

气候变化对中国农业生产的影响^{*}

潘根兴¹, 高 民², 胡国华³, 魏钦平⁴, 杨晓光⁵, 张文忠⁶, 周广胜⁷, 邹建文¹

(1.南京农业大学农业与气候变化研究中心, 南京 210095; 2.内蒙古农牧业科学院, 呼和浩特 010031; 3.黑龙江农垦科研育种中心, 哈尔滨 150090; 4.北京市农林科学院果树研究所, 北京 100089; 5.中国农业大学资源环境学院, 北京 100193; 6.沈阳农业大学水稻研究所, 沈阳 110866; 7.中国气象科学院农业气象研究所, 北京 100081)

摘 要:未来气候变化下中国农业的稳定事关中国的长远持续发展,国内外气候变化研究界和农业气象研究界对气候变化对中国农业生产的影响的评估未有一致的认识。本文从农业科学角度讨论了气候变化对中国农业生产涉及的气象资源、土地资源、农业生物环境和生态系统的影响,并从作物生长和经济产量形成的角度讨论和分析了气候变化对中国种植业、养殖业不同产业行业的影响,气候变化中一些趋势性变化因不同作物和不同区域而异,例如温度和 CO₂ 浓度变化对农业生产的影响因不同作物和不同时相而异,反之,极端性气候/天气事件对农业不同行业的生产都显得危害很大,而气候变化中区域性干旱将成为我国未来农业生产愈来愈严重的挑战。气候变化对中国农业生产的影响甚为复杂,一些气候变化因子的实际影响还存在很大不确定性。当前,定量评价气候变化对中国农业生产的影响还存在困难。

关键词:气候变化; 中国农业; 农业生产; 农业气象

中图分类号:X16 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)09-1698-09

Impacts of Climate Change on Agricultural Production of China

PAN Gen-xing¹, GAO Ming², HU Guo-hua³, WEI Qin-ping⁴, YANG Xiao-guang⁵, ZHANG Wen-zhong⁶, ZHOU Guang-sheng⁷, ZOU Jian-wen¹

(1.Center of Agriculture and Climate Change, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 3.Center of Agronomy and Crop Breeding, Heilongjiang Land Reclamation Bureau, Harbin 150090, China; 4.Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100089, China; 5.College of Resource and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 6.Rice Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 7.Institute of Agro-meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Sustainability of crop production under climate change impacts has been much concerned as a focus for sustainable development of China's economy. There had been much uncertainty of the potential impacts of climate change on China's crop production in the literature of both climate change studies and agro-meteorological studies for the last years. On view of agricultural science, the potential overall impacts of climate change on crop growth and economic yield build-up was discussed in this paper taking into account the integrated potential impacts on land resource availability, biological environment and ecosystem behavior as well as meteorological resource for crop development. Both impacts on crop production and animal husbandry by climate changes in various geographical regions of China were addressed. The differentiated and mutual interaction of climate change trends varying with crops and regions were also considered. The adverse or beneficial effects of warming and increasing air CO₂ concentration would mutual interact and offset, depending on crop types and their growing periods. However, extreme weather events which would be increasingly threatened under climate change conditions tended to pose hazards to all crops and in almost all sectors of agriculture. In particular, drought would be more extensive and frequent in regional scale, and would cause increasingly serious challenge for China's crop production in the future. Overall, the very complicated impacts of climate change on agricultural produc-

收稿日期:2011-03-19

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项经费项目“气候变化对中国农业生产的影响及应对技术研究”(200903003)项目资助

作者简介:潘根兴(1958—),教授,主要研究农业与气候变化。E-mail:gxpan@njau.edu.cn

^{*}:本文为《气候变化对中国农业生产的影响分析与评估》报告编写组集体成果,参加报告编写的还有陈效民、胡春耕、姜东、李保平、李恋卿、罗卫红、吕军、孟玲、佟建明、熊正琴、张春雷、张吉旺、周治国、朱伟云等。除第一作者外,其他作者排名按姓名拼音为序。

tion would result in a much uncertainty of the actual effects on productivity yield and efficiency of production of China's agricultural production. Therefore, quantitative assessment of climate change impacts on China's agriculture would be still a challenging issue for the study of climate change and agriculture.

Keywords: climate change; China agriculture; agro-meteorology; agricultural production

近十几年来,以气候变暖为主要特征的气候变化及其对自然、经济和人类生活的影响已经成为各国政府、社会和科学界共同关注的全球性问题。尽管科学界对大气温室气体升高与全球气候变化的关系及其原因,气候变化的历史演变和未来气候的变化趋势还存在着争论,但气候变化已经深刻地影响了全球社会经济发展和人类健康生活^[1]。其中对农业生产的影响,不但关系到全球粮食生产和安全供应^[2],而且可能影响到农产品品质和食物安全性^[3]。因此,世界粮农组织把应对气候变化列为解决世界粮食供应和缓解饥饿的全球重大挑战^[4]。

中国是自然资源缺乏,自然灾害严重,生态环境脆弱的发展中国家,中国国民经济和社会生活已经受到气候变化的严重影响,未来可持续发展受到日益加剧的气候变化的严峻挑战。农业本身是温室气体排放的重要人为源之一,但同时又具有减缓温室气体释放的巨大潜力。作为气候变化的受害国,中国农业是对气候变化十分敏感和脆弱的生产产业^[5]。中国农业以占全球不到9%的耕地面积养育着占全球20%的人口。自1949年以来,中国农业生产能力经历了几个台阶式的发展,粮食产量和肉品产量分别达到5亿t和8000万t(2008年),但是,中国农业自然条件限制因素多,耕地质量差,土地利用强度大,经营规模和技术覆盖度底,但农业和技术投入效益日益递减^[6]。气候变化影响日益制约着农业生产的可持续发展,农业生产要满足日益增长的食物供应需求面临着更严峻的挑战。

因此,国内外科学界对气候变化下中国未来农业的走向,特别是粮食生产能力的变化十分关注,Cline^[7]气候变化对农业影响的国别报告提出,未来气候变化对中国农业影响可能是小幅度增产^[7];而我国科学界通过气象与作物生产结合的模型研究,认为气候变化下中国农业的总体生产力可能减产,幅度在5%~30%^[8]。这种不同研究的巨大不确定性制约着我国应对气候变化的决策选择。2009年,“国家公益性行业(农业)科研专项经费”专门支持启动了“气候变化对中国农业生产的影响及应对技术研究”。组织了全国13家从事农业气象和农业生产科研的高等院校和科

研院所,由涵盖农业生产中水稻、小麦、玉米、大豆、油菜和棉花等6大作物,代表南方果树的柑橘和北方果树的苹果等种植业以及生猪、奶牛和家禽等3大养殖业技术领域的30多位一线科学家,从农业专业角度分析评估气候变化对农业生产的影响,于2010年完成了《气候变化对中国农业生产的影响分析与评估》报告^[9],本文摘要报道这个报告的主要结果,期望对中国农业与气候变化研究有所推进,并为研究和发展应对气候变化的农业技术提供科学依据,为国家应对气候变化的总体战略提供决策支持。

1 气候变化对中国农业资源的影响

气候变化已经严重地改变了我国气候的时空格局,导致了我国农业气候资源时空格局的显著变化:热量资源呈总体增加但时空分布极不均匀,其中北方地区增加幅度大于南方地区,冬季和夜间增温较大,北方地区气候变暖突出地表现为最低气温升高的贡献;降水量变化不明显,但分布格局发生明显变化,西部和华南地区降水增加,华北和东北大部分地区降水减少。特别是,伴随着气候变化农业气象灾害不断加剧,使得高温、干旱、强降水等极端天气、气候事件日益频发,进一步制约我国农业的气候资源和生产潜力,并加剧农业生产的不稳定性,从而使提高我国粮食生产面临日益严峻的减产风险。

近50年来,中国年平均气温升高,以冬季和春季增温最为明显,降水量呈微弱增加趋势,日照时数呈显著下降趋势。气候要素变化表现为明显的区域特征(表1),年平均温度整体呈增加趋势,北方和青藏高原增温更为显著,西南地区增温较缓。50年来,降水量在长江中下游地区明显增加,而华北地区减少最明显,东北和西南地区降水量也呈下降趋势。另外,全国普遍存在日照时数减少趋势,华北地区尤甚。

气候变化对农业物候的影响主要表现为春季物候期提前,秋季物候期推迟,作物生长期相对延长,因而越冬作物种植北界和多熟制北界明显北移^[10]。1981年以来,冬小麦种植北界不同程度北移西扩,东北地区玉米中、晚熟品种潜在界限不同程度北移。华北地区喜温作物生育期延长,种植面积逐渐扩大;西北地区

表 1 中国不同地区 1961—2007 年间气候指标的平均倾向率
Table 1 The average trend rate of climate index in different areas
from 1961 to 2007

区域	年均气温/ (°)·10 a ⁻¹	年降水/ mm·10 a ⁻¹	日照时数/ h·10 a ⁻¹
东北地区	0.38	-13	-24
西北地区	0.35	-8	-36
华北地区	0.23	-7	-41
长江中下游地区	0.22	8	-58
华南地区	0.20	10	-73
西南地区	0.18	17	-119

负积温减少,为冬小麦安全越冬及种植界限北移西扩提供了有利的气候条件;这些变化可能带来提高单位面积粮食生产能力和增加农作物种植面积的潜力,但在种植界限变化敏感地带,干旱和冷害等农业气象灾害发生风险显著增加。

过去 50 年来,东北、华北和西南地区全年降水量呈减少趋势,我国北方地区水资源脆弱性持续加剧,未来农业水资源量将日益短缺,灌溉农田面积将显著减少。由于升温和干旱,土壤水分蒸发大大加强,华北干旱化将进一步扩张和加剧(表 2)。而在华东和长江以南地区,秋季降水减少明显,可能会加重我国红壤地区的农业生产的秋伏季干旱问题。未来气候变化下,全国将以旱灾多发和水灾减少为特征,特别是三北地区。长江中下游地区和中南地区涝灾频率呈波动中升高,华南和西南水灾和旱灾频率均呈波动增加,气候变化将进一步加剧南涝北旱局面,这将进一步加剧中国未来农业生产的波动性。

土壤温度特别是 0~10 cm 表土土温对气候变化敏感,气候变化下东北和西北东部-华北地区有明显的年均土温升高趋势,特别是华北和东北地区冬季土壤温度升高,在江淮地区则略有降温趋势,而在西南-华南地区变化趋势并不明显。这有利于冬季土壤病虫害的越冬和早发,从而诱发次年春夏病虫害的发生

和蔓延。气候变化还可能使我国土壤退化扩张,荒漠化加剧,耕地面积缩小,而影响潜在适宜粮食种植面积的实际扩张。由于土温升高,蒸发加强,水分短缺,气候变化下三北地区盐碱化将有所发展。而在江南丘陵和西南山地,风暴潮和强降雨频率的增加会扩大和加速土壤侵蚀;由于我国耕地分布中北方多于南方,旱地多于水田,坡耕地多于平地,总体上将表现为盐碱化发展,侵蚀加剧和土壤墒情降低的土地资源变化趋势,并将进一步加剧华北、西北地区的沙化,华北和东北地区西部的盐碱化,西南山区特别是喀斯特地区的水土流失。未来气候变化下旱地比例将更大,低产田比例可能扩大,灾害脆弱性将进一步提高。耕地的自然生产力(地力贡献力)将出现降低的趋势,并诱发农业生产投入成本的加大而限制生产效益,这反过来可能限制对气候变化的适应。

所以,尽管气候变暖使得我国大陆(除西南地区外)的光温生产潜力呈显著增加趋势,其中北方地区的增幅大于南方地区,但气候变化对不同地区农业资源的影响不同,从而使作物生产潜力更具不确定性。

2 气候变化对农田生态系统过程和病虫害发生和危害的影响

气候变化通过改变土壤条件而影响农田生态系统过程。首先,气候变化将影响土壤养分储量保持及其有效性。华北和东北的升温和干旱将促进土壤有机质分解和矿化,加快土壤中养分的流失,直接影响土壤有机碳的蓄积和温室气体的排放,可能限制和降低这些地区土壤肥力的发挥^[1]。但是,气候变化对土壤氮素养分的储库和有效性的影响还存在不确定性,而对磷和钾素养分的影响不明显。

气候变化对土壤碳库、氮供给生物化学过程将产生综合影响和长期效应。气候变化促进土壤呼吸,加快农田土壤养分周转,改变农田土壤碳氮组分,其长

表 2 未来气候变化下中国农业水资源变化的一般趋势(+增加趋势,-为减少趋势)

Table 2 General trends of China agricultural water resource changes with future climate change
(+ for increasing tendency; - for decreasing trend)

地区	温度变化	降水变化	径流变化	水分蒸发损失	降水变率	水资源总体变化
长江中下游	+	+	+	+	++	季节不均(夏涝秋旱)
华北地区	++	--	-	++	++	严重缺乏
西北地区	+	+	+	+	+	增加
东北地区	++	--	-	+	+	缺乏(春季)
西南地区	+	-	/	+	+	春/秋缺乏

期效应将改变土壤微生物群落结构向适应高 C/N 条件转化。 $[CO_2]$ 升高通过刺激植物生长而导致养分吸收增强,导致土壤养分有效性降低,养分对作物产量的限制作用更为突出,这将制约 $[CO_2]$ 升高对农田生态系统生产力和碳汇功能的潜在发挥。当然, $[CO_2]$ 升高和养分管理对农田生态系统过程的影响存在复杂的交互作用,同时气候变化升温、降水和辐照强度等各因子变化对生态系统过程的影响也具有显著的交互作用。这需要在评价未来气候变化情景下农作物生产力变化中充分考虑,未来农作物产量变化估计还存在很大的不确定性。

气候变化对农业病、虫、草害的发生表现出较强影响。气候变化下升温可能促进病原菌、害虫和杂草的生长发育和生殖,扩大其分布范围向北延伸,从而将改变农作物病虫害的分布格局,主要表现为向高纬度和高海拔的扩散;气候变化总体上将提高越冬存活率,影响作物的抗病表现和病害流行,增强杂草的相对竞争力,降低天敌的控害效应,从而加剧不同地区和不同作物病虫害的猖獗为害,从而抵消或超过升温和 CO_2 浓度增高带来的“施肥”和水分利用效率提高带来的作物生产的有利效应。

气温与降水对生物的影响通常具有明显的互作效应,两因素共同影响害虫的发生。根据对我国近 50 年气候变化的分析,结合主要农作物重大病虫害的生物学和生态学特性进行分析表明,未来气温和降水变化可能使我国不同地区部分重大农业病虫害发生都表

现出加重的趋势(表 3):(1)东北、华北和西北气温升高降水减少的地区,刺吸式口器害虫的为害将加重,这些害虫传播的病毒病相应加剧;而东北、华北和西北气温升高降水增加的少部分地区,有利于麦长管蚜、麦红吸浆虫、黏虫、亚洲玉米螟、栗灰螟、华北蝼蛄等的发生和为害,降水的增加会加剧这些地区稻瘟病、小麦锈病、大豆灰斑病等病菌引起病害的流行。(2)长江中下游地区气温升高降水增加可有利于稻纵卷叶螟、褐飞虱、白背飞虱、禾谷缢管蚜、黏虫、大豆食心虫、棉红铃虫、绿盲蝽等重大害虫暴发,并加重植物病原菌引起的病害流行。(3)西南大部分地区春夏季变凉,但降雨增加有利于水稻害虫如稻瘿蚊、稻蓟马、二化螟、稻苞虫、稻纵卷叶螟的发生为害,作物苗期病害更易流行。气候变化可能影响农药的防治效果并可能导致农药用量提高。

气候变化可能在很大程度上影响生态系统生物多样性^[1]。气候变化将影响外来物种入侵过程的传入、定殖和扩张为害等各个阶段。气候变化可改变外来害虫、病原菌和杂草的传入方式,为外来入侵物种的传入提供新的传输机会;为受气候要素限制的外来入侵物种在新环境中存活和定殖提供新的机遇,促进已经定殖的外来入侵物种扩大分布范围、增加发生世代、提高越冬存活率、提前为害期、增强竞争能力、增大种群数量,从而对农作物生长发育和农业生态系统造成更大的威胁,给外来入侵害虫、病原菌和杂草的治理提出了新的挑战。

表 3 不同区域气候变化下害虫为害趋势
Table 3 Aggravating trend of pests due to climate change in different regions

区域	近 50 a 气候变化特征	主要作物及其害虫
东北地区	升温明显,气候呈暖干化趋势;土壤含水量降低	玉米:玉米蚜;水稻:二化螟;大豆:大豆蚜、朱砂叶螨、豆黄蓟马、烟蓟马;
	东北北部和内蒙古大部降水量有一定程度增加	杂粮:亚洲玉米螟、栗灰螟;大豆:豆秆黑潜蝇、大豆食心虫、草地螟
西北地区	大部升温,干旱区降水增加,暖湿化转型	小麦:麦长管蚜;玉米:亚洲玉米螟、栗灰螟
	东部半干旱区气温升高,降雨量减少	小麦:麦二叉蚜、麦岩螨;棉花:棉蚜、棉铃虫、朱砂叶螨、烟粉虱;杂粮:高粱蚜、玉米蚜;苹果:苹果蚜、苹果全爪螨、山楂叶螨、梨木虱
华北地区	升温显著,北部、西部增温大于南部、东部;降水减少,夏秋干旱严重,土壤墒情降低	小麦:东亚飞蝗、麦二叉蚜、麦岩螨;棉花:棉蚜、三点盲蝽、朱砂叶螨、棉叶蝉、棉铃虫;玉米:高粱蚜、玉米蚜、栗灰螟;蔬菜:甘薯天蛾、美洲斑潜蝇、菜螟、豆荚螟,地下害虫:暗黑金龟甲、华北大黑金龟、沟金针虫;果树:二斑叶螨、山楂叶螨、梨木虱
	黄河上游和江淮流域升温显著,降雨量通常增加	小麦:麦红吸浆虫、黏虫;玉米:亚洲玉米螟、栗灰螟等;棉花:绿盲蝽、中黑盲蝽;大豆:豆秆黑潜蝇、大豆食心虫;果树:桃蛀螟、梨小食心虫、苹小卷叶蛾
长江中下游地区	气温升高趋势,降水量增加,土壤含水量增加,江南暴雨极端事件出现频率上升、强度增大	水稻:稻纵卷叶螟、褐飞虱、白背飞虱;大豆:豆秆黑潜蝇、大豆食心虫;棉花:中黑盲蝽、棉红铃虫、绿盲蝽;果树:桃蛀螟、梨小食心虫、苹小卷叶蛾
华南地区	年平均气温上升,降水量略增加,暴雨极端事件出现频率上升、强度增大	水稻:稻纵卷叶螟、褐飞虱、白背飞虱;蔬菜:甜菜夜蛾、甘薯小象甲、甘薯麦蛾、甘薯天蛾、栗灰螟、菜蛾、黄曲条跳甲;果树:荔枝蒂蛀虫、柑橘红蜘蛛、柑橘粉虱
西南地区	四川盆地东部和西南部的降温,春夏季变凉四川、贵州变干;云南略湿	水稻:灰飞虱;蔬菜:马铃薯块茎蛾、菜粉蝶、桃蚜;果树:柑橘木虱;凉湿下水稻:稻瘿蚊、稻蓟马、二化螟、稻包虫、稻纵卷叶螟

3 气候变化对中国种植业生产的影响

3.1 作物生长发育与产量变化

气候变化中温度、CO₂ 浓度、水分等因子和极端气候事件都对作物生育期及产量表现出深刻影响。由近几十年来产量的历史统计资料分析表明,全国主要作物的平均生育期延长了 6.6 d,这主要是由于生长季延长后品种在熟期上的适应性演进。但温度变化对作物生育期和产量的影响表现出随农业产区 and 年代际的变化。同时,作物对温度的敏感性也受其他气候因子的制约,在北方干旱地区,水分是决定作物产量的关键气候因子,而在南方湿润地区,过多的降水则不利于产量的提高。大气[CO₂]升高缩短作物的生育期,在[CO₂]加倍的短期田间试验中发现水稻的生育期缩短 5 d,而抽穗期和成熟期缩短了 2~3 d。小麦的情形类似。但现有的评估研究可能过高估计了大气[CO₂]升高对作物产量的正效应。气候变化对作物产量的变化可能随不同区域的不同气候因子的交互作用和农业资源和技术交互作用而异,试验条件下一些地区的作物表现出的升温和[CO₂]升高对产量的正效应可能被有效光照的普遍减少而抵消,水分和氮素等养分供应也是不可忽视的限制因素。因此,目前还不能就未来气候变

化情景下农作物产量变化给出一个定量估计。气候变化对不同作物生产的影响归纳在表 4。

3.2 粮食作物

近十多年来,东北水稻向北扩张,种植北界北移了 4 个纬度;东北地区水稻生长期内光热水同步,且昼夜温差大,东北水稻生产可能是对气候变化的良好适应。在江淮以南地区,双季稻潜在适合面积将增大,麦稻轮作改为肥-稻-稻轮作模式可能提高粮食产量 10%~15%。

营养生长期夜温升高有提高产量的作用,但幼穗分化-抽穗期的夜温升高使产量下降,但 35℃以上的高温对水稻生产都不利;我国长江中游地区水稻生长期夜温升高对水稻产量的影响因早、晚稻而异,早稻减产而晚稻增产。长江中下游稻区在夏季的极端高温和东北夏季的极端低温同样是影响水稻生产的极端性天气/气候因素。在东北,极端性低温可能造成水稻减产在 20%以上。光照日数和有效辐射强度降低是气候变化中的水稻减产的普遍因素。CO₂ 施肥效应可能在实际水稻生产中并不明显,因为水稻的光合适应较强。气候变化各因子或者其相互叠加都具有降低稻米品质的趋势,特别是营养成分组成;气候变化下水稻主要病虫害(稻飞虱、水稻螟虫、稻纵卷叶螟、水稻纹

表 4 气候变化对中国主要农作物生产的影响比
Table 4 The comparison of influences of climate change on Chinese major crop production

作物	温度升高	降水	[CO ₂]升高	光照减少	极端性天气灾害风险	病虫害为害趋势
水稻	种植区北移扩大,江淮双熟稻面积增加,生育期缩短;但夜温升高,早稻减产(晚稻增产)	干旱化影响水稻种植面积	短期光合增强而增产,但缩短生育期,影响稻米品质	敏感,普遍减产	江淮夏季极端高温,东北夏季极端低温	稻飞虱、水稻螟虫、稻纵卷叶螟、纹枯病和稻瘟病等严重加剧
小麦	冬小麦种植区向春麦区扩展,不利效应不清楚	前期水分有利;北方春旱严重减产	短期增产,但影响品质	比水稻较不敏感,减产 5%左右	生育期中后期极端高温/低温,强降水严重减产	江淮小麦赤霉病、白粉病可能加重,麦田病虫害加剧
玉米	种植面积扩大,生长季延长,但生育期缩短,产量及品质下降	降雨增多和强降雨加剧病虫害	较水稻、小麦不敏感,尚不确定	—	旱灾、涝灾增多,低温冷害	华北玉米螟、褐斑病加重
大豆	早熟而减产	干旱大幅度减产;夏季降雨增多,加重大豆灰斑病	较水稻、小麦不敏感,尚不确定	产量对光照较不敏感,影响品质	强降雨涝灾、低温冷害	“病斑旱虫”,大豆灰斑病
油菜	冬油菜种植面积显著扩大,生长有利;冬季气温偏高,早薹、早花;	秋、冬、春季干旱减产	较水稻、小麦不敏感,尚不确定	光照较敏感,减产明显	霜冻冷害普遍减产;强降水倒伏	病虫害危害提前
棉花	种植区可能扩大,生育期积温增加,提高产量,可能增多高温胁迫	盛花期干旱、花铃期涝渍,减产严重	有利于棉花提升品质,提高经济产量	极为敏感,减产幅度大	易受多种极端天气事件影响而减产降质	棉铃虫和内陆棉区棉蚜加重
柑橘	种植带可能北扩,夏季高温经济产量和品质下降,病虫害增多	强降雨增多,缺素征可能多发	未有资料	较不敏感	极端低温/冻害加重	黄龙病北扩
苹果	早春积温增加,花期提前,花期霜害增加	黄河故道产区,夏季多雨,春秋少雨减产降质	未有资料	低温寡照减产	低温冻害和西北产区高温热害	较不敏感

枯病和稻瘟病等)的发生和危害将大幅度加剧。气候变化对水稻生产将带来更为严峻的病虫害防治问题,这是对水稻安全生产的最大威胁。总之,气候变化下未来水稻生产将表现为气候产量减产和极大的波动性。

气候变化会对我国小麦生产带来深远的影响。温度升高对小麦产量的影响目前尚无明确定论; CO_2 浓度升高对小麦可能具有较小幅度的增产作用。黄淮海麦区和长江中下游麦区冬小麦反而可能因太阳辐射强度的下降减产5%以上;小麦生长前期干旱将严重影响产量,气候变化中广大地区春旱加重将严重影响冬小麦产量。然而,因极端性天气/气候事件发生频率显著增加,高温与低温以及强降水可能对小麦生产构成极端性气象灾害,尤其是生育中后期的高温、干旱、滞涝等逆境将导致小麦结实粒、千粒重显著下降而产量锐减和品质劣变。气候变化下江淮地区小麦赤霉病、白粉病可能加重。麦田病虫害的加剧不仅导致减产,还将显著增加小麦生产成本,降低小麦比较效益而削弱小麦生产。总之,未来气候变化对小麦生产的主要影响是:(1)气候变化将扩大我国冬小麦可种植区域;(2)气候变化对小麦生长发育、产量和品质的影响表现为正负效应共存,以负面效应比重更大;(3)极端气象事件将是影响我国冬小麦生产的主要制约因素。

气候变化对玉米生产的影响因不同产区而异。温度升高和生长期延长对部分高纬度地区以及高海拔地区的玉米生产的发展总体有利。最近10多年来,玉米产量增幅高于粮食作物平均水平,特别是在东北的黑龙江地区。但生长期温度升高使玉米生育期、有效灌浆期缩短,产量及品质下降;极端性气候/天气事件将成为制约玉米生产的主要因素,黄淮海夏玉米区的高温或低温寡照和东北春玉米区的低温冷害都是玉米生产的首要气象灾害,在严重低温冷害年东北玉米减产可达20%以上。气候变化中降雨强度提高,玉米生长期持续阴雨天气将增多,玉米病虫害暴发的几率将抬升,华北地区玉米螟虫、玉米褐斑病发生和危害可能加重。与此同时,因玉米属于C4作物,玉米实际生产中 $[\text{CO}_2]$ 施肥效应可能很不明显。因此,气候变化对玉米主产区的生产影响总体上仍以减产为主。

3.3 油料和棉花

我国大豆平均产量较大幅度低于世界平均水平。除规模化种植原因以外,气候变化是影响大豆产量与品质的根本问题。气候因子中的温度、降雨、光照的变化影响大豆产量和品质的提高。黑龙江主产区

1950—2000年气象灾害成灾率高达38%,气候变化造成的大豆产量减产率平均达到27%。其中,干旱成灾年占22%,平均减产率却达到30%,其次为涝灾和低温冷害。2000年以来,气象灾害发生频率增加到60%以上,主要为旱灾。极端性气候变化对大豆产量和质量有着严重的影响,东北地区大豆生育期中几天的极端高温就可使大豆早熟而减产。另外,气候变化同样影响大豆的品质。气候变化下无论是旱灾还是涝灾,大豆脂肪含量下降,蛋白质含量升高。但特大旱灾或涝灾下,两者都下降,且蛋白质含量损失更大。大豆病虫害发生的规律通常呈“涝病旱虫”的发生态势。总体上气候变化对中国大豆生产不利效应明显。

受气候变化的影响,我国油菜生产近年来也发生了明显变化。气候变暖、无霜期延长,油菜安全越冬地区扩大,加上西北地区降雨量的增加,油菜种植存在明显的向北、向西,向高纬度、高海拔地区发展的趋势,冬油菜种植面积显著扩大。2008年全国冬油菜种植面积是1978年的2.7倍。最近几十年油菜单产也呈显著增加的趋势。但是,目前还不能肯定气候变化对油菜单产发挥了有利影响。不过,极端性天气/气候事件增加了农业气象灾害频率,油菜生产的不稳定性显著提高。提高油菜综合抗逆能力是未来油菜生产适应气候变化急需解决的问题。

棉花的产量品质形成对光照、辐射、积温等环境变化较其他作物更为敏感。棉花生长期中每年的7—9月为产量品质形成关键期,极易遭受多种极端天气气象条件的影响。尽管气温升高、 CO_2 浓度升高将在一定程度上有利于扩大棉花可种植面积,并对棉花增产提质带来积极影响。但光照时数和辐射量的下降、尤其是短期极端高温/低温、短期极端干旱/暴雨等极端天气发生的日趋频繁将提高棉花减产和品质下降的风险,严重威胁我国的棉花安全生产。

3.4 果树

气候升温对处于热带、亚热带的柑橘生产可能有一定的有利影响。但是由于柑橘对低温敏感,栽培区域主要受限于极端低温及其出现的频率。因此,全球气候变化有限的升温不足以影响现有柑橘北缘的分布。而气温和雨量不断提高的波动幅度对柑橘产业带来的风险可能大大超过其有利的影响。气候变化下柑橘冻害发生频率不减反增,早霜、晚霜及暖冬骤冷风险加大,可能是我国柑桔生产面临的重大风险;大气温度升高可能引起柑橘病、虫繁殖和生活规律的改变,柑橘黄龙病等病害发生区域北扩,可能造成北部

柑橘产区毁灭性破坏;部分柑橘产区气温升高,特别是夏季温度升高可能会造成泡皮果比例升高和品质下降;温度和雨量升高,可能使柑橘产区土壤养分淋溶增加,特别是微量元素含量减低加快,导致缺素症的发生增多。

苹果是落叶果树,喜冷凉干燥的气候条件,特别是对冬季温度要求较高。1980年以来,苹果单位面积产量呈逐年增加的趋势,总产量持续增长。冬季温度对苹果栽培关系甚大,过高不能满足冬季休眠的要求,过低容易使枝、芽遭受冻害甚至全株死亡。在渤海湾产区,平均气温和年极端最低气温分别升高1~2℃,减少了苹果冻害的发生,但苹果花期提前,果树遭受花期霜冻的概率明显增加。在陕西关中和渭东北部苹果产区,高温热害增多。在黄河故道苹果产区,夏季降水增多,春秋降水减少,严重影响了苹果生长和品质,苹果成花难、果实硬度低、品质差等问题增多。另外,低温寡照也影响苹果的着色和品质以及商品效益。比较而言,气候变化对苹果生产的影响可能较其他作物小,同时对品质的影响可能更大。但作为多年生果树,极端性天气事件对苹果生产的影响不可低估。

4 气候变化对畜牧业生产的影响

4.1 气候变化影响畜牧业生产的共性特点

草地畜牧业是受气候变化影响最大的产业之一,也是最脆弱的产业。气候变化对畜牧业的影响既是多途径的,也是多方面的。气候变化对畜牧业的影响主要通过草地资源变化而影响草地畜牧业的生产能力及其产品质量,通过气候变化中环境条件变化影响设施畜牧业,同时气候变化对农作物产量和品质的影响也间接影响设施养殖业的产量和品质。不同气候情景的模拟表明,草地生物量变化将取决于温度、降水和[CO₂]浓度升高的交互作用,考虑单一因子的试验给出了相左的结果。因此,气候变化对我国草地畜牧业的影响十分不确定,一般认为,西北地区草地饲草生物量将有较大幅度增加,特别对于高寒草地而言,短期内由于延长了生长季、提高了生物量,因而“利可能大于弊”;但对于温带草地而言,可能“弊大于利”。

由于动物蛋白需求的高速增长,畜牧养殖量大幅增加,对饲料产量的需求日益突出,而气候变化对大豆、玉米等饲料作物生产的不利影响,使得未来我国畜牧业将日益依赖国外进口的饲料及原料,特别是大豆。饲料生产成本的提高,使畜牧养殖业的利润空间受限,经济效益下降,从而影响产业的竞争力。另外,

饲草和饲料作物的病虫害为害以及动物疾病也出现了增多和扩大的趋势,如草地病虫害发生面积逐年增加;我国饲料中霉菌毒素含量不断升高;动物自身疾病频繁发生,特别是某些危害严重的畜禽新疾病如高致病性蓝耳病的发生频率增加,将对畜牧业发展构成新的威胁。气候变化中日益增加的气候变率使极端性天气灾害增多,如洪涝、干旱、极热、极冷等,可能成为设施养殖业安全生产的严重挑战,如不采取合理的应对措施,其对畜牧业造成的损失可能难以预计。

4.2 生猪和奶牛养殖

家猪属于恒温动物,圈舍人工调节又可以减弱自然环境变化对猪体的不利影响。但是,气候变化对养猪生产的不同环节仍然有不同程度的影响。气候变化因素对生猪存栏和出栏总量未造成直接影响;随着养猪业规模化、商品化和对大宗饲料原料依赖程度不断提高,整个产业带将逐步向粮食主产区集中,因此气候因素预计将通过影响玉米等主要饲料作物的产量和分布对生猪养殖区划产生间接影响;我国普遍采用的开放或半开放式的猪舍,对环境温湿度不能完全控制,因此气候变化引起的持续性高温湿热、寒冷天气将对生猪生产性能造成直接的影响,导致种猪繁殖性能、肥育猪生长性能以及疾病抵抗力大幅下降;此外气候变化引起的自然灾害频发是养猪业面临的严重威胁,猪场选址不当和缺乏与气象部门的联动使其在面对飓风、洪水及其次生灾害时表现得异常脆弱。

全球气候变暖的大背景下,气候变化对我国奶牛业的影响也日渐凸显。气候变化可能加重奶牛的冷、热应激反应,而影响奶牛的采食量、生产性能、繁殖能力、生理代谢等。舍饲半舍饲条件下,由于人为干预控制能力较强,因此气候变化中温度和降水的趋势性变化对奶牛业发展的直接影响有限,但高温、寒潮、洪涝、雪灾、干旱等极端性天气事件增多,会对奶牛生产与健康有更高的灾害风险。南方地区热应激和北方地区突发性极端气候事件增多可能对奶牛养殖业有不可忽视的影响。同时,气候变化对放牧条件下的奶牛业带来的局部影响是直接且可能是巨大的,气候变化引发的粮食产量下降必然会推动饲料价格上涨,而降低奶牛养殖的利润空间,从而可能影响牛奶生产积极性,而间接诱发牛奶供应短缺。

4.3 家禽

养禽业是我国畜牧业的支柱产业。以气候变暖为主要特征的气候变化会对养禽业造成重要影响,这些影响既有直接的,也有间接的,存在正面有利的影响,

同时负面不利影响也不可低估。从宏观上看,养禽业中禽类生长和产量对气候变化的敏感性较低。但是,极端性天气事件可能对养禽业造成灾害性影响,例如龙卷风、强降水和极端高温,这些影响具有区域性和偶发性特点。气候变化中频繁发生的夏季持续高温会对养禽业造成严重的不利影响,气候变化下禽类热应激将十分普遍,当前由于缺乏养殖场受高温应激影响的实际生产统计数据,高温对蛋鸡、肉鸡生产性能的影响等试验资料尚难以评估气候变化下热应激对养禽业的生产的影响幅度。同时,气候变化对养禽业的间接影响是气候变化下饲料作物生产能力降低,饲料原料供应短缺引起饲料成本增加,应对极端性天气影响的饲舍设施引起养殖成本增加,同样会影响养禽业的经济效益和市场竞争力。

5 近60年中国农业生产能力变化及其与气候变化的关系

中国农业近60年来呈阶梯式增长的背后,是生产力提高和稳定的周期由初期的6~7年缩短到最近的3~4年,平均年增长率由起初的>4%降低到新近的不足2%。中国粮食生产表现出巨大的区域变异性和年代间的波动性,技术因素对于生产力的贡献愈益受到外部因素的削弱或掩盖。粮食产量年增长率的下降还带来农业物质和能源成本的飙升,这对气候变化产生正反馈。粮食作物的单产水平因作物和区域而表现出显著的差异,稻作区和水稻的产量和稳定性高于旱作区和旱作物,气候边缘区或敏感区的产量变率(不

表5 我国不同地区1949—2006年间气候变率与旱作物和水稻气象产量减产风险分布

Table 5 Distribution of the risk in reducing between the rate of climate change and dry-crops and rice meteorological yield in different regions from 1949 to 2006

区域	年均温度 变率/%	年均降水 变率/%	气象产量变异系数/%		综合减产风险	
			旱作	稻作	旱作	稻作
东北	16.81	21.41	20.88	28.18	1.33	2.39
华北	10.74	28.78	12.58	22.67	0.98	2.08
西北	10.37	30.10	10.34	23.84	1.08	2.13
华东	3.52	20.44	16.35	12.06	1.42	1.07
华南	2.82	21.32	13.17	11.10	1.44	1.18
西南	5.67	17.80	12.67	13.89	1.34	1.31

稳定性)最高(表5)。

我国不同地区均存在气象产量的减产趋势。尤其是北方(西北、华北和东北)地区大陆性气候地区,是我国粮食生产主产区,也是未来潜在增长区,但恰恰明显地表现为气象产量减产的高风险地区(图1);在这些地区,气候变化中降水变化带来的干旱化可能削弱或抑制了升温的有利效应,特别是水资源日益紧缺的华北地区。水稻在西北和东北的扩张可能提高粮食生产能力,但是这些地区的水稻气候变化下的高减产风险不可忽视。综合来说,中国不同地区粮食生产仍将主要面临不同程度的减产风险和波动风险,将表现为总体的减产和日益增大的生产力的不稳定性 and 粮食生产能力的不确定性。

从过去60年农业生产的地区差异的变化中可以

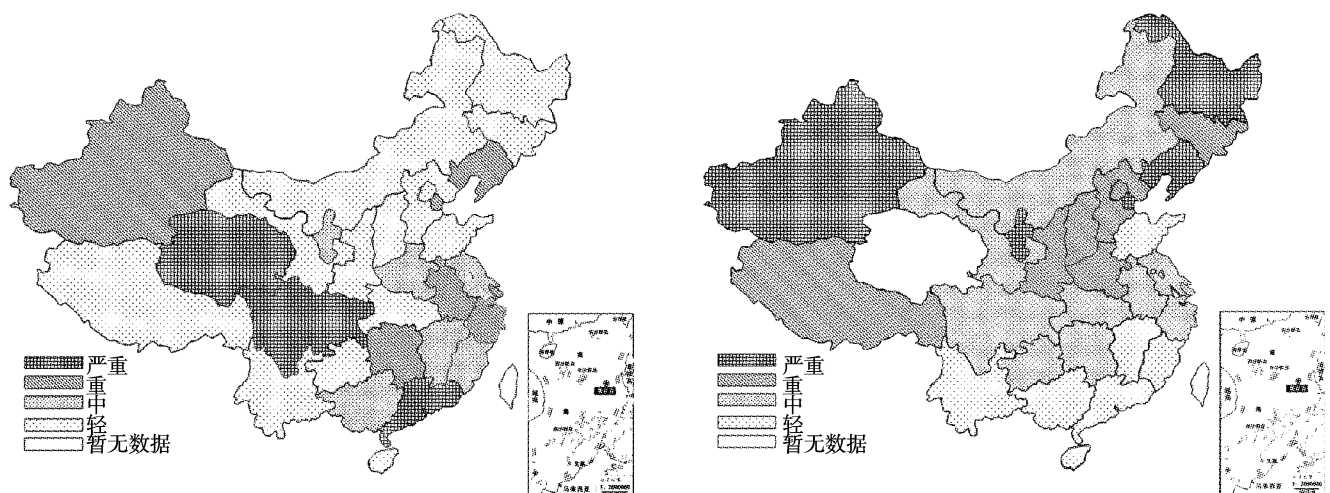


图1 1949—2006年中国粮食生产气象产量减产综合风险的区域分布(左为旱作;右为稻作)

Figure 1 Regional distribution of comprehensive risk in reducing Chinese grain meteorological yield from 1949 to 2006 (left, dry-farming; right, rice)

预示,在我国耕地和粮食生产重心北移和西移的背景下,在没有适应性技术对策的情况下,未来气候变化可能至少使粮食生产减产 10%以上,而生产的年际不稳定性将提高 15%以上。无论是减产还是产量波动性,在东北、华北、西北地区等 90 年代以来增温和干旱化强烈的大陆性气候地区,粮食生产存在十分严峻的减产风险。气候变化影响将严重制约技术进步对粮食生产的贡献,并将进一步提高农业成本,从而降低农业比较效益。

过去 60 年来中国农业生产的变化突出地表现为:

(1)随着总体生产水平的提高,气象产量仍表现为减产的趋势。

(2)耕地北移的潜在面积变化与所扩张耕地的生产力及其稳定性的矛盾。

(3)气候变化的强烈波动性日益遏制农业技术进步的生产效益。

参考文献:

- [1] 秦大河,丁一汇,苏继兰,等. 中国气候与环境演变(上卷):气候与环境的演变及预测[M]. 第一版. 北京:科学出版社,2005.
Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, et al. Assessment of Climate and Environment Changes in China (I):Climate and environment changes in China and their projection[M]. Beijing:Science press, 2005.
- [2] Schmidhuber J, Tubiello F N. Global food security under climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(50): 19703-19708.
- [3] Miraglia M, Marvin H J P, Kleter G A, et al. Climate change and food safety:An emerging issue with special focus on Europe [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2009, 47: 1009-1021.
- [4] Food and Agriculture Organization, FAO profile for climate change [EB/OL].[2009-07-21]. <http://www.fao.org/docrep/fao/012/ak914e/ak914e00.pdf>.
- [5] 国家发展改革委员会. 国家粮食安全中长期规划纲要(2008-2020). 2008. <http://www.gov.cn> 新华社 2008 年 11 月 13 日发布. 访问日期:2010/01/13.
National Development and Reform Commission. The national food security long-term planning programs(2008-2020). 2008. <http://www.gov.cn>. Xinhua. 2008/11/13. Visit date :2010/01/13.
- [6] 顾益康,袁海平. 中国农业安全问题思考[J]. 农业经济问题, 2010, 131(4):53-57.
GU Yi-kang, YUAN Hai-ping. Reflections on China's Agriculture Security[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2010, 131(4):53-57.
- [7] Cline W R. 2007. Global warming and agriculture, impact estimates by country[M]. Center for global development, Peterson Institute for International Economics. Washington, DC, USA. 1-186
- [8] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等. 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.
LIN Er-da, XU Yin-long, JUANG Jin-he, et al. National assessment report of climate change(II):Climate change impacts and adaptation[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(2):51-56.
- [9] 潘根兴,等. 气候变化对中国农业生产的影响分析评估[M]. 北京:中国农业出版社,2010.
- [10] 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[J]. 中国农业科学, 2010(43):329-336.
YANG Xiao-guang, LIU Zhi-juan, CHEN Fu. The possible effects of global warming on cropping systems in China I . The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010(43):329-336.
- [11] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J. , et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100[J]. *Science*, 2000, 287:1770-1774.
- [12] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129:344-348.