

气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施

赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 柏会子

(河北省科学院 地理科学研究所 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050011)

摘 要:过去几十年气候变化对我国主要粮食作物产量产生了重要影响,为了研究作物产量对气候变化的响应和适应,保障粮食安全,基于国内相关研究文献,分析归纳了研究方法,综述了国内小麦、玉米和水稻等主要粮食作物产量对气候变化的响应和适应,得出如下结论:(1)作物产量对气候变化响应的研究方法主要包括田间试验观测、统计分析和作物模型模拟等方法,其中田间观测法最直观,统计分析法可操作性强、应用最为普遍,作物模型模拟机理性强,可以定量描述气候因子对作物产量的影响,外推效果好;(2)近几十年来,小麦生育期内气温升高和辐射变化使我国北方小麦增产 0.9%~12.9%,南方小麦减产 1.2%~10.2%;气候变暖对玉米产量贡献率为-41.4%~0.4%;水稻生育期内气温升高和辐射增强有利于东北地区水稻产量增加,增产贡献率为 1.01%~3.29%,而辐射减弱对长江流域等南方主要水稻种植区的水稻产量(长江流域晚熟稻除外)产生不利影响;(3)未来气候变化情境下小麦应从延长生殖生长期、增加籽粒数量和提高收获指数等方面培育新品种应对气候变暖对作物产量的不利影响;耐高温和长生殖生长期的玉米品种可以用来应对气温、降水等气候因子的变化;水稻则应选育耐高温品种应对气温和辐射等因子的变化所带来的作物生产上的风险。

关键词:作物产量;气候变化;农业管理措施

中图分类号:S162.5⁺3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0317-10

Effects of Climate Change on the Yield of Major Grain Crops and Its Adaptation Measures in China

ZHAO Yanxi, XIAO Dengpan, TANG Jianzhao, BAI Hui zi

(Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract:Climate change has had the important impact on the production of main grain crops in China in the past few decades. In order to examine the response and adaptation of crop yield to climate change to guarantee food security, based on domestic research literature, the research methods were analyzed and summarized, the effects of domestic climate change on the yield of wheat, maize, rice and other crops were reviewed. The following conclusions were drawn as follows. (1) The research methods of crop yield mainly include field experiment observation method, statistical analysis method and crop model simulation method. Among them, the most intuitive method is field observation method, while the most operable and widely used method is statistical analysis method, and crop model simulation machine is highly rational, which could quantitatively describe the impact of climatic factors on crops and has good extrapolation effect. (2) In recent decades, the increase of temperature and radiation change in wheat growth period have led to wheat yield to increase by 0.9%~12.9% in north China and decrease by 1.2%~10.2% in south China; the contribution of climate warming to maize yield was -41.4%~0.4%; the increase of temperature and radiation in the growth period of rice was beneficial to the increase of rice yield in northeast China, while the contribution rate was between 1.01%~3.29%, whereas the decrease of radiation had the negative effect on rice yield in major rice growth regions in south China, such as the Yangtze River Basin except late rice in the Yangtze River Basin. (3) Under the future climate change situation, the new wheat varieties should be cultivated by prolonging the reproductive growth period, increasing the number of grains and improving the harvest index in order to

收稿日期:2019-01-16

修回日期:2019-03-02

资助项目:国家自然科学基金(41401104);河北省自然科学基金(D2015302017);河北省科学院高层次人才培养与资助项目(2018G03);河北省专家出国培训项目

第一作者:赵彦茜(1992—),男,河北南和人,实习研究员,硕士,主要从事作物模型应用研究。E-mail:18233181223@163.com

通信作者:肖登攀(1982—),男,河北张北人,副研究员,博士,主要从事农业气象学研究。E-mail:xiaodengpan168@163.com

compensate the adverse effects of climate warming on crop yield; the maize varieties with high-temperature resistant and long reproductive growth could be used to cope with the change of climatic factors such as temperature and precipitation; the high-temperature resistant rice varieties should be cultivated to compensate crop production risk caused by the change of temperature, radiation and other factors.

Keywords: crop yield; climate change; agricultural management measures

中国是一个粮食生产大国,也是一个粮食消费大国。因此,粮食安全一直以来是国家高度关注的课题^[1]。近百年来,地表平均温度上升了 0.7℃ 以上,而自 1950 年以来温度上升速率更是达到了 0.13℃/10 a,全球气候变暖趋势越来越明显^[2]。伴随着气温升高,许多地区地表太阳辐射呈显著减弱趋势^[3-6],同时降雨年际变化增大,极端降水事件频繁发生^[7]。气候变化对自然环境以及人类的生产和生活行为等方方面面都会产生重要影响,其中对农业生产的影响尤为明显。以气候变暖为主要特征的气候变化可能导致作物生长速度加快,从而缩短作物的生长过程,影响作物产量。研究气候变化对作物产量的影响有利于改进农业管理措施,提高作物对气候变化的适应能力,进而保障粮食生产安全^[8]。因此,气候变化对农业生产的影响受到了全球众多学者的广泛关注^[9-11]。

随着研究方法的日趋完善,气候变化影响作物产量的相关研究逐步增多,在区域尺度及全球尺度上均有涉及^[12-15]。Chmielewski 等^[16]根据田间试验结果并结合多年气象数据对英国南部的作物与气候的关系进行回归分析,结果表明,该地区作物产量波动趋势同气温、降水等气候因子密切相关。在基于统计产量的研究中,通常需要将技术、管理等人为因素分离,以量化气候变化对作物产量的影响,Nicholls 等^[17]利用残差法计算了自 1952 年以来气候变化对澳大利亚小麦产量的贡献率,研究期内澳大利亚小麦产量持续增长,气候变化的贡献率在 30%~50%。全球尺度上,气温上升对于小麦、大麦和玉米等作物的产量都有消极影响^[18],但对水稻生产较为有利,在 1980—2008 年,气候变化导致全球玉米、小麦分别减产 3.8%,2.5%,而水稻则增产 2.9%^[19]。气候变暖并不意味着全年每一阶段气温均呈上升态势,Lobell 等^[20]通过研究发现,在 1982—1998 年,美国夏季气温呈下降趋势,但玉米和大豆产量均有所增加。CO₂ 肥效是研究气候变化对作物产量的影响中不确定性和敏感性最大的参数^[21],但大气 CO₂ 浓度升高对作物生长的积极效应具有广泛的共识^[22-23],Wang 等^[24]利用 APSIM 模型模拟研究了澳大利亚东南部气候变化对小麦产量的影响,结果显示,气温每升高 1℃ 和降水减少 10% 所造成的产量损失可以由 CO₂ 浓度增加 266

mg/kg 对产量的影响抵消。

中国在这方面的研究主要集中在小麦、玉米、水稻等主要粮食作物上^[25-27]。前人对国内气候变化影响作物产量的研究已有综述,但论述主要集中在单个作物的单个生产区对气候变化的响应,而未对全国范围内不同区域不同作物对气候变化的响应与适应的差异进行比较。因此,本文论述国内气候变化对小麦、玉米、水稻等粮食作物的影响相关研究,分析我国不同区域不同作物对气候变化的响应及适应对策,以期为我国农业生产安全提供科学依据。

1 气候变化影响作物产量的主要研究方法

1.1 田间试验观测方法

田间试验观测可以获得作物产量的原始数据,是研究作物产量变化最直观的方法。自 20 世纪 80 年代开始,我国近 800 个农业气象站点对作物产量进行了定点观测,这些观测数据为研究学者们统计分析作物产量变化特征提供了数据支持^[28]。另外,根据研究目的可以进行特定田间定位试验,通过气温、降水、辐射等气象因素以及 CO₂ 浓度的控制试验量化气候变化对作物的影响。田间增温试验系统的常用方法是红外线辐射增温^[29-30]。参考国际增温系统^[31],田云录等^[32]设计了中国首个麦田开放式增温系统(FATI),进行冬小麦增温试验。肖国举等^[33]利用红外线辐射器进行田间增温试验,模拟温度升高情况下西北半干旱区马铃薯产量的变化。控制土壤水分条件试验可以用来研究降水对作物产量的影响,韩晓增^[34]和王鹤龄^[35]等通过水分控制装置设置降水量,分别对降水变化条件下的大豆和春小麦产量变化进行了试验模拟。对辐射的控制试验可以通过遮荫网进行,郑有飞等^[36]利用改进的开顶式气室(OTC)和遮荫网研究辐射减弱对冬小麦产量的影响。开放式 CO₂ 富集系统(FACE)是常用的 CO₂ 浓度控制系统,Cai 等^[37]利用该系统进行温度和 CO₂ 浓度控制试验,研究发现气温上升对小麦和水稻产量增加不利,而 CO₂ 浓度增加则有利于产量增加。

田间试验所得到的观测数据是作物产量研究的第一手资料,比较精确可靠。但是,田间观测试验通

常情况下需要耗费大量人力、财力、物力和时间,不适合作为长期研究作物产量变化的方法。同时,田间试验观测是单点观测,其结果往往针对的是特定地域、品种以及管理措施等,在更大区域上不具代表性。

1.2 统计分析方法

统计分析可以获取大范围、长时间序列的作物产量变化趋势,适用于较大的时空尺度,是研究气候变化对作物产量影响的基本方法之一^[38]。长序列的作物产量变化受到了气候变化和管理措施的综合影响,为研究气候因子对作物产量的影响,需要对作物产量进行趋势分离然后单独分析气候因子对作物产量的影响^[17],常用的趋势分离方法有滑动平均法^[39]、三次指数平滑法^[40]以及一阶差分法^[41]等。不同的气候因子对作物产量影响不同,为量化作物生长对不同气候因子的敏感度,可以建立统计模型进行评估^[42]。统计模型主要有 3 种类型^[38]:时间序列模型(基于单点/区域时间序列)、截面模型(基于空间)和面板模型(基于时空变化)。时间序列模型易受多重共线性影响,统计结果误差较大;截面模型在研究中有很大局限性,例如对降水影响的评估受降水时间等因素影响,效果较差;面板模型克服了多重共线性的影响,在研究作物生长对温度、降水等气候因子的响应上综合效果较好^[43]。时间序列模型^[38]可以根据区域或站点的多年时间序列数据构建,公式如下:

$$\log Y_t = \beta_0 + \beta_1 T_t + \beta_2 P_t + \beta_3 S_t + \dots + \epsilon_t \quad (1)$$

式中: $Y_t, T_t, P_t, S_t, \dots$ 分别为年份 t 时的产量、生育期平均气温、平均降水、平均辐射以及其他气候要素; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$ 分别为模型的拟合参数; ϵ_t 为误差项。

根据多个区域或站点的平均产量、气象因素等数据构建截面模型^[38],公式如下:

$$\log Y_{i,a} = \beta_0 + \beta_1 T_{i,a} + \beta_2 P_{i,a} + \beta_3 S_{i,a} + \beta_4 T_{i,a}^2 + \beta_5 P_{i,a}^2 + \beta_6 S_{i,a}^2 + \dots + \epsilon_i \quad (2)$$

式中: $Y_{i,a}, T_{i,a}, P_{i,a}, S_{i,a}, T_{i,a}^2, P_{i,a}^2, S_{i,a}^2, \dots$ 分别为区域或站点 i 的平均产量、平均气温、平均降水、平均辐射和平均气温、平均降水、平均辐射以及其他气候要素的平方项; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \dots$ 分别为模型的拟合参数; ϵ_i 为误差项。

构建面板模型^[38]需将所有区域或站点的产量和气象因素综合起来,公式如下:

$$\log Y_{i,t} = \beta_{i,0} + \beta_1 T_{i,t} + \beta_2 P_{i,t} + \beta_3 S_{i,t} + \beta_4 T_{i,t}^2 + \beta_5 P_{i,t}^2 + \beta_6 S_{i,t}^2 + \dots + \epsilon_{i,t} \quad (3)$$

式中: $Y_{i,t}, T_{i,t}, P_{i,t}, S_{i,t}, T_{i,t}^2, P_{i,t}^2, S_{i,t}^2, \dots$ 分别为区域或站点 i 在年份 t 时的产量、气温、降水、辐射和气温、降水、辐射以及其他气候要素的平方项; $\beta_{i,0}$ 为截距; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \dots$ 分别为模型的拟合参数; $\epsilon_{i,t}$

为误差项。

统计分析方法可操作性强,研究周期长,范围广,信息量大,因此是了解区域和整体上作物产量变化有效的研究方法。但该方法机理性不足,对许多影响因素考虑不充分。同时,统计模型在预测未来气候情景下作物产量的变化趋势方面有很大局限性。

1.3 作物模型模拟方法

自 20 世纪 90 年代开始,随着作物模型发展的日趋完善,利用作物模型量化气候变化对作物的影响的研究也在逐步增多^[44-46]。Mo 等^[47]利用 VIP 模型模拟华北平原地区过去 50 a 冬小麦—夏玉米种植模式下的作物产量,评估气候和农业管理水平对作物产量的影响。Zhang 等^[48]基于水稻专用模型 ORYZA 2000 模拟了 1980—2010 年气候变化影响下中国主要水稻种植区的产量变化情况。Xiao 等^[49]利用 APSIM 模型和 CERES 模型模拟了华北平原 1971—2013 年 CO_2 浓度变化对灌溉和雨养小麦产量的影响。聂江文等^[50]利用 DSSAT 4.5 模型对荆州市 1971—2006 年中稻生长季内高温热害和低温冻害的变化规律及灾害对水稻产量的影响进行了模拟分析,并根据研究结果提出调整播期以降低该区域水稻生产的高低温灾害风险。Huang 等^[51]利用 Hybrid-Maize 模型研究分析了华北平原地区近 60 年间气候变化对玉米产量的影响。作物模型面向作物生长过程,对于作物生长动态变化趋势模拟效果较好,在预测未来产量变化研究上应用前景广阔。Tao 等^[52]结合 MCWLA—Rice 与 Super EPPS 模型研究发现,未来平均温度、太阳辐射以及 CO_2 浓度的增加对华东地区水稻生长较为有利。

作物模型基于作物生长过程建立,机理性很强,对于气候变化和作物生长过程之间的关系可以进行定量描述,准确度较高,同时外推效果好,预测未来作物产量可信度较高。但作物模型结构复杂,需要大量的作物生长发育过程、土壤条件以及管理措施等详细输入数据。

2 主要粮食作物产量对过去几十年气候变化的响应和适应

2.1 主要粮食作物产量对过去几十年气候变化的响应

2.1.1 小麦 过去几十年气候变化对我国不同地区小麦产量产生了较大影响(表 1)。在气温、降水和辐射综合影响下,我国北方地区小麦产量呈现增加趋势,1981—2009 年小麦产量增加了 0.9%~12.9%,但春小麦除外^[28,45]。气温上升对西北地区小麦产量增加具有促进作用^[53]。在华北地区,研究期内最低

温上升,尤其是越冬返青期内最低温上升可减少冻害对小麦生长的不利影响,使小麦产量增加 14.5%,太阳辐射下降,导致产量减少 3%,最高温和降水的变化对产量影响较小^[54]。1961—2010 年,在西南地区减产严重区域,生长季辐射降低、气温升高、昼夜温差减小对潜在产量降低的贡献率分别为 45%,36%,2%,对雨养产量降低的贡献率分别为 36%,39%,8%,而降水减少对雨养产量降低的贡献率为 7%^[55]。相对于气候平均态而言,极端气候事件对作物产量影响更为显著,其中高温热害和干旱对小麦影响较大^[56-57]。

我国小麦产量对气候变化的响应并未呈现出统一的趋势,空间特征差异明显:气候变化对北方小麦生长

有利,对南方小麦生长则较为不利。不同的气候因子对作物的影响机制不同,对作物生长的影响程度差别较大。气温升高对北方地区的小麦生长较为有利,对南方小麦则有消极影响^[28]。小麦生育期内降水变化不明显,对小麦影响较小^[58]。辐射与小麦产量呈正相关,生育期内辐射减弱对小麦生长不利^[59]。极端气候事件(干旱、强降水、高温热害以及低温冻害等)对农业生产的影响要远远大于气候平均状态变化所带来的影响。农作物拥有自己的适宜生长条件,当气温(降水)超过或低于作物适宜生长温度(降水)时,都会对作物生长产生不利影响,例如,高温、弱降水和强辐射对干旱区和半干旱区的小麦产量影响较大^[60]。

表 1 国内小麦产量变化特征及影响因子研究

研究区	研究结果	文献
中国	1981—2009 年,气温、降水和辐射综合影响下,中国北方小麦产量增加 0.9%~12.9%,南方小麦产量减少 1.2%~10.2%	[28]
	1980—2008 年,气温变化导致小麦产量增加 1.3%,降水变化对小麦产量影响较小	[58]
	1960—2009 年,小麦生殖生长期内高温对产量影响突出,北方种植区较南方种植区受高温影响更大	[57]
	1981—2009 年,相对于东北和南方地区,中部小麦种植区受霜冻灾害影响较大,尤其是华北地区	[61]
北方地区	1980—2008 年,极端气候呈现加重态势,导致大部分地区小麦产量减少,平均达到 1.28%/a	[56]
	1981—2010 年,气温上升对春小麦产量造成不利影响,辐射和降水变化对于产量影响较小,总体来说,气候变化不利于产量增加	[45]
西北地区	1981—2005 年,气温上升、降水下降导致低海拔地区产量增加 43.2 kg/(hm ² ·a),高海拔地区产量增加 91.6 kg/(hm ² ·a)	[53]
	1957—2013 年,气温与 CO ₂ 浓度增加,有利于陕西省冬小麦产量增加	[62]
华北地区	1991—2014 年,河西走廊春季变暖变干,夏秋季变暖变湿,春小麦产量总体上呈下降趋势	[63]
	1981—2009 年,气候变化导致该区域东部和南部地区产量增加,西部地区产量减少	[54]
	1979—2012 年,气候变化导致小麦产量下降,日照时数和昼夜温差与产量呈正相关,相对湿度与产量呈负相关,该地区日照时数和昼夜温差呈下降趋势,对未来小麦产量可能造成不利影响	[64]
	1980—2009 年,气候对产量影响在-3.0%~3.0%;温度上升导致小麦增产 3.0%~6.0%,辐射减弱导致小麦减产 3.0%~12.0%,降水变化不明显,对小麦产量影响小	[59]
西南地区	1961—2010 年,65%的研究站点冬小麦潜在产量显著减少,25%的站点旱作产量显著减少	[55]

2.1.2 玉米 气候变化对我国玉米产量有明显不利影响(表 2)。1961—2010 年,生育阶段内日照时数的下降是东北地区潜在产量下降的主要气候因素,气候变化导致玉米潜在产量下降超过 20%^[65]。气候变化对华北平原玉米减产的贡献率为 15%~30%,其中,太阳辐射减弱贡献率为 12%~24%,气温升高贡献率为 3%~9%,降水变化幅度较小,对产量变化影响不显著^[66]。气温和辐射在气候影响因子中作用较为突出。在西南地区减产显著的研究站点中,春玉米生长季内太阳辐射减弱、气温升高和降水减少对作物减产的贡献率分别为 32%,40%,1%,昼夜温差降低对玉米产量增加有微弱的作用^[67]。

我国玉米产量对气候变化的响应呈现出了统一的特征:气候变化对玉米产量影响不利,气候产量减少趋势显著。在玉米生育期内东北、华北以及西南地区等气温上升

和辐射减弱趋势显著,对玉米产量增加较为不利。此外,高温、弱降水和强辐射等极端气候事件导致的干旱对干旱区和半干旱区的玉米产量也有很大不利影响^[60]。

2.1.3 水稻 气温和辐射对我国水稻产量变化起主导作用,辐射减弱是南方地区和长江流域产量减少的主要原因,昼夜温差减小是北方地区水稻产量下降的主要原因,降水则对北方地区和西北地区灌溉水资源量较少地区的水稻产量影响较大^[76-77]。气候变化对水稻产量的影响有较明显的地域特征,气温升高有利于东北地区水稻产量增加,但对南方区域水稻生产造成了一定的消极影响^[78]。不同地区、不同种植模式下水稻产量对气候变化的响应存在较大差异,过去 30 a(1981—2009 年)里,气温升高和辐射减弱共同作用不利于长江流域早熟稻和单季稻产量增加,产量变化幅度分别在-0.59%~2.4%, -9.68%~-7.14%,气

候变暖对长江流域的晚熟稻和东北地区的单季稻产量增加则有明显的积极效果,产量变化幅度分别在 8.38%~9.56%,1.01%~3.29%^[79]。气候变暖可以增加东北地区水稻生长季的有效积温,延长作物播种窗口,减少低温冷害对水稻生长的伤害,提高作物产量,但降水则对该区域水稻生长较为不利^[80-81]。随着气候变暖,南方地区有效积温增加和低温指数减少,

水稻产量分别增加 1.71%~8.73%,0.01%~1.61%,高温指数增加和太阳辐射减弱,导致水稻分别减产 0.14%~0.34%,0.13%~9.34%,有效积温增加的积极影响和太阳辐射减弱的消极影响对于产量的变化起到主导作用,但随着未来气候变暖,有效积温增加和低温冷害日数减少的积极影响可能被高温热害日数的增加的不利影响抵消^[82]。

表 2 国内玉米产量变化特征及影响因子研究

研究区	研究结果	文献
中国	1980—2010 年,辐射减弱、温度上升对潜在产量有较大不利影响,而降水变化则影响较小,气候变化对玉米实际产量的贡献率为-41.4%~0.4%	[68]
	1980—2008 年,气温变化导致玉米产量下降 12%,降水变化对作物产量影响较小	[58]
	1981—2009 年,中国地区总体上玉米生育期内的辐射和气温呈现下降趋势,玉米产量变化趋势与之呈正相关	[69]
东北地区	1981—2010 年,最高气温增加对玉米潜在产量有不利影响,但最低气温上升则有利于潜在产量增加	[70]
	1973—2011 年,总有效积温增加、总降水和日照时数减少导致研究区域内玉米潜在产量下降 12.9%	[71]
	1961—2010 年,气候变化对玉米潜在产量的影响表现出负效应,减产率在 22%~26%	[65]
	1981—2009 年,玉米实际产量呈增长趋势,但气候产量呈降低趋势,产量平均下降 7%~10%	[72]
	1971—2014 年,低温对水稻产量的影响为负效应,对松嫩平原东部、三江平原等地水稻影响较大	[73]
	1971—2014 年,春季低温指数每增加 1 d,水稻产量下降 125.35 kg/hm ²	[74]
西北地区	1981—2015 年,春玉米生育期内降水年际波动较大,降水量正常略偏多年份,玉米产量较高,干旱或者过湿年份,产量水平较低	[75]
华北地区	1991—2014 年,河西走廊春季变暖变干,夏秋季变暖变湿,玉米产量总体上呈上升趋势	[63]
西南地区	1981—2009 年,玉米产量变化趋势呈现为显著增加趋势,速率为每年 58.1~78.3 kg/(hm ² ·a);品种更新与农业管理措施改进对产量提升贡献率最高,但气候变化抵消了 46%~67%的影响	[66]
	1954—2014 年,气温上升和辐射下降趋势较为显著,降水下降趋势不明显,气候变化导致玉米产量减少	[51]
	1961—2010 年,春玉米雨养产量在 46%的研究站点中呈显著降低趋势,东部中区和南部最显著	[67]

我国水稻产量对气候变化的响应呈现出较为显著的空间分布特征:气候变化有利于东北地区水稻产量增加,对长江流域等南方主要水稻种植区的水稻产量(长江流域晚熟稻除外)则有消极作用(表 3)。高降水和弱辐射对东南地区水稻影响较大,这主要是因为高温导致的热压对作物生长不利,但高温和弱降水对东部和东北地区的水稻生产是较为有利的^[60]。

2.1.4 其他作物 国内对农作物产量的研究主要集中于小麦、玉米、水稻 3 大主要粮食作物上,对大豆、棉花、马铃薯等经济作物产量研究相对较少。气候变暖对我国大豆生长较为有利,尤其是在东北地区,气温升高可以延长作物生长期,减少冻害对大豆的影响,在 1979—2002 年研究阶段内中国大豆产量增产速率为 7 万 t/10 a^[84]。棉花种植区域主要分布在西北地区、黄河流域以及长江流域等,在 1961—2010 年,平均气温上升对西北地区和黄河流域的棉花生产较为有利,对长江流域棉花产量则有消极效果,气温上升导致整体研究区域棉花产量减少 0.1%,昼夜温差减小和降水减少对棉花生长是不利的,分别导致研究区域内棉花产量下降 5.5%,1.1%,气候变化总体上仅在西北地区对

棉花生长表现为正效应^[85]。作物不同生育阶段对气候响应是不同的,气候对马铃薯影响较大的生育阶段是结薯期和淀粉积累期,其中,降水、气温和风速等气候因子对作物产量影响最大,导致区域内作物产量在年际间会产生一定波动^[86]。

2.2 典型作物应对气候变化的适应措施

气候变化对农业生产影响较大,为保证作物产量,需要采取一些适应性农业管理措施以弥补气候变化带来的不利影响,措施主要包括品种更新、播期调整和改善施肥和灌溉条件,以及改变耕作方式等。

2.2.1 品种 通常情况下,气候变暖会加快作物生长速度,缩短作物生育期,减弱作物光合作用,减少干物质的积累时间,导致作物产量下降。种植晚熟的长生育期品种可以延长作物的生殖生长期,增加作物的灌浆时间,有利于作物的干物质积累和产量增加^[69,87]。杜春英等^[88]在黑龙江省的研究表明,随着地区热量资源的增加,玉米、水稻和大豆中熟、中晚熟品种正逐步取代极早熟、早熟品种。Bai 等^[89]通过研究发现水稻和小麦品种更新对产量影响显著,产量提升贡献率达 14.4%~27.2%。

表 3 国内水稻产量变化特征及影响因子研究

研究区	研究结果	文献
中国	1981—2005 年,降水对北方地区和西北地区灌溉水资源量较少地区的水稻产量影响较大;辐射、降水以及灌溉水利用量差异决定了区域尺度上的产量变化	[76]
	1981—2009 年,气候变暖和辐射减弱导致长江流域早熟稻和单季稻产量变化为 $-0.59\%\sim 2.4\%$, $-9.68\%\sim -7.14\%$;气候变暖导致长江流域晚熟稻增加 $8.38\%\sim 9.56\%$;气候变暖和辐射增加导致东北平原单季稻产量增加 $1.01\%\sim 3.29\%$	[79]
	1961—2010 年,气候变化导致水稻模拟产量下降了 11.5% ,生育期内辐射和气温日较差的变化起了主导作用,而气温上升对水稻产量也有一定不利影响	[77]
	1980—2008 年,在东北区域,气温变化导致水稻产量增加为 $0.59\%/a$,云贵高原部分区域为 $0.34\%/a$,但在四川盆地和南方耕作区则为 $-0.29\%/a$, $-0.17\%/a$	[78]
	1980—2008 年,气温变化导致水稻产量增加 0.4% ,降水变化对水稻产量影响较小	[58]
	1981—2009 年,气候变化导致产量变化为 $-16\%\sim 10\%$	[46]
	1981—2010 年,温度升高有利于双季稻增产,早熟稻和晚熟稻产量分别增加 0.52% , 2.83%	[83]
	1960—2009 年,随着气候变暖,水稻平均产量呈增加趋势,速率为 $113\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,且产量受有效积温亏缺量影响相较于其他气候因子更为明显	[80]
东北地区	1980—2008 年,在东北水稻生长的主体区域上,气候变暖对水稻生产较为有利,水稻产量呈增加趋势,降水则对水稻生长有一定不利影响	[81]
	1971—2014 年,低温对水稻产量的影响为负效应,对松嫩平原东部、三江平原等地水稻影响较大	[73]
	1971—2014 年,春季低温指数每增加 1 d ,水稻产量下降 $125.35\text{ kg}/\text{hm}^2$	[74]
南方地区	1981—2009 年,有效积温增加的积极影响和太阳辐射减弱的消极影响对于产量的变化起到主导作用;极端低温事件呈减少趋势,与之相对应的是极端高温事件呈增加态势,该区域高温造成的热害加重对水稻产量的负影响要超过低温冷害减轻对水稻生长的正效应	[82]

品种更替对玉米产量贡献率较大,华北平原近几十年来品种更新对玉米产量的贡献率为 $23.9\%\sim 40.3\%$ ^[66],东北地区则在 $46\%\sim 79\%$ ^[65],耐高温和延长生殖生长期是应对温度升高的品种更替方向。Zhang 等^[90]通过 APSIM 模型研究发现,气温升高会减弱华北平原冬小麦的春化作用,不利于冬小麦生长,种植对春化作用要求低的半冬性和弱冬性品种可以有效抵消气温升高对冬小麦的不利影响。品种更新对华北平原小麦产量增长贡献率在 $12.2\%\sim 22.6\%$,是产量增加的主要因素^[59]。小麦品种逐渐向对辐射和降水变化更为敏感的趋势发展,为应对气候变化,培育新品种需要从增加谷粒数量、提高收获指数和水分利用效率以及延长生育期等方面入手。品种更新在过去 30 年里对我国水稻产量增长贡献率为 $16\%\sim 52\%$,同期施肥的水稻产量增长贡献率为 $0\sim 16\%$,气候变化为的水稻产量增长贡献率为 $-16\%\sim 10\%$,品种更新对水稻产量增加影响巨大^[46]。随着气候变暖,我国极端高温事件也呈现增强态势,对积温需求较高的耐高温品种成为我国水稻品种更新的主要方向^[79]。

2.2.2 播种期 调整作物播种期可以改变各生育阶段的辐射、气温和降水等气候条件,进而影响作物的生长过程。华北平原春玉米开花期内光照充足和降水少有利于玉米的开花授粉,确定华北平原春玉米的播种期的首要考虑因素就是开花期要避开雨季^[91]。

旱作和灌溉种植系统对于播种期的响应机制是有差异的,北方地区旱作条件下,推迟播种期可以增加作物降水资源利用量,提升春小麦产量,而提前播种期则可以增加灌溉条件下的小麦产量^[45]。气候变暖对调整作物播种期有导向作用,华北平原越冬期气温上升可以推迟小麦播种期和玉米收获期,小麦玉米总产量提升了 $4\%\sim 6\%$ ^[92],而提前播种期则使东北地区玉米产量增加超过 4% ^[93]。单季稻和双季稻的播种期调整主要考虑水稻灌浆期,提前播种单季稻和推迟播种晚熟稻可以有效延长水稻灌浆阶段,提高作物产量^[94]。Bai 等^[89]通过研究发现水稻和小麦播种期/移栽期变化趋势和变化幅度在各地并不一致,调整水稻和小麦播种期/移栽期对于产量提升贡献率在 $-4.7\%\sim -0.1\%$,相对于品种更新($14.4\%\sim 27.2\%$)和优化施肥措施($2.3\%\sim 22.2\%$),其对水稻和小麦产量的影响并不显著。

2.2.3 施肥等其他管理措施 施肥是适应气候变化的一项重要措施。近 20 年来,施肥对于东北地区作物产量增加的贡献率为 40% ,华东地区为 36% ,华北地区为 9% ,中部和西南地区为 6.8% ^[95]。Xiao 等^[59,66]根据气象数据和观测数据分析了过去 30 年里华北平原施肥对小麦和玉米产量的影响,发现施肥措施下,小麦、玉米产量增加分别 $2.1\%\sim 3.6\%$, $3.3\%\sim 8.6\%$ 。Zhang 等^[46]通过研究发现我国施肥管理水平提高对水稻产量增加的贡献率为 $0\sim 16\%$ 。

Bai 等^[89]的研究结果显示施肥对我国水稻和小麦产量提升贡献率为 2.3%~22.2%。

灌溉水平的提升对作物生长也有一定影响。适量灌溉可以减少水分胁迫对作物生长的不利影响,但过度灌溉则会降低作物水分利用效率,并且不利于产量增加^[96]。此外,在北方地区,免耕相比于传统耕作方式有利于玉米增产,平均增产率达到 3.1%,尤其是在年降水量较少或年均气温较低的区域,轮作或秸秆还田条件下,有利于发挥免耕的增产效应,而东北地区较华北地区和西北地区更适宜推行免耕技术^[97]。西北干旱地带推行全膜双垄沟耕作技术来抵抗干旱对作物的威胁,全膜双垄沟耕作技术相对于露地、单垄等方式,产量波动较小,适应气候变化能力更强^[98]。田间留茬对土壤有增肥效果,水稻在田间留茬情况下相对于不留茬情况增产大约 5.2%^[99]。农业管理水平和农业技术的进步对作物影响巨大,以中国玉米为例,过去 30 a 里,农业管理水平提高和技术进步对玉米产量的贡献率为 99.6%~141.6%,远高于气候变化(-41.4%~0.4%)^[68]。

3 结论

(1) 作物产量对气候变化响应的研究方法主要包括田间试验观测方法、统计分析方法和模型模拟方法等,其中田间观测法最直观,但局限性较大,不适合长周期研究;统计分析法可操作性强,应用最为普遍,缺点是机理性不足,外推效果差;作物模型模拟方法机理性强,可以定量描述气候因子对作物产量的影响,外推效果好,不足之处是结构复杂,输入数据繁多。

(2) 过去几十年里,小麦生育期内气温升高和辐射变化使我国北方小麦增产 0.9%~12.9%,南方小麦减产 1.2%~10.2%;气候变暖对玉米产量贡献率为 -41.4%~0.4%,使我国玉米产量呈显著下降的趋势;水稻生育期内气温升高和辐射增强有利于东北地区水稻产量增加,增产贡献率为 1.01%~3.29%,而辐射减弱对长江流域等南方主要水稻种植区的水稻产量(长江流域晚熟稻除外)产生不利影响。总体上,气温、辐射和降水等气候因子的变化以及极端气候事件对我国粮食作物生产造成了一定的不利影响,气温和辐射是其中主要影响因素。

(3) 品种更替是应对气候变化的关键技术措施。未来气候变化情境下小麦应从延长生殖生长期、增加籽粒数量和提高收获指数等方面培育新品种应对气候变暖对作物产量的不利影响;耐高温和长生殖生长期的玉米品种可以用来应对气温、降水等气候因子的变化;水稻则应选育对积温需求较高的耐高温品种应对气温和辐射等因子的变化所带来作物生产上的风险。

参考文献:

- [1] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 2010,327(5967):812-818.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Gilgen H, Wild M, Ohmura A. Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data[J]. Journal of Climate, 1998,11(8):2042-2061.
- [4] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2001,107(4):255-278.
- [5] Liepert B G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(10), DOI: 10.1029/2002GL014910.
- [6] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface[J]. Science, 2005,308(5723):847-850.
- [7] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006,111(D5):1042-1063.
- [8] Shi W J, Tao F L, Zhang Z, et al. A review on statistical models for identifying climate contributions to crop yields[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23 (3):567-576.
- [9] Porter J R, Xie L, Challinor A J, et al. Food security and food production systems [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [10] Asseng S, Ewert F, Martre P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production [J]. Nature Climate Change, 2015,5(2):37-64.
- [11] Tao F L, Zhang Z, Zhang S, et al. Heat stress impacts on wheat growth and yield were reduced in the Huang-Huai-Hai Plain of China in the past three decades[J]. European Journal of Agronomy, 2015,71:44-52.
- [12] Schlenker W, Roberts M J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U. S. crop yields under climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009,106 (37):15594-15598.
- [13] Peng S, Huang J, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004,101(27):9971-9975.
- [14] Lobell D B, Burke M B, Tebaldi C, et al. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in

- 2030[J]. Science, 2008, 319(5863):607-610.
- [15] Liu B, Asseng S, Müller C, et al. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(12):1130-1136.
- [16] Chmielewski F M, Potts J M. The relationship between crop yields from an experiment in southern England and long-term climate variations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 73(1/2):43-66.
- [17] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends[J]. Nature, 1997, 387(6632):484-485.
- [18] Lobell D B. Changes in diurnal temperature range and national cereal yields[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(3):229-238.
- [19] Lobell D B, Schlenker W, Costaroberts J. Climate trends and global crop production since 1980 [J]. Science, 2011, 333(6042):616-620.
- [20] Lobell D B, Asner G. Climate and management contributions to recent trends in U. S. agricultural yields[J]. Science, 2003, 299(5609):1032.
- [21] Lobell D. Estimation of the carbon dioxide (CO₂) fertilization effect using growth rate anomalies of CO₂ and crop yields since 1961 [J]. Global Change Biology, 2010, 14(1):39-45.
- [22] Müller C, Bondeau A, Popp A, et al. Climate change impacts on agricultural yields [J]. Washington DC World Bank, 2010, 102(3/4):435-466.
- [23] Mcgrath J M, Lobell D B. Regional disparities in the CO₂ fertilization effect and implications for crop yields [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(1), DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014054
- [24] Wang J, Wang E L, Luo Q Y, et al. Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia [J]. Climatic Change, 2009, 96(1):79-96.
- [25] Tao F L, 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.
- [26] You L Z, Rosegrant M W, Wood S, et al. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6):1009-1014.
- [27] Zhang T Y, Huang Y. Impacts of climate change and inter-annual variability on cereal crops in China from 1980 to 2008[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(8):1643-1652.
- [28] Tao F L, Zhang Z, Xiao D P, et al. Responses of wheat growth and yield to climate change in different climate zones of China, 1981—2009 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189:91-104.
- [29] Hou R, Ouyang Z, Li Y, et al. Is the change of winter wheat yield under warming caused by shortened reproductive period[J]. Ecology & Evolution, 2012, 2(12):2999-3008.
- [30] Zheng Y P, Guo L, Hou R, et al. Experimental warming enhances the carbon gain but does not affect the yield of maize (*Zea mays* L.) in the North China Plain [J]. Flora, 2018, 240(1):152-163.
- [31] Harte J, Torn M S, Chang F R, et al. Global warming and soil microclimate: Results from a meadow-warming experiment[J]. Ecological Applications, 1995, 5(1):132-150.
- [32] 田云录, 郑建初, 张彬, 等. 麦田开放式昼夜不同增温系统的设计及增温效果[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18):3724-3731.
- [33] 肖国举, 仇正跻, 张峰举, 等. 增温对西北半干旱区马铃薯产量和品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3):830-836.
- [34] 韩晓增, 乔云发, 张秋英, 等. 不同土壤水分条件对大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2003, 22(4):269-272.
- [35] 王鹤龄, 张强, 王润元, 等. 增温和降水变化对西北半干旱区春小麦产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):67-75.
- [36] 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等. 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2):532-541.
- [37] Cai C, Yin X, He S, et al. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO₂ and temperature in FACE experiments[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2):856-874.
- [38] Lobell D B, Burke M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11):1443-1452.
- [39] 马雅丽, 王志伟, 栾青, 等. 玉米产量与生态气候因子的关系[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4):565-568.
- [40] 尹东, 柯晓新. 甘肃省夏粮气候产量变化特征的因子分析[J]. 中国农业气象, 2000, 21(3):11-14.
- [41] Lobell D B, Ortizmonasterio J I, Asner G P, et al. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico[J]. Field Crops Research, 2005, 94(2):250-256.
- [42] Lobell D B, Field C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming [J]. Environmental Research Letters, 2007, 2(1), DOI: 10.1088/1748-9326/2/1/014002.
- [43] Schlenker W, Lobell D B. Robust negative impacts of climate change on African agriculture[J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(1), DOI: 10.1088/1748-9326/5/1/014010.
- [44] 杨靖民, 杨靖一, 姜旭, 等. 作物模型研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(5):553-561.
- [45] Xiao D P, Cao J S, Bai H Z, et al. Assessing the impacts of

- climate variables and sowing date on spring wheat yield in the Northern China[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2017,19(6):1551-1558.
- [46] Zhang H, Tao F L, Xiao D P, et al. Contributions of climate, varieties, and agronomic management to rice yield change in the past three decades in China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016,10(2):315-327.
- [47] Mo X, Liu S, Lin Z, et al. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 134(1):67-78.
- [48] Zhang T, Yang X, Wang H, et al. Climatic and technological ceilings for Chinese rice stagnation based on yield gaps and yield trend pattern analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014,20(4):1289-1298.
- [49] Xiao D P, Shen Y J, Zhang H, et al. Comparison of winter wheat yield sensitivity to climate variables under irrigated and rain-fed conditions [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016,10(3):444-454.
- [50] 聂江文,杨梅,熊勤学,等.基于 DSSAT 模型模拟高温灾害对荆州市中稻产量的影响及对策[J].*江西农业大学学报*,2017,39(2):223-229.
- [51] Huang S, Lü L, Zhu J, et al. Extending growing period is limited to offsetting negative effects of climate changes on maize yield in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2018,215:66-73.
- [52] Tao F L, Zhang Z. Climate change, high-temperature stress, rice productivity, and water use in Eastern China: A new superensemble-based probabilistic projection[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013,52(3):531-551.
- [53] Xiao G, Zhang Q, Yao Y, et al. Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid northwestern China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2008,127(1):37-42.
- [54] Tao F L, Xiao D P, Zhang S, et al. Wheat yield benefited from increases in minimum temperature in the Huang-Huai-Hai Plain of China in the past three decades[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 239:1-14.
- [55] 戴彤,王靖,赫迪,等.1961—2010 年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析[J].*中国生态农业学报*,2016,24(3):293-305.
- [56] Chen Y, Zhang Z, Wang P, et al. Identifying the impact of multi-hazards on crop yield: A case for heat stress and dry stress on winter wheat yield in northern China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016,73:55-63.
- [57] Liu B, Liu L, Tian L, et al. Post-heading heat stress and yield impact in winter wheat of China[J]. *Global Change Biology*, 2014,20(2):372-381.
- [58] Wei T, Cherry T L, Glomrød S, et al. Climate change impacts on crop yield: Evidence from China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,499:133-140.
- [59] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014,52:112-122.
- [60] Tao F L, Zhang Z, Zhang S, et al. Variability in crop yields associated with climate anomalies in China over the past three decades [J]. *Regional Environmental Change*, 2016,16(6):1715-1723.
- [61] Xiao L J, Liu L L, Asseng S, et al. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260:154-164.
- [62] 周英霞,王全九,张继红,等.基于 AquaCrop 模型的气候变化对陕西省冬小麦产量影响模拟分析[J].*水土保持研究*,2018,25(6):361-368.
- [63] 张亚宁,张明军,王圣杰,等.气候变化对河西走廊主要农作物的影响[J].*生态环境学报*,2017,26(8):1325-1335.
- [64] Zhang X Y, Wang S, Sun H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013,50(1):52-59.
- [65] 吕硕,杨晓光,赵锦,等.气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响[J].*农业工程学报*,2013,29(18):179-190.
- [66] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivar shift, management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981—2009[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016,60(7):1111-1122.
- [67] 戴彤,王靖,赫迪,等.基于 APSIM 模型的气候变化对西南春玉米产量影响研究[J].*资源科学*,2016,38(1):155-165.
- [68] Guo J P, Zhao J F, Wu D R, et al. Attribution of maize yield increase in China to climate change and technological advancement between 1980 and 2010 [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014,28(6):1168-1181.
- [69] Tao F L, Zhang Z, Zhang S, et al. Historical data provide new insights into response and adaptation of maize production systems to climate change/variability in China[J]. *Field Crops Research*, 2016,185:1-11.
- [70] Liu Z, Yang X, Hubbard K G, et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of north-east China[J]. *Global Change Biology*, 2012,18(11):3441-3454.
- [71] Chen X, Chen F, Chen Y, et al. Modern maize hybrids in Northeast China exhibit increased yield potential and resource use efficiency despite adverse climate change[J]. *Global Change Biology*, 2013,19(3):923-936.

- [72] 李辉,姚凤梅,张佳华,等.东北地区玉米气候产量变化及其对气候变化的敏感性分析[J].中国农业气象, 2014,35(4):423-428.
- [73] 姜丽霞,任桂林,李秀芬,等.作物生长期低温指数演变及对作物产量的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版, 2018,46(10):79-88.
- [74] 田宝星,于敏,李浩然,等.黑龙江省春季低温指数及其对作物产量的影响[J].中国农学通报, 2018,34(25):103-109.
- [75] 刘维,李祎君,何亮,等.基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J].农业工程学报, 2018,34(22):121-127.
- [76] Zhang T, Jiang Z, Reiner W. 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.
- [77] Yang J, Wei X, Yang X G, et al. Geographic variation of rice yield response to past climate change in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014,13(7):1586-1598.
- [78] 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.
- [79] Tao F L, Zhang Z, Shi W J, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981—2009 in China, and late rice was just opposite [J]. *Global Change Biology*, 2013,19(10):3200-3209.
- [80] Zhao Z, Liu X, Wang P, et al. The heat deficit index depicts the responses of rice yield to climate change in the northeastern three provinces of China[J]. *Regional Environmental Change*, 2014,14(1):27-38.
- [81] Liu Z, Zhang G, Yang P. Geographical variation of climate change impact on rice yield in the rice-cropping areas of Northeast China during 1980—2008[J]. *Sustainability*, 2016,8(7):1-12.
- [82] Zhang S, Tao F L, Zhang Z. Changes in extreme temperatures and their impacts on rice yields in southern China from 1981 to 2009 [J]. *Field Crops Research*, 2016,189:43-50.
- [83] 刘胜利.气候变化对我国双季稻区水稻生产的影响与技术适应研究[D].北京:中国农业大学, 2018.
- [84] Tao F L, Yokozawa M, Liu J Y, et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends[J]. *Climate Research*, 2008,38(1):83-94.
- [85] Chen C, Pang Y, Pan X, et al. Impacts of climate change on cotton yield in China from 1961 to 2010 based on provincial data[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015,29(3):1555-1564.
- [86] 宋学锋,侯琼.气候条件对马铃薯产量的影响[J].中国农业气象, 2003,24(2):35-38.
- [87] Liu Y, Wang E, Yang X, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s[J]. *Global Change Biology*, 2010,16(8):2287-2299.
- [88] 杜春英,宫丽娟,张志国,等.黑龙江省热量资源变化及其对作物生产的影响[J].中国生态农业学报, 2018,26(2):242-252.
- [89] Bai H Z, Tao F L, Xiao D P, et al. Attribution of yield change for rice-wheat rotation system in China to climate change, cultivars and agronomic management in the past three decades[J]. *Climatic Change*, 2016,135(3/4):539-553.
- [90] Zhang Y, Feng L P, Wang J, et al. Using APSIM to explore wheat yield response to climate change in the North China Plain: the predicted adaptation of wheat cultivar types to vernalization[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2013,151(6):836-848.
- [91] 刘明,陶洪斌,王璞,等.播期对春玉米生长发育与产量形成的影响[J].中国生态农业学报, 2009,17(1):18-23.
- [92] Wang J, Wang E L, Yang X G, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. *Climatic Change*, 2012,113(3/4):825-840.
- [93] Liu Z, Hubbard K G, Lin X, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China[J]. *Global Change Biology*, 2013,19(11):3481-3492.
- [94] Lü Z, Zhu Y, Liu X, et al. Climate change impacts on regional rice production in China[J]. *Climatic Change*, 2018,147(3):523-537.
- [95] Wang X, Cai D, Grant C, et al. Factors controlling regional grain yield in China over the last 20 years[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015,35(3):1127-1138.
- [96] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006,85(1):211-218.
- [97] 银敏华,李援农,陈朋朋,等.基于 Meta-analysis 的中国北方地区免耕玉米产量效应研究[J].中国农业科学, 2018,51(5):843-854.
- [98] 张涛,孙伟,孙步功,等.不同种植模式下旱地春玉米产量对降雨和气温变化的响应[J].农业工程学报, 2017,33(20):127-135.
- [99] Huang S, Zeng Y, Wu J, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2013,154(3):188-194.