张志高,张秀丽,贾梦薇,等.1960-2020年黄河流域农业热量资源时空演变特征[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(3):119-130.
Zhang Z G, Zhang X L, Jia M W, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of agricultural thermal resources in the Yellow River Basin from 1960 to 2020[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(3):119-130.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202401015

1960-2020年黄河流域农业热量资源时空演变特征

张志高[1],张秀丽[2],贾梦薇[1],陈河阳[1],孙梓欣[3],郝海姣[1],李卓娅[1],蔡茂堂[4*]

(1.安阳师范学院 资源环境与旅游学院,河南 安阳 455000;2.河南大学 黄河文明与可持续发展研究中心,河南 开封 475001;
3.河南大学 地理与环境学院,河南 开封 475004;4.中国地质科学院 地质力学研究所,北京 100081)

摘 要:[目的]气候变暖将改变农业热量资源的时空分布,对黄河流域农业热量指标进行分析,可为区域合理利用农业气候资源提供依据。[方法]基于1960—2020年黄河流域89个气象站点逐日气象资料,运用线性趋势估计和Mann—Kendall突变检验等方法分析了黄河流域年平均气温,≥0 ℃和≥10 ℃的初终日、持续日数和有效积温的时空变化特征及其影响因素。[结果]近61 a黄河流域平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温分别以0.29 ℃·(10 a)$^{-1}$、70.23 ℃·d·(10 a)$^{-1}$和34.50 ℃·d·(10 a)$^{-1}$的倾向率呈上升趋势,≥0 ℃和≥10 ℃持续日数呈增加趋势,倾向率分别为3.33 d·(10 a)$^{-1}$和2.78 d·(10 a)$^{-1}$。≥0 ℃和≥10 ℃初日呈提前趋势,倾向率分别为—2.16 d·(10 a)$^{-1}$和—2.14 d·(10 a)$^{-1}$,≥0 ℃和≥10 ℃终日呈延迟趋势,倾向率分别为1.16 d·(10 a)$^{-1}$和0.63 d·(10 a)$^{-1}$,≥0 ℃和≥10 ℃初日提前的幅度大于终日推迟的幅度,≥0 ℃初终日和持续日数变化幅度大于≥10 ℃相应指标变化幅度。近61 a黄河流域年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温分别于1996、2003和1997年发生突变。黄河流域上、中、下游地区各热量指标变化趋势与流域整体变化一致,上游地区变化幅度相对较大。从空间分布来看,由上游、中游到下游地区年平均气温逐渐增加,≥0 ℃和≥10 ℃有效积温逐渐增加,初日逐渐提前,终日逐渐推迟,持续日数逐渐延长。[结论]黄河流域农业热量资源呈增加趋势,热量指标主要受海拔高度和年平均气温影响。西太平洋副高强度指数、太平洋副高强度指数和东大西洋遥相关型指数是影响近61 a黄河流域农业热量指标变化的主要大气环流因子。

关键词:气温; 有效积温; 热量资源; 初终日数; 黄河流域
中图分类号:S161 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-8151(2024)03-0119-12

地球气候正在经历以全球变暖为主要特征的变化,IPCC第六次评估报告指出2011—2020年全球平均表面温度相比1850—1900年上升1.09 ℃,2001—2020年较工业化前增暖0.99 ℃[1],北半球中高纬度地区气温上升更为明显[2]。随着全球变暖的持续发展,气温、光照、降水等气候要素也相应发生变化,进而对作物生长发育以及农业生态环境产生显著影响[3-5]。热量资源是作物生产所必需的环境条件,也是决定农业结构和熟制的重要因素[6-7]。因此,气候变化背景下农业热量资源时空变化及其影响因素受到了国内外学者的广泛关注[8-10]。

李帅等[11]研究发现中国≥5 ℃和≥10 ℃初始日提前,结束日推迟,南方地区增温幅度大于北方地区,青藏高原及山区增幅最小,≥5 ℃和≥10 ℃有效积温于1997年突变后,积温带界线向北、向高海拔地区移动。戴声佩等[12]发现华南地区≥10 ℃积温呈增加趋势,倾向率为7.54 ℃·d·(10 a)$^{-1}$,伴随全球变暖气候带分布呈向高海拔和高纬地区移动趋势。何勇坤和郭建平[13]指出1961—2006年东北地区积温一致呈增多趋势,积温高值区向东、向北扩展。李元华等[14]研究发现河北≥0 ℃和≥10 ℃初日提前,终日推迟,持续日数延长,20世纪

收稿日期:2024-01-06 **修回日期**:2024-03-28
基金项目:国家自然科学基金项目(42272112);河南省哲学社会科学规划项目(2022BJJ003);河南省科技攻关项目(232102320024;232102321109);河南省高等学校重点科研项目(23A170008);安阳市科技计划项目(2022C01NY019);安阳师范学院大学生创新创业训练计划项目(202310479139)
作者简介:张志高(ORCID:0009-0000-3085-534X),博士,副教授,研究方向:气候变化,E-mail: Zhangzhg06@163.com
*通信作者:蔡茂堂,博士,副研究员,研究方向:环境演变,E-mail: Caimaotang@126.com

70年代积温偏少,80年代后积温增加。唐宝琪等[15]研究发现华东地区≥10 ℃积温和持续日数分别以89.71 ℃·d·(10 a)$^{-1}$和2.96 d·(10 a)$^{-1}$的倾向率显著增加,在全球变暖背景下华东地区气候带明显北移东扩。孙杨等[16]研究发现我国西北地区生长期、无霜期呈显著上升趋势,≥0 ℃和≥10 ℃活动积温明显增加,并探讨了气候变化对农业生产的影响。李瑞英等[17]指出鲁西南地区≥0 ℃、≥5 ℃和≥10 ℃活动积温均呈极显著的上升趋势,热量资源指标在20世纪90年代发生突变。钱锦霞等[18]发现山西省≥0 ℃和≥10 ℃活动积温分别以64.8 ℃·d·(10 a)$^{-1}$和57.9 ℃·d·(10 a)$^{-1}$的倾向率呈上升趋势,且于1996年发生突变。赵金鹏等[19]研究发现青藏高原地区≥0 ℃、≥5 ℃和≥10 ℃积温和持续天数呈增加趋势,初日提前,终日普遍延后。李涛辉等[20]发现1972—2019年云南省各类积温均呈增加趋势,于20世纪90年代发生突变。姜树坤等[21]发现1961—2019年松嫩平原盐碱地区域水稻生长季内≥10 ℃的活动积温3000 ℃·d等值线北移了约2.6 °。张晨霞等[22]基于CMIP6气候模式对东北气候变化进行了模拟,发现未来该区农业热量资源将显著增加。在影响因素方面,李帅等[11]发现中国≥5 ℃和≥10 ℃有效积温在东、中部地区受纬度影响明显,西部地区受海拔影响强于纬度。胡琦等[23]研究发现全国热量资源南多北少,东部主要受纬度的影响,西部则受地形影响。李硕和沈彦俊[24]指出西北干旱区≥0 ℃积温持续天数的增加主要源于终日的推迟,≥10 ℃积温天数的增加主要是初日的提前所致。崔成等[25]研究发现厄尔尼诺年时,山东苹果产区的光照资源和热量资源较为优越,利于苹果增产。

黄河流域跨越干旱、半干旱和半湿润区,覆盖9个省区,流域内地形地貌、植被类型、气候等差异明显。黄河流域是我国重要生态安全屏障,也是我国传统农业主产区,流域现有耕地1.3×10^{7} hm^{2},粮食产量约占全国三分之一,在我国农业生产中占有重要地位[26]。目前针对黄河流域农业热量资源方面的研究较少,因此,本文基于1960-2020年黄河流域气象站点逐日气温数据资料,选取平均温度,≥0 ℃和≥10 ℃的初终日、有效积温和持续日数等作为热量指标,采用线性趋势分析和Mann-Kendall突变检验等方法对黄河流域农业热量资源的时空变化特征进行分析,以期为指导区域农业生产以及保障粮食安全等方面提供科学依据和参考。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区概况

黄河流域(32°10′~41°50′ N,95°53′~119°05′ E)横贯青藏高原、内蒙古高原和黄土高原和下游冲积平原3级阶梯,包含青海、四川等9个省区,流域面积约7.52×10^{5} km^{2}。黄河流域海拔在0~6241 m,东西跨度约5464 km,整体地势西高东低,起伏显著。流域位于中纬度地带,受大气环流和季风环流的影响,跨越干旱、半干旱、半湿润气候区。流域多数地区降水在200~650 mm,年均温在-4~14 ℃,全年日照时数在2000~3300 h,黄河流域光热资源十分丰富,粮食生产潜力大[26]。

1.2 数据来源

1960-2020年黄河流域89个气象站点逐日气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn)中国地面气候资料日值数据集,并进行初步质量控制。北大西洋涛动和西太平洋副高强度等环流因子数据源自国家气候中心(http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php)。为研究黄河流域热量指标的区域分布特征,将黄河流域进一步划分为上、中、下游地区,其中,上游地区包括久治、景泰和包头等40个气象站点,中游地区包括武功、靖边和神木等42个气象站点,下游地区包括新乡、郑州和沂源等7个气象站点。研究区域及站点分布如图1所示。

1.3 界限温度起止日期的确定

≥0 ℃初终日是农耕活动的开始或结束期,≥10 ℃初终日代表喜温作物生产活跃期[27]。为减弱日均温逐日变化所造成的不稳定性,利用5 d滑动平均法确定稳定通过某界限温度(≥0 ℃和≥10 ℃)的起止日期,在此基础上分别分析通过界限温度(≥0 ℃和≥10 ℃)的持续日数和活动积温等热量指标。具体计算如下:

$$A=\sum_{i=1}^{n}T_i \tag{1}$$

式中:A表示1年中有效积温值,℃;n表示1年中有效积温连续日数,d,由5 d滑动平均法确定;T_i表示

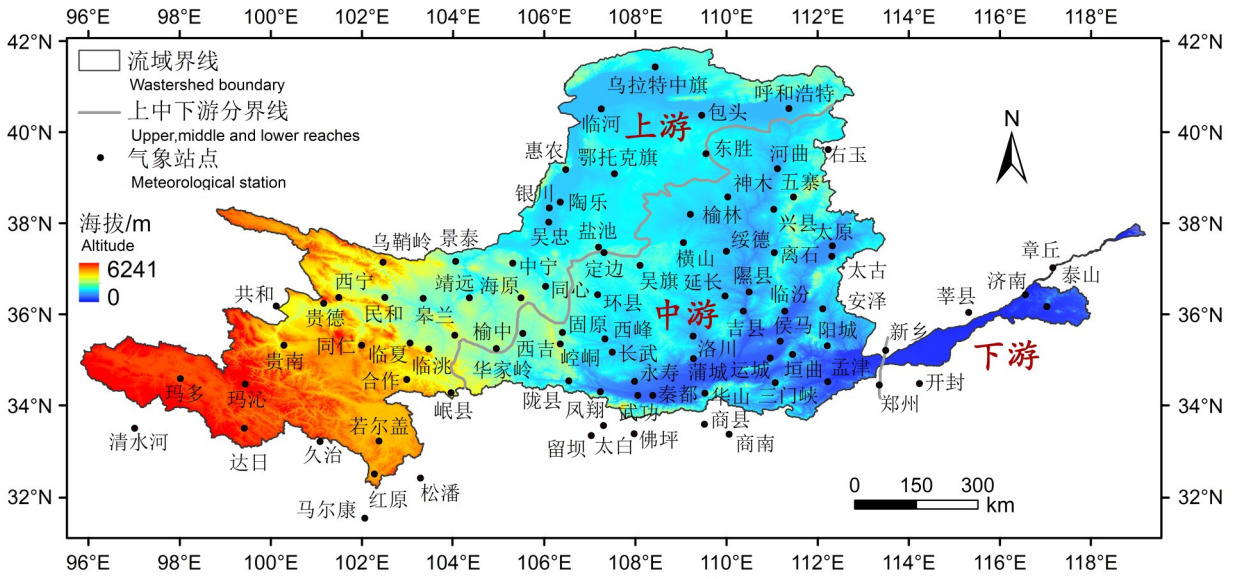


图1　黄河流域气象站点分布

Fig.1　Distribution of meteorology stations in the Yellow River Basin

有效温度,℃。

$$T_i = \bar{T} - T_{\text{lower}} \tag{2}$$

式中:T_{lower}表示下限温度,℃;$\bar{T}$表示日平均温度,℃。

此外,采用线性倾向估计法分析黄河流域霜冻的时间变化特征;采用Mann-Kendall检验法对黄河流域有效积温进行突变分析[28],利用信噪比对其突变点进行检验[29]。利用Person相关分析法分析热量指标与地理因子、气象要素和环流因子的关系。

2　结果与分析

2.1　年平均气温和有效积温时间变化

1960-2020年黄河流域年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温年际变化如图2所示,由图2可知,近61 a黄河流域年平均气温在7.33～9.62 ℃,平均为8.49 ℃,2006年最高,1967年最低。1960-2020年黄河流域≥0 ℃有效积温平均值为3 603.28 ℃·d,在3 259.03～3 927.19 ℃·d之间波动,1976年最小,2013年最大。近61 a黄河流域≥10 ℃有效积温平均值为1 404.55 ℃·d,其中1976年最小为1 223.79 ℃·d,2013年最大为1 579.92 ℃·d。从变化趋势来看,1960-2020年黄河流域平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温均呈上升趋势,倾向率分别为0.29 ℃·(10 a)$^{-1}$、70.23 ℃·d·(10 a)$^{-1}$和34.50 ℃·d·(10 a)$^{-1}$。

2.2　≥0 ℃、≥10 ℃初终日和持续日数时间变化

1960-2020年黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃初终日和持续日数年际变化如图3所示,由图3可知,近61 a黄河流域≥0 ℃初日平均为2月15日,其中2002年最早,为1月27日,1984年最晚,为2月27日,相差31 d。1960-2020年黄河流域≥10 ℃初日平均为4月10日,最早为2008年的3月27日,最晚为1970年和1996年的4月21日,相差25 d。1960-2020年黄河流域≥0 ℃终日平均为11月28日,最早为1967年和1969年的11月19日,最晚为1987年的12月9日,相差20 d。≥10 ℃终日平均为10月15日,其中1981年最早,为10月5日,2011年最晚,为10月21日,相差16 d。近61 a黄河流域≥0 ℃持续日数在271～307 d,平均为288 d,1967年最小,2016年最大。≥10 ℃持续日数平均189 d,其中1976年最小,为177 d,2009年最大,为207 d。从变化趋势来看,近61 a黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃初日分别以－2.16 d·(10 a)$^{-1}$和－2.14 d·(10 a)$^{-1}$的倾向率提前,≥0 ℃和≥10 ℃终日分别以1.16 d·(10 a)$^{-1}$和0.63 d·(10 a)$^{-1}$的倾向率推迟,≥0 ℃和≥10 ℃持续日数均呈增加趋势,倾向率分别为3.33 d·(10 a)$^{-1}$和2.78 d·(10 a)$^{-1}$。总体上看,≥0 ℃和≥10 ℃初始日期提前的幅度大于终止日期推迟的幅度,≥0 ℃

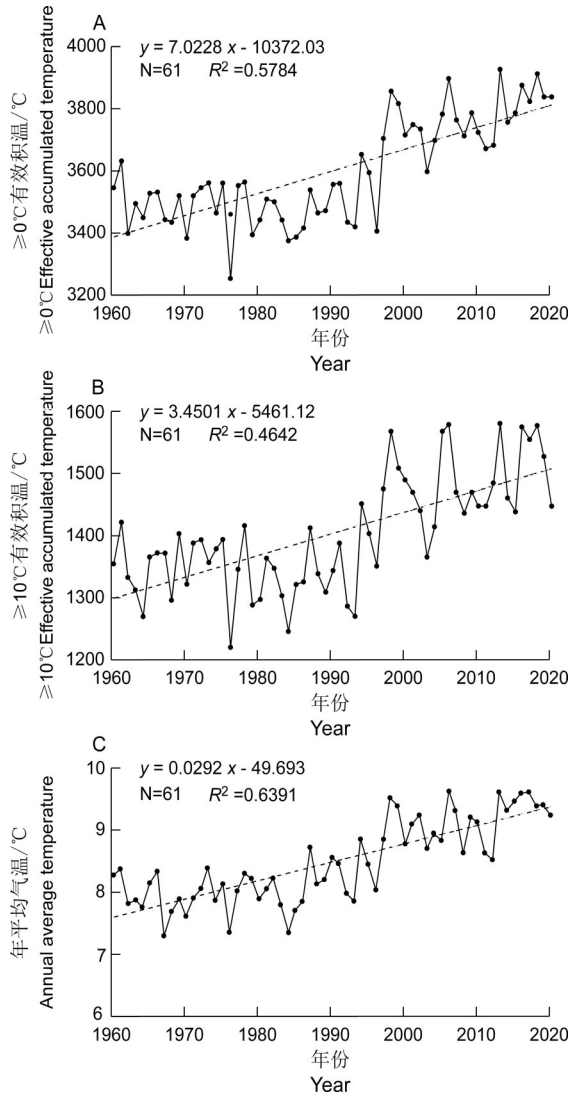


图2 1960-2020年黄河流域年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温变化

Fig.2 Changes of annual average temperature, effective accumulated temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃ in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

初终日和持续日数变化幅度大于≥10 ℃相应指标幅度。

2.3 年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温的突变分析

1960-2020年黄河流域年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温Mann-Kendall突变检验结果如图4所示,可见,近61 a黄河流域年平均气温正序列*UF*曲线呈波动上升趋势,1988年以后,*UF*数值在0值之上,表明该时期年平均气温呈上升趋势,特别是*UF*曲线在1998年后超出信度线,说明1998年后黄河流域年平均气温的上升趋势显著,反序列*UB*曲线呈下降趋势,二者相交于1996年,突变点在信度线内,且通过了信噪比检验,确定其突变点为1996年,突变前流域年平均气温为8.05 ℃,突变后为9.17 ℃,上升1.12 ℃。≥0 ℃有效积温的*UF*曲线在1997年后稳定在0值之上,2002年后超出信度线,表明2002年后上升趋势明显,*UB*曲线呈波动下降趋势,*UF*和*UB*曲线相交于2003年,且通过了信噪比检验,其突变点为2003年,突变后≥0 ℃有效积温为3 794.10 ℃·d,较突变前增加264.55 ℃·d。≥10 ℃有效积温的*UF*曲线在1997年后稳定在0值之上,上升趋势明显,*UB*曲线呈波动下降趋势,*UF*和*UB*曲线相交于1997年,突变点在信度线内,且通过了信噪比检验,其突变点为1997年,突变后≥10 ℃有效积温为1 492.98 ℃·d,较突变前的1 351.03 ℃·d增加141.95 ℃·d。

2.4 上、中、下游地区热量指标变化

1960-2020年黄河流域上、中、下游地区各热量指标变化如表1所示,由表1可知,近61 a来流域上、中、下游地区≥0 ℃有效积温分别为2 870.33 ℃·d、4 110.69 ℃·d、4 939.62 ℃·d,≥10 ℃有效积温分别为912.70 ℃·d、1 682.50 ℃·d、2 291.02 ℃·d,上游积温最小,下游地区最大。上游≥0 ℃初日开始最晚(3月3日),下游开始最早(1月18日),相差44 d;上游≥0 ℃终日结束最早(11月15日),下游结束最晚(12月22日),相差37 d;上游≥0 ℃持续日数最短(258 d),下游最长(339 d),相差81 d;上游≥10 ℃初日开始最晚(4月27日),下游开始最早(3月20日),相差38 d;上游≥10 ℃终日结束最早(9月30日),下游结束最晚(11月7日),相差39 d;上游≥10 ℃持续日数最短(157 d),下游最长(233 d),相差76 d。从变化趋势来看,黄河流域上、中、下游地区各指标变化趋势与流域整体变化一致;从变化幅度来看,上游地区变化幅度相对较大。上游地区≥0 ℃初日和持续日数、≥10 ℃初终日和持续日数变化幅度最大;下游地区≥0 ℃积温、终日和≥10 ℃积温变化幅度最大。

2.5 年平均气温的空间分布特征

黄河流域平均气温空间分布如图5所示,由图5可知,近61 a黄河流域平均气温在−4.32~14.84 ℃,整体呈由东到西、由南向北逐渐减小趋势,流域东南部平均气温较高在11.07~14.84 ℃,西南部平均气温最低在−4.32~−0.29 ℃,流域

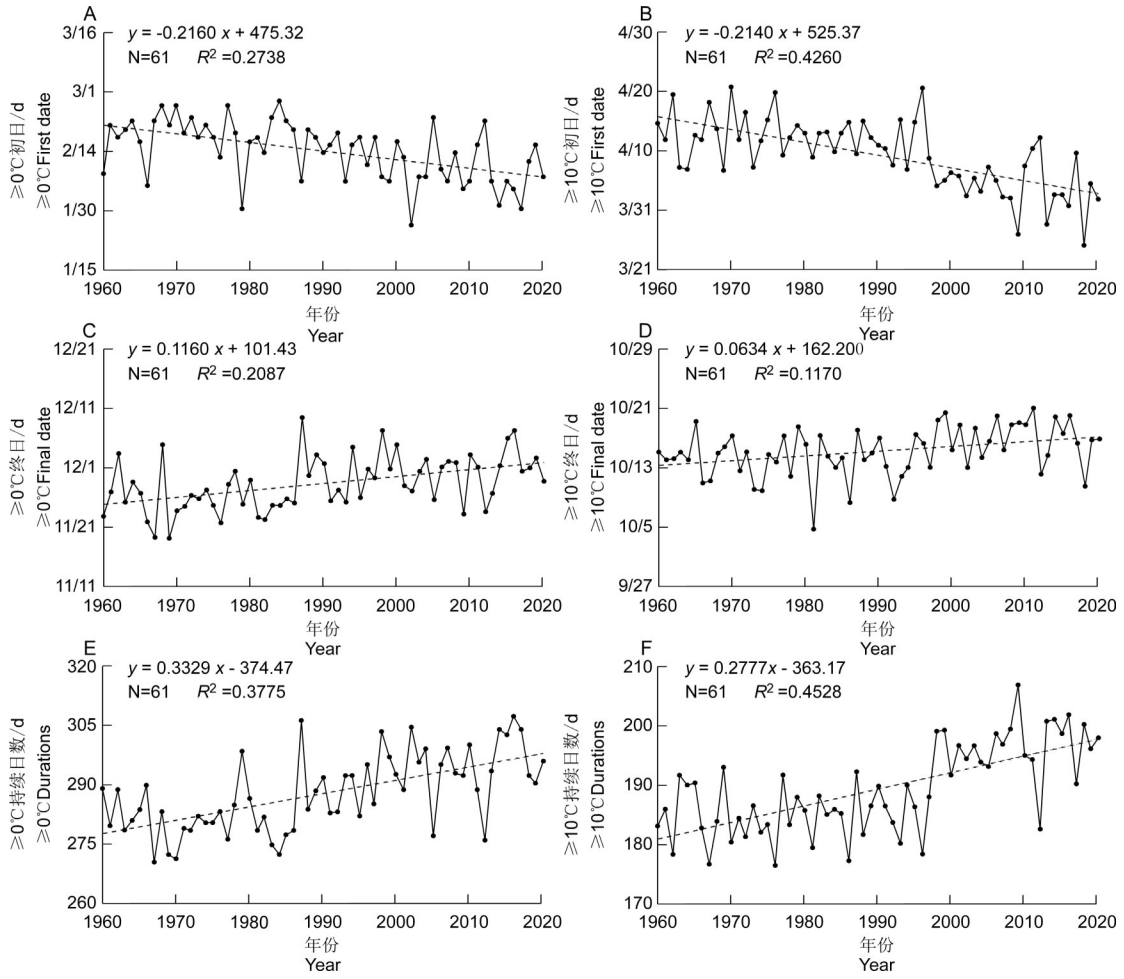


图3　1960-2020年黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃初终日和持续日数变化

Fig.3　Changes of the first date, final date, and durations of temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃ in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

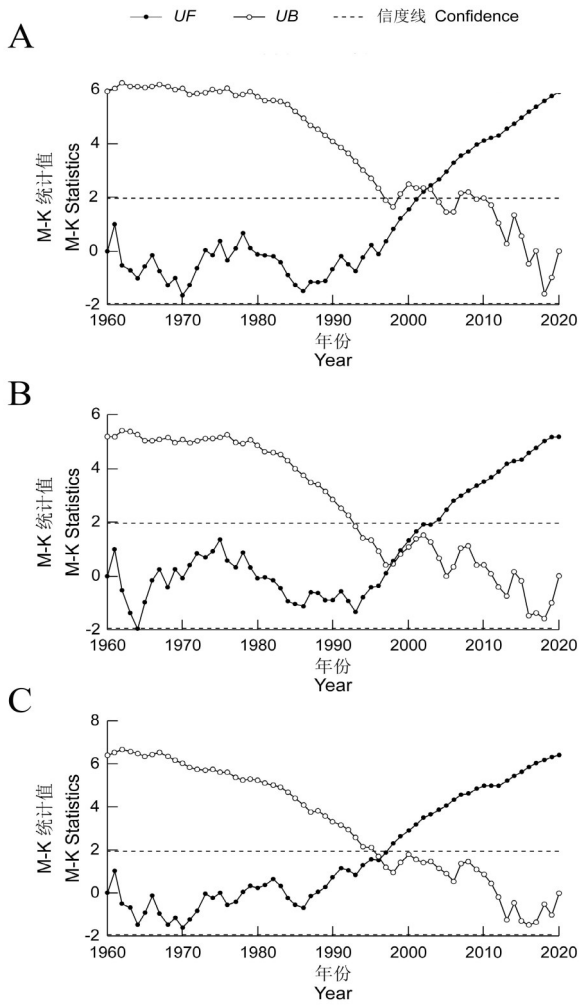
中南部宁夏、陕西和甘肃东部等地区在7.28～11.06 ℃,流域北部内蒙古和山西等地在3.50～7.27 ℃。

2.6　≥0 ℃和≥10 ℃初终日空间分布特征

近61 a黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃初终日空间分布如图6所示,可见,黄河流域≥0 ℃初日在1月5日-4月29日,整体呈由东到西、由南向北逐渐推迟趋势,流域东南部初日最早,在1月5日-1月26日,流域西南部达日、玛多和清水河等站初日最晚,在4月6日-4月29日,流域中西部大部分地区在2月19日-3月13日。与≥0 ℃初日空间分布特征相似,流域东南部≥10 ℃初日最早,在3月10日-4月5日,流域西南部玛沁、达日、玛多和清水河等站初日最晚,在6月22日-7月17日,流域中西部大部分地区在4月6日-5月1日。≥0 ℃终日空间分布与初日趋势相反,整体呈由东到西、由南向北逐渐提前趋势,流域西南部达日、玛多和清水河等站终日最早,在10月7日-10月19日,流域东南部终日最晚,在12月13日-12月28日,流域中西部大部分地区在11月10日-11月25日。流域西南部达日、玛多和清水河等站≥10 ℃终日最早,在7月28日-8月22日,流域东南部≥10 ℃终日最晚,在10月26日-11月15日,流域中西部大部分地区在10月5日-10月25日。

2.7　≥0 ℃和≥10 ℃有效积温和持续日数的空间分布特征

近61 a黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃有效积温和持续日数空间分布如图7所示,黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃有效积温空间分布特征相似,整体上均呈由东到西、由南向北逐渐减小趋势。流域≥0 ℃有效积温在723～5485 ℃·d,流域东南部积温较高在5025 ℃·d以上,流域西南部达日、玛多和清水河等站最小,在723～1532 ℃·d。黄河流域≥10 ℃有效积温在1～2640 ℃·d,流域东南部积温较高在



A:≥0 ℃有效积温;B:≥10 ℃有效积温;C:年平均气温

A: effective accumulated temperature ≥0 ℃ ; B: effective accumulated temperature ≥10 ℃ ; C: annual average temperature

图4 黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃有效积温、年平均气温的Mann-Kendall检验

Fig.4 Mann-Kendall test curve of annual average temperature, effective accumulated temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃ in the Yellow River Basin

2210 ℃·d以上,流域西南部达日、玛多和清水河等站最小,在1～62 ℃·d。黄河流域≥0 ℃持续日数在162～358 d,整体呈由东到西,由南向北逐渐缩短趋势,流域东南部≥0 ℃持续日数最长,在326 d以上,西南部玛沁、达日、玛多和清水河最短,在203 d以下,流域中西部大部分地区在242～282 d。≥10 ℃持续日数在11～251 d,整体呈由东到西,由南向北逐渐缩短趋势,流域东南部≥10 ℃持续日数最长,在235 d以上,西南部达日、玛多和清水河等站最短,在57 d以下,流域中南部大部分地区在157～204 d。

2.8 热量指标的影响因素分析

黄河流域各农业热量指标与地理因子、气象要素的相关分析如表2所示。≥0 ℃和≥10 ℃有效积温、终日和持续日数与海拔高度的相关系数分别为－0.960、－0.818、－0.805、－0.956、－0.950和－0.946,表现为显著的负相关关系($P<0.01$);≥0 ℃和≥10 ℃初日与海拔高度的相关系数分别为0.791和0.930,呈显著的正相关($P<0.01$)。≥0 ℃和≥10 ℃有效积温、终日和持续日数与经度均呈显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数在0.634～0.777;≥0 ℃和≥10 ℃初日与经度的相关系数分别为－0.608和－0.696,呈显著负相关($P<0.01$)。≥0 ℃和≥10 ℃有效积温、终日和持续日数与年平均气温的相关系数分别为0.985、0.940、0.942、0.946、0.988和0.976,呈显著正相关($P<0.01$);≥0 ℃和≥10 ℃初日与年平均气温呈显著负相关,相关系数分别为－0.938和－0.953($P<0.01$)。≥0 ℃和≥10 ℃初日与平均风速和平均湿度均呈显著正相关($P<0.01$);≥0 ℃和≥10 ℃有效积温和持续日数与平均风速和平均湿度均呈显著负相关($P<0.01$)。黄河流域各热量指标与纬度、光照和平均气压相关性不强,且大多未通过$\alpha=0.01$水平下的显著性检验。整体来看,黄河流域农业各热量指标与年平均气温和海拔高度密切相关,近61 a黄河流域农业热量指标主要受年平均气温和海拔高度的影响。

2.9 热量指标的环流因子分析

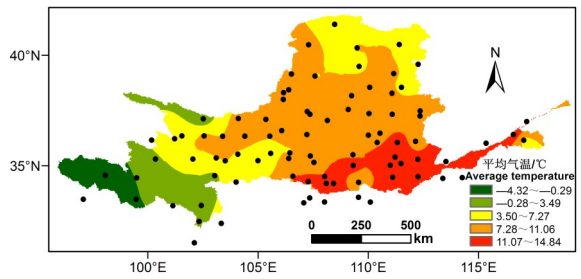
大气环流是形成和制约区域气候的重要因子,参考相关成果,本文选取北大西洋涛动和西太平洋副高强度等7个环流因子,采用Pearson相关分析研究其对黄河流域各热量指标的关系[30],结果如表3所示。可见,≥0 ℃和≥10 ℃有效积温、终日和持续日数与西太平洋副高强度指数、太平洋副高强度指数和东大西洋遥相关型指数均呈显著正相关($P<0.01$);≥0 ℃和≥10 ℃初日与西太平洋副高强度指数、太平洋副高强度指数和东大西洋遥相关型指数均呈显著负相关($P<0.01$)。≥0 ℃有效积温和≥10 ℃有效积温、终日和持续日数与北大西洋涛动指数均呈显著负相关($P<0.01$)。≥0 ℃和≥10 ℃有效积温与极地-欧亚遥相关型指数相关系数分别为－0.361和－0.422,表现为显著

表1　1960—2020年黄河流域热量指标变化

Table 1　Change of thermal indicators in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

地区 Area	≥0 ℃有效积温 Effective accumulated temperature (≥0 ℃)		≥0 ℃初日 First date (≥0℃)		≥0 ℃终日 Final date (≥0 ℃)		≥0 ℃持续日数 Durations (≥0 ℃)	
	均值 Average	倾向率/[℃·d·(10 a)$^{-1}$] Tendency rate	均值 Average	倾向率/[d·(10 a)$^{-1}$] Tendency rate	均值 Average	倾向率/[d·(10 a)$^{-1}$] Tendency rate	均值 Average	倾向率/[d·(10 a)$^{-1}$] Tendency rate
上游	2 870.33	70.89	3月3日	—2.29	11月15日	1.29	258	3.58
中游	4 110.69	66.96	2月3日	—2.19	12月8日	1.07	308	3.26
下游	4 939.62	86.01	1月18日	—1.52	12月22日	1.33	339	2.85

地区 Area	≥10 ℃有效积温 Effective accumulated temperature (≥10 ℃)		≥10 ℃初日 First date (≥10 ℃)		≥10 ℃终日 Final date (≥10 ℃)		≥10 ℃持续日数 Durations (≥10 ℃)	
	均值 Average	倾向率/[℃·d·(10 a)$^{-1}$] Tendency rate	均值 Average	倾向率/[d·(10 a)$^{-1}$] Tendency rate	均值 Average	倾向率 Tendency rate	均值 Average	倾向率/[d·(10 a)$^{-1}$] Tendency rate
上游	912.70	29.46	4月27日	—2.30	9月30日	0.87	157	3.17
中游	1 682.50	34.71	3月30日	—2.16	10月25日	0.58	210	2.74
下游	2 291.02	47.09	3月20日	—1.89	11月7日	0.65	233	2.54



实心圆点为气象站点,名称见图1

The solid dot is the meteorological station, the name is shown in Fig. 1

图5　黄河流域平均气温空间分布

Fig.5　Spatial distribution of average temperature in the Yellow River Basin

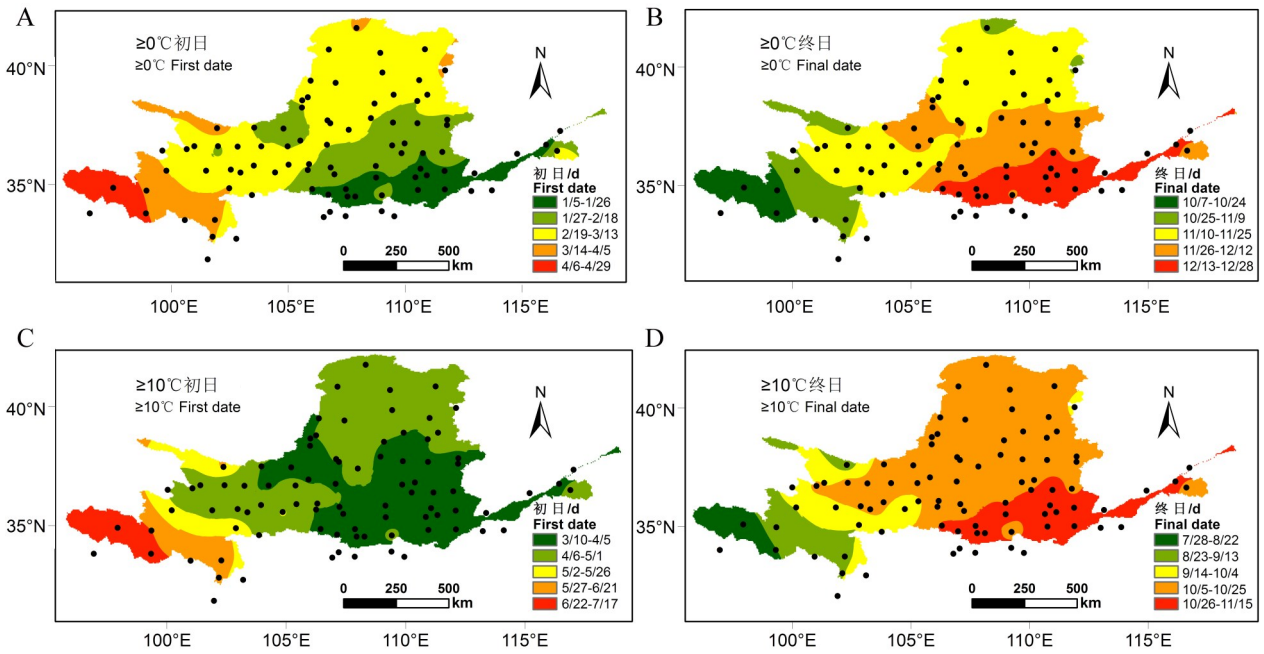
负相关($P<0.01$)。各农业热量指标与北极涛动指数和西太平洋遥相关型指数没有显著的相关关系。整体上看,黄河流域各农业热量指标受西太平洋副高强度指数、太平洋副高强度指数和东大西洋遥相关型指数的影响较大。

3　讨论

近61 a黄河流域年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温呈上升趋势,≥0 ℃和≥10 ℃初日呈提前趋势,终日呈推迟趋势,持续日数呈延长趋势,这与新疆[6]、华北地区[31]以及全国[8, 32]的变化趋势一致。从变化幅度来看,黄河流域年平均气温增幅[0.29 ℃·(10 a)$^{-1}$]略高于全国水平[0.27 ℃·(10 a)$^{-1}$][23],≥0 ℃和≥10 ℃初日提前幅度[—2.16 d·(10 a)$^{-1}$和—2.14 d·(10 a)$^{-1}$]、终日延迟幅度[1.16 d·(10 a)$^{-1}$和0.63 d·(10 a)$^{-1}$]和持续日数延长幅度[3.33 d·(10 a)$^{-1}$和2.78 d·(10 a)$^{-1}$]高于全国大部分地区[33],小于华北地区[31]。黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃持续日数延长是受初日提前和终日延迟共同作用,且初日的提前较终日的延迟对持续日数增加的影响更明显。

近61 a黄河流域年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温分别于1996、2003和1997年发生突变,这与云南[20]、华北地区[31]和山西[18]等研究结果一致,20世纪80年代中后期全球气候状态的转变[34]导致黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃初日提前,终日和持续日数延迟,有效积温增加。

黄河流域热量指标主要受年平均气温和海拔高度的影响,这与全国[33]及贵州[35]研究结果一致,温度升高导致流域界限温度初日提早终日推迟,积温增加,同时由于黄河流域横跨3级阶梯,区域内海拔高差起伏较大,立体气候特征明显。西太平洋副高强度指数、太平洋副高强度指数和东大

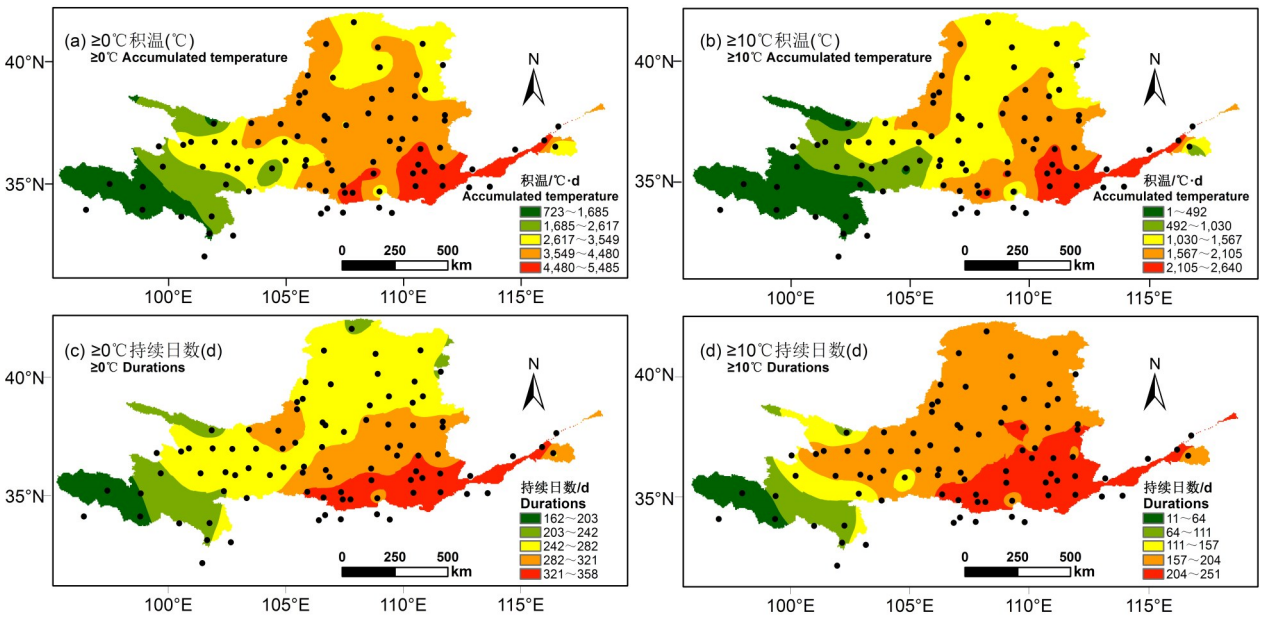


实心圆点为气象站点,名称见图1

The solid dot is the meteorological station, the name is shown in Fig. 1

图6 黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃初终日空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the first date and final date of temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃ in the Yellow River Basin



实心圆点为气象站点,名称见图1

The solid dot is the meteorological station, the name is shown in Fig. 1

图7 黄河流域≥0 ℃和≥10 ℃有效积温和持续日数变化

Fig.7 Spatial distribution of durations and effective accumulated temperature of ≥0 ℃ and ≥10 ℃ in the Yellow River Basin

西洋遥相关型指数是影响黄河流域农业热量指标的主要大气环流因子,其通过影响夏季气温[36]和冬季气温等[37]引致流域农业热量指标变化。

本文利用黄河流域89个气象站点数据研究农业热量指标变化,探讨了地理因子和气象要素对热量指标的影响,社会经济发展和土地利用变化等因素对流域热量指标的影响有待进一步研究。

表2　黄河流域农业热量资源指标与其影响因素的相关性分析

Table 2　Correlation analysis of agricultural thermal resource index and its influencing factors in the Yellow River Basin

影响因素 influenc factor	≥0 ℃有效积温 Effective accumulated temperature (≥0 ℃)	≥0 ℃初日 First date (≥0 ℃)	≥0 ℃终日 Final date (≥0 ℃)	≥0 ℃持续日数 Durations (≥0 ℃)	≥10 ℃有效积温 Effective accumulated temperature (≥10 ℃)	≥10 ℃初日 First date (≥10 ℃)	≥10 ℃终日 Final date (≥10 ℃)	≥10 ℃持续日数 Durations (≥10 ℃)
海拔高度	−0.960**	0.791**	−0.818**	−0.805**	−0.956**	0.930**	−0.950**	−0.946**
经度	0.760**	−0.608**	0.665**	0.634**	0.777**	−0.696**	0.763**	0.732**
纬度	0.112	0.274**	−0.246**	−0.263	0.193	−0.176	0.078	0.134
年平均气温	0.985**	−0.938**	0.940**	0.942**	0.946**	−0.953**	0.988**	0.976**
光照	−0.280*	0.176	−0.216	−0.237	−0.188	0.300*	−0.126	−0.298*
平均风速	−0.528**	0.365**	−0.414**	−0.473**	−0.424**	0.482**	−0.237	−0.494**
平均湿度	−0.427**	0.355**	−0.017	−0.279*	−0.475**	0.265*	−0.189	−0.298*
平均气压	0.290*	−0.316*	0.329**	0.396**	0.248	−0.263*	0.093	0.253*

注:**表示在0.01水平上显著相关,*表示在0.05水平上显著相关

Note:* and ** indicated significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively

表3　黄河流域农业热量资源指标与环流因素的相关性分析

Table 3　Correlation analysis of agricultural heat resource index and circulation factors in the Yellow River Basin

环流因子 Circulation factors	≥0 ℃有效积温 Effective accumulated temperature (≥0 ℃)	≥0 ℃初日 First date (≥0 ℃)	≥0 ℃终日 Final date (≥0 ℃)	≥0 ℃持续日数 Durations (≥0 ℃)	≥10 ℃有效积温 Effective accumulated temperature (≥10 ℃)	≥10 ℃初日 First date (≥10 ℃)	≥10 ℃终日 Final date (≥10 ℃)	≥10 ℃持续日数 Durations (≥10 ℃)
西太平洋副高强度指数	0.639**	−0.535**	0.452**	0.621**	0.554**	−0.518**	0.399**	0.597**
太平洋副高强度指数	0.660**	−0.516**	0.430**	0.596**	0.577**	−0.526**	0.384**	0.597**
北极涛动指数	0.215	−0.095	0.154	0.144	0.137	−0.179	0.057	0.170
北大西洋涛动指数	−0.332**	0.210	−0.172	−0.244	−0.345**	0.207	−0.372**	−0.333**
东大西洋遥相关型指数	0.694**	−0.566**	0.514**	0.674**	0.597**	−0.649**	0.352**	0.680**
西太平洋遥相关型指数	−0.239	0.078	0.030	−0.046	−0.242	0.157	0.047	−0.106
极地−欧亚遥相关型指数	−0.361**	0.206	−0.121	−0.216	−0.422**	0.231	−0.273*	−0.308*

注:**表示相关性在0.01水平上显著相关,*表示相关性在0.05水平上显著相关

Note:* and ** indicated significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively

4　结论

1960-2020年黄河流域平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温呈上升趋势,≥0 ℃和≥10 ℃初日呈提前趋势,≥0 ℃和≥10 ℃终日呈延迟趋势,≥0 ℃和≥10 ℃持续日数呈增加趋势。近61 a黄河流域整体上由东到西,由南向北年平均气温逐渐减小,≥0 ℃和≥10 ℃有效积温逐渐减小,≥0 ℃和≥10 ℃初日逐渐推迟,≥0 ℃和≥10 ℃终日逐渐提前,≥0 ℃和≥10 ℃持续日数逐渐缩短。黄河流域上、中、下游地区各热量指标变化趋势一致,上游地区变化幅度相对较大。Mann-Kendall突变检验表明,近61 a黄河流域年平均气温、≥0 ℃和≥10 ℃有效积温分别于1996、2003和1997年发生突变。近61 a黄河流域农业热量指标主要受年平均气温和海拔高度的影响。西太平洋副高强度指数、太平洋副高强度指数和东大西洋遥相关型指数是影响近61 a黄河流域农业热量指标变化的主要大气环流因子。

参　考　文　献

[1]IPCC. Climate Change 2021:The Physical Science Basis[R]. Cambridge and New York:Cambridge University Press,2021.

[2]Linderholm H W. Growing season changes in the last century

[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(1-2): 1-14.

[3]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.

[4]Asseng S,Ewert F,Martre P,et al. Rising temperatures reduce global wheat production[J]. Nature Climate Change,2015,5:143-147.

[5]Ishigooka Y, Kuwagata T, Nishimori M, et al. Spatial characterization of recent hot summers in Japan with agro-climatic indices related to rice production[J]. Journal of Agricultural Meteorology,2011,67(4):209-224.

[6]普宗朝,张山清,李景林,等. 近50a新疆≥0℃持续日数和积温时空变化[J]. 干旱区研究,2013,30(5):781-788.
Pu Z C, Zhang S Q, Li J L, et al. Spatiotemporal change of duration and accumulated temperature of temperature ≥ 0℃ in Xinjiang in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(5):781-788.

[7]杨晓光,于沪宁. 中国气候资源与农业[M]. 北京:气象出版社,2006:1-339.
Yang X G, Yu H N. Climate resources and agriculture in China[M]. Beijing:China Meteorological Press,2006:1-339.

[8]宁晓菊,秦耀辰,崔耀平,等. 60年来中国农业水热气候条件的时空变化[J]. 地理学报,2015,70(3):364-379.
Ning X J,Qin Y C,Cui Y P,et al. The spatio-temporal change of agricultural hydrothermal conditions in China from 1951 to 2010[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(3):364-379.

[9]郭佳,张宝林,高聚林,等. 内蒙古东部农业热量资源的空间分异及玉米资源利用率[J]. 西北农业学报,2020,29(3):476-486.
Guo J, Zhang B L, Gao J L, et al. Spatial heterogeneity of agricultural thermal resources and use efficiency of maize in eastern Inner Mongolia[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2020,29(3):476-486.

[10]Piticar A. Changes in agro-climatic indices related to temperature in Central Chile[J]. International Journal of Biometeorology,2019,63(4):499-510.

[11]李帅,张勃,马彬,等. 基于格点数据的中国1961—2016年≥5℃、≥10℃有效积温时空演变[J]. 自然资源学报,2020,35(5):1216-1227.
Li S, Zhang B, Ma B, et al. Spatiotemporal evolution of effective accumulated temperatures of ≥5℃ and ≥10℃ based on grid data in China from 1961 to 2016[J]. Journal of Natural Resources,2020,35(5):1216-1227.

[12]戴声佩,李海亮,罗红霞,等. 1960—2011年华南地区界限温度10℃积温时空变化分析[J]. 地理学报,2014,69(5):650-660.
Dai S P,Li H L,Luo H X,et al. The spatio-temporal change of active accumulated temperature≥10℃ in Southern China from 1960 to 2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5):650-660.

[13]何永坤,郭建平. 1961—2006年东北地区农业气候资源变化特征[J]. 自然资源学报,2011,26(7):1199-1208.
He Y K, Guo J P. Characteristics of agricultural climate resources in the three provinces of Northeast China from 1961 to 2006[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(7):1199-1208.

[14]李元华,田国强,杨贤,等. 河北省近50年农业界限温度变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(5):83-88.
Li Y H, Tian G Q, Yang X, et al. The change characteristics of the agricultural limit temperature in Hebei Province in recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(5):83-88.

[15]唐宝琪,延军平,李英杰. 华东地区≥10℃积温的时空演变特征[J]. 中国农业气象,2015,36(6):674-682.
Tang B Q, Yan J P, Li Y J. Changes of the accumulated temperature above 10℃ in East China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2015,36(6):674-682.

[16]孙杨,张雪芹,郑度. 气候变暖对西北干旱区农业气候资源的影响[J]. 自然资源学报,2010,25(7):1153-1162.
Sun Y,Zhang X Q,Zheng D. The impact of climate warming on agricultural climate resources in the arid region of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(7):1153-1162.

[17]李瑞英,任崇勇,张婷. 1961—2015年鲁西南地区热量资源时空变化特征[J]. 气象与环境学报,2018,34(4):92-97.
Li R Y, Ren C Y, Zhang T. Spatio-temporal change characteristics of heat resources in the southwest of Shandong Province during 1961-2015[J]. Journal of Meteorology and Environment,2018,34(4):92-97.

[18]钱锦霞,张建新,李娜,等. 山西省农业热量资源变化特征及其对农业的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(3):786-792.
Qian J X,Zhang J X,Li N,et al. Variation characteristics of agricultural heat resource and its effect on agriculture in Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(3):786-792.

[19]赵金鹏,胡婧媛,郭翔,等. 近50年青藏高原地区热量资源时空变化特征[J]. 应用与环境生物学报,2022,28(4):822-828.
Zhao J P,Hu J Y,Guo X,et al. Variation characteristics of thermal resources in Qinghai-Tibet Plateau in recent 50 years[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022,28(4):822-828.

[20]李涛辉,张文翔,吕爱锋,等. 云南省农业生长季热量资源的时空特征[J]. 山地学报,2023,41(3):361-374.
Li T H,Zhang W X,Lyu A F,et al. Temporal and spatial characteristics of heat resources in growing season in Yunnan Province, China[J]. Mountain Research, 2023, 41(3):361-374.

[21]姜树坤,王立志,杨贤莉,等. 1961—2019年松嫩平原盐碱地区域水稻生长季气候资源的时空变化特征分析[J]. 作物杂志,2022(6):214-219.
Jiang S K,Wang L Z,Yang X L,et al. Spatiotemporal change characteristics of rice growth climate resources in saline-

alkaline area of Songnen Plain from 1961 to 2019[J]. Crops, 2022(6):214-219.

[22]张晨霞,陈方正,黄明霞,等. 基于CMIP6气候模式的东北三省农业水热资源时空变化特征[J]. 地理与地理信息科学,2023,39(3):94-103.
Zhang C X,Chen F Z,Huang M X,et al. Spatial and temporal change characteristics of agricultural precipitation and heat resources in Northeast China based on CMIP6[J]. Geography and Geo-Information Science,2023,39(3):94-103.

[23]胡琦,潘学标,邵长秀,等. 1961—2010年中国农业热量资源分布和变化特征[J]. 中国农业气象,2014,35(2):119-127.
Hu Q,Pan X B,Shao C X,et al. Distribution and variation of China agricultural heat resources in 1961-2010[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(2):119-127.

[24]李硕,沈彦俊. 气候变暖对西北干旱区农业热量资源变化的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(2):227-235.
Li S,Shen Y J. Impact of climate warming on temperature and heat resource in arid Northwest China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2013,21(2):227-235.

[25]崔成,刘园,刘布春,等. ENSO事件对山东苹果生产的影响Ⅰ:不同年型下苹果气候资源及产量的变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(10):1659-1674.
Cui C,Liu Y,Liu B C,et al. ENSO events impacts on apple production in Shandong Ⅰ:a study of changes in apple climatic resources and yields under different scenarios[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2022,30(10):1659-1674.

[26]李晴晴. 黄河流域农业干旱时空特征及其对土壤水和地下水的影响[D]. 开封:河南大学,2023.
Li Q Q. Spatial-temporal characteristics of agricultural drought in the yellow river basin and its impact on soil moisture and groundwater storage[D]. Kaifeng: Henan University, 2023.

[27]田彦君,张山清,徐文修,等. 北疆农业热量资源时空变化及其对熟制的影响研究[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(5):227-233,239.
Tian Y J,Zhang S Q,Xu W X,et al. Spatial-temporal variation of agricultural-heat resources and its impacts on multiple cropping in the North Area of Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2016,34(5):227-233,239.

[28]魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 第二版[M]. 北京:气象出版社,2007:1-296.
Wei F Y. Modern climate statistics diagnosis and prediction technology 2nd[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007:1-296.

[29]苗运玲,于永波,霍达,等. 中天山北坡冬季降雪变化及其影响因子分析[J]. 干旱区研究,2023,40(1):9-18.
Miao Y L,Yu Y B,Huo D,et al. Analysis of winter snowfall variability and its influencing factors on the north slopes of the middle Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research,2023,40(1):9-18.

[30]孙从建,郑振婧,李新功,等. 黄土塬面保护区潜在蒸发量时空变化及其与气象、环流因子关系分析[J]. 自然资源学报,2020,35(4):857-868.
Sun C J,Zheng Z J,Li X G,et al. Spatio-temporal distribution of the potential evapotranspiration and its controlling factors in the tableland protected region of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources,2020,35(4):857-868.

[31]董满宇,李洁敏,王磊鑫,等. 1960—2017年华北地区气候生长季变化特征及成因分析[J]. 地理科学,2019,39(12):1990-2000.
Dong M Y,Li J M,Wang L X,et al. Climatic characteristics of climatic growing season and impact factors in North China during 1960-2017[J]. Scientia Geographica Sinica,2019,39(12):1990-2000.

[32]刘少华,严登华,翁白莎,等. 近50a中国≥10℃有效积温时空演变[J]. 干旱区研究,2013,30(4):689-696.
Liu S H,Yan D H,Weng B S,et al. Spatiotemporal evolution of effective accumulated temperature ≥10℃ in China in recent 50 years[J]. Arid Zone Research,2013,30(4):689-696.

[33]吴蓓蕾,姜大膀,王晓欣. 1961—2018年中国生长季变化[J]. 大气科学,2021,45(2):424-434.
Wu B L,Jiang D B,Wang X X. Changes in the growing season across China during 1961-2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2021,45(2):424-434.

[34]Reid P C,Hari R E,Beaugrand G,et al. Global impacts of the 1980s regime shift[J]. Global Change Biology,2016,22(2):682-703.

[35]张波,于飞,吴战平,等. 贵州霜冻气候变化特征[J]. 浙江农业学报,2020,32(4):685-695.
Zhang B,Yu F,Wu Z P,et al. Climate characteristics of frost in Guizhou[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2020,32(4):685-695.

[36]吴晓娜,孙照渤. 欧亚大陆夏季地表温度的气候特征及与大气环流的联系[J]. 大气科学学报,2015,38(2):195-204.
Wu X N,Sun Z B. Climatic features of summer land surface temperature in Eurasian continent and its relationship with atmospheric circulation[J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2015,38(2):195-204.
Fan S M,Yang X S. Arctic and East Asia winter climate variations associated with the eastern Atlantic pattern[J]. Journal of Climate,2017,30(2):573-583.

Spatiotemporal evolution characteristics of agricultural thermal resources in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

Zhang Zhigao[1], Zhang Xiuli[2], Jia Mengwei[1], Chen Heyang[1], Sun Zixin[3], Hao Haijiao[1], Li Zhuoya[1], Cai Maotang[4*]

(*1.School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, China; 2.Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development, Henan University, Kaifeng 475001, China; 3.College of Geography and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China; 4.Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: [Objective] Climate warming will change the spatialtemporal distribution of agricultural heat resources. Analyzing the heat indicators of agriculture in the Yellow River Basin can provide a basis for the rational utilization of regional agricultural climatic resources. [Methods] Based on the daily meteorological data from 89 meteorological stations in the Yellow River Basin from 1960 to 2020, linear trend estimation and Mann-Kendall abrupt change test methods were used to analyze the spatialtemporal variations and influencing factors of annual mean temperature, the initial and final dates of temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃, duration, and effective accumulated temperature. [Result] Over the past 61 years, the average temperature, effective accumulated temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃ showed an increasing trend with trendency rates of 0.29 ℃·(10 a)$^{-1}$, 70.23 ℃·d·(10 a)$^{-1}$ and 34.50 ℃·d·(10 a)$^{-1}$, respectively. The duration of temperatures ≥0 ℃ and ≥10 ℃ showed increasing trends, with tendency rates of 3.33 d·(10 a)$^{-1}$ and 2.78 d·(10 a)$^{-1}$, respectively. The first date of temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃ showed an advancing trends with tendency rates of —2.16 d·(10 a)$^{-1}$ and —2.14 d·(10 a)$^{-1}$, respectively, while the final dates showed delaying trends with tendency rates 1.16 d·(10 a)$^{-1}$ and 0.63 d·(10 a)$^{-1}$, respectively. The magnitude of the advancement of initial dates was greater than the delay of final dates for temperatures ≥0 ℃, and the changes in the first and final date and duration were greater than those of temperatures ≥10 ℃. Abrupt changes in the annual mean temperature and effective accumulated temperature ≥0 ℃ and ≥10 ℃ occurred in the years 1996, 2003 and 1997, respectively, in the Yellow River Basin. The changes in thermal indicators in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River Basin were consistent with the overall changes in the basin, with relatively greater changes observed in the upper reaches. Spatially, the annual average temperature, effective accumulated temperatures ≥0 ℃ and ≥10 ℃ increased gradually from the upper to the lower reaches, while the initial dates advanced, final dates delayed, and the duration extended. [Conclusion] Agricultural heat resources in the Yellow River Basin showed an increasing trend, and thermal indicators were mainly affected by altitude and annual average temperature. The intensity indices of the Western Pacific Subtropical High, Pacific Subtropical High, and East Atlantic Teleconnection Pattern were the main atmospheric circulation factors influencing the changes in agricultural heat indicators in the Yellow River Basin over the past 61 years.

Keywords: Temperature, Effective accumulated temperature, Thermal resources, First and final date, The Yellow River Basin

(编辑:郭玥微)