

中国粮食生产的综合影响因素分析

熊 伟^{1,2}, 林而达^{1,2}, 蒋金荷³, 李 岩⁴, 许吟隆^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2. 农业部气候变化与农业环境重点实验室, 北京 100081;

3. 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100732; 4. 水利部水利信息中心, 北京 100053)

摘要: 采用模型模拟的方式, 根据中国社会发展规划, 将未来社会经济发展情景与区域气候模型、水资源模型和作物模型相连接, 综合评估和分析未来中国的粮食生产状况, 以期宏观决策提供科学参考。结果表明, ①气候变化将影响未来三大作物单产, 如果不考虑 CO₂ 肥效作用, 未来雨养作物单产将受到更大冲击; 当灌溉条件保障后, 水稻受到冲击更大, 单产降低最多, 尤其是 A2 情景。如果考虑 CO₂ 肥效作用, 未来玉米平均单产变化不大, 小麦单产明显增加, 尤其是雨养小麦, 水稻单产也有所增加。②未来气候变化、水资源、社会经济发展将影响中国三大作物的需水量和农业供水量, 导致水稻、灌溉玉米和小麦的播种面积下降, 而雨养小麦和玉米的播种面积上升。③未来气候变化、CO₂ 肥效、水资源和土地利用变化对粮食生产的影响较为复杂, 依情景和时段的不同而不同。农业可用水资源对粮食总产的影响最不利, 致使三大作物粮食总产量明显降低, 成为未来粮食生产的主要限制因素, 尤其是水稻生产; 土地利用对总产的负面影响最小; 气候变化和 CO₂ 的相互作用可使总量少许增加。未来各情景下水稻受到冲击最大, 而小麦和玉米则表现为不同程度的增产。

关键词: 气候变化; 水可用量; 粮食生产; 综合评估; 中国

粮食是人类生存和发展的基础, 粮食生产不仅是关系国计民生的大问题, 而且关系到世界的和平与稳定, 气候变化对粮食生产的影响评价, 从 20 世纪 70 年代以来, 一直受到学术界和有关政府部门的广泛关注。中国地处东亚季风区, 是世界上气候变化最为显著、气象灾害最频繁的国家之一, 未来气候变化及其极端天气事件的增多将有可能影响中国粮食生产的稳定和持续发展^[1], 对此国内外学者展开了大量的研究^[2-5], 研究中多假设未来农业生产与现阶段状况保持一致, 以未来气候变化 (CO₂ 浓度增加、温度增加) 为背景, 从单因素影响角度出发 (仅考虑温度增加或温度增加的同时考虑了 CO₂ 浓度) 去评价气候变化对粮食生产的影响。然而, 农业生产不仅受气候环境变化的影响, 还受到诸多社会因素, 如未来的水资源、土地资源利用格局、社会结构和消费习惯以及科学技术发展水平等的影响^[6]。部分学者对建国 50 年来影响粮食作物单产的因素进行分析, 从总体上讲, 灌溉和技术进步对提高粮食作物单产起了决定性作用^[7], 目前技术进步、水资源和土地利用已被公认为影响我国粮食生产最重要的三大驱动因素, 它们对中国未来粮食生产的影响也是不可忽视的。因此随着研究的逐渐深入, 研究者和决策部门已越来越意识到, 如果要全面和系统地了解未来粮食生产的状况, 为管理部门制定短、中、长期决策提供科学的依据, 结合气候变化和其它趋动因子, 开展综合评估是非常必要的。

部分学者尝试综合多种因子, 研究气候变化对粮食生产的影响, Parry 等^[8]结合不同社会经济情景, 研究气候变化对全球各国粮食生产的影响, 指出未来 2080 年中国粮食产量在 0~±2.5% 的范围内变化, 而这一幅度仍属于自然气候波动的正常影响范围; Fischer

收稿日期: 2009-02-27; 修订日期: 2009-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(30700477); 国家科技支撑计划 (2007BAC03A02) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.30700477; National Technology R&D Program, No.2007BAC03A02]

作者简介: 熊伟 (1974-), 男, 湖北孝感人, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化对农业的影响研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http

等^[9]也分析了不同社会经济情景下全球粮食生产，认为中国地区由于降水增加，边缘地区的粮食产量将会增加。Rosenzweig 等^[10]结合水资源变化，评价气候变化对粮食生产影响时指出，中国东北地区未来粮食生产的主要限制因子是水分。国内学者也展开了一些综合研究，研究中将田间试验、产量预测、需水量预测以及专家判断等的结果进行了综合分析，得出由于未来 CO₂ 浓度增加，我国粮食产量潜力将会增大，但是由于水分胁迫和极端天气事件的增加，也会增大粮食生产的不稳定性，降低其适应性^[11]。前人研究中，国外学者多关注全球粮食安全问题，其社会经济情景的假设与我国的国情和发展存在一定差距；而国内研究目前还主要是将气候变化与各驱动因子的单独影响结果进行综合分析，考虑的因素少且忽略了各因素之间的有机关联，并非真正意义上的综合评估。鉴于此，本研究采用模型模拟的方式，根据未来中国社会发展规划，尝试将气候变化模型、水资源模型、未来社会经济发展情景与作物模型接合起来，以综合地评估和分析未来中国粮食生产的状况。

1 材料和方法

1.1 整体评估框架

研究中突出 7 方面内容：① 基于 IPCC 提供的社会发展方案，构建我国未来社会经济情景和模拟不同 CO₂ 排放情景下未来气候变化状况；② 基于未来气候状况，利用 CERES 作物模型，模拟 50 km×50 km 网格尺度下气候变化对中国主要粮食作物单产量和灌溉需水量的变化；③ 利用气候变化情景和 VIC 分布式水文模型，预测未来中国各流域水资源（包括地表径流深和地下径流深）总量的变化；④ 结合社会经济情景和未来中国水资源总量，计算出未来中国农业可利用水量；⑤ 结合社会经济发展情景，预测网格尺度下未来耕地面积；⑥ 根据预测的灌溉需水量、农业可利用水量以及耕地面积，确定各作物的雨养和灌溉面积；⑦ 根据预测的未来作物单产量（灌溉、雨养单产）和雨养、灌溉面积，计算未来粮食总产。研究流程如图 1。

1.2 社会发展方案的选择

SRES 排放情景是 IPCC 基于未来的多种可能的发展模式，专门整理和修订的未来排放方案，每种排放方案与未来不同的社会发展模式相对应^[12]，其中 A2 情景（中—高排放方案）考虑了快速的人口增长，与中国发展状况差异较大，但作为一种假设的高排放情景，可以帮助我们评估在最坏的发展状况下可能的影响^[13-14]；B2（中—低排放方案）情景与中国中长期社会发展方案相近，可以作为未来可持续的发展情景，因此本文选取了这两种情景。

1.3 气候变化情景

本文选用了英国 Hadley 中心最新开发的区域气候模式 PRECIS^[15]，与以往研究中所采用的全球气候模式（GCM）相比，该模式在模式验证、时空分辨率、对地形的表述以及模式的不确定性方面有显著的改善^[16]，但 PRECIS 对降水变化的预测较其他模型大。

研究中，基于 A2 和 B2 情景，运用区域气候模式模拟出中国 50 km×50 km 网格的逐日最高温、最低温、降水、辐射等 20 余项气象指标，其中以模拟的 1961-1990 年历年

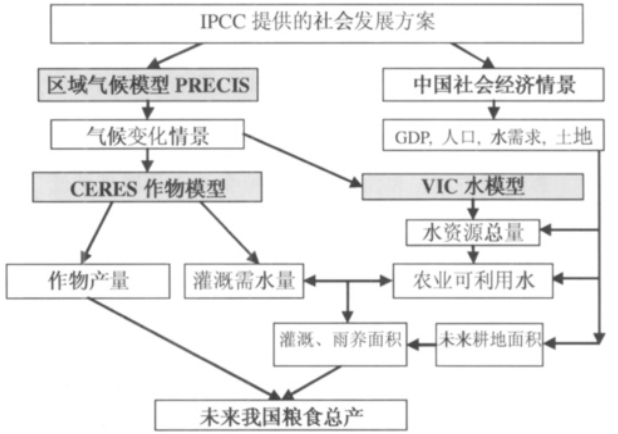


图 1 本研究的流程图

Fig. 1 Flowchart of the approach

表 1 气候变化情景（与目前气候 BS 的比较值）
Tab. 1 Climate change scenarios (corresponding to the present climate BS)

时段	A2 (中-高排放情景)				B2 (中-低排放情景)			
	温度变化	降水变化	辐射变化	CO ₂	温度变化	降水变化	辐射变化	CO ₂
	(℃)	(%)	(%)	(ppmv)	(℃)	(%)	(%)	(ppmv)
2020s (2011-2040)	+1.3	+5	+0.5	440	+1.5	+4	+0.5	429
2050s (2041-2070)	+2.6	+10	+0.7	599	+2.4	+6	+0.7	492
2080s (2071-2100)	+4.5	+17	+1.1	721	+3.4	+9	+0.9	561

的逐日气象信息作为基准时段 (BS)，代表当前气候；由 A2 和 B2 分别驱动模拟得到 2071-2100 年的逐日气象信息，代表未来远期的气候状况；受气候模拟工作量的限制，2011-2070 年的逐日气象信息，由时间降尺度方法计算得出。为了与社会经济发展情景相一致，我们选择了 2011-2050 时段的逐日天气数据作为其他模型的输入。PRECIS 模拟气候情景及对应的 CO₂ 浓度见表 1。

1.4 社会经济情景构建

为了更好地评价气候变化和社会经济发展对我国粮食生产的综合影响，基于 IPCC 的 A2 与 B2 社会发展方案和我国中长期发展规划，对未来 2050 年内中国的 GDP、人口、工业结构、水需求以及土地利用情况等进行了预测，构建了中国社会发展情景 (表 2)，并按现有比例不变法^[17]，把 GDP、人口、水需求、土地利用预测降尺度到网格水平。

1.5 CERES 作物模型及模拟

CERES 系列模型是目前世界上应用最广的作物模型之一，本研究中选择其中的 CERES-Rice^[18]，CERES-Wheat^[19]和 CERES-Maize^[20]模型，它们不仅可以预测不同作物品种在各种气候生态和栽培条件下的生长、发育和产量，而且可以帮助制定多目标的优化决策。模型中还考虑了 CO₂ 浓度增加对作物光合作用和水分利用效率的影响，可以模拟不同农业管理措施条件下，气温、降水、辐射以及 CO₂ 浓度等自然因素对作物生产和产量的影响。

在运用作物模型之前，研究首先对每个模型分别进行站点和区域两种尺度的校准和验证^[21-22]，结果表明，校准后，模型不但对站点尺度的单季作物模拟效果较好，而且在区域模拟上可以反映出产量的时间和空间变化趋势。然后利用校准和验证的模型，模拟了基准气候情景下 (BS, 1961-1990 年) 和 2 种 SRES 温室气体排放方案下 2011-2050 年中国雨养、灌溉作物单产量(自动灌溉方式，即当土壤有效含水量小于 60%时进行定量灌溉，其他管理和品种数据由区域校准过程确定) 和作物需水量，具体模拟过程参见文献[3]。

1.6 VIC 水模型及模拟

采用 VIC (Variable Infiltration Capacity) 模型模拟了气候变化下网格尺度的水资源状况。VIC 模型是美国华盛顿大学和普林斯顿大学共同研制，基于网格而建立的气候变化对径流影响评估的分布式水文模型^[23-27]。该模型在很多地区已经得到了验证和运用，模型参数的网格化特性有利于与气候模型嵌套，以评价气候变化对水资源的影响。

研究中首先采用遥感、DEM (数字高程图) 和气候等资料 (来源于国家气象局信息中心)，在 50 km×50 km 的网格尺度上对 VIC 模型所需要的气候背景参数、植被参数和土

表 2 两种社会经济发展情景下 (A2、B2) 未来中国的人口和经济发展

Tab. 2 China's population and GDP projections in the two socio-economic scenarios

	2000	2005	2020		2050	
			A2	B2	A2	B2
GDP (万亿元)	9.92	15.6	30.1	48.1	83.7	145.0
人口 (亿)	12.7	13.1	15.3	14.4	19.4	15.1
人均 GDP (\$)	950	1,700	2,400	4,050	5,200	11,650
耕地 (亿 hm ²)	1.28	1.22	1.14	1.22	1.08	1.22
水需求 (亿 m ³)	5497	5633	6161	6194	7470	6910

说明：GDP 按 2000 年不变价格计算；人均 GDP 按 2000 年兑换率，1 美元 = 8.2784 人民币。

壤参数进行了标定。其次利用降水、气温及流量资料,对中国不同气候区 60 个典型流域 VIC 模型水文参数进行率定,模拟了历史流量过程,并与实测历史流量进行对比。结果表明,基于 VIC 模型在中国进行气候变化对径流影响的评估是可行的。再后,通过对气候和土壤分区的聚类分析,将全国分为 41 个水文参数区^[28],并对同一水文参数区所有已率定的水文参数求平均,将其应用到同一分区的其他网格,实现无资料地区的水文参数的移植,最后模拟了中国各网格 BS (1961-1990 年), A2 (2011-2050 年) 和 B2 (2011-2050 年) 逐日的径流深 (包括地表径流深和地下径流深)。

1.7 模型间的连接和处理

1.7.1 未来各省和网格的农业可用水量 为了简化分析,将每个网格的年径流深作为该网格该年水资源总量。按公式 (1) 计算出全国 10 个主要流域的水资源总量。

$$S_j = \sum_{k=1}^n (R_k \times A_k) \tag{1}$$

式中: S_j 表示流域 j (全国分为 10 个流域) 的年水资源总量, n 表示流域 j 所涵盖的网格数, R_k 表示网格 k 的年径流深, A_k 为该网格在流域 j 中的面积。

由于中国是以省为单位进行水资源分配,因此按式 (2) 计算 i 省农业可用水资源 AWP_i :

$$AWP_i = \left(\sum_{j=1}^n (S_j \times R_j \times P_{ij}) \right) (aw_i/t_i) \tag{2}$$

式中: AWP_i 表示第 i 省的农业可用水总量,由于多数省份是从多个流域内取水,所以用 n 表示第 i 省可以取水的流域数, P_{ij} 表示 i 省从流域 j 的取水量, R_j 表示 j 流域的水资源开发率,该值来源中国水利部水利信息中心,为 1994-2007 多年观测平均值。 S_j 由式(1) 获得, t_i 表示第 i 个省的水资源需求总量, aw_i 该省农业需水量, t_i 、 aw_i 由所构建的中国社会发展情景预测获得。

i 省内 k 网格农业可用水量 AWG_k 按式(3)式计算:

$$AWG_k = AWP_i \times (IA_k/IA_i) \tag{3}$$

式中: IA_k 表示 k 网格内潜在最大灌溉面积 (为 2000 年调查值,由中国农调总队提供的分县数据计算而得,具体由各县灌溉面积占种植面积的比重计算得出), IA_i 是 i 省全部的灌溉面积。

1.7.2 未来各网格的耕地面积 未来 k 网格耕地面积 A'_k 由该网格所在省的耕地分配系数 q_i 和该网格的现有耕地面积 A_k 共同决定,即:

$$A'_k = (1 - q_i) \times A_k \tag{4}$$

式中: 第 i 省的耕地分配系数 q_i 由式 (5) 获得:

$$q_i = \Delta L_i/A_i \tag{5}$$

ΔL_i 表示第 i 省的耕地减少总量,由所构建的中国社会发展情景预测获得; A_i 表示 i 省的现有的耕地面积。

1.7.3 未来各网格的粮食总产计算 未来 k 网格历年的粮食总 P_k 按式 (6) 计算

$$P_k = Y(\text{rice})_k \times a(\text{rice})_k + Y(\text{wheat})_k \times a(\text{wheat})_k + Y(\text{maize})_k \times a(\text{maize})_k + Y'(\text{wheat})_k \times a'(\text{wheat})_k + Y'(\text{maize})_k \times a'(\text{maize})_k \tag{6}$$

式中: Y , Y' 分别表示作物灌溉和雨养单产, a , a' 分别表示灌溉和雨养播种面积,鉴于实际生产中中国耕作制度复杂多样,本研究中进行了简化处理,对三大作物雨养和灌溉面积按如下假设来计算 (不考虑作物轮作等情况): ① 如果作物模型计算得出的 k 网格的水稻需水量(DWG_k) 大于该网格的农业总供水量 (AWG_k), 则将该网格中水稻面积作为该网格灌溉的最大面积,而灌溉小麦、玉米面积为 0; ② 如果水稻需水量小于农业总供水量, 则除满足目前水稻所需的全部用水外, 其余水量平均分配给小麦和玉米, 并依此计算出

灌溉小麦和玉米的面积；② 将该网格中其余未灌溉的面积平均分配用于种植雨养小麦和玉米。

2 结果和分析

为了去除气候变率对结果的影响，研究中取 1961-1990 (BS) 年的平均值作为基准，2011-2030 (2020s) 的平均值作为未来近期，2031-2050 (2040s) 的平均值为未来中期进行分析。

2.1 气候变化对三大作物单产的影响

未来不同气候情景下三大作物的单产变化如图 2 (a. 不考虑 CO₂ 肥效, b. 考虑 CO₂ 肥效)。如果不考虑 CO₂ 肥效作用(图 2a)，就玉米而言，雨养玉米平均单产较基准情景 BS 有所减产，都表现为 2040s 时段降低幅度更大，大约在 -10%左右，两种情景差异不明显；未来灌溉玉米受到影响明显小于雨养玉米，2020s 时段平均单产变化不大，甚至略有增加，2040s 时段则有所降低，幅度在 -5%以内。对小麦而言，未来两种情景下雨养小麦平均单产较 BS 略有降低，2040s 时段下降幅度更大，但均不超过 -5%，而灌溉小麦 B2 情景下平均单产略有下降，A2 情景下则有所增产，尤其是在 2020s 时段。就水稻单产而言，未来 B2 情景下，表现为单产逐渐降低，在 2040s 时段约减产 10%左右，而 A2 情景则为先增加后降低的趋势，这可能与两种情景不同的 CO₂ 浓度和增温幅度有关。

综上所述，就雨养和灌溉方式相比，小麦、玉米两种作物都表现为雨养方式下单产降低更大，变化幅度更大，说明未来雨养作物产量将会受到更大冲击，而良好的灌溉措施是产量高产稳产的保障之一；当灌溉条件保障后，三种作物相比，未来水稻受到的冲击更大，生产相对更脆弱；从两种情景来看，在 2020s 三大作物单产变化并不明显，但是到 2040s 气候变化的影响将逐渐显露，将可能带来更大的波动。

如果考虑 CO₂ 肥效作用 (图 2b)，未来玉米平均单产变化不大，小麦单产明显增加，尤其是雨养小麦，B2 情景下 2040s 时段单产增幅可达 30%以上，水稻单产也有所增加，尤其是 A2 情景下增产幅度为 5%-10%。

图 2a 和图 2b 相比，可以看出 CO₂ 肥效作用对作物单产的影响是不可忽视的，这种作用在小麦上最明显，最大可达 37%左右，而水稻最大为 15%左右，玉米则 10%左右，三种作物增产幅度的差异，可能与 CO₂ 肥效作用对 C3 作物 (如小麦、水稻) 的效应比 C4 (如玉米) 更大有关^[29, 30]，这种肥效作用对雨养作物影响更明显，这可能与 CO₂ 肥效作用可以提高水分利用效率有关^[30]。

2.2 气候变化、水资源、未来社会经济发展对我国三大作物灌溉面积的影响

未来气候变化、水资源、未来社会经济发展将影响我国三大作物的需水量和农业可用水量，导致未来三大作物灌溉面积发生变化。表 3 中列出未来 2020s、2040s 时段，A2、B2 情景下，我国三大作物灌溉面积的变化。考虑 CO₂ 肥效作用时，B2 情景下未来水稻、灌溉玉米和小麦播种面积都将逐渐减少，2040s 减少更多，三种作物中水稻减少幅度最大，而雨养小麦、玉米的播种面积将有所增加，雨养玉米增幅更大；A2 与 B2 情景波动趋势相似，但波动的幅度更大，A2 情景 2040s 时段水稻播种面积甚至减少 40%，而雨养玉米也增长了 40%多，这可能是由于 A2 情景下，高排放量和快速的人口、经济增长等导致农业可用水量骤减而造成的。

如果不考虑 CO₂ 肥效，A2、B2 情景未来三大作物面积变化与考虑 CO₂ 肥效趋势一致，除了 A2 气候情景下雨养小麦、玉米的播种面积增加幅度减小外，其余波动幅度均有所增加。这可能与一定浓度的 CO₂ 肥效能提高作物水分利用率，降低作物需水量有关。

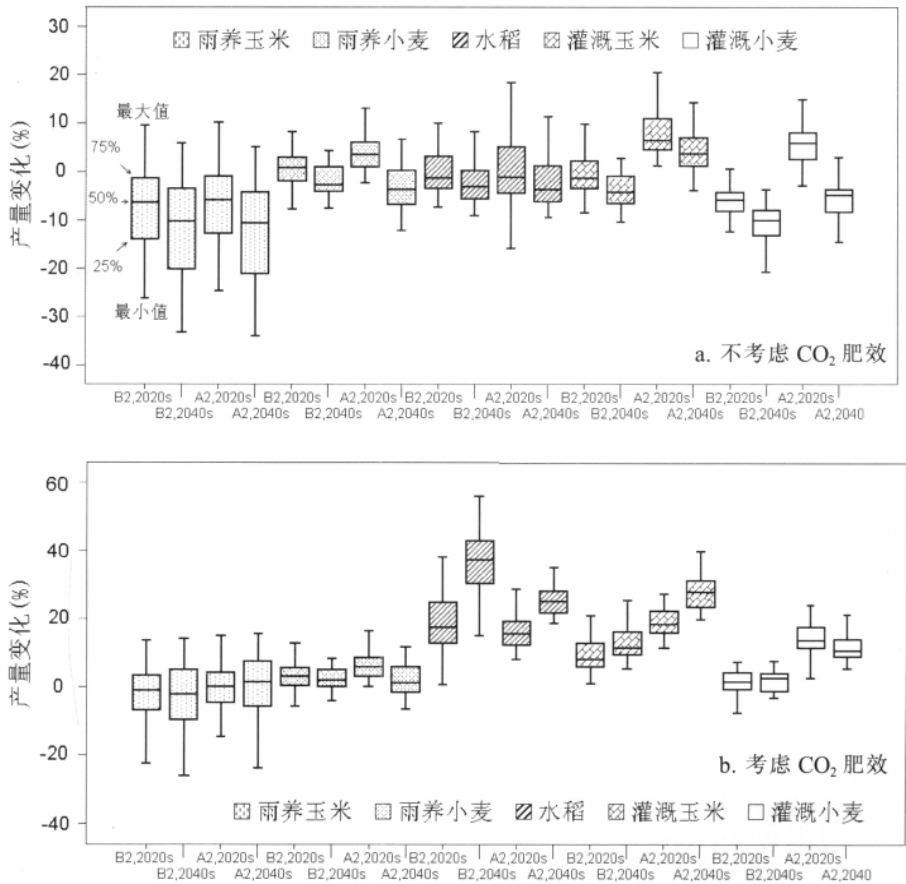


图 2 A2 和 B2 情景下, 不同时段三大作物单产的变化
Fig. 2 Yield change for different periods, under A2 and B2 scenarios

表 3 未来我国三大作物灌溉面积的变化百分比 (与 BS 相比)

Tab. 3 Percentage change of future irrigated area for crops (corresponding to values of BS)											
时段		A2 (中-高排放情景)					B2 (中-低排放情景)				
		水田面积 (%)	灌溉面积 (%)		雨养面积 (%)		水田面积 (%)	灌溉面积 (%)		雨养面积 (%)	
		水稻	小麦	玉米	小麦	玉米	水稻	小麦	玉米	小麦	玉米
考虑	2020s	-27.83	1.87	-4.52	21.83	30.71	-3.33	-3.08	-6.06	1.20	3.26
CO ₂ 肥效	2040s	-37.32	-2.98	-11.38	31.49	42.97	-13.79	-10.19	-10.16	9.95	12.73
不考虑	2020s	-30.25	-6.34	-12.68	11.21	19.03	-8.00	-6.99	-12.92	9.11	12.78
CO ₂ 肥效	2040s	-41.40	-17.75	-26.03	10.24	23.41	-19.64	-15.87	-19.00	16.58	21.87

2.3 气候变化、水资源、社会经济发展对粮食总产的综合影响

未来气候变化、水资源、社会经济发展对粮食总产量的综合影响见图 3。图 3a 为考虑 CO₂ 肥效作用时, 未来三大作物总产量的变化情况。三大作物的粮食产量 2000 年 (数据来源于 FAO) 与模拟的 BS (1960-1990 年) 的平均产量相差不大, 说明模型模拟效果较好, 模拟结果与实际差异不明显。如果只考虑气候变化的影响, 未来三大作物粮食总产比 BS 明显增加, 水稻增产幅度为 23%~38% 之间, 小麦 8%~25%, 玉米则略有减产; 两种情景相比 A2 情景波动更大, 可见未来气候变化, 温度升高改善热量条件, CO₂ 浓度增加提高光合效率, 从而有利于作物生长发育, 提高粮食产量。三种作物增产的差异则说明 CO₂ 肥效作用对 C3 作物影响更大, 这与人研究结果相似^[29, 30]。如果在气候变化的同

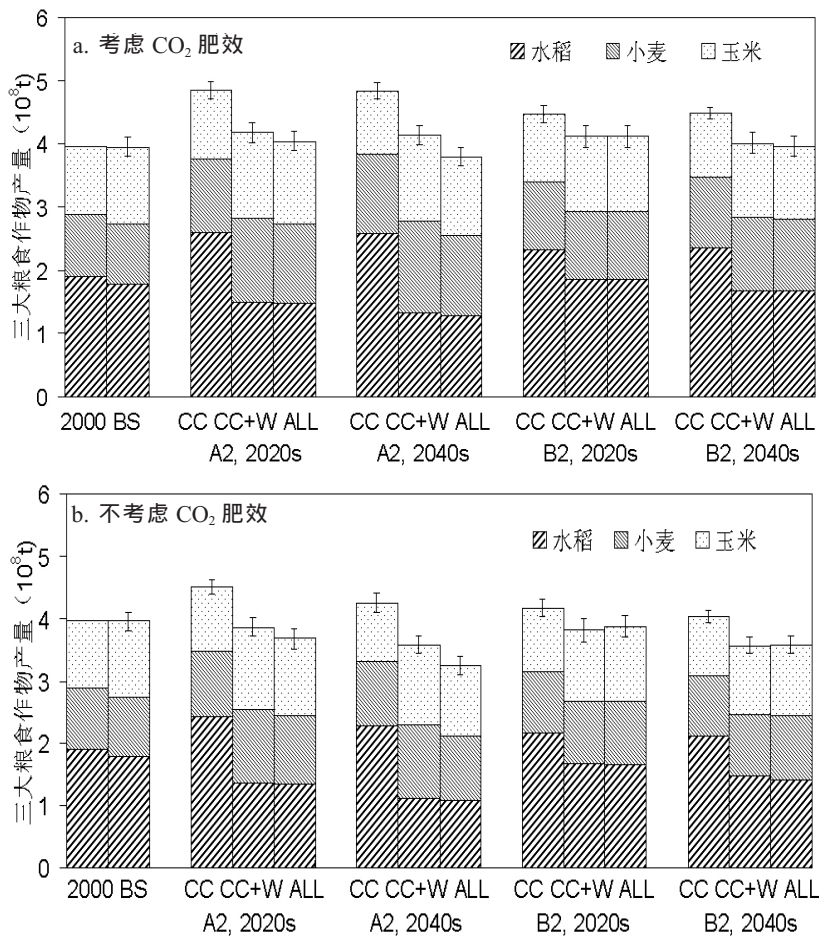


图 3 未来气候变化、水资源、社会经济发展对三大作物粮食总产量的综合影响 (CC: 表示考虑气候变化影响; CC + W: 表示考虑气候变化和水资源共同影响; ALL: 表示考虑了气候变化、水资源、土地利用的综合影响)

Fig. 3 The integrated impacts of climate change, water availability, and socio-economic development on cereals production (CC: climate change; CC + W: climate change and water availability; ALL: climate change, water availability and land use change)

时，又考虑未来水资源的变化，与单考虑气候变化的影响相比，三大粮食作物总产增加幅度明显降低，约降低 8%~15% 左右，但仍高于 BS。可见，未来水资源的变化将抵消气候变化带来的热量条件和高 CO₂ 的益处，未来水资源短缺对产量影响作用是不可忽视的，在某些地区(华北、西北等) 可能成为粮食生产的限制因素。受水资源的影响，水稻产量表现出不同程度的减产：B2 2020s (-2%) < B2 2040s (-11%) < A2 2020s (-21%) < A2 2040s (-30%)，这种减产将会影响我国居民对大米的消费等；小麦和玉米则表现出不同程度增产，小麦增加幅度更明显些，最大 A2 情景的 2040s 平均增加了 45%。这种变化主要是由于水资源不足后，水稻面积缩减，更多的耕地改为玉米、小麦的雨养种植造成的。两种气候情景相比，A2 情景下水稻产量降低更大，小麦玉米增加也更明显，说明在 A2 方案下未来发展状况水资源矛盾将更激烈，因此坚持可持续发展是非常必要的。

与考虑气候和水资源变化的结果相比，当增加土地利用变化因素，未来各情景的三大作物总产将进一步降低，但产量变化幅度明显小于由水资源引起的变化幅度，说明土地利用的因素对未来粮食产量的影响要小于水资源的影响，未来部分地区粮食生产的限

制因素可能是水,这与前人的研究结果相似^[10]。

图 3b 是不考虑 CO₂ 肥效的结果,不同情景和不同因素对三大作物产量的影响,与考虑 CO₂ 肥效相比,具有相似的趋势,但产量的变化幅度上有所差异:如果只考虑气候变化的影响,尽管未来三大作物粮食总产仍高于 BS 水平,但总产及各作物产量变化幅度将明显小于考虑肥效的情况,如果再进一步考虑水资源及土地利用的因素,与图 3a 相比,三大作物总产下降明显,已低于 BS 水平,可见 CO₂ 肥效作用对作物产量是不可忽视的,有利于帮助缓解未来气候变化的不利影响,以及提高水分利用效率,从而提高作物产量,这种作用在本研究中最大可达 11% 左右,因此今后有必要加大 CO₂ 肥效作用的研究,以更好适应未来变化。

3 结论和讨论

本研究利用模拟的方式,根据中国社会发展的规划,尝试将气候变化模型、水资源模型、未来社会经济发展情景与作物模型相接合,以综合地评估和分析未来中国三大粮食作物生产状况,结果表明:

(1) 气候变化将影响未来三大作物单产,如果不考虑 CO₂ 肥效作用,小麦、玉米两种作物都表现为雨养方式下单产量降低更大,未来雨养作物单产将会受到更大冲击;当灌溉条件保障后,三种作物而言,未来水稻受到的冲击更大,单产降低更多,尤其是 A2 情景。如果考虑 CO₂ 肥效作用,未来玉米平均单产变化不大,小麦单产明显增加,尤其是雨养小麦,水稻单产也有所增加。

(2) 未来气候变化、水资源、社会经济发展将导致未来三大作物灌溉面积略有变化,水稻、灌溉玉米和小麦的播种面积都将减少,其中水稻减少幅度最大,其次是灌溉玉米,而雨养小麦和玉米的播种面积将有所增加,其中雨养玉米增加更大。

(3) 未来气候变化、CO₂ 肥效、水资源、土地利用的影响中,气候变化和 CO₂ 肥效作用可以使作物产量增加,而水资源对作物产量的影响最为不利,致使三大作物粮食总产量将明显降低,成为未来粮食生产的限制因素,尤其是水稻生产;而土地利用对产量的影响较小。未来各情景下水稻产量受到冲击最大,表现不同程度的减产,最大可达 -30% 以上,小麦和玉米则表现为不同程度的增产;B2 情景较高排放量的 A2 情景变化幅度小。

参考文献 (References)

- [1] Wang Futang. Climate change and Chinese food production. *Chinese Rural Economy*, 1996, (11): 19-23. [王馥棠. 气候变化与我国的粮食生产. *中国农村经济*, 1996, (11): 19-23.]
- [2] Xiong W, Matthew R, Holman I et al. Modelling China's potential maize production at regional scale under climate change. *Climatic Change*, 2007, 85 (3/4): 433-451.
- [3] Xiong W, Lin E D, Ju H et al. Climate change and critical thresholds in China's food security. *Climatic Change*, 2007, 81(2): 205-221.
- [4] Yao F M, Xu Y L, Lin E D et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 395-409.
- [5] Lin E D, Xiong W, Ju H et al. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360: 2149-2154.
- [6] Wang Zheng, Zheng Yiping. Impacts of global change on China's food security. *Geographical Research*, 2001, 20(3): 282-289. [王铮, 郑一萍. 全球变化对中国粮食安全的影响分析. *地理研究*, 2001, 20(3): 282-289.]
- [7] Cai Chengzhi. *Cropping System and Food Security*. Beijing: China Agricultural Press, 2006. [蔡承智. 农作制与粮食安全. 北京: 中国农业出版社, 2006.]
- [8] Parry M, Rosenzweig C, Livermore M. Climate change, global food supply and risk of hunger. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series B*, 2005, 360: 2125-2138.
- [9] Fischer G, Shah M, Tubiello F N et al. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: An integrated

- assessment, 1990-2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series B*, 2005, 360: 2061-2083.
- [10] Rosenzweig C, Strzepek K M, Major D C et al. Water resources for agriculture in a changing climate: International case studies. *Global Environmental Change*, 2004, 14: 345-360.
- [11] Barry S, Cai Y. Climate change and agriculture in China. *Global Environment Change*, 1996, 6: 205-214.
- [12] Nakicenovic N, Swart R. *Special Report on Emission Scenarios*. London: Cambridge University Press, 2000.
- [13] Cholaw B, Cubasch U, Lin Y H et al. The change of North China climate in transient simulation using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios with a coupled atmosphere-ocean General Circulation Model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 755-766.
- [14] Cholaw B. Simulation of the future change of East Asian monsoon climate using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(10): 1024-1030.
- [15] Jones R G, Noguer M, Hassell D C et al. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*, 2004, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2001: 35.
- [16] Xu Y L. Setting up PRECIS over China to develop regional SRES climate change scenarios//*Proceedings of the International Workshop: Prediction of Food Production Variation in East Asia under Global Warming*, Tsukuba, Japan, 2004: 17-21.
- [17] Gaffin S R, Rosenzweig C, Xing X S et al. Downscaling and geo-spatial gridding of socio-economic projections from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES). *Global Environment Change*, 2004, 14: 105-123.
- [18] Ritchie J T, Baer B D, Chou T Y. Effect of global climate change on agriculture Great Lakes Region//Smith J B, Tirpak D A. *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States: Appendix C-Agriculture*. Washington DC: US EPA, 1989: 1-25.
- [19] John H, Retchie J T. *Modeling Plant and Soil Systems*. Wisconsin, USA: Madison, 1991.
- [20] Ritchie J T, Singh U, Godwin D C et al. Cereal growth, development and yield//Gordon Y T, Gerrit H, Philip K T// *Understanding Options for Agricultural Production*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998: 79-98.
- [21] Xiong W, Holman I, Conway D et al. A crop model cross calibration for use in climate impacts studies. *Ecological Modelling*, 2008, 213: 365-380.
- [22] Xiong W, Conway D, Holman I et al. Evaluation of CERES-Wheat simulation of wheat production in China. *Agronomy Journal*, 2008, 100(6): 1720-1728.
- [23] Wood E F, Lettenmaier D P, Zartarian V G. A Land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D3): 2717-2728.
- [24] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal Geophysical Research*, 1994, 99(D3): 14415-14428.
- [25] Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global Planet Change*, 1996, 13(1): 195-206.
- [26] Liang X, Xie Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9/10): 1173-1193.
- [27] Liang X, Xie Z. Important factors in land-atmosphere interactions: Surface runoff generations and interactions between surface and groundwater. *Global and Planetary Change*, 2003, 38(1): 101-114.
- [28] Su F, Xie Z H. A model for assessing effects of climate change on runoff in China. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(9): 701-707.
- [29] Wechsung F, Garcia R L, Wall G W et al. Photosynthesis and conductance of spring wheat ears: Field response to free-air CO₂ enrichment and limitations in water and nitrogen supply. *Plant Cell Environment*, 2000, 23: 917-929.
- [30] Bai Liping, Lin Erda. The effects of CO₂ concentration enrichment and climate change on the agriculture. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(2): 132-134. [白莉萍, 林而达. CO₂ 浓度升高与气候变化对农业的影响研究进展. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 132-134.]

An Integrated Analysis of Impact Factors in Determining China's Future Grain Production

XIONG Wei^{1,2}, LIN Erda^{1,2}, JIANG Jinhe³, LI Yan⁴, XU Yinlong^{1,2}

(1. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *The Key Laboratory for Agro-environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;*

3. *Institute of Quantitative and Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China;*

4. *Water Resources Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)*

Abstract: An integrated simulation framework was introduced to assess China's future cereal production. The integrated framework includes simulations of climate change, water availability, crop yield and socio-economic characteristics, and their interactions on future cereal productions. The simulations are based on a reasonable socio-economic scenario which is consistent with China's mid- and long-term national development plan. Results demonstrate (1) Climate change will affect cereal yield. Excluding CO₂ fertilization effects, yield drops for all cereal crops, with remarkable increases in both instability of production and possibility of lower yield. Irrigation partially offsets the damages caused by climate change. The biggest yield decrease occurs for rice with A2. Including the CO₂ fertilization effects, yield increases for most crops, particularly for rainfed wheat, and rice, a small promotion occurs for maize. (2) Cereal's water demand will change in future, along with anticipated irrigation water supply. Interactions of climate change, water availability and socio-economic development result in an unmatched change between water demand and supply. These consequently induce obvious decreases in sown area of irrigated crops or increases in rainfed crops. (3) Interactions of climate change, CO₂ effects, water availability and land use change on crop production are complicated, which highly depend on the scenarios and expected periods. The biggest harmful attribution comes from water availability, least from land use change, while the combination of climate change and CO₂ may increase crop production. Regarding specific crop, production decreases for rice, but increases for wheat and maize.

Key words: climate change; water availability; food production; integrated assessment; China