

陇东黄土高原冬小麦生长对气候变暖的响应特征

王位泰^{1,2,3}, 黄 斌², 张天锋², 王润元¹, 薛景轩², 王灵梅⁴, 王 琴²

(1. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 2. 庆阳市气象局, 甘肃 庆阳 745000; 3. 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081; 4. 庆阳市西峰初级中学, 甘肃 庆阳 745000)

摘 要: 使用地面平行观测资料, 就甘肃陇东黄土高原作物冬小麦对气候变暖的响应进行初步比较分析。结果表明: 1981 年以来, 冬小麦对气候变暖的响应主要表征为全生育期与越冬期缩短, 返青期与成熟期提前; 各发育阶段对增温的响应差异明显, 增温使营养生长阶段的返青~起身~拔节和生殖生长阶段的开花及成熟日期提前, 乳熟日期和开花~成熟期间的总日数无明显变化, 但增温使开花~乳熟有延长趋势, 使乳熟~成熟有缩短趋势。产量随平均最低气温的升高和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 及 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温的增加而增加, 随 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 积温的增加而减少, 表明乳熟期的高温天气对冬小麦产量有逼熟减产的负作用。

关键词: 黄土高原; 冬小麦; 生长; 气候变暖; 响应

中图分类号: S512.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)01-0153-05

全球气候变化造成的异常灾害天气气候事件如干旱和洪涝等严重影响越来越受到广泛关注, 对全球气候日益变暖(IPCC, 2001)的事实, 普遍得到人们的公认。国内在气候变暖对农业生产和主要粮食作物的总体影响研究上, 已得出我国长江以北地区, 作物生长季开始日期提早, 终止日期延后, 使潜在生长期有所延长, 特别是中纬度和高原地区, 使得主要粮食作物发育期缩短; 根据历史气候的相似性原理, 西北地区主要农作物在气候变暖背景下, 总体上是暖湿型, 综合 CO₂ 浓度增大的因素, 粮食产量增加的可能性相对较大; 气候变暖对粮食作物营养生长有促进作用, 但考虑到未来百年内气候的持续增温, 有可能对作物的生殖生长有阻滞作用^[1~6]。陇东黄土高原地区是我国历史上传统旱作农业种植区, 而冬小麦作为主要粮食作物在农业生产上占有很大比例, 研究冬小麦的生态变化对气候变暖的响应特征, 对于改进冬小麦种植制度、科学调整粮食生产布局、充分利用气候资源、增强粮食安全和提高经济效益具有重要意义。

1 研究区概况与资料来源

1.1 研究区概况

陇东黄土高原位于我国黄土高原中部, 东依子午岭, 北靠羊圈山, 西接六盘山, 系黄河中游黄土高原沟壑区, 因四周高而中间低, 故有“陇东盆地”之称。甘肃省庆阳市是陇东黄土高原的主要组成部

分, 西峰区位于北纬 35°44', 东经 107°38', 海拔高度 1 421.9 m, 辖区以塬地为主, 区域内董志塬在《诗经》中被称为“大原”, 总面积为 910 km², 对黄土高原残塬沟壑区的塬地具有较好的代表性, 年降水量 527 mm, 年平均气温 8.7℃, 属温和半湿润气候。

1.2 资料来源

本文所用冬小麦发育期与产量基本资料为 1980~2004 年西峰国家一级农业气象试验站观测的冬小麦生长资料, 所有冬小麦发育期与产量资料均根据中国气象局《农业气象观测规范》测定, 保持了观测方法的一致性。作物冬小麦观测地段与气象观测场 24 年内保持基本稳定, 所用气候资料为紧邻观测试验地 2 m 处西峰国家基准气候站平行气候观测资料。文内涉及的相关系数和回归方程均通过信度为 0.05 的统计检验。

2 冬小麦生长期对期间气候变暖的响应

2.1 全生育期与温度变化

冬小麦全生育期是指从播种到成熟收获的生命周期所经历的日数。不考虑品种的影响情况(下同), 图 1 是 24 年来作物冬小麦生长期与生长期平均气温的实际变化趋势。从平均气温变化曲线可以看出, 从 1985 年达到 5.1℃的最低点后在波动中持续升高, 1999 年达到 24 年中最高值 7.6℃, 2000~2004 年温度处在相对高值阶段, 连续 2 年平均气温达到 24 年中次高温年 6.6℃, 线性升温变暖趋势明

显。对应冬小麦生长期在 1983 年出现最大值 301 d 后,在波动中持续缩短,特别是 1994 年后发生显著变化,在 2000 年出现生长期最小值 261 d,2001~2004 年生长期仍保持相对较短年份,与前 20 a 生长期序列比较出现了 2 年次小值与第 3 小值,生长期线性缩短趋势清楚。统计 24 年中,80 年代冬小麦生育期平均为 292 d,而 1991~2004 年平均生长期为 282 d,平均气温升高 0.6℃,生长期缩短 10 d,表明黄土高原冬小麦生长期内气温的升高导致生长期

缩短,但粮食作物整个生长季相对延长,热量增加 200℃左右积温,这对于冬麦收割后提高小秋作物复种指数和引种夏玉米等,具有潜在的提高粮食总产的重要生产价值。

2.2 越冬期与负积温变化

冬小麦越冬期是指从冬前停止生长到次年返青所经历的日数。如图 2 是 24 年来冬小麦越冬期与期间负积温的实际变化趋势。

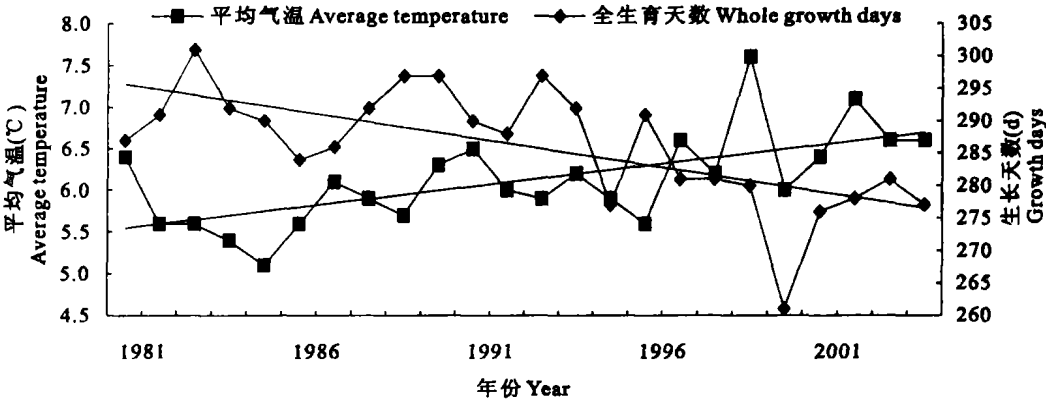


图 1 冬小麦生长期与期间平均气温逐年变化曲线

Fig. 1 The change curve of growth period and course mean temperature of winter wheat year to year

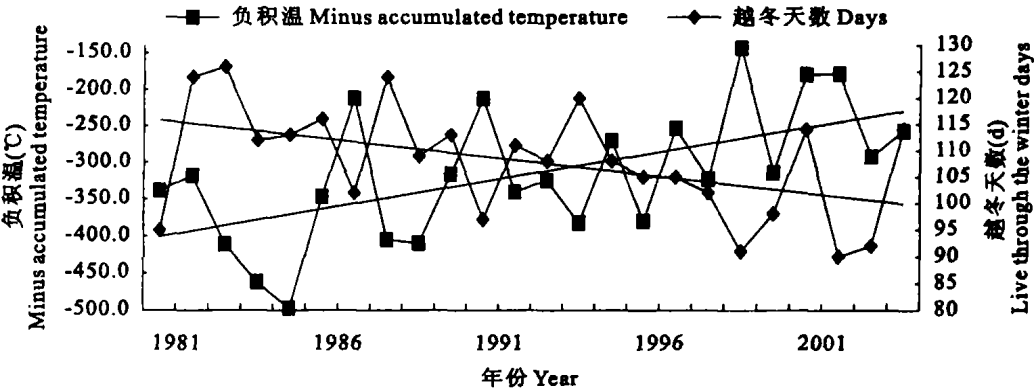


图 2 冬小麦越冬期与期间负积温的逐年变化曲线

Fig. 2 The year after year change curves of winter period and course minus accumulated temperature of winter wheat

负积温不仅可反映冬小麦越冬期的平均冷暖程度,由于采用累积数值的方法,可以反映出极端最低温度的寒冷影响。从负积温曲线可以看出,1985 年负积温绝对值(下同)达到 -495.3℃最大值之后在波动中持续减少,1998~1999 年度达到 -151.7℃最小值,即最温暖的冬季,2001~2004 年生产年度,负积温出现了 3 a 较小值,其中 2001~2002 年度出现次暖冬,反映出陇东黄土高原地区冬季负积温明显呈减少状态,其振幅也日益减小,表明冬季变暖的稳定性在增强。与此同时,从作物冬小麦越冬日数逐年变化曲线可以看出,越冬日数在波动中减少,特别

是 1995 年以来,冬小麦越冬日数减少 10 d,统计表明负积温平均每减少 -8.5℃,越冬天数平均减少 1 d。

冬小麦越冬日数与期间负积温的相关关系如图 3 所示,相关系数 $r = -0.50$,用 y 表示越冬日数, x 表示负积温值,得到二次回归方程 $y = -0.0001x^2 - 0.1349x + 77.644$, $R^2 = 0.306$,可以看出越冬期日数与期间负积温具有较好的负相关关系。

2.3 返青期与前期增温

冬小麦经过越冬休眠,到次年春季,当平均气温稳定通过 0℃后,随着气温的升高,开始返青,比较 1981~2004 年冬小麦返青日期,最迟返青日期为 3

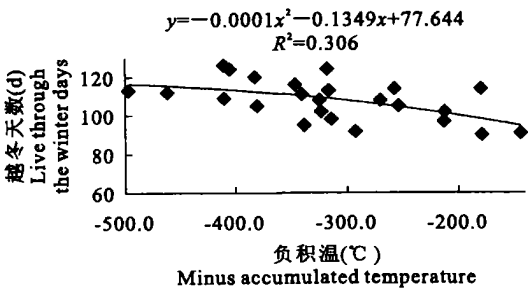


图 3 冬小麦越冬日数与期间负积温的相关回归曲线
Fig. 3 The correlation regression of the winter days and course minus accumulated temperature of winter wheat

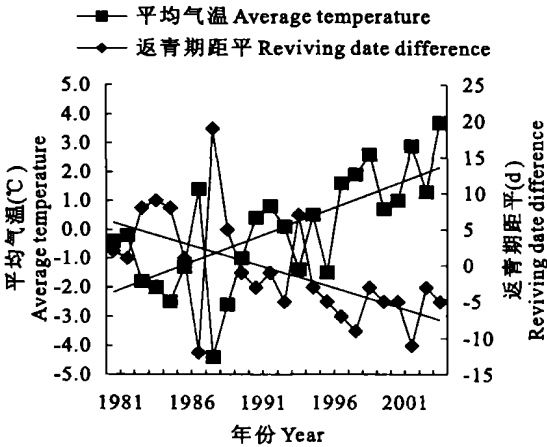


图 4 冬小麦返青距平天数与前期平均气温的逐年变化曲线
Fig. 4 The year after year change curves of reviving distance mean days and prophase mean temperature of winter wheat

月 30 日,平均日期为 3 月 11 日,因此选择 2 月中旬~3 月上旬平均气温反映冬小麦返青前的气候条件。图 4 是冬小麦返青距平天数(规定早于平均返青日期为负距平,迟于平均返青日期为正距平,下

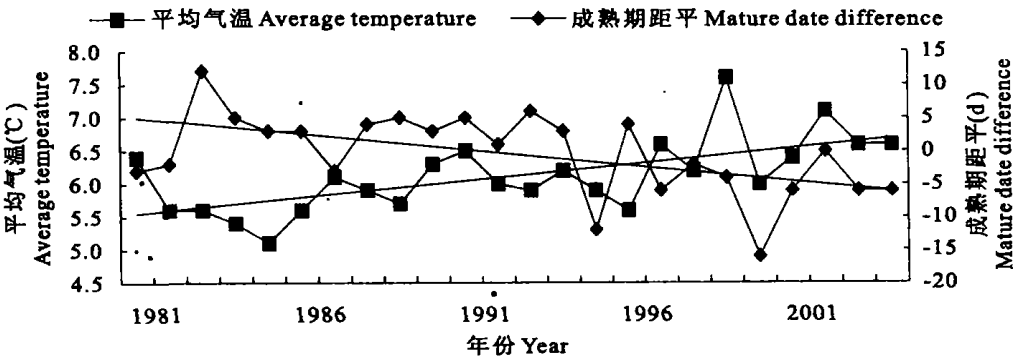


图 5 冬小麦成熟期距平天数与生长期平均气温逐年变化曲线

Fig. 5 The year after year change curve of harvest date distance mean datedays and growth period mean temperature of winter wheat

2.4.2 成熟期与 6 月平均温度的关系 成熟期与 6 月平均气温关系可由散点相关图 6 反映, y 表示成熟日期距平, x 表示 6 月平均气温,得到二次回归方程: $y = -0.2706x^2 - 13.88x + 165.79$, ($r =$

同)与返青前期 2 月中旬~3 月上旬平均气温的实际变化趋势。

从逐年变化曲线与线性趋势可清楚看出,1981~2004 年冬小麦返青前期平均气温呈上升趋势,特别是从 90 年代以来平均气温持续上升,且年际间波幅显著减小,而冬小麦返青期则呈明显提前趋势。两者年际变化曲线的波峰与波谷有较好的反对应相关关系,用 y 表示返青期距平天数, x 表示 2 月中旬~3 月上旬平均气温,模拟得到二次回归方程 $y = 0.4407x^2 - 2.9463x - 2.3895$, ($r = -0.71$, $R^2 = 0.7877$),返青前期平均气温每升高 1°C ,返青日期平均提前 3 d,表明前期增温使得冬小麦返青期明显提前。

2.4 成熟期与温度变化

2.4.1 成熟期与生长期平均气温变化 图 5 是 24 年来冬小麦成熟期与生长期平均气温的实际变化趋势,成熟期对气候变暖的响应是生长期对气候变暖响应的关键环节,其提前与推迟不但直接影响生长期而且对冬小麦收获后的小秋复种,充分利用热量气候资源,提高粮食总产具有重要意义。从生长期平均气温逐年变化曲线可以看出,平均气温从 1987 年以后明显上升,在 1999 年达到最高值 7.6°C 后,并没有较大幅度回落,仍然在较高温度上波动,存在显著的线性变暖趋势,而冬小麦成熟期对生长期平均气温的变暖有较好的响应关系,特别是从 90 年代中期 1995 年以来成熟期明显提前。线性趋势表明,随着生长期平均气温的上升,冬小麦成熟期存在明显提前的响应变化趋势,平均气温每升高 1°C ,成熟期提前 5.5 d。

-0.49 , $R = 0.4324$),由二次回归曲线可见,随着 6 月平均气温升高,成熟期提前,当遇高温少雨干旱时段时,表现更为突出。

3 各发育阶段对温度变化的响应特征

作物冬小麦各发育阶段对气温变暖的响应是有差异的,为避免年际气温变化对各发育期及期间日数的影响,没有对各发育阶段对应的平均气温按高低排序分析其影响特点,而是着重分析冬小麦生长期平均气温序列 1980~2004 年的增暖趋势对各发育阶段的影响特点,如表 1 所示。与 80 年代比较,冬小麦越冬前,出苗~三叶期从 90 年代开始持续推迟,期间日数增加 4~6 d,表明随着气候变暖,生长发育出现迟缓变化;分蘖~越冬期间日数缩短 6~14 d,伸根日数明显减少。越冬~返青、返青~起身和起身~拔节三个发育阶段中,返青、起身和拔节期明显提前 2~10 d,越冬~返青及返青~起身期间日数均缩短 10 d 左右,表明越冬到起身 2 个阶段对气候变暖的响应特征是加快了生育进程,而起身~拔节增加 9~12 d,发育出现迟缓变化;生殖生长阶段的孕穗~抽穗~开花均提前 5~10 d,期间日数无明

显变化;开花~乳熟阶段,主要是开花期明显提前 5~6 d,乳熟日期无明显变化,期间日数增加 4~6 d 呈增长变化趋势,表明气候变暖使得开花~乳熟期生殖生长阶段受阻;乳熟~成熟阶段主要是成熟期明显提前,期间日数减少 4~7 d,为缩短趋势,表明持续的增温对冬小麦有逼熟不利影响。

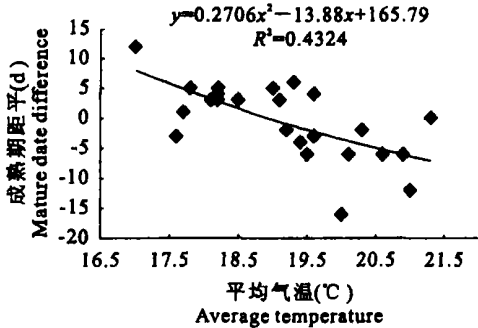


图 6 冬小麦成熟期距平天数与 6 月平均气温相关回归曲线
Fig. 6 The correlation regression curve of harvest date distance mean datedays and June mean temperature of winter wheat

表 1 冬小麦生育期及年代际平均气温

Table 1 Winter wheat growth period, days and decade mean temperature

生育期 Growth period	播种 Seed	出苗 Exce·	三叶 Leaves	分蘖 Diva·	越冬 Winter	返青 Revi·	起身 Rise	拔节 Shoot	孕穗 Spike	抽穗 Spik·	开花 Bloom	乳熟 Milk	成熟 Matu·	播种~成熟 Seed~mature	气温 Temp·
1980 _s ′															
生育期 Growth period	09—16	09—24	10—06	10—13	11—21	03—14	04—04	04—27	05—10	05—19	05—27	06—14	07—04	—	5.8℃
期间日数 Course days	—	8	12	7	39	113	21	23	13	9	8	18	20	292	—
1990 _s ′															
生育期 Growth period	09—19	09—27	10—13	10—21	11—23	03—07	03—21	04—25	05—05	05—14	05—22	06—13	06—29	—	6.3℃
期间日数 Course days	—	8	16	8	33	104	14	35	10	9	8	22	16	284	—
期间日数差 Course days difference	—	0	4	1	—6	—9	—7	12	—3	0	0	4	—4	—8	—
2001~2004															
生育期 Growth period	09—23	10—02	10—20	10—28	11—22	03—05	03—16	04—17	05—03	05—13	05—21	06—14	06—27	—	6.8℃
期间日数 Course days	—	9	18	8	25	103	11	32	16	10	8	24	13	278	—
期间日数差 Course days difference	—	1	2	0	—8	—1	—3	—3	6	1	0	2	—3	—6	—

4 产量与温度及积温的关系

4.1 产量与温度的关系

利用正交多项式方法分离冬小麦趋势产量与受气候因子影响的产量部分,统计冬小麦气候产量部

分(下同)与全生育期、越冬期、3 月~成熟期和 6 月平均气温、最高和最低温度的相关系数(表略),均未通过信度为 0.05 的显著性统计检验,相对较明显的是产量与全生育期平均最低气温相关系数为 0.32 (通过信度为 0.20 的显著性统计检验),表明最低气

温的升高有增产意义;产量与 3 月~成熟期的平均最高气温相关系数为-0.25,表明高温天气的增加对冬小麦产量有负作用产生,对此值得引起注意。

4.2 产量与积温的关系

为探讨气候变暖状态下积温热量条件对冬小麦产量的影响,统计冬小麦气候产量与积温的相关关系,见表 2。冬小麦气候产量与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温正相关显著,从冬小麦气候产量与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 及 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温逐年变化曲线(图略)反映出较一致的波峰及波谷对应关系;产量与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温的相关系数达到一定的正相关显著性水平;值得注意的是产量与 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 积温的相关系数为-0.1142,虽未通过显著性统计检验,但表明随着气候变暖, $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 积温的增加对产量有一定的负作用产生。

表 2 冬小麦气候产量与积温相关系数

Table 2 Correlation coefficient of winter wheat climate yield and accumulated temperature

项目 Item	$\geq 0^{\circ}\text{C}$	$\geq 5^{\circ}\text{C}$	$\geq 10^{\circ}\text{C}$	$\geq 15^{\circ}\text{C}$	$\geq 20^{\circ}\text{C}$
气候产量 Climate yield	0.4592**	0.4289**	0.3072*	0.3273*	-0.1142

注:*, **, * 分别表示通过信度为 0.05、0.20 的显著性统计检验。Note: **, *, * were significant at 0.05、0.20 level.

5 结论与讨论

1) 随着冬小麦生长期平均气温的升高,冬小麦生长期有明显的缩短趋势,平均气温每升高 0.6°C 生长期缩短 10 d。

2) 随着冬季负积温的减少即出现日益冬暖变化,冬小麦越冬期明显缩短,平均负积温每减少 -8.5°C ,越冬期减少 1 d。

3) 冬小麦返青期随着返青前期的平均气温升高和越冬期负积温的减少,返青期明显提前,平均气温升高 1°C ,返青期提前 3 d,20 世纪 90 年代以来前期平均气温升高 2.5°C ,返青期提前 8 d。

4) 随着全生育期平均气温升高冬小麦成熟期呈提前趋势,温度每升高 1°C ,成熟期提前 5.5 d,20 世纪 90 年代以来冬小麦成熟期平均提前 7 d,这对

增加小秋作物复种指数,引种夏玉米,提高粮食总产具有潜在的重要生产价值。

5) 冬小麦各生育阶段对气候变暖响应的变化是具有较大差异的,主要营养生长阶段的返青~起身~拔节日期均提前,返青~起身期间日数减少,而起身~拔节期间日数增加;生殖生长阶段的孕穗~抽穗~开花期均提前 5~10 d,期间日数无明显变化,而开花~乳熟阶段,主要是开花期明显提前 5~6 d,乳熟日期无明显变化,期间日数是增长变化趋势,乳熟~成熟阶段主要是成熟期明显提前,期间日数为缩短趋势,表明气候变暖后尤其是高温日数的增加对开花~乳熟与乳熟~成熟的生殖生长阶段有迟滞及逼熟负作用发生。

6) 冬小麦产量随平均最低气温的升高而增加,与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温正相关关系较为密切,通过显著性统计检验,表明黄土高原地区冬小麦在气候变暖状态下,产量随着 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 活动积温的增加而增加,但随着 3 月~收获期的平均最高温度和 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 的增加有减产发生,因此对于未来 3 月~成熟期平均最高温度变化情况要加以高度重视。

参 考 文 献:

[1] 林而达,杨修. 1997 气候变化对农业的影响评价及适应对策[M]. 北京:气象出版社,2002. 72-77.

[2] 丁一汇,孙颖. 中国近 50 年和未来 50 年气候变化[A]. 陈邦柱,秦大河. 气候变化与生态环境研讨会文集[C]. 北京:气象出版社,2002. 53-57.

[3] 王绍武,董光荣. 中国西部环境特征及其演变[A]. 秦大河. 中国西部环境演变评估(第一卷)[C]. 北京:科学出版社,2002.

[4] 郑淑霞,上官周平. 黄土高原植物对气候变化的生态响应[A]. 陈邦柱,秦大河. 气候变化与生态环境研讨会文集[C]. 北京:气象出版社,2002. 394-398.

[5] 王润元,张强. 西北干旱区玉米对气候变暖的响应[A]. 魏万进. 甘肃省 2004 年学术年会文集[C]. 兰州:兰州大学出版社,2004. 349-354.

[6] 韩永翔,董安祥,王卫东. 气候变暖对中国西北主要农作物的影响[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(4):39-42.

[7] 王位泰. 干旱与冬小麦和玉米产量关系的分析[J]. 中国农业气象,2002,23(3):27-30.

(英文摘要下转第 171 页)

Assessment on the influence of drought climate on main crop
yield in Southeast of Gansu

PU Jin-yong^{1,2}, ZHANG Cun-jie¹, YAO Xiao-ying³, DENG Zhen-yong¹, Liu Wei-min³, MIAO Ju-quan⁴
(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory
of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China;
2. The Agrometeorological Experiment Station of Tianshui, Tianshui Gansu 741020, China; 3. The Tianshui Meteorological
Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China; 4. The TanChang Meteorological Bureau, Tanchang Gansu 745800, China)

Abstract: Based on the monthly precipitation, yearly precipitation of 7 weather stations in Tianshui 1961~2005 (represent station 1936~2005), frequency of drought disaster and the yield reduction caused by drought disaster, the frequency of drought disaster in temporal distribution and degree of loss had been analyzed. The results showed that the frequency of drought had been increased from 1961 to 2005; the highest frequency of drought disaster was in hot summer while the lowest was in spring in a year. The effective coefficient of drought disaster to main crop has been given and the assessment of degree of risk to planting crop also has been made.

Keywords: drought climate; crop; yield assessment; Southeast of Gansu

(上接第 157 页)

The response of winter wheat growth to the climate
warming of Loess Plateau of East Gansu

WANG Wei-tai^{1,2,3}, HUANG Bin², ZHANG Tian-feng², WANG Run-yuan¹,
XUE Jing-xuan², WANG Ling-mei⁴, WANG Qin²
(1. Institute of Arid-meteorology, CMA, Lanzhou 730020, Gansu; 2. the meteorology
Bureau of qingyangcity in Gansu Gansu Xifeng 745000; 3. Open laboratory of climate
research, CMA, Beijing 100081, China; 4. Qingyang city xifeng primary middle school Gansu Xifeng 745000)

Abstract: Using the ground parallel observation data, the response of winter wheat to the climate warming on Loess Plateau of east Gansu was compared and analyzed. The result showed that the response of winter wheat to the climate warming was mainly that whole growth period and the winter period have been shortened; reviv-ing period and maturity period has been advanced since 1981. The response to temperature increase is distinct in different growth phases, temperature increase makes reviving-rising-jointing of alimentation growth phase and blooming and maturity of procreation growth phase earlier, the days of milk maturity and blooming to maturity phase change not distinctly, but temperature increase leads to prolonging of blooming to milk maturity, shorten-ing of days of milk maturity to maturity. The yield increases with increase of the lowest temperature, $\geq 0^{\circ}\text{C}$, $\geq 5^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ and $\geq 15^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature, and reduce with increase of $\geq 20^{\circ}\text{C}$ accumulated tempera-ture, which indicates that the high temperature weather compels to mature and reduces output of winter wheat yield.

Keywords: Loess Plateau; winter wheat; growth; climate warming; response