中国生态农业学报(中英文) 2021 年 8 月 第 29 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2021, 29(8): 1417−1429

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.201009

刘行, 张晓龙, 王艺璇, 郭英, 罗建美, 沈彦军. 1960—2018 年中国玉米生育期及各生育阶段水热条件时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1417−1429
LIU H, ZHANG X L, WANG Y X, GUO Y, LUO J M, SHEN Y J. Spatio-temporal characteristics of the hydrothermal conditions in the growth period and various growth stages of maize in China from 1960 to 2018[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1417−1429

1960—2018 年中国玉米生育期及各生育阶段水热条件时空变化特征*

刘 行[1,2], 张晓龙[1], 王艺璇[1,2], 郭 英[1], 罗建美[3], 沈彦军[1**]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 河北地质大学土地科学与空间规划学院 石家庄 050031)

摘 要: 水热条件是影响作物分布与农业生产的重要因素。玉米不仅是我国重要的粮食作物, 同时也是重要的饲料作物和能源作物, 探讨其生育期及各生育阶段水热条件的时空变化特征对农业应对气候变化带来的风险及粮食安全具有重要意义。本文选取平均温度(T_{mean})、生长度日(GDD)、高温度日(KDD)、日照时数(SD)、有效降水(P_e)和灌溉需水量(IR)为水热条件指标, 基于全国 422 个气象站点和 292 个农气站点观测数据, 采用趋势和空间分析方法, 揭示了 1960—2018 年中国九大玉米种植区玉米全生育期及各生育阶段水热条件的时空变化特征。结果表明, 玉米生育期 T_{mean}、GDD 的增幅分别为 0.18~0.36 ℃·(10a)$^{-1}$ 和 5.73~41.23 ℃·(10a)$^{-1}$, 东北、甘新区、黄淮海平原和黄土高原等种植区增加最显著。生育期 KDD 的高值区主要集中在黄淮海平原和甘新地区; 除黄淮海平原西南局部区域呈不显著下降趋势外, 其他地区呈增加趋势; 且 KDD 的增加主要集中在苗期到花粒期。玉米生育期 SD 整体表现为显著下降趋势, 其中黄淮海平原和黄土高原地区玉米各生育阶段均存在显著下降趋势, 花粒期 SD 下降最明显。玉米生育期 P_e 和 IR 变化趋势总体上不显著但空间差异明显; 除甘新区和内蒙 P_e 呈现不显著增加趋势外, 全国大部分玉米种植区 P_e 呈不显著减少趋势。生育期 IR 在南疆及黄淮海平原西南部呈不显著减少、东北东南部不显著增加趋势; 从各生育阶段来看, 黄淮海平原区及东北地区 P_e 在穗期和花粒期减少且 IR 相对增加, 黄淮海平原区及黄土高原西部的 IR 分别在播期和苗期呈现减少趋势。总体来看, 全国玉米生育期热量资源有增加趋势, 光照资源减少, 有效降水和灌溉需水量的变化趋势不明显, 但是各生育阶段及区域间水热条件变化差异明显, 如黄淮海平原和黄土高原地区苗期到花粒期 KDD 增加显著但 SD 下降, 高温胁迫可能会对玉米生长产生负影响, 同时影响对水分的消耗。因此, 未来研究更应该关注生育阶段的水热条件变化以及极端情况对玉米生长的影响。

关键词: 气候变化; 玉米; 水热条件; 生长度日; 高温度日; 有效降水; 灌溉需水量
中图分类号: S162.3 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Spatio-temporal characteristics of the hydrothermal conditions in the growth period and various gro wth stages of maize in China from 1960 to 2018*

* 中国科学院农业水资源重点实验室重点方向培育项目及国家自然科学基金项目(42001037, 41807157)资助
** 通信作者: 沈彦军, 主要从事流域生态水文模拟与水环境管理方向研究。E-mail: shenyanjun@sjziam.ac.cn
刘行, 主要从事气候变化对农业产量的影响研究。E-mail: liuhang.950923@foxmail.com
收稿日期: 2020-12-27 接受日期: 2021-03-09

* This research was supported by the Key Cultivation Project of the Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences and the National Natural Science Foundation of China (42001037, 41807157).
** Corresponding author, E-mail: shenyanjun@sjziam.ac.cn
Received Dec. 27, 2020; accepted Mar. 9, 2021

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

LIU Hang[1,2], ZHANG Xiaolong[1], WANG Yixuan[1,2], GUO Ying[1], LUO Jianmei[3], SHEN Yanjun[1**]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Hydrothermal conditions affect crop distribution and agricultural development. Maize is an important food crop in China and is primarily used as a fodder and energy crop. However, the growth of maize is sensitive to climate change. Understanding the spatiotemporal characteristics of the hydrothermal conditions, especially during the growth period and at various growth stages of maize, is crucial for food security and for coping with the impacts of climate change. This study aims to explore the spatiotemporal characteristics of the hydrothermal conditions during the maize growth period and its various growth stages in different regions of China from 1960 to 2018. The mean temperature (T_{mean}), growth degree-day (GDD), killing degree-day (KDD), sunshine hours (SD), effective precipitation (P_e), and irrigation water requirement (IR) served as the hydrothermal condition indicators, incorporating the data from 422 meteorological stations and 292 agricultural stations. The spatial and temporal variations of each indicator were explored using trend and spatial analysis methods. The results showed that T_{mean} and GDD generally increased in the maize growth period, 0.18~0.36 °C·(10a)$^{-1}$ and 5.73~41.23 °C·(10a)$^{-1}$, respectively, and T_{mean} and GDD had risen more rapidly in Northeast China, the Gansu-Xinjiang Region, and the Huang-Huai-Hai Plain. KDD increased in the summer maize planting areas, including the Huang-Huai-Hai Plain and Gansu-Xinjiang Region. KDD tended to increase nationally except in the southwestern part of the Huang-Huai-Hai Plain, where there was an insignificant decline. In the various growth stages, KDD mainly increased from the seedling stage to the flowering and kernel stages. SD in the maize growth period showed a significant downward trend, and there was a significant downward trend in each maize growth stage in the Huang-Huai-Hai Plain and the Loess Plateau. SD declined the most in the flowering and kernel stages. Changes in P_e and IR during the maize growth period were generally non-significant, but the changes varied in different regions. P_e in different growth stages generally decreased, except in the Gansu-Xinjiang Region and Inner Mongolia, where, in past years, the P_e values increased non-significantly. IR in the maize growth period tended to decrease in southern Xinjiang and the southwestern part of the Huang-Huai-Hai Plain, whereas IR increased non-significantly in parts of Northeast China. In the various growth stages, P_e decreased and IR increased at the heading and flowering stages in the Huang-Huai-Hai Plain and Northeast China, whereas IR tended to decrease during the sowing and seedling stages in the Huang-Huai-Hai Plain and the western part of the Loess Plateau. Overall, there was an increasing trend of heat resources during the maize growth period in the whole country. Solar radiation tended to decrease, with no significant changes in P_e and IR. However, there were significant differences in the water and heat conditions among growth stages and regions; KDD significantly increased from the seedling stage to flowering stage in the Huang-Huai-Hai Plain and Loess Plateau, whereas SD decreased in the same regions. Thus, high-temperature stress may negatively impact maize growth and affect water consumption in different maize growth stages. This study illustrated that changes in the hydrothermal conditions during different maize growth stages were more important than those experienced during the entire maize growth period. However, knowledge of the possible spatio-temporal changes in the hydrothermal conditions in different maize growth stages is still lacking; particularly, the climate extremes during different maize growth stages in different regions of China. The results of this study highlight the impact of climate change on crop production, although more detailed research is needed.

Keywords: Climate change; Maize; Hydrothermal conditions; Growth degree-day; Killing degree-day; Effective precipitation; Irrigation water requirement

20 世纪以来，气候变化不断加剧，主要体现在温度持续升高，极端天气事件数量和强度不断增加[1-2]。农业生产对气候条件的依赖较大，更易受到气候变化的影响[3-4]。玉米(*Zea mays*)是中国主要粮食作物中面积和产量增长最快的作物，2004—2012 年中国玉米种植面积增加 45.2%，但产量增加约 79.7%，玉米增产是中国粮食增产的主要贡献者[5]。因此，保障玉米产量的稳定性对我国粮食安全至关重要。

玉米是C4作物，相对于其他作物对气候条件的依赖性更大，对气候变化的敏感性也更高[6-8]。生育期的水热因子是影响玉米生长发育的关键。研究发现，玉米生育期的气温超过 29 ℃将会产生热胁迫，导致光合速率下降、蒸散发增加，进而增加干旱发生的几率[9]。此外，玉米在不同生育阶段对高温的敏感度也不同，花期高温容易导致花粉萌发数目减少[2]，灌浆期高温则可能会缩短籽粒灌浆时间，降低产量[10]。水分条件是限制玉米生长发育的另一重要因素，干旱是影响玉米产量减少的重要原因[11]。从各生育阶段来看，生育早期的干旱会导致玉米生殖器官发育

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

减慢[12]; 在生殖生长阶段, 缺水也会导致光合作用下降, 从而减少生殖器官的营养供应, 造成玉米减产[13]。干旱和高温的叠加效应对玉米危害更大。Matiu 等[14]分析了干旱和高温相互作用对全球及区域尺度作物产量的影响, 结果表明, 全球玉米生育期遭遇干旱导致产量平均下降 7.8%, 而干旱和高温复合作用下, 玉米产量将下降 11.6%。光照同样也是影响玉米生长的关键要素, 影响着玉米干物质的积累。光合作用是玉米营养物质积累的主要来源, 约占玉米干物质积累的 95%, 如抽雄吐丝阶段是玉米积累干物质的关键时期, 此阶段充足的光照是保证玉米产量的关键[15]。

中国玉米种植区域分布广泛, 经纬跨度较大, 光热资源差异明显且水资源分布不均, 不同地区的气候变化也有较大的差异。气候变化背景下, 中国玉米生育期的热量资源增加, 辐射资源减少, 降水季节变化加剧[16]。近年来, 许多学者就玉米生育期的水热条件进行了研究。马洁华等[17]对过去 50 年华北地区的水热资源研究发现, 华北地区热量增加, 大于 10 ℃积温显著增加, 但降水量呈减少趋势, 夏秋季节减少速率在 25~40 mm·(10a)$^{-1}$。杨若子等[18]指出东北地区玉米生育期内大于 10 ℃有效积温除大兴安岭地区外, 其他地区普遍增加 200~400 ℃。高晓容等[19]对东北地区不同玉米生育期的需水量进行了研究, 结果表明乳熟—成熟阶段呈现出干旱化的趋势。王曼等[20]指出近 30 年来喀什地区玉米生长季的有效积温增加显著, 2000 年之后热量资源增加最为明显。代立芹等[21]研究发现, 河北省玉米生育期内的日照时数呈现出总体减少的趋势, 日照适宜度下降; 同时, 幼苗期的温度也存在升高趋势且温度适宜度下降。尽管玉米生育期水热条件变化研究已取得一定进展, 但水热条件的变化存在区域特征, 全国尺度玉米生育期水热条件变化特征的研究还相对较少; 此外, 作物不同生育阶段对水热因子的敏感性不同, 研究不同生育阶段的水热因子变化特征也显得尤为必要。因此, 本次研究在前人研究的基础上, 将玉米分为不同的发育期, 进而对各个发育期的热力因子[平均温度(T_{mean})、生长度日(GDD)、高温度日(KDD)、日照时数(SD)]和水分因子[有效降水(P_e)、灌溉需水量(IR)]的时空变化特征进行探究, 以期为制定有针对性的气候变化适应措施, 提高我国玉米产量和保障产量的稳定性提供理论依据。

1　数据来源及研究方法

1.1　数据来源

全国范围玉米种植区域分布图来自于 MIRCA2000[22]数据集, 并按照《中国综合农业区划》将中国地区分为九大农业种植区[23](图 1)。日最高温度、最低温度和平均温度、日降水量、日照时数、风速、相对湿度等气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn), 共选取了玉米种植区内均匀分布且数据完整的 422 个气象站点, 时间跨度为 1960—2018 年。玉米物候资料来自于中国气象数据网提供的中国农作物生长发育数据集, 其中包含 292 个农气站观测的玉米生长发育日期, 同时参考统计年鉴和论文资料得到[24]。

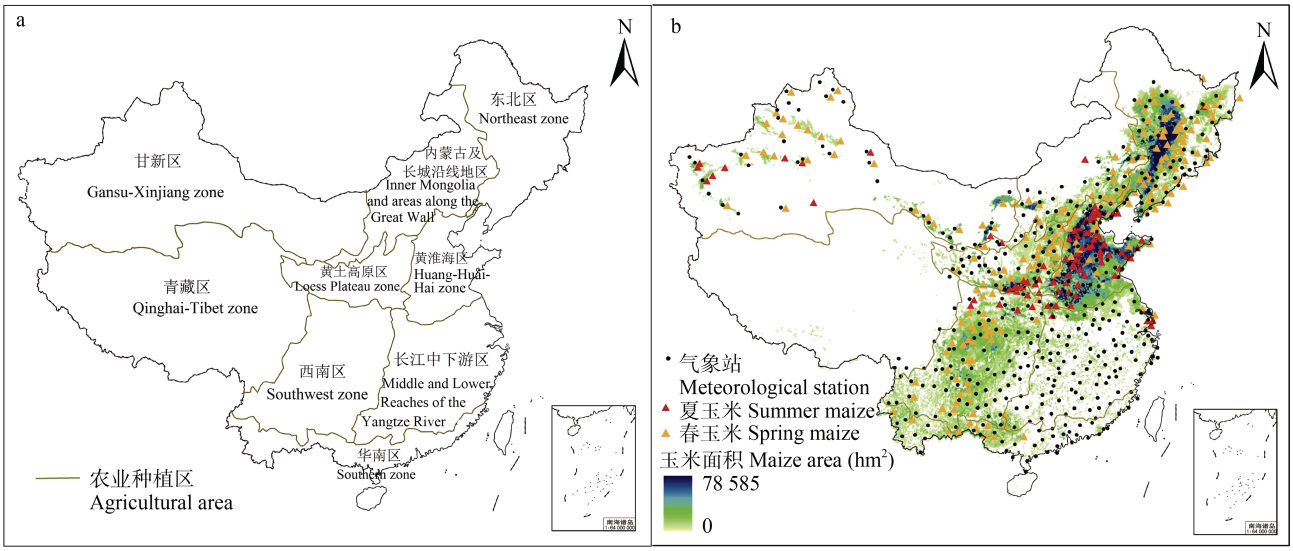

图 1　中国九大农业种植区**(a)**和玉米种植面积、气象和农业站点**(b)**分布

Fig. 1　Distribution of nine agricultural planting areas (a) and maize planting areas, meteorological and agricultural observation stations (b) in China

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2 研究方法

1.2.1 玉米生育期划分

结合中国气象局农业观测站的观测数据、统计年鉴及论文资料, 将玉米的整个生育期划分为播种期(播种—出苗)、苗期(出苗—拔节)、穗期(拔节—抽雄)、花粒期(抽雄—成熟)4 个生育阶段, 并总结出全国尺度玉米各生育阶段的具体日期, 如表 1 所示[25-27]:

1.2.2 玉米生育期生长度日和高温度日

生长度日(growing degree days, GDD)指完成某一生育阶段所经历的有效积温, 能够很好地表征作物生育期的热量资源[28-30]。玉米适宜生长的温度范围在 9~29 ℃之间[29,31], GDD 计算如公式(1)和公式(2)所示:

$$\mathrm{GDD}=\frac{T_{\min}+T_{\max}}{2}-T_{\mathrm{low}} \tag{1}$$

$$T_{\max}=\begin{cases}T_{\max} & (9\leqslant T_{\max}\leqslant T_{\mathrm{high}})\\ T_{\mathrm{high}} & (T_{\max}>T_{\mathrm{high}})\\ T_{\mathrm{low}} & (T_{\max}<T_{\mathrm{low}})\end{cases} \tag{2}$$

式中: $T_{\min}$ 为日最低温度, $T_{\max}$ 为日最高温度, T_{low} 为玉米生长适宜的最低温度阈值(9 ℃), T_{high} 为玉米生长适宜的最高温度(29 ℃)。

表 1 中国不同农业种植区玉米生育期划分

Table 1 Division of maize growth periods in different regions of China

农业种植区 Agricultural zone	春/夏玉米 Spring/summer maize	播种期(月-日) Sowing period (month-day)	苗期(月-日) Seedling period (month-day)	穗期(月-日) Ear period (month-day)	花粒期(月-日) Flowering to maturity period (month-day)
东北区 Northeast zone	春 Spring	04-20—05-10	05-10—06-17	06-17—07-25	07-25—09-10
内蒙古及长城沿线地区 Inner Mongolia and areas along the Great Wall	春 Spring	05-05—05-25	05-25—06-25	06-25—07-25	07-25—09-23
黄土高原地区 Loess Plateau zone	夏 Summer	06-05—06-20	06-20—07-10	07-10—08-10	08-10—09-16
	春 Spring	04-20—05-10	05-10—06-20	06-20—07-25	07-25—09-24
黄淮海地区 Huang-Huai-Hai zone	春 Spring	04-20—05-10	05-10—06-20	06-20—07-25	07-25—09-24
	夏 Summer	06-05—06-20	06-20—07-10	07-10—08-10	08-10—09-16
甘新区 Gansu-Xinjiang zone	春 Spring	04-25—05-13	05-13—06-17	06-17—07-20	07-20—09-25
	夏 Summer	06-16—07-05	07-05—08-05	08-05—09-05	09-05—10-03
西南区 Southwest zone	春 Spring	04-01—04-11	04-11—05-11	05-11—06-12	06-12—08-01
长江中下游流域地区 Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	春 Spring	03-05—03-15	03-15—05-01	05-01—06-01	06-01—07-11
华南区 Southern zone	春 Spring	02-25—03-05	03-05—04-01	04-01—05-01	05-01—06-11

当温度超过玉米生育期的适宜温度, 会对玉米的生长带来不利影响。高温度日(killing degree days, KDD)是表征作物生育期的高温灾害的热量指标[28,30], 计算公式为:

$$\mathrm{KDD}=\begin{cases}T_{\max}-T_{\mathrm{high}} & (T_{\max}>T_{\mathrm{high}})\\ 0 & (T_{\max}\leqslant T_{\mathrm{high}})\end{cases} \tag{3}$$

1.2.3 玉米生育期有效降水及灌溉需水量

有效降水(effective precipitation, P_{e})指降雨过程中能够下渗到地下, 被植物的根系所吸收的降水。本文在全国尺度计算 P_{e} 时采用美国土壤局发布的计算方法[32-34], 如公式(4)所示:

$$P_{\mathrm{e}}=\begin{cases}\dfrac{P(4.17-0.2P)}{4.17} & (P<8.3\ \mathrm{mm\cdot d^{-1}})\\ 4.17+0.1P & (P\geqslant 8.3\ \mathrm{mm\cdot d^{-1}})\end{cases} \tag{4}$$

式中: P 为日降水量(mm), P_{e} 为有效降水量(mm)。

灌溉需水量(irrigation water requirement, IR)是指作物生长过程中需依靠灌溉补充的水量[35], 能够表征作物生育期或生育阶段的缺水程度, 一般以作物需水量与有效降水的差值来表示。计算公式如下:

$$\mathrm{IR}=\begin{cases}\mathrm{ET_c}-P_{\mathrm{e}} & (\mathrm{ET_c}>P_{\mathrm{e}})\\ 0 & (\mathrm{ET_c}\leqslant P_{\mathrm{e}})\end{cases} \tag{5}$$

$\mathrm{ET_c}$ 为作物需水量($\mathrm{mm\cdot d^{-1}}$), 可根据作物系数法计算[36]:

$$\mathrm{ET_c}=\mathrm{ET_0}\times K_{\mathrm{c}} \tag{6}$$

其中: $\mathrm{ET_0}$ 是参考作物蒸发量($\mathrm{mm\cdot d^{-1}}$), 由 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式[34,37-38]计算, 见公式(7); K_{c} 指作物系数。

$$\mathrm{ET_0}=\frac{0.408\Delta(R_{\mathrm{n}}-G)+\gamma\dfrac{900}{\gamma+273}U_2(e_{\mathrm{s}}-e_{\mathrm{a}})}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \tag{7}$$

式中: R_{n} 为冠层表面净辐射($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$); G 为热通量密度($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$); Δ为饱和水气压和温度关系曲线的斜率($\mathrm{Kpa\cdot ℃^{-1}}$); T 为平均温度(℃); e_{s} 和 e_{a} 分别为饱和水汽压和实际水汽压(Kpa); γ 为湿度计常数, 一般取 0.66 $\mathrm{hPa\cdot ℃^{-1}}$; U_2 为风速($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)。

K_{c} 是作物的潜在蒸发量和参考作物蒸发量的比

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

值，受到土壤、气候、作物生长状况等多种因素的影响。玉米在标准条件(相对湿度=45%)下的作物系数分为 3 个阶段，分别为 0.3(生长初期)、1.2(生长中期)、0.6(生长后期)[36]。本文利用相对湿度和风速对玉米生育期的标准作物系数进行修正[34,36,38]，具体如公式(8)所示:

$$K_c = K_{c_{tab}} + \left[0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)\right]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (8)$$

式中: $K_{c_{tab}}$ 为标准作物系数; U_2 为平均风速，取值范围为 1~6 m·s^{-1}; RH_{min} 为日最低相对湿度，取值范围为 20%~80%; h 为生育期作物平均高度(m)。利用公式(9)计算生育期内的日 K_c 值[36]:

$$K_{ci} = K_{c\,prev} + \left(\frac{i - \sum L_{prev}}{L_{stage}}\right)(K_{c\,next} - K_{c\,prev}) \quad (9)$$

式中: i 为生长季的日数，K_{ci} 是第 i 天的作物系数，$K_{c\,prev}$ 是上一个生长阶段的作物系数，$K_{c\,next}$ 是下一个阶段的作物系数，L_{stage} 是现生育阶段的天数(d)，L_{prev} 是之前所有生育阶段的总天数(d)。

基于上述方法，对中国玉米全生育期及各生育阶段的水热因子进行了计算，并基于 Mann-kendall 趋势检验和 Sen-slope 法分析其时间变化趋势，最后利用克里金插值法对多年平均值及其变化趋势进行空间插值。

2　结果与分析

2.1　玉米生育期水热条件变化特征

全国尺度上春玉米和夏玉米的生育期开始时间及长短不同(表 1)，生育期 T_{mean} 大致分布在 13~25 ℃，其中黄淮海平原玉米生育期 T_{mean} 最高，分布在 20~25 ℃(图 2a)。1960—2018 年，全国玉米生育期的 T_{mean} 均呈现出增加的趋势，东北、甘新区和黄土高原西北部玉米生育期 T_{mean} 增加速率[0.18~0.36 ℃·(10a)$^{-1}$, P<0.05]，高于西南区玉米种植区[0.1~0.18 ℃·(10a)$^{-1}$, P<0.05]；其中，黄淮海平原西南部及西南区西南部地区呈不显著增加趋势[0~0.1 ℃·(10a)$^{-1}$]；长江中下游流域生育期 T_{mean} 增加速度较快[0.1~0.27 ℃·(10a)$^{-1}$, P<0.05 (图 2d)]。

全国尺度上，玉米生育期 GDD 为 971.3~1845.4 ℃(图 2b)。其时空分布与 T_{mean} 大体类似，黄淮海平原区 GDD 相对较高(1600 ℃以上)，东北北部、甘肃和南疆、四川及其西北部分地区的多年均值较低，为 971~1400 ℃。1960—2018 年，玉米生育期 GDD 在所有种植区都呈现为显著增加趋势(图 2e)，西北甘新区、东北北部及山西和内蒙河套和黄土高原北部地区 GDD 增加速率最快，为 23.48~41.23 ℃·(10a)$^{-1}$；长江中下游以南地区流域及西南地区生育期 GDD 增加速率大体在 5.73~23.48 ℃·(10a)$^{-1}$。

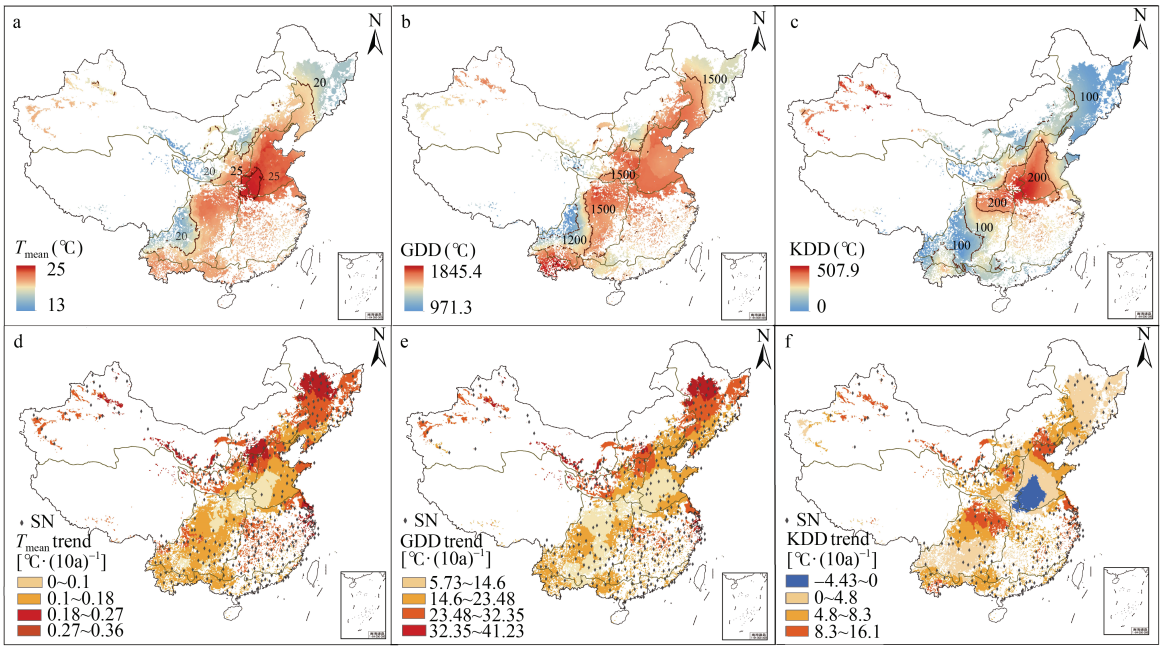

图 2　1960—2018 年玉米生育期平均温度(T_{mean})、生长度日(GDD)、高温度日(KDD)多年均值及变化趋势的空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of annual averages and trends of mean temperature (T_{mean}), growing degree days (GDD), killing degree days (KDD) during growth period of maize from 1960 to 2018

a-c 为各因子多年均值图，图中棕色线为各因子等值线; d-f为各因子多年变化趋势图，其中 SN 代表通过显著性检验的站点(P<0.05)。Figure a-c are maps of annual means of indicators, in which the brown line is contour line. Figure d-f are maps of trends of indicators, in which SN indicates significant changes (P<0.05).

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

玉米生育期 KDD 主要分布在黄淮海平原、黄土高原西南部和甘新区西部地区，多年均值约为 200~508 ℃。1960—2018 年，KDD 除在华北中南部地区黄淮海平原西南部呈不显著下降趋势之外，其他玉米种植区域均呈现出增加的趋势(图 2f)。

玉米生育期多年 SD 由东南到西北逐渐增加(图 3a)，甘新区、内蒙、黄土高原北部及东北地区 SD 值高，多年平均 SD 为 1000~1624 h；黄淮海平原区 SD 为 600~800 h，长江中下游以南地区及西南地区玉米生育期 SD 为 400~800 h。1960—2018 年，除甘新区中部和西南区西南部地区之外，其余地区 SD 均呈减少趋势(图 3d)；其中，黄淮海平原区玉米生育期 SD 减少趋势最大，变化幅度为 49.2~28.2 h·(10a)$^{-1}$，其次是东北地区，减少速率约 49.2~10.9 h·(10a)$^{-1}$；甘新区西部地区及南部地区减少速率相对较小。

玉米生育期多年平均 P_e 由西北到东南逐渐增加，整体上，黄淮海平原、黄土高原及东北西部地区玉米生育期 P_e 在 200 mm 以下；甘新区及内蒙河套地区由于降水量较少，生育期 P_e 在 100 mm 之下(图 3b)。1960—2018 年，玉米生育期 P_e 在西北干旱半干旱区呈现出增加趋势，增加速率为 0~3.4 mm·(10a)$^{-1}$；其余地区都呈现出减少的趋势，其中，环渤海地区减少趋势最为明显，多年趋势为−5.87~−3.22 mm·(10a)$^{-1}$(图 3e)。总体上，玉米种植区生育期 P_e 变化趋势并不显著。玉米生育期的多年平均 IR 高值区分布在甘新区、内蒙、黄土高原东北部及东北西北部(300~500 mm)，华北东部地区生育期多年平均 IR 在 200 mm 以下(图 3c)。1960—2018 年，甘新区西部、长江中下游和黄淮海南部地区玉米生育期 IR 呈现不显著减少趋势，其余地区为不显著增加趋势(图 3f)。

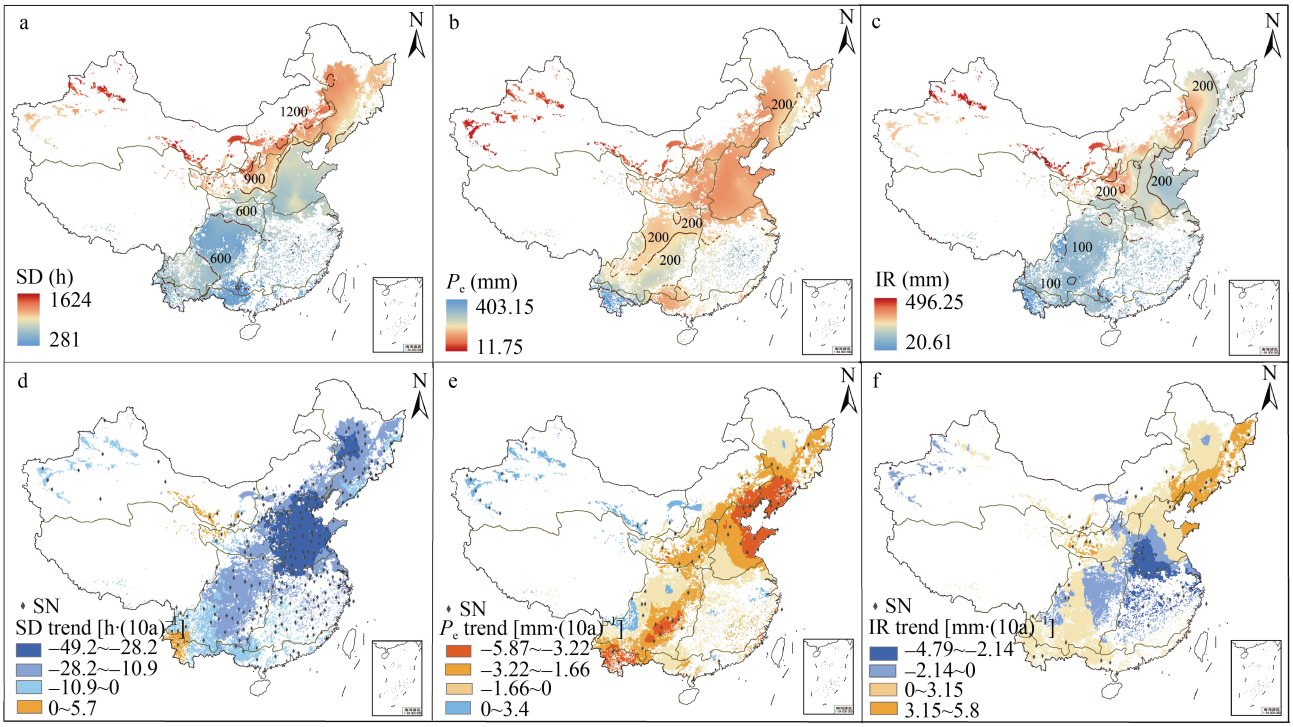

图 3　1960—2018 年玉米生育期日照时数(SD)、有效降水(P_e)、灌溉需水量(IR)多年均值及变化趋势空间分布

Fig. 3　Spatial distributions of annual average and trends of sunshine duration (SD), effective precipitation (P_e) and irrigation water demand (IR) during growth period of maize from 1960 to 2018

a-c 为各因子多年均值图，图中棕色线为各因子等值线；d-f为各因子多年变化趋势图，其中 SN 代表通过显著性检验的站点(P<0.05)。Figure a-c are maps of annual means of indicators, in which the brown line is contour line. Figure d-f are maps of trends of indicators, in which SN indicates significant changes (P<0.05).

2.2　玉米各生育阶段水热条件时空变化特征

2.2.1　GDD 时空变化特征

全国尺度上，玉米种植区各生育阶段的开始日期及持续时间存在显著差异(表 1)，因此，从播种期到花粒期 GDD 分布存在显著的空间差异(图 4)。播种期，GDD 高值区主要集中在黄淮海和甘新区西部地区，多年平均值为 150~280 ℃；苗期除黄淮海和甘新区西部地区 GDD 较高外，东北地区 GDD 增加迅速；穗期 GDD 较高的地区集中在黄淮海平原南部、西南区及长江中下游流域，多年平均 GDD 为 400~670 ℃；花粒期除东北北部地区、甘新区东南部以及黄淮海沿海地区的 GDD 在 600 ℃以下，其余地区为 600~860 ℃。全国尺度上，1960—2018 年 GDD 在各生育阶段均呈现出显著增加趋势且在不同玉米

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

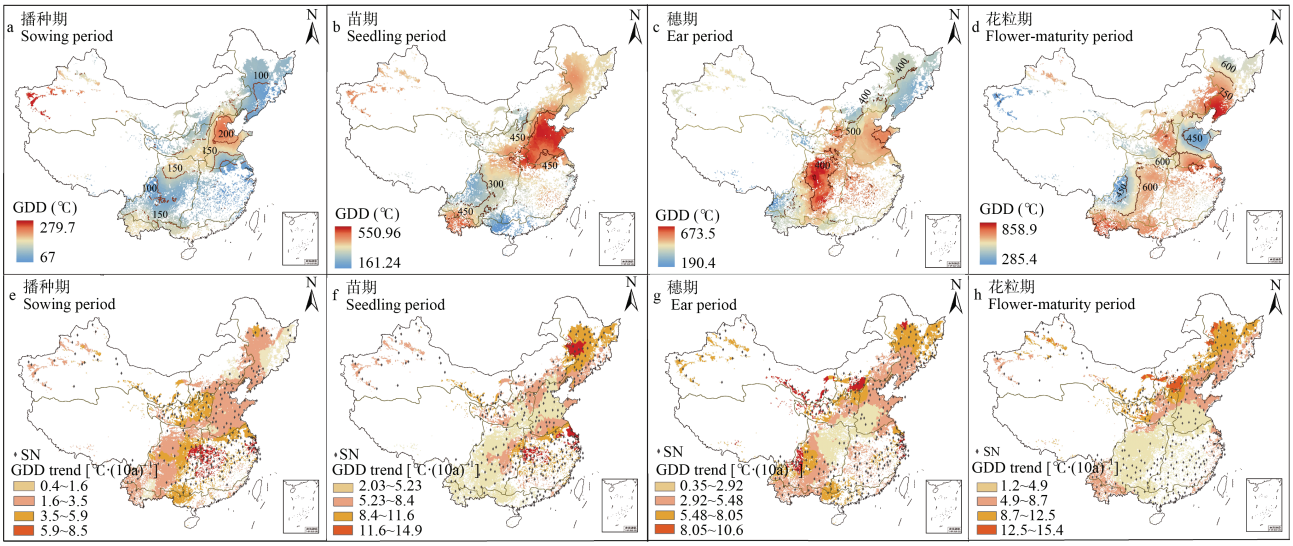

图 4　1960—2018 年玉米播种期、苗期、穗期、花粒期生长度日(GDD)多年均值及变化趋势空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of annual average and trend of growing degree days (GDD) in sowing period, seedling period, ear period and flowering to maturity period of maize from 1960 to 2018

a-d 为 GDD 多年均值图，图中棕色线为 GDD 等值线; e-h 为 GDD 多年变化趋势图，其中 SN 代表通过显著性检验的站点(P<0.05)。Figure a-d are maps of annual means of GDD, in which the brown line is contour line. Figure e-h are maps of GDD trends, in which SN indicates significant changes (P<0.05).

种植区存在显著空间差异，但东北和甘新区各生育阶段 GDD 增长趋势均大于长江中下游南部地区；其中，西南区南部地区玉米种植区 GDD 在穗期的增加趋势相对显著。

2.2.2　KDD 时空变化特征

玉米 4 个生育阶段的 KDD 时空分布特征如图 5 所示。播种期-穗期易发生高温灾害的地区集中在黄淮海平原和新疆地区，苗期 KDD 高值区则在黄淮海和新疆地区；花粒期 KDD 主要集中在东南部及长江中下游流域，多年平均 KDD 为 100~166 ℃。1960—2018 年，黄淮海平原玉米播种期 KDD 呈现不显著减少趋势，但苗期到花粒期，黄淮海、东北、内蒙及甘新区的高温天气均有增加趋势；值得注意的是，黄淮海西南部地区玉米穗期 KDD 有减少趋势；长江

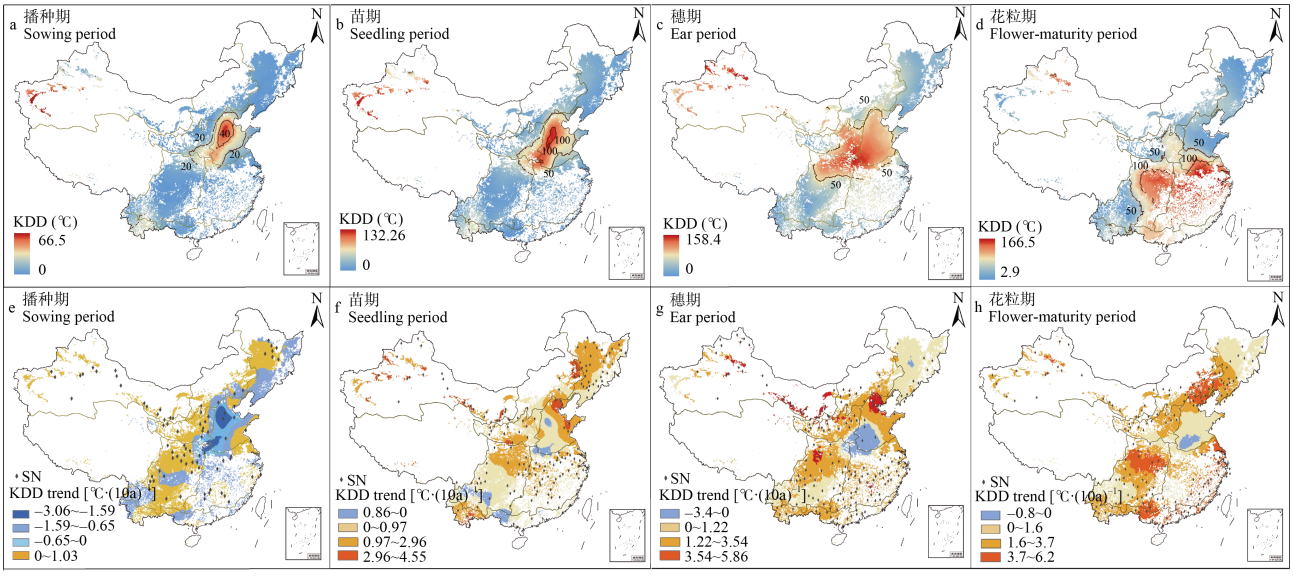

图 5　1960—2018 年玉米播种期、苗期、穗期、花粒期高温度日(KDD)多年均值及变化趋势空间分布

Fig. 5　Spatial distributions of annual average and trend of killing degree days (KDD) in sowing period, seedling period, ear period and flowering to maturity period of maize from 1960 to 2018

a-d 为 KDD 多年均值图，图中棕色线为 KDD 等值线; e-h 为 KDD 多年变化趋势图，其中 SN 代表通过显著性检验的站点(P<0.05)。Figure a-d are maps of annual means of KDD, in which the brown line is contour line. Figure e-h are maps of KDD trends, in which SN indicates significant changes (P<0.05).

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

中下游流域地区 KDD 除在播种期无明显变化趋势外，从苗期到花粒期整个阶段均呈现出增加的趋势，花粒期增加尤其明显。

2.2.3 SD 时空变化特征

整体上玉米各生育阶段，甘新区、内蒙、东北及黄淮海北部的 SD 高于其他地区(图 6)。花粒期是光照资源比较集中的时期，甘新区、内蒙、东北和黄土高原北部区的 SD 在 300~702 h 之间，黄淮海、西南及长江中下游流域则在 106~300 h 之间。1960—2018 年，各生育期的 SD 变化趋势相对一致，除甘新区东部、西南地区西南部 SD 在播种、苗期和穗期有增加趋势外，其他地区 SD 及花粒期均呈现减少趋势，尤其以黄淮海平原减少最为显著(图 6)。长江中下游流域地区 SD 在播种和苗期有增加趋势，穗期和花粒期减少趋势显著。

2.2.4 P_e 时空变化特征

从 P_e 空间分布来看，其与年降水量或生育期降水量息息相关，各生育阶段的 P_e 都呈现出自西北到东南逐渐增加的趋势(图 7)，黄淮海、甘新区、内蒙及东北西北部各生育阶段的 P_e 均相对较少。从各生育阶段 1960—2018 年 P_e 变化趋势看(图 7)，甘新区 P_e 在各生育阶段呈现出不显著增加趋势；东北地区 P_e 在玉米生育前期，即播种期、苗期为增加趋势，在穗期和花粒期则呈现出减少的趋势；黄淮海平原区的 P_e 从苗期到花粒期均呈现不显著减少趋势；长江中下游流域 P_e 在整个生育阶段都较高，在播种期和苗期都呈现出不显著减少，穗期和花粒期在整体上呈现为增加趋势。

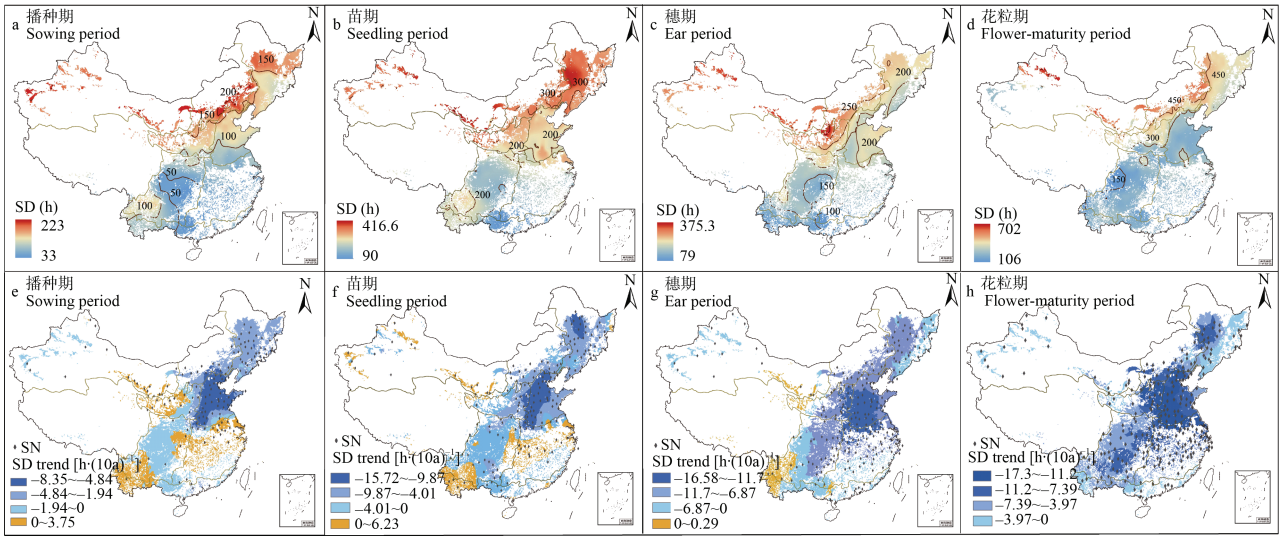

图 6 1960—2018 年玉米播种期、苗期、穗期、花粒期光照时数(SD)多年均值及变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of annual average and trend of sunshine duration (SD) in sowing period, seedling period, ear period and flowering to maturity period of maize from 1960 to 2018

a-d 为 SD 多年均值图，图中棕色线为 SD 等值线; e-h 为 SD 多年变化趋势图，其中 SN 代表通过显著性检验的站点(P<0.05)。Figure a-d are maps of annual means of SD, in which the brown line is contour line. Figure e-h are maps of SD trends, in which SN indicates significant changes (P<0.05).

2.2.5 IR 时空变化特征

中国南方地区的 IR 在玉米各生育阶段都在 50 mm 以下，基本无需灌溉；从播种期到花粒期，IR 的高值区主要分布在甘新区、内蒙、东北及黄淮海部分地区(图 8)。1960—2018 年，除甘新区东部地区之外，播种期的 IR 在中国的北方地区都呈现出减少的趋势，减少速率为 0.34~1.09 mm·(10a)$^{-1}$；苗期南疆、东北北部、黄土高原区、西南西部地区和长江中下游与华南交接处呈现出不显著减少的趋势，在其他地区则为增加趋势，其中黄淮海东部地区 IR 增加趋势显著，速率为 1.38~3.08 mm·(10a)$^{-1}$；东北地区、甘新区东部、内蒙以及西南部分地区的穗期 IR 呈现出显著增加的趋势，速率在 0~3.07 mm·(10a)$^{-1}$，其他地区则为减少趋势；花粒期的 IR 在长江中下游流域地区为减少趋势，其他地区为增加趋势。

3 讨论

平均温度和有效积温不仅是衡量作物种植区热量资源的指标，也是影响作物各生育阶段环境适宜性的重要指标。气候变化导致的水热条件时空差异给中国的玉米生产带来不同的影响。1960—2018 年中国玉米种植区生育期 T_{mean} 空间差异较为明显；T_{mean} 和 GDD 在整个种植区都呈现出增加趋势，且东北和甘新区增幅大于长江中下游流域；各生育期

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

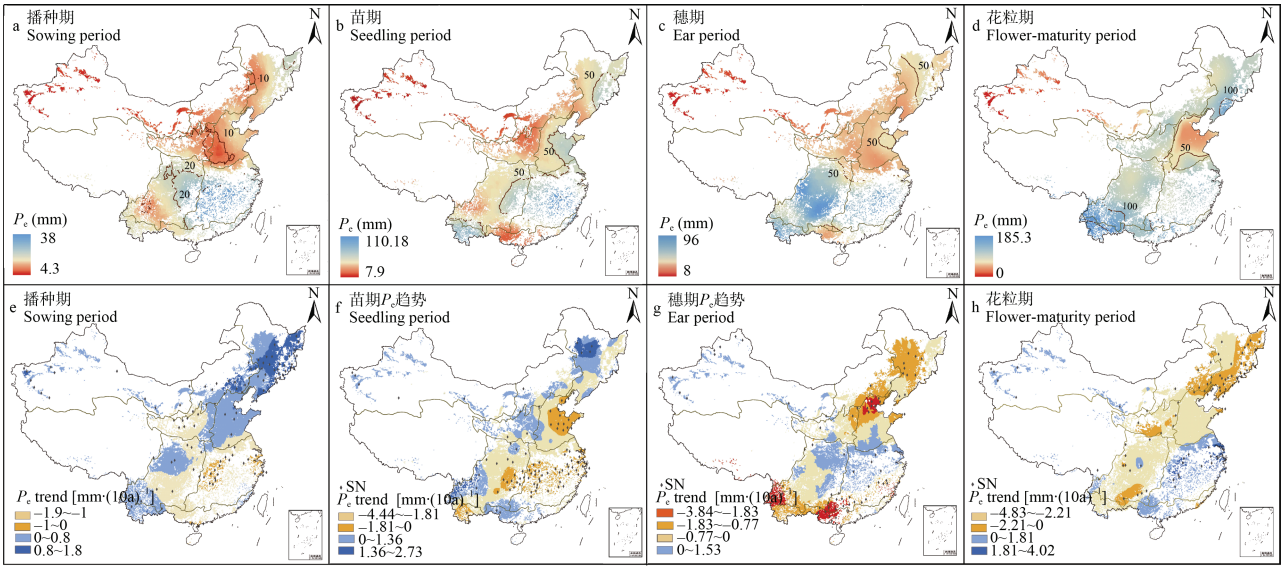

图 7　1960—2018 年玉米播种期、苗期、穗期、花粒期有效降水(P_e)多年均值及变化趋势空间分布

Fig. 7　Spatial distributions of annual average and trend of effective precipitation (P_e) in sowing period, seedling period, ear period and flowering to maturity period of maize from 1960 to 2018

a-d 为 P_e 多年均值图，图中棕色线为 P_e 等值线; e-h 为 P_e 多年变化趋势图，其中 SN 代表通过显著性检验的站点(P<0.05)。Figure a-d are maps of annual means of P_e, in which the brown line is contour line. Figure e-h are maps of P_e trends, in which SN indicates significant changes (P<0.05).

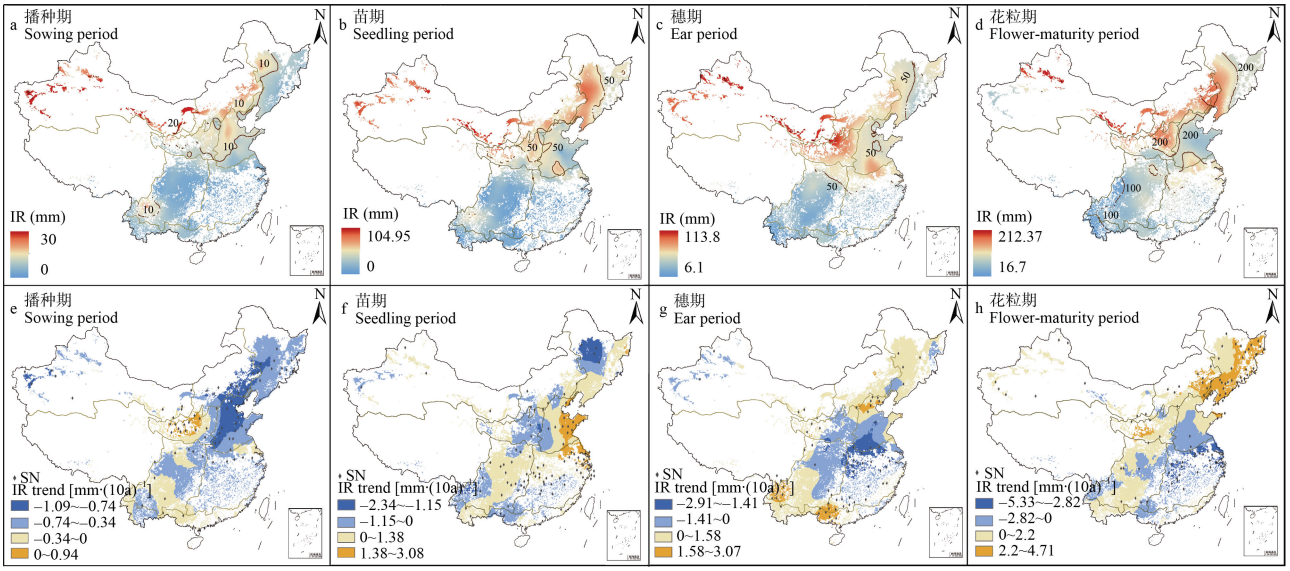

图 8　1960—2018 年玉米播种期、苗期、穗期、花粒期灌溉需水量(IR)多年均值及变化趋势空间分布

Fig. 8　Spatial distributions of annual average and trend of irrigation water demand (IR) in sowing period, seedling period, ear period and flowering to maturity period of maize from 1960 to 2018

a-d 为 IR 多年均值图，图中棕色线为 IR 等值线; e-h 为 IR 多年变化趋势图，其中 SN 代表通过显著性检验的站点(P<0.05)。Figure a-d are maps of annual means of IR, in which the brown line is contour line. Figure e-h are maps of IR trends, in which SN indicates significant changes (P<0.05).

的 T_{mean} 及 GDD 也表现为增加的趋势，苗期的增长速率最快。上述热量资源的变化可能会改变中国玉米种植区的适宜播种期、玉米生育期并影响产量。研究发现，T_{mean} 和 GDD 的增加导致的热量条件变化可能会促使玉米种植区北移或生育期提前[17,39-41]，农业活动需要综合考虑气候变化对作物系统的影响。Zhang 等[42]研究指出 GDD 增加对玉米生长有利，以美国为例，GDD 每增加 100 ℃，产量提升 20%；中国地区 T_{mean} 和 GDD 的增加可能会促进玉米种植及产量增加，但还需特别注意玉米生育期极端高温或干热复合效应的发生，避免或减缓农业灾害对玉米产量的影响[31,43-44]。全生育期来看，KDD 主要分布在黄淮海平原和新疆地区，这和作物熟制及自然条件密切相关；但从各生育阶段看，播种期和穗期的 KDD 仍然主要分布在黄淮海和甘新区，尤其是甘新区，各生育阶段的 KDD 均呈增加趋势，高温胁迫可

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能会对上述 KDD 主要分布区玉米生产产生负面影响。王占彪等[45]对华北地区的夏玉米水热条件分析也得到了一致结论，夏玉米生产高温风险呈增加趋势。此外，高温风险可能会造成玉米产量降低。Hawkins 等[46]研究发现，法国玉米产量随着日最高温度在 32 ℃以上的天数的增加而降低。中国玉米生育期热量资源及 KDD 变化存在空间异质性，不同地区需根据局地特点考虑适应性应对，KDD 增加会造成高温灾害的增加，如西北、华北北部和南方地区的 KDD 在花粒期的上升，可能会造成玉米提前进入成熟期从而导致减产[47]，耐高温的晚熟品种能够使玉米更好地适应高温环境，可能是应对气候和保持产量稳定的重要措施。

全国尺度上玉米生育期及各生育阶段的 SD 呈显著下降趋势，其中，黄淮海平原春夏播玉米种植区 SD 下降最为明显。从生育期来看，花粒期的 SD 减少趋势更为明显，黄淮海平原和长江中下流流域是下降趋势最为明显的地区，这与其他学者对玉米物候、光热资源研究中的结论一致[17,48-49]。SD 下降可能会导致地表净辐射减少，对作物生长及干物质积累不利[50]。花粒期是玉米积累干物质的关键时期，黄淮海平原区作为我国主要的玉米生产区，其辐射资源的显著减少对产量的负作用要大于热量资源增加带来的正作用[49]；同时，长江中下游流域玉米生育期较短，其光照资源的减少，对玉米干物质的积累更为不利。

水热条件的时空变化影响作物需水量或净灌溉需水量的时空变异性。中国玉米种植区的 P_e 和 IR 整体上呈现变化趋势并不明显，但甘新区生育期 P_e 整体表现为不显著增加趋势且 IR 呈现出减少趋势，东北、黄淮海平原区及西南地区 P_e 呈现为显著减少趋势且东北地区 IR 显著增加；西北地区湿润化趋势可能是造成西北地区 P_e 和 IR 变化的重要原因[51]。纪瑞鹏等[52]通过研究气候变化对东北地区玉米生产的影响发现，东北地区存在降水减少和干旱化的趋势。从生育阶段来看，甘新区各生育阶段 P_e 均有增加趋势，东北、黄淮海平原等地 P_e 在播期增加、穗期和花粒期显著减少而长江中下游流域则呈现相反趋势；P_e 的变化影响 IR 的空间变化，东北地区 IR 在穗期和花粒期均有显著增加趋势，东北及黄淮海平原区播种期 IR 下降趋势明显。不同地区 P_e 和 IR 的差异变化对玉米生产造成不同的影响，如东北地区和黄土高原北部的 IR 在生育后期增加，与同时段高温胁迫结合，会加大玉米生育后期的干旱风险或增加灌溉水需求，针对作物关键生育阶段优化灌溉来减缓干旱的不利影响是保证粮食安全和进行农业水资源管理的有效途径[53]，但也有研究表明，平原区水资源承载力已难以可持续地维持农业灌溉[54]，还需要从耐高温和耐旱的品种资源培育方面进行突破[41]。黄淮海平原区玉米各生育阶段 IR 差异并不显著，夏玉米种植区雨热同期，灌溉活动需要根据春/夏玉米熟制及降雨年型来决定，一般情况下无需灌溉[35]。西北地区玉米生育前期 P_e 增加、IR 减少，但由于干旱区本身降雨较少，虽然生育后期 P_e 也呈现增加趋势，但并不能抵消温度升高所带来的耗水增加的影响，导致生育后期 IR 的增加，灌溉是维持玉米生产的关键手段。中国东南部地区在玉米生育后期雨热同期，对玉米的生长极为有利，但需注意玉米生育期的洪涝灾害。

本研究对全国不同玉米种植区生育期平均温度、生长度日、高温度日、日照时数、有效降水及灌溉需水量的时空变化特征进行了分析，并着重分析了玉米播种期、苗期、穗期和花粒期水热条件的时空变化特征，但受全国尺度空间异质性的影响，也存在一定不确定性，其次气候变化背景下，各地区的生育期也存在着提前或者推迟的现象，本研究利用其多年均值进行分析，存在一定的局限性，这也是以后需要进一步探讨的方向。另外作物系数的确定受众多条件的影响，研究中虽对作物系数进行了纠正，但并未考虑土壤质地因素的影响；此外，全国尺度玉米生育期的气候条件变化多样，区域性差异明显，如何有针对性地采取不同措施去更好地利用水热条件、削弱气候变化带来的不良影响还需要进一步研究。

4 结论

1)1960—2018 年中国玉米种植区生育期的热量资源不断增加，其中平均温度(T_{mean})和生长度日(GDD)都呈现增加趋势，北方增幅大于南方，各生育阶段中苗期的增长速率最快。高温度日(KDD)主要分布在黄淮海平原和新疆地区，在播种期和穗期的值较高，且表现为增加趋势，尤其是甘新区，各生育阶段均呈增加趋势。

2)全国尺度上玉米生育期及各生育阶段的光照资源呈显著下降趋势，黄淮海平原春夏播玉米种植区日照时数(SD)下降最为明显；各生育期中，花粒期的 SD 减少趋势最为明显。

3)玉米种植区的水资源变化趋势并不明显，但

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是具有明显的地区差异。其中甘新区在各生育阶段有效降水(P_e)为不显著增加趋势且灌溉需水量(IR)呈现出减少趋势; 东北、黄淮海平原区及西南地区 P_e 在播期增加、穗期和花粒期显著减少而长江中下游流域的变化趋势则相反; 东北地区 IR 在穗期和花粒期均显著增加, 东北及黄淮海平原播种期 IR 下降趋势明显。

参考文献 References

[1] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011, 333(6042): 616–620

[2] GOURDJI S M, SIBLEY A M, LOBELL D B. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(2): 024041

[3] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80–94
ZHOU G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015, 38(1): 80–94

[4] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 905–910
LIU Y S, LIU Y, GUO L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 905–910

[5] 赵久然, 王荣焕. 中国玉米生产发展历程、存在问题及对策[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(3): 1–6
ZHAO J R, WANG R H. Development process, problem and countermeasure of maize production in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(3): 1–6

[6] DERYNG D, CONWAY D, RAMANKUTTY N, et al. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(3): 034011

[7] IIZUMI T, FURUYA J, SHEN Z H, et al. Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 7800

[8] TEBALDI C, LOBELL D. Estimated impacts of emission reductions on wheat and maize crops[J]. Climatic Change, 2018, 146(3/4): 533–545

[9] LOBELL D B, FIELD C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. Environmental Research Letters, 2007, 2(1): 014002

[10] CEGLAR A, TORETI A, PRODHOMME C, et al. Land-surface initialisation improves seasonal climate prediction skill for maize yield forecast[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1322

[11] ZIPPER S C, QIU J X, KUCHARIK C J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(9): 094021

[12] BARNABÁS B, JÄGER K, FEHÉR A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals[J]. Plant, Cell & Environment, 2008, 31(1): 11–38

[13] 郝卫平. 干旱复水对玉米水分利用效率及补偿效应影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013
HAO W P. Influence of water stress and rewatering on maize WUE and compensation effects[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013

[14] MATIU M, ANKERST D P, MENZEL A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961−2014[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0178339

[15] 张吉旺. 光温胁迫对玉米产量和品质及其生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005
ZHANG J W. Effects of light and temperature stress on physiological characteristics of yield and quality in maize (*Zea mays* L.)[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2005

[16] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1–11
GUO J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 1–11

[17] 马洁华, 刘园, 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): 3818–3827
MA J H, LIU Y, YANG X G, et al. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3818–3827

[18] 杨若子, 周广胜. 1961—2013 年东北三省玉米低温冷害强度的时空分布特征[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4386–4394
YANG R Z, ZHOU G S. Spatio-temporal distribution of maize chilling damage intensity in the Three Provinces of Northeast China during 1961 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): 4386–4394

[19] 高晓容, 王春乙, 张继权, 等. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及旱涝时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 101–109
GAO X R, WANG C Y, ZHANG J Q, et al. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 101–109

[20] 王曼, 郭燕云, 杨彩虹, 等. 1991—2019 年喀什地区夏玉米生长季热量资源变化及其影响[J]. 新疆农业科技, 2020, (4): 8–12
WANG M, GUO Y Y, YANG C H, et al. Changes and effects of heat resources in summer maize season in Kashgar region from 1991 to 2019[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2020, (4): 8–12

[21] 代立芹, 李春强, 魏瑞江. 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(Z1): 1031–1036
DAI L Q, LI C Q, WEI R J. Climatic suitability of summer corn and its changes in Hebei Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(Z1): 1031–1036

[22] PORTMANN F T, SIEBERT S, DÖLL P. MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

a new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(1): DOI:10.1029/2008gb003435

[23] 全国农业区划委员会《中国综合农业区划》编写组. 中国综合农业区划[M]. 北京: 农业出版社, 1981
Compilation Group of China's Comprehensive Agricultural Division. China's Comprehensive Agricultural Division[M]. Beijing: Agricultural Press, 1981

[24] 郑永丹. 中国主要粮食作物生育期时空格局及其变化[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015
ZHENG Y D. Research on the spatial-temporal distribution of growth period of main grain crops and its change in China[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015

[25] 曹永强, 王怡涵, 冯兴兴, 等. 河北省夏玉米不同生育期干旱时空分析[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2020, 41(4): 1–9
CAO Y Q, WANG Y H, FENG X X, et al. Spatial and temporal analysis of drought in different growth stages of summer corn in Hebei Province[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2020, 41(4): 1–9

[26] 赵秀萍. 玉米的生育期划分及生长发育特性[J]. 养殖技术顾问, 2014, (4): 85
ZHAO X P. Classification and growth characteristics of maize grwoth stages[J]. Technical Advisor for Animal Husbandry, 2014, (4): 85

[27] 佟屏亚, 凌碧莹. 关于统一划分玉米生育期的若干建议[J]. 耕作与栽培, 1985, (4): 55–59
TONG P Y, LING B Y. Some suggestions on uniform division of maize growth stages[J]. Tillage and Cultivation, 1985, (4): 55–59

[28] TIGCHELAAR M, BATTISTI D S, NAYLOR R L, et al. Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(26): 6644–6649

[29] BUTLER E E, MUELLER N D, HUYBERS P. Peculiarly pleasant weather for US maize[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(47): 11935–11940

[30] ZHU P, ZHUANG Q L, ARCHONTOULIS S V, et al. Dissecting the nonlinear response of maize yield to high temperature stress with model-data integration[J]. Global Change Biology, 2019, 25(7): 2470–2484

[31] BUTLER E E, HUYBERS P. Variations in the sensitivity of US maize yield to extreme temperatures by region and growth phase[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(3): 034009

[32] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2367–2377
HU W, YAN C R, LI Y C, et al. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2367–2377

[33] 王卫光, 彭世彰, 孙风朝, 等. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 656–664
WANG W G, PENG S Z, SUN F C, et al. Spatiotemporal variations of rice irrigation water requirements in the mid-lower reaches of Yangtze River under changing climate[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 656–664

[34] WU D, FANG S B, LI X, et al. Spatial-temporal variation in irrigation water requirement for the winter wheat-summer maize rotation system since the 1980s on the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 214: 78–86

[35] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6–12
LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6–12

[36] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56[R]. Rome: FAO, 1998: 100–109

[37] 刘钰, Pereira L S. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26–30
LIU Y, PEREIRA L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(5): 26–30

[38] PEREIRA L S, PAREDES P, HUNSAKER D J, et al. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106466

[39] 崔耀平, 肖登攀, 刘素洁, 等. 中国夏玉米和冬小麦近年生育期变化及其与气候的关系[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 388–396
CUI Y P, XIAO D P, LIU S J, et al. Growth periods variation of summer maize and winter wheat and their correlations with hydrothermal conditions in recent years in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 388–396

[40] 王琪, 马树庆, 郭建平, 等. 温度变化对东北春玉米生长发育速率的影响[J]. 现代农业科技, 2011, (7): 46–48
WANG Q, MA S Q, GUO J P, et al. Effect of temperature change on maize growth rate in northeast China[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011, (7): 46–48

[41] MENG Q F, HOU P, LOBELL D B, et al. The benefits of recent warming for maize production in high latitude China[J]. Climatic Change, 2014, 122(1/2): 341–349

[42] ZHANG T Y, LIN X M, SASSENRATH G F. Current irrigation practices in the central United States reduce drought and extreme heat impacts for maize and soybean, but not for wheat[J]. Science of the Total Environment, 2015, 508: 331–342

[43] 王柳, 熊伟, 温小乐, 等. 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 138–146
WANG L, XIONG W, WEN X L, et al. Effect of climatic factors such as temperature, precipitation on maize production in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 138–146

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[44] FENG S F, HAO Z C, ZHANG X, et al. Probabilistic evaluation of the impact of compound dry-hot events on global maize yields[J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 1228–1234

[45] 王占彪, 王猛, 尹小刚, 等. 气候变化背景下华北平原夏玉米各生育期水热时空变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 473–481
WANG Z B, WANG M, YIN X G, et al. Spatiotemporal characteristics of heat and rainfall changes in summer maize season under climate change in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 473–481

[46] HAWKINS E, FRICKER T E, CHALLINOR A J, et al. Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s[J]. Global Change Biology, 2013, 19(3): 937–947

[47] 赵龙飞. 玉米花期高温响应的基因型差异及其生理机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012
ZHAO L F. Genotypic responses and physiological mechanisms of maize (*Zea mays* L.) to high temperature stress during flowering[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012

[48] 秦雅, 刘玉洁, 葛全胜. 气候变化背景下 1981—2010 年中国玉米物候变化时空分异[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 906–916
QIN Y, LIU Y J, GE Q S. Spatiotemporal variations in maize phenology of China under climate change from 1981 to 2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 906–916

[49] 杨鹏宇, 胡琦, 马雪晴, 等. 1961—2015 年华北平原夏玉米生长季光热资源变化及其影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(7): 431–441
YANG P Y, HU Q, MA X Q, et al. Spatiotemporal variation of heat and solar resources and its impact on summer maize in the North China Plain over the period 1961−2015[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(7): 431–441

[50] 史建国. 不同光照对夏玉米产量及其根系生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015
SHI J G. Effect of different light conditions on yield and the root characteristics of summer maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015

[51] 李亮. 气候变化条件下中国西北地区主要作物需水量时空演变及干旱指标研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
LI L. Impact of climate change on crop water requirement and drought indices in Northwest China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019

[52] 纪瑞鹏, 张玉书, 姜丽霞, 等. 气候变化对东北地区玉米生产的影响[J]. 地理研究, 2012, 31(2): 290–298
JI R P, ZHANG Y S, JIANG L X, et al. Effect of climate change on maize production in Northeast China[J]. Geographical Research, 2012, 31(2): 290–298

[53] XU H Q, TIAN Z, HE X G, et al. Future increases in irrigation water requirement challenge the water-food *Nexus* in the northeast farming region of China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 594–604

[54] 石建省, 王昭, 张兆吉, 等. 华北平原深层地下水超采程度计算与分析[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 215–220
SHI J S, WANG Z, ZHANG Z J, et al. Assessment of over-exploitation of deep groundwater in the North China Plain[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 215–220

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net