

曾志勇. 气候变化对农业影响的研究进展与前沿——以水稻为例[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 20–26.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.005

# 气候变化对农业影响的研究进展与前沿 ——以水稻为例

曾志勇<sup>1,2</sup>

(1. 武汉学院会计与金融学院, 湖北武汉 430212; 2. 华中农业大学经济管理学院, 湖北武汉 430070)

**摘要:**在全球气候变化背景下,我国农业生产活动所受到的影响越来越严重。本文以水稻为研究对象,从生产方式、种植制度、经营方式、结构布局等不同角度总结和分析了气候变化与农业活动之间的相互关系与作用机制。结果表明,现有的研究主要分析气候变化对水稻产量与水稻种植面积的影响,而在水稻生产对气候变化的适应性与脆弱性这一领域,几乎无人问津。鲜有的关于水稻生产对气候变化适应性与脆弱性的研究发现,研究时段长短的差异以及不同的区域水稻生产对气候变化的适应性与脆弱性不尽相同。因此,气候变化背景下水稻种植户的适应性行为研究将成为未来研究的主要方向,加强对这些方面的研究将有助于深化与完善气候变化与农业影响双向互动机制的研究。

**关键词:**气候变化;农业;水稻生产;影响;研究进展

**中图分类号:** S162      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0020-07

自 20 世纪中后期以来,气候变化问题一直是全球的热点话题。关于气候变化的研究也越来越多,并且其研究已经远超出大气科学研究范畴,涉及到社会经济学方方面面。特别是在我国,气候变化与农业生产行为关系密切,彼此之间存在着相互影响和相互作用的关系。一方面,气候变化的加剧给我国粮食生产带来了严峻的挑战;另一方面,我国粮食生产也积极适应气候变化并对其产生积极影响。因此,本文首先从自然科学角度和社会科学角度阐述气候变化及未来气候变化对农业生产的影响。其次,以水稻生产为重点,分析气候变化对水稻总产量、种植面积、水稻单产的影响;总结气候变化对水稻生产影响的研究成果。最后,关于水稻生产对气候变化的适应性及脆弱性分析,进行了梳理与评价,为深入开展气候变化对农业生产影响的研究和制定我国应对气候变化的农业生产政策提供经验借鉴。

收稿日期:2018-03-21

基金项目:国家社会科学基金(编号:15BJY099)。

作者简介:曾志勇(1985—),男,湖北汉川人,博士研究生,讲师,主要从事粮食安全研究。E-mail:165292846@qq.com。

## 1 气候变化对农业的影响

### 1.1 自然科学角度

气候变化给全球生态环境带来了相应的影响,农业生态环境也不例外。最早对其展开研究的是自然科学界的专家学者们,他们主要利用观测试验和构建作物模型对气候变化与农业生产活动之间的关系进行模拟分析。

1.1.1 关于观测试验的研究 在国外,学者们首先以农作物、树木、草等作为研究对象,通过开顶试验室(open-top chamber)与温室环境控制(controlled environment)研究气候变化对其的影响。研究发现,相关农作物的主要蛋白质及酶、非结构性碳水化合物含量在气候变化的作用下有所增加,这将增强作物光合作用,同时抑制作物呼吸作用,提高水分利用效率,从而改变农作物的生理形态结构与化学组成成分,最终导致农作物产量增加,这些都是气候变化导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加所带来的结果<sup>[1]</sup>。后来,有学者通过试验得出了与之相反的结论,他们认为在早期大气 CO<sub>2</sub> 浓度的增加会导致作物光合作用的加强,但是如果高 CO<sub>2</sub> 浓度对作物的影响时间比较长,那么作物光合作用不但不会加强,反而会由于植物叶片

[54] 陈富桥, 杜 佩, 胡林英, 等. 茶产业区域发展综合实力评估研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(12): 157–163, 191.

[55] 李 坤. 体验经济模式下的茶文化旅游发展[J]. 福建茶叶, 2016(5): 170–171.

[56] 吴华群. 基于智慧旅游视角的茶文化旅游资源开发模式研究[J]. 福建茶叶, 2016(6): 138–139.

[57] 宋 韬. 休闲体育旅游视域下的茶文化旅游发展路径研究[J]. 福建茶叶, 2016(6): 301.

[58] 徐 茜. 低碳经济背景下的茶文化旅游发展策略[J]. 福建茶叶, 2016(5): 146–147.

[59] 龚苏宁. 基于“超旅游”理论探究茶文化旅游的创新发展[J]. 福建茶叶, 2017(12): 108.

[60] 刘清洋. 全域旅游视角下信阳茶文化旅游产品体系构建[J]. 对外经贸, 2017(11): 79–81.

[61] 吴兰卡, 李如跃. “互联网+”时代茶文化旅游经济发展的新思路[J]. 福建茶叶, 2017(6): 63–64.

[62] 刘 莹. 非物质文化遗产视角下茶文化旅游产品的开发策略[J]. 福建茶叶, 2017(4): 99–100.

[63] 张晓峰. 新媒体背景下的茶旅游经济发展策略[J]. 福建茶叶, 2015(5): 42–44.

[64] 魏晓露, 董进霞. 旅游地屏蔽理论视域下河北茶文化旅游开发可行性探究[J]. 福建茶叶, 2017(6): 105–106.

[65] 韩白莲, 董玉峰. 茶文化旅游中的消费者心理需求分析[J]. 福建茶叶, 2017(5): 106–107.

气孔导度的减小而减弱,也就是说,作物光合作用的强弱取决于受高  $\text{CO}_2$  浓度影响时间的长短<sup>[2]</sup>。

在国内,研究学者以花生、大豆等作物为对象研究气候变化对农作物光合作用的影响,重点分析  $\text{CO}_2$  浓度与光合作用之间的关系。曹仁林等通过设定不同  $\text{CO}_2$  浓度,利用开顶式熏气罩对花生、大豆进行试验研究,结果表明,提高  $\text{CO}_2$  浓度将导致农作物光合作用加强,即  $\text{CO}_2$  浓度与作物光合作用之间呈正相关关系<sup>[3]</sup>。在 33 ~ 40 °C 温度区间,农作物光合作用会随着  $\text{CO}_2$  浓度与温度的升高而加强,并且在同等条件下, $\text{CO}_2$  浓度与温度对花生的影响要大于对大豆的影响。但是,如果温度不在这一区间, $\text{CO}_2$  浓度与光合作用之间的关系并没有得到有效验证,表明这一关系受到温度变化的影响而呈现出不稳定性。

无论是国外还是国内,观测试验条件下所得到的农作物对  $\text{CO}_2$  浓度变化的响应程度由于温度、湿度、光照、风力等气候因素的严格控制将明显区别于自然条件下所带来的结果<sup>[4]</sup>。因此,1987 年在美国的小麦、棉花、玉米等种植地里出现了一种名为 FACE (free - air  $\text{CO}_2$  enrichment) 的装置,对  $\text{CO}_2$  浓度变化给农作物带来影响的分析完全是在自然气候环境下进行的,没有采取任何主观控制环境的措施。近些年在森林、水稻田地甚至是草地也陆续出现了 FACE 装置,都能够比较客观地反映出农作物对于  $\text{CO}_2$  浓度变化的反应程度。但是,FACE 装置也存在不足之处,如不能有效解释  $\text{CO}_2$  浓度变化所引起的温度变化对农作物的影响<sup>[5]</sup>,这一缺陷也给学者们指出了后续研究的方向。

1.1.2 关于作物模型的研究 为了有效解决观测试验结果精确度较低的问题,科学家们开始尝试建立各种农作物模型。最早的作物生长动态模型是由 Dewit 于 20 世纪 60 年代建立的 SUCROS (simple and universal crop simulator) 模型,重点模拟农作物的光合作用过程,强调在遵循作物自然生长的前提下研究气候变化对其的影响<sup>[6]</sup>;后来,在草地、森林、经济作物、粮食作物等一系列领域出现了各种不同的作物生长模型,具有代表性的是 CERES (crop environment resource synthesis, 作物环境资源综合系统) 和 GOSSYM (gossypium simulation model) 模型,这些模型开始模拟分析作物发育期的气候变化对其的作用,更注重模型的实用性<sup>[7]</sup>。

20 世纪 90 年代末期,我国研究学者开始借鉴国外先进作物生长模型的分析思路,先后建立了 RICEMOD (rice computer simulation model) 水稻模型和 COTGRO (cotton organ technology relationship) 棉花模型,尝试对水稻、小麦等主要粮食作物自然生长过程中所受到的气候变化影响进行模拟,并且取得了一些前期的研究成果<sup>[8]</sup>。后来,研究者在对分析世界上不同的农作物模型之后,结合我国农作物的实际生长特点,建立了作物计算机模拟优化决策系统 CCSODS (crop computer simulation, optimization, decision making system)。此系统可以在不同的气候环境、不同的区域、不同的作物生长条件下模拟分析出农作物任何品种的最优种植方案<sup>[9]</sup>。

农作物模型可以模拟作物生长的土壤养分、生长阶段、温度、湿度等具体条件,还原作物生长的客观真实环境,但是会忽略外部社会环境等因素,这是国内外作物模型共有的缺陷。

## 1.2 社会科学角度

1.2.1 关于统计分析方法的研究 早期的统计分析多采用回归统计方法建立气候产量模型或气候生产力计算模型,进而分析气候波动与作物产量或气候生产力之间的数量关系。张全武等在研究宁夏灌区水稻不同年份产量差异化的原因时,运用统计回归模型分析不同年份水稻产量与温度之间的相关性,认为气温是导致宁夏灌区水稻产量呈现年份差异性变化的主要因素,并且在每年的 7 月中旬至下旬影响程度最高<sup>[10]</sup>;王毓堂将中国粮食生产近 60 年的产量、种植面积等相关资料进行了统计分析,结果显示气温变化与降水量变化是影响粮食产量波动的关键气候因素<sup>[11]</sup>。

后期的统计分析通过假定未来气候因素存在变幅,然后借助某些农业气候指标或利用早期模型进行气候变化对粮食产量影响的估算。郑大玮等以我国的小麦生产为研究案例,运用积分回归模型对气温与降水量变化进行综合模拟,确定了气候变化对小麦生产的影响模式<sup>[12]</sup>。高素华等搜集华南、华北、东北、长江中下游、青海等几个区域 1982—1989 年粮食生产与气候变化等的相关资料,采用逐步回归模拟的方法计算了上述几个区域粮食产量的变化趋势<sup>[13]</sup>。在此基础上,分离出不同区域粮食的气候产量,以进一步分析气候变化对粮食产量变化的具体影响。他们的研究结果都表明气候变化对粮食产量的确产生了重要影响,但是其影响程度由于统计回归模型自身的缺陷而无法准确估计。

1.2.2 关于生产函数模型的研究 最早将农业气候研究与经济研究联系起来的是丑洁明等将温度、降水量等气候变量融入到生产函数中,构建了所谓的新经济 - 气候模型,并将其与传统的 C - D 生产函数模型进行比较。对比发现,新经济 - 气候模型的模拟结果要比传统的生产函数模型更精确,同时也验证了在每年的 4—6 月降水量确实对粮食产量产生了重大影响<sup>[14]</sup>。

崔静等以水稻、玉米、小麦为研究对象,也利用经济 - 气候模型分析 1976—2009 年主要粮食作物产量变化的状况。研究表明,气候因子对粮食产量的影响存在明显的区域差异性特点,即北方的粮食产量由于气候变化而增加,但南方的粮食产量变化则刚好与北方相反;此外,还发现不同的气候因子对不同品种粮食的产量影响也不相同,具体表现为气温升高将降低早稻与玉米产量;降水量增加则不利于小麦生产;平均日照时数延长将导致玉米减产<sup>[15]</sup>。

1.2.3 关于其他经济模型的研究 统计分析与生产函数模型都没有考虑农户对气候变化的适应性行为这一影响因子,这将在很大程度上降低模型构建的合理性。所以,Seo 等选用逻辑回归 (Logistic) 模型分析拉丁美洲农户在气候变化影响下的生产行为,结果表明在温度不断上升的条件下,农户更加愿意种植喜热类农作物,比如水果和蔬菜,而将放弃种植不利于在高温环境中生长的马铃薯、小麦等农作物<sup>[16]</sup>。

还有学者运用 Ricardian (李嘉图) 模型分析农业生产活动受气候变化的影响程度,他们认为 Ricardian 模型相比生产函数模型而言精确度更高,因为这种模型将农户对气候变化的反应行为作为主要的影响因子,有效规避了模型的有偏估计问题。Ricardian 模型出现后受到各国学者的青睐,在全球范围内掀起了 Ricardian 模型的研究热潮。但是,Ricardian 模

型的运用过程中也存在着一些不可忽略的缺陷,比如对样本容量要求比较高,前提假设条件比较多并在现实环境中很难满足等,所以,Ricardian 模型的使用范围比较有限<sup>[17]</sup>。

### 1.3 气候变化对农业生产影响小结

就研究角度而言,目前国内外关于气候变化对农业生产影响的研究,主要还是从自然科学角度进行的,通过社会科学角度进行研究所取得的成果相对比较少;尤其是在国内,通过经济社会角度研究气候变化对农业生产的影响才刚刚崭露头角,少数研究成果也都是经济领域中的定性分析研究,经济计量模型研究成果就更加弥足珍贵了。就研究方法而言,关于气候变化对农作物产量影响的研究主要是通过观测试验和模型模拟 2 种方法完成的。动态数值模拟研究主要考虑农作物生长机理,并没有考虑其他影响农作物生长的因素,这不符合当今社会经济现实状况,因此其研究结果并不精确。

## 2 气候变化对水稻生产影响的研究

### 2.1 气候变化对水稻产量的影响

2.1.1 关于气候变化对水稻实际产量影响的研究 在国外,较早开展气候变化对水稻产量影响分析的是国际水稻研究所,他们利用 1978—2004 年的气象和粮食生产资料,分别研究日最高气温、日最低气温以及日气温差对水稻产量的作用。研究发现,日最低气温升高在很大程度上降低水稻产量,并且实证分析出水稻产量的气温弹性系数是  $-0.1$ ,但日最高气温变化对水稻产量的影响并不明确<sup>[18]</sup>。

有学者对全球范围内 1962—2004 年间气温变化与水稻产量之间的关系进行了系统研究,认为最高气温升高对大多数国家水稻产量产生抑制作用,将使水稻减产  $0.2\%$ ,日气温差的变化将对水稻产量产生负向影响<sup>[19]</sup>。随后,学者们以印度为研究对象分析得出了与之前不太一致的结论。他们认为印度 1978—2008 年水稻产量与最高温度呈负相关,并且最高温度每升高  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水稻产量降低  $10.4\%$ ,与最低温度的相关性并不显著<sup>[20]</sup>。

在国内,林而达等最早使用 CERES - Wheat (crop environment resource synthesis - Wheat) 和 CERES - Maize (crop environment resource synthesis - Maize) 模型以及荷兰的 ORYZA 水稻模型模拟气候变化对水稻生产的影响,结果表明水稻减产幅度在  $4.7\% \sim 11.5\%$ 。周文魁借鉴前人研究的经验,选取华东、华北、西北、西南、中南 5 个地区作为研究对象,分析得出在 1959—2007 年间气温变化对水稻产量影响最严重的是西北地区,影响最小的是西南地区,还计算出水稻产量的气温弹性系数,按研究区域排序依次为  $-2.5\%$ 、 $-2.3\%$ 、 $-3.2\%$ 、 $-1.6\%$ 、 $-2.6\%$ <sup>[21]</sup>。朱红根将我国南方地区作为唯一的研究对象,利用加入了气候因子的生产函数模型作为分析工具,提高了模型研究假设的合理性和模拟结果的精确性,研究结果表明气温变化与水稻产量呈显著的负相关关系,并且平均温度上升  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,将导致水稻产量下降  $2.61\% \sim 3.57\%$ <sup>[22]</sup>。

2.1.2 关于气候变化对水稻预期产量影响及产量变化趋势的研究 国外许多学者早期都是利用大气情景模拟模式对水稻的气候产量进行预测分析。Krajewska 等利用 3 种大气环流模式的气候数据对亚洲、拉丁美洲与非洲水稻产量的变化进行评价<sup>[23]</sup>;Parry 等则预测分析全球范围内 2072—2101 年

水稻在 4 种 HadCM2 情景与一种 HadCM3 情景下产量的变化状况,但并没有得出实质性的结论<sup>[24]</sup>。Sheehy 等运用模型预测气候变化对水稻产量的影响,表明最低气温每升高  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水稻将减产  $14.7\%$ ,日平均气温升高  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水稻将减产  $6.2\%$ <sup>[25]</sup>。

我国的学者们近些年也开始模拟预测水稻产量的变化趋势。石春林等最早利用 GISST 模式与作物模型相结合,模拟分析长江中下游地区未来 60 年水稻产量的变化情况,得出了水稻将来会减产的结论<sup>[26]</sup>。张建平等则将研究范围限定在我国南方地区,选用 BCC - T63 情景模拟模式,并且将其与定量计算模型相结合,分析认为我国南方地区水稻在气候变化的作用下将呈现出减产的趋势,且早稻的减产幅度要略高于晚稻的减产幅度<sup>[27]</sup>。熊伟等综合前人的研究结论,组合了 HadCM2 (Had circulation models2) 和 ECHAM4 (examined in a coupled atmosphere - ocean general circulation model) 的 4 种气候变化情景,得出了与前人基本一致的结论,即我国水稻产量在未来气候变化情境下将出现下降的趋势,并且下降的趋势存在区域差异性的特征,下降的程度随着时间的推移而不断加深<sup>[28]</sup>。

### 2.2 气候变化对水稻种植布局的影响

2.2.1 关于气候变化对水稻种植面积影响的研究 Reyenga 等在对澳大利亚水稻种植面积的变化情况进行分析时,选用 APSIM 作物模拟模型作为量化工具,研究发现未来气候变化将使澳大利亚水稻种植面积增加约  $25\text{ 万 hm}^2$ ,种植区域将由南向北移动<sup>[29]</sup>。郑小华等通过 GIS 地理数量分析方法对陕西省近 45 年的气候与水稻产量变化资料进行了综合分析,表明冬季气温变化对陕西省水稻种植面积的影响要大于夏季气温变化,总体而言水稻种植界限在气温升高的条件下将北移<sup>[30]</sup>。还有学者专门研究黑龙江省水稻种植面积与气候变化的关系,所得到的结论基本上与国内外其他学者的观点不谋而合,即水稻种植面积的增加主要是气温升高的结果。

2.2.2 关于气候变化对水稻种植时间影响的研究 部分学者首先对东北地区不同时期水稻生长期进行了比较分析,表明随着气温不断升高,水稻生育期明显有所延长。具体数据显示,东北地区水稻播种期相比过去提前了  $4.1\text{ d}$ ,而收获期却延迟了  $2.1\text{ d}$ 。但是,曾凯等对长江中下游地区水稻生育期变动趋势进行分析,所得的结果刚好相反。他们认为在气温升高的前提下,水稻生产的开花期、抽穗期、乳熟期、灌浆期不但不会延长反而会大大缩短,整体来说水稻平均生育期将会缩短  $7\text{ d}$ <sup>[31]</sup>。

雷秋良等通过对近 40 年水稻生育期数据的综合整理,发现气候变化对水稻生长期的影响呈现出阶段性特点,水稻从播种到移栽的时间长度在气温升高的作用下会缩短,但水稻从移栽到开花、抽穗的时间长度则会在气候变化的影响下明显延长<sup>[32]</sup>。因此,水稻生长期变化趋势在气候变化的影响下表现得并不显著。

2.2.3 关于气候变化对水稻种植制度影响的研究 赵锦等通过分析中国南方地区气候变化对水稻种植制度界限的影响,与 1981 年以前对比发现,南方一年一熟和一年二熟地区界限变化不明显,但面积有所缩小,而一年三熟地区面积扩大,且气候变化使得南方地区多熟种植界限向北和向西推进<sup>[33]</sup>。

金之庆等利用相似分析方法对我国华中地区水稻种植界

限的变化情况进行模拟分析,结果表明在未来气候情景下到 2020 年华中地区水稻种植区域将会向武汉 - 郑州 - 成都一线移动<sup>[34]</sup>。郝志新等以东北地区辽宁省为例分析气候变化对水稻种植制度的影响,得出了比前人更新且更为精确的结论。他们认为导致水稻种植界限移动的气候因子不仅有气温的变化还有降水量的变动,气温升高与降水量增加将共同导致水稻种植界限北移<sup>[35-36]</sup>。

2.3 气候变化对水稻单产的影响

2.3.1 关于气候变化对水稻单产水平影响的研究 江敏运用 CERES - Rice 模型预测模拟分析气候变化对水稻单产的影响,结果发现到 2030—2050 年福建省水稻生长期在气候变化影响下会有所缩短,并且水稻单产水平会降低,然而这一结论却并不适用于东北区域,在她的研究中也证实了东北地区水稻单产的提升主要得益于气温上升<sup>[37]</sup>。熊伟等在不同的气候变化情境下,利用农作物模拟模型,对我国水稻、玉米、小麦等主要粮食作物未来的产量状况进行预测分析,结果表明,如果考虑到气温升高的情况,到 2030 年、2040 年、2070 年 3 个不同时间段,3 种主要粮食作物的单产水平都会上升,但是如果不考虑气温升高的情形,3 种主要粮食作物单产的水平将呈现下降的趋势<sup>[38]</sup>。

2.3.2 关于气候变化对水稻单产水平影响存在分歧的研究 气候变化对水稻单产水平影响不一致的争论主要集中在东北区域。李秀芬等通过对过去 70 年黑龙江省水稻生产数据与气候数据的统计回归分析,认为气候变化对黑龙江省水稻单产水平的变化是不利的,且气温与水稻单产水平两者之间呈负相关关系。并且研究还发现气温的升高同时也大大提高了干旱与病虫害的发生频率,这在一定程度上又将减少水稻产量<sup>[39]</sup>。而方修琦等在黑龙江省水稻大面积产区,选用 1965—2007 年水稻单产数据,再结合 30 个地方气象站点的气温与降水数据,通过构建空间面板数据模型,精确计算出气候变化对水稻单产的作用程度,结果说明过去几十年气温升高有利于黑龙江省水稻单产水平的提高,并且其幅度达到 3% 左右<sup>[40]</sup>。

2.4 气候变化对水稻生产影响小结

气候变化不仅影响水稻的实际产量,还对水稻生产的预期产量以及未来产量的变化趋势产生影响,并且气候变化对水稻产量的影响存在阶段差异性,即对早稻产量与晚稻产量的影响不同。研究还发现导致水稻产量变化的关键气候因素是温度与降水量。气候变化对水稻种植布局的影响是通过水稻种植面积、种植时间、种植制度 3 个方面表现的。研究表明气温升高对南半球水稻种植面积的影响比北半球的影响更严重,从而导致在全球范围内水稻种植界限由南向北移动,并且气候变化对水稻种植制度的影响也存在区域差异性。气候变化对水稻单产水平及变化趋势都产生影响,但是其影响方向与影响程度存在着分歧。总体而言,研究表明气候变化对水稻单产的影响呈现出区域差异性,并且即使是同一区域也会存在时间差异性。

3 水稻生产对气候变化适应性的研究

3.1 关于不同方法下水稻生产对气候变化适应性的研究

在国内外,最早研究水稻种植户气候变化适应行为的是 Kurukulasuriya 等选用多元 Logistic 模型分析影响水稻种植户

气候变化适应行为的因素<sup>[41]</sup>;Nhemachena 等通过多元 Probit 模型研究了这一问题<sup>[42]</sup>。无论是多元 Probit 模型还是多元 Logistic 模型,都存在样本选择的时间偏差问题。因此,后来的学者都利用逐步回归模型分析农户的气候变化适应行为与措施。Maddison 以南非地区为研究样本,通过两步回归模型分析农户采取适应气候变化行为的决策过程<sup>[43]</sup>,研究认为水稻种植户采取适应气候变化的措施不是一蹴而就的,而是循序渐进完成的,首先只有感知到气候变化的存在,其次才能采取相应的适应行为与措施,这是一个渐进的过程。朱红根基于农户微观数据,运用 Heckman - Probit 2 步模型对农户适应行为及影响因素进行实证分析,结果表明大部分水稻种植户都感知到了气候变化的存在,但是实证数据分析显示只有一半的种植户在感知到气候变化后采取了相应的措施以适应水稻生产。并且还指出水稻种植户是否采取气候变化适应行为受到诸多因素的制约,其中种植户年龄、文化程度等是主要影响因素,而种植户获取信息的便利程度、气象服务设施等与适应气候变化行为之间并不太显著<sup>[22]</sup>。周力等运用空间面板数据模型实证分析我国水稻主产区种植户的气候变化适应行为与措施,研究发现水稻种植户都主动采取了适应气候变化行为,特别是在极端气候事件发生之后,他们还认为影响气候变化适应行为的不仅取决于种植户自身,还受到政府宏观管理的制约,但是目前而言政府管理这一方面是气候变化适应行为效果的薄弱环节<sup>[44]</sup>。

3.2 关于不同时段水稻生产对气候变化适应性的研究

探讨水稻生产对气候变化适应性措施正成为当前学术界最为活跃的研究领域之一。无论是水稻生产者、经营管理者还是从事水稻研究的相关科研工作者,在全球范围内都已经展开了一场关于水稻生产适应气候变化行为的研究与争论。根据研究时段长短的差异对主要的文献进行了归纳整理(表 1)。

表 1 不同研究时段水稻生产对气候变化的适应性

作者	研究起止时间	研究时段	研究区域	研究结论
张瑜洁 <sup>[45]</sup>	2007—2008	1 年	江苏省	被动适应
谢立勇等 <sup>[46]</sup>	2000—2007	7 年	全国	被动适应
周文魁 <sup>[47]</sup>	1978—2005	27 年	全国	主动适应
周曙东等 <sup>[48]</sup>	1978—2007	29 年	南方地区	主动适应
杨修等 <sup>[49]</sup>	1961—1990	29 年	全国	主动适应
朱珠等 <sup>[50]</sup>	1980—2008	28 年	江苏省	主动适应
朱红根 <sup>[22]</sup>	1978—2007	29 年	江西省	主动适应
熊伟等 <sup>[51]</sup>	1981—2007	26 年	全国	主动适应
谢云 <sup>[52]</sup>	1949—1996	47 年	全国	主动适应
张卫建等 <sup>[53]</sup>	1970—2009	39 年	东北地区	主动适应

由表 1 可知,关于水稻生产对气候变化适应性的研究时段长短并不一致,研究时段较短的得出的结论是被动适应,即水稻种植户是被动地接受气候变化所带来的结果;而研究时段较长的得出的结论是主动适应,即水稻种植户会主动采取适应性行为与措施以减少气候变化的影响。谢立勇等以 2000—2007 年的气候变化与粮食生产资料为依据,就粮食生产系统对气候变化的响应性进行了预测分析。结果表明在短期内粮食生产系统只能被动地适应气候变化,在长期内粮食生产系统对气候变化的适应能力将大大提高,即粮食生产系统对气候变化的响应性由于研究时段长短不一致而存在差

异<sup>[46]</sup>。周曙东等通过构建经济－气候模型,实证分析 1978—2007 年我国南方地区水稻生产对气候变化的适应行为与措施。发现在研究时段足够长的前提条件下,水稻种植户会主动采取措施以适应气候变化,而且适应气候变化行为与措施的效果受到诸多因素的影响。分析进一步指出西南、华南、华东、华中等地区水稻生产对气候变化的适应能力并不一致,并且适应效果也存在差异<sup>[48]</sup>。熊伟等通过分析 1981—2007 年水稻生育期气候变化对水稻产量的影响,评估水稻生产对气候变化的适应性与敏感性。结果表明我国水稻生产对气候变化的适应性与敏感性存在研究时段长短差异与区域位置差异,研究时段较长的适应气候变化能力要强于研究时段较短的,并且水稻生产对不同气候因子变化的适应性与敏感性也不尽相同<sup>[51]</sup>。

3.3 水稻生产对气候变化适应性研究小结

在国内外,学者们主要运用计量经济模型分析水稻生产对气候变化的适应性,运用最多的还是逐步回归模型。研究发现水稻种植户主要通过加大投入力度、完善农业基础设施、改变传统的耕地利用方式、合理利用水资源,提高利用效率、

更换水稻品种、改变水稻种植的管理模式等有效行为适应气候变化。

根据对相关文献的对比分析,发现水稻种植户对气候变化的适应行为是一个渐进的过程,在短期内首先感知到气候变化,在长期内才会主动采取措施适应气候变化,从短期感知气候变化到长期适应气候变化需要一段时期的转换,即水稻生产对气候变化的适应性由于研究时段长短不一致而存在差异。在此基础上,进一步分析发现不同区域水稻生产对气候变化的适应性也不一致,北方地区水稻生产对气候变化的适应性要优于南方地区。此外,水稻种植户采取适应气候变化的行为与措施受到诸多因素的影响,其中水稻品种差异是关键性的因素。

4 水稻生产对气候变化脆弱性的研究

当前学者们开始把脆弱性研究方法应用于农业生产活动中,现阶段主要通过神经网络模型、案例研究法、统计分析法、实地调查法等手段分析农业生产活动对于气候变化的脆弱性(表 2)。

表 2 我国农业生产对气候变化的脆弱性研究方法

研究方法	研究内容	研究结论	参考文献
模型模拟法	利用作物模型分析我国未来主要三大农作物的气候变化敏感区和脆弱区	初步划分出我国三大粮食作物的敏感区和脆弱区分布	[49]
	以中国典型的干旱区为例,选取 VSD 模型作为统领具体的脆弱性评价的依据	构建示例区脆弱性评价的指标和参数	[54]
	利用中国小麦的旱灾致灾因子强度和农作物生长模块模拟出典型小麦品种的自然脆弱性	定量评价中国小麦旱灾风险的时空分布规律	[55]
统计分析法	利用省级资料,通过 5 个适应能力方面的指标,对我国农业的气候变化脆弱性进行分析	得出农业对气候变化的脆弱性分布	[56]
指标体系法	利用甘肃省近 40 年的秋粮产量和气候资料,分析气候变化特征和产量演变规律,评价秋粮生产的脆弱性	气候波动剧烈的甘肃雨养农业区秋粮生产的脆弱性高,强脆弱区主要在陇东东部及天水北部地区	[57]
	利用敏感性指数、适应性指数、脆弱性指数 3 个指标,分析黑龙江省粮食生产对气候变化影响的脆弱性	脆弱性指数的空间上与敏感性指数相似,时间上敏感性指数的增加幅度最大	[58]
	在构建水稻对气候变化脆弱性综合评价指标模型的基础上,以江西省为案例区进行实证分析	江西省水稻生产对气候变化的脆弱性较大,主要处于中、高度脆弱区	[22]
	以宁夏回族自治区为案例,筛选出敏感性和适应能力指标,分析农业对气候变化的脆弱性	从时间和空间分布上,分析宁夏农业对气候变化的脆弱性	[59]
综合评估法	以乡村人口比重、单位面积生产总值等指标,定量研究鄱阳湖区农户洪灾脆弱性程度	研究区农户对洪涝灾害总体存在着较高的脆弱性,特别是在滨湖地带及五河干流沿岸地区	[60]
	利用设定的综合评估框架,评价中国西部地区气候变化的脆弱性	综合评价中国西部地区气候变化脆弱性	[61]
	利用多种模型、指标和工具综合评价长江流域农田生态系统、水资源的气候变化脆弱性	长江流域的大部分系统气候变化脆弱性较低,但极端事件对其影响较大	[62]

王馥堂等对我国陕北地区农业生产活动划分不同的层次,根据实际情况进行实地调查分析,发现陕甘宁地区以及黄土高原一带农业生产行为受气候变化的影响比较严重,也就是说该地区属于气候变化敏感区与脆弱区<sup>[11]</sup>。赵跃龙等为了分析我国水稻生产对气候变化的脆弱性,搜集大量的水稻生产与气象数据,根据统计回归函数模型,得出我国水稻生产对气候变化的敏感度与脆弱度,并且据此将我国水稻主产区对于气候变化脆弱程度的不同进行水稻脆弱区的划分;在此基础上借助 GIS 地理分析工具精确计算出不同水稻生产对气候变化脆弱性的影响因子的权重<sup>[63]</sup>。随着农作物模拟模型

与气候情景模型的大量出现,对于水稻生产对气候变化脆弱性的分析逐渐开始采用模型模拟方法与案例相似分析法。朱红根等选取江西省作为研究案例,将水稻产量与气温、降水量等气候变量作为技术参数,结合农作物模拟模型和气候情景模型构建水稻生产对气候变化脆弱性的综合分析模型,将江西省水稻生产区划分为不同的气候变化敏感区与脆弱区。结果表明,江西省水稻生产对气候变化的敏感性比较大,江西省水稻生产对气候变化的脆弱性较高,处于高度气候变化脆弱区<sup>[22]</sup>。

在不同的历史时期,我国学者分析农业生产对气候变化

的脆弱性所采取的研究方法不尽相同。在早期,实地调查法与统计分析法运用比较普遍,后期随着作物模型与经济计量模型以及气候情景模型的出现,综合模型评估法成为了当前研究水稻生产对气候变化脆弱性的主要方法。现有文献的研究结果表明水稻生产对气候变化的脆弱性主要是通过敏感性与适应性 2 个方面体现的,并且水稻生产对气候变化的脆弱性同样存在时段差异性。

## 5 文献述评与启示

5.1 气候变化对农业生产影响的研究主要集中在自然科学领域,社会科学领域涉及较少

社会科学领域研究气候变化与农业生产之间关系的并不多,少有的研究也只是比较简单的定性分析。这主要是因为经济学家缺乏气候变化的概念,大部分学者在分析水稻产量的影响因素时,通常只将各种物质要素投入、制度因素及区域特征因素纳入经济计量模型,往往会忽略气候因子对水稻生产的影响。随着世界科技及研究水平的不断深入发展,气候变化对水稻生产影响的研究方法也在不断进步,经济计量模型分析方法就是典型的代表,计量经济分析模型规避了自然科学和经济学单独研究的缺陷,将气候变化研究和经济学研究相结合,能够较好地揭示出各影响因素之间的关系,从而能够有针对性地提出适应性对策建议。

5.2 水稻生产对气候变化的适应性存在研究时段长短差异性

现有的研究表明由于研究时段较短,水稻种植户无法主动采取措施适应气候变化而只能被动适应,并且适应行为及其影响需要一段时期转换才能得以体现,研究发现转换期在 26~30 年之间,研究时段较长的水稻生产则可以主动适应气候变化,在某种条件下不同区域水稻生产对气候变化的适应性也不相同。

总体来说,关于水稻生产对气候变化适应性的研究,大多数学者未考虑农业的自适应能力,在运用作物模型进行模拟与评估时,由于未考虑今后品种、播期、种植制度等可能的变化,所得出的结论似乎过于悲观。整体而言,对于气候变化的适应性对策的研究尚处于分析、讨论和研制阶段,对策的分析无论是可行性还是科学性,都尚显得薄弱。因此,未来适应性对策的研究应以系统科学理论与科学发展观指导研究,充分考虑农业生物自适应与人工辅助适应 2 类适应行动的优化配置。

5.3 宏观层面关于水稻生产对气候变化脆弱性的研究较多,微观层面甚少涉及

水稻生产对气候变化的脆弱性主要通过敏感性与适应性 2 个方面体现,但是敏感性与适应性在分析脆弱性中所占的权重并不明确。另外,国内外学者关于水稻生产对气候变化脆弱性的研究采用了不同的研究方法,但是其研究成果却主要集中在宏观层面,甚少涉及到区域层面以及微观层面。

总之,关于水稻生产对气候变化的脆弱性仍有很多疑问需要解答,比如水稻生产对气候变化的脆弱性是否存在区域差异性的特点? 水稻生产对气候变化的脆弱性指标体系如何构建? 如何降低水稻生产对气候变化的脆弱性? 水稻种植农户将采取何种措施以适应气候变化? 其影响因素有哪些? 政

府如何促进农户积极采取气候变化适应性行为? 对这些方面问题的研究将成为未来气候变化与水稻生产互动研究的主要方向。

## 参考文献:

- [1] Rogers H H, Cure J D, Smith J M. Soybean growth and yield response to elevated carbon dioxide[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1986, 16(2): 113-128.
- [2] Kim H Y, Lieffering M, Miura S, et al. Growth and nitrogen uptake of CO<sub>2</sub> - enriched rice under field conditions[J]. New Phytologist, 2001, 150(2): 223-229.
- [3] 曹仁林, 霍文瑞, 郝建军, 等. CO<sub>2</sub> 对大豆、花生生产量的效应[J]. 农业环境保护, 1994(3): 124-126.
- [4] Allen L H. Free - air CO<sub>2</sub> enrichment field experiments; an historical overview[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1992, 11(2/3): 121-134.
- [5] Kim H Y, Horie T, Nakagawa H, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and high temperature on growth and yield of rice[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1996, 65(4): 634-643.
- [6] 姚凤梅. 气候变化对我国粮食产量的影响评价——以水稻为例[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [7] 林而达, 张厚宜, 王京华. 全球气候变化对中国农业影响的模拟[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1997.
- [8] 熊 伟. 未来气候变化情景下中国主要粮食作物生产模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [9] Huang Y, Gao L, Jin Z, et al. A software package for optimizing rice production management based on growth simulation and feedback control[J]. Agricultural Systems, 1996, 50(4): 335-354.
- [10] 张全武, 元 伟, 马建平, 等. 决定宁夏灌区水稻丰歉年的温度关键期及其温度指标[J]. 中国农业气象, 2003, 34(3): 21-23.
- [11] 王馥堂. 气候变化与我国的粮食生产[J]. 中国农村经济, 1996(11): 19-23.
- [12] 郑大玮, 刘中丽. 气候变化对小麦生产的影响[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1993.
- [13] 高素华, 丁一汇, 赵宗慈, 等. 大气中 CO<sub>2</sub> 含量增长后的温室效应对我国未来农业生产的可能影响[J]. 大气科学, 1993(5): 584-591.
- [14] 丑洁明, 叶笃正. 构建一个经济 - 气候新模型评价气候变化对粮食产量的影响[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 347-354.
- [15] 崔 静, 王秀清, 辛 贤. 气候变化对中国粮食生产的影响研究[J]. 经济社会体制比较, 2011(2): 54-60.
- [16] Seo S N, Mendelsohn R. An analysis of crop choice: Adapting to climate change in Latin American Farms[J]. Social Science Electronic Publishing, 2007, 67(1): 1-24.
- [17] 贺亚琴. 气候变化对中国油菜生产的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [18] Rosenzweig C, Iglesias A. Implications of climate change for international agriculture: crop modeling study[M]. Washington: US Environment Protection Agency, 1994.
- [19] Brown R A, Rosenberg N J. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO<sub>2</sub> concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 83(3/4): 171-203.
- [20] Schlenker W, Roberts M J. Nonlinear effects of weather on corn

- yields[J]. Review of Agricultural Economics,2006,28(3):391-398.
- [21] 周文魁. 气候变化对我国水稻生产的影响及科技应对措施[J]. 江西农业学报,2014,26(9):75-79.
- [22] 朱红根,周曙东. 南方水稻对气候变化的脆弱性分析——以江西为例[J]. 农业现代化研究,2010,31(2):208-211.
- [23] Krajewska M, Kitada S, Winter J N, et al. Bcl-B expression in human epithelial and nonepithelial malignancies [J]. Clinical Cancer Research,2008,14(10):3011-3021.
- [24] Parry M L, Swaminathan M S. Effects of climate change on food production[C]// Science and Sustainable Food Security: Selected Papers of M S Swaminathan. 1992.
- [25] Sheehy J E, Mitchell P L. Ferrer A B. Decline in rice grain yields temperature; models and correlations can give different estimates. Field crops Research,2006,98:151-156.
- [26] 石春林,金之庆,葛道阔,等. 气候变化对长江中下游平原粮食生产的阶段性影响和适应性对策[J]. 江苏农业学报,2001,17(1):1-6.
- [27] 张建平,赵艳霞,王春乙,等. 气候变化对我国南方双季稻发育和产量的影响[J]. 气候变化研究进展,2005,1(4):151-156.
- [28] 熊伟,杨婕,林而达,等. 未来不同气候变化情景下我国玉米产量的初步预测[J]. 地球科学进展,2008,23(10):1092-1101.
- [29] Reyenga P J, Howden S M, Meinke H, et al. Global change impacts on wheat production along an environmental gradient in South Australia[J]. Environment International,2001,27(2):195-200.
- [30] 郑小华,屈振江,鲁渊平,等. 气候变化对陕西省小麦种植布局的影响分析[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(3):244-246.
- [31] 曾凯,周玉,宋忠华. 气候变暖对江南双季稻灌浆期的影响及其观测规范探讨[J]. 气象,2011,37(4):468-473.
- [32] 雷秋良,徐建文,姜帅,等. 气候变化对中国主要作物生育期的影响研究进展[J]. 中国农业科学,2014,30(11):205-209.
- [33] 赵锦,杨晓光,刘志娟,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响:南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响[J]. 中国农业科学,2010,43(9):1860-1867.
- [34] 金之庆,葛道阔,陈华,等. 全球气候变暖对我国南方水稻生产的影响[J]. 南京林业大学学报,1991(10):11-19.
- [35] 郝志新,郑景云,陶向新. 气候变暖背景下的冬小麦种植北界研究——以辽宁省为例[J]. 地理科学进展,2001,20(3):254-261.
- [36] 纪瑞鹏,班显秀,张淑杰. 辽宁冬小麦北移热量资源分析及区划[J]. 农业现代化研究,2003,24(4):264-266.
- [37] 江敏. 基于自适应调整的福建省水稻生产气候变化影响研究[D]. 福州:福建农林大学,2012.
- [38] 熊伟,林而达,蒋金荷,等. 中国粮食生产的综合影响因素分析[J]. 地理学报,2010,65(4):397-406.
- [39] 李秀芬,陈莉,姜丽霞. 近 50 年气候变暖对黑龙江省玉米增产贡献的研究[J]. 气候变化研究进展,2011,7(5):336-341.
- [40] 方修琦,王媛,徐铨,等. 近 20 年气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献[J]. 地理学报,2004,59(6):820-828.
- [41] Kurukulasuriya P, Mendelsohn R O. Crop Selection: Adapting to Climate Change in Africa[J]. Policy Research Working Paper, 2007(9):1-29.
- [42] Nhemachena C, Hassan R M. Micro-level analysis of farmers' adaptation to climate change in Southern Africa[J]. IFPRI Discussion Papers,2007,7778:5-15.
- [43] Maddison D. The perception of and adaptation to climate change in Africa[M]. Washington: The World Bank,2007.
- [44] 周力,周曙东. 极端气候事件的灾后适应能力研究——以水稻为例[J]. 中国人口资源与环境,2012,22(4):167-174.
- [45] 张瑜洁. 气候变化对南方地区水稻生长影响的试验研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
- [46] 谢立勇,李悦,钱风魁,等. 粮食生产系统对气候变化的响应:敏感性与脆弱性[J]. 中国人口资源与环境,2014,24(5):25-30.
- [47] 周文魁. 气候变化对中国粮食生产的影响及应对策略[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [48] 周曙东,朱红根. 气候变化对中国南方水稻产量的经济影响及其适应策略[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(10):152-157.
- [49] 杨修,孙芳,林而达,等. 我国水稻对气候变化的敏感性和脆弱性[J]. 自然灾害学报,2004,13(5):85-89.
- [50] 朱珠,陶福祿,娄运生,等. 江苏省水稻产量对气候变化的敏感性研究——基于县级和站点尺度[J]. 资源科学,2013,35(5):1035-1043.
- [51] 熊伟,杨婕,吴文斌,等. 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性[J]. 生态学报,2013,33(2):509-518.
- [52] 谢云. 中国粮食生产对气候资源波动响应的敏感性分析[J]. 资源科学,1999(6):13-17.
- [53] 张卫建,陈金,徐志宇,等. 东北稻作系统对气候变暖的实际响应与适应[J]. 中国农业科学,2012,45(7):1265-1273.
- [54] 刘小茜,王仰麟,彭建. 人地耦合系统脆弱性研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(8):917-928.
- [55] 王志强,马箐,闫静,等. 农业旱灾适应性研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2013(5):124-129.
- [56] 林而达. 气候变化与农业——最新的研究成果与政策考虑[J]. 地学前缘,1997(增刊1):225-230.
- [57] 王静,韩永翔,尉元明. 甘肃省雨养农业区气候变暖背景下秋粮生产脆弱性研究[J]. 干旱地区农业研究,2006(1):15-19.
- [58] 侯亚红,刘文泉. 我国黄土高原地区农业生产的气候脆弱性变化预测[J]. 灾害学,2003,18(3):34-38.
- [59] 唐为安. 区域农业对气候变化的脆弱性评价——宁夏案例研究[D]. 北京:中国农业科学院,2007.
- [60] 马定国,刘影,陈洁,等. 鄱阳湖区洪灾风险与农户脆弱性分析[J]. 地理学报,2007,62(3):321-332.
- [61] 殷永元. 气候变化对中国西部地区影响的脆弱性和适应性综合评价[J]. 世界环境,2004(3):23-25.
- [62] 雷小途,徐明,任福民. 全球变暖对台风活动影响的研究进展[J]. 气象学报,2009,67(5):679-688.
- [63] 赵跃龙. 全球气候变化对美国农业经济影响的再评估[J]. 地理译报,1996,15(4):38-45.