

多模式气候预估对华北冬小麦产量模拟的不确定性分析

杨 绚¹, 汤 绪², 陈葆德³, 谭 燕³, 田 展⁴

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044; 2. 上海市气象局, 上海 200030;

3. 上海市台风所, 上海 200030; 4. 上海市气候中心, 上海 200030)

摘 要:基于CMIP5的多模式气候预估资料,应用集合方法,评估了未来中国华北地区冬小麦产量受气候变化影响的不确定性,并给出未来中国华北冬小麦增产或减产可能的概率。利用CMIP5的15个全球气候模式2006-2030年4种排放情景的54组逐日气候预估结果,运用CERES-Wheat模型模拟了未来华北地区冬小麦的产量。结果表明,气温的预估结果较好,降水量和太阳辐射的气候预估的不确定性较大。河北、山东和河南的3个代表点小麦产量的模拟集合表明,未来冬小麦产量年际波动较大,以弱增产的概率为主,但是随气候变化的冬小麦产量的低产概率明显上升。最后本文还给出了2011-2030年间华北地区冬小麦产量不同等级的概率分布。

关 键 词:概率分布;不确定性;冬小麦;CMIP5模式评估;华北

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.015

1 引言

基于集合数值预报技术的概率预报与应用是天气气候预报与服务最重要的技术手段。集合预报的结果是通过多模式或单模式控制参数变化得到的(Collins, 2007)。相较于确定性预报,集合预报能够通过模式初值的扰动以及不同物理过程参数化方案的组合,产生一组预报值并借此描述数值预报的不确定性(Lewis, 2005; Semenov et al, 2010)。集合方法最显著的特点就是不再以确定性的形式给出模拟结果,取而代之的是一个预估的置信区间或概率形式。

集合技术不仅仅应用于天气预报,近些年许多学者开始尝试把它应用于到受天气影响较大的领域,例如把天气预报的集合信息转换为天气条件对航空飞行影响的概率预报(Matthias et al, 2010)。同样,农业产量对气候变化也非常敏感,是受气候变化影响最大的行业之一(Wang et al, 2009),国内外围绕气候变化对农业产量影响的研究也已展开,其模拟评估通常基于耦合了作物生长机理模型的气

候模式(Parry et al, 2004)。

由于目前对于气候系统的认识有限,气候变化预估结果给出的只是一种可能的变化趋势和方向,加之农作物生长过程以及对气候变化响应机理的复杂性,气候变化对农业影响评价中尚包含有相当大的不确定性(Challinor et al, 2009; Lobell et al, 2008; Masutomi et al, 2009)。其中的不确定性既包括气候变化情景的不确定性,也包括农业评价模型的不确定性以及气候情景与农业模型耦合的不确定性(姚凤梅等, 2011)。考虑到气候变化预估结果的不确定性,可用集合方法来描述一个未来气候预估可能的范围。已有研究多利用IPCC(2007)第四次报告中的多模式对未来气候预估结果,构造出多模拟集合的概率预估,借此表达气候变化对农业影响的不确定性,并最终评价气候变化对农业的影响(Hansen et al, 2006; Tao et al, 2009; Tebaldi et al, 2008)。最近,国际耦合模式比较计划(CMIP5)使用温室气体的稳定情景,即典型浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)为IPCC第五次评估报告(AR5)组织了气候模拟和预估试验,这种

收稿日期:2012-09; 修订日期:2013-01.

基金项目:国家自然科学基金项目(40921140410);上海市科委项目(10231203700);上海市气象局科研项目(YJ201204);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12_0495)。

作者简介:杨绚(1985-),女,博士研究生,主要研究方向为气候变化及其影响。E-mail: yx_221@126.com

建模关注了人口和经济的增长、技术的演变以及政府政策与社会机构等其它因素,从而将人类减缓气候变化的反馈考虑进来(Moss et al, 2010)。

气候变化对中国农业产量的影响一直受到学术界和政府部门的广泛关注,许多学者已开展气候变化对中国冬小麦生产影响研究,并取得了很多有意义的进展:在不考虑CO₂肥效的情况下,未来冬小麦减产的可能性较大(Piao et al, 2010; 熊伟等, 2010; Ye et al, 2012)。也有研究表明,在考虑CO₂肥效的作用下,小麦的产量在 2050 年相对于 1961-1990 年平均产量将增加 13%~20%。由于CO₂的排放量级对农作物产量的影响仍然有争议,这也是其预估结果有很大不确定性的原因之一(Xiong et al, 2008, 2009, 2010)。就区域而言,中国各地区小麦产量受气候变化的影响不尽相同:气温上升和降水量的增加对中国东北、华北以及西北部省份的粮食产量提升有利,对其他省区则会产生小幅负面影响(黄维等, 2010)。同时,熊伟等(2005)利用区域气候模式模拟未来 2 种温室气体排放方案(A2 和 B2)与 CERES-WHEAT 模式耦合,指出气候变化情景下中国小麦产量的年际波动和变率明显加大,产量的年际变幅会显著增加。同时,由于气候模式预估能力非常大的不确定性直接导致了对未来农作物产量变化的不确定性(Chavas et al, 2009)。因此,气候变暖对中国冬小麦产量潜在影响到底有多大仍有很大的不确定性。

为定量描述这些不确定性,将集合方法应用于气候变暖对华北地区冬小麦产量的影响研究中,这种基于集合方法的概率预估不仅提供了未来冬小麦产量可能的范围,还直观的给出未来冬小麦发生增产或减产可能的概率。本研究利用 CMIP5 中 4 种排放情景下的 54 组气候预估结果,模拟 2011-2030 年华北冬小麦的产量,并对华北冬小麦产量受气候变化的影响进行概率预估。

2 数据与方法

2.1 研究区域

小麦是中国重要的粮食作物之一,在整个小麦生产中,冬小麦产量约占总产的 90%,其中华北地区是中国最主要的冬小麦产区,实际种植面积和产量均占全国小麦比例的 50% 以上(张宇等, 2000)。本文研究区域是华北地区(32°~42°N, 110°~120°E),空间分辨率为 1°×1°的 131 个格点(图 1)。并取 3 个代表点,分别位于河北省(39.5°N, 115.5°E)、山东省(36.5°N, 117.5°E)和河南省(34.5°N, 113.5°E)着重分析其未来冬小麦产量预估的不确定性。

2.2 资料和方法

首先选用普林斯顿大学开发的经过全球修订和降尺度的气象强迫资料(Bias-Corrected and Downscaled Future Climate Global Meteorological Forcing Data, 简称 BCD)(Li et al, 2010; Sheffield et

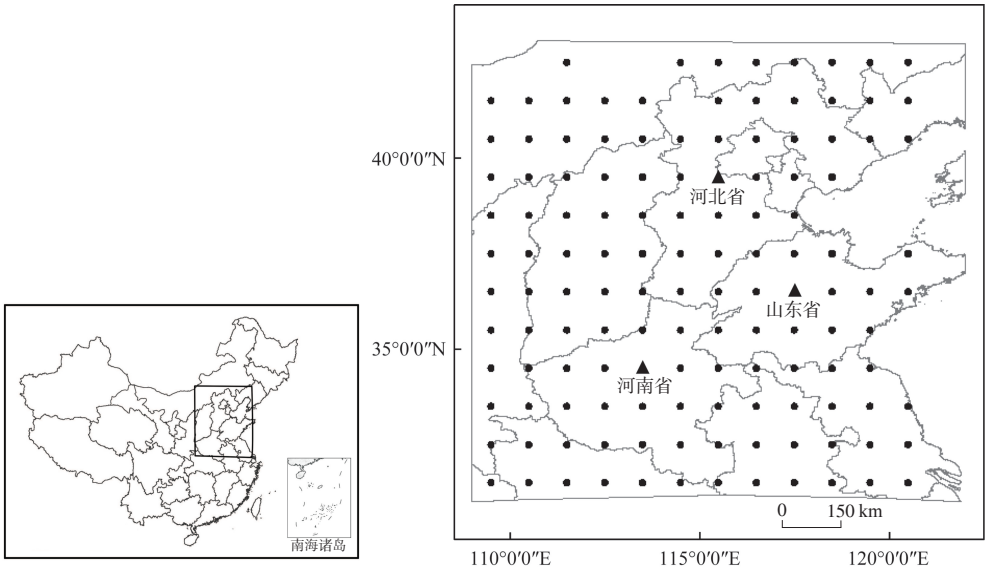


图 1 研究区域以及代表点(三角)

Fig. 1 Study area and location of the trial sites (triangle)

al, 2006)。该资料由全球气候模式NCAR-PCM1模拟得到,其中1948-2000年的历史资料采用20C3M情景,2001-2099年采用SRES A2,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,时间分辨率为3小时。从中选取1979-2030年逐日最高气温、最低气温、降水量和太阳辐射资料。同时,选取NCEP/DOE(National Center for Atmospheric Research/National Energy Research Supercomputing Center of the Department of Energy)再分析II资料(Kanamitsu et al, 2002);1979-2010年逐日最高气温、最低气温、降水量、短波辐射资料代表较为可靠的气象资料作为基准值(baseline),该资料空间分辨率为全球 192×94 个格点的高斯网格,为了方便比较,将其插值到 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的等距网格上。

CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project)使用“典型浓度路径”的辐射强迫情景(van Vuuren et al, 2011),包括4种辐射强迫浓度排放途径(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.0)(Taylor et al, 2012)。本文根据CMIP5中的15个全球大气海洋耦合模式在4种辐射强迫浓度排放情景下的54组逐日气候预估结果(表1)(http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_getting_started.html),分别取2006-2030年间逐日最高气温、最低气温、降水量和太阳辐射值。由于15个模式的空间分辨率不同,文中对所选用的变量均采用反距离权重插值的方法,统一插

值到 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的网格上。观测资料采用了中国气象局1981-1999年华北地区3个站的观测小麦产量和成熟日期。

本文运用CERES-Wheat模型模拟华北地区灌溉小麦的产量。该模型需要输入每个格点的参数,包括栽培品种、管理措施、土壤参数和逐日气象资料(Jones et al, 2003; Bannayan et al, 2003)。参考Tian等(2012)的工作,将华北地区划分为19个生态及土壤区,采用不同的冬小麦品种和土壤参数对中国冬小麦产量进行模拟。

3 结果与分析

3.1 资料评估

3.1.1 BCD 资料评估

将NCEP/DOE再分析II资料作为基准值(baseline),首先对BCD资料进行评估。图2给出了BCD资料与NECP再分析II资料1979-2010年平均逐日太阳辐射、最高气温、最低气温和降水量的差。

2套资料的4个物理量在华北地区差异较大的区域主要位于华北中部,而华南北部和北部地区差异较小。其中,就日平均太阳辐射量来看,BCD资料在华北中部地区比NCEP再分析资料偏高 2 MJm^{-2} 左右;日平均最高气温和最低气温BCD资料

表1 CMIP5 中 15 个气候模式的基本信息
Tab. 1 Basic information of selected climate models from CMIP5

模式名称	国家	分辨率	排放情景			
			RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
BCC-CSM1.1	中国	126×64	1	1	1	1
BNU-ESM	中国	126×64	1	1		1
CanESM2	加拿大	126×64	1	1		1
GFDL-CM3	美国	144×90	1		1	1
GFDL-ESM2G	美国	144×90	1	1	1	1
GFDL-ESM2M	美国	144×90	1	1	1	1
INM-CM4	俄罗斯	180×120		1		1
IPSL-CM5A-LR	法国	96×96	1	1	1	1
IPSL-CM5A-MR	法国	144×143	1	1	1	1
MIROC5	日本	256×128	1	1	1	1
MIROC-ESM-CHEM	日本	128×64	1	1	1	1
CSIRO-Mk3.6.0	澳大利亚	192×96	1	1	1	1
MPI-ESM-LR	德国	192×96	1	1		1
MRI-CGCM3	日本	320×160	1	1	1	1
NorESM1-M	挪威	144×96	1	1	1	1

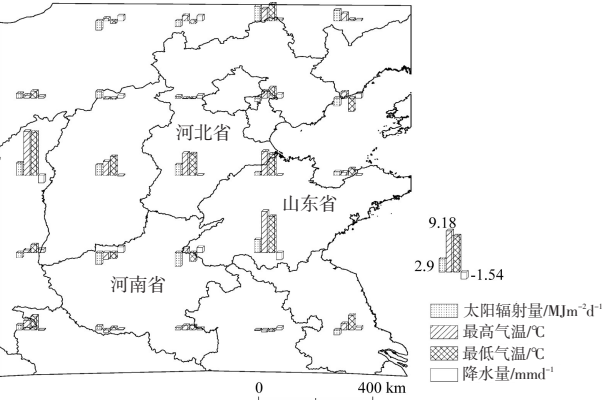


图2 1979-2010年BCD资料与NECP再分析资料平均日太阳辐射量、最高气温、最低气温和降水量之差

Fig. 2 Difference between the BCD data and the NECP reanalyze data of solar radiation, maximum temperature, minimum temperature and precipitation during 1979-2010

在华北中部地区比NCEP再分析资料普遍偏高4℃以上;从降水量来看,BCD资料比NCEP再分析资料的日平均降水量普遍偏多0.5 mm左右。

3.1.2 BCD资料模拟冬小麦产量的适用性检验

用BCD资料驱动CERES-Wheat模型对华北区冬小麦产量作初步的模拟,并与田间观测站点的冬小麦产量和成熟日期对比以进行适用性检验。采用的观测资料分别为1990-1999年河北定县(38.5°N, 115°E)、1981-1999年河南驻马店(33.5°N, 114°E)和1981-1990年山东泰安(36.2°N, 117.2°E)。

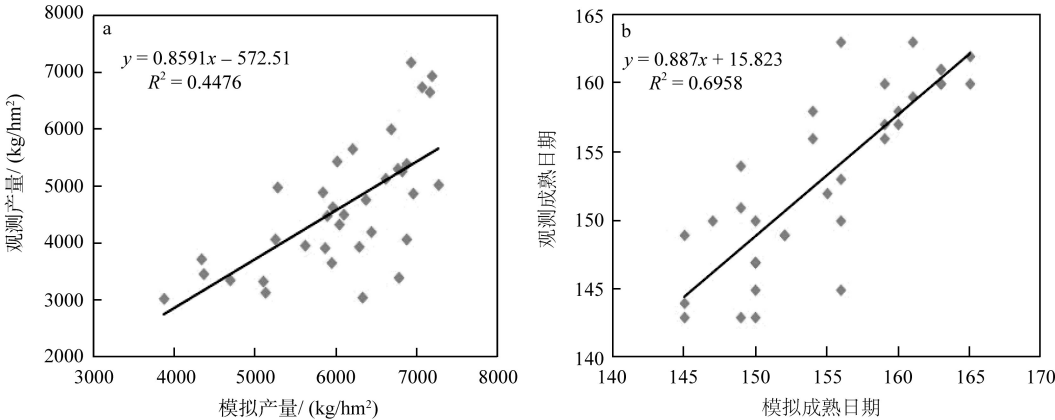
图3给出BCD资料模拟的冬小麦产量和成熟日期与实测的对比。模拟的小麦产量与实测值有一定的偏差,模拟产量比实测产量平均高1000 kg/ha左右,但两者总体的相关系数为0.67(通过0.05信度的

显著性检验);模拟的小麦成熟期与实测值相关性较好,相关系数为0.83(通过0.01信度的显著性检验)。总体来看,BCD资料与作物模型的连接模拟效果较好,在模拟未来冬小麦产量时是适用的。

3.1.3 多模式预估的集合评估

泰勒图(Taylor Diagram)(Taylor, 2001)是近来被广泛采用的应用于模式预报能力评估和检验的方法,相关系数、均方根偏差和标准差都可以在一张二维图上以“点”体现。在一张泰勒图上,可以将多个模式的相关信息集中表示,全面清晰地反映多个模式的模拟能力。相关系数表示模式模拟与观测值的相似性,标准差的比值反映了整个空间模式模拟能力与观测值之间的离散程度。

运用泰勒图评估CMIP5的54组预估结果。取华北地区2006-2010年54组最高、最低气温、降水量和太阳辐射的预估结果与NCEP/DOE再分析II资料进行评估。分别计算了两者的相关系数和标准差,图4给出54组预估资料与NCEP/DOE再分析II资料的泰勒图,4种排放情景用4种颜色表示。可以看到,华北地区日最高、最低气温预估结果较好,与NCEP气温资料的相关系数达到0.95左右,最低气温与NCEP气温资料的相关系数达到0.99左右,并且从各模式的标准差的分布来看,落区基本在1附近。而降水量和太阳辐射的模拟值相对不确定性较大,尤其是太阳辐射的预估值。降水量的预估值与NCEP再分析资料的相关系数在0.85左右,但各模式的空间离散度不大。太阳辐射的预估值与NCEP再分析资料的相关系数在0.6~0.9之间,各模式之间的标准差差别较大,不确定性大。与NCEP



注:成熟日期为自1月1日开始计算的日序数

图3 模拟和实测小麦产量(a)和成熟期(b)对比

Fig. 3 Simulated vs. observed yield(a) and maturity date(b) in stations

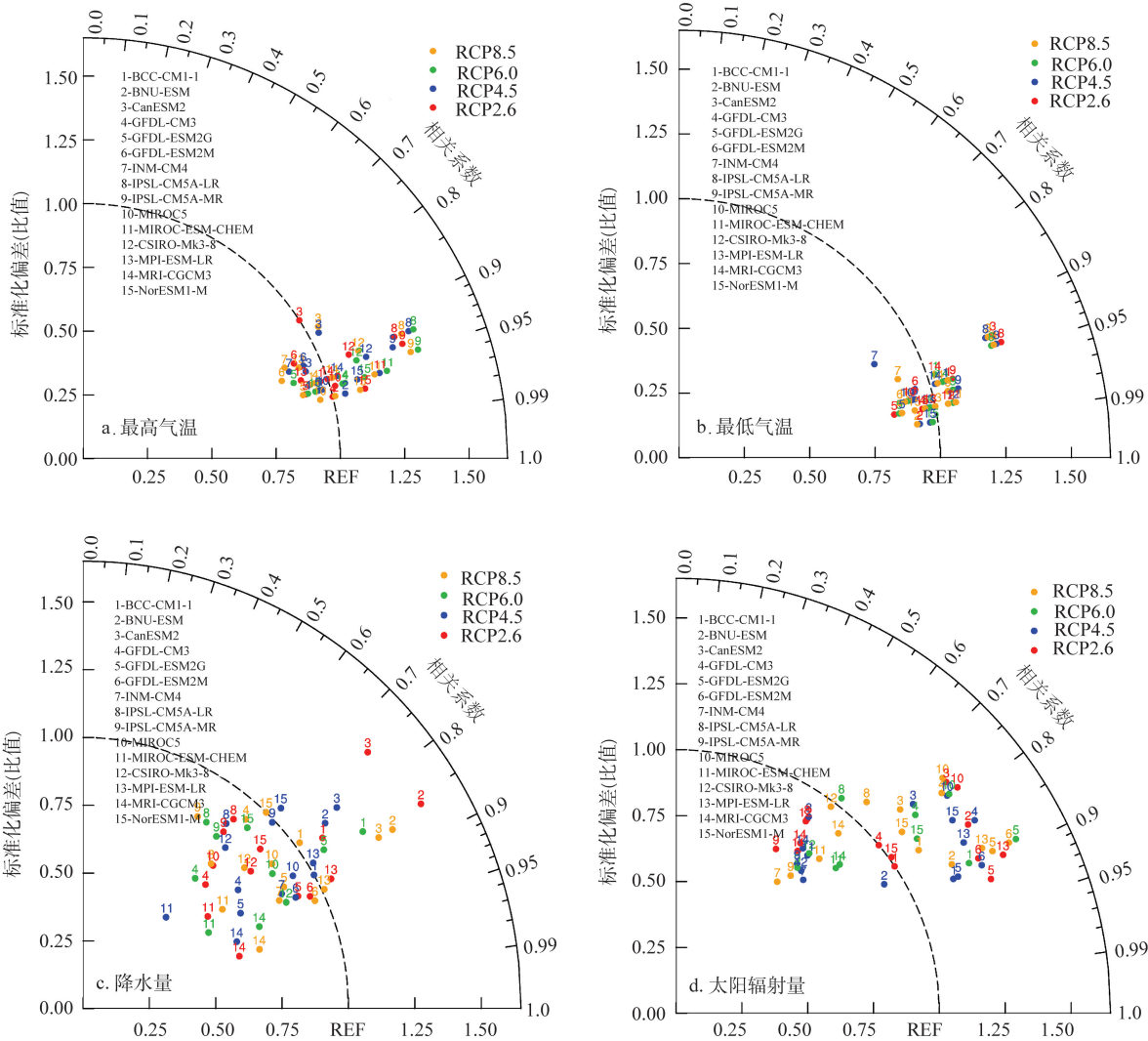


图4 2006-2010年平均多模式预估值与NCEP/DOE再分析II资料对比的泰勒图
(a. 最高气温; b. 最低气温; c. 降水量; d. 太阳辐射量)

Fig. 4 Taylor diagram of the projection from multi-model ensemble against NCEP/DOE output from the average of 2006 to 2010
(a. maximum temperature; b. minimum temperature; c. precipitation; d. solar radiation)

的标准差分布较分散,即离散度较大。

3.2 冬小麦产量集合模拟结果

分别讨论华北主产区3个代表点的冬小麦产量预估的集合结果,图5为54组气候模式预估资料在灌溉条件下模拟得到的2011-2030年冬小麦产量可能的范围。

从54组集合成员来看,河北代表点(39.5°N, 115.5°E)(图5a)在未来20年冬小麦产量主要集中在7000 kg/hm²,产量范围在5000~9000 kg/hm²,集合平均和BCD模拟得到的小麦产量值较接近,集合平均与中位数基本重合,表明集合成员之间大致呈正态分布。山东代表点(36.5°N, 117.5°E)(图5b)

冬小麦产量的集合平均在8000 kg/hm²左右,产量范围在6000~10000 kg/hm²之间,集合冬小麦产量的波动特征与河北代表点相似,有个别年份的BCD模拟得到的小麦产量要高于集合平均值。河南代表点(34.5°N, 113.5°E)(图5c)冬小麦产量的集合平均在6000 kg/hm²左右波动,产量范围为4000~8000 kg/hm²,较河北和山东代表点低。此外,河南代表点的冬小麦产量离散度较大,有个别年份的中位线与集合平均并不重合,中位线普遍比集合平均值大,这表明存在一些极端低值。

总的来看,在未来20年,3个代表点的小麦产量没有一个明显的增产或者减产的趋势,但年际波

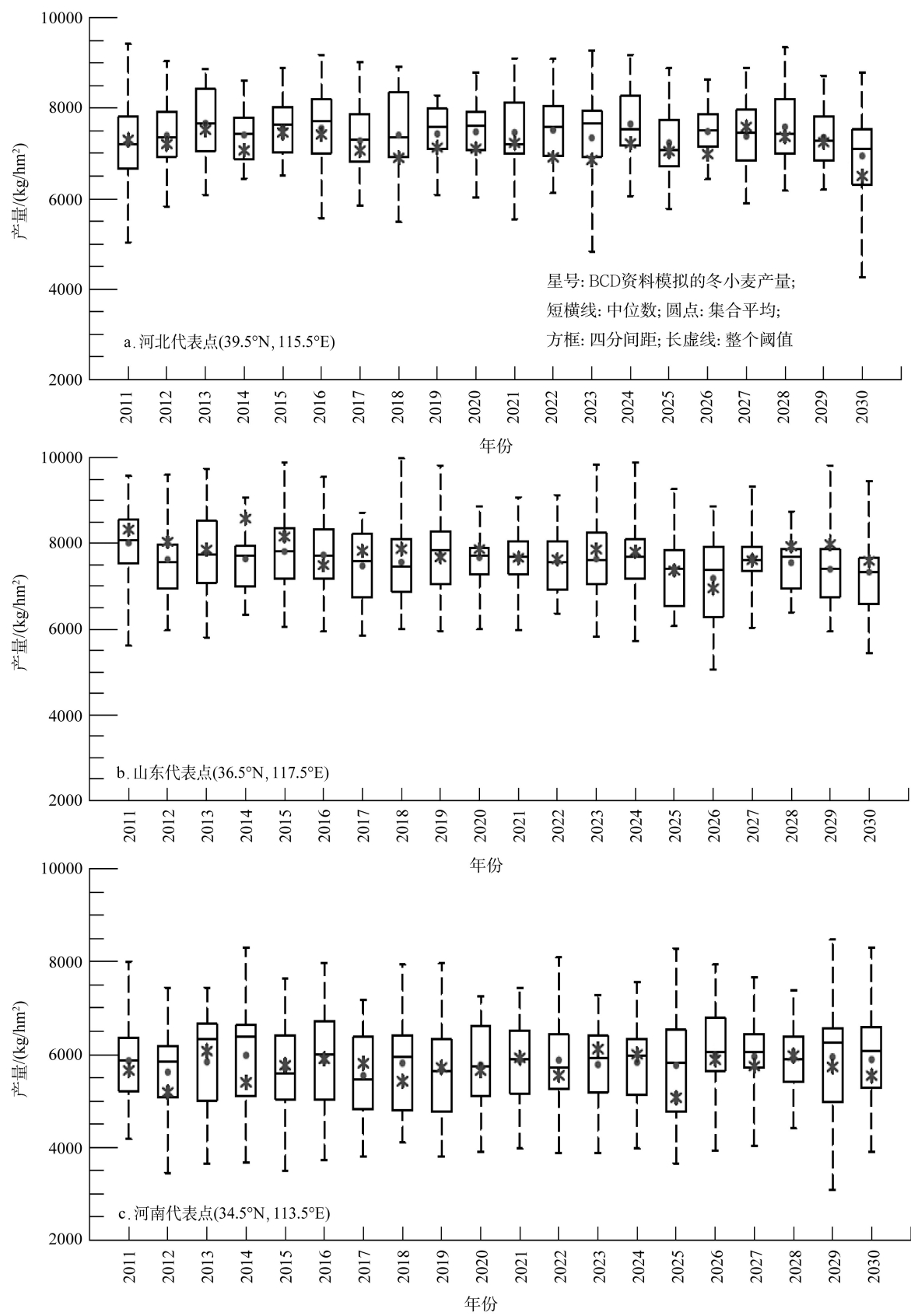


图5 集成员模拟的2011-2030年各代表点(a.河北;b.山东;c.河南)冬小麦产量范围

Fig. 5 The plot of the boxes and whiskers in the range of the simulated wheat yield during 2011-2030 at the trial sites (a. Hebei; b.Shandong; c. Henan)

动还是比较大的。这表明气候变化使上述地区冬小麦的产量在年际尺度上并不稳定,这很可能与未来极端气候事件频发有关。

3.3 代表点冬小麦产量的概率分布

概率密度可以帮助我们直观的看到模拟预估的分布情况。通过分析 54 组集合成员对于 3 个代表点在 2011-2030 年的冬小麦模拟的产量相对于 NCEP/DOE 再分析资料模拟的 1979-2010 年冬小麦平均产量 (BASELINE) 的概率分布, 主要对 2011-2020 年和 2021-2030 年的概率平均进行对比分析, 深入探讨冬小麦在年代际尺度上受气候变化影响的特征, 以及未来该地区冬小麦相对于 BASELINE 发生增产或者减产的可能性。

图 6 分别给出了河北(图 6a)、山东(图 6b)和河南(图 6c)代表点 54 组集合成员模拟的 2011-2020 年和 2021-2030 年平均冬小麦产量相对于各格点历史平均产量的概率分布。总的来看, 54 组集合成员模拟的未来 20 年 3 个代表点的冬小麦产量相对于 BASELINE 的概率落区均主要集中在 0%-10% 之间, 这表明未来 20 年这 3 个代表点的冬小麦产量以弱的增产为主, 增产不超过 10%。其中山东代表点的概率分布最集中, 离散度较小, 而河南代表点的概率分布较分散, 离散度较大, 这也与上一节的结论一致。但值得注意的是, 比较 2011-2020 年与 2021-2030 的概率分布可以明显的看出, 后者低产的可能性明显比前者要大, 并且这种特征在 3 个代表点均有表现。这充分表明了在未来华北地区冬小麦的低产概率上升, 受气候变暖的影响冬小麦产量的稳定性受到威胁。

将这种概率预估方法应用于气候变化对中国冬小麦产量影响预估, 不仅可以给出一个冬小麦产量的范围, 还能更直观的给出未来冬小麦产量相对于历史平均值增产或减产的概率, 并且给出其增产或减产可能性最大的百分数。这对于研究气候变化对农作物产量影响, 在评估方法上是一种新的尝试。

3.4 华北地区冬小麦产量的概率分布

图 7 给出了整个华北地区 2011-2030 年期间灌溉冬小麦产量分别高于 2000、4000、6000、8000 和 10000 kg/hm² 的概率分布, 这对把握未来冬小麦产量变化有一定的指导意义, 并为制定应对气候变化策略提供了科学依据。

在灌溉条件下, 华北地区除了西北小部分地区以外, 冬小麦的产量大于 2000 kg/hm² 的概率均为 90% 以上; 冬小麦预产量大于 4000 kg/hm², 并且概率均大于 70% 以上的地区主要位于华北中部及南部地区; 而预产量大于 6000 kg/hm² 并概率在 70% 以上的地区主要位于华北东南部和黄淮北部地区, 主要以山东, 江苏和安徽东部地区为主; 而冬小麦产量大于 8000 kg/hm² 概率达 70% 以上的只有长江下游的小部分地区。

4 结论与讨论

本文用最新的 CMIP5 预估资料, 用集合方法讨论了气候变化对中国冬小麦产量的影响, 阐述了气候变化情景下中国未来冬小麦产量的不确定性, 运用 CERES-Wheat 模型, 用概率的形式给出未来华

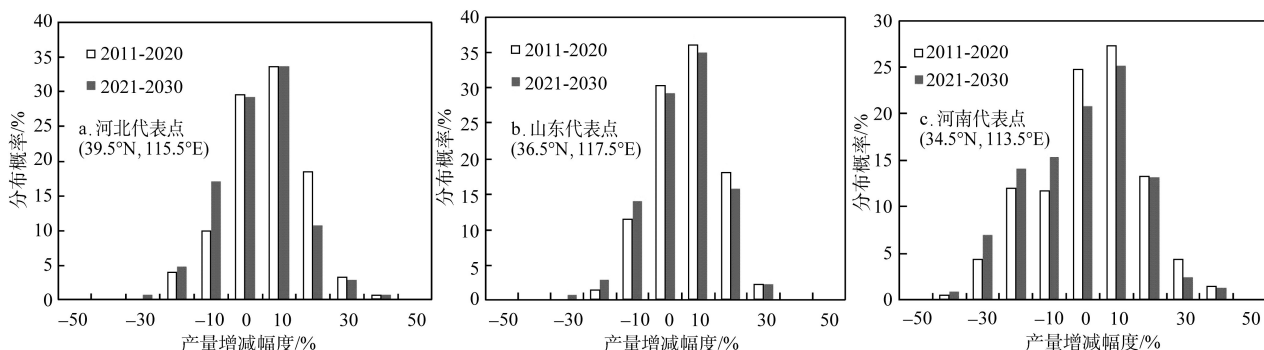


图 6 集合成员模拟的 2011-2020、2021-2030 年各代表点(a.河北;b.山东;c.河南)冬小麦产量相对于 1979-2010 年历史平均产量的概率分布

Fig. 6 The probability distribution of the irrigation forecasted wheat yield of ensemble members relative to the average yields during 1979-2010 (a. Hebei; b. Shandong; c. Henan)

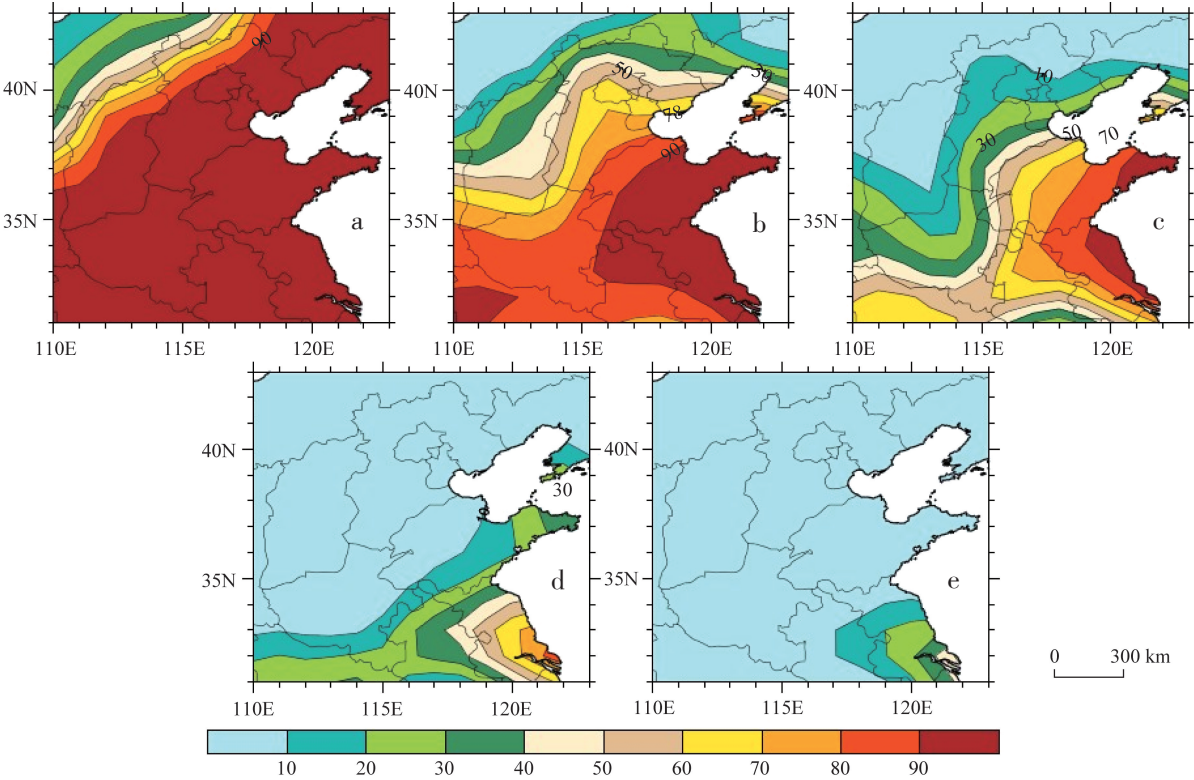


图 7 2011-2030 年间华北灌溉冬小麦产量分别大于 2000、4000、6000、8000 和 10000 kg/hm² 的概率分布
Fig.7 The probability distributions of the wheat regions during 2011-2030 with irrigation yield
over 2000, 4000, 6000, 8000 and 10000 kg/hm²

北地区冬小麦增产或减产可能的概率分布。

(1) 利用 CMIP5 中 15 个全球模式在 4 种不同的排放情景下 54 组气象预估资料,分析逐日最高气温、最低气温、降水量和太阳辐射 4 个变量的预估,结果表明逐日预估值的降水量和太阳辐射值的不确定较大。

(2) 分别在河北、山东和河南选取 3 个代表点,详细分析该点未来 20 年冬小麦产量的范围和概率分布。结果表明 3 个代表点均以弱增产的概率最大,但是随气候变化的冬小麦产量的低产风险明显上升。

(3) 给出了华北地区 2011-2030 年期间灌溉冬小麦产量分别高于 2000、4000、6000、8000 和 10000 kg/hm² 的概率分布,这对把握未来冬小麦产量变化有一定的指导意义,并为制定应对气候变化策略提供了科学依据。

本文对华北地区冬小麦产量的概率预估在一定程度上反映出未来该地区冬麦产量可能的趋势,但未来气候变化的模拟和预估存在诸多不确定性,气候变化的复杂性和多变性均影响农业产量的预

估。当前对不确定性处理的研究尚处于发展阶段,现有的各种处理方法无论是在减小不确定性还是量化不确定性上都有限,因此,在今后研究中,应用多个模式以及多气候预估结果进行模拟,以减少气候变化对农业影响评价结果的不确定性。

参考文献(References)

Bannayan M, Crout N M J, Hoogenboom G. 2003. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom. *Agronomy Journal*, 95(1): 114-125.

Challinor A J, Wheeler T R, Hemming D, et al. 2009. Ensemble yield simulations: Crop and climate uncertainties, sensitivity to temperature and genotypic adaptation to climate change. *Climate Research*, 38(2): 117-127.

Chavas D R, Izaurralde R C, Thomson A M, et al. 2009. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6-7): 1118-1128.

Collins M. 2007. Ensembles and probabilities: A new era in the prediction of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1468): 2007-2014.

- tions of the Royal Society A, 365: 1957-1970.
- Hansen J W, Challinor A J, Ines A, et al. 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges. *Climate Research*, 33(1): 27-41.
- Huang W, Deng X Z, He S J, et al. 2010. An econometric analysis on the impacts of climatic change on grain production at counties of China. *Progress in Geography*, 29(6): 677-683. [黄维, 邓祥征, 何书金, 等. 2010. 中国气候变化对县域粮食产量影响的计量经济分析. *地理科学进展*, 29(6): 677-683.]
- IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. 2003. The DS-SAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3): 235-265.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11): 1631-1643.
- Lewis J M. 2005. Roots of ensemble forecasting. *Monthly Weather Review*, 133(7): 1865-1885.
- Li H B, Sheffield J, Wood E F. 2010. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Inter-governmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research*, 115: D10101.
- Lobell D B, Burke M B, Tebaldi C, et al. 2008. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319: 607-610.
- Masutomi Y, Takahashi K, Harasawa H, et al. 2009. Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process parameter uncertainty in general circulation models. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(3-4): 281-291.
- Matthias S, Richard B, Daniel M, et al. 2010. Translation of ensemble weather forecasts into probabilistic air traffic capacity impact. *Air Traffic Control Quarterly*, 18(3): 229-254.
- Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: 747-756.
- Parry M L, Rosenzweig C, Iglesias A, et al. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socioeconomic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1): 53-67.
- Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467: 43-51.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13): 3088-3111.
- Semenov M A, Stratonovitch P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1): 1-14.
- Tao F, Zhang Z, Liu J, et al. 2009. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8): 1266-1278.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4): 485-498.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106(D7): 7183-7192.
- Tebaldi C, Lobell D B. 2008. Towards probabilistic projections of climate change impacts on global crop yields. *Geophysical Research Letters*, 35(8): L08705.
- Tian Z, Zhong H, Shi R, et al. 2012. Estimating potential yield of wheat production in China based on cross-scale data-model fusion. *Frontiers of Earth Science*, 6(4): 364-372.
- van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1): 5-31.
- Wang J X, Mendelsohn R, Dinar A, et al. 2009. The impact of climate change on China's agriculture. *Agricultural Economics*, 40(3): 323-337.
- Xiong W, Xu Y L, Lin E D. 2005. The simulation of yield variability of winter wheat and its corresponding adaptation options under climate change. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 21(5): 380-385. [熊伟, 许吟隆, 林而达. 2005. 气候变化导致的冬小麦产量波动及其应对措施模拟. *中国农学通报*, 21(5): 380-385.]
- Xiong W, Conway D, Holman I, et al. 2008. Evaluation of CERES-Wheat simulation of wheat production in China. *Agronomy Journal*, 100(6): 1720-1728.
- Xiong W, Conway D, Lin E D, et al. 2009. Future cereal production in China: The interaction of climate change, water availability and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 19(1): 34-44.
- Xiong W, Holman I, Lin E D, Conway D, et al. 2010. Climate change, water availability and future cereal production in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135

(1): 58-69.

Xiong W, Lin E D, Jiang J H, et al. 2010. An integrated analysis of impact factors in determining China's future grain production. *Acta Geographica Sinica*, 65(4): 397-406. [熊伟, 林而达, 蒋金荷, 等. 2010. 中国粮食生产的综合影响因素分析. *地理学报*, 65(4): 397-406.]

Yao F M, Qin P C, Zhang J H, et al. 2011. Uncertainties in assessing the effect of climate change on agriculture using model simulation and uncertainty processing methods. *Chinese Science Bulletin*, 56(8): 729-737. [姚凤梅, 秦鹏程, 张佳华, 等. 2011. 基于模型模拟气候变化对农业影响评估的不确定性及其处理方法. *科学通报*, 56(8): 729-737.]

Ye L, Xiong W, Li Z, et al. 2012. Climate change impact on China food security in 2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2): 363-374.

Zhang Y, Wang S L, Wang F T. 2000. Research on the possible effects of climate change on growth and yield of wheat in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 11(3): 264-270. [张宇, 王石立, 王馥棠. 2000. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究. *应用气象学报*, 11(3): 264-270.]

Uncertainty of ensemble winter wheat yield simulation
in North China based on CMIP5

YANG Xuan¹, TANG Xu², CHEN Baode³, TAN Yan³, TIAN Zhan⁴

(1. College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030, China; 3 Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030, China;
4. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: The uncertainty of the influence of climate change on the North China's winter wheat yield is estimated by using the ensemble climate projections of CMIP5 and the probability of increase or reduction of the wheat yield in main production areas is analyzed. We combined 54 runs of projections from 15 global climate models of CMIP5 under different greenhouse gas emission scenarios in 2006-2030. Meanwhile, the CERES-Wheat was employed to stimulate the North China's winter wheat yield in the future. The results indicate that the projection of precipitation and solar radiation in future climate by the climate models has the largest uncertainty. Take the three representative points as an example: although in some years the yield will increases slightly, the fluctuation of winter wheat yield from year to year can be significant. An increased risk of lower yield is inevitable. And the probabilistic distributions of winter wheat yield in Middle and Eastern China during 2011-2030 over 2000, 4000, 6000, 8000, and 10000 kg/hm² are elaborated.

Key words: probabilistic distribution; uncertainty; winter wheat; model assessment of CMIP5; North China