



Characteristics of Climate Change and Abrupt Analysis in the Source Region of the Yellow River in Recent 50 Years

Qi Luo^{*}, Tinglong Zhang

Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou, China

Email address:

lqsgdsgh@sina.com (Qi Luo)

^{*}Corresponding author

To cite this article:

Qi Luo, Tinglong Zhang. Characteristics of Climate Change and Abrupt Analysis in the Source Region of the Yellow River in Recent 50 Years. *Asia-Pacific Journal of Earth Sciences*. Vol. 3, No. 1, 2021, pp. 9-18.

Received: April 25, 2021; Accepted: May 12, 2021; Published: May 26, 2021

Abstract: Based on the daily data set of China surface climate data of China Meteorological Data Network (V3.0) Maqu meteorological site from 1967 to 2017. Mann Kendall and other methods are used to analyze the abrupt change of meteorological elements. The results show that the air temperature and surface temperature show an obvious upward trend in the past 50 years, which indicates that the plateau region is also continuously warming under the background of global warming, Land surface temperature is more sensitive to climate warming. The difference of sunshine hours is significant, but the overall trend is not obvious. However, the precipitation showed a slight increase, which also confirmed the warming trend of the plateau. The temperature showed an upward trend in both warm season and cold season, especially in cold season, but it kept below -5°C thus could not form liquid precipitation; The difference of sunshine hours is small. In recent years, it fluctuates drastically in warm season and gentle in cold season; The relative humidity in warm season is higher than that in cold season. The abrupt change analysis of meteorological elements in Maqu region from 1967 to 2017 shows that there are two abrupt changes in temperature, the time of abrupt change is about 1975-1976 and 2000 respectively, in which the abrupt change of significant rise occurred in 2000, and the abrupt change of surface temperature occurred around 2000; The wind speed decreased abruptly from 1972 to 1975; The possible abrupt points of sunshine hours are 1974, 1992 and 2002; The possible abrupt time of relative humidity is from 2004 to 2005; The possible abrupt change time of precipitation is around 1977.

Keywords: Source Region of the Yellow River, Climate Change, Analysis of Abrupt Climate Change

近50a黄河源区的气候变化特征及突变分析

罗琪^{*}, 张廷龙

海南省气象科学研究所, 海口, 中国

邮箱

lqsgdsgh@sina.com (罗琪)

摘要: 利用中国气象数据网中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 玛曲气象站1967-2017年数据, 用Mann-Kendall等方法对气象要素进行突变分析, 结果表明: 近50a来气温与地表温度均呈明显的上升趋势, 说明在全球气候变暖的背景下, 高原地区也是持续增温, 地表温度对于气候变暖更为敏感。日照差异显著, 但总体变化趋势不明显。相对湿度总体呈下降趋势, 然而降水量显示出微弱的上升, 这也从侧面印证了高原的变暖趋势。气温无论暖季、冷季均呈上升趋势, 冷季更为显著, 但是始终保持 -5°C 以下, 无法形成液态降水; 日照时数差异较小, 近年来暖季波动剧烈, 冷季较为平缓; 相对湿度暖季明显高于冷季。对1967-2017近50a玛曲地区气象要素进行突变分析, 结果表明: 气温发生两次突变, 突变时间分别为1975-1976年和2000年左右, 其中2000年发生显著上升突变, 地表温度于2000年左右发生突变; 风速于

1972-1975年间发生下降突变;日照时数可能的突变点为1974年、1992年和2002年;相对湿度可能的突变时间为2004-2005年;降水可能的突变时间为1977年左右。

关键词: 黄河源区, 气候变化, 突变分析

1. 引言

黄河源区位于青藏高原东北部,区域内分布有高山、盆地、峡谷、草原、和众多湖泊、沼泽、冰川、湿地及分布广泛的长年冻土等地貌。既是我国重要的水源涵养区,也是三江源国家自然保护区的重要组成部分[1-10]。该区域是湖泊-高寒草甸复杂下垫面的典型代表,源区复杂下垫面上的陆-气相互作用不仅直接影响到青藏高原的气候和环境变化,而且对东亚乃至全球的气候和环境都可能产生重要影响[11-19]。而黄河源区也是气候变化的敏感区域,本文利用Mann-Kendall等几种方法对黄河源区近50年的气温、地表温度、降水等进行了突变分析,为天气预测及气候变化提供科学依据。

2. 近50a玛曲气候变化

玛曲作为黄河源区的关键区域,其气候变化具有代表性。为了了解半世纪以来黄河源区气候变化特征,本部分利用中国气象数据网中国地面气候资料日值数据集(V3.0)对其进行研究,主要分析气温、地表温度、日照时数、风

速大小、降水以及相对湿度的变化趋势,如图1所示,为1967-2017年各要素年平均变化特征。近50a来气温与地表温度均发生多次波动,但由线性拟合可以看到,二者呈明显的上升趋势,说明在全球气候变暖的背景下,高原地区也是持续增温,气温最高值出现在2010年,为3.3℃,最小值为0.4℃,出现在1977年;太阳短波辐射直接加热地表,而气温升高主要源自地表长波辐射,所以地表温度高于气温,比较发现地表温度斜率大于气温变化斜率,说明地表温度对于气候变暖更为敏感。日照时数是指太阳在垂直于其光线的平面上的辐射强度等于或超过120 W·m⁻²的时间长度,由图1(c)可以看到,近50a来日照差异显著,但总体变化趋势不明显,1990-2008年始终保持较高水平,2009年后下降,近年有所回升。相对湿度总体呈下降趋势,空气变干,然而降水量显示出微弱的上升,这也从侧面印证了高原的变暖趋势,由于气候变暖,气温及土壤温度升高,使得土壤与大气中水分不断蒸发至对流层上部,再经大气环流运抵其他地区。利用二次多项式对风速变化进行拟合,可以看到前30a风速波动明显,呈下降趋势,近20a基本保持稳定,稍有升高。

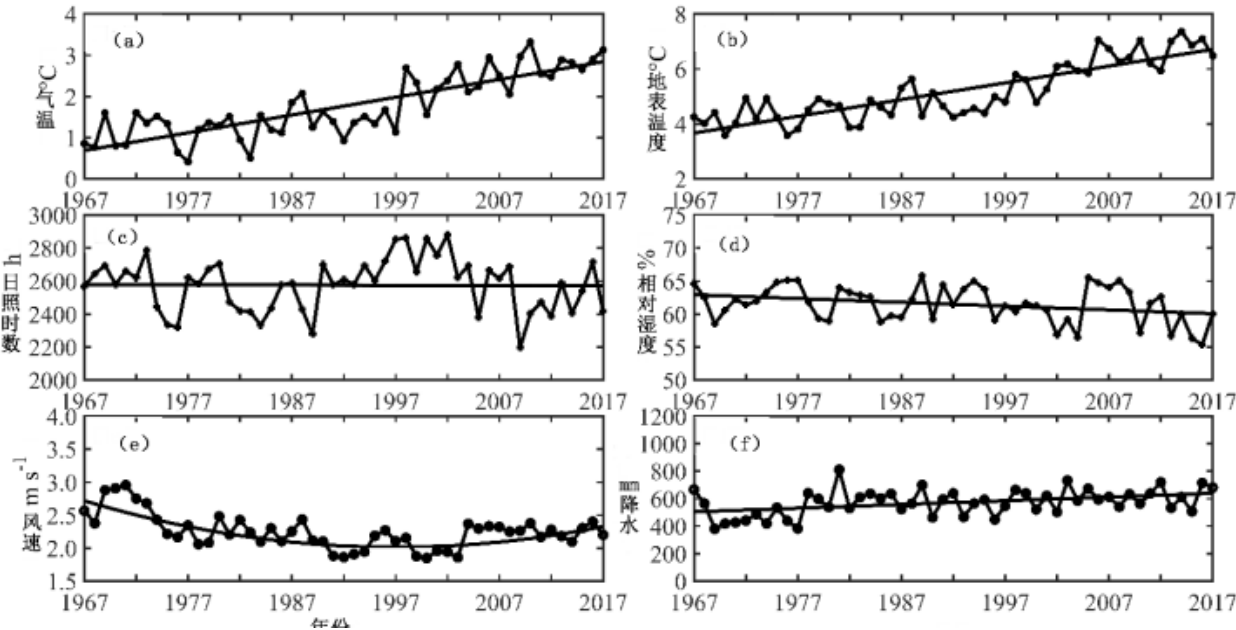


图1 1967-2017年气象要素年平均变化。

黄河源区无明显四季之分,只有冷暖两季,为了突出冷暖季节特征,本文选择6-8月数据作为暖季、12-2月数据作为冷季进行研究。地表温度由于自动站代替人工观测后,其观测规范与人工观测不同,会造成冬季地面有积雪时,自动站观测比人工观测偏高,所以冷季地表温度不进行分

析;另一方面,冷季降水主要以固态为主,常规雨量桶无法进行观测,所以对于降水变化也无法进行衡量。如图2、图3所示,分别为1967-2017年暖季与冷季气象要素年平均变化。气温无论暖季、冷季仍呈上升趋势,冷季更为显著,但是始终保持-5℃以下,无法形成液态降水;暖季地表温

度最大值可达18.1℃，最小值为12.6℃，跨度大且斜率大于年平均变化，说明气候变暖增加了极端天气事件爆发，使得温度差异更加显著；日照时数差异较小，近年来暖季波动剧烈，冷季较为平缓；相对湿度暖季明显高于冷季，暖季为68.7%-77.5%，冷季仅为34.8%-57.4%，暖季降水变

化平稳，稍有增加，冷季无液态降水，而由于温度始终保持零度以下，固态积雪和土壤冰对水汽进行有效补充；冷季风速较大且波动剧烈，近年来振幅减小趋于平缓，暖季较冷季变化小，总体先降低，后基本保持平稳。

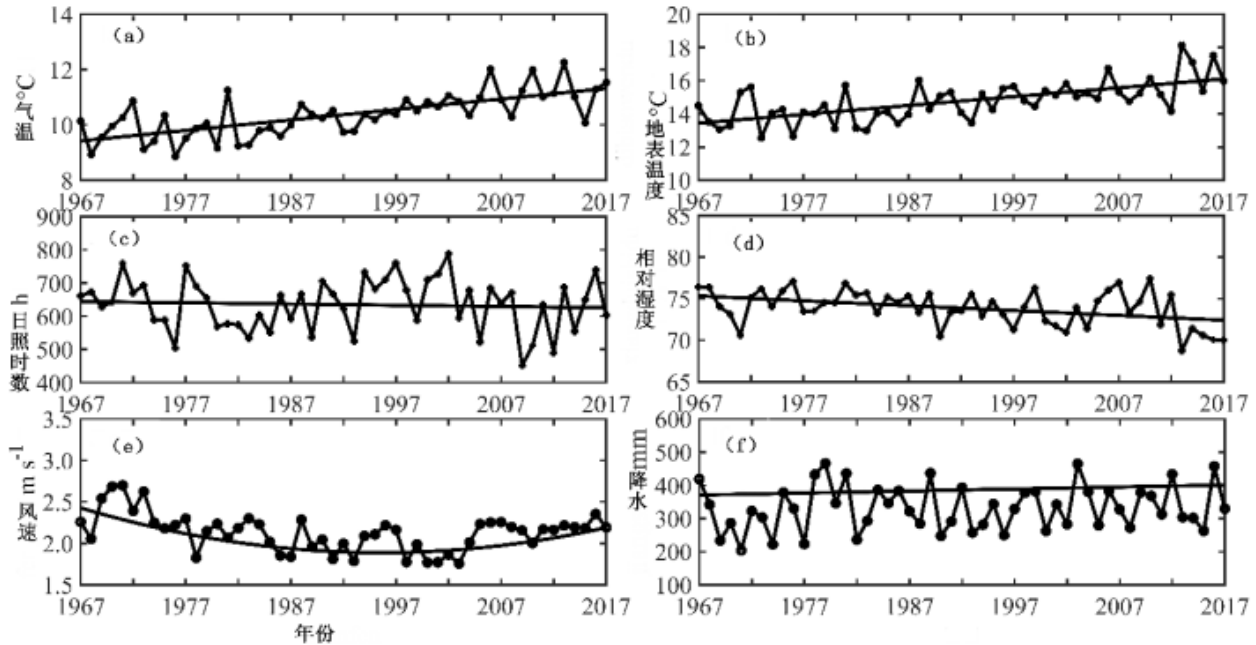


图2 1967-2017年暖季气象要素年平均变化。

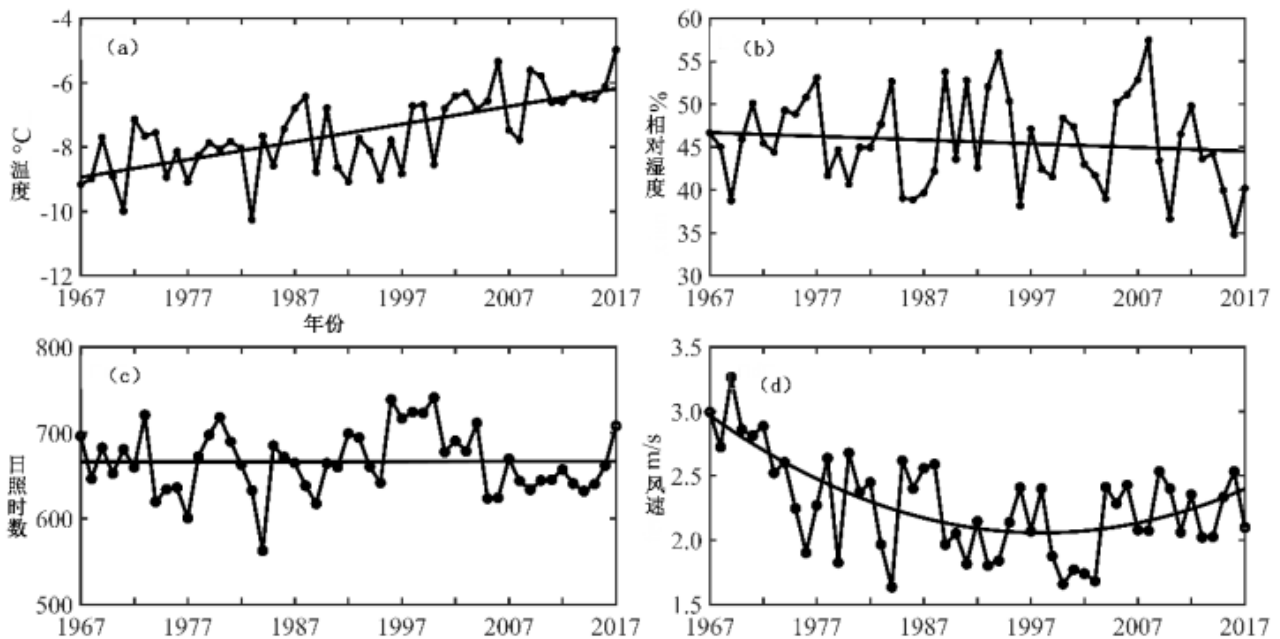


图3 1967-2017年冷季气象要素年平均变化。

3. 气候突变分析

根据气候的成因及时间尺度，把气候突变归成两类。第一类是简单状态的突变，即在气候系统结构没发生根本变化的情况下，或不考虑系统外边界条件任何长期变化的

前提下，可观测到的迅速且显著的气候变化；第二类则反映系统边界长期变化中的突变，这些事件不是有规律地发生的，如缓慢的大地构造引起的地理变化，必须要有新的大气和海洋环流与之相适应[20]。具体的，气候突变可以分为四类，第一类是指气候从一个平均值到另一个平均值的急剧变化，表现为气候变化的不连续性，较好的反映一

个气候基本状况（特征平均值）的变化，称为均值突变；均值只是反映气候状态的一个基本特征量，另一个变量为气候变率，即方差，这类气候突变定义为气候从一个方差状态到另一个方差状态的急剧变化，平均值无明显变化；第三类为翘翘板突变，某段时间持续增加（减小）至某一点后突然恢复至原始水平左右，再次重复该过程；第四类为转折突变，即某一时段持续增加（减少），经某点后开始持续减少（增加）。

3.1. 方法简介

气候突变检测方法很多，本研究主要使用滑动t-检验法、Cramer法、Yamamoto法、Mann-Kendall法、B-G分割算法以及小波分析。滑动t-检验通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变，基本思想是将气候序列中两段子序列均值有无显著性差异看作两个总体均值有无显著差异的问题来检验，如果两段子序列均值差异超过一定的显著性水平，则认为均值发生了质变，突变发生。对于具有n个样本量的时间序列x，设置某一时刻为基准点，基准点前后两段子序列x₁和x₂的样本分别为n₁和n₂，平均值分别为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 ，方差分别为s₁²和s₂²。定义统计变量：

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2)$$

其中（1）式遵从自由度为n₁+n₂-2的t分布。该方法的缺点是子序列时段的选择具有人为性，为避免任意选择子序列长度造成突变点的漂移，本研究通过反复变动子序列长度进行试验比较，最终确定子序列时间步长为5a。

Cramer方法原理与滑动t-检验相近，区别在于该方法通过比较子序列与总序列的平均值差异来检验突变。设总序列x与子序列x₁的均值分别为 \bar{x} 和 \bar{x}_1 ，总序列方差为s，定义统计量：

$$t = \sqrt{\frac{n_1(n-2)}{n-n_1(1+\tau)}} \cdot \tau \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}}{s} \quad (4)$$

其中n为总序列样本长度，n₁为子序列样本长度，（3）式遵从自由度为n-2的t分布，该方法易需要反复变动子序列长度提高计算结果的可靠性，通过多次试验，最终确定时间步长为5a。

Yamamoto方法从气候信息与气候噪声两方面讨论突变问题。对于时间序列x，设置某一时刻为基准点，该点前后样本量分别为n₁和n₂，子序列为x₁和x₂，平均值分别为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 ，标准差分别为s₁和s₂，定义信噪比为：

$$SNR = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_1 + s_2} \quad (5)$$

两段子序列均值差的绝对值为气候变化信号，其变率（标准差）为噪声。

Mann-Kendall法是一种非参数统计检验方法，其优点是不需要遵从一定的分布，也不受少数异常值干扰，更适用于类型变量和顺序变量。对于具有n个样本量的时间序列x，构造一秩序列：

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & (x_i > x_j) \\ 0 & (x_i \leq x_j) \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (7)$$

秩序列s_k为i时刻数值大于j时刻数值个数的累计值。假定时间序列随即独立，定义统计量：

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

其中UF₁=0，E(s_k)和Var(s_k)分别为累计数s_k的均值和方差，若x₁, x₂..., x_n相互独立，且有相同连续分布，则：

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (9)$$

$$Var(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (10)$$

UF_i为标准正态分布，是按时间序列x顺序x₁, x₂..., x_n计算出的统计量序列，给定显著性水平α，若UF_i>U_α，则表明序列存在明显的趋势变化。对时间序列逆序列重复上述过程，同时使UB_k=-UF_k，k=n, n-1, ..., 1，UB₁=0。该方法不但计算方便，而且可以明确突变开始时间，并指出突变区域。

B-G分割算法是一种检测非线性、非平稳性序列突变的方法，可是应用于时间序列的突变检验。对于由N个实际数据组成的非线性时间序列X(t)，t=1, 2, ..., N，计算步骤如下：

计算第i点左右两段的平均值和标准差，其中平均值分别为μ_L(i)和μ_R(i)，标准差分别为SL(i)和SR(i)(i=2, 3, ..., N-1)；

为了计算μ_L和μ_R的差异，采用t检验统计值来确定统计量，其定义为：

$$T(i) = |(\mu_L(i) - \mu_R(i)) / S_D| \quad (11)$$

$$S_D = i \left[(S_L^2(i) + S_R^2(i)) / (N_L + N_R - 2) \right]^{1/2} \times (1/N_L + 1/N_R)^{1/2} \quad (12)$$

SD为联合方差, NL和NR分别为第*i*点左右两端的样本个数;

计算T(i)中最大值 T_M , 并计算其统计显著性P(TM):

$$P(T_M) = Prob(T \leq T_M) \quad (13)$$

$P(T_M)$ 表示在随机过程中取到T值小于等于 T_M 的概率, 可近似表示为:

$$P(T_M) = (1 - I_{v/(v+T_M^2)}(\delta v, \delta))^{\gamma} \quad (14)$$

由蒙特卡洛模拟可以得到 $\gamma = 4.19 \ln N - 11.54$, $\delta = 0.40$, $v = N - 2$, $I_x(a, b)$ 为不完全 β 函数, 显著性水平为0.95, 如果 $P(T_M)$ 大于0.95, 则在该点将时间序列分割为两段。对新得到的两个子序列重复上述操作, 直至所有子序列不能分割为止, 分割点即为均值突变点。

小波变化是一种信号处理技术, 其性能优于傅立叶变换, 目前在分形结构、图像处理、湍流结构等学科均有广泛的应用。一位信号函数 $f(t)$ 的小波变换为:

$$T_g(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g_{a,b}(t) dt \quad (a > 0) \quad (15)$$

其中 $g_{a,b}(t)$ 由小波函数 $g(t)$ 通过平移 b 和放大 $1/a$ 来构成:

$$g_{a,b}(t) = \frac{1}{a} g\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (16)$$

小波函数有多种形式, 本文选用高斯型小波, 即墨西哥帽小波:

$$g(t) = (1 - t^2) e^{-t^2} \quad (17)$$

已有研究证明[21], $f(t)$ 的子波变换 $T_g(a, b)$ 曲线在 $(b, T_g(a, b))$ 上穿过零的点即为突变点。

3.2. 结果分析

本节利用以上六种方法对1967-2017近50a玛曲地区气象要素进行突变分析, 主要包括气温、地表温度、风速、日照时数、相对湿度以及降水。如图4所示, 为气温突变检验。滑动t检验结果显示气温发生了两次突变, 分别是1986年和1997年; 50a来气温多次出现由暖到冷和由冷到暖的过度, 1967-1975年气温下降, 1975-1986, 总体呈上升趋势, 1986-1991年气温再次下降, 之后明显反弹, 二十世纪以来变化较为平缓; Cramer检验显示气温于2008年出现突变, 之后超过0.05的显著性水平, 突变显著; Yamamoto信噪比于1997年超过0.05的显著性水平, 最大值亦为该年; M-K检验UF曲线于1986年开始大于0, 气温开始上升, 与UB曲线交点正好位于0.01显著性水平线上, 说明2000年左右为突变年, 之后超越0.01的显著水平, 突变显著; B-G分析显示多个突变点, 1972-1977年间为突变密集区, 所以突变点为1975年; 小波分析法分别设置其分辨尺度为26a、11a和6a, 小波变化系数穿过0值的位置对应该段时间尺度下的气候突变点, 可以看到, 分辨尺度为26a时出现三个突变点, 通过检验发现只有后两个点突变显著, 分别位于1990-1991和2003-2004年间; 11a分辨尺度下有7个突变点, 经过检验1996-1997年间为显著突变; 6a分辨尺度下有16个突变点, 仅有1975-1976年间为发生显著突变。通过对六种方法进行综合考虑, 最终确定气温发生两次突变, 突变时间分别为1975-1976年和2000年左右, 其中2000年发生显著上升突变。

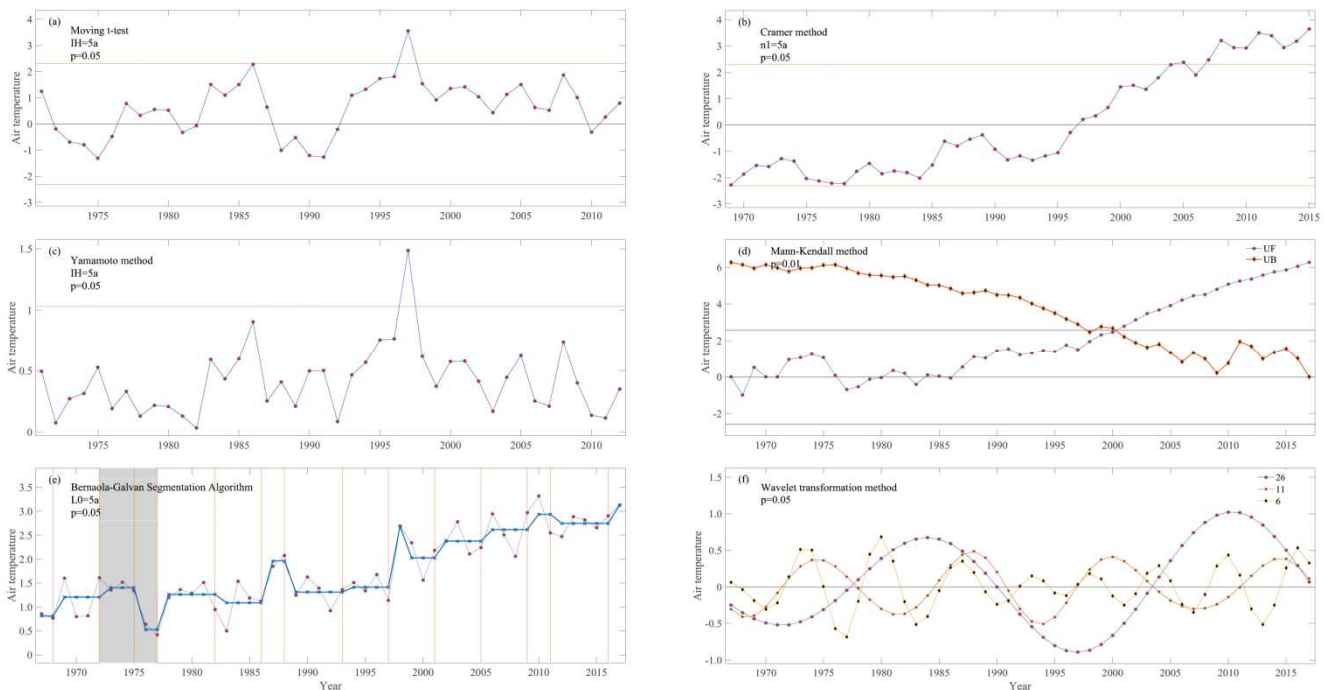


图4 1967-2017年气温突变检测。

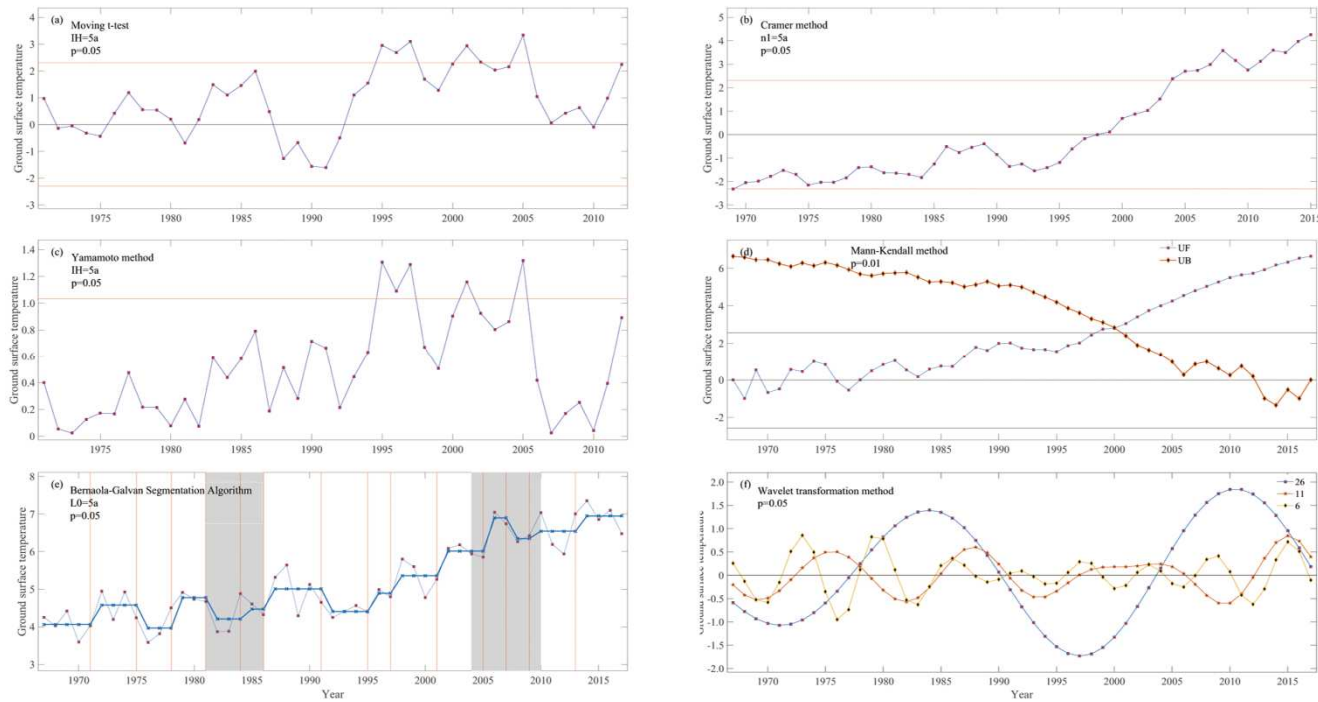


图5 1967-2017年地表温度突变检测。

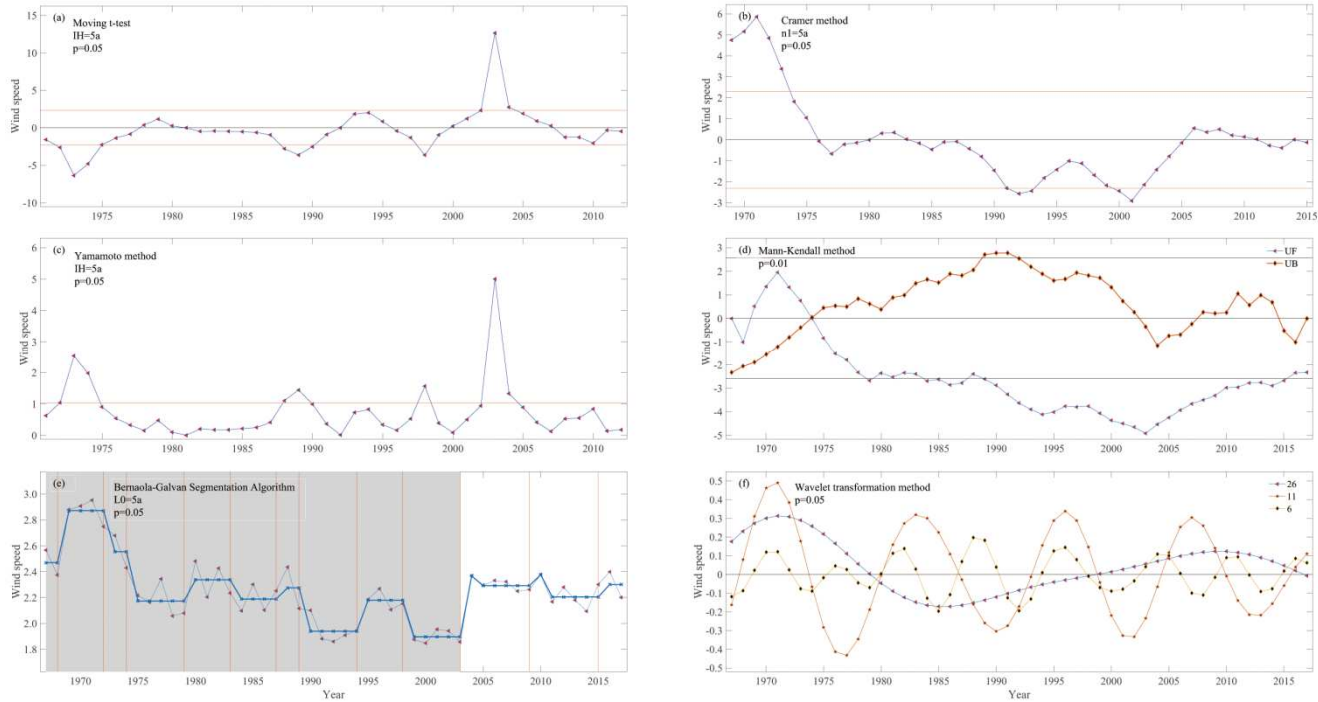


图6 1967-2017年风速突变检测。

图5为地表温度突变检验，滑动步长除小波分析外均为5年，M-K检验显著性水平为0.01，其他变为0.05。由滑动t检验可以看到，地表温度出现三次突变，第一次为1995-1997年，第二次为2000-2002年，第三次为2005年左右；Cramer方法显示突变发生在2004年，之后超过0.05的显著性水平，突变显著；Yamamoto检验亦出现了三次突变，与滑动t检验对应一致；M-K检验方法UF与UB交点位于临界线外，无法判断突变发生时间，但是自1978年后，

UF始终大于0，所以地表温度呈上升趋势；B-G分割算法拥有两个突变密集区，分别是1981-1985年和2004-2010年，其内的突变时间包括1983年、2005年、2007年和2009年；小波分析分辨尺度仍然按照26a、11a和6a取值，分辨尺度为26a时出现三个突变点，通过检验发现有两个点突变显著，分别位于1977-1978和2003-2004年间；11a分辨尺度下有7个突变点，经过检验1996-1997年、2006-2007年、2012-2013年间为显著突变；6a分辨尺度下有17个突变点，

仅有1977-1978年间为发生显著突变。通过对六种方法进行综合考虑，最终确定地表温度于2000年左右发生突变。

风速突变检验如图6所示。滑动t检验包含四次突变，其中三次为下降突变，分别为1972-1975年、1988-1990年和1998年，上升突变发生在2003年左右；Cramer方法显示2001年前风速呈下降趋势，2001年后发生上升突变；Yamamoto检验结果与滑动t检验一致；M-K检验UF与UB曲线交点刚好位于临界线上，1974年发生下降突变，1979

年之后突变显著；B-G检验显示，从1976年-2003年始终处于突变密集区；小波分析当分辨尺度为26a时出现三个突变点，通过检验发现只有一个点突变显著，为1979-1980年间；11a分辨尺度下有9个突变点，经过检验1973-1974年、2004-2005年间为显著突变；6a分辨尺度下有15个突变点，1968-1969年、1972-1973年、1990-1991年、1993-1994年间为发生显著突变。通过对六种方法进行综合考虑，最终确定风速于1972-1975年间发生下降突变。

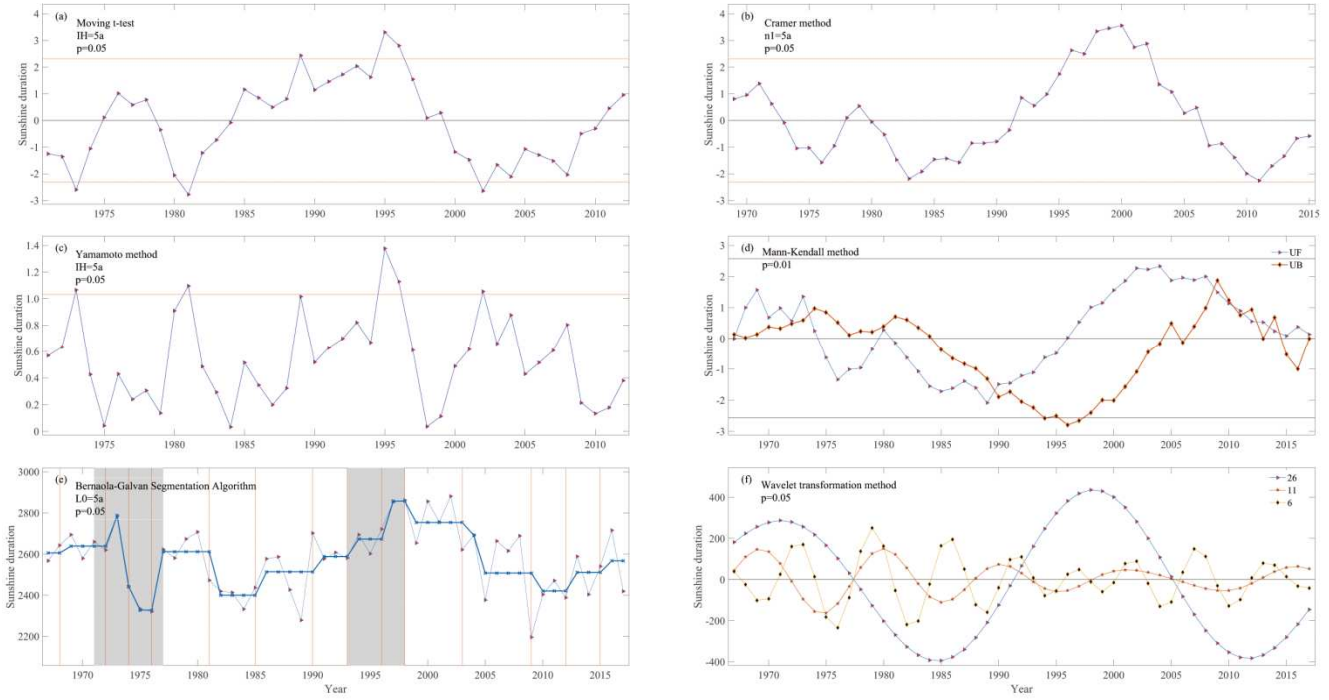


图7 1967-2017年日照时间突变检测。

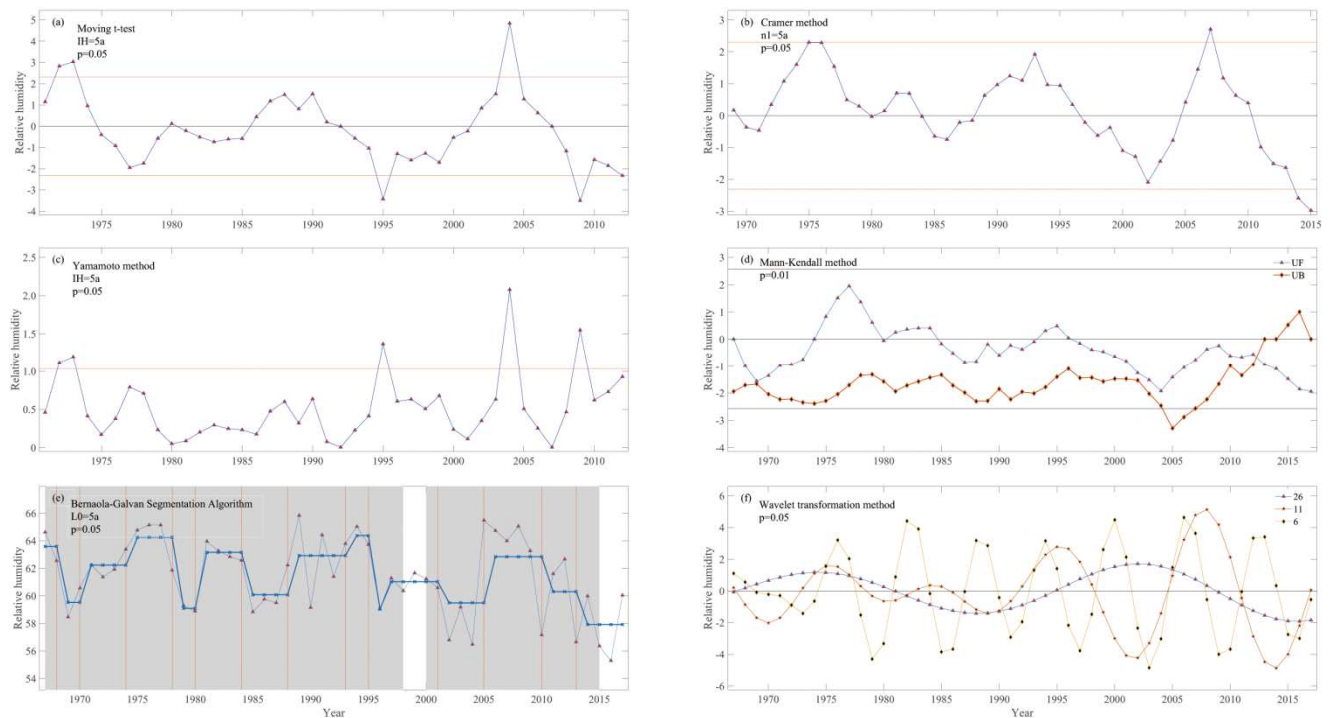


图8 1967-2017年相对湿度突变检测。

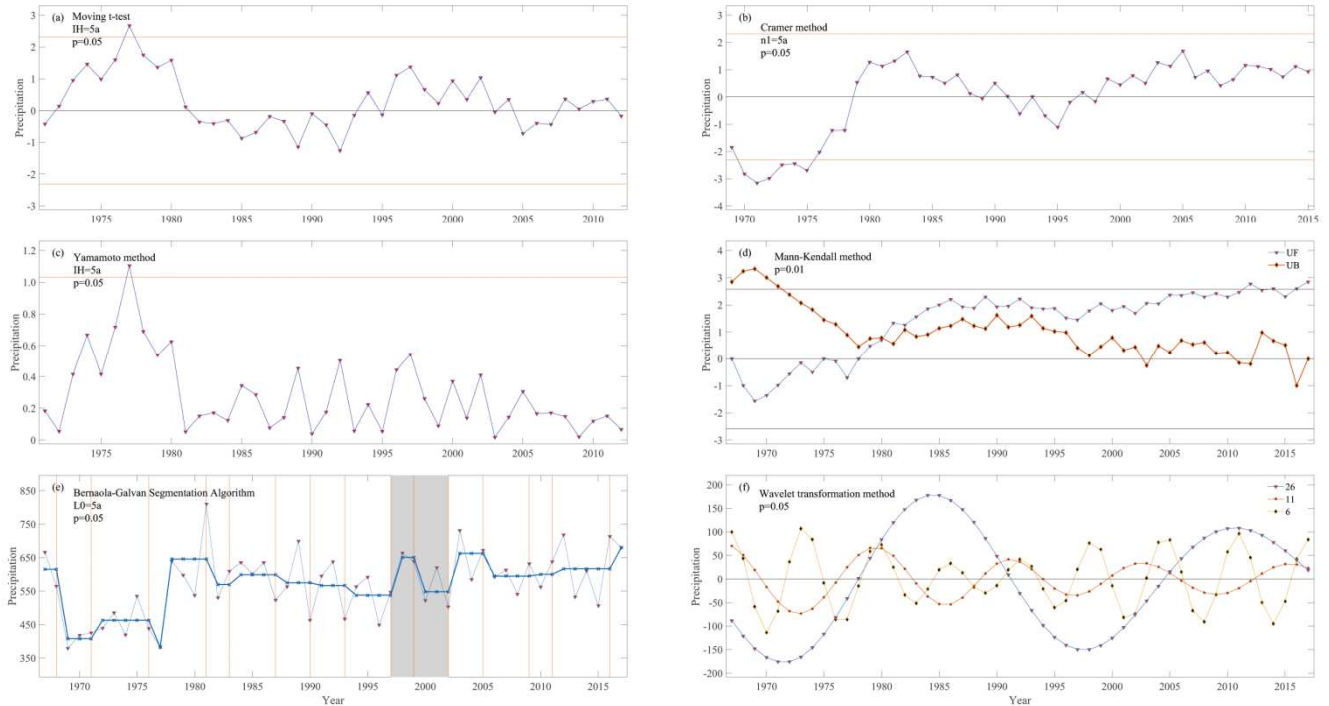


图9 1967-2017年降水突变检测。

图7为年累计日照时数的突变检验。在0.05的显著性水平下, 滑动t检验显示发生三次突变, 分别是1969年、1981年和2002年; Cramer方法显示1996-2002年间发生显著的上升突变; Yamamoto方法信噪比最大值出现在1995年, 1995-1996年间超过0.05的显著性水平, 突变显著; M-K检验UF与UB在两条临界线内出现多个交点, 分别位于1973-1974年间和1989-1990年间, 2008年后发生多次异常交叉; B-G分割算法显示两个突变密集区, 分别是1971-1977年和1993-1998年, 包含的突变时间有1972、1974、1976和1996; 小波分析当分辨尺度为26a时出现三个突变点, 通过检验发现后两个点突变显著, 为1991-1992年和2005-2006年; 11a分辨尺度下有8个突变点, 经过检验1992-1993年间发生显著突变; 6a分辨尺度下有17个突变点, 1980-1981年、2008-2009年发生显著突变。通过对六种方法进行综合考虑, 最终确定日照时数可能的突变点为1974年、1992年和2002年。

相对湿度突变检验如图8所示。滑动t检验显示四次突变, 两次上升突变位于1970-1971年和2004年左右, 两次下降突变分别位于1995年和2009年左右; Cramer方法结果显示上升突变发生在2007年左右, 下降突变出现在2013-2014年间; Yamamoto结果与滑动t检验一致; M-K检验UF与UB交点位于2012-2013年间, 之后呈下降趋势; B-G分割算法由于突变密集区域几乎涵盖所有时间段, 所以存在滑动补偿问题; 小波分析当分辨尺度为26a时出现四个突变点, 通过检验发现并无显著突变; 11a分辨尺度下有10个突变点, 经过检验1972-1973、1998-1999、2004-2005、2010-2011年间发生显著突变; 6a分辨尺度下有15个突变点, 1974-1975年、1977-1978、1980-1981、1983-1984、1995-1996、2001-2002、2004-2005年发生显著突变。通过

对六种方法进行综合考虑, 最终确定相对湿度可能的突变时间为2004-2005年。

图9为对于降水的突变检验。滑动t检验与Yamamoto方法仅显示出一次突变, 位于1977年左右; Cramer方法检测突变时间位于1970-1975间; M-K检验UF与UB交点出现在1980年, 之后几乎保持平稳; G-B分割算法突变密集区为1997-2002年, 其中1999年为突变时间; 小波分析当分辨尺度为26a时出现三个突变点, 通过检验发现1977-1978年为显著突变; 11a分辨尺度下有8个突变点, 经过检验1976-1977年间发生显著突变; 6a分辨尺度下有16个突变点, 1968-1969和2015-2016年发生显著突变。通过对六种方法进行综合考虑, 最终确定降水可能的突变时间为1977年左右。

4. 结论

(1) 近50a来气温与地表温度均发生多次波动, 但由线性拟合可以看到, 二者呈明显的上升趋势, 说明在全球气候变暖的背景下, 高原地区也是持续增温, 气温最高值出现在2010年, 为 3.3°C , 最小值为 0.4°C , 出现在1977年; 太阳短波辐射直接加热地表, 而气温升高主要源自地表长波辐射, 所以地表温度高于气温, 比较发现地表温度斜率大于气温变化斜率, 说明地表温度对于气候变暖更为敏感。日照时数是指太阳在垂直于其光线的平面上的辐射强度等于或超过 $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的时间长度, 近50a来日照差异显著, 但总体变化趋势不明显, 1990-2008年始终保持较高水平, 2009年后下降, 近年有所回升。相对湿度总体呈下降趋势, 空气变干, 然而降水量显示出微弱的上升, 这也从侧面印证了高原的变暖趋势, 由于气候变暖, 气温及土壤温度升高, 使得土壤与大气中水分不断蒸发至对流层上部, 再经

大气环流运抵其他地区。利用二次多项式对风速变化进行拟合,可以看到前30a风速波动明显,呈下降趋势,近20a基本保持稳定,稍有升高。

气温无论暖季、冷季仍呈上升趋势,冷季更为显著,但是始终保持-5℃以下,无法形成液态降水;暖季地表温度最大值可达18.1℃,最小值为12.6℃,跨度大且斜率大于年平均变化,说明气候变暖增加了极端天气事件爆发,使得温度差异更加显著;日照时数差异较小,近年来暖季波动剧烈,冷季较为平缓;相对湿度暖季明显高于冷季,暖季为68.7%-77.5%,冷季仅为34.8%-57.4%,暖季降水变化平稳,稍有增加,冷季无液态降水,而由于温度始终保持零度以下,固态积雪和土壤冰对水汽进行有效补充;冷季风速较大且波动剧烈,近年来振幅减小趋于平缓,暖季较冷季变化小,总体先降低,后基本保持平稳。

(2) 利用六种方法对1967-2017近50a玛曲地区气象要素进行突变分析,主要包括气温、地表温度、风速、日照时数、相对湿度以及降水。结果表明:气温发生两次突变,突变时间分别为1975-1976年和2000年左右,其中2000年发生显著上升突变,地表温度于2000年左右发生突变;风速于1972-1975年间发生下降突变;日照时数可能的突变点为1974年、1992年和2002年;相对湿度可能的突变时间为2004-2005年;降水可能的突变时间为1977年左右。

基金项目

国家自然科学基金(41775011);海南省自然科学基金创新研究团队项目(2017CXTD014)。

参考文献

- [1] 刘辉志,洪钟祥.青藏高原改则地区近地层湍流特征[J].大气科学,2000,24(3):289-300.
- [2] 王楠,李栋梁,张杰.青藏高原气温变化的研究进展[J].干旱气象,2010,28(3):265-269.
- [3] 吕少宁,李栋梁,文军等.全球变暖背景下青藏高原气温周期变化与突变分析[J].高原气象,2010,29(6):1378-1385.
- [4] 王少影,张宇,吕世华等.玛曲高寒草甸地表辐射与能量收支的季节变化[J].高原气象,2012,31(3):605-614.
- [5] 陈云刚,张宇,王少影等.高寒草甸湍流特征量的季节变化特征[J].高原气象,2014,33(3):585-595.
- [6] 阳坤,王介明.一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法[J].中国科学:地球科学,2008(2):243-250.
- [7] 张强,陈丽华,王润元等.气候变化与西北地区粮食和食品安全[J].干旱气象,2012,30(4):509-513.
- [8] 冯健武,刘辉志,王雷等.半干旱区不同下垫面地表粗糙度和湍流量整体输送系数变化特征[J].中国科学:地球科学,2012(1):24-33.
- [9] 张强,王胜.关于黄土高原陆面过程及其观测试验研究[J].地球科学进展,2008,23(2):167-173.
- [10] 岳平,张强,赵文等.黄土高原半干旱草地近地层湍流温湿特征及总体输送系数[J].高原气象,2015,34(1):21-29.
- [11] 杨丽薇,高晓清,惠小英等.青藏高原中部聂荣半干旱草地夏季近地层能量平衡与输送分析[J].气候与环境研究,2017,22(3):335-345.
- [12] 赵兴炳,彭斌,秦宁生等.青藏高原不同地区夏季近地层能量输送与微气象特征比较分析[J].高原山地气象研究,2011,31(1):6-11.
- [13] 李跃清,刘辉志,冯健武等.高山草甸下垫面夏季近地层能量输送及微气象特征[J].大气科学,2009,33(5):1003-1014.
- [14] Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto, Wu Xiaoming et al. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan plateau area[J].大气科学,2000,24(5):715-722.
- [15] 黄菁.中国黄土高原地区陆面过程时空变化特征的观测与模拟研究[D].中国气象科学院,2012.
- [16] 尚伦宇,吕世华,张宇等.青藏高原东部冻融过程中近地层湍流统计特征分析[J].高原气象,2011,30(1):30-37.
- [17] 马晓波,李栋梁.青藏高原近代气温变化趋势及突变分析[J].高原气象,2003,22(5):507-512.
- [18] 杨启东,左洪超,杨扬等.近地层能量闭合度对陆面过程模式的影响[J].地球物理学报,2012,55(9):2876-2888.
- [19] 朱文琴,陈隆勋,周自江.现代青藏高原气候变化的几个特征[J].中国科学:地球科学,2001(s1):327-334.
- [20] 魏凤英,曹鸿兴.中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究[J].大气科学,1995,19(2):140-148.
- [21] 邓自旺,林振山.西安市近50年来气候变化多时间尺度分析[J].高原气象,1997,16(1):81-91.
- [22] Chen T S, G Ohring G. On the relationship between clear-sky planetary and surface albedos[J].Journal of the Atmospheric Sciences,1984,41(1):156-156.
- [23] HA Panofsky, H Tenekes, DH Lenschow et al. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1977, 11(3):355-361.
- [24] JC Wyngaard, OR Cote. The Budgets of Turbulent Kinetic Energy and Temperature Variance in the Atmospheric Surface Layer[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, 28(2):190-201.
- [25] SP Oncley, T Foken, Rvogt et al. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance[J]. Boundary-layer Meteorology, 2007, 123(1):1-28.
- [26] P Sellers, F Hall, KJ Ranson et al. The boreal ecosystem-atmosphere study(BOREAS):An overview and early results from the 1994 field year[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 76(9):1549-1577.

- [27] TR Karl, RW Knight, KP Gallo et al. A New Perspective on Recent Global Warming: Asymmetric Trends of Daily Maximum and Minimum Temperature [J]. Bull.amer.meteor.soc, 1993,74(6):1007-1024.