

渭北旱原区域气候变化及其对 冬小麦产量的潜在影响

王宝良^{1,2}, 潘贤章¹, 梁音¹, 刘通¹, 杨轩¹, 穆欢^{1,2}, 苏春丽¹, 关庆伟²

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 南京林业大学研究生院, 江苏 南京 210037)

摘要: 对渭北旱原长武地区冬小麦产量与农业气候因子变化进行了通径分析, 结果表明, 降水和地温是影响该地区冬小麦生产的主要气候因子, 播种~出苗期降水对小麦产量的影响较大, 在分蘖~越冬、返青~拔节、灌浆~乳熟期地温对产量影响更大。该地区近50年来年均气温呈明显上升趋势, 而年降水总量总体有减少趋势, 波动较大; 且在播种~出苗期降水量有减少的趋势, 极值出现几率增加, 而在返青~拔节期地温有增加的趋势, 且2000年后增加幅度增大。因此, 在区域气候变化影响下, 随着气候变暖和降水量减少及波动性增加, 将会导致未来冬小麦产量的波动性增加。

关键词: 渭北旱原; 小麦; 产量; 气候因子; 通径分析

中图分类号: S165⁺.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)01-0227-06

全球气候变暖对我国西北地区冬小麦生产产生了很大的影响。研究发现我国西北地区“董志塬”近35 a来年均增温线性趋势达0.0505℃^[1], 增温的结果使得我国西北地区农作物种植结构发生了较大改变, 冬小麦种植区西伸北扩^[2,3], 冬小麦越冬期缩短, 播种期推迟, 成熟期提前^[1,4]。虽然模拟研究认为气候变化会使宁夏冬小麦生长期缩短, 产量降低^[5], 但是近期的模拟研究显示, 增温情况下热量充足, 只要水分条件适宜, 未来我国北方干旱、半干旱地区小麦产量整体都有增产趋势, 如果考虑CO₂因素增产效果更加明显^[6]。然而, 纵观这些研究可以发现, 关于气候因子变化对冬小麦生长影响机理的研究还缺乏细致的分析, 究竟哪些气候因子, 在什么阶段如何影响小麦产量仍需要进一步分析。

本文以渭北旱原典型区域——陕西省长武县为研究区, 利用该县冬小麦多年的测产数据和气候观测数据, 从冬小麦生长不同季节中温度和降水量对产量影响的机理入手, 分析了不同气候因子变化对渭北旱原地区冬小麦产量影响的基本特征和规律, 并预测了区域气候变化对未来冬小麦产量的潜在影响。

1 研究区概况、资料来源及研究方法

1.1 研究区概况

渭北旱原位处黄土高原南部, 属典型的旱作农

业区。冬小麦是渭北旱原主要粮食作物之一, 占粮食播种面积的60%以上。陕西省长武县作为渭北旱原的典型区域, 地处黄土高原沟壑区, 南、西、北三面与甘肃省接壤。该县人口接近18万, 南北长30.06 km, 东西长27.23 km, 总面积567.1 km²。境内有泾河、黑河、南河三条河流, 将全县切割为巨路塬、枣园塬和长武塬三部分。由于长期的水土流失, 形成了883条干支毛沟, 构成了沟壑纵横, 塬高沟深坡陡的地貌特征。塬面最高, 海拔1 274 m, 川道最低, 海拔847 m, 塬、滩最大高差427 m, 塬沟相对高差200~300 m。沟坡面积大, 约占69.3%, 塬、滩面积分别占22.1%和8.6%。因此, 地形条件对农业生产十分不利。

该县全年有霜天数92~103 d, 年日照时数约1 999.3 h, 年平均风速约2.3 m/s, 年平均地面温度10.8℃, 年平均气温9.2℃, 年平均相对湿度68.3%。光能资源较丰富, 但利用率低。冬季寒冷、夏无酷暑、春季升温慢、秋季降温快、无霜期短的气候特点, 决定了长武县农业生产只能是一年一熟制。该区农业属典型的雨养农业。多年平均降水量580.6 mm, 降雨特点是冬春少, 夏秋多, 且雨热同期。该县种植业生产属渭北旱作农业区, 既有土质良好、雨热同季、劳力充足、生物资源丰富和农田治理面积大之利, 又有冬季寒冷、降雨分布不均、土壤养分较缺、水资源贫乏和社会经济基础差之弊。长武县属暖温带

收稿日期: 2009-04-01

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“耕地保育与持续高效现代农业试点工程”土壤主题(KSCX1-YW-09-02)

作者简介: 王宝良(1983—), 男, 河北衡水人, 硕士, 主要从事土壤信息研究。E-mail: wbl_1983@163.com。

通讯作者: 潘贤章(1965—), 男, 安徽肥东人, 副研究员, 主要从事遥感和GIS技术应用研究。E-mail: panxz@issas.ac.cn。

半湿润大陆季风气候区,光照充足,冬季寒冷,降雨分布不均的气候特点决定了长武县小麦属北方晚熟冬麦生态类型,每年9月中下旬播种,次年6月下旬收获,全生育期 280 d 左右。由于小麦生长发育过程中占据了全部的低温、干旱时期,气候的变化影响着冬小麦生产。

1.2 资料来源

数据主要来源于长武县气象观测站 1957~2007 年连续的原始气象记录月报表,包括气温、地温、降水、风速、有霜天数、日照时数、相对湿度和大气压强等 8 项气候因子。冬小麦产量等资料来源于长武县农业技术推广中心。数据处理时,对资料进行严格的质量控制,剔除错误资料,保证了资料的科学性、客观性。

1.3 分析方法

冬小麦产量与农业气候因子变化之间的关系主要采用途径分析(Path Analysis)方法,该方法是研究变量间相互关系、自变量对因变量作用方式和程度的多元统计分析技术。通过途径分析,可找出自变量对因变量影响的直接效应和间接效应;找出由于自变量间相关性很强而引起多重共线性的自变量;通过逐步途径分析,剔除不必要的自变量,建立“最优”的回归方程^[7]。

2 结果与分析

2.1 小麦产量变化的气候因子分析

2.1.1 小麦产量变化趋势与分析 从图 1 可以看出,近 50 年来长武县小麦产量显著增加。据统计,该县小麦产量 20 世纪 70 年代以前为 945 kg/hm²,进入 70~80 年代达到 1 402 kg/hm²,增加幅度比较大,而 1980~1999 之间产量较前期又上升到 2 300 kg/hm²左右,2000 年之后产量平均达到 3 078 kg/hm²。小麦单产的增加与小麦品种改良密切相关,碧蚂一号、陕农 1、陕农 2 号、长选一号、702、404 等历史上引入的品种,都在不同时期不同程度地提高了产量。目前该县广泛栽种的是长武 134 以及长旱 58 等优质品种。单产的提高同时又与施肥量不断增加有关。据资料调查显示,长武县化肥的施用从 1958 年开始,1958~1974 年农田平均施用化肥量为 1.9 kg/667m²,1975~1980 年均均为 8.0 kg/667m²,1981~1983 年均达到 16.7 kg/667m²,1990 年代初期为 50.0 kg/667m²左右,而 2001 年则达到 70.0 kg/667m²(图 2)。除此以外,研究还显示该区域小麦产量提高与气候因子有关。

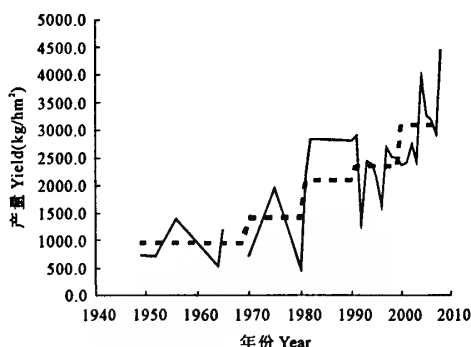


图 1 长武县冬小麦产量年际变化

Fig.1 The annual yield of wheat in Changwu County

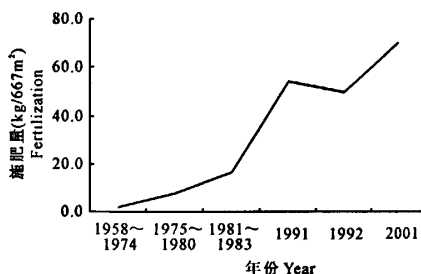


图 2 长武县化肥施用量变化

Fig.2 The fertilization changes in different period

2.1.2 各气候因子对小麦产量的响应特征 利用长武县 1990~2007 年连续 18 年的冬小麦产量与同时期同步气象资料进行途径分析,得出农业气候变化中各气候因子对冬小麦产量的贡献率大小(表 1)。由表 1 途径系数可知,地温和降水对小麦产量贡献最大,均通过了 0.05 和 0.01 的显著性检验。虽然气温对小麦产量直接途径系数较小,但通过气压、湿度、地温、风速、日照时数、降水、有霜天数等其它因素对产量的间接途径系数总和为 0.845,其中地温又起着主要的间接作用,由此可知气温对产量的贡献主要通过地温起作用,其它因素对产量的贡献均较小。

对小麦不同生育期内的降水和地温与小麦产量的相关性进行了途径分析,结果见表 2。由表 2 可以看出:

(1) 小麦产量与整个生长期内的降水总量相关性较显著,相关系数为 0.439,说明降水量增加有助于小麦产量的提高。进一步分析发现,小麦产量与播种~出苗阶段的降水相关性极显著,达到了 0.01 信度水平,相关系数达到了 0.676,而与其他生育阶段相关性不明显。9 月中旬至 7 月上旬的小麦生长期是黄土高原旱塬区的旱季,降水稀少,而小麦生

长耗水量却持续增加,导致小麦生长盛期 4~7 月土壤干燥化是旱源地小麦生产中的一种必然结果。在夏闲期雨季降水量正常或偏多年份,土壤水分通常能够得到补充恢复,季节性土壤干燥化能够基本缓解或完全消除。但在夏闲期雨季降水量较低或年降水量较低的年份,土壤水分恢复程度较差,季节性土壤干燥化通常难以完全消除,土壤水分恢复程度与

夏闲期降水量密切相关。7、8 月份总降水量与产量呈极显著正相关,达到了 0.01 信度水平,相关系数达到了 0.623,夏闲期及播种~出苗期降水越多,土壤蓄水越多,即田块底墒越好,土壤能承担小麦分蘖期至拔节期对水分的需求。因此,播种前期到出苗期的 7~9 月期间降水量对小麦产量影响很大。

表 1 气候因子与小麦产量的通径分析

Table 1 Path analysis between meteorological factors and yield of wheat

项目 Items	气压 Pressure	气温 Temperature	湿度 Humidity	地温 Ground temperature	风速 Wind speed	日照时数 Sunshine hours	降水 Precipitation	有霜天数 Frost days
相关系数 Correlation coefficient	-0.176	0.451	0.19	0.650**	-0.376	0.229	0.725**	0.099
直接作用 Direct effect	0.228	-0.39	0.19	0.99	0.06	0.018	0.637	0.112
间接作用 Indirect effect	综合 Total	-0.404	0.845	0.005	-0.34	-0.39	0.212	0.087
	气压 Pressure	—	-0.08	-0.08	-0.05	-0.077	-0.069	-0.06
	气温 Temperature	0.135	—	0.122	-0.34	-0.028	-0.246	-0.072
	湿度 Humidity	-0.065	-0.06	—	-0.05	-0.01	-0.045	0.051
	地温 Ground temperature	-0.235	0.842	-0.27	—	-0.25	0.49	0.168
	风速 Wind speed	-0.022	0.005	-0.01	-0.02	—	0.027	-0.005
	日照时数 Sunshine hours	-0.005	0.011	-0.01	0.009	0.007	—	0.002
	降水 Precipitation	-0.167	0.116	0.176	0.108	-0.05	0.077	—
	有霜天数 Frost days	-0.045	0.006	0.065	0	0.024	-0.02	0.003

注: ** 代表在 0.01 水平下为极显著相关; * 代表在 0.05 水平下为显著相关(下同)。
Note: ** stands for significant correlation in 0.01 level; and * stand for significant correlation in 0.05 level. (They are the same in the following.)

表 2 冬小麦不同生育期地温和降水与产量的通径分析

Table 2 Path analysis between yield and precipitation and surface temperature in different growing season of wheat

生育时期 Growth stages	气象因子 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficients	直接通径 Direct effect	间接通径 Indirect path	
				降水 Precipitation	地温 Ground temperature
夏闲期 Summer fallow period	地温 Ground temperature	-0.596**	-0.309	-0.287	—
	降水 Precipitation	0.623**	0.404	—	0.220
播种~出苗 Sowing~emergence period	地温 Ground temperature	-0.288	0.050	-0.338	—
	降水 Precipitation	0.676**	0.699	—	-0.024
分蘖~越冬 Sub-sin~wintering period	地温 Ground temperature	0.540*	0.661	-0.122	—
	降水 Precipitation	0.281	0.457	—	-0.176
返青~拔节 Turning green~jointing period	地温 Ground temperature	0.713**	0.853	-0.139	—
	降水 Precipitation	-0.129	0.286	—	-0.415
抽穗~扬花 Heading period~blooming period	地温 Ground temperature	0.192	0.769	-0.577	—
	降水 Precipitation	0.191	0.769	—	-0.578
灌浆~乳熟 Filling~milk period	地温 Ground temperature	0.519*	0.492	-0.027	—
	降水 Precipitation	-0.294	0.728	—	-0.238

(2) 小麦产量与返青~拔节时期平均地温相关性极显著,达到了 0.01 信度水平,与分蘖~越冬及灌浆~乳熟时期平均地温相关性显著,达到了 0.05

信度水平,与 7、8 月份地温呈极显著负相关,达到 0.01 信度水平,与其它阶段平均地面温度相关性不明显。原因是,12~2 月份地面温度提高,可使小麦

返青期提早,有利于冬小麦早发快长。同时,3、4月份地面温度提高,可使抽穗期提前,有利于延长冬小麦灌浆时间,提高千粒重。而6月份地面温度提高,可使成熟期提前,有利于避开干热风、雷雨大风等农业气象灾害的影响。相反,7、8月份地面温度提高将会增大蒸发量,土壤水分亏缺加重。

由此可以得出结论,夏闲时期的降水和地温对小麦产量影响都很大,播种~出苗期降水量对小麦产量的影响较大,分蘖~越冬、返青~拔节、灌浆~乳熟期地温对产量的影响较大。其他生育时期降水与地温对产量影响不大。但是,如小麦分蘖期长期无雨,那么随温度的升高,蒸发加大,土壤水分大量消耗,必会进一步加大旱情,直接影响小麦产量。

2.2 区域气候变化及其对冬小麦产量的潜在影响

2.2.1 近 50 a 来长武地区降水年际变化

长武县降水年际变化曲线图(图 3)可以看出,近 50 a 来长武地区降水呈微弱减少趋势,年降水倾向率为 $-5.925 \text{ mm}/10\text{a}$,年总降水量年际波动较大。20 世纪 60~70 年代降水稳定,80 年代突增,而 90 年代显著减少,2000 年后降水又有回升迹象。从图 3 可以看出,近年来随着全球气候的变化,该地区 90 年代以来极端降水出现的频率增加,如 1996 年年总降水量仅为 296.0 mm ,而 2004 年年总降水量达到 956.0 mm ,分别是长武县有气象记录以来,出现的年降水量最小值和最大值。长武地区属典型的雨养农业区,降水量的变化势必会对冬小麦产量产生潜在影响。

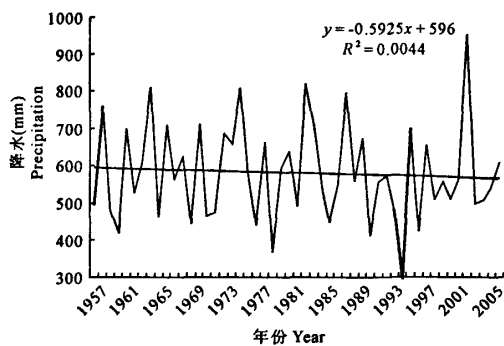


图 3 1957~2007 年年降水量变化

Fig.3 The annual precipitation changes between 1957 and 2007

2.2.2 近 50 年来长武地区气温的年际变化

由图 4 可知,长武地区年平均气温呈明显的上升趋势,年均温度倾向率为 $0.136^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。其中 20 世纪 90 年代以来升温较快,由 80 年代的年均 8.9°C 升高到 90 年代的年均 9.5°C ,2000 年以来气温还在升高中,

2001~2007 年平均为 9.8°C 。近 20 多年来,该地区气温上升幅度要比同时期全国平均气温增幅水平高,略小于西北地区增温幅度。随着全球气候变暖,该地区极端气温出现概率也随之增加,如 1997 年 7 月 21 日,当天最高气温达到了 37.6°C ,而 2002 年 12 月 26 日最低气温达到 -26.2°C ,这也是长武地区有气候记录以来的温度最大值和最小值。

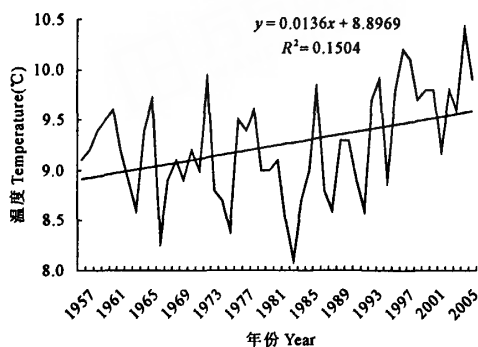


图 4 1957~2007 年年均气温年际变化

Fig.4 The annual temperature changes between 1957 and 2007

通过图 3、图 4 趋势曲线可以看出,长武地区气温呈增加趋势,与全球气候变暖趋势一致,而降水呈微弱减少趋势,该地区 50 a 来气候类型转变方向为暖干型,同时气候变化加剧气候变率并增加极端气候的发生频率。

2.2.3 区域气候变化对冬小麦单产的潜在影响

由小麦不同生长期的降水和地温的年际变化曲线可以看出(图 5、图 6),播种~出苗期的降水呈减少的趋势,极值出现几率增加;在返青~拔节期,地温有增加趋势,且 2000 年后增加幅度增大。

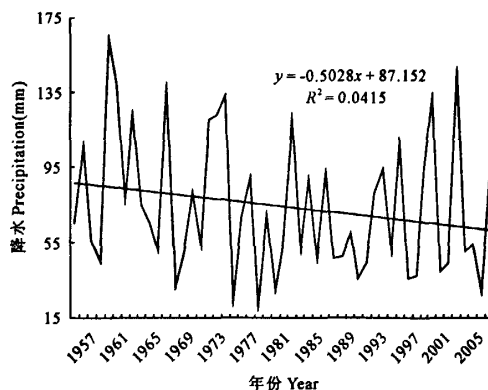


图 5 小麦播种~出苗期降水年际变化曲线

Fig.5 The curve of annual precipitation during sowing date to seedling emergence stage

如前文结论所示,播种~出苗阶段的降水和返

青~拔节期的地温对小麦产量影响极显著,而分蘖~越冬及灌浆~乳熟期平均地温对小麦产量也有显著影响。很显然,冬小麦生长中后期地温的增加有利于提高产量,然而前期降雨的减少却限制了产量的提高,而且降雨波动性的增加也会增加产量的波动性。据研究,在气候波动中以降水波动对冬小麦产量波动的影响最为明显,其次是温度和日照^[8,9]。

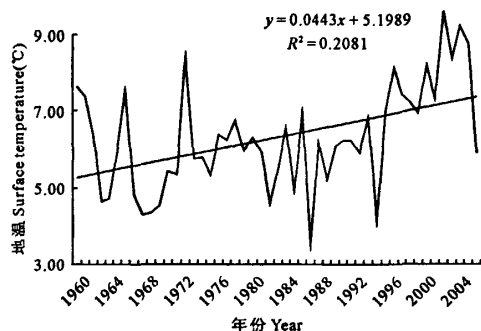


图6 小麦返青~拔节期地温年际变化曲线

Fig.6 The curve of annual surface temperature during turning green stage to jointing stage

因此,随着未来区域气温升高、降水减少及波动增大,使干旱大面积频繁发生,土壤水分蒸发加剧,水分亏缺增加,这样该地区气候变暖的负面影响大于正面影响,预计未来长武地区冬小麦产量会受此影响,产量波动增加。

3 结论

1) 长武地区近50 a来小麦单产呈跳跃式的提高,进入21世纪后仍然有增加的趋势。主要与小麦品种和化肥施用量增加有关。同时,研究显示冬小麦产量与地温及降水存在显著的相关性。进一步分析发现,播种~出苗期降水对小麦产量的影响较大,

分蘖~越冬、返青~拔节、灌浆~乳熟期地温的影响较大,夏闲时期的降水与小麦产量之间存在极显著正相关,而这时期的地温与小麦产量之间存在极显著的负相关。

2) 长武地区农业气候变化对全球气候变暖的响应特征十分明显。近50多年来该地区气温呈显著升高趋势,降水则呈微弱减少趋势。为保证小麦生产发展,建议该地区加快小麦品种的更替,以后尽量多使用耐高温、抗旱性强的品种。进一步研究发现,该区域播种~出苗期的降水有减少的趋势,极值出现几率增加,而在返青~拔节期地温有增加的趋势,且2000年后增加幅度增强。由于降水总体减少,且波动增大,干旱发生的几率增加,虽然气温增高有利于提高产量,但是总体来说,该地区冬小麦产量增产幅度减小,不确定性增加。

参考文献:

- [1] 万信,王润元.气候变化对陇东冬小麦生态影响特征研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):80—83.
- [2] 曾英,黄祖英,张红娟.气候变化对陕西省冬小麦种植区的影响[J].水土保持通报,2007,27(5):137—140.
- [3] 邓振镛,张强,蒲金涌,等.气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响[J].生态学报,2008,28(8):3760—3768.
- [4] 李军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J].自然资源,2001,16(2).
- [5] 雷水玲.全球气候变化对宁夏春小麦生长和产量的影响[J].中国农业气象,2001,22(2):33—36.
- [6] 杜瑞英,杨武德,许吟隆,等.气候变化对我国干旱/半干旱区小麦生产影响的模拟研究[J].生态科学,2006,25(1):34—37.
- [7] 张全德.通径系数及其在农业研究中的应用[J].浙江农业大学学报,1981,7(3):17—26.
- [8] 张谋草,赵满来,李锦祥,等.陇东塬区气象要素变化对冬小麦产量的影响[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):52—55.
- [9] 习耀国,武卷丽,李兆元,等.陕西省气候波动对冬小麦产量的影响[J].中国农业气象,1991,12(4):11—15.

The potential response of wheat yield to regional climate change and meteorological factors in the arid plain north of the Weihe River

WANG Bao-liang^{1,2}, PAN Xian-zhang¹, LIANG Yin¹, LIU Tong¹, YANG Xuan¹,
MU Huan^{1,2}, SU Chun-li¹, GUAN Qing-wei²

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

2. Graduate School of Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: The path analysis was made between meteorological factors and yield of wheat in Changwu County in the arid plain north of the Weihe River. The results showed that: the major meteorological factors which effected yield of wheat were precipitation and surface temperature. Precipitation had great effect during sowing to seedling emergence stage, while surface temperature had even more remarkable effect during the stages of tillering to overwintering, turning green to jointing, and filling to milk. During past 50 years in this area, air temperature had a rising trend significantly, basically identical with global climate change. With great fluctuation, the annual precipitation had a decreasing tendency in general, especially during sowing to emergence period. The ground temperature had an increasing trend during turning green to jointing period, with a greater range after the year of 2000. So it was good to improve the yield of wheat by climate warming, but with a fluctuation of precipitation, it was hard to make sure the yield under the regional climate change.

Keywords: the arid plain north of the Weihe River; wheat; yield; meteorological factors; path analysis

(上接第 226 页)

A study on eco-climate suitability of broomcorn millet (*Panicum Miliaceum* L.) in Gansu

PU Jin-yong¹, YAO Xiao-ying², XIN Chang-ye¹, YUAN Ya-ping¹

(1. Tianshui Agrometeorological Experiment Station, Tianshui, Gansu 741020, China;

2. Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China)

Abstract: Broomcorn millet is main minor crops in Gansu. To investigate the eco-climate suitability of millet, we analyzed the influence of climate factors on the yield of broomcorn millet with the method of integral regression in Xiefeng, Maiji, Anding and Liangzhou districts from 1985 ~ 2008. The result shows that water and heat have different function on the yield of broomcorn millet in different regions at different periods in which the highest value of ten-day average temperature on the yield of broomcorn millet in Anding, Liangzhou, Xifeng and Maiji are $10.5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $9.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $8.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ and $5.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ respectively in heading to flowering periods and the highest value of ten-day precipitation on yield of broomcorn millet are $8.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, $3.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, $5.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ and $5.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ respectively in jointing growth period. It also shows that the sunshine can satisfy the growing of broomcorn millet in Gansu. The most eco-climate suitability area is in the plateau of Eastern Gansu, the basin of the Weihe River and the irrigation area below 1 600 m above the sea level and Dunhuang Basin in Hexi corridor and the most potential eco-climate suitability area is Middle Gansu and Northeast Gansu.

Keywords: millet; eco-climate; suitability; yield