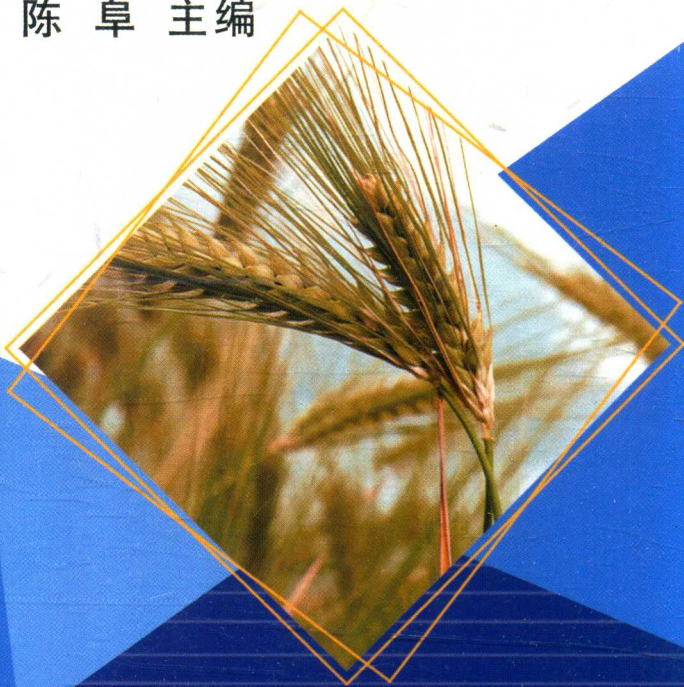


作物产量差的 理论与实证研究

ZUOWU CHANLIANGCHA DE
LILUN YU SHIZHENG YANJIU

褚庆全 陈 阜 主编



ZUOWU CHANLIANGCHA DE
LILUN YU SHIZHENG YANJIU

作物产量差的 理论与实证研究

褚庆全 陈 阜 ● 主编

中国农业出版社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

作物产量差的理论与实证研究 / 褚庆全, 陈阜主编

. —北京: 中国农业出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-109-24923-3

I. ①作… II. ①褚… ②陈… III. ①作物-产量-研究 IV. ①S31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 256123 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 郑 君

文字编辑 耿增强

北京通州皇家印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13.25

字数: 315 千字

定价: 79.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

《《 本书编写委员会



主 编 褚庆全 陈 阜

副主编 刘建刚 王 宏 石全红

张耀耀 范士超



粮食安全与农业可持续发展问题一直受到全世界的关注。中国作为世界第一人口和农业大国，粮食安全问题和农业可持续发展问题一直是中国农业的核心主题。人均耕地面积少、后备耕地资源紧缺、水资源严重短缺是农业发展的主要资源制约因素。在有限的耕地、水分等资源条件下，寻求高产高效的农业生产途径，确保农产品有效供给和实现未来粮食安全始终是中国农业的主要任务。

从20世纪90年代以后，作物产量差研究一直是国际作物学研究方向的一个重要分支。近年来，国际上高度关注产量差研究，组织召开了作物产量差评论国际研讨会，成立了全球产量差研究网络，启动了“缩减亚洲水稻产量差”和亚洲（亚）热带水稻的发展体系、联合国粮食及农业组织（FAO）的“全球粮食估产项目”及全球灾害风险综合研究计划（涉及农业领域）等国际合作项目，《自然》《科学》等国际重要学术期刊都对产量差问题进行了深入探讨。我国也非常重视作物产量差的研究，在国家“十三五”重点研发计划项目农业领域第一批项目中，立项并启动了“粮食作物产量与效率层次差异及其丰产增效机理”项目，深度研究东北平原、黄淮海平原、长江中下游平原的小麦、玉米、水稻等作物的产量差及光温水肥资源利用效率差，研究缩减我国粮食作物产量差和效率差的技术途径。

研究表明，我国主要粮食作物存在较大的产量差，进一步提高粮食产量仍有很大潜力。与国际先进国家相比，我国在缩小产量差方面还存在较大差距。因此，开展区域产量差研究对于增加我国粮食产量、保障国家粮食安全意义重大。但是从研究的深度和系统性方面看，相对国际的研究，我国关于产量差的研究还缺乏系统性，研究深度还有待深化，尤其在产量差系统模型方面的研究还是空白。从目前发展趋势看，产量差的研究已经从概念模型向应用模型方向发展，产量差的量化研究已经在很多国家和地区及研究部门得以深化，应用模型工具研究产量差将成为产量差研究的发展方向。

本书研究了作物产量差的理论和分析方法，综述了国内外产量差的研究现状，构建作物产量差的分析方法和模型，为作物产量差的研究提供分析工具。在此基

础上系统进行了黄淮海农作区的冬小麦和夏玉米以及南方稻区的水稻产量差的实证研究，分析了作物产量差时空分布特点及影响因素，解析作物产量差的产生机理，提出了缩减作物产量差的技术途径，为区域粮食总产的持续提高提供建议对策。

本书共分9章，第1章系统论述了产量差的理论和研究方法；第2章至第7章对黄淮海农作区作物产量差开展了系统的研究，系统分析了黄淮海农作区的冬小麦和夏玉米产量差的时空分布和影响因素，提出了缩减黄淮海冬小麦和夏玉米产量差的技术优先序；第8章和第9章研究了我国南方稻区水稻产量差的时空分布特点，解析了影响水稻产量差的限制因素，探讨了缩减水稻产量差的技术途径。

由于编者水平有限，书中错误在所难免，希望广大读者进行批评指正。

编 者

2018年7月

前言

第 1 章 作物产量差的理论和研究方法	1
1.1 产量差的概念和内涵	1
1.1.1 产量差的概念	1
1.1.2 产量差的研究尺度	2
1.1.3 产量差的分析模型	2
1.1.4 产量差产生机制的解析	3
1.2 作物产量差的研究方法	5
1.2.1 田间试验方法	6
1.2.2 统计分析模型方法	6
1.2.3 参与式评估方法	7
1.2.4 作物生长模拟模型	8
1.3 作物的产量差和效率差	11
1.3.1 作物单产潜力的认识与争论	11
1.3.2 缩减产量差和效率差同步实现高产与高效是农业可持续发展的关键	15
第 2 章 黄淮海农作区冬小麦和夏玉米产量差时空分布研究	18
2.1 黄淮海农作区粮食生产的变化趋势	18
2.1.1 区域概况	18
2.1.2 农业及粮食生产概况	19
2.2 农业技术推广决策支持系统 (DSSAT) 有效性验证	21
2.2.1 DSSAT 模型的简介	21
2.2.2 DSSAT 模型的初始化和参数的确定	23
2.2.3 DSSAT 模型品种参数调试和有效性验证	24
2.3 黄淮海农作区冬小麦和夏玉米潜在产量及影响因素解析	28
2.3.1 黄淮海农作区冬小麦夏玉米生长季内农业气候资源的时空特征	28
2.3.2 黄淮海农作区冬小麦和夏玉米潜在产量的时空分布特征	31
2.3.3 气候要素对黄淮海农作区冬小麦和夏玉米潜在产量时空分布的影响	33
2.4 黄淮海农作区冬小麦和夏玉米产量差的分布特征	36
2.4.1 黄淮海农作区县级尺度产量差的空间分布特征	36
2.4.2 黄淮海农作区不同亚区产量差的空间分布特征	39

2.4.3 黄淮海农作区各亚区冬小麦和夏玉米周年产量差的变化	41
2.4.4 农业生产投入条件对黄淮海农作区冬小麦和夏玉米生产的影响	41
2.4.5 黄淮海农作区各亚区产量差限制因素解析	45
2.5 本章小结	46
第3章 氮肥管理对冬小麦和夏玉米产量差的影响	48
3.1 近30年吴桥县气候条件	48
3.1.1 冬小麦生育期内气候要素分析	48
3.1.2 夏玉米生育期内气候要素分析	49
3.2 吴桥农户作物生产情况分析	50
3.2.1 不同地块的冬小麦产量和施氮量的评价	50
3.2.2 不同地块的夏玉米产量和施氮量的评价	51
3.3 氮肥管理对冬小麦产量差的影响	52
3.3.1 DSSAT模型的验证和冬小麦品种参数的校正	52
3.3.2 冬小麦最佳施肥量的比较	53
3.3.3 不同施氮量对冬小麦产量差的影响	53
3.3.4 不同施氮量的氮肥农学效率分析	55
3.3.5 不同气候年型下氮肥对不同品种冬小麦产量差的影响	55
3.4 氮肥管理对夏玉米产量差影响	61
3.4.1 DSSAT模型的验证和夏玉米品种参数的校正	61
3.4.2 夏玉米最佳施肥量的比较	62
3.4.3 不同施氮量对夏玉米产量差的影响	62
3.4.4 不同施氮量的氮肥农学效率分析	63
3.5 本章小结	64
第4章 基于农户调研的黄淮海农作区麦玉两熟产量差实证研究	66
4.1 农田高产与高效的指标体系	66
4.1.1 调研区域概况	66
4.1.2 评价农田高产与高效的指标体系	67
4.2 冬小麦-夏玉米生产体系产量差分析	69
4.2.1 冬小麦-夏玉米种植模式下潜在产量分析	69
4.2.2 冬小麦-夏玉米种植模式下农户田块产量差分析	71
4.3 冬小麦-夏玉米种植模式的农田投入与产出	76
4.3.1 冬小麦-夏玉米农田投入	76
4.4 冬小麦-夏玉米农田系统资源利用效率分析	88
4.4.1 自然资源利用效率分析	88
4.4.2 人工投入要素分析	89
4.5 高产高效同步可行性分析	91
4.5.1 冬小麦-夏玉米种植体系氮肥限制下的可获得产量	91
4.5.2 冬小麦-夏玉米种植体系高产高效同步性分析	93

4.6 本章小结	94
附 冬小麦-夏玉米生产调查表	96
第5章 基于参与式评估的冬小麦和夏玉米产量提升的技术需求研究	99
5.1 吴桥县冬小麦和夏玉米产量提升空间分析	99
5.1.1 县域尺度的产量差	99
5.1.2 田块尺度的产量差	99
5.2 影响农户产量差的因素分析	100
5.2.1 基于回归分析的产量限制因素解析	100
5.2.2 冬小麦和夏玉米的产量限制因素分析	101
5.2.3 农户水平的产投结构分析	102
5.3 基于 DSSAT 的冬小麦和夏玉米栽培管理技术优化	103
5.3.1 模型的校正	103
5.3.2 栽培管理技术的模型模拟优化	104
5.3.3 提高农户产量的栽培管理技术途径	107
5.4 本章小结	113
第6章 提升冬小麦和夏玉米产量的技术需求分析	114
6.1 农户的基本信息	114
6.2 农户对粮食增产的认识	114
6.3 农户产量提升的技术需求	115
6.3.1 基于技术类型的优先序	115
6.3.2 基于产量影响因素的技术需求优先序	116
6.4 本章小结	118
附 1 吴桥普通农田基本信息调查问卷	119
附 2 农户技术需求调查问卷	122
第7章 缩减冬小麦和夏玉米产量差的技术优先序	125
7.1 龙口市小麦-玉米两熟制产量差分析	125
7.1.1 近 40 年龙口市冬小麦产量差变化	125
7.1.2 农户水平小麦-玉米种植体系产量差分析	126
7.1.3 农户地块的产量差分析	128
7.2 冬小麦和夏玉米产量差形成机制	132
7.2.1 研究思路和方法	132
7.2.2 自然因素对产量差形成的分析	134
7.2.3 品种因素对产量差形成的分析	135
7.2.4 栽培管理因素对产量差形成的分析	136
7.2.5 龙口市小麦-玉米两熟制高产高效探讨	137
7.3 冬小麦和夏玉米高产潜力开发技术途径	140
7.3.1 小麦-玉米两熟制产量限制因素及其提升技术途径	140

7.3.2 基于农户调研的小麦-玉米两熟制技术优先序	144
7.4 本章小结	146
附 调查问卷	148
第8章 南方稻区水稻产量差及缩减产量差的技术需求研究	151
8.1 南方稻区水稻产量差研究模型的构建	151
8.1.1 南方稻区水稻生产现状及增产潜力	151
8.1.2 水稻产量差研究模型构建	154
8.2 南方稻区水稻产量差的量化及分布特点	156
8.2.1 1980—2008年南方稻区水稻生产变化特点	156
8.2.2 南方稻区水稻产量差现状	159
8.3 南方稻区水稻产量差的变化特点及其气候影响因素	162
8.3.1 南方稻区水稻潜在产量及产量差的变化特点	162
8.3.2 水稻光温生产潜力及产量差的变化	164
8.3.3 南方稻区水稻光温潜力及产量差的气候影响因素分析	165
8.4 本章小结	169
第9章 基于参与式评估的南方稻区水稻产量差研究	170
9.1 湖南省各县域内水稻生产概况及产量差分析	170
9.1.1 湖南省水稻生产概况	170
9.1.2 基于农户调研的水稻产量差	171
9.2 不同产量水平的农户地块产量差研究	174
9.2.1 高、中、低产农户地块划分标准	174
9.2.2 湖南省不同县域高、中、低产农户分布情况	175
9.2.3 湖南省高、中、低产农户水稻产量差及其原因分析	177
9.3 南方稻区水稻生产限制因素及技术需求	179
9.3.1 普通农户水稻生产限制因素及技术需求	179
9.3.2 南方稻区水稻生产限制因素的分析	184
9.3.3 缩小南方稻区水稻产量差的对策	187
9.4 本章小结	188
附1 南方双季稻区农作制度发展优先序农户调查表	190
附2 湖南省农户水稻产量限制因素及技术需求调研	194
参考文献	199

第1章 作物产量差的理论和研究方法

1.1 产量差的概念和内涵

1.1.1 产量差的概念

产量差这一名词在过去几十年内被广泛地应用 (van Ittersum 等, 1997), 从 20 世纪 90 年代以后, 作物产量差的研究一直是国际作物学研究方向的一个重要分支。产量差 (Yield gap) 可通俗地理解为不同产量水平之间的差异。产量差的概念由 De Datta S. K. (1981) 提出, 定义为农民实际收获的作物产量与试验站获得的潜在产量之间的差距, 引起这个产量差距的因子叫做产量限制因子。Fresco (1984) 提出了产量差概念模型, 在用到“田块潜在产量”和“技术上限产量”的同时, 又引入了“经济上限产量”的概念。Lobell 等 (2006) 又提出了不同田块间的产量差概念, 定义田块产量差为农户田块最高产量与平均产量的差距。在产量差的研究中, 不同的学者将产量差定为不同的水平, 如 Cook (1990) 将作物产量分为潜在产量、纪录产量、试验站产量、平均产量; Still (1991) 提出了 4 个 A 产量, 绝对产量 (Absolute yield)、可达到的产量 (Attainable yield)、合算的产量 (Affordable yield)、实际产量 (Actual yield); Evenson (1997) 提出 5 种产量水平, 农户实际产量、农户最高产量、试验站产量、试验站最优产量、潜在产量; 联合国粮食及农业组织 (FAO) (2000) 将产量分为理论产量、试验站产量、农户可获得产量、农户实际产量; 也有学者将产量划分为潜力产量、水分限制条件下的产量、肥料限制条件下的产量以及实际产量。Lobell 等 (2009) 又在原来各种产量差定义的基础上增加了农户田块最高单产与大田平均单产的差距, 扩大了产量差研究的内涵。

国际上有大量针对作物产量差的研究。大多数科学家以及机构都认为缩小产量差是可行的, 只要作物在当地没有达到其单产上限, 那么通过追加实现作物全部遗传学潜力所必需的基本投入或者协调好其他农艺措施 (如选择最佳的种植密度或更有效地控制病虫害) 就可以实现区域大面积农田单产的进一步提升。Borlaug (2000, 2002) 研究认为印度次大陆、拉丁美洲和东欧的大部分地区的产量仍然能够增加 50%~100%。撒哈拉以南非洲的大部分地区在政治稳定, 破坏企业家主动性的官僚机构被管制的前提下, 当地的研究人员和多余的劳动力会把更多的精力放在科研和农田实用技术上去, 产量将增加 100%~200%。以撒哈拉以南非洲为例, 设置 6×10^5 个论证点推广技术, 绝大部分论证点产量比传统方法耕作的农户高 2~3 倍, 甚至 4 倍。Byelee 等 (2000) 指出, 由于广泛采用现代化的品种, 高度集约化的施肥, 以及化学杀虫剂的施用, 发展中国家很多地区的作物单产已经达到发达国家水平和农艺家的试验田水平。在现有的自然资源基础和经济环境下, 许多发展中国家农户的真实产量与试验田可获得产量之间的差异正在缩小。

随着产量差相关研究的深入,产量差的内涵也在进一步拓展。国内外对产量差已有多年的研究,理论和方法相对成熟,近几年我国关于作物产量差的研究越来越广泛。林毅夫是较早在我国开展产量差研究的,林毅夫将三个产量差水平定义为:产量差Ⅰ是通过科研人员提升作物的生物技术潜力来缩减的在理想条件下试验田的最高产量与未知的可能单产潜力之间的差距;产量差Ⅱ是通过加强综合生产能力来消除品种差异和环境影响来缩减的理想条件下大田品种的可能单产与理想试验条件下试验品种的最高单产之间的差距;产量差Ⅲ是通过加大技术和物质投入来缩减的实际条件下的大田单产与理想条件下的大田品种的可能单产之间的差距(林毅夫,1996)。由于不同研究者对产量水平的定义的不同和水平测定方法的多样性,产量差的概念有不同的描述,但是核心都围绕着量化和缩减不同产量水平之间的差距。

1.1.2 产量差的研究尺度

从研究尺度方面看,作物产量差研究包括田块水平和区域水平两个尺度。田块水平以田间试验为主,集中于各种产量限制因子研究,如干旱、肥料亏缺、病虫害等对产量的影响。影响作物生长和产量的因素很多,包括土壤、气候、管理等多个方面,而且很多因素之间相互关联。这就需要针对影响产量的一个或几个因子,严格控制或半控制其他因子,通过在试验站或农户田块布置不同处理进行比较分析,从而确定指定因子对作物产量的影响。区域水平产量差分析主要研究区域内或区域间产量差异及产量差时空分布特点。从区域角度研究产量差分布特点的研究居多,如FAO(2000)组织多国研究人员对印度、菲律宾、越南、埃及、马达加斯加、意大利、巴西、韩国以及中国等国家和地区水稻产量差的研究,David E. Johnson(2003)对非洲西部不同区域雨养条件下水稻产量差的研究,国际半干旱热带作物研究所(2008)对印度不同地区雨养条件下水稻、小麦、棉花、油菜等作物的产量差进行的定量化研究,Lobell(2010)对全球三大粮食作物产量差空间分布特征的研究等,均是以区域为尺度。以区域为尺度研究产量差及其分布特点,可依此制定相应的农业决策意见,对区域农业生产布局进行指导,具有十分重要的意义。

1.1.3 产量差的分析模型

产量差模型是评价作物产量提升空间的重要工具,不同研究者对产量差的概念有不同的理解,提出的产量差评价模型中不同产量水平的测算方法也存在多样性。如De Datta S. K.在1981年提出的产量差模型包括农田实际产量、潜在农田产量和试验站潜在产量,De Bie提出的产量差模型包括试验站潜在产量、潜在农田产量和农田实际产量等,Lobell和Ivan Ortiz-Monasterio提出的田块尺度上的产量差模型为农户最高产量和平均产量差距等。不同学者由于研究目的和研究手段不同,提出的产量差分析模型可能有所差别,但是在他们构建的产量差分析模型中主要包括以下几个方面的产量层次:潜在产量、可获得产量、试验站产量、农民可获得产量、农民实际产量、区域平均产量等。相应的产量差也可分为理论产量差、可缩减产量差等。

(1) **潜在产量。**潜在产量代表的是一个地区作物基于适宜的土壤在较高管理水平下由光温水条件所决定的产量，现实生产中作物的产量水平很难达到潜在产量的水平，因此潜在产量是一种理论产量值。与实际产量之间的差距仅为理论产量差，远远超过现实生产中可缩减产量差。大多数研究人员采用作物模拟模型来测算一个区域或试验站的潜在产量，例如 AEZ 模型、DSSAT 模型、APSIM 模型等。

(2) **可获得产量。**可获得产量是一个地区在一定气候、土壤和耕作栽培技术条件下生产者能够获得的较高的产量水平，不同研究者对可获得产量的定义不同。如 Lobell 提出运用潜在产量的 80% 作为可获得产量，Xu 提出将可获得产量定义为实地试验中获取的最大产量，Waongo 提出通过将优化的栽培管理措施导入模型中，通过模型模拟可获得产量等 (Lobell 等, 2009; Xu 等, 2017; Waongo M. 等, 2015)。田块水平的可获得产量容易确定，但是区域尺度的可获得产量较难确定。可缩减产量差是指可获得产量与实际产量之间的差距，这一差距是可以通过现阶段的田间管理措施的改进、品种改良、新技术的引进等方式缩减。

(3) **试验站产量。**试验站产量是指在大田试验中，相关技术人员通过采用较优的管理措施、适当的水肥投入、优质品种的引进等条件下，试验站点获取的产量，且产量处于较高水平。由于技术手段成熟与成本投入量较大，农民在普通大田中获取的产量与试验站产量存在一定的差距，通过科学管理大田、定期定量施用水肥、选择生态条件适宜的区域种植等，普通大田可达到试验站产量。

(4) **纪录产量。**纪录产量代表在一定时间、一定生态区的无物理的、生物的或经济学的障碍下最优栽培管理措施条件下，试验田所得的最高产量。在所选试验田中，拥有最有利的生态条件和最优的栽培技术措施，即不考虑环境风险和经济成本，所记载产量中的最高纪录产量。由于农户的栽培管理措施相对粗放，投入成本较小，且多数种植区的自然条件较差，故达到记录产量的可能性较小。

(5) **农户可获得产量。**农户可获得产量指在现有农户栽培水平下，可以获得的最大产量。假设农户在不考虑各种市场因素及政策条件下，将现有栽培管理措施应用到最佳所获得的产量，也叫做农户潜在产量。主要通过调整管理措施和选用高产优质品种等手段在普通大田中获得的最大产量，只要农户对田块管理精细、水肥投入适中、及时控制病虫害的发生等，实现农户可获得产量的水平较为容易。

(6) **农户实际产量。**农户实际产量指在一定区域内农户实际产量的平均状况，反映了当地土壤、气候条件、品种及农民实际栽培管理措施下获得的产量。往往与其他产量水平进行比较，从而获得产量差。

1.1.4 产量差产生机制的解析

区域作物的产量差不仅取决于作物生物特性，还要依赖区域的自然资源和社会物质投入情况，因此要分析作物的产量差，除了要研究作物生产过程以外，还要综合考虑区域自然资源、社会经济条件、科学技术水平、物质投入条件等因素，采取综合分析的方法。产量差的研究能够揭示产量的提升空间及区域各种限制因子对产量提高的限制作用，如自然

因素（气候、土壤等）、技术因素、经济因素等。通过对产量差的研究，不仅可以使我们解析区域作物产量差的形成机制，量化作物产量提升空间，还可以使我们找出影响作物产量潜力挖掘的限制因素，量化社会经济、技术等非自然因素对作物产量差的影响（Lobell 等，2009；van Ittersum 等，2012）。

由于产量差产生的原因复杂，不同领域的研究者对产量差产生原因有着不同的阐述，因此揭示产量差产生的多方面原因显得尤为重要，不同机构学者从不同的角度对产量差产生原因及缩减产量差途径进行了研究。从栽培管理角度，国际水稻研究所最先提出了产量差的分析方法，针对单一作物从作物生物特性方面分析了不同层次产量差的产生原因，后来国际半干旱热带作物研究所基于该产量差距方法对间作条件下不同土壤条件的作物产量差距的原因进行了分析（Barker 等，1979）；从经济学的角度，Reddy 认为物质投入不足、作物生长关键时期的水分亏缺、管理不细致以及产物价格低是农户的实际产量达不到示范性农场生产水平的主要因素（Reddy，1997）；从营养学的角度，产量差距形成与土壤养分和质地关系密切（Zhang 等，2013）；从耕作角度，Pandey 等通过轮作试验研究了 4 种作物（鹰嘴豆、小麦、大麦、芥末）在不同条件下的产量差距（Pandey，1997）；从生物学和农学的角度分析，形成不同产量水平之间差距的主要原因有：化肥的投入水平、有机肥的施用以及植保措施和播种质量；而从农民角度考虑，形成差距的主要原因有：灌溉管理水平低、缺乏抗性强的品种、农业技术的缺乏以及土壤贫瘠（林毅夫，1996）；从品种进化的角度，品种的更替优化了作物形态上的特征，同时也促进了作物产量水平的提高（刘园，2012）；从气候变化角度，气候资源是自然资源中影响农业生产最重要的组成部分之一，其对农业作物布局及产量都起到了决定性的作用（Lobell 等，2006）。目前看来，产量差产生机制的解析主要关注以下 3 个方面：

（1）气候变化对作物产量差的影响。在全球气候变暖的背景下，气候变化对作物生产影响的研究成为热门话题。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的研究发现，从 1950 年开始，全球温度每隔 10 年大概增加 0.13°C ，温度呈现上升趋势，然而目前气候变化对农业的影响仍然是不清楚的。气候变化对作物产量差的影响比较复杂，研究者针对全球不同区域运用多种方法进行了相关研究，不同方法间结果有所差异。统计分析的方法往往会忽略品种改变引起的影响，造成对气候变化分析的不合理性。Lobell 通过对 1980 年以来小麦、玉米、水稻和大豆主要种植区的温度和降水条件进行了分析，结果表明在全球尺度上，由于 1980—2008 年气候变暖的趋势，使小麦和玉米分别表现出 3.8% 和 5.5% 产量的减少，而水稻产量的变化则因地区不同呈现出较大的差异（Lobell 等，2011）。通过对墨西哥西北部州的气候变化趋势分析可知，由于生育期内夜间温度下降，并且品种改良和栽培管理措施改变而引起的净产量的变化比之前预测的要小，因此墨西哥小麦的产量在过去 20 年内增长了 25%（Rejesus 等，1999）。从 1980 年以来，我国大多数地区的温度呈明显的上升趋势，并且由于这种变化，引起了作物生育期和产量的改变（Tao 等，2006）。在目前耕地面积有限的情况下，正确应对气候变化，缩减作物产量差，提高粮食总产是保证全球粮食安全的重要途径。

（2）品种对作物产量差的影响。品种是影响作物产量差大小的重要因素，目前已有很多关于改变不同生态类型的作物品种对产量差影响的研究。品种更替是应对气候变化对冬

小麦和夏玉米产量差带来影响的重要措施。对于华北地区的小麦和玉米,品种的改变消除了由于气候变暖而引起的生育期缩短,保证开花前所需的生长时间,花后生长期内温度的降低延长了作物的灌浆期(Liu等,2010)。王靖利用 APSIM 模型模拟了澳大利亚未来气候条件下改变冬小麦品种后产量的变化,指出不同生态型的小麦在气候变化条件下出现不同的表现,有的品种会增产,但有些品种会减产(Wang等,2007)。在20世纪的小麦品种进化过程中,绿色革命以前品种的产量水平无明显差异,而在1975年之后推出的品种与老品种相比,产量水平有了10%~15%的差距,虽然老品种具有密植增穗的特征,然而却在新品种的大面积推广过程中消失了,取而代之的是高穗粒数对丧失功能的补偿,就粒重比较而言,也增加了6%~8%。品种的更替优化了作物形态上的特征,同时也促进了作物产量水平的提高,但减弱了老品种密植增穗的特征(Pandey等,2000)。

(3) 栽培管理措施对作物产量差的影响。栽培管理措施对产量差有重要的影响,目前通过微观实验解析产量差限制因子的研究多属于该类。合理高效的栽培技术能够发挥作物高产潜力,提高对不同环境条件的适应能力,实现平均产量水平的增加(兰林旺,1995)。区域产量差异主要由直接的人为因素如改进田间管理措施、增施化肥等影响,而非由气候变化、灌溉、盐渍化、地下水位、虫害等自然或间接人为因素影响(Doos和Shaw,1999)。Reddy认为,除氮素外其他资源的较少投入是水稻产量差距形成的主要因素(Reddy,2006);Mussnug认为在营养平衡的条件下,钾(K)已经成为以水稻为栽培基础的农作系统最主要的限制性营养元素,并造成了较大的产量差距,而镁(Mg)则是居于第二位的限制性营养元素(Mussnug,2008)。在生产实践中,不当的资源投入或配比则可能是造成产量差距的重要原因,而适时适度的水分胁迫、甚至是多种资源的胁迫往往并不会导致产量的明显降低,有时甚至有益于增产。在水资源限制地区,合理调节作物管理技术能够增加作物产量,并提高资源利用效率。播期、播量、病虫害防治、灌溉、肥料等栽培管理条件均是作物产量差的限制因子,但不同地区这些因子对作物产量差的限制作用有所不同。缩小产量差距的主要手段将是改革政策、增加投入、加强技术推广和对农民进行技术培训,而提高产量的措施将主要依靠高产综合管理技术的改进和应用。

1.2 作物产量差的研究方法

产量差形成的原因是多样的,与品种特征、环境因素、技术水平、经济状况、政策法规等均有密切的联系。不同类型的产量差,其形成的主要原因可能是不同的,这就需要采用系统方法对其进行分析。关于作物产量差的研究方法包括田间试验、统计分析模型、参与式评估、跟踪试验和模型模拟等方法。不同研究方法各有所长,但田间试验和跟踪试验大都是通过试验与一个预先设定好的处理进行比较,然而有限的人力、物力和财力总是限制着这些试验研究的数量和质量(王纯枝,2009)。参与式评估法虽然提供了一种很好的思路,可以快速评估区域产量差距状况,但其结果不能进行定量化分析,且收集数据的准确度不高。关于模型模拟,国内外相继开发出数十个大型的作物生长模拟模型,包括 CERES 模型、WOFOST 模型、WINEPIC 模型、APSIM 模型、CROPSYST 模型、GOSSYM 模型、RCSODS 等。近年来,将模型模拟方法与地理信息系统、遥感技术等相

结合来进行区域作物生产过程模拟研究是一种发展趋势。

1.2.1 田间试验方法

田间试验主要集中于各种产量限制因子研究,如干旱、肥料亏缺、病虫害等对产量的影响。影响作物生长和产量的因素很多,包括土壤、气候、管理等多个方面,而且很多因素之间相互关联。这就需要针对影响产量的一个或几个因子,严格控制或半控制其他因子,通过在试验站或农户田块布置不同处理进行比较分析,从而确定指定因子对作物产量的影响。国内外很多学者通过田间试验的方法对作物产量差进行了系统研究。例如,Meertenst 于 1990—1991 年在坦桑尼亚选择 2 个村农民田块里布置 6 个棉花处理试验,该试验主要通过设置杂草、肥料和病虫害处理,最后分析发现只有杂草处理对产量有显著的影响。Becker 和 Johson (1999) 在非洲选择 64 块洼地灌溉水田布置试验,分析水管理、氮肥施用以及杂草管理对水稻产量的影响。A. Boling 等于 1997—2000 年在印度尼西亚中爪哇地区布置试验,对于干旱、肥料亏缺、病虫害以及其互作作用对雨养低地水稻产量的影响进行了定量研究,结果表明氮肥缺失平均可使产量减少 42%,钾肥缺失平均可使产量减少 33%~36%,磷缺失可使产量减少 3%~4%,干旱可使水稻平均减产 20%~23%。黄凤林 (2008) 通过对超级杂交早稻新品种株两优 819 在不同自然与技术条件下种植的产量差异的分析比较,较系统地研究了自然与技术条件对水稻产量的影响。结果表明,从不同生态区株两优 819 大面积的产量来看,自然生态条件是影响水稻产量的主要因素,产量差异可以达到 15% 以上,技术条件的影响较小,仅为 5% 左右。A. Audebert 和 M. Fofana (2009) 对非洲西部地区因重金属污染造成的水稻产量差进行了研究,结果表明,与无铁污染区域相比,铁营养紊乱平均可使水稻产量减少 43%。熊又升、袁家富等 (2009) 对氮肥用量对不同小麦品种产量和品质的影响进行了研究,结果表明在一定范围内,作物的产量会随着施氮水平的提高而增加,施氮作为提高小麦产量和改善小麦品质的重要技术措施,不同小麦品种对氮肥的表现存在不同程度的差异。A. Boling 等 (2010) 对印度尼西亚中爪哇地区不同地形条件下水稻的产量及两类产量差进行了研究,结果表明,高海拔地区水稻的实际产量低于低海拔地区,高海拔地区水分亏缺和氮肥亏缺造成的产量差均高于低海拔地区,其主要是由于地势高的地区漏水漏肥现象比较严重造成的。田块尺度的研究可以明确特定因子在作物产量形成中的作用,但是在解释空间和时间变异方面能力有限。

1.2.2 统计分析模型方法

作物产量差及产量限制因素的统计分析方法较多,归纳起来主要包括以下几种:回归分析、通径分析、比较优势分析、主成分分析和回归树分析方法。

(1) 回归分析。利用两个或两个以上变量之间的关系,由一个或几个变量来预测另一个变量的统计方法,主要包括一元线性回归、多元线性回归、逐步回归和非线性回归等 4 种类型。Casanova 等利用逐步回归方法构建了土壤属性对产量的预测方程,并分析了土

壤养分含量、pH、土壤质地、土壤盐碱度等指标对墨西哥埃布罗三角洲地区充分灌溉条件下水稻产量的影响。赵宝军和宫永红用逐步回归方法分析了 7 年的监测数据来探寻核桃产量的主要影响因子。通常在进行回归分析时,假定各因素之间是相互独立的,但实际生产中各因子是相互影响的,如果产量影响因子间高度相关的时候,多元回归分析中最小二乘法就会失去作用,可能会得到不合理“最优”子集。

(2) **通径分析**。多元回归中能够反映自变量相对重要性的一种分析方法。通过通径网络图,不仅可以把相关关系和回归关系表示出来,还能够直观有效地表示相关变量间原因对结果的直接影响效应,估计出原因因素对效应因素的间接作用,从而能直接比较各原因因素的相对重要性。找出由于自变量间相关性很强而引起多重共线性的自变量,通过逐步通径分析,剔除不必要的自变量,建立“最优”的回归方程。张玉铭等采用通径分析方法研究了影响玉米产量主要因素之间的相互关系,剖析了各因素对提高玉米产量的相对重要性。

(3) **比较优势分析**。旨在找出产量主要限制因子,并对限制因子进行定量化分析,其主要通过比较农民田块实际生产情景进行产量差分析。De Bie (2000) 详细介绍了比较优势分析方法,利用该方法对泰国水稻和芒果的产量限制因子进行了定量分析。刘明强 (2006) 基于农户调查数据和试验监测数据采用比较优势分析方法对河北曲周冬小麦-夏玉米产量差及产量限制因子进行了定量分析。陈健等 (2008) 在农户调查基础上,采用比较优势分析法对曲周县 2003—2004 年度冬小麦产量差异进行分析,结果表明土壤盐碱度、土壤肥力和是否咸水灌溉是冬小麦的主要产量限制因子,小麦品种次之,播种时间、返青期追施氮肥类型、病虫害防治和返青期是否水分胁迫等为非主导因子。比较优势分析法的主要缺陷是不能进行外推,即获得的模型只能在建模的本地区应用,如果要应用于其他地方,就必须再次进行校正。

(4) **主成分分析**。在一组变量中找出其方差和协方差矩阵的特征量,将多个变量通过降维转化为少数几个综合变量的统计分析方法。由于其在对高维变量系统进行最佳的综合与简化、客观地确定各个指标的权数和避免主观随意性方面的突出特点,在产量差研究中具有十分广泛的应用。例如郭笃发和王秋兵 (2005) 以小麦产量、表层土壤有机质及其他养分(氮、磷、钾)含量的实测值为变量,应用主成分分析方法,研究了山东省莒南县小麦产量与这些因子的关系,并利用田间试验加以验证。高吉喜等 (2006) 利用主成分分析方法对农田土壤污染物进行识别,并对土壤环境质量进行分级。

(5) **回归树分析**。本原理是通过对由测试变量和目标变量构成的训练数据集的循环二分形成二叉树形式的决策树结构。该算法既可以用于分类,也可以用于连续变量的预测。Lobell 等利用回归树方法和线性回归方法对比分析了墨西哥索诺拉灌溉小麦产量限制因子,最后指出回归树方法可以充分考虑产量影响因子对产量的非线性关系以及因子间的交互作用,是进行区域作物产量差分析的有效分析方法。

1.2.3 参与式评估方法

农户调查的方法在作物产量差研究中具有重要的应用,通过农户调查获取农户作物管