中国生态农业学报 2010 年 7 月 第 18 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, July 2010, 18(4): 905–910

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2010.00905

气候变化对中国农业生产的影响及应对策略*

刘彦随[1,2] 刘 玉[1,2] 郭丽英[3]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室 北京 100101; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081)

摘 要 全球气候呈现变暖的趋势，对农业生产和粮食安全产生重大影响，并成为当今全球环境变化关注的热点问题之一。本文采用文献综述与比较研究的方法，系统分析了气候变化对光资源、温度、土壤质量和水环境等农业生产要素的影响机理，探讨了气候变化对我国作物种植区域和种植制度、农作物病虫害、农业生产能力以及农业经济与管理等方面的实际影响，通过梳理国外应对气候变化的主要农业战略，提出新时期我国应对气候变化的农业可持续发展策略。

关键词 农业生产 粮食安全 气候变化 应对策略 中国

中图分类号: F329.9;S162.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2010)04-0905-06

Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China

LIU Yan-Sui[1,2], LIU Yu[1,2], GUO Li-Ying[3]

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Natural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract A number of studies indicate increasing global climate warming especially in recent decades. Climate warming greatly influences global agro-production and food security — the focus of global environmental change. This paper proposes a structural and orientational framework for scientifically addressing climatic change impact on agro-production. Through literature review and comparative studies, the paper systematically summarizes influencing mechanisms and effect of climate warming on such agro-production factors as light, temperature, soil quality and water environment. The impact of climate warming on cultivation regions, cropping systems, crop pests, agro-production capacity, agro-economy and farm management is analyzed. Then, suitable climate-adapted agro-development strategies are put forward for different regions in China. The strategies are carefully selected from a repository of international tested climatic change countermeasures in agriculture at national or district level.

Key words Agro-production, Food security, Climatic change, Response strategy, China

(Received Nov. 11, 2009; accepted March 18, 2010)

1 气候变化的主要特点

以气候变暖为主要特征的全球气候变化，对当今世界经济、生态和社会系统产生了重大影响，并通过农业生产及其相关产业威胁到国家和全球粮食安全[1]。农业作为基础产业、国民经济中最基本的物质生产部门，是人类衣食之源和生存之本，农业生产直接关系着人类生存、发展与社会稳定[2]。农作物产量受气候条件、作物品种、农业技术与管理等要素的综合影响，气候要素既为作物生长提供物质、能量，又是农业技术有效实施的限制因素之一。气候变化对农业生产的影响已成为全球关注的热点问题之一，对中国尤为重要[3]。气候变暖对世界农业生产和粮食安全产生的影响日益显现[4]，极端气候事件的增多加剧了农业生产的波动性，甚至带来严

* 国家自然科学基金项目(40871257, 40635029)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB400505)资助
刘彦随(1965~)，男，博士、研究员、博士生导师，主要从事土地利用和区域农业与农村发展研究。E-mail: liuys@igsnrr.ac.cn
收稿日期: 2009–11–11 接受日期: 2010–03–18

重的农业灾害。预测未来气候的可能变化，研究其对生态系统、经济和社会的影响及其响应，探寻减缓和适应气候变化的策略成为气候变化研究的核心内容[5]。

2007 年 IPCC 第 4 次评估报告指出，1906~2005 年的 100 年间，全球平均地表温度上升 0.74 ℃，北半球高纬度地区温度升幅较大，中国年平均温度增加幅度为 0.78±0.27 ℃，略高于全球同期平均值[5]。实证研究表明，中国内陆热带地区、华南地区、黄淮海平原和西北地区等地气温均呈显著升高的趋势[6–9]。CO_2 年排放量不断增长，未来 20~100 年中国地表气温将明显增加[10]。2020 年全国年平均气温将比 1950s 升高 1.68 ℃，气候向暖干的趋势发展[11]。21 世纪末，中国气候变暖范围在 1.6~5 ℃之间，年降水量增加 1.5%~20%；北方增温幅度大于南方，降水的增加也主要集中在北方；冬季明显变暖，冬、春季降水显著增加[12]。自 1990s 以来，世界粮食产量增长趋缓，气候变化将继续影响世界范围农业与粮食生产。因此，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，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。

2 气候变化对农业生产的影响

我国农业资源的人均占有量少，人口增长的压力却不断加大，农业生产的生态环境脆弱；而气候变化将改变农业生产空间布局，比如降低小麦、玉米、水稻等主要作物的产量，减弱区域粮食供给能力，致使农业生产的脆弱性更趋严重。

2.1 气候变化对农业生产系统的影响

气候变化将通过温度与降水变化的综合作用，使光、温、水、土、气、生等生态系统要素发生变化，进而对种植制度、病虫害防治、农业生产潜力及农业管理等产生影响(图 1)。

2.1.1 气候变化对光资源的影响

光资源是重要的农业气候资源之一。光以热效应形式给地球创造了生物得以生存的温度环境，光对绿色植物表现出光合效应、形态效应和光周期效应，保障植物正常生长、发育并形成产量[13]。通常从光亮、光质与光时等方面来描述和评估光资源。光资源是光合作用的动力，过高或过低均会导致作物光合能力的下降。我国长江中下游地区水稻生育期间常因强光高温而引发光合作用的光抑制，且每隔 2~3 年又会因连阴雨的低光强造成严重减产[14]。

2.1.2 气候变化对温度的影响

一定界限温度以上的积温及其持续日数是评价某地区农业热量资源的重要指标之一。一般以日均气温≥0 ℃的持续时间与积温来反映地区农事季节的总长度和农事季节内的热量资源；以日均气温≥10 ℃的持续时间与积温反映喜温作物的生育期和生长期内的热量状况。研究表明: 1951 年以来，我国

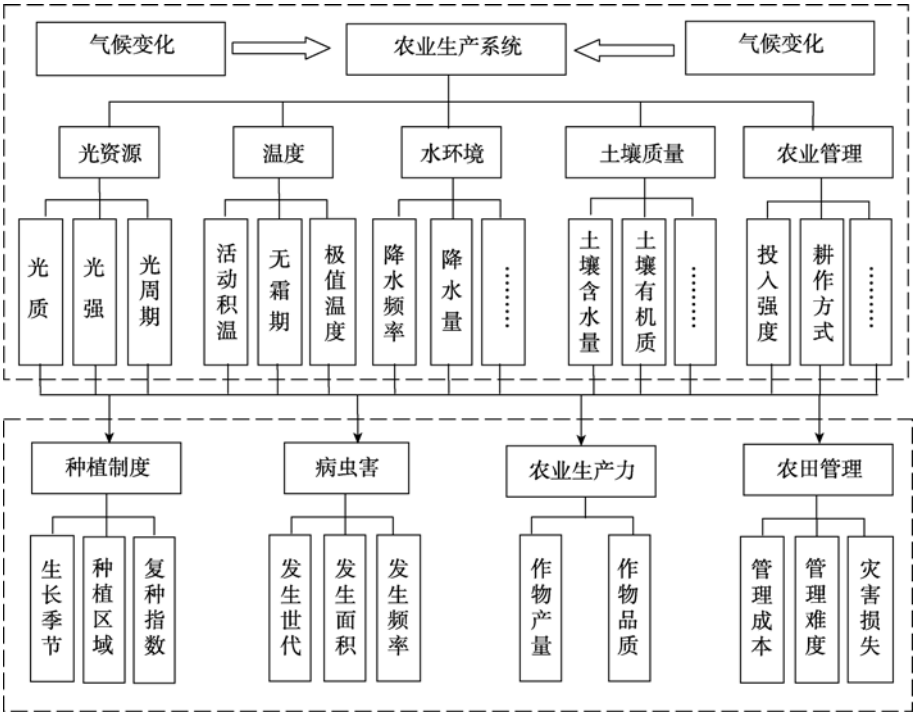

图 1 气候变化对农业生产的影响

Fig. 1 Impacts of climatic change on agricultural production

≥10 ℃、≥0 ℃积温及持续天数总体上呈增加趋势[15]。1979~2005 年全国大部分地区≥10 ℃的年积温有所增加，东北、华北、华南地区的增幅较大；长江以北大部分地区≥10 ℃的年积温初日提前 0~5 d，以南地区则推迟 0~5 d；大部分地区≥10 ℃年积温终日推迟 0~5 d[16]。随着温室气体(GHG)浓度的提高，气候变暖，积温增加，东北地区的低温冻害有所缓解。华北平原 1961~2005 年的年平均气温整体呈上升趋势：≥0 ℃积温的增加速率为 59.5 ℃·d·10a^{-1}；≥10 ℃积温的整体上升趋势明显，但低于≥0 ℃积温的增幅[17]。此外，气候变化还引起温度极值的显著变化。

2.1.3　气候变化对土壤质量的影响

温暖干燥的气候导致潜在蒸发能力增大，土壤含水量降低，且一般夏季土壤水分减少最严重。土壤水分条件通过影响土壤的通气性而影响土壤固有有机碳的矿化分解和外源有机碳的降解，进而影响土壤有机碳含量。土壤水分充足，则透气性差，有利于提高土壤有机碳含量；土壤水分不足，土壤孔隙度大，促进了有机碳的矿化分解[18]。气候变暖影响土壤微生物量和微生物的活动，改变土壤中养分利用和 C-N 循环[19]，加快了土壤有机质的分解和氮的流失，削弱了农业生态系统抵御自然灾害的能力。东北地区降水变率增大，极端降水事件的频率和强度明显加强，尽管降水有所增加，但土壤湿度却呈减小趋势，干旱已经使部分地区出现了土壤盐渍、荒漠化现象[20]。独特的地形和气候使我国西南地区水土流失加重，土壤肥力损失较大，土地质量明显下降。

2.1.4　气候变化对水环境的影响

气候变化将改变区域降水量和降水格局，北方江河径流量减少、南方径流量增加，各流域年均蒸发量增大，其中黄河及内陆河地区的蒸发量增加约 15%，导致流域流量下降乃至断流[21]。气候变暖导致气候更加不稳定，旱涝等极端气候事件出现的频率和强度增加，水资源的不稳定性与供需矛盾加剧。在暖干气候背景和人类活动的共同影响下，大气降水对湖泊的补给量减少，气候变暖使作物生长季延长，农业用水需求量不断增加，对区域农业用水产生负面影响[22]。区域降水变化波动较大，华北大部、西北东部和东北地区降水量减少，对种植业灌溉用水的影响巨大[23]。IPCC 第三、第四次评估报告指出，受气候变暖的影响，高纬度地区和一些湿润热带地区的水资源量有可能在本世纪增加；中纬度和干旱热带地区的水资源短缺将进一步加剧；极端降水强度及频率的增加将加大洪水灾害危险。

2.2　气候变化对农业生产活动的影响

2.2.1　对作物种植区域和种植制度的影响

气候变暖将改善区域的热量资源，积温增多，我国长江以北特别是中纬度和高原地区的作物生长季节延长，低温冷害有所减轻，喜温作物界限北移，晚熟作物品种种植面积增加，促进了种植结构调整。同时，土壤水分蒸散量加大，热量资源增加的有利因素可能会因水资源的匮乏而得不到充分利用，作物稳产的气候风险性增加[21]。20 世纪 90 年代以来，东北地区气候增暖明显，水稻种植面积得以北扩至伊春、嘉荫等水稻禁区[24]；西北地区喜温作物面积扩大，越冬作物种植区北界向北扩展[25]；陕西省冬小麦种植区北界向北扩展，但降水减少和干旱加剧使冬小麦生长受限制区扩大[26]。假若在温度上升 1.40 ℃、降水增加 4.2%的条件下，我国一熟种植面积由现在 62.3%下降为 39.2%，二熟种植面积由 24.2%上升到 24.9%，三熟种植面积由当前的 13.5%提高到 35.9%[27]。

2.2.2　对农作物病虫害的影响

农作物病虫害具有种类多、影响大等特点，是我国农业生产不稳定的重要因素之一。近年来，耕作熟制改进、水肥条件改善及气候变暖有利于害虫和病原体安全过冬，作物病虫害的发生世代、越冬北界及分布范围发生变化，病虫害发生面积、危害程度和发生频率均呈逐年增长的趋势[28]。河北省气候变暖宜于棉铃虫发生，但同时减轻枯萎病、黄萎病等病害[29]；气候增暖有利于内蒙古草原虫卵越冬，草原蝗灾等病虫害明显加重[30]。气候变暖情景下，粘虫在冬季繁殖、越冬、春季迁入等气候带均增殖 1~2 代；在温度升高 2.69 ℃的情景下，粘虫的越冬北界将向北推移 3°左右[31]。2006~2007 年冬季，我国大部分地区气温接近或略高于常年，病虫越冬基数较大。春季以后，大部分地区迁飞性害虫发生较重，小麦白粉病、条锈病、纹枯病等也较为严重[32]。

2.2.3　对农业生产能力的影响

气候变化对农业生产能力影响主要取决于温度的升高程度、降水格局及作物对 CO_2 浓度升高的生理反应。气候变暖引发的季节变化、作物适宜种植区迁移、作物病虫害的演替等将影响到农业生产[33]。温度升高可延长全年生长期，有益于多年生作物及热量不足的地区；温度升高将加快生长期短的栽培作物的发育速度，缩短生育期，单产将下降[34]。南方

水稻产量随温度升高而下降，且下降幅度随温度升高加快而增大[35]。小麦生长季节内温度每升高 1 ℃，产量将降低 3%~10%。在过去 20 年中，温度升高使小麦产量下降 4.5%[36]。在黄淮海平原区，暖冬将加快小麦生育进程，使之提前进入拔节期，增加遭遇倒春寒天气而发生冻害的概率[37]；在提高 CO_2 施肥效应的情景下，我国东部的水稻、菜籽油、玉米、土豆和冬小麦的潜在生产能力提高；在不考虑 CO_2 施肥效应时，生产潜力将下降 2.5%~12%[38]。

2.2.4 对农田管理和农业经济的影响

气候变暖使农业单位面积用水量增加，生产成本提高。近些年来，气温升高和降水量明显下降加剧了我国华北地区的农业用水紧张度。由于光呼吸生化机制的差异，未来气候暖干化将有利于大多数 C_3 类田间杂草丛生，而 C_4 类粮食作物很有可能因竞争不到正常生长所需的水分和养分而使产量下降[13]。气候变暖引发的病虫害流行和杂草蔓延的加剧，将增大农药施用量，提高控制难度。虽然气候变化使部分地区的粮食产量得到提高，但气候变化，尤其是极端气候条件对粮食生产的冲击强度加大。1990~2007 年，我国年均受旱面积 2 548×10^4 hm^2，成灾面积 1 357×10^4 hm^2；年均洪涝灾面积 1 304×10^4 hm^2，成灾面积 746×10^4 hm^2。2007 年，全国因低温冷冻灾害和雪灾造成农作物受灾面积达 407.2×10^4 hm^2，直接经济损失 186.5 亿元[32]，极端气候已成为我国农业大幅度减产和粮食产量波动的重要因素。

3 应对气候变化的主要农业发展策略

3.1 国外应对气候变化的农业战略

(1) 制定应对气候变化的长远战略。气候变化对全球环境变化与可持续发展的影响日益受到关注，世界各国正在寻求合作和积极应对，规避气候变暖对农业生产和粮食安全带来的不利影响。主要包括两种途径：一方面采取有效措施控制 GHG 排放，并吸收、固定空气中的 CO_2，从而降低气候变暖的速率和幅度；另一方面，制定长远战略使农业生产与气候变化相适应，尽可能降低环境变化对农业生产直接的负面影响。在宏观战略上形成了基本认识：未来 20~30 年，人类只有将适应和减排措施有机结合，才能有效地应对全球气候变化。

(2) 转变生产方式，减少温室气体排放。自然植被转化为耕地、秸秆燃烧、厩肥管理、农场运作等农业生产活动是温室气体的重要来源[39]。改善农田和牧场的土地利用、改进肥料管理、优化水资源配置、实施农林混作、强化畜牧业管理、改变耕作制度、维持积极的养分平衡以及施用绿肥等农业管理措施，将农业边际土地转化为林地、修复退化的土壤和湿地、增加农业生态系统的净初级生产力将有效增加土壤有机碳的累积率，固化大气中的 CO_2，降低农业对气候的影响[40]。在温带地区，采用增加复种指数、粮草轮作、农林混作、降低耕作强度和频率等措施可增加土壤中碳的固定；在热带地区，改善耕地和牧场肥力、实施农业休耕与作物覆盖、农林混作等措施可增加土壤碳汇[41]。在水稻生产中，采用轮换灌溉、用稻草饲养牛、使用尿素供应氮可使 GHG 排放量显著降低[42]。改良牧草和豆科植物品种，在较早阶段收割牧草，降低生产单位肉类或奶类的饲料数量，改进粪便的处理、储存和处置技术可以减少 GHG 排放[40]。

(3) 把农业适应看作一个复杂的系统过程。应对气候变化的农业策略具有系统性与不确定性。在非洲农场，重视改良作物品种、改善储水设备、植树种草，以及提供推广服务和正规的信贷等一系列措施来促进农民对气候变化的适应[43]。将创新农业新技术、培育作物新品种和增强农业应变能力作为核心目标，以适应不断变化的环境和满足人类食物安全与营养需求，特别是在粮食供给紧缺的发展中国家更应如此[44]。在鼓励农民调整作物种植结构，创新水管理技术，建立完善的农业推广支持系统的同时，逐步消除基础设施、市场营销、获取信贷等方面的政策限制，加强气候变化的区域监测与模拟，探寻人类包括动物适应气候变化的潜能和途径[45]。比如在美国，一方面从限制温室气体排放、气候友好型运输、发展清洁能源等领域采取措施缓解气候变化；另一方面从气候科学、公共健康、水管理、土地利用、生物多样性等方面采取综合行动，以适应复杂的气候变化[46]。

3.2 我国应对气候变化的农业发展策略

我国是农业大国、人口大国，而且巨大的地域差异和农业生产本身面临的许多现实问题，决定了我国应对气候变化的农业策略必须符合基本国情。既要借鉴发达国家在农业领域应对气候变化的适应与减缓战略，也要突出中国特色及发展阶段的具体特点，制定切实可行的应对策略。

(1) 从我国基本国情和发展的阶段性特征出发，借鉴发达国家应对气候变化的策略重点，亟需构建保障我国土地资源安全、粮食安全的农业可持续发展的长效机制与创新体系，加快推进农业主体功能导向的农业优势区、产业带建设，深入研究如何面向不同农业地域类型、不同农业生产方式的有效应对措施和调控策略，增强我国农业发展自觉适应气

候变化的应变能力，准确把握未来我国可持续农业发展方向与区域战略。

(2) 气候变化导致农业生态环境的一系列变化，对农业生产和粮食安全产生深远影响。气候变暖使我国北方农业气候临界适宜区边际土地的开垦成为可能，特别是在国家各项惠农政策和耕地占补平衡政策的激励下，边际土地开发成为补充耕地和扩大粮食播种面积的重要途径。但应全面考量开垦耕地质量、产能及其生态效应，转变一味追求耕地数量的做法，适时制定边际后备土地资源开发整治的地域类型区划及其中长期规划。

(3) 遵循区域差异规律，制定应对气候变化差别化策略。我国地域差异大，农作物品种及种植制度多样，气候变化的影响具有明显的季节性和区域差异性[47]，即对不同季节、不同地区(如传统农区、农牧交错区、生态脆弱区等)的影响程度不同。亟需着眼不同类型区域创新管理模式、调控政策，针对不同战略导向的农业发展目标，合理安排与实施各类型区域农业生物、农业工程和管理措施，切实完善区域性农业科学管理与生产决策支撑体系。

(4) 农业发展战略应凸显系统性与前瞻性。切实加强农业基础设施配套建设，提高农业生产水平和效率，提升农业综合生产能力；大力发展农业生物技术，优化调整农业结构和经营体制，实施绿色经济、低碳经济战略；深化开展气候变化对水稻、小麦、玉米等作物的影响机理研究，加快适应调控技术、综合评价技术、精准定量模拟技术平台的研制；着力构建我国多功能现代农业体系，大力发展农林牧复合型经济和建设专业化基地，有效提高农业生产率和农业生态系统服务价值。把优化农业结构、提升创新能力、应对气候变化，作为支撑我国农业可持续发展的战略任务纳入国民经济和社会发展规划。

参考文献

[1] 唐海峰，樊万选．农业应对气候变暖 创新开发理念 加快技术研发[J]．创新科技, 2009(3): 17–19

[2] 刘彦随，陈百明．中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J]．地理研究, 2002, 21(3): 324–341

[3] 蔡运龙．全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策[J]．地理学报, 1996, 51(3): 202–212

[4] 唐国利，丁一汇，王绍武，等．中国近百年温度曲线的对比分析[J]．气候变化研究进展, 2009, 5(2): 71–78

[5] 秦大河，丁一汇，苏纪兰，等．中国气候与环境演变评估(I): 中国气候与环境变化及未来趋势[J]．气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4–9

[6] 何云玲，张一平，杨小波．中国内陆热带地区近 40 年气候变化特征[J]．地理科学, 2007, 27(4): 499–505

[7] 黄晓莹，温之平，杜尧东，等．华南地区未来地面温度和降水变化的情景分析[J]．热带气象学报, 2008, 24(3): 254–258

[8] 姜群鸥，邓祥征，战金艳，等．黄淮海平原气候变化及其对耕地生产潜力的影响[J]．地理与地理信息科学, 2007, 23(5): 82–85

[9] 刘德祥，董安祥，陆登荣．中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J]．干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 195–201

[10] 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[J]．气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3–8

[11] 李明志，袁嘉祖，李建军．中国气候变化现状及前景分析[J]．北京林业大学学报：社会科学版, 2003, 2(2): 16–20

[12] 江志红，张霞，王冀. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估[J]．地理研究, 2008, 27(4): 787–799

[13] 王馥棠，赵宗慈，王石立，等．气候变化对农业生态的影响[M]．北京：气象出版社, 2003

[14] 林文雄，余高镜，熊君，等．水稻苗期响应光强日变化的分子行为生态初探[J]．中国生态农业学报，2009，17(1): 115–119

[15] 柏秦凤，霍治国，李世奎，等. 1978 年前、后中国≥10℃年积温对比[J]．应用生态学报, 2008, 19(8): 1810–1816

[16] 谭方颖，王建林，宋迎波．华北平原近 45 年农业气候资源变化特征分析[J]．中国农业气象, 2009, 30(1): 19–24

[17] 缪启龙，丁园圆，王勇，等．气候变暖对中国热量资源分布的影响分析[J]．自然资源学报, 2009, 24(5): 934–944

[18] 姜勇，庄秋丽，梁文举．农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]．生态学杂志, 2007, 26(2): 278–285

[19] 张乃莉，郭继勋，王晓宇，等．土壤微生物对气候变暖和大气 N 沉降的响应[J]．植物生态学报, 2007, 31(2): 252–261

[20] Liu Y S, Wang D W, Gao J. Land use/cover changes, the environment and water resources in northeast China[J]. Environmental Management, 2005, 36(5): 691–701

[21] 林而达，许吟隆，蒋金荷，等．气候变化国家评估报告(Ⅱ): 气候变化的影响与适应[J]．气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51–56

[22] 刘兴汉，尤莉，魏煜．气候变暖对内蒙古生态环境的影响[J]．内蒙古气象, 2003(2): 22–24

[23] 李晓锋，陈明新．全球气候变暖对我国畜牧业的影响与分析[J]．中国畜牧杂志, 2008, 44(4): 50–53

[24] 矫江，许显斌，卞景阳，等．气候变暖对黑龙江省水稻生产影响及对策研究[J]．自然灾害学报, 2008, 17(3): 41–48

[25] 刘德祥，董安祥，邓振镛．中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]．自然资源学报, 2005, 20(1): 119–125

[26] 曾英，黄祖英，张红娟．气候变化对陕西省冬小麦种植区的影响[J]．水土保持通报, 2007, 27(5): 137–140

[27] Futang W. Impacts of climate change on cropping system and

its implication for China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1997, 11(4): 407–415

[28] 叶彩玲, 霍治国, 丁胜利, 等. 农作物病虫害气象环境成因研究进展[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 90–97

[29] 王勤英. 气候变化对河北省棉花生产及病虫害的可能影响[J]. 生态农业研究, 1997, 5(3): 45–48

[30] 陈素华, 宫春宁, 苏日那. 气候变化对内蒙古农牧业生态环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4): 155–158

[31] 李淑华. 气候变暖对病虫害的影响及防治对策[J]. 中国农业气象, 1993, 14(1): 41–47

[32] 中国气象局国家气候中心. 全国气候影响评价(2007 年)[M]. 北京: 气象出版社, 2008

[33] Miraglia M, Marvin H J P, Kleter G A. Climate change and food safety: An emerging issue with special focus on Europe[J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, 47(5): 1009–1021

[34] 周平. 全球气候变化对我国农业生产的可能影响与对策[J]. 云南农业大学学报, 2001, 16(1): 1–4

[35] 姚凤梅, 张佳华, 孙白妮, 等. 气候变化对中国南方稻区水稻产量影响的模拟和分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(5): 659–666

[36] 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(6/7): 1009–1014

[37] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 等. 我国低温冷冻害的发生规律分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1167–1172

[38] Chavas D R, Izaurralde R C, Thomson A M. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6/7): 1118–1128

[39] Del Grosso S J, Ojima D S, Parton W J, et al. Global scale DAYCENT model analysis of greenhouse gas emissions and mitigation strategies for cropped soils[J]. Global Planet Change, 2009, 67(1/2): 44–50

[40] Verge´ X P C, de Kimpe C, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142(2/4): 255–269

[41] Hutchinson J J, Campbell C A, Desjardins R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142(2/4): 288–302

[42] Pathak H, Wassmann R. Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture: I. Generation of technical coefficients[J]. Agricultural Systems, 2007, 94(3): 807–825

[43] Bryan E, Deressa T T, Gbetibouo G A, et al. Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: Options and constraints[J]. Environmental Science & Policy, 2009, 12(4): 413–426

[44] Ortiz R, Sayre K D, Govaerts B. Climate change: Can wheat beat the heat?[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 126(1/2): 46–58

[45] Kabubo-Mariara J. Global warming and livestock husbandry in Kenya: Impacts and adaptations[J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1915–1924

[46] Saavedra C, Budd W W. Climate change and environmental planning: Working to build community resilience and adaptive capacity in Washington State, USA[J]. Habitat International, 2009, 33(3): 246–252

[47] Liu H, Li X B, Fischer G. Study on the impacts of climate change on China’s agriculture[J]. Climatic Change, 2004, 65(1/2): 125–148