

doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2014.04.001

林而达, 谢立勇. 《气候变化 2014: 影响、适应和脆弱性》对农业气象学科发展的启示[J]. 中国农业气象 2014, 35(4): 359-364

## 《气候变化 2014: 影响、适应和脆弱性》对农业气象学科发展的启示\*

林而达<sup>1</sup>, 谢立勇<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 通过对政府间气候变化专门委员会第二工作组(IPCC AR5 WGII)的报告《气候变化 2014: 影响、适应和脆弱性》有关涉农章节的解读, 分析有助于国内外农业气象学科发展的科学问题, 并提出进一步研究的优先领域。IPCC 认为, 如果不考虑适应, 局地温度比 20 世纪晚期升高 2℃ 或更多, 对热带和温带地区主要作物产量(小麦、水稻和玉米)都将产生负面影响。预计的影响随作物、区域和适应情景而不同。约 10% 的研究结果预测 2030-2049 年比 20 世纪晚期可能增产 10%, 也有 10% 的研究结果则预测减产 25% 以上。对比国内有关气候变化对农业影响评估的研究, 反映的差距主要集中在: (1) 农业系统对气候变化敏感程度和脆弱性的定量评估能力较弱; (2) 难以识别气候对农业的直接和间接影响程度; (3) 综合研究不够, 还不能定量分析各种非气候因素的贡献; (4) 适应对策实例和经验总结不够, 有关的成本效益分析不够。建议本学科优先在以下领域进一步深入研究: (1) 更新并完善粮食生产影响模型, 建立区域和全球尺度的、可靠的、综合的粮食系统模型; (2) 进一步认识 CO<sub>2</sub> 与臭氧对作物生长的综合影响程度, 高温和低温对作物的影响, 以及干旱和洪涝的生理阈值; (3) 开展与各种变暖情景有关的粮食生产实验和模拟, 包括作物、家畜、渔业、水果和蔬菜等生产要素以及加工、分配及零售和消费模式等非生产要素的气候影响和适应。

**关键词:** 气候变化; 影响与适应; 农业系统; CO<sub>2</sub>

## Revelation of Agro-meteorology Learning From *Climate Change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability*

LIN Er-da<sup>1</sup>, XIE Li-yong<sup>2</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture Chinese Academy of Agricultural Sciences Beijing 100081 China;

2. Agronomy College Shenyang Agricultural University Shenyang 110866)

**Abstract:** Through the understanding of the assessment of impacts, adaptation and vulnerability in the Working Group II contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (WGII AR5) in related chapters with agriculture, the current situation, research gaps and proposed priorities of future studies were analyzed. IPCC suggested that, climate change without adaptation is projected to mainly negatively impact production for local temperature increases of 2℃ or more above the late-20<sup>th</sup>-century levels, projected impacts vary across crops and regions and adaptation scenarios, with about 10% of projections for the period 2030-2049 showing yield gains of more than 10%, and about 10% of projections showing yield losses of more than 25%, compared to the late 20<sup>th</sup> century. But the research gaps showed from the assessment of climate change impacts on Chinese agriculture mainly focus on: (1) the quantified assessment ability of sensitivity and vulnerability of agriculture system for climate change is still weak; (2) the direct and indirect impacts of climate change on agriculture were difficultly detected and attributed; (3) there were not enough of integration studies, did not quantify contributions of the non-climate factors; (4) there were less adaptation implementation and experience summary, less cost/benefit analysis. The priorities of future studies suggested in these

\* 收稿日期: 2014-04-18

基金项目 “十二五”国家科技支撑计划“IPCC 第五次评估对我国应对气候变化战略的影响”(2012BAC20B05); 国家重点基础研究发展计划项目(“973”项目)(2012CB955903); CDM 基金项目

作者简介: 林而达(1947-) 辽宁营口人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为气候变化。E-mail: lined@ami.ac.cn

area: (1) revising and improving impact models of food production, establish regional and global credible integrated models of food system; (2) further understanding the influence degree of CO<sub>2</sub> associate with O<sub>3</sub> on crops, impacts of high and low temperature on crops and physiological thresholds of drought and flood; (3) developing several experiments and simulations of climate impacts and adaptation on food production related with different warming scenarios, including crops, animals, fishery, fruits and vegetables as production factors and non-production factors, e. g. processing, distributing, retailing and consume models.

**Key words:** Climate change; Impact and adaptation; Agriculture systems; CO<sub>2</sub>

2014年3月,政府间气候变化专门委员会第二工作组(IPCC AR5 WGII)在日本横滨正式发布第五次评估报告《气候变化2014:影响、适应和脆弱性》。该报告由全球自然和人文科学领域的309位主要作者历时4a合作完成,12位中国学者(包括两名农业气象学者)参与编写。该报告是在1990、1995、2001、2007年前4次评估报告的基础上,整合了近年发表的最新重要研究成果而完成的。报告主要基于系统、可靠的观测,并对取得的数据进行了细致、深入的分析,同时对各种影响过程有了新的、进一步的认识,从而对模拟这些过程的影响模式做了改进,并对气候变化影响预估的不确定性进行了深入分析<sup>[1]</sup>。

本文通过对该报告有关涉农章节的解读,分析了有助于国内外农业气象学科发展的科学问题,并提出进一步研究的优先领域,供同行参考。

## 1 有关涉农内容的解读

报告第七章《粮食安全和粮食生产系统》(Food Security and Food Production System)是最主要的涉农章节,部分内容与第四次评估报告第五章《食物、纤维和森林产品》(Food, Fiber and Forest Products)相似,有连续性,但在内容上更集中于粮食(食物),在层面上更广泛涉及粮食生产、营养、获得、市场及粮食安全等问题,特别引入了粮食系统和粮食安全的新概念。从全球来看,气候变化对粮食安全的各个方面均有潜在的影响,包括粮食的获取、使用和价格稳定。IPCC WGII 2014年报告认为<sup>[2]</sup>,目前对非生产系统的粮食安全因素如何受气候变化影响及其适应性还知之甚少。此外,还有一些区域章节和适应章节也涉及农业,如亚洲章发现与干旱相关的水和粮食短缺造成的营养不良的风险在上升。上述报告的粮食和亚洲章节中分别引用43篇和110篇中国作者的研究成果作为参考文献,分别占这两章总引用文献的8%和18%。

报告中的《粮食安全和粮食生产系统》章还给出了一些新发现:(1)观测及模拟的影响表明,气候变化已经对全球许多区域主要作物包括小麦和玉米总

产量产生不利影响,负面影响的结果比正面影响更为普遍;少量研究表明正面影响多见于高纬度地区。这个发现显然是气候变化影响的识别结果。中国农业生产已连续10a获得丰收,除气候变化的影响外,农业丰收还得益于政策、技术、市场和投入的作用,这些因素的正面效应如果大于气候变化的负面影响,且针对气候变化的风险管理作用显著,应可以起到趋利避害的适应效果。IPCC报告引用的几十份中国作者的文献均支持了上述观点<sup>[3-5]</sup>。(2)田间试验和模型模拟均表明CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、平均温度、极端气候和水分及氮肥的交互作用是非线性的,对未来作物产量的影响还难以预测<sup>[6-8]</sup>;(3)如果没有相应的防御措施(包括科学使用农药),从全球平均水平看,病害和虫害对主要作物产量造成的损失分别达到总产的16%和18%<sup>[9]</sup>。

《粮食安全和粮食生产系统》章引用的大量文献表明,白天最高温度超过30℃,作物产量将表现出极大的负敏感性,并将在整个生长季内对许多作物和区域产生持续影响。气候变化可能逐步增加某些地区作物产量年际间的变化。如果不考虑适应,局地温度比20世纪晚期升高2℃或更多,温度的升高对热带和温带地区主要作物(小麦、水稻和玉米)产量均将产生负面影响<sup>[10-13]</sup>。预估的影响随作物、区域和适应情景而不同,与20世纪后期相比,约有10%的预估表明2030-2049年作物产量将提高10%以上,还有10%的预估则表明产量将减少25%以上,整体上,全球所有研究结果中值平均为减产0~2%/10a<sup>[2,9]</sup>。这些研究成果再次证明了虽然模拟的结果有较大差异,但概率分布上依然是负面影响比正面影响更普遍。

如果全球温度比20世纪末升高4℃或更多,结合人口增加对粮食需求的增加,则全球和区域粮食安全将面临巨大风险。即使考虑CO<sub>2</sub>肥效的正面作用和降水的变化,2050年非洲和南亚地区主要作物产量仍可能减少8%<sup>[9]</sup>。

气候变化可能推高粮食价格。粮食供应能力和居民的敏感性取决于获得粮食的渠道。如果不考虑CO<sub>2</sub>的作用,温度和降水的变化将在2050年推高全

球粮价3%~84%,如果考虑CO<sub>2</sub>的作用但忽略O<sub>3</sub>、病虫害等的负面影响,届时全球粮价的波动范围应在-30%~45%。气候变化增加了某些极端事件的发生率和频率,对粮食安全产生显著影响。极端事件的增加也降低了对农业生产激励性投资的积极性,相对抵消了粮价上涨的正效应。IPCC<sup>[21]</sup>在比较是否采取适应措施的产量差异时发现,采用适应作物管理措施的案例中,全球平均而言,适应措施能够达到提高15%~18%目前总产量的效果,但区域适应效果差异很大,有的地域可能收效明显,有的地域则也许收效甚微。今后如能加强气候变化影响的识别和归因研究,则适应的效果应该首先能够区分出来。

## 2 应对气候变化研究现状

据CNKI2013年5月统计,第一次气候变化国家评估报告<sup>[14]</sup>发表以来,有关中国农业影响的中文学术论文发表了1121篇,英文论文(SCIe)发表了281篇。很多新的领域取得了研究成果,如气候变化对主要作物适宜种植分布及主要生产过程的观测数据大大丰富<sup>[15]</sup>,过去气候变化对中国农业影响的识别和归因研究有了初步成果,未来气候变化下,特别是高CO<sub>2</sub>浓度下,农作物反应的实验研究有了明显增加,气候变化对家畜饲养和捕捞渔业的影响也开始了新的研究<sup>[16-17]</sup>,但对当前和未来粮食安全的影响评估研究依然是最为关注的领域之一<sup>[18-19]</sup>。

中国农业气象工作者利用县级尺度和国家站点尺度的作物产量调查数据,利用统计分析方法研究表明,中国水稻、小麦、玉米、大豆对气温、降雨、辐射以及气候总体等主要气候因子的变化敏感性正负并存<sup>[20]</sup>,Tao等<sup>[4]</sup>研究表明,1980-2008年以来气候变化导致小麦单产降低1.27%,总产降低 $3.6 \times 10^5$ t;玉米单产降低1.73%,总产降低 $1.53 \times 10^6$ t;大豆单产降低0.41%,总产增加 $4.16 \times 10^3$ t;水稻单产增加0.56%,总产增加 $7.44 \times 10^4$ t,受气候变化影响最敏感作物是中国北部和东北部干旱和半干旱区的玉米和小麦。国家气象站点的作物产量数据统计分析表明,1981-2009年,气候变暖和太阳辐射变化使长江中下游早稻的产量变化幅度在-0.59%~2.4%。但不同资料和研究方法得到的结果存在差异,Zhang等<sup>[21]</sup>研究表明,平均温度对北方中部地区的小麦和东北东部的玉米具有显著的正效应,而Xiong等<sup>[22]</sup>研究表明,区域尺度的产量-温度关系表明,超过一半的耕地易受到增暖趋势的不利影响,但在大部分粮食主产区中,由于较好的农艺管理措施(含适应),作物产量实际表现为增加或不显著变化。

国内现有研究依然表明,未来气候变化对农业生产具有重要的影响,且以负面影响为主。一些研究表明<sup>[23]</sup>,气候变化背景下中国部分地区农业生产的热量条件将得到改善,但水分供需矛盾会更加突出,对技术和投入的要求更高,且未来气候变率的变化对粮食生产和农业的稳定性和可持续性会产生重大影响。

目前有关未来气候变化对作物的影响研究,主要采用气候模式与作物模型相结合的方式,预测未来不同气候情景下中国主要作物产量的变化,多数模拟结果表明,未来中国三大作物单产变化以下降趋势为主<sup>[22,24-26]</sup>。

如果考虑CO<sub>2</sub>肥效作用,则可部分抵消高温造成的减产,此外由于高浓度CO<sub>2</sub>可以降低气孔导度,提高水分利用率,因此在一些干旱地区也有一定的节水效果。由于C3作物比C4作物对CO<sub>2</sub>施肥效应更敏感,因此未来小麦增产潜力最大,水稻次之,玉米的单产变化则不大<sup>[27]</sup>。截至目前,CO<sub>2</sub>在大田生产中的实际肥效还难以量化,模型方法预估的肥效结果可能被高估,需要进一步通过FACE等试验进行验证和客观评价<sup>[28]</sup>。

如果考虑农业技术对气候变化的响应(适应),研究认为由于种植制度的变化,品种的变更,以及其它管理措施的改进,未来2020s时段粮食总产量,在A2和B2情景下将分别增产14.2%和5.5%;在2040s时段,两种情景下,增产幅度分别为13.9%和6.6%<sup>[29]</sup>。其中,水稻增产幅度最大,为23%~38%,其次是小麦,将增产8%~25%,玉米则略有减产<sup>[30]</sup>。

由于中国气候资源区域性明显,因此未来气候变化对中国粮食生产的影响也具有明显的区域差异性,一般来说高纬度地区温度增加明显,热量条件改善较大,受益相对显著<sup>[30]</sup>,东北增产潜力巨大,华北、西北、西南地区将减产,华东和东南地区产量增加不明显<sup>[31]</sup>。

## 3 应对气候变化研究差距

基于IPCC报告,与国际相比,国内在有关气候变化对农业影响的评估和适应方面<sup>[14,32]</sup>还存在一定差距,主要集中在:(1)农业系统对气候变化敏感程度和脆弱性的定量评估较弱。大部分论文仅对观测的主要气候要素与农作物/饲养动物生长和产量的关系进行分析,缺少对“变化”的影响分析。

(2)大量研究多针对气候变化背景下多因素的影响,难以识别气候变化范围、变化频率和极端事件对农业的直接和间接影响程度。

(3)综合研究不够,不能定量分析各种非气候因

素的贡献;气候变化对农业和其它部门/领域的交互影响缺少综合分析。

(4) 操作性强的适应对策实例与经验总结不够,特别是有关的成本效益分析不够。

气候变化是人类面临的重大挑战。国内有关气候变化对农业影响研究的重大需求就是要回答气候变化对粮食供给能力的可能影响,并逐步进展到探明各种条件下未来可能的实际粮食产量,从而为未来农业可持续发展提供适应对策建议。对此,目前研究还有待更深入更全面。

#### 4 进一步研究的优先领域

自第一、二次气候变化国家评估报告发布以来,研究和数据的差距主要表现在评估工作仍集中于粮食生产,而很少包括粮食系统与气候变化有关的其它方面。近年来,其它与气候变化影响有关的领域,如粮食储存、加工、分配、获取以及消费也逐渐受到研究者关注,但主要还是针对这些领域本身的问题开展,与气候变化影响的结合还不够。《气候变化 2014: 影响、适应和脆弱性》提出了全球农业领域需要重视研究的一些内容,对中国农业气象学科的发展具有启发。

(1) 更新并完善粮食生产影响模型,建立区域和全球尺度的、可靠的、综合的粮食系统模型。

要重视气候变化对粮食质量和营养的影响评估,需要更新并完善粮食生产影响模型,需要建立区域和全球尺度的、可靠的、综合的粮食系统模型,使之适合准确评估气候变化对全球及中国粮食系统的影响。现有的关于产量变化的结论大都未包括或未报告产量的波动,要关注这个问题,包括粮食生产的数量和质量,特别要关注粮价的波动及其与气候事件的关系。对于产量波动的研究,预计未来环境阈值,如高温、干旱和洪涝将变得更为重要。建议开展与变暖情景有关的粮食生产实验,包括模型中反映全球变暖程度高情景的影响(如气温比工业革命前升高 4~5℃),很可能由于平均温度升高及改变了气候变率造成产量下降减少。一些示范研究表明,精确的作物生产力数据能够显著改善对未来的产量预测。该领域研究的重要差距还包括针对杂草、病虫对气候变化的反应的研究还远远不够,以及有关饲养家畜的病害、哪些适应活动能很好地整合进粮食安全评估中等。这些内容都需要并可以纳入未来的综合粮食系统模型中。

(2) 进一步认识 CO<sub>2</sub> 与臭氧对作物生长的综合影响,高温和低温对作物的影响,以及干旱和洪涝的生理阈值。

对于粮食作物生产来说,进一步认识大田条件下 CO<sub>2</sub> 作为对作物生长的刺激物的作用程度,特别是与其它温室气体如臭氧结合以后的综合作用十分必要。还要注意高温和低温对作物的影响,以及作物承受干旱和洪涝的生理阈值。至目前,作物气候模式还没有充分包括这些阈值,需要完善并改进 FACE 实验和模型,并检验在气候变化不同情景下极端温度的变化对作物产量及其质量的影响。

(3) 开展与各种变暖情景有关的粮食生产实验和模拟,包括作物、家畜、渔业、水果和蔬菜等生产要素以及加工、分配及零售和消费模式等非生产要素的气候变化影响和适应。要研究畜禽热应激与冷应激,畜舍环境调控成本,饲料营养成分改变等。还要开展气候变化对农事作业的影响,如化肥、农药效率、地膜寿命成本等,以及土壤有机质及微生物活动的影响。

(4) 加强对内陆渔业和小规模水产业的研究,内陆渔业和小规模的水产业对粮食安全和营养的真实贡献在许多发展中国家和地区依然知之甚少,因而常常被低估。要开展研究以确定这些领域的真实贡献以及它们对气候变化和变率的脆弱性,以确保有计划地实施适应行动,避免对粮食安全造成不利影响。在不同社会和生态关系中开展这样的案例研究能使现有理论得到试验和改进,包括开展水体富营养化与泛塘灾害加重影响的研究,水资源缺乏与河流湖泊水量变化,咸潮入侵的影响研究;台风、风暴潮、赤潮等海洋灾害及海温海流变化对近海养殖业和海洋捕捞业的影响研究。

#### 5 结语

自从第一次《气候变化国家评估报告》发布以来,粮食安全生产方面已经开展了不少研究,有些还是宏观研究,比非生产性要素研究多很多。已有研究表明,用农学和育种的方法可能使粮食生产适应比工业革命前升温 5℃ 的情景,但升温 3℃ 应是相对有效的情景。有关粮食安全的研究迫切需要估计农民和其它行动者的实际适应能力,特别是还要包括针对不同气候变率的情形。

农业气象学科需要进一步开展全球及全国粮食安全和粮食系统在所有辐射强迫情景(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)下气候变化有关的影响和适应研究,同时要尽可能开展定量研究,包括作物、家畜、渔业、水果和蔬菜作为生产要素,以及加工、分配及零售和消费模式等等重要的非生产要素受气候变化的影响及适应对策。

中国农业气象学科应对气候变化研究的发展值

得期待。

#### 参考文献:

- [1] 姜彤,李修仓,巢清尘,等. IPCC AR5《气候变化2014:影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知[J]. 气候变化研究进展 2014,10(3):157-166.
- [2] IPCC WG II. The contribution to the IPCC's fifth assessment report (WGII AR5) [R]. Cambridge: Cambridge University Press 2014.
- [3] Lin E D, Xiong W, Ju H, et al. Climate change impacts on crop yield and quality with CO<sub>2</sub> fertilization in China [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 2005, 360(1463):2149-2154.
- [4] Tao F, Zhang Z, Zhang S, et al. Response of crop yields to climate trends since 1980 in China [J]. Climate Research, 2012, 54(3):233-247.
- [5] Xiong W, Lin E D, Ju H, et al. Climate change and critical thresholds in China's food security [J]. Climatic Change, 2007, 81(2):205-221.
- [6] Wang X, Wang M, Feng Z, et al. Ground-level ozone in China: distribution and effects on crop yields [J]. Environmental Pollution 2007, 147(2):394-400.
- [7] Zhao Y, Wang C, Wang S, et al. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the humid and sub-humid tropics [J]. Climatic Change 2005, 70:73-116.
- [8] Feng Z Z, Koyabashi K, Ainsworth E A. Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology and yield of wheat (*Triticum aestivum* L): a meta analysis [J]. Global Change Biology 2008, 14(14):2696-2708.
- [9] 谢立勇,李悦,徐玉秀,等. 气候变化对粮食生产与粮食安全影响的最新认知[J]. 气候变化研究进展 2014,10(4):235-239.
- [10] Xiao G, Liu W, Xu Q, et al. Effects of temperature increase and elevated CO<sub>2</sub> concentration, with supplemental irrigation on the yield of rain-fed spring wheat in a semiarid region of China [J]. Agricultural Water Management 2005, 74(3):243-255.
- [11] Tao F, 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.
- [12] Xiong W, Conway D, Lin E D, et al. Potential impacts of climate change and climate variability on China's rice yield and production [J]. Climate Research 2009, 40:23-35.
- [13] Wang M, Li Y, Ye W, et al. Effects of climate change on maize production, and potential adaptation measures: a case study in Jilin Province, China [J]. Climate Research 2011, 46:223-242.
- [14] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告 [R]. 北京: 科学出版社 2007.
- [15] 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 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 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(2):329-336.
- [16] FAO. State of world fisheries and agriculture 2010 [R]. Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Department, 2010:197.
- [17] Yu D, Chen M, Zhou Z, et al. Global climate change will severely decrease potential distribution of the East Asian coldwater fish *Rhynchocypris oxycephalus* (*Actinopterygii*, *Cyprinidae*) [J]. Hydrobiologia 2013, 700(1):23-32.
- [18] Li S, Wheeler T, Challinor A, et al. The observed relationships between wheat and climate in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11):1412-1419.
- [19] Li X, Takahashi T, Nobuhiro S, et al. The impact of climate change on maize yields in the United States and China [J]. Agricultural Systems 2011, 104(4):348-353.
- [20] Chen C C, Lei A, Deng C, et al. Will higher minimum temperatures increase corn production in Northeast China: an analysis of historical data over 1965-2008 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(9):1580-1588.
- [21] Zhang T Y, Huang Y. Estimating the impacts of warming trends on wheat and maize in China from 1980 to 2008 based on county level data [J]. International Journal of Climatology 2013, 33(3):699-708.
- [22] Xiong W, Holman I P, You L, et al. Impacts of observed growing-season warming trends since 1980 on crop yields in China [J]. Regional Environmental Change, 2013, 13(1):1-10.
- [23] Chen C, Wang E, Yu Q, et al. Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961-2003) on crop growth and water demand in the North China Plain [J]. Climatic Change 2010, 100(3-4):559-578.
- [24] Hansen J M, Tuan F C, Somwaru A. Assessing the impact of climate change on China's grain sector and international trade [R]. Pittsburgh, Pennsylvania: 2011 Annual Meeting, Agricultural and Applied Economics Association 2011.
- [25] Tao F, Hayashi Y. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment [J]. Agricultural and Forest Meteorology 2008, 148(1):94-110.
- [26] Tao F L, Zhang Z. Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: quantify the relative contributions of adaptation options [J]. European Journal of

- Agronomy 2010, 33(2): 103-116.
- [27] Xiong W, Holman I, Lin E D, et al. Untangling relative contributions of recent climate and CO<sub>2</sub> trends to national cereal production in China [J]. Environmental Research Letters 2012, 7(4): 1-9.
- [28] Ashworth K, Wild O, Hewitt C N. Impacts of biofuel cultivation on mortality and crop yields [J]. Nature Climate Change 2013, 3(3): 492-496.
- [29] Xiong W, Declan C, Lin E D, et al. Future cereal production in China: the interaction of climate change, water availability and socio-economic scenarios [J]. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions 2009, 19(1): 34-44.
- [30] 熊伟, 林而达, 蒋金荷, 等. 中国粮食生产的综合影响因素分析 [J]. 地理学报 2010, 65(4): 397-406.
- [31] 吴文斌, 唐华俊, 杨鹏, 等. 基于空间模型的全球粮食安全评价 [J]. 地理学报 2010, 65(8): 907-918.
- [32] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告 [R]. 北京: 科学出版社 2011.