

赵秀兰,徐玲玲,张艳红,等.未来黄淮海地区夏玉米光温水资源适宜度及灾害风险演变特征[J].海洋气象学报,2023,43(3):88-103.

ZHAO Xiulan, XU Lingling, ZHANG Yanhong, et al. Evolution characteristics of future light, temperature, and water suitability and disaster risk for summer maize in Huang-Huai-Hai region[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(3): 88-103. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.09. (in Chinese)

## 未来黄淮海地区夏玉米光温水资源适宜度 及灾害风险演变特征

赵秀兰,徐玲玲,张艳红,吕厚荃

(国家气象中心,北京 100081)

**摘要:** 为探索未来气候变化对黄淮海地区农业气候资源和夏玉米气候适宜度及灾害的影响,以黄淮海地区 1981—2021 年 56 个农业气象观测站夏玉米生育期观测资料,84 个气象站逐日气象要素观测资料及中尺度区域气候模式(Regional Climate Model Version 3, RegCM3)输出的未来气候情景(Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emissions Scenarios A1B, IPCC SRES A1B)下黄淮海 2022—2100 年  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  共 897 个格点逐日气象资料为基础,分析未来黄淮海地区光温水等农业气候资源演变特征,建立黄淮海夏玉米生长发育气候适宜度模型及气候适宜度灾害指数模型,研究未来气候变化对黄淮海夏玉米气候适宜度的影响特征,预估夏玉米农业气象灾害发生风险及特点。结果表明:(1)2022—2100 年黄淮海地区夏玉米生长季热量资源呈明显增加趋势,降水资源总体为微弱上升趋势且阶段性变化明显,光照资源变化趋势不明显。(2)2022—2100 年夏玉米全生育期气候适宜度呈总体平稳略有下降波动趋势,并具有一定阶段特征和发育期差异。各生育期相比,播种出苗期气候适宜度相对最差,成熟期最好。(3)全生育期温度适宜度总体呈稳定波动下降趋势,说明未来气候明显变暖趋势对夏玉米生长总体不利;水分适宜度和光照适宜度总体稳定、变化趋势不明显,说明未来水分和光照资源对夏玉米的生长基本有利。(4)由各年代来看,2080 年代、2090 年代温度适宜度最差,2020 年代最好;2030 年代水分适宜度最差,2080 年代最好;2080 年代、2090 年代光照适宜度明显偏差,2020 年代、2030 年代明显偏好。综合来看,2061—2100 年期间夏玉米气候适宜度总体偏差,2020 年代最好。(5)抽雄吐丝期遭受高温热害风险最大,三叶至七叶期发生旱涝风险最大,播种出苗期发生寡照(连阴雨)风险最大,而成熟期发生各种农业气象灾害风险均最小。(6)2080—2098 年期间夏玉米拔节期、抽雄吐丝期、灌浆至乳熟期遭受高温热害的风险大;2031—2035 年、2046—2056 年播种出苗至拔节期发生阶段性严重旱涝灾害风险等级高。2030 年代和 2040 年代及 2026 年、2080—2093 年播种出苗期出现寡照(连阴雨)的风险较大。

**关键词:** 气候适宜度;夏玉米;黄淮海;气候变化;生育期;气候适宜度灾害指数;农业气象灾害

**中图分类号:** P467;S162.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)03-0088-16

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.009

收稿日期:2022-04-08;修回日期:2022-05-18

基金项目:科技部公益性气象行业专项(GYHY201106020);国家气象中心 2019 年现代化专项(QXXDH201917);国家气象中心 2020 年现代化专项(QXXDH202023)

第一作者简介:赵秀兰,女,博士,研究员,主要从事农业气象与气候变化等方面研究,751502742@qq.com。

## Evolution characteristics of future light, temperature, and water suitability and disaster risk for summer maize in Huang-Huai-Hai region

ZHAO Xiulan, XU Lingling, ZHANG Yanhong, LÜ Houquan

(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of future climate change on agricultural climate resources and climate suitability of summer maize and its disasters in Huang-Huai-Hai region, based on the observation data of growth period of summer maize at 56 agricultural meteorological stations and daily observation data of meteorological elements at 84 meteorological stations in Huang-Huai-Hai region from 1981 to 2021, and daily meteorological data of 897 grid points ( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) under the future climate scenario (Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emissions Scenarios A1B, IPCC SRES A1B) output by the mesoscale Regional Climate Model Version 3 (RegCM3) in Huang-Huai-Hai region from 2022 to 2100, this paper analyzes the evolution characteristics of future agricultural climate resources such as light, temperature, and water, establishes a climate suitability index model and a disaster risk index model based on climate suitability for the growth and development of summer maize, studies the effects of future climate change on the climate suitability of summer maize, and estimates the risks and characteristics of agrometeorological disaster for summer maize in Huang-Huai-Hai region. The results are as follows. (1) During the whole growth period of summer maize in Huang-Huai-Hai region from 2022 to 2100, the thermal resources show an increasing trend, the precipitation resources show a slightly upward trend with obvious periodic changes, while the solar resources show no obvious changes. (2) From 2022 to 2100, the climate suitability of summer maize in the whole growth period in Huang-Huai-Hai region shows an overall stable trend with slightly downward fluctuation, and there are periodic characteristics and differences at different growth stages. The climate suitability is the worst at sowing and seeding stage and the best at mature stage. (3) The temperature suitability in the whole growth period shows a stably downward trend with fluctuations, indicating that the increase of thermal resources in the future is generally unfavorable to the growth of summer maize. The water suitability and light suitability are generally stable without obvious changes, indicating that the water and light resources are basically favorable to summer maize in the future. (4) The temperature suitability is the worst in the 2080s and the 2090s, and the best in the 2020s; the water suitability is the worst in the 2030s and the best in the 2080s; the light suitability is poor in the 2080s and 2090s and obviously higher in the 2020s and the 2030s. On the whole, the climate suitability of summer maize from 2061 to 2100 is generally poor but the best in the 2020s. (5) The highest disaster risk for summer maize is heat damage from high temperature at tasseling and silking stage, drought and flood at 3–7 leaves stage, and sparse sunlight from continuous rain at sowing and seedling stage, while the risk of agrometeorological disasters at mature stage is the lowest. (6) From 2080 to 2098, there is a high risk of heat damage from high temperature for summer maize at jointing stage, tasseling and silking stage, and filling-milk ripening stage; in the periods of 2031–2035 and 2046–2056, there is a high risk of serious drought and flood from sowing and seeding stage to jointing stage; in the 2030s, the 2040s, 2026, and the period of 2080–2093, there is a high risk of sparse sunlight with continuous rain in the seeding stage.

**Keywords:** climate suitability; summer maize; Huang-Huai-Hai region; climate change; growth stage; disaster risk index based on climate suitability; agrometeorological disaster

## 引言

黄淮海地区是我国重要粮食生产基地,也是夏玉米最大集中产地,夏玉米关键生长阶段正值炎热多雨季节,农业气候资源较为丰富<sup>[1]</sup>。在全球气候变化背景下,近几十年我国呈现出区域性显著气候变暖以及极端降水和北方干旱多发等特征<sup>[2-3]</sup>,对农业气候资源及粮食生产产生了不同的利弊影响<sup>[4-5]</sup>。其中,黄淮海地区是受气候变化影响较为明显的区域之一<sup>[6-9]</sup>。近几十年,由于热量资源增加和作物适宜生长期延长,部分作物的适宜种植区域有扩大趋势;由水分条件来看,黄淮海地区夏季降水受多因素影响,发生明显年代际变化,近些年部分地区降水出现阶段性异常变化,使作物生长季阶段性干旱有增加趋势,对作物生长有不利影响。

近几十年黄淮海地区夏玉米呈现出生长季延长、积温增多、光照减少、降水变异大等特征<sup>[10-12]</sup>,并且伴随着农业气候资源的变化,夏玉米气候适宜度也呈现不同变化特征。已有研究表明,夏玉米全生育期区域平均气温适宜度基本持平,降水适宜度波动较大、规律不明显,日照适宜度呈明显下降趋势,其中幼苗和灌浆期气候适宜度下降趋势相对明显<sup>[13-14]</sup>。针对黄淮海西部的研究表明,1981—2011年夏玉米生育期光热资源较适宜,能满足玉米生长所需,降水是影响夏玉米产量形成的主要限制因子,且降水适宜度年际变化幅度大于日照和温度;综合气候适宜度年际波动以抽雄—乳熟期最大、稳定性较差,出苗—抽雄期相对较小、稳定性较好<sup>[15]</sup>。

气候适宜度不仅限于夏玉米农业气象条件的定量评价,还可用于发育期预报等。有研究利用气候适宜度量化夏玉米发育进程,建立了夏玉米发育期预报模型,将气候适宜度应用到生育期预报中,拓展了作物发育期预报的方法<sup>[16]</sup>。但以往学者们的研究缺少近几十年夏玉米气候适宜度与夏玉米农业气象灾害的关联性研究,气候适宜度趋势演变特征分析尚不够系统,在光温水适宜度模型生理指标和农业气象指标的系统性和精细化方面仍需要进一步改进和完善,同时多数研究也存在研究区域范围较小和观测站点数量偏少等局限。尽管已有研究将研究区域拓展到全国产区并进行了区域的适宜性量化评价和时空分析<sup>[17]</sup>,但针对年代趋势变化仅局限

于较少典型站点,而缺少使用全部观测站点的整体趋势演变分析。

伴随全球气候变化,未来几十年全球升温趋势仍然明显<sup>[18-20]</sup>,我国农业气候特征尤其是黄淮海地区生长季和农业气候资源仍将发生改变,对夏玉米生长发育和产量形成等将会产生一定影响<sup>[21-22]</sup>。研究表明,2031—2090年黄淮海地区北部呈显著变暖趋势,而年降水量和年辐射量变化不明显,冬小麦有生育期缩短、成熟提前趋势,夏玉米则有提早播种及生长季延长的趋势<sup>[23]</sup>。利用典型站点所做研究表明,1951—2100年黄淮海地区夏玉米气候适宜度总体呈下降趋势,其中2071—2100年更为明显,夏玉米拔节至抽雄期、抽雄至成熟期降水和温度适宜度的急剧下降较明显<sup>[17]</sup>。以往学者们关于未来气候变化对黄淮海地区夏玉米不同生长发育阶段气候适宜度变化趋势与演变特征等研究尚不够系统和深入,尤其缺少基于未来夏玉米气候适宜度的不同年份、不同生长阶段的干旱、渍涝灾害、连阴雨寡照、高温热害等农业气象灾害发生风险的分析预估。本文采用黄淮海地区历史气象资料、夏玉米生育期历史观测资料、区域气候模式(Regional Climate Model Version 3, RegCM3)输出的未来A1情景数据,分析2022—2100年黄淮海地区夏玉米生长季气候资源要素变化特征、不同年代和不同生育阶段气候适宜度的变化特征及农业气象灾害发生风险,可为黄淮海地区农业气候资源利用、防灾减灾、夏玉米生产管理及未来应对气候变化提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区域和数据来源

黄淮海地区主要包括山东、河南、河北中南部、北京长城以南地区、天津、江苏和安徽两省淮河以北地区(111°10′~122°43′E,32°30′~40°30′N)。

黄淮海地区1981—2021年56个农业气象观测站夏玉米生育期观测资料来自国家气象中心,1981—2021年黄淮海地区84个气象站点逐日气象观测资料来自国家气象信息中心,包括逐日温度、降水量、平均风速、平均相对湿度、辐射等资料。2022—2100年黄淮海地区897个格点(0.25°×0.25°)逐日气象资料采用国家气候中心提供的中尺度区域气候模式RegCM3在未来气候情景

(Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emissions Scenarios A1B, IPCC SRES A1B) 下的输出结果,包括逐日平均气温、最高和最低气温、降水量、辐射等格点资料,并已根据 1981—2010 年黄淮海地区 84 个气象站点逐日气象观测资料、1981—2010 年黄淮海地区 897 个格点模式输出逐日气象资料利用双线性插值方法等完成了 897 个格点插值及误差订正<sup>[24]</sup>。

## 1.2 方法

### 1.2.1 夏玉米生育期的确定

假定未来(2022—2100年)气候变化情况下黄淮海夏玉米生育期不发生变化,仍然保持 2011—2020 年的平均状况,以黄淮海地区 56 个农业气象观测站 2011—2020 年夏玉米生育期观测资料平均值作为其 2022—2100 年夏玉米生育期数据,以此为基准,通过空间插值方法<sup>[25-26]</sup>计算得到 897 个格点的 2022—2100 年平均夏玉米生育期格点数据。

### 1.2.2 气候适宜度计算方法

夏玉米光、温、水要素适宜度以及气候适宜度,是表征夏玉米生长发育阶段过程或全生育期光、温、水条件以及综合气候条件对夏玉米生长发育适宜性程度的量化指标,包括温度适宜度、水分适宜度、光照适宜度及气候适宜度,数值范围为 0~100,数值越大表明适宜程度越高,数值越小表明适宜程度越低。本文计算了黄淮海地区 897 个格点的 2022—2100 年各个生育期的各适宜度数值。夏玉米全生育期温度、水分、光照、气候适宜度均由各生育期数值平均获得;本文中黄淮海地区温度、水分、光照、气候适宜度均指黄淮海地区区域平均值,由 897 个格点的数值平均获得。

#### 1.2.2.1 温度适宜度模型

温度对夏玉米等作物生长发育适宜程度可用函数表示,夏玉米温度适宜度为公式(1)<sup>[27-28]</sup>:

$$S_{t_i} = \frac{(t_i - t_{\min}) \times (t_{\max} - t_i)^B}{(t_0 - t_{\min}) \times (t_{\max} - t_0)^B} \times 100, \quad (1)$$

其中: $B = (t_{\max} - t_0) / (t_0 - t_{\min})$ ;  $S_{t_i}$  为夏玉米某一生育期温度适宜度;  $t_i$  为该生育期日平均气温的平均值,单位:°C;  $t_{\min}$ 、 $t_{\max}$ 、 $t_0$  分别为该生育期所需的日最低温度、最高温度和最适温度,单位:°C。各生育期取值依据已有的研究结果<sup>[17]</sup>。

#### 1.2.2.2 水分适宜度模型

水分对夏玉米等作物生长发育适宜程度可用函

数表示,见公式(2):

$$S_{R_i} = \begin{cases} 100, & R_0 \leq R_i \leq 150\%R_0 \\ (R_i/R_0) \times 100, & R_i < R_0 \\ (R_0/R_i) \times 100, & R_i > 150\%R_0 \end{cases} \quad (2)$$

公式(2)中: $S_{R_i}$  为夏玉米某一生育期水分适宜度,以降水量作为判定夏玉米该生育期水分适宜程度的指标; $R_i$  为该生育期累计降水量,单位:mm;  $R_0$  为该生育期生理需水量,单位:mm,根据联合国粮食及农业组织给出的作物系数,运用实时气象资料根据彭曼公式计算而得<sup>[29]</sup>。当  $R_0 \leq R_i \leq 150\%R_0$  时,认为水分可被夏玉米基本全部吸收利用或完全被土壤储存,水分适宜度为 100; 当  $R_i < R_0$  时,水分适宜度小于 100,并随着  $R_i$  偏低幅度越大,土壤缺墒程度越重,水分适宜程度越低;  $R_i > 150\%R_0$  时,土壤状态为渍涝<sup>[30-31]</sup>,水分适宜度小于 100,并随着  $R_i$  偏高幅度越大,土壤渍涝的程度越重,水分适宜程度也越低。

#### 1.2.2.3 光照适宜度模型

光照对夏玉米生长发育的适宜程度可用函数表示,见公式(3):

$$S_{S_i} = \begin{cases} 100, & S_i \geq S_0 \\ (S_i/S_0) \times 100, & S_i < S_0 \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中: $S_{S_i}$  是夏玉米某一生育期光照适宜度; $S_i$  为夏玉米该生育期平均辐射值,单位:(MJ·m<sup>-2</sup>)·d<sup>-1</sup><sup>[32]</sup>;  $S_0$  为该生育期适宜辐射值,单位:(MJ·m<sup>-2</sup>)·d<sup>-1</sup>,即夏玉米达到适宜状态的该生育期平均辐射值。假定 2022—2100 年夏玉米各生育期所需的辐射值不发生变化,仍然保持 1991—2020 年(30 a)期间的平均状况,各生育期适宜辐射值  $S_0$  可用 30 a 气候平均值代替,即以未来气候情景(IPCC SRES A1B)下黄淮海地区 2022—2100 年 897 个格点与气象站点经纬度有交叉重合的气象观测站点各生育期 30 a 辐射值平均值为基准,通过插值获取黄淮海地区 897 个格点夏玉米各生育期适宜辐射值  $S_0$ <sup>[25-26]</sup>。

#### 1.2.2.4 气候适宜度模型

为反映光温水气象要素对夏玉米生长发育适宜程度的综合影响,夏玉米某一生育期或全生育期的综合气候适宜度可用下式计算:

$$S_{C_i} = aS_{t_i} + bS_{R_i} + cS_{S_i} \quad (4)$$

公式(4)中: $S_{C_i}$  为某一生育期或全生育期的综合气候适宜度(以下简称“气候适宜度”);  $S_{t_i}$ 、 $S_{R_i}$ 、 $S_{S_i}$  分

别为该生育期或全生育期的温度、水分、光照适宜度; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别为温度、水分、光照适宜度的权重系数。鉴于黄淮海夏玉米产区农业气候资源特征,水分是夏玉米产量形成的关键影响因子和限制因子<sup>[15]</sup>,结合农业生产实际,水分适宜度的权重系数 $b$ 取值0.4,温度和光照两个要素适宜度权重系数 $a$ 、 $c$ 均取值0.3。

#### 1.2.2.5 气候适宜度灾害指数模型

基于夏玉米某一生育期或全生育期的温度、水分、光照适宜度及气候适宜度,计算气候适宜度灾害指数,以此判定未来夏玉米农业气象灾害发生风险。基于温度、水分、光照以及气候适宜度的灾害指数可分别用公式(5)、(6)、(7)、(8)计算。

$$I_{t_i} = \frac{S_{t_i} - \overline{S_{t_i}}}{\overline{S_{t_i}}}, \quad (5)$$

$$I_{R_i} = \frac{S_{R_i} - \overline{S_{R_i}}}{\overline{S_{R_i}}}, \quad (6)$$

$$I_{S_i} = \frac{S_{S_i} - \overline{S_{S_i}}}{\overline{S_{S_i}}}, \quad (7)$$

$$I_{C_i} = \frac{S_{C_i} - \overline{S_{C_i}}}{\overline{S_{C_i}}}. \quad (8)$$

式中: $S_{t_i}$ 、 $S_{R_i}$ 、 $S_{S_i}$ 、 $S_{C_i}$ 分别为某一生育期或全生育期的温度、水分、光照适宜度及气候适宜度; $\overline{S_{t_i}}$ 、 $\overline{S_{R_i}}$ 、 $\overline{S_{S_i}}$ 、 $\overline{S_{C_i}}$ 分别为某一生育期或全生育期的温度、水分、光照适宜度及气候适宜度1991—2020年平均值; $I_{t_i}$ 、 $I_{R_i}$ 、 $I_{S_i}$ 、 $I_{C_i}$ 分别为某一生育期或全生育期的基于温度、水分、光照适宜度及气候适宜度的灾害指数,分别简称为温度、水分、光照、气候适宜度灾害指数,数值范围为-1~1,数值越高灾害风险越低,数值越低灾害风险越高。本文将数值在-1~0确定为较高到高风险等级,把2022—2100年灾害指数数值按照从高到低排序,数值最低的5 a均确定为最高风险等级。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度适宜度及高温热害风险

以积温 $t \geq 10$  °C为指标分析夏玉米生长季热量资源变化,结果表明2022—2100年黄淮海地区夏玉米生长季热量资源呈现出显著的平稳增加趋势,积

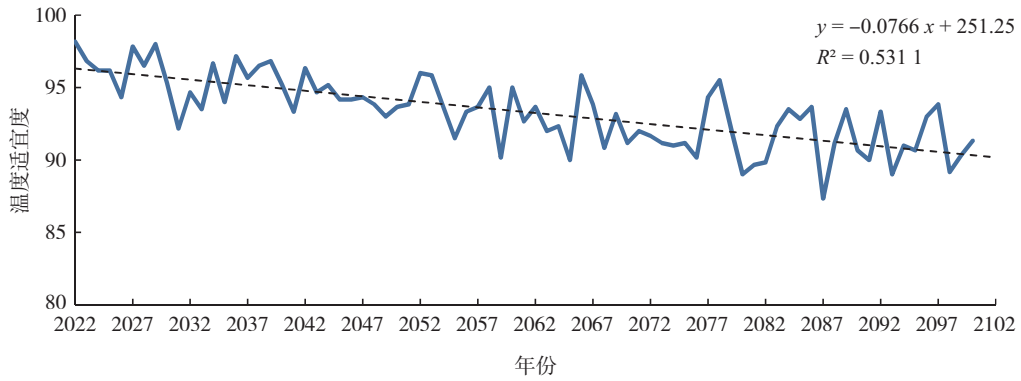
温 $t \geq 10$  °C区域平均值从21世纪20年代的3 100 °C·d波动上升至21世纪末的3 500 °C·d,其中最大值将达3 722 °C·d(2087年),比最低值2 950 °C·d(2021年)增加了772 °C·d,表明未来黄淮海地区夏玉米生长季气候呈明显变暖趋势,热量资源将更加充裕或过剩,热量过剩会导致夏玉米生长发育遭受高温热害的风险增加。

以夏玉米温度适宜度为指标分析夏玉米生长季温度条件适宜性时间变化趋势,结果表明2022—2100年黄淮海地区区域平均夏玉米全生育期温度适宜度总体呈稳定的明显波动下降趋势(图1a),同时也具有一定阶段性变化特点,其中2031—2040年有较明显波动上升阶段,其后70 a的时间尺度内多呈平稳下降趋势。2025—2040年、2050—2070年、2075—2100年期间波动相对偏大,而2022—2024年、2071—2074年期间波动较小,2045—2049年最小;决定系数 $R^2$ 相对较高,也反映了全生育期温度适宜度年际差异相对较小(图1a)。温度适宜度总体呈波动下降趋势,说明未来气候明显变暖对夏玉米的生长总体是不利的。对于不同生育期而言,虽然均呈下降趋势,但在下降幅度上存在差异。抽雄吐丝期和灌浆乳熟期等夏玉米生长关键期温度适宜度波动下降趋势明显、变幅相对较大(图1b、c),其中抽雄吐丝期最明显;其次为拔节期和成熟期,播种出苗期(图1d)、三叶至七叶期下降趋势相对较平缓,变幅相对较小,说明未来气候明显变暖对夏玉米抽雄吐丝期和灌浆乳熟期的不利影响相对于其他生育期更明显。

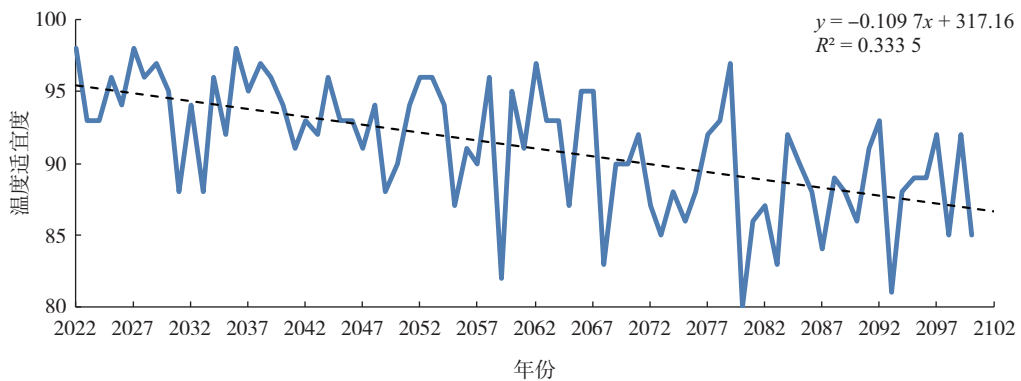
由各生育期温度适宜度各年代平均值(表1)来看,结合温度适宜度灾害指数,2020年代温度条件对玉米生长发育的适宜度最好,2071—2100年相对于前50 a明显偏差,其中2080年代、2090年代最差。2080年代和2090年代遭受高温热害的风险最高,2020年代风险最低,2080年代抽雄吐丝期和灌浆乳熟期温度适宜度灾害指数分别为-0.06、-0.04,2090年代均为-0.05,2020年代分别为0.03、0.04,说明2020年代发生高温热害风险很低,但随着未来温度的上升,超过了夏玉米生长所需适宜的温度指标,热量资源是过剩的、负面的,因此未来热量资源的增加对夏玉米生长总体不利,尤其是夏玉米开花灌浆阶段出现持续日最高气温超过35 °C高温频率

明显增大,更容易遭受高温热害影响,导致授粉结实率下降、灌浆期缩短等,从而影响产量形成。由2022—2100年温度适宜度平均值及其灾害指数平均值来看,不同生育期之间温度适宜度存在一定差异。其中,成熟期平均值达到95.9,温度适宜度灾害指数平均值也相对最高,达到0.03,温度条件为各生

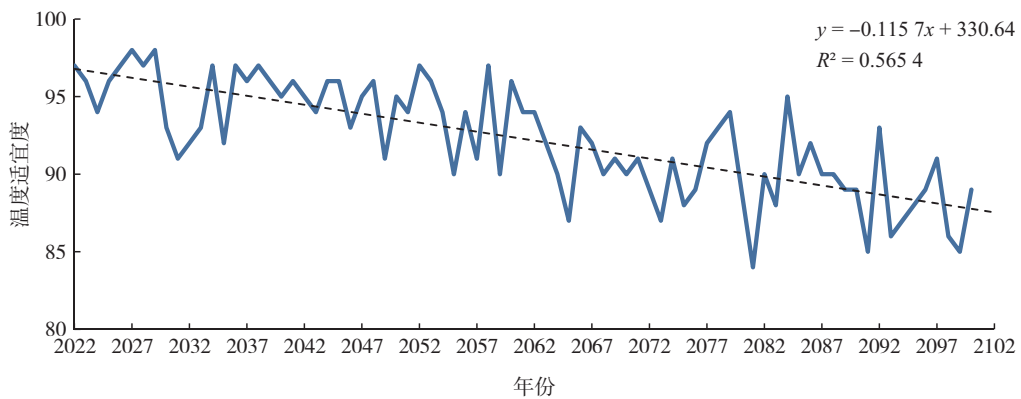
育期中最好;播种出苗期、三叶至七叶期次之;拔节期、抽雄吐丝期、灌浆乳熟期等玉米生长发育关键阶段温度适宜度相对偏低,抽雄吐丝期是所有生育期中最低的,温度适宜度灾害指数平均值也最低,说明未来热量资源增加情况下夏玉米抽雄吐丝期遭受高温热害的风险增大,影响夏玉米产量形成。



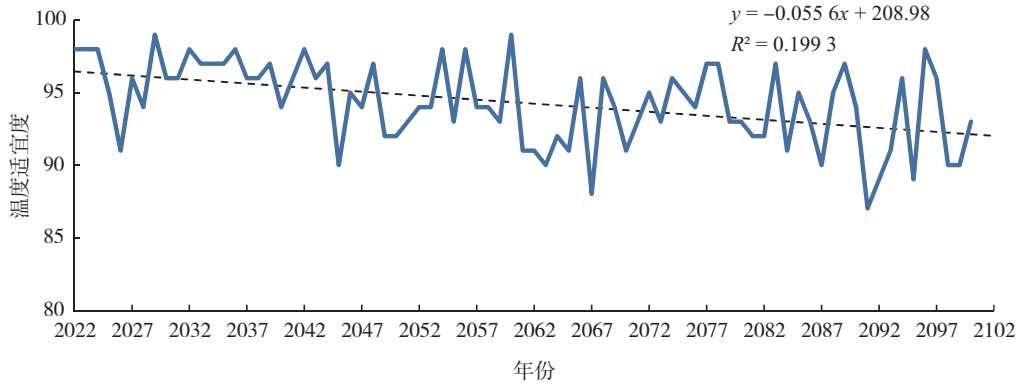
(a) 全生育期



(b) 抽雄吐丝期



(c) 灌浆乳熟期



(d) 播种出苗期

虚线—线性趋势线;公式—线性拟合方程; $R^2$ —决定系数;下同。

图1 2022—2100年夏玉米生长季各生育期温度适宜度变化趋势

Fig.1 Variation trend of temperature suitability of summer maize at different growth stages from 2022 to 2100

表1 2022—2100年各年代不同生育期夏玉米温度适宜度  
Table 1 Temperature suitability of summer maize at different growth stages in each decade from 2022 to 2100

年代	温度适宜度						
	播种出苗期	三叶至七叶期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆至乳熟期	成熟期	全生育期
2020	96.2	96.6	96.7	95.8	96.4	98.5	96.7
2030	96.6	95.1	94.1	93.8	94.6	97.2	95.2
2040	94.7	94.3	93.2	92.1	94.7	96.6	94.3
2050	95.0	94.2	91.2	92.1	93.9	96.4	93.8
2060	92.0	94.2	92.5	91.4	91.3	93.9	92.6
2070	94.6	94.0	89.6	88.8	90.3	93.6	91.8
2080	93.6	93.0	90.6	87.3	89.7	94.5	91.5
2090	91.9	93.6	91.2	88.5	87.9	93.9	91.2

由温度适宜度和温度适宜度灾害指数年代极端值来看,在2050年代之前,全生育期温度适宜度普遍

偏好、灾害风险普遍偏低;全生育期温度适宜度最差、灾害风险最高的5 a依次出现在2087年、2080年、2093年、2098年、2081年,温度适宜度灾害指数为-0.06~-0.04,说明全生育期平均来看2080—2098年遭受高温热害的风险高。由不同生育期来看,拔节期2087年、2080年温度适宜度灾害指数分别为-0.11、-0.09,抽雄吐丝期2080年、2093年、2059年、2068年、2083年、2087年灾害指数为-0.14~-0.09(图2),灌浆至乳熟期2081年、2091年、2093年、2098年灾害指数为-0.10~-0.08,说明2080—2098年夏玉米拔节、抽雄吐丝、灌浆至乳熟期遭受高温热害风险高,上述各生育期内持续出现日最高气温超过35℃高温的可能性极大,对产量形成带来一定不利影响。

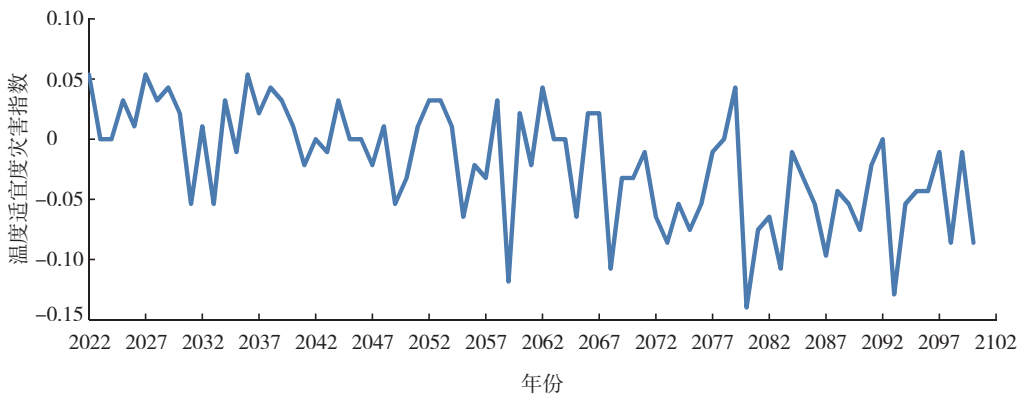


图2 2022—2100年夏玉米抽雄吐丝期温度适宜度灾害指数变化

Fig.2 Change of disaster index based on temperature suitability of summer maize at tasseling and silking stage from 2022 to 2100

2.2 水分适宜度及早涝风险

采用区域气候模式输出的2022—2100年897个

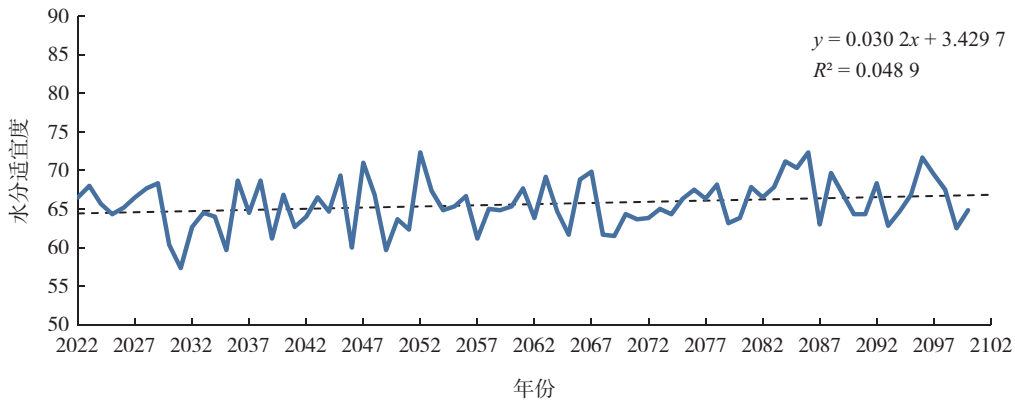
格点降水数据对黄淮海地区夏玉米生长季水分资源进行分析,发现夏玉米生长季区域平均降水量阶段性

变化明显,总体为微弱的上升趋势。其中 2022—2031 年,降水变化震荡突出,存在快速上升又快速下降的特点,该时期也是降水量年际变幅较大时期,在此期间夏玉米生长季最大降水量达760 mm(2029 年),最小降水量为 298 mm(2031 年),最小值也是 2022—2100 年最低值;2032—2100 年呈现缓慢的波动上升趋势,2098 年达到 2022—2100 年的最大值 802 mm。上述结果表明,未来黄淮海地区夏玉米生长季水分资源存在较大不稳定性,发生旱涝灾害风险较大。

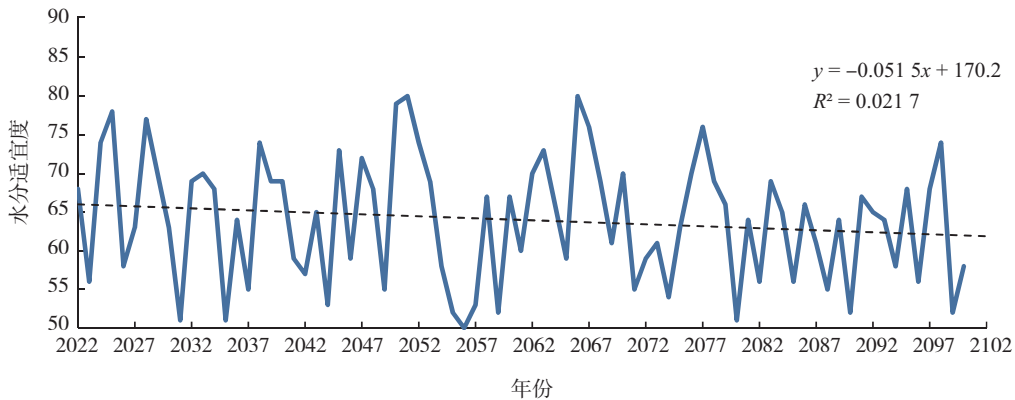
以水分适宜度为指标分析夏玉米生长季水分条件适宜性时间变化趋势,结果表明 2022—2100 年黄淮海地区区域平均夏玉米全生育期水分适宜度总体平稳、变化趋势不明显,仅后期略有上升趋势(图 3a),但也具有一定的阶段特征,存在几个小的波动。2022—2030 年、2053—2058 年、2085—2093 年为波动下降阶段,水分适宜度下降,说明发生旱涝风险上升;2031—2038 年、2049—2053 年、2058—2067 年、2070—2085 年为波动上升阶段,其中 2070—2085 年的上升阶段时间最长,达 15 a,说明该时段发生旱涝风险明显下降,水分条件对夏玉米生长发

育明显有利;决定系数  $R^2$  较低,也反映了全生育期水分适宜度年际间差异相对较大。虽然各个生育期水分适宜度变化趋势总体较平缓,但不同生育期也呈现一定差异,其中抽雄吐丝期、灌浆乳熟期无明显趋势,拔节期为平缓下降趋势(图 3b),三叶至七叶期前期平缓后期略有上升趋势(图 3c),成熟期为明显的平稳上升趋势(图 3d),播种出苗期为前期平缓略有下降、后期平缓略有上升的趋势。

由各生育期水分适宜度各年代平均值(表 2)来看,2030 年代水分条件对玉米生长发育的适宜度相对于其余 70 a 都是明显偏差的,全生育期水分适宜度灾害指数也最低,为-0.03,说明 2030 年代发生旱涝风险最高;除拔节期和抽雄吐丝期以外,其余 4 个生育期 2080 年代水分适宜度均为最高值或次高值,全生育期水分适宜度和水分适宜度灾害指数最高值也出现在 2080 年代,表明 2080 年代水分条件相对于其余 70 a 是明显最好的,发生旱涝风险最低。因此,由全生育期来看,2030 年代水分条件对夏玉米生长发育适宜度是最差的,而 2080 年代是最好的。以水分适宜度 2022—2100 年平均值及其灾害指数

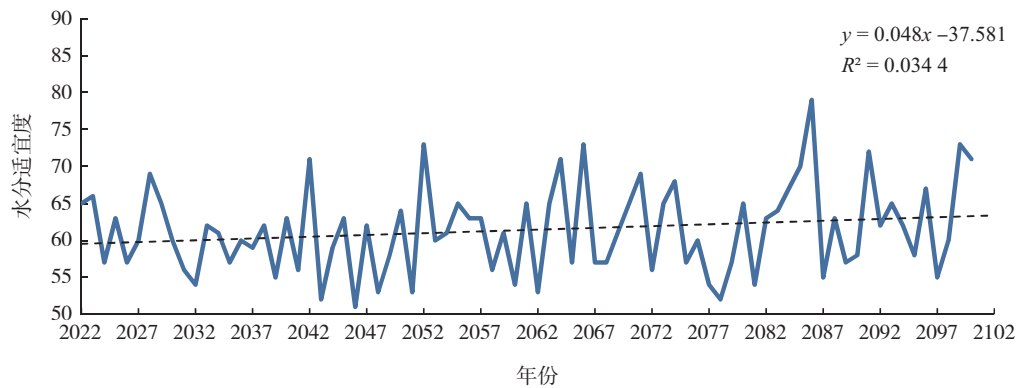


(a) 全生育期

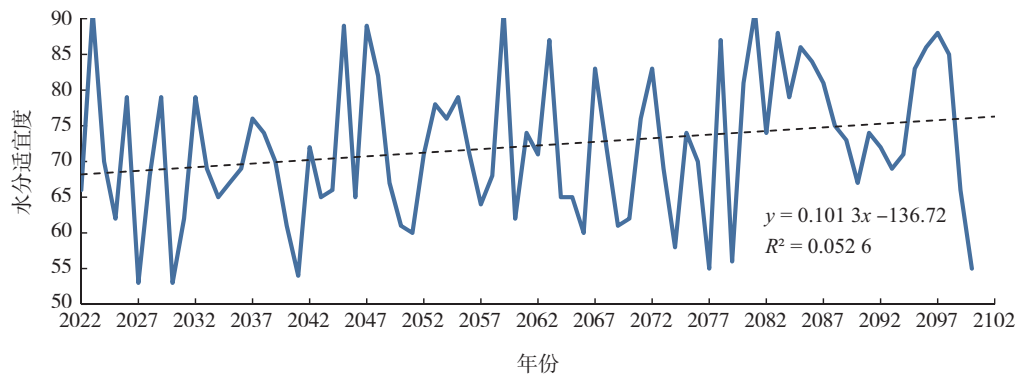


(b) 拔节期





(c) 三叶至七叶期



(d) 成熟期

图3 2022—2100年夏玉米各生育期水分适宜度变化趋势

Fig.3 The same as Fig.1, but for water suitability

平均值来看,各生育期之间存在一定差异。其中成熟期水分适宜度平均值达到72.1,水分适宜度最好,水分适宜度灾害指数也最高,平均值达到0.10,灾害风险最低,其次为灌浆乳熟期;而播种出苗期、拔节期、抽雄吐丝期水分适宜度较低,灾害指数平均值为 $-0.03 \sim -0.02$ ,说明连阴雨、暴雨洪涝及干旱灾害风险较大;三叶至七叶期平均水分适宜度及其灾害指数均最低,灾害指数平均值为 $-0.07$ (图4),说明该期间夏玉米遭受到水分胁迫类灾害的风险最大。结果表明,各个生育期相比,夏玉米成熟期发生旱涝灾害风险相对最小,三叶至七叶期发生旱涝风险最大;抽雄吐丝期发生旱涝风险较大,由于该发育期是影响产量形成的最关键时期,抽雄吐丝期较大的旱涝风险也会带来较大的产量损失风险。

由2022—2100年水分适宜度及其灾害指数极值来看,2070年代至2090年代全生育期水分适宜度普遍偏好、灾害风险普遍偏低;全生育期水分适宜度最差、灾害风险最高的5a依次出现在2031年、2035

年、2049年、2046年、2030年,水分适宜度灾害指数均为 $-0.13 \sim -0.09$ ,说明这5a发生全生育期旱涝灾害风险等级高。由各生育期来看,播种出苗期在2053年、2026年、2051年,三叶至七叶期在2046年、2043年、2078年(图4),拔节期在2056年、2031年、2035年、2080年,抽雄吐丝期在2068年、2031年,水分适宜度灾害指数均处于明显低值范围,数值为 $-0.24 \sim -0.22$ ,说明上述生育期的相应年份,尤其2031—2035年、2046—2051年播种出苗至拔节期发生阶段性严重旱涝灾害风险等级高,严重影响产量。灌浆至乳熟期及成熟期,水分适宜度数值和水分适宜度灾害指数相对较高,说明水分条件总体利于夏玉米灌浆乳熟和成熟,发生连阴雨、暴雨洪涝及干旱灾害风险明显偏低。

### 2.3 光照适宜度及寡照风险

采用区域气候模式输出的2022—2100年总太阳辐射格点数据,对黄淮海地区夏玉米生长季光照资源的时间变化趋势进行分析,发现夏玉米生长季区域平均总太阳辐射总体变化趋势不明显,但仍存

在一定的阶段性年际变化,其年际变化大致可分为3个阶段:2022—2031年为不稳定期,年际间波动较大,最大年(2031年,  $2\,942\text{ (MJ}\cdot\text{m}^{-2})\cdot\text{d}^{-1}$ )与最小年(2022年,  $2\,590\text{ (MJ}\cdot\text{m}^{-2})\cdot\text{d}^{-1}$ )相差  $352\text{ (MJ}\cdot\text{m}^{-2})\cdot\text{d}^{-1}$ ;2032—2065年为缓慢上升阶段,大部分年份总辐射在  $2\,700\text{ (MJ}\cdot\text{m}^{-2})\cdot\text{d}^{-1}$ 以上,且变化幅度有所减小;2066—2100年为迅速下降阶段,且年际波动增大。上述结果表明,黄淮海地区夏玉米生长季光照资源稳定性较差,2070年代之后出现寡照的风险增加。

表2 2022—2100年各年代不同生育期夏玉米水分适宜度

Table 2 The same as Table 1, but for water suitability

年代	水分适宜度						全生育期
	播种出苗期	三叶至七叶期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆至乳熟期	成熟期	
2020	64.4	61.9	68.4	66.3	67.8	69.5	66.4
2030	63.8	58.9	64.0	63.3	63.6	69.2	63.8
2040	60.8	58.9	64.0	63.7	70.6	71.0	64.8
2050	61.4	60.9	62.2	65.9	70.7	72.0	65.5
2060	60.1	62.4	68.4	64.6	66.4	70.0	65.3
2070	68.8	60.3	62.4	63.0	65.9	70.9	65.2
2080	69.4	63.0	60.8	63.4	71.6	79.8	68.0
2090	63.3	64.5	63.0	65.3	66.8	74.9	66.3

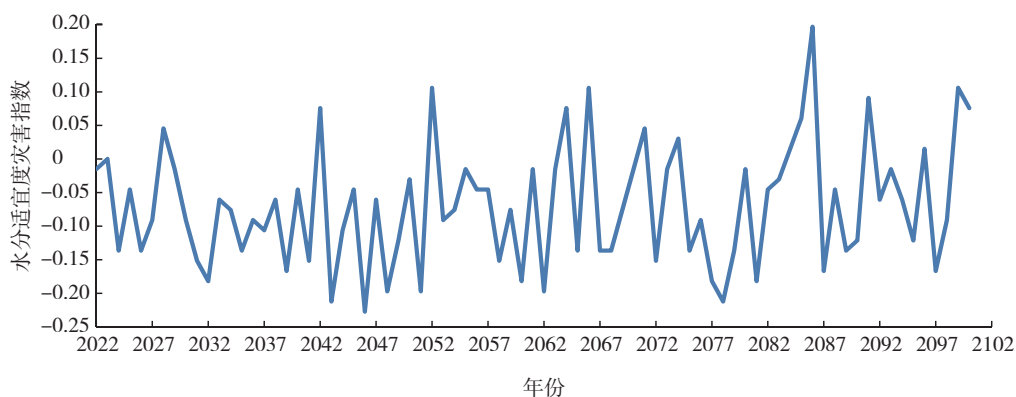


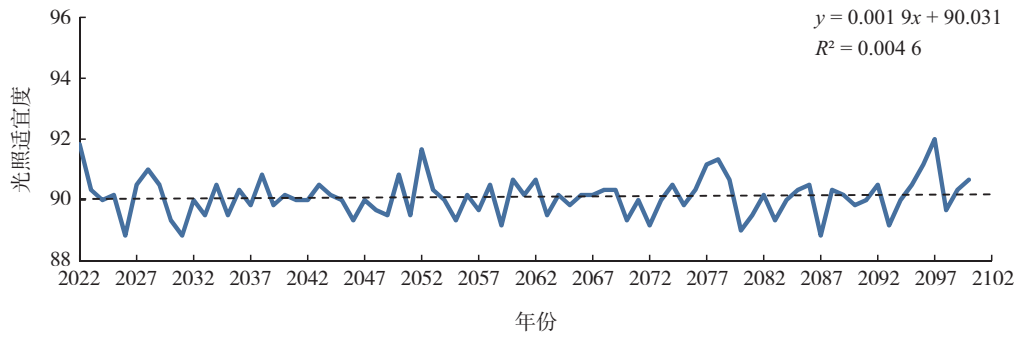
图4 2022—2100年夏玉米三叶至七叶期水分适宜度灾害指数变化

Fig.4 The same as Fig.2, but for water suitability of summer maize at 3-7 leaves stage

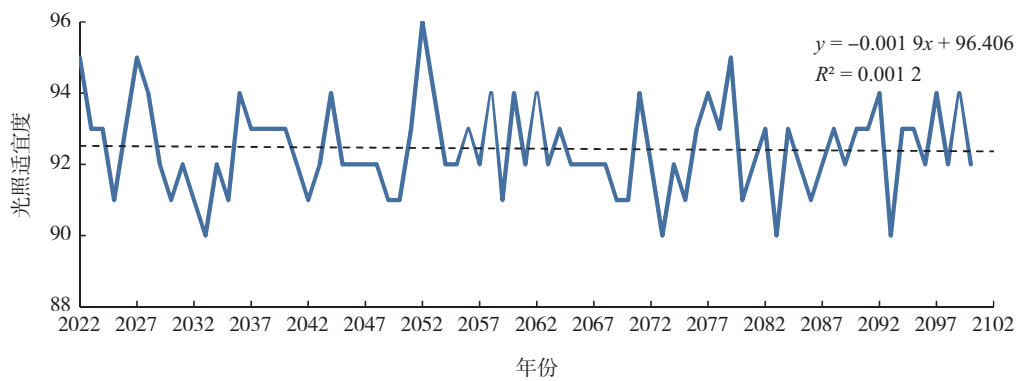
以光照适宜度为指标分析夏玉米生长季光照条件适宜性时间变化趋势,2022—2100年黄淮海地区区域平均夏玉米全生育期光照适宜度总体稳定,无明显变化趋势,期间虽也伴随一些小的波动,但波动变幅较小,光照适宜度数值为  $88.8\sim 91.8$ (图5a)。由不同生育期来看,光照适宜度时间变化趋势均较平缓、差异相对较小,其中拔节期、抽雄吐丝期(图5b)、灌浆乳熟期等产量形成关键期在2022—2100年呈现前期略有下降总体相对平缓的趋势,三叶至七叶期、成熟期则无明显变化趋势,播种出苗期呈现总体平稳末期略有上升趋势。但在变化幅度上各生育期存在较明显差异,其中成熟期变幅最小,拔节期最大。总体来看,夏玉米生长初期和中期相比于后期光照适宜度变幅大,说明夏玉米生长后期相比于初期和中期光照条件更稳定。

由不同生育期光照适宜度和光照适宜度灾害指数各年代平均值来看,全生育期、抽雄吐丝期、灌浆乳熟期、成熟期各年代差异均不明显;播种出苗期、三叶至七叶期、拔节期2080年代和2090年代最差,

而2020年代、2030年代明显最好,说明2080年代、2090年代发生寡照的风险较大,而2020年代、2030年代风险较小。以2022—2100年光照适宜度平均值及其灾害指数平均值来看,不同生育期之间光照适宜性存在一定差异。其中成熟期光照适宜度最好,光照适宜度灾害指数平均值也最高,为0.11,灾害风险最低;其次为灌浆乳熟期、抽雄吐丝期;再次为三叶至七叶期、拔节期,灾害指数平均值分别为  $-0.06$ 、 $-0.07$ (图6);播种出苗期光照适宜度及其灾害指数均最低,灾害指数平均值为  $-0.12$ 。上述结果说明,播种出苗期发生寡照的风险最高,因该生育期夏玉米播种出苗对光照需求较小,直接影响相对较小,但寡照往往伴随着连阴雨天气,阴雨天气会明显影响夏玉米顺利播种和正常出苗;其次是三叶至七叶期、拔节期发生寡照的风险较高,虽然不及播种出苗期风险高,但对幼苗光合生长及壮苗的不利影响却是较大的;夏玉米成熟期发生寡照(连阴雨)风险最低,往往多晴好天气,利于夏玉米成熟收获和晾晒归仓。



(a) 全生育期



(b) 抽雄吐丝期

图5 2022—2100年夏玉米光照适宜度变化趋势  
Fig.5 The same as Fig.1, but for light suitability

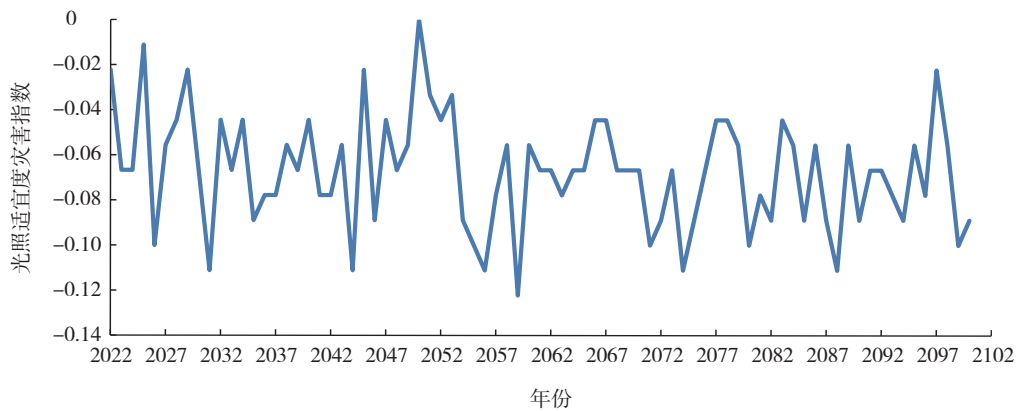


图6 2022—2100年夏玉米拔节期光照适宜度灾害指数变化  
Fig.6 The same as Fig.2, but for light suitability of summer maize at jointing stage

由2022—2100年光照适宜度和光照适宜度灾害指数极值来看,2052—2054年、2075—2079年、2094—2098年全生育期光照适宜度普遍较好,灾害风险普遍偏小。全生育期光照适宜度最差以及灾害风险最高的5 a依次为2026年、2031年、2087年、2080年、2059年,光照适宜度灾害指数普遍为-0.02~-0.01,说明上述年份夏玉米生长季出现阶段性寡照的风险最

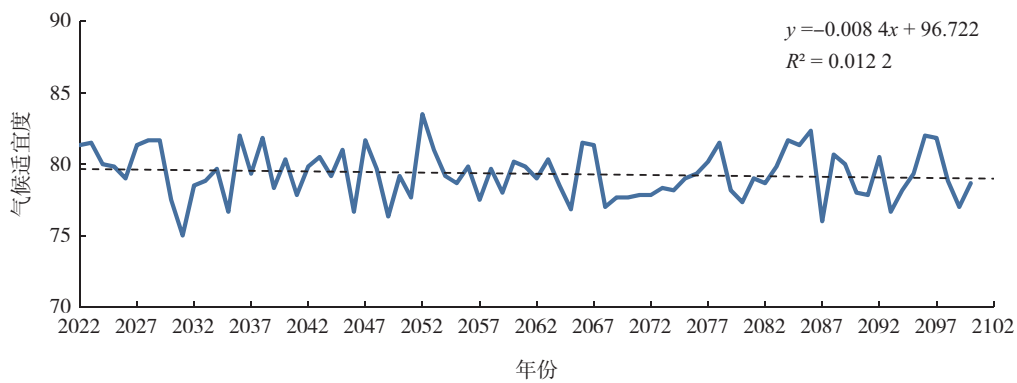
大。其中,播种出苗期光照适宜度最差的5 a依次为2051年、2026年、2030年、2039年、2049年,光照适宜度灾害指数也最低,普遍为-0.16~-0.15;三叶至七叶期在2026年、2048年、2051年,拔节期在2059年、2031年、2036年、2037年、2039年、2044年、2056年、2074年、2088年,光照适宜度灾害指数也明显偏低,普遍为-0.12~-0.06(图6),说明播种出苗至拔节期

2030年代和2040年代及2026年、2080—2093年出现寡照(连阴雨)的风险较大。2022—2100年大部分年份抽雄吐丝期、灌浆至乳熟期、成熟期,光照适宜度和灾害指数数值均普遍较高,发生寡照(连阴雨)风险低。

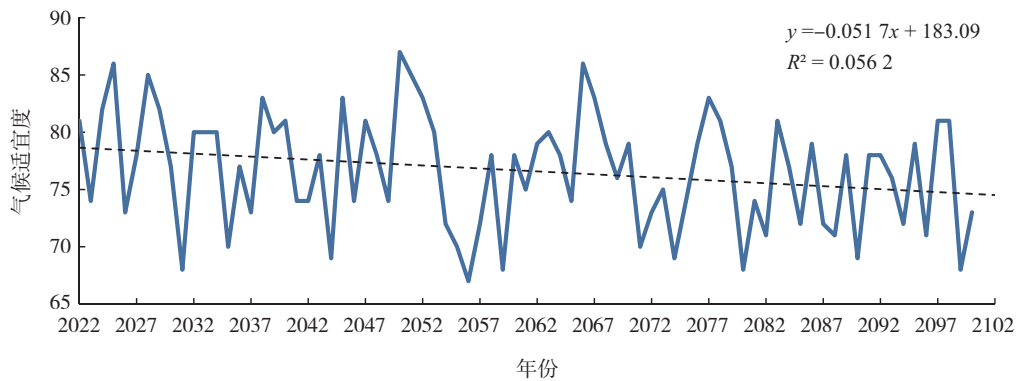
#### 2.4 气候适宜度及农业气象灾害风险

2022—2100年,黄淮海地区区域平均夏玉米全生育期气候适宜度呈现总体平稳略有下降的时间波动趋势,并具有一定的阶段特征(图7a),例如,2022—2035年为较明显波动下降阶段,2068—

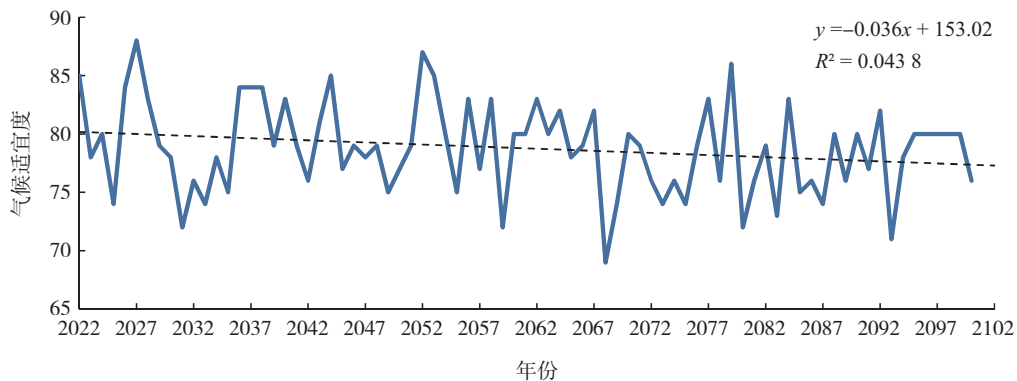
2088年为缓慢波动上升阶段,变幅普遍也相对较大,其余时间波动相对平缓、变幅相对偏小。不同生育期的气候适宜度时间变化趋势呈现一定差异性,其中拔节期、抽雄吐丝期和灌浆乳熟期时间变化趋势的一致性较好,均呈现波动下降趋势,且变幅相对较大,拔节期变幅最大(图7b、c、d);成熟期、播种出苗期、三叶至七叶期时间变化趋势均相对平缓,且相对前3个产量形成关键期变幅总体偏小,其中播种出苗期、三叶至七叶期呈现先略降后微升趋势,成熟期总体呈略有上升趋势。



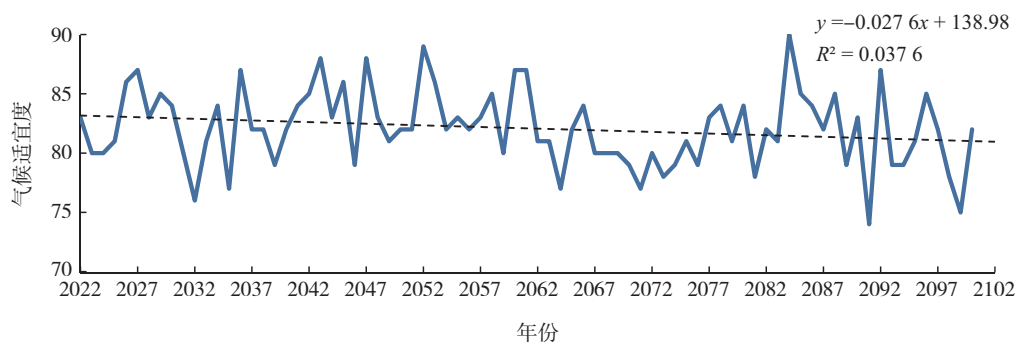
(a) 全生育期



(b) 拔节期



(c) 抽雄吐丝期



(d) 灌浆乳熟期

图7 2022—2100年夏玉米气候适宜度变化趋势

Fig.7 The same as Fig.1, but for climate suitability

由不同生育期气候适宜度及其灾害指数各年代平均值来看,播种出苗期、三叶至七叶期、拔节期、抽雄吐丝期、灌浆乳熟期和成熟期最低值分别出现在2060年代、2040年代、2080年代、2080年代、2090年代和2060年代,气候适宜度灾害指数也均为最低;全生育期气候适宜度及其灾害指数最高值均在2020年代,最低值均在2060年代、2070年代。这说明2061—2080年气候条件对夏玉米生长发育适宜度总体偏差,2020年代最好。由2022—2100年平均值来看,不同生育期之间气候适宜度存在一定差异。其中,成熟期平均气候适宜度达到85.6,适宜度最好,灾害指数平均值也最高,其次为灌浆乳熟期,再次为抽雄吐丝期,三叶至七叶期、拔节期再次之,播种出苗期适宜度相对最低,平均气候适宜度为75.8,灾害指数平均值也最低,为-0.04(图8)。上述结果表明,在各个生育期中,夏玉米播种出苗期气候条件适宜度相对最差,发生高温热害、旱涝或连阴雨寡照等农业气象灾害的风险最大,不利于前茬作物成熟收获、腾茬整地和夏玉米播种出苗,不能适时播种的风险高;成熟期气候条件的适宜度相对最好,农业气象灾害发生风险明显偏小,利于夏玉米正常成熟和收获晾晒。三叶至七叶期、拔节期虽然不及播种出苗期农业气象灾害风险高,但该期间发生高温热害、旱涝或连阴雨寡照等灾害对作物幼苗生长及后期产量的影响是较大的。虽然由平均情况来看,抽雄吐丝期发生灾害的风险明显不如三叶至七叶期、拔节期、播种出苗期高,但该时期正值产量形

成敏感期和关键期,一旦发生农业气象灾害,对产量的影响更严重。

由2022—2100年气候适宜度及其灾害指数极值来看,2027—2029年、2054—2055年、2082—2086年等时段全生育期气候适宜度普遍偏好,灾害风险普遍偏低;全生育期气候适宜度最差的5a依次出现在2031年、2087年、2049年、2035年、2046年,气候适宜度灾害指数也是依次最低的,数值为-0.04~-0.02,说明上述年份生长季发生农业气象灾害的风险大。其中,播种出苗期最差的5a依次为2026年、2051年、2098年、2049年、2053年,气候适宜度数值均低于69.0,气候适宜度灾害指数为-0.13~-0.11(图8);拔节期最差的5a依次为2056年、2031年、2059年、2080年、2099年,气候适宜度灾害指数为-0.14~-0.12;三叶至七叶期最差的5a依次为2048年、2087年、2051年、2032年、2041年,气候适宜度灾害指数为-0.09~-0.06;抽雄吐丝期最差的5a依次为2068年、2093年、2031年、2059年、2080年,气候适宜度灾害指数为-0.11~-0.08;灌浆至乳熟期、成熟期最差的5a气候适宜度及其灾害指数数值相对于其他发育期均偏高明显,发生农业气象灾害的风险偏小。这说明2026年、2031—2032年、2035年、2041年、2048—2049年、2051年、2053年、2056年、2059年、2068年、2080年、2087年、2093年、2098年、2099年等年份播种出苗期以及拔节期和抽雄吐丝期农业气象条件适宜度偏差的程度较大,发生高温热害、干旱、暴雨洪涝、寡照(连阴雨)等农业气象灾害的风险相对更大。

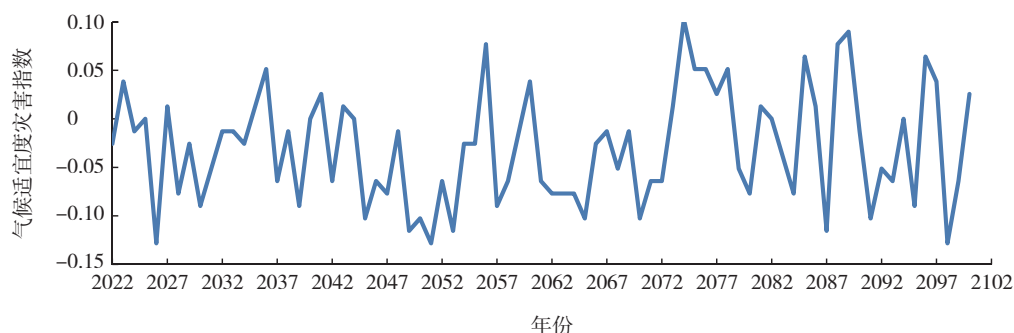


图8 2022—2100年夏玉米播种出苗期气候适宜度灾害指数变化

Fig.8 The same as Fig.2, but for climate suitability of summer maize at sowing and seedling stage

### 3 结论和讨论

预计未来(2022—2100年)气候变化情景下,黄淮海地区夏玉米生长季热量资源将呈增多趋势,水分资源总体为微弱的增多趋势,但随时间阶段性变化明显、存在较大不稳定性,光照资源变化总体稳定、趋势不明显。本文以积温 $t \geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为指标分析夏玉米生长季热量资源变化,发现未来黄淮海地区夏玉米生长季呈明显气候变暖趋势,与已有研究结论<sup>[18-19]</sup>一致,因此由热量资源来看,夏玉米未来热量资源将更加充裕或过剩,夏玉米遭受高温热害风险增加。由水分资源变化来看,未来黄淮海地区夏玉米生长季水分资源存在较大不稳定性,发生旱涝灾害风险较大,与已有研究结果<sup>[33-34]</sup>有较好一致性。由光照资源变化来看,2070年代之后出现寡照的风险明显增加。

2022—2100年黄淮海地区夏玉米全生育期气候适宜度呈现总体平稳略有下降波动趋势,并具有一定阶段性特征,其中2022—2035年为较明显波动下降阶段,2068—2088年为缓慢波动上升阶段。不同生育期气候适宜度时间趋势呈现一定差异性,其中拔节期、抽雄吐丝期和灌浆乳熟期均呈现明显的波动下降趋势,且变幅较大;其余生育期变化趋势均相对平缓,变幅相对较小。本文以黄淮海地区897个格点得出区域平均全生育期气候适宜度呈现总体平稳略有下降波动趋势的结果,与已有研究<sup>[17]</sup>以典型站点得到的气候适宜度总体呈下降趋势的结论基本一致,区别在于本文研究结果在下降幅度上相对偏小,但由于是基于全部黄淮海地区897个格点进行的研究,结论更能反映区域整体特点。以不同生育期气候适宜度数值的高低判断农业气象灾害

发生风险的大小,其中播种出苗期气候适宜度相对最差,发生高温热害、旱涝或寡照(连阴雨)等农业气象灾害的风险大,不利于前茬作物收获整地和夏玉米播种出苗;其次为三叶至七叶期、拔节期,再次为抽雄吐丝期,灌浆乳熟期气候适宜度好于抽雄吐丝期;而成熟期气候条件适宜度相对最好,农业气象灾害发生风险最小。

光温水不同气象要素适宜度2022—2100年的时间演变趋势存在明显差异,其中全生育期温度适宜度总体呈波动下降趋势,且具有一定年代阶段性变化特征,2031—2040年有一个较明显波动上升阶段,其后时间多呈现逐渐平稳下降趋势。温度适宜度总体呈波动下降趋势,说明未来热量资源增加、气候呈明显变暖趋势对夏玉米的生长总体是不利的。2022—2100年全生育期水分适宜度和光照适宜度总体稳定,随年代变化趋势不明显,水分适宜度后期略有上升趋势,2070—2085年有一个明显上升阶段,说明在长达15a的时间里发生旱涝风险明显偏低。因此,未来水分和光照资源对夏玉米的生长基本有利。夏玉米全生育期气候适宜度呈现总体平稳略有下降的波动趋势,这主要是由温度适宜度的下降趋势决定的,光照和水分两个要素的影响相对较小。

由全生育期各年代特征来看,2080年代、2090年代是温度条件适宜度最差的年代,2020年代最好;2030年代水分条件适宜度最差,而2080年代最好;2080年代、2090年代光照适宜度明显偏差,而2020年代、2030年代明显偏好。由全生育期和各生育期综合来看,2061—2100年夏玉米气候适宜度总体是偏差的,2020年代最好,这与研究<sup>[17]</sup>2070—2100年气候适宜度下降明显的结论大体一致。

由各生育期发生农业气象灾害种类及风险来看,夏玉米抽雄吐丝期遭受高温热害的风险最大,其次为灌浆乳熟期和拔节期;由发生旱涝风险来看,三叶至七叶期最大,其次为抽雄吐丝期,抽雄吐丝期旱涝风险虽然不是最大的,但连阴雨、暴雨洪涝及干旱灾害会降低玉米开花期的授粉率,对产量形成的影响相对较大,该结果与已有研究<sup>[35]</sup>结论一致。播种出苗期发生寡照的风险最高,寡照往往伴随连阴雨,寡照(连阴雨)会明显影响夏玉米顺利播种和正常出苗,其次是三叶至七叶期、拔节期风险较高;成熟期发生高温热害、旱涝、寡照(连阴雨)等各类农业气象灾害风险均最低。

综合来看,2080—2098年夏玉米拔节期、抽雄吐丝期、灌浆乳熟期遭受高温热害的风险大;2031—2035年、2046—2056年播种出苗至拔节期发生阶段性严重旱涝灾害风险等级高;2030年代和2040年代及2026年、2080—2093年播种出苗期出现寡照(连阴雨)的风险较大。由整个生长季来看,2031年、2087年、2049年、2035年、2046年依次为夏玉米发生农业气象灾害风险最大的5 a。2026年、2031—2032年、2035年、2041年、2048—2049年、2051年、2053年、2056年、2059年、2068年、2080年、2087年、2093年、2098年、2099年等年份播种出苗期、拔节期、抽雄吐丝期农业气象条件适宜度偏差的程度较大,发生高温热害、干旱、暴雨洪涝、寡照(连阴雨)等农业气象灾害的风险相对偏大。

本研究主要是基于未来气候变化情景下所做的研究和分析,由于诸多不确定因素,研究必然存在一定的局限。首先,本研究是限定在夏玉米品种特性不变的情况下,没有考虑未来近80 a的时间尺度内夏玉米品种特性随遗传育种、栽培技术以及气候变化和土壤等环境因素而产生的变化,也没有考虑生长季夏玉米生育期的长短变化、生理生态特性尤其是生长发育农业气象指标可能会发生一定变化。其次,本研究是假定现有栽培和种植模式在未来气候变化情况下保持不变得出的结论,没有考虑气候变化对相同种植区域内轮作的夏玉米、冬小麦生育期长短、土壤变化以及腾茬和夏玉米播种的影响。实际上已有研究表明气候变暖对夏玉米—冬小麦种植模式是有影响的,气候变暖会造成冬小麦播种时间推迟、生育期缩短、茬口时间延长以及夏玉米生育期

的变化等<sup>[23,36]</sup>,所以结论存在一定局限性。最后,本研究使用了联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次报告中模式输出未来气候情景数据,由于气候模式和气候情景的不完善和局限,也会使本研究结果存在一定的不确定性,未来随着IPCC模式输出情景数据和评估报告的更新完善,研究结果也将会有调整 and 变化。本研究仅提供了一个可能的结果,结论有一定局限性,但作为未来作物气候适宜性的预估性研究,仍然给出了黄淮海地区夏玉米未来农业气候资源和气候适宜性的时间变化趋势、特征及不同年代和不同发育阶段可能面临的各类农业气象灾害风险,对今后指导黄淮海地区农业气候资源利用、防灾减灾、夏玉米生产管理和种植制度调整及未来应对气候变化有一定现实意义。

#### 参考文献:

- [1] 郭建平.气候变化对农业气候资源有效性的影响评估[M].北京:气象出版社,2016.
- [2] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,等.中国气候与环境演变评估(1):中国气候与环境变化及未来趋势[J].气候变化研究进展,2005,1(1):4-9.
- [3] 黄荣辉,杜振彩.全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势[J].自然杂志,2010,32(4):187-196.
- [4] 钟章奇,王铮,夏海斌,等.全球气候变化下中国农业生产潜力的空间演变[J].自然资源学报,2015,30(12):2018-2032.
- [5] 温静,张超,张丽君,等.气候变化下中国粮食生产时空演变及影响因素[J].河南大学学报(自然科学版),2020,50(6):653-665.
- [6] 顾伟宗,陈丽娟,伯忠凯.印度洋海面温度对黄淮地区夏季降水影响的年代际变化研究[J].海洋气象学报,2020,40(4):89-96.
- [7] 张晓旭,孙忠富,郑飞翔,等.基于作物水分亏缺指数的黄淮海平原夏玉米全生育期干旱分布特征[J].中国农业气象,2021,42(6):495-506.
- [8] 吴洪颜,张佩.气候变化背景下江苏省水稻气候适宜性区划研究[J].海洋气象学报,2021,41(3):69-76.
- [9] 李建,苑文华,丁洁,等.山东省春季马铃薯播种至出苗期水热特征分析[J].海洋气象学报,2021,41(4):109-117.
- [10] 刘志娟,杨晓光,王文峰.气候变化背景下中国农业气候资源变化IV:黄淮海平原半湿润暖温带—玉两熟灌溉农区农业气候资源时空变化特征[J].应用生态学

- 报,2011,22(4):905-912.
- [11] 陆伟婷,于欢,曹胜男,等.近20年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(16):3132-3145.
- [12] 赵彦茜,肖登攀,柏会子,等.华北平原冬小麦和夏玉米气候适宜性[J].生态学杂志,2020,39(7):2251-2262.
- [13] 何奇瑾,周广胜.我国夏玉米潜在种植分布区的气候适宜性研究[J].地理学报,2011,66(11):1443-1450.
- [14] 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(增刊):1031-1036.
- [15] 李树岩,彭记永,刘荣花.基于气候适宜度的河南夏玉米发育期预报模型[J].中国农业气象,2013,34(5):576-581.
- [16] 王展,刘荣花,薛明,等.基于气候适宜度的夏玉米发育期模拟模型[J].气象科学,2015,35(1):77-82.
- [17] 徐玲玲,吕厚荃,方利.气候变化对黄淮海地区夏玉米气候适宜度的影响[J].资源科学,2014,36(4):782-787.
- [18] 秦大河.未来50—100年全球气候继续变暖[J].决策与信息,2004(12):1-2.
- [19] 王绍武,罗勇,赵宗慈,等.2100年全球平均温度将超过过去1万年[J].气候变化研究进展,2013,9(5):388-390.
- [20] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [21] 熊伟,杨婕,林而达,等.未来不同气候变化情景下我国玉米产量的初步预测[J].地球科学进展,2008,23(10):1092-1101.
- [22] 马玉平,孙琳丽,俄有浩,等.预测未来40年气候变化对我国玉米产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(1):224-232.
- [23] 马倩倩.未来气候变暖情景下北部冬麦区冬小麦生育期演变趋势预测分析[J].麦类作物学报,2021,41(4):1-9.
- [24] 袁彬,郭建平,冶明珠,等.气候变化下东北春玉米品种熟型分布格局及其气候生产潜力[J].科学通报,2012,57(14):1252-1262.
- [25] 尉英华,郭品文,刘洪滨.利用插值法建立历史旱涝格点资料的可行性[J].气象与减灾研究,2007,30(3):1-6.
- [26] 黄嘉佑,李庆祥.气象数据统计分析方法[M].北京:气象出版社,2015.
- [27] 马树庆.吉林省农业气候研究[M].北京:气象出版社,1996.
- [28] 郭建平,田志会,张涓涓.东北地区玉米热量指数的预测模型研究[J].应用气象学报,2003,14(5):626-633.
- [29] 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.
- [30] 魏瑞江,姚树然,王云秀.河北省农作物灾损评估方法[J].中国农业气象,2000,21(1):27-31.
- [31] 钟兆站,赵聚宝,郁小川,等.中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析[J].中国农业气象,2000,21(2):1-4.
- [32] 李明财,熊明明,杨艳娟,等.环渤海地区1961—2010年太阳总辐射时空变化特征[J].气候变化研究进展,2012,8(2):119-123.
- [33] 唐晓培,宋妮,陈智芳,等.未来主要气候情景下黄淮海地区参考作物蒸散量时空分布[J].农业工程学报,2016,32(14):168-176.
- [34] 宋阿伟,王胜,段春锋,等.未来RCPs情景下淮河流域夏玉米卡脖子旱风险预估[J].暴雨灾害,2021,40(2):201-207.
- [35] 成林,刘荣花.河南省夏玉米花期连阴雨灾害风险区划[J].生态学杂志,2012,31(12):3075-3079.
- [36] 孙新素,龙致炜,宋广鹏,等.气候变化对黄淮海地区夏玉米-冬小麦种植模式和产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(13):2476-2487.