阶微分与差分法能很好地应用于光谱数据对土壤水分的反演中。Liu等(2002a)的研究发现,在一定土壤含水量范围内,随着土壤含水量的增大光谱反射率反而减小,超过这个范围后,随着土壤含水量的增大光谱反射率也增大,并且指出这个范围的分界值大于田间持水量。姚艳敏等(2011)通过室内试验,认为2156nm是0~20cm黑土土壤水分的敏感波段,并且基于反射率对数一阶微分方法建立了土壤水预测模型。刘焕军等(2008)通过野外和室内试验结合,利用光谱分析技术和统计分析方法,指出光谱对于表层<5cm土层含水量的监测效果优于>5cm土层的监测效果。

1.3 作物模型方面的研究

1.3.1 SIMDualKc 模型

双作物系数法(Allen et al., 1998)是研究作物蒸散和土壤蒸发的重要方法,国内外学者在应用双作物系数法研究作物不同时空尺度蒸散规律方面取得了许多成果(樊引琴和蔡焕杰, 2002; 宿梅双等, 2005; 陈凤等, 2006; Allen and Pereira, 2009; 赵丽雯和吉喜斌, 2010; Alberto et al., 2014; Zhao et al., 2015)。Rosa等(2012a)根据双作物系数法的原理,开发了双作物系数模型SIMDualKc,该模型以作物指标(地面覆盖度、根深度、植株高度等)、土壤指标(土壤质地、田间持水量、凋萎系数等)、农田管理指标(播种日期、收获日期、灌水量和灌水日期等)为输入参数,可模拟不同作物在不同灌溉制度下的蒸散变化情况。Rosa等(2012b)用该模型模拟了葡萄牙、叙利亚和乌兹别克斯坦等国家的玉米、小麦和棉花等作物的蒸散变化情况,准确性较高,并且在部分数据缺失的情况下,利用FAO-56文件推荐的参数进行模拟,仍然有较高的准确性。赵娜娜等(2011, 2012)、邱让建等(2015)及李石琳等(2014)也在SIMDualKc模型的参数校验和模拟应用方面做了大量的工作,用SIMDualKc模型模拟研究了小麦、玉米和番茄等作物的蒸发蒸腾规律。模型应用前要先经过校正和验证的过程(Ma et al., 2000),先前的研究者在校验SIMDualKc模型时,大都是先测定土壤含水率,再依据水量平衡法计算蒸发蒸腾量,然后与模型的模拟值比较,这种方法得到的蒸散量的实测值不具有连续性,在校验模型时难以做到全面,因此需要更为细致的实测数据。

1.3.2 DSSAT 模型

DSSAT 模型是由农业技术转移国际基准网 (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, IBSNAT) 开发研制的一项新的综合作物模型, 其目的: 一是将各种作物模型汇总; 二是将模型输入和输出变量格式标准化, 以便模型的普及应用。它具有鲜明的应用特色, 包括 CERES 系列模型、CROPGRO 模型和 SUBSTOR potato 模型等, 所有这些模型均使用相同格式的土壤、天气和管理变量输入, 最终的输出格式也相同, 包括土壤条件、植物生长状况和产量等。DSSAT 模型考虑了作物品种遗传特性、土壤、气候和管理措施等因素的综合作用, 可用于模拟作物管理措施的最终效果, 验证科学假设, 模拟季节变换、空间位置变换和不同管理措施对作物生长过程的影响。在评估农艺措施 (如播期、品种遗传特性等) 对作物产量的影响方面有独特优势。

1.3.3 作物-水模型

作物-水模型是节水灌溉推广应用研究的核心内容之一, 对于节水灌溉应用于生产实际具有非常重要的现实指导意义。20 世纪 60 年代国内外对作物-水模型的研究还只是停留在定性的概念上, 如对“关键水”“作物需水敏感期”“需水临界期”等问题的探讨。1968 年, 由美国学者 M. E. Jensen 提出的 Jensen 模型, 使对作物-水模型的研究从定性过渡到定量研究阶段, 也使节水灌溉的研究内容及应用前景明朗化。Jensen 模型利用相对蒸发蒸腾量和相对作物产量建立函数关系, 它不仅表示产量与水之间数量上的关系, 还可以根据试验确定不同生育期供水量多少对产量的影响大小, 从而为有限水量在作物生育期内的合理分配、为节水灌溉技术在生产实践中的具体应用提供了可能。

与发达国家相比, 中国的作物模型模拟研究虽然起步较晚, 但发展较快。1983 年, 江苏省农业科学院高亮之研究构建了苜蓿生产的农业气象计算机模拟模型。黄策和王天铎 (1986) 从作物生理学出发, 建立了水稻物质生产的计算机模拟模型。至 20 世纪 90 年代, 江苏省农业科学院高亮之等将作物模拟与水稻栽培的优化原理相结合, 研究制成我国第一个大型的作物模拟软件——水稻栽培模拟优化决策系统。南京农业大学曹卫星和江海东 (1996) 建立了小麦发育的模拟模型。中国农业科学院等以 CERES 模型为基础, 分析提出了小麦、玉米作物的生产试验系统。总的来说, 国内研究的作物生长模型大多注重实用性和预测性, 经验性参数较多, 且具有一定的地域性和局限性。

1.4 作物产差及水氮耦合理论的研究

1.4.1 作物产差理论研究

“产差”这一概念是由 de Datta (1981) 提出的, 他将产差定义为试验站收获的产量