

解伟, 魏玮, 崔琦. 气候变化对中国主要粮食作物单产影响的文献计量 Meta 分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 79-85. [XIE Wei, WEI Wei, CUI Qi. The impacts of climate change on the yield of staple crops in China: a Meta-analysis [J]. China population, resources and environment, 2019, 29(1): 79-85.]

气候变化对中国主要粮食作物单产影响的文献计量 Meta 分析

解伟¹ 魏玮² 崔琦³

(1. 北京大学现代农学院中国农业政策研究中心, 北京 100871; 2. 北京商业干部管理学院, 北京 100028;

3. 北京师范大学经济与资源管理研究院, 北京 100875)

摘要 气候变化对粮食安全的影响越来越受到各级政府和学界的关注。然而, 已有研究在评估气候变化对粮食单产的影响时, 因情景设定、模型方法、参数设定或作物种类等不同, 得出的结果存在差异, 甚至出现正负截然相反的评估结果, 给气候变化经济学者在评估气候变化对粮食供需、价格和贸易的影响时选用哪篇文献的结果作为依据进一步评估造成困扰。本文研究目的是以已有文献中有关气候变化对中国未来粮食单产影响的评估结果为统计样本, 构建气候变化对粮食单产影响的损失函数, 给出统一情景下气温、降水变化对中国主要粮食作物单产的影响。本文从 1 366 篇文献中通过层层筛选, 找到 34 篇高度相关的文献, 基于此获得了 288 个研究样本, 采用统计描述分析和文献计量 Meta 分析方法估计气候变化关键变量对主要粮食作物单产的影响。研究结果表明, 气候变化对主要粮食作物单产的影响大小与气候变化情景、作物种类、种植地区、是否考虑 CO₂ 肥效等有关。综合不同气候变化情景的结果, 发现: 气温每提高 1℃, 中国三大粮食作物的单产整体下降约 2.6%; 降水每增加 1%, 中国三大粮食作物的单产整体约增加 0.4%; CO₂ 肥效的影响存在较大争议。综合气温和降水对粮食单产的影响, 本研究表明气候变化将对我国粮食安全造成一定的冲击, 可能部分抵消技术进步等带来的正面效应。本研究综合相关文献结果, 提供了统一情景下气温、降水变化对中国主要粮食作物单产的影响, 将为气候变化的农产品供需市场模型或者气候变化综合评估模型(IAM) 研究提供可靠的数据基础。

关键词 温度; 降水; CO₂ 肥效; 粮食单产; 损失函数; Meta 分析

中图分类号 F062.1; F062.2 文献标识码 A 文章编号 1002-2104(2019)01-0079-07 DOI: 10.12062/cpre.20181014

近年来, 粮食安全相关政策和研究高度重视气候变化影响这一要素。粮食安全事关国家全局, 不仅引起全球关注, 更是各国政府工作的重中之重^[1]。传统的“粮食安全”相关政策和研究中, 多关注诸如价格、收入等对需求的影响, 以及科技、基础设施投入、生产要素等对供给的影响^[2]。然而, “粮食安全”最新政策和研究越来越重视气候变化这一非传统要素^[3-4]。国际上, 世界粮食安全委员会粮食安全与营养问题高级别专家组(HLPE)于2012年出版专刊讨论气候变化与粮食安全^[5]。之后, 2014、2018年国际农业经济学会(IAAE)和近年美国农业经济学会(AAEA)举行的年会都特别设置了气候变化与粮食安全的主题论坛。在中国, 近些年中央一号文件都指出气候变化对农业生产的影响日益加深^[6]。

准确评估气候变化对主要粮食作物单产的影响是回答气候变化与粮食安全关系的前提, 然而已有研究在评估气候变化对粮食单产的影响时, 因影响要素和模型方法不同, 得出的结果存在差异, 甚至出现正负截然相反的两类评估结果。已有研究注意到模型不同对评估结果会造成影响, 并通过开展国际上7个典型作物生长模型、5个全球大气模式的比较以期找到差异提高评估准确度^[7]。即便这样, 常因输入的气候情景不同, 以及是否考虑适应措施、CO₂ 肥效和技术进步, 也还常常有多个评估结果。如, 与1961—1990年比, 全球平均气温升高1℃, 如果不考虑CO₂ 肥效, 中国水稻单产变化-18.6%~ -6.1%, 如果考虑CO₂ 肥效, 水稻单产变化-10.1%~ 3.3%^[8]。也有研究结果认为, 与1961—1990年比, A2情景下到2020s如果

收稿日期: 2018-04-12 修回日期: 2018-10-12

作者简介: 解伟, 博士, 研究员, 博导, 主要研究方向为农业与气候变化经济学。E-mail: xiewei.ccap@pku.edu.cn。

通讯作者: 崔琦, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境与气候变化经济学。E-mail: cuiqi@bnu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目“基于C3IAM模型的气候变化综合影响评估”(批准号: 2016YFA0602604); 国家自然科学基金项目“全球气候变化对我国粮食供需、价格和贸易的影响及对策研究”(批准号: 71503243), “极端气候事件对中国-全球农产品市场影响及对策”(批准号: 71873009)。

不考虑 CO₂ 肥效,中国水稻单产将增加 6.3%,如果考虑 CO₂ 肥效,水稻单产将增加 15.8%。显然,是否考虑 CO₂ 肥效会导致多个结果^[9-11]。另外,由于气候情景不同,前者是升高 1℃,后者是 A2 情景,所以出现不同的评估结果,甚至同在不考虑 CO₂ 肥效情况下出现正负相反的结果。从其他文献看,是否考虑适应措施和技术进步,是否区分灌溉农业和雨养农业评估,研究区和研究时间是否相同,这些都会得出不同的评估结果^[12-13]。

由于不同文献得出的气候变化对粮食单产的影响存在差异,气候变化经济学者在评估气候变化对粮食供需、价格和贸易的影响时究竟选用哪类单产影响参数常比较困惑。众所周知,大量研究评估了气候变化对粮食单产的自然影响,但气候变化经济学家所发展的综合评估模型(IAM)仍没有使用现有研究中的信息构建气候变化对粮食单产影响的损失函数。如 DICE/RICE 模型从 20 世纪 90 年代开始一直沿用气温升高 2.5℃ 导致中国农业产值上升 0.02%,美国农业产值上升 0.03%,俄罗斯农业产值下降 0.82%^[14];如 FUND 模型构建了全球各国一样的农业产值与最佳温度、实际温度以及肥效之间的经验公式,其中参数的估计没有依据已有文献评估的气候变化对作物单产的影响结果^[15]。

文献计量 Meta 分析恰恰可以充分利用现有文献中的信息,基于源自文献的气候变化对粮食单产的影响结果这一样本,控制气候变化影响主要粮食作物单产的各个因素,获取已有研究中温度、降水、CO₂ 肥效等关键变量对于作物单产的平均影响。本文基于此研究目的,对气候变化领域相关文献进行梳理,汇总与单产变化相关的样本统计量及相关控制变量,重点研究以下几个问题:①气温变化对于单产变化的定量分析;②降水变化百分比对于单产变化的定量分析;③ CO₂ 肥效是否对作物单产产生影响以及影响程度如何。以期这一研究能帮助进一步认识气候变化对粮食单产的自然影响。

1 数据收集与样本

为了分析气候变化对中国主要粮食作物单产的影响,对国内外相关研究进行了细致搜索和收集。文献搜索的具体方法如图 1 所示:首先,以“气候变化(暖)”“产量/单产”“作物/玉米/小麦/水稻”“气候情景/模拟”等为关键词在中国知网全文数据库(CNKI)、万方数据库等全文数据库进行相关文献检索。同时以“Climate change scenario”“Crop/maize/rice/wheat”“Yield change”等关键词在 Web of Science、Science Direct、Google Scholar 等外文数据库进行文献检索。最终获得相关文献 1 366 篇。同时本文将中国作为研究区域,只选取文献中涉及中国或中国

某一区域研究结论的文献。剔除掉不涉及中国的文献,进一步筛选后,获得文献 298 篇。

本文重点研究预估年代下,不同情景下气候变化对单产的影响,因此,在研究中国气候变化对作物单产影响的 298 篇文献中进一步筛选,要求文献必须是评估未来年份的单产变化情况,针对玉米、小麦、水稻三大粮食作物,不符合任意一条原则的剔除,得到 55 篇文献。进一步详细阅读文献并根据作物类型进行数据分类梳理,对于定性分析以及关键变量(气温、降水)缺失的文献进一步剔除,最终得到文献 34 篇。值得说明的是,本文层层筛选出的文献样本必须确保符合如下原则:①必须是对中国整体或某区域进行评估的文献,不包括对国外和全球评估的文献;②必须是评估气候变化对未来作物单产影响的文献,不包括评估气候变化对历史单产影响的文献;③必须是对三大类作物单独开展评估的文献,不包括对农业整体评估的文献,也不包括对病虫害、耕地、种植制度等其他方面开展评估的文献;④必须是基于各类作物模型(文献中主要使用的定量评估方法)的定量评估,不包括各类定性论述文献。尽管根据直觉,应该有大量气候变化对农业影响的文献,甚至不少杂志还出专刊讨论这一问题,但不符合上述原则的文献都不在本文样本中。2016 年出版的《第三次气候变化国家评估报告》对符合上述条件的文献也进行了梳理,文献数为 26 篇,比本文样本文献少 8 篇^[16]。Challinor^[17]对全球及主要国家符合上述条件的文献也进行了梳理,文献数也仅 89 篇,同时包括了全球总体及分国别结果。

我们将每篇文章中不同预估年代、不同情景下的粮食作物单产变化作为一个观测样本(例如,如果一篇文献中,针对玉米、小麦、水稻三种主要粮食作物,在 RCP2.6 与 RCP8.5 情景下,分别预估 2020、2050、2080 三个年代的产量情况,则该文献提供了 $3 \times 2 \times 3 = 18$ 个样本观测值)。

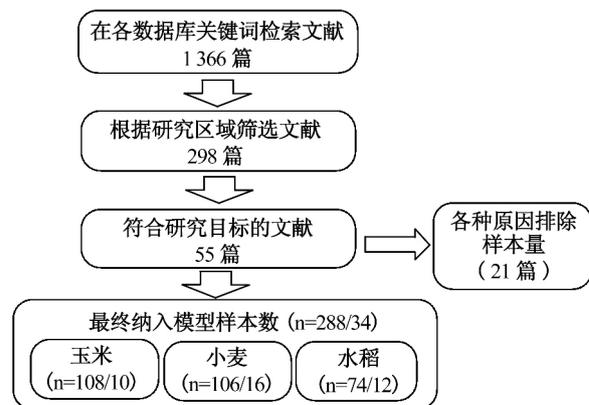


图 1 Meta 分析样本筛选流程

同时再将每个样本观测值针对气温变化情况、降水变化百分比、是否考虑 CO₂ 肥效、作物类型等等进行归纳整理, 这样将每篇文章拓展为包含以上信息的多个样本观测值。根据上述样本处理方式, 本文对最终选取的 34 篇文献进行分类汇总, 最终得到样本统计量 288 个。其中, 玉米作物的样本量为 108 个, 小麦的样本量为 106 个, 水稻的样本量为 74 个。

2 温度、降水变化与主要粮食作物单产的统计关系

通过文献梳理得到以下关键研究变量: 气候变化情景、作物种类、种植地区、灌溉条件、是否考虑 CO₂ 肥效等, 目前研究最多的要素是气温变化、降水变化和 CO₂ 肥效。气温越高, 农作物的生长发育就越快, 当活动温度积累到一定水平时, 作物完成了整个发育周期。在气候变暖的情况下, 高温使得农作物的发育周期缩短, 减少了通过光合作用积累物质的时间, 从而使得产量直接减少, 品质也会下降^[18-19]。中国地域广、跨度大, 气候变化背景下降水的区域差异显著, 南方地区出现明显的降水减少, 使得南方地区雨养作物出现减产情况; 东北地区东南部、华北降水出现小幅增加趋势, 使得灌溉作物的单产适当增加。降水对于作物单产的影响具有明显的地域差异。CO₂ 是作物光合作用的基本要素, 也是气候变化情景构建的主要指标。CO₂ 含量增加可以提高作物的光合速率, 直接刺激作物生长, 提高干物质的含量, 使得产量增加^[20-21]。这三者是本文研究气候变化下影响单产变化的主要考察因素, 利用文献整理数据, 分析这三者与作物单产之间的相关关系。

由图 2 可以看出, 在未考虑 CO₂ 肥效的情况下, 随着温度升高, 粮食作物单产呈明显的下降趋势, 在温度升高超过 4℃ 时单产下降比例超过 10%; 在考虑 CO₂ 肥效的情况下, 拟合曲线出现明显的增长趋势, 单产变化明显高于未考虑 CO₂ 肥效时的估计结果, 统计显著为正。这说明了 CO₂ 肥效对于气温升高造成的单产损失具有一定的抵消作用。同时, 在变化相同温度时, 考虑肥效后的产量变化比例明显低于未考虑肥效的变化比例, 这意味着在考虑 CO₂ 肥效情况下, 气温升高造成的减产只能抵消部分负影响。

由图 3 可以看出, 未来作物单产变化随着降水变化百分比的增加出现小幅增加的趋势, 但是趋势不明显。降水变化百分比在 20% 以内时, 作物单产的波动较大; 降水变化比例超过 20% 时, 单产的估计值较少。根据文献整理发现, 水稻的研究区域主要来自南方地区, 少量是来自北方地区, 而玉米、小麦的研究区域主要来自北方地区。从图中可知, 现有文献对于未来降水变化百分比的估计普

遍认为是增加的, 这种增加能够提高南方地区水稻、北方地区玉米和小麦的产量; 从整体趋势看, 未来降水增加, 三大作物的总产量还是会出现上涨的趋势。

3 Meta 回归结果及稳定性检验

从前述统计描述中, 可以发现温度、降水变化均与主要粮食作物单产百分比变化存在明显的相关关系。然而, 统计描述具有一定的局限性: ①只能分析三者之间的相关关系, 难以考虑温度与降水变化的相互作用以及二者与单产变化之间的定量关系; ②难以定量分析 CO₂ 肥效对作物单产的影响。因此, 本节利用 Meta 回归模型, 定量分析温度、降水变化、CO₂ 肥效等因素对小麦、玉米和水稻等主要粮食作物单产的影响。

根据 Challinor 等^[17], Meta 回归的基本模型具体设定如下:

$$(\Delta Y/Y)_i = \alpha_0 + \alpha_1 \times \Delta T_i + \alpha_2 \times (\Delta P/P)_i + \alpha_3 \times CO_{2i} + \alpha_4 \times N_i + \alpha_5 \times S_i + \varepsilon \quad (1)$$

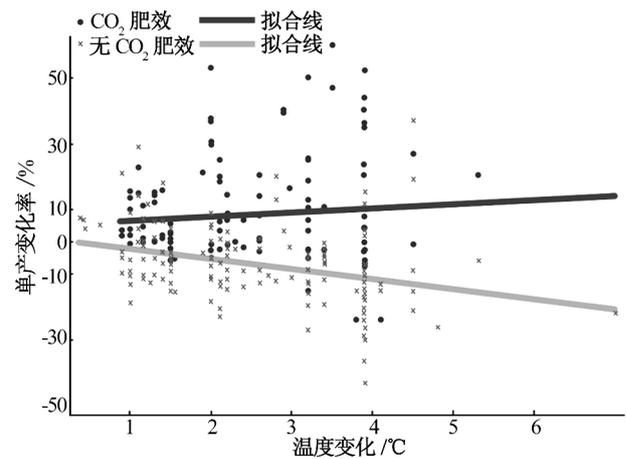


图 2 温度变化与主要粮食作物单产变化率

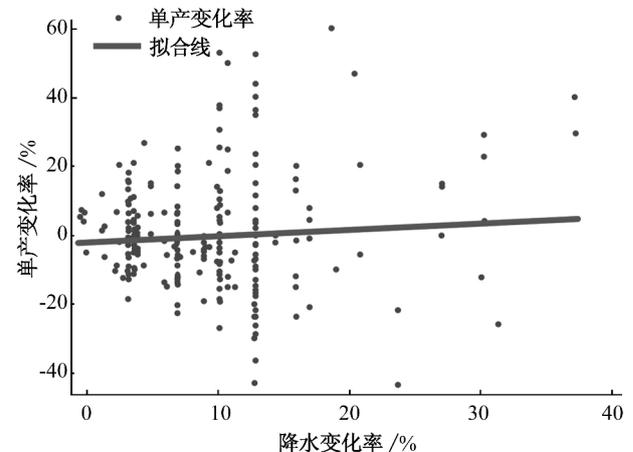


图 3 降水变化率与主要粮食作物单产变化率

其中,因变量 $\Delta Y/Y$ 为主要粮食作物单产的百分比变化。在等式右边 ΔT 代表第 i 个样本的温度变化, $\Delta P/P$ 为第 i 个样本的降水百分比变化。 CO_2 为二值虚拟变量,当样本 i 考虑 CO_2 肥力效应时,该变量等于 1,否则等于 0。为了考虑气候变化影响在不同区域之间的差异,以全国为基准组 N 和 S 分别为代表北方地区和南方地区的二值虚拟变量。针对南方地区的研究结果,北方地区二值虚拟变量 $N_i = 0$,南方地区二值虚拟变量 $S_i = 1$;针对北方地区的研究结果,北方地区二值虚拟变量 $N_i = 1$,南方地区二值虚拟变量 $S_i = 0$;针对全国的研究结果,北方地区二值虚拟变量 $N_i = 0$,且南方地区二值虚拟变量 $S_i = 0$ 。

在方程(1)的基础上,进一步考虑温度、降水变化在不同粮食作物之间的差异。以小麦为基准组,将二值虚拟变量 D_M 和 D_R 加入方程(1)中,得到方程(2)。当第 i 个样本是关于玉米(水稻)单产变化时, D_M (D_R) 取值为 1,否则为 0。

$$(\Delta Y/Y) \Delta i = \beta_0 + \beta_1 \times \Delta T_i + \beta_2 \times (\Delta P/P)_i + \beta_3 \times CO_{2i} + \beta_4 \times D_{Mi} + \beta_5 \times D_{Ri} + \beta_6 \times N_i + \beta_7 \times S_i + \varepsilon \quad (2)$$

Nelson 和 Kennedy^[22]认为,由于在 Meta 分析中不同研究提供的样本数不同,可能导致异方差的出现。为了解决异方差问题,我们以每个研究提供样本数的倒数作为权重,利用加权最小二乘回归(WLS)估计方程(1)和(2)^[23]。

表 1 为 Meta 回归变量的统计分析结果。主要粮食作物单产变化的最大值为提高 59.9%,最小值为下降 43.5%,均值为 0.02%,标准差为 15.37。温度变化的均

表 1 Meta 回归变量的统计分析

| 变量 | 均值 | 标准差 | 最大值 | 最小值 | 偏度 | 峰度 |
|----------------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 单产变化/% | 0.02 | 15.37 | 59.9 | -43.5 | 0.96 | 5.18 |
| 温度变化/℃ | 2.42 | 1.17 | 7 | 0.38 | 0.66 | 3.28 |
| 降水变化/% | 9.95 | 8.47 | 51.5 | -0.38 | 2.71 | 11.98 |
| 是否考虑 CO_2 肥效 | 0.45 | 0.50 | 1 | 0 | 0.19 | 1.04 |
| 研究区域 | | | | | | |
| 全国 | 0.49 | 0.50 | 1 | 0 | 0.02 | 1.00 |
| 北方 | 0.30 | 0.46 | 1 | 0 | 0.89 | 1.80 |
| 南方 | 0.21 | 0.41 | 1 | 0 | 1.41 | 2.97 |
| 作物 | | | | | | |
| 小麦 | 0.37 | 0.48 | 1 | 0 | 0.54 | 1.29 |
| 玉米 | 0.38 | 0.49 | 1 | 0 | 0.51 | 1.26 |
| 水稻 | 0.25 | 0.44 | 1 | 0 | 1.13 | 2.27 |

注:样本量为 287。

值为升高 2.42℃,最大值为升高 7℃,最小值为升高 0.38℃,标准差为 1.17。降水变化的均值为增加 9.95%,最大值为增加 51.5%,最小值为下降 0.38%,标准差为 8.47。除了温度、降水外,45%的研究结果考虑 CO_2 肥效对粮食作物单产的影响。就研究区域而言,49%的样本来自对全国情况进行的分析,30%的样本只针对北方地区进行分析,21%的样本只针对南方地区进行分析。就作物而言,37%的样本来自对小麦单产的分析,38%的样本来自对玉米单产的分析,25%的样本来自对水稻单产的分析。

表 2 为主要粮食作物单产变化的 Meta 回归结果。其中,第(1)列为方程 1 的回归结果,第(2)列为方程 2 的估计结果。首先,从整体上看,两个回归的 R^2 都在 0.45 以上,说明模型对数据的拟合程度较好。其次,包含粮食作物虚拟变量的回归结果(第 2 列)与不包含作物虚拟变量的回归结果(第 1 列)基本一致,说明我们的模型具有较好的稳健性。第三,Meta 回归的结果与第 3 节统计描述基本保持一致。以下分析主要介绍方程 2 的回归结果(第 2 列)。

第一,温度上升显著降低了中国主要粮食作物的单产。从表 2 中可以看到,温度变化的系数显著为负(-2.568,第 1 行)。我们的估计结果表明,温度每提高 1℃,中国主要粮食作物的单产将下降约 2.6%。根据区

表 2 主要粮食作物单产变化的 Meta 回归结果

| 变量 | 主要粮食作物的单产变化/% | |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| | (1) | (2) |
| 温度变化/℃ | -2.187 *** (0.115) | -2.568 *** (0.105) |
| 降水变化率/% | 0.302 *** (0.024 2) | 0.371 *** (0.021 9) |
| CO_2 肥效(1=是;0=否) | 16.78 *** (0.202) | 16.48 *** (0.183) |
| 作物 | | |
| 玉米(1=是;0=否) | — | -10.16 *** (0.220) |
| 水稻(1=是;0=否) | — | -4.375 *** (0.872) |
| 区域 | | 略 |
| 常数项 | -7.744 *** (0.263) | -0.589 ** (0.284) |
| 样本量 | 287 | 287 |
| R^2 | 0.476 | 0.573 |

注:括号里为系数标准差;*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

域气候模式(RegCM4.0) 测算中国区域气候变化情况,认为到 21 世纪末,在 RCP4.5、RCP8.5 情景下,平均气温分别增加 1.8℃ 和 3.8℃ (第三次气候变化国家评估报告^[16])。基于我们的回归分析结果,在 RCP4.5 情景下,到 2100 年中国主要粮食作物单产将会下降约 4.6% ($2.568 \times 1.8 = 4.6$),大体相当于过去 4 年中国粮食单产提高的水平(从 2011 年到 2014 年,三大类粮食作物单产从 5 166 kg/hm² 提高到 5 385 kg/hm²,提高了约 4.2%)。进一步,在 RCP8.5 情景下,中国主要粮食作物的单产将会下降约 9.8% ($2.568 \times 3.8 = 9.8$)。这超过了过去 7 年中国主要粮食作物单产提高的水平(从 2008 年到 2014 年,三大类粮食作物单产从 4 951 kg/hm² 提高到 5 385 kg/hm²,提高了 8.8%^[24])。考虑到水土资源、劳动力成本等制约因素之后,气候变化对未来中国主要粮食生产将会带来更大的威胁。

第二,降水的增多将提高粮食作物的单产。根据表 1 的结果,降水变化的系数显著为正(0.371,第 2 行),即降水每增加 1% 粮食作物的单产约增加 0.4%。利用区域气候模式(RegCM4.0) 测算到 21 世纪末,在 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下,降水分别增加 6.3% 与 8.0%^[16]。基于现有降水与产量的相关分析统计(见图 3),也发现未来降水变化呈现增长趋势。结合回归分析结果,认为降水的增加将提高未来中国粮食作物单产,但增长幅度不大(<3%)。

第三,CO₂ 肥力显著增加三大粮食作物单产,甚至抵消气温升高造成的损失。从表 1 中可以看到,CO₂ 肥效的系数显著为正(16.48,第 3 行)。估计结果表明,在考虑 CO₂ 肥效的影响下,未来粮食作物的单产会增加约 16%。我们有关 CO₂ 肥效与粮食作物单产的计量分析也印证了已有研究结论,在不同情景下的未来预估年代下,CO₂ 肥效能够降低温度变化造成的产量损失^[25-27]。同时,CO₂ 肥效不仅能够弥补温度升高造成的损失,甚至带来产量的增加^[28-29]。尽管 CO₂ 肥效对于作物产量的影响在自然科学领域存在很大的争议,但是基于本研究的 Meta 分析结果看,CO₂ 肥效对于作物产量还是具有显著正影响。

在 Meta 回归分析的基础上,我们利用多因素方差分析(ANOVA)进一步探讨各类变量的组间方差对主要粮食作物单产总方差的影响,分析导致研究结论差异的主要影响因素。表 3 中的平方和表示基于均值水平的各类变量组件方差估计的平方和,将其除以总平方和得到各变量组间方差的贡献率。显著性基于 F 检验,表明各组变量的组间方差是否显著影响总体方差。结果表明气候变化对主要粮食作物单产影响的差异主要来自 CO₂ 肥效、作物品种、温度和降水的差异,分别可以解释结论差异的 51.0%、20.4%、11.5% 和 5.7%,四个变量可以解释模型部分的

88.6%。这与 Meta 回归结果一致,正是不同研究在以上方面的差异,最终导致了关于气候变化对主要粮食作物单产影响的不同结论。

4 结 论

为进一步认识气候变化对粮食单产的自然影响,利用已有文献中有关气候变化对三大粮食作物单产影响的评估结果作为样本,通过层层筛选确定了 34 篇高度相关的文献,最终获得 288 个样本,采用文献计量 Meta 分析方法开展统计分析和计量估计。研究结果表明:气候变化对主要粮食作物单产的影响因素包括气候变化情景、作物种类、种植地区、是否考虑 CO₂ 肥效等,目前研究最多的是气温、降水和 CO₂ 肥效。气温每提高 1℃,中国主要粮食作物的单产将下降 2.6%;降水每增加 1%,粮食作物的单产约增加约 0.4%;在考虑 CO₂ 肥效的影响下,粮食作物的单产平均增加约 16%。有关气候变化对三大粮食作物单产影响的差异主要来自不同研究在 CO₂ 肥效、作物品种、温度和降水方面的差异。

综合气温和降水对粮食单产的综合影响,本研究表明气候变化将对我国粮食安全造成一定的冲击。根据第三次国家气候变化评估报告^[16],在 RCP8.5 情景下到 2100 年中国气温将上升 3.8℃,同时降水将提高 8.0%,两方面影响共同作用导致中国粮食单产将下降约 6.7%。这也正是本研究能够服务政策制定的方面,本研究综合相关文

表 3 主要粮食作物单产变化的 ANOVA 分析结果

| 项目 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | Prob > F | 贡献率 /% |
|-----------------------------------|----------|-----|----------|-------|----------|--------|
| 模型 | 33 788.9 | 7 | 4 827.0 | 39.9 | 0.00 | 100.0 |
| 温度变化/℃ | 3 885.3 | 1 | 3 885.3 | 32.1 | 0.00 | 11.5 |
| 降水变化率/% | 1 922.7 | 1 | 1 922.7 | 15.9 | 0.00 | 5.7 |
| CO ₂ 肥效 (1 = 是; 0 = 否) | 17 237.7 | 1 | 17 237.7 | 142.3 | 0.00 | 51.0 |
| 作物 | | | | | | |
| 玉米 (1 = 是; 0 = 否) | 6 194.0 | 1 | 6 194.0 | 51.1 | 0.00 | 18.3 |
| 水稻 (1 = 是; 0 = 否) | 718.2 | 1 | 718.2 | 5.9 | 0.02 | 2.1 |
| 区域 | | | | | | |
| 北方地区 (1 = 是; 0 = 否) | 2 079.7 | 1 | 2 079.7 | 17.2 | 0.00 | 6.2 |
| 南方地区 (1 = 是; 0 = 否) | 66.0 | 1 | 66.0 | 0.5 | 0.46 | 0.2 |
| 残差 | 33 797.4 | 279 | 121.1 | | | |
| 整体 | 67 586.3 | 286 | 236.3 | | | |

献结果 提供了统一情景下气温、降水变化对中国主要粮食作物单产的影响,将为气候变化的农产品供需市场模型或者气候变化综合评估模型(IAM)研究提供可靠的数据基础。

在不考虑粮食播种面积调整和气候变化适应措施下,未来气候变化带来的粮食作物产量变化比较显著。现有研究还较少考虑粮食播种面积调整和气候变化适应行为。尽管气候变化将在一定程度上降低中国粮食单产,但粮食产出减少同时会提高粮食的价格,在一定程度上会刺激粮食播种面积的扩大。气候变化对粮食产量的影响最终要取决于粮食单产与播种面积的双重影响,未来研究应当进一步考虑气候变化对粮食播种面积的影响。另一方面,政府与农户均可实施气候变化的适应措施,包括加强田间管理、水利建设、调整耕作时间等,将在一定程度上抵消气候变化的影响。但是现有研究还很少在研究气候变化的农业影响时考虑政府与农户的适应行为,未来的研究也应在该方面加以改进。最后,气候变化对不同粮食作物单产的影响也可能存在差异,需要在未来的研究中深入研究气候变化对不同区域、不同作物单产的影响。

(编辑:王爱萍)

参考文献

- [1]陈锡文. 中国农业政策面临的挑战[J]. 经济研究参考, 2017(12): 25-25.
- [2]黄季焜, 杨军, 仇焕广. 新时期国家粮食安全战略和政策的思考[J]. 农业经济问题, 2012(3): 4-8.
- [3]谢立勇, 李悦, 徐玉秀, 等. 气候变化对农业生产与粮食安全影响的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 235-239.
- [4]汪阳洁, 仇焕广, 陈晓红. 气候变化对农业影响的经济方法研究进展[J]. 中国农村经济, 2015(9): 4-16.
- [5]HLPE (High Level Panel of Experts). Food security and climate change. A report by the High Level Panel of Experts (HLPE) on food security and nutrition of the Committee on World Food Security (CFS) [R]. 2012.
- [6]中央一号文件. 中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定[R]. 2011.
- [7]ROSENZWEIG C, ELLIOTT J, DERYNG D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st Century in a global gridded crop model intercomparison[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(9): 3268-73.
- [8]TAO F L, HAYASHI Y, ZHANG Z, et al. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment[J]. Agricultural and forest meteorology, 2008, 148(1): 94-110.
- [9]XIONG W, CONWAY D, LIN E, et al. Potential impacts of climate change and climate variability on China's rice yield and production[J]. Climate research, 2009, 40(1): 23-35.
- [10]ZHANG T, ZHU J, WASSMANN R. Responses of rice yields to recent climate change in China: an empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981-2005) [J]. Agricultural and forest meteorology, 2010, 150(7): 1128-1137.
- [11]YU Y, ZHANG W, HUANG Y. Impact assessment of climate change, carbon dioxide fertilization and constant growing season on rice yields in China[J]. Climatic change, 2014, 124(4): 763-775.
- [12]MATTHEWS R B, KROPFF M J, HORIE T, et al. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation [J]. Agricultural systems, 1997, 54(3): 399-425.
- [13]WANG J X, HUANG J K, YANG J. Overview of impacts of climate change and adaptation in China's agriculture [J]. Journal of integrative agriculture, 2014, 13(1): 1-17.
- [14]NORDHAUS W. A question of balance: weighing the options on global warming policies [M]. New Haven C T: Yale University Press, 2009.
- [15]ACKERMAN F, MUNITZ C. Climate damages in the FUND Model: a disaggregated analysis [J]. Ecological economics, 2012, 77(2): 219-224.
- [16]《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [17]CHALLINOR A J, WATSON J, LOBELL D B, et al. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation [J]. Nature climate change, 2014, 4(4): 287-291.
- [18]潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698-1706.
- [19]TAO F, YOKOZAWA M, XU Y, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000 [J]. Agricultural and forest meteorology, 2006, 138(1): 82-92.
- [20]谢立勇, 林而达. 适应二氧化碳肥效作用的农业技术潜力分析[J]. 中国农业气象, 2006, 27(3): 161-166.
- [21]WANG P, ZHANG Z, SONG X, et al. Temperature variations and rice yields in China: historical contributions and future trends [J]. Climatic change, 2014, 124(4): 777-789.
- [22]NELSON J P, KENNEDY P E. The use (and abuse) of Meta-Analysis in environmental and natural resource economics: an assessment [J]. Environmental and resource economics, 2009, 42(3): 345-377.
- [23]SHADISH W R, HADDOCK C K. Combining estimates of effect size [J]. Handbook of research synthesis, 2009: 257-277.
- [24]国家统计局. 中国统计年鉴(2015) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [25]LIN E, WEI X, HUI J, et al. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: biological sciences, 2005, 360: 2149-2154.
- [26]XIONG W, MATTHEWS R, HOLMAN I, et al. Modelling China's

- potential maize production at regional scale under climate change [J]. *Climatic change*, 2007, 85(3-4): 433-451.
- [27] XIONG W, DECLAN C, ERDA L, et al. Future cereal production in China: the interaction of climate change, water availability and socio-economic scenarios [J]. *Global environmental change*, 2009, 19(1): 34-44.
- [28] TAO F L, ZHANG Z. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: a new super-ensemble-based probabilistic projection [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2013, 170(2): 146-165.
- [29] LI K, YANG X, TIAN H, et al. Effects of changing climate and cultivar on the phenology and yield of winter wheat in the North China Plain [J]. *International journal of biometeorology*, 2016, 60(1): 21-32.

The impacts of climate change on the yield of staple crops in China: a Meta-analysis

XIE Wei¹ WEI Wei² CUI Qi³

(1. China Center for Agricultural Policy, School of Advanced Agricultural Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Beijing Business Management College, Beijing 100028, China; 3. School of Economics and Resource Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The impact of climate change on food security is attracting ever increasing attention from governments and academics. However, the previous studies on assessing the effects of climate change on grain yield—which used different impact factors and methods—have led to different, even contrasting results. This situation confuses agricultural and climate change economists when choosing the yield loss for assessing the impact of climate change on food security. This paper aims to provide the impact of temperature and precipitation changes on the yields of China's staple crops under a unified scenario by using the results of the existing research on assessment of the impact of climate change on China's future grain yields as a statistical sample. Then it constructs a damage function of climate change impact on grain yield. Thus, this study establishes 288 samples according to the results of highly relevant papers and applies Meta-analysis method to assess the impact of climate change on staple crops' yield of China. The results show that the impacts of climate change on the yield of staple crops are different depending on climate change scenarios, crop types, planting areas, and whether CO₂ fertilizer efficiency is considered. It concludes that for every 1°C increase in temperature, the overall yield of China's three major food crops decreases by about 2.6%; for every 1% increase in precipitation, the yield of China's three major food crops increases by about 0.4%; while the influence of the CO₂ fertilizer effect has large uncertainty due to different studies. By synthesizing the effects of temperature and precipitation on grain yields, this study shows that climate change will certainly affect China's food security even offsetting the positive effects of some technological advance. Our study summarizes the impacts of climate change on the yield of staple crops under the same temperature and precipitation change and will provide reliable data basis for assessing the impact of climate change by using agricultural partial equilibrium model or integrated assessment models.

Key words temperature; precipitation; CO₂ fertilizer effect; staple crops' yield; damage function; meta-analysis