

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0108

曹永强,王菲,齐静威,等. 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(中英文), 2020, 18(5): 182-192. CAO Y Q, WANG F, QI J W, et al. 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. (in Chinese)

河北省夏玉米生育期气象要素变化特征及相关性

曹永强,王菲,齐静威

(辽宁师范大学 城市与环境学院,辽宁 大连 116029)

摘要:为深入探究气象要素与夏玉米产量的关系,根据逐日气象数据、逐年作物数据,采用气候倾向率、M-K 突变检验及相关性检验等方法对河北省夏玉米气象产量及相关气象要素变化特征进行分析,在此基础上探讨两者相关性及其作用程度。结果显示:河北省平均、最高、最低气温呈显著上升趋势,日照时数、降水量、相对湿度、风速则呈显著下降趋势;1960—2017年河北省夏玉米气象产量以每10年 -568 kg/hm^2 速度显著减少;气象产量与平均气温、最高气温、最低气温负相关,与日照时数、降水量、相对湿度、风速正相关;降水量、最低气温、风速是影响河北省夏玉米气象产量的关键气象要素,最高气温和日照时数对夏玉米气象产量影响较小。研究成果可为优化农业资源结构,促进地区农业可持续发展提供理论支撑。

关键词:气候变化;气象要素;夏玉米;气象产量;河北省

中图分类号:S161 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Characteristics and correlations of meteorological elements during growth period of summer maize in Hebei Province

CAO Yongqiang, WANG Fei, QI Jingwei

(School of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: In order to deeply explore the relationship between meteorological factors and summer maize yield, the annual yield data and related meteorological factors in Hebei Province were analyzed using different methods such as climate propensity rate, M-K mutation test, and correlation test. Based on this, the relevance and the degree of action of the two are discussed. The results showed that: the average, maximum and minimum temperatures in Hebei Province showed a significant upward trend, while the sunshine hours, precipitation, relative humidity, and wind speed showed a significant downward trend; from 1960 to 2017, the meteorological output of summer corn in Hebei Province was significantly reduced at -568 kg/hm^2 per 10 a; meteorological output is negatively related to average temperature, maximum temperature, minimum temperature, and is positively related to sunshine hours, precipitation, relative humidity, and wind speed; precipitation, minimum temperature and wind speed are the key factors affecting the meteorological output of summer maize in Hebei Province. The research results can provide theoretical support for optimizing the structure of agricultural resources and promoting the sustainable development of regional agriculture.

Key words: climate change; meteorological element; summer maize; meteorological output; Hebei Province

收稿日期:2019-06-03 修回日期:2019-09-22 网络出版时间:2020-06-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/KCMS/detail/13.1430.TV.20200623.1030.008.html

基金项目:国家自然科学基金(51579126;51779114);辽宁省“百千万人才工程”资助基金;大连市科技创新基金(2018J13SN116)

作者简介:曹永强(1972—),男,内蒙古乌盟丰镇人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:caoyongqiang@lnnu.edu.cn

以气候变暖为典型特征的全球气候变化关乎区域农业的可持续发展,气象要素非平稳变迁会影响地区的水热平衡及干湿状况,导致水分及热通量改变。同时农业是人类赖以生存的基本生活资料来源,由于气象要素发生变化,气候条件对粮食产能制约作用凸显^[1]。因此,研究各气象要素变化趋势,深入探究其对粮食产能的综合影响,对农业可持续与稳定发展意义重大。

为揭示气候变化对农作物生长的机理,国内外学者已进行了大量研究。江铭诺等^[2]采用 WO-FOST 模型探究气象条件差异对玉米潜在产量的影响,结果表明温度上升造成的增产效应远大于太阳辐射下降带来的减产效应。崔耀平等^[3]依托 ECHAM 模型模拟未来气候情景下中国夏玉米生长过程,发现温度的升高和降水的减少使得夏玉米主要物候期延长。杨宇^[4]创新采用经济-气候一体化模型,对黄淮海平原农作物生长的水热条件进行分析,发现 10.2 °C 是小麦单产达到峰值的最佳温度,630 mm 和 330 mm 分别是玉米和小麦高产的最佳降水量。Brown 等^[5]计算了全球变化评估模型 (GCAM) 对美国主要种植区玉米潜在生产力的影响,发现全球气温为 2.5 °C 时研究区玉米潜在产量减少了 6%。Trnka 等^[6]利用 ECAMON 模型研究欧洲玉米螟气候生态位的变化,发现在未来气候条件下,玉米将部分取代冬小麦、黑麦等传统谷物。

河北省是我国十三个粮食主产区之一,其玉米播种面积和产量均约占全国的 10%^[7],但因地处季风气候区,气候变率大,其产量严重不稳定。气候变化对作物产量影响区域差异性较大,目前研究区域多集中于东北、华北、华南地区^[8-10]。此外,前人研究仅对单一气象要素或仅从一个维度进行研究,这对较大区域分析较为可行,对省际及市县尺度研究缺乏一定程度针对性。故此,本文在已有研究成果的基础上,结合统计学分析方法和 GIS 软件,探究河北省夏玉米生育期内 7 种主要气象要素变化趋势,计算夏玉米气象产量,进而分析出各气象要素与夏玉米气象产量的相关关系,为农业部门提供参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

河北省位于我国华北平原中北部,113°27′~119°50′E;36°05′~42°40′N,东临渤海、北靠燕山、西倚太行山,总面积 18.85 万 km²,地势由西北向东南倾斜,属温带大陆性季风气候,雨热同期,多年平均气温 -1.5~15.2 °C,年无霜期 81~204 d,年均降

水量 484.5 mm,年日照时数 2 303.1 h。河北省粮食种植面积为 639.25 万 hm²,占总耕地面积的 98%^[11],主要粮食作物为冬小麦、夏玉米。

所需气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),包括逐日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、降水量、相对湿度、风速等,时间尺度为 1960—2017 年,因河北省夏玉米生育期为 6 月中旬至 9 月末^[12],故本文仅对每年的 6—9 月气候特征进行分析;夏玉米单产数据来源于 1960—2017 年《中国统计年鉴》;各市玉米播种面积、总产量数据选自 1994—2016 年《河北省经济统计年鉴》,单产数据为总产量与播种面积的比值,对于不完整的数据进行插补。为保证空间插值精度,在选取 18 个省内站点的同时,增加了大同、五台山、安阳、北京和天津等 5 个省外站点,共计 23 个站点。河北省地形特征及站点分布见图 1。

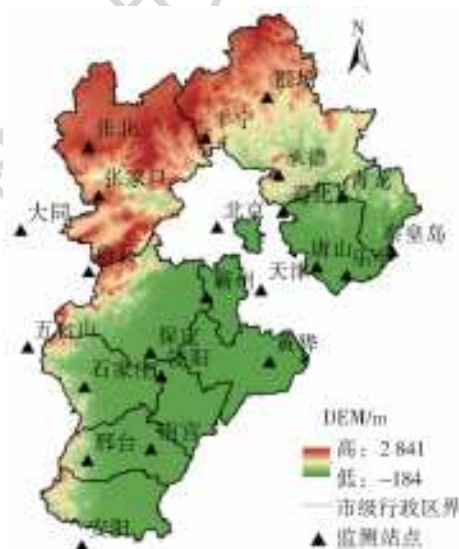


图 1 站点分布

Fig. 1 The distribution of stations

1.2 研究方法

1.2.1 趋势分析

运用气候倾向率^[13]描述河北省 1960—2017 年气象要素的变化趋势及特征。

曼-肯德尔法是一种非参数统计检验的气候诊断与预测技术。该方法借助 Matlab 软件的程序编写对序列数据进行计算,得到 UF 和 UB 两条曲线,并用于检验序列的变化趋势^[14]。若 UF/UB>0,则序列呈上升趋势;若 UF/UB<0,则序列呈下降趋势。当 UF 和 UB 两条曲线出现交点时,且交点在临界值之间则表示该时刻为突变开始的时刻^[15]。运用 M-K 检验法对河北省 7 个主要气象要素 57 年的时间变化特征进行分析,可清晰地判断出各气象要素的趋势变化程度及有无突变产生。

1.2.2 产量模拟

夏玉米的实际产量(Y)可分为趋势产量(Y_t)、气象产量(Y_w)和随机误差(ϵ)^[15]。趋势产量由社会技术发展水平决定,气象产量受气象因素影响,随机误差一般忽略不计。在分析时,只研究气象因素对玉米产量造成影响的气象产量部分,即

$$Y = Y_t + Y_w + \epsilon \quad (1)$$

当 $\epsilon = 0$ 时,气象产量为

$$Y_w = Y - Y_t \quad (2)$$

直线滑动平均法将线性回归模型与滑动平均相结合,操作便捷,运算简单^[16],是进行气象产量分类技术的基础方法。设某阶段夏玉米产量的线性趋势方程为

$$Y_i = a_i + b_i t \quad (3)$$

式中: i 为方程个数, $i = n - k + 1$; n 为样本序列个数; t 为年份序列号; k 为步长,当 k 足够大时,趋势产量才足以消除短周期波动的影响,一般 k 值可取 10 a 或更长,本文取滑动步长 11 a^[17]。经滑动平均后,序列中短于 11 a 的波动幅度被大大削弱,得到趋势产量 Y_t 变化趋势,同时根据式(2)可分离出气象产量 Y_w 。

1.2.3 相关性分析

回归方程解释率 R^2 代表气象要素对气象产量的决定系数,用此方法解释气象要素对河北省夏玉米气象产量的贡献率^[18]。 R^2 越接近 1,表明解释率越高,对气象产量变异的影响越大。

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - y_{avg})(x_i - x_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{avg})^2} \quad (4)$$

式中: y_i 、 x_i 分别为第 i 年的气象产量、气象要素; y_{avg} 、 x_{avg} 分别为气象产量、气象要素 n 年的平均值。

相关分析是确定两个或多个变量之间关系及其密切程度的方法^[19],相关系数 K 表示变量间相关

程度,取值范围为 $[-1, 1]$,在通常情况下,实验结果 $P < 0.05$ 称数据达到显著水平; $P < 0.01$ 称数据达到极显著水平。采用 SPSS 软件对河北省近 57 a 的夏玉米产量与气象因子进行相关分析。

反距离权重法(IDW)是一种常用而又简单的插值方法,该方法假定气象因子数值不存在潜在的全局趋势,只用局部因子就能够很好地预估未知值,相对于传统插值方法精度较高^[20]。利用反距离权重插值法借助 GIS 平台绘制河北省各气象要素对气象产量解释率 R^2 的空间分布。

2 结果与分析

2.1 夏玉米生育期内气象要素变化趋势

将河北省 23 个监测站点 1960—2017 年 6—9 月逐日气象数据进行平均,得到逐年平均气温(平均、最高、最低气温)、降水量、相对湿度和风速资料,日照时数数据则为逐年 6—9 月日照时数的总和,以此探究近 60 年河北省气候变化趋势。

2.1.1 平均、最高、最低气温变化趋势

玉米生育期适宜温度为 $25 \sim 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[21],通过对 1960—2017 年河北省平均气温(图 2)变化趋势分析发现,近 60 年平均气温均值为 $21.9 \text{ }^\circ\text{C}$,略低于夏玉米生长期所需温度。平均气温(图 2)、最高气温(图 3)和最低气温(图 4)总体呈上升趋势,但增高幅度明显不同。近 60 年平均气温(图 2(a))以每 10 年 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 速度变化,大致趋同于全国年平均气温每 10 年 $0.25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的上升幅度^[22]。在 M-K 突变检验(图 2(a))中,由平均气温 UF 曲线可见,自 20 世纪 60 年代以来,平均气温呈下降趋势,90 年代有明显增暖趋势,21 世纪初这一增暖趋势超过显著性水平 0.05 临界线,表明河北省平均气温增暖趋势十分显著。同时结合 UF 和 UB 曲线交点位置可得河北省 20 世纪 90 年代增暖是突变现象。

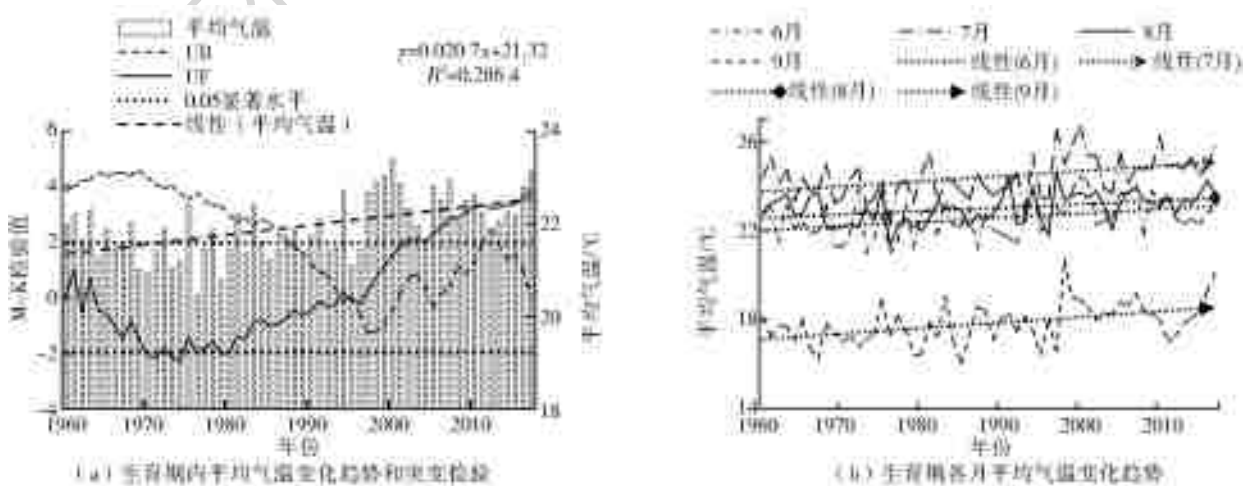


图 2 生育期内平均气温变化趋势和突变检验(a)、生育期各月平均气温变化趋势(b)

Fig. 2 Trend and mutation test of average temperature during the growth period (a), Trend of monthly average temperature during the growth period (b)

最高气温(图 3(a))以每 10 年 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率上升,远低于最低气温(图 4(a))每 10 年 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的上升速率,这与姜丽霞等^[23]研究结果一致,夜间增温较多,白天增温较少,气温日较差逐渐减小。夏玉米生育期内各月气温(平均、最高、最低气温)均呈上升趋势(图 2(b)、3(b)、4(b)),与平均气温变化趋势一致。最高气温 UF 和 UB 曲线有 3 个交点(图 3(a)),分别在 1997、2011 和 2013 年,分析 UF 曲线

可知,最高气温从 20 世纪 60 年代末出现下降趋势,直到 20 世纪 90 年代末出现回升。由此可见,1997 年是最高气温的突变年。最低气温 UF 和 UB 曲线交于 1992 年(图 4(a))且交点在临界值之间,说明最低气温在 1992 年发生突变。综合 M-K 检验分析可知,河北省 1960—2017 年气温(平均、最高、最低气温)在 20 世纪 90 年代发生突变,出现异常增暖现象,这与李春强等^[24]研究结果一致。

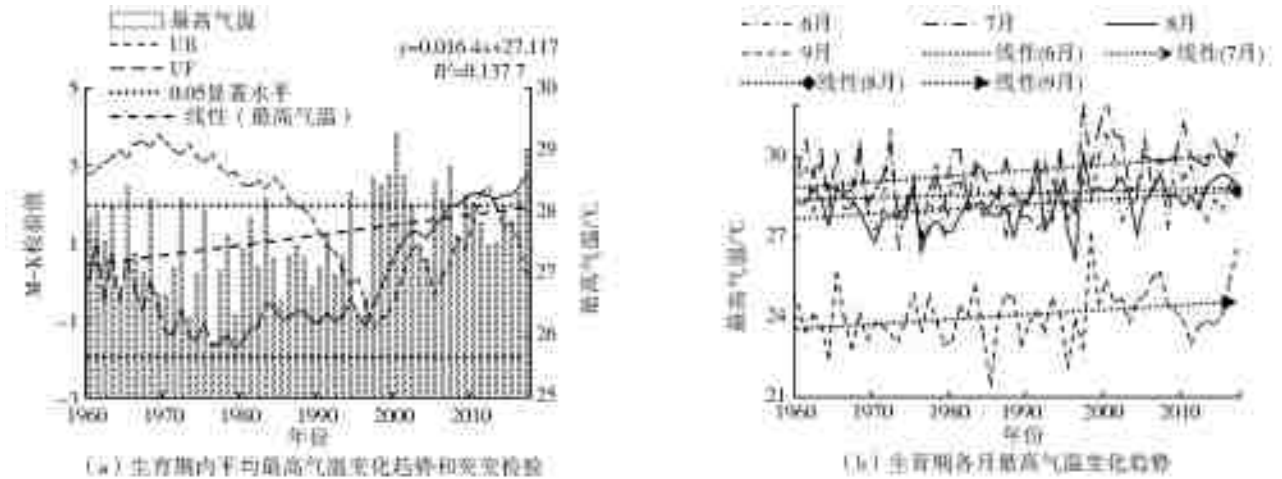


图 3 生育期内平均最高气温变化趋势和突变检验(a)、生育期各月最高气温变化趋势(b)

Fig. 3 Trend and mutation test of average maximum temperature during the growth period (a), Trend of monthly maximum temperature during the growth period (b)

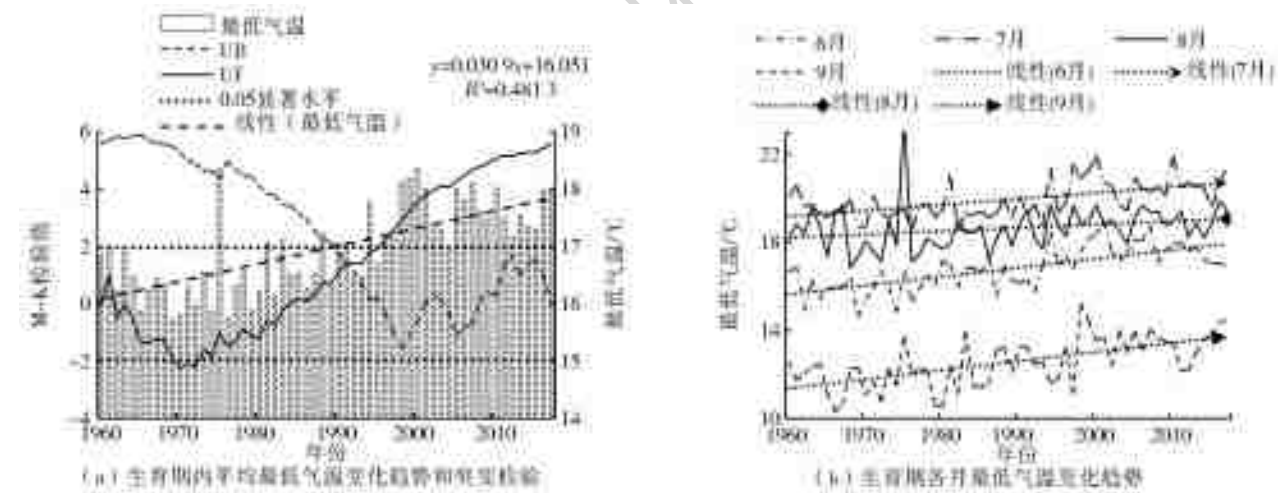


图 4 生育期内平均最低气温变化趋势和突变检验(a)、生育期各月最低气温变化趋势(b)

Fig. 4 Trend and mutation test of average minimum temperature during the growth period (a), Trend of monthly minimum temperature during the growth period (b)

2.1.2 日照时数、降水量的变化趋势

日照时数是作物获得光照时间长短的标志,是太阳辐射最直观的表现^[25],其年际变化趋势见图 5(a)。由图可知:1960—2017 年 6—9 月河北省日照时数为 740.7~1 058 h,年平均日照时数为 911.7 h;峰值分别出现在 1960 年(1 032.3 h)、1975 年(1 031.4 h)、1990 年(972.2 h)和 2004 年(1 058.0 h),形成大致以 15 a 为周期的起伏。王永波等^[26]认为任一气候系统都有个慢变的气候平均值,Rasmus-

son 等^[27]将 30 a 以上慢变平均值定义为“气候基本态”,年际和年代际变化都是在此背景下发生的快变过程。这表明河北省日照时数以年际快变为主。其中,日照时数回升最明显的阶段为 2001—2004 年,2004 年达到日照时数的最高峰,这与国际上普遍认为“自 20 世纪 80 年代末以来,人们观察到了一种普遍的光明”一致^[28]。整体上看,1960—2017 年日照时数以每 10 年 12.057 h 的速度显著减少,2017 年比 1960 年减少了 68.725 h ,年均减少 1.18 h ,且生

育期内每月平均日照时数均为下降趋势(图 5(b)), 该趋势与 Stanhill 等^[29]学者提出的“全球变暗”效应一致。经 M-K 突变检验(图 5(a))可得, UF 和 UB 曲线在 1997 年出现交点, 但交点并未在两条临界线之间, 说明玉米全生育期内日照时数未发生明显突变, 1997 年可能是个噪声点。

玉米属于喜温喜水作物, 全生育期内最适宜降水量为 300~400 mm^[30]。由图 6(a)可知, 河北省 6—9 月降水量为 241.36~637.68 mm, 平均降水量为 454.79 mm。1960—2017 年降水量以每 10 年

40.27 mm 的显著水平下降, 58 a 间降水减少了 221.46 mm。这与高霞等^[31]认为河北省主要降水区降水量显著减少结论一致。图 6(b)显示, 夏玉米生育期中 6 月和 9 月降水量呈缓慢上升趋势, 7、8 月降水量呈显著上升状态。经 M-K 突变检验可得, 玉米全生育期降水量波动复杂无明显突变。综上分析: 1960—2017 年 6—9 月河北省气温(平均、最高、最低气温)呈现上升趋势而增暖显著, 降水量则呈显著下降趋势, 说明河北省气候继续朝“暖干”方向发展。这与王长燕等^[32]学者研究结果一致。

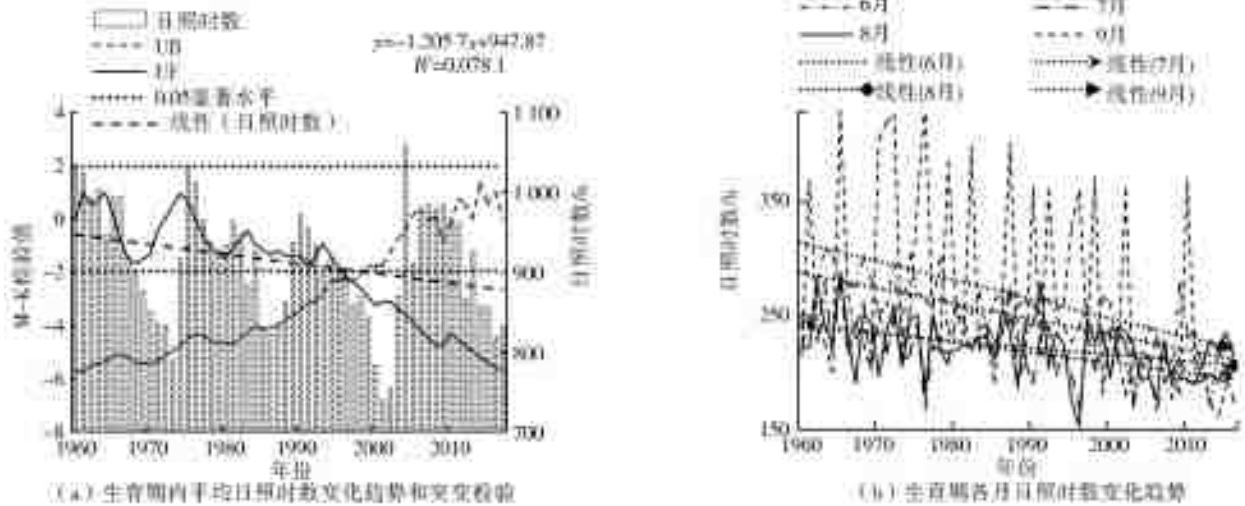


图 5 生育期内平均日照时数变化趋势和突变检验(a)、生育期各月日照时数变化趋势(b)

Fig. 5 Trend and mutation test of average sunshine hours during the growth period (a), Trend of a monthly sunshine hour during the growth period (b)

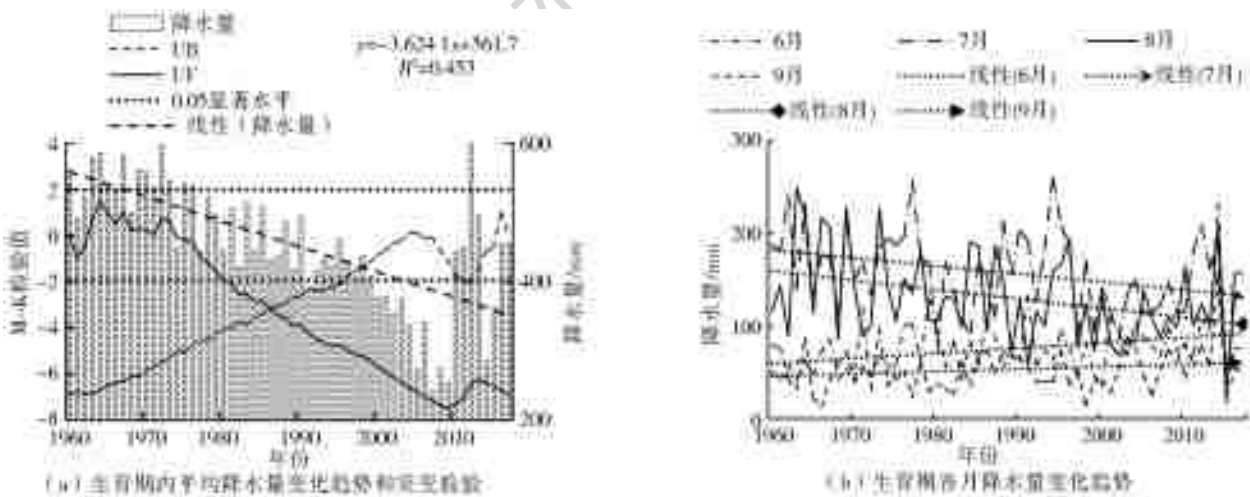


图 6 生育期内平均降水量变化趋势和突变检验(a)、生育期各月降水量变化趋势(b)

Fig. 6 Trend and mutation test of average precipitation during the growth period (a), Trend of monthly precipitation during the growth period (b)

2.1.3 相对湿度、风速的变化趋势

适宜的相对湿度和风速对改善农田环境具有重要意义。1960—2017 年 6—9 月, 河北省相对湿度以每 10 年 0.489% 的速率下降(图 7(a)), 2017 年比 1960 年相对湿度下降了 2.787%。最大波动范围在 1972—1973 年, 分别出现相对湿度最小值(63.47%)

和最大值(77.67%)。同时经对比河北省水旱灾害发生情况发现, 20 世纪 70 年代的旱灾成灾率高达 57.72%, 为近 60 年最高^[33]。由图 7(b)可知: 1960—2017 年, 河北省 6 月平均相对湿度呈上升趋势, 7、8、9 月相对湿度则为减少趋势; 但因 6 月相对湿度的上升幅度远远小于 7、8、9 月的下降趋势, 故夏玉

米生育期内相对湿度整体表现出减少状态。分析UF曲线可知,自20世纪90年代以来,相对湿度有一定下降趋势,在20世纪初下降趋势有所增强,且在1991年发生突变。这可能与20世纪90年代爆发的厄尔尼诺现象导致气候异常有关。

1960—2017年河北省风速以每10年0.063 m/s极显著水平下降(图8(a)),2017年风速比1960年下降了0.359 m/s,58年间出现了两次极高值,分别在1972年(2.878 m/s)和2013年(2.894 m/s)。这与阎访等^[34]对石家庄地区风速研究结果一致,1972年为平均年大风日数峰值。据统计2013年河北省夏季共出现大风208个站次,为近年来大风站

次最多的年份。由图8(b)可知,1960—2017年河北省6、7月平均风速呈减小趋势,其中,尤以6月风速减少趋势明显,8、9月平均风速呈不明显增大趋势,但总体上夏玉米生育期内风速呈减少状态。对风速UF曲线(图8(a))分析可知,自20世纪80年代以来风速呈减小趋势,尤其在1986年至今风速减小趋势显著性极大增强,表明河北省风速的减少趋势十分明显,这与赵宗慈等^[35]对中国风速的研究结果一致。同时根据UF和UK曲线交点位置可知,河北省风速在1981年发生突变,1982—2017年比突变前的1960—1981年平均风速下降了0.28 m/s。

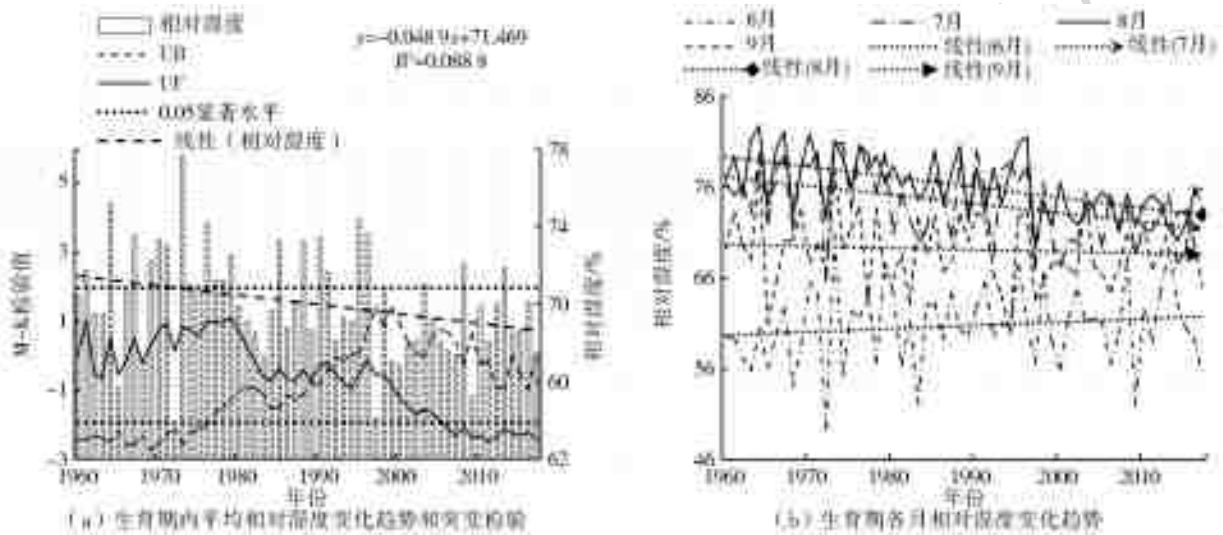


图7 生育期内平均相对湿度变化趋势和突变检验(a)、生育期各月相对湿度变化趋势(b)

Fig. 7 Trend and mutation test of average relative humidity during the growth period (a), Trend of monthly relative humidity during the growth period (b)

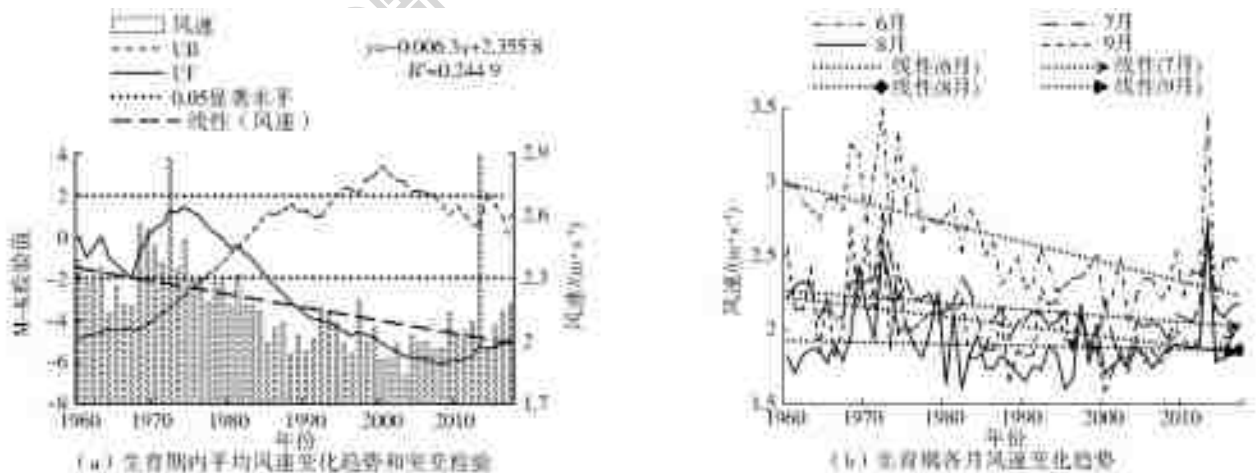


图8 生育期内平均风速变化趋势和突变检验(a)、生育期各月风速变化趋势(b)

Fig. 8 Trend and mutation test of average wind speed during the growth period (a), Trend of monthly wind speed during the growth period (b)

2.2 夏玉米气象产量变化趋势分析

夏玉米气象产量年际变化趋势见图9。分析可得1960—2017年河北省夏玉米气象产量整体呈下降趋势,大体经历了三个阶段:第一阶段为平缓下降

阶段(1960—1987年),玉米气象产量波动较小,以每10年1119.6 kg/hm²的速率减少;第二阶段为剧烈变化阶段(1988—2010年),1988—1996年为高速增产状态,1998—2010年为快速减产状态,起伏

变化大;第三阶段为稳定增长阶段(2011—2017 年),气象产量保持中高速增长,增长速率每 10 年为 2 402.3 kg/hm²。气象产量峰值出现在 1998 年,约为 374.5 kg/hm²;最低值为-4 343.3 kg/hm²,出现在 2010 年。分析发现:1988—2010 年河北省气象要素波动较大,气温在 20 世纪 90 年代发生突变,出现异常增暖现象;日照时数、风速高于多年平均值;而相对湿度、降水量则较常年偏少。由此可知,气象要素的不平稳变化是造成气象产量发生波动的主要原因。

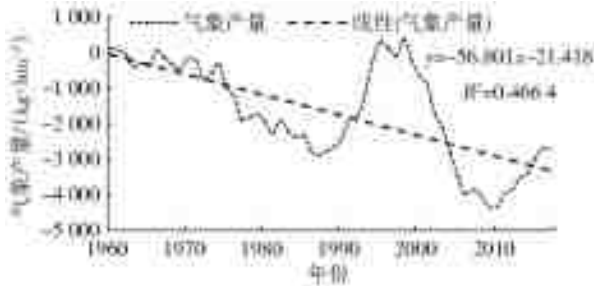


图 9 河北省夏玉米气象产量

Fig. 9 Meteorological production of summer maize in Hebei Province

2.3 气象要素对产量影响的时间分析

为探究气象产量与气象要素的相关性,借助

表 1 1960—2017 年河北省夏玉米气象产量和气象因子的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient of meteorological yield and meteorological factors of summer maize in Hebei Province, from 1960 to 2017

气象产量	平均气温	最高气温	最低气温	风速	相对湿度	日照时数	降水量
Pearson 相关性	-0.230	-0.150	-0.344**	0.301*	0.219	0.073	0.496**
Sig(双侧)	0.083	0.264	0.008	0.022	0.099	0.584	0

注: * 表示通过 0.05 显著性检验; ** 表示通过 0.01 极显著性检验。

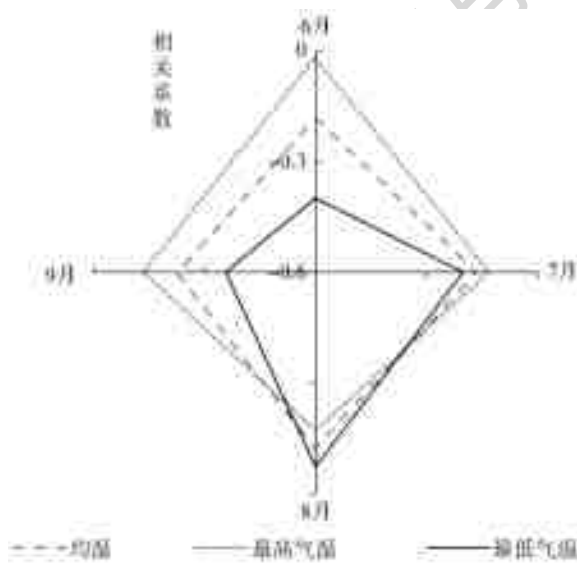


图 10 6—9 月平均、最高、最低气温与气象产量相关性

Fig. 10 Correlation between mean, maximum, minimum temperature and meteorological output

2.3.2 日照时数、降水量与产量的关系

通过对夏玉米生育期各月日照时数、降水量与

SPSS 软件,对夏玉米生育期 6—9 月气象要素平均值和气象产量的相关性进行分析,结果见表 1,可以看出:降水量和最低气温对产量影响最大,相关系数达到极显著水平;其次为风速、平均气温和相对湿度,相关系数为显著水平;而最高气温和日照时数则与气象产量关系不大。

2.3.1 平均、最高、最低气温与产量的关系

1960—2017 年夏玉米生育期各月平均、最高、最低气温与气象产量的相关分析见图 10,分析可知:6—9 月河北省气温(平均、最高、最低)与夏玉米气象产量均呈负相关,其中,平均气温和最高气温对玉米气象产量的影响较小,相关系数在-0.23~0 波动,这可能与近 60 年河北省平均与最高气温虽处于增温状态但年际变化较平缓有关^[36];而最低气温对气象产量影响较大,尤其在 6 月玉米播种期和 9 月成熟期,夜间增温快,使得玉米夜间呼吸增强,不利于营养物质积累^[37],气象产量减产。7 月和 8 月相关性较小,可能是由于该月份夜间最低温与其他月份相比较,对气象产量的制约性较小。

气象产量相关分析(图 11)可得,6—9 月河北省日照时数与气象产量均呈正相关,其中,6、7、8 月相关性通过了极显著水平检验。结合图 5 分析可知,1960—2017 年河北省平均及各月日照时数均呈明显减少趋势,导致玉米光合生产率下降,有机质积累减少,从而造成气象产量下降。这与曹巧莲等^[38]对临汾市日照时数研究结果一致。1960—2017 年降水量与气象产量的相关系数在 6 月为负相关,7、8、9 月为正相关,6、7、9 月通过了显著性检验。因 6 月和 9 月河北省降雨量呈上升趋势,7 月和 8 月降雨量为减少趋势,故在 6、7、8 月降雨量对气象产量为负影响,9 月为正影响。6 月为玉米播种-幼苗期,需水量较小,仅为生育期平均日需水强度的 57%^[39],降水量的增加易出现坏芽现象;9 月为玉米灌浆-收获期,由于夏玉米灌浆时间长,干物质积累量大,需要大量的水分,这时雨量的增加有利于高产;7 月和 8 月为玉米出苗-拔节-抽雄期,是玉米需水量最大的阶段,降水量的减少加剧了气象产量的降低。

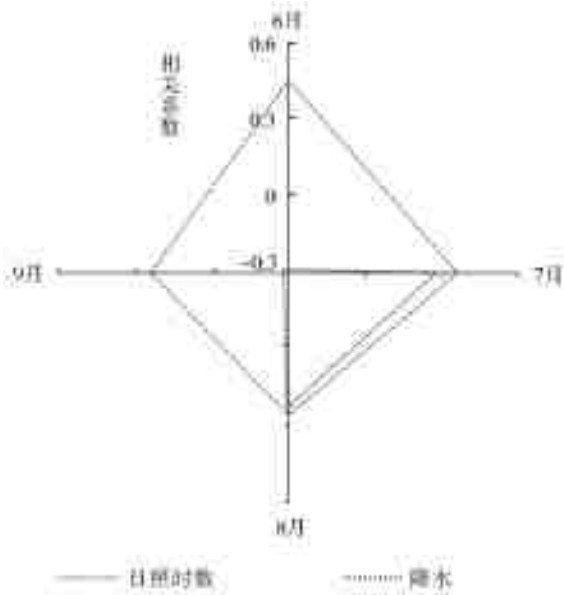


图 11 6—9 月日照时数、降水量与气象产量相关性
Fig. 11 Correlation between sunshine hours, precipitation and meteorological output

2.3.3 相对湿度、风速与产量的关系

夏玉米生育期各月相对湿度、风速与气象产量的相关分析见图 12。分析可得：相对湿度与气象产量相关系数在 6 月和 9 月呈负相关，7、8 月为正相关。结合图 7 可知，6 月相对湿度为增加趋势，7、8、9 月为减少趋势，故 6、7、8 月相对湿度的变化均造成气象产量的减产，9 月造成气象产量的增产。相关系数绝对值在 0.023~0.421，浮动较高，说明相对湿度对气象产量影响波动较大。7、8 月相关性分别通过显著水平和极显著水平检验。夏玉米 6 月出苗期所需的最适宜相对湿度为 70%^[40]，相对湿度增大超过了出苗期的需要，引起气象产量的下降。7、8 月为玉米出苗-拔节-抽雄阶段，玉米耗水量大，相对湿度的减少不能满足玉米快速生长需要，从而减少气象产量。9 月为玉米收获期，相对湿度的减少降低了玉米的病虫害发病率，有利于气象产量增产^[41]。风速与气象产量的相关系数在 6—9 月均为正相关，6、9 月分别通过了极显著性和显著性检验。同时结合图 8 可知，6—9 月风速均呈减小趋势，因此在夏玉米生育期各月风速的变化皆造成气象产量的下降。

综上所述：在气候变化的大背景下，河北省夏玉米生育期内气温呈上升趋势；日照、降水量、湿度、风速皆呈下降趋势。降水量、最低气温和风速是影响河北省夏玉米气象产量的关键气象要素，其次是平均气温、相对湿度、最高气温和日照时数。其中，降水对气象产量的影响最大。6 月为夏玉米播种期，主要受最低气温、日照时数、降水量、风速的影响，对

夏玉米气象产量表现为负贡献率。夜间最低气温的升高使得气温日较差减小，不利于播种；风速和日照时数的减少使得幼苗无法强壮成长，存活率降低；降水量的增多易产生播种后烂芽现象。7 月为夏玉米出苗-拔节期，其主要影响要素为日照时数、降水量和相对湿度，该 3 种气象要素的减少可能会引起玉米光合生产率下降，有机质积累减少，同时需水量不足造成气象产量的减产；8 月为夏玉米抽雄期，主要受日照时数和相对湿度影响，其变化原因与 7 月一致。9 月为夏玉米灌浆-成熟期，主要影响因素为最低气温、降水量和风速，该阶段应注重水肥管理，保证水分供给，必要时进行灌溉，同时加强田间管理，防止倒伏减产。

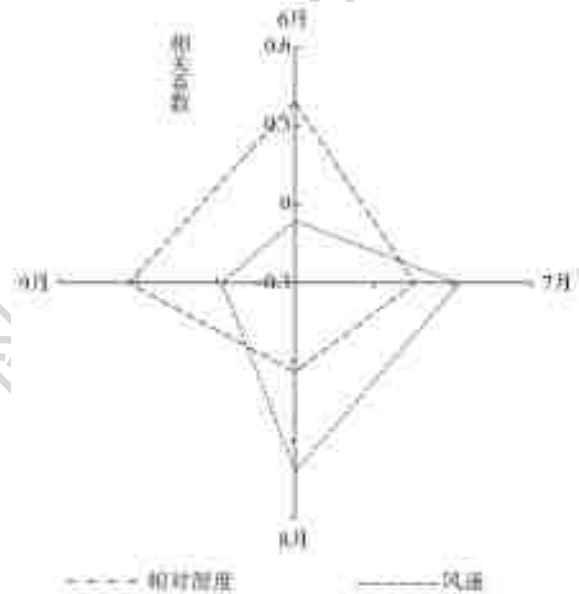


图 12 相对湿度、风速与气象产量相关性
Fig. 12 Correlation between relative humidity, wind speed and meteorological output

2.4 气象要素对产量影响的空间分析

根据式(5)并借助反距离权重插值法对决定系数进行空间插值见图 13。由图可知，平均气温(图 13(a))对气象产量变异的决定系数在 0~17.6%，仅中部保定达到 0.05 显著性水平，占有地区的 9.1%。最高气温(图 13(b))对气象产量变异的决定系数在 0~27%，其中北部承德、中南部衡水和邯郸达到显著水平。最低气温(图 13(c))对气象产量变异的决定系数在 0~71.2%，27.3%的地区达到显著性水平，决定系数较高地区为北部唐山、秦皇岛以及中部保定。日照时数(图 13(d))对气象产量变异的决定系数在 0~35.8%，分别形成以中部保定和南部邯郸为中心向外辐散的区域，可能是近年来该地区总云量增加所致^[42]。降水量(图 13(e))对气象产量变异的决定系数在 0~35.1%，27.3%的地

区达到显著性水平,主要集中在北部承德、张家口以及中部保定。相对湿度(图 13(f))对气象产量变异的决定系数在 0~28.2%,36.4%的地区达到显著性水平,集中于北部秦皇岛以及中部沧州、衡水、邢

台地区。风速(图 13(g))对气象产量变异的决定系数在 0~26%,形成以秦皇岛为中心的高值区,其主要原因可能是该地区为沿海地区,海岸带风能资源丰富^[43]。

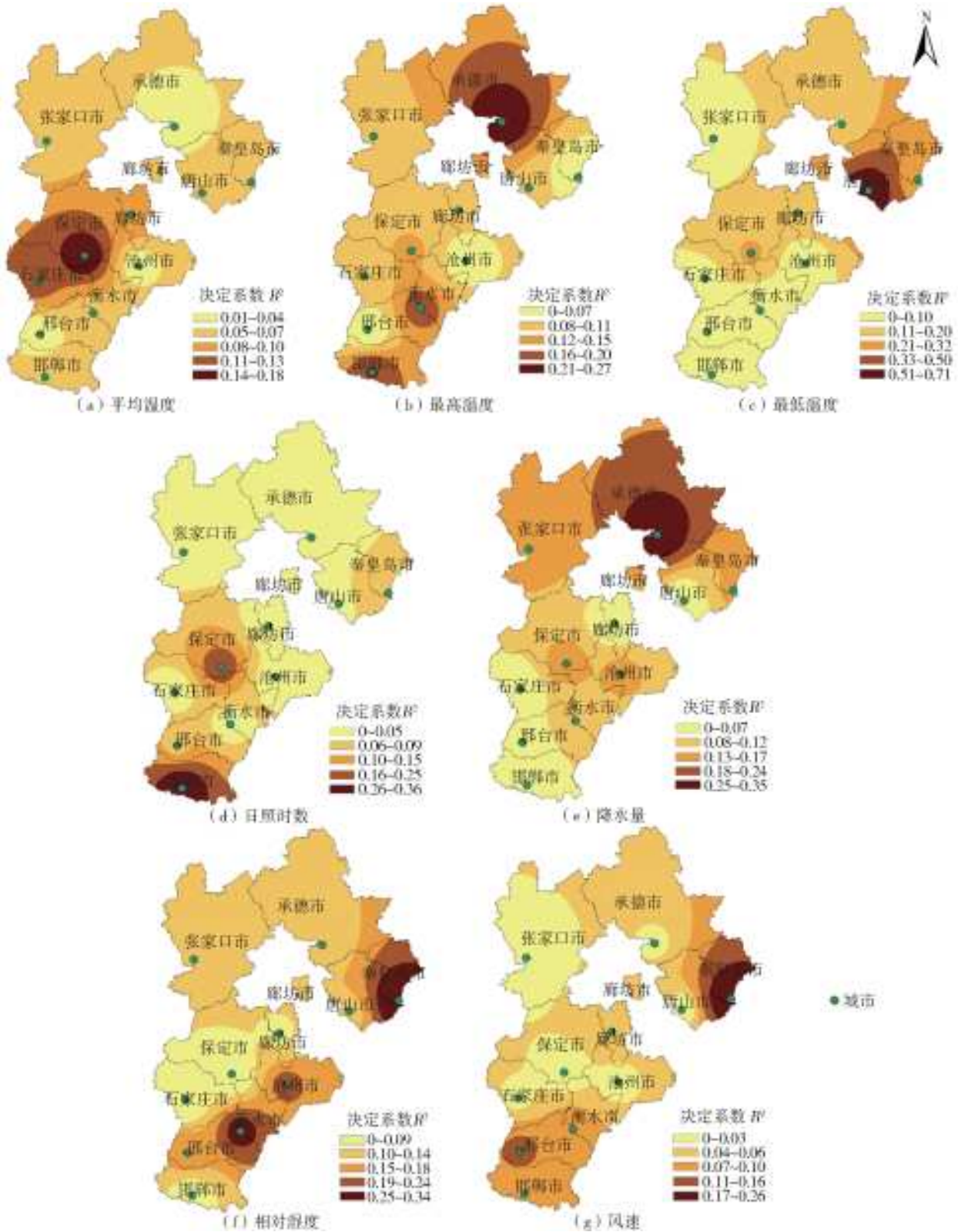


图 13 1994—2016 年河北省气象要素对夏玉米气象产量决定系数分布

Fig. 13 Distribution of coefficients of determination for meteorological factors to summer maize production in Hebei Province from 1994 to 2016

在达到显著水平检验地区中,夏玉米产量受气象要素影响最多的是保定,该地区同时与平均气温、

最低气温、日照时数以及降水量保持高度相关性;其次是秦皇岛,受到最低气温、相对湿度和风速的高度影响;承德、衡水和邯郸气象产量受到2个气象要素的影响,其中,承德气象产量与最高温、降水量的相关性最大,可能与该地纬度较高积温低,同时受山地地形和灌溉条件的限制水分较少有关,形成夏玉米的低产区;衡水气象产量与最高温、相对湿度的相关性最大,邯郸与最高温、日照时数的相关性最大;而张家口、唐山、沧州、邢台气象产量仅受到单个气象要素的高度影响:张家口气象产量受降水量限制,唐山气象产量受日照时数限制,沧州、邢台气象产量受相对湿度限制;石家庄和廊坊气象产量则表现出与所研究气象要素相关性不大的特点,石家庄处于太行山山麓地带,地下水资源丰富且位于背风向阳处^[44],日照资源丰富,耕作基础良好,一直以来都是夏玉米的高产区,而廊坊地区相比气象要素的影响,土壤肥力低,盐碱地面积广则是造成该地玉米产量低的主要原因^[45]。

3 结 论

(1)1960—2017年河北省夏玉米生育期内气温呈上升趋势,增暖显著;日照、降水量、湿度、风速皆呈下降趋势,下降速度为降水量>日照时数>相对湿度>风速;气象要素变化趋势皆通过了0.05显著性检验。经突变检验,风速突变时间最早,在20世纪80年代初发生;气温、相对湿度突变发生在20世纪90年代;而日照时数、降水量波动复杂,无明显突变。

(2)1960—2017年河北省夏玉米气象产量呈下降趋势,大体经历了平缓下降—剧烈变化—稳定增长3个阶段,近60年减产约3259.1 kg/hm²,由此可见,气候变化对河北省玉米气象产量的影响主要以减产为主。

(3)降水量、最低气温和风速是影响河北省夏玉米气象产量的关键气象要素,最高气温和日照时数相关性较小;气象产量与平均气温、最高气温、最低气温负相关,与日照时数、降水量、相对湿度、风速正相关;在达到显著水平检验($P<0.05$)的地区中受气象要素影响最多的是保定,该地区同时与平均气温、最低气温、日照时数以及降水量保持高度相关性;在所研究的气象要素中,最低气温对气象产量变异的解释率最高,为71.2%。

参考文献:

[1] 柳芳,黎贞发.降水量和积温变化对天津冬小麦产量的影响[J].中国农业气象,2010,31(3):431-435. DOI:

- 10.3969/j.issn.1000-6362.2010.03.020.
- [2] 江铭诺,刘朝顺,高炜.华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应[J].中国生态农业学报,2018,26(6):865-876. DOI:10.13930/j.cnki.cjea.170806.
- [3] 崔耀平,秦耀辰,肖登攀,等.中国夏玉米和冬小麦生育期对历史及未来水热条件的响应[J].地理与地理信息科学,2018,34(4):101-107,2. DOI:CNKI:SUN:DL-GT.0.2018-04-016.
- [4] 杨宇.气候变化对黄淮海平原粮食生产力影响的实证研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(6):130-135. DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2017.190.
- [5] BROWN R A,ROSENBERG N J. Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary united states growing regions [J]. Climatic Change,1999,41(1):73-107. DOI:10.1023/a:1005449132633.
- [6] TRNKA M,MUŠKA F,SEMERÁDOVÁ D,et al. European corn borer life stage model:Regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate[J]. Ecological Modelling,2007,207(2-4):61-84. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2007.04.014.
- [7] 于慧丰,李吉朝,杨英茹.河北省玉米生产现状与发展对策[J].河北农业科学,2006,10(3):100-102. DOI:10.3969/j.issn.1088-1631.2006.03.030.
- [8] 胡亚南.东北作物产量对气候变化的空间响应研究[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [9] 王丽君.黄淮海平原夏玉米季干旱、高温的发生特征及对产量的影响[D].北京:中国农业大学,2018.
- [10] 李勇,杨晓光,王文峰,等.气候变化背景下中国农业气候资源变化I.华南地区农业气候资源时空变化特征[J].应用生态学报,2010,21(10):2605-2614.
- [11] 王晓夕,张新仕,李敏,等.生产资料投入量对河北省粮食产量的贡献率分析[J].农业科技管理,2017,36(4):8-11. DOI:10.16849/J.CNKI.ISSN1001-8611.2017.04.003.
- [12] 孙宏勇,张喜英,陈素英,等.气象因子变化对华北平原夏玉米产量的影响[J].中国农业气象,2009,30(2):215-218. DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2009.02.019.
- [13] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2008:1-260.
- [14] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.11.
- [15] 房世波.分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J].自然灾害学报,2011,20(6):13-18.
- [16] 尹贞铃,许伟峰,田中伟,等.渭南市冬小麦产量预报

- 模型研究[J]. 陕西气象, 2014(5): 35-37. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-4354. 2014. 05. 007.
- [17] 魏庆伟, 石俊峰, 张亿博. 冬小麦趋势产量与气象产量分离方法对比分析[J]. 山东农业科学, 2019, 51(8): 127-132.
- [18] 吴冰洁, 王靖, 唐建昭, 等. 华北平原冬小麦产量变异的气象影响因子分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(10): 623-635. DOI: CNKI; SUN; ZGNY. 0. 2018-10-001.
- [19] 张璐, 权婷, 刘清. 使用 SPSS 进行相关分析[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(3): 190-191. DOI: 10. 19311/j. cnki. 1672-3198. 2018. 03. 094.
- [20] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 53-57. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-1374-B. 2003. 03. 017.
- [21] 徐玉秀, 蒋姗姗, 周福然, 等. 1981—2010 年锦州地区玉米生育期气象因子变化及其与气象产量的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 82-90. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-503X. 2017. 05. 011.
- [22] 朱彩芬, 胡桃花. 1957—2017 年朔州气温变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23): 103-109.
- [23] 姜丽霞, 王晾晾, 杜春英, 等. 1971—2014 年黑龙江省春季气温演变特征及对作物播种期的影响[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 849-857.
- [24] 李春强, 杜毅光, 李保国, 等. 河北省近四十年(1965—2005)气温和降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 1-7.
- [25] 张万诚, 郑建萌, 马涛. 1961—2010 年云南日照资源的时空分布及年代际变化研究[J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2281-2288.
- [26] 王永波, 张治, 周秀杰. 哈尔滨气温的长期变化及基本态特征[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 492-497.
- [27] RASMUSSEN E M, WANG X L, ROPELEWSKI C F. Secular variability of ENSO cycle: Decade to century time scales of natural climate variability[M]. San Diego: Academic press, 1994: 458-569.
- [28] WILD M, GILGEN H, ROESCH A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface[J]. Science, 2005(308): 847-850. DOI: 10. 1126/science. 1103215.
- [29] STANHILL G, MORESHET S. Global radiation climate changes in Israel[J]. Climatic Change, 2004, 22(2): 121-138. DOI: 10. 1007/bf00142962.
- [30] 曹永强, 李晓瑞. 河北省夏玉米主产区作物需水量和缺水研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(10): 141-147, 152.
- [31] 高霞. 河北省近 45 年气候均态及极值变化特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [32] 王长燕, 赵景波, 李小燕. 华北地区气候暖干化的农业适应性对策研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 646-652. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-6060. 2006. 05. 005.
- [33] 王晓卿. 20 世纪华北地区的水旱灾害及防救措施研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005. DOI: 10. 7666/d. y774535.
- [34] 阎访, 岳艳霞, 张秉祥. 石家庄地区大风日数气候变化特征[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 81-88. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-503X. 2013. 02. 013.
- [35] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 近 50 年中国风速减小的可能原因[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 106-109. DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-1973. 2016. 03. 014.
- [36] 高金兰, 马晓群, 许莹. 安徽省气候变化背景下降水量对粮食产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(18): 112-118.
- [37] 胡洵瑀, 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. DOI: 10. 7606/j. issn. 1000-7601. 2015. 04. 38.
- [38] 曹巧莲, 孙悦, 陈霄健, 等. 临汾市近 40a 日照时数变化及其对农业生产的影响[J]. 山西农业科学, 2011, 39(8): 880-882. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-2481. 2011. 08. 32.
- [39] 曹云者, 宇振荣, 赵同科. 夏玉米需水及耗水规律的研究[J]. 华北农学报, 2003, 18(2): 47-50.
- [40] 杜寒晖, 李发军. 红原地区温、湿度对玉米出苗的影响[J]. 农业灾害研究, 2017, 7(Z4): 51-53.
- [41] 马丽, 白龙. 气象因素对玉米重大病虫害的影响研究[J]. 现代农业科技, 2016(6): 218-219.
- [42] 李玉娥. 保定市日照气候变化特征及成因分析[A]. 中国气象学会. 第 27 届中国气象学会年会城市气象, 让生活更美好分会场论文集[C]. 中国气象学会: 中国气象学会, 2010: 8.
- [43] 康西言. 河北省沿海地区风速的变化趋势和突变分析[A]. 中国气象学会. 中国气象学会 2006 年年会“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集[C]. 北京: 中国气象学会, 2006.
- [44] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 黄淮海地区冬小麦生产力时空变化及其驱动机制分析[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 449-457, 502. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2006. 03. 015.
- [45] 李阔, 熊伟, 潘婕, 等. 未来升温 1.5℃ 与 2.0℃ 背景下中国玉米产量变化趋势评估[J]. 中国农业气象, 2018, 39(12): 765-777.