

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2021.0099

杨丽,刘海军,唐晓培,等.气候变化对河北省宁晋县冬小麦低/高产年产量的影响[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):950-959,971. YANG L, LIU H J, TANG X P, et al. Effects of climate change on winter wheat yield in low/high yield years in Ningjin County, Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 950-959, 971. (in Chinese)

气候变化对河北省宁晋县冬小麦 低/高产年产量的影响

杨丽,刘海军,唐晓培,冯东雪,李伦

(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:采用河北省平原区粮食生产大县宁晋县 1982—2018 年冬小麦产量数据和对应气象数据,对其进行 Mann-Kendall(M-K)趋势检验和 Sen 斜率分析,利用 HP 滤波法将冬小麦产量分离为气候产量和趋势产量,筛选产量变化较大的年份并揭示主要气象影响因子,进而分析冬小麦产量与气候变化的关系。研究结果表明:冬小麦生育期平均气温、最高气温和最低气温均呈显著上升趋势,上升幅度分别为 0.05、0.03 和 0.07 °C/a,平均风速呈显著下降趋势,下降幅度为 $-0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;冬小麦实际产量多年平均值为 $5\ 330 \text{ kg}/\text{hm}^2$,实际产量和趋势产量均呈显著上升趋势,气候产量无明显变化趋势,但是变化范围为 $-1\ 245 \sim 1\ 376 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ($-41\% \sim 26\%$),说明年际间变化较大;分析典型高产年和低产年气候要素对冬小麦产量的影响,发现播种-返青期极端低温(1986 年 12 月 8 日和 9 日日最低气温达到 $-21.2 \text{ }^\circ\text{C}$,1993 年 1 月 14—25 日最低气温平均值达到 $-14.1 \text{ }^\circ\text{C}$),拔节-抽穗期补灌不及时(1993 年)以及种植后期降水量过多(2008 年)会导致小麦减产,日照时数的提高和播种-拔节期气温的升高有利于小麦高产;不同年份造成减产的主导气象要素不同表明了气候要素对小麦减产的复杂性,而不同年份造成增产的主导气象要素相似则表明了气候要素对小麦增产的一致性。

关键词:气候产量;冬小麦;典型低产年;典型高产年

中图分类号:TV213 ;S162.5 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



气候变化以全球气候变暖为主要特征,对全球经济、生态以及社会系统都造成了重大影响^[1-3]。随着气候变化,极端天气,如干旱、极端低温或高温,也发生得更加频繁^[4-5]。农业生产对气候变化,尤其对极端气候极为敏感^[6-7]。在粮食主产区,气候要素的剧烈变化对当地农业生产和作物产量的影响更为突出,如暴雨、短期极端低温或极端高温以及干旱等极端气候均会导致棉花和玉米等作物产量显著减少^[8-11]。

小麦是我国的主要粮食作物之一,2019 年我国小麦产量达到 $13\ 360 \text{ 万 t}$,占粮食总产量的 20%^[12]。

邢素丽等^[13]发现在我国的冬小麦种植区冷冬年份有效穗数下降极大,导致小麦减产。刘家宏等^[14]发现石家庄冬小麦的致灾因子为:3 月是最低温度;6 月是平均温度;10、11 月是降水量。Li 等^[15]研究了极端气候对我国天山地区小麦产量的影响,发现:在对降水敏感的地区,强降雨对小麦产量增加影响较大;在对温度敏感的地区,极端高温天气的增加对小麦减产影响较大,而极端低温天气的减少对小麦增产影响较大。Kristensen 等^[16]研究发现,夏季温度升高会导致冬小麦产量降低。Saadi 等^[17]发现在地中海地区,气候变暖对冬小麦春化影响较大,春季降

收稿日期:2021-01-30 修回日期:2021-06-10 网络出版时间:2021-06-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210621.1750.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51939005);国家重点研发计划项目(2017YFD0201500);111 引智基地项目(B18006)

作者简介:杨丽(1997—)女,湖南常德人,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail:201921470027@mail.bnu.edu.cn

通信作者:刘海军(1975—)男,陕西富平人,教授,博士,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail:shanxiljh@bnu.edu.cn

水量的减少对冬小麦生长的影响尤为明显。Kothari 等^[18]发现温度升高使得得克萨斯高原冬小麦的生长季节缩短,预计冬小麦的灌溉用水量在未来将会减少,这对于灌溉水资源量较少的得克萨斯高原的冬小麦种植有利。

可以发现,对于国内外不同地区,气候变化对冬小麦种植的影响不尽相同。河北省是我国的小麦主产区之一,宁晋县是河北平原区最大的小麦生产县。以宁晋县小麦产量和气候变化长系列数据为基础,分析和识别影响该地区小麦产量的主要气候要素,并提出相应的应对措施,研究结果对指导当地农业生产、保障作物高产稳产具有重要

意义。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

气象数据来源于河北省宁晋气象站(纬度 37°38'N,经度 114°55'E,海拔 30.1 m),包括日尺度的降水量、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,时间范围为 1981—2018 年,数据由国家气象局气象信息中心提供。冬小麦产量数据来源于 1982—2018 年《河北农村统计年鉴》。研究区冬小麦的生育期由中国气象网的农业气象站数据资料和实地观察结果确定,见表 1。

表 1 冬小麦的生育期划分

Tab. 1 Growth period of winter wheat in Ningjin

生育期	播种-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟
时间区间	10月10日—次年2月28日	3月1日—4月10日	4月11日—4月30日	5月1日—6月15日

1.2 研究方法

1.2.1 参考作物蒸散量 ET_0

参考作物蒸散量 ET_0 采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算,反映研究区的总体作物蒸散能力,只与当地的气象条件有关^[19]。

1.2.2 M-K 趋势检验和 Sen 斜率计算

M-K 趋势检验能有效区分某一变化过程是处于自然波动还是存在确定的变化趋势,具有无须对数据系列进行特定的分布检验,允许系列有缺失值等优点,因此该检验法被广泛应用于数据的趋势检测^[20-21]。如果数据时间序列显示线性趋势,则可以使用 Sen^[22] 给出的简单非参数计算估计真实斜率。

本文使用 Salmi 等^[23] 基于 Excel 开发的 MAKESENS 1.0 软件进行气象要素以及冬小麦产量的 M-K 趋势检验和 Sen 斜率计算。

1.2.3 HP 滤波法进行产量分解

农作物产量的影响因素有人为因素、气候因素以及随机因素,据此农作物产量(y)可以分解为趋势产量(y_t)、气候产量(y_w)以及随机产量 Δ_y 。其中趋势产量主要反映以育种、耕种栽培方式和农业机械水平等提高为主的人为因素。农作物产量计算公式为

$$y = y_t + y_w + \Delta_y \quad (1)$$

由于随机产量对农作物产量的影响较小,且无规律可循,难以定量计算,多年平均值为零,故忽略不计。因此,可以认为农作物产量由趋势产量和气候产量组成,即

$$y = y_t + y_w \quad (2)$$

HP 滤波法是 Hodrick 等^[24] 提出的一种时间序列在状态空间中的分析方法。HP 滤波法可以近似看作一个高通滤波器,把时间序列看作是不同频率成分的叠加。因此 HP 滤波法可以将产量分离成气候产量(高频成分)与趋势产量(低频成分),具有分离出的趋势产量无滞后性,产量序列的两端没有缺损等优点^[25]。

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期气象要素和 ET_0 变化趋势

河北省平原区的冬小麦生育期一般为 10 月至次年 6 月。1982—2018 年冬小麦生育期的气象因子的年际变化趋势见图 1,多年平均值和 Sen 斜率见表 2。可以看出,1982—2018 年冬小麦生育期总降水量多年平均值为 130 mm,总日照时数多年平均值为 1 632 h,相对湿度多年平均值为 62.2%。从年际变化趋势来看,冬小麦生育期总降水量呈不显著上升趋势,总日照时数和相对湿度呈不显著下降趋势。冬小麦生育期平均、最高、最低气温多年平均值分别为 7.9、14.6 和 2.2 °C,三者均呈显著上升趋势。Sen 斜率分别 0.05、0.03 和 0.07 °C/a,最低气温上升幅度最大。冬小麦生育期的风速多年平均值为 2.1 m/s,呈显著下降趋势,下降幅度为 $-0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。1982—2018 年冬小麦生育期总 ET_0 多年平均值为 600 mm,其上升趋势不显著。

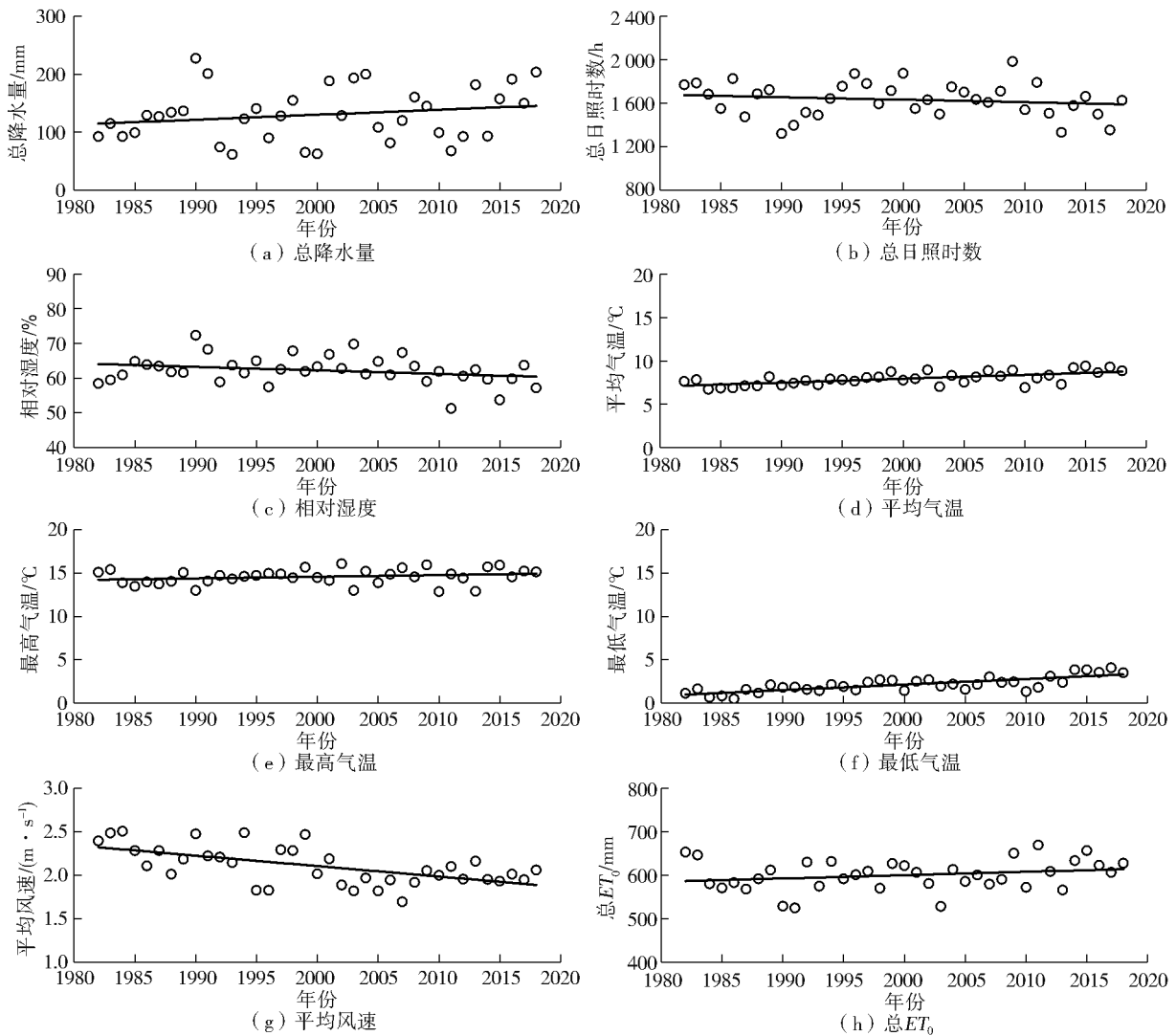


图 1 冬小麦生育期气候要素年际变化趋势

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

表 2 1982—2018 年冬小麦生育期气候要素的多年平均值和 Sen 斜率

Tab. 2 The perennial average values and Sen slope of climatic factors of wheat growth period from 1982 to 2018

气候要素	总降水量/ mm	总日照时数/ h	相对湿度/ %	平均气温/ ℃	最高气温/ ℃	最低气温/ ℃	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	总 ET_0 / mm
平均值	130	1 632	62.2	7.9	14.6	2.2	2.1	600
Sen 斜率	1.05	-3.08	-0.08	0.05***	0.03+	0.07***	-0.01***	0.85

注：“+”和“***”表示分别通过了 0.1 和 0.001 的显著性检验。

2.2 冬小麦产量变化分析

冬小麦实际产量以及通过 HP 滤波法分离出的趋势产量和气候产量见图 2。1982—2018 年,冬小麦实际产量多年平均值为 $5\ 330\ kg/hm^2$,实际产量和趋势产量均呈显著上升趋势,对其进行 M-K 趋势检验和 Sen 斜率计算,冬小麦实际产量和趋势产量 Sen 斜率分别为 $136\ kg/(hm^2 \cdot a^{-1})$ 和 $139\ kg/(hm^2 \cdot a^{-1})$ 。1998 年前,冬小麦实际产量呈波动上升趋势,之后实际产量平稳上升,2008 年后,冬小麦实际产量又呈波动增加趋势。在 20 世纪 90 年代,趋势产量增长速率较快,调研发现主要是由于品种更替、灌溉施肥管理水平提高和农业机械化水

平提升等。河北省宁晋县冬小麦气候产量变化范围为 $-1\ 245 \sim 1\ 376\ kg/hm^2$ 。其 M-K 检验结果显示,1982—2018 年小麦气候产量无显著变化趋势。

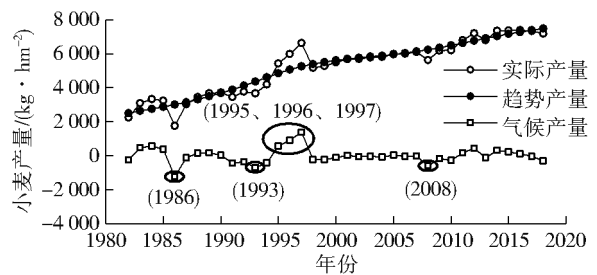


图 2 小麦实际产量、趋势产量以及气候产量年际变化

Fig. 2 Interannual variation of actual yield, trend yield and climatic yield of wheat

2.3 低产年气候要素对小麦产量的影响

虽然冬小麦气候产量总体变化趋势不显著,但其变化范围极大,为-1 245~1 376 kg/hm²,说明在某些年份气候变化对冬小麦产量造成了明显影响。选取气候产量降低较大的年份为典型低产年,即1986年(气候产量为-1 245 kg/hm²,减产41%)、1993年(气候产量为-694 kg/hm²,减产16%)和

2008年(气候产量为-601 kg/hm²,减产10%),见图2。由于气候产量已经去除了人为要素的影响,只与气象条件有关,因此主要分析气象要素的变化,见图3。图3同时显示了气象要素多年平均值,如果该气象要素偏离多年平均值较大,说明数据变化比较剧烈,表明该要素可能是造成产量变化较大的主要原因之一。

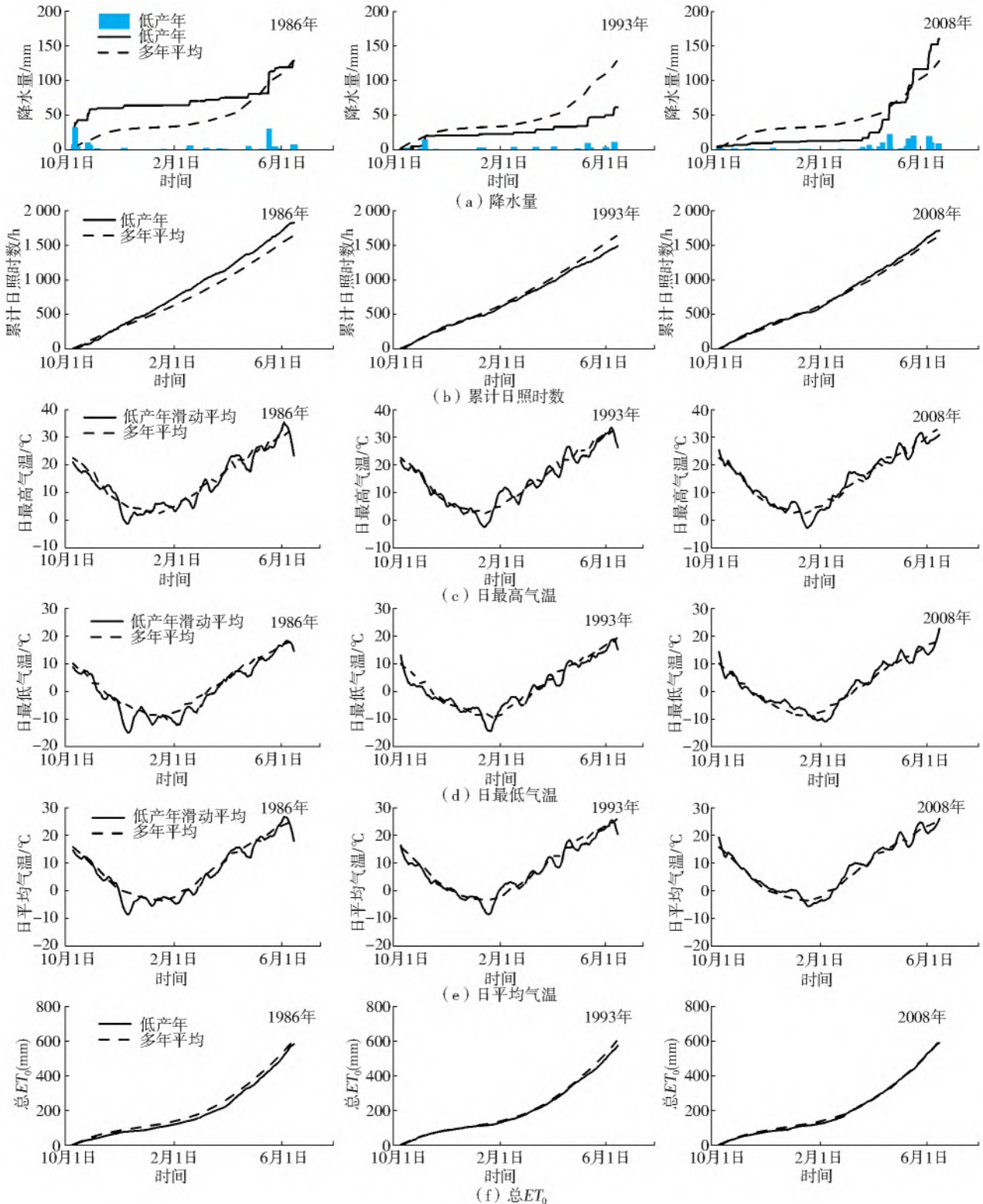


图3 冬小麦典型低产年全生育期气候变化

Fig. 3 Variation of climatic variables during the whole growth period of winter wheat in typical low yield years

1986 年冬小麦生育期气象数据显示,播种后降水较多,且总体日照时数较多,这有利于冬小麦生长。但是在播种-返青期,日最低气温和日平均气温分别为 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,显著低于该时期日最低气温和平均气温多年平均值 $-2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。尤其在 12 月 8 日和 9 日,日最低气温达到 $-21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,明显低于同期平均日最低气温 $-4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1986 年播种-返青期小麦 ET_0 比多年平均值减少 22.5 mm,这可能主要是由于温度较低的影响,但是在整个生育期 1986 年的 ET_0 与多年平均值接近。

1993 年小麦生育期气象数据显示,其生育期降水量要显著小于多年平均降水量。冬小麦生育期内降水为 61 mm,而同期多年平均值为 130 mm,减少了 69 mm,尤其是在拔节-抽穗期降水量仅为 1.3 mm。研究区为井灌区,当发生大面积干旱时,会发生灌水不及时情况,最终在区域上会造成减产。温度显示在 1 月 14 日—25 日最低气温平均值达到 $-14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,显著低于多年平均值 $-8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时在拔节开始后的 4 月中旬,日最低气温平均值为 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于同时期多年平均最低气温 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于该阶段已经进入拔节期,极低气温引起的倒春寒会显著冻伤幼苗,延缓生长和降低后期的产量。同时,1993 年小麦生育期日照时数 1 490 h 比多年平均值 1 632 h 少了将近 10%;尤其在小麦的抽穗-成熟期,1993 年日照时数为 301 h,平均每天日照时数为 6.5 h,比该时期日照时数多年平均值 385 h 少 22%,见图 3(b)。

2008 年数据显示冬小麦生育期降水量为 161 mm,比多年平均值 130 mm 多 24%,但是该年份的降水量分布与多年平均分布差异较大。在播种至返青期,2008 年的降水量仅为 13.3 mm,明显小于多年平均值 39.8 mm,该阶段降水量偏少会影响小麦越冬。进入 4 月小麦拔节后降水量明显增加,这有利于小麦生长。但是进入 5 月下旬后,降水量依旧偏高,在小麦的抽穗-成熟期达到了 93 mm,比该时期多年平均值 57 mm 多 63%,见图 3(a),同时该时期相对湿度为 67.5%,高于相对湿度多年平均值 63.5%。温度和 ET_0 变化与多年平均接近,对产量变化影响较小。

2.4 高产年气候要素对小麦产量的影响

选取气候产量最大的年份为典型高产年,即 1995 年(气候产量为 $569\text{ kg}/\text{hm}^2$,增产 12%)、1996 年(气候产量为 $910\text{ kg}/\text{hm}^2$,增产 18%)和 1997 年(气候产量为 $1\,376\text{ kg}/\text{hm}^2$,增产 26%)为小麦的典型高产年,见图 2,分析小麦高产年的全生育期气候

要素变化情况,见图 4。

从图 4 可以看出,高产年份的 3 年气象要素变化特点比较相似:最高、最低和平均气温与多年平均值接近或者稍微高于平均值,说明温度不是限制因子,这与低产年份得到的结果不同,在低产年份,温度偏低是影响产量的主要原因,见图 3。如:1995、1996 和 1997 年播种-返青期日平均气温比多年平均值分别高 0.2、0.3 和 0.5 $^{\circ}\text{C}$,见图 4(e);日照时数要高于平均日照时数,如 1995 年冬小麦日照时数在返青-拔节期比多年平均值多 60 h,在拔节-抽穗期比多年平均值多 23 h,抽穗-成熟期比多年平均值多 37 h,1996 年冬小麦的播种-返青期总日照时数比多年平均值多 216 h,1997 年冬小麦播种-返青期总日照时数比多年平均值多 109 h,抽穗-成熟期总日照时数也比多年平均值多 42 h,见图 4(b)。播种-返青期和抽穗-成熟期日照时数的增加以及播种-返青期气温的提升有利于冬小麦顺利越冬并促进根系生长,培养健壮麦苗,最终提高小麦产量。3 年的降水量与多年平均值变化趋势不同,1996 年要比多年平均值少 40 mm,而 1995 年和 1997 年与多年平均值接近。但是 3 年的降水量分布比较一致,即降水大部分出现在返青至灌浆期间,尤其是在拔节的 4 月。该阶段是冬小麦耗水量的高峰期,通过降水及时补充土壤水分,对于缓解水分亏缺、促进冬小麦生长具有重要作用。虽然当地以灌溉为主,但是考虑到水资源限制,部分区域仍不能及时灌溉,适时的降水可以缓解干旱。该降水特征与图 3 显示的 1993 年降水分布不同。1993 年降水量也较少,但是主要是返青后降水量极少,这样在同时大面积发生干旱时,大面积区域不能同时进行灌溉,部分区域灌水不及时,进而造成减产。

3 讨论

气候数据分析表明:日平均、最高和最低气温均呈显著上升趋势,这与全球变暖的大背景相符;日照时数呈不显著下降趋势,这可能与研究区空气污染有关^[26],空气中以烟、霾、微尘为主的微粒量增加,使得到达地面的辐射量下降;降水量和 ET_0 变化趋势不显著,这与曹倩等^[27]和姬兴杰等^[28]在冬小麦主产区的研究结论一致;风速呈显著下降趋势,这与高静等^[29]针对华北平原的研究结论一致。这说明研究区域的气候变化与较大空间尺度下的气候变化趋势具有一致性。

产量数据分析表明,实际产量和趋势产量均呈显著上升趋势,尤其在 20 世纪 90 年代,产量增长速

率较快,这与刘昌等^[30]、刘家宏等^[14]和李彩侠等^[31]在山东、石家庄和黑龙江等地的研究结果相对一致,

说明在 20 世纪 90 年代,国内的冬小麦种植水平显著提升。

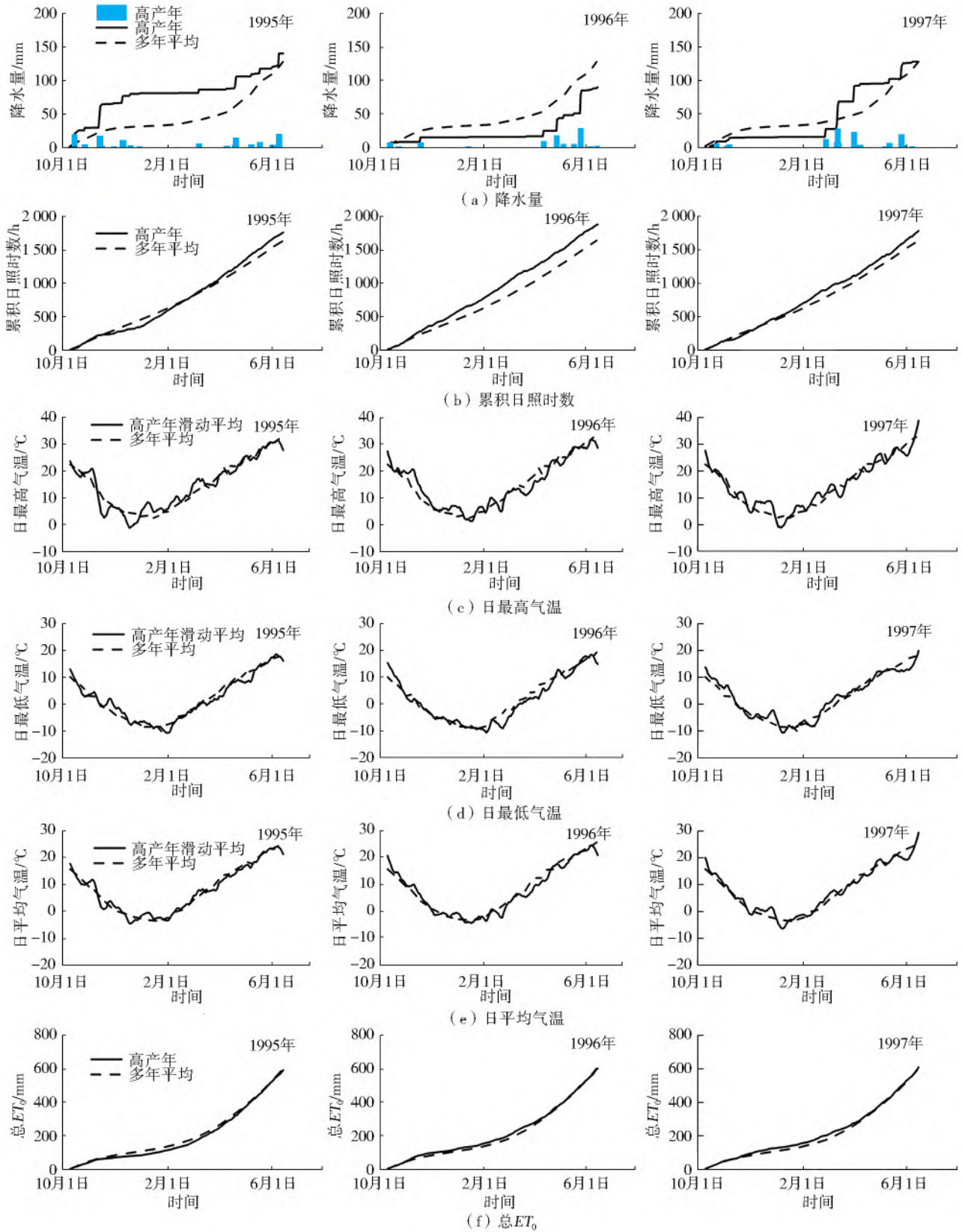


图 4 冬小麦典型高产年全生育期气候变化

Fig. 4 Variation of climatic variables during the whole growth period of winter wheat in typical high yield years

从低产年气候要素对冬小麦产量影响可以看出,小麦播种-返青期极端低温是小麦减产的主要原因(1986 年和 1993 年),此时小麦虽然进入越冬期,

但是过低的气温也制约了小麦安全越冬,影响了幼苗生长、推迟小麦开始分蘖的时间,从而影响干物质的积累,使得小麦减产^[32-33]。吴冰洁等^[34]发现华北

平原最低气温对气候产量变异影响程度最大,冬小麦产量受低温的限制作用较为明显。慕臣英等^[35]研究表明,对于不同的冬小麦品种,幼苗半致死温度范围为 $-21.5\sim-14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此为了保障小麦安全越冬,一般在11月根据土壤含水量浇足冬水,以提高土壤含水量和增加土壤热容量,减小温度快速下降和低温条件对小麦幼苗的影响。胡实等^[36]发现灌溉可缓解降雨变化对作物产量的影响,包括局部地区降水的季节和年际变化影响。而在本研究中县域尺度下,小麦拔节-返青期降水对小麦产量影响较大,该时期为冬小麦耗水高峰期,补灌不及时会导致小麦水分亏缺,影响小麦的有效穗粒数和千粒重,以及籽粒粗蛋白质和氨基酸含量,对小麦产量和籽粒品质造成较大影响^[37-38]。但该时期降水较多,即使生育期内其他时期降水较少,由于可以及时补灌,则不会对小麦产量造成明显影响(1996年)。Liu等^[39]研究发现,补充灌溉对华北地区的冬小麦生产非常重要,在干旱年份,小麦高产需要400mm灌溉。但在研究区地下水过度开采、水位急剧下降的背景下,可能会导致补灌不及时,进而影响小麦产量。抽穗-成熟期降水过多也会导致小麦减产(2008年),小麦生长后期降水量过多会影响冬小麦籽粒的形成,导致籽粒腐烂,造成减产。同时后期较多降水会造成田间湿度较高,易引起赤霉病、白粉病等病虫害^[40-41]。王德梅等^[42]在山东省研究了灌溉量和灌溉时期对小麦产量的影响,发现当灌水量低于120mm时,产量随灌水量的增加而提高,但灌水量超过180mm时产量则显著降低。可以看出,水分过多也会导致小麦减产。因此在未来的小麦种植过程中,应关注中长期天气预报,进而制定合理的灌溉计划,既要保障土壤有充足的水分,同时也要预防土壤含水量过高而引起的倒伏等情况。

从高产年气候要素对冬小麦产量影响可以看出,较高的日照时数有利于冬小麦高产。郑娜等^[43]发现在河北省栾城县,整个小麦生育期日照时数与冬小麦产量呈正相关。太阳辐射通过影响植物酶活性和光合作用直接影响植物生长过程,是植物进行光合作用的能量来源,植物通过光合作用进行有机物积累^[44]。当植株未受到其他非生物胁迫时,植物叶片接收的太阳辐射强度越强,叶片的叶绿素含量会越高,植物的净光合速率、光电子传输速率会越强^[45-46]。因此在无其他极端气候发生且日照时数较高的年份,小麦产量较高。

4 结 论

(1)1982—2018年河北省宁晋县冬小麦生育期

各气象要素变化趋势为:总降水量、总日照时数和相对湿度变化较为平稳,气温呈显著上升趋势,风速呈显著下降趋势。总 ET_0 多年平均值为600mm,其上升趋势不显著。

(2)1982—2018年,研究区冬小麦实际产量多年平均值为 $5\ 330\text{ kg/hm}^2$,气候产量变化范围为 $-1\ 245\sim1\ 376\text{ kg/hm}^2$,实际产量和趋势产量均呈显著上升趋势,气候产量无显著变化趋势。

(3)越冬期过低的气温(1986年和1993年)、拔节-抽穗期补灌不及时和光照强度低(1993年),以及灌浆-成熟期的多雨(2008年)均会造成冬小麦显著减产,说明引起小麦减产的因素多元而复杂。

(4)在温度与多年平均值保持一致的条件下,日照时数的提高更有利于小麦的增产。同时降水量相对均匀地分布在返青-灌浆阶段,有利于缓解干旱,提高产量。

致谢:作者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(References):

- [1] KANG Y H, KHAN S, MA X. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security: A review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(12): 1665-1674. DOI: 10.1016/j.pnsc.2009.08.001.
- [2] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493. (WANG Y J, QIN D H. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China: An overview[J]. Climate Change Research, 2017, 13(5): 483-493. (in Chinese)) DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2017.004.
- [3] 夏军, 石卫, 雒新萍, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286. (XIA J, SHI W, LUO X P, et al. Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 279-286. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.019.
- [4] MIDDLETON N J, STERNBERG T. Climate hazards in drylands: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126: 48-57. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.07.008.
- [5] SHANNON H D, MOTHA R P. Managing weather and climate risks to agriculture in North America, Cen-

- tral America and the Caribbean[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2015, 10: 50-56. DOI:10. 1016/j. wace. 2015. 10. 006.
- [6] 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. (in Chinese)) DOI: 10. 11898/1001-7313. 20150101.
- [7] 周国新, 苗慧英, 王福田, 等. 适应气候变化的河北省农业节水技术与模式探讨[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(6): 157-162. (ZHOU G X, MIAO H Y, WANG F T, et al. Discussion of agricultural water-saving technique and mode adapting to climate change in Hebei Province[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(6): 157-162. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2013. 06157.
- [8] 王友华, 周治国. 气候变化对我国棉花生产的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1734-1741. (WANG Y H, ZHOU Z G. Effect of climate changing on cotton fiber production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1734-1741. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;NHBH. 0. 2011-09-013.
- [9] 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. DOI: 10. 1016/j. agee. 2017. 06. 004.
- [10] LIU H J, L 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. DOI: 10. 25165/j. ijabe. 20191202. 3388.
- [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. DOI:10. 1016/j. agrformet. 2019. 107867.
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 2019年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China statistical yearbook of 2019*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020. (in Chinese)).
- [13] 邢素丽, 张广录, 李会龙, 等. 极端气候条件下冬小麦产量构成及成因分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(S1): 212-214. (XING S L, ZHANG G L, LI H L, et al. Analysis of the winter wheat yield components and causes under the extreme climatic conditions[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(S1): 212-214. (in Chinese)) DOI:10. 3321/j. issn:1002-6819. 2005. z1. 051.
- [14] 刘家宏, 郭迎新, 秦大庸, 等. 极端天气作用下的区域粮食产量波动: 以石家庄冬小麦为例[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(6): 777-782. (LIU J H, GUO Y X, QIN D Y, et al. Fluctuation of regional crop yields with extreme weather events: Winter wheat in Shijiazhuang[J]. *Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2011, 51(6): 777-782. (in Chinese)) DOI:10. 16511/j. cnki. qhdxxb. 2011. 06. 013.
- [15] LI C, WANG R G, NING H S, et al. Changes in climate extremes and their impact on wheat yield in Tianshan Mountains region, northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(17): 1228. DOI: 10. 1007/s12665-016-6030-6.
- [16] KRISTENSEN K, SCHELDE K, OLESEN J E. Winter wheat yield response to climate variability in Denmark[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2011, 149(1): 33-47. DOI:10. 1017/S0021859610000675.
- [17] SAADI S, TODOROVIC M, TANASIJEVIC L, et al. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 103-115. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2014. 05. 008.
- [18] KOTHARI K, ALE S, ATTIA A, et al. Potential climate change adaptation strategies for winter wheat production in the Texas High Plains[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 225: 105764. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2019. 105764.
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56[M]. FAO, Rome. 1998.
- [20] MANN H B. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259. DOI: 10. 2307/1907187
- [21] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. Griffin, London:1975.
- [22] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Publications of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389. DOI:10. 1080/01621459. 1968. 10480934.
- [23] SALMI T, MÄÄTTÄ A, ANTTILA 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 [P]. 2002.
- [24] HODRICK R J, PRESCOTT E C. Postwar U S business cycles: An empirical investigation[M]. Real Business Cycles, 1997.
- [25] 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. (in Chinese)) DOI: 10. 11898/10017313. 20200107.
- [26] 阿多, 熊凯, 赵文吉, 等. 1960—2013 年华北平原气候变化时空特征及其对太阳活动和大气环境变化的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1555-1564. (A D, XIONG K, ZHAO W J, et al. Temporal trend of climate change and mutation analysis of north China plain during 1960 to 2013 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(10): 1555-1564. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2016. 10. 013.
- [27] 曹倩, 姚凤梅, 林而达, 等. 近 50 年冬小麦主产区农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 161-166. (CAO Q, YAO F M, LIN E D, et al. Analysis of changing characteristics of agricultural climate resources in the main planted areas of winter wheat in China over last 50 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(2): 161-166. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2011. 02. 002.
- [28] 姬兴杰, 朱业玉, 刘晓迎, 等. 气候变化对北方冬麦区冬小麦生育期的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 576-581. (JI X J, ZHU Y Y, LIU X Y, et al. Impacts of climate change on the winter wheat growth stages in north China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(4): 576-581. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2011. 04. 016.
- [29] 高静, 邹定荣, 王培娟, 等. 华北平原冬小麦主要发育阶段日数对温度变化的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 431-436. (GAO J, WU D R, WANG P J, et al. Relative sensitivity of main growth durations to temperature for winter wheat in north China plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(4): 431-436. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2016. 04. 007.
- [30] 刘昌, 张红日, 赵相伟, 等. 山东省气候变化及其对冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 379-384. (LIU C, ZHANG H R, ZHAO X W, et al. Climate change and its effect on the yields of winter wheat and summer corn in Shandong Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 379-384. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2020. 03. 054.
- [31] 李彩侠, 李俏, 孙天一, 等. 气候变化对黑龙江省主要农作物产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 200-208. (LI C X, LI Q, SUN T Y, et al. Effect of climate change on major crops yield in Heilongjiang Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 200-208. (in Chinese)) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2014. 0625.
- [32] 柴雨葳, 黄彩霞, 陆军胜, 等. 水分胁迫条件下低温对小麦幼苗生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 53-58. (CHAI Y W, HUANG C X, LU J S, et al. Effects of low temperature on growth and development of wheat seedling under drought [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 53-58. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2017. 04. 010.
- [33] 张泽全, 舒长生, 董雪芳, 等. 低温对小麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(1): 22-25. (ZHANG Z Q, SHU C S, DONG X F, et al. Effect of low temperature on seed germination and seedling growth in wheat [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2010, 23(1): 22-25. (in Chinese)) DOI: 10. 16213/j. cnki. scjas. 2010. 01. 019.
- [34] 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. (WU B J, WANG J, TANG J Z, et al. Meteorological influencing factors on variation in winter wheat yield in the north China plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(10): 623-635. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2018. 10. 001.
- [35] 慕臣英, 杨晓光, 杨婕, 等. 黄淮海地区不同冬春性小麦抗冻能力及冻害指标 I. 隆冬期不同冬春性小麦抗冻能力比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3119-3125. (MU C Y, YANG X G, YANG J, et al. Freezing resistance and injury indices for different cultivars of winter-spring wheat in Huang-Huai-Hai plain I. Comparison of freezing resistance for different cultivars of winter-spring wheat during mid-winter period [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3119-3125. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 20150921. 011.
- [36] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 气候变化对海河流域主要作物物候和产量影响[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 3-12. (HU S, MO X G, LIN Z H. The contribution of climate change to the crop phenology and yield in Haihe River basin [J]. Geographical Research, 2014, 33(1): 3-12. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dljy201401001.

- [37] 刘祖贵,孙景生,张寄阳,等. 不同时期干旱对强筋小麦产量与品质特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 25(5): 877-882. (LIU Z G, SUN J S, ZHANG J Y, et al. Effect of drought at different growing stages on yield and quality characteristics of strong-gluten wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 25(5): 877-882. (in Chinese)) DOI: 10. 7606/j. issn. 1009-1041. 2008. 05. 187.
- [38] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等. 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(2): 20-23. (XIAO J F, LIU Z D, DUAN A W, et al. Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(2): 20-23. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2006. 02. 006.
- [39] 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. DOI: 10. 1016/S0168-1923(02)00015-1.
- [40] 张雪雪,王斌,田洋洋,等. 作物病虫害预测机理与方法研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5): 110-120. (ZHANG X X, WANG B, TIAN Y Y, et al. Research progress on forecasting mechanism and methodology for crop disease and insect pest [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(5): 110-120. (in Chinese)) DOI: 10. 13304/j. nykjdb. 2018. 0407.
- [41] SONG Y L, LINDERHOLM H W, WANG C Y, et al. The influence of excess precipitation on winter wheat under climate change in China from 1961 to 2017[J]. Science of The Total Environment, 2019, 690: 189-196. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2019. 06. 367.
- [42] 王德梅,于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1965-1970. (WANG D M, YU Z W. Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and grain yield of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 1965-1970. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 2008. 0353.
- [43] 郑娜,刘秀位,王锡平. 利用产量差距方法进行华北冬小麦产量受气候影响规律的分析:以河北省栾城县为例[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 234-240. (ZHENG N, LIU X W, WANG X P. Determining the effects of climate on winter wheat yield in northern China via yield gap analysis: A case study of Luancheng County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 234-240. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1011. 2014. 30893.
- [44] WANG L, DENG F, REN W J. Shading tolerance in rice is related to better light harvesting and use efficiency and grain filling rate during grain filling period [J]. Field Crops Research, 2015, 180: 54-62. DOI: 10. 1016/j. fcr. 2015. 05. 010.
- [45] CHANG X M, ALDERSON P G, WRIGHT C J. Solar irradiance level alters the growth of basil (*Ocimum basilicum* L.) and its content of volatile oils [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 63(1/3): 216-223. DOI: 10. 1016/j. envexpbot. 2007. 10. 017.
- [46] WANG Y Q, XI W X, WANG Z M, et al. Contribution of ear photosynthesis to grain yield under rainfed and irrigation conditions for winter wheat cultivars released in the past 30 years in north China plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(10): 2247-2256. DOI: 10. 1016/S2095-3119(16)61408-9.

Effects of climate change on winter wheat yield in low/high yield years in Ningjin County, Hebei Province

YANG Li, LIU Haijun, TANG Xiaopei, FENG Dongxue, LI Lun

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

Abstract: Wheat is one of the main grain crops in China, and in 2019, China's wheat production reached 133.6 million tons, accounting for 20% of total grain production. Climate change, especially the extreme climate, does a significant impact on winter wheat yield. Identifying the main influencing factors could help farmers to choose appropriate methods to alleviate the risk to wheat production. For different regions, the impact of climate change on winter wheat cultivation varies. Hebei Province is one of the main wheat-producing areas in China, and Ningjin County is the largest wheat-producing county in the plain area of Hebei. Therefore, it is important to analyze and identify the main climatic factors affecting wheat yield in the region and propose corresponding countermeasures to guide local agricultural production and guarantee high and stable crop yields.

Mann-Kendall (M-K) trend test and Sen's slope analysis were performed to obtain the trend of winter wheat production data and corresponding meteorological data from 1982 to 2018 in Ningjin County. The HP filter was used to separate

(下转第 971 页)

黑龙江省西部地区玉米需水量与灌溉制度制定

聂堂哲¹, 梁契宗^{1,2}, 王天倚¹, 褚丽丽¹, 陈选³, 李奉锐⁴

(1. 黑龙江大学水利电力学院, 哈尔滨 150080; 2. 中山大学土木工程学院水资源与环境研究中心, 广州 510275;
3. 宁海县水务局, 浙江 宁波 315600; 4. 河北省邢台水文勘测研究中心, 河北 邢台 054000)

摘要:黑龙江省西部地区频发的干旱情况影响该地区农业水循环与粮食安全, 研究玉米水分供需关系对于理解该地区干旱机理有重要意义。根据 FAO-56 单作物系数法, 计算玉米生育期参考作物蒸散量(ET_0)、作物需水量(ET_c)和灌溉需水量(I_r), 依托 CROPWAT 模型制定灌溉制度, 并通过计算作物水分盈亏指数(C_w)分析玉米水分盈余情况。结果表明: 1960—2015 年黑龙江省西部玉米生育期 ET_0 和 ET_c 呈下降趋势, 有效降水量(P_e)、 I_r 和 C_w 呈上升趋势; 平均 ET_0 、 ET_c 、 P_e 和 I_r 分别为 639.64、438.13、224.40 和 273.87 mm; 由于不同水文年干旱条件不同, P_e 并不能在所有年份满足玉米水分需求, 丰水年、平水年、枯水年和特枯水年的平均净灌溉定额分别为 152.43、236.33、276.53 和 353.47 mm。黑龙江省西部玉米生育期水分供需关系的研究和灌溉制度的制定有助于区域水资源调控和农业发展。

关键词:参考作物蒸散量; 作物需水量; 作物水分盈亏指数; 有效降雨量; 灌溉需水量; 灌溉制度

(上接第 959 页)

winter wheat yield into climatic yield and trend yield, to screen the years with high yield variability, i. e., three high yield years and three low yield years, and to reveal the main meteorological factors affecting yields, and then to analyze the relationship between winter wheat yield and climate change.

The results showed that the average temperature ($0.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$), maximum temperature ($0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$) and minimum temperature ($0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$) in wheat season increased significantly, the average wind speed decreased significantly ($-0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), and the multi-year mean value of total ET_0 was 600 mm with a not clear increasing trend. The multi-year average of actual winter wheat yield was $5\ 330\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Both the actual and trend yields showed a significant increasing trend with Sen's slopes of $136\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1})$ and $139\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1})$, respectively. Though the climatic yield trend did not show a clear change trend, it varied from $-1\ 245$ to $1\ 376\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($-41\%\sim 26\%$), indicating a great variation in different years. The climate variables in big low yield and high yield seasons were analyzed and the main factors to influence wheat yield were summarized. Generally, extremely low temperature during the sowing-regreening period (for example December 8 and 9, 1986, the daily minimum temperature reached $-21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the average minimum temperature from January 14 to 25, 1993 reached $-14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), un-sufficient irrigation during a jointing-heading period (1993) and excessive precipitation in late planting period (2008) would lead to wheat yield reduction. The increases in sunshine hours and temperature are beneficial to wheat production.

The trends of climate elements are consistent with the findings of most studies in the north China plain, indicating that climate change in the study area is consistent with the trends of climate change at larger spatial scales. Yields in the study area increased at a faster rate in the 1990's, indicating a significant increase in the level of winter wheat cultivation during that period. The influence of climate factors on winter wheat yield in low yield years shows that extremely low temperatures during the sowing-regreening period, un-sufficient irrigation during the jointing-heading period, and excessive precipitation in the late planting period can all lead to wheat yield reduction. The main meteorological factors causing yield reduction varied with growth seasons, indicating the complexity of climate effects on wheat yield production. The influence of climate factors on winter wheat yield in high-yielding years shows that the increase in sunshine hours is more beneficial to wheat yield under the condition that the temperature remains consistent with the multi-year average. The main meteorological factors causing yield increase are similar in different years, indicating the consistency of climate factors on wheat yield increase.

Key words: climatic yield; winter wheat; typical low yield year; typical high yield year