文章编号:1000-7601(2017)05-0066-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2017.05.10

气候变化与品种更新对黄土高原半干旱雨养农业区冬小麦的影响

尚 艳[1],赵 鸿[2],柴守玺[1]

(1.甘肃农业大学生命科学技术学院,甘肃 兰州 730070;2.中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃 兰州 730020)

摘 要: 利用甘肃省通渭农业气象观测站 1981—2010 年的气象和农气观测资料,运用相关分析、趋势分析和方差分析等方法,就气候变化与品种变化对黄土高原半干旱雨养农业区冬小麦的影响进行了初步研究。结果表明:近 30 年来该地区在冬小麦生育期内温度升高(增长率为 0.225℃·$10a^{-1}$)、降水量减少(减少率为 23.879 mm·$10a^{-1}$),气候呈现暖干化趋势。降水的减少与品种更新均导致冬小麦的生育期明显缩短。近 30 年来,甘肃省通渭县冬小麦产量增加了 4 514.97 kg·hm^{-2},冬小麦生育期内温度的增加和降水量的减少对产量增加没有明显促进作用。冬小麦品种的改良可提高产量 8.8% ~ 132.0%,其变异系数在 4.1% ~ 65.6%之间。方差分析结果表明,不同品种间的平均产量之间存在显著的差异($F = 4.056, P < 0.01$)。通过分析产量在年际间、气候要素间和品种间的变化,可以发现品种的更新是冬小麦产量显著提高的原因。

关键词: 冬小麦;气候变化;品种更新;生育期;温度;降水量;产量

中图分类号: S314 **文献标志码:** A

Effects of climate change and cultivars change on winter wheat in semi-arid region of loess plateau in northeast China

SHANG Yan[1], ZHAO Hong[2], CHAI Shou-xi[1]

(1. *College of Life Sciences and Technology*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province*, *Key Open Laboratory of Arid Change and Disaster Reduction of CMA*, *Institute of Arid Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Lanzhou*, *Gansu* 730020, *China*)

Abstract: This research, based on the observational data of climate and agrometeorology from 1981 to 2010 of Tongwei meteorological observation station in Gansu Province, conducted primary research toward the influence of climate change and cultivars change on the winter wheat in semi-arid region of Loess Plateau through correlation analysis, trend analysis, variance analysis and other methods. The results showed that the district has warming and drying trend that the temperature increased (increase rate: 0.225℃·$10a^{-1}$) and the precipitation decreased (decrease rate: 23.879 mm·$10a^{-1}$) in the past 30 years. The reduction of precipitation and cultivars shift led to the shortening of winter wheat growth period. In the past 30 years, the winter wheat yield of Tongwei County in Gansu has increased by 4 514.97 kg·hm^{-2}, temperature increase and precipitation decrease during its duration period have no obvious effect on the increase of winter wheat yield (facilitation influence). The cultivars shift toward winter wheat can increase the yield at a range of 8.8% ~ 132.0% and the variable coefficient was within 4.1% ~ 65.6%. The variance analysis showed that the average yield of different cultivars have significant difference ($F = 4.056, P < 0.01$). It can be found that the cultivars shift led to a significant increase of winter wheat yield through analyzing the yield changes of different years, climate and cultivars.

Keywords: winter wheat; climate change; cultivars change; growth period; temperature; precipitation; yield

收稿日期: 2016-06-16 **修回日期:** 2016-11-09

基金项目: 国家自然科学基金委(31560356);现代农业产业技术体系建设专项资助项目(CARS-3-2-49);公益性行业(农业)科研专项资助项目(201303104)

作者简介: 尚 艳(1991—),女,山东平度人,硕士研究生,研究方向为植物生理生态。E-mail:415967629@qq.com。

通信作者: 柴守玺(1962—),男,甘肃会宁人,教授,博士,主要从事作物栽培与抗旱生理生态研究。E-mail:sxchai@126.com。

IPCC 第五次评估报告指出:1880—2012 年,全球平均地表温度升高了 0.85℃,1951—2012 年,全球平均地表温度的升温速率(0.12℃·$10a^{-1}$)几乎是 1880 年以来升温速率的两倍。过去的 3 个 10 年比之前自 1850 年以来的任何一个 10 年都暖[1]。全球平均气温升高,正在和继续影响着农业生产、水资源、生态环境、物种、人类健康等。随着全球气候变化研究的不断深入,有关气候变化对作物生产力影响的研究也开始受到广泛关注和重视[2-6]。在气候变化背景下,为保证三大粮食作物稳产、丰产,通常而言,农户以及生产管理者会根据气候条件,灵活调整种植管理模式,其中最普遍采用的技术就是更换品种和调整播期[7]。在气候变化对作物的影响上,国内外学者分别就不同气象要素对作物生产的影响在不同地区进行了研究,通过生理、生态及产量等方面对小麦在气候变化背景下的适应性进行分析[8-11]。姚玉璧等[12]研究发现,对春小麦生长发育全生育期而言,受气候变暖的影响,乳熟~成熟期每 10 a 缩短 2~3 d,全生育期每 10 a 缩短 4~5 d。肖登攀等[13]模拟结果表明,过去 30 年小麦开花期和成熟期提前的主要驱动因素为气候变化。在气候变化背景下,作物品种的更新可以在一定程度上抵消全球气候变化带来的影响[14-15],提高作物的产量[16-18]。不同的作物品种对气候变化的响应存在差异,同一作物品种的生长发育过程主要受气候条件的影响,最终导致年际间产量的差异[19]。从 20 世纪 50 年代起到现在,我国各大主要小麦种植区已经先后经历了 6~8 次大规模的小麦品种更替,每次品种更替都能够为小麦的产量创造新的高度[20-22]。例如,孙倩等[23]研究表明:气候变化背景下河南省冬小麦品种更新特征是营养生长期缩短,生殖生长期延长,千粒重增加,从而提高了产量。吕硕等[24]利用通过参数调试与验证后的 APSIM-Maize 模型,对吉林梨树县春玉米的产量潜力进行模拟分析,解析了不同年代育成的玉米品种的产量潜力,明确了气候变化对春玉米产量潜力的影响以及品种对增产的贡献。但是目前涉及气候变化与品种变化对冬小麦这种作物产生的影响研究尚不多见。为此,本文以通渭为例,研究气候变化与品种更新对冬小麦生育期与产量的影响,以期为该地区适应未来气候变化与实现作物高产高效提供科学依据。

1　资料来源与方法

1.1　资料来源

选取黄土高原半湿润半干旱地区通渭农业气象观测站 1981—2010 年的气象资料(包括温度、降水量、日照时数数据)和冬小麦各个发育期的观测资料以及观测地段的单产资料。所有资料都是依照中国气象局《农业气象观测规范》要求和注意事项进行观测而得到,并保持了观测方法的一致性。通渭县属陇中黄土高原丘陵壑区,多为黄土梁、峁和河谷阶地。地势西北高,东南低,为温带半湿润半干旱性季风气候类型。气象观测站位于 105°14′E,35°13′N,海拔 1 768.2 m,年平均气温 6.6℃,冬季最低气温一般在 -20℃左右,夏季最高气温一般在 30℃左右,年温差较大。无霜期 147 d,降水量 334.9 mm 左右。作物冬小麦的观测地段位于气象观测点附近约 1 000 m 处,并自 1981 年以来一直保持不变。

1.2　研究方法

利用相关分析和趋势分析研究冬小麦的生育期天数和产量与温度、降水量、≥0℃积温、日照时数的相关关系及其年际变化趋势。在此基础上,运用方差分析,揭示品种变化对冬小麦生育期天数与产量的影响。在软件 Excel 与 SPSS 23.0 下对数据进行统计分析。研究站点冬小麦从 1981 到 2010 年共有 10 个品种,品种变化较快,具体信息见表 1。由于方差分析用于两个及两个以上样本原因,剔除掉长治 2017、洮 157 和咸农 4 号品种[25]。

表 1　1981—2010 年间通渭站冬小麦品种

Table 1　The cultivars of winter wheat during 1981—2010 in Tongwei station

年份 Year	品种 Cultivars
1981—1984	东方红 3 号 Dongfanghong 3
1985—1987	中粮 5 号 Zhongliang 5
1988—1989,1997	陇东 3 号 Longdong 3
1990—1991	青山 821 Qingshan 821
1992—1995,1998,2000—2001,2003	大西亚 Daxiya
1996	长治 2017* Changzhi 2017
1999	洮 157* Tao 157
2002	咸农 4 号* Xiannong 4
2004—2005	陇鉴 19 Longjian 19
2006—2010	临云 125 Linyun125

注:表中有*标注的品种为方差分析时剔除的品种。

Note: The cultivars marked with "*" were excluded when using ANOVA method.

冬小麦品种的贡献率计算方法:

本文定义不同年代育成的冬小麦品种与陇东 3 号相比的产量增加百分率为品种的增产贡献率,用以量化品种对产量的贡献,计算公式如下所示:

$$\Delta VY_{pi} = \frac{(Y_{pi} - Y_{p-\text{陇东3号}})}{Y_{p-\text{陇东3号}}} \times 100\% \qquad (1)$$

其中，ΔVY_{pi} 表示冬小麦品种贡献率(%)；Y_{pi} 表示冬小麦品种的产量(kg·hm^{-2})，本文选择东方红 3 号、中粮 5 号、陇东 3 号、青山 821、大西亚、陇鉴 19、临云 125 这 5 个品种比较不同品种增产百分率特性，因而分别取值以上 5 个品种。

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期内气候要素、产量的年际变化特征(1981—2010 年)

图 1 为 1981—2010 年甘肃省通渭县冬小麦生育期内温度与总降水量的变化趋势。由图 1 可以看出温度呈显著上升趋势($P<0.05$)，总降水量呈极显著下降趋势($P<0.01$)，≥0℃积温呈下降趋势($P>0.05$)，日照时数呈上升趋势($P>0.05$)。温度年增长率为 0.0225 ℃·a^{-1}，总降水量年减少率为 2.3879 mm·a^{-1}。分析结果说明黄土高原半干旱农业区冬小麦生长季的气候变化呈现暖干化趋势。

图 2 为实测的冬小麦产量随时间的变化趋势。由图 2 可以看出从 1981—2010 年，产量呈上升趋势，但趋势不显著。1981—2010 年，冬小麦产量增加了 4 514.97 kg·hm^{-1}。

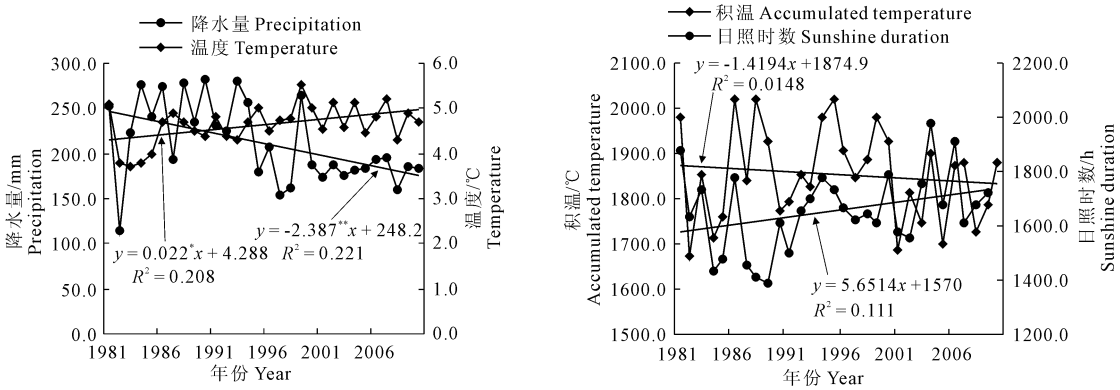

图 1 冬小麦生育期内气候要素的年际变化趋势(1981—2010 年)

Fig.1 Trends of climatic elements during the whole winter wheat growth period over times(1981—2010)

注：直线表示年际间的趋势线；＊＊表示达到 0.01 显著水平，＊表示达到 0.05 显著水平，下同。

Note: Straight lines show the linear trends against year; ＊＊ significant at $P<0.01$, ＊ significant at $P<0.05$, the same below.

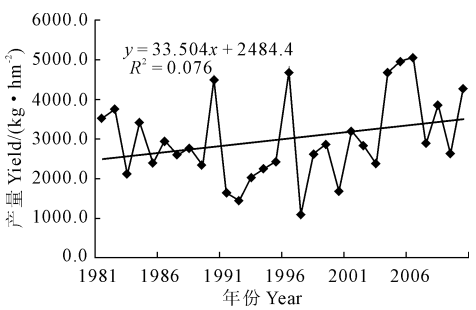

图 2 冬小麦实际产量随年份的变化(1981—2010 年)

Fig.2 Yearly changes of winter wheat yields(1981—2010)

2.2 冬小麦主要生育期的基本特征及变化趋势

冬小麦生育期是指完成从播种到成熟收获的生命周期过程所经历的时间。自 1981 年以来，冬小麦全生育期天数呈逐年减少趋势(图 3)。1981—2010 年平均以 0.7～0.8 d·a^{-1}($R=-0.717$, $P<0.01$)速度线性减少。持续减少的转折年份出现在 1986 年，1986—2010 年平均以 1.0～1.1 d·a^{-1}($R=-0.78$, $P<0.01$)的速度线性减少，20 世纪 80 年代—21 世纪初全生育期天数减少了 40 d。

冬小麦播种期逐年推后，播种期变化曲线线性拟合倾向率为 3.399 d·10a^{-1}($R=0.419$, $P<0.05$)，即播种期每 10 a 推后 3～4 d。冬小麦返青期变化曲线线性拟合倾向率为 −1.264 d·10a^{-1}($R=-0.226$, $P>0.1$)，即返青期每 10 a 提前 1～2 d。冬小麦开花期也逐年提前，开花期变化曲线线性拟合倾向率为 −4.752 d·10a^{-1}($R=-0.464$, $P<0.01$)，即开花期每 10 a 提前 4～5 d。成熟期变化曲线线性拟合倾向率为 −4.916 d·10a^{-1}($R=0.656$, $P<0.01$)，即成熟期每 10 a 提前 8～9 d。冬小麦全生育期天数的缩短，主要是由播种期的推后，开花期、成熟期的提前引起的。

2.3 气候要素变化与品种变化对冬小麦生育期的影响

图 4 为黄土高原半干旱地区冬小麦生育期天数与生长期间温度与总降水量的变化趋势。由温度变化曲线(图 4a)可以看出，随着生育期内温度的增加，冬小麦生育期变短，生育期天数与温度呈负相关关系，生育期天数随温度变化的线性关系为：$y=$

$-5.9115x+315.05$,式中 x 为温度,y 为生育期天数。温度每增加 1℃,生育期天数减少约 5 ~ 6 d。由总降水量与生育期天数的变化(图 4b)可知,随着生育期间总降水量的增加,冬小麦生育期变长,二者呈极显著正相关关系。生育期天数随降水量变化的线性关系为:$y=0.6623x+277.57$,式中 x 为降水量,y 为生育期天数。降水量每减少 10 mm,生育期天数也减少 6 ~ 7 d。

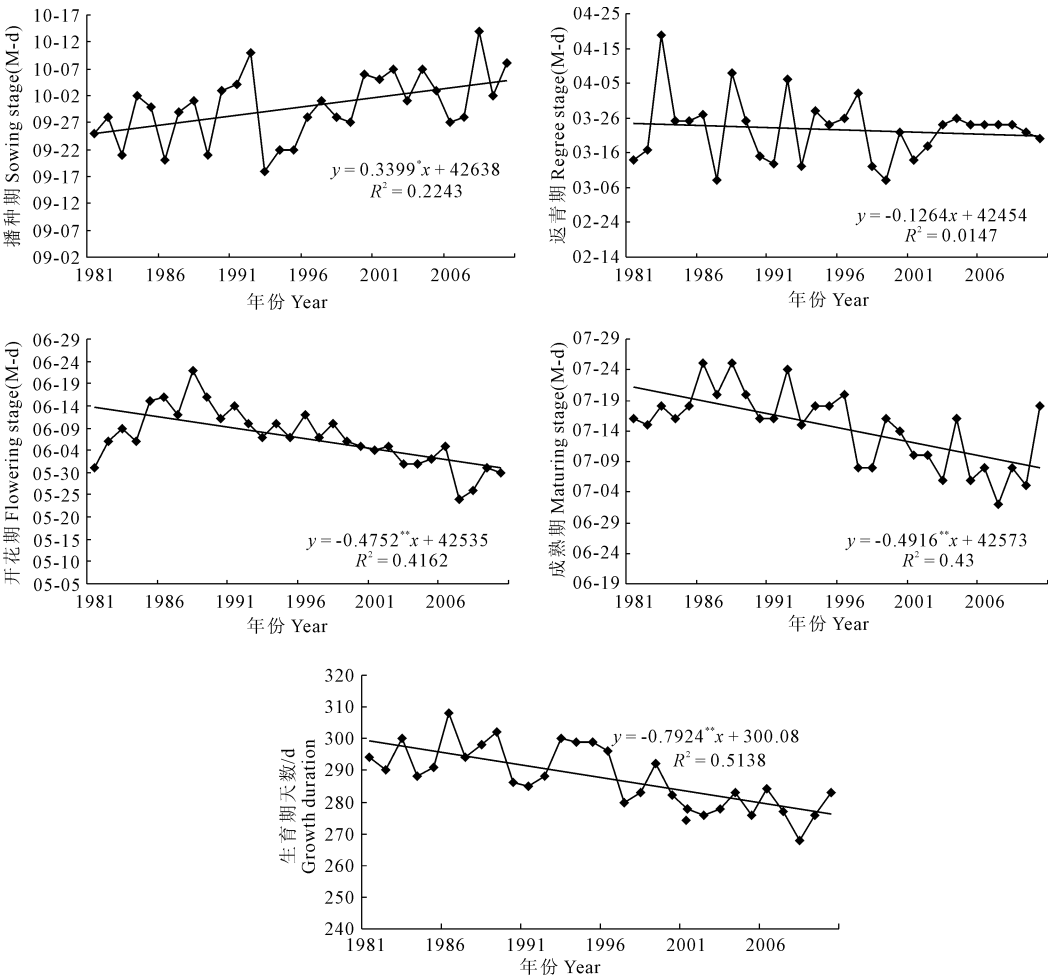

图 3　冬小麦生育期随年份的变化(1981—2010 年)

Fig.3　Yearly changes of winter wheat growth duration (1981—2010)

图 5 为不同小麦品种间生育期天数的变化。由图 5 可以看出,随着品种的更新,冬小麦生育期呈现明显的缩短趋势,约缩短 22 d。对冬小麦品种间生育期天数变异的方差分析结果表明(图 5),不同品种间的生育期天数之间存在显著的差异($F=2.852$,$P<0.01$)。事后分析的多重比较结果显示:东方红 3 号和临云 125 生育期天数差异显著($P<0.05$),中粮 5 号和陇鉴 19、临云 125 生育期天数差异显著($P<0.05$,$P<0.01$),陇东 3 号和临云 125 生育期天数差异显著($P<0.05$)。相比于 20 世纪 80、90 年代,本世纪初的品种生育期显著缩短。这说明半干旱雨养农业区生育期内降水的减少和品种更新都会使冬小麦生育期明显缩短。

2.4　气候要素变化与品种变化对冬小麦产量的影响

图 6 为半干旱地区冬小麦产量在生长期间随温度、总降水量的变化趋势。由温度变化曲线(图 6a)可以看出,随着生育期内温度的增加,冬小麦产量减少,二者呈不显著负相关关系,产量随温度变化的线性关系为:$y=-80.432x+3317.3$,式中 x 为温度,y 为产量。由总降水量与产量的变化(图 6b)可知,随着生育期间降水量的增加,冬小麦产量减少,二者呈不显著负相关关系。产量随降水量变化的线性关系为:$y=-19.989x+3256.3$,式中 x 为降水量,y 为产量。这说明生育期内温度的增加和降水的减少对冬小麦产量增加无明显促进作用。

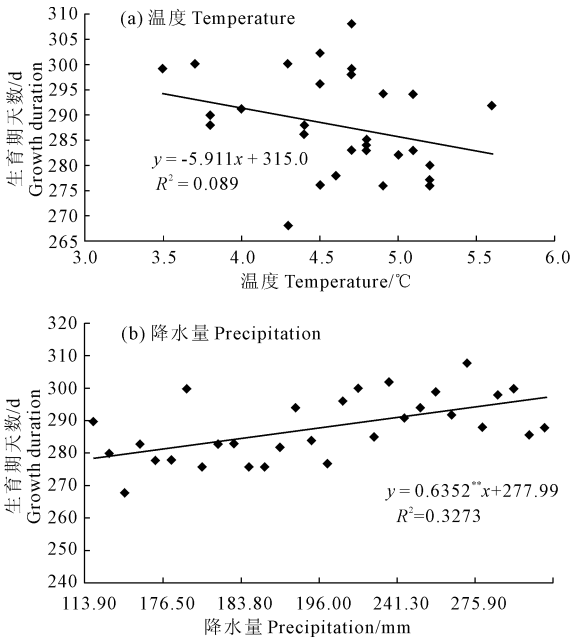

图 4 冬小麦生育期内积温(a)与降水量(b)随生育期天数的变化趋势(1981—2010 年)

Fig.4 Trends of accumulated temperature (a) and precipitation (b) change during the winter wheat growing season(1981—2010)

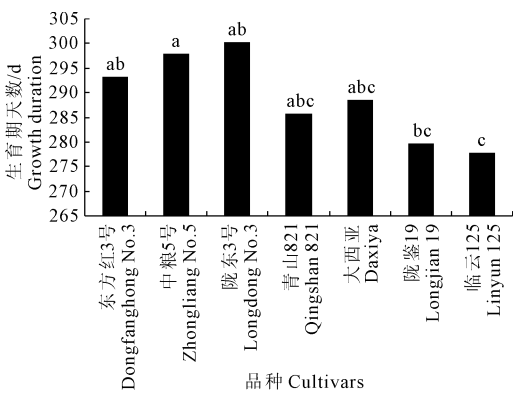

图 5 不同品种间冬小麦生育期天数的差异

Fig.5 Differences of growth period days among different winter wheat cultivars

注:小麦品种按年代顺序从左到右排列,小写字母代表品种间的显著差异,下图 7 同。

Note: The cultivars are listed in a chronological order from left to right. The different letters above the bars indicate significant difference at $P < 0.05$, the same below figure 7.

由公式(1)计算得到 1981—2010 年的平均品种贡献率见表 2,可知不同品种对增产的贡献率差异较大。在不考虑栽培管理措施的前提下,仅通过冬小麦品种的改良可提高产量 8.8% ~ 132.0%,其中陇鉴 19 的品种贡献率最大,为 132.0%;临云 125 的品种贡献率次之,为 80.4%;大西亚的品种贡献率最小,为 8.8%,可见 20 世纪初的品种对产量的贡献率较大。

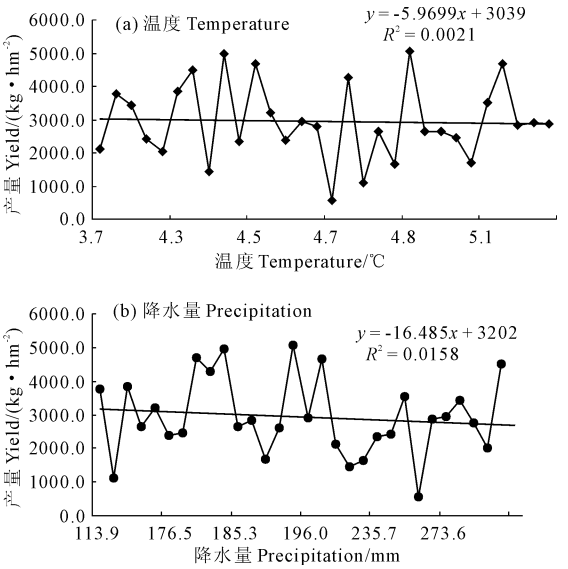

图 6 冬小麦生育期内温度(a)与降水量(b)随实际产量的变化趋势(1981—2010 年)

Fig.6 Trends of temperature(a) and precipitation(b) with yields during the winter wheat growing season(1981—2010)

表 2 可以看出,近 30 a 不同品种的产量变异系数在 4.1% ~ 65.6%之间,以变异系数表示的不同冬小麦品种的稳产性也有一定的差异,总体表现为随着品种育成年代的后移,其变异系数有先增大后减小的趋势,尤其是青山 821 品种产量的变异系数显著增大,稳产性降低。综合分析不同品种冬小麦的产量及其变异系数,可见,在不考虑其它适应措施的前提下,品种的改良对稳产高产有一定的贡献。

对小麦品种间产量变异的方差分析结果表明(图 7),不同品种间的平均产量之间存在显著的差异($F = 4.056$, $P < 0.01$)。多重比较结果显示:东方红 3 号和大西亚产量差异显著($P < 0.05$),中粮 5 号和陇鉴 19 产量差异显著($P < 0.05$),陇东 3 号和临

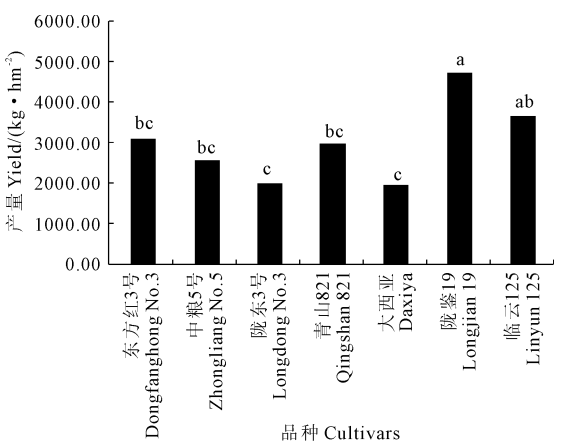

图 7 不同品种间冬小麦产量的差异

Fig.7 The yield differences among different winter wheat cultivars

表 2　冬小麦不同品种间产量贡献率及其变异系数/%

Table 2　Winter wheat yield contribution rate and coefficient of variation among different cultivars

项目 Item	东方红 3 号 Dongfanghong 3	中粮 5 号 Zhongliang 5	陇东 3 号 Longdong 3	青山 821 Qingshan 821	大西亚 Daxiya	陇鉴 19 Longjian 19	临云 125 Linyun 125
变异系数 CV	23.0	10.2	41.6	65.6	24.3	4.1	26.4
产量贡献率 ΔVY_{pi}	54.4	27.9	0	47.8	8.8	132.0	80.4

云 125 产量差异显著($P<0.05$),陇东 3 号和陇鉴 19 产量差异显著($P<0.01$),大西亚和陇鉴 19 产量差异显著($P<0.01$),大西亚和临云 125 产量差异显著($P<0.01$)。因而,可以认为,20 世纪初的品种比之前的品种表现出明显增产优势。

3　结论与讨论

3.1　讨　论

1981—2010 年甘肃省通渭县冬小麦生育期内温度呈上升趋势,且上升趋势显著($P<0.05$),总降水量呈下降趋势,且下降趋势极显著($P<0.01$),≥0℃积温呈下降趋势($P>0.05$),日照时数呈上升趋势($P>0.05$)。温度年增长率为 0.225℃·10a^{-1},总降水量年减少率为 23.879 mm·10a^{-1}。分析结果说明黄土高原半干旱农业区冬小麦生长季的气候变化呈现暖干化趋势。

在过去 30 a 间,黄土高原半干旱地区冬小麦生育期天数有所缩短,这与我国黄土高原半湿润区[26-27]及华北地区[28]冬小麦生育期对气温升高的响应方式一致。通过分析生育期天数在年际间、气候要素间及品种间的变化,可以发现冬小麦全生育期天数减少了 40 d,冬小麦播种期每 10 a 推后 3~4 d,返青期每 10 a 提前 1~2 d,开花期每 10 a 提前 4~5 d,成熟期每 10 a 提前 8~9 d。冬小麦全生育期天数的缩短,一方面主要是由播种期的推后,开花期、成熟期的提前引起的,另一方面是由于降水量减少与品种更新使冬小麦生长期缩短,营养生长阶段加快,全生育期缩短。因此,选择中晚熟品种,延长作物生长季长度是黄土高原半干旱地区冬小麦适应气候变化的重要措施。

在考虑冬小麦在生长季内的光、热、水资源随生长季延长可较充分利用的条件下,多数研究表明黄土高原半湿润区[26]、中原腹地[29]、安徽省[30]气候变暖,冬小麦生长季内热量资源增加,有利于冬小麦产量的提高。这与本研究的结论不一致,主要是由于近三十年冬小麦品种的更新造成的。冬小麦生长季内的热量资源的显著增加,水资源的显著降低均未引起产量的显著变化。因此,在不考虑其它适应措施的前提下,选择品种贡献率高、变异系数低的小麦品种,是黄土高原半干旱地区冬小麦实现作物高产的重要措施。因而,选育优良品种,改善栽培管理措施,对未来西北地区粮食稳产高产有重要意义。

3.2　结　论

1981—2010 年甘肃省通渭县冬小麦生育期内温度呈上升趋势,且上升趋势显著($P<0.05$),总降水量呈下降趋势,且下降趋势极显著($P<0.01$),≥0℃积温呈下降趋势($P>0.05$),日照时数呈上升趋势($P>0.05$)。

1981—2010 年甘肃省通渭县冬小麦全生育期天数减少了 40 d,冬小麦播种期每 10 a 推后 3~4 d,返青期每 10 a 提前 1~2 d,开花期每 10 a 提前 4~5 d,成熟期每 10 a 提前 8~9 d。生育期内降水的减少和品种更新都会使冬小麦生育期明显缩短。

甘肃省通渭县冬小麦生育期内温度的增加和降水的减少对冬小麦产量增加无明显促进作用,不同品种对增产的贡献率差异较大,不同品种间的平均产量之间存在显著的差异,且 20 世纪初的品种比之前的品种表现出明显增产优势。

参 考 文 献:

[1] IPCC. Working Group Ⅰ Contribution to the IPCC Fifth AS-sessment Report (AR5). Climate change 2013: The Physical Science Basis. Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment[R/OL].[2013-10-30].

[2] Tack Jesse, Barkley Andrew, Nalley Lawton Lanier. Effect of warming temperatures on US wheat yields[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015,112(22):6931-6936.

[3] Ummenhofer, Caroline C, Xu, Hong, et al. How climate change affects extremes in maize and wheat yield in two cropping regions[J]. Journal of Climate, 2015,28(12):4653-4687.

[4] 秦大河,孙鸿烈,孙　枢,等.中国气象事业发展战略研究[M].北京:气象出版社,2004.

[5] FL Tao M Y, YL Xu, Y Hayashi, et al. Climate changes and trends in phenology and yield of fields in China, 1981—2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006,138(1-4):82-92.

[6] Hui Ju, Marijn Velde, Erda Lin, et al. The impacts of climate change on agricultural production systems in China[J]. Climatic Change, 2013,120(1-2):313-324.

[7] 陈鹏飞,于延春,杨　飞,等.气候变化对鲁西北平原冬小麦产量的影响及对策[J].自然资源学报,2013,28(2):211-219.

[8] 蔡　剑,姜　东.气候变化对中国冬小麦生产的影响[J].农业

环境科学学报,2011,30(9):1726-1733.

[9] Olmstead, Alan L, Paul W. Rhode. "Adapting North American wheat production to climatic challenges, 1839—2009"[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011,108(2):480-485.

[10] Lobell DB, Schlenker W, Costa - Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011,333(6042):616-620.

[11] Center M W I. Wheat: global alliance for improving food security and the livelihoods of the resource-poor in the developing world[J]. Memoirs of the Faculty of Science Kyusyu University, 2011,14(5):386-391.

[12] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等.黄土高原半干旱区气候变化对春小麦生长发育的影响———以甘肃定西为例[J].生态学报,2011,31(15):4225-4234.

[13] 肖登攀,陶福禄.过去30年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1539-1545.

[14] Lu P L, Yu Q, Wang E L, et al. Effects of climatic variation and warming on rice development across south China[J]. Climate Research, 2008,36(1):79-88.

[15] Zhang T Y, Zhu J, Wassmann R. Responses of rice yields to recent climate change in China: An empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales(1981—2005)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010,150(7-8):1128-1137.

[16] Peng S B, Cassman K G, Virmani S S, et al. Yield potential trends of tropical rice since the release of IRS and the challenge of increasing rice yield potential[J]. Crop Science, 1999,39(6):1552-1559.

[17] Zhou Y, He Z H, Sui X X. Genetic improvement of grain yield and associated traits in the northern China winter wheat region from 1960 to 2000[J]. Crop Science, 2007,47:245-253.

[18] Leilei Liu, Enli Wang, Yan Zhu, et al. Contrasting effects of warming and autonomous breeding on single-rice productivity in China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012,149(7):20-29.

[19] 房世波,谭凯炎,任三学.夜间增温对冬小麦生长和产量影响的实验研究[J].中国农业科学,2010,43(15):3251-3258.

[20] 庄巧生.中国小麦品种改良及系谱分析[M].北京:中国农业出版社,2003.

[21] 庄巧生.中国小麦育种研究进展(1991—1995)[M].北京:中国农业出版社,1996.

[22] 董玉琛,曹永生,张学勇,等.中国普通小麦初选核心种质的产生[J].作物品种资源学报,2003,4(1):1-8.

[23] 孙 倩,黄 耀,姬兴杰,等.气候变化背景下河南省冬小麦品种更新特征[J].气候变化研究进展,2014,10(4):282-288.

[24] 吕 硕,杨晓光,赵 锦,等.气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响[J].农业工程学报,2013,29(18):179-190.

[25] 刘蕾蕾.气候变化、品种更新和管理措施对我国水稻生育期及产量影响的研究[D].南京:南京农业大学,2012.

[26] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等.黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响[J].生态学报,2012,32(16):5154-5163.

[27] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等.黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生育及水分利用效率的影响[J].西北植物学报,2011,31(11):2290-2297.

[28] 杨建莹,梅旭荣,刘 勤,等.气候变化背景下华北地区冬小麦生育期的变化特征[J].植物生态学报,2011,35(6):623-631.

[29] 史本林,朱新玉,李红忠,等.中原腹地气候变化对冬小麦产量的影响——以商丘地区为例[J].地理研究,2012,31(1):14-22.

[30] 唐为安,田 红,陈晓艺,等.气候变暖背景下安徽省冬小麦产量对气候要素变化的响应[J].自然资源学报,2011,26(1):66-78.

(上接第65页)

[7] 吴健生,乔 娜,彭 建,等.露天矿区景观生态风险空间分异[J].生态学报,2013,33(12):3816-3824.

[8] 王大力,吴映梅.基于GIS的云南省生态环境空间分异探究[J].中国农学通报,2015,31(25):192-199.

[9] 程红霞,胡列群,林粤江.近50 a新疆沙尘暴冷热点的时空分布特征[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):100-104.

[10] 毛国君.数据挖掘原理与算法[M].北京:清华大学出版社,2005.

[11] 孙奇奇,宋 戈,齐美玲.基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J].水土保持研究,2012,19(1):234-238.

[12] Fujita M, Krugman P, Venables A J. The Spatial Economy: Cities, Regions and International Trade[M]. MIT Press, 1999.

[13] 蔡 艳,丁维新,蔡祖聪.土壤玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J].生态学报,2006,26(12):4273-4279.

[14] 乔建平,石莉莉,王 萌.基于贡献权重叠加法的滑坡风险区划[J].地质通报,2008,27(11):1787-1794.

[15] 吴绍华,周生路,潘贤章,等.城市扩张过程对土壤重金属积累影响的定量分离[J].土壤学报,2011,48(3):496-505.

[16] Zhang X, Lin F, Jiang Y, et al. Assessing soil Cu content and anthropogenic influences usingdecision tree analysis[J]. Environmental Pollution, 2008,156(3):1260-1267.

[17] 张秀英,孙 棋,王 珂,等.基于决策树的土壤Zn含量预测[J].环境科学,2008,29(12):3508-3512.