

东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应

吴海燕¹, 孙甜田^{1,2}, 范作伟¹, 赵兰坡^{2*}

(1.吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林 长春 130033; 2.吉林农业大学资源与环境学院, 吉林 长春 130118)

摘要:综述了在全球气候变暖背景下,东北地区农业气候资源、农业气象灾害的变化特征以及主要农作物对气候变化的响应。结果表明,气候变暖给东北地区农业带来的影响利弊共存,主要表现为东北地区主要农作物生长季节温度升高、热量资源增加,适宜农作物生长的时期延长、适种区域扩大,为作物的光温生产潜力以及产量的提高提供了潜在的可能。但由于光照及水资源的限制以及CO₂浓度的增加而引发的温室效应,对农作物的产量和品质也产生了负面影响。极端天气事件增加,农作物生态环境恶化,干旱、洪涝、盐碱化速度加快,尤其是近几年受全球变暖的影响,东北地区主要农作物受干旱灾害的影响最为明显。降水总量减少和降水分布不均匀,使东北地区成为受气候变化影响最敏感和脆弱地区之一。

关键词:气候变暖;东北地区;气候资源;气象灾害;农作物

中图分类号:S162.5

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)04-0299-09

doi: 10.13254/j.jare.2014.0087

The Major Food Crops in Response to Climate Change and Its Yield Effect in Northeast of China

WU Hai-yan¹, SUN Tian-tian^{1,2}, FAN Zuo-wei¹, ZHAO Lan-po^{2*}

(1. Research Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 2. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: This article reviewed the effect of climate changes on the variation of agricultural climate resources, characteristics of agricultural disaster and the response of the main crops in Northeast China under the condition of global warming. The results showed that there were advantages and disadvantages to the effects of climate warming on agriculture of China. The growing temperature in main crop season in Northeast China, the increasing of heat resources, the extended growth period and the expansion of region suitable for crop, which were potential possible for raising the output of crop production and light-temperature potential productivity. Because of the light and the limitation of water resources and the increase of CO₂ concentration which were caused by the greenhouse effect, the yield and quality of the crop had a negative effect. With extreme weather events increasing, agricultural ecological environment deterioration, drought, flood and waterlogging, salinization speed, the most obvious effect was drought disaster in Northeast China, especially for the effect of global warming in recent years. With the total amount of precipitation reduction and precipitation uneven distribution, the Northeast China became one of the most sensitive and vulnerable areas affected by climate change.

Keywords: climate warming; Northeast region; climate resources; meteorological disasters; crops

地球自然系统正在经历着逐渐变暖的过程,潘根兴等^[1]根据近60年气候变化在中国不同地区 and 不同作物的表现,结合不同作物对气候变化因子的敏感性差异,认为气象要素变化呈现出气温升高、日照时数

减少、极端天气事件频率增大、降水分布不均匀的总体态势,而中国农业生产将面临病虫害加重、干旱化趋势增强、农业气象灾害风险提高的挑战,未来的农业生产将表现出水资源短缺、旱地作物生产和耕地生产能力的脆弱性明显增加的严峻形势。因此,农业资源脆弱性将加剧未来农业生产对气候变化的高度脆弱性和敏感性。而我国东北地区地处中高纬度及欧亚大陆东端,自然地理环境及地貌特征十分复杂,热量资源空间分布差异大,降水的时空分布不均匀,年际

收稿日期:2014-04-08

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAC09B01)

作者简介:吴海燕(1968—),女,博士,研究员,主要从事土壤微生物与生物肥料方面的研究。E-mail: wuhaiyan1968@163.com

* 通信作者:赵兰坡 E-mail: zhaolanpo12@163.com

间变化幅度较大,对气候变化具有较强的敏感性,是中国乃至全球气候变暖最显著的地区,也是气象灾害频繁且严重的地区之一^[2]。东北地区是中国重要的农牧业和商品粮基地,是世界三大黑土带之一,以松嫩平原、辽河平原和三江平原为中心的粮食总产量约占全国粮食产量 1/3^[3]。气候变化势必对东北地区的粮食生产以及农产品品质产生深刻的影响^[4-9]。因此,本文从东北地区农业气候资源、农业气象灾害以及农作物产量效应等方面,深入系统地分析东北地区主要粮食作物产量及品质对气候变化的响应,对合理利用农业气候资源以及农业防灾、减灾、趋利避害具有重要的现实意义。

1 东北地区气候资源的变化

1.1 热量资源的变化

热量资源的变化主要体现在气温的变化,近百年东北地区的气温变化情况与全球及全国的变化情况一致,也是呈明显变暖趋势。有研究认为,东北地区近 50 年间(1951—2000 年)平均气温以 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ 倾向率上升,尤其是近 10 年(1991—2000 年)的倾向率达到了 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$,明显高于全国 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ 的平均水平^[10]。而且,气温增高具有明显的不对称性,即气温升高呈现明显的季节性差异,春季和冬季增温率均为每 10 年 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$;夏季和秋季增温率均为每 10 年 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而气温增高的不对称性也表现出昼夜变化的差异,即以夜间增温为主,气温日较差明显减小^[11]。

温度升高致使农作物生长季节积温增加明显,无霜期延长,积温带北移东扩。近 50 年东北地区主要农作物生长季节内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在 $2\ 400\sim 2\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot \text{d}^{-1}$ 之间的积温带北移了 1.1° ; $2\ 800\sim 3\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot \text{d}^{-1}$ 之间的积温带分别北移东扩了 0.85° 和 0.67° ;大于 $3\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot \text{d}^{-1}$ 的积温带所包括区域面积增加了 $2.2\times 10^4\text{ km}^2$,使得主栽作物适宜种植区域明显扩大。辽宁省有效积温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温线扩展更加明显,近 50 年 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 界限温度开始的日期提前 6 d 左右,冬小麦种植北界向北移到了辽宁省的中北部地区。因此,在不同的时间和空间尺度上,东北地区热量资源都呈现出增加的趋势,热量资源生产潜力明显提高^[3,12-15]。

1.2 水资源的变化

在全球自然气候系统变暖的背景下,全球的降水量以及降水的时空分配也发生了一定的变化,区域性洪涝、干旱等灾害由于降水格局的改变所带来的气象

灾害有增多、增强的趋势。我国降水资源的空间变化主要表现为由西北向东南方向增加,旱涝交替频繁、极端降水事件增多^[16]。东北地区的水资源短缺现象更加明显,中西部的主要江河出现了连年枯水的现象,致使西部地区可利用降水资源严重匮乏^[17-18]。20 世纪 90 年代,东北三省(辽宁、吉林、黑龙江)发生了 3~4 次严重旱灾。21 世纪初,旱灾的发生情况更加严重,甚至达到了 10 年 8 旱的程度。尤其是 2001 年春夏连旱,松花江水位降至历史最低水位,给松嫩平原水稻生产带来了严重的影响。2006 年,松辽平原流域的年平均降水量、地表水径流量和地下水资源储量分别降至 465.8 mm 、 $1\ 460\text{ 亿 m}^3$ 和 610 亿 m^3 ,与多年平均值相比分别减少了 9.5%、17.4% 和 10.4%。赵秀兰^[3]也认为近 50 年东北地区年降水量和生长季节降水量均不同程度地呈减少趋势。尤其是黑龙江东部、吉林西部、辽宁东南部降水量减少更为明显。从季节上看,夏季降水量较冬季减少明显,春季略有增加,但在东北局部区域每年在播种季节的透雨呈现偏晚的趋势^[19-21]。

在降水资源减少及降水格局变化的影响下,地下水质量也不同程度的受到影响,大连、锦州、营口等沿海城市由于地下水采补失调,导致海水倒灌面积大,严重影响了地下水水质^[22]。降水资源的变化还表现在年降水日数的改变。王静等^[23]研究认为,三江平原近 50 年(1959—2007 年)年降水日数气象倾向率为 $-4.3\text{ d}\cdot 10\text{ a}^{-1}$,呈极显著减少趋势。赵秀兰^[3,11]也认为我国近 50 年年降水日数每 10 年减少 2 d 左右,而东北地区年降水日数在近 50 年间(1959—2007 年)减少了 3~4 d。

1.3 光能资源的变化

光能资源的变化主要体现在日照时数的变化。气候变化背景下,我国日照时数整体上呈减少趋势,东北和华北地区减少更加明显^[24],近 50 年东北地区年日照时数平均每 10 年减少 30 h 左右^[25]。从空间变化分析,松嫩平原东部、松辽平原及辽河平原西部的大部分地区年日照时数和生长季节日照时数都不同程度地减少。东北三省(黑龙江、吉林、辽宁)日照时数高于 $2\ 800\text{ h}$ 的区域面积由原来的 $13.6\times 10^4\text{ km}^2$ 减少到 $4.1\times 10^4\text{ km}^2$ ^[26-27],减少幅度达到 69.9%,减少趋势十分明显。

东北大部分地区陆地表面太阳总辐射整体上呈不显著减少趋势,但区域间有一定的空间差异性。如黑龙江省北部和东部、内蒙古东北部、吉林、辽宁大部分地区太阳总辐射呈现减少的趋势,而黑龙江省南部地区却呈现增加的趋势。光能资源的变化不同季节也

表现出了时间差异性。例如,吉林省冬季太阳总辐射下降趋势显著,夏季显著增加^[28-29]。

1.4 农业气象灾害的变化

我国是世界上遭受气象灾害影响最为严重的国家之一,每年因气象灾害造成的直接经济损失高达全国GDP的3%~6%,占整个自然灾害损失的70%左右^[30]。东北地区作为粮食主产区,农作物受干旱、洪涝、冰雹、低温冷害等气象灾害的影响更大,特别是在全球变暖的背景下,突发性及致灾性的气象灾害明显增多,东北地区干旱等气象灾害增加最为明显。

1.4.1 旱涝灾害的变化

农业干旱主要是由于农作物需水过程与自然降水过程不协调造成的。一般是指在农作物生长季节内降雨稀少、大气干旱,土壤缺水严重,农作物生长发育受到抑制,导致减产甚至绝收的一种气象灾害^[2]。洪涝灾害一般是相伴发生的,洪水对农作物的危害是毁灭性的,而涝害是由于农田积水,作物呼吸等生理功能受阻导致农作物减产的一种气象灾害^[31]。

东北地区水资源匮乏,降水分布不均匀,流域内丰水年和枯水年水资源量相差数倍,全年降雨70%~80%集中在6—9月份,干旱和洪涝灾害都容易发生。而在全球气候变暖的背景下,东北地区降水总量减少,降水分布变得更不均匀,大部分地区有干旱的倾向^[32-34],并表现出有一定的阶段性特征。总体上看,20世纪70年代为相对干旱时期;80—90年代旱灾和涝灾表现出阶段性的波动,马建勇等^[31]研究认为这一时段旱灾的受灾比为负距平,而涝灾的受灾比为正距平,说明这个时期为相对湿润的时期;而进入2000年以后东北地区则处于相对干旱的时段。例如,这一时期辽宁省锦州市作物整个生长季节受到干旱胁迫,本溪的干旱频率也增加了13%,而水涝的发生频率从20世纪60年代的57%降为90年代的23%。大范围洪涝灾害发生频率、强度、突发性以及连续降雨日数较20世纪90年代以前明显减少,洪涝灾害发生的机率也明显变小^[19,26]。

1.4.2 风雹、霜冻和低温冷害等灾害的变化

大风和冰雹称为风雹灾害。风灾对农作物的伤害主要为机械性的折断及倒伏,冰雹的危害在于它降落过程中的机械破坏作用,同时农作物受到突发的低温胁迫而致使生理功能受阻以及土壤板结等次生危害。而低温灾害是指在农作物生长季节内温度较低,以至于不能满足作物生长、发育、结实等对热量的需求,从而导致减产的一种自然灾害。

马建勇等^[31]研究认为,从1971—2009年近40年间,东北地区风雹灾害以1.1个百分点·10 a⁻¹的速率显著降低,说明现阶段风雹对农作物的影响相对减弱。赵秀兰^[3]也认为近50年东北地区寒潮和霜冻害的发生频率和危害性均呈明显减少趋势^[35-36]。近20年与30年前相比,黑龙江省穆棱市冰雹发生频率减少40%;辽宁锦州地区雹灾年发生次数也有所减少,危害程度略有减轻^[26,35]。

东北地区近几十年低温受灾比曲线的阶段性波动较大,20世纪70年代农作物受低温的影响较大,如在1969年、1972年、1976年发生了严重的低温冷害,使东北地区粮食减产300亿kg左右。20世纪80年代以后冷害发生的频率逐渐减少。但在20世纪90年代及21世纪初期气候变暖的背景下低温的受灾比再现相反趋势^[31,37]。赵秀兰^[3]认为近50年东北地区夏季低温冷害也呈减少的趋势,但由于东北地区处于高纬度地区,在变暖背景下发生区域性的低温冷害的概率仍然较大,一旦发生低温冷害造成的粮食减产也最为严重。并且随着不同熟期玉米品种种植范围的北移东延,区域或局地低温冷害出现的风险可能会加大^[3,38-39]。

2 东北地区主要粮食作物对气候变化的响应

为合理利用气候资源,提高气候资源的生产潜力,东北地区主要粮食作物的品种、布局和播种区域等都进行了有针对性的调整,表现了对气候变暖事实的响应。

2.1 对热量及光照资源变化的响应

2.1.1 主栽农作物适宜生育期延长,适种区域不断扩大

热量条件的改变促使东北地区主栽农作物的物候期春季提前秋季延后现象明显,作物适宜生育期延长。仅从无霜期考量,与20世纪70年代相比,80年代延长4 d,90年代延长7 d,北部地区较南部地区延长幅度更大^[3,13]。

20世纪80年代以来,东北地区不同熟期玉米品种可种植区域明显北移东扩,种植面积不断扩大。早熟品种适种区域逐渐被中、晚熟品种取代^[40-42],晚熟品种北界从20世纪60年代的吉林省镇赉县扩展到21世纪初黑龙江的甘南县;中熟种北界从20世纪60年代的黑龙嘉荫县向北延伸到呼玛县。黑龙江省主栽玉米品种的分布从平原地区向北扩展到了大兴安岭和伊春地区,向北推移了大约4个纬度,第六积温带也能种植相应熟期的玉米品种。三江平原成为中熟和中晚熟品种的适种区域,松嫩平原南部亦可种植晚熟

品种。辽宁省东部山区的种植范围明显向东、向北扩展,主要是因为热量条件的改善^[43]。

近 50 年东北地区太阳能资源有减少的趋势,主要表现为日照时数和总辐射量的减少,这对农业生产不利。但由于东北地区太阳能资源总量相对较为丰富,加之减少趋势不显著,因此,光照资源对农业生产的总体影响不大。

2.1.2 主要农作物种植结构、播种面积适时进行了调整

气候变暖使我国主要粮食作物的种植结构、播种面积以及品种布局都发生了相应的变化,作物的适种区域整体表现出向高纬度和高海拔方向移动的趋势。研究表明,年平均气温是决定适种作物的种植区域、播种面积以及品种布局的关键因素,一般年平均气温每增加 1℃,北半球中纬度的作物将北移 150~200 km,垂直上移 100~200 m,≥10℃积温的持续日数平均延长 15 d 左右。而当年平均温度低于 15℃时,小麦、玉米种植比例高于水稻的种植;当年平均温度高于 15℃时,水稻的种植比例明显占优势,玉米、小麦的种植比例减小。就是说水稻的种植比例随着温度的升高而增大,而小麦、玉米的种植比例随着温度的升高而减小,这也是作物生长对温度变化的响应^[44]。

在气候变暖的背景下,近 30 年东北地区主要粮食作物种植结构发生了显著的变化。云雅如等^[45]对黑龙江水稻种植格局变化进行了分析,结果发现 1985 年以后水稻不仅种植面积扩大,种植区域也向北推移和向东扩展,水稻年种植增长率超过 10%。至 2000 年,松嫩平原成为玉米主要适种区,三江平原成为水稻主要适种区,形成了以玉米、水稻和大豆为主要格局的粮食作物种植结构。主要粮食作物的播种面积也发生了很大的变化,主要表现出玉米、水稻面积不断增加,大豆基本持平、小麦面积不断减少的趋势。20 世纪 80 年代初整个东北地区水稻种植面积仅为 84.88 万 hm²,至 2009 年已达到 400 万 hm²;目前玉米播种面积在 700 万~800 万 hm² 之间,呈增加趋势;大豆播种面积基本保持在 400 万~500 万 hm² 的水平,但年际间存在波动;小麦播种面积从 20 世纪 80 年代初的 300 万 hm² 左右减少到目前的不足 40 万 hm²,减少幅度十分明显,种植区域主要分布在黑龙江省的部分地区^[21]。

种植结构的改变,充分利用了温度和热量资源增加的有利气候条件,使水稻总产和商品化水平得以提高,因此成为国家重要的商品粮生产和供应基地。松嫩平原南部作为玉米高产中心,由于生长季节温度

高、热量资源充足,主要推广种植高产、高效的晚熟和中晚熟品种,玉米产量达到 15 t·hm⁻²。在农业育种过程中,在高产、耐旱、耐涝和耐低温、冷害等品质鉴定的基础上,增加了对适应较高温度或较长生育期的新品种选育工作,拓宽品种资源,适应气候变暖对新品种的需求^[46]。

2.2 对水分资源变化的响应

气候变暖对农业用水的影响远大于工业和生活用水,气温每上升 1℃农业灌溉用水将增加 6%~10%,干旱和极端降水事件的发生直接影响甚至终止农业生产过程,导致农作物减产或绝收。因此,在气候变暖背景下,针对水资源供给不足而作物生长需水增加的矛盾,从供水源头、渠道以及应用对象等方面有针对性地进行输水系统节水、田间灌溉节水、田间农艺节水、化学节水、生物改良节水等相应的农业节水技术研究,并将单项技术进行组装配套,形成了农业节水技术集成模式,在东北地区的农业生产中应用,取得了一定的节水效果^[47-48]。

21 世纪以后,以秸秆还田和少免耕等技术为核心的保护性耕作在东北大部分地区试验、示范和推广。如松嫩平原中部地区采用了由秸秆覆盖、免耕播种、机械深松和化学除草为核心的保护性耕作技术,辽宁西北地区推广了以秸秆覆盖和少耕免耕为中心的保护性耕作技术^[49],初步显示出保护性耕作在减轻土壤侵蚀、提高土壤有机质、抗旱节水和节本增效方面的作用。尤其是抗旱节水和降低劳动力投入方面效果更为明显,但是对适应气候变化的长期效果仍然需要进一步的检验和完善。

3 主要农作物病虫害对气候变化的响应

中国是世界上农作物病虫害最严重的国家之一,具有种类多、影响大并时常暴发成灾的特点。气候变化导致农业有害生物致灾的生态环境条件发生了变化,尤其是地表温度增加、区域降水变化、农业结构、种植制度和种植界限变化等,对农作物病虫害的发生与灾变、地理分布、危害程度等产生重大影响,使农作物病虫害的发生呈现出发生面积、暴发种类和灾害损失逐年增加的新态势。如 2006 年病虫害的发生面积由 1949 年的 0.12 亿 hm² 上升到 4.6 亿 hm²;而 20 世纪 50—70 年代,每年约有 10 种有害生物暴发,21 世纪以来每年暴发的有害生物增加 30 种左右;1949—2009 年,生物灾害造成的全国粮食损失增加了 4 倍左右,其中 2000—2006 年,仅水稻、小麦、玉米、大豆

4种主要粮食作物的实际产量损失就由105.39亿kg增加到127.08亿kg,损失率增加了20.58%^[50]。

温度、降水、日照等气象因子可直接影响病虫害的生长发育及其危害程度,多数病虫害随温度的升高、降雨强度的增加以及日照时数的减少,生命活动旺盛,发育速率增加、历期缩短,种群增长力增加。如黑龙江省水稻病害以往主要是以稻瘟病为主,而如今细菌性褐斑病(*Rhizoctonia solani*)和胡麻斑病(*Xanthomonas oryzae*)已逐渐成为危害很严重的常发性病害,而苗期虫害也由以往不是很严重的负泥虫(*Oulema oryzae*)和潜叶蝇(*Hydrellia griseola*)等逐渐演化为以二化螟(*Chilo suppressalis*)为主的常发性苗期虫害;杂草种类也呈增加的趋势^[46]。

农业病虫害与气象灾害具有相伴发生的偶合性。如历史上蝗虫成灾往往与大旱、洪水等相伴发生。1999—2003年,我国北方地区连续发生了大面积的严重干旱,同时发生了新中国成立以来极其少见的大面积蝗灾^[51]。

4 在气候变化背景下,东北地区主要农作物的生产潜力、产量及品质效应

4.1 气候变化背景下主要农作物生产潜力的变化

在气候变暖的背景下,中国大陆(西南地区除外)光温生产潜力呈明显大幅度增长的趋势,北方高纬度地区增幅大于南方^[52]。我国东北三省(黑龙江、吉林和辽宁)由于温度上升,中晚熟品种替换早熟品种以及种植面积的增加,作物的光温生产潜力和气候生产潜力都有不同程度的提高。20世纪90年代以来,松嫩平原的气候生产潜力与近50年(1951—2000年)各年平均气候生产潜力相比,玉米增加1057 kg·hm⁻²,水稻增加787 kg·hm⁻²,增加趋势较为明显^[53]。

气候变化对作物生产潜力的影响利弊共存,不同生态地区限制作物生长的气象因子不同,对作物的生产潜力影响也不同。东北地区气候变暖导致玉米生长季气温升高、积温增加,使玉米生长发育和灌浆速度加快,生物量增加,从而提高单产,这是气候变暖对作物生产潜力的正效应。但是,如果水分条件得不到满足,气候变暖会限制热量资源的利用,将缩短主要农作物的灌浆时间,降低灌浆速率,使千粒重下降,从而造成明显减产,而且减产幅度明显大于温度升高所带来的正效应。因此,气候变暖利于提高非干旱区玉米单产水平,对干旱区尤其是无灌溉条件地区的作物生产潜力的影响不利^[3,54]。

4.2 气候变化背景下主要农作物的产量及品质效应

气候变暖使东北地区主要农作物的适宜生长期延长,同时也降低了影响作物生产的低温冷害和霜冻的发生频率^[55]。所以说气候变暖在一定程度上对东北地区的粮食生产有促进作用。例如,黑龙江省20世纪90年代水稻单产与80年代相比增产42.7%,其中气候变暖的贡献率为23.2%~28.8%^[56]。与20世纪70年代和80年代相比,20世纪90年代气候变暖对松嫩平原玉米增产的贡献率分别为17.98%和26.78%^[57]。而与20世纪60年代相比,20世纪70年代、80年代、90年代和21世纪初气候变暖对玉米增产的贡献率分别为16.8%、16.0%、20.9%和23.9%^[58]。也有研究认为气候变暖使主要粮食作物生育期缩短,灌浆速率加快,光合作用时间减少而影响干物质积累导致产量下降。如平均气温每升高1℃,玉米生育期将缩短7d左右,产量下降5%~6%;水稻生育期缩短14~15d,促使水稻分蘖速度加快,有效分蘖减少而导致产量下降幅度达到14%~17%;小麦生育期也会缩短10d左右,减产幅度达到10%~12%。因此,气候变化对我国主要农作物产量的影响,因不同区域的气候因子与农业资源、技术管理水平等因素的交互作用不同,产生的效应也不尽相同。对于某些地区产生正效应的有利条件可能被其他气候因子制约而成为其他地区的不利条件。例如,在北方干旱地区,水分是决定作物产量的关键因子,而在南方湿润地区降水过多则不利于产量的提高。而温度和CO₂浓度的升高对产量的正效应可能被光照资源的减少而抵消。总体而言,我国高纬度地区农业适应性较强,中纬度地区适应性较弱。

气候变化引发的温度、降水、光照等自然资源的变化对农作物的品质也产生了一定的影响。在CO₂浓度升高的情况下,植株体内吸收的C增加、N减少,C/N比增加而蛋白质含量降低,从而使作物品质下降。而生长期温度升高使玉米生育期、有效灌浆期缩短也是产量及品质下降的原因之一^[23]。大豆产量和品质对极端天气气候事件的响应更为敏感,如大豆生育期中如遇几天的极端高温就可使大豆早熟而减产,而特大旱灾或涝灾大豆脂肪、蛋白质含量会明显下降,尤其是蛋白质含量损失更大。潘根兴等^[59]研究认为气候变化造成的大豆平均减产率为27%。其中,干旱成灾年占22%,平均减产率达到30%,其次为涝灾和低温冷害。贾敬敦等^[60]认为大豆病虫害通常呈“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。

5 气候变化给粮食生产带来的风险评估与预测

气候变暖将影响气候资源的时空分布,在 Had-CM2 GX (英国哈德莱中心的一种集合结果的强迫方案)条件下,气候变化将明显增加中国东北地区的土地生产潜力,相反,气候变化将明显减少中国华南、西藏地区的土地生产潜力^[61]。

气候变化对农作物产量的影响有利有弊。气候变化改变了水热条件,促使复种指数增加对粮食增产有益,但温度升高对作物产量的影响是非线性的,当温度高于关键温度后其产量可能会迅速下降^[62]。如果不改变现有的种植制度、种植品种和生产水平在 CO₂ 浓度倍加的条件下,到 2030 年由于气候变暖的影响,全国主要粮食作物总产量将平均减少 5%~10%左右,其中水稻、小麦和玉米三大粮食作物均以下降为主。气候变化将使我国玉米总产量平均减产 3%~6%,春玉米平均减产 2%~7%,夏玉米平均减产 5%~7%;灌溉玉米减产 2%~6%,无灌溉玉米减产 7%左右。减产的主要原因是温度升高,作物生长发育速度加快,生育时期缩短,光合时间减少,呼吸消耗加剧等。

未来农业气象灾害会更加频繁,农业在气候变化条件下会变得更加脆弱。很多全球气候变化的模型都显示土壤有机质随温度的升高分解速率加强,加剧了土壤中碳的损失^[63-65],Kirschbaum^[66]综述了土壤碳库对全球变暖响应,认为在气候变暖的背景下,温度每升高 1℃,土壤有机碳损失 10%或更高,土壤碳循环过程的加速提高了 CO₂ 的释放速率,进一步加剧温室效应,是对气候变暖的负反馈。

6 结论

综合分析以上文献内容,可以看出东北地区气候变化的主要表现在光照、温度、水分、气象灾害等方面,而农作物的产量、品质以及病虫害等对这些资源的变化均有不同程度的响应,表现出以下几方面的特点。

(1)东北地区的热量及光照资源的变化主要是气候变暖、温度升高、热量资源增加,但日照时数和太阳总辐射呈减少的趋势。东北地区主要粮食作物对热量及光照资源变化的响应主要表现在粮食作物的种植结构、播种面积以及品种布局都发生了相应的变化,农作物生长季节积温增加,无霜期延长,适种区域北移东扩,适种面积增加,这为粮食产量的提高提供了潜在的可能。品种布局表现出水稻的种植面积及区域

增加较为明显。

(2)在全球自然气候系统变暖的背景下,我国降水资源的时空变化主要表现为由西北向东南方向增加,东北地区粮食生产与水资源短缺的矛盾日益突出。针对水资源供给不足而作物生长需水增加的矛盾,主要是进行了田间灌溉节水、化学节水、生物改良节水以及保护性耕作等相应的农业节水技术研究,并将单项技术进行组装配套,形成了农业节水技术集成模式,在东北地区的农业生产中应用,取得了一定的节水效果。

(3)东北地区作为粮食主产区,农作物受干旱、洪涝、冰雹、低温冷害等气象灾害的影响较大,特别是在全球变暖的背景下,突发性及致灾性的气象灾害明显增多,尤其是干旱已成为东北地区的主要气象灾害。气候变化导致农业有害生物致灾的生态环境条件发生了变化,使农作物病虫害的发生呈现出发生面积、暴发种类和灾害损失逐年增加的新态势。

(4)在气候变暖的背景下,我国东北三省(黑龙江、吉林和辽宁)主要粮食作物的光温生产潜力和气候生产潜力都有不同程度的提高。所以说气候变暖在一定程度上对东北地区的粮食产量的提高有促进作用。但气候变暖使主要粮食作物生育期缩短,灌浆速率加快,光合作用时间减少而影响干物质积累导致产量下降。气候变暖对粮食生产利弊共存。

(5)气候变化引发的温度、降水、光照等自然资源的变化对农作物的品质也产生了一定的影响。在 CO₂ 浓度升高的情况下,植株体内的 C/N 比增加而蛋白质含量降低,从而使作物品质下降。尤其是大豆对极端天气反应极为敏感,大豆生育期中如遇几日的极端高温就可使大豆早熟而减产,而特大旱灾或涝灾大豆脂肪、蛋白质含量会明显下降。总体上气候变化对中国大豆生产不利效应明显。

参考文献:

- [1] 潘根兴,高 民,胡国华,等. 应对气候变化对未来中国农业生产影响的问题和挑战[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1707-1712.
PAN Gen-xing, GAO Min, HU Guo-hua, et al. Issues and challenges on mitigation of climate change impacts on China's future agriculture[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1707-1712. (in Chinese)
- [2] 孙风华,吴志坚,杨素英. 东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(7): 779-784.
SUN Feng-hua, WU Zhi-jian, YANG Su-ying. Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in Northeast China in last 50 years[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 779-784. (in Chinese)

- [3] 赵秀兰. 近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 144-149.
ZHAO Xiu-lan. Influence of climate change on agriculture in Northeast China in recent 50 years[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(9): 144-149. (in Chinese)
- [4] 马宗晋, 高庆华. 中国第四纪气候变化和未来北方干旱灾害分析[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 245-251.
MA Zong-jin, GAO Qing-hua. Climate changes of China in the quaternary period and analysis on drought disasters of north China in the future[J]. *Quaternary Science*, 2004, 24(3): 245-251. (in Chinese)
- [5] 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述[J]. 地球科学进展, 2007, 22(7): 673-684.
QIAN Wei-hong, FU Jiao-lan, ZHANG Wei-wei, et al. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 673-684. (in Chinese)
- [6] 丁一汇, 张 锦, 宋亚芳. 天气和气候极端事件的变化及其与全球变暖的联系[J]. 气象, 2002, 28(3): 3-7.
DING Yi-hui, ZHANG Jin, SONG Ya-fang. Changes in weather and climate extreme events and their association with the global warming[J]. *Meteorological Monthly*, 2002, 28(3): 3-7. (in Chinese)
- [7] 房世波, 韩国军, 张新时, 等. 气候变化对农业生产的影响及其适应[J]. 气象科技进展, 2011, 1(2): 15-19.
FANG Shi-bo, HAN Guo-jun, ZHANG Xin-shi, et al. Climate change affects crop production and its adaptation[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2011, 1(2): 15-19. (in Chinese)
- [8] 房世波, 谭凯炎, 任三学. 夜间增温对冬小麦生长的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3251-3258.
FANG Shi-bo, TAN Kai-yan, REN San-xue. Winter wheat yields decline with spring higher night temperature by controlled experiments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3251-3258. (in Chinese)
- [9] 房世波, 沈 斌, 谭凯炎. 大气(CO₂)和温度升高对农作物的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1116-1124.
FANG Shi-bo, SHEN Bin, TAN Kai-yan. Effect of elevated CO₂ concentration and increased temperature on physiology and production of crops[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5): 1116-1124. (in Chinese)
- [10] 高 锋, 王宝书. 全球变暖与东北地区气温变化研究[J]. 海洋预报, 2008, 25(1): 25-30.
GAO Feng, WANG Bao-shu. A study on global warming and the temperature changes in the northeast region[J]. *Marine Forecasts*, 2008, 25(1): 25-30. (in Chinese)
- [11] 谭凯炎, 房世波, 任三学, 等. 非对称性增温对农业生态系统影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 634-641.
TAN Kai-yan, FANG Shi-bo, REN San-xue, et al. Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and its effects on agriculture ecosystems[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 634-641. (in Chinese)
- [12] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.
LIU Zhi-juan, YANG Xiao-guang, WANG Wen-feng, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2199-2206. (in Chinese)
- [13] 居 焯, 熊 伟, 许吟隆. 东北春麦对气候变化的响应预测[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1595-1598.
JU Hui, XIONG Wei, XU Yin-long. Response of spring wheat to climatic change in northeast China[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1595-1598. (in Chinese)
- [14] 谢立勇, 侯立白, 高西宁, 等. 冬小麦 M808 在辽宁省的种植区划研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(1): 6-10.
XIE Li-yong, HOU Li-bai, GAO Xi-ning, et al. Suitable planting regions of winter wheat M808 in Liaoning Province[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(1): 6-10. (in Chinese)
- [15] 贾建英, 郭建平. 东北地区近 46 年玉米气候资源变化研究[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3): 302-307.
JIA Jian-ying, GUO Jian-ping. Studies on climatic resources change for maize over last 46 years in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Agro-meteorology*, 2009, 30(3): 302-307. (in Chinese)
- [16] 章名立. 中国东部近百年的雨量变化[J]. 大气科学, 1993, 17(4): 451-461.
ZHANG Ming-li. Variation of mean annual precipitation in east China during recent hundred years[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1993, 17(4): 451-461. (in Chinese)
- [17] 安 刚, 孙 力, 廉 毅. 东北地区可利用降水资源的初步分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(1): 132-139.
AN Gang, SUN Li, LIAN Yi. A primary analysis of utilizable precipitation in northeast China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(1): 132-139. (in Chinese)
- [18] 赵秀兰, 延晓冬. 近 20 年黑龙江省土壤水储量变化趋势研究[J]. 地理科学, 2006, 26(5): 569-573.
ZHAO Xiu-lan, YAN Xiao-dong. Change trend of soil water storage of Heilongjiang Province in recent 20 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(5): 569-573. (in Chinese)
- [19] 吉 奇, 徐璐璐, 宋冀凤. 1953—2005 年本溪地区气候变化及其对农业生产的影响[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(1): 36-39.
JI Qi, XU Lu-lu, SONG Ji-feng. Climate change and its effect on agricultural production in Benxi from 1953 to 2005[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(1): 36-39. (in Chinese)
- [20] 阎 琦, 吴艳青, 朱 宇, 等. 鞍山市春季气候变化及其对农业的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(4): 1599-1600, 1633.
YAN Qi, WU Yan-qing, ZHU Yu, et al. Spring climatic change and its impacts on agriculture in Anshan City[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(4): 1599-1600, 1633. (in Chinese)
- [21] 谢立勇, 李 艳, 林 森. 东北地区农业及环境对气候变化的响应与应对措施[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 197-201.
XIE Li-yong, LI Yan, LIN Miao. Response and adaptation to climate change of agriculture and environment in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1): 197-201. (in Chinese)
- [22] 张 郁, 邓 伟, 杨建锋. 东北地区的水资源问题、供需态势及对策研究[J]. 经济地理, 2005, 25(4): 565-568, 541.
ZHANG Yu, DENG Wei, YANG Jian-feng. Study on problems of water resources, supply and demand and countermeasure in Northeast of China[J]. *Economic Geography*, 2005, 25(4): 565-568, 541. (in Chinese)
- [23] 王 静, 杨晓光, 李 勇, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 VI. 黑龙江省三江平原地区降水资源变化特征及其对春玉米生产的可能影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1511-1522.
WANG Jing, YANG Xiao-guang, LI Yong, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of global climate change. VI. Change characteristics of precipitation resource and its possible effect on maize production in Sanjiang Plain of Heilongjiang

- Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1511–1522.(in Chinese)
- [24] 张 蕾, 霍治国, 王 丽, 等. 气候变化对中国农作物虫害发生的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(6): 1499–1507.
ZHANG Lei, HUO Zhi-guo, WANG Li, et al. Effects of climate change on the occurrence of crop insect pests in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(6): 1499–1507.(in Chinese)
- [25] 赵春雨, 王 颖, 张玉书, 等. 近 50 年辽宁省作物生长季气候条件变化及对农业生产的影响[J]. *灾害学*, 2009, 24(4): 102–106.
ZHAO Chun-yu, WANG Ying, ZHANG Yu-shu, et al. Climate conditions of crop growth season and its effect on agricultural production in the recent 50 years in Liaoning Province[J]. *Journal of Catastrophology*, 2009, 24(4): 102–106.(in Chinese)
- [26] 张丽华, 史奎桥, 刘景利, 等. 气候变化与气候事件对锦州农田生态的影响及预防对策[J]. *安徽农学通报*, 2009, 15(19): 141–143.
ZHANG Li-hua, SHI Kui-qiao, LIU Jing-li, et al. Effect of climate change and climate events on farm land ecosystem in Jinzhou City and its defensive counter measures[J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2009, 15(19): 141–143.(in Chinese)
- [27] 曹艳芳, 古 月, 徐 健, 等. 内蒙古近 47 年气候变化对春小麦生育期的影响[J]. *内蒙古气象*, 2009(4): 22–25.
CAO Yan-fang, GU Yue, XU Jian, et al. The influence of climate change on growing period of spring wheat in recent 47 years Inner Mongolia[J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2009(4): 22–25.(in Chinese)
- [28] 廉士欢, 靳英华, 彭 聪. 吉林省太阳辐射变化规律及太阳能资源利用研究[J]. *气象与环境学报*, 2009, 25(3): 30–34.
LIAN Shi-huan, JIN Ying-hua, PENG Cong. Variation of solar radiation and utilization of solar energy resources in Jilin province[J]. *Journal of Meteorology And Environment*, 2009, 25(3): 30–34.(in Chinese)
- [29] 王雅婕, 黄 耀, 张 稳. 1961—2003 年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(4): 405–413.
WANG Ya-jie, HUANG Yao, ZHANG Wen. Changes in surface solar radiation in mainland China over the period from 1961 to 2003[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(4): 405–413.(in Chinese)
- [30] 翟盘茂, 王萃萃, 李 威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*. 2009, 3(3): 144–148.
ZHAI Pan-mao, WANG Cui-cui, LI Wei. A review on study of change in precipitation extremes[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 3(3): 144–148.(in Chinese)
- [31] 马建勇, 许吟隆, 潘 婕. 东北地区农业气象灾害的趋势变化及其对粮食产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(2): 283–288.
MA Jian-yong, XU Yin-long, PAN Jie. Analysis of agro-meteorological disasters tendency variation and the impacts on grain yield over Northeast China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(2): 283–288.(in Chinese)
- [32] 谢 安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. *地理学报*, 2003, 58(增): 75–82.
XIE An, SUN Yong-gang, BAI Ren-hai. Arid climate trend over northeastern China and its response to global warming[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 58(Sup): 75–82.(in Chinese)
- [33] 张耀存, 张录军. 东北气候和生态过渡区近 50 年来降水和温度概率分布特征变化[J]. *地理科学*, 2005, 25(5): 561–566.
ZHANG Yao -cun, ZHANG Lu -jun. Precipitation and temperature probability characteristics in climatic and ecological transition zone of northeast China in recent 50 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(5): 561–566.(in Chinese)
- [34] 魏凤英, 张 婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(3): 1–7.
WEI Feng-ying, ZHANG Ting. Frequency distribution of drought intensity in Northeast China and relevant circulation background[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(3): 1–7.(in Chinese)
- [35] 李宪萍, 于翠红, 冯 娟, 等. 气候变化对黑龙江农业气象灾害的影响及对策[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(32): 14220–14222.
LI Xian -ping, YU Cui -hong, FENG Juan, et al. Effects of climate change on agrometeorological disaster in Heilongjiang Province and its counter measures[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(32): 14220–14222.(in Chinese)
- [36] 钱维宏, 张玮玮. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖[J]. *大气科学*, 2007, 31(6): 1266–1278.
QIAN Wei-hong, ZHANG Wei-wei. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1266–1278.(in Chinese)
- [37] 方修琦, 王 媛, 朱晓禧. 气候变暖的适应行为与黑龙江省夏季低温冷害的变化[J]. *地理研究*, 2005, 24(5): 664–672.
FANG Xiu -qi, WANG Yuan, ZHU Xiao -xi. Change of cool summer hazard under an adaptation behavior to the climate warming in Heilongjiang Province, Northeast China[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 664–672.(in Chinese)
- [38] 李 辑, 龚 强. 东北地区夏季气温变化特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 2006, 22(1): 6–10.
LI Ji, GONG Qiang. Characteristics of summer air temperature in Northeast China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(1): 6–10.(in Chinese)
- [39] 张丽娟. 气候变化对黑龙江省农业生态环境的影响[J]. *哈尔滨师范大学学报: 自然科学版*, 1998, 14(4): 105–108.
ZHANG Li-juan. The change of the climate affect the modes of life and relation of agriculture of Heilongjiang[J]. *Journal of Harbin Normal University: Natural Sciences*, 1998, 14(4): 105–108.(in Chinese)
- [40] 赵俊芳, 杨晓光, 刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6544–6551.
ZHAO Jun-fang, YANG Xiao-guang, LIU Zhi-juan. Influence of climate warming on serious low temperature and cold damage and cultivation pattern of spring maize in Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6544–6551.(in Chinese)
- [41] 杨尚英. 气候变化对我国农业影响的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(2): 303–304.
YANG Shang-ying. The world climate changes to affect to agriculture [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2006, 34(2): 303–304.(in Chinese)
- [42] 孙智辉, 王春乙. 气候变化对中国农业的影响[J]. *科技导报*, 2010, 28(4): 110–117.
SUN Zhi-hui, WANG Chun-yi. Impact of changing climate on agriculture in China[J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(4): 110–117.(in Chinese)
- [43] 张翠艳. 近 50 年来锦州地区气候变化对生态环境及农业生产的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(29): 12835–12837, 12912.
ZHANG Cui-yan. Effects of the climate variation on the ecological environment and agricultural production during the past half century in Jinzhou area[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(29): 12835–12837, 12912.(in Chinese)
- [44] 李祎君, 王春乙. 气候变化对我国农作物种植结构的影响[J]. *气候变*

- 化研究进展, 2010, 6(2): 123-129.
- LI Yi-jun, WANG Chun-yi. Impacts of climate change on crop planting structure in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(2): 123-129. (in Chinese)
- [45] 云雅如, 方修琦, 王媛, 等. 黑龙江省过去20年粮食作物种植格局变化及其气候背景[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 697-705.
- YUN Ya-ru, FANG Xiu-qi, WANG Yuan, et al. Main grain crops structural change and its climate background in Heilongjiang Province during the past two decades[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 697-705. (in Chinese)
- [46] 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]. 自然资源学报, 2008, 17(3): 41-48.
- JIAO Jiang, XU Xian-bin, BIAN Jing-yang, et al. Impact of global warming on rice yield in Heilongjiang Province and strategic studies[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 17(3): 41-48. (in Chinese)
- [47] 戚颖, 付强, 孙楠. 黑龙江省半干旱地区水资源利用程度评价及节水灌溉模式优选[J]. 节水灌溉, 2007(4): 7-9, 12.
- QI Ying, FU Qiang, SUN Nan. Research on the assessment of water resource utilization level and the optimum selection of water saving irrigation modes in semi-arid area in Heilongjiang Province[J]. *Water Saving Irrigation*, 2007(4): 7-9, 12. (in Chinese)
- [48] 孟维忠, 葛岩, 于国丰. 辽西半干旱地区高效节水技术集成模式[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 71-74.
- MENG Wei-zhong, GE Yan, YU Guo-feng. Research on integration water-saving technique and water-saving mode in west semi-arid areas of Liaoning Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5): 71-74. (in Chinese)
- [49] 孙传生, 黄长海, 朱大为, 等. 东北黑土区水土保持保护性耕作措施探讨[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 132-133, 136.
- SUN Chuan-sheng, HUANG Chang-hai, ZHU Da-wei, et al. Discussion on soil and water conservation protective cultivation for Northeast blackland area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(5): 132-133, 136. (in Chinese)
- [50] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1935-1945.
- HUO Zhi-guo, LI Mao-song, WANG Li, et al. Impacts of climate warming on crop diseases and pests in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(10): 1935-1945. (in Chinese)
- [51] 霍治国, 钱拴, 王素艳, 等. 2001年农作物病虫害发生流行的气候影响评价[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(3): 30-37.
- HUO Zhi-guo, QIAN Shuan, WANG Su-yan, et al. The assessment of the impact of the climatic condition on the outbreak of crop pests and diseases and prevalence in 2001[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2002, 2(3): 30-37. (in Chinese)
- [52] 章基嘉, 徐祥德, 苗俊峰. 气候变化及其对农作物生产潜力的影响[J]. 气象, 1992, 18(8): 3-7.
- ZHANG Ji-jia, XU Xiang-de, MIAO Jun-feng. Climate change in China and its influence potential crop productivity during the last 40 years[J]. *Meteorological Monthly*, 1992, 18(8): 3-7. (in Chinese)
- [53] 周光明. 松嫩平原作物气候生产潜力分析及其气候变化响应[J]. 黑龙江农业科学, 2009(5): 35-37.
- ZHOU Guang-ming. Analysis of crop climatic potential productivity and its response to climatic change in Songnen Plain[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009(5): 35-37. (in Chinese)
- [54] 马树庆, 王琪, 罗新兰. 基于分期播种的气候变化对东北地区玉米生长发育和产量的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2131-2139.
- MA Shu-qing, WANG Qi, LUO Xin-lan. Effect of climate change on maize (*Zea mays*) growth and yield based on stage sowing[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2008, 28(5): 2131-2139. (in Chinese)
- [55] 刘颖杰, 林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 229-233.
- LIU Ying-jie, LIN Er-da. Effects of climate change on agriculture in different regions of China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(4): 229-233. (in Chinese)
- [56] 方修琦, 王媛, 徐铤, 等. 近20年气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 820-828.
- FANG Xiu-qi, WANG Yuan, XU Tan, et al. Contribution of climate warming to rice yield in Heilongjiang Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 820-828. (in Chinese)
- [57] 王宗明, 宋开山, 李晓燕, 等. 近40年气候变化对松嫩平原玉米带单产的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 112-117.
- WANG Zong-ming, SONG Kai-shan, LI Xiao-yan, et al. Effects of climate change on yield of maize in maize zone of Songnen Plain in the past 40 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(9): 112-117. (in Chinese)
- [58] 李秀芬, 陈莉, 姜丽霞. 近50年气候变暖对黑龙江省玉米增产贡献的研究[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(5): 336-341.
- LI Xiu-fen, CHEN Li, JIANG Li-xia. Contribution of climate warming to maize yield for 1961-2008 in Heilongjiang Province[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(5): 336-341. (in Chinese)
- [59] 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.
- PAN Gen-xing, GAO Min, HU Guo-hua, et al. Impacts of climate change on agricultural production of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1698-1706. (in Chinese)
- [60] 贾敬敦, 蒋丹平, 陈良玉, 等. 中国农业应对气候变化研究进展与对策[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- JIA Jing-dun, JIANG Dan-ping, CHEN Liang-yu, et al. The research progress and countermeasures of China agriculture on climate change [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2013. (in Chinese)
- [61] 唐国平, 李秀彬, Guenther Fischer, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 129-138.
- TANG Guo-ping, LI Xiu-bin, Guenther Fischer, et al. Climate change and its impacts on China's agriculture [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 129-138. (in Chinese)
- [62] 谭凯炎, 房世波, 任三学, 等. 气候变化中的非对称性增温对农作物生长的影响[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 634-641.
- TAN Kai-yan, FANG Shi-bo, REN San-xue, et al. Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and its effects on agriculture ecosystems[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 634-641. (in Chinese)
- [63] Sundquist E T. The global carbon dioxide budget[J]. *Science*, 1993, 259: 934-941.
- [64] Kevenbolden K. Gas hydrates-geological perspective and global change[J]. *Review Geophysics*, 1993, 31: 173-187.
- [65] McKane R B, Rastetter E B, Shaver G R. Climatic effects on tundra carbon storage inferred from experimental data and a model[J]. *Ecology*, 1997, 78: 1170-1187.
- [66] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 753-760.