

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20130501

· 研究综述 ·

气候变化对农业和粮食生产影响 的研究进展与发展方向*

覃志豪^{1,2}, 唐华俊¹, 李文娟¹, 赵书河³

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210046;
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210046)

摘要 农业是以作物生长为基础, 因此, 受气候变化的影响很大。我国幅员辽阔, 东西和南北之间气候差异显著。气候变化将直接导致我国主要农区水资源和热量资源时空分布格局变化。农业生产所依赖的土壤肥力和作物品种资源及其抗逆性也会在气候变化的作用下发生变化。气候变化直接导致局部地区农业气候灾害和农业病虫害频度与强度加剧。在气候变化作用下, 我国农业作物种植制度、农业生产结构和地区布局将会发生相应的变化, 导致我国粮食产量波动变化, 甚至影响到国家粮食安全。因此, 迫切需要深入分析气候变化对我国农业和粮食生产影响的研究进展, 提出进一步深入研究的重点发展方向。目前, 国内外围绕气候变化对农业和粮食生产的影响开展了很多研究。综合进来, 主要有集中在气候变化对农区水热土资源要素时空分布变化的影响, 对作物品种抗逆性、抗逆基因、品种改良的影响与适应, 对作物种植制度、生产结构与地区布局的影响与适应, 对农业生物灾害和非生物灾害尤其是农业旱涝灾害发生的影响, 以及对粮食产量、国家粮食安全和农业发展的影响等方面。从发展趋势看, 深入开展气候变化对我国农业和粮食生产系统的影响机理及适应机制研究, 科学地把握气候变化背景下水热资源条件、土壤肥力、品种资源等变化规律, 揭示农业病虫害流行暴发特征和气象灾害发生机理, 模拟、分析和预测气候变化对我国农业、粮食生产和国家粮食安全的影响程度和变化趋势, 具有重大的科学价值和现实意义, 因而也将是气候变化对农业和粮食生产影响研究的重点发展方向。

关键词 气候变化 农业 粮食生产 影响机理 适应机制

气候变化研究是 20 世纪中后期发展起来的一个跨学科前沿领域, 其研究已经远超出大气科学研究范畴, 涉及到地球系统科学和社会经济科学的方方面面。气候变化及其可能导致的后果和影响是多方面的和广泛的, 1988 年建立的政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在推动评估与理解人为引起的气候变化、这种变化的潜在影响以及提出适应和减缓对策方面发挥了重要作用 (秦大河等, 2007; 林尔达等, 2007)。国际地圈与生物圈计划 (IGBP)、世界气候研究计划 (WCRP)、人类与发展计划 (IHDP) 及美国的对地观测计划 (EOS) 等全球性研究计划从不同角度开展了气候变化及其影响研究。影响力较大的《Science》杂志 1992~2004 年就有 480 篇有关气候变化的科学事实、影响及其应对方案的报道 (郑新奇等, 2005)。

农业尤其是粮食生产是以作物生长为基础, 直接依赖于水热土等自然要素, 因此对气候变化非常敏感。可以说, 农业是我国受气候变化影响较大的行业 (周义等 2011)。我国是一个人口大国, 经济发展加速, 生活水平不断提高, 需要确保国内粮食等大宗农产品稳定供给。积极应对气候变化的不利影响, 保持我国粮食生产健康发展, 稳定粮食产量, 确保国家粮食安全, 是我国的基本国策 (Simelton, 2011; 朱晓禧, 2012)。目前, 国内外围绕气候变化对农业的影响已开展了很多研究。该文将从水热资源、作物品种资源、农业灾害、作物布局等角度综合分析现有气候变化对农业尤其是粮食生产影响的研究进展。在此基

础上,进一步提出深入研究的主要发展方向,以推动气候变化对我国农业和粮食生产影响研究的发展。

1 气候变化对农业自然资源要素时空分布变化的影响

农业是自然再生产和社会再生产重合的产业部门,是以农作物生长发育为基础。光、热、水和土壤等资源要素是决定农业生产的基本自然要素。气候变化,无论是变暖还是变冷以及温室气体浓度变化,将会直接导致辐射、光照、热量、温度、湿度、风速等气候要素时空格局发生变化,从而对农业生产形成全方位、多层次的影响。我国面积超过全国 50% 的西部干旱半干旱地区,生物量仅占全国的 13%;面积不到全国一半的东部地区,生物量占全国的 87%。这种东西部土地资源自然生产力的差异主要由于东西部水分条件的差异引起的。此外,东部地区生物量从热带向寒温带递减,南北相差 5~6 倍,这种南北差异主要是南北热量条件的差异所造成的(唐华俊和周清波,2009)。气候变化对土壤的影响虽然复杂,但可以归结为是通过土壤与环境要素尤其是光、热、水等要素之间的联系来发生作用,进而影响土壤有机质、土壤气体、土壤水分、矿物质、土壤微生物活动和繁殖而影响土壤肥力(Van et al., 1993;肖辉林和郑习健,2001)。很多学者利用模拟模型分析研究了气候变化对土壤肥力的影响,高鲁鹏等(2005)利用 CENTURY 模型对草原化草甸植被下黑土在环境要素变化背景下的演化趋势进行定量模拟,结果表明:气温升高或降水量减少将会导致土壤有机碳含量的降低;相反,气温降低或降水量增加则有利于土壤有机碳的增多,但以气温变化的作用为主导。秦小光等(2001)利用陆地生态模型开展黄土高原土壤生物地球化学过程的定量模拟,深入研究了不同气候条件下黄土高原土壤有机碳变化的敏感性试验,结果表明降水变化是影响该地区土壤有机碳变化的主要因素。白人海(2005)利用土壤调查数据,分析了松嫩流域黑土地有机碳含量的分布状况和近 50 年来的变化趋势,并结合该地区气温和降水等气候要素的变化,分析了气候变化对该地区土壤碳含量变化的影响。土壤有机质是土壤肥力的重要构成要素。为了提高农业生产对气候变化的适用性,深入研究不同气候要素时空变化对土壤有机质和土壤肥力的影响显得越来越重要。

2 气候变化对农作物品种资源及其抗逆性的影响与育种改良适应

农业的自然再生产特性决定了农业生产受自然条件尤其是光热水要素的直接制约。不同地区适宜生长的作物品种与种类和当地的气候条件有密切关联(郭建平等,2001;Keeling et al., 1982)。气候变化,也即主要气象要素的变化,将在很大程度上对农作物品种资源尤其是种类及其适生性等产生影响。气候变暖,气温升高,将改变作物生长季节的长短,可能会加剧对光热敏感作物的吸收作用,降低作物干物质积累,最终导致作物产量降低。气候变暖大大增强我国多数区域的有效积温,有效延长了作物生长周期,为培育晚播早熟小麦品种与晚熟玉米品种提供了可能,可以大大提高光热资源的利用率。因此,气候变化对农业的影响有双重表现,一方面,气候变化可能会加剧农业生产的逆境(包括生物逆境与非生物逆境),另一方面它又增加了宝贵的光热资源,有利于作物生长发育。陈宜瑜等(2005)指出,加快培育和种植较为“强悍”的农作物,合理改变农作物种植方式,是应对全球气候变化、保障粮食生产的有效途径之一。国际水稻研究所(IRRI)一直致力于研究开发新的耐逆水稻新品种,同时认为还应发展作物生产管理技术。我国在应对全球气候变化的主要农作物多样性布局、基因资源发掘和新品种培育方面比较滞后,相关的理论和技术储备薄弱,应进一步加强气候变化对我国主要农作物品种资源影响的研究,提出应对未来可能气候变化的我国主要农作物品种育种改良策略。

3 气候变化对农作物种植制度与生产布局的影响

虽然农业生产受自然适宜性的制约,但同时它也是一种社会经济再生产过程。区域农业发展,是农业生产活动适应自然条件的结果,直接表现为不同地区之间的作物种植制度和生产布局差异。因此,气候变化对作物种植制度、生产结构和区域布局都有较大的影响(李伟君和王春乙,2010)。金之庆等(2002)利用模型的方法评价了气候变暖对研究区域作物布局和品种布局的阶段性影响,分析了我国冬小麦安全种

植北界在研究地区可能出现的地理位移。杨晓光等(2010)的最新研究表明,随着温度的升高,1981~2007年间中国一年两熟制、一年三熟制的种植北界都较之1950~1980年有不同程度北移,我国北方辽宁省、河北省、山西省、陕西省、内蒙古、宁夏、甘肃省和青海省冬小麦的种植北界不同程度北移西扩。气候变暖也使双季稻的种植北界不同程度北移。张厚瑄(2000)指出,气候变暖对我国作物种植制度将有较大的影响,我国主要农区光热量资源在气候变化作用下将有不同程度的增加,有利于农业丰产,一年二熟和一年三熟的种植北界将有所北移。但是,降水变化的影响可能对我国农业生产构成不利影响,因此,种植制度在气候变化背景下的演变仍具有较大的不确定性。云雅如等(2005)研究指出,黑龙江省过去20年水稻播种范围向北和向东扩展,种植面积比重显著增加,小麦种植范围大幅向北退缩,与气候变暖带来的积温增加与积温带北移东扩密切相关。熊伟等(2006)运用两种温室气体排放方案下模拟了气候变化对我国小麦生产发展变化的可能影响。林而达(1997)认为,在大气CO₂浓度倍增的情况下,我国水稻主产区热量资源趋于丰富,但温度升高使作物发育速率加快,生育期缩短,若品种和播种、移栽期不变,水稻产量将下降。李玉娥和张厚瑄(1992)预测了CO₂浓度增加对我国北方春玉米和夏玉米都将有增产作用。王修兰和徐师华(1994)采用半封闭式同化箱测量装置进行的盆栽大豆在不同CO₂浓度下的生物量与经济产量变化研究也支持了CO₂浓度增大对大豆产量增长有积极作用的观点。李虎等(2012)指出,我国农业适应气候变化在技术上与发达国家相比仍有较大差距,迫切需要从种植制度、作物布局、品种选育和农业基础设施等方面加强研究。

4 气候变化对农业病虫害、农业旱涝等气象灾害的影响

国外很早就对气候变化对农作物病虫害发生流行趋势的影响开展了研究(Jhorar et al., 1998; Meinke et al., 1998; Cannon et al., 1998)。农业病虫害实际上也是一种生物过程,有利的气象条件,是农业病虫害发生、流行暴发的基础。农业病虫害的大范围流行暴发,都直接与有利气象条件的影响有关。气候变暖,尤其是暖冬,将十分有利于北方农区各种农作物病虫害源(菌)安全越冬(张厚瑄, 2000)。在暖冬作用下,主要农作物病虫害越冬基数将会增加、越冬死亡率降低、安全越冬的地理范围扩大,直接导致来年度病虫害发生频度和危害程度加剧(叶彩玲和霍治国, 2001)。气候变暖可使水稻黏虫越冬北界北移约3个纬度、稻飞虱越冬北界北移约2.5~3.5个纬度,有效扩大黏虫和稻飞虱的迁飞范围和增加繁殖代数,直接导致我国稻作区这两种主要虫害区域范围扩大(李淑华, 1993; 张润杰和何新风, 1997)。另一方面,从生态系统的角度来看,气候变暖将会引起生物种间关系变化,气温升高将会扰乱生态系统中害虫-捕食者、害虫寄生天敌等种群间的平衡关系,有些害虫的天敌可能因适应不了气候变化而缩减甚至消亡,相反在缺少天敌的有效控制条件下一些害虫则会迅速繁殖,形成流行暴发,直接威胁农业稳产丰产(李祎君等, 2010; 刘雨芳和古德祥, 1997)。

我国气候的形成与变化受太平洋、印度洋、北冰洋等全球性地理单元的重要影响(Qin et al., 2013)。这些全球性地理单元的动态变化,尤其是异常变化,是我国农业灾害发生与发展的大气环流成因(安芷生等, 2004; 覃志豪等, 2005)。全球气候变化,将会导致厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)动态变化,进而造成西太平洋暖池海水热力、青藏高原上空热力场、亚洲季风环境和西太平洋副热带高压异常变化,是我国华北、长江中下游、华南和西南地区农业旱涝等气象灾害发生与发展的大气环流起因(叶笃正和黄荣辉, 1996; 黄荣辉等, 1999)。李克让等(1997)指出,中国气候独特,大范围的气候干旱成因是中国气候形成基础的大气环流尤其是东亚夏季风、副热带高压、西风带环流和热带高空环流的异常变化。青藏高原对我国西北干旱气候形成有不可推卸的作用。在ENSO事件处于活跃发展的时段,我国江淮流域夏季的降水量就会相应地异常偏多,往往造成较大范围的洪涝灾害;相反,当ENSO活跃时,我国黄河流域和华北地区的降雨量明显偏少,导致严重干旱。当东太平洋海温处于下降阶段,我国淮河流域的降雨往往会偏少,发生干旱;而黄河流域和华南地区降雨量则偏多,造成洪涝灾害;当西太平洋暖池的海温偏低时,长江中下游地区和淮河流域往往出现较强的降雨,造成严重的洪涝灾害(符淙斌和腾星林, 1988;

Huang and Wu, 1989)。2008 年初中国南方遭遇严重的冰雪灾害、2009 年初中国北方小麦集中产区发生极大干旱灾害、2010 年初我国新疆内蒙等北方地区发生严重的雪灾冻害和西南地区持续干旱，很大程度上和气候变化导致我国大气环流产生季节性和区域性振荡有关。未来全球气候变化仍将持续加剧，对我国气象灾害发生的频率、强度和区域分布产生作用，进而影响到粮食主产区农业旱灾、洪涝、台风、低温冷害、高温灾害等气象灾害时空格局的变化，威胁粮食生产持续稳定发展，影响国家粮食安全（Qin et al., 2013）。

5 气候变化对农业（尤其是粮食产量和粮食安全）和农村社会经济发展的影响

气候变化对农业（尤其是粮食产量和粮食安全）和农村社会经济发展的影响已成为气候变化研究的一个重点领域（Schmidhuber and Tubiello, 2007; Tao et al., 2009）。肖国举（2007）认为，气候变暖将会导致我国部分地区的农作物产量下降，1980~2000 年气候变暖引起黄淮海农业区雨养小麦全面减产，其中西部减产幅度大于东部。张建平等（2005, 2006）表明，在水稻结实期，温度上升 1~2℃ 将会使水稻产量下降 10%~20%；温度每增加 1℃，我国玉米平均产量将减少 3%。在未来 100 年内，气候变化将会使我国华北地区冬小麦产量会有不同程度的下降，平均减产 10.1%。张明伟等（2011）指出，未来 90 年内气候变化可能导致华北地区冬小麦发育速度加快，生长期变短，使小麦平均减产 8% 左右。秦大河（2002）和林而达等（2006）的模拟研究表明，未来 30 年内我国种植业产量在总体上将因全球变暖而可能会减少 5%~10%，其中小麦、水稻和玉米三大作物均以减产为主。当降水在适宜范围内，气候变暖可使旱作区农作物产量增加（邓振镛等，2008）。同时，Wang et al.（2009）以全国 28 个省 8 405 个雨养农户和灌溉农户的截面调查数据为基础，以温度和降水为自变量，以农户农作物净收益为因变量，进行了相关分析，结果表明，气候变暖不利于雨养农业，但有利于灌溉农业。Morton（2007）通过典型调查和归纳推理法研究了全球气候变化对小农户经济的影响，并指出，小农户对气候变化尤其是气候变化介导的农业灾害较敏感，并且应对灾害的能力较弱。从全球角度来看，这些小农户群体主要分布在亚热带地区，这些地区农业灾害频繁，由于生产力水平低，生产规模不大，这些小农户的生产投入通常不足，适应气候变化的能力较低。

6 以气候变化为驱动的粮食生产发展变化模型和数值模拟

气候变化驱动的粮食生产发展变化模型常用的做法是，以气候变化数据（即气温、降水等气候因子数据）作为模型输入数据，通过模型的复杂函数过程和状态变量运算过程，最终得到气候变化模拟结果（Tao et al., 2008; Xiao et al., 2008）。这些模型从早期简单的统计经验模型，发展到现在广泛应用的复杂作物机理模型。经验模型多是基于历史数据和气象要素之间的相关关系，其建模的方法包括简单回归、多元线性回归、偏最小二乘法回归，以及神经网络等（任建强等，2006; Lobell et al., 2008）。作物机理模型，如 EPIC, DSSAT 等，是以大气—作物—土壤之间的物质和能量传输和转化为基础，建立作物生长模型，用来模拟大气、作物、土壤、管理等因子变化对作物生长发育和产量的影响，以及作物生长对大气、土壤的反馈作用，因而是一种面向过程的动态模型，在气候变化对农业影响方面有较广泛的应用（杨鹏等，2008）。作物机理模型多是单点模型，适于小区域的模拟分析研究，但是通过与 GIS 的集成，作物模型能被应用于区域甚至全球农作物单产模拟研究（Tan et al., 2003; Jones and Thornton, 2003）。唐国平等（2000）利用 3 个大气环流模型来构建中国未来气候变化 6 种情景模式，利用 IIASA 的农业生态地带 AEZ 模型评估分析了气候对中国不同区域的复种指数、可耕种土地面积、潜在历史产量及其土地生产潜力的影响。熊伟等（2008）采用区域气候模式与 CERES-Maize 模型相结合的方法，模拟了基准气候（1961~1990 年）和 A2、B2 两种温室气体排放方案下 2011~2100 年我国雨养和灌溉玉米产量，初步预测了未来不同气候情景下玉米产量的变化状况。Reidsma 等（2009）利用 WOFOST 模型对欧盟 15 国的玉米产量进行了模拟分析，并通过比较分析模拟产量和实际观测产量的差异性，进一步分析气候变化因素之外的其他

因子对作物产量变化的影响。张建平(2005, 2006)利用 WOFOST 作物模型, 结合气候模式输出的气候情景资料, 定量模拟了未来 100 年气候变化对我国南方双季稻发育和产量和华北地区冬小麦生产的影响。

7 结论

综上所述, 可以看到, 全球气候变化及其影响研究已经成为了一个全球广泛关注的科学问题, 成为一个融合大气科学、地理科学、环境科学等众多自然科学和社会科学的前沿研究领域。虽然有关气候变化对农业和粮食生产影响的研究已经得到了关注(李虎等, 2012), 但这方面的研究与其他领域相比, 还是比较薄弱, 整体水平落后。从将来发展趋势看, 深入开展气候变化对我国粮食生产系统的影响机理及适应机制研究, 具有重大的科学价值和现实意义。

围绕粮食生产系统, 开展气候变化与粮食生产之间的相互作用的系统研究, 是未来发展的主要方向。以往的全球气候变化研究只是围绕粮食生产系统的某一方面, 并未将粮食生产作为一个有机的整体系统来开展研究。事实上, 全球变化会导致粮食主产所需要的水热资源要素的发生时空分布格局变化, 促使粮食生产依存的土壤肥力动态变化, 诱导作物品种资源及其抗逆性改变, 加剧区域性的灾害要素形成, 这些因素综合影响和共同作用, 对我国粮食生产过程和格局发生重大影响, 进而直接影响国家粮食安全。因此, 深入开展气候变化对我国粮食生产系统的影响机理和适应机制, 将有助于我们更好地摸清气候变化对我国粮食安全的影响程度, 提出我国应对气候变化的粮食生产发展策略和粮食主产区农村经济社会发展对策。

对于气候变化与粮食生产系统之间相互影响和相互作用这一前沿研究领域, 还有许多重大基础理论迫切需要进一步突破。粮食生产涉及的因素很多, 是一个非常复杂的自然-社会系统。气候变化不仅是全球变暖或者变冷的问题, 而且也常引进的极端气候事件的频发, 导致农业灾害。同时, 我国地域辽阔, 南北和东西差异都非常大。因此, 气候变化与粮食生产系统之间的相互影响和相互作用, 也呈现出复杂而多样。目前, 虽然已有许多研究探讨了气候变化对粮食生产的影响, 但还有许多重大基础理论尚未得到彻底解答, 如何科学把握气候变化背景下我国各地尤其是粮食主产区水热资源条件、农田土壤肥力、农作物品种资源等生产要素的变化趋势和规律, 弄清主要农区农业病虫害流行暴发以及气象灾害发生的特征和机理, 定量分析气候变化对我国主要农区作物种植制度、生产结构和空间布局的影响, 对我国粮食消费需求、粮食进出口、农产品价格变化、农村经济发展和农民收入增长的影响和作用, 都将是需要重点进行重点理论、技术方法突破的研究方向和前沿学术问题。集成应用气候气象学、农学尤其是作物育种和作物栽培学、农业灾害学(包括气象灾害和病虫害)、地学、经济学等多门学科理论方法, 综合运用典型区域调研解剖、野外台站试验观测、实验室样品分析、多元统计分析、对地遥感监测与定量反演、GIS 空间模拟等技术途径, 深入开展上述重大理论问题的基础研究, 科学阐明气候变化对我国粮食生产系统的影响机理与适应机制, 是未来气候变化对农业影响的重要发展方向。

致谢: 该文的研究得到国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“气候变化对我国粮食生产系统的影响机理与适应机制研究”(编号: 2010CB951504)资助。中国农业科学院作物科学研究所景蕊连博士、中国农业科学院植物保护研究所侯茂林博士、中国农业大学杨晓光博士、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所吴文斌博士、毛克彪博士和罗其友博士等在论文形成过程中提出了许多建议和观点, 特此感谢。

参考文献

- [1] 安芷生, 丁仲礼, 周卫健, 周杰. 中国北方干旱化的历史证据与成因研究. 气象出版社, 2004, 298
- [2] 白人海. 气候变化与松嫩流域黑土退化. 黑龙江气象, 2005, (3): 6~7
- [3] 陈宜瑜, 丁永间, 余之祥, 等. 中国气候与环境演变评估(II): 气候与环境变化的影响与适应、减缓对策. 气候变化研究进展,

2005, 1 (2): 51~57

- [4] 邓振镛, 张强, 徐金芳. 全球气候变暖对甘肃农作物生长影响的研究进展. 地球科学进展, 2008, 23 (10): 1070~1078
- [5] 符凉斌, 腾星林. ENSO 与中国夏季气候的关系. 大气科学, 1988, 特刊: 133~141
- [6] 高鲁鹏, 梁文举, 赵军等. 气候变化对黑土有机碳库影响模拟研究. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24 (2): 288~291
- [7] 郭建平, 高素华, 刘玲. 气象条件对作物品质和产量影响的试验研究. 气候与环境研究, 2001, 6 (3): 361~367
- [8] 黄荣辉. 关于东亚气候系统年际变化研究进展及其需要进一步研究的问题. 中国基础研究, 1999, (2): 66~75
- [9] 金之庆, 葛道阔, 石春林, 等. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究. 作物学报, 2002, 28 (1): 24~31
- [10] 李虎, 邱建军, 王立刚, 等. 适应气候变化: 中国农业面临的新挑战. 中国农业资源与区划, 2012, 33 (6): 23~28
- [11] 李克让, 郭其蕴, 张家城. 中国干旱灾害研究及减灾对策. 郑州: 河南科学技术出版社, 1997, 397
- [12] 李淑华, 气候变化对中国农业病虫害的影响. 邓根云主编, 气候变化对中国农业的影响. 北京: 北京科学技术出版社, 1993, 223
- [13] 李伟君, 王春乙, 赵蓓, 等. 气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响. 农业工程学报, 2010, S1: 200~205
- [14] 李伟君, 王春乙. 气候变化对我国农作物种植结构的影响. 气候变化研究进展, 2010, 6 (2), 123~129
- [15] 李玉娥, 张厚瑄. 温室效应对我国北方冬麦区粮食作物生产潜力的影响. 中国农业气象, 1992, 13 (4): 37~39
- [16] 林而达. 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
- [17] 林而达, 吴绍洪, 戴晓苏, 等. 气候变化影响的最新认识. 气候变化研究进展, 2007, 3 (3): 125~131
- [18] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告 (II): 气候变化的影响和适应. 气候变化研究进展, 2006, 2 (2): 51~56
- [19] 刘雨芳, 古德祥. 气候变暖后我国作物害虫发生趋势分析. 昆虫天敌, 1997, (2): 1~5
- [20] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认识. 气候变化研究进展, 2007, 3 (2): 63~73
- [21] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合卷. 北京: 科学出版社, 2002
- [22] 秦小光, 李长生, 蔡炳贵. 气候变化对黄土碳库效应影响的敏感性研究. 第四纪研究, 2001, 21 (2): 154~161
- [23] 覃志豪, 徐斌, 李茂松, 等. 我国主要农业气象灾害机理与监测研究进展. 自然灾害学报, 2005, 14 (2), 61~69
- [24] 任建强, 陈仲新, 唐华俊, 等. 基于植物净初级生产力模型的区域冬小麦估产研究. 农业工程学报, 2006, 22 (5): 111~117
- [25] 唐国平, 李秀彬, Fischer G, 等. 气候变化对中国农业生产的影响. 地理学报, 2000, 55 (2): 129~138
- [26] 唐华俊, 周清波. 资源遥感与数字农业: 3S 技术与农业应用. 北京: 中国农业科技出版社. 2009: 1~352
- [27] 王修兰, 徐师华. CO₂ 浓度倍增对大豆各生育期阶段的光合作用及干物质积累的影响. 作物学报, 1994, 20 (5): 520~527
- [28] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展. 应用生态学报, 2007, 18 (8): 1877~1885
- [29] 肖辉林, 郑习健. 土壤变暖对土壤微生物活性的影响. 土壤与环境, 2001, 10 (2): 138~142
- [30] 熊伟, 杨婕, 林而达, 等. 未来不同气候变化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
- [31] 熊伟, 居辉, 许吟隆, 等. 气候变化下我国小麦产量变化区域模拟研究. 中国生态农业学报, 2006, 14 (2): 164~167
- [32] 杨鹏, 吴文斌, 周清波, 等. 基于光谱反射信息的作物单产估测. 模型研究进展, 2008, 24 (10): 262~268
- [33] 杨晓光, 刘志娟, 陈卓. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响. 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
- [34] 朱晓禧, 方修琦, 高勇. 基于系统科学的中国粮食安全评价研究. 中国农业资源与区划, 2012, 33 (6): 11~17
- [35] 叶彩玲, 霍治国. 气候变暖对我国主要农作物病虫害发生趋势的影响. 中国农业信息快讯, 2001, (4): 9~10
- [36] 叶笃正, 黄荣辉. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科技出版社, 1996: 387
- [37] 云雅如, 方修琦, 王媛, 等. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景. 自然资源学报, 2005, 20 (5): 697~705
- [38] 张厚瑄. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题. 气候变化对我国种植制度的影响. 中国农业气象, 2000, 21 (1): 9~13
- [39] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化对我国南方双季稻发育和产量的影响. 气候变化研究进展, 2005, 1 (4): 151~156
- [40] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响. 应用生态学报, 2006, 17 (7): 1179~1184
- [41] 张明伟, 邓辉, 李贵才, 等. 模型模拟华北地区气候变化对冬小麦产量的影响. 中国农业资源与区划, 2011, 32 (4): 45~49
- [42] 张润杰, 何新风. 气候变化对农业害虫的潜在影响. 生态学杂志, 1997, 16 (6): 36~40
- [43] 郑新奇, 姚慧, 王筱. 20 世纪 90 年代以来《Science》关于全球气候变化研究述评. 生态环境, 2005, 14 (3): 422~428
- [44] 周义, 覃志豪, 包刚. 气候变化对农业的影响及应对. 中国农学通报, 2011, 32: 260~267
- [45] Cannon, RJC. The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. Global Biology, 1998, 4 (7): 785~796
- [46] Huang RH, Wu YF. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanisms. Advance in Atmospheric Science, 1989, 6: 21~32
- [47] Jhorar OP, Mathauda SS, Gurdip S. Relationship s between climate variables and Ascochyta blight disease of chickpea in Punjeb, India. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 87 (2 - 3): 171~177
- [48] Jones PG, Thornton PK. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. Global Environmen-

- tal Change, 2003, 13: 51 ~ 59
- [49] Keeling CD, Bacastow RB, Whof TT. Measurement of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. Hawaii CO2 Review, W. C. Clark Ed., Oxford Press. London, 1982, 377 ~ 385
- [50] Lobell DB, Burke MB, Tebaldi C, et al. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 2008, 319: 607 ~ 610
- [51] Holger M, Malcolm R. Effects of sorghum ergot on grain sorghum production: a preliminary climate analysis. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1998, 48 (8): 1241 ~ 1247
- [52] Morton JF. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *PNAS*, 2007, 104 (50): 19680 ~ 19685
- [53] Qin Z, Li W, Tang H, et al. Characteristics of climate for agriculture in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013
- [54] Qin Z, Tang H, Li W, et al. Modeling impact of agro-drought on grain production in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2013
- [55] Reidsma P, Ewert F, Boogaard H, et al. Regional crop modeling in Europe: The impact of climatic conditions and farm characteristics on maize yields. *Agricultural Systems*, 2009, 100: 51 ~ 60
- [56] Schmidhuber J, Tubiello FN. Global food security under climate change. *PNAS*, 2007, 104 (50): 19703 ~ 19708
- [57] Simelton E. Food self-sufficiency and natural hazards in China. *Food Security*, 2011, 3, 35-52, doi 10. 1007/s12571-011-0114-7
- [58] Tan G, Shibasaki R. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling*, 2003, 168: 357 ~ 370
- [59] Tao F, Yokozawa M, Liu J. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. *Climate Research*, 2008, 38: 83 ~ 94
- [60] Van GM, Merckx R, Vlassak K. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: The fate of fast and slow growing microorganisms in soils from different climates. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25: 109 ~ 123
- [61] Wang J, Mendelsohn R, Dinar A, et al. The impact of climate change on China's agriculture. *Agricultural Economics*, 2009, 40: 323-337
- [62] Xiao GJ, Zhang Q, Yao YB, et al. Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid north-western China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 127: 37 ~ 42

PROGRESS AND DIRECTIONS IN STUDYING THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURE AND GRAIN PRODUCTION IN CHINA

Qin Zhihao^{1,2}, Tang Huajun¹, Li Wenjuan¹, Zhao Shuhe³

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

2. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093;

3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Agriculture especially grain production is very sensitive to climate change as a result of both natural evolution and anthropogenic activities. Objective of the paper is to review the progress in studying the impacts of climate change on agriculture and grain production in China. In recent decades, impact of climate change on agriculture and grain production has become an important research area and many studies have addressed to the issue. Comprehensively, the existing studies on the impact were mainly concentrated on such aspects as the consequence of climate change as an impact on agricultural resources, cropping system and its spatial structure, modeling and analysis. Further study on the issues may concentrate on the mutual relationship between climate change and agriculture especially grain production, the impact mechanism and adaption approaches, the changes of heat flux, sunshine, water resources available for irrigation, the occurrence of pest, drought and flood. Examination of these issues may provide insights into the interaction between climate change and agriculture for better adaption to maintain sustainable development. Therefore these aspects may represent future directions of studying the impact of climate change on agriculture and grain production.

Keywords climate change; agriculture; grain production; influence mechanism; adaption approaches