

基于小波分析法的气象因子对河南省 夏玉米单产的影响

邵云^a, 刘玘^a, 李春喜^a, 杨俊华^a, 王岚^a, 侯盟^a, 闫广轩^b

(河南师范大学 a.生命科学学院;b.环境学院,河南 新乡 453007)

摘要:[目的] 全球气候变暖已对农业生产产生深远的影响.传统的多元线性回归分析方法不能直接分析气象因子与夏玉米气象单产间的周期变化.[方法] 根据 1988—2018 年河南省 13 个气象站点的气象数据,利用连续小波变换分析方法探讨了河南省 31 a 夏玉米全生育期(6 月至 9 月按旬分段)的平均温度、降水量、日照时数、气象单产的周期变化特征;利用相干小波变换分析方法探讨了气象因子与夏玉米气象单产间的相互影响关系.[结果] 1)近 31 a,河南省夏玉米气象单产占实际单产的比重逐渐降低,对于气象灾害抵御能力逐步增强.2)从周期变化来看,6 月上旬的平均温度有 6 a 显著周期变化;8 月中旬的平均温度有 2~3 a 显著周期变化;7 月下旬的降水量有 2~6 a 显著周期变化;8 月中旬的日照时数有 2 a 和 3 a 显著周期变化;夏玉米气象单产有 2 a 显著周期变化.3)从气象因子与夏玉米气象单产间的关系来看,6 月上旬种子萌发期平均温度和 8 月中旬灌浆期平均温度与夏玉米气象单产呈负相关关系;7 月下旬抽雄期降水量与夏玉米气象单产呈正相关关系;8 月中旬灌浆期日照时数与夏玉米气象单产呈正相关关系.[结论] 6 月上旬种子萌发期和 8 月中旬灌浆期平均温度的降低,7 月下旬抽雄期降水量和 8 月中旬灌浆期日照时数的增加有助于提升夏玉米单产.

关键词:夏玉米;小波分析;气象因子;单产

中图分类号:S162.5

文献标志码:A

光、热、水是农业生产发展的重要环境条件,也是制约农业生产发展的重要气候资源.联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,全球表面气温将在未来 20 年内上升超过 1.5 °C^[1].气候变暖对农业生产环境、农作物生长发育和产量都将造成显著影响.中国的粮食安全也受到了严重的威胁,甚至在未来的几十年,中国农业生产可能还会受到气候变化更严重的冲击.气候变化过程通常表现为周期性的波动,其变化所导致的损坏也随之波动^[2].具有时频多分辨功能的小波分析,有助于分析气候变化对农作物影响的差异.已有研究利用小波分析方法研究了气候变化对水稻单产的影响^[3],长周期气象因子对冬小麦-夏玉米的影响^[4],以及玉米苗期低温与干旱对其产量的影响^[5].上述研究结果并未揭示气象因子的周期变化特征对于农作物产量的影响,且在气候变暖的大背景下,极端天气频发,气象因子的周期变化对于农作物产量的影响不可忽视.

河南省地处我国中东部地区,属于亚热带-温带季风气候,降水和热量丰沛,气候资源丰富多样.玉米作为河南省粮食种植的第二大作物,其播种面积和产量占全国的 9%^[6].利用小波分析法分析河南省气候变化对夏玉米产量的影响未见报道.本研究基于 1988—2018 年河南省 13 个气象站点的气象数据,利用连续小波变换分析法探讨了河南省 31 a 夏玉米全生育期的平均温度、降水量、日照时数、气象单产的周期变化特征,利用相干小波变换分析方法探讨了气象因子与夏玉米气象单产间的相互影响关系,为河南省夏玉米生产、高产、稳产提供理论依据.

收稿日期:2022-10-24;**修回日期:**2022-11-28.

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300203-3;2018YFD0300708-4).

作者简介:邵云(1973—),女,山东单县人,河南师范大学教授,博士,研究方向为作物栽培与资源利用,E-mail:shaoyun73@126.com.

通信作者:闫广轩,E-mail:guangxuan.yan@htu.cn.

1 材料与方法

1.1 数据来源

气象因子数据来自中国气象局网站河南省 1988—2018 年 13 个气象站点信息逐日平均温度、降水量、日照时数,如附表 I 所示,以旬为单位(每 10 d 为 1 旬)分段计算 31 a 夏玉米生育期(6 月至 9 月)内平均温度、降水量、日照时数的平均值。粮食产量数据来自中国统计年鉴的 1988—2018 年河南省夏玉米单位面积产量统计数据,河南省夏玉米生育期阶段根据中国气象网的农业气象数据资料 and 实际观察划分,如附表 II 所示。

1.2 气象单产和小波分析

在研究气象因子对单产的影响时,通常需要将单产进行分离,其中由于年际间气象条件差异造成作物单产波动的产量称为气象单产。作物的气象单产可通过模拟计算获得,参考文献[7]模拟计算。

小波分析方法是建立在泛函分析、傅里叶分析、调和分析及数值分析方法基础上的信号分析工具^[8]。小波分析方法分为连续小波、交叉小波及相干小波分析方法,本研究主要利用连续小波变换分析方法和相干小波变换分析方法。Morlet 复数小波是 Gauss 包络下的单频率复正弦函数,在时域和频域内具有较好的局部聚集性。Morlet 复数小波函数与其小波变换公式见参考文献[9]。相干小波变换方法是研究 2 个时间序列多尺度相互关系的方法,相干小波可度量二者在低能量区的相关性^[10]。本文使用 Matlab 中具有的 wcoherence 函数对气象因子和单产数据进行相干小波变换分析。

1.3 数据处理

使用 Matlab 和 GraphPad 棱镜 8.0.2 软件进行作图,利用 SPSS 17.0 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 河南省 1988—2018 年夏玉米生育期气候变化

图 1 是由相干小波变换分析方法筛选出的对夏玉米气象单产影响显著的气象因子的线性分析。图 1(a)是 6 月上旬平均温度变化,呈现缓慢上升趋势,最低值出现在 2004 年,为 21.91 °C;最高值出现在 2002 年,为 27.62 °C,相差达 5.71 °C。图 1(b)是 8 月中旬平均温度变化,呈现缓慢上升趋势,最低值出现在 2003 年,为 21.90 °C;最高值出现在 2013 年,为 30.79 °C,相差达 8.89 °C。图 1(c)是 7 月下旬降水量变化,波动较大呈现下降趋势,最低值出现在 1994 年,为 6.29 mm;最高值出现在 2001 年,为 172.63 mm,相差达 166.34 mm。图 1(d)是 8 月中旬日照时数变化,呈现缓慢上升趋势,最低值出现在 2003 年,为 19.71 h;最高值出现在 2013 年,为 96.59 h,相差达 76.88 h。

2.2 河南省 1988—2018 年夏玉米气象单产分解

2.2.1 实际单产

图 2(a)是实际单产变化,呈现波动上升趋势,波动范围为 3 273.90~6 000.00 kg/hm²,相差 2 726.10 kg/hm²。运用 SPSS 17.0 对夏玉米年份与实际单产进行线性回归分析可知: $F=32.77, R=0.73, R^2=0.53, P=0.00$,表明线性回归可解释 53%的产量信息。

2.2.2 时间趋势单产

图 2(b)是时间趋势单产变化,发现其有 3 个不同的增速波动阶段,分别在 1988—1996 年,1997—2003 年和 2004—2018 年。

①第一阶段(1988—1996 年):变化范围为 3 967.62~4 842.87 kg/hm²,相差 875.25 kg/hm²。自 1978 年以来,随着家庭联产承包责任制的推行,河南省农业生产总值明显地增长,但全省农业呈现地域上发展不均衡现象,这些差异的产生与当地农业生产条件、农业技术水平和区域经济态势有着密切的联系。

②第二阶段(1997—2003 年):变化范围为 4 559.10~5 122.17 kg/hm²,相差 563.07 kg/hm²。时间趋势单产的变化波动较大,一是因为自 2001 年之后,大力实施科教兴农战略,加快“农业现代化进程”的改革,使河南省整体农业管理水平有了一定的提高,二是化肥农药的大量使用。

③第三阶段(2004—2018 年):变化范围为 5 307.60~6 000.00 kg/hm²,相差 692.40 kg/hm²。自 2007 年

以来,中央一号文件的发布,河南省大力发展现代农业,紧紧抓住农业增产、农民增收、农民工就业这个中心,全面落实惠民政策,时间趋势单产稳步提升.

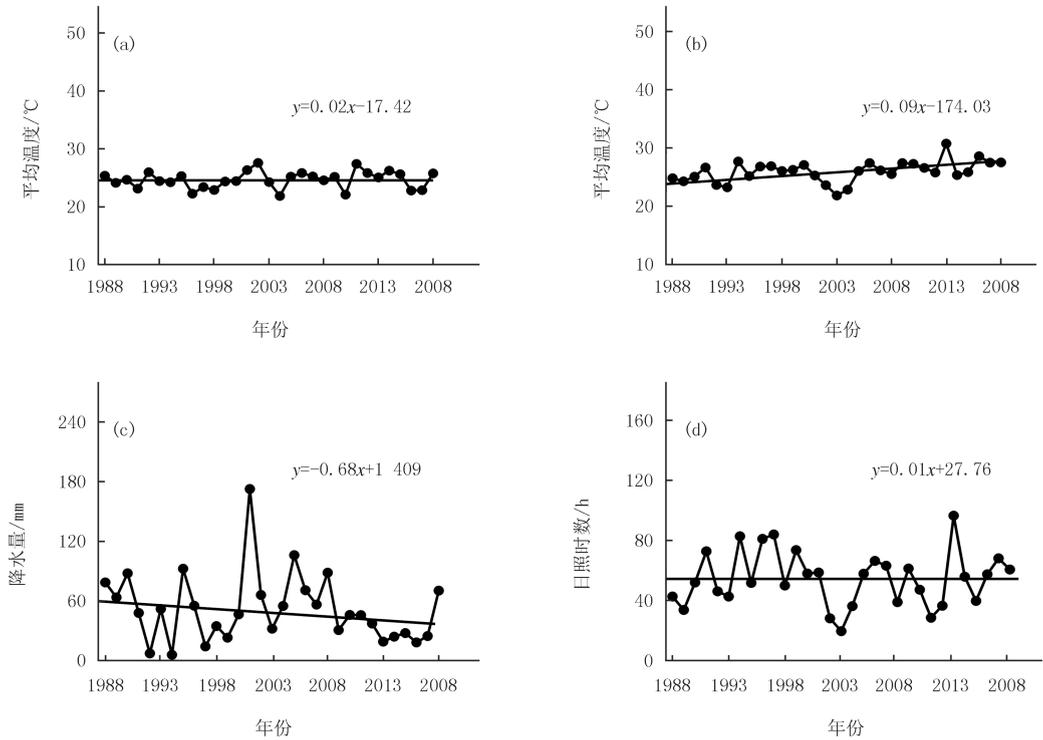


图1 河南省夏玉米生育期气候变化

Fig.1 Climatic changes of summer maize growth period in Henan Province

2.2.3 气象单产

图 2(c)是气象单产变化,1988—2006 年波动较大,波动范围为 $-1\ 593.60 \sim 616.29\ \text{kg}/\text{hm}^2$,相差 $2\ 209.89\ \text{kg}/\text{hm}^2$,2007—2018 年波动较小,波动范围为 $-299.80 \sim 184.95\ \text{kg}/\text{hm}^2$,相差 $484.75\ \text{kg}/\text{hm}^2$,说明气象因子对气象单产的影响程度在减弱.

2.2.4 各成分对实际单产的贡献

图 2(d)是时间趋势单产和气象单产之间的比例关系.在夏玉米实际单产中,时间趋势产量占主要成分,其中时间趋势单产和气象单产在 31 a 间对实际单产的贡献率分别为 93.5%和 6.5%.

2.3 河南省 1988—2018 年夏玉米生育期气象因子和气象单产的周期变化特征

图 3 是由相干小波变换分析方法筛选出的对夏玉米气象单产影响显著的气象因子和夏玉米气象单产的连续小波功率谱.图中粗黑线显示的范围通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平红色噪音标准谱的检验(下同),细黑线为影响锥曲线.

图 3(a)为 6 月上旬平均温度连续小波功率谱,6 月上旬平均气温存在 6 a 显著周期变化,主要集中在 2001—2008 年.图 3(b)为 8 月中旬平均温度连续小波功率谱,8 月中旬平均温度存在 2~3 a 显著周期变化,主要集中在 2010—2014 年间.图 3(c)为 7 月下旬降水量连续小波功率谱,7 月下旬降水量存在 2~6 a 显著周期变化,主要集中在 1994—2005 年间.图 3(d)为 8 月中旬日照时数连续小波功率谱,8 月中旬日照时数存在 2 a 和 3 a 显著周期变化,分别主要集中在 1993—1995 年和 2009—2015 年.图 3(e)为气象单产连续小波功率谱,气象单产存在 2a 显著周期变化,主要集中在 1994—1997 年.图 3 的周期变化均通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平的检验.通过对上述结果进一步分析可知,气象单产周期与 8 月中旬平均温度、7 月下旬降水量、8 月中旬日照时数的周期有部分重合的变化,说明气象单产与气象因子有相同间隔重复出现的可能性.

2.4 河南省 1988—2018 年夏玉米生育期气象因子对夏玉米气象单产的影响

图 4 是将以旬为单位的气象因子与夏玉米气象单产做相干小波变换分析,其中 6 月上旬平均温度、8 月

中旬平均温度、7 月下旬降水量和 8 月中旬日照时数对夏玉米气象单产的影响最大。

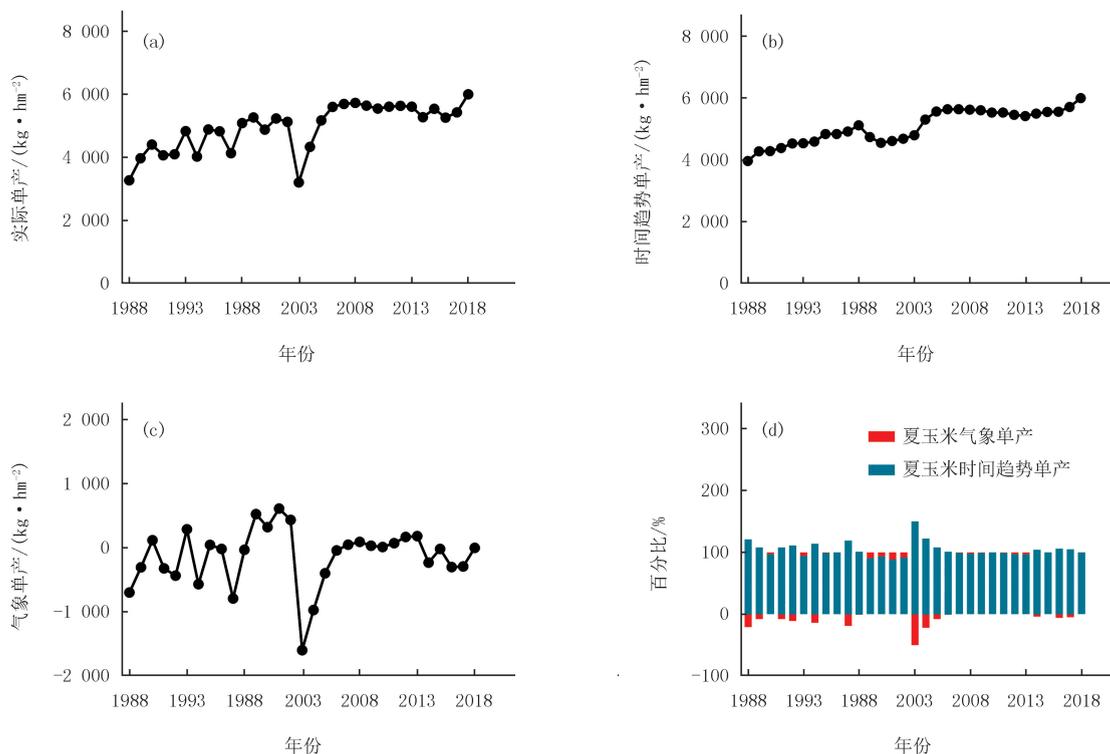


图2 河南省夏玉米气象单产时序变化

Fig.2 Time series diagram of meteorological yield per unit area of summer maize in Henan Province

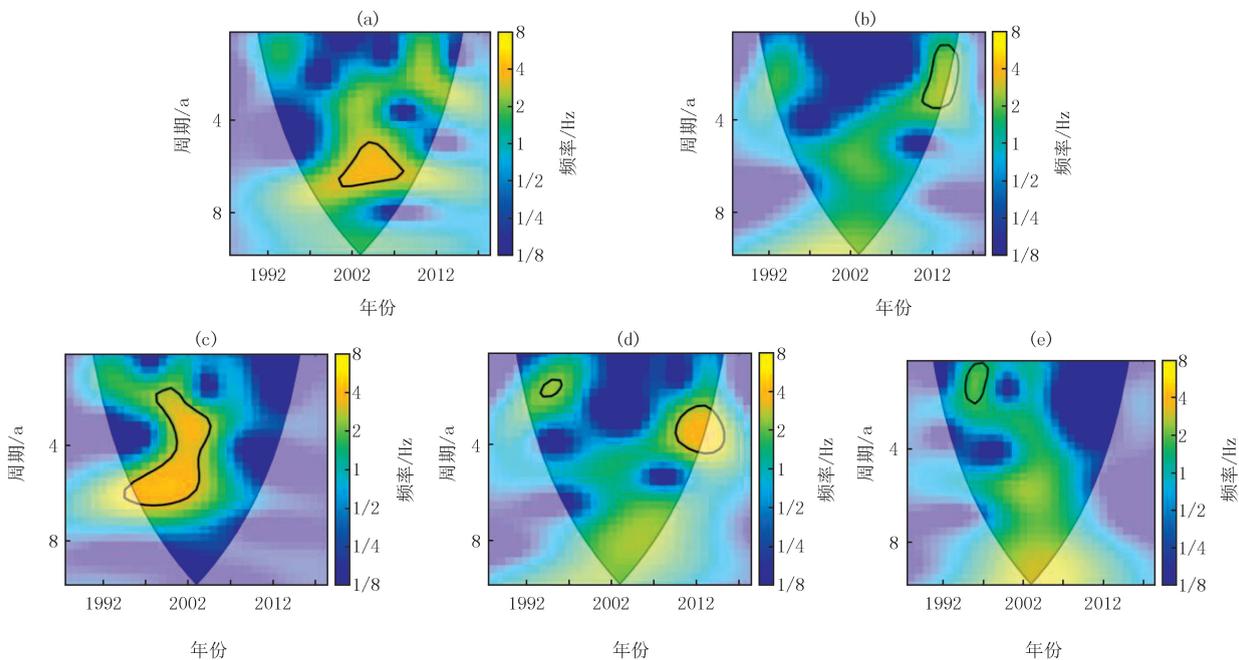


图3 气象因子和夏玉米气象单产连续小波功率谱

Fig.3 Meteorological factors and continuous wavelet power spectrum of summer maize meteorological yield per unit area

2.4.1 种子萌发期平均温度对气象单产的影响

图 4(a)为 6 月上旬平均温度与气象单产距平的相干小波变换谱,6 月上旬平均温度与气象单产在 2000—2011 年间存在 3~6 a 共振周期变化,两者相位谱呈现反相位变化,为负相关关系.6 月上旬平均温度与气象

单产相位差约 $\pi/4$.

2.4.2 灌浆期平均温度对气象单产的影响

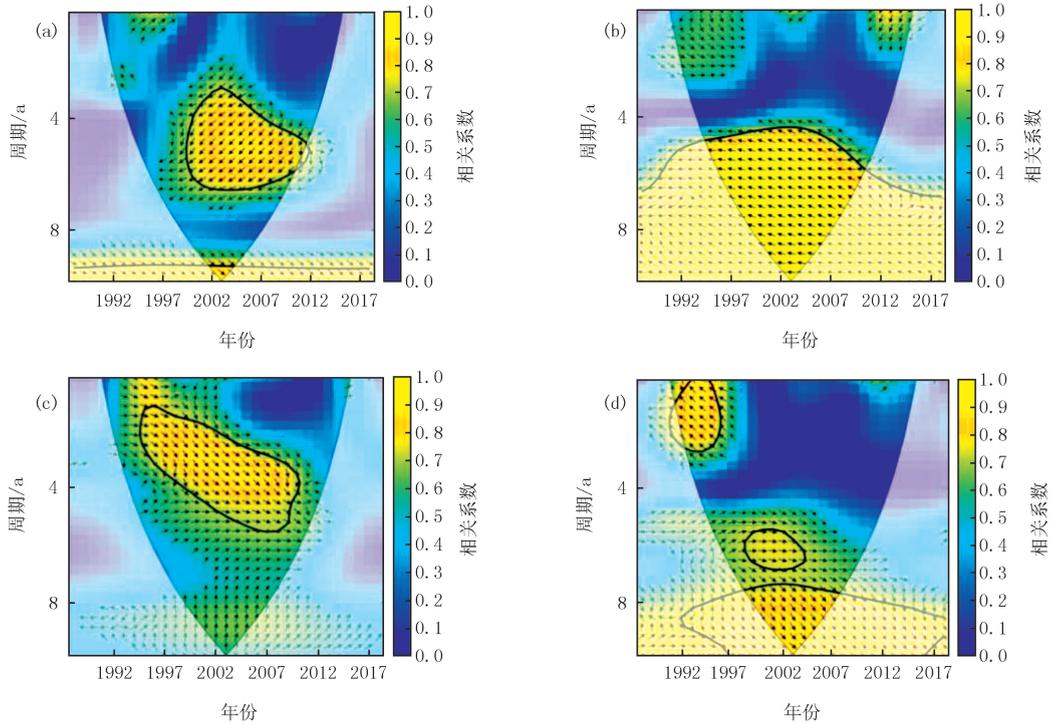
图 4(b) 为 8 月中旬平均温度与气象单产距平的相干小波变换谱, 8 月中旬平均温度与气象单产在 1997—2009 年间存在 5~10 a 共振周期变化, 两者相位谱呈现反相位变化, 为负相关关系. 8 月中旬平均温度与气象单产相位差约 π .

2.4.3 抽雄期降水量对气象单产的影响

图 4(c) 为 7 月下旬降水量与气象单产距平的相干小波变换谱, 7 月下旬降水量与气象单产在 1995—2010 年间存在 2~4 a 共振周期变化, 两者相位谱呈现同相位变化, 为正相关关系. 7 月下旬降水量与气象单产的相位差约 $\pi/4$.

2.4.4 灌浆期日照时数对气象单产的影响

图 4(d) 为 8 月中旬日照时数与气象单产距平的相干小波变换谱, 8 月中旬日照时数与气象单产在 1998—2004 年间存在 6 a 共振周期变化, 在 1992—2018 年间有 8~10 a 共振周期变化, 两者相位谱呈现正相位变化, 为正相关关系; 在 1991—1997 年有 2 a 共振周期变化, 两者相位谱呈现反相位变化, 为负相关关系. 8 月中旬日照时数与气象单产相位差约 $(\pi/2) \sim (\pi/4)$.



图中“→”表示表示两者同相位变化, “←”表示两者反相位变化, “↓”表示两者相位差为 $\pi/2$.

图4 气象因子与夏玉米气象单产距平的相干小波变换谱

Fig.4 Coherent wavelet transform spectrum of single meteorological factor and yield anomaly per unit area of summer maize

通过上述结果进一步分析可知, 种子萌发期平均温度和灌浆期平均温度与气象单产呈反相位差变化, 抽雄期降水量与气象单产呈同相位差变化, 灌浆期日照时数与气象单产主要呈同相位差变化. 6 月上旬处于种子萌发期, 当温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 种子发芽速度明显增快, 但当温度高于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者低于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 种子发芽的速度变慢, 根系脆弱细小, 容易形成细弱高脚苗, 而造成单产的下降^[11]. 8 月中旬处于灌浆早期, 灌浆早期属于夏玉米籽粒库建成的关键时期, 籽粒库的建成有助于粒质量的增加, 在籽粒形成和灌浆期间, 日平均温度以 $22\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最适宜, 当气温高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则酶活性受阻, 会造成籽粒灌浆不良, 从而影响单产^[12]. 夏玉米是具有高光效的 C4 作物, 在灌浆期间, 保证每天 8 h~12 h 的日照条件, 有利于光合产物向籽粒的转运, 增加穗粒质量; 而在阴雨寡照下, 光照严重不足, 产生的营养物质无法满足玉米灌浆的需要,

从而造成粒重降低,并影响单产^[13].7月下旬处于抽雄期,是生长的关键时期,此阶段的降水与单产的相关性最强,此时土壤田间持水量应达到80%;若在抽雄期前后受到严重的干旱胁迫,会造成植株所累积的营养物质分配到籽粒中的比例明显下降,从而阻碍吐丝和受精,最终影响单产^[14].

3 讨论

3.1 温度对气象单产的影响

温度是决定作物生长发育状况和产量的非生物因素之一.与前人研究相比,本研究获得了精细化的结果,可为研究河南省夏玉米具体生育期的气候要求提供依据.孙扬越^[15]利用 CERES-Maize 模型以及偏相关分析方法探究了河南省不同地区气象因素对夏玉米产量的影响,发现平均温度的增加对产量有负效应,本研究结果与其一致.同时本研究还发现6月上旬种子萌发期的平均温度与气象单产存在3~6 a的共振周期变化,表现负相关关系;8月中旬灌浆期平均温度与气象单产存在5~10 a共振周期变化,表现负相关关系.说明平均温度越高,越不利于夏玉米种子萌发和灌浆,最终影响产量.

3.2 降水量对气象单产的影响

水分是作物生产中的主要限制因素,抽雄期是营养生长到生殖生长过渡的关键时期.闫旖君等^[16]利用 BCC/RCG-WG 3.0 天气发生器构建区域气候变化情景的方法研究发现河南省玉米全生育期内需水量增加5.1%,尤其在拔节期前后的需水量更多,本研究结果与其相似.同时本研究还发现,7月下旬抽雄期的降水量与气象单产存在2~4 a的共振周期变化,表现正相关关系.进入7月下旬之后,温度持续升高,田间水分蒸发和叶片蒸腾作用都开始加剧,植株发生复杂的生理生化变化,对降水的需求增加.根据河南省的气候特点,夏玉米抽雄期前后易发生干旱,此时保证充足的灌溉水,也是夏玉米高产的一项重要的农管措施.

3.3 日照时数对气象单产的影响

日照是夏玉米产量形成的能源,灌浆期是籽粒质量增加的关键时期.李文旭等^[17]研究发现河南省日照时数的增加使玉米单产明显下降,与本研究结果不一致.原因是:灌浆期光照充足,有利于光合产物的积累,能有效促进籽粒灌浆的进程,从而提高产量.

3.4 极端气候事件对气象单产的影响

玉米产量对极端气候事件高度敏感,玉米产量的变化可以直接或间接地反映气候变化和极端气候情况.图4(d)中1991—1997年出现短暂几年负相关的原因有:①极端干旱事件.据冀航^[18]的研究,河南省最大无降水日数呈现增加的趋势,在1997年达到最高,为27.6 d.②极端高温事件.据闫振华等^[19]的研究,极端高温事件会对玉米的光合反应过程、光合产物积累和产量形成造成不良影响.③极端降水事件.据刘金秋^[20]对华北夏玉米极端降水事件的研究可知,极端降水会使土壤含水量升高,而土壤水分状况会直接影响群体光饱和点的范围,较高的土壤相对含水量(SRWC=130%)会降低夏玉米群体光饱和点,并降低高光强下的光合能力,极端降水也会降低夏玉米农田的光能利用率,从而影响玉米生长,导致玉米减产.④品种因素.玉米光合作用的强弱不仅受到太阳辐射、温度、湿度等环境因素的影响,还受到品种本身遗传特性的影响.⑤田间管理因素.合理的耕作方式能有效地改善土壤水、肥、气、热条件,提高资源利用率,达到作物增产提质效果.

综上,利用小波分析不仅可以得到气象因子的年际变化特征以及气象因子与气象单产间的关系,还可得到一些极端天气事件的信息,气候变化将会使河南省的热量资源更加丰富,可在农业上采用合理的措施来提高粮食产量.一是加强水利建设:①灌溉方式多样化,可进行畦灌、沟灌、喷灌、管道渗灌等;②生育期灌溉,播前(冬季前进行)贮备灌溉以及在抽雄开花期根据土壤水肥利用情况进行灌溉,对全生育期进行定额灌溉;③排涝措施,修建明沟和暗管以及竖井排水系统进行排水.二是优化种植制度:①利用夏玉米生长季开始日期提前的特点,适时早播;②合理密植,增加光合效率;③开展耐旱、耐涝、耐高温、抗病虫害等品种的研究,选育适应气候变化的夏玉米新品种.三是加强农业气象预报:①加强气象灾害防御系统的建设;②加强病虫害防御技术的研究;③提高农业气象灾害预报的能力.

4 展望

本研究提供了一种采用小波分析的方法研究气象因子与夏玉米气象单产间的相互影响关系,还存在一

定的局限性。一是采用了统一的标准,设置了豫北、豫中、豫南、豫东和豫西的夏玉米生育期分布阶段,忽视了农业的地域特征。二是忽视了气象灾害对夏玉米生产的影响。三是以旬为单位没有突出极端天气对夏玉米生产的影响。因此,在今后的研究工作中将着重细化全省各地夏玉米生育期分布阶段,研究气象灾害周期性的变化规律,揭示气候变暖对夏玉米、小麦等粮食生产的影响。

附 录

附表 I ~ II 见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.06.013)。

参 考 文 献

- [1] 周天军,陈梓明,陈晓龙,等. IPCC AR6 报告解读:未来的全球气候:基于情景的预估和近期信息[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652-663.
ZHOU T J, CHEN Z M, CHEN X L, et al. Interpreting IPCC AR6: future global climate based on projection under scenarios and on near-term information[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 652-663.
- [2] 祝子淳,付丛生. 中国降水情势变化及归因分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 1-12.
ZHU Z C, FU C S. Variation and attribution analysis of precipitation in China[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(2): 1-12.
- [3] 沈陈华. 气象因子对江苏省水稻单产的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4155-4167.
SHEN C H. Meteorological effects on rice yields in Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4155-4167.
- [4] 杨森,李会云,寇艳玲,等. 1982-2012年河南省夏玉米生育期降水量时空变化格局分析[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(1): 28-33.
YANG S, LI H Y, KOU Y L, et al. Analysis on the temporal-spatial variation patterns of precipitation of summer maize growth period in Henan Province during 1982 to 2012[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(1): 28-33.
- [5] 蒿宝珍,马静丽,董嘉强,等. 不同耐旱性玉米品种叶片光合特性和产量对干旱胁迫的响应[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 29-37.
HAO B Z, MA J L, DONG J Q, et al. Response of leaf photosynthesis characteristics and yield of maize hybrids differing in drought tolerance to drought stress[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2022, 50(6): 29-37.
- [6] 缪丽娟,刘冉,邹扬锋,等. 黄淮海平原气候变化及对粮食产量影响研究综述[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(1): 10-20.
MIAO L J, LIU R, ZOU Y F, et al. A review of climate change in Huanghuaihai Plain and its impact on grain yield[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(1): 10-20.
- [7] 李心怡. 作物产量分离方法的比较:以江苏水稻为例[D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
LI X Y. Comparison of crop yield separation methods—a case study of Jiangsu rice[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [8] 王辰璇,陈莉,张安安. 基于小波-PSOSVM的陕甘宁新农业资源可持续利用评价[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 96-103.
WANG C X, CHEN L, ZHANG A A. Sustainable agricultural resource utilization in northwestern China determined using the wavelet-PSOSVM[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 96-103.
- [9] TUO W, ZHANG X Q, SONG C, et al. Annual precipitation analysis and forecasting-taking Zhengzhou as an example[J]. Water Supply, 2020, 20(5): 1604-1616.
- [10] HU W, SI B. Improved partial wavelet coherency for understanding scale-specific and localized bivariate relationships in geosciences[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(1): 321-331.
- [11] 刘啸笑. 温度与土壤水分对玉米种子萌发及幼苗生理特性的影响[D]. 长春:吉林农业大学, 2016.
LIU X X. Effects of temperature and soil moisture on seed germination and physiological characteristics of maize seedlings[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.
- [12] TAO Z Q, CHEN Y Q, LI C, et al. The causes and impacts for heat stress in spring maize during grain filling in the North China Plain—a review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(12): 2677-2687.
- [13] 尤勇. 夏季低温阴雨寡照天气对红河州玉米生产的影响分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(9): 68-70.
YOU Y. Effect of low temperature, overcast rain and little sunshine in summer on maize in Honghe prefecture[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, 11(9): 68-70.
- [14] KOBIR M S, RAHMAN M R, ISLAM A M, et al. Yield performance of some maize varieties as influenced by irrigation management at different growth stages[J]. Research in Agriculture Livestock and Fisheries, 2019, 6(1): 57-67.
- [15] 孙扬越. 气候变化对河南省夏玉米气候资源及产量影响的评估研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
SUN Y Y. Impact of climate change on climate resources and yield of summer maize in Henan Province[D]. Nanjing: Nanjing University of

- Information Science and Technology, 2020.
- [16] 闫旖君,徐建新,肖恒.2021-2050年河南省夏玉米净灌溉需水量对气候变化的响应[J].气候变化研究进展,2017,13(2):138-148.
YAN Y J, XU J X, XIAO H. Summer maize net irrigation water requirement to climate change in Henan Province in China during 2021-2050[J]. Climate Change Research, 2017, 13(2): 138-148.
- [17] 李文旭,吴政卿,雷振生,等.河南省主要气象因子变化及其对主要粮食作物单产的影响特征[J].作物杂志,2021(1):124-134.
LI W X, WU Z Q, LEI Z S, et al. The characteristics of climate factors change and its effects on main grain crops yield per unit area in Henan Province[J]. Crops, 2021(1): 124-134.
- [18] 冀航.河南省夏季极端干旱时空特征及对夏玉米产量的可能影响[D].郑州:郑州大学,2021.
JI H. Spatial and temporal characteristics of extreme summer drought in Henan Province and its possible influence on summer corn yield [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [19] 闫振华,刘东尧,贾绪存,等.花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响[J].中国农业科学,2021,54(17):3592-3608.
YAN Z H, LIU D Y, JIA X C, et al. Maize tassel development, physiological traits and yield under heat and drought stress during flowering stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(17): 3592-3608.
- [20] 刘金秋.华北夏玉米农田生态系统生产力的变化特征及其对极端降水事件的响应[D].泰安:山东农业大学,2016.
LIU J Q. Variation characteristics of productivity of summer maize agroecosystem and its response to the extreme precipitation event in North China plain[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016.

Effects of meteorological factors on yield per unit area of summer maize in Henan Province based on wavelet analysis

Shao Yun^a, Liu Qi^a, Li Chunxi^a, Yang Junhua^a, Wang Lan^a, Hou Meng^a, Yan Guangxuan^b

(a. College of Life Sciences; b. College of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: [Objective] Agriculture is sensitive to climate change. Traditional multiple linear regression analysis method cannot directly analyze the periodic change between meteorological factors and summer maize meteorological yield. [Methods] Based on the meteorological data of 13 meteorological stations in Henan Province from 1988 to 2018, we analyzed the correlation of meteorological factors (i.e., average temperature, precipitation, sunshine duration) and meteorological yield by multi-level wavelet analysis. [Results] The results showed that the proportion of meteorological yield to actual yield of summer maize periodic change in Henan Province in recent 31 years, which indicated that the ability to resist meteorological disasters gradually increased. The average temperature in early June and in mid-August have a significant periodic change of 6 a and 2-3 a, respectively. Precipitation in late July showed a significant periodic change of 2-6 a. In the middle of August, the sunshine duration had a significant periodic change of 2 a and 3 a. The meteorological yield of summer maize had a significant periodic change of 2 a. Furthermore, the mean temperature at seed germination stage in early June and the mean temperature at filling stage in mid-August were negatively correlated with meteorological yield of summer maize. Precipitation at tasseling stage in late July were positively correlated with meteorological yield of summer maize. Sunshine hours at filling stage in mid-August were mainly positively correlated with meteorological yield of summer maize. [Conclusion] The decrease of average temperature during seed germination stage in early June and filling stage in mid-August, the increase of precipitation during tasseling stage in late July and sunshine duration during filling stage in mid-August contributed to the improvement of summer maize yield.

Keywords: summer maize; wavelet analysis; meteorological factors; yield per unit area

[责任编辑 刘洋 杨浦]

附表 I 河南省 1988—2018 年夏玉米生育期 13 个站点及气象因子信息

Attached tab. I Thirteen stations and meteorological factors during the whole growth period of summer maize in Henan Province from 1988 to 2018

站号	站名	北纬/(°)	东经/(°)	海拔/m	日平均温度/°C	总降水量/mm	总日照时长/h
53898	安阳	36.03	114.68	194.8	24.98	419.04	708.12
53986	新乡	35.19	113.53	73.2	25.43	389.82	750.55
57083	郑州	34.43	113.39	113.4	25.60	416.39	690.76
57089	许昌	34.04	113.56	67.2	25.03	460.87	677.95
57181	宝丰	33.53	113.03	136.4	25.13	456.89	638.95
57178	南阳	33.06	112.29	180.6	25.37	503.92	666.86
57290	驻马店	32.56	113.55	106.2	25.33	560.79	631.99
57297	信阳	32.08	114.03	114.5	25.35	603.99	647.49
57091	开封	34.47	114.18	73.7	25.39	421.73	702.11
58005	商丘	34.27	115.40	50.1	24.99	485.66	654.89
57193	西华	33.47	114.31	52.6	25.22	499.10	712.19
57051	三门峡	34.48	111.12	409.9	24.77	334.22	760.64
57071	孟津	34.49	112.26	333.3	24.47	385.78	729.47

附表 II 河南省夏玉米生育期阶段

Attached tab. II The whole growth period of summer maize in Henan Province

生育期	播种~拔节	拔节~抽雄	抽雄~灌浆	灌浆~成熟
日期	6月10日至7月10日	7月11日至8月10日	8月11日至8月20日	8月21日至9月30日