

甘肃东部气候变化及冬小麦生长发育响应特征

毛玉琴^{1,2}

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省庆阳市农业气象试验站, 甘肃 庆阳 745000)

摘 要: 分析发现 1971 年以来陇东黄土高原变暖特征明显, 其中西峰半湿润塬区 1971~2005 年增温线性趋势 $0.0525^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 环县半干旱川区增温线性趋势 $0.0367^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 平凉半湿润半干旱过渡地区增温线性趋势 $0.0411^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。除了环县川区夏季增温不明显, 其余各区域四季增温均比较显著, 西峰塬区四季增温幅度最大, 增温趋势最明显, 平凉次之。增温表现出夏季、秋季、春季、冬季依次增强的趋势。西峰半湿润塬区年降水量呈减少的趋势, 环县半干旱川区年降水量呈增加的趋势, 处于半湿润和半干旱过渡带的平凉年降水量则没有明显变化, 不同区域秋季降水量均呈现出减少的趋势。气候变暖对陇东不同气候区域冬小麦生态影响既有相同之处, 也有不同之处, 相同之处主要表现在停止生长期和乳熟期均没有明显变化, 起身期提前趋势明显。不同之处体现在西峰播种期明显推迟, 返青期明显提前, 而环县和平凉播种期和返青期均没有明显变化; 西峰、平凉分蘖期明显推迟, 抽穗期明显提前, 而环县分蘖期和抽穗期没有明显变化; 西峰、环县成熟期显著提前, 全生育期日数显著缩短, 而平凉成熟期和全生育期日数则没有明显变化; 另外, 西峰、平凉冬前及早春分蘖减少, 越冬死亡率大幅度下降, 产量显著增高, 西峰、环县灌浆期显著延长, 成熟期显著缩短, 环县越冬死亡率较高时段对应秋春季降水偏少时段, 增产增幅不大, 增产趋势不明显。综合分析认为, 西峰半湿润塬区气候变暖特征最明显, 气候变暖对冬小麦的生态影响最显著。

关键词: 气候变化; 冬小麦; 生态响应; 陇东

中图分类号: S162.5⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)06-0257-06

农作物对全球气候变化响应的研究可以揭示全球变化的生物学响应机制^[1], 是全球变化的生态系统响应的研究基础, 成为植被—气候关系研究中不可缺少的环节。甘肃东部俗称“陇东”, 地处黄土高原腹地, 位于我国北方半湿润气候与半干旱气候的过渡地带, 泾河主要流域, 是全球气候变化较为敏感的区域之一^[2], 为残塬沟壑地形, 耕地以塬地和川地为主, 素有“陇东粮仓”之称, 属雨养旱作农业, 冬小麦播种面积占粮食作物播种面积的 50%~55%。区域内的“董志塬”面积 910 km², 是黄土高原最大且保存最为完整的一个塬面, 黄土层平均厚度超过 100 m, 是世界上黄土层最深厚的地方。探讨该地区冬小麦对全球气候变化的响应, 可为种植结构调整和陇东区域粮食安全提供理论依据。

1 资料来源

选取的三个研究区在陇东区域代表性比较强, 平凉位于泾河流域中心地带, 六盘山以东, 是半湿润气候向半干旱气候的过渡带; 西峰代表“董志塬”典型的半湿润气候和特殊地貌; 环县代表陇东北部半

干旱地区和冬小麦种植北界。选择在陇东地区广泛种植的冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 为气候变化对农业生态影响研究的代表作物。冬小麦相关观测资料分别来源于甘肃省西峰农业气象试验站和平凉、环县气象站, 由于观测地段、品系、种植方法等都长期一致, 年际间非气候因素造成的差异较小。冬小麦一般 9 月中下旬播种, 第二年 6 月中下旬成熟, 品种均为当地当家品种, 强冬性, 且冬小麦物候观测地毗邻气象观测场, 符合农业气象平行观测要求。物候期观测采用人工目测和百分比统计方法, 标准参照《农业气象观测规范》^[3]。气象资料来源于甘肃省西峰国家基准气候站、平凉国家气候站、环县国家基本气象站, 资料序列 1971~2005 共 35 a。

2 结果分析

2.1 气候变化特征

2.1.1 气温变化 1971~2005 年平均气温增温线性趋势西峰达 $0.0525^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 环县 $0.0367^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 平凉 $0.0411^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (图 1), 增温均比较显著, 以西峰塬区增温最显著, 增温幅度最大 (见图 1)。

收稿日期: 2008-12-24
基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项; 西北地区旱作农业对气候变暖的响应特征及其预警和应对技术研究 (GYHY 200806021)
作者简介: 毛玉琴 (1964—), 女, 甘肃山丹县人, 工程师, 主要从事农业气象应用研究。E-mail: .zysdnyq@163.com。

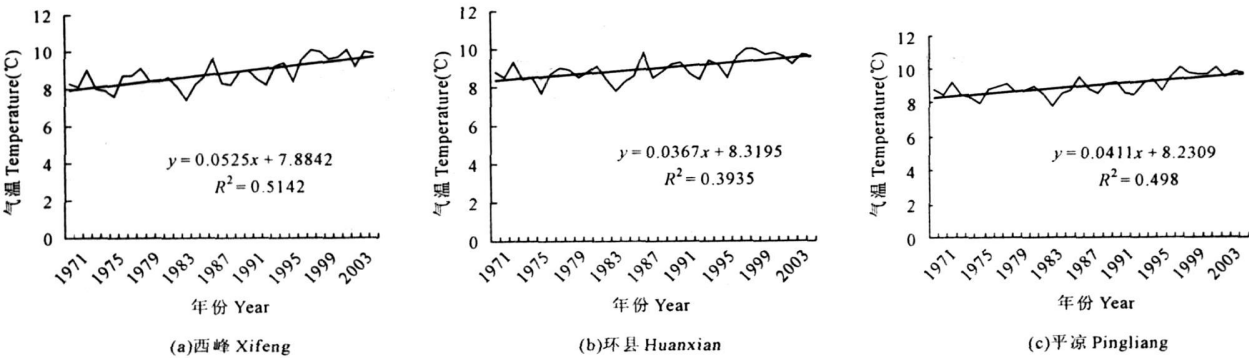


图 1 年平均气温变化曲线

Fig. 1 The mean annual temperature (°C) in the last 35 years from 1971 to 2005 in the studied region.

表 1 列出了西峰、环县、平凉 1971~2005 年春、夏、秋、冬四季平均气温变化幅度,可以看出,无论塬区还是川区,增温幅度和增温显著性从大到小依次为:冬季、春季、秋季、夏季,与任玉国等^[4]分析的全国近 50 a 四季增温显著性一致。从地域上分析,西峰塬区四季增温线性幅度最大,平凉次之,环县川区最小;从显著性上看,西峰、平凉四季增温均比较显著,其中西峰冬季、春季、秋季均达到极显著,平凉冬季和春季达到极显著,环县冬季达到极显著,夏季增温不显著。增温表现出平均气温和最高气温最低气温同时增高的特点^[5]。

表 1 陇东四季增温趋势及显著性

Table 1 Temperature increasing trends and their significances in Longdong region in four seasons

季节 Seasons	研究区 Region	线性趋势 Linear trend (°C/a)	R ²	显著性 Significance
春季 Spring	西峰(a) Xifeng	0.0598	0.3169	***
	环县(b) Huanxian	0.0380	0.1939	**
	平凉(c) Pingliang	0.0475	0.3069	***
夏季 Summer	西峰(a) Xifeng	0.0315	0.1939	**
	环县(b) Huanxian	0.0134	0.0380	NS
	平凉(c) Pingliang	0.0242	0.1582	*
秋季 Autumn	西峰(a) Xifeng	0.0435	0.2501	***
	环县(b) Huanxian	0.0285	0.1498	*
	平凉(c) Pingliang	0.0320	0.2159	**
冬季 Winter	西峰(a) Xifeng	0.0764	0.3446	***
	环县(b) Huanxian	0.0642	0.3350	***
	平凉(c) Pingliang	0.0630	0.3642	***

注:*** 极显著 ($P<0.001$); ** 显著 ($P<0.01$); * 比较显著 ($P<0.05$); NS; 不显著 ($P>0.10$), 下同。

Note: *** extremely significant ($P<0.001$); ** significant ($P<0.01$); * relatively significant ($P<0.05$); not significant ($P<0.10$). The same as below.

2.1.2 降水变化 1971~2005 西峰年平均降水量 537 mm, 环县 415 mm, 平凉 489 mm, 图 2 是三个研究点近 35 a 降水距平, 从图中可以看出, 西峰塬区 1993 年以来正距平显著减少, 环县正距平显著增加, 而处于半湿润气候向半干旱气候过渡带的平凉则没有明显变化特征, 说明甘肃东部半湿润区出现干旱化趋势^[6], 半干旱区出现湿润化趋势, 降水地域差异在减小, 出现趋同现象。

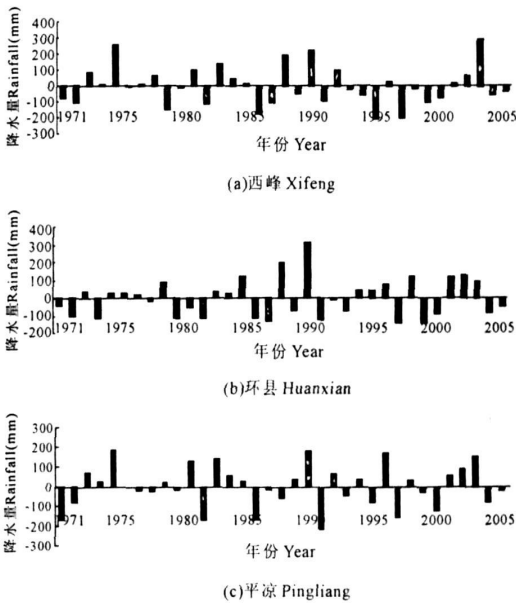


图 2 1971~2005 年降水量距平

Fig. 2 Histogram of the differences between annual precipitations and average precipitation from 1971 to 2005

通过对春、夏、秋、冬四季降水量分析, 20 世纪 90 年代西峰、环县、平凉秋季降水基本上以负距平为主, 进入新千年以来, 西峰、平凉秋季降水以正距平为主, 而环县仍然以负距平为主, 但较 90 年代有所好转(见图 3), 其它季节降水则没有明显变化。

通过资料延伸分析,1960 年以来西峰、平凉、环县秋季降水均呈显著减少趋势,这与谌芸等研究的近 50 a 我国大部分地区秋季降水呈减少的趋势,减少最明显的区域是西北黄土高原和东北平原的结论一致^[7]。其中环县以 2.02 mm/a 的线性趋势减少($R^2=0.2377^{***}$, $P<0.001$);西峰以 1.50 mm/a 的线性趋势减少($R^2=0.0867^*$, $P<0.05$);平凉以 1.39 mm/a 的线性趋势减少($R^2=0.0968^*$, $P<0.05$),环县减少幅度最大,减少趋势最明显。

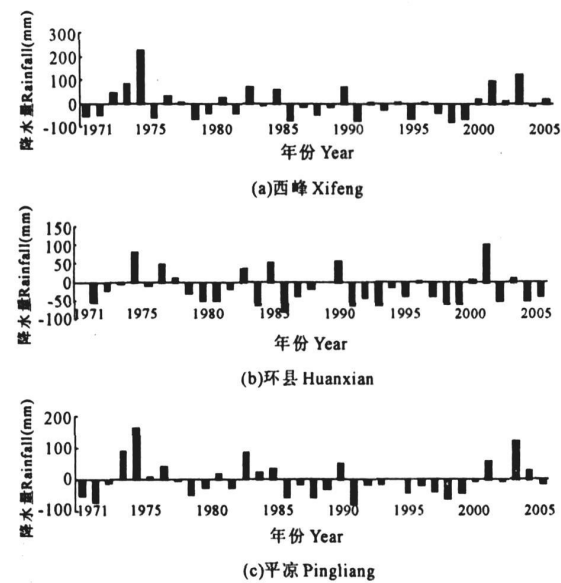


图 3 1971~2005 年秋季降水量距平

Fig. 3 Histogram of the differences between autumn precipitations and average autumn precipitation from 1971 to 2005

2.2 气候变化的生态响应特征

选取西峰、环县、平凉三个研究区广泛种植的冬小麦为代表作物,研究陇东黄土高原不同气候区农业生态对气候变暖的响应特征。

2.2.1 对冬小麦发育期的影响 表 2 显示,三个研究区冬小麦冬前停止生长期和乳熟期无显著提前或滞后的趋势,表现出对气候变化不敏感的一致性;而起身期显著提前,表现出对气候变化敏感的一致性。其他发育期对气候变化的响应,三个研究区则没有表现出一致性。西峰除了停止生长期和乳熟期,其余各发育期变化均比较显著,冬前各发育期明显推迟,返青及返青后各发育期显著提前;平凉和环县播种期推迟和返青期提前的趋势均不明显,另外,环县分蘖期推迟和抽穗期提前的趋势不明显,平凉成熟期提前的趋势不明显。

气温变化和发育期变化表明,变暖特征越明显的区域,冬小麦物候变化越显著。平凉和环县由于年降水量明显比西峰少,早春旱对返青生长造成一

定影响,使冬春气温显著升高导致发育期提前的生态变化特征滞后到起身期出现。

表 2 冬小麦发育期变化趋势及显著性

Table 2 Changes trends and their significances of growth dates of winter wheat

生育时期 Growth stage	研究区 Region	线性趋势 Linear trend (d/a)	R ²	显著性 Significance
播种期 Planting	西峰(a) Xifeng	0.4123	0.3905	***
	环县(b) Huanxian	-0.1946	0.0481	NS
	平凉(c) Pingliang	0.3386	0.0353	NS
分蘖期 Tillering	西峰(a) Xifeng	1.0408	0.5157	***
	环县(b) Huanxian	0.3346	0.0282	NS
	平凉(c) Pingliang	0.5649	0.1440	*
停止生长期 Growth stopping	西峰(a) Xifeng	0.1400	0.0154	NS
	环县(b) Huanxian	0.1408	0.0168	NS
	平凉(c) Pingliang	-0.3298	0.0502	NS
返青期 Reviving	西峰(a) Xifeng	-0.5238	0.2877	**
	环县(b) Huanxian	-0.0438	0.0014	NS
	平凉(c) Pingliang	0.2947	0.0417	NS
起身期 Setting	西峰(a) Xifeng	-1.0669	0.6025	***
	环县(b) Huanxian	-0.9111	0.3506	***
	平凉(c) Pingliang	-0.6088	0.2011	*
抽穗期 Heading	西峰(a) Xifeng	-0.4715	0.4560	***
	环县(b) Huanxian	-0.3015	0.0895	NS
	平凉(c) Pingliang	-0.4544	0.2688	**
乳熟期 Milky	西峰(a) Xifeng	-0.1185	0.0370	NS
	环县(b) Huanxian	-0.1746	0.0319	NS
	平凉(c) Pingliang	-0.3614	0.1305	NS
成熟期 Maturity	西峰(a) Xifeng	-0.5592	0.3676	***
	环县(b) Huanxian	-0.5469	0.2735	**
	平凉(c) Pingliang	-0.1614	0.0500	NS

2.2.2 冬小麦发育期间隔日数变化 由于气候类型不同,气候变化对冬小麦生态影响不尽相同。表 3 列出了冬小麦主要发育期间隔日数变化趋势。不同研究区冬小麦发育期间隔日数变化相同之处是:冬前生长期和拔节期~成熟期间隔日数均没有显著变化。不同之处是:① 西峰全生育期、越冬期显著缩短(图 4),播种~分蘖期显著延长;环县、平凉相同发育期间隔日数则没有明显变化。② 西峰、平凉冬前分蘖期显著缩短,环县没有明显变化;环县返青~成熟期显著缩短,西峰、平凉则没有明显变化。③ 环县、平凉返青~拔节期显著缩短;西峰返青~拔节期没有明显变化。④ 西峰、环县抽穗~乳熟期显著延长,乳熟~成熟显著缩短,平凉则没有明显变化。

表 3 冬小麦各发育期间隔日数变化
Table 3 Changes of the days between different
growing stages of winter wheat

发育期 Stage	测点 Station	线性趋势 Linear trend (d/a)	R^2	显著性 Significance
全生育期 Total growth	西峰(a) Xifeng	-0.9692	0.4975	* * *
	环县(b) Huanxian	-0.3808	0.0801	NS
	平凉(c) Pingliang	-0.2368	0.0617	NS
播种~ 停止生长 Planting ~growth stopping	西峰(a) Xifeng	-0.2421	0.0481	NS
	环县(b) Huanxian	0.3354	0.0897	NS
	平凉(c) Pingliang	-0.4053	0.0705	NS
播种~ 分蘖 Planting~ tillering	西峰(a) Xifeng	0.5586	0.4002	* * *
	环县(b) Huanxian	0.3812	0.0812	NS
	平凉(c) Pingliang	0.2263	0.0178	NS
分蘖~ 停止生长 Tillering~ growth stopping	西峰(a) Xifeng	-0.8007	0.2353	* *
	环县(b) Huanxian	-0.1158	0.0040	NS
	平凉(c) Pingliang	-0.8947	0.1508	*
越冬期 Wintering	西峰(a) Xifeng	-0.6615	0.2214	* *
	环县(b) Huanxian	-0.1846	0.0135	NS
	平凉(c) Pingliang	0.6246	0.0761	NS
返青~ 成熟 Reviving~ maturity	西峰(a) Xifeng	-0.0354	0.0013	NS
	环县(b) Huanxian	-0.5031	0.1699	*
	平凉(c) Pingliang	-0.4561	0.0919	NS
返青~ 拔节 Reviving~ jointing	西峰(a) Xifeng	0.1231	0.0324	NS
	环县(b) Huanxian	-0.3392	0.1506	*
	平凉(c) Pingliang	-0.6316	0.2227	* *
拔节~ 成熟 Jointing~ maturity	西峰(a) Xifeng	-0.1585	0.0410	NS
	环县(b) Huanxian	-0.1638	0.0257	NS
	平凉(c) Pingliang	0.1754	0.0309	NS
抽穗~ 乳熟 Heading ~milky	西峰(a) Xifeng	0.3531	0.3865	* * *
	环县(b) Huanxian	0.2670	0.1865	*
	平凉(c) Pingliang	0.0930	0.0217	NS
乳熟~ 成熟 Milky~ maturity	西峰(a) Xifeng	-0.4408	0.3988	* * *
	环县(b) Huanxian	-0.3196	0.2152	* *
	平凉(c) Pingliang	0.2000	0.0731	NS

2.2.3 分蘖及越冬死亡率变化特征 由于西峰、平凉分蘖期~停止生长期显著缩短,冬前和返青期分蘖也在逐年减少,以西峰减少最为显著(见图 5)。而环县川区由于分蘖期~停止生长期间隔日数没有明显变化,因此,停止生长期和返青期分蘖均没有明显变化规律。虽然西峰、平凉冬前及返青期分蘖在逐年减少,但乳熟期有效茎并没有减少的趋势^[8]。由于 1998~2003 年中仅 2000 年春季降水出现负距

平,其余 5 a 春季降水均为正距平,越冬死亡率较低,因此,环县 1998~2003 年乳熟期有效茎出现了一个高值区。

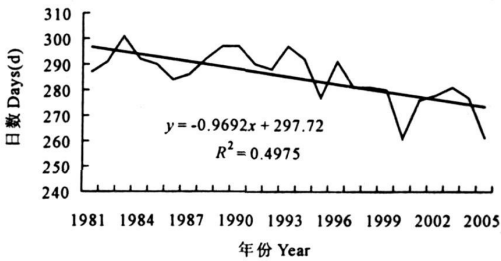


图 4 西峰塬区历年冬小麦全生育期日数

Fig. 4 The days of the growing stage of winter wheat in different year in Xifeng

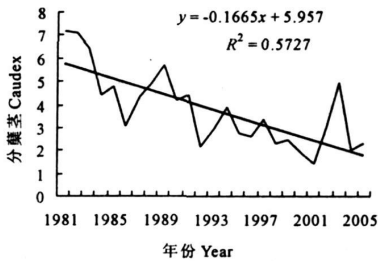


图 5 西峰塬区历年冬小麦返青期分蘖

Fig. 5 The number of winter wheat sprout in return green period at Xifeng from 1981 to 2005

由于冬、春气温持续上升,西峰、平凉冬小麦越冬死亡率明显降低,1999 年以来冬小麦越冬死亡率基本为零。而环县冬小麦在气候变暖的背景下,越冬死亡率高底主要取决于土壤干旱程度,前文分析显示 1990 年以来环县秋季降水量偏少,而 1994~2000 年为环县越冬死亡高值期,说明干旱是环县冬小麦越冬死亡的主要原因。2001~2004 年环县年降水量和春季降水量比较丰沛,冬小麦越冬死亡基本为零,但 2004 年秋季和 2005 年春季环县降水量均偏少,2005 年冬小麦越冬死亡率又出现回升趋势。

2.2.4 产量变化 通过对西峰、环县 1981~2005 年和平凉 1987~2005 年冬小麦产量分析发现,陇东冬小麦产量在波动中呈逐年增加的趋势,其中西峰产量以 $76.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 线性趋势增加 ($R^2 = 0.3077, P < 0.01$),平凉产量以 $59.7 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 线性趋势增加 ($R^2 = 0.4281, P < 0.01$) (图 6),环县产量以 $21.9 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 线性趋势增加 ($R^2 = 0.1068, P < 0.1$),从半湿润气候区到半干旱气候区,冬小麦产量增加幅度和增产显著性逐步下降。

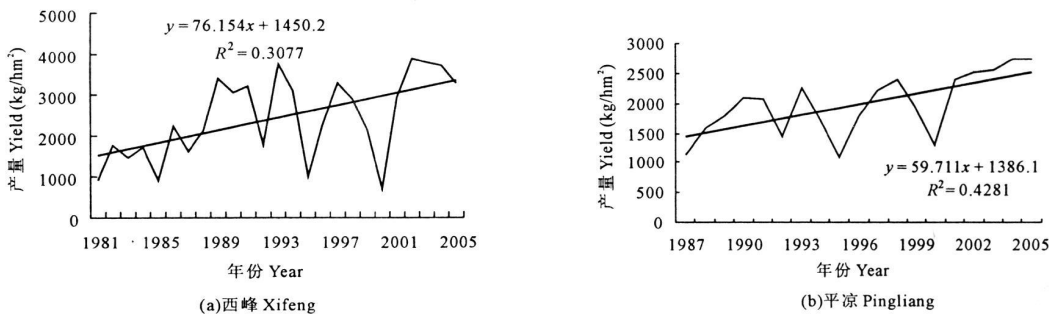


图 6 历年冬小麦产量

Fig. 6 Yield of winter wheat in east Gansu from 1981~2005

3 结论与讨论

陇东黄土高原气候变暖与全球变暖趋势一致,增温幅度从大到小依次为冬季、春季、秋季、夏季,其中增温幅度和增温显著性从半湿润气候区到半干旱气候区依次减弱。年降水量半湿润塬区呈逐年减少趋势,向干旱化发展,半干旱川区呈逐年增多趋势,向湿润化发展。秋季降水量呈减少趋势,其余季节降水量没有明显变化特征,尤其北部半干旱川区秋季降水偏少趋势明显,导致收墒期土壤储水量减少,春旱加重,不利于冬小麦等越冬作物返青和春季生长,是越冬死亡率较高的主要原因。

气候变暖对冬小麦生长发育进程的显著影响,进一步印证了植物物候与温度关系比较密切的定论^[9]。对半湿润西峰塬区冬小麦发育期影响主要体现在:(1)播种期推迟,返青及返青后各发育期(乳熟期除外)普遍提前。(2)越冬期和全生育期显著缩短。(3)冬前生长期变化不明显,但冬前分蘖期显著缩短,导致冬前和返青时分蘖显著减少。(4)返青期~成熟期间隔日数不变,抽穗前各发育期间隔日数不变,但抽穗期~乳熟期显著延长,乳熟期~成熟期显著缩短,即灌浆期显著延长,成熟期显著缩短。(5)越冬死亡率大幅度下降,近年基本上达到了越冬零死亡。(6)产量呈现出逐年增加的趋势;而对半干旱环县川区冬小麦影响主要体现在:(1)由于干旱影响,返青期没有提前的趋势,越冬期没有缩短的趋势;(2)发育期对气候变暖的响应滞后到起身期,起身期及以后各发育期(乳熟期除外)普遍提前;(3)由

于返青期没有提前,而成熟期提前趋势明显,因此,返青期~成熟期明显缩短,而且以返青期~抽穗期缩短为主;(4)抽穗期~乳熟期显著延长,乳熟期~成熟期显著缩短,即灌浆期显著延长,成熟期显著缩短;(5)秋季和早春降水量明显偏少造成的早春旱是冬小麦越冬死亡的主要原因;(6)产量有增加的趋势,但增产幅度不大,增产趋势不显著;气候过渡带平凉川区冬小麦生态响应不同之处主要体现在:灌浆期没有延长趋势,成熟期没有缩短趋势,其余特征均和西峰或环县基本一致。

参考文献:

[1] 居辉,熊伟,许吟隆,等. 气候变化对我国小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1340—1343.

[2] 谢金南. 中国西北地区干旱气候变化与预测研究(第一卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 1—8.

[3] 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 27—31.

[4] 任国玉,郭军,徐铭志,等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942—952.

[5] 万信,王润元,李宗英. 陇东黄土高原塬区农业气象要素变化特征研究[J]. 生态学杂志, 2007, 26(3): 94—97.

[6] 郭海英,马鹏里,杨兴国,等. 陇东黄土高原塬区冬小麦越冬期土壤水分损耗规律浅析[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 165—168.

[7] 谌芸,施能. 我国秋季降水、温度的时空分布特征及气候变化[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(5): 622—630.

[8] 郭海英. 陇东黄土高原冬小麦生产农业气象要素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 123—126.

[9] 张学霞,葛全胜,郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系—基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 499—506.

Characters of climate change and winter wheat ecological response in East Gansu

MAO Yu-qin^{1,2}

(1. Institute of Arid-meteorology, CMA, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China;
2. Qingyang Agricultural Meteorological Experimentation Station, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: Since 1971 year, the average temperature increased by 0.0525℃/a in semi-humid plateau (Xifeng) and 0.0367℃/a in semi-arid plain (Huanxian), while in the transition area of semi-humid and semi-arid climate (Pingliang), the average temperature increased by 0.0411℃/a. The temperature increase was significant in different areas in four seasons, but not significant in the river valley (Huanxian) in summer. The most extent and significance of increment is the air temperature in semi-humid plateau (Xifeng) in four seasons, and Pingliang next. The increment of air temperature follows the order of winter>spring>autumn>summer. The precipitation of the years was decreased in the plateau (Xifeng) and increased in river valley (Huanxian), but in the transition area of semi-humid and semi-arid climate (Pingliang), the precipitation of the years showed inconspicuous change in the study period. The precipitation in study regions decreased in autumn. The climate warming had sameness, but yet had difference to ecological response of winter wheat in different regions in Longdong loess plateau. The sameness behaved that the date of growth-stopping and milk-maturity had inconspicuous change, and the date of rise had an advance current distinctness. The date of planting delayed but the date of reviving advanced obviously in the plateau (Xifeng), while the date of planting and reviving had inconspicuous change in Huanxian and Pingliang. The tillering defer and the tassel advance was evident in Xifeng and Pingliang, but inconspicuous in Huanxian. The date of maturity advanced and the number of days in the whole growth duration shortened distinctly in Xifeng and Huanxian, but inconspicuously in Pingliang. In addition, the number of tillering was lessened in winter and the next early spring, so the death rate through the winter descended and the yield increased significantly in Xifeng and Pingliang. The significant delaying of grouting period and shortening of maturity occurred in Xifeng and Huanxian. Through colligate analysis, it was considered that the semi-humid plateau (Xifeng) had the most conspicuous character of climate warming and the most significant biological effect on winter wheat.

Keywords: climate change; winter wheat; ecological response; East Gansu