

中国生态与农业气象研究进展

吕晓敏^{1,2} 周广胜^{1,2}

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081 2 中国气象局固城农业气象野外科学试验基地, 保定 072656)

摘要: 目前中国生态与农业气象研究主要关注气候变化的影响, 而脆弱性与风险预估研究仍存在很大不确定性, 甚至无法进行预估研究。以生态/农业气象的脆弱性和风险为切入点, 从生态/农业的地理/种植分布、物候/生育期和生产力/产量等方面, 综述了中国生态/农业气象的研究进展, 指出现有研究成果难以满足高质量生态保护与粮食安全的需求, 为此提出了未来拟重点开展的研究任务, 即生态/农业气象承载力及其优化布局、生态/农业气象的灾变过程与调控机制、生态/农业变化的气象条件贡献率评估及其适应技术、高质量生态保护与粮食提质增效的气候资源高效利用和定向调控研究, 以推进中国生态与农业气象脆弱性与风险研究, 为中国生态/农业气象科学应对气候变化提供依据。

关键词: 生态气象, 农业气象, 气候变化, 脆弱性, 风险

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.014

A Review on Ecological and Agro-Meteorology in China

Lyu Xiaomin^{1,2}, Zhou Guangsheng^{1,2}

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2 Gucheng Agrometeorological Field Scientific Experiment Base, China Meteorological Administration, Baoding 072656)

Abstract: Research of eco- and agro-meteorology mainly focuses on the impact of climate change in China at present, but there are still great uncertainties in the research of vulnerability and risk prediction, and even the prediction research cannot be conducted. Taking the vulnerability and risk of eco-/agro-meteorology as an entry point, from the aspects of geography/planting distribution, phenology/growth period and productivity/yield in ecology/agriculture, this paper summarizes the research progress of eco-/agro-meteorology in China. It is pointed out that the results are difficult to meet the needs of high-quality ecological protection and food security based on the existing research. And the key research tasks to be carried out in the future are proposed, namely, research on carrying capacity and its optimized layout of eco-/agro-meteorology, catastrophe process and regulation mechanism of eco-/agro-meteorology, the evaluation of the contribution rate of the meteorological conditions and its adaptation technology of changes in ecology and agriculture, the efficient utilization of climate resources and targeted regulation of high-quality ecological protection and food quality and efficiency. These tasks aim at promoting the research on the vulnerability and risk of eco- and agro-meteorology of China, as well as providing bases for responding scientifically to climate change.

Keywords: ecological meteorology, agrometeorology, climate change, vulnerability, risk

0 引言

工业革命以来, 大气中的二氧化碳等温室气体浓度呈现不断增长趋势, 全球气候变暖趋势仍在持续。1900年以来, 全球大陆平均增温趋势约 $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$; 降水有所增加, 干旱区域趋于增大^[1]; 1950年以来, 全球极端冷天显著减少, 热天显著增多, 极端降水增强的区域增大^[2]; 1993年以来, 全球平均海平面上升率约 $3.1\text{ cm}/10\text{ a}$, 且正在加速^[3]。最新

的均一化观测资料表明, 1900年以来, 中国气温升高趋势在 $1.3\sim 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$, 北方更甚^[4-5]; 1960年以来增暖更快, 达 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 冬春季更甚; 极端冷天显著减少、热天显著增多, 霜冻日数减少 ($-3.31\text{ d}/10\text{ a}$), 生长季延长 ($2.82\text{ d}/10\text{ a}$); 降水总体有所增加 ($4.2\text{ mm}/10\text{ a}$), 东南部、西部和东北部增势明显, 但东北南部、华北到西南一带则呈减势; 暴雨普遍趋频, 东南部尤甚; 同期极端少雨天气也增多, 特别是伴随高温热浪而快速发展的“骤旱”事件剧增^[6-9]。如此剧烈的气候变化将对全球, 尤其是中国的生态与农业气象产生重大影响。揭示生态与农业气象脆弱性和风险的形成机制, 科学地评估生态与农业气象的脆弱性和风险已经成为全球变化研究的热点与难点, 也是中国科学家面临的严峻挑战。

收稿日期: 2021年3月30日; 修回日期: 2021年4月15日
 第一作者: 吕晓敏 (1989-), Email: lvxm@cma.gov.cn
 通信作者: 周广胜 (1965-), Email: zhoughs@cma.gov.cn
 资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (2018YFA0606103);
 第二次青藏高原综合科学考察研究
 (2019QZKK0106)

生态或农业气象的脆弱性指生态或农业系统遭受或没有能力应付气候变化（包括气候变率和极端气候事件）不利影响的程度，是系统内的气候变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和适应能力的函数^[10]；生态与农业气象风险指发生在未来特定时间段的生态或农业潜在损失的事件^[11]。近年来，中国科学家从气候变化影响的观测事实与未来预估出发，开展了大量的生态/农业气象研究。本文试图以生态/农业气象的脆弱性和风险为切入点，从生态/农业的地理/种植分布、物候/生育期和生产力/产量等方面，综述中国生态与农业气象研究进展，提出未来拟关注的研究重点，以为中国生态/农业气象科学应对气候变化提供依据。

1 生态气象的脆弱性与风险

生态气象是研究生态系统与气象条件相互作用的科学，它研究的基本单元是生态系统，指在一定的时间和空间范围内，由生物群落与其环境组成的一个整体，其研究内容包括了气象的生态效应格局和规律，涉及了陆地、水生生态、自然资源生产和管理（森林、农业、草地、湿地、园艺和海洋生态系统）、以及生态系统脆弱性与风险评估等^[12]。气候变化将对中国大陆生态系统的地理分布、物候和功能产生重大影响。

1.1 生态气象脆弱性观测研究

气候变化明显影响物种、群落和生态系统的地理分布。中国中东部地区的调查和文献分析表明，80%的物种平均北移约 3.37° ^[13]；西北地区主要木本植物树种呈西移趋势^[14]；大兴安岭地区湿地面积呈减小趋势^[15]。华北和东北辽河流域向草原化发展，西部荒漠和草原略有退缩^[16]；青藏高原高寒草地分布面积缩小并向高海拔地区移动^[17]。青藏高原湿地面积显著增加^[18]；华北地区湿地核心区呈北移趋势^[19]；长江中下游地区的湿地面积逐渐萎缩^[20]。

森林植被生长季的开始期以提前为主，结束期以推迟为主^[21-22]。1960—2012年，714条木本植物（含乔木和灌木）的春、夏季物候期序列中有94%提前，平均提前趋势为 -2.55 d/10 a；294条木本植物秋季物候期（叶变色和落叶期）序列中有77.5%推后，平均推后趋势为 1.98 d/10 a^[23]。中国春季物候区域差异显著，华北平原木本植物物候变化趋势最大，云贵高原变化趋势最小^[24]。森林植物春季物候尽管在多数站点呈显著变化趋势，但个别站点的变化并不明显，如牡丹江的40种木本植物中仅1种在1978—2014年显著提前^[25]。遥感物候监测表明，东北地区针叶林的春季物候期以 2 d/10 a的速率显著提前，但大兴安岭山地植被

和阔叶林的春季物候期变化不显著^[26-27]。1982—2010年，中国植被秋季物候呈推迟趋势，其中温带落叶阔叶林平均推迟 2.5 d/10 a、落叶松林平均推迟 1.3 d/10 a、寒温带大兴安岭山地植被平均推迟 3.2 d/10 a^[25]。青藏高原高寒草甸和高寒草原返青期提前速率为 7.8 d/10 a和 7.2 d/10 a、枯黄期推迟，生长季均呈延长趋势^[27-28]。也有研究表明，新疆草地返青期提前，枯黄期呈推迟趋势，生长季延长速率为 0.25 d/a；东北地区草甸和草原返青期呈提前趋势，枯黄期呈推迟趋势^[29]。但是，一些草地物种，如典型草原糙隐子草（*Cleistogenes squarrosa*）和克氏针茅（*Stipa krylovii*）随气候变化返青期显著延迟，后续物候期均呈提前趋势，整个生长季呈缩短趋势^[30]。1960—2012年发表文献中，127条草本植物的春、夏季物候期序列中有83%提前^[23]。遥感物候监测表明，草原返青期在青藏高原西南地区和内蒙古高原于1980—2000年主要呈提前趋势，在东北地区于2000年后开始推迟；草原黄枯期在青藏高原的推迟趋势不明显，但在内蒙古高原以 1.1 d/10 a的速率推迟^[31]。

中国南方阔叶林、针叶林和森林的总地上生物量以及东北地区，特别是长白山和小兴安岭北部的森林生物量均呈显著增加趋势^[32-33]。内蒙古草原植被生产力在典型草原和荒漠草原呈下降趋势，而在草甸草原呈弱上升趋势^[34]。气温变暖使得中国北方森林的碳储量持续增加^[35]，尽管对北方草原土壤碳储量的影响存在较大的空间差异，但高寒草甸、高寒草原、温带草甸草原、典型草原、高寒荒漠和温带荒漠的土壤碳储量均呈下降趋势。

1.2 生态气象风险预估

气候变暖将导致树种向高海拔和高纬度地区迁移^[36]，树线向高海拔迁移^[37]；热带和暖温带森林的面积呈增加趋势，温带和北方森林面积呈减少趋势，中国东部的大部分植被特别是北方森林和热带森林的北界北移^[38]；热带常绿树种分布区将大幅度减小，仅在云南省存在；热带雨绿树种分布区将增加2倍以上；亚热带常绿树种分布区减小；温带落叶阔叶树种和温带常绿针叶树种分布区西移；北方落叶针叶树种分布南界北移，分布面积减小^[39]。未来降水增加或CO₂浓度增加有利于森林净初级生产力（NPP）的增加^[40-41]，但不同类型和区域的森林NPP对气候变化的响应存在差异。未来气候变暖不利于成熟林固碳，在气温增幅较大的东北和东南林区，特别是长白山林区，森林植被和土壤固碳速率将大幅降低，而在气温增幅较小的西南林区的南部和其他林区，植被和

土壤固碳速率将提高^[42]。也有研究表明,气候变化整体效应仍然能够增加大兴安岭森林的碳储量,未来100年森林地上和土壤有机碳储量分别增加9%~22%和6%~9%^[43]。到2050年,中国乔木林和新造林的总碳储量和平均碳密度与2010年相比将分别增加81%和41%^[44]。

未来气温升高、中国西南部降水显著增加而东北部降水减少情景下,内蒙古温性草原的总面积有所增加,主要源自典型草原和荒漠草原向西和向北扩张;草甸草原的南北边界都有北移趋势,但面积将有所减少;内蒙古草原东部的气候暖干化有使森林被草甸草原替代的趋势,而西部的气候暖湿化有使温性草原向荒漠带扩张的趋势^[38];冻原高山草地向西北的冷干气候区移动,青藏高寒区冻原高山草地面积比从60.40%减少至36.75%,东部季风区的冻原高山草地将在21世纪末消失^[45];温性典型草原和高寒草甸的适宜区减小,大针茅、贝加尔针茅、短花针茅等主要建群种的分布范围向西南扩展^[39]。未来气候变化情景下,温带草原NPP呈下降趋势^[46];青藏高原高寒草甸NPP呈增加趋势^[47],在考虑CO₂肥效作用时增加更明显。也有研究表明,中国各类型草地的生产力均呈增加趋势^[48];若考虑大气CO₂肥效作用,高寒草甸、温性草甸草原、温性典型草原和温性荒漠草原4类草原的NPP均明显增加^[49]。未来气候变化情景下,高寒区域草地的土壤有机碳均明显增加,而温带地区草地均有所降低^[48]。但也有研究表明,未来气候变化情景下三江源草地的土壤有机碳呈显著减少趋势^[50]。

未来气候变化情景下,东北地区沼泽湿地面积呈明显减少趋势,且分布区呈由东向西迁移、南北向中心收缩的趋势^[51];青藏高原湿地总面积呈减少趋势^[52]。也有研究表明,三江平原沼泽湿地尽管受未来气候变化的不利影响,但面积仍呈增加趋势^[53]。皱蒴藓属(*Aulacomnium*)和寒藓属(*Meesia*)是北温带沼泽或湿原藓类属的代表,未来气候变化情景下,皱蒴藓属的分布区呈增加趋势,寒藓属的分布区则呈减少趋势^[54]。未来气候情景下,三江平原沼泽湿地的NPP及其空间分布没有显著变化,但年际波动加剧^[55]。但也有研究表明,未来不同气候情景下的三江平原湿地NPP均呈增加趋势,但增加的幅度不同^[56]。辽河三角洲芦苇沼泽NPP呈增加趋势^[57]。湿地是全球最大的甲烷自然排放源。研究表明,即使青藏高原和三江平原湿地保持现有分布面积不变,未来气候变化将使湿地甲烷排放量较当前水平增加32.0%~90.8%^[58]。

未来气候情景下,温带荒漠向冷湿气候迁移,半荒漠向暖湿气候迁移,西北干旱区温带荒漠呈减少趋势^[45]。荒漠树种的东部边缘适宜区缩减,多数树种适宜区西移^[14]。57.14%的荒漠植物适宜分布区明显向高纬度地区迁移,而42.86%的荒漠植物适宜分布区向低纬度地区迁移^[59]。梭梭林在未来气候情景下呈显著增加趋势,其分布区呈向西北和东北迁移趋势^[60]。未来气候变化情景下,西北干旱区植被NPP呈增加趋势^[61];西鄂尔多斯5种荒漠灌丛(沙冬青、霸王、四合木、半日花和红砂)的土壤碳排放量将比基准高出6.60%~14.66%,其中沙冬青灌丛地增加幅度最小,半日花灌丛地增加幅度最大^[62]。也有研究表明,新疆北部和南部的荒漠碳汇潜力在未来降水持续增加条件下将明显增加。

以1961—1990年为基准期,未来气候情景下中国自然生态系统整体表现为适应性减弱、脆弱性增加的趋势。温带草原向西南迁移,占据了大片高寒植被区。未来典型浓度路径RCP4.5气候情景下,高寒荒漠和高寒草原几乎消失;而在RCP8.5气候情景下,热带雨林、高寒草原、高寒荒漠均基本消失。在区域上,表现为高纬度、农牧交错区和青藏高原地区的生态系统脆弱性加剧^[39]。

2 农业气象的脆弱性与风险

农业气象是研究气象条件与农业相互关系及其规律的科学,主要研究与农业有关的气象条件和制约农业的气象条件及其解决措施^[63]。在气候变化背景下,农业气象研究作为基础与边缘交叉学科,坚持需求和问题导向、跟踪国际学科发展前沿,信息技术和生物技术的发展提高了其研究手段,加强了作物模式与遥感和GIS技术的结合,开展全球气候变化背景下农业生产系统所受的影响及响应;完善农业气象研究理论和方法,在解决农业生产重大需求和科学问题中得到发展。已有研究表明,气候变化将严重影响农作物生长发育和产量形成的热量资源、水分资源、光资源和大气资源。1961年以来,全球气候变化极大地改变了我国农业气候资源的时空分布格局^[64]。热量资源表现出总量增加、空间分布极其不均衡的变化特征,水分资源总体表现出显著的年际和年代际变化、空间分布不均以及农业水分利用效率偏低的特征,光资源表现出总体减少、空间分布不均的显著变化特点,大气资源总体表现出温室气体浓度明显增加和大气污染日趋严重的特征^[65]。同时,气候变化加剧了农业气象灾害,主要表现为干旱、洪涝、高温和低温灾害频率和强度的变化,从而将对我国农业种植格局和作物产量

产生严重影响。

2.1 农业气象脆弱性观测研究

气候变化将严重影响我国主要粮食作物的种植制度、作物布局和适宜种植区以及作物产量。气候变暖使我国多熟制可能的种植北界向高纬度高海拔地区扩展，多熟种植面积扩大。与1951—1980年相比，1981—2010年中国一年一熟区种植面积由19.7%减少到19.2%，相当于减少8200 hm²，二熟区耕地面积由52.3%减少到50.0%，相当于减少49900 hm²，三熟区耕地面积由28.0%增加到30.8%，相当于增加98500 hm²，复种指数可增加1.7%。预计2011—2040年和2071—2100年，我国一年一熟和一年两熟种植面积将进一步缩小，而一年三熟种植面积将持续增加^[66]。

气候变化使作物布局变化，可种植面积扩大。与1951—1980年相比，1981—2010年东北三省寒地水稻种植北界平均北移120 km，水稻安全种植北界可北移至嫩江中部—五大连池—逊克北部一线；未来升温1~3℃情景下，寒地水稻安全种植北界向北移动411~545 km，向北扩展至黑龙江省呼玛以北地区，温度升高3℃时，除漠河地区外都可种植寒地水稻^[67]。与1951—1980年相比，1981—2010年华南地区麦稻两熟、早三熟、中三熟和晚三熟可种植北界平均移动分别约10 km、30 km、52 km和66 km^[68]。

气候资源变化使得主要粮食作物的适宜种植区发生变化。与1951—1980年相比，1981—2010年中国冬小麦光温潜在产量最高产区和高产区面积分布增加6.3%和7.4%，最稳产区面积减少了25.8%；冬小麦最适宜区、适宜区和可种植区界限在空间上都发生改变。其中，最适宜区界限北移西扩，适宜区界限向东北方向移动^[69]。与1951—1980年相比，1981—2010年中国单季稻和双季早稻适宜区减小，而双季中稻和双季晚稻适宜区扩大，预计2011—2040年和2071—2100年呈现类似的变化趋势；1981—2010年东北三省春玉米气候适宜区和次适宜区面积比例由61.1%增加为83.0%，最适宜区面积比例由18.8%减少为6.7%，可种植区面积比例由20.1%减少为10.3%^[70]。

气候变暖已对我国主要粮食作物生长发育进程产生了显著影响，但不同作物的物候期对气候变化响应不同，大多数表现为营养生长期及全生育期时长缩短，生殖生长期变化不明显或略有延长。1981—2010年中国冬小麦的平均播种推迟了2.29 d/10 a，成熟期提前了1.42 d/10 a，全生育期平均缩短了3.69 d/10 a，但生殖生长期的平均长度延长了0.61 d/10 a^[71]。华北地区玉米生育期内平均气温每上升1℃，其全生育期

和生殖生长期天数分别缩短2.7 d和1.1 d。

由于我国粮食主产区不同区域气候变化特征差异较大，因此气候变化对不同主产区粮食作物的影响不尽相同。1981—2009年，气候变化使我国北方小麦增产0.9%~12.9%，南方小麦减产1.2%~10.2%^[72]；华北平原夏玉米减产15.0%~30.0%^[73]，西南玉米减产13.0%~17.0%，西北玉米增产13.0%~14.0%^[74]。

2.2 农业气象风险预估

对于东北地区春玉米种植区域来说，在RCP4.5和RCP8.5情景下，预计2011—2100年晚熟玉米种植区域北扩至黑龙江省、内蒙古中部地区和吉林省大部分，不能种植区域明显减少^[75]。对于中国水稻适宜区来说，与1951—1980年相比，未来2011—2040年和2071—2100年中国单季稻和双季早稻适宜区减小，而双季中稻和双季晚稻适宜区扩大^[76]。未来升温1~3℃情景下，寒地水稻安全种植北界向北移动411~545 km，向北扩展至黑龙江省呼玛以北地区，温度升高3℃时，除漠河地区外都可种植寒地水稻^[67]。另外，未来RCP2.6和RCP8.5气候情景下，无论是全国水平，还是各稻区持续3~5 d的高温事件明显增多，1961—2000年中国水稻高温中心主要集中在110°—113°E，28°—30°N，湖南北部与湖北省交界处附近，预计2021—2050年高温中心有向东北方向移动的趋势^[77]。

在不考虑品种更替的背景下，1980—2008年，温度变化引起我国水稻单产增加0.8%，小麦、玉米的单产分别降低0.3%和0.4%；而温度和降水的协同变化引起我国水稻单产增加1.2%，总产增加 4.6×10^8 t；小麦、玉米的单产分别降低0.3%和0.4%，总产分别降低 2.5×10^7 t和 1.5×10^8 t^[78]，温度升高1℃，作物产量降低5%~10%，甚至更多。在仅改变未来气候变化的条件下，冬、春小麦的灌溉小麦单产相对于1996—2005年普遍减产，并且随着气候变化，灌溉小麦的减产概率上升，预估到21世纪末期，RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下冬小麦分别减产2%、6%和9%左右，减产概率超过85%，春小麦分别减产5%、8%和15%以上，减产概率超过90%；在雨养条件下，预估到21世纪末期，在RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下，冬小麦增产21%~25%以上，增产概率超过90%^[79]。未来随着气温和CO₂浓度的上升，水稻产量呈增加趋势，在RCP8.5情景下，2020—2099年中国区域平均水稻产量在21世纪末达到22%，在空间上，东北和西南地区水稻增产较多，可达40%以上^[80]；2000—2100年，东北地区玉米生育期会缩短，产量也会相应地下降，中

熟和晚熟玉米平均减产3.3%和2.7%^[81]。

以1961—1990年为基准期,未来气候变化总体对主要粮食作物(水稻、小麦、玉米)种植面积扩大有利,但不同粮食作物对气候变化的适应性与脆弱性因作物而不同^[39]。未来全球升温1.5℃和2.0℃情景下,中国玉米平均减产幅度分别为3.7%和11.5%^[82]。气候变化对西北半干旱地区马铃薯产量具有显著的负效应^[83-84]。1961—2016年气候变化使得晋北地区马铃薯气候生产潜力每年降低17.7 kg/hm²,其中辐射的影响最大^[85],而在未来气候变化的背景下(2011—2060年),中国黄土高原马铃薯产量总体呈现下降趋势^[86]。

3 研究展望

生态气象主要研究生态系统与气象条件的相互关系,是生态学与气象学的交叉融合,体现了以生态系统为核心的多圈层的相互作用,以及气候变化对生态类型及其地理分布的决定作用等。农业气象主要研究农业生产与气象条件之间的相互关系。农业气象的形成与发展是与农业生产密切相关,是农业科学与气象科学的交叉融合^[63],既要研究农业生产对气象条件的要求和响应,揭示气象条件的发生、变化和空间分布规律对农业生产的影响;同时也研究农业生产的对象和过程对气象条件的反馈作用,不断地解决影响和制约农业生产的气象问题,实现农业生产的高产、优质、高效益。相对来说,生态气象研究涉及的时间尺度跨度更大,空间范围更广(从叶片气孔到全球),研究内容不仅包括多圈层相互作用的生物—物理—化学—管理过程与定量描述,还涉及灾变过程、识别与灾害风险管理等^[12]。

气候变化从植被地理分布/作物种植分布、物候/生育期和生产力/产量等方面显著影响了生态与农业气象,改变了生态/农业气象的脆弱性和风险。现有气候变化背景下生态/农业气象的脆弱性和风险研究为生态系统保护和粮食安全提供了决策依据。尽管如此,现有研究成果仍难以满足高质量生态保护与粮食安全的需求,主要体现在对生态/农业气象脆弱性与风险的形成机制与变化规律的认识严重不足,使得现有研究主要停留在观测研究阶段,而预估研究仍存在很大的不确定性,甚至无法进行预估研究。为此,科学地制定生态与农业气象应对气候变化决策迫切需要开展以下研究:

1) 生态/农业气象承载力及其优化布局研究。中国生态/农业风险暴露程度较高,气候变化所引起的极端天气气候事件极易造成生态/农业生产损失。尤其是

农业风险具有风险单位大、区域性、伴生性、风险事故与风险损失的非一致性,灾害发生频率高且损失规模较大等特点^[87]。生态/农业气象灾害的发生具有较强的客观性,但是最终造成的实际损失还取决于生态/农业体系的承灾能力与减灾措施的成效。中国气候变化的时空变异大、不同地区的种植制度不同,以往关于不同植物在气候变化背景下的种植制度、分布格局以及不同类型/品种在不同地区对资源的利用效率、对气象灾害的效果评价研究等还较缺乏。未来需根据中国不同地区的气候变化特征和资源能力,重点研究生态/农业的气候资源高效利用机制,生态/农业的气象灾害时间和空间分布规律,明确影响生态分布格局和农业种植格局的气象敏感指标,发展基于气候资源和气象灾害的生态/农业气象承载力评估技术,提出基于生态/产量最优的优化布局对策措施。

2) 生态/农业气象的灾变过程与调控机制研究。目前气象灾害监测指标仍以气象指标为主,结合植物生长特性、发育过程并能指示灾害对其生产力/产量影响程度的指标较少,现有研究主要考虑灾害的发生与强度或对生态/农业的影响^[88-89],未考虑灾害过程的影响进展及其与生产力/产量的关系,且生态/农业气象的灾变过程与各气象灾害影响因子之间的关系及其影响机制仍不清楚,使灾害的监测预警与减灾保产不能很好地联系起来。未来需重点研究不同生态/作物类型、不同生育阶段以及不同环境下不同灾害的影响过程和机制,明确不同生态/作物类型、不同生育阶段的致灾临界气象条件,发展灾变识别技术与方法^[12],建立灾变监测评估预警模型,提出不同类型、不同生育阶段的生态/农业气象灾害应对技术与措施。

3) 生态与农业变化的气象条件贡献率评估及其适应技术研究。影响生态/农业变化的主要因素有天气气候条件和人为干扰。天气气候作为决定生态系统和生态环境最活跃、最直接的因子,对我国生态文明建设有着重要的影响。特别是重大气象灾害给生态/农业生产造成的破坏,不利气候变化造成的生态系统逆向演替。国家在考核生态文明建设、进一步做好生态保护/农业生产过程中需要知道气象条件的贡献大小,但目前气候和气候变化对生态质量影响评价技术与指标体系还没有建立;过去与现在气候变化影响识别归因,及如何区分气候变化与其它因素(如人类活动)影响,明确气候变化贡献评价方法仍不明确^[12],不能定量评价气象条件在保障生态/农业安全中的贡献率,一定程度上制约着减缓气候变化对生态与农业变化不良影响的科学政策与措施的制定。迫切需要重点研究

生态/农业变化与气象条件（气候资源和气象灾害）的关系，发展综合考虑生态分布/农业种植的地理格局、生产功能与服务功能的生态/农业健康评价指标，明确影响生态/农业健康的气象敏感指标，研发气象条件对生态/农业变化贡献率评价模型，研究提出不同类型生态/农业适应气候变化的技术与措施。

4) 高质量生态保护与粮食提质增效的气候资源高效利用和定向调控研究。当前科学研究提高了气候变化对生态保护/农业生产影响的客观认识，为确保生态保护/农业生产与粮食安全提供了决策支持，但仍存在一定的不足，如气候变化（包括气候、大气成分和土地利用变化等）对生态/农业的综合影响认识不足，评估模型不能动态地反映生态保护/农业种植制度与各种调控措施的影响等^[90-92]。保护生态环境已成为全球共识，目前关于生态变化，尤其是人类-生态/农业相互作用的过程、格局与驱动力仍不清楚，严重制约着生态保护的监测预警、风险管理和粮食的增产增效。因此，未来研究需进一步提出高质量生态保护与粮食提质增效指标体系及其气象敏感指标，分析高质量生态保护与粮食提质增效的气候资源数量及其配置，揭示高质量生态保护与粮食提质增效的气候调控机制，研发高质量生态保护与粮食提质增效的精细化气候区划，发展高质量生态保护与粮食提质增效的气象灾害识别与调控技术。

参考文献

- [1] Xu W H, Li Q X, Jones P D, et al. A new integrated and homogenized global monthly land surface air temperature dataset for the period since 1900. *Climate Dynamics*, 2018, 50: 2513-2536.
- [2] Wang J, Chen Y, Tett S, et al. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. *Nature Communication*, 2020, 11: 528.
- [3] Cazenave A, Meyssignac B, Michaël A, et al. Global sea-level budget 1993-present. *Earth System Science Data*, 2018, 10: 1551-1590.
- [4] Cao L J, Yan Z W, Zhao P, et al. Climatic warming in China during 1901-2015 based on an extended dataset of instrumental temperature records. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(6): 064005.
- [5] Yan Z W, Ding Y H, Zhai P M, et al. Re-assessing climatic warming in China since 1900. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(2): 243-251.
- [6] Yin H, Sun Y. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(4): 218-226.
- [7] Yuan X, Wang L Y, Wu P L, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. *Nature Communication*, 2019, 10: 4661.
- [8] Hu L S, Huang G, Qu X. Spatial and temporal features of summer extreme temperature over China during 1960-2013. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(3-4): 821-833.
- [9] 孙继松. 短时强降水和暴雨的区别和联系. *暴雨灾害*, 2017, 36(6): 498-506.
- [10] IPCC. Summary for policymakers. In: *climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [11] 吴绍洪, 潘韬, 贺山峰. 气候变化风险研究的初步探讨. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 363-368.
- [12] 周广胜, 周莉. 生态气象: 起源、概念和展望. *科学通报*, 2021, 66(2): 210-218.
- [13] 宋文静, 吴绍洪, 陶泽兴, 等. 近30年中国中东部地区植物分布变化. *地理研究*, 2016, 35(8): 1420-1432.
- [14] 张晓芹. 西北旱区典型生态经济树种地理分布与气候适宜性研究. 咸阳: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2018.
- [15] Liu H, Bu R, Liu J, et al. Predicting the wetland distributions under climate warming in the Great Xing'an Mountains, northeastern China. *Ecological Research*, 2011, 26(3): 605-613.
- [16] 赵茂盛, NeilSON R P, 延晓冬, 等. 气候变化对中国植被可能影响的模拟. *地理学报*, 2002, 57(1): 28-38.
- [17] 刘文胜, 游简龄, 曾文斌, 等. 气候变化下青藏苔草地理分布的预测. *中国草地学报*, 2018, 40(5): 43-49.
- [18] 邢宇. 青藏高原32年湿地对气候变化的空间响应. *国土资源遥感*, 2015, 27(3): 99-107.
- [19] 齐述华, 张起明, 江丰, 等. 水位对鄱阳湖湿地越冬候鸟生境景观格局的影响研究. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1345-1355.
- [20] 刘俊威, 吕惠进. 气候变化对长江中下游湿地的影响及其响应. *湖南农业科学*, 2012, 3: 73-76.
- [21] Tao Z, Wang H, Liu Y, et al. Phenological response of different vegetation types to temperature and precipitation variations in northern China during 1982-2012. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(11): 3236-3252.
- [22] 黄文婕, 葛全胜, 戴君虎, 等. 贵阳木本植物始花期对温度变化的敏感度. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1015-1024.
- [23] Ge Q, Wang H, Rutishauser T, et al. Phenological response to climate change in China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265-274.
- [24] Dai J, Wang H, Ge Q. Characteristics of spring phenological change in China over the past 50 years. *Advances in Meteorology*, 2014: 1-8.
- [25] 徐韵佳, 仲舒颖, 戴君虎, 等. 1978-2014年牡丹江地区植物花期变化及模型模拟. *地理研究*, 2017, 36(4): 779-789.
- [26] Tang H, Li Z, Zhu Z, et al. Variability and climate change trend in vegetation phenology of recent decades in the greater Khingan mountain area, northeastern China. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11914-11932.
- [27] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2012, 32(4): 1045-1055.
- [28] 雷占兰, 周华坤. 气候变化对高寒草甸垂穗披碱草生育期和产量的影响. *中国草地学报*, 2012, 34(5): 10-17.
- [29] 王彦颖. 中国东北植被时空动态变化及其对气候相应研究. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [30] 师桂花, 季晓丽, 陈素华. 气候变化对典型草原隐子草物候期和产量的影响. *中国草地学报*, 2017, 39(1): 42-49.
- [31] Ren S, Yi S, Peichl M, et al. Diverse responses of vegetation phenology to climate change in different grasslands in Inner Mongolia during 2000-2016. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 17.
- [32] 吴卓, 戴尔阜, 林媚珍. 气候变化和人类活动对南方红壤丘陵区森林生态系统影响模拟研究——以江西泰和县为例. *地理研究*, 2018, 11: 2141-2152.
- [33] Tan K, Piao S, Peng C, et al. Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1): 114-121.
- [34] 祁晓婷, 韩永翔, 张存厚, 等. 公元1-2000年内蒙古草原ANPP序列的重建及特征研究—基于CENTURY模型. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(2): 107-113.
- [35] 黄超, 贺红士, 梁宇, 等. 气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2088-2100.
- [36] 刘世荣, 温远光, 蔡道雄, 等. 气候变化对森林的影响与多尺度适应性管理研究进展. *广西科学*, 2014, 21(5): 419-435.
- [37] 付玉, 韩用顺, 张扬建, 等. 树线对气候变化响应的研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 799-805.
- [38] Zhao D, Wu S. Vulnerability of natural ecosystem in China under regional climate scenarios: An analysis based on eco-geographical

- regions. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 237-248.
- [39] 周广胜, 何奇谨, 殷晓洁. 中国植被/陆地生态系统对气候变化的适应性及脆弱性. 北京: 气象出版社, 2015.
- [40] 霍晓英. 陕西省油松林生产力动态及对未来气候变化响应. 西安: 西北农林科技大学, 2018.
- [41] 何丽鸿, 王海燕, 王璐, 等. 长白落叶松林生态系统净初级生产力对气候变化的响应. *北京林业大学学报*, 2015, 37(9): 28-36.
- [42] 黄攻, 侯晶, 唐旭利, 等. 中国成熟林植被和土壤固碳速率对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 416-424.
- [43] 黄超, 贺红士, 梁宇, 等. 气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2088-2100.
- [44] 李奇, 朱建华, 冯源, 等. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 287-294.
- [45] 车彦军, 赵军, 师银芳, 等. 基于CSCS和RegCM3模型的21世纪末中国潜在植被. *生态学报*, 2014, 33(2): 447-454.
- [46] 刘丹丹. 基于BIOME-BGC模型对锡林河流域NPP现状研究及风险评价. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [47] 耿元波, 王松, 胡雪菽. 高寒草甸草原净初级生产力对气候变化响应的模拟. *草业学报*, 2018, 27(1): 1-13.
- [48] 粟文瀚. 气候变化对中国主要草地生产力和土壤有机碳影响的模拟研究. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [49] 莫志鸿, 李玉娥, 高倩竹. 主要草原生态系统生产力对气候变化响应的模拟. *中国农业气象*, 2012, 33(4): 545-554.
- [50] 张文娟. 气候变化与放牧管理对三江源草地生物量和土壤有机碳的影响. 兰州大学, 2018.
- [51] 贺伟, 布仁仓, 刘宏娟, 等. 气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 6314-6319.
- [52] Xue Z, Zhang Z S, Lu X G, et al. Predicted areas of potential distributions of alpine wetlands under different scenarios in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Global and Planetary Change*, 2014, 123: 77-85.
- [53] 孟焱. 气候变化对三江平原沼泽湿地分布的影响及其风险评估研究. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2016.
- [54] 刘艳, 赵正武. 基于最大熵模型模拟气候变化下中国两个沼泽藓类属的潜在分布. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(5): 792-799.
- [55] 刘夏. 气候变化对三江平原沼泽湿地NPP的影响研究. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2016.
- [56] 尹晓梅. 气候变化对三江平原湿地植被生产力影响模拟研究. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2013.
- [57] 贾庆宇. 辽河三角洲芦苇湿地局地气候变化特征及地-气相互影响关系研究. 沈阳农业大学, 2018.
- [58] 刘建功. 气候变化背景下中国自然湿地生态系统甲烷排放的时空变化. 西北农林科技大学, 2015.
- [59] 李晓辰. 中国温带主要荒漠植物的地理分布格局研究. 石河子大学, 2018.
- [60] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 等. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1243-1250.
- [61] Zhao D, Wu S, Yin Y. Responses of terrestrial ecosystems' net primary productivity to future regional climate change in China. *Plos One*, 2013 8(4): e60849.
- [62] 党晓宏. 西鄂尔多斯地区荒漠灌丛生态系统固碳能力研究. 内蒙古农业大学, 2018.
- [63] 梅旭荣. 农业气象学发展现状及展望. *农学学报*, 2018, 8(1): 61-66.
- [64] Zhao J F, Zhan X, Jiang Y Q, et al. Variations in climatic suitability and planting regionalization for potato in northern China under climate change. *Plos One*, 2018, 13(9): e0203538.
- [65] 赵俊芳, 姜月清, 詹鑫, 等. 我国气溶胶污染对农作物影响研究进展. *气象科技进展*, 2018, 8(5): 6-10.
- [66] Yang X G, Chen F, Lin X M, et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 208: 76-84.
- [67] 王晓煜, 杨晓光, 吕硕, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响XII. 气候变暖对黑龙江寒地水稻安全种植区域和冷害风险的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1859-1871.
- [68] Ye Q, Yang X G, Liu Z J, et al. The effects of climate change on the planting boundary and potential yield for different rice cropping systems in Southern China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7): 1546-1554.
- [69] 孙爽, 杨晓光, 赵锦, 等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响XI. 气候变化背景下中国冬小麦潜在光温适宜种植区变化特征. *中国农业科学*, 2015, 48(10): 1926-1941.
- [70] Zhao J, Yang X G, Liu Z J, et al. Variations in the potential suitability distribution patterns and grain yields for spring maize in Northeast China under climate change. *Climatic Change*, 2016, 137: 29-42.
- [71] Liu Y J, Chen Q M, Ge Q S, et al. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 518-526.
- [72] Tao F, Zhang S, Zhang Z, et al. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3686-3699.
- [73] Xiao D, Tao F. Contributions of cultivar shift, management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981-2009. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(7): 1111-1122.
- [74] Tao F, Zhang Z, Zhang S, et al. Historical data provide new insights into response and adaptation of maize production systems to climate change/variability in China. *Field Crops Research*, 2016, 185: 1-11.
- [75] 初征, 郭建平. 未来气候变化对东北玉米品种布局的影响. *应用气象学报*, 2018, 29(2): 165-176.
- [76] Ye Q, Yang X G, Dai S W, et al. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water requirements in southern China. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 35-44.
- [77] 熊伟, 冯灵芝, 居辉, 等. 未来气候变化背景下高温热害对中国水稻产量的可能影响分析. *地球科学进展*, 2016, 31(5): 518-528.
- [78] Zhang Z, Song X, Tao F, et al. Climate trends and crop production in China at county scale, 1980 to 2008. *Theoretical & Applied Climatology*, 2016, 123(1-2): 291-302.
- [79] 杨绚, 汤绪, 陈葆德, 等. 利用CMIP5多模式集合模拟气候变化对中国小麦产量的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(15): 3009-3024.
- [80] 孙攀, 杨再强, 杨世琼, 等. 多种格点作物模型对中国区域水稻产量模拟能力评估. *中国农业气象*, 2019, 40(4): 199-213.
- [81] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 未来气候变化情景下我国主要粮食作物产量变化模拟. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 208-213.
- [82] 李阔, 熊伟, 潘婕, 等. 未来升温 1.5 °C 与 2.0 °C 背景下中国玉米产量变化趋势评估. *中国农业气象*, 2018, 39(12): 765-777.
- [83] 姚玉璧, 雷俊, 牛海洋, 等. 气候变暖对半干旱区马铃薯产量的影响. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1264-1270.
- [84] 亢艳莉, 申双和, 张学艺, 等. 气候变化对宁夏南部山区马铃薯产量的影响及马铃薯水分供需特征分析. *江苏农业学报*, 2017, 33(5): 1056-1061.
- [85] 马雅丽, 郭建平, 赵俊芳. 晋北农牧交错带作物气候生产潜力分布特征及其对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 818-827.
- [86] Wang C L, Shen S H, Zhang S Y, et al. Adaptation of potato production to climate change by optimizing sowing date in the Loess Plateau of Central Gansu, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 398-409.
- [87] 郑大玮, 李茂松, 霍治国. 农业灾害与减灾对策. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [88] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 620-630.
- [89] 吕晓敏, 周广胜. 双季稻主要气象灾害研究进展. *应用气象学报*, 2018, 29(4): 385-395.
- [90] 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.
- [91] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望. *气象与环境科学*, 2015, 38(1): 80-94.
- [92] 刘肖张, 张豆豆, 焦进宇, 等. 冬小麦-夏玉米周年农田资源高效利用限制因素分析. *中国农业科学*, 2020, 53(19): 3900-3914.