

气候变化对河北省宁晋县夏玉米产量的影响

杨 丽,刘海军,唐晓培

(北京师范大学水科学研究院城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,北京 100875)

摘 要:利用 M-K 检验和 Sen 斜率对河北省宁晋县 1982—2018 年的气象数据和对应年份的玉米产量数据进行分析,并利用 HP 滤波法将夏玉米产量分离为气候产量和趋势产量,进而分析气候产量与气候变化的关系,筛选产量变化较大的年份,分析气象因子的变化特征,进而解释夏玉米生产主要的气象影响要素。结果表明:夏玉米种植季总日照时数、相对湿度以及风速呈显著下降趋势,下降幅度分别为 $3.76\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0.10\%\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,平均气温和最低气温呈显著上升趋势,上升幅度分别为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$;玉米实际产量和趋势产量均呈显著上升趋势,实际产量多年平均值为 $4\,997\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,气候产量变化范围为 $-1\,649\sim 932\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;分析典型高产年和低产年气候要素得出,降水不足,尤其是抽雄~成熟期降水不足,及播种~拔节期极端高温会造成玉米减产,如 1986 年和 1991 年抽雄~成熟期降水量比多年平均值少 32%和 43%,造成减产 56%和 29%,2009 年播种~拔节期(6 月 24—29 日)日最高气温为 40°C 左右,8 月 20 日以后,降水量达到了 207 mm,苗期过高的气温以及生育后期过多的降水也使得产量降低了 25%。玉米生育期稍微偏低的气温,尤其是拔节~成熟期偏低的气温以及充足的降水有利于玉米高产。

关键词:气候变化;气候产量;夏玉米;典型低产年;典型高产年

中图分类号:S162.5;S513 **文献标志码:**A

Effects of climate change on yield of summer maize
in Ningjin County of Hebei Province

YANG Li, LIU Haijun, TANG Xiaopei

(Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology,
College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The impact of climate factors on summer maize yield in typical years in plain area of Hebei Province, especially the impact of extreme climate factors, plays an important role in stable yield and high-yield management of summer maize. In this study, M-K test and Senslope were used to analyze the climate and yield data of summer maize growth period from 1982 to 2018 in Ningjin County of Hebei Province. The summer maize yield was separated into climatic yield and trend yield by using HP filter. Then the relationship between climatic yield and climate change was analyzed. The years with large yield changes were selected, and the main climate factors were revealed. The results showed that the total sunshine hours ($3.76\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$), relative humidity ($0.10\%\cdot\text{a}^{-1}$) and wind speed ($0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) in maize planting season decreased significantly, and the average temperature ($0.03^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$) and minimum temperature ($0.05^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$) increased significantly. The annual average of actual maize yield was $4\,997\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the range of climatic yield was $-1\,649\sim 932\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The actual yield and trend yield showed a significant upward trend. Analysis of the impact of climate factors on summer maize yield in typical high yield and low yield years indicated that insufficient precipitation, especially at tasseling-maturity period, and extreme high temperature at sowing-jointing period significantly affected maize yield. In 1986 and 1991, the precipitation from tasseling to maturity was 32% and 43% less than the annual average, resulting in 56% and 29% yield re-

duction.From June 24 to 29 of 2009 during sowing to jointing period, the daily maximum temperature was about 40℃. After August 20, the precipitation reached 207 mm. The high temperature at seedling stage and excessive precipitation at later growth stage also reduced the yield by 25%. In summary, the slightly lower temperature during maize growth period, especially at jointing-maturity period and sufficient precipitation were beneficial to maize yield.

Keywords: climatic yield; summer maize; typical low yield year; typical high yield year

在全球气候变化背景下,区域极端天气增多,极端高温、强降水、干旱等气象灾害频发^[1-2]。相较于长期的气候平均值变化,短期的极端天气事件对生态和人类活动的影响更为显著^[3-5]。气候变化以及极端气候,如气温升高、干旱、洪水等会显著影响小麦、甘蔗、棉花、菠萝等农作物产量^[6-9]。

玉米作为我国的主要粮食作物之一,2019 年我国玉米播种面积为 4 128.4 万公顷,其中河北省玉米播种面积为 340.82 万公顷,占全国总播种面积的 8.3%^[10]。关于气候变化以及极端气候对玉米产量的影响,已有学者进行了相关研究。Chen 等^[11]研究发现气温升高使得我国长江流域玉米减产,极端高温、极端干旱和强降水对玉米产量影响较大。Liu 等^[12]研究发现极端低温以及玉米开花和灌浆期降水较少会导致我国华北地区玉米减产。李崇瑞等^[13]研究了干旱对东北地区春玉米生长的影响,发现 5 月为干旱高发月份。Srivastava 等^[14]研究发现气温升高、尤其是最高气温升高使得印度东部玉米减产。Ahmad 等^[15]发现对于巴基斯坦的玉米种植,在温度升高和降水减少的气候背景下,玉米生产会受到负面影响。Ureta 等^[16]研究了气候变化对墨西哥玉米产量的影响,发现在雨养区,温度是玉米产量的主要影响因子,在灌溉区,降水是玉米产量的主要影响因子。

不同地区气候变化以及极端气候条件对玉米产量的影响不尽相同。国内外气候变化对作物产量影响的研究中,大多基于较大的空间尺度,对于县尺度的研究较少。宁晋县作为河北平原区最大的产粮县,其玉米产量在 2018 年达到 40.2 万吨,占河北省玉米总产量的 21%^[17]。因此研究影响该地玉米种植的气候要素,对指导当地玉米生产,减小极端天气对玉米产量的影响具有重要意义。在长时间尺度下,玉米产量除了受气候因素影响外,还受育种耕作水平等人为因素的影响,因此本文利用 HP 滤波法,将产量分离为由人为因素影响的产量和由气候因素影响的产量,以便更好地分析气候对玉米产量的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

河北省宁晋(37°38'N,114°555'E,海拔 30.1 m)

的气象数据从国家气象局气象信息中心获取,包括降水量、平均气温、最低气温、最高气温、平均相对湿度、日照时数和平均风速等,数据以日为单位,玉米产量数据从《河北农村统计年鉴》^[18]获取。气象和产量数据时间尺度均为 1982—2018 年。根据中国气象网的农业气象站数据资料 and 实际观察,总结研究区夏玉米的生育期情况,如表 1 所示。

表 1 宁晋县夏玉米生育期

Table 1 Growth period of summer maize in Ningjin			
生育期	播种~拔节	拔节~抽雄	抽雄~成熟
Growth period	Sowing~jointing	Jointing~tasseling	Tasseling~maturity
时间段	06-17—07-15	07-16—08-10	08-11—10-05
Time interval			

1.2 研究方法

1.2.1 参考作物蒸散量(ET_0) 利用 FAO56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量(ET_0),其只受气候因素影响,能够反映研究区的整体蒸散发能力^[19]。

1.2.2 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验和 Sen 斜率计算 Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数统计方法,不要求样本遵从一定的分布,少数异常值对检验结果基本没有影响,被广泛应用于数据的趋势检测^[20-21]。对于具有线性趋势的时间序列,可以用 Sen^[22]给出的简单非参数计算方法估计真实斜率。本文使用 Salmi 等^[23]基于 Excel 开发的 MAKESENS 1.0 软件进行 M-K 趋势检验和 Sen 斜率计算。

1.2.3 突变检验 利用 Mann-Kendall (M-K) 突变检验法来检验气象要素在研究时段内是否存在突变^[20],对于该检验方法得出的不确定的突变点,利用累计距平法和滑动 T 检验法对突变点进行校核^[24]。

1.2.4 HP 滤波法分解产量 将玉米实际产量(y)分解为由人为因素,即育种、机械水平等农业种植水平影响的趋势产量(y_t),由气候因素影响的气候产量(y_w),以及由随机因素影响的随机产量(Δy)。

玉米产量计算公式为:

$$y = y_t + y_w + \Delta y \tag{1}$$

随机产量无规律可循,且对产量影响较小,故可忽略不计,因此玉米产量计算公式可简化为:

$$y = y_i + y_w \tag{2}$$

Hodrick 等^[25]提出的 HP 滤波法类似一个高通滤波器,可以把时间序列看作是不同频率成分的叠加。利用 HP 滤波法可以将序列数据分离为高频成分和低频成分,在本研究中为气候产量和趋势产量。具有分离出的趋势产量无滞后性,序列的两端没有缺损等优点^[26]。

2 结果与分析

2.1 气象要素变化趋势

河北省宁晋县夏玉米种植时间为 6 月 17 日—10 月 5 日(表 1),1982—2018 年夏玉米生育期气象

因子的年际变化趋势如图 1 所示,其多年平均值和 Sen 斜率如表 2 所示。

1982—2008 年总降水量和总参考作物蒸散量多年平均值分别为 296 mm 和 454 mm,均呈不显著下降趋势。总日照时数、相对湿度以及风速多年平均值分别为 754 h、74.9%和 1.9 m·s⁻¹,均呈显著下降趋势,下降幅度分别为 3.76 h·a⁻¹、0.10%·a⁻¹和 0.01 m·s⁻¹·a⁻¹。平均气温、最高气温以及最低气温多年平均值分别为 24.2 ℃、30.1 ℃和 19.3 ℃,其中平均气温和最低气温呈显著上升趋势,上升幅度为 0.03 ℃·a⁻¹和 0.05 ℃·a⁻¹,最高气温呈不显著上升趋势。

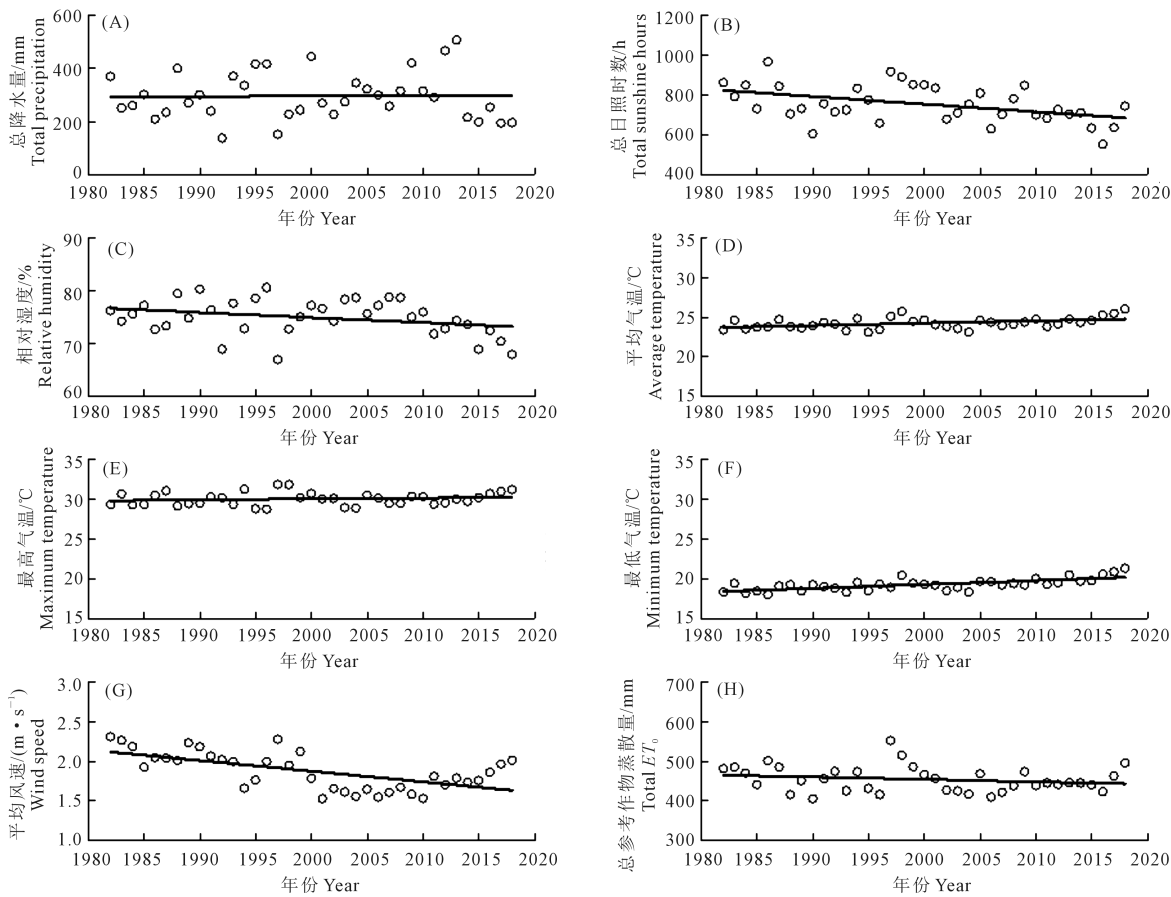


图 1 夏玉米生育期气候要素年际变化趋势

Fig.1 Interannual variation trends of climate factors in summer maize planting season

表 2 1982—2018 年夏玉米生育期气候要素的多年平均值和 Sen 斜率

Table 2 Perennial average values and Sen slope of climatic factors of summer maize growth period from 1982 to 2018

项目 Item	总降水量 Total precipitation /mm	总日照时数 Total sunshine hours /h	相对湿度 Relative humidity /%	平均气温 Average temperature/℃	最高气温 Maximum temperature /℃	最低气温 Minimum temperature /℃	平均风速 Average wind speed /(m·s ⁻¹)	总参考作物蒸散量 Total ET ₀ /mm
平均值 Average values	296	754	74.9	24.2	30.1	19.3	1.9	454
Sen 斜率 Sen slope	-0.15	-3.76 **	-0.10 *	0.03 **	0.01	0.05 ***	-0.01 ***	-0.63

注:“*”、“**”和“***”表示分别通过了 0.1、0.01 和 0.001 的显著性检验。
Note:“*”、“**”和“***”representing significant text of 0.1,0.01 and 0.001 levels, respectively.

对具有显著变化趋势的气象要素进行 M-K 突变检验(图 2),发现日照时数在 1990、2006、2007 年和 2009 年存在突变点,进一步利用累计距平法和滑动 T 检验法来判断突变点,发现 2009 年为日照时数突变发生年份;平均气温突变发生年份为 2015 年;最低气温的突变点为 2012 年,但并未通过 0.05 显著性检验,结合累计距平法和滑动 T 检验法,发现 2012 年不是最低气温的突变发生年份;根据图 2(d),平均风速突变发生年份为 1990 年。

2.2 夏玉米产量变化

将夏玉米的实际产量分离为趋势产量和气候产量,如图 3 所示。1982—2018 年,夏玉米的实际产量多年平均值为 $4\,997\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,总体呈显著上升趋势,上升幅度达到 $6.06\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。趋势产

量上升幅度达到 $7.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,尤其在 20 世纪 90 年代,随着水利设施完善、良种快速推广和施肥量增加,产量增速较快,进入 2010 年后,该区域的产量变化较小,说明目前的产量已经进入到了稳定时期。气候产量呈不显著下降趋势,但其波动较大,变化范围为 $-1\,649\sim 932\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明不同年份气候要素对玉米产量影响较大。

2.3 低产年气候要素对夏玉米产量的影响

选取夏玉米气候产量最低的 3 个年份,即 1986、1991 年和 2009 年为典型低产年,这 3 个年份气候产量分别为 $-1\,496$ 、 $-964\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $-1\,649\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,相对于对应年份的趋势产量分别降低了 56%、29%和 25%。典型低产年气候要素变化情况如图 4 所示。

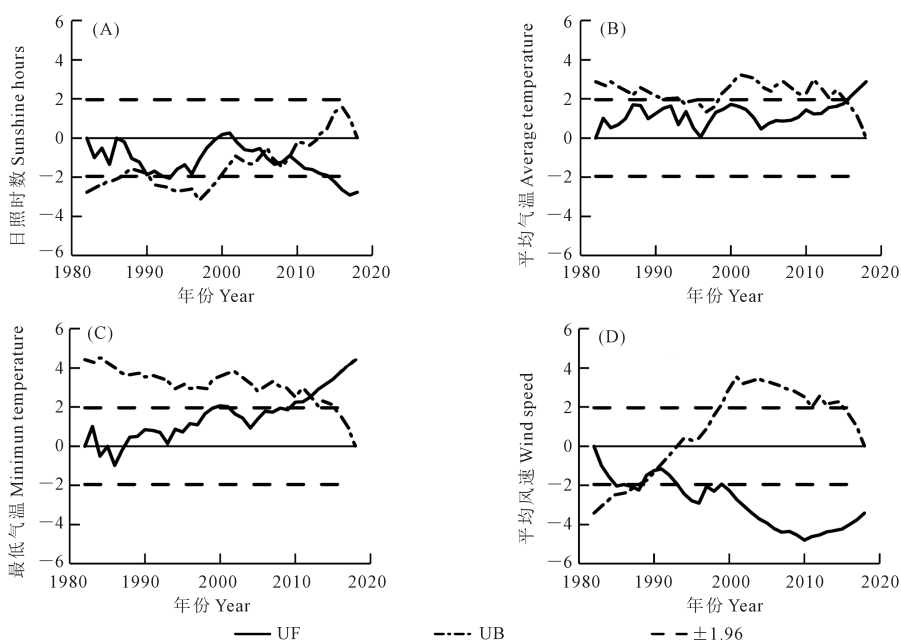


图 2 气象要素 M-K 突变检验
Fig.2 M-K mutation test of climate factors

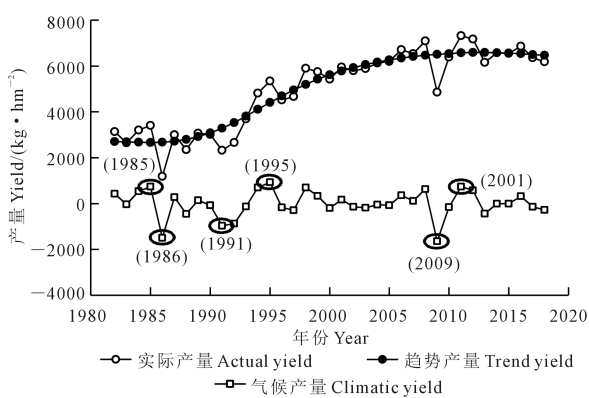


图 3 夏玉米实际产量、趋势产量以及气候产量年际变化
Fig.3 Interannual variation of actual yield, trend yield and climatic yield of summer maize

1986 年玉米生育期降水 210 mm(图 4),比玉米生育期多年平均降水量(296 mm)少 29%,日照时数 967 h(图 4),比多年平均值(754 h)多 28%,且该年玉米的每个生育期,降水均比多年平均值少,日照时数均比多年平均值多,播种~拔节期、拔节~抽雄期以及抽雄~成熟期降水分别比多年平均值少 20%、34%和 32%,日照时数分别比多年平均值多 30%、17%和 31%,较少的降水和较高的日照时数使得该年总 ET_0 比多年平均值多 10%。 ET_0 增加在一定程度上加剧了降水量较少的影响,使得玉米长期处于缺水状态,造成最终产量下降 56%。

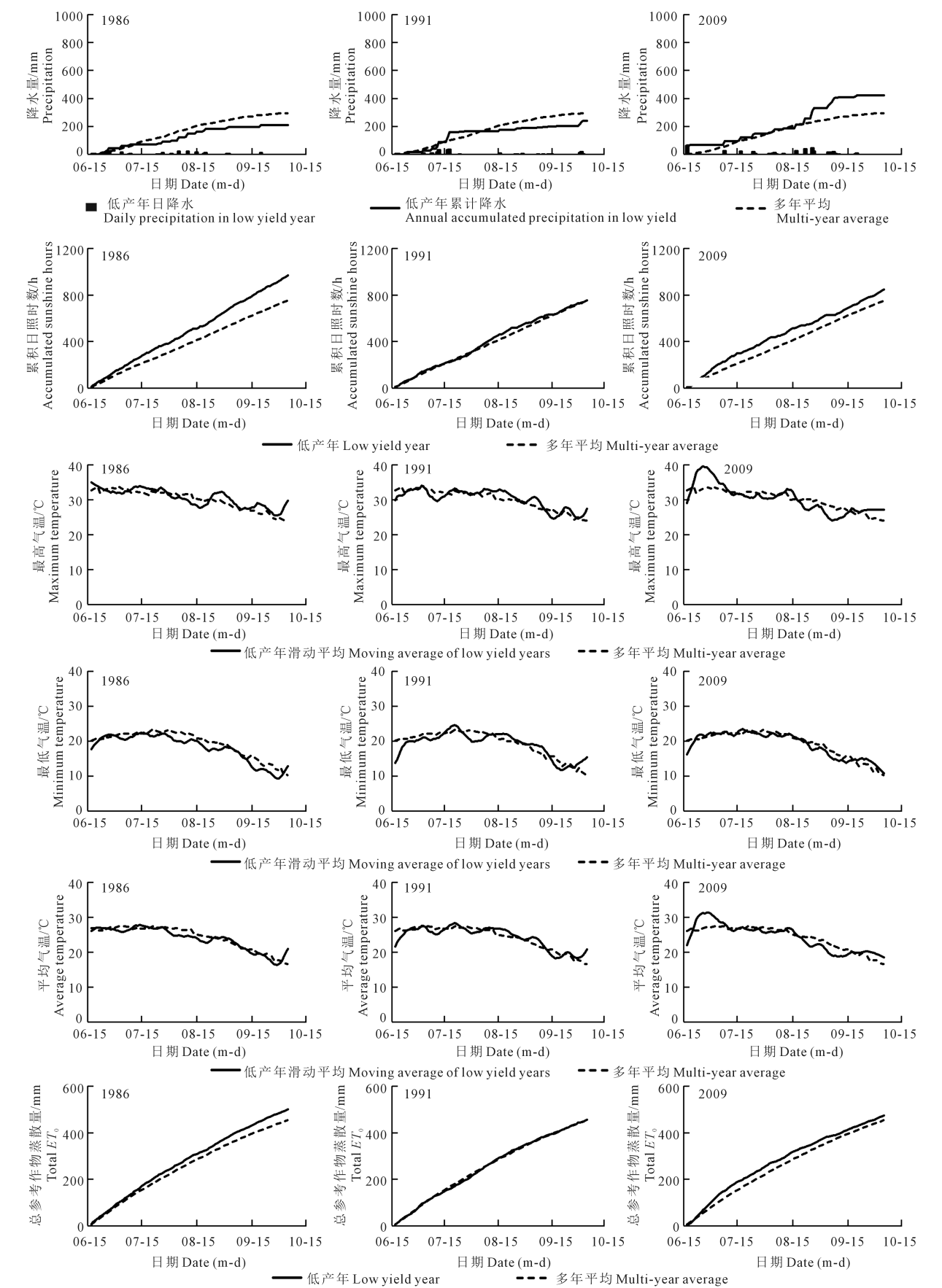


图 4 夏玉米典型低产年全生育期气候变化

Fig.4 Variation of climatic variables during the whole growth period of summer maize in typical low yield years

与 1986 年类似,1991 年降水量也较少,累积降水量为 239 mm(图 4),比多年平均降水量少 19%,尤其在玉米的抽雄~成熟期,降水量仅为 73 mm,比多年平均值(128 mm)少 43%。

2009 年日照时数为 849 h(图 4),比多年平均值多 13%,尤其在夏玉米的播种~拔节期,日照时数为 299 h,比多年平均值多 42%,平均每天日照时数比多年平均值多 3 h。由图 4 可知,2009 年在玉米播种~苗期,气温较高,最高气温和平均气温分别为 35.6℃ 和 28.7℃,比最高气温和平均气温的多年平均值(32.9℃ 和 26.9℃)分别高 2.7℃ 和 1.8℃。尤其在 6 月 24—29 日,日最高气温在 40℃ 左右。玉米播种~苗期,植株较为脆弱,极易受到高温胁迫。8 月 20 日以后,降水量达到了 207 mm,这时玉米处于灌浆期,较多的降水量使得空气湿度增加,易引起玉米丝黑穗病和灰色斑病等;同时较多的降水使得玉米根系层内的养分淋失到更深土层而不能利用,使得玉米易受到养分胁迫影响,因此病虫害增加和养分胁迫最终造成玉米减产。

2.4 高产年气候要素对夏玉米产量的影响

选取夏玉米气候产量最高的 3 个年份,即 1985、1995 年和 2001 年为典型高产年,这 3 个年份气候产量分别为 745、932 kg·hm⁻² 和 744 kg·hm⁻²,增产百分比分别为 28%、21% 和 11%。典型高产年气候要素变化情况如图 5 所示。

可以看出,3 个夏玉米高产年份的气象要素变化特点较为相似:(1)降水量接近或高于多年平均值,说明降水量充足,不是产量的限制因子;(2)气温要稍微低于多年平均值。1985 年夏玉米的抽雄~成熟期,日最高气温 26.4℃,比该时期多年平均值低 1.7℃,尤其在 9 月份,日最高气温 23.2℃,比多年平均值(26.8℃)低 3.6℃。1995 年夏玉米的拔节~抽雄期,最高气温、平均气温和最低气温分别比多年平均值低 2.5℃、2.0℃ 和 1.4℃,抽雄~成熟期,最高气温、平均气温和最低气温分别比多年平均值低 1.4℃、1.1℃ 和 0.6℃。2001 年夏玉米的拔节~抽雄期最高气温、平均气温和最低气温分别比多年平均值低 1.2℃、0.91℃ 和 0.34℃,抽雄~成熟期最高气温、平均气温和最低气温分别比多年平均值低 0.13℃、0.4℃ 和 0.42℃。较低的气温使得 ET_0 略低于多年平均值,与 ET_0 多年平均值相比,1985 年抽雄~成熟期 ET_0 减少 19 mm,1995 年拔节~抽雄期 ET_0 减少 12 mm,抽雄~成熟期 ET_0 减少 15 mm,2001 年拔节~抽雄期 ET_0 减少 2.9 mm。因此高产年份虽然降水量与多年平均值接近,但耗水量较少,使得作

物可利用的水分增加,从而对增产有利。

3 讨 论

气象数据分析表明,1982—2018 年玉米生育期内平均气温和最低气温呈显著上升趋势,最高气温上升趋势不显著,相关研究也表明,华北平原具有明显的气候变暖现象^[27-28];降水量呈不显著下降趋势,多年平均值为 296 mm, Liu 等^[29] 研究发现华北平原 1995—2000 年夏玉米平均耗水量为 423 mm, Zhang 等^[30] 研究发现华北平原夏玉米耗水量为 376~396 mm。可以看出河北省宁晋县玉米生育期多年平均降水(296 mm)不能满足玉米需水(376~423 mm),因此在缺水年份需要进行补灌;总日照时数、相对湿度以及风速均呈显著下降趋势,这与孟林等^[28] 和张红丽等^[31] 在华北地区的研究结论一致。说明研究区的气候变化趋势与较大空间尺度下的气候变化规律具有一致性。

1982—2018 年,夏玉米的实际产量和趋势产量均呈显著上升趋势,上升幅度分别为 6.06 kg·hm⁻²·a⁻¹ 和 7.70 kg·hm⁻²·a⁻¹。陆伟婷等^[32] 研究了河北省 1989—2010 年夏玉米产量变化,发现产量增长趋势为 19 kg·hm⁻²·a⁻¹,高于宁晋县 1982—2018 年夏玉米产量的增长趋势,这与本研究夏玉米产量在 20 世纪 90 年代增速较快,2010 年后,产量变化较小的规律相符。东北地区的玉米产量也呈现出类似的变化趋势^[33]。说明 20 世纪 90 年代,我国的玉米种植水平有显著提升。

研究区降水量对玉米产量的影响较大,如 1986 年和 1991 年玉米生育期降水较少,仅为 210 mm 和 239 mm,使得玉米气候产量分别降低了 1 496 kg·hm⁻² 和 964 kg·hm⁻²,降低幅度达到 29%~56%。其中,1991 年玉米抽雄~成熟期降水显著低于多年平均值,抽雄~成熟期需要大量的水分来进行干物质积累,降水量的降低使得干物质积累降低,从而导致玉米减产^[34]。相关研究表明,河北省夏玉米降水适宜度最低且变异系数最大,对干旱强度反应极为敏感^[35-36]。因此在降水量较少的年份建议对玉米进行补灌。相关研究表明,华北地区夏玉米全生育期耗水量在 400 mm 左右^[29-30],根据实际调研,研究区在玉米缺水年份会浇出苗水和拔节灌浆水来弥补降水的不足,灌水量不少于 50 mm,因此夏玉米降水量大于 350 mm 时基本不会造成水分胁迫。故选择降水量小于 350 mm 的年份进行气候要素与气象产量相关分析(图 6),发现在缺水年份,气候产量随着降水量的提高而提高,这与 Wang 等^[37]

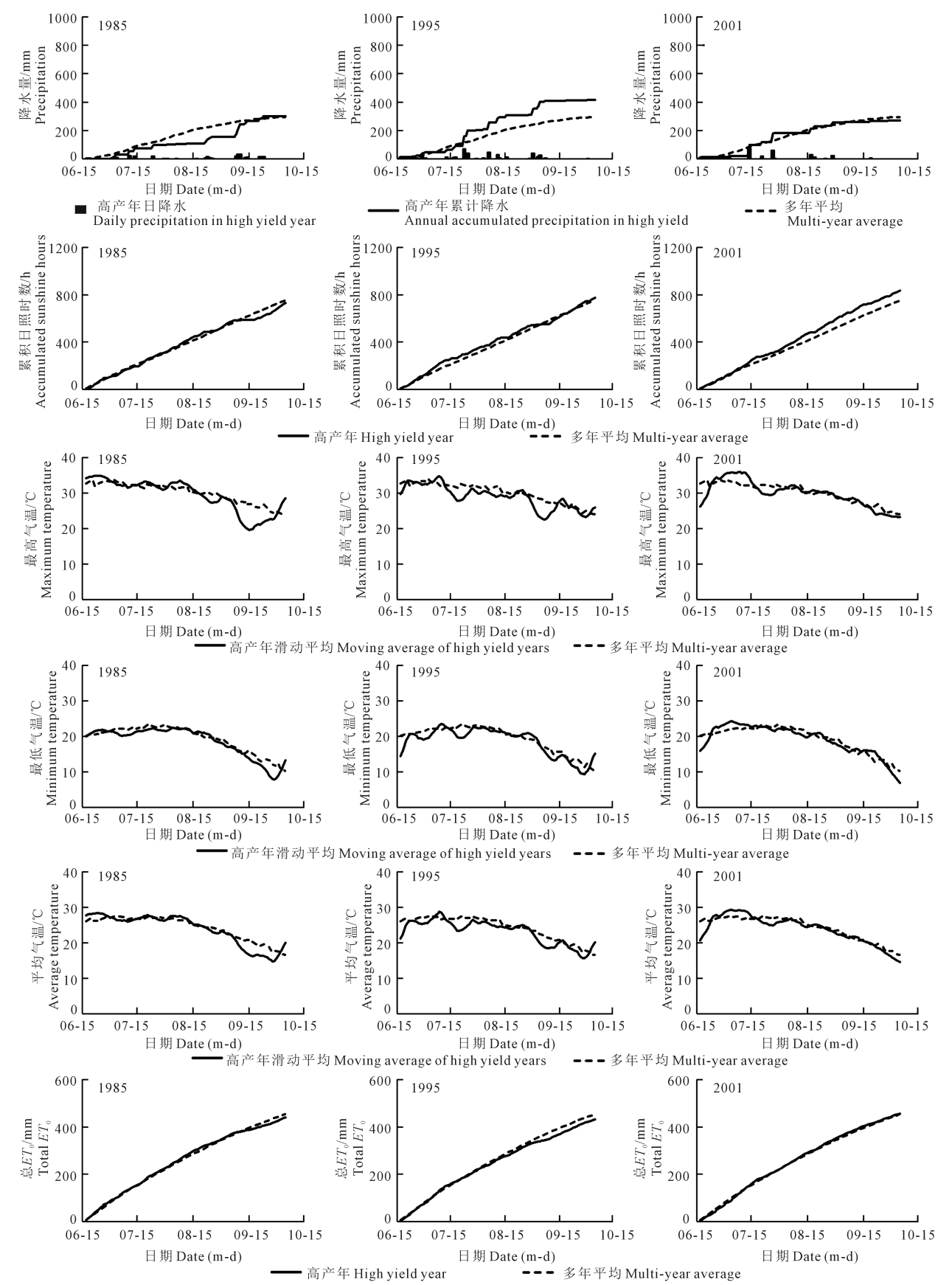


图 5 夏玉米典型高产年全生育期气候变化

Fig.5 Variation of climatic variables during the whole growth period of summer maize in typical high yield years

和徐昆等^[36]的研究结论一致。当玉米幼苗受到高温胁迫时,玉米幼苗的株高、主根长、单株鲜质量和根冠比均受到不同程度的影响,使得玉米减产^[38]。而在生育期降水过多使玉米受到涝灾影响,降低玉米产量^[39]。因此 2009 年玉米播种~拔节期的极端高温天气以及生长后期过多的降水造成玉米减产 25%。

玉米生育期气温的降低有利于玉米产量提高,尤其在夏玉米抽雄~成熟期,温度的降低使得夏玉米呼吸作用减弱,有利于有机物积累^[40],因此 1985、1995 年以及 2001 年较低的气温均使得玉米产量提高。曹永强等^[34]对河北省夏玉米产量的影响因子研究中,也发现 6—9 月份河北省最高、最低和平均气温均与产量呈负相关。因此研究区显著的气候变暖现象不利于玉米产量的提高,这与其他相关研究的结论一致^[41-42]。在夏玉米未受到水分胁迫时,即在夏玉米生育期降水量大于 350 mm 的年份,气候产量随着气温的升高而降低(图 7),其中日最高气温对气候产量的影响最为显著。这与 Wu 等^[42]和 Liu 等^[43]的研究结论一致。

本研究采用河北省宁晋县单站点的气象和夏玉米产量数据进行研究,基于县域尺度揭示了气候变化对河北省宁晋县夏玉米产量的影响,是对已有研究的有益补充。但单站点的数据不能充分地反映出区域和更大空间尺度的变化规律,基于多站点数据研究区域气候变化对夏玉米产量的影响是未来进一步研究的内容。

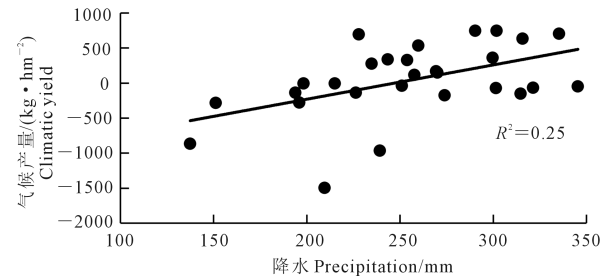


图 6 少雨年份降水量对气候产量的影响

Fig.6 Effect of precipitation on climatic yield in less rainy years

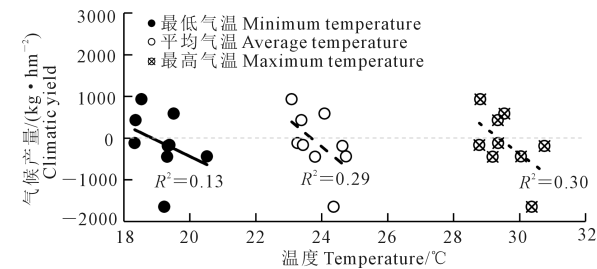


图 7 多雨年份气温对气候产量的影响

Fig.7 Effect of temperature on climatic yield in rainy years

4 结 论

1)1982—2018 年河北省宁晋县夏玉米生育期各气象要素变化趋势为:总降水量、最高气温和总参考作物蒸散量变化趋势不显著,总日照时数、相对湿度以及风速均呈显著下降趋势,平均气温和最低气温呈显著上升趋势。总降水量和总参考作物蒸散量多年平均值分别为 296 mm 和 454 mm。

2)1982—2018 年,夏玉米的实际产量多年平均值为 4 997 kg · hm⁻²,气候产量变化范围为-1 649~932 kg · hm⁻²,实际产量和趋势产量均呈显著上升趋势,气候产量呈不显著下降趋势。

3)夏玉米生育期降水不足、播种~拔节期极端高温、以及在少雨或高温的年份,日照时数较高,导致蒸腾较大,使得玉米受到干旱胁迫,影响玉米产量。

4)在降水充足的年份,夏玉米生育期气温降低,尤其是拔节~成熟期较低的气温有利于玉米增产。

致谢:非常感谢河北婴泊种业科技有限公司国家级种子试验站张文杰站长和河北省宁晋县农业局技术推广站站长高瑞波高级农艺师提供的数据帮助。

参 考 文 献:

[1] YU R, ZHAI P M, CHEN Y. Facing climate change-related extreme events in megacities of China in the context of 1.5℃ global warming [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2018, 30: 75-81.

[2] 许迪,李益农,龚时宏,等.气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究[J].农业工程学报,2019,35(14):79-89.

XU D, LI Y N, GONG S H, et al. Impacts of climate change on agricultural water management and its coping strategies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 79-89.

[3] WALSH J E, BALLINGER T J, EUSKIRCHEN E S, et al. Extreme weather and climate events in northern areas: a review[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 209: 103324.

[4] CHEN Y F, WU Z G, OKAMOTO K, et al. The impacts of climate change on crops in China: ARi cardian analysis[J]. Global and Planetary Change, 2013, 104: 61-74.

[5] 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.

[6] OSANAI Y, TISSUE D T, BANGE M P, et al. Interactive effects of elevated CO₂, temperature and extreme weather events on soil nitrogen and cotton productivity indicate increased variability of cotton production under future climate regimes[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 246: 343-353.

[7] MCGREE S, SCHREIDER S, KULESHOV Y, et al. On the use of

- mean and extreme climate indices to predict sugar yield in western Fiji [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2020, 29: 100271.
- [8] HAQUE S, AKBAR D, KINNEAR S. The variable impacts of extreme weather events on fruit production in subtropical Australia[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 262: 109050.
- [9] 宋妮,孙景生,王景雷,等.河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J].*应用生态学报*,2014,25(6):1693-1700.
- SONG N, SUN J S, WANG J L, et al. Temporal and spatial variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1693-1700.
- [10] 国家统计局.中国统计年鉴—2019[M].北京:中国统计出版社,2019.
- National Bureau of Statistics.China statistical yearbook-2019[M].Beijing:China Statistics Press,2019.
- [11] CHEN X X, WANG L C, NIU Z G, et al. The effects of projected climate change and extreme climate on maize and rice in the Yangtze River Basin, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 282/283: 107867.
- [12] LIU H J, LIU Y, ZHANG L W, et al. Quantifying extreme climatic conditions for maize production using RZWQM in Siping, northeast China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(2): 111-122.
- [13] 李崇瑞,游松财,武永峰.东北地区干旱特征与春玉米生长季干旱主导气象因子[J].*农业工程学报*,2020,36(19):97-106.
- LI C R, YOU S C, WU Y F. Drought characteristics and dominant meteorological factors driving drought in spring maize growing season in northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19): 97-106.
- [14] SRIVASTAVA R K, PANDA R K, CHAKRABORTY A. Assessment of climate change impact on maize yield and yield attributes under different climate change scenarios in eastern India[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106881.
- [15] AHMAD I, AHMAD B, BOOTE K, et al. Adaptation strategies for maize production under climate change for semi-arid environments [J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 115: 126040.
- [16] URETA C, GONZÁLEZ E J, ESPINOSA A, et al. Maize yield in Mexico under climate change [J]. *Agricultural Systems*, 2020, 177: 102697.
- [17] 河北省人民政府办公厅,河北省统计局.河北农村统计年鉴—2019[M].北京:中国统计出版社,2019.
- General Office of Hebei Provincial People's Government,Hebei Provincial Bureau of Statistics.Hebeirural statistical yearbook-2019[M]. Beijing:China Statistics Press,2019.
- [18] 河北省统计局.河北农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1995-2019.
- Statistics Bureau of Hebei Province. Hebei rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 1995-2019.
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [20] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [21] KENDALL M G. Rank correlation methods [M]. London: Charles Griffin,1975.
- [22] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63 (324): 1379-1389.
- [23] SALMI T, MAATA A, ANTILLA P, et al. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the excel template application MAKESENS [M]. Helsinki, Finland: Finnish Meteorological Institute, 2002.
- [24] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].第2版.北京:气象出版社,2007.
- WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Publishing House, 2007.
- [25] HODRICK R J, PRESCOTT E C. Postwar U.S business cycles: an empirical investigation [J]. *Journal of Money*,1997,29(1): 1-16.
- [26] 李心怡,张祎,赵艳霞,等.主要作物产量分离方法比较[J].*应用气象学报*,2020,31(1):74-82.
- LI X Y, ZHANG Y, ZHAO Y X, et al. Comparative study on main crop yield separation methods [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2020, 31(1): 74-82.
- [27] 谭方颖,王建林,宋迎波.华北平原近45年气候变化特征分析[J].*气象*,2010,36(5):40-45.
- TAN F Y, WANG J L, SONG Y B. Characteristics of climate change in the North China Plain for recent 45 years [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(5): 40-45.
- [28] 孟林,刘新建,郭定荣,等.华北平原夏玉米主要生育期对气候变化的响应[J].*中国农业气象*,2015,36(4):375-382.
- MENG L, LIU X J, WU D R, et al. Responses of summer maize main phenology to climate change in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 375-382.
- [29] LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109-120.
- [30] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097-1104.
- [31] 张红丽,张强,刘晓云.华北河套地区气候干燥度的影响因素研究[J].*气候变化研究进展*,2016,12(1):20-27.
- ZHANG H L, ZHANG Q, LIU X Y. Study on the main factors of aridity in Hetao area of north China [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(1): 20-27.
- [32] 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.
- [33] 李辉,姚凤梅,张佳华,等.东北地区玉米气候产量变化及其对气候变化的敏感性分析[J].*中国农业气象*,2014,35(4):423-428.
- LI H, YAO F M, ZHANG J H, et al. Analysis on climatic maize yield and its sensitivity to climate change in northeast China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(4): 423-428.
- [34] 曹永强,王菲,齐静威.河北省夏玉米生育期气象要素变化特征及相关性[J].*南水北调与水利科技*,2020,18(5):182-192.
- CAO Y Q, WANG F, QI J W. Characteristics and correlations of meteorological elements during growth period of summer maize in Hebei Province [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science &*

Technology, 2020, 18(5): 182-192.

[35] 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, 2011, 20(6): 1031-1036.

[36] 徐昆,朱秀芳,刘莹,等.气候变化下干旱对中国玉米产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(11):149-158.

XU K, ZHU X F, LIU Y, et al. Effects of drought on maize yield under climate change in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 149-158.

[37] WANG P J, WU D R, YANG J Y, et al. Summer maize growth under different precipitation years in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Agriculturaland Forest Meteorology, 2020, 285/286: 107927.

[38] 吴小娟,杨雯,解如琳,等.高温胁迫对玉米品种“郑单 958”幼苗生长及部分生理指标的影响[J].植物资源与环境学报,2018,27(2): 117-119.

WU X J, YANG W, JIE R L, et al. Effects of high temperature stress on growth and some physiological indexes of seedling of *Zea mays* “Zhengdan 958”[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2018, 27(2): 117-119.

[39] 白珊珊,万书勤,康跃虎,等.雨养条件下控失肥对夏玉米产量的影响[J].中国农村水利水电,2016,(9):46-49, 56.

BAI S S, WAN S Q, KANG Y H, et al. Effect of loss-control fertilizer on yield of winter wheat and summer maize under rain-fed condition[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016,(9): 46-49, 56.

[40] 胡海瑀,王靖.华北平原夏玉米各生育阶段农业气候要素变化特征[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):251-258,267.

HU X Y, WANG J. Analyses of variations in agro-climatic elements during summer maize growing season in North China Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 251-258, 267.

[41] XIAO D P, LIU D L, WANG B, et al. Climate change impact on yields and water use of wheat and maize in the North China Plain under future climate change scenarios[J]. Agricultural Water Management, 2020, 238: 106238.

[42] WU J Z, ZHANG J, GE Z M, et al. Impact of climate change on maize yield in China from 1979 to 2016[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(1): 289-299.

[43] LIU Y J, ZHANG J, QIN Y. How global warming alters future maize yield and water use efficiency in China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 160: 120229.

(上接第 112 页)

[23] JIN J, TANG C X, ROBERTSON A, et al. Increased microbial activity contributes to phosphorus immobilization in the rhizosphere of wheat under elevated CO₂[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 75: 292-299.

[24] HEIMANN M, REICHSTEIN M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. Nature, 2008, 451(7176): 289-292.

[25] LAMBERS H, SHANE M W, CRAMER M D, et al. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits[J]. Annals of Botany, 2006, 98(4): 693-713.

[26] 张彬.冬小麦对昼夜不同增温的地下生物学响应特征及其机制[D].南京:南京农业大学,2010.

ZHANG B. Belowground biological responses and their mechanisms of winter whera to three diurntal warming scenarios[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.

[27] 张明乾,韩证仿,陈金,等.夜间增温对冬小麦土壤微生物量碳氮及其活性的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1464-1470.

ZHANG M Q, HAN Z F, CHEN J, et al. Impact of nighttime warming on soil microbial biomass carbon/nitrogen and activity in main winter wheat cropping areas in China[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2012, 20(11): 1464-1470.

[28] YANG L M, YANG Z J, PENG Y Z, et al. Evaluating P availability influenced by warming and N deposition in a subtropical forest soil: a bioassay mesocosm experiment[J]. Plant and Soil, 2019, 444(1/2): 87-99.

[29] SCHIMEL J, BALSER T C, WALLENSTEIN M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function[J]. Ecology, 2007, 88(6): 1386-1394.

[30] 朱义族,李雅颖,韩继刚,等.水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展[J].应用生态学报,2019,30(12):4323-4332.

ZHU Y Z, LI Y Y, HAN J G, et al. Effects of changes in water status on soil microbes and their response mechanism:a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4323-4332.

[31] SCHRAMA M, BARDGETT R D. Grassland invasibility varies with drought effects on soil functioning[J]. Journal of Ecology, 2016, 104(5): 1250-1258.

[32] REN C J, CHEN J, LU X J, et al. Responses of soil total microbial biomass and community compositions to rainfall reductions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116: 4-10.

[33] LI G L, KIM S, PARK M, ET al. Short-term effects of experimental warming and precipitation manipulation on soil microbial biomass C and N, community substrate utilization patterns and community composition[J]. Pedosphere, 2017, 27(4): 714-724.

[34] ANDRESEN L C, MICHELSEN A, AMBUS P, et al. Belowground heathland responses after 2 years of combined warming,elevated CO₂ and summer drought[J]. Biogeochemistry, 2010, 101(1): 27-42.

[35] 杨连新,王云霞,朱建国,等.开放式空气中 CO₂ 浓度增高 (FACE) 对水稻生长和发育的影响[J].生态学报,2010,30(6):1573-1585.

YANG L X, WANG Y X, ZHU J G, et al. What have we learned from 10 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)experiments on rice growth and development[J]. Acta EcologicaSinica, 2010, 30(6): 1573-1585.

[36] SENEWEERA S P, GHANNOUM O, CONROY J P, et al. Changes in source-sink relations during development influence photosynthetic acclimation of rice to free air CO₂ enrichment (FACE)[J]. Functional Plant Biology, 2002, 29(8): 947-955.

[37] 沙霖楠.CO₂浓度和温度升高对水稻根系生长的影响[D].南京:南京林业大学,2015.

SHA L N. Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on the growth of rice root[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.