石羊河流域气候变化及对作物生育期的影响

盛 露^{1,2},刘明春^{2,3},胡正华^{1,2},潘 莹¹,

崔海羚1,陈书涛1,李 琪1

(1.南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044;

2.中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃 兰州 730020;

3.甘肃省武威市气象局,甘肃 武威 733000)

摘 要:利用石羊河流域 5 个农业气象观测站 1951—2009 年气象资料和武威市作物(春小麦、玉米)生育期观 测资料,采用线性对比分析、Mann-Kendall 趋势检验和突变检验分析、Arcgis 空间统计分析、Morlet 小波分析、SPSS 统计分析等方法,分析了该地区的气候变化特征,以及气候变化对作物(春小麦、玉米)生育期的影响。结果表明: 近 60 年来石羊河流域不同地区的气温呈不同程度的上升趋势,月、季、年平均降水增量不同程度地增(减),并且气 候变化显著周期分别为:平均气温 3~5 a,降雨量 1~3 a。从气象因素对作物生育期的影响可以看出,降水是影响 春小麦乳熟期长短的主要气象因素,而气温和降水与玉米关键生育期的相关性不显著。

关键词: 气候变化;作物;生育期;石羊河流域

中图分类号: Q143 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)05-0019-09

Characteristics of climate change and its influence on growth period of crops in Shiyang River basin

SHENG Lu^{1,2}, LIU Ming-chun^{2,3}, HU Zheng-hua^{1,2}, PAN Ying¹,

CUI Hai-ling¹, CHEN Shu-tao¹, LI Qi¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology,

Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2. Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA,

Institute of Arid Meteorology of CMA, Lanzhou, Gansu 730020, China; 3. Wuwei Meteorology Bureau, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract: To gain insight into the characteristics of climatic change and its influence on the growth period of crops (spring wheat and corn) in the Shiyang River basin, the meteorological data of five agricultural meteorological stations during 1951—2009 and the growth period observation data of crops in Wuwei City were analyzed using linear contrast analysis, Mann-Kendall trend test and mutation test analysis, Arcgis spatial statistical analysis, Morlet wavelet analysis, and SPSS statistical analysis. The results showed that there was an increasing tendency of temperature in different areas of Shiyang River basin in last 60 years, while the monthly, quarterly and annual mean precipitation increased (or decreased) to different extents. The significant change periods of mean temperature and precipitation were $3 \sim 5$ a, and $1 \sim 3$ a, respectively. Precipitation was the main meteorological factor that impacted the length of milky stage of spring wheat, however, there was no significant correlation between temperature (precipitation) and key growth periods of corn.

Keywords: climate change; crop; growth period; Shiyang River basin

石羊河流域地处青藏高原东北边缘,位于 101° 41′~104°16′E,36°29′~39°27′N,是西北内陆河区灌 溉农业发达、水资源开发利用程度最高、生态环境问题最严重、水资源对经济社会发展制约性最强的区

收稿日期:2013-05-18

域^[1],紧邻腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠,气候系统复 杂,是典型的气候敏感区和生态环境脆弱带。气候 变化不仅直接影响流域本身生态环境、资源开发利 用和经济建设,而且对全国乃至全球气候生态系统起 着极其重要的作用。比如民勤绿洲自然生态系统,因 干旱和沙漠化的影响,处于濒临崩溃的边缘^[2]。

农业是对气候变化反应最为敏感的部门之一, 气候变暖对农业生产影响很大。全球气候变暖已是 不争的事实, IPCC 第 4 次评估报告指出:近 100 a (1906-2000年)全球平均地表温度上升了 0.74℃, 1850年以来最暖的 12个年份中有 11个出现在近期 的 1995-2006 年, 过去 50 a 升温率几乎是过去 100 a的两倍^[3-4]。但目前的研究以大空间尺度为研究 对象,多集中在作物种植区域界限的变化和物候对 气候变暖的响应等方面,取得了很多研究成果^[5-7], 但对特定区域主要作物的发育期受气侯变化影响的 研究还很少。此外,甘肃省经济发展相对滞后,以经 济条件为支撑的生态环境治理受到限制。因此,分 析石羊河流域气候变化特征及其对作物生育期的影 响具有重要的意义。本文拟利用线性对比分析、Arcgis空间统计分析等方法分析该地区的气候变化特 征,以及气候变化对作物(春小麦、玉米)生育期的影 响,为该流域的气候变化及其对作物生育期的影响 提供科学依据,并为系统深入研究该流域气候变化 和对作物生育期的影响提供基础资料,同时为干旱 区产业结构调整、水资源的合理开发利用与环境保 护等提供决策依据。

1 资料来源与研究方法

1.1 资料来源

石羊河流域 5 个农业气象站点(武威、民勤、古 浪、乌鞘岭、永昌)逐旬气象数据来自于国家气象信 息中心,武威绿洲作物生育期资料由武威市气象局 提供。农业气象试验站点分布如图 1 所示,气象站 点的概况如表 1 所示。乌鞘岭、古浪位于石羊河上 游区域;武威、永昌位于石羊河中游区域;民勤位于 于石羊河下游区域。从石羊河流域 5 个农业气象观 测站得到 1951—2009 年气象资料,从武威市气象局 得到绿洲作物春小麦 1981—2006 年、玉米 1981— 2006 从播种到成熟各个生育期时间资料。对所选 取站点的气象资料进行严格的筛选,对于个别月份 缺测的资料用世界气象组织规定的 1971—2000 年 的 30 年平均值代替,以保证研究数据的完整性。



图 1 石羊河流域站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Shiyang River basin

表 1 气象站点概况

Table 1	Overview	of	meteorological	stations
---------	----------	----	----------------	----------

气象站 Meteorological station	海拔/m Elevation	经度 E/° Longtude	纬度 N/° Latitude	起止年份 Beginning and ending year	资料长度/a Number of years
武威 Wuwei	1525.0	102.92	38.08	1951—2009	58
民勤 Minqin	1367.0	103.08	38.63	1953—2009	56
古浪 Gulang	2072.4	102.90	37.48	1959—2009	50
乌鞘岭 Wushaoling	3045.1	102.87	37.20	1951—2009	58
永昌 Yongchang	1986.7	101.97	38.23	1959—2009	50

1.2 数据分析方法

1.2.1 线性对比分析 为了使线性对比分析的效 果更加明显,截取时间间隔跨度比较大的 2 个时段, 选取 1960—1979 年和 1990—2009 年作为研究的时 间段,然后分别统计年平均气温,年降水量的气象资 料以及分别统计年、月、春(3—5 月)、夏(6—8 月)、 秋(9—11 月)、冬(11—次年 2 月)四季平均气温,前 后进行线性对比分析^[8-9]。根据气温和降水量变化 趋势图,求出 2 个时段的温度差值 ΔT 、降水差值 ΔR_{\circ}

1.2.2 Mann-Kendal 趋势检验分析 Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法主要用于水文气象 资料趋势检验^[10-12],是检验水文时间序列单调趋势的有效工具^[13],如水质、流量、气温和降雨等。其 优点是样本不需要遵从一定的分布,也不受少数异 常值的干扰,检测范围宽,定量化程度高。

2) 计算统计量 S。计算式为:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_k)$$
(1)

3) S 为正态分布,其均值为 0,方差 var(s) = [n(n-1)(2n+5)]/18,标准的正态统计量计算式为

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\operatorname{var}(s)}}, s > 0\\ 0, \quad s = 0\\ \frac{s+1}{\sqrt{\operatorname{var}(s)}}, s < 0 \end{cases}$$
(2)

4) 若经检验,统计量 Z 不满足 – $Z_{1-a/2} \leq Z \leq Z_{1-a/2}$,则拒绝原假设,表明序列有明显的趋势。

5) 计算倾斜度 β(量化单调趋势):

$$\beta = \text{median}\left[\frac{x_i - x_j}{i - j}\right], \forall j < i$$
(3)

式中:1 < j < i < n; median 为取中值函数。

当 $\beta > 0$ 时,序列呈上升趋势;当 $\beta < 0$ 时,序列 呈下降趋势。

1.2.3 Mann-Kendall 突变检验分析^[14]

1) 设有一时间序列为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,构造一 秩序列 m_i ,表示 $x_i > x_j$ ($1 \le j \le i$)的样本累计数。 定义 d_k 为

$$d_k = \sum_{1}^{k} m_i \quad (2 \leq k \leq n) \tag{4}$$

2) d_k 的均值以及方差近似为

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}$$
 (5)

$$\operatorname{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \le k \le n)$$
(6)

3) 在时间序列随机独立的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\operatorname{var}(d_k)}} \qquad (k = 1, 2, \cdots, n) \quad (7)$$

给定显著性水平 α ,若 $| UF_k | > UF_{\alpha/2}$,则表明 序列存在明显的变化趋势。将时间序列 x_k 逆序排 列,再按照式(7) 计算,同时使

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \quad (8)$$

通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k ,可以进一步分 析序列 x_k 的变化趋势,而且可以明确突变的时间, 指出突变的区域。若 $UF_k > 0$,则表明序列呈上升趋 势; $UF_k < 0$ 则表明序列呈下降趋势;当它们超过 临界直线时,表明上升或下降趋势显著;若 UF_k 和 *UB*_k 这 2 条曲线出现交点,且交点在临界直线之间, 那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

1.2.4 Arcgis 空间统计分析 在空间上,结合 Arcgis 技术的空间分析优势,以 Arcgis 为平台对石羊 河流域内 5 个观测站点 1951—2009 年所观测的年均 气温、年降水量、年日照时数、年蒸发量数据进行分析,利用反距离加权插值的空间插值方法来实现。

1.2.5 Morlet 小波分析法 小波变化把原始的信号 f(t)转化到时间 – 频率平面上,可以把原始信号中看不见的信息在时域频率上显示出来。通过小波分析,得到时间序列在任意时刻的频率特征及在时间 – 频率域上的变化特征。

采用 Morlet 小波作为基函数进行小波变换,其 子小波形式为^[15]:

$$\varphi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \varphi[(t-b)/a]$$
$$(b \in R; a \in R; a \neq 0)$$
(9)

式中, a 为伸缩尺度参数, b 为平移尺度参数。

对于时间序列 $f(t) \in L^2(R)$,其连续小波变换 定义为:

$$W_{f}(a,b) = a^{-1/2} \int_{R} f(t) \varphi^{*}(t) [(t-b)/a] dt$$
(10)

式中, $\varphi^*(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的复共轭复数, $W_f(a,b)$ 称小 波(变换)系数,a为尺度参数,b为时间中心参数。

Morlet小波函数是一个周期函数并经一个 Gaussian函数平滑而得到的,所以,它的伸缩尺度 *a* 与傅里叶分析中的周期*T*有一一对应关系。

$$T = \{4\pi/[c + (2 + c2)1/2]\}a = 1.114a$$

$$(c = 5.4)$$
 (11)

将时间域上的关于 a 的所有小波系数的平方积分,即为小波方差。

$$\operatorname{var}(a) = \int_{R} W_{f} \mid (a, b) \mid^{2} \mathrm{d}b \qquad (12)$$

1.2.6 相关性统计分析 使用 SPSS17.0 软件来测 定变量之间的相关系数,即线性相关程度和相关方 向的统计指标,同时要对相关系数的显著性进行检 验。首先对武威站点的春小麦、玉米的生育期进行 标准归一化处理。以全生育期天数作为"1",各个生 育期天数与全生育期天数相比,得到生育期归一化 数值(介于0和1之间),然后利用 SPSS 进行相关性 分析。

2 结果与分析

2.1 气温变化特征

从石羊河流域各站点 1960—1979 年、1990—

2009 年平均温度变化图(表 2)可以看出,1990—2009 年较 1960—1979 年,月、季、年平均气温有不同程度 的上升,从月际变化看,2月增温最快 ΔT 达 2.1℃, 1月次之 ΔT 达 1.8℃,8月增温最慢 ΔT 只有 0.4℃;在四季变化中, ΔT 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏 季;年际变化是 ΔT 增加 1.1℃。

从石羊河流域气温突变 M-K 图(图 2)可以看 出,石羊河的气温有逐渐增加的趋势。用 Mann-Kendall 法进行突变检验,取 95%信度水平,当序列 $UF_K \ UB_K$ 超过 $Y = \pm 1.96$ 信度线,且 $UF_K \ UB_K$ 曲 线相交于信度线之间,则交点是突变点开始。 UF_K 和 UB_K 两条信度线在 1974、1977、1978、1979、1980、 1981、1982 和 1986 年相交,说明流域气温经历了八 次由少到多的突变阶段,由图可见气温的突变比较 复杂,年均气温的突变并不明显,在信度线之间存在 多个交点。 UF_K 曲线在 1996 年后超过 1.96 的信度 线,表明上升趋势在 1996—2009 年间更加显著。这 一研究结果和整个河西走廊的升温突变年份一 致^[16],但是比全国的升温要滞后十年左右^[17]。

从石羊河流域各站点逐年平均气温 M-K 趋势 检验(表 3)可以看出,石羊河流域 5 个站点的年平 均气温倾向率都大于 0,说明 5 个站点的气温呈明 显上升趋势,其中民勤站的上升趋势最为明显。其 可能原因是自然因素和人为因素共同作用的结果, 但是人类活动的作用是最主要的,在全球气候变暖 的大背景下,近 60 年来民勤县气温上升趋势明显是 对全球气候变化的积极响应。石羊河是民勤县唯一 的地表水资源^[18],民勤地处石羊河流域下游,近年

表 2 石羊河流域各站点 1960—1979 年、 1990—2009 年平均温度变化

Table 2 Change of annual mean temperature in Shiyang River basin during 1960—1979 and 1990—2009

左伯	月份 Month	平均温度 Mean temperature/℃					
平八 Year		武威 Wuwei	民勤 Minqin	古浪 Gulang	乌鞘岭 Wushaoling	永昌 Yongchang	
	1	- 8.4	-9.5	-9.7	- 12.1	- 10.0	
	2	-4.8	- 5.6	-7.0	- 10.7	-7.3	
	3	2.5	1.9	-0.3	-5.7	-0.6	
	4	10.0	9.9	6.5	0.2	6.4	
	5	15.8	16.6	12.2	5.3	12.3	
10/0 1000	6	19.7	21.0	15.8	8.9	16.0	
1960—1979	7	21.5	22.9	17.5	11.1	17.4	
	8	20.6	21.8	16.9	10.4	16.8	
	9	14.7	15.6	11.5	5.5	11.6	
	10	7.9	7.9	5.3	0.5	5.2	
	11	-0.5	-1.0	-2.7	-6.6	-2.8	
	12	-6.7	-8.0	-7.9	- 10.2	-8.1	
	1	-7.1	-8.0	-4.7	- 11.3	-9.4	
	2	-2.5	-3.1	-4.7	-9.2	-5.7	
	3	3.8	3.6	0.7	-5.0	0.3	
	4	11.2	11.4	7.4	0.8	7.5	
	5	16.4	17.4	12.6	5.5	12.6	
1000 2000	6	20.6	22.0	16.9	9.9	16.5	
1990—2009	7	22.4	23.7	18.5	12.0	18.3	
	8	20.9	22.1	17.3	10.8	17.4	
	9	15.6	16.4	12.6	6.7	12.6	
	10	8.8	8.8	6.1	0.8	5.6	
	11	1.2	0.7	-0.7	-4.7	-1.4	
	12	-5.0	-5.9	-6.1	-9.2	-7.1	





Fig.2 Abrupt change of temperature in Shiyang River basin

表 3 石羊河流域各站点逐年平均气温 M-K 趋势检验

Table 3 M – K trend test for annual mean temperature in Shiyang River Basin

站点 Station	Z_c	β	趋势 Trend
武威 Wuwei	3.7667	0.028345	上升趋势 Rising
民勤 Minqin	5.2661	0.039457	上升趋势 Rising
古浪 Gulang	4.5972	0.035615	上升趋势 Rising
乌鞘岭 Wushaoling	3.2043	0.01625	上升趋势 Rising
永昌 Yongchang	4.256	0.026892	上升趋势 Rising

来由于上游引水量的不断增加,造成民勤地区无法 满足正常的生产生活用水。因地表水的缺乏,农田 灌溉、工农业生产和居民生活需要依靠开采地下水 来弥补用水量的不足,大量开采地下水造成地下水 位快速下降,地表植被枯萎、死亡,干旱化、荒漠化加 剧^[18],因缺水导致的植被盖度的减少对局部气温改 变的贡献也不容忽视。

由石羊河流域气温空间变化分布图(图 3)可以 看出,年均气温的分布特点是东北部温度高,西和南 部温度低,南部等温线较密,北部等温线相对稀疏, 说明年平均气温变化由南向北单位距离温差由大变 小。由北向南、从西往东气温升温速度加快,气温随 海拔高度增加而降低,而且高海拔地区气温变化速 率小。2000年以后相对于 60 年代的平均气温显著 增加,永昌的升温幅度最大,南部的山区升温幅度最 小。其可能原因是地处流域中游平原区的西部,紧 邻人口密集的武威,2000年以来,随着西部经济的 快速发展,县域经济的持续增长,城市大规模扩建, 加上污染治理资金和环保措施难以一步到位,温室 气体和气溶胶的大量排放对永昌县气温变化有一定 的促进作用。





Fig. 3 Change of spatial distribution of temperature in Shiyang River basin

从图 4 可以看出,近 60 年平均气温变化包含多 个不同尺度的周期变化,尺度变化周期为 12 a,6 a 和 3 ~ 5 a。在 3 ~ 5 a 时间尺度上,1969—1977 年、 1987—1994 年能量谱密度较强,即近 60 年平均气温 有明显的 3 ~ 5 a 震荡周期,并在这 2 个时段震荡较 强。从距平平均方差在 3 ~ 5 a 时间序列变化图中 可以看出,在 3 ~ 5 a 时间尺度上,平均气温于 50 年 代初期有一次强震荡。

2.2 降水变化特征

从石羊河流域各站点 1960—1979、1990—2009 年均降水量变化表(表4)可以看出 1990—2009 年较 1960—1979年,月、季、年平均降水增量△*R*不同程 度地增(减),从月际变化看,7月平均增幅最大△*R* 为4.0 mm,3月和5月次之△*R*为3.1 mm,9月△*R* 减少了 2.5 mm;从四季变化来看, $\triangle R$ 夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季,其中秋季 $\triangle R$ 平均减少了 6.0 mm; 年际变化是 $\triangle R$ 平均增加了 10.1 mm,但降水时空 分布不均的现象日趋明显。从地域上分析,西部的 永昌年 $\triangle R$ 增加了 24.8 mm,东南部的乌鞘岭年 $\triangle R$ 增加了 22.3 mm,中部的武威年 $\triangle R$ 增加了 10.2 mm,北部的民勤年 $\triangle R$ 增加了 0.9 mm,而东南 部的古浪年 $\triangle R$ 减少了 7.5 mm。

从石羊河流域降水量突变 M-K 图(图 5)可以看出,年平均降水量在 1951—1965 年呈下降趋势,之后波动上升,曲线 UF_K 在 1954 年超过信度线,说明在 0.05 的显著性水平下年均降水量发生突变显著。 降水量呈减少 – 增多交替突变。



(a)平均气温距平能量谱 (b)平均气温距平平均方差在 3~5 a 时间序列变化

 $(a) \ Anomalous \ energy \ spectrum \ of \ mean \ temperature; \ (b) \ Time \ series \ variation \ of \ anomaly \ average \ variance \ of \ mean \ temperature \ in \ 3 \sim 5 \ years.$

图 4 1951—2009 年石羊河流域气温要素 Morlet 小波分析

Fig.4 Morlet wavelet analysis of temperature in Shiyang River Basin during 1951-2009

表 4 石羊河流域各站点 1960—1979、

1990—2009 年均降水量变化/mm

Table 4 Change of annual mean precipitation (mm) in Shiyang River basin during 1960—1979 and 1990—2009

左仏	月份 - Month	平均降水量 Annual mean precipitation					
平代 Year		武威 Wuwei	民勤 Minqin	古浪 Gulang	乌鞘岭 Wushaoling	永昌 Yongchang	
	1	1.6	0.7	3.1	0.9	0.6	
	2	2.6	0.5	5.9	2.5	1.4	
	3	5.3	2.4	15.0	7.7	4.3	
	4	8.2	5.2	24.3	17.2	7.4	
	5	14.6	8.8	38.5	36.1	18.2	
10.00 1070	6	17.7	12.0	42.6	59.2	23.7	
1960—1979	7	28.1	23.4	61.4	91.6	38.8	
	8	39.3	33.2	70.9	81.8	39.2	
	9	29.2	20.2	64.1	60.7	37.9	
	10	13.2	8.2	25.8	17.6	13.1	
	11	5.4	2.8	11.4	3.6	4.3	
	12	1.0	0.3	3.0	0.9	0.6	
	1	1.8	1.2	3.4	3.1	1.7	
	2	2.2	0.8	5.4	5.0	2.1	
	3	8.1	2.9	19.6	13.2	6.3	
	4	9.2	5.6	26.1	16.9	9.0	
	5	18.1	11.8	39.4	40.9	21.5	
4000 0000	6	22.8	16.0	44.4	57.2	29.8	
1990—2009	7	34.1	26.4	61.9	88.6	52.1	
	8	37.6	25.6	69.5	88.4	45.3	
	9	28.5	20.7	54.7	61.2	34.4	
	10	9.6	6.3	22.4	22.4	9.8	
	11	2.9	0.9	8.1	3.6	1.9	
	12	1.6	0.4	3.4	1.6	0.7	

从石羊河流域各站点逐年降水量 M-K 趋势检 验(表 5)可以看出,石羊河流域 5 个站点的年降水 倾向率部分大于 0,说明石羊河流域降水量变化存 在地理差异。Mann-Kendall 特征表明,武威、民勤、 永昌站点的年降水呈上升趋势,其中武威站点的上 升趋势最为明显,古浪、乌鞘岭站点的年降水呈下降 趋势,趋势均不显著。

表 5 石羊河流域各站点逐年降水量 M-K 趋势检验

Table 5 M-K trend test for annual precipitation

in Shiyang River basin

站点 Station	Z_{c}	β	趋势 Trend
武威 Wuwei	2.6812	1.0294	上升趋势 Rising
民勤 Minqin	0.7366	0.1986	上升趋势 Rising
古浪 Gulang	-0.0162	-0.0250	下降趋势 Decreasing
乌鞘岭 Wushaoling	- 1.0332	-0.6087	下降趋势 Decreasing
永昌 Yongchang	2.9727	1.0862	上升趋势 Rising

由石羊河流域降水量空间变化分布图(图 6)可 以看出,石羊河流域受自然地理环境的影响,该流域 年平均降水量南部山区降水多,北部降水少,整体表 现出由南向北、由西往东降水量减少,降水随海拔高 度增加而增加。2000年以后的降水量比 60年代增 加了大约 23.00 mm,乌鞘岭增加最明显,大约增加 了 51.99 mm,永昌次之,其余站点的降水量都呈现 不同程度的增加趋势。其可能原因是全球强烈变暖 促使南方热带海洋水汽向北输送,致使石羊河流域

近 60 年来的年降水量总体呈相对增多趋势[19]。





Fig.5 Abrupt change of precipitation in Shiyang River basin



图 6 石羊河流域降水量空间变化分布



从石羊河流域降水距平能量谱(图7)可以看 出,近60年石羊河流域降雨量在12a,5~6a和1~ 3a左右的震荡比较明显。在1~3a时间尺度上 1976—1987年能量谱密度较强,即降雨量有明显的 1~3a周期,并在这个时段震荡较强。从距平平均 方差在1~3a时间序列变化图看,在1~3a时间尺 度上,石羊河流域近50年降雨量震荡最强时段在 1963年前后,其次是1973和1987年前后各有一次 强振荡期。

2.3 气候变化对作物生育期的影响

2.3.1 对春小麦生育期的影响 以武威站点的春

小麦为例(表 6),将武威站点的气象条件与春小麦 的关键生育期用 SPSS 进行相关性分析。从表 6 可 以看出,拔节期长短与出苗 – 拔节期平均气温、平均 降水量相关性不明显,且均成负相关。孕穗期长短 与出苗 – 孕穗期平均气温、平均降水量相关性也不 明显,与出苗 – 孕穗期平均气温成负相关。开花期 长短与出苗 – 开花平均气温、平均降水量相关性不 明显。乳熟期与出苗 – 乳熟期平均气温相关性不明 显,且成负相关,但是出苗 – 乳熟期平均降水量相关 性显著。表明降水是影响春小麦关键生育期的主要 气象因素。



(a)降水距平能量谱 (b)降水距平平均方差在1~3 a时间序列变化

(a) Anomalous energy spectrum of precipitation; (b) Time series variation of anomaly average variance of precipitation in 1 ~ 3 years.

图 7 1951—2009 年石羊河流域降水要素 Morlet 小波分析

Fig.7 Morlet wavelet analysis of precipitation in Shiyang River basin during 1951-2009

表 6 春小麦关键生育期与不同时段气象因素的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of critical growth stages of spring

wheat with meteorological factors in different periods				
生育期 Growth stage	气象要素 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient		
拔节期	出苗 – 拔节期平均气温 Mean temperature during emergence to jointing stage	- 0.204		
Jointing	出苗 – 拔节期平均降水量 Mean precipitation during emergence to jointing stage	-0.143		
孕穗期	出苗 – 孕穗期平均气温 Mean temperature during emergence to booting stage	- 0.036		
Booting	出苗 – 孕穗期平均降水量 Mean precipitation during emergence to booting stage	0.237		
开花期	出苗 – 开花期平均气温 Mean temperature during emergence to flowering stage	0.344		
Flowering	出苗 – 开花期平均降水量 Mean precipitation during emergence to flowering stage	0.115		
乳熟期 Milky	出苗 – 乳熟期平均气温 Mean temperature during emergence to milky stage	- 0.067		
	出苗 – 乳熟期平均降水量 Mean precipitation during emergence to milky stage	0.396*		

注:*表示 P<0.05, * *表示 P<0.01。表7同。

Note: * Significance at P < 0.05. * * Significance at P < 0.01.

The same for Table 7.

2.3.2 对玉米生育期的影响 以武威市玉米生育 期为例,从表7可以看出,拔节期与出苗-拔节期平 均气温、平均降水量相关性不显著。开花期与出苗 -开花期平均气温、平均降水量相关性不显著,且均 成负相关。乳熟期与出苗-乳熟期平均气温相关性 不显著,且成负相关,与出苗-乳熟期平均降水量相 关性不显著。

表 7 玉米关键生育期与不同时段气象因素的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of critical growth stages of corn

with meteorological factors in different periods

生育期 Growth stage	气象要素 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient
拔节期	出苗 – 拔节期平均气温 Mean temperature during emergence to jointing stage	0.175
Jointing	出苗 – 拔节期平均降水量 Mean precipitation during emergence to jointing stage	0.138
开花期	出苗 – 开花期平均气温 Mean temperature during emergence to flowering stage	- 0.010
Flowering	出苗 – 开花期平均降水量 Mean precipitation during emergence to flowering stage	- 0.031
乳熟期	出苗 – 乳熟期平均气温 Mean temperature during emergence to milky stage	- 0.358
Milky	出苗 – 乳熟期平均降水量 Mean precipitation during emergence to milky stage	0.171

3 小 结

 1)近60年来石羊河流域气温呈现上升趋势;
 从空间上,由北向南、从西往东气温升温速度加快, 永昌的升温幅度最大,南部的山区升温幅度最小。

 2)月、季、年平均降水增量不同程度地增(减), 并且降水时空分布不均的现象日趋明显,整体表现 出由南向北、由西往东降水量减少。

3) 气候变化显著周期分别为:平均气温 3~5 a,降雨量 1~3 a。

4)分析不同气象因子对春小麦、玉米关键生育 期的影响发现,从整体上看,降水是影响春小麦乳熟 期长短的主要气象因素,而气温和降水与玉米关键 生育期的相关性不显著。

参考文献:

- [1] 熊 伟,冯颖竹,高清竹,等.气候变化对石羊河、大凌河流域灌 溉玉米生产的影响[J].干旱区地理,2011,34(1):150-159.
- [2] 孙 佳.47 年来石羊河流域气候变化趋势及突变分析[D].兰 州:兰州大学,2008.
- [3] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability
 [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 张克新,刘普幸,霍华丽,等.石羊河流域近 50 a 来日照时数的 时空变化特征分析[J].中国沙漠, 2011,31(2):517-520.
- [5] 谷永利,林 艳,李元华.气温变化对河北省冬小麦主要发育期 的影响分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(12):141-145.
- [6] 郑景云,葛全胜,郝志新.气候增暖对我国近40年植物物候变 化的影响[J].科学通报,2002,47(20):1582-1587.

[7] 沙万英,邵雪梅,黄 枚.20世纪80年代以来中国的气候变暖

(上接第18页)

- [7] 刘会平,梁红梅,倪研贤,等.广东农业水灾的年际分布规律及 重灾年份预测[J].热带地理,2007,27(3):203-212.
- [8] 陈兴芳,孙林海.我国年、季降水的年代际变化分析[J].气象, 2002,28(7):3-9.
- [9] 张 智,陈金锥.城市年用水量灰色预测研究[J].水资源与水 工程学报,2006,17(5):9-11.
- [10] 程桂福,付日辉,李兴云.水旱灾害发展趋势的灰色拓扑预测 与应用[J].海岸工程,2001,60(4):56-62.
- [11] 吉中礼.干旱趋势预报及监控[J].干旱地区农业研究,1995,13 (2):119-125.
- [12] 刘俊民.灌区地下水年最高水位的灰色预测[J].地下水, 1993,15(3):93-96.
- [13] 邱淑芳,王泽文.灰色 GM(1,1)模型背景值计算的改进[J].统 计与决策,2007,(3):129-131.
- [14] Douglas EM, Vogel RM, Kroll CN. Trends in flood and low flows in the United States: impact of spatial correlation[J]. Journal of Hydrol-

及其对自然区域界限的影响[J].中国科学,2002,32(4):317-326.

- [8] IPCC. Climate change 2001: The Science Basis, Contribution of working Group I to the Third Assessment Report of the Inter government Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [9] 李万希,陈 雷,王润元,等.石羊河流域 1970-2009 年气候变 化对农业生产结构的影响[J].农学学报,2012,2(3):25-30.
- [10] 魏风英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版 社,1999:69-72.
- [11] 张燕明,文 俊,王新华,等.基于 Mann-Kendall 分析的昆明降 雨与气温变化趋势研究[J].安徽农业科学,2011,39(25): 15755-15757.
- [12] Yu P S, Yang T C, Wu C K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan [J]. Journal of Hydrology, 2002, 260: 161-175.
- [13] Xu Z X, Takeu Chik, Ish Damh. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan[J]. Journal of Hydro science and Hydraulic Engineering, 2002,20(2):11-26.
- [14] 刘叶玲,翟晓丽,郑爱勤.关中盆地降水量变化趋势的 Mann-Kendall 分析[J]. 人民黄河,2012,34(2):28-33.
- [15] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大学出版 社,1998:20-76.
- [16] 贾文雄,何元庆,李宗省,等.近50年来河西走廊平原区气候 变化的区域特征及突变分析[J].地理科学,2008,28(4):525-531.
- [17] 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):942-956.
- [18] 张宝军,马金珠,赵 鑫,等.近50年来民勤县气温变化特征 及其原因分析[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):226-234.
- [19] 李玲萍,杨永龙,钱 莉.石羊河流域近45年气温和降水特征 分析[J].干旱区研究,2008,25(5):705-710.

ogy, 2000, 240: 90-105.

- [15] Xu Z. X., Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation [J]. Journal of Hydrology, 2003, 279:144-150.
- [16] Donald H. Burn, Mohamed A. Hag Elnur. Detection of hydrologic trends andvariability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255: 107-122.
- [17] Juraj M. C, Donald H. B. Non-stationary pooled flood frequency analysis[J]. Journal of Hydrology, 2003, 276:210-223.
- [18] 蔡 震,蔡 琳,李春华,等.晋北地区降水量时空变化及突变 分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):247-253.
- [19] 张遇春,张 勃.黑河中游近 49 年降水序列变化规律及干旱
 预测——以张掖市为例[J].干旱区资源与环境,2008,22(1):
 84-88.
- [20] 张艳芳.基于 GM(1,1)的残差修正模型及应用[J].水利科学 与工程技术,2005,(6):51-53.