

基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市 气温降水变化特征

张涵丹^{1,2}, 卫 伟¹, 薛 薏³

(1. 中国科学院 生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘 要:黄土丘陵区生态脆弱、环境恶劣,对气候变化的响应复杂而敏感。研究以地处黄土丘陵区西南缘的定西市为研究对象,采用线性方程、5 a 滑动平均、Mann-Kendall 突变检验、R/S 分析等方法,基于逐日气象数据,以此分析定西市 1960—2004 年间气温和降水的动态变化,以期为该地区合理开展农业生产和植被恢复提供依据。结果表明:(1) 温度方面,45 a 来,定西市气温呈上升趋势,其 Hurst 指数 $H > 0.5$,表明在之后的一定时段内气温将持续上升,1994 年为定西市气温突变开始的时间;同时,升温速率表现出明显的季节性差异;定西市极端气候变化显著,最大增温趋势出现在冬季,暖冬现象较为明显。(2) 降水方面,1960 年以来定西市降水量呈下降趋势,且以夏秋季下降为主,降水量变化无明显的突变现象,其 Hurst 指数 $H < 0.5$,说明未来将呈现反持续性趋势。定西市未来气候将由暖干型向暖湿型转变。

关键词:气候变化; 趋势; 突变性检验; 特征

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0183-07

Analysis on the Variation of Temperature and Precipitation in Dingxi Based on R/S and Mann-Kendall Test

ZHANG Handan^{1,2}, WEI Wei¹, XUE Sha³

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental

Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Resources and

Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The loess hilly region has long been characterized by its fragile ecosystem and deteriorated environment. The local natural conditions are very sensitive to climate change. Dingxi, located in the southwest of the Loess Plateau, was selected as a typical example to detect the basic features of local climate variation. Linear equation, 5-year moving-average, climatic tendency, Mann-Kendall test and R/S analysis methods were used to analyze the meteorological data. Results showed that: (1) the temperature gradually increased during the past 45 years and would continue to increase with the Hurst index greater than 0.5; the temperature was testified to rise by a clear abrupt in 1994; meanwhile, the increase rate of temperature differed in different seasons, extreme climate events were confirmed in Dingxi during the monitored years; it increased sharply in winter, showing an obvious warm-winter phenomenon; (2) the precipitation had decreased gradually since 1960s, particularly during the summer and autumn periods, no abrupt changes were detected, and the Hurst index was less than 0.5, indicating that the precipitation will tend to increase in the forthcoming years. Generally, the climate in Dingxi region possibly will transfer from warm-dry to warm-wet conditions.

Keywords: climate change; trend; abrupt change detection; characteristics

近几十年来,高温、热浪、冰川消融、海平面上升、永久冻土层融化等事件频繁发生,气候变化问题引起了人

们的普遍关注。众多观测事实表明,全球气候正在经历一次以增温为主要特征的变化趋势;20 世纪的升温速率

是近 1000 年来最高的时期,而近 30 a 又是 20 世纪升温率最高的时期^[1-2]。全球气候变暖势必会对自然生态系统和人类的生产生活产生直接或间接的影响,尤其是生态敏感性和生态脆弱性极高的干旱半干旱地区。研究表明,半干旱区在近 100 年来冬季升温趋势超过全球陆地平均气温升温趋势的 35.4%,对全球陆地变暖的贡献率达 44.46%^[3]。不同时期、不同地区的干旱半干旱区干湿变化趋势呈现显著差异性^[4-5]:南非、南美洲、北美洲、中亚、中国西北等全球主要干旱区在 1860—1995 年这百年呈现暖干化趋势^[6];澳洲和南美洲在 1951—2002 年温度和降水均升高,而依然呈现干旱化趋势^[4,7];中国西北地区气温持续增加^[8-9],降水量变化的波动性较大^[10-12],东北地区依然以暖干化趋势为主^[13-14]。

定西市位于黄土高原西南缘,处于半干旱半湿润向干旱荒漠化转变的过渡地带,该地区水资源匮乏,降水量少而集中,水蚀与风蚀严重,是黄土高原生态脆弱地区的典型代表。天然降水是主要的水分来源,农林业的生产对气候条件的依赖性极强^[15],气候变暖及生态环境的干旱化程度对区域的经济影响重大^[16-18]。作为西部大开发及扶贫攻坚的重点地区之一,为改善其生态环境现状,植树造林、退耕还林还草、输引水源等诸多工程措施相继得到开展^[19-21],在长期的历史进程中,区域气候也在相应的改变。毋庸置疑,基于长期气象数据,对区域气候变化特征进行综合分析,将为实现该地区的生态恢复与建设,深入了解西北半干旱地区的气候变化特征提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),采用 1960—2004 年安定区、华家岭、通渭、陇西、渭源、临洮、漳县、岷县 8 个站点的逐日气象数据。除漳县站 1961—1966 年的部分气象数据缺少外,其余站点的观测资料都比较齐全。此外,华家岭、临洮和岷县为国家基本气象站,其气象数据持续至 2013 年。本文基于定西市 45 a 的逐日气象资料,分别计算该地区月平均气温、月极端最高气温、月极端最低气温、月降水量等气象指标,分别从年际尺度、季节差异以及极端天气的变化等方面进行系统分析,深入探讨该地区多年气候变化特征。季节划分标准为:春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12—次年 2 月。

1.2 分析方法

采用线性回归、5 a 滑动平均、气候倾向率^[22]、Mann-Kendall 检验^[23]和 R/S 分析^[24]等数学方法,对

所搜集到的气象资料进行详细分析。其中,线性回归和气候倾向率能够从直观角度反映定西地区长时间序列的气候变化趋势;5 a 滑动平均平滑处理了年际间的干扰,且用时间序列的平滑值来显示气候变化趋势。

线性气候倾向率计算公式为:

$$\hat{y}(t) = a_0 + a_1 t \quad (1)$$

其趋势变化率方程为:

$$d\hat{y}(t)/dt = a_1 \quad (2)$$

式中系数 a_0, a_1 , 可通过最小二乘法或经验正交多项式来确定,本文采用最小二乘法,即满足式(3):

$$\sum_{i=0}^n [y_n - \hat{y}(t)]^2 = \min \quad (3)$$

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐并广泛使用的非参数检验方法,该方法既可以检测序列的变化趋势,也可以进行突变点检验,主要用于气候要素在时间序列趋势中的突变性检测。该方法的优点在于不需要样本遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰,且计算简便^[22]。

Mann-Kendall 检验中,原假设 H_0 为原序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 无变化趋势,备择假设 H_1 是原序列有增大或减小变化趋势,为双边检验,构造秩序列 S_k 。

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, (k=2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

$$\text{式中: } r_i = \begin{cases} 1 & x_i \geq x_j \\ 0 & x_i < x_j \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, i$$

定义统计变量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, k=2, 3, \dots, n \quad (5)$$

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (7)$$

UF_k 为标准正态分布, $UF_1 = 0$ 。对于给定显著性水平 α , 若 $|UF_k| > \mu_\alpha$, 则表明原序列存在明显的趋势变化。将上述方法逆向使用, 时间序列逆序排列为 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复相同的操作, 得到 UB_k , 满足 $UB_k = -UF_k, k=1, 2, \dots, n, UB_n = 0$ 。

通过 UF_k 和 UB_k 的曲线走势可进一步分析序列 x 的变化趋势, 同时也能够明确突变的时间及显著性变化的范围。R/S 分析方法又称为重标极差分析法 (Rescaled Range Analysis), 最早由被称为尼罗河之父的 H. E. Hurst 提出。近年来, R/S 方法在时间序列分析中得到广泛应用, 其 Hurst 指数能很好的揭示时间序列中的趋势成分^[24-25]。

Hurst 指数 $H(0 < H < 1)$, 存在以下几种情况:

① 当 $H=0.5$ 时, 序列是一个随机游动序列, 反映在气候指标上则是各观测结果之间完全独立, 气候

指标随机变化;

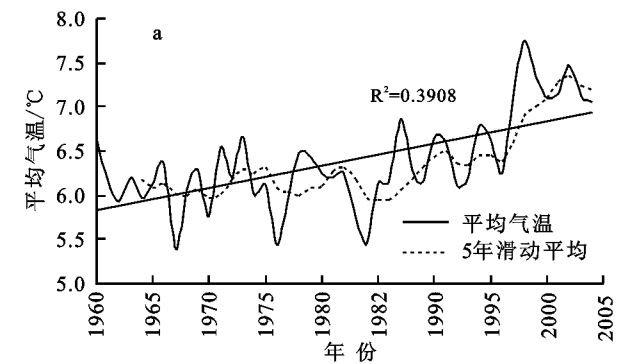
② 当 $0 \leq H < 0.5$ 时,系统是反持久性的或遍历性的时间序列,具有比随机序列更强的突变性或易变性。反应在气候指标上则是气候变化的总体趋势与过去相反;

③ 当 $0.5 < H \leq 1$ 时,系统是一个持久性的或趋势增强的序列,反应今后的气候变化总趋势与过去相同。

2 结果与分析

2.1 气温变化

2.1.1 平均气温年际变化 1960—2004 年定西市



年平均气温呈递增趋势,线性升温率为 $0.252^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图 1),略高于全国平均水平($0.25^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)^[26],其中安定区、通渭县、漳县的年平均气温线性升温率超过市平均升温率,分别为 $0.338, 0.255, 0.272^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,以安定区升温最明显(表 1)。定西市年平均气温介于 $5.39 \sim 7.74^{\circ}\text{C}$ 之间。1967 年是定西市 60 年代以来最冷的一年,年平均气温为 5.39°C ,比常年平均值低 1.0°C ;该市气温以增温为主,气温距平值呈现递增趋势,1990 年之后增温明显,以正向距平为主(图 1b)。1998 年为定西市历史上最暖年,年平均气温为 7.74°C ,高于常年平均值 1.44°C 。

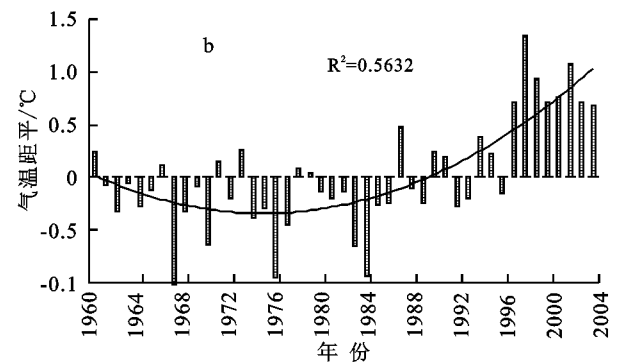


图 1 1960—2004 年定西市平均气温和气温距平年际变化

表 1 定西市各站点平均气温对比

站点	线性趋势/($^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)	均值/ $^{\circ}\text{C}$	距平/ $^{\circ}\text{C}$
安定区	0.338	6.69	0.003
华家岭	0.229	3.64	-0.004
临洮县	0.219	7.21	0.009
通渭县	0.255	6.83	-0.016
渭源县	0.161	5.84	0.047
陇西县	0.207	7.82	0.032
漳县	0.272	7.47	0.061
岷县	0.221	5.79	0.002
全市	0.252	6.39	0.014

这些变化说明,定西市暖冬趋势明显,而且冬季增温程度仍在加强,秋季的增温幅度也有增大的趋势,与全球气候变暖明显加速的结论相一致^[23]。区域气候变化一方面与大气环流密切相关^[27],另一方面也受到该地区地形条件的影响。定西市地处中纬度地带,属典型大陆性气候,同时深受印度洋、太平洋和欧亚大陆三大环流影响^[28],这些特点决定了其易受全球环境变化的影响。

2.1.2 平均气温季节变化 各季平均气温的变化趋势见图 2,如图所示,定西市四季气温都呈现增暖趋势,但不同季节的气温升高速率不同,其中以冬季增温最明显($0.377^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),其次为秋季($0.271^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),夏季($0.181^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),春季的增温幅度最小($0.156/10\text{ a}$)。20 世纪 90 年代起各季节温度均高于常年均值,20 世纪初的 4 a 变化尤为显著(图 3),其中春季和冬季气温分别增长 11.2% 和 14.6% 。1990—1999 年冬季平均气温为 -4.83°C ,比常年均值高 0.5°C ,21 世纪初进一步升高为 -4.55°C 。2004 年春季平均气温达 8.74°C ,比常年偏高 1.4°C ,是 45 a 来春季最暖的一年;2002 年夏季平均气温达 18.34°C ,比常年偏高 1.46°C ;秋季气温最高的年份为 1998 年 8.39°C ,高于常年均值 1.81°C 。

2.1.3 极端气温变化特征 45 a 来该地区极端气温变化曲线如图 4 所示,增暖趋势明显,且极端最高气温的气候倾向率($0.338^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)略大于极端最低气温的气候倾向率($0.268^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。

定西市各站点极端气温的年际气候倾向率和各季的气候倾向率变化情况如表 2 所示。极端最高气温以秋季增温最明显($0.6^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),为年际极端最高气温气候倾向率的 1.76 倍;极端最低气温的气候倾向率以冬季最高为 $0.5^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,达年际极端最低气温气候倾向率的 1.85 倍。极端气温的增温幅度均以安定区的变化最明显,且极端最低气温增温幅度高于极端最高气温。极端最低气温的气候倾向率除了秋季低于极端最高气温的气候倾向率之外,春季、夏季、冬季均高于极端最高气温的气候倾向率。进一步表明定西市气候呈现明显的变暖趋势,且以秋冬季的增温为主。

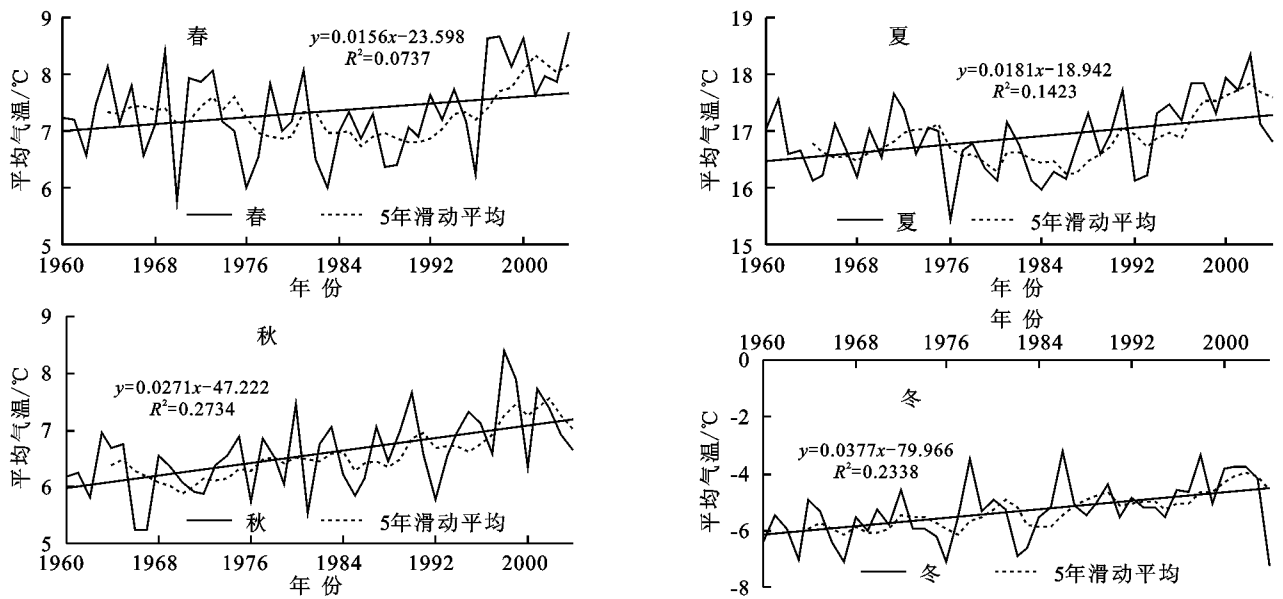


图 2 1960—2004 年定西市平均气温季节性变化趋势

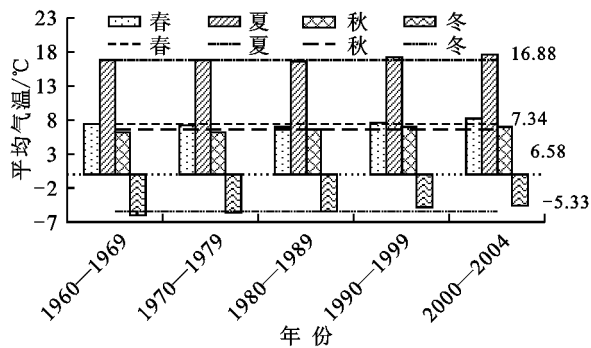


图 3 1960—2004 年定西市平均气温季节性变化

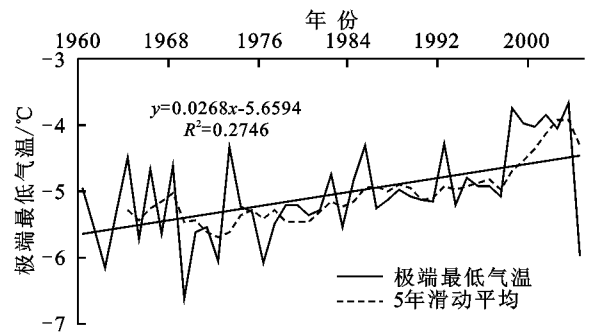
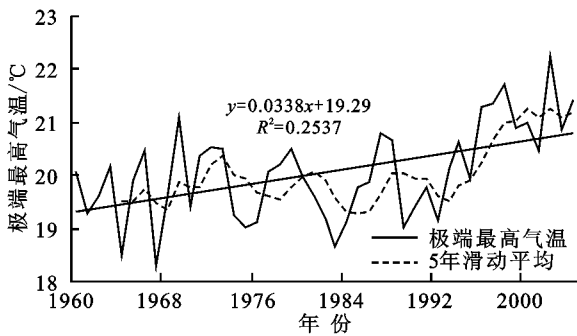


图 4 1960—2004 年定西市极端气温变化趋势

表 2 1960—2004 年定西市极端气温气候倾向率

站点	极端最高气温气候倾向率/(℃/10 a)					极端最低气温气候倾向率/(℃/10 a)				
	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬	年
安定区	0.30	0.29	0.61	0.53	0.42	0.31	0.62	0.47	0.58	0.47
华家岭	0.24	0.19	0.60	0.40	0.34	0.10	0.30	0.40	0.53	0.30
临洮	0.15	0.27	0.60	0.41	0.35	0.20	0.26	0.31	0.51	0.31
通渭	0.13	0.24	0.58	0.43	0.32	0.12	0.28	0.13	0.33	0.20
渭源	0.06	0.08	0.58	0.51	0.29	0.03	0.00	0.00	0.28	0.05
陇西	0.08	0.16	0.53	0.34	0.26	0.10	0.21	0.07	0.47	0.20
漳县	0.37	0.44	0.65	0.52	0.36	0.27	0.40	0.21	0.55	0.26
岷县	0.20	0.33	0.47	0.17	0.29	0.20	0.22	0.14	0.52	0.26
平均	0.18	0.26	0.60	0.43	0.34	0.18	0.28	0.23	0.50	0.27

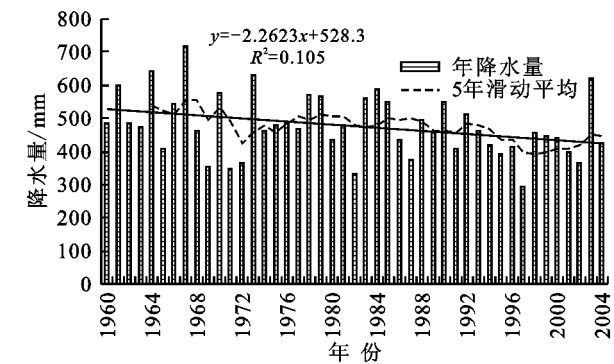


图 5 定西市 1960—2004 年降水量变化趋势

为了更清晰地探讨降雨量的年际变化,绘制定西市降水量分布图(图 6)。从图 6 可知,降水量主要集中在 7 月,8 月份,占年总降水量的 38.6%。年降水量以定西市北部的安定区最低,东部华家岭的年降水量最高,总体呈现南部高于北部,四周高于中心的变化趋势。定西市的降水变化很大程度上受到地形条件与季风变化的影响。

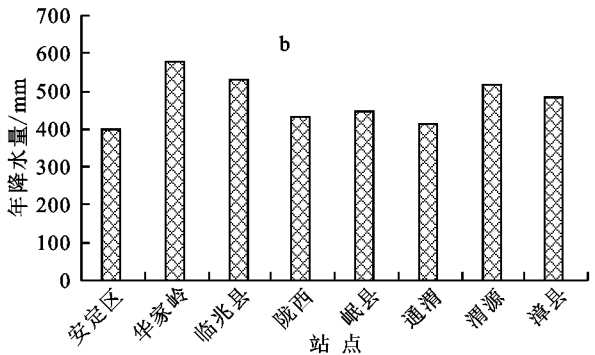
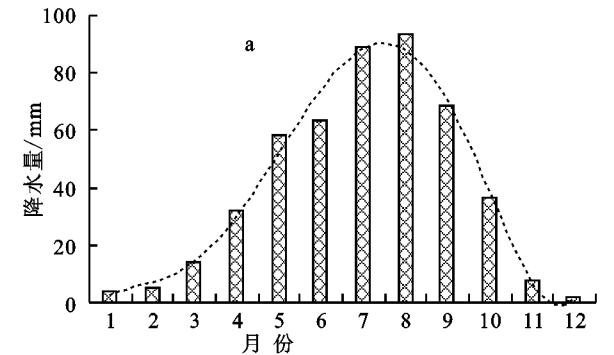


图 6 降水量分布状况全市月平均以及各站点年降水量

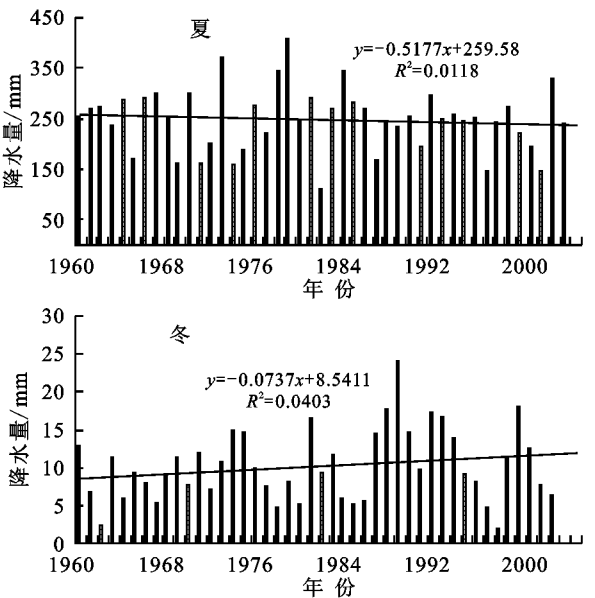
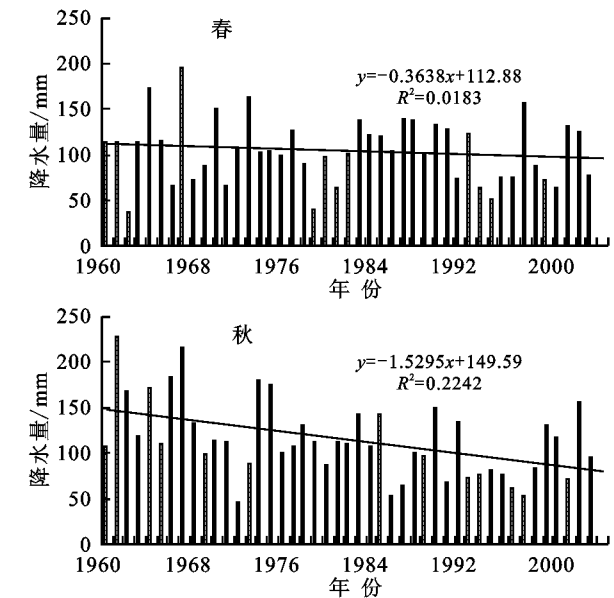


图 7 定西市 1960—2004 年降水量季节性变化趋势

2.3 气候突变性检验

气候突变泛指气候从一种状态到另一种状态的较迅速转变的现象。定西市气候干旱少雨,气温总体

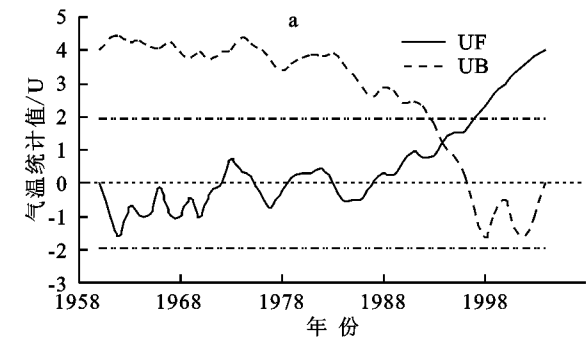
2.2.2 降水量季节变化特征 降水量季节变化趋势如图 7 所示:定西市各季节的降水量总体呈减少趋势,其中以秋季的下降幅度最大,气候倾向率为 $-15.30 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。各年代间的变化也不尽相同(表 3),春季降水量以 80 年代最高,超过均值的 7.6%;夏季降水量 70 年代最高,2000 年以来明显减少,比平均降水量低 8.1%;秋季、冬季降水量分别以 60 年代和 80 年代最高,年平均降水量随着时间梯度持续减少,20 世纪初有所回升。

定西市处于东南季风边缘地区,是季风变化的敏感地带,季风的强弱变化直接影响降水的多少。定西市降水量的减少主要发生在夏秋季节,近半个世纪以来东南季风一直保持减弱趋势,与区域降水量减少趋势相一致^[18,28]。此外,定西市地处印度洋、太平洋和欧亚大陆三大环流的汇聚位置,一方面受到秦岭焚风效应和青藏高原下沉气流影响,同时还受到全球尺度的大气环流影响,这也是影响定西大范围加水差异的可能性原因之一。

呈现增温趋势,降水量呈递减趋势,其年平均气温和年平均降雨量的检测结果见图 8。

根据 Mann-Kendall 趋势检验原理,UF 曲线值

大于 0,表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。1987 年之前 UF 曲线呈现波动,未达到显著上升(或下降)趋势,1987 年之后呈现上升趋势,1998—2004 年升温趋势超过 0.05 显著性水平临界线($\mu_{0.05} = \pm 1.96$),甚至超过 0.01 显著性水平($\mu_{0.01} = \pm 2.56$),表明定西气温呈现从冷到暖的显著上升趋势。UF 曲线与 UB 曲线仅在 1994 年出现了一个交点且位于两临界线之间,表明定西市年平均气温的突变时间从 1994 年开始,此后,气温呈现明显的递增趋势。相比而言,降水量的 UF 曲线和 UB 曲线有多处交点,没有出现显著的突变现象,降水量总体呈现减少趋势,且在



1997 年低于 0.05 显著性水平置信线,降水量进入短期显著减少阶段。

表 3 定西市各年代平均降水量季节性差异 mm

年代	春季	夏季	秋季	冬季	年
1960—1969	108.85	249.93	153.43	8.26	517.55
1970—1979	104.83	263.75	116.76	9.78	487.16
1980—1989	112.46	246.37	101.5	11.57	449.04
1990—1999	97.15	240.65	85.82	10.78	427.15
2000—2004	94.02	227.69	114.71	11.22	433.89
1960—2004	104.51	247.68	114.41	10.20	476.27

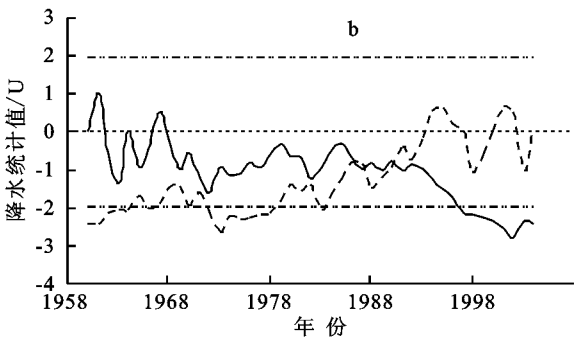


图 8 平均气温和降水量的 Mann-Kendall 检测曲线

2.4 R/S 分析

通过上述分析可知定西市气温具有上升趋势而降水量呈下降趋势。在此基础上,对定西市年平均气温和年平均降水量分别进行 R/S 分析(见图 9),得出定西市各站点气候指标的 Hurst 指数(见表 4)。结果表明,定西市气温指标中,各站点 H 值都大于 0.5,存在明显的 Hurst 现象,说明定西市气温的变化将延续过去的趋势,持续上升。除了安定区、临洮、漳县降水指标的 H 值略大于 0.5,其余站点的 H 值均小于 0.5,说明降水变化具有一定的波动性,有呈现反持续性趋势,即降水量可能会有所增加。定西市气候变化将可能由暖干型向暖湿型转变。此外,华家岭、临洮、岷县这三个站点 2004—2013 年的气温降水变化与 R/S 分析结果相一致。

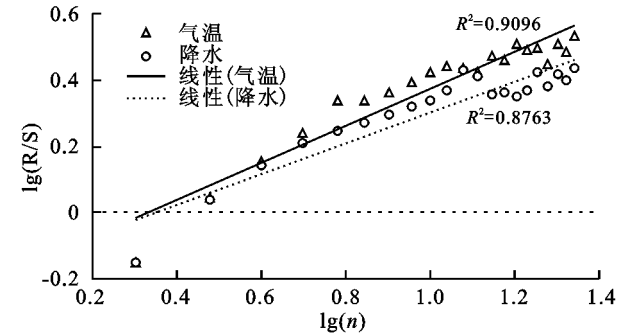


图 9 定西市气温降水的 R/S 分析

当前,对西北干旱半干旱地区气候变化的相关结论并不一致,其中,Zhang 等^[4]指出暖干向暖湿型转

变是西北地区气候变化的主要趋势,而姚晓军等^[29]则表明,西北大部分地区干旱化程度增加。这主要与本研究的结果与前者的研究结果一致,定西市将呈现由暖干型向暖湿型转变的趋势。

表 4 定西市各站点气候指标的 Hurst 指数

项目	气温	降水
安定区	0.52	0.56
华家岭	0.57	0.49
临洮	0.50	0.50
陇西	0.62	0.45
岷县	0.53	0.46
通渭	0.60	0.43
渭源	0.52	0.40
漳县	0.65	0.51
平均	0.56	0.46

3 结论

气温和降水是反映气候变化的两大要素,长时间序列分析能准确呈现区域气候的变化趋势和规律^[9,30]。定西市自 1960—2004 年的气候变化具有以下特征:

(1) 年平均气温整体呈上升趋势,检验结果表明 1994 年是气温变化的突变年,之后进入显著增温期。不同季节的平均气温均呈现增加趋势,尤以冬季增温最明显(0.377℃/10 a),春季的增温幅度最小(0.156℃/10 a)。

(2) 极端最高气温和极端最低气温上升趋势明显,极端最高气温的气候倾向率(0.338℃/10 a)大于

极端最低气温($0.268^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。从季节角度看,秋季和冬季的极端最高气温增温趋势大于年际间的增温趋势;极端最低气温以冬季增温最显著。

(3) 年降水量呈下降趋势,常年平均降水量为 476.3 mm ,不存在明显的突变现象。降水量总体呈现南部高于北部,四周高于中心的变化趋势。降水量的减少主要发生在夏秋季,且秋季的下降幅度最大($-15.30\text{ mm}/10\text{ a}$)。

(4) 对定西市 1960—2004 年气温、降水的 Mann-Kendall 检验与 R/S 分析进行综合分析,结果表明,定西市平均气温呈现增长趋势,且存在明显的 Hurst 现象,即定西市气候变化存在持续性,未来气温将持续上升;降水变化具有一定的波动性,有呈现反持续性趋势,即未来降水量将有所增加。

参考文献:

- [1] 王绍武,谢志辉,蔡静宁,等. 近千年全球平均气温变化的研究[J]. 自然科学进展,2002,12(11):27-31.
- [2] 钱维宏,陆波. 千年全球气温中的周期性变化及其成因[J]. 科学通报,2010,55(32):3116-3121.
- [3] Huang J P, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2012,12(12):5391-5398.
- [4] ZhangBaoqing, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Drought variation trends in different subregions of the Chinese Loess Plateau over the past four decades[J]. Agricultural Water Management,2012,115:167-177.
- [5] 黄建平,李明霞,刘玉芝,等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展,2013,09(1):9-14.
- [6] 李新周,刘晓东,马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱区研究,2004,21(2):97-103.
- [7] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature,2002,416(6879):389-395.
- [8] 郭敏杰,张亭亭,张建军,等. 1982—2006 年黄土高原地区植被覆盖度对气候变化的响应[J]. 水土保持研究,2014,21(5):35-40.
- [9] 张晓晓,张钰,徐浩杰. 1961—2010 年白龙江流域气温和降水量变化特征研究[J]. 水土保持研究,2014,21(4):238-245.
- [10] 吕妍,王让会,蔡子颖. 我国干旱半干旱地区气候变化及其影响[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(11):65-71.
- [11] 刘德坤,王军邦,齐述华. 基于湿润指数的近 35 a 青海省干湿状况变化分析[J]. 水土保持研究,2014,21(2):246-250.
- [12] 卓玛兰草,刘普幸,张亚宁,等. 甘肃黄土高原区潜在蒸散量时空变化与成因研究[J]. 水土保持研究,2012,19(1):70-75.
- [13] 贾建英,郭建平. 东北地区近 46 a 气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):109-115.
- [14] 高峰,隋波,孙鸿雁,等. 1951—2008 年东北地区冬季气温变化及环流场特征[J]. 气象与环境学报,2011,27(4):12-16.
- [15] 吉奇,徐璐璐,宋冀凤. 1953—2005 年本溪地区气候变化及其对农业生产的影响[J]. 气象与环境学报,2008,24(1):36-39.
- [16] CookB I, Wolkovich E M, and Parmesan C. Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2012,109(23):9000-9005.
- [17] Yu H, Luedeling E, and Xu J. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010,107(51):22151-22156.
- [18] 张秀云,董颀华,姚玉璧,等. 定西市气候资源特点与开发利用[J]. 成都信息工程学院学报,2004,19(3):447-450.
- [19] Zhang Zhihua, Li Xiaoyan, Jiang Zhiyun, et al. Changes in some soil properties induced by re-conversion of cropland into grassland in the semiarid steppe zone of Inner Mongolia, China[J]. Plant and Soil,2013,373(1):89-106.
- [20] Li Xiaoyan. Hydrology and biogeochemistry of semiarid and arid regions[J]. Forest Hydrology and Biogeochemistry,2011,216:285-299.
- [21] 周长进,董锁成,李岱. 定西地区主要生态环境问题与对策[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(6):32-37.
- [22] 林学椿,于淑秋. 近 40 a 我国气候趋势[J]. 气象,1990,16(10):16-22.
- [23] 曲学斌,吴昊. 呼伦贝尔市 53a 气候变化特征分析[J]. 水土保持研究,2014,21(1):178-182.
- [24] 顾维慧,洪洪军,乔晓波. R/S 分析法在涟水县降水趋势预测中的应用[J]. 农业与技术,2013,33(10):204-206.
- [25] 何毅,杨太保,杜鹃,等. 基于 GIS 和 RS 的中亚阿拉套山脉近 22 a 来冰川变化[J]. 水土保持研究,2013,20(6):130-134.
- [26] 何云玲,鲁枝海. 近 60a 昆明市气候变化特征分析[J]. 地理科学,2012,32(9):1119-1124.
- [27] 李双双,延军平,万佳. 全球气候变化下秦岭南北气温变化特征[J]. 地理科学,2012,32(7):853-858.
- [28] 王文艳,张丽萍,吴东平,等. 近 19a 干旱半干旱过渡区气温降雨变化特征分析[J]. 环境科学与技术,2012,35(61):57-61.
- [29] 姚晓军,张晓,孙美平,等. 1960—2010 年中国西北地区水分盈亏量时空特征[J]. 地理研究,2013,32(4):607-616.
- [30] 周晓宇,赵春雨,张新宜,等. 1961—2009 年辽宁省气温、降水变化特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(10):87-93.