



基于粮食安全的中国水资源 利用及其效率研究

Jiyu Liangshi Anquan De Zhongguo Shuiziyuan
Liyong Jiqi Xiaolü Yanjiu



张雄化 范厚权 著

本研究以效率评价为主线贯穿全书，具体的内容体例采用“总—分—总”的格局。一是总体上分析各个资源特点、总体资源在粮食安全中的地位、总体资源的利用效率水平；二是重点对水资源利用效率的方方面面进行细分研究；三是附带分析其他资源效率情况；四是总结国外水资源利用管理经验和我国实情并提出资源改进措施。



西南财经大学出版社
Southwestern University of Finance & Economics Press

中国·成都

中国博士后科学基金第57批面上资助、中国粮食安全与
水资源利用效率研究（项目编号：2015M572346）



基于粮食安全的中国水资源 利用及其效率研究

Jiyu Liangshi Anquan De Zhongguo Shuiziyuan
Liyong Jiqi Xiaolü Yanjiu

张雄化 范厚权 著



西南财经大学出版社
Southwestern University of Finance & Economics Press

图书在版编目(CIP)数据

基于粮食安全的中国水资源利用及其效率研究/张雄化,范厚权著. —成都:西南财经大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5504-2467-8

I. ①基… II. ①张…②范… III. ①粮食问题—研究—中国②水资源利用—利用率—研究—中国 IV. ①F326.11②TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 137974 号

基于粮食安全的中国水资源利用及其效率研究

张雄化 范厚权 著

责任编辑:何春梅

助理编辑:涂洪波

封面设计:杨红鹰 张姗姗

责任印制:封俊川

出版发行	西南财经大学出版社(四川省成都市光华村街 55 号)
网 址	http://www.bookcj.com
电子邮件	bookcj@foxmail.com
邮政编码	610074
电 话	028-87353785 87352368
照 排	四川胜翔数码印务设计有限公司
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	170mm×240mm
印 张	13.5
字 数	245 千字
版 次	2016 年 6 月第 1 版
印 次	2016 年 6 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5504-2467-8
定 价	68.00 元



1. 版权所有,翻印必究。
2. 如有印刷、装订等差错,可向本社营销部调换。

目 录

1 绪论 / 1

- 1.1 研究的意义 / 1
- 1.2 理论基础与文献综述 / 3
- 1.3 粮食安全与自然资源的界定 / 14
- 1.4 主要内容 / 15
- 1.5 研究目标 / 17
- 1.6 拟解决的关键问题 / 18
- 1.7 研究方法及关键技术 / 20
- 1.8 技术路线 / 23
- 1.9 研究创新之处 / 24

2 粮食生产中自然资源的利用特征与地位 / 26

- 2.1 引言 / 26
- 2.2 几种常见自然资源利用特征分析 / 27
- 2.3 新常态下粮食安全中的资源利用地位分析 / 40

3 粮食生产中自然资源总利用效率：土地、水和气候 / 59

- 3.1 引言 / 59
- 3.2 粮食生产中的资源分类及其基本特征分析 / 60
- 3.3 粮食生产中的自然资源利用效率实证分析 / 63
- 3.4 研究结论与启示 / 73

4	基于粮食安全的真实水利用效率分析 /	74
4.1	水资源利用效率与粮食生产的动态分析 /	74
4.2	灌溉水资源利用效率、空间溢出与影响因素 /	86
4.3	水资源相关热点问题的研究概述 /	96
4.4	结论及启示 /	99
5	基于粮食安全的虚拟水资源利用效率及预测 /	100
5.1	引言 /	100
5.2	中国粮食需求、虚拟水及其国际贸易的现状 /	101
5.3	水资源利用效率的测算及其与虚拟水贸易的关系 /	118
5.4	水资源生态环境效率与虚拟水贸易关系 /	124
5.5	未来十年粮食供需预测与虚拟水供需预测 /	126
5.6	结论及启示 /	137
6	气候变化关联水资源的利用及其效率影响分析 /	138
6.1	引言 /	138
6.2	气候变量对粮食产出的影响分析 /	139
6.3	极端天气对粮食产出的影响及预测 /	141
6.4	洪涝和干旱灾害对粮食产出的影响分析 /	144
6.5	气候框架下的粮食安全 CGE 模型 /	155
6.6	结论及启示 /	156
7	其他自然资源利用及其效率分析 /	159
7.1	引言 /	159
7.2	能源在农业中利用的基本情况 /	161
7.3	农业能源消耗及其碳排放量特征分析 /	162
7.4	农业能源消耗效率及节能减排空间实证分析 /	165
7.5	结论及启示 /	173

8 国外资源利用管理的经验借鉴——以水资源为例 / 174

8.1 引言 / 174

8.2 美国、欧盟、印度和澳大利亚的水资源管理经验 / 175

8.3 国外水资源管理经验对我国的启示 / 178

9 粮食安全与自然资源利用协调发展的措施 / 180

9.1 自然资源效率低下的原因分析 / 180

9.2 粮食安全与自然资源协调发展的思考 / 182

9.3 自然资源效率提升的具体措施 / 187

10 总结 / 192

参考文献 / 195

图表附录 / 201

致谢 / 210

1 绪论

1.1 研究的意义

随着工业化和城镇化加速发展,粮食生产中的土地、水、能源等不仅变得日益稀缺,也受到内外部环境的影响。2005 年我国已有 20% 的耕地遭到重金属污染(裴敏欣, 2014)。2011 年我国生活废水排放量为 428 亿吨,工业废水排放量为 231 亿吨,灌溉流域受到较为严重污染(中商情报网, 2014)。2000—2012 年我国粮食生产中化石能源消耗的年均碳排放总量约为 82.5 亿吨。这说明农业自然资源的利用处境堪忧,如何既维护粮食安全(数量安全和质量安全),又改善农业自然资源的利用处境是当前迫切需要解决的问题。本研究认为综合高效利用国内外农业自然资源是破解这一问题的有效办法。

(1) 调整资源结构和利用技术提高资源利用效率是保证我国粮食安全的有效方案之一。相关研究表明,提高农产品数量和质量的有效途径之一就是最优化资源利用(Behrouzi et al., 2012)。目前,中国粮食产量主要依靠单位亩产量的提高,而非扩大种植面积,故粮食产量在面临气候改变,水、土地、能源稀缺以及农业面源污染、土壤质量下降加剧的情况下,提高粮食产量最快和最现实的路径是运用和推广现存的农业技术(FAN et al., 2013)。同时,调整粮食生产的资源结构和优化资源效率应该建立土地、水和气候一体化的地理信息监测系统(GIS),建立健全土地、水和气候资源流转市场及其衍生市场。就气候资源利用而言,中国粮食自给安全的潜在解决方案之一,就是育种更适宜气候变化的高产粮食品种(CHEN et al., 2013)。单就能源利用而言,粮食生产中应该重点使用清洁电力和优化区域农业能源结构,以此缩小区域内部的能源效率差距。所以,调整农业自然资源、提高自然资源利用效率是保证我国粮食安全的有效方案。

(2) 粮食产品虚拟水国内外贸易可以同步缓解我国粮食紧平衡状态和水短缺状态。一方面,以土地为载体,真实水利用及其效率的提高,可以有效促成粮食单位产量及总产量供给的跃升;另一方面,虚拟水贸易可以作为粮食供给补充的另一条思路。虚拟水是指凝结在商品或服务中无差别的单元水,表示为生产给定商品或服务所需水的数量(Allan, 1998; Wilchens, 2001; Chapagain & Hoekstra, 2004)。中国农产品贸易属于净虚拟水进口国(Biro, 2012),我国粮食总体对外依存度已达28%,大豆对外依存度更是达到80%以上。据估算,我国粮食产品虚拟水年净进口量约为964.81亿立方米,大豆虚拟水进口占主导地位。我国属于贫水国(人均水资源量仅为世界平均水平的1/4),而农业用水却占全行业用水量的60%以上,粮食产品虚拟水贸易可以缓解我国粮食供需的紧张局面,也可以节约更多的实体水,用于生活、工业和生态用水。此外,我国粮食产品虚拟水贸易属于产业内贸易,但粮食虚拟水贸易不符合国际贸易的H-O理论。我国富水区不一定出口更多的虚拟水,我国贫水区也不一定进口更多的虚拟水,可能的原因是我国粮食产品及虚拟水贸易属于省际间贸易,这一发现可以作为我国粮食产品及虚拟水国内外贸易的理论基础。

(3) 关注化石能源及其非期望碳排放能有效地评估粮食安全生产的能耗及其效率。改革开放以来,随着石油工业的高速发展,我国粮食供求的紧平衡状态得益于石油化学农业(倪国华, 2012)。但长期来看,能源加速消耗将阻碍全国农业长期增长,过多的化石能源消耗也将造成更多的碳污染。我国粮食生产的能源消耗主要以农机及灌溉用能和煤电为主,两者产生的碳排放约占总能耗碳排放量的94%。另外,我国粮食生产能源效率分布不均衡,如不同粮食产品的区域能源效率存在差异(陆文聪, 2010),粮食生产能源效率较高的省份主要集中在东部工业区,而粮食生产效率较低的省份主要集中在西部农业区。笔者认为,应该考虑粮食生产中直接和间接的化石燃料消耗及碳排放,可以运用包含非期望碳排放的DEA模型评估粮食安全生产的能耗及其效率,据此可以深入探讨粮食安全生产范围内的节能空间和减排空间。

(4) 规避和预防气候变化对粮食减产的影响是节约粮食的有效途径之一。气候本身是一种中性资源,适宜的气候对人类生产、生活产生有利影响,但随着工业和城镇化加速发展及我国采用以煤炭、煤电和石油等为主的化石能源消费结构,我国排放了大量的二氧化碳,严重破坏了原有的气候生态,使我国气候资源转变为一种灾害,气候灾害呈现出范围广、频次高、时间长、破坏强的特点。其中,农业领域及粮食生产是受气候灾害肆虐最为严重的领域,每年我

国直接和间接受气候灾害减产的粮食,笔者估计至少可以额外养活 1 亿人口,因此规避和预防气候灾害对粮食生产的影响大有必要。据此,本研究统计历史相关气候数据与粮食产量,试图判断过去气候对我国粮食产量的影响如何,并通过建立适当的回归模型,预测未来 2025 年的气候对我国粮食产量的影响程度,借此提出有益的应对气候变化的政策。

1.2 理论基础与文献综述

1.2.1 本研究的理论基础

1.2.1.1 自然资源及效率理论

自然资源一般是可耗竭资源,人类发展离不开资源的利用,如何用有限的自然资源实现人类的持续发展是当今世界面临的难题。大量的事实表明,一个国家经济发展水平与资源利用是一种倒 U 形曲线关系,即在经济早期阶段,伴随经济的增长资源消耗量快速增长,随着经济进一步的发展,资源利用达到一定平台后出现回落的趋势。促成这一趋势的原因包括技术进步带来资源效率的提高、对原有资源的替代、循环经济发展、经济高端化后远离物耗要素等。我国经济发展处于工业化中后期阶段,资源依然需要较长时间的大量消耗,资源效率的提高将成为经济发展的有效选择手段。

近年来,在资源与经济相互关系日益受到政府、企业和学界深刻认知背景下,国内关于资源及其效率的研究兴起。重点表现为:整体资源效率国家和区域层面的研究(吴狄、武春友,2012;程晓娟,2012);水资源区域、行业 and 全国层面的研究(马海良、黄德春等,2012;陈观聚、白永秀,2013;魏楚、沈满洪,2014)和关于国际资源效率研究演化的研究(王晓玲,2013;郭玲玲等,2012)。农业资源研究方面,有单个省份农业资源情况的研究,如刘军等(2012)利用农业资源可持续模型和资源丰度模型评价了湖南农业资源利用水平;张燕、张洪等(2012)分析了安徽种植业资源利用情况,得出不再追加人工资源的方法提高产出最符合资源节约型农业的要求。有利用境外农业资源的研究,如周文涛等(2012)和马晓河等(2012)分析了中国利用境外农业资源的情况,均认为利用比较优势原则,我国应该进口土地密集型农业产品,出口劳动力密集型农业产品。以上几个方面,国内对农业资源研究定性方法居多,依然缺乏关于全国及区域层面的农业资源及其效率的定量研究。

1.2.1.2 土地资源、气候资源和水资源效率理论

土地是财富之母,土地资源是农业及其他生产活动的核心载体资源。农地利用及效率方面,罗必良(2000)分析了土地规模效率决定的理论基础。刘云生(2006)认为,农村土地地方公有制应该向农村土地国有制转变,以此较为缓和的方式可以提高土地效率和土地价值。方文(2011)研究了我国不同时期土地规模经营与土地效率二者的关系,研究发现二者的相关性在不同时期有着方向上的变异。马世发等(2014)对土地利用规划模型进行文献综述,指出土地利用规划的核心是数量结构和空间布局的调整。崔许峰(2014)对我国建设用地利用效率、农地利用效率和综合效率进行分析,研究结果显示三者皆呈现空间集聚特征。土地利用与水文相关方面,张翔等(2014)研究汉江流域土地利用/覆盖变化的动态关系,预测结果表明汉江流域上游的水田、旱地、灌木林和建设用地面积均有不同程度的增加,且建设用地增幅最大。水文模型预测显示该区域的流域年径流量和蒸发量均将增加。另外,城镇土地利用及效率方面,孙平军等(2012)对我国城镇用地效率的空间分异进行研究,结果显示我国城镇土地的投入水平特征是粗放、低效,空间特征是效率分异明显。张志军(2014)对我国城市土地利用效率进行了测算,结果显示城市土地利用效率整体偏低,土地利用率高到低排列依次是东部、西部和中部。

水资源和气候等资源对农业和粮食生产的影响日益增加。气候变化及气候变量影响农业及粮食生产。例如,IPCC(2013,2012)研究表明,农业对气候改变的长期趋势与短期的降雨和温度及发生的干旱、洪涝、热浪、霜冻等均特别敏感。IPCC(2012)指出气候改变尤其挑战粮食生产系统和自然资源的持续性。Grafton & Keenan(2014),Chartres & Noble(2015)指出,未来气候变化最主要的是气候变量影响下增加的极端天气事件对粮食产量供给的影响。以上说明,气候变化很多因素是关联水资源的,气候变化带动水资源影响粮食生产及安全。极端天气影响粮食安全。例如,MacMahon et al.(2015)研究澳大利亚的粮食后认为是安全的,但2010—2011年的洪涝灾害使粮食安全受到重要影响。Doward et al.(2014)研究英国后指出,2014年洪涝增加了主要农场的脆弱性。Cai et al.(2015)认为未来较为严重的洪涝风险将增加。Wei et al.(2015)就中国假设两种极端情景,降雨量最小和降雨量最大,并研究农民通过市场的同步应对措施,采用可计算的一般均衡模型进行粮食安全预测。结果显示:极端降雨情景就国际层面来说对中国收获影响不是特别严重。以上说明,极端降雨量、洪涝灾害是影响粮食增产的重要因素,需要重点关注。气候变化下的水资源风险管理研究总体上主张采用全盘管理和整合管理。例如,

Lal (2015) 基于气候改变和自然资源需求增长, 主张采用整合和全盘的联系方法管理水、土壤和污染物等以保证全球粮食安全。Parvin et al. (2015) 认为, 气候改变、洪涝灾害、粮食安全和人类健康等是相互联系的议题, 需要合并应对处理。Keppen et al. (2015) 基于美国加利福尼亚州 2014—2015 年的大旱对西部农业生产的重要影响, 推荐了两个增加水供应弹性和可靠性的工具: 调解和整合的解决方案由各利益相关者产生; 增加水储存基础设施。笔者针对中国以水旱为主的自然灾害提出为保障粮食可持续安全需要进行整合水资源管理、开发应对气候变化工具和补充基础水利设施缺口投资及建设。

在所有资源研究中, 水资源效率研究较为全面。其原因在于水资源问题日益影响到全球粮食的安全。中国严重缺水, 淡水资源人均拥有量为 2 200 立方米, 仅占世界平均水平的 1/4, 属于人均水资源最贫乏国家之一。与此同时, 中国农业用水总量却占绝对优势地位, 约占全国用水总量的 60% 以上。如何科学利用水资源服务农业及粮食生产是我国面临的主要矛盾之一。

我国地处亚洲季风区, 水资源影响农田灌溉和粮食生产。有研究表明, 水稻是亚洲季风区理想的粮食作物, 随着灌溉率的增大, 单位稻谷亩产量最终也将增加。同时, 小麦、玉米等口粮也属于高耗水作物, 提高其产量也不容忽视灌溉效应。粮食生产用水划分为绿水 (Green Water) 和蓝水 (Blue Water)。绿水主要是指雨水, 包括渗透到作物或土壤中用于植物生长的部分, 和重新蒸发回归到大气层的部分; 蓝水主要指雨水最终变为江河湖泊和地下水。蓝水是农业用水管理的主要部分, 故提高灌溉用水效率, 本质应提高蓝水利用效率。

农业及粮食生产水资源利用有其自身特色。Chartres et al. (2015) 明确各国农业是水资源利用的主要行业。Rosegrant et al. (2009), Noorka et al. (2013) 指出, 农业水资源普遍稀缺并受到人口、经济、食物偏好、天气等多重因素的影响。FAO (2009), Huang et al. (2015), Marsily et al. (2015) and Singh (2015) 强调农业及粮食生产中的水资源主要依靠降雨和地下及地表水。

水资源利用及测量体现出全面精准的特点。第一, 水利用指数方面, Rosegrant, Cai and Cline (2002) 对灌溉水供给可靠性指数下降进行了研究。Frouzani and Karami (2010) 开发了农业水贫困指数 (Agriculture Water Poverty Index, AWPI), 用来衡量农业用水的安全水平。第二, 水消耗量方面, Zimmer (2013) 研究了不同粮食产品生产的耗水量。Marsily et al. (2015) 测算表明全球粮食单位产量和总产量消耗水量会越来越多。第三, 食物水耗量方面, WEF (2011) 研究表明, 生产 1 卡路里食物需要消耗 1 升水。Allon (2015) 研究表明国家及个人经济 90% 的水内嵌在食物供应消费链中, 全球绿水的 80% 主要

用于作物和家禽生产,超过20%的蓝水主要用于灌溉。第四,水评估方面,García-Tejero et al. (2011) 在研究中利用了国际水管理机构(International Water Management Institute)的不同土地覆盖面的蒸发评估研究水耗情况。Crafton et al. (2015) 利用全球粮食和水系统(Global Food Water System, GFWS)平台模拟不同国家生产规划量的粮食及水资源在灌溉农业上的需求量。以上水资源测量及评估等方面的研究,为农业水资源结构和粮食产品水耗结构的分析提供了较好的借鉴。

水资源利用类型影响农业及粮食生产。Spring et al. (2009) 指出,谷物生产中依靠雨养和灌溉的比率为:发展中国家灌溉农业占39%,雨养农业占30%;发达国家雨养农业占20%,灌溉农业占11%。Smilovic et al. (2015) 以印度为例计算了地表水和地下水灌溉情景下的潜在谷物产量变化,得出地下水灌溉相比地表水灌溉将产生较高的粮食产出。笔者具体研究了三种情景:第一,非灌溉的田地按照灌溉水资源的特别分布状态按比例进行灌溉的产量(大米、小麦)增加情况;第二,非灌溉田地用地下水进行灌溉的产量(大米、小麦)增加情况。第三,不进行灌溉的粮食(大米、小麦)潜在损失。以上研究表明,农业及粮食生产用水是依靠降雨还是依靠灌溉?不同地区或省份的农业依靠雨育和灌溉的比例也是值得研究的。

水资源利用时间影响农业及粮食生产。Gao et al. (2011) 指出,中国每年的降雨量从东南的1600毫米递减到西北的200毫米,并且每年80%的降雨量集中在6~9月,对中国农业产生了深远影响。Dharmarathna et al. (2014), Amarasingha et al. (2014) 研究表明,改变水稻种植日期根据降雨开始时间,可以减少灌溉水需求和水稻的种植风险。

水资源利用空间转移影响农业及粮食生产。Gasteyer (2008), Li (2012), Clark et al. (2014) 研究证实水资源地域转移工程的实现利于国家农业及粮食安全。

水资源利用管理体现出重要性和多样性的特点。第一,管理作用。IFAD (2012), Rahman et al. (2015), Zaman et al. (2015) 的研究表明,水资源管理可以维持农业可持续性,增加粮食产量和维护国家粮食安全。第二,适应性管理。Rosegrant et al. (2002) 认为,全球化和贸易自由化将增加粮食生产及水利利用的影响,解决这一发展趋势的办法是进行适应性管理,包括实施农业研究、经济刺激和投资水利基础设施、制定适当管理程序等。第三,弹性管理。Maleksaeidi et al. (2015) 基于弹性将家庭农场进行高、中、低分类,分析水稀缺条件下家庭农场的弹性特征,研究发现高弹性家庭农场特性是高风险管

理、拥有更高的农业水安全、更积极的心理特征、更多的知识管理；且他们拥有较好质量的水和使用现代灌溉系统；最后笔者提出弹性管理水资源是一种有效的供给。第四，技术性管理。Mahendra M. Shah 认为，遥感的应用、地理信息系统和精确的农场技术在农业资源管理中迅速增加：空间估计作物生产的区域和产量；预测极端天气如干旱、洪涝，提高早期的预警和反应系统；地下水质量评估。Singh（2015）指出，使用各种模拟最优模型适合地下水资源问题达到最优的解决。此外，Kurian et al.（2013）提出农业污水管理的理念。以上说明，农业及粮食生产用水管理是必要的，并且不同情况下的水资源均有对应的管理经验可以借鉴。

同时，虚拟水是指凝结在商品或服务中无差别的单元水，表示生产给定商品或服务所需水的数量。按此定义，粮食生产虚拟水是指生产粮食产品所需要投入水的数量，粮食贸易虚拟水是指凝结在贸易粮食中虚拟水的数量。我国水资源短缺和利用效率低下，虚拟水能成为解决农业用水问题的有效途径。简易的虚拟水测量可用不同粮食产品的虚拟水转化系数得到。国外按生产粮食 1 千克需要 1 000 公升水。国内学者如马静等指出了南北方和全国的粮食作物虚拟水含量参数：粮食=1 立方米/千克；谷物=0.9 立方米/千克；豆类=3 立方米/千克；薯类=0.9 立方米/千克。柯兵等结合国外最佳田间试验指出，1 千克干小麦=1 立方米水；1 千克水稻=2 立方米水；1 千克玉米=1 立方米水。相关虚拟水内含量的研究表明，中国农产品贸易整体上属于净虚拟水进口国，与我国加入世界贸易组织后已成为农产品净进口国的现实相一致。其他国家和地区虚拟水研究中，富水区域不一定有经济上的激励来生产粮食进行出口。如亚马逊有丰富的水，但土地较贫弱，因而不可能成为粮食出口地区。另外，足够的土地和较长的生产季节地区，即使水资源贫乏，该区域也可成为农产品较低生产成本的出口者。但以上研究尚存在不足之处，如不同国家及地区的虚拟水计量方法不一致，只能得到欠佳答案；基于粮食角度的国家间的虚拟水贸易研究居多，较缺乏省际虚拟水国际贸易研究；较为缺乏粮食虚拟水国际贸易与生态环境间关系的研究；较缺乏蓝水利用效率对虚拟水国际贸易的影响研究等。

目前，国际资源效率研究进展及其演化趋势表明，水资源等战略稀缺度资源日益受到关注（武春友等，2013）。国内方面对水资源效率的研究也兴起，如魏楚、沈满红（2014）对我国供水部门效率进行研究；陈观聚、白永秀（2013）对我国工业进行全要素水资源效率研究等。农业及粮食生产的水资源效率研究方向表现为：MFA 的水资源生产率研究、SFA 方法的灌溉用水效率研究和 DEA 方法的全要素水资源效率研究。

MFA 的水资源生产率研究。物质流分析 (MFA) 是定量测度经济系统运行中物质使用量的基本工具。Fischer (1969) 首次基于经济学观点尝试国家层次物质流分析。欧盟统计局 (2007) 开始发布主要成员国的国家层次物质流分析数据。国内学者借鉴国外的国家物质流分析框架, 并把物质流分析推演到区域物质流分析和省市物质流分析。陈效述等 (2003)、张天柱等 (2004)、武春友等 (2012) 分别对社会经济系统的物质、化石燃料和煤炭进行了物质流分析及效率测算。黄和平 (2006, 2009)、鞠美庭等 (2010)、钟若愚 (2010, 2014) 等基于物质流分析评价区域经济循环及可持续发展。据此, Huang et al. (2008) 分析中国常州地区物质投入产出时, 用 MFA 方法分析水资源投入趋势及在农业中的利用情况。MFA 的水资源生产率属于单要素生产率, 相对简单与直观。

SFA 方法的灌溉用水效率研究。农业用水效率等于技术上可行的最小水资源使用量与实际使用量的比值 (Kopp, 1981)。Kaneko 等 (2004) 基于分省数据和 C-D 函数建立农业用水效率的随机前沿生产函数, 并据此测定农业用水效率。王学渊 (2008) 依据 Battese & Coelli (1992, 1995) 的 SFA 方法, 研究中国农业生产技术效率和灌溉用水效率。粮食生产蓝水利用效率的新近研究表明, 我国蓝水利用效率普遍较低, 不同省份动态效率出现“高者愈高、低者欲低”的局面 (笔者, 2015)。SFA 的用水效率测算需建立合适的生产函数模型得到, 计算相对复杂。

DEA 方法的全要素水资源利用效率研究。Charnes and Cooper 提出传统的评价决策单元相对效率的数据包络分析方法 (Data Envelopment Analysis, DEA)。Tone (2003) 提出基于非径向 DEA 的包含非期望产出的 SBM 模型。国内外学者利用 DEA 及其扩展方法对水资源效率进行研究。例如, Ali et al. (2014) 基于 DEA 及 Malquist 全要素生产率指数, 估计加拿大南部灌溉区域的水资源利用效率和生产率。Sun et al. (2014) 基于水足迹和灰水足迹的省际面板数据, 结合期望产出和非期望产出的 DEA 模型与空间杜宾计量模型分析区域水资源利用效率及空间溢出效应。DEA 的全要素水资源效率考虑到其他要素及负产出, 计算较为复杂。

农业及粮食生产的水资源利用、效率及其管理的具体研究。第一, 水资源利用现状研究。姚顺波等 (2012) 运用面板 VAR 模型实证分析了有效灌溉对中国粮食单位产量的正向影响。王西琴等 (2014)、何杰等 (2014) 和韩成福 (2012) 分别分析了水资源约束对河南省、松花江地区和内蒙古自治区粮食增产的影响。张培丽 (2014) 对国外粮食安全研究的最新进展进行梳理, 指出

水资源短缺对中国粮食安全构成重大威胁。总体研究显示：灌溉水消耗量大和利用效率低、使用农业地少、生产粮食多的特点（Abdullah, 2006; MWR, 2011; Agha et al., 2011; Gleeson et al., 2012; Cao et al., 2014; Starr & Levison, 2014）。第二，水资源利用效率实证研究。刘小刚等（2013）运用投影跟踪模型评价了云南省农业水资源效率；张俊飏等（2007）、王学渊等（2008）、刘渝等（2012）、陆迁等（2014）基于 DEA 方法或 SFA 方法对地区或全国的农业水资源利用效率进行了研究。Ali et al.（2014）基于 DEA 及 MALQUIST 全要素生产率指数，估计了加拿大南部灌溉区域的水资源利用效率和生产率。其他关于水资源利用效率及风险的研究方法包括 SFA 分析、SWOT 分析、敏感性分析、最优化模型的区域层面分析等（Phillips, 2013; Nagara et al., 2014; Qian et al., 2014; Lany et al., 2014）。总体来看，DEA 方法和 SFA 方法是评价水资源利用效率的基础方法。第三，水资源利用政策研究。刘海林（2012）在对黑龙江粮食主产区地下水资源调查基础上，指出落实最严格水资源管理制度的重要性。刘鹏（2014）对河北省农业水资源管理发展对策进行了研究等。科学水管理措施包括：提高农用水生产力、废水的循环利用、海水的淡化、洪水的利用、虚拟水的进口（Demin, 2014）；发展节水农业，减少粮食生产的蓝水足迹（Fang et al., 2010; Hu et al., 2010）；减少灌溉排水浪费（Azim & Allam, 2005; Khater et al., 2014）；回收利用雨水（Wallacel, 2002）；以水电项目为导向的水资源开发战略需要再评估和重新调整（Ran et al., 2013）；重新设计水的管理制度（Biermann et al., 2012; Galaz et al., 2012; Wiek et al., 2014）；整合协调水政策与农业政策（Villarejo et al., 2014）。以上关于区域和县市层面的粮食生产的水资源生产率的研究比较少见；相对缺乏水资源利用与粮食生产动态效率的实证分析；水管理方案尚缺乏整合的统一框架。

1.2.1.3 粮食安全理论

美国学者布朗率先研究中国水资源与粮食安全，并认为中国水短缺会动摇世界粮食安全（Brown, 1994, 1998）。国际粮食政策研究所与国际水资源研究所（2002）联合发布的《2025 年全球水资源展望报告》指出，日益严重的全球水危机将威胁世界粮食安全，各国政府需加大对农业科技和水利设施的投入。麦肯锡（2009）的一份评估中国华北、东北地区的抗旱措施的报告显示，到 2030 年，华北和东北因干旱灾害损失的粮食将达到 720 万吨和 1 380 万吨。第六届世界水论坛（2012）的主题是“水与粮食安全”，联合国秘书长潘基文在致辞中表示，若要生产足够的粮食来养活迅速增长的世界人口，国际社会就必须确保以可持续的方式利用世界上“最重要且有限的资源”——水。据此，

水资源与粮食安全休戚相关得到世界公认。

粮食安全按照传统的划分包括生产安全、分配安全、交换安全、贮藏安全和消费安全。按照联合国粮农组织（FAO）最新一次即1996年的定义：只有当所有人在任何时候都能在物质上和经济上获得足够、安全、富有营养的食物来满足其积极健康的膳食需要及食物喜好时，才实现了粮食安全。该定义至少强调了粮食安全的四个方面，即粮食生产安全、粮食购买力安全、粮食贸易安全和粮食质量安全（张晓京，2012；吕新业等，2013）。中国当前的粮食安全形势，更应该是粮食供给满足粮食需求，才能算真正意义上的粮食安全。粮食获得的途径无非是自给和对外贸易，因此粮食生产安全和贸易安全至关重要。粮食生产安全需要在一定的水土条件下，生产出保质保量的粮食产品来维持持续增长的口粮消费；口粮不足的部分，需要利用国际贸易的方式来进行补充，国际贸易的安全重在进口国家的多元化、渠道的畅通和粮食价格的合理。

粮食安全问题历久弥新，国内学者在研究粮食安全时，关注到国内粮食生产安全与贸易安全的相对重要性。陈锡文（2014）指出，中国粮食安全面临三大挑战：第一大挑战是质疑中国农业资源及农业技术在多大程度上能保持中国的粮食增长态势，粮食增长必定有极限；第二大挑战是中国快速的社会经济结构的变化影响粮食生产供给与粮食消费结构，将影响到粮食供需的不对称；第三大挑战是中国为保障粮食自给花费了较大的资源和环境代价，努力表现出了负效应。湖州师范学院农村发展研究院（2014）认为，中国粮食安全更应关注世界粮食，尤其是市场份额较小的国际大米市场。为保证粮食安全，我国提出“以我为主，立足国内，确保产能，适度进口，科技支撑”的国家粮食安全新战略和“谷物基本自给，口粮绝对安全”的粮食安全战略目标。至今为止，虽然我国粮食安全面临的挑战较为严峻，但口粮基本能自给，粮食处于绝对安全区间。除大豆外，我国的其他口粮对外依存度均较低，离国际公认的安全红线有一定的距离。

1.2.1.4 可持续发展理论

最早定义可持续发展是世界环境和发展委员会在《我们共有的将来》报告中提出来的，该委员会定义可持续发展为一种能力，“既满足当代人的需要又不牺牲后代人的需要”（WCED，1987；Thomas et al.，1998）。可持续的争论集中于长期的发展，该发展特点是不降低生活水平、严格的自然资源保护、较低的经济风险和生态危机（Lucas et al.，2010）。联合国食品和农业组织设定可持续的农业包括5个主要的属性：资源保护（土地、水、植物和遗传资源）；环境非退化；技术适宜；经济合意；社会可忍受（David，2005）。有的

学者强调可持续的农业包括三个基本功能：生产产品和服务、主导乡村风景和在农村中发挥重要作用（Landais, 1998; Zahm et al., 2008）。有的则强调可持续性农业或许应看成农业资源的成功管理，来满足改变的人类需要，同时保持或提高环境质量和保护自然资源（FAO, 1991; Hatai et al., 2008）。Spiertz（2010）基于可持续性的准则：既能满足当代的需要且不牺牲将来的需要。认为可持续性农业包括三个主要目标：经济利润、环境健康、道德健康。通常被表示为一个3P框架概念：人—星球—利润（people-planet-profit）。欧盟委员会认为，可持续性应用到农业涉及农业系统的能力，它必须是经济上可行、提高农民及农村人的生活质量和改善环境质量（European Commission, 1997; Salazar et al., 2013）。Goswami & Nishad（2014）指出，农业可持续性的基本指标变量有可利用的可耕地和水；依靠别的部门的竞争需求和自然要素如气候变化。另外，决定可持续性的关键要素是需求，它随着人口和饮食习惯改变而改变；而供给需要依靠外部资源（如进口）。

粮食安全生产的水资源可持续利用表现在水资源的经济价值、社会价值和环境价值三个方面。其中：经济价值表现为清洁、高效利用水资源，保证粮食的产量和质量；社会价值表现为各个粮食生产区域能平等利用水资源，水资源贫困地区也能从区域外调水或者通过进口虚拟水来补缺本地水资源的不足；环境价值体现在水资源在粮食生产过程中、在不影响粮食产量及质量的情况下，污染排放量最小。

农业及粮食安全的资源可持续发展体现为一种能力。随着时间推移，农业及粮食的产量、质量和产值注重稳步提高，资源外部使用量和使用总成本注重稳步下降，环境污染量和污染成本也需同步降低。

1.2.2 国外研究现状综述

目前，农业生产的资源利用效率问题日益成为国际研究热点。第一，资源利用效率的研究方法和手段。国际主流的研究方法包括：①运用边际产品价值（MVP）与边际要素成本（MFC）的比率来反映资源利用效率（Mbanasor & Obioha, 2003; Karthick et al., 2013）；②运用数据包络分析（DEA）方法计算不同作物类型的农场或农户的技术效率水平（Shavkat, 2011）；③运用生产函数—柯布道格拉斯生产函数（C-D）、随机前沿生产函数（SFA）和超越对数生产函数（Translog）反映要素资源投入量（或单位成本）与产品产量（或单位产值）之间的函数关系，通过普通最小二乘（OLS）回归或极大似然估计（ML）方法来判断各种资源的效率利用水平（Dung et al., 2011; Sanzidur,