文章编号:1000-7601(2025)03-0210-10

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.03.22

# 近 60 年黄淮海夏玉米光温水资源 适宜度及灾害风险演变特征

赵秀兰,吕厚荃

(国家气象中心,北京 100081)

摘 要:为探索气候变化对北方夏玉米气候适宜性及灾害的影响,基于 1961—2020 年黄淮海地区 84 个气象站 逐日气象要素、56 个农业气象观测站夏玉米生育时期观测资料,分析黄淮海地区光温水资源演变特征,建立黄淮海 夏玉米气候适宜度模型、灾害风险指数模型并对其年际变化特征进行分析。结果表明:近60 年黄淮海地区夏玉米生 长季热量资源呈明显增加趋势,降水和光照资源均呈波动减少趋势。夏玉米全生育期气候适宜度总体呈平稳上升、 后期略有下降的波动趋势,阶段性特征突出,其中 1987—2000 年持续上升达 13 a;温度适宜度总体呈稳定的波动上 升趋势,水分适宜度和光照适宜度总体均为前期波动上升、中期平稳、后期波动下降的趋势。不同生育时期光温水 及气候适宜度年际趋势存在一定差异且适宜性和灾害风险年代特征明显。温度适宜度 1970s 最差,低温灾害等风险 最高,而 2010s 达到最高值 83.7,为各年代最好;1960s 和 2010s 水分适宜度为各年代最差,旱涝灾害风险最高,而 1980s 和 2000s 均为最好。1960s 气候适宜度为 71.8,为各年代最差;1990s 最好,达到最高值 75.7,农业气象灾害风险 最低。成熟期遭受各种农业气象灾害风险最高,其次为播种出苗期;抽雄吐丝期气候适宜性在全生育期中最好,灾 害风险最低。

# Evolution of light, temperature, and water resource suitability and disaster risks for summer maize in the Huang-Huai-Hai region over the past 60 years

ZHAO Xiulan, LV Houquan (National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore the impacts of climate change on climate suitability and the risk of agrometeorological disasters for summer maize, we established a climate suitability index model and a risk index model based on daily meteorological data from 84 meteorological stations and summer maize growth period observations from 56 agricultural meteorological stations in the Huang-Huai-Hai region from 1961 to 2020. The results showed that over the past 60 years, during the entire growth period of summer maize in the Huang-Huai-Hai region, heat resources exhibited a significant increasing trend, while precipitation and light resources showed a fluctuating decline. From 1961 to 2020, the climate suitability of summer maize in the region generally increased throughout most of the growth period but showed a slight decline in the later stages. Notably, a continuous increase was observed over a 13-year period from 1987 to 2000, demonstrating distinct phase characteristics. The temperature suitability throughout the entire growth period exhibited a generally stable upward trend with fluctuations, while water and light suitability showed an initial increase, remained stable in the middle stages, and declined in the later stages from 1961 to 2020. The interannual trends of light, temperature, water, and overall climate suitability varied across different growth stages, with distinct patterns of suitability and disaster risk. The 1970s experienced the worst temperature suitability, with the highest risk of low-temperature disasters, whereas the 2010s recorded the best temperature suitability at 83.7.

收稿日期:2024-07-24 修回日期:2024-11-11 基金项目:国家气象中心 2024 年度气象高质量发展专项(QXGZL2024);科技部公益性气象行业专项(GYHY201106020) 作者简介:赵秀兰(1968-),女,黑龙江五常人,研究员,主要从事农业气象和气候变化研究。E-mail:751502742@qq.com Water suitability was at its lowest in the 1960s and 2010s but significantly improved in the 1980s and 2000s. Across all decades, climate suitability was the poorest in the 1960s at 71.8 and reached its highest at 75.7 in the 1990s, which also had the lowest risk of agrometeorological disasters. Among different growth stages, the risk of agrometeorological disasters was highest at the mature stage, followed by the seedling stage, and lowest at the tasseling and silking stages, which had the best climate suitability throughout the entire growth period.

Keywords: summer maize; climate suitability; agrometeorological disaster index; Huang-Huai-Hai region

夏玉米是黄淮海地区主要的大宗粮食作物之 一,在当地粮食总产中占比超过40%。从夏玉米初 夏播种到秋季成熟收获,正值水热条件充沛的季 节;但受副热带高压等大气环流影响[1],水热条件 匹配存在年际间不稳定,夏玉米生长面临夏季强降 水引发的暴雨洪涝、高温少雨引发的农业干旱[2]和 高温热害,以及秋季多阴雨天气引发的低温阴雨寡 照和秋收连阴雨等农业气象灾害威胁,影响夏玉米 稳产增产[3-4];其中农业干旱导致的玉米产量损失 风险相对较大[5-6],播种出苗期发生严重干旱的概 率最高[7]。在黄淮海夏玉米生长季光温水资源时 空分布和变化特征等方面[8-9],已有学者进行了研 究,发现可利用热量资源呈显著增加趋势,光照资 源呈减少趋势:也有学者研究表明,气候变化背景 下夏玉米生长季平均气温呈上升趋势,而降水空间 差异明显,其中黄淮海北部的干旱地区更趋于干 性,干旱极端性更强、发生频率较低<sup>[5,10]</sup>。以往研究 均存在研究的年代时间尺度相对偏短、研究内容不 够全面等局限,需要深入开展长序列年代时间尺 度、不同生育时期阶段特征等系统性研究。

生长季适宜的光温水条件是夏玉米产量形成 的关键。气候适宜度作为评价玉米生长发育气象 条件适宜性的主要技术指标<sup>[11-12]</sup>,近年来不断得到 改进<sup>[13-15]</sup>,并在实际农业气象业务中应用。但夏玉 米气候适宜度模型仍然存在公式繁琐、生育时期光 温水适宜指标精细化程度偏低等问题,需要不断优 化和完善。以往学者们<sup>[16-18]</sup>针对河北或河南夏玉 米气候适宜度时间趋势演变特征分析表明,光照适 宜度呈下降趋势,温度适宜度基本持平或下降,而 降水适宜度趋势结论分歧较大,并且多数分析尚不 够系统,存在研究区域范围偏小和年代时间尺度较 短等局限;也缺少夏玉米气候适宜度与农业气象灾 害的关联性研究,尤其缺少年际变化、不同生育时 期阶段的干旱、渍涝、连阴雨寡照、高温热害等农业 气象灾害发生风险的诊断分析。

本文拟采用历史地面气象观测资料、夏玉米发 育期观测资料,分析近60年黄淮海地区夏玉米生长 季农业气候资源变化特征、不同年代和不同生育时 期阶段气候适宜度的变化特征,并诊断其农业气象 灾害发生风险,为黄淮海地区农业气候资源利用和 防灾减灾,夏玉米生产管理和种植制度调整以及未 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)。 1961—2020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,包括逐日最高气 温、最低气温、平均气温、降水量、日照时数、风速、 相对湿度、辐射等资料。黄淮海地区 1981—2020年 56个农业气象观测站夏玉米生育时期观测资料来 自国家气象中心;1961—1980年夏玉米生育时期数 据无实际观测资料,在不考虑生育时期年际波动的 情况下<sup>[19]</sup>,基于作物对气候的长期适应性<sup>[20]</sup>,以 1981—2010年夏玉米生育时期观测资料 30年气候 平均值作为标准值代替 1961—1980年数据<sup>[21]</sup>。黄 淮海地区夏玉米生长季时间为6月—10月上旬。

#### 1.2 计算模型和计算方法

1.2.1 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每个生长 发育阶段或全生育期光、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定量化指标, 包括温度适宜度、水分适宜度、光照适宜度及气候 适宜度;数值介于 0~100 之间,其中数值越大表明 适宜程度越高,数值越小表明适宜程度越低。夏玉 米全生育期温度、水分、光照、气候等各要素适宜度 由各生育时期的要素适宜度数值平均获得,黄淮海 地区各个要素适宜度均由 84 个站点的数值平均 获得。

(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 如式(1)所示<sup>[22-23]</sup>:

$$S(T_i) = \frac{(T_i - T_{\min}) (T_{\max} - T_i)^B}{(T_0 - T_{\min}) (T_{\max} - T_0)^B} \times 100 \quad (1)$$

式中,  $B = (T_{\text{max}} - T_0) / (T_0 - T_{\text{min}})$ ;  $S(T_i)$  为夏玉米 某一生育时期温度适宜度;  $T_i$  为该生育时期日平均 气温的平均值( $\mathbb{C}$ );  $T_{\text{min}}$ 、 $T_{\text{max}}$ 、 $T_0$ 分别为该生育时期 所需的日最低温度、最高温度、最适温度( $\mathbb{C}$ )。各 生育时期取值依据已有研究结果<sup>[24]</sup>。

(2)水分适宜度模型。水分对夏玉米生长发育 的适宜程度可用函数表示,如式(2)所示:

$$S(R_i) = \begin{cases} 100 & R_0 \le R_i \le 150\% R_i \\ (R_i/R_0) \times 100 & R_i < R_0 \\ (R_0/R_i) \times 100 & R_i > 150\% R_0 \end{cases}$$

(2)

式中,  $S(R_i)$  为夏玉米某一生育时期水分适宜度,以 降水量作为判定夏玉米该生育时期水分适宜程度 的指标;  $R_i$ 和  $R_0$ 分别为该生育时期累积降水量和生 理需水量(mm),根据 FAO 给出的作物系数并运用 实时气象资料根据 Penman 公式计算而得<sup>[25]</sup>。当  $R_0 \leq R_i \leq 150\%R_0$ 时,认为水分可被夏玉米基本全 部吸收利用或完全可被土壤储存,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;  $R_i \geq 150\%R_0$ 时,土壤状态为渍涝<sup>[26-27]</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。

(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,如式(3)所示:

$$S(S_i) = \begin{cases} 100 & S_i \ge S_0 \\ (S_i / S_0) \times 100 & S_i < S_0 \end{cases}$$
(3)

式中,  $S(S_i)$  是夏玉米某一生育时期光照适宜度;  $S_i$  为夏玉米该生育时期平均日照时数(h);  $S_0$ 为该生育时期适宜日照时数(h),即夏玉米达到适宜状态的该生育时期平均日照时数。各生育时期适宜日照时数 $S_0$ 可用 1981—2010年日照时数观测数据 30 年气候平均值替代<sup>[21]</sup>。

(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性程度的综合影响,夏玉米 某一生育时期或全生育期的综合气候适宜度可用 下式计算:

 $S(C_i) = aS(T_i) + bS(R_i) + cS(S_i)$  (4) 式中,  $S(C_i)$  为某一生育时期或全生育期的综合气 候适宜度;  $S(T_i) \ S(R_i) \ S(S_i)$  分别为该生育时 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 淮海夏玉产区农业气候特征,水分是夏玉米产量形 成的关键影响因子和限制因子,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 基于气候适宜度的农业气象灾害风险指数 模型 基于夏玉米某一生育时期或全生育期的温 度、水分、光照适宜度及气候适宜度,计算基于气候 适宜度的灾害风险指数<sup>[12]</sup>,以此判定夏玉米农业气 象灾害发生风险。基于温度、水分、日照适宜度以 及气候适宜度的灾害风险指数可采用式(5)~(8) 计算:

$$DS(T_i) = \frac{S(T_i) - S(T_i)}{\overline{S(T_i)}}$$
(5)

$$DS(R_i) = \frac{S(R_i) - \overline{S(R_i)}}{\overline{S(R_i)}}$$
(6)

$$DS(S_i) = \frac{S(S_i) - \overline{S(S_i)}}{\overline{S(S_i)}}$$
(7)

$$DS(C_i) = \frac{S(C_i) - \overline{S(C_i)}}{\overline{S(C_i)}}$$
(8)

式中,  $S(T_i)$ 、 $S(R_i)$ 、 $S(S_i)$ 、 $S(C_i)$ 分别为某一生育 时期或全生育期的温度、水分、光照、综合气候适宜 度;  $\overline{S(T_i)}$ 、 $\overline{S(R_i)}$ 、 $\overline{S(S_i)}$ 、 $\overline{S(C_i)}$ 分别为该生育时期 或全生育期的温度、水分、光照、综合气候适宜度常 年气候平均值;  $DS(T_i)$ 、 $DS(R_i)$ 、 $DS(S_i)$ 、 $DS(C_i)$ 分别为该生育时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农业气象灾害风险指 数,分别简称温度、水分、光照、气候适宜度灾害指 数,数值范围在-1~1之间,数值越高说明灾害发生 风险越低,数值越低灾害发生风险越高;本文以数值 在 0~1 范围确定为灾害较低风险等级,以数值在-1~ 0范围确定为灾害较高风险等级,其中以 1961—2020 年灾害指数数值按照从高到低进行 60 年的年份排 序,数值最低的 6 年(按照总年份 10%比例,且数值在 -1~0范围)均确定为高风险等级年份。

# 2 结果与分析

#### 2.1 温度适宜度及灾害风险演变特征

图 1 为 1961—2020 年黄淮海地区夏玉米生长 季≥10℃积温年际变化,近 60 年夏玉米生长季≥ 10℃积温区域平均值呈现波动增加趋势,年际间震 荡显著,从 20 世纪 60 年代的 3 030 ℃ · d 波动上升 至 2020 年的 3 120 ℃ · d;其中最大值达 3 200 ℃ · d(2013 年),比最低值 2 909 ℃ · d(1976 年)增加 了 291 ℃ · d。从年代上看,1960s、1970s、1980s 生 长季增温趋势不明显;1990s、2000s、2010s 增温显 著,分别以 17.42 • a<sup>-1</sup>、2.46 • a<sup>-1</sup>、11.60 • a<sup>-1</sup>的速率 上升, 1990s 上升速率最快。从 6—9 月各月份来 看,也是 1990s 之后积温增加明显,各月 1980s 均为 最低;9 月 2010s 比 1980s 增加 27.7 ℃ • d,上升速 率为 8.29 • 10a<sup>-1</sup>,增温使初秋热量更充足、阶段性 低温发生风险降低,延长了夏玉米灌浆成熟的时 间。综上所述,近 60 年黄淮海地区夏玉米生长季热 量资源呈增加趋势,气候变暖趋势明显,1990s 以来 变暖尤为突出。

由图 2 可知,近 60 年黄淮海地区夏玉米全生育 期温度适宜度总体呈稳定的波动上升趋势,同时也 具有一定阶段性变化特点,1970—1978 年、1992— 2000 年、2003—2010 年为三个较明显波动上升阶 段,波动幅度较大,其中 1992—2000 年上升速率达 1.19 · a<sup>-1</sup>,上升最快。全生育期温度适宜度总体呈 稳定的波动上升趋势,说明近 60 年气候变暖对夏玉 米的生长总体是有利的。各个生育时期与全生育 期相似,总体均呈上升趋势,但在上升幅度上存在差 异;其中成熟期温度适宜度波动上升趋势最为明显、 震荡变幅也相对较大(图 3),其次为播种出苗期、三 叶~七叶期,灌浆乳熟期、抽雄吐丝期上升趋势相对 放缓,拔节期变化较平稳趋势最不明显。说明气候变 暖对夏玉米成熟阶段的有利影响相对更大。

由表1可知,1961—1990年温度条件对玉米生 长发育的适宜程度相对于1991—2020年明显偏差; 其中全生育期温度适宜度1970s最差,而2010s平 均值达到83.7,为各年代最好。从温度适宜度灾害 指数以及生长季≥10℃积温也可以反映出来这个特 点,例如选取其中的1970s和2010s,1970s灌浆乳熟 期和成熟期温度适宜度灾害指数均为-0.06,而 2010s灾害指数分别为0.02和0,说明1970s夏末秋 初积温不足、遭受阶段性低温的风险相对较高, 2010s风险较低。

抽雄吐丝期温度适宜度各年代平均值达到 83.3 (表1),温度条件为各生育时期中最好,并且随年代 呈上升趋势;各年代的抽雄吐丝期温度适宜度灾害 指数也均在 0.01~0.06 范围,数值均高于其它发育 期;这些都反映了夏玉米开花阶段遭受高温热害等 风险呈降低趋势,明显利于授粉结实。因此,过去 60 年热量资源增加的趋势提高了积温,且各月份的 积温增量符合夏玉米生理生态需求,使产量形成关 键期的阶段性低温和高温热害的发生风险都得到 了降低,对夏玉米生长发育明显有利。成熟期温度 适宜度各年代平均值为 78.5,为各生育时期中最低, 说明夏玉米成熟期遭受阶段性低温的风险相对其



Note: The dotted line is the linear trend line and the formula is the linear fitting equation (the same as below).







它发育期要高,并且随年代变化有稳定上升趋势, 说明近 60 年夏玉米成熟期遭受阶段性低温的风险 在逐渐降低,夏玉米灌浆成熟的时间在逐步延长, 利于增产和丰收。

Table 1 Temperature suitability of summer maize at different growing stages from 1961 to 2020							
年代 Age	播种出苗期 Seeding stage	三叶~七叶期 Three to seven leaves stage	拔节期 Jointing stage	抽雄吐丝期 Tasseling and silking stage	灌浆至乳熟期 Filling to milking stage	成熟期 Mature stage	全生育期 Whole growth period
1960s	77.7	80.6	83.3	82.6	79.9	71.7	79.3
1970s	79.5	77.7	79.5	81.2	76.8	76.8	78.6
1980s	79.4	77.7	80.6	81.6	80.3	79.7	79.9
1990s	82.3	82.3	84.5	84.3	83.0	80.8	82.9
2000s	82.3	82.3	84.5	84.3	83.0	80.8	82.9
2010s	83.1	84.9	83.9	85.9	83.0	81.3	83.7
平均 Average	80.7	80.9	82.7	83.3	81.0	78.5	81.2

表 1 1961—2020 年各年代不同发育期夏玉米温度适宜度

从温度适宜度灾害指数极端值来看,全生育期 温度条件最差的5年依次出现在1976年、1970年、 1969年、1992年、1989年,说明遭受阶段性低温和 高温热害风险最高。播种出苗期的1969—1970年 和1973年,三叶~七叶期的1970年,拔节期的1993 年和2020年,成熟期的1967—1970年和1973年, 温度适宜度灾害指数在-0.34~-0.09范围,反映了 遭受阶段性高温热害、低温的风险较高。总体来 看,1960s、1970s播种至幼苗期遭受阶段性高温热 害、成熟期遭受阶段性低温风险较高。以2020年作 为典型年份进行灾害验证,2020年7月中下旬,河 南、山东、河北南部、苏皖两省淮北地区拔节期的夏 玉米遭受明显阶段性低温,导致夏玉米生长缓慢、 长势偏弱;验证的受灾结果与2020年拔节期灾害风 险高相吻合。

#### 2.2 水分适宜度及旱涝风险演变特征

图 4 为 1961—2020 年黄淮海地区夏玉米生长 季降水量年际变化,可知近60年夏玉米生长季区域 平均降水量总体呈减少趋势,且年际间震荡显著、 阶段性变化明显:其中 1993—2003 年降水量震荡变 化突出,年际变幅也较大,降水量最大达 622.7 mm (2003年),仅次于近 60 年最大值 649.3 mm(1964 年);最小值为 297.5 mm(1997 年),也是 60 年期间 的最低值。2003—2020年呈现较明显的缓慢波动 下降趋势,下降速率达到-5.44 ・a<sup>-1</sup>,其中 2015 年 达到期间最低值 363.4 mm; 而 1962—1992 年, 降水 量在历时 30 年时间里呈现稳定震荡减少趋势,下降 速率为-3.54 · a<sup>-1</sup>。从 6—9 月各月份来看,7 月降 水量减少趋势相对最为明显,其次为8月和9月,6 月趋势不明显。上述结果表明,近60年黄淮海地区 夏玉米生长季水分资源呈震荡减少趋势,年际间存 在较大不稳定性。

由图 5 可知,近 60 年夏玉米全生育期水分适宜 度总体为前期波动上升(1960s—1970s)、中期平稳 (1980s—2000s)、后期波动下降的趋势(2010s)。其 中,1977—1984年、2001—2009年为明显上升阶段, 反映了这两个时期旱涝风险明显减小;1984—1989 年、2009—2012年为明显下降阶段,旱涝风险呈增 多趋势。各个生育时期水分适宜度变化趋势总体 与全生育期相似;但拔节期(图6)、抽雄吐丝期、成 熟期震荡较为剧烈,灌浆乳熟期次之,播种出苗期、 三叶~七叶期趋势相对平缓。

从各个年代来看,1960s和2010s全生育期水分 适宜度分别为63.7和63.9,相对于其余40年都是 明显偏差的;水分适宜度灾害指数也最低,均为 -0.02,说明1960s和2010s发生旱涝灾害的风险最 高。1980s和2000s水分适宜度分别为最高值和次 高值,水分适宜度灾害指数也最高,表明1980s和 2000s水分条件相对于其余40年是明显偏好的,发 生旱涝风险最低。从各生育时期来看,拔节期水分 适宜度最高,达到68.3;其次为三叶~七叶期、抽雄 吐丝期,播种出苗期、灌浆乳熟期次之,成熟期水分 适宜度最低;说明成熟期遭遇连阴雨、暴雨洪涝及 干旱灾害影响的风险最大,拔节期风险最小。

从水分适宜度灾害指数极值来看,全生育期水分 条件最差的5年依次出现在1963年、1974年、1965 年、1977年、2012年,说明遭受旱涝灾害的风险最高。 播种出苗期(图7)、三叶~七叶期、成熟期在1962— 1977年、1994—2000年、2005—2007年、2011—2013 年、2017—2020年等时段的水分适宜度灾害指数的数 值均处于明显低值范围(-0.23~-0.09),说明播种~幼 苗期、成熟期发生阶段性严重旱涝灾害风险等级 高。拔节期、抽雄吐丝期、灌浆至乳熟期等产量形 成关键期,多数年份水分适宜度灾害指数的数值相 对较高,说明发生旱涝灾害风险明显偏低。本文以 2011年和2019年作为典型年份进行灾害验证。 2011年6月上中旬,河南、苏皖两省淮河以北地区 出现农业干旱,墒情差影响了夏玉米播种出苗。2019









Fig.6 Annual change of water suitability index at jointing stage of summer maize from 1961 to 2020

年9月中旬,河南出现秋收连阴雨天气,河南中部夏 玉米成熟收获遭受明显影响。验证的灾情结果与 2011年播种出苗期、2019年成熟期旱涝灾害风险高 相吻合。

#### 2.3 光照适宜度及寡照风险演变特征

对 1961—2020 年生长季区域平均累计日照时 数的分析发现,夏玉米生长季光照资源总体呈减少 趋势,并且存在两个较明显阶段性的年际变化。其 中,1965—1985 年为第一个震荡下降时期,下降速 率达到-8.19 · a<sup>-1</sup>,下降趋势清晰,从近 60 年最高 值 1101.3h(1965 年)下降到 890.7 h(1985 年); 1986—2003 年为第二个震荡下降阶段,下降速率达 到-8.37 · a<sup>-1</sup>,年际波动较为明显。上述结果表明, 近 60 年黄淮海地区夏玉米生长季光照资源总体呈 减少趋势,寡照风险明显增加。

由图 8 可知,近 60 年夏玉米全生育期光照适宜



## 图 5 1961—2020 年夏玉米全生育期水分适宜度年际变化

Fig.5 Annual change of water suitability index during the whole growth period of summer maize from 1961 to 2020



## 图 7 1961—2020 年夏玉米播种出苗期水分 适宜度灾害指数变化

Fig.7 Change of disaster index based on water suitability at seedling stage of summer maize from 1961 to 2020

度呈现前期波动上升、中期平稳、后期波动下降的 趋势。其中,1965—1985年为波动上升趋势,光照 适宜度由 76上升到 85,上升速率达到 0.54 · a<sup>-1</sup>; 1986—1998年期间为平稳期、无明显变化趋势,光 照适宜度普遍在 83~87范围,数值偏高、适宜性最 好;1998—2020年期间为震荡下降阶段,光照适宜 度由 87下降到 77,下降速率达到-0.12 · a<sup>-1</sup>。各生 育时期变化趋势总体与全生育期相似,各生育时期 之间差异较小,成熟期年际震荡最突出且最不稳定。

从各生育时期来看,抽雄吐丝期和拔节期光照 适宜度相对较低,说明发生阶段寡照的风险相对偏 高,会明显影响夏玉米光合生长和开花授粉,对产 量形成不利。播种出苗期、三叶~七叶期、灌浆乳熟 期光照适宜度相对较高,各生育时期平均值均为 83,说明晴好天气较多、光照充足,发生阶段寡照风 险相对偏低。 从各个年代来看,1960s 光照适宜度最差,全生 育期平均值最低(78);1990s 和 2000s 最好,光照适 宜度数值最高(85)。全生育期光照适宜度最差的 5 年依次为 1969 年、1968 年、1966 年、1965 年、2020 年,数值普遍在 74~76 范围,出现阶段性寡照的风 险最高。拔节期在 1965—1972 年,抽雄吐丝期在 1966 年、1973 年、2011 年、2020 年光照适宜度数值 均低于 72,灾害指数均低于-0.08,发生寡照的风险 偏高、程度偏重。以 2011 年作为典型年份进行灾害 验证,8 月上旬河南、山东、河北南部出现多雨寡照 天气,夏玉米抽雄吐丝、开花授粉受到影响;验证的 灾情结果与 2011 年抽雄吐丝期灾害风险高相吻合。

2.4 气候适宜度及农业气象灾害演变特征

由图9可知,近60年夏玉米全生育期气候适宜 度呈现总体平稳上升、后期略有下降的波动趋势, 而且阶段特征突出,其中1987—2000年以0.18 · a<sup>-1</sup>的速率上升,持续时间最长(达13 a);1969— 1981年上升幅度较大,气候适宜度从69上升到77, 上升速率达0.39 · a<sup>-1</sup>。各生育时期气候适宜度年 际变化趋势与全生育期总体相似,不同生育时期也 存在一定差异性,例如,抽雄吐丝期(图10)、播种出 苗期和成熟期震荡变幅较大,而三叶~七叶期变幅 相对偏小。

从各生育时期来看,抽雄吐丝期平均气候适宜 度达到75.6,数值最高,灾害指数数值也最高,发生 农业气象灾害风险最低;说明夏玉米产量形成最关 键的抽雄吐丝和开花授粉阶段农业气象条件最好。 成熟期平均气候适宜度为71.9、相对最低,灾害指数 数值也为最低,灾害风险最高;说明成熟期气候适 宜性相对最差,发生阶段性高温和低温、旱涝或连 阴雨寡照等农业气象灾害的风险最高,不利于夏玉



图 8 1961—2020 年夏玉米全生育期光照适宜度年际变化 Fig.8 Annual change of light suitability index during the whole growth period of summer maize from 1961 to 2020

米正常成熟和收获晾晒。播种出苗期气候适宜度 也较低,仅略好于成熟期,发生农业气象灾害发生 风险也较高,影响冬小麦等前茬作物成熟收获、腾 茬整地和夏玉米播种出苗,延时播种的风险较大。

从各年代来看,全生育期和各生育时期气候适 宜度最低值均出现在 1960s,其中全生育期气候适 宜度为71.8、为各年代最差,气候适宜度灾害指数也 为各年代最低;而各生育时期的气候适宜度及灾害 指数最高值均出现在 1990s 或 2000s,全生育期最高 值均在 1990s. 其中气候适宜度达到 75.7。说明 1960s期间气候条件对夏玉米生长发育适宜性总体 是最差的,而1990s是最好的。全生育期气候适宜 度最差的5年依次出现在1969年、1968年、1965 年、1966年、1970年,农业气象灾害风险最高。 1960s 以及 2008 年、2020 年等年份播种出苗期、成 熟期气候适宜度数值均低于70.气候适宜度灾害指 数也普遍低于-0.07(图 11),农业气象条件适宜性 偏差的程度较大,各类农业气象灾害发生风险高。 以 2008 年作为典型年份进行灾害验证,6 月上旬河 北南部、河南农田土壤缺墒,干旱使夏玉米适时播 种和出苗受到明显影响:9月下旬京津冀大部、河 南、山东降水日数为5~7d.低温阴雨寡照使成熟夏 玉米收获晾晒受阻。验证的灾情结果与 2008 年播 种出苗期、成熟期灾害风险高相吻合。

# 3 讨 论

本研究表明,近 60 年黄淮海地区夏玉米生长季 热量资源呈显著波动增加趋势、气候变暖趋势明显 的结论,与已有研究<sup>[5-6,28]</sup>结论一致。全生育期温 度适宜度总体呈稳定的波动上升趋势,与以往学者 们<sup>[16-18]</sup>得出的温度适宜度基本持平或下降的结论



图 9 1961—2020 年夏玉米全生育期气候适宜度年际变化





# 气候适宜度年际变化

Fig.10 Annual change of climate suitability index at tasseling and silking stage of summer maize from 1961 to 2020

不一致,主要原因在于研究时空尺度上的差异造成 结论不同;以往研究在空间上多针对河北或河南的 部分区域,时间序列多以 1981-2010 年或 1971-2010年等 30~40 a 尺度,本研究空间尺度覆盖全部 黄淮海地区、范围较大,时间尺度延长到 60 a,因此 就黄淮海地区而言,本研究更为系统和全面。温度 适宜度以线性上升趋势为主,主要是由于近60年黄 淮海地区气候变暖降低了阶段性低温发生风险,夏 季旺盛生长和秋季灌浆成熟阶段积温分别增加了 61.0 ℃ · d 和 55.9 ℃ · d,充分满足了夏玉米对热 量的需求<sup>[20]</sup>,热量条件对夏玉米的生长是明显有利 的。但随着积温的增加,有研究表明河南南部夏玉 米花期高温热害发生频次自 2010s 开始有增加趋 势<sup>[29]</sup>:从本研究来看,整个黄淮海地区 2010s 温度 适宜度仍然为各年代最高值(83.7),温度适宜性最 好,高温热害影响有限。有研究表明,未来随着气 候变暖的加剧,黄淮海地区夏玉米遭遇花期高温热 害的风险将明显加大[30],温度适宜度未来将呈稳定 波动下降趋势<sup>[12]</sup>。

从水资源变化来看,黄淮海地区夏玉米生长季 水资源波动大、存在较大不稳定性,年际间震荡显 著,发生旱涝灾害风险较大,与已有研究结果<sup>[3,5]</sup>有 较好的一致性;大部地区降水总体呈减少趋势,与 张宇等<sup>[1]</sup>和刘志娟等<sup>[28]</sup>基本一致;光照资源呈减少 趋势,与已有研究结果<sup>[8-9]</sup>有较好一致性。全生育 期水分适宜度和光照适宜度总体均为前期波动上 升、中期平稳、后期波动下降的趋势;在趋势变化上 存在较多时段的一致性,例如,均是 1965—1980 年 为波动上升期、1986—1998 年为平稳期、2010s 为震 荡下降阶段。其中,1986—1998 年是水分适宜度和



气候适宜度灾害指数变化

Fig.11 Change of disaster index based on climate suitability at mature stage of summer maize from 1961 to 2020

生长季平均日照时数 926.0 h、平均降水量 434.3 mm,夏玉米生长所需的水分和光照资源匹配最 佳<sup>[20]</sup>;而在 1965—1980 年期间生长季平均日照时 数 990.5 h,平均降水量 474.5 mm,相对于夏玉米生 长需求日照时数和降水量均是偏多的,尤其降水偏 多引发渍涝灾害风险增加,因此随着日照时数和降 水量减少,适宜性呈增加趋势;而在 2010s 生长季平 均日照时数 829.0 h,平均降水量 452.4 mm,相对于 1986—1998年期间日照时数明显偏少,降水量略偏 多,寡照和渍涝灾害风险呈增加趋势,致使水分适 宜度和光照适宜度均呈降低趋势。夏玉米生长对 光照、水分资源的需求,主要由其生理生态特性决 定的,并不是光照、水分资源越多或越少越适合,并 不呈线性关系。因此,近60年降水和光照资源的阶 段性年际变化,与夏玉米生长所需的最佳光、水资 源的匹配程度也在不断变化,1986—1998年匹配程 度较好,1965—1980年、2010s相对偏差,致使适宜 度全生育期水分适官度和光照适官度随时间变化 总体均呈非线性变化。以往学者[16-18]针对光照适 官度和水分适官度变化趋势的研究时段多集中在 1981-2010年,其中关于光照适宜度趋势的研究结 论较为一致,即随时间呈下降趋势,本研究在该时 段光照适宜度正处于最好适宜性的平稳期向下降 阶段过度时期,因此本研究结论基本与以往学者观 点吻合:水分适宜度变化趋势的研究结论以往学 者[16-18]观点不一,主要是由于研究区域和时间尺度 的差异造成的,本研究在该时段水分适宜度也正处 于最好适宜性的平稳期向下降阶段过度时期,基本 属于平稳弱下降趋势<sup>[18]</sup>。

近 60 年黄淮海地区夏玉米生长季气候适宜度 呈现总体平稳上升、后期略有下降的波动趋势,是 由全生育期温度适宜度、水分适宜度和光照适宜度 趋势共同决定的,是在夏玉米生长发育过程中光温 水要素共同作用的综合反映;其中光照适宜度和水 分适宜度的趋势向下波动,主要在于光照资源和降 水资源的减少以及降水的年际震荡加剧,导致旱涝 和寡照连阴雨等灾害影响呈增加趋势<sup>[31]</sup>。本研究 1981—2010年期间气候适宜度变化趋势总体不明 显,与以往学者结论较为一致<sup>[17]</sup>。气候适宜度最高 值出现在 1990s,气候适宜性最好,与以往学者研究 结果吻合<sup>[18]</sup>。1960s水分适宜度为各年代最差,旱 涝灾害风险最高,与已有关于 1960s夏玉米遭受旱 涝灾害较高的研究结论一致<sup>[32]</sup>。抽雄吐丝期气候 适宜度为全生育期最好,播种出苗期气候适宜性较 差,与以往研究结果一致<sup>[18]</sup>。

本研究是限定在夏玉米品种特性不变的情况 下,没有考虑近 60 年夏玉米品种特性随遗传育种、 栽培技术以及土壤等环境因素而产生的变化。其 次,本研究假定种植模式保持不变,没有考虑气候 变化等因素对相同种植区域内轮作的夏玉米、冬小 麦生育期长短以及腾茬和播种的影响;实际上已有 研究<sup>[10,33]</sup>表明气候变暖对夏玉米种植模式存在一 定影响,造成夏玉米生育期变化,所以本研究结论 也存在一定局限性。本研究提供了黄淮海地区夏 玉米气候适宜性定量评价的系统性研究结论,给出 了夏玉米生长发育的农业气候资源和气候适宜性 的变化趋势、特征及不同年代和生育阶段各类农业 气象灾害风险,对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的现实意义。

# 4 结 论

近 60 年,黄淮海地区夏玉米生长季≥10℃积温 呈现显著波动增加趋势,降水资源和光照资源总体 均呈减少趋势;其中,热量和水分资源年际间震荡 显著。近 60 年夏玉米全生育期气候适宜度总体呈 平稳上升、后期略有下降的波动趋势,而且阶段性 特征突出,其中 1987—2000 年持续波动上升,各生 育时期与全生育期趋势总体相似。全生育期温度 适宜度呈稳定波动上升趋势,水分适宜度和光照适 宜度均呈前期波动上升、中期平稳、后期波动下降 趋势。

从各年代来看,1960s 全生育期气候适宜度是 最差的,农业气象灾害风险也最高;1990s 气候适宜 性最好。1970s 温度适宜度最差、低温等灾害风险 最高;而2010s 温度适宜度达到最高值83.7,为各年 代最好。1960s和2010s水分适宜度均为各年代最 差,旱涝灾害风险最高;而1980s和2000s均为最 好。1960s光照适宜度为各年代最差,寡照灾害风 险最高;而1990s和2000s均为最好。

从各生育时期来看,成熟期气候适宜度和灾害 指数均最低,气候适宜度为71.9,农业气象灾害风险 最高、气候适宜性最差;播种出苗期灾害风险较高; 抽雄吐丝期气候适宜度和灾害指数均最高,气候适 宜度达到75.6,灾害风险最低、气候适宜性最好。

#### 参考文献:

- 张宇,李耀辉,刘抗.西太平洋副热带高压对黄淮海夏季区域降水 异常的影响[J].干旱区研究,2015,32(3):518-525.
   ZHANG Y, LI Y H, LIU K. Effect of western pacific subtropical high on regional rainfall anomalies in summer over Huang-Huai-Hai Plain [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3):518-525.
- [2] 薛昌颖,马志红,胡程达.近 40a 黄淮海地区夏玉米生长季干旱时 空特征分析[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 1-14.
  XUE C Y, MA Z H, HU C D. Spatiotemporal characteristics of drought during summer maize growing season in Huang-Huai-Hai area for recent 40 years [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(2): 1-14.
- [3] 郁凌华,赵艳霞.黄淮海地区夏玉米生长季内的旱涝灾害分析[J]. 灾害学,2013,28(2):71-75,80.
  YULH, ZHAOYX. Analysis of drought-flood disaster on Huanghuaihai region during summer maize growing season [J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2):71-75,80.
- [4] 马玉平,孙琳丽,马晓群. 黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理 生态反应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 85-93.
  MA Y P, SUN L L, MA X Q. Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang -Huai-Hai Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 85-93.
- [5] LIU S L, WU W B, YANG X G, et al. Exploring drought dynamics and its impacts on maize yield in the Huang-Huai-Hai farming region of China[J]. Climatic Change, 2020, 163(1): 415-430.
- [6] HU Z H, WU Z R, ZHANG Y X, et al. Risk assessment of drought disaster in summer maize cultivated areas of the Huang-Huai-Hai Plain, eastern China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(7): 441.
- [7] GAO C, LI X W, SUN Y W, et al. Water requirement of summer maize at different growth stages and the spatiotemporal characteristics of agricultural drought in the Huaihe river basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136(3): 1289-1302.
- [8] 田宏伟. 黄淮海地区玉米生育时期农业气候资源分析[J]. 气象与 环境科学, 2016, 39(4): 56-61.
   TIAN H W. Study on agricultural climate resources in Huang-Huai-Hai area during summer maize growing season[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(4): 56-61.
- [9] ZHAO J, YANG X G. Average amount and stability of available agroclimate resources in the main maize cropping regions in China during 1981-2010[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 32 (1): 146-156.
- [10] 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.

LU W T, YU H, CAO S N, et al. Effects of climate warming on growth process and yield of summer maize in Huang-Huai-Hai Plain in last 20 years [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(16): 3132-3145.

[11] 魏瑞江,王鑫. 气候适宜度国内外研究进展及展望[J]. 地球科学 进展, 2019, 34(6): 584-595.

WEI R J, WANG X. Progress and prospects of research on climatic suitability at home and abroad[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 584-595.

 [12] 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 X L, XU L L, ZHANG Y H, 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.

- [13] 帅艳民,武梦瑾,吴昊,等.东北春玉米全生育期气候适宜度评价[J].干旱地区农业研究,2022,40(3):238-247.
  SHUAI Y M, WU M J, WU H, et al. Evaluation of climate suitability of spring maize during the whole growth period in northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 238-247.
- [14] 李萌,申双和,吕厚荃,等. 气候变化情景下黄淮海区域热量资源及夏玉米温度适宜度[J]. 大气科学学报,2016,39(3):391-399.

LI M, SHEN S H, LV H Q, et al. Thermal resources and summer maize temperature suitability in the Huang-Huai-Hai region under future climate change[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2016, 39(3): 391-399.

- [15] 越昆,武荣盛,桑婧,等.内蒙古春玉米气候适宜度变化特征及 评价指标[J].干旱地区农业研究,2021,39(3):209-217.
  YUE K, WU R S, SANG J, et al. Characteristics and evaluation index of climate suitability of spring maize in Inner Mongolia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3):209-217.
- [16] 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(6): 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 Environment Sciences, 2011, 20(6): 1031-1036.
- [17] 李树岩,陈怀亮.河南省夏玉米气候适宜度评价[J].干旱气象, 2014, 32(5): 751-759.
   LI S Y, CHEN H L. Evaluation studies on climate suitability of sum-

The set of the set of

[18] 史本林,朱新玉,胡云川,等.夏玉米气候适宜度对全球气候变 暖的响应-以商丘地区为例[J].地理科学,2013,33(10): 1277-1284.

SHI B L, ZHU X Y, HU Y C, et al. Influence of climate change on climate suitability of summer maize in central plain of China: a case study of Shangqiu[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(10): 1277-1284.

[19] 李树岩,潘学标,王靖. RCP 情景下河南省夏玉米发育期变化及 可调节热量资源估算[J].中国农业大学学报,2020,25(6): 35-45. LI S Y, PAN X B, WANG J. Variation of summer maize development and estimation of adjustable thermal resource in Henan province under RCP scenarios [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(6): 35-45.

[20] 韩湘玲, 孔扬庄, 赵明斋. 华北平原地区玉米生产的气候适应性 分析[J]. 天津农业科学, 1981, (2): 17-24.
HAN X L, KONG Y Z, ZHAO M Z. Analysis of climatic adaptability of maize production in North China Plain [J]. Tianjin Agricultural Science, 1981, (2): 17-24.

- [21] 全国气象基本信息标准化技术委员会. 地面标准气候值统计方法:GB/T 34412-2017[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2017.
  Basic Information of Meteorology. Statistical method for surface standard climate normals:GB/T 34412-2017[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration, 2017.
- [22] 马树庆. 吉林省农业气候研究[M]. 北京: 气象出版社, 1996.
   MA S Q. Study on agro-climate of Jilin province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996.
- [23] 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.
  GUO J P, TIAN Z H, ZHANG J J. Forecasting models of heat index for corn in northeast China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 626-633.
- [24] 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.
  XU L L, LV H Q, FANG L. Effect of climate change on climate suitability of summer maize in Huang-Huai-Hai region [J]. Resources Science, 2014, 36(4): 782-787.
- [25] 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.
- [26] 魏瑞江,姚树然,王云秀.河北省主要农作物农业气象灾害灾损 评估方法[J].中国农业气象,2000,21(1):27-31.
  WEI R J, YAO S R, WANG Y X. Loss assessment of staple crops caused by major agrometeorological disasters in Hebei province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2000, 21(1):27-31.
- [27] 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):1-4,52.
  ZHONG Z Z, ZHAO J B, YU X C, et al. Calculation and analysis on water requirements of major crops in northern China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2000, 21(2):1-4,52.
- [28] 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麦-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.
  LIU Z J, YANG X G, WANG W F. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. IV. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in sub-humid warm-temperate irrigated wheat-maize agricultural area of Huang-Huai-Hai Plain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4):905-912.