

华北平原夏玉米各生育阶段农业 气候要素变化特征

胡洵瑀^{2,3},王 靖^{1,2}

(1.中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,河南 郑州 450003;
2.中国农业大学资源与环境学院,北京 100193;
3.中国科学院植物研究所,植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093)

摘 要: 基于华北平原 6 个农业气象试验站 1981—2009 年夏玉米生育期资料,以及同期 48 个气象站平均、最高和最低温度,降水、日照时数等逐日气象资料,采用线性倾向估计的方法,分析了华北平原近 30 年夏玉米各生育阶段农业气候要素的变化趋势。结果表明:(1) 夏玉米出苗~拔节期的温度升高,其中平均温度、平均最高温度、平均最低温度的增幅分别为 $0.42^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ 、 $0.36^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ 和 $0.58^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$),平均最低温度显著增加的站点多于平均最高温度显著增加的站点,温度日较差降幅为 $0.22^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$);夏玉米拔节~抽雄期的温度变化不明显,温度日较差降幅为 $0.22^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$);夏玉米抽雄~成熟期的平均温度、平均最高温度、平均最低温度均下降,降幅分别为 $0.16^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$), $0.15^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) 和 $0.06^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$,其中下降显著的站点位于山东省。(2) 各生育阶段降水量变化不明显,全区仅山东南部和河南中部出苗~拔节期的降水量增加显著。(3) 除播种~出苗期外,各生育阶段的总辐射量均显著下降,其中出苗~拔节、拔节~抽雄、抽雄~成熟和全生育期的日均总辐射降幅分别 0.83 、 1.10 、 $0.87\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot10\text{a}^{-1}$ 和 $0.89\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$),且大部分站点下降显著。

关键词: 华北平原;夏玉米;生育期;气候变化
中图分类号: S162.3 **文献标志码:** A

Analyses of variations in agro-climatic elements during summer maize growing season in North China Plain

HU Xun-yu^{2,3}, WANG Jing^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique in Henan Province, China Meteorological Administration, Zhengzhou, Henan 450003, China;*
2. *College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;*
3. *State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, CAS, Beijing 100093, China*)

Abstract: Based on phenological data of summer maize at from typical agro-meteorological experimental stations and parallel daily meteorological data from 48 meteorological stations in the North China Plain (NCP) from 1981 to 2009, we analyzed the variations of agro-climatic elements during summer maize growing season in recent 30 years by using the method of liner regression. The results showed that mean temperature, mean maximum temperature and mean minimum temperature during the period from emergence to jointing were increased by $0.42^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$, $0.36^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ and $0.58^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$), respectively. There were more stations where mean minimal temperature became increased statistically significantly than those where mean maximum temperature was increased significantly. Mean daily temperature range became decreased by $0.22^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) during the period from emergence to jointing. There was no significant changing trend in the temperature during the period from jointing to tasseling. However, mean daily temperature range was decreased by $0.22^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) from jointing to tasseling. Mean temperature, mean maximum temperature and mean minimum temperature during the period from tasseling to maturity were decreased by $0.16^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<$

收稿日期:2014-05-04
基金项目:中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金项目(AMF201203);国家自然科学基金项目(41101046);973 项目(2009CB118608)
作者简介:胡洵瑀(1989—),女,浙江海宁人,硕士研究生,主要研究方向为气候变化响应与适应。E-mail: huxunyucooky@163.com。
通信作者:王 靖(1980—),男,内蒙古集宁人,副教授,博士生导师,主要研究方向为气候变化影响与适应。E-mail: wangj@cau.edu.cn。

0.05), $0.15^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$) and $0.06^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, respectively. The stations where the temperature became decreased significantly in statistics were located in Shandong province. Also, precipitation was changed little during all the development stages of summer maize, except for the south area of Shandong and the middle regions of Henan where precipitation during the period from the emergence to jointing had been increased significantly. Additionally, mean daily radiation was decreased by $0.83\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$, $1.10\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$, $0.87\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ and $0.89\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), respectively, during the periods from emergence to jointing, from jointing to tasseling, from tasseling to maturity and from sowing to maturity. The results are helpful to refine the agricultural measures in summer maize production in NCP.

Keywords: North China Plain; Summer maize; Growing period; Climatic change

玉米是我国三大粮食作物之一。近年来,玉米生产发展迅速。统计资料显示,1980 年以来,我国玉米播种面积不断增加,产量增幅为 $1.08\times 10^7\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。华北平原是夏玉米的主产区,其产量占全国玉米产量的 27%^[1]。同时,华北平原也是气候变化敏感的区域。1951—2009 年华北平原温度升高速率为 $0.31^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,特别是 1990 年以来增温更加显著,达 $0.40^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$;然而,涵盖夏玉米生长期的夏秋两季的增温速率略小于冬春两季,分别为 $0.16^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.24^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ^[2]。华北平原还是全国年降水量减少最快的地区,特别是在夏季最为明显,下降速率达 $-16.8\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ^[2]。华北平原的日照时数在近几十年也明显下降^[3]。

气候变率和变化显著影响玉米的生长发育和产量。研究指出,影响山西玉米产量最显著的气候因子为气温和降水,其次为日照,且其影响效应在不同的生育阶段表现不同^[4]。黑龙江省玉米的气象产量与生育期降水呈显著正相关,其对产量的影响高于积温^[5];而王秀芬等^[6]研究表明,黑龙江省玉米气象产量与玉米穗期和花粒期的最低温度呈正相关关系,与花粒期的最高温度呈负相关关系。王道波和张广录^[7]研究表明石家庄地区夏玉米的生物量和积温的关系密切,温度对玉米生长发育起到关键性作用。朱金城^[8]研究显示,影响华北平原夏玉米生长进程的主要因素是平均最高温度、平均气温日较差和平均温度,影响夏玉米产量的主要因素是有效积温、日照时数和全生育期降水量。以上研究表明了解玉米生育期内农业气候要素的变化特征有助于更好地理解气候变化对玉米产量的影响。现有研究主要针对作物全生育期或者生育期内各月的气候变化特征^[9-10],难以反映特定生育阶段的农业气候要素变化规律。由华北平原冬小麦各生育阶段农业气候要素变化特征可见,各生育阶段的农业气候要素时空分布特征差异较大^[11]。因此,将生育期细化,研究各个生育阶段的气候要素变化特征,对理解气候

变化对农业生产的影响和精细化农业管理措施的制定有较高的参考价值。目前,有关夏玉米各生育阶段农业气候要素变化趋势的研究较少。本研究将基于华北平原农业气象试验站的夏玉米生育期观测数据和气象站的逐日气象数据,分析近 30 年来夏玉米各生育阶段的农业气候要素变化特征,探讨其对夏玉米生产的影响,为应对气候变化、制定相应的精细化生产措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据资料

本研究采用位于华北平原三省二市(河北、山东、河南、北京和天津)1981—2009 年的 48 个气象站点(图 1)的逐日气象数据。数据资料由国家气象信息中心提供,包括逐日最高温度、最低温度、平均温度、降水量和日照时数。日总辐射量由日照时数通过埃斯屈朗公式计算^[12]。

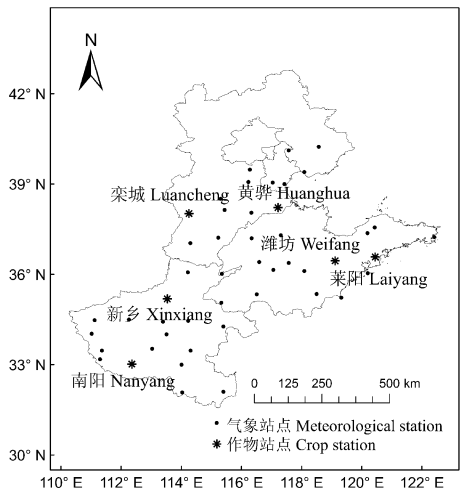


图 1 华北平原主要气象站点和典型农业气象站点分布
Fig.1 The geographical distribution of meteorological stations and typical agro-meteorological stations (crop stations) in the North China Plain

夏玉米生育期资料来自中国气象局农业气象试

验站,观测项目包括播种、出苗、拔节、抽雄和成熟的发育期时间。选取华北平原 6 个代表性农业气象试验站(河北:黄骅和栾城;山东:潍坊和莱阳;河南:新乡和南阳;图 1)1981—2009 年夏玉米生育期的观测数据。分析近 30 年华北平原夏玉米全生育期和各生育阶段农业气候要素的变化特征。

1.2 研究方法

夏玉米生育期划分为 4 个生长阶段,分别为播种~出苗,出苗~拔节,拔节~抽雄,抽雄~成熟期。为便于比较,将栾城和黄骅每年夏玉米各生育期起止日期的平均值作为当年河北、北京、天津夏玉米各生育阶段的划分时间,潍坊和莱阳每年夏玉米各生育期起止日期的平均值作为当年山东夏玉米生育期的划分依据,新乡和南阳每年夏玉米各生育期起止日期的平均值作为当年河南夏玉米的生育期划分依据,分析 1981—2009 年华北平原夏玉米各生育阶段农业气候要素的时空变化规律。

各生育阶段和全生育期农业气候要素的变化特

征采用线性倾向估计法分析^[13]。气候要素倾向率的空间变化特征由 ArcGIS10.1 作图展现。

2 结果与分析

2.1 夏玉米各生育阶段气候资源特征

1981—2009 年六个农业气象试验站夏玉米全生育期平均 101 d,出苗~拔节期平均 33 d,拔节~抽雄期平均 17 d,抽雄~成熟期平均 44 d;生殖生长期(拔节~成熟期)占全生育期的 60%。

夏玉米全生育期平均温度为 25.2℃;拔节~抽雄期的日均温度最高,六站平均为 26.8℃;播种~出苗期的平均温度最低,六站平均为 23.9℃。全生育期平均日最高温度和平均日最低温度分别为 30.2℃和 20.9℃。全生育期温度日较差平均为 9.4℃;拔节~抽雄期的温度日较差在各生育阶段中最小,平均为 8.2℃。夏玉米全生育期降水量平均为 393.5 mm。全生育期的日均辐射量平均为 17.0 MJ·m⁻²(表 1)。

表 1 1981—2009 年六个农业气象试验站平均气候资源特征
Table 1 Characteristics of climatic resources at 6 typical agro-meteorological experimental stations from 1981 to 2009

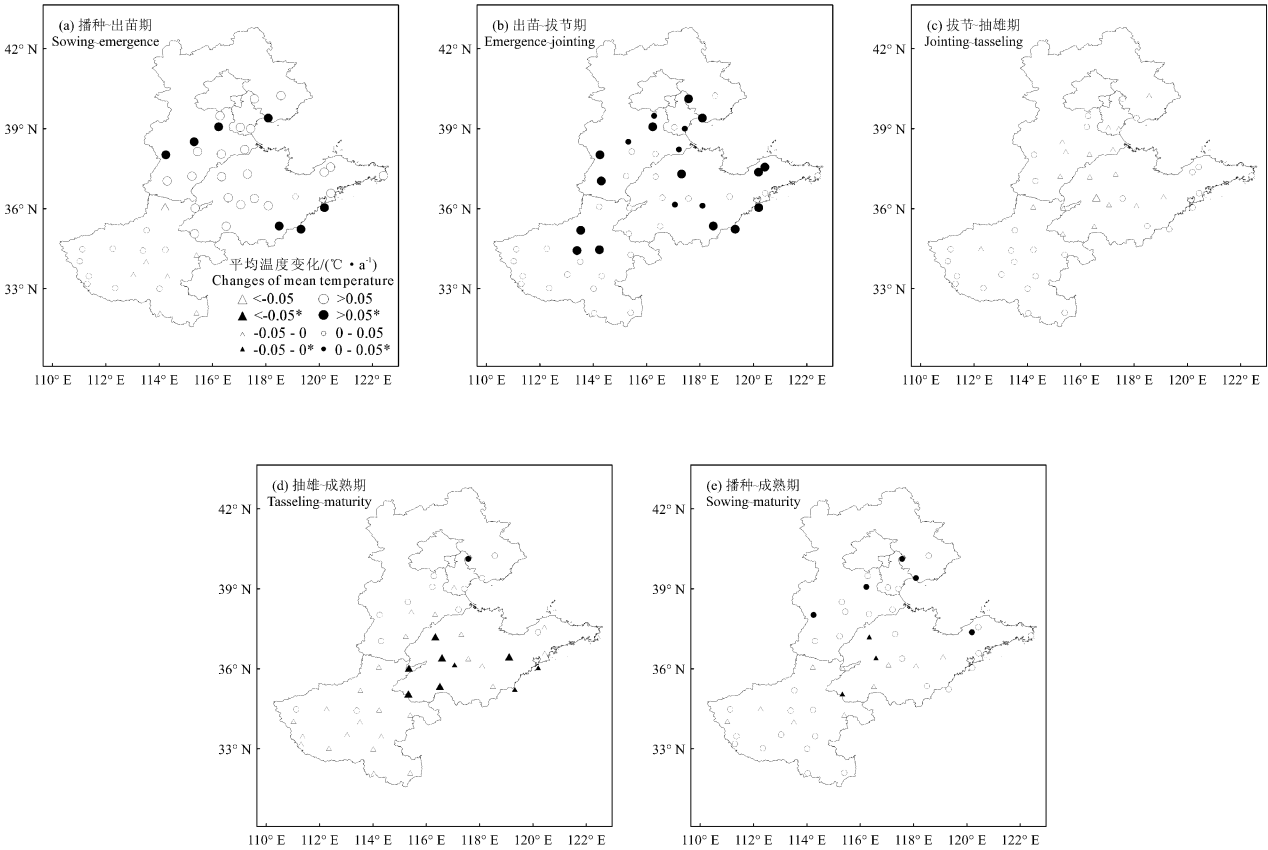
生育阶段 Growing periods	播种~出苗 Sowing~emergence	出苗~拔节 Emergence~jointing	拔节~抽雄 Jointing~tasseling	抽雄~成熟 Tasseling~maturity	播种~成熟 Sowing~maturity
天数 Days/d	7	33	17	44	101
平均温度 Mean temperature/℃	23.9	25.8	26.8	24.3	25.2
最高温度 Maximum temperature/℃	29.8	31.1	31.2	29.3	30.2
最低温度 Minimum temperature/℃	18.3	21.2	23.1	20.2	20.9
温度日较差 Mean daily temperature range/℃	11.5	9.9	8.2	9.1	9.4
降水量 Precipitation/mm	14.8	134.0	92.4	152.3	393.5
日均辐射量 Mean daily global radiation/(MJ·m ⁻²)	19.3	18.0	16.6	16.1	17.0

2.2 各生育阶段平均温度变化特征

华北平原夏玉米播种~出苗期的平均温度在近 30 年的上升幅度为 0.51℃·10a⁻¹($P < 0.05$)。其中河北中部的石家庄、保定、廊坊和唐山该期的平均温度增加显著,平均增幅达 1.04℃·10a⁻¹($P < 0.05$);山东半岛的青岛、日照和莒县该期的平均温度也显著增加,平均增幅为 0.92℃·10a⁻¹($P < 0.05$);其余各站该期的平均温度变化不显著,河南的部分站点该期的平均温度稍有下降(图 2a)。出苗~拔节期的平均温度在全区均增加,平均增幅为 0.42℃·10a⁻¹($P < 0.05$)。其中 41.7% 站点显著增加,主要分布在河北、山东和河南北部(图 2b)。拔节~抽雄期,华北平原有 60.4% 的站点平均温度增加,39.6% 的站点平均温度降低,但变化均不显著(图 2c)。全

区 72.9% 的站点在抽雄~成熟期的平均温度降低,全区抽雄~成熟期的平均温度降幅为 0.16℃·10a⁻¹($P < 0.05$),显著降低的站点集中在山东,9 个站点抽雄~成熟期的平均温度降幅达到 0.56℃·10a⁻¹($P < 0.05$)(图 2d)。

华北平原夏玉米全生育期平均温度在近 30 年变化较小,全区平均增幅为 0.07℃·10a⁻¹。其中河北的站点平均温度增加,山东和河南站点的平均温度有增有减。但全区仅河北和山东 5 个站点的平均温度呈显著增加,平均增幅为 0.38℃·10a⁻¹($P < 0.05$);另有山东西部的 3 个站点全生育期的平均温度显著下降 0.37℃·10a⁻¹($P < 0.05$);其余各站的变化均不显著(图 2e)。总体上看,近 30 年来夏玉米在出苗~拔节期的平均温度增加最为显著。



注：* 表示通过 0.05 水平的显著性检验。下同。 Note: * is significant at $P < 0.05$, and hereinafter.

图 2 1981—2009 年华北平原夏玉米各生育阶段平均温度变化的气候倾向率

Fig. 2 Climate tendency rates of mean temperature during summer maize growing periods in North China Plain from 1981 to 2009

2.3 各生育阶段最高温度变化特征

近 30 年,全区夏玉米播种~出苗期的平均最高温度增幅为 $0.56^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$) (图略)。其中平均最高温度显著增加的站点集中在河北,占全部站点的 18.7%,山东仅日照的该期平均最高温度增加显著。河南大部分站点该期的平均最高温度下降,但降幅较小。出苗~拔节期的平均最高温度呈上升趋势,全区增幅为 $0.36^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。三省各有 2 个站点增温显著,分别是河北的石家庄和遵化,河南的新乡和安阳,山东的泰山和日照,8 站平均最高温度的增幅为 $0.65^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。拔节~抽雄期的平均最高温度呈下降趋势,全区平均下降 $0.04^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,但所有站点均不显著。抽雄~成熟期,全区平均最高温度下降 $0.15^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$),其中 72.9% 的站点温度下降,下降显著的站点分布在山东,平均降幅为 $0.53^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。全区全生育期的平均最高温度增幅为 $0.05^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,但仅遵化显著增加。全生育期的平均最高温度在河北大部分站点表现为增加,山东的绝大部分站点表现为降低,而河南各站点的

平均最高温度有增有降。

2.4 各生育阶段最低温度变化特征

近 30 年,全区夏玉米播种~出苗期的平均最低温度增幅为 $0.57^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$),显著增加的站点分布在河北和山东,占全区站点的 22.9%,这些站点平均增温幅度为 $1.09^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。仅河南 5 个站点和河北 1 个站点的平均最低温度降低,但均不显著(图 3a)。出苗~拔节期所有站点的平均最低温度都增加,增幅为 $0.58^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$),其中全区 66.7% 的站点增温显著 (图 3b)。全区拔节~抽雄期平均最低温度增幅为 $0.18^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$),但仅山东和河南两省共 5 个站点呈显著增加,平均增幅为 $0.51^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。河北南部和山东部分站点该期的平均最低温度呈下降趋势,但变化不显著(图 3c)。全区抽雄~成熟期平均最低温度降幅为 $0.06^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,其中河北北部的 3 个站点平均最低温度显著增加,增幅 $0.76^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$),而山东 6 个站点的平均最低温度显著降低,降幅为 $0.75^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$) (图 3d)。

全区全生育期的平均最低温度增幅为 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$), 其中 35.4% 的站点增加显著, 这些站点平均增幅为 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$); 仅山东西部 3 个站点平均最低温度显著降低, 降幅为

$0.42\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) (图 3e)。总体上看, 近 30 年华北平原夏玉米全生育期的平均最低温度增加显著, 其增幅高于平均温度和平均最高温度。

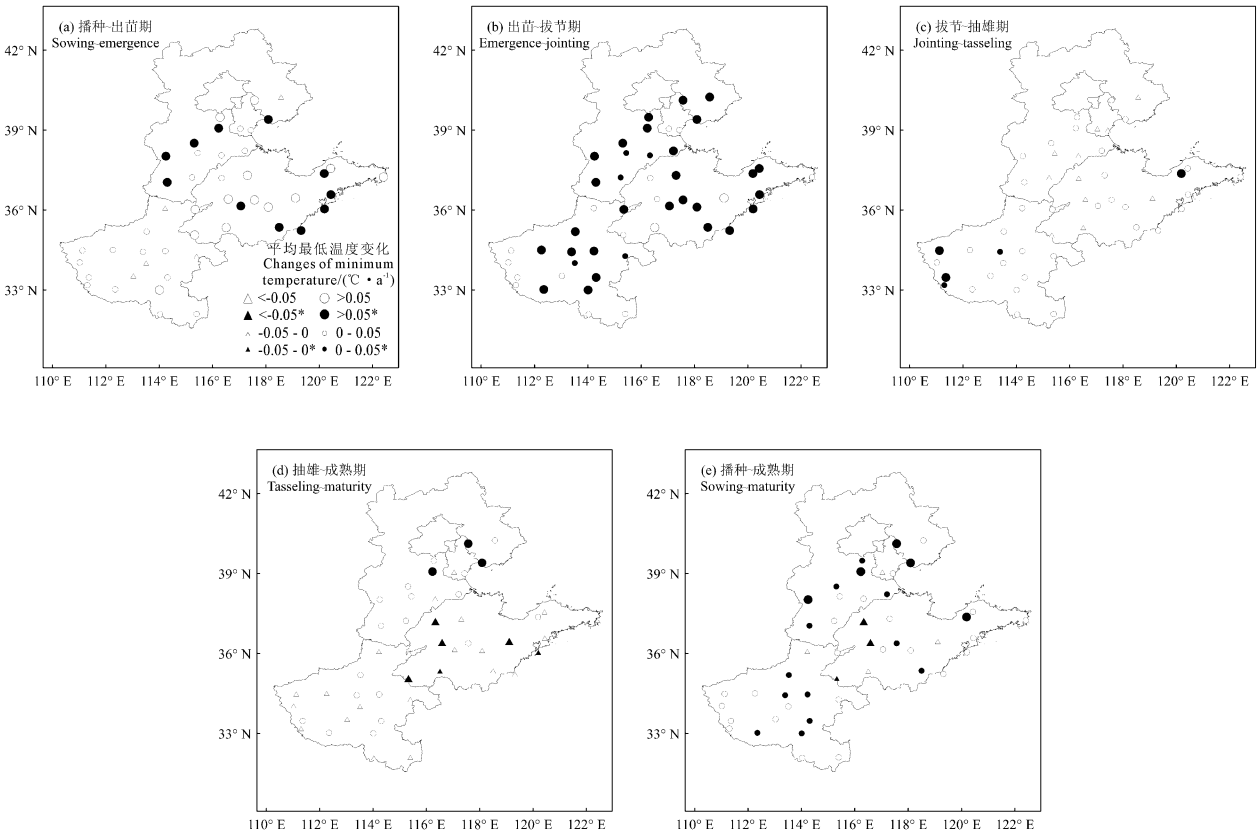


图 3 1981—2009 年华北平原夏玉米各生育阶段平均最低温度变化的气候倾向率
Fig.3 Climatic tendency rates of mean minimum temperature during summer maize growing periods in North China Plain from 1981 to 2009

2.5 各生育阶段气温日较差变化特征

近 30 年, 播种 ~ 出苗期温度日较差的变化较小, 仅河北的 3 个站点温度日较差显著增加, 山东的 1 个站点温度日较差显著降低(图 4a)。全区出苗 ~ 拔节期的温度日较差降幅为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$), 其中显著降低的站点分布在山东和河北南部, 平均降幅为 $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) (图 4b)。拔节 ~ 抽雄期全区有 83.3% 的站点温度日较差降低, 平均降幅为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$)。全区 22.9% 的站点温度日较差显著降低, 集中在河南和河北南部, 以及山东的个别站点, 平均降幅为 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) (图 4c)。全区抽雄 ~ 成熟期的温度日较差平均降幅为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$; 仅山东西部的 2 个站点温度日较差显著增加, 平均增幅为 $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$); 而温度日较差显著降低的站点占全区站点的 14.6%, 平均降幅为 0.41

$^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) (图 4d)。

全区全生育期的温度日较差平均降幅为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$)。仅山东西部的 2 个站点温度日较差显著增加; 全区 35.4% 的站点温度日较差显著降低, 平均降幅为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$) (图 4e)。

2.6 各生育阶段总辐射变化特征

近 30 年来, 华北平原夏玉米播种 ~ 出苗期 79.2% 的站点日均总辐射减少, 平均减少幅度为 $0.53\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$), 仅河南开封降低显著(图 5a)。出苗 ~ 拔节、拔节 ~ 抽雄和抽雄 ~ 成熟期全区的日均总辐射下降幅度分别为 0.83 、 $1.10\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot10\text{a}^{-1}$ 和 $0.87\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$), 各期日均总辐射显著减少的站点分别占全区站点的 47.9%、47.9% 和 64.6%。出苗 ~ 拔节期日均总辐射显著减少的站点多分布在河北和山东(图 5b); 拔

节~抽雄(图 5c)和抽雄~成熟期(图 5d)日均总辐射显著减少的站点在全区均匀分布。

全区夏玉米全生育期的日均总辐射降低,平均下降幅度为 $0.89 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$),其中 79.2% 的站点减少显著,这些站点减少幅度为 1.04

$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)(图 5e)。总体上看,夏玉米各生育阶段的日均总辐射均减少,除播种~出苗期外,其余各期日均总辐射显著减少的站点均占全区站点的 47% 以上。

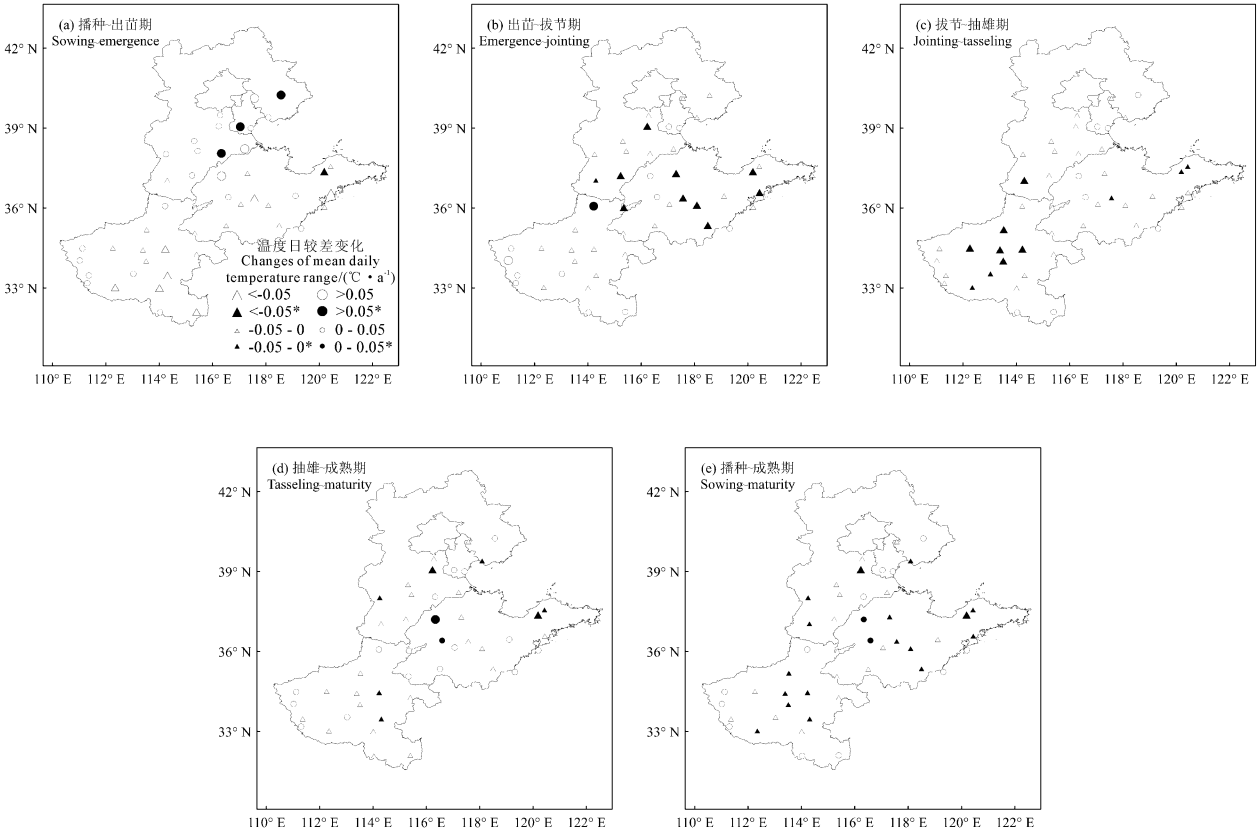


图 4 1981—2009 年华北平原夏玉米各生育阶段温度日较差变化的气候倾向率
Fig.4 Climatic tendency rates of mean daily temperature range during summer maize growing periods in North China Plain from 1981 to 2009

2.7 各生育阶段降水量变化特征

近 30 年,夏玉米播种~出苗期的降水量全区平均减少 $0.2 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。河北省多数站点降水减少,山东省及河南北部多数站点降水增加,全区仅山东惠民县在播种~出苗期的降水量显著增加,增幅为 $7.8 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ (图 6a)。出苗~拔节期降水减少的站点主要集中在河北中北部,降水增加的站点主要分布在山东、河南以及河北南部(图 6b)。其中降水显著增加的站点占有所有站点的 25%,位于山东和河南两省,其平均增幅为 $46.5 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。拔节~抽雄期降水变化的空间差异较大(图 6c),全区平均减少幅度为 $3.4 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。河北省抽雄~成熟期的降水减少,山东省在该期降水增加,河南省的各站降水有增有减(图 6d)。

全区夏玉米播种~成熟期的降水量平均增加

$18.4 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。全区 70.8% 的站点降水量增加,主要集中在山东和河南。其中位于山东南部 and 河南东部的站点降水显著增加 $84.1 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)(图 6e)。

3 结论与讨论

在气候变化的背景下,夏玉米各生育阶段的农业气候要素发生了明显的变化,这对华北平原夏玉米的生长和发育会产生较大影响。

1) 出苗~拔节期的平均温度在全区均增加,平均增幅为 $0.42 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$);平均最高温度显著增加的站点少于同期平均温度显著增加的站点,平均最低温度的增幅大于平均温度和平均最高温度的增幅,导致此期温度日较差下降显著。该期日均总辐射下降,而该期降水量仅在山东南部和河

南中部增加。出苗~拔节期是玉米的苗期,平均温度的增加导致玉米出苗~拔节期缩短,最低温度升高会增强玉米的夜间呼吸,不利于营养物质的积累^[14];日均辐射量下降和日均降水量增加,虽然降

水增加减轻了该期内的水分胁迫,但辐射降低不利于同化产物的积累。华北该期近 30 年的气候变化对有机物的积累不利^[15]。

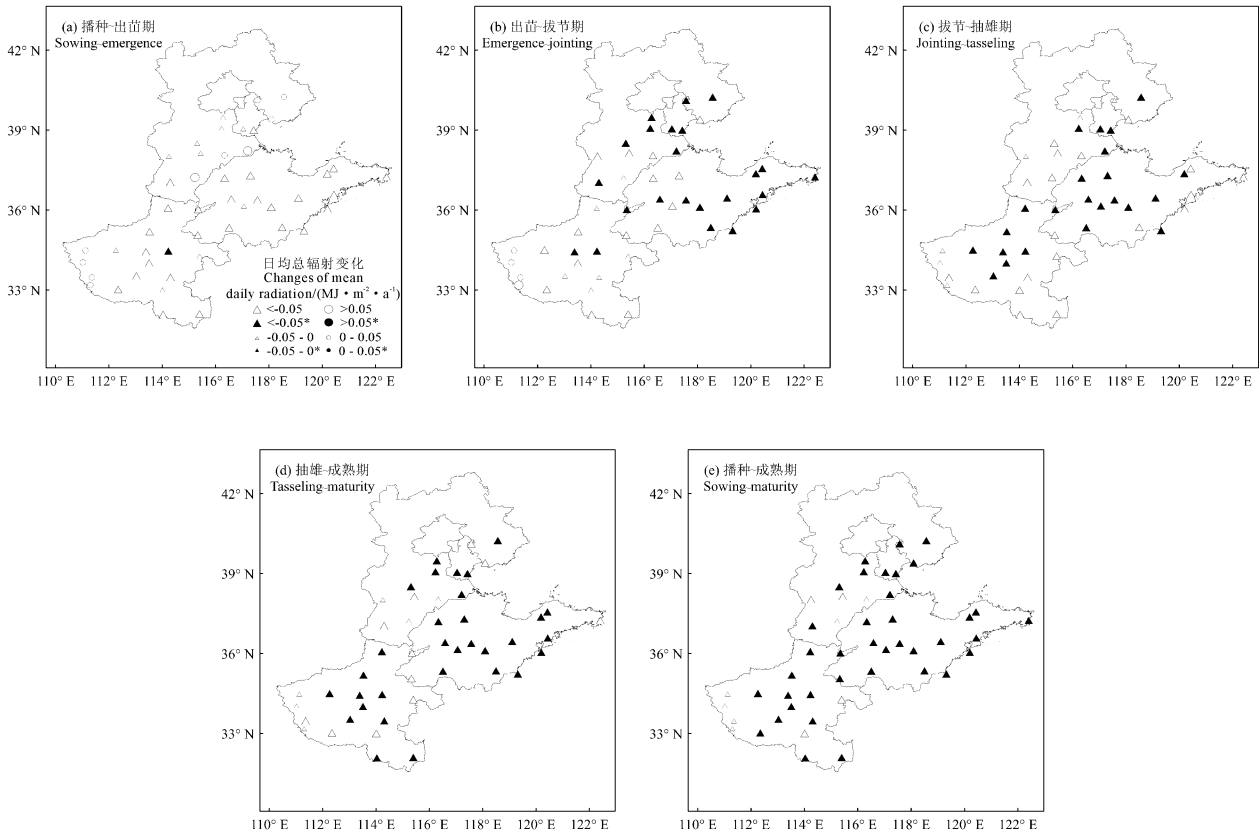


图 5 1981—2009 年华北平原夏玉米各生育阶段日均总辐射变化的气候倾向率
Fig.5 Climatic tendency rates of mean daily global radiation during summer maize growing periods in North China Plain from 1981 to 2009

2) 拔节~抽雄期的平均温度和平均最高温度的变化不显著,而全区平均最低温度增加 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$);温度日较差的下降幅度较大,为 $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$),且在河南下降明显。该期日均辐射量下降显著。拔节~抽雄期是玉米的穗期,此期营养生长和生殖生长并进,是雄穗的发育时期,也是粒数的决定时期,对玉米产量有重要作用^[16]。该期的最适温度是 $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,下限和上限温度分别为 $7.7\text{ }^{\circ}\text{C}\pm0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $37.3\text{ }^{\circ}\text{C}\pm1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[16]。华北平原夏玉米在拔节~抽雄期的平均温度为 $26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均最高和最低温度为 $31.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $23.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,适于玉米的生长发育。该期温度日较差和辐射量减少都会降低夏玉米同化物累积效率。

3) 华北平原夏玉米抽雄~成熟期的日平均温度、平均最高和平均最低温度均下降,温度日较差略

有下降;日均降水量的变化不大;日均总辐射下降 $0.89\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$)。抽雄~成熟期又称花粒期,是玉米的生殖生长期。此期还包括了开花和吐丝期,开花和吐丝期一般同步或相差 $2\sim3\text{ d}$,若抽穗前 $10\sim15\text{ d}$ 遇干旱,则这两个时期的间隔天数会增多,严重时还会造成花期不遇,授粉不良^[17]。开花期对高温特别敏感,当温度超过 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$,花粉将减少近 51% ^[18]。代立芹等^[19]研究认为,1981—2010 年华北夏玉米灌浆期的气温适宜度较低。该期温度的降低虽然避免了高温灾害,但是不利于玉米灌浆,可能会减少百粒重。我们的研究发现,近 30 年来,6 个农气站夏玉米的抽雄期变化不明显,但是成熟期显著推迟,使抽雄~成熟期增加 3 d 左右 ($P<0.05$)。温度降低增加了夏玉米生殖生长期天数,延长了灌浆时间。

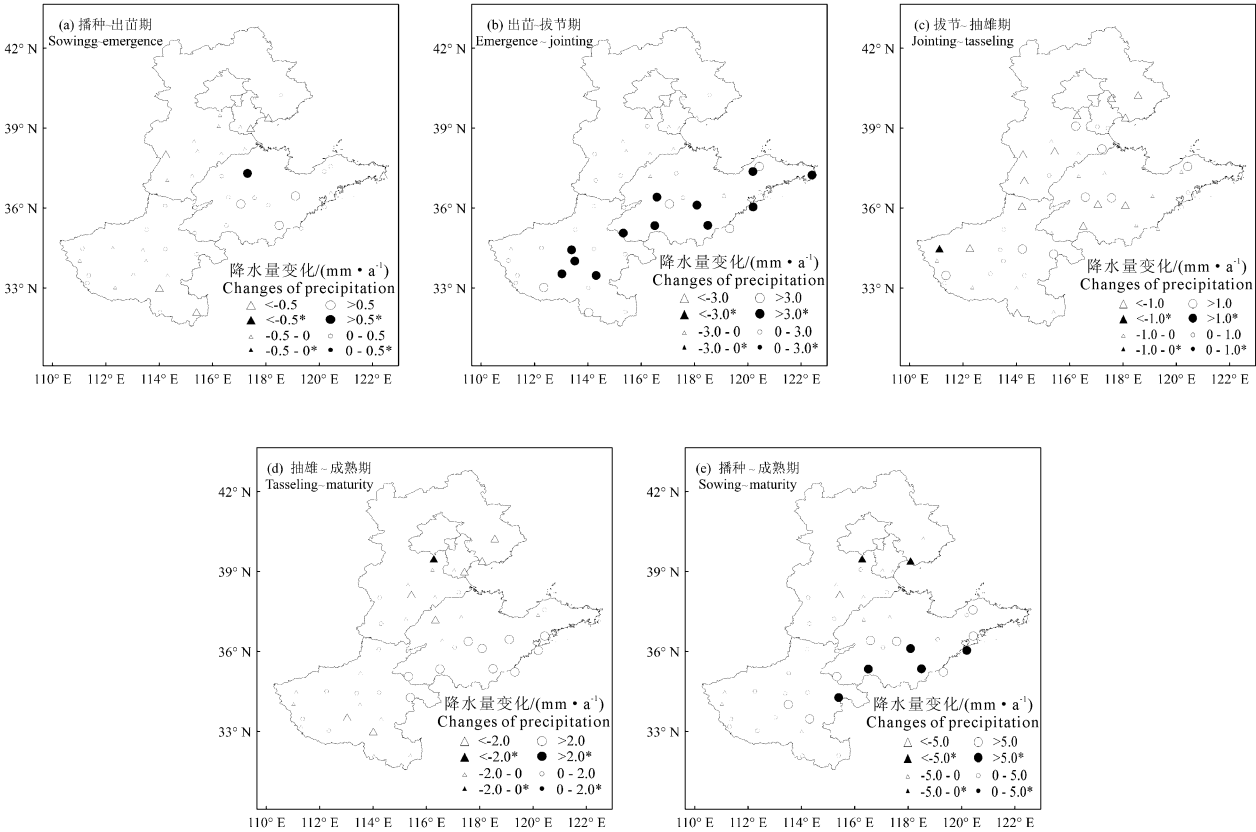


图 6 1981—2009 年华北平原夏玉米各生育阶段降水量变化的气候倾向率

Fig.6 Climatic tendency rates of precipitation during summer maize growing periods in North China Plain from 1981 to 2009

4) 总的来说,夏玉米全生育期内平均最高、最低温度的变化趋势与平均温度的变化趋势相似。河北中部的站点全生育期平均温度增加 $0.38^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), 山东西部站点的全生育期平均温度显著下降 $0.37^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), 河南的无显著变化。全生育期降水量变化不明显。日均总辐射在各个生育阶段均下降。研究显示生长季辐射与玉米总生物量呈显著正相关关系^[20], 因此辐射的减少意味着干物质质量的减少; 但玉米是 C4 植物, 光合效率高, 辐射的减少是否会显著影响华北平原夏玉米的生长发育, 尤其是产量形成, 是值得进一步研究的问题。

本研究分析了近 30 年华北平原 48 个气象站在夏玉米各生育阶段农业气候要素的变化特征, 其中无生育期数据的各站采用的是同省内农业气象试验站夏玉米生育期数据的平均值, 没有考虑各站玉米生育期的差异, 这会造成一定的误差, 今后的研究还需细化。但是, 对于整个华北平原来说, 本研究揭示了近 30 年夏玉米各生育阶段农业气候要素变化的区域特征, 为研究气候变化对玉米生产的影响以及制定应对气候变化的精细化生产措施提供了理论依据。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

[2] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 1951—2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 1-11.

[3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(1): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.

[4] 马雅丽, 王志伟, 栾青, 等. 玉米产量与生态气候因子的关系[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 565-568.

[5] 曹士亮, 于芳兰, 王成波, 等. 降水量与积温对玉米气象产量影响的综合分析[J]. 作物杂志, 2009, (3): 62-65.

[6] 王秀芬, 杨艳昭, 尤飞. 近 30 年来黑龙江省气候变化及其对玉米产量的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1105-1111.

[7] 王道波, 张广录. 基于气象因子的玉米生长模型拟合研究[J]. 玉米科学, 2005, 13(1): 119-122.

[8] 朱金城. 华北平原玉米产量形成对气象条件的响应[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.

[9] Chen C Q, Qian C R, Deng A X, et al. Progressive and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast China[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38: 94-103.

[10] 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 等. 气象因子变化对华北平原夏玉米产量的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 215-218.

参 考 文 献:

[1] 《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,2011:36-41.

[2] 左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J].高原气象,2004,23(2):238-244.

[3] 阮德语,阮重校.越南气候资源[M].河内:科学出版社,1986:68-69.(越文本)

[4] Trnka M, Eitzinger J, Semerádová D, et al. Expected changes in agroclimatic conditions in Central Europe[J]. Climate change, 2011, 108(1-2):261-289.

[5] Williams V. Agroclimatic resource analysis—an example using an index derived and applied for Canada[J]. Agricultural meteorology, 1984,28(1):31-47.

[6] Shen S P, Yin H, Cannon K, et al. Temporal and Spatial Changes of the Agroclimate in Alberta, Canada, from 1901 to 2002[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005,44(7):1090-1105.

[7] 李 勇,杨晓光,王文峰,等.气候变化背景下中国农业气候资源变化 I.华南地区农业气候资源时空变化特征[J].应用生态学报,2010,21(10):2605-2614.

[8] 马洁华,刘 元,杨晓光,等.全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势[J].生态学报,2010,30(14):3817-3827.

[9] 代姝玮,杨晓光,赵 孟,等.气候变化背景下中国农业气候资源变化 II.西南地区农业气候资源时空变化特征[J].应用生态学报,2011,22(2):442-452.

[10] 郭建平.中国农业气候资源演变趋势[M].北京:气象出版社,2010.

[11] 王潇宇,邱新法,曾 燕.地形起伏下我国太阳直接辐射的分布式模拟[J].南京气象学院学报,2005,28(3):297-301.

[12] 文小航,尚可政,王式功,等.1961—2000 年中国太阳辐射区域特征初步研究[J].中国沙漠,2008,28(3):554-561.

[13] 马金玉,梁 宏,罗 勇,等.中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征[J].物理学报,2011,60(6):853-866.

[14] 申彦波,赵宗慈,石广玉.地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J].地球科学进展,2008,23(9):915-923.

[15] 余光明,徐建中,任贾文.青藏高原大气气溶胶研究进展[J].冰川冻土,2012,34(3):609-617.

[16] 徐铭志,任国玉.近 40 年中国气候生长期的变化[J].应用气象学报,2004,15(3):306-312.

[17] 任国玉,郭 军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956.

[18] 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.

[19] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis[M]. Cambridge, UK: The Press Syndicate of Cambridge University,2001.

[20] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001[J]. Journal of Climate, 2003,16:206-223.

[21] Zhao Z C, Xu Y. Detection and projection of temperature change in East Asia for the 20th and 21st centuries[J]. Review of World Resources (USA), 2003,9:223-234.

[22] 叶柏生,李 翀,杨大庆,等.我国过去 50 年来降水变化趋势及其对水资源的影响(i):年系列[J].冰川冻土,2004,26(5):587-594.

[23] 范泽孟,岳天祥,陈传法,等.中国气温与降水时空变化趋势分析[J].地球信息科学学报,2011,13(4):526-533.

[24] 余优森.我国西部干旱气候与农业对策[J].干旱地区农业研究,1992,10(1):1-8.

(上接第 258 页)

[11] 胡洵瑀,王 靖,冯利平.华北平原冬小麦各生育阶段农业气候要素变化特征分析[J].中国农业气象,2013,34(3):317-323.

[12] 陈 超.华北平原作物水分生产力—农田水平衡—气候波动/变化的系统分析[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2009.

[13] 高永刚,顾 红,姬菊枝,等.近 43 年来黑龙江气候变化对农作物产量影响的模拟研究[J].应用气象学报,2007,18(4):532-537.

[14] Earl H J, Liu W, Bowley S R, et al. Effects of abiotic stress on respiratory carbon loss of two maize (*Zea mays* L.) inbred lines and their hybrid during silking and grain-filling[J]. Crop Science, 2012,52:1795-1802.

[15] Xiong W, Holman I P, You L Z, et al. Impacts of observed growing-season warming trends since 1980 on crop yield in China[J]. Regional Environmental Change, 2014,14:7-16.

[16] Sánchez B, Rasmussen A, Porter J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review[J]. Global Change Biology, 2014,20:408-417.

[17] 魏 湜.玉米生态基础[M].北京:中国农业出版社,2010.

[18] Schoper J B, Lambert R J, Vasilas B L. Pollen variability, pollen shedding, and combining ability for tassel heat tolerance in maize[J]. Crop Science, 1987,27:27-37.

[19] 代立芹,李春强,魏瑞江,等.河北省夏玉米气候适宜度及其变化特征分析[J].生态环境学报,2011,20(6):1031-1036.

[20] Cheng Y B, Zhang Q Y, Lyapustin A I, et al. Impacts of light use efficiency and fPAR parameterization on gross primary production modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014,187-197.