

郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
doi: 10.11898/1001-7313.20150101

气候变化对中国农业生产的影响研究进展

郭建平*

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要

气候变化已成为当今科学界、各国政府和社会公众普遍关注的环境问题之一,气候变化可能对生态系统和经济社会产生灾难性影响,农业是受气候变化影响最直接的脆弱行业。因此,气候变化对农业生产的影响研究一直是气候变化研究领域中的热点问题之一。该文系统介绍了有关全球气候变化对中国农业生产影响研究的现状与进展,包括气候变化对农业影响的研究方法、大气中温室气体浓度增加对农作物的影响试验、气候变化对农业气候资源的影响、气候变化对农作物生长发育和产量的影响、气候变化对农业种植制度和品种布局的影响、气候变化对农作物气候生产潜力和气候资源利用率的影响等,指出当前在研究气候变化对农业影响评估中存在的问题,提出了今后应加强对气候变化情景和预测模式不确定性的研究、气候变化对农业影响的方法研究。此外,气候变化背景下极端天气气候事件对农业生产的影响以及气候变化对农业病虫害的影响研究等仍较薄弱,有待进一步加强和深入。

关键词: 气候变化; 农业生产; 影响评估; 研究进展

引 言

以全球变暖为主要特征的气候变化已经成为当今世界重要的环境问题之一。最近几十年,关于气候变化的问题一直是学术界研究的热点^[1]。在过去的 100 年里,全球平均表面温度上升了 0.74℃^[2],而最近 50 年的升温几乎是过去 100 年的 2 倍^[3]。IPCC 第 5 次评估报告指出,气候变化比原来认识的要更加严重,在过去的 30 年里,每 10 年的表面温度要高于人类有记录以来的任何 10 年,且 2000 年以来的十几年气温最高^[4]。许多区域的作物研究表明,气候变化对粮食产量的不利影响比有利影响更为显著^[5-6]。在全球变暖的情景下,近 50 年来,我国增暖明显,全国年平均表面温度增加了 1.1℃,明显高于全球或北半球同期的平均增温速率^[7]。尤其是 20 世纪 80 年代中期以来,升温速率显著加快,北方地区增温趋势显著^[8]。近 50 年我国年降水变化趋势不明显,但年代际波动较大,区域间存在明显差

异,极端天气气候事件的频率和强度出现了明显增强,霜冻日、寒潮事件减少,长江中下游地区和东南地区洪涝加重。我国东北和华北、西北东部的干旱日趋严重^[8]。未来 20~100 年我国表面温度仍将继续上升,趋势明显,北方增暖大于南方,内陆大于沿海。降水量的年际变化较大,但随着温室气体浓度的持续增加,未来降水量可能呈增加趋势^[9]。

全球气候变化带来一系列问题,变化幅度已超出地球本身自然变动范围,对人类生存和社会经济构成严重威胁。农业是受全球气候变化影响最大、最直接的行业之一,尤其是作为农业主体的作物生产与粮食安全^[10]。根据中国国家气候变化方案,农业是应对气候变化 4 个主要领域之一。气候变化背景下我国的粮食安全也已受到严重威胁,2020—2050 年我国农业生产将受到气候变化的严重冲击^[11]。大气中 CO₂ 浓度增加及气候变暖,通过影响作物生育进程、适宜种植区和灾害性因子等的变化,对农业生产产生很大影响。科学预测气候变化对农业生产的影响,探讨应对气候变化的农业发展策略,

2014-09-03 收到, 2014-10-28 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(31371530),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106020)

* email: gjp@cams.cma.gov.cn

已成为实施全球可持续农业与农村发展(SARD)战略需要研究解决的重大问题^[12]。本文系统回顾了近几年气候变化对农业生产影响评估的研究进展,以期今后该领域的研究工作提供参考。

1 气候变化对农业影响的研究方法

综合国内外文献,研究气候变化的影响通常有3类方法:一是实验室模拟或现场观测试验方法,二是历史相似或类比法,三是利用计算机进行数值模拟和预测的方法。第3类方法是当前最有前途、进展最为迅速的方法^[13]。从气候变化对农业影响来看,目前采用的方法主要集中在观测试验和模型模拟影响两方面^[11]。观测试验多采用田间试验和环境控制试验两种方法,其中环境控制试验是在野外设立封闭或顶部开放温室,通过人为控制CO₂浓度研究对作物的影响^[14]。国外早期的研究多采用环境控制试验^[15],因为这种方法重复性好,能为研究者提供稳定的环境^[16]。我国有关CO₂浓度增加对农作物直接影响的研究起步较晚^[17],20世纪90年代一些学者开展了通过田间试验进行CO₂浓度和光合作用关系的试验研究^[18-19]。直接田间试验的方法可以获取许多重要数据,用来检验假设或评价因果关系等,是一种重要的研究方法。但该方法耗时、耗财力,特别是对模拟未来气候变化后环境温度和降水等条件发生变化情况下多作物品种的长期试验非常困难,因此,在使用中存在很大的局限性^[20]。

鉴于田间试验方法的局限性,利用计算机进行数值模拟和预测研究是目前量化研究气候变化及其影响的较科学和理想的方法。模型模拟包括统计分析(回归模型)和动态数值模拟(气候模式与农业评价模式相嵌套)两种方法。统计学方法在大数定律和统计假设检验的基础上,根据生物量与气候因子的统计相关建立数学模型。20世纪80年代以来,随着长期观测试验的进行和人们对作物生长过程认识的不断深化以及作物模式研究的不断发展和完善,大气环流模型(GCM)和作物模式相联接逐渐发展成为评价气候变化对农业影响的最基本、最有效的方法^[20]。

国外学者研究气候变化与作物的关系多采用作

物模型,结合不同的气候或天气模式,评价气候变化对作物影响并给出建议和对策。目前,国外具有代表性的作物模型有美国农业部开发的 CERES(Crop Environment Resource Synthesis)^[21]系列以及荷兰的 WOFOST(World Food Studies)^[22]系列模型,国内则有 RCSODS(Rice Cultivational Simulation, Optimization and Decision-Making System)^[23]和 WheatGrow^[24]等模型。国内外在这方面已有大量报道,Christian等^[25]将GCM模拟的天气数据及观测站的天气数据分别输入到作物模型 SARRA-H(System for Regional Analysis of Agro-Climatic Risks-Habille)中,建立了比较合理的作物模型;Easterling等^[26]在 EPIC(Erosion-Productivity Impact Calculator)模型中加入CO₂对作物光合作用和蒸散作用的影响,探讨美国 MINK(Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas)气候变化对地区作物影响;Gregory等^[27]利用作物模型研究了气候变化对希腊玉米生育期和产量的潜在影响;David等^[28]利用多种气候模式和作物统计模式研究了气候变化对美国加利福尼亚多年生作物的影响。

近年来,我国在应用作物模型进行气候变化对农作物影响的研究领域也取得了显著成果。王馥棠^[29]利用3种大气环流模式预测未来气候情景下我国主要作物水稻、小麦和玉米产量的可能变化,并指出作物产量下降的主要原因是大气中CO₂浓度倍增时,温度升高、作物发育速度加快和生育期缩短。张建平^[30]利用 WOFOST 作物模型,结合气候模型 BCC-T63 输出的未来气候情景资料,模拟分析了未来气候变化对东北地区玉米产量的影响,表明气候变化将严重影响东北粮食产量。金之庆等^[31]利用 CERES-Maize 模拟了全球气候变化对我国玉米生产的可能影响,并评价了当CO₂倍增时,气候变化对我国各地玉米产量和灌溉需要的可能影响。尚宗波^[32]利用玉米生长生理生态学模拟模型(MPESM),模拟评价了沈阳地区玉米生长对各种气候因子变化的敏感性,全球气候变化背景下沈阳地区春玉米的生长趋势以及产量变化情况,研究表明,在未来气候变化背景下沈阳地区玉米平均产量会有5%~30%的降幅。冯利平等^[33]建立了气候变化背景下我国华北冬小麦生产影响评估模型,探讨气候异常对华北冬小麦的可能影响。

2 大气中温室气体浓度增加对农作物的影响试验

大气 CO₂ 浓度升高除了通过温室效应导致的全球气候变化并对植物产生间接影响外,还直接影响植物的生长发育^[34]。

CO₂ 浓度升高对植物影响的田间试验主要手段有 3 种:控制环境试验(controlled environment, CE)、开顶式测定箱(open-top chambers, OTC)和自由 CO₂ 气体施肥试验(free-air CO₂ enrichment, FACE)^[35]。国外早期研究多采用环境控制试验^[15-16],因为这种方法重复性好,能为研究者提供稳定的环境。缺点是光照通常减少,温度升高,昼夜温差减少,光温不能同步,且风速相对静止。最大的缺陷是大部分植物种在花盆中,植物根系生长空间受限。另外,这种试验通常以植物幼苗为试验材料,所得结论能否应用于田间状态下的成熟植株值得怀疑,因此,近年来这种方法的应用逐渐减少^[17]。而 OTC 试验优点是生长环境基本接近于自然状态,可自动控制 CO₂ 浓度,并使之与温度变化同步。如果利用自然植物作为试验对象,可以避免根系受限制和只能研究幼苗等不足之处,其结果具有说服力。而 FACE 在自然状态下进行 CO₂ 浓度升高对植物影响的试验,其结果有很强的代表性,是另外两种方法不能比拟的。因而,这是公认的研究植物对高 CO₂ 浓度响应的最理想的手段之一。

我国有关 CO₂ 浓度增加对作物直接影响研究起步较晚,20 世纪 90 年代一些学者通过田间试验进行 CO₂ 浓度和光合作用关系研究^[18-19,36-38]。其中,王修兰^[37]于 1992—1995 年在人工控制环境条件下分别对我国几种主要作物(小麦、玉米、大豆等)进行了不同 CO₂ 浓度反应的试验研究,在作物生物量、产量、光合速率、蒸腾系数方面获得了大量系统数据。试验结果表明,在人工控制环境条件下随着 CO₂ 浓度增加,作物的生物量、产量、光合速率等增加,而作物的蒸腾系数减少。王春乙等^[39]于 1992—1996 年利用 OTC-1 型开顶式气室研究 CO₂ 浓度增加对我国 6 种主要作物的生长发育、产量形成、光合作用、蒸腾等的影响,并研究 CO₂ 浓度增加对一些作物品质的影响。结果表明:CO₂ 浓度增加,作物发育进程加快,株高增加,经济产量和生物产量增加明显,且 C3 作物的增长幅度大于 C4 作物;冬小麦、

棉花品质呈良性变化,玉米品质可能有所下降,大豆品质变化不明显。O₃ 对农作物影响的研究也有了新的进展,利用 OTC-1 型开顶式气室研究 O₃ 浓度增加对冬小麦、水稻、菠菜、油菜生长发育和产量的影响,O₃ 浓度达到 100×10^{-9} 情况下作物产量降低 20% ~ 30%;在此基础上进行 CO₂ 和 O₃ 的复合影响试验和模型研究,从生理生态、土壤微生物及碳氮循环角度出发,探讨空气质量变化对农业生态系统功能的可能影响,为评估近地层大气 CO₂ 和 O₃ 浓度变化对农业生产及农业生态系统功能的可能影响提供科学依据^[39-40]。此外,郑有飞等^[41-42]研究了大气中气溶胶的增加对我国主要作物小麦、玉米的影响,发现气溶胶增加引起太阳辐射减少,进而影响小麦、玉米生育期和籽粒产量。

由此可见,CO₂ 浓度增加导致作物光合作用增强,蒸腾速率减小是最终导致生物量和产量提高的根本原因。O₃ 浓度增加引起作物伤害是导致生物量和产量下降的原因,而大气气溶胶增加,阻挡了太阳辐射,进而影响作物产量。

3 气候变化对农业气候资源的影响

农业气候资源的数量及其配置直接影响农业生产过程,并为农业生产提供必要的物质和能量。农业气候资源主要包括光资源、热量资源和水分资源。气候变化对农业生产的影响,首先表现为对农业气候资源的影响,由于农业气候资源在数量和配置上发生了变化,导致对农业生产过程的影响,并最终影响农业种植制度、品种布局以及生长发育和产量形成。因此,系统分析气候变化背景下农业气候资源演变趋势及空间分布格局,不仅有利于合理利用农业气候资源,还将为调整农业结构和种植制度提供一定的科学依据。研究表明:近 50 年我国大于等于 0℃和大于等于 10℃积温和持续时间总体呈增加趋势,但增温幅度区域间存在差异。1961—2007 年华南地区年平均气温以 0.20℃/10 a 的趋势上升,温度生长期内积温的气候倾向率(平均为 98℃·d/10 a)由北向南递增^[43]。西南地区年平均气温呈上升趋势,平均增速为 0.18℃/10 a;温度生长期内大于等于 10℃和大于等于 15℃积温均呈增加趋势,平均增速分别为 55.3℃·d/10 a 和 37℃·d/10 a^[44]。西北干旱地区年平均气温呈上升趋势,其气候倾向率为 0.35℃/10 a;喜凉作物和喜温作物温度生长期

内积温总体呈升高趋势,气候倾向率分别为 $67^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 和 $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ ^[45]。与 1961—1980 年的平均状况相比,1981—2007 年黄淮海平原喜凉作物和喜温作物温度生长期均呈延长趋势,分别延长了 7.4 d 和 6.9 d; 大于等于 0°C 和大于等于 10°C 积温总体表现为增加趋势,其气候倾向率分别为 $4.0\sim 137.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ 和 $1.0\sim 142.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\text{a}$ ^[46]。与 1961—1980 年相比,1981—2007 年我国年平均气温增加了 0.6°C , 喜凉作物生长期大于等于 0°C 积温和喜温作物生长期大于等于 10°C 积温分别平均增加 $123.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $125.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$; 1961—2007 年年平均气温增幅最大的区域是东北地区,喜温作物生长期大于等于 10°C 积温增幅最大的是华南地区^[47]。长江中下游地区双季稻的安全种植北界北推^[48], 华东地区和华北平原在 1961—2005 年气温也出现明显的上升趋势^[49-50], 西北地区大于等于 0°C 和大于等于 10°C 积温均从 1986 年开始增加,在 1995 年后增加趋势更加明显。大于等于 0°C 积温和大于等于 10°C 积温的平均气候倾向率区域间存在差异,其中于田、库车、阿拉尔等地区积温呈减少趋势^[51]; 1961—2007 年东北三省的年平均气温总体上升,气候倾向率为 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 温度生长期大于等于 10°C 的积温带北移东扩^[52]。未来我国气温变化趋势较一致,大部分地区大于等于 0°C 、大于等于 10°C 积温的持续日数、无霜期延长,大于等于 0°C 、大于等于 10°C 积温呈增加趋势^[11]。河套地区初霜日日期推后,终霜日日期提前,无霜期逐步延长,霜冻灾害呈逐年减少趋势^[53]。虽然热量资源表现出总体增加趋势,但表现出时空分布极不均匀的显著特点:一是北方地区增温幅度大于南方,二是冬季大于夏季,三是夜间大于白天,从而导致日较差减小^[54]; 同时,南方地区的增温趋势不明显^[55]。

近 50 年我国降水量总体变化趋势不显著,区域差异明显,长江中下游地区、东南地区、西部大部分地区、东北北部和内蒙古大部分地区年降水量呈增加趋势,但华北、西北东部、东北南部年降水量呈下降趋势^[7]。近 50 年黑龙江省和吉林省绝大部分区域在温度生长期内的参考作物蒸散量呈逐年增加趋势,而辽宁省绝大部分区域则有所减少^[52]。长江中下游地区生长期参考作物蒸散量呈略微减少趋势,低值区扩大,高值区减小^[48]。我国未来降水量总的变化趋势仍为增加,但降水量增加中心因模式不同而有所差异。加拿大 CCCma 模式预估未来我

国降水量增加中心位于青海、西藏一带,21 世纪末华南地区降水量有所减少^[56]。区域气候模式 PRECIS 预测未来气温持续升高,导致参考作物蒸散量普遍增加,降水量增加最多的地区分布在长江以南、海南以北的中、亚热带地区^[9]。

1960 年以来,我国大部分地区太阳辐射降低,出现日照时数减少的现象。近 50 年在气候变暖背景下,相对湿度和云量增加导致西北大部分地区日照时数显著减少,西北地区平均减少速率为 $19.92\text{h}/10\text{a}$ ^[45,57]。东北三省年日照时数显著下降,且以松嫩平原东部、吉林省中西部平原、辽河平原西部的减少尤为明显,日照时数高值区西退、日照时数减少^[52]。长江中下游地区日照时数普遍表现为减少趋势,其中 1980 年以来比 1961—1980 年温度生长期平均日照时数减少了 8.1% ^[48]。华南地区年日照时数呈由西向东逐渐减少的特征,且东部减少趋势较西部更显著,但空间差异较大^[44],全年和温度生长期日照时数分别以 $-57\text{h}/10\text{a}$ 和 $-38\text{h}/10\text{a}$ 的速率递减^[43]。对全国而言,与 1961—1980 年相比,1981—2007 年在全年、喜凉和喜温作物生长期日照时数分别减少了 125.7、32.2 h 和 53.6 h。1961—2007 年长江中下游地区年日照时数的减幅最大,喜凉和喜温作物生长期日照时数减少量最大的地区分别是华北和华南地区^[47]。

由此可见,气候变化背景下,我国农业气候资源总体表现为热量资源显著增加,辐射资源减少,而降水资源的变化不显著,区域差异明显。

4 气候变化对农作物生长发育的影响

温度是影响作物发育速度的关键因子,温度高低决定了生育期长短。温度升高,作物生育期普遍缩短。研究表明:平均气温升高 1°C , 水稻生育期日数平均缩短 7.6 d, 温度增加导致一季稻、早稻的生育期缩短^[58]。但气温升高对不同熟性的水稻品种生长发育的影响不一致。近 20 年广东省潮州水稻生育期积温增加,早稻各发育期均有不同程度的提早,晚稻的发育期持续推迟,早稻、晚稻的全生育期日数均在逐渐缩短^[59]。且影响主要表现在生育前期,1961—2008 年河南省信阳地区水稻生长季内 4—5 月变暖趋势最为显著,使得水稻播种、移栽日期显著提前,移栽—抽穗长度显著延长^[60]。

气候变暖对冬小麦影响较大的时期主要在生育

前期,对生育后期的影响较小,春季发育期(从返青期到成熟期)普遍提前^[61-62],拔节期提前最明显,抽穗以后各生育期提前程度较少,冬季生育期、全生育期明显缩短^[63]。生态学模式 SUCROS 模拟冬小麦生长发育状况表明,在无土壤水分亏缺的情况下,黄淮海地区秋冬季温度升高,播种期到开花期日数减少,开花期到成熟期日数稍有延长,播种期到成熟期整个生育期的持续日数缩短^[64]。

在气候变暖的形势下,河南省 6—9 月降水量减少,夏玉米生长减缓,各生育期有推迟的趋势,成熟期推迟程度较大,全生育期日数显著增加^[63]。陇东塬区随气候变暖,积温增加,日照时数和降水量相对减少,春玉米生长发育速度加快,生育期日数缩短,主要发育期较历年均提前,提前幅度最大的是乳熟期和成熟期^[65]。

总体而言,气候变化使作物生育期缩短,且对生育前期的影响大于对生育后期的影响。

5 气候变化对农作物产量的影响

气候变化对作物的影响最终表现在产量上,气候变化的正负效应全球分布不均匀。高纬度地区将从气候变暖中受益,可耕作土地面积增加,国内生产总值(GDP)随之增长;低纬度地区气候变化将减少土壤水分,降低农业和林业的生产力,商品生产受到影响,GDP 降低;而气候变化对中纬度地区的影响是混合的,随地区或气候变化情景的改变而改变^[66]。目前研究方法主要是采用气候模型与作物模式相嵌套,对作物产量可能受到的影响进行分析评价^[67]。在未来气候情景下,温度升高,作物生长加快,生育期缩短,不同品种水稻产量会有不同程度下降,早稻平均减产幅度为 3.7%,中稻为 10.5%,晚稻为 10.4%^[68]。气候变暖导致小麦发育加快,生育期缩短,春小麦生育期日数缩短比例大于冬小麦,春小麦的减产幅度也大于冬小麦,无论是冬小麦还是春小麦,雨养条件下减产幅度均略大于水分适宜条件(灌溉条件下)。区域间产量变化趋势也有所不同,未来降水量增加,华北和长江中下游地区的雨养冬小麦有增产趋势,而东北地区和西北地区春小麦、西南地区冬小麦有减产趋势^[69]。气候变化将导致石羊河、大凌河流域灌溉玉米稳产风险及低产出现的概率增大,给农业生产带来一定的经济损失,其中 A2 情景对玉米产量的负面影响大于 B2 情景。CO₂

肥效作用可以一定程度上缓解这种负面影响^[70]。若不采取其他措施,未来 A2 和 B2 两种温室气体排放情景下,2021—2050 年河南省冬小麦产量平均约减少 5%^[71]。但也有研究表明:2012—2050 年在 A2 和 B2 情景下,河北省和河南省冬小麦气象产量均表现出以减产为主、而山东省冬小麦气象产量以增产为主的趋势^[72]。但如果考虑 CO₂ 的肥效作用,减产幅度会明显减小^[73]。气候变化将导致我国玉米主产区玉米单产普遍降低,总产下降。A2 气候变化情景对我国玉米产量的负面影响大于 B2 情景。CO₂ 肥效作用可以在一定程度上缓解这种负面影响,其缓解作用对雨养玉米更明显^[74]。受 3 种气象因子(平均温度、日较差、太阳辐射)变化趋势的综合影响,约有 30% 的水稻产区对 1981—2007 年的气候变化趋势敏感,少部分地区表现为脆弱,但对水稻主产区影响不大,且在东北地区还集中表现出产量增加的趋势,为我国水稻发展提供了契机^[75]。综合研究表明:气候变化将影响未来三大作物(玉米、水稻、小麦)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^[76]。

但气候变化对作物产量影响还有很大不确定性:首先,CO₂ 的肥效作用还有很大争议;其次,在模型中也未考虑病虫害和水资源供应减少的可能性、臭氧层空洞等因素对作物产量的影响;再次,未来适应的可能性带来不确定性,若很好地利用农业科技可以减少气候变化的不利影响^[77]。

6 气候变化对种植制度的影响

气温升高增加了各地的农业热量资源,从而使当前多熟制的北界向北、向西推移,复种指数呈波动式增长,全国复种指数由 1985 年的 143% 增加到 1995 年的 165.1% 后,又缓慢下降为 2001 年的 163.8%^[78]。在只考虑温度的情况下,1981—2007 年与 1950—1980 年相比,一年两熟制种植北界空间位移变化最大的区域在陕西东部、山西、河北、北京和辽宁,一年三熟制种植北界空间位移变化最大的区域为浙江、江苏、安徽、湖北、湖南地区^[79]。与 1951—1980 年相比,2011—2040 年和 2041—2050

年的一年两熟制和一年三熟制种植北界均不同程度向北移动,其中一年一熟区和一年二熟区分界线空间位移最大的省(市)为陕西省和辽宁省,且2041—2050年种植北界北移情况更为明显;一年两熟区和一年三熟区分界线空间位移最大的区域在云南省、贵州省、湖北省、安徽省、江苏省和浙江省境内,且2041—2050年种植北移情况更为明显^[80]。若考虑温度和水分的影响,南方地区一年两熟区北界无明显变动,一年三熟区北界向西推进了约0.25个经度,向北移动了0.20个纬度^[81];北方地区东北部种植界限发生了空间位移,北移西扩显著^[82]。对未来种植制度如何变动,学者多采用模型模拟未来气候变化情景,对种植制度可能受到的影响进行分析评价。若未来CO₂增加1倍,在品种和生产水平不变的前提下,仅考虑热量条件,我国一熟制面积减少而三熟制面积会明显增加。但由于水分变化可能产生的不利影响,种植制度的变化仍具有较大的不确定性^[83]。在大于等于10℃积温指标下,1986—2009年我国潜在的不可耕地面积平均值相对1961—1985年减少约34.33%,一年一熟区面积有所减少,但仍约占50%,一年两熟和一年三熟地区面积均呈增加趋势;综合大于等于10℃和大于等于0℃两个积温指标,我国潜在播种面积缓慢增加,与实际播种面积的变化趋势一致,其他综合因子则在总体上对潜在播种面积的增长有微弱抑制作用^[84]。

几乎所有研究结果表明:气候变化有利于多熟制种植的发展,可有效扩大作物播种面积,提高复种指数,在一定程度上弥补气候变化对作物单产的不利影响。

7 气候变化对品种布局的影响

在气候变暖背景下,人们可能通过改变种植结构、更换相对高产的中晚熟品种等适应措施,以期获得更高生产效益。气候变暖背景下,在不考虑CO₂浓度升高对作物生长发育影响的前提下,东北三省春玉米不同熟型品种种植北界不同程度向北移动,在界限敏感区域内中晚熟品种替代早熟品种,使玉米生育期延长;干物质积累增加,可以提高东北三省春玉米产量^[85]。与1951—1980年相比,1981—2007年在80%气候保证率下我国热带作物安全种植北界北移0.86个纬度^[86]。冬小麦强冬性品种种植北界在宁夏—甘肃及河北—辽宁北移趋势最明

显,分别北移200 km和100 km;冬性品种种植北界在山东—河北变化明显,向北移动310 km;弱冬性品种种植北界在安徽、江苏、河南和山东交界处变化明显,北移120~370 km^[87]。东北地区不同熟性的玉米品种可种植北界明显北移东扩,小兴安岭可以种植极早熟玉米品种,长白山地带可以种植早熟玉米品种,三江平原成为中熟和中晚熟玉米品种区域,松嫩平原的南部亦可种植晚熟玉米品种^[88]。与1951—1980年相比,1981—2010年长江中下游地区双季稻安全种植区增加 $11.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[89]。目前华北推广的强冬性冬小麦品种将被半冬性冬小麦品种所取代,比较耐高温的水稻品种将在我国南方地区占主导地位^[90]。福建省当年平均气温升高0.5℃时,水稻各熟性品种种植高度提高50 m,相当于北界北移0.25个纬度^[91]。气候变化背景下,河南省冬小麦品种更新特征是营养生长期缩短,生殖生长期延长,千粒重增加,从而提高了产量^[92]。

因此,气候变化背景下,有利于喜温和晚熟品种的种植,从而可以在一定程度上提高作物产量。

8 气候变化对作物生产潜力和气候资源利用率的影响

农业气候生产潜力是评价农业气候资源优劣的依据之一,农业气候生产潜力的大小取决于光、温、水三要素的数量及其相互配合协调的程度。研究表明:气候变暖对热量充足地区表现为负效应,辽宁地区未来由于热量资源的增加超出了玉米生长发育的适宜温度,2010年开始气候生产潜力明显下降;而吉林省和黑龙江省随晚熟品种的应用,气候生产潜力不断增加,气候生产潜力的高值区向东北方向移动^[93]。目前我国小麦单产最高潜力主要分布在黄土高原南部,总产潜力主要分布在环渤海山东半岛、江淮江汉平原及黄淮平原南阳盆地^[94]。气候变化背景下,光、热、水资源的不匹配是限制资源利用率的主要因素。北京市房山和昌平部分区域气候资源总量丰富,但水分限制使光、热、水配合程度较差,资源利用率较低^[95]。1960—2005年河北地区降水资源不断减少,尽管光热资源能满足作物生长需求,但冬小麦气候适宜度仍呈下降趋势^[96]。宁夏春玉米温度生产潜力呈逐年增加、降水和气候生产潜力呈波动中减少的趋势。未来气候变化显著影响春玉米气候生产潜力,其中降水量变化对春玉米气候生产

潜力的影响远大于气温变化影响,降水量及其变率对其限制作用将更明显^[97]。

目前世界上大部分地区农业气候资源利用效率不高,我国光能利用率、热量利用效率、水分利用效率以及综合利用效率在世界上均属于中等水平。其中平均光资源利用效率为0.08%~0.22%,大于等于0℃期间的光能利用率为0.18%,低于世界陆地植物的平均光能利用率0.3%,更低于高产地区农田平均光能利用率0.4%的水平。世界高产地区的降水利用效率比我国平均降水利用效率高33.30%~67.60%^[98]。但即便是利用效率高的国家,也蕴藏巨大开发潜力,因此提高农业气候资源利用效率成为亟待解决的重点课题^[99]。前人已经结合模糊数学的概念,考虑适应性措施对气候资源利用率的影响。Yuan等^[93]认为调整播种期可以有效提高资源利用率,但这种效果因地、因时而异,热量丰富地区推迟播种期,可以避开生长后期的高温天气,气候资源利用率增加明显,但对于热量不足地区调整播种期的影响不大。在未来气候暖干化背景下,增强品种的抗逆性能可有效提高作物气候生产潜力,提高气候资源利用率。玉米品种的抗逆性越强,增加的气候生产潜力值愈高。具备双重抗逆性(抗旱、耐高温)的品种在增加气候生产潜力方面的作用要优于只具备单一抗逆性(抗旱或耐高温)的玉米品种,而抗旱性的玉米品种对气候生产潜力影响大于耐高温性品种^[100]。

综合研究结果表明:气候变化对不同作物气候生产潜力的影响趋势不同,但在未来气候变化趋势下,水分可能是影响气候生产潜力的主要气候要素。农业适应气候变化的措施对提高农业气候资源利用率有一定补偿作用,从而证实了农业适应气候变化措施的有效性。

9 问题与展望

气候变化对农业生产影响的研究成果,在准确评价气候变化对农业生产的可能影响及其发展趋势、制定适应与减缓气候变化不良影响的对策与措施中起重要作用。然而,目前关于气候变化对农业影响评估方法和结果方面还存在很大的不确定性和许多亟待解决的问题,需进一步深入研究。

1) 气候变化情景的不确定性。2000年IPCC排放情景特别报告(The Special Report on Emis-

sions Scenario)中提出了SRES排放方案,在对已有排放情景进行分析的基础上设计了4种世界发展模式。主要分为4个情景“家族”,包含6个温室气体排放参考情景,其中A1和A2强调经济发展,但在经济和社会收敛程度上有所不同;B1和B2强调可持续发展,但在有关收敛程度上同样存在不同。2011年发布了新一代情景称为“典型浓度目标”(Representative Concentration Pathways, RCPs)。同样给出了4种情景,分别称为RCP8.5, RCP6, RCP4.5及RCP2.6。其中前3个情景大体同2000年方案中的SRES A2, A1B和B1相对应^[101]。由此也可以看出,未来温室气体排放情景仍处于讨论和研究中,最终结论存在不确定性。因此,如何选择适合本国的未来气候情景是准确模拟未来气候可能变化最重要的问题。

2) 气候模式对气候变化模拟存在不确定性。目前,全球用于开展未来气候变化模拟的全球气候模式和区域气候模式有数十个,不同模式输出结果相差甚远,虽然在温度的模拟方面趋势一致,但增温幅度也相差几倍。如第4次评估报告结果显示,与1980—1999年相比,21世纪末全球平均地表温度可能会升高1.1~6.4℃,最大值约为最小值的5倍;第5次评估报告结果显示,尽管升温的最大幅度小于第4次评估报告,但不同模式模拟的升温最大值与最小值之间的差距反而更大。而对于降水的模拟在不同区域间差异更大,甚至出现完全相反的结果。因此,如何选择合理的气候模式是开展气候变化影响评估的重要基础和前提。

3) 评估方法存在不确定性。气候变化对农业的影响评估通常使用3种方法:一是试验模拟方法,二是统计模拟方法,三是数值模拟方法。试验模拟方法的主要问题是精度难以控制,无论是开顶式气室还是FACE都不能很好控制环境变量的精度,模拟结果实际上仅仅反映了影响结果的一种趋势。而统计模拟方法通常是利用历史数据建立气候要素与作物产量之间的相关关系,输入模拟的未来气候情景,得到气候变化背景下的影响。因此,统计模拟方法存在统计模式外推的风险。数值模拟方法主要利用已有的作物生长模型输入未来气候情景模拟对作物的影响,但事实上,现有的大部分作物模型中的许多过程仍建立在统计关系上,未真正解决作物生长的机理过程,因此,同样也存在外推风险。其次,现有的作物模型对极端气候事件的响应不足,难以全

面反映气候变化对农业的影响。第三,基于单点建立的作物模型如何解决空间变异性从而应用于大范围区域的问题目前尚未很好解决。因此,如何将试验方法、统计方法和数值模拟方法结合,建立能完整反映气候要素对农作物综合影响的模拟模型才有可能真正解决气候变化对农作物的影响评估。

4) 极端天气气候对农业影响的研究有待进一步加强。农业是对气候变化响应最为敏感的领域之一。气候变化背景下,全球范围异常气候出现的概率将大大增加,这些极端天气气候事件将对农业生产可持续发展产生重要影响,尤其是极端天气事件的增多势必导致世界粮食生产的不稳定。因此,气候变化背景下该方面相关问题将是未来研究的重要课题之一。

5) 气候变化背景下农业病虫害的影响评估较少。历史资料分析表明:气候变暖可使大部分病虫害发育历期缩短、危害期延长,害虫种群增长力增加、繁殖世代数可比常年增加1个代次,发生界限北移、海拔界限高度增加,危害地理范围扩大,危害程度呈明显加重趋势。但也使一些对高温敏感的病虫害呈减弱趋势,致使小麦条锈病、蚜虫等病虫害由低海拔地区向高海拔地区迁移危害^[102]。一定区域、时段的降水偏少、高温干旱有利于部分害虫的繁殖加快、种群数量增长,降水量、雨日偏多有利于部分病害发生程度和害虫迁入数量的明显增加,病虫害损失加重;暴雨洪涝可使部分病害发生突增,危害显著加重;暴雨可使部分迁入成虫数量突增、田间幼虫数量锐减^[103]。暖冬可使病虫害进入越冬阶段推迟,延长病菌冬前侵染、冬中繁殖时间,降低害虫越冬死亡率,增加冬后菌源和虫源基数;病虫害发生期、迁入期、危害期提前;越冬北界北移、海拔上限高度升高;持续暖冬可使冬后虫源基数显著增加^[104]。因为对未来气候变化预估的可靠性,特别是对降水预估的可靠性不足,所以未来病虫害的影响程度仍难以估计。因此,深入研究农业病虫害的发生发展规律及其对气候变化的响应是未来十分重要的研究内容之一。

本文主要回顾了气候变化对农作物(粮食作物为主)的影响研究。但气候变化对农业的影响涉及内容十分丰富,如气候变化对经济作物、经济林果、畜牧业、农田生态系统等的影响,以及气候变化背景下农业气象灾害、病虫害等极端气候事件变化对农业生产的影响,有待以后进一步完善。

参考文献

- [1] Alexandrov V A, Hoogenboom G. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104(4): 315-327.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-989.
- [3] 秦大河, 罗勇. 全球气候变化的原因和未来变化趋势. 科学对社会的影响, 2008(2): 16-21.
- [4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-1552.
- [5] IPCC. Climate Change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press. [2014-05-06]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- [6] 姜彤, 李修仓, 巢清尘, 等. 《气候变化2014: 影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知. 气候变化研究进展, 2014, 10(3): 157-166.
- [7] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [8] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.
- [9] 汤绪, 杨续超, 田展, 等. 气候变化对中国农业气候资源的影响. 资源科学, 2011, 33(10): 1962-1968.
- [10] Adams R M. Global climate and agriculture: An economic perspective. *American Journal of Agricultural Economics*, 1989, 71(5): 1272-1279.
- [11] 赵俊芳, 郭建平, 马玉平, 等. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2922-2930.
- [12] 刘彦臻, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 905-910.
- [13] 李克让, 陈育峰. 中国全球气候变化影响研究方法的进展. 地理研究, 1999, 18(2): 214-219.
- [14] 孙白妮, 门艳忠, 姚凤梅. 气候变化对农业影响评价方法研究进展. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 165-168.
- [15] Chaudhuri U N, Kirkham M B, Kanemasu E T. Root growth of winter wheat under elevated carbon dioxide and drought. *Crop Sci*, 1990, 30: 853-857.
- [16] Finn G A, Brun W A. Effect of atmospheric CO₂ enrichment on growth, nonstructural carbon hydrates content and root nodule activity in soybean. *Plant Physiology*, 1982, 69: 327-331.
- [17] 蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气CO₂浓度升高对植物的直接影响——国外十余年来模拟试验研究之主要手段及基本结论. 植物生态学报, 1997, 21(6): 489-502.
- [18] 王春乙. OTC-1型开顶式气室中CO₂对大豆影响的试验结

- 果. 气象, 1993, 19(7): 23-26.
- [19] 郭建平, 高素华. CO₂ 浓度倍增对春小麦不同品系影响的试验研究. 资源科学, 1999, 21(6): 25-28.
- [20] 陈鹏狮, 米娜, 张玉书, 等. 气候变化对作物产量影响的研究进展. 作物杂志, 2009(2): 5-9.
- [21] Jones C A, Kiniry J R. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. TX: Texas A & M University Press, College Station, 1986: 194.
- [22] Boogaard H L, van Diepen C A, User's Guide for the WOFOST 7. 1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1. 5. 1 DLO Wageningen: Win and Staring Centre. 1998: 1-40.
- [23] 高亮之, 金之庆. 作物模拟与栽培优化原理的结合——RC-SODS. 作物杂志, 1994(3): 4-7.
- [24] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 华文出版社, 2000.
- [25] Christian B, Benjamin S, Maud B, et al. From GCM grid cell to agricultural plot scale issues affecting modeling of climate impact. *Phits T Roy Soc B*, 2005, 360: 2095-2108.
- [26] Easterling W E, Norman J R. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 59: 17-34.
- [27] Gregory J C, William K, Christopher L, et al. Response of soybean and sorghum to varying spatial scales of climate change scenarios in the Southeastern United States. *Climatic Change*, 2003, 60: 73-98.
- [28] David B L, Christopher B F, Kimberly N C, et al. Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141: 208-218.
- [29] 王馥棠. CO₂ 浓度增加对植物生长和农业生产的影响. 气象, 1993, 19(7): 8-13.
- [30] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化情境下东北地区玉米产量变化模拟. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1448-1452.
- [31] 金之庆, 葛道阔, 郑喜莲, 等. 评价全球气候变化对我国玉米生产的可能影响. 作物学报, 1996, 22(5): 513-524.
- [32] 尚宗波. 全球气候变化对沈阳地区春玉米生长的可能影响. 植物学报, 2000, 42(3): 300-305.
- [33] 冯利平, 高亮之. 小麦生育期动态模拟模型的研究. 作物学报, 1997, 23(4): 418-424.
- [34] Kobayashi K, Liefferring M, Miura S. Growth and nitrogen uptake of CO₂ enriched rice under field conditions. *New Phytol*, 2001, 150: 223-229.
- [35] Rogers H H, Cure J D, Smith J M. Soybean growth and yield response to elevated carbon dioxide. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1986, 24: 113-128.
- [36] 刘建国. 全球 CO₂ 浓度升高和气候变暖对六个生物组织层次的影响//当代生物学博论. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [37] 王修兰. 二氧化碳、气候变化与农业. 北京: 气象出版社, 1996.
- [38] 林而达, 张厚宣, 王京华. 全球气候变化对中国农业影响的模拟. 北京: 中国农业科技出版社, 1997.
- [39] 王春乙, 郭建平, 白月明. OTC-1 型开顶式气室 O₃ 发生、控制与测量系统及物理性能评价. 应用气象学报, 2000, 11(3): 383-384.
- [40] 王春乙, 白月明, 郑昌玲. CO₂ 和 O₃ 浓度增加对作物影响的研究进展. 气象学报, 2004, 62(6): 875-881.
- [41] 郑有飞, 何雨红, 甘思旧. 紫外辐射增加后麦田的小气候特征研究(D). 农业环境保护, 2002, 21(5): 406-409.
- [42] 郑有飞, 简慰民, 李秀芬, 等. 紫外辐射增强对大豆影响的进一步分析. 环境科学学报, 1998, 18(5): 549-552.
- [43] 李勇, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 I. 华南地区农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2605-2614.
- [44] 代姝玮, 杨晓光, 赵孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 II. 西南地区农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452.
- [45] 徐超, 杨晓光, 李勇, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 III. 西北干旱区农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(3): 763-772.
- [46] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IV. 黄淮海平原半湿润暖温带-玉两熟灌溉农区农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(4): 905-912.
- [47] 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3177-3188.
- [48] 李勇, 杨晓光, 代姝玮, 等. 长江中下游地区农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2912-2921.
- [49] 谭方颖, 王建林, 宋迎波, 等. 华北平原近 45 年农业气候资源变化特征分析. 中国农业气象, 2009, 30(1): 19-24.
- [50] 周伟东, 朱洁华, 李军, 等. 华东地区热量资源的气候变化特征. 资源科学, 2009, 31(3): 472-478.
- [51] 孙兰东, 刘德祥. 西北地区热量资源对气候变化的响应特征. 干旱气象, 2008, 26(1): 8-12.
- [52] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [53] 仇巧玲. 河套地区初终霜日变化趋势分析及霜冻预防. 内蒙古气象, 2013(5): 21-23.
- [54] 王菱, 谢贤群, 苏文, 等. 中国北方地区 50 年来最高和最低气温变化及其影响. 自然资源学报, 2004, 19(3): 337-343.
- [55] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138: 82-92.
- [56] 莫伟强, 黎伟标, 许吟隆, 等. 中国地面气温和降水变化未来情景的数值模拟分析. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(5): 104-108.
- [57] 陈少勇, 张康林, 邢晓宾, 等. 中国西北地区近 47a 日照时数的气候变化特征. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1142-1152.
- [58] 崔读昌. 气候变暖对水稻生育期影响的情景分析. 应用气象学报, 1995, 6(3): 361-365.

- [59] 丁丽佳,谢松元. 气候变暖对潮州水稻主要生育期的影响和对策. 中国农业气象, 2009, 30(增刊 I): 97-102.
- [60] 薛昌颖,刘荣花,吴骞. 气候变暖对信阳地区水稻生育期的影响. 中国农业气象, 2010, 31(3): 353-357.
- [61] 万信,王润元. 气候变化对陇东冬小麦生态影响特征研究. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 80-84.
- [62] 车少静,智利辉,冯立辉. 气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策. 中国农业气象, 2005, 26(3): 180-183.
- [63] 余卫东,赵国强,陈怀亮. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响. 中国农业气象, 2007, 28(1): 9-12.
- [64] 周林,王汉杰,朱红伟. 气候变暖对黄淮海平原冬小麦生长及产量影响的数值模拟. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2003, 4(2): 76-82.
- [65] 段金省,牛国强. 气候变化对陇东塬区玉米播种期的影响. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 235-238.
- [66] Darwin R, Tsigas M, Lewandrowski J, et al. World Agriculture and Climate Change: Economic Adaptations. Agricultural Economic Report No. 703, America, Washington, United States Department of Agriculture, 1995: 1-86.
- [67] Tubiello F N, Donatelli M, Rosenzweig C, et al. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems; Model predictions at two Italian locations. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(2-3): 179-189.
- [68] 王馥棠,张宇. 气候变暖对我国水稻生产可能影响的数值模拟试验研究. 应用气象学报, 1995, 6(增刊 I): 19-25.
- [69] 居辉,熊伟,许吟隆,等. 气候变化对我国小麦产量的影响. 作物学报, 2005, 31(10): 1340-1343.
- [70] 熊伟,冯颖竹,高清竹,等. 气候变化对石羊河、大凌河流域灌溉玉米生产的影响. 干旱区地理, 2011, 34(1): 150-159.
- [71] 成林,刘荣花,王信理. 气候变化对河南省灌溉小麦的影响及对策初探. 应用气象学报, 2012, 23(5): 571-577.
- [72] 王培娟,张佳华,谢东辉,等. A2 和 B2 情景下冀鲁豫冬小麦气象产量估算. 应用气象学报, 2012, 22(5): 549-557.
- [73] 袁东敏,尹志聪,郭建平. SRES B2 气候情景下东北玉米产量变化数值模拟. 应用气象学报, 2014, 25(3): 284-292.
- [74] 熊伟,杨婕,林而达,等. 未来不同气候情景下我国玉米产量的初步预测. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1092-1101.
- [75] 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. 生态学报, 2013, 33(2): 509-518.
- [76] 熊伟,林而达,蒋金荷,等. 中国粮食生产的综合影响分析. 地理学报, 2010, 65(4): 397-406.
- [77] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467: 43-51.
- [78] 李立军. 中国耕作制度近 50 年演变规律及未来 20 年发展趋势研究. 北京: 中国农业大学, 2004: 1-204.
- [79] 杨晓光,刘志娟,陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329-336.
- [80] 杨晓光,刘志娟,陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1562-1570.
- [81] 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 II. 南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1860-1867.
- [82] 李克南,杨晓光,刘志娟,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响分析 III. 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2088-2097.
- [83] 张厚瑄. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 I. 气候变化对我国种植制度的影响. 中国农业气象, 2000, 21(1): 10-14.
- [84] 付雨晴,丑洁明,董文杰. 气候变化对我国农作物宜播面积的影响. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 110-117.
- [85] 刘志娟,杨晓光,王文峰,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 IV. 未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能影响. 中国农业科学, 2010, 43(11): 2280-2291.
- [86] 李勇,杨晓光,王文峰,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 V. 气候变暖对中国热带作物种植北界和寒害风险的影响分析. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2477-2484.
- [87] 李克南,杨晓光,慕臣英,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响分析 V III. 气候变化对中国冬小麦冬春性品种种植界限的影响. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1583-1594.
- [88] 贾建英,郭建平. 东北地区近 46 年玉米气候资源变化研究. 中国农业气象, 2009, 30(3): 302-307.
- [89] 李勇,杨晓光,叶清,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 IX. 长江中下游地区单双季稻高低温灾害风险及其产量影响. 中国农业科学, 2013, 46(19): 3997-4006.
- [90] 孙智辉,王春乙. 气候变化对中国农业的影响. 科技导报, 2010, 28(4): 110-117.
- [91] 陈惠,林添忠,蔡文华. 气候变化对福建粮食种植制度的影响. 福建农业科技, 1999(1): 6-7.
- [92] 孙倩,黄耀,姬兴杰,等. 气候变化背景下河南省冬小麦品种更新特征. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 282-288.
- [93] Yuan B, Guo J P, Ye M Z, et al. Variety distribution pattern and climatic potential productivity of spring maize in North-east China under climate change. *Chin Sci Bull*, 2012, 57(14): 1252-1262.
- [94] 蔡承智, van Velthuis H, Fischer G, 等. 基于 AEZ 模型的中国农区小麦生产潜力分析. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 182-184.
- [95] 田志会,郭文利,赵新平,等. 北京山区农业气候资源系统的模糊综合评判. 山地学报, 2005, 23(4): 4507-4512.
- [96] 魏瑞江,张文宗,康西言,等. 河北省冬小麦气候适宜度动态模型的建立及应用. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 5-9.
- [97] 赖荣生,余海龙,黄菊莹. 宁夏中部干旱带气候变化及其对春玉米气候生产潜力的影响. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 108-114.
- [98] 崔读昌. 中国粮食作物气候资源利用效率及其提高的途径. 中国农业气象, 2001, 22(2): 25-32.
- [99] 崔读昌. 世界谷物产量与农业气候资源利用效率. 自然资源学报, 1995, 10(1): 85-94.

- [100] Xu Y H, Guo J P, Zhao J F, et al. Scenario analysis on the adaptation of different maize varieties to future climate change in Northeast China. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(3):469-480.
- [101] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 新一代温室气体排放情景. 气候变化研究进展, 2012, 8(4):305-307.
- [102] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响. 中国农业科学, 2012, 45(10):1926-1934.
- [103] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 降水变化对中国农作物病虫害的影响. 中国农业科学, 2012, 45(10):1935-1945.
- [104] 霍治国, 李茂松, 李娜, 等. 季节性变暖对中国农作物病虫害的影响. 中国农业科学, 2012, 45(10):2168-2179.

Advances in Impacts of Climate Change on Agricultural Production in China

Guo Jianping

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Climate change, the main feature of which is global warming, has become one of the important environmental problems in the world. Also, it is a matter of general concern by the scientific community, governments and the social public. Climate change has brought a series of problems that beyond the range of nature changes in the earth itself, which poses a serious threat to human survival and social economy. Agriculture, especially crop production and food security, is one of the largest and the most direct industry affected by climate change. Therefore, the impact of climate change on agricultural production is always one of the hottest issues in the field of climate change. The present situation and progress in the research field of climate change impact on agricultural production in China is summarized systematically, introducing research methods, the progress in the experiment of greenhouse gases concentration enrichment in the atmosphere impact on crops, impacts and future trends of climate change on agricultural climate resources, the possible impact of climate change on crop growth and yield, impacts and future trends of climate change on agricultural planting system and varieties distribution, impact of climate change on crop potential productivity, impact of measures of adapting to climate change to increase the utilization ratio of agricultural climate resources and so on. On the basis, current problems in the impact assessment of climate change on agriculture is proposed too. In order to improve the reliability and rationality of the impact assessment for climate change on agriculture, more attention needs to be paid to the research of uncertainty of future climate change scenarios, model prediction and evaluation method. In addition, further researches are also needed about the impact of extreme weather events under climate change on agricultural production, the impact of climate change on agricultural plant diseases and insect pests, impacts of climate change on cash crops, fruit, animal husbandry and farmland ecosystem.

Key words: climate change; agricultural production; impact assessment; research advance