

气候带北移及其对中国作物种植制度的影响研究进展

胡延斌¹,肖国举¹,李永平²

(1.宁夏大学资源环境学院环境工程研究院,宁夏 银川 750021;2.宁夏农林科学院固原分院,宁夏 固原 756000)

摘要:全球大气中CO₂浓度升高、水热资源变化是全气候变化中对农田生态系统影响最为重要的生态因子。半个世纪以来,气候变化已经对我国作物种植制度产生重要影响。本研究汇集整理近年来多位专家学者的研究成果,系统分析中国东北、西北、华北、华南及青藏等不同区域气候变化类型,以及气候带北移对作物种植制度的影响,得出区域共性研究结论。气候变化存在明显的时空差异,半个世纪以来,冬夏气温增幅较春秋显著;北方地区增温2.5℃~3.0℃,高纬度和高海拔地区增温高达4℃。东北、华北、西南、以及西北东部降水减少率达10%~20%,西北中西部和华南地区降水增加超过10%。多元种植结构逐渐替代单一型种植结构,一熟制向北推进200~300 km,两熟和三熟制向北推进500 km,作物多熟制面积扩大。复种指数以超过1.29%的速率逐年提高。中熟和中晚熟品种种植界限北移、面积扩大。喜温耐旱作物面积扩大,强冬性作物逐渐被冬性和弱冬性作物代替。

关键词:气候变化;气候带北移;种植制度;作物产量;粮食安全

中图分类号:S162.5⁺7 **文献标志码:**A

Research advances in northward shifting of climatic-zones and the influence on crop-planting systems in China

HU Yanbin¹, XIAO Guoju¹, LI Yongping²

(1. Institute of Environmental Engineering, College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences Guyuan Branches, Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: In global climate change, the most important factors influencing agroecosystem are elevated atmospheric CO₂ concentration, raised air temperature, and changing precipitation. For half of a century, climate change has had an important impact on China's crop-planting system. This research combined the research results of experts and scholars in recent years together and did systematic analysis of climate change types in different regions such as Northeastern China, Northwestern China, Northern China, Southern China, Qinghai and Tibet, as well as the impact of northward shifts of climatic zones on crop-planting systems and drew conclusions of regional commonality. There were clear spatial and temporal differences in climate change. For half of a century, the temperature increased in winter and summer was more significant than that in spring and autumn; the temperature in the northern region increased by 2.5℃~3.0℃, and the temperature in high latitudes and high altitudes increased by 4℃. Precipitation in Northeastern China, Northern China, Southwestern China, and east of Northwestern China decreased significantly, with a precipitation reduction rate of 10%~20%. Precipitation increased by more than 10% in Northwestern Central and Western China and Southern China. China's multi-planting structure gradually replaced the single-type planting structure. The area of crops with multiple crops has expanded and the multiple cropping index has increased. The one-cropping system advanced 200~300 km north, and the two-cropping system and three-cropping system advanced 500 km north. The area of multi-cropping was expanded. The multiple crop index increased year by year at a rate of more than 1.29%. The planting boundaries of mid-maturing and mid-late maturing varieties

are shifted to the north and the area was enlarged. Thermophilic and drought-tolerant crops expanded in area, and the strong winter crops were gradually replaced by the winter and weak winter crops.

Keywords: climate change; climatic zones moving northward; crop planting structure; crop yield; food security

20世纪70年代以来,全球气温、降水、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温以及无霜期天数等农业气候资源发生明显变化。气候变暖已经对全球生态系统产生明显的影响,成为当前国内外学术界乃至社会各界关注的热点。中国是世界上重要的农业大国,气候变暖对中国农业生态系统带来的影响尤为显著。近年来,我国诸多学者就气候变暖对农业生产的影响开展了广泛而深入的研究,成果颇为丰富,从中得出了规律性的研究,为气候变化背景下的中国农业生产提供了一定的理论依据。笔者就气候变化对气候带北移及其对种植制度的影响展开研究,对近年来诸多研究成果进行梳理,得出区域共性研究结论,以期为保障国家粮食安全,积极推进气候适应型农业提供决策依据^[1]。

积温增加,北半球气候带北移,作物可耕种北界北移,多熟制种植面积扩大,复种指数提高,作物生产受到严重影响。因此,系统分析气候带北移对作物种植结构的影响,对保障粮食安全生产具有重要现实意义^[2]。

1 研究区概况

本文的研究范围为中国大陆的广大地区,依据气温、降雨及海拔高度变化可划分为东北、西北、华北、华南和青藏地区5个地理区域。中国大陆属于典型的大陆性季风气候,气温季节变化幅度较同纬度其它地区明显剧烈,普遍冬季寒冷,夏季高温。南北跨纬度广,大部分区域位于北温带,少部分位于热带。

2 农业气候资源变化

2.1 气温资源变化特征

气候变化存在明显的时空差异,冬、夏半年气温增幅显著,且冬半年较夏半年增温明显,夜间较白天增幅较大;东北、西北以及华北地区增温幅度在 $2.5^{\circ}\text{C} \sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 之间,明显高于南方,纬度较高的东北和海拔较高的青藏地区增温高达到 4°C ^[3]。21世纪末,中低碳排放(RCP4.5)与高碳排放(RCP8.5)两种排放情景下,东北地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温明显增加,年均增温达 $400^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和 $700^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ^[4-5]。过去半个世纪,河西走廊和北疆地区甚至出现过 $0.27 \sim 0.34^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的“突变型”升高^[6-7]。暖昼夜指数和生长季长度明显增加,极端气温指数减少在一定程度上

对气候变暖影响较大。多年连续气象数据资料显示,北方地区极端低温变率明显高于南方地区。东北和华北夜间极端低温日数以 $8 \sim 12 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率快速减少,西北地区白天极端高温日数明显增多^[8]。华北地区冬季和夏季以 $0.23^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的倾向率呈增暖趋势,春季气温抬升是年均温升高的主要原因^[9]。20世纪90年代,长江流域平均气温增加了 0.33°C ,21世纪初的前5年,急剧升温 0.71°C ,预测到21世纪中期,长江以南地区增幅低于 2.5°C ^[8,10-11]。西藏地区极端低温上升速率达 $1.06^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ^[12]。各地积温普遍增加导致气候带北移,农业生态系统输入热量增加。

受温度和降水变化的共同影响,中国气候区出现了较为明显的水平位置移动和范围盈缩,温带和亚热带北界不同程度北移,半湿润与半干旱分界线东移与南扩^[13],暖温带和中温带北界北移最大幅度超过1个纬度;北亚热带北界越至淮河以北,中亚热带北界最大移动幅度超过2个纬度,南亚热带北界北移 $0.5 \sim 2.0$ 个纬度^[14]。对三江源区半个世纪以来的气象资料分析表明,平均最低气温上升速率明显快于平均气温和平均最高气温,降水量和降水日数均呈增加趋势,说明三江源地区气候正在向暖湿化发展^[4]。

2.2 降水资源变化特征

相对于气温升高,降水格局也发生显著变化。西北中西部和华南地区降水呈增多趋势,而东北、华北、西南,以及西北东部降水明显减少,华北地区最为明显。半个世纪以来,中国北方地区日降水量大于 25 mm 以上的日数以 $0.2 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率呈显著减少趋势,东北西部降水增加,北部到华北大部极端降水减少,冬夏两季尤为明显^[8]。西北地区20世纪90年代极端降水比早期增加了1倍,21世纪降水量的增加趋于减缓,但夏秋季降水明显增加,且内部存在明显的区域差异^[6-7]。长江中下游地区春季降水减少,秋季趋于增多。旱灾发生频率高、持续时间长、影响范围广,是最常见、破坏性最强的自然灾害^[15]。21世纪,中国持续性干旱中心由华北逐渐转移至西南地区,极端干旱频率以 $0.0023 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率缓慢增加,夏秋两季最为明显^[16]。西南地区春秋季节降水明显减少,干旱面积扩大,严重制约区域农业可持续发展^[17]。

近 30 年来我国农业气候资源时空格局变化显著^[10]。气候变化对中国农业气候资源的影响主要表现在随着温度的升高,积温增加,热量资源增加。气候变化类型分为暖湿型、暖干型、冷干型和冷湿型(图 1)。暖湿型面积最为广泛,包括东北地区、新疆、青藏高原、长江中下游、内蒙古、及华北南部^[18]。暖干型主要集中于东北南部、华北中北部、黄土高原西北部及华南沿海部分地区;冷干型在四川盆地和青藏高原东北部^[18]。云贵高原和青藏高原部分地区呈降温趋势,冷湿型分布于四川盆地中部和云贵高原东北部。受地形和小气候影响,四川盆地中部和云贵高原东北部降水呈不稳定的上升趋势,表现为寒冷湿润的气候特征^[18]。农业气候资源的时空变化引起中国气候带整体北移,作物多熟制面积扩大,复种指数提高,种植结构趋于多元化^[10]。

3 气候带北移对作物种植制度的影响

气候带北移对作物种植制度的影响主要表现在种植熟制、布局及品种布局方面,这三者之间既有联系,又有区别^[3]。熟制变化引起作物布局变化,而种植熟制与品种布局往往伴随作物布局而变化。按照通常的观点,三个方面各有侧重,种植熟制针对不同的积温带,作物布局针对范围较大的种植区域,品种布局针对小范围种植区域^[19]。

3.1 气候带北移对作物种植熟制的影响

气候带北移对农业的影响表现为春季物候提前,秋季物候推迟,作物生长期相对延长,越冬作物种植北界和多熟制北界明显北移^[20]。半个世纪以来农业生态系统热量输入增加,物候变化显著,复种指数上升,对作物生产影响较大^[21]。我国耕地复种指数从北向南逐渐增加,西北和东北地区复种指

数偏小。丁明军等^[22]研究表明,1999—2013 年间我国耕地复种指数以年均 1.29% 的速度呈整体上升趋势,但存在显著地域差异。京津冀交界地区以及成都平原、鄱阳湖平原等地区复种指数显著降低,陇东、渭河平原、山西西部以及山东半岛等地区的复种指数显著上升^[22]。总体表现为高原、山地以及熟制过渡带复种指数明显增加,间作套种模式大面积推广应用^[13,22](图 2)。

区域尺度上,复种指数最高的为中部地区,增长最快的是东北、西北和西南地区。气候带北移,积温增加,弱冬性作物种植面积扩大,复种指数提高。东北地区暖温带范围扩大、作物种植边界北移对种植面积和产量的增加都有正向效应^[4,23]。水稻逐步代替小麦,成为东北地区重要的粮食作物,未来种植结构将以玉米、大豆和水稻为主。内蒙古引黄灌区逐渐向多元化种植结构转变,玉米、向日葵种植面积扩大,小麦种植面积缩小^[24]。气候带北移

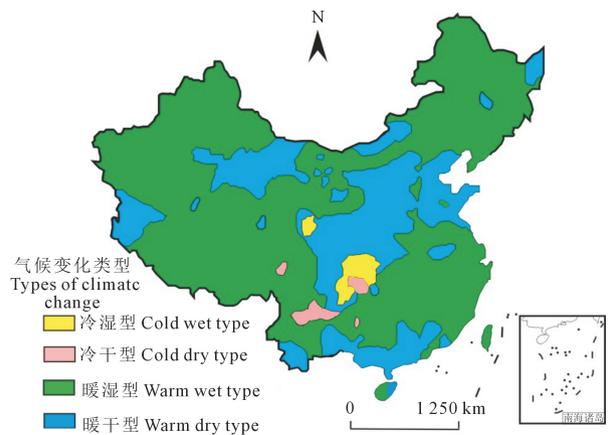
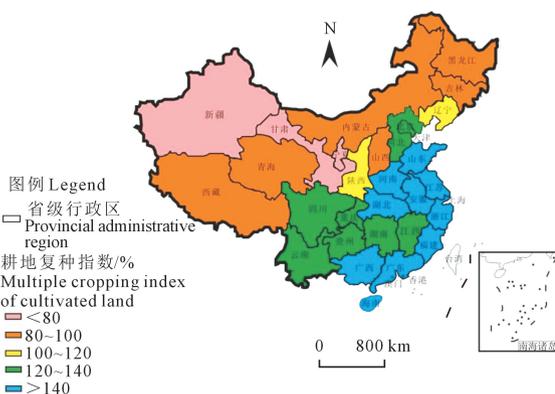
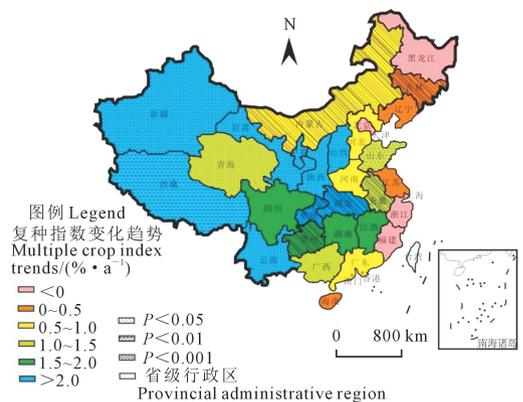


图 1 1971—2000 年中国气候变化类型图^[18]
Fig.1 The types of annual climate change in China from 1971 to 2000^[18]



(A)1990—2013年耕地复种指数空间格局
The spatial pattern of multiple cropping index during 1999-2013



(B)1999—2013年耕地复种指数年际变化趋势($P < 0.1$)
The significant change of multiple cropping during 1999-2013 ($P < 0.1$)

注:研究数据不包含香港、澳门特区及台湾省。

Note: The research data does not include Hong Kong, Macau SAR, Taiwan Province.

图 2 基于遥感反演的中国耕地复种指数空间格局及变化趋势^[22]

Fig.2. The spatial pattern and significant inter-annual change of multiple cropping index based on SPOT-NDVI in China

促使我国多熟制界限向高纬度地区推进,单位面积作物周年产量增加^[25]。到 21 世纪中期,全国作物种植北界不同程度北移,两熟制北界将移至目前一熟制地区的中部,三熟制北界将从长江流域移至黄河流域^[13,26]。

时空尺度上,半个世纪以来稻、麦等主要粮食作物种植北界北移,为种植结构变化提供了地理空间^[27]。热量资源增加促进了东北地区 and 内蒙古大兴安岭东南部粮食种植结构优化。玉米和水稻等喜温作物生长期延长、农作物适种面积扩大,复种指数增加,播种面积和总产量大幅提升。研究显示,气温每升高 1.2℃,黑龙江省水稻、小麦、玉米和大豆分别增产 336.8、289.3、541.6、195.8 kg·hm⁻²^[5]。冬小麦种植区域向北、向西扩展了 50~100 km,而且从海拔 1 800~1 900 m 扩展至 2 000~2 100 m,种植面积扩大 10%~20%;棉花的适宜种植高度升高 100 m 左右,面积扩大了 10 倍,复种作物适宜区海拔升高 200 m 左右,面积扩大 4~5 倍。两熟制北移最明显的是黄河中下游和辽宁等地,三熟制种植北界在长江中下游地区北移最为显著^[28](表 1)。

我们必须认识到复种指数提高导致有效增加粮食产量的同时耕地肥力下降,淡水资源供需矛盾加剧。若仅考虑水资源状况,华北地区耕作制度从一年两熟改为两年三熟或一年一熟的种植模式,灌溉用水减少,极大缓解了地区用水紧张的局面^[29]。

3.2 气候带北移对作物布局的影响

气候带北移显著影响作物布局,不同地区和作物差异显著。东北地区水稻、玉米和大豆的适宜区向北、向西扩至大兴安岭附近^[5,30]。西北地区玉米、棉花等喜温耐旱作物种植面积扩大,冬小麦北界向高纬度和高海拔地区延伸,春小麦正逐步被冬小麦取代,夏秋作物种植结构明显改变^[31]。华北地区冬小麦-夏玉米套改平,大大提高粮食总产^[19]。南方地区极端高温、干旱频发,导致水稻种植和产量重心分别向东北方向迁移约 230 km 和 320 km,种植面积由 27.3% 下降到 20.6%,东北地区水稻播种面积不断扩大,东南沿海地区则明显减少^[23]。

受气候变化的影响,东北地区种植制度一熟制向北推移了 200~300 km,两熟制和三熟制向北推移 500 km^[28]。冬小麦-夏玉米稳产种植北界明显北移,邓振镛等^[32]研究表明,冬小麦向北、向西扩展了 50~100 km,而且从海拔 1 800~1 900 m 扩展至 2 000~2 100 m,种植面积扩大 10.0%~20.0%;棉花的适宜种植高度升高 100 m 左右,面积扩大了 10 倍,复种作物适宜区海拔升高 200 m 左右,面积扩大 4~5 倍。总体来看,两熟区和三熟区平均向西推进

0.2 个经度,向北移动 0.2 个纬度^[20,28](表 1)。

在水资源满足情况下,气候带北移利于喜温作物的扩种。气候变暖后,棉花主产区由华北和长江中下游扩展至甘肃、新疆等地,种植面积为上世纪的数十倍之多,播种期提前,气候产量增加、品质提高^[33-35]。目前,新疆已由粮食生产为主的单一作物布局转为以果蔬-棉花为主的多元作物布局^[35]。气候和土地资源的可利用性进一步提高,合理优化作物布局,有效提高农业生产水平。

3.3 气候带北移对品种布局的影响

作物有效生育期主要受温度影响,一般日均温稳定通过 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是喜温作物生育的有效界限^[36]。由于积温增加,作物安全生长期延长,可利用的有效热量增多,尤其冷季升温明显,为晚熟作物延长有效生育期提供了水热潜在生产能力,对作物产量和种植面积的增加呈正效应^[37]。但在气候变暖背景下,我国西北和华北某些缺水地区若在作物生长期农田灌溉用水不足,加之当地自然降水量严重不足的情况下,致使气候固有热量资源与降水季节不能同步,则使早熟水稻品种、稻产量分别下降 14.1%~16.1%,但因地制宜适当增加生育期较长的中晚熟品种后,其产量分别增加 17%、23.0%,极早熟和早熟品种的适宜区逐步被中熟、中晚熟品种代替^[30]。基于上述认识,我国东北地区晚熟品种种植面积逐步向北扩至大兴安岭附近,东线移至三江平原已成为可能^[38]。华北平原弱冬性小麦品种将逐渐取代强冬性品种,气候带北移使北部地区种植面积增加,而南部麦-玉两熟区可能缩减^[39]。东北地区和北疆春玉米播种期较 20 世纪 60 年代分别提前 1~21 d、2~10 d 不等^[40]。因此,适当调整作物生育期管理、选用中晚熟品种、充分利用热量资源、尤为必要。

气候带北移,作物生长季延长,早熟品种被晚熟品种取代,强冬性品种逐渐被弱冬性品种代替(表 1)。为适应气候暖干化,在确保粮食安全的前提下适当减少稻麦等高耗水作物,增加玉米、棉花、马铃薯等耐旱作物的播种面积^[41-42]。

4 结论与展望

4.1 结论

半个世纪以来,中国冬夏气温增幅较春秋显著;北方增温幅度明显高于南方,高纬度和高海拔地区增温最为明显。西北中西部和华南地区降水增多,而东北、华北、西南、以及西北东部降水明显减少。农业气候资源时空格局变化引起气候带整体北移。

表1 气候带北移对中国作物种植结构的影响

Table 1 Impacts of northward shift of climate belt on crop planting structure in China

地区 Region	作物及品种布局变化 Crop and variety layout	多熟种植变化 Cropping system	种植带变化 Planting belt	种植北界变化 Planting changes in the northern boundary
东北 Northeast	原适宜极早熟、早熟品种的区域逐步被中熟、中晚熟品种替代。 The areas suitable for extremely early and early maturing varieties were gradually replaced by intermediate and late maturing varieties.	一熟制范围缩小至大兴安岭附近;东北南部地区可种植两熟作物。 The scope of one-crop system was reduced to the vicinity of Daxinganling; two crops can be grown in the southeast of Northeast China.	稻麦、玉米、大豆作物种植带北移;适宜种植区向高纬度扩张;晚熟品种种植带北移。 Rice, wheat, corn and soybean crop planting belts moved north; suitable planting areas expand to northwest high latitudes; late maturing variety planting belts move north.	晚熟品种由松嫩平原北扩至大兴安岭附近;极晚熟品种北界移至48.5°N。 The late-maturing varieties expanded from the north of Songnen Plain to the vicinity of Daxinganling Mountains; the northern boundary of very late-maturing varieties moved to 48.5°N.
西北 Northwest	玉米、马铃薯种植面积扩大,成为主要粮食作物;冬小麦适宜种植区北移,逐渐代替春小麦;品种由早熟向中晚熟发展。 The cultivation of corn and potatoes has expanded and become the main food crops; winter wheat moved northward, gradually replacing spring wheat, and the varieties developed from early to mid-late maturity.	形成麦玉、薯玉套作,冬小麦-夏玉米-蚕豆复种等两熟制。 Form wheat / corn, potato / corn intercropping, winter wheat-summer corn-broad bean multiple cropping, etc.	冷凉作物范围扩大;陇东形成以小麦和马铃薯为主的格局。 The range of cold crops expanded; Longdong formed a planting pattern dominated by wheat and potatoes.	冬小麦种植北界扩展,适宜区、次适宜区范围扩大。 The northern boundary of winter wheat planting expands, and the range of suitable areas and sub-suitable areas expands.
华北 North China	喜温耐旱的玉米、棉花种植面积扩大;水稻面积减少;弱冬性品种逐渐取代强冬性品种。 The planting area of maize and cotton that likes temperature and drought was expanded; the area of rice was reduced; weak winter varieties gradually replaced strong winter varieties.	冬小麦种植区将改为冬小麦-夏玉米-春玉米两年三熟、春玉米一年一熟。 The winter wheat planting area will be changed to winter wheat-summer corn-spring corn three crops in two years and spring corn one crop in one year.	冬小麦北界扩至长城以北;小麦玉米种植北界向东南方向移动。 The northern boundary of winter wheat expanded to the north of the Great Wall; the northern boundary of winter wheat-summer corn planting moved southeast.	两熟制北界移至长城以北,冬小麦种植北移至长城一线。 The northern boundary of the two-cropping system moved to the north of the Great Wall, and the winter wheat planting moved north to the Great Wall.
华南 South China	主要种植水稻、热带经济作物,极晚熟品种大幅推广。 Rice and tropical cash crops are mainly planted, and extremely late-maturing varieties are widely promoted.	冬作物-花生-晚稻三熟制种植面积扩大。 Winter crops-peanuts-late rice triple cropping area expanded.	水稻种植和产量重心北移。 The rice planting and yield center of gravity moved north.	三熟制北界从长江流域移至黄河流域。 The northern boundary of three crops a year moved from the Yangtze River Basin to the Yellow River Basin.
青藏高原 Qinghai-Tibet	积温低,不适宜作物生长 ^[43] 。在有灌溉水源的谷地形成河谷农业生产区,目前尚未开展气候变化的影响研究。 Low accumulated temperature was not suitable for crop growth. In valleys with irrigation water sources, river valley agricultural production areas were formed, and the impact of climate change had not yet been studied.			

21世纪初我国种植结构类型丰富度不断提高,多元化种植结构逐渐替代单一型种植结构。气候带北移对高纬度及高海拔地区喜温作物面积的扩大和增产呈正效应,而对中低纬度及水分要求较高的作物呈负效应。作物多熟制界限总体向北、向西推进,复种指数提高,单位面积周年产量增加,以高纬度地区尤为明显。预计到2050年,两熟制北界将移至目前一熟制地区的中部,三熟制的北界将从长江流域移至黄河流域^[26]。热量资源增加,中熟和中晚熟品种种植界限北移,逐渐代替早熟和极早熟品种,强冬性作物逐渐被冬性和弱冬性作物所代替。

4.2 讨论与展望

全球气候变化背景下的气候变暖是不争的事实,半个世纪以来我国经历了高温、干旱、暖冬等一

系列气候变化。尽管国内外专家在气候变化对作物生长发育、产量形成等方面已经做出一些研究,还有许多重大科学问题亟待研究和解决。建议加强以下几个方面的重点研究工作:

(1)加强未来气候变化下极端气候对作物生产影响的研究,为不同气候类型区提供较为严谨的科研数据和理论支持。依据不同气候类型和生态类型区的气温、降水、积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 天数、无霜期等农业气候资源变化,合理规划适应气候变化下应变型高效种植制度、农作物种植结构优化方案,为大面积生产示范和推广提供科技支撑。

(2)加强气候带北移地区对水肥与气候高效利用关键技术研究。利用数学模型与模拟试验研究,综合考虑水热、光合、土壤肥力、风向等自然因素,

加强多因素综合效应研究,提高多因子模型研究的准确性至关重要。

(3) 中国农业已经发展到了需要更多依靠科技突破资源环境约束、实现可持续稳定发展的新阶段。确保粮食安全战略下“藏粮于地、藏粮于技”关键技术措施实施到位,不断提升农业综合生产能力^[44]。重视应对气候暖干化、旱灾、洪灾、低温冻害等防灾减灾能力技术。依据气候带北移对作物种植制度的影响,积极调整应对策略,发展区域特色产业,为农业供给侧结构性改革提供资源动力。

参考文献:

- [1] 秦大河, Stocker T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 16-27.
- [3] 张雪芹, 孙杨, 郑度, 等. 中国干旱区气候带界线对气候变暖的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1166-1178.
- [4] 初征, 郭建平, 赵俊芳. 东北地区未来气候变化对农业气候资源的影响[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1248-1260.
- [5] 刘昌波, 纪潇潇, 许吟隆, 等. SRES A1B 情景下中国区域 21 世纪最高、最低气温及日较差变化的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(1): 89-96.
- [6] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 4(9): 1295-1304.
- [7] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1482-1492.
- [8] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58: 1-10.
- [9] 阿多, 熊凯, 赵文吉, 等. 1960—2013 年华北平原气候变化时空特征及其对太阳活动和大气环境变化的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1555-1564.
- [10] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698-1706.
- [11] 李克南, 杨晓光, 刘志娟. 全球气候变化对中国种植制度可能影响分析 III. 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2088-2097.
- [12] 杜军, 路红亚, 建军. 1961—2010 年西藏极端气温事件的时空变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1269-1280.
- [13] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 3-13.
- [14] 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951—2010 年中国主要气候区划界线的移动[J]. 地理研究, 2013, 32(7): 1179-1187.
- [15] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213.
- [16] 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 四川省近 50 年降水的变化特征及影响[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 619-630.
- [17] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1041.
- [18] 李爽, 王羊, 李双成. 中国近 30 年气候要素时空变化特征[J]. 地理科学, 2009, 28(6): 1593-1605.
- [19] 李阔, 许吟隆. 适应气候变化的中国农业种植结构调整研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 8-17.
- [20] 杨晓光, 刘志娟, 陈卓. 全球气候变化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.
- [21] 刘凤山, 陈莹, 史文娇. 农业气候动态对地表生物物理过程及气候的反馈研究进展[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1139-1150.
- [22] 丁明军, 陈倩, 辛良杰, 等. 1999—2013 年中国耕地复种指数的时空演变格局[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1080-1090.
- [23] 刘珍环, 唐鹏钦, 范玲玲, 等. 1980—2010 年东北地区种植结构时空变化特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4107-4119.
- [24] 李泽鸣, 魏占民, 白燕英. 内蒙古引黄灌区种植面积与种植结构的时空演变[J]. 干旱区研究, 2014, 31(2): 348-354.
- [25] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变化对中国种植制度可能影响 II. 南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1860-1867.
- [26] 田彦君, 张山清, 徐文修, 等. 北疆农业热量资源时空变化及其对熟制的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 227-233, 239.
- [27] 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 [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(7): 1546-1554.
- [28] 杨晓光, 刘志娟, 陈卓. 全球气候变化对中国种植制度可能影响: VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1562-1570.
- [29] 王学, 李秀彬, 辛良杰. 河北平原冬小麦播种面积收缩及由此节省的水资源量估算[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 694-707.
- [30] 杜春英, 宫丽娟, 张志国, 等. 黑龙江省热量资源变化及其对作物生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 242-252.
- [31] 王鹤龄, 张强, 王润元, 等. 气候变化对甘肃省农业气候资源和主要作物栽培格局的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6099-6100.
- [32] 邓振镛, 张强, 刘德祥. 气候变暖对甘肃种植业结构和农作物生长的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 627-631.
- [33] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 等. 近 30 年中国农作物种植结构时空变化分析[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 840-851.
- [34] 姚玉璧, 杨金虎, 肖国举, 等. 气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2170-2179.
- [35] 吕娜娜, 白洁, 常存, 等. 近 50 年基于农作物种植结构的新疆绿洲农田蒸发散发时空变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(8): 1443-1454.
- [36] 韩荣青, 郑度, 戴尔卓, 等. 中国粮食主产区生产潜力对气候波动响应研究[J]. 资源科学, 2014, 36(12): 2611-2623.
- [37] Liu Z H, Yang P, Tang H J, et al. Shifts in the extent and location of rice cropping areas match the climate change pattern in China during 1980-2010[J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(5): 919-929.
- [38] 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[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 208-213.
- [39] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 气候变化对黄淮海平原冬小麦产量和耗水的影响及品种适应性评估[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1153-1161.
- [40] 田彦君, 张山清, 徐文修, 等. 近 52 年来北疆 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日时空变化特征及其对春玉米播期的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 271-276.
- [41] 王鹤龄, 王润元, 张强, 等. 甘肃省作物布局演变及其对区域气候变暖的响应[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 413-421.
- [42] 肖国举, 张强, 王静, 等. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [43] 裴玉芳, 祁祯林, 张启发, 等. 近 55 年来青海省海东市气候变化特征及影响因子分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 27(3): 275-282.
- [44] 陈印军, 易小燕, 陈金强, 等. 藏粮于地战略与路径选择[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(12): 8-14.