

近 51 年云南滇中地区地面气象要素 变化特征的统计分析

郑亦佳^{1,2} 缪育聪¹ 刘树华^{1,†} 何萍^{3,†} 王姝¹

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 浙江省气象台, 杭州 310017; 3. 楚雄师范学院地理科学与旅游管理学院, 楚雄 675000; † 通信作者, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn (刘树华), heping@cxtc.edu.cn (何萍)

摘要 利用 1963—2013 年 4 个国家基本/基准站(昆明、楚雄、玉溪和曲靖)的近地面温度、相对湿度和降水量的观测资料, 对云南滇中地区近 51 年来的气象要素的变化特征进行统计分析。结果显示: 近 51 年来, 滇中地区增温趋势明显, 冬季的增温幅度最大, 昆明市作为上述滇中城市中发展最快的城市, 年增温趋势是 4 个城市中最明显的; 滇中地区年降水量呈波动减少趋势, 冬、春季降水量增加而夏、秋季减少, 昆明市年降水量的降幅最大, 楚雄市只呈微弱的上升趋势; 4 个城市年均及各季节的相对湿度均呈显著下降趋势, 各季节的降幅差别不大。通过小波分析, 发现滇中地区不同气象要素的周期变化具有一定的相关性: 在 36 年时间尺度上, 相对湿度的干(湿)中心与气温的暖(冷)中心对应; 在 16~32 年时间尺度上, 相对湿度的干(湿)中心与降水量的弱(强)中心对应。

关键词 滇中地区; 小波分析; 统计分析; 气候变化

中图分类号 P404

Analysis of Meteorological Variables in Dianzhong Region in Recent 51 Years

ZHENG Yijia^{1,2}, MIAO Yucong¹, LIU Shuhua^{1,†}, HE Ping^{3,†}, WANG Shu¹

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017; 3. The College of Geography and Tourism Management, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000; † Corresponding authors, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn (LIU Shuhua), heping@cxtc.edu.cn (HE Ping)

Abstract To understand the climate change in Dianzhong region, Yunnan Province, the near-surface observations from 1963 to 2013 in four cities (i.e. Kunming, Chuxiong, Yuxi, and Qujing) were analyzed. Significant warming trend was found in the past 51 years in all the four cities. Comparing the warming trend in different seasons, it was found that the warming rate was fastest in winter. The warming phenomenon was most significant in Kunming, which might be relevant to the urbanization there in the past decades. The annual precipitation presented a slightly decreasing trend. The precipitation increased in the dry seasons (spring and winter), while decreased in the wet seasons (summer and autumn). In the four cities, the decrease of precipitation was most significant in Kunming, while it was slight in Chuxiong. In addition, the decrease of relative humidity was found, and the difference between the seasons is not huge. The correlations between different meteorological variables can also be found through the wavelet analysis. It was found that the 36-year cycle of temperature was relevant to that of relative humidity, and the 16–32 years cycle of relative humidity was also related to that of precipitation in Dianzhong region.

Key words Dianzhong region; morlet wavelet; statistical analysis; climate change

1880—2012 年, 全球地表平均温度大约上升 0.85°C 。在此期间的增温幅度, 高纬度地区比中低纬度地区大, 冬半年比夏半年明显; 1983—2012 年是过去 1400 年来最热的 30 年^[1]。全球变暖虽有不均匀性, 但大体上呈增温趋势。然而, 降水缺乏明显的全球性趋势, 湿润地区的降水有所增加, 干旱地区的降水则有减少的趋势。

中国地区的变暖趋势与全球一致。1913 年以来, 中国地区地表平均温度上升 0.91°C 。最近 60 年气温上升尤为明显, 平均每 10 年升高约 0.23°C , 几乎是全球的两倍^[1]。中国地形复杂, 地域广阔, 又是最典型的季风气候区之一。由于自然条件的变更以及人为活动对不同区域的气候会产生不同的影响, 因此, 中国地区的气候变化具有一定的区域特征^[2-3]。国内外学者利用气候统计的分析方法, 对区域气候变化做了很多研究。Miranda 等^[4]评估了 1951—2004 年全球地表温度的变化。Jones 等^[5]和 Peterson 等^[6]分别研究了全球农村气温的变化趋势以及城市化对大陆气温变化的影响。国内学者通过分析温度的变化, 发现 20 世纪 80 年代, 中国地区的增温开始加速, 年、季平均温度均呈上升趋势, 但上升幅度不同^[7-9]。Jones 等^[10]通过分析全球的降水资料, 发现 20 世纪以来全球陆面降水已增加约 1%, 南、北半球降水的增长幅度以及降水增长发生的季节有所不同。虞海燕等^[9]通过分析 1951—2009 年 194 个气象台站的观测资料, 发现中国地区的年降水量在 20 世纪 50 年代最多, 21 世纪头 10 年代最少, 且降水分布具有明显的南北差异。赵娜等^[11]发现北京的降水有减弱的趋势, 夏季的减弱趋势最为明显。郑思轶等^[12]通过分析北京的地面气象观测资料, 发现近 40 年来北京的城市化进程已经对局地气候变化产生重要的影响。刘瑜等^[13]通过对云南 1961—2007 年的降水和气温资料进行线性趋势分析和突变检验, 发现云南的年降水量趋于减少, 但年平均气温却升高。何萍等^[14]通过分析云南楚雄市的气温、降水、相对湿度及低云量资料, 发现楚雄市的热岛效应越来越明显, 雨岛及干岛效应也逐渐显现。纪智荣等^[15]通过分析云南 1961—2010 年的气候资料, 发现 20 世纪 90 年代中期以来, 云南地区的气候呈干旱化趋势。

此外, 还有学者将小波分析应用于长期气候变化特征的分析中^[16-18]。虞海燕等^[19]利用 Morlet 小波方法分析全国日照时数的变化, 发现日照时数在

不同时间尺度的变化特征不同。郑建萌等^[20]运用 Morlet 小波方法, 对云南 10 个站的气象资料分析后发现, 云南气温的年代际变化周期是 32 年, 年降水具有 16~32 年以及 4~8 年的周期振荡。

云南省位于中国西南边陲, 境内多山, 全省范围内因海拔高度的差异造成区域气候有较大差异。滇中地区以云南中部的昆明市为核心, 半径 150~200 km, 包括曲靖市、玉溪市和楚雄彝族自治州, 共 4 个市(州)(图 1)。滇中地区位于全球最活跃的东亚季风气候区, 是孟加拉湾水汽及南海水汽输送的必经之路。以往的研究中, 对云南地区降水和温度的研究较多, 对相对湿度的研究较少。相对湿度是表征空气中水汽含量的重要物理量。大气中的水汽直接影响降水, 水汽含量(相对湿度)与水汽输送、大气环流形势、云量等密切相关^[21], 同时也是影响大气气溶胶短波辐射特性的重要因子^[22], 是全球能量平衡和水循环的重要组成部分, 其变化会深刻地影响全球气候及水资源系统的格局和演变^[23]。在了解滇中地区降水及温度变化的基础上, 对湿度的变化进行分析, 不仅可以更全面地了解该地区的气候特征, 还有助于探究温度及降水年际变化产生的原因。

本文利用滇中地区 4 个站点(昆明、楚雄、玉溪和曲靖) 1963—2013 年温度、降水和相对湿度资料, 采用统计分析方法, 对滇中地区近 51 年来主要气象要素的年际变化和季节变化以及各要素之间的相关关系进行分析。研究结果有助于进一步全面认识滇中地区的气候变化特征, 为研究滇中地区城市发展对区域气候和降水变化的影响机理研究提供基础资料, 对未来滇中地区进一步城市化的科学规划具有重要意义。

1 数据与方法

本文使用的台站气象资料是云南省气象局气候中心资料室提供的昆明、楚雄、玉溪和曲靖 4 个台站的逐日气象观测资料, 包括平均气温、降水量和相对湿度等。其中, 由于曲靖站的建站时间为 1974 年, 因此采用的气象观测资料的时间范围为 1974 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日, 其他 3 个站资料的时间范围为 1963 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日。季节依照常规划分为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月—次年 2 月)。考虑到台站海拔高度对气温资料的影响, 采取常用的

气温垂直递减率(海拔高度每上升 100 m, 气温下降 0.6°C), 将各台站的气温修正到海平面温度。

如图 1 所示, 滇中地区属于滇东高原盆地, 地表类型多样, 地形复杂, 以山地和山间盆地为主, 地势起伏较为和缓。昆明市地处云南高原中部, 总体上, 地形由北向南呈阶梯状逐渐降低, 昆明市区紧挨云贵高原最大的淡水湖泊滇池。楚雄市位于滇中地区西部, 地势西北高, 东南低。玉溪市位于滇中地区南部, 地处云贵高原西缘, 地势西北高, 东南低, 以红河为界, 其东西两侧的地貌有较大差异。曲靖市处于云贵高原中部的乌蒙山脉, 以高原山地为主, 多种地貌并存。受局地地形的影响, 滇中地区不同区域的气象要素可能呈现不同的变化特征。

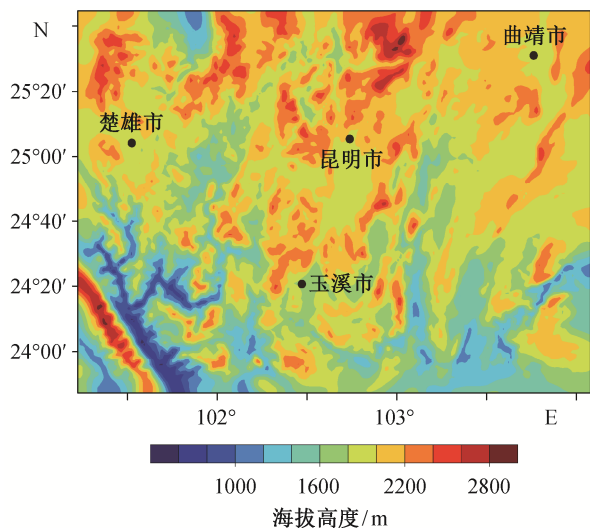


图 1 滇中地区地形分布

Fig. 1 Distribution of terrain height in Dianzhong region

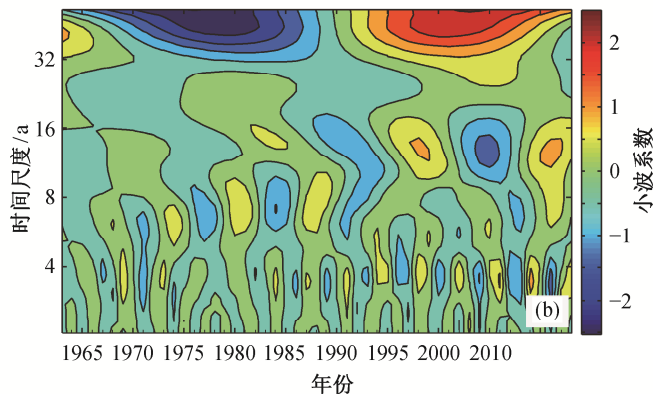
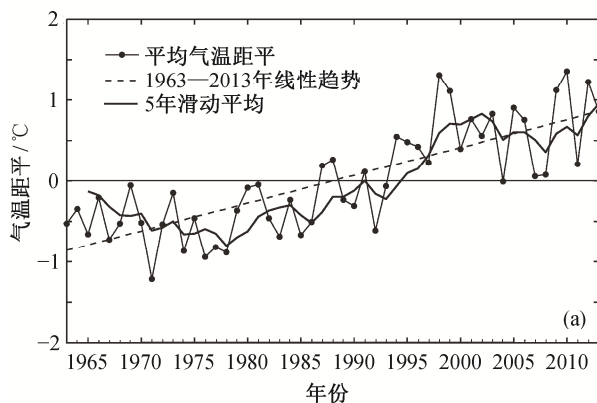


图 2 1963—2013 年滇中地区年均气温距平序列(a)及小波变换结果(b)

Fig. 2 Variation of annual temperature anomaly (a) and wavelet transform (b) in Dianzhong region during 1963—2013

为了研究各要素的总体变化趋势, 我们对各季节及年均要素距平序列进行一元线性回归^[24]、5 年滑动平均^[25]及连续的小波变换分析。一元线性回归法可以确定气象要素长期的变化趋势和变化速率, 滑动平均法可以显示气象要素历年变化总趋势, 小波变换可以分辨气象要素的时间序列在不同时间尺度上的演变特征及周期变化特征。

小波分析是在傅里叶变换的基础上发展起来的一种统计分析方法, 具有良好的局部特性, 能够将研究对象分解为交织在一起的多尺度成分, 从而捕捉到研究对象的细微特征^[26]。小波分析在数学上具有严格的突变点和很强的周期诊断能力, 因此, 小波分析广泛地应用于多尺度下气候变化的分析和研究^[27-29]。

本文选用地球物理学中常用的连续小波母函数 Morlet 小波, 它由一个无理数 e 的复指数函数和一个 Gauss 窗口的乘积构成^[30]。Morlet 小波是一个复数形式的小波, 它的实部和虚部位相相差为 $\pi/2$, 消除了实数形式子波变换系数模的振荡。Morlet 小波可以将小波变换系数的模和位相分离开, 模代表某一尺度成分的多少, 位相用来研究信号的歧义性和即时频率。另外, Morlet 小波函数的实部和虚部可以分别作为两个子波函数看待, 其实部可用来判别信号不同时空尺度的结构及其突变点的位置, 其虚部则是一个反对称小波函数^[31]。

2 结果分析和讨论

2.1 气温的变化特征

2.1.1 滇中地区年均气温的变化特征

图 2(a)给出滇中地区年均气温距平序列。可以

看出, 1963—2013 年, 滇中地区的年均气温整体上呈明显的上升趋势, 增温幅度为 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 略高于全国的增温幅度($0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 且高于西南地区的增温幅度($0.13^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[9,19]。20 世纪 90 年代中期以前, 滇中地区的年均气温距平基本上为负值, 在 70 年代中期有小幅下降, 这与 Fan 等^[32]的研究结果一致。从 80 年代后期开始, 气温呈现明显的上升趋势, 特别是在 1998 和 2009 年, 年均温度较前一年分别上升 1.25°C 和 1.30°C 。从增温趋势线来看, 近 51 年滇中地区平均气温的增温主要发生在 80 年代中期之后, 1985—2013 年增温幅度为 $0.43^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 高于近 51 年来的平均增温幅度。21 世纪以来, 尽管增温的幅度有所减缓, 但年均气温仍是所有年代中最高的。

为了解滇中地区温度的多尺度变化特征, 图 2(b)给出 1963—2013 年滇中地区气温距平的小波变换结果。图 2(b)的上半部分等值线相对稀疏, 对应较长尺度周期的振荡(低频振荡); 下半部分等值线相对密集, 对应较短尺度周期(高频振荡)^[33]。在 36 年的时间尺度上, 可以发现一冷一暖两个时期。其中, 20 世纪 80 年代初和 2000 年左右分别对应冷、暖时期的中心, 且与温度距平序列 5 年滑动平均曲线的谷、峰值位置相对应(图 2(a))。小波分析得到的冷期至暖期的变化点(20 世纪 80 年代末至 90 年代初)刚好与温度距平序列(图 2(a))的正负值切换点相对应。在稍短的时间尺度(8~16 年)上, 温度的周期性变化特征更为复杂。20 世纪 90 年代以来 12 年的周期振荡表现得较为明显, 而此前冷暖交替的周期大约为 7 年。

无论从气温距平序列, 还是小波变化图, 都可以发现自 20 世纪 90 年代中期以来, 滇中地区的气温呈增暖趋势, 这与纪智荣等^[15]的研究结果一致。

图 3 给出滇中地区昆明、楚雄、玉溪和曲靖 4 个城市的年均气温距平序列。从总体上看, 4 个城市的年均气温都呈上升趋势, 与滇中地区的整体变化趋势(图 2(a))一致。1963—2013 年间, 昆明、楚雄和玉溪 3 个城市的增温幅度分别为 $0.46^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。1974—2013 年间, 曲靖的增温幅度为 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。4 个城市中, 昆明市的增温幅度最大, 1985—2013 年间高达 $0.59^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。昆明市的城市化水平是 4 个城市中最高的, 这种高于地区平均水平的增温可能与城市化进程有关。

在研究时段内, 昆明市的气温变化与滇中地

区的变化趋势一致。温度距平在 20 世纪 90 年代以前为负值, 气温在小范围内波动, 90 年代中期开始气温距平为正。楚雄市和玉溪市的气温变化比较相似, 两个城市的气温距平在 20 世纪 80 年代中期以前均为负值, 且变化比较平缓; 之后气温逐年升高, 在 2000 年达到峰值后开始下降; 2008 年前后降至低谷, 近几年气温又有所回升。曲靖市的气温自 1974 年来一直在波动中以 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的幅度上升。从 5 年滑动平均图还可以看出, 曲靖市的气温年均距平存在 5 年左右的波动变化周期。

2.1.2 滇中地区各季节平均气温的变化特征

图 4(a)~(d)给出滇中区域近 51 年四季平均气温距平变化曲线。可以看出, 滇中地区四季的年均气温都呈上升趋势, 但增温幅度有所不同, 冬季最大, 春季次之, 夏秋较小。这种季节性的温度变化与全国的季节变化^[9]一致。在研究时段内, 滇中地区四季的增温幅度分别为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.55^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。冬季气温在年际间的波动比较明显, 夏季气温的波动最小, 其年际间的气温变化基本上在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

滇中地区春季的平均气温总体上呈上升趋势, 从 5 年滑动平均的曲线上可以看到不同年代的变化特征。20 世纪 60 年代中期至 80 年代中期, 温度的变化相对平缓, 气温仅在小范围内波动; 从 90 年代开始, 春季的气温明显增加。夏、秋季的增温趋势与春季相似, 但夏季的增温趋势不如春秋明显。冬季的气温变化呈现明显的“一谷一峰”变化趋势, 其谷值位于 20 世纪 70 年代中期, 峰值位于 90 年代末。

2.2 降水的变化特征

2.2.1 滇中地区年降水量的变化特征

图 5(a)给出的滇中地区年降水距平的变化。近 51 年来滇中地区的年降水量呈波动性变化, 且有微弱的减小趋势, 其气候倾向率为 $-1.80\text{ mm}/10\text{a}$, 低于全国的平均水平($-4.90\text{ mm}/10\text{a}$), 但略高于西南地区的平均水平($-0.93\text{ mm}/10\text{a}$)^[9]。20 世纪 80 年代以前, 滇中地区年降水量呈微弱的减小趋势; 80 年代至 90 年代中期, 年降水量维持稳定, 距平值在平衡位置附近上下波动; 90 年代末, 年降水量有所增加; 2000 年以来, 年降水量呈明显的减小趋势。其中, 滇中地区年降水量最多的年份为 1999 年。

从图 5(b)可以看出, 在较大的时间尺度上, 降水量的变化存在 32 年的周期振荡, 1963—2013 年,

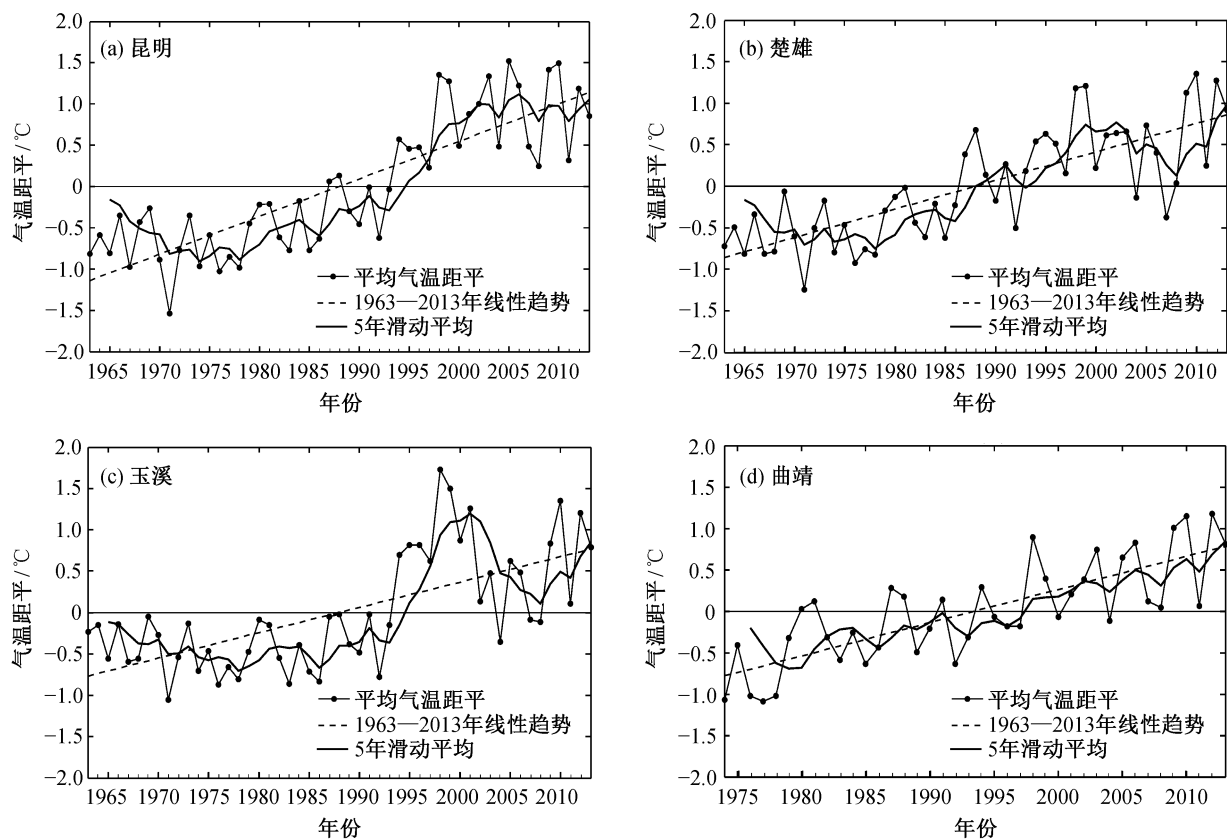


图 3 1963—2013 年昆明、楚雄、玉溪和曲靖年均气温距平序列

Fig. 3 Variations of annual temperature anomaly in Kunming, Chuxiong, Yuxi and Qujing during 1963–2013

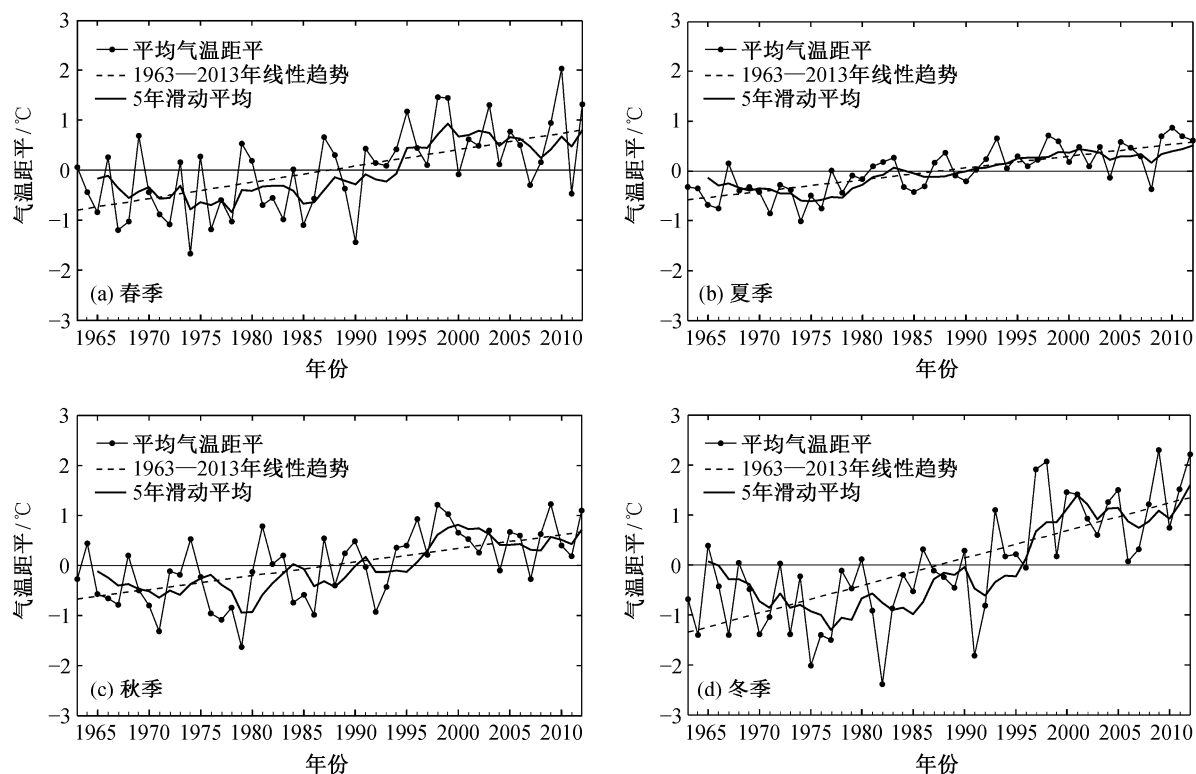


图 4 1963—2013 年滇中地区四季平均气温距平序列

Fig. 4 Variations of temperature anomaly in spring, summer, autumn and winter in Dianzhong region during 1963–2013

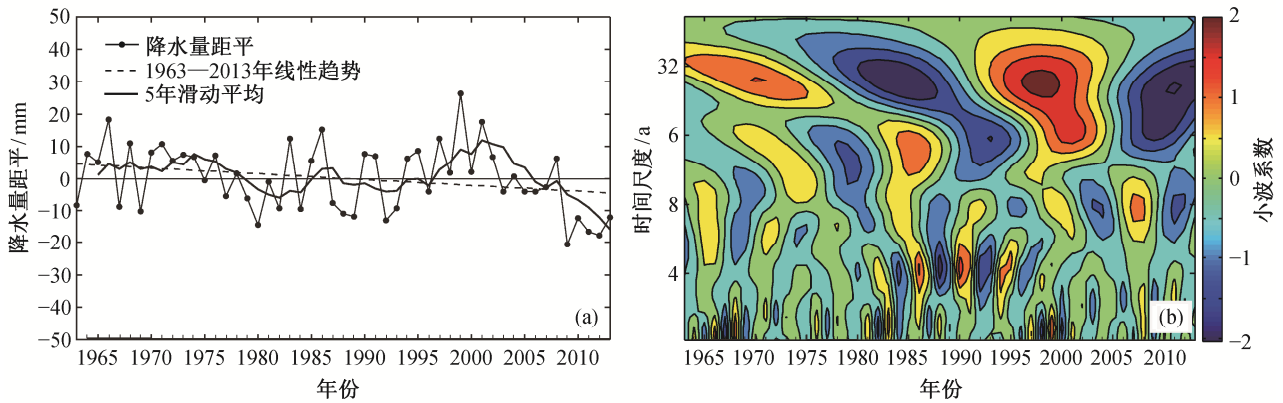


图 5 1963—2013 年滇中地区年降水量距平序列(a)及小波变换结果(b)

Fig. 5 Variation of annual precipitation anomaly (a) and wavelet transform (b) in Dianzhong region during 1963–2013

滇中地区的降水经历“多→少→多→少”的变化；20 世纪 70 年代前期、80 年代中期、2000 年和 2010 年分别对应上述 4 个时期的中心。目前，滇中地区正处于 32 年周期振荡中降水较少的时期。8~16 年较小时间尺度的降水演变相对复杂一些，其变化趋势与气温类似。以 20 世纪 90 年代初为界，90 年代以前存在 14 年左右的周期振荡，90 年代以后周期

振荡为 8 年。此外，在更小的时间尺度上还存在一些年际间的振荡，如 80 年代和 90 年代。

图 6 给出 1963—2013 年滇中地区 4 个城市的年降水距平时间序列。4 个城市中，昆明降水量减小的趋势最明显。1963—2013 年，昆明降水的气候倾向率为 $-2.80 \text{ mm}/10\text{a}$ ，与气温的变化一样，明显高于滇中地区的平均水平。与昆明不同，楚雄降水

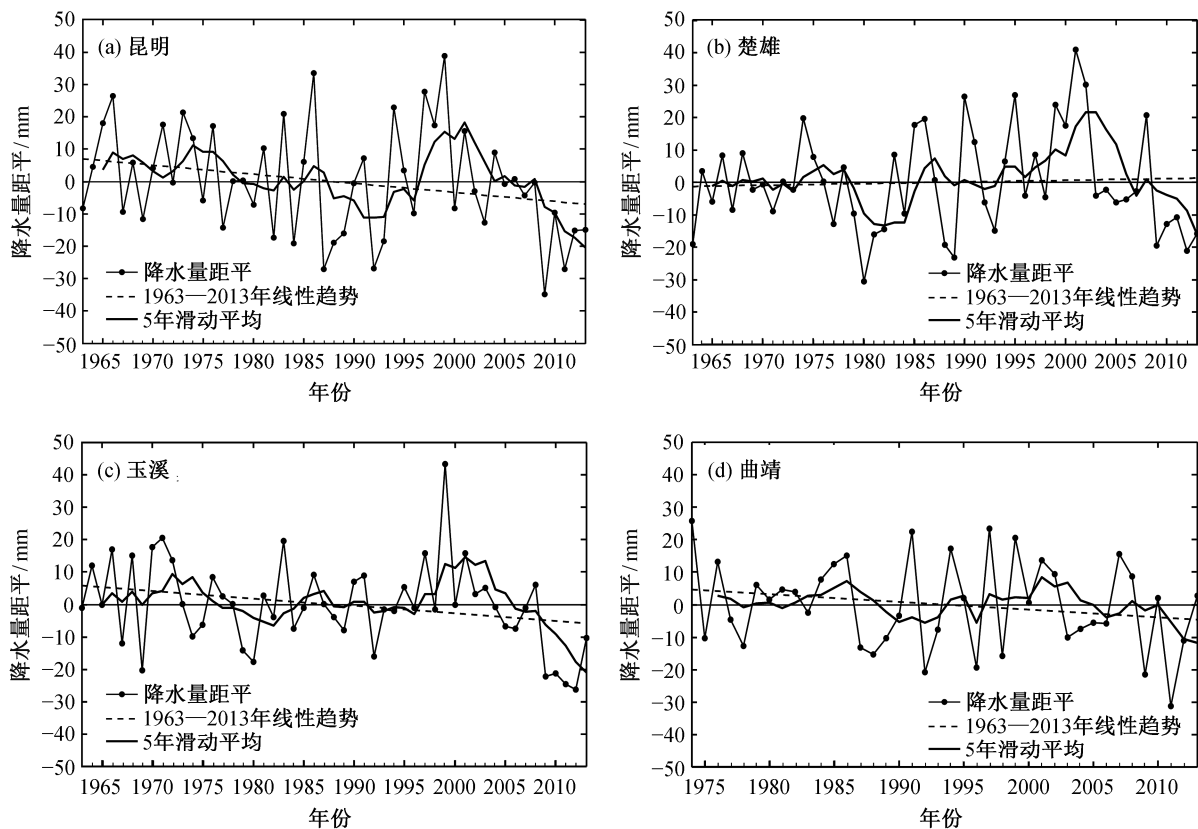


图 6 1963—2013 年滇中地区不同城市年降水量距平序列

Fig. 6 Variations of annual precipitation anomaly in Kunming, Chuxiong, Yuxi and Qujing during 1963–2013

量呈现“一谷一峰”的变化趋势,谷值位于 20 世纪 80 年代初期,峰值位于 2003 年前后。自 2004 年以来,楚雄的年降水量呈现明显的下降趋势。1963—2013 年,玉溪的年降水量在总体上也呈微弱的下降趋势,气候倾向率为 $-2.30\text{ mm}/10\text{ a}$ 。1998 年以前,玉溪的年降水量相对稳定,只在很小的范围内波动;玉溪在 1999 年达到研究时段内年降水量的峰值;此后,玉溪的降水量呈明显的下降趋势。与其他 3 个城市相同,尽管存在年际间的振荡,曲靖的年降水量也呈现微弱下降的趋势。

2.2.2 滇中地区各季节降水量的变化特征

受西南季风的影响,滇中地区冬季受干暖季风环流(北部大陆冷气团和温带西风带)控制,天气晴朗干燥;夏季受暖湿季风环流(西南和东亚夏季风)影响,雨水较多。因此,一般将 5—10 月定为雨季,11 月至次年 4 月定为干季;大致可以认为夏季和秋季为滇中地区的雨季,春季和冬季则为干季^[32,34]。图 7 给出滇中地区近 51 年来四季年降水量的距平序列。从线性趋势线可以看出,春季年降水量呈上升趋势,夏季年降水量呈下降趋势,秋季和冬季变

化不明显。春夏季(雨季)的降水距平波动明显,而秋冬季(干季)的降水距平波动相对较弱。秋季和冬季的降水量在这 51 年中没有明显的变化趋势,降水量距平在平衡位置附近波动。

滇中地区春季的降水量距平在 $\pm 40\text{ mm}$ 的范围内波动。滇中地区具有典型季风气候的特征,即全年 55%~65%的降水集中在夏季^[35]。夏季降水量年际间的波动幅度是四季中最大的。研究时段内,夏季降水量的峰值出现在 2000 年前后。2004 年以后,夏季降水明显减少。

2.3 相对湿度的变化特征

2.3.1 滇中地区年均相对湿度的变化特征

图 8(a)给出 1963—2013 年滇中地区年均相对湿度距平序列。可以看出,近 51 年滇中地区的相对湿度距平呈明显的下降趋势,气候倾向率为 $-1.57\%/10\text{ a}$,是 1951—2009 年全国年均相对湿度气候倾向率的两倍^[9,19]。近 51 年以来,滇中地区的年均相对湿度减小 8%。比较图 2(a)和图 8(a)可以看出,20 世纪 80 年代中后期,滇中地区年均气温距平从负值转为正值,而年均相对湿度距平年际变化则从正

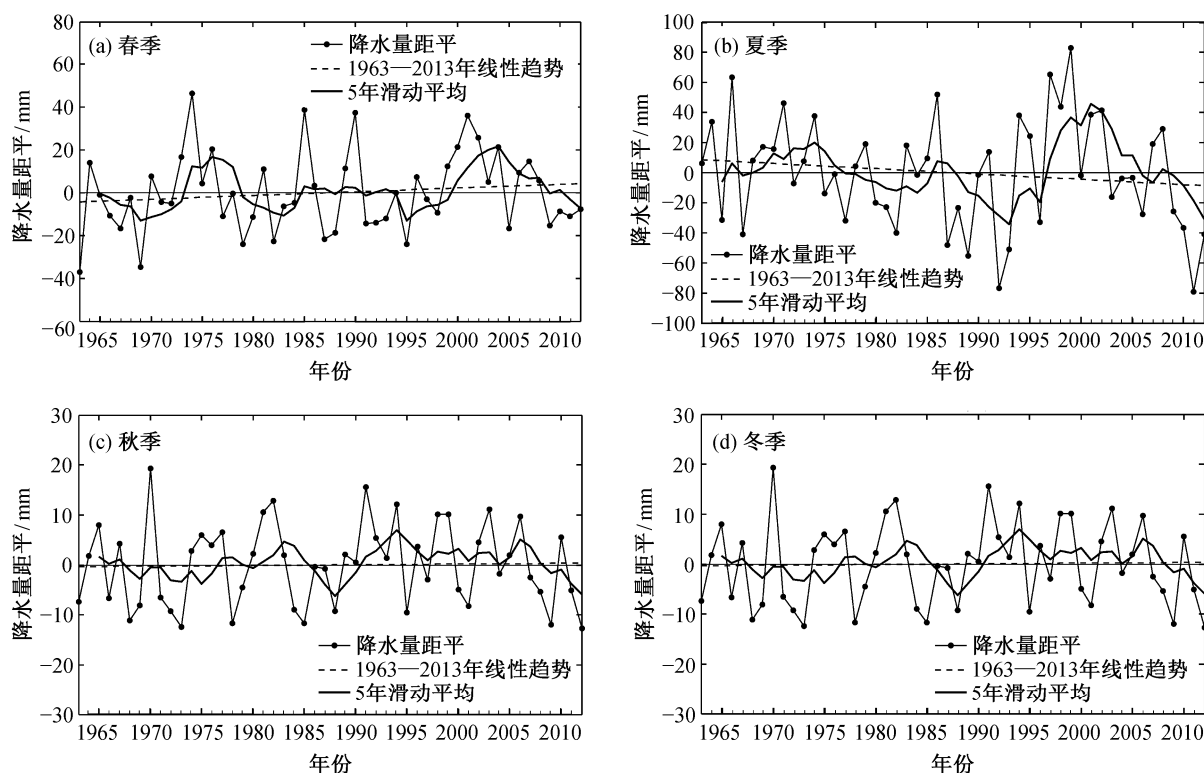


图 7 1963—2013 年滇中地区四季降水量距平序列

Fig. 7 Variations of precipitation anomaly in spring, summer, autumn and winter in Dianzhong region during 1963–2013

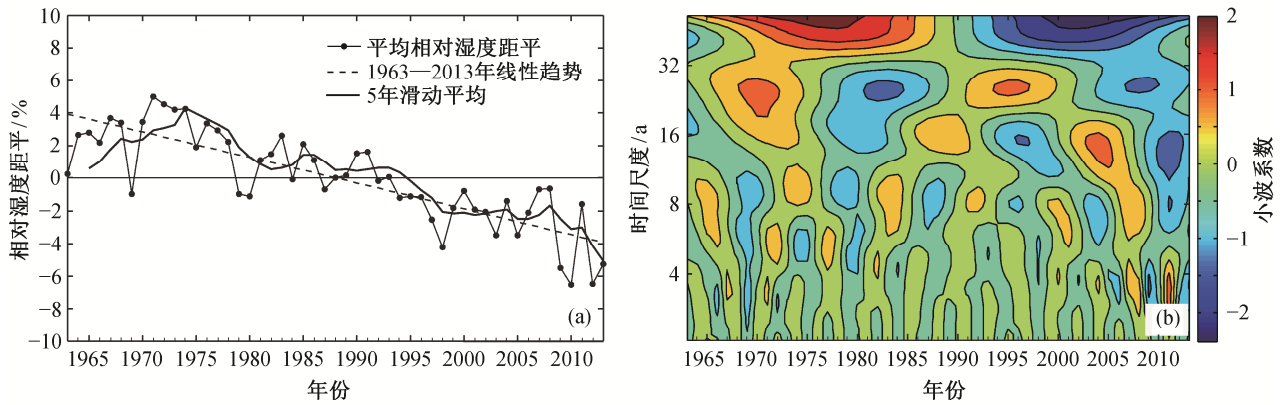


图 8 1963—2013 年滇中地区年均相对湿度距平序列(a)及小波变换结果(b)

Fig. 8 Variations of annual relative humidity anomaly (a) and wavelet transform (b) in Dianzhong region during 1963–2013

值转为负值。

图 8(b)是滇中地区年均相对湿度距平小波变换结果。在 36 年的时间尺度上, 相对湿度的变化存在一干一湿两个时期, 干(湿)中心出现的时间与气温(图 2(b))中的暖(冷)中心对应。在 16~32 年时间尺度上, 滇中地区的相对湿度呈现“两高两低”4 个

时期, 相对湿度的周期性交替变化规律与降水量的变化(图 5(b))一致。另外, 2005 年以后, 还可以发现时间尺度为 4 年的周期振荡现象。

从图 9 可以看到, 与滇中地区的总体变化趋势一致, 昆明、楚雄、玉溪和曲靖 4 个城市的年均相对湿度都呈现明显的下降趋势, 其相对湿度的变化

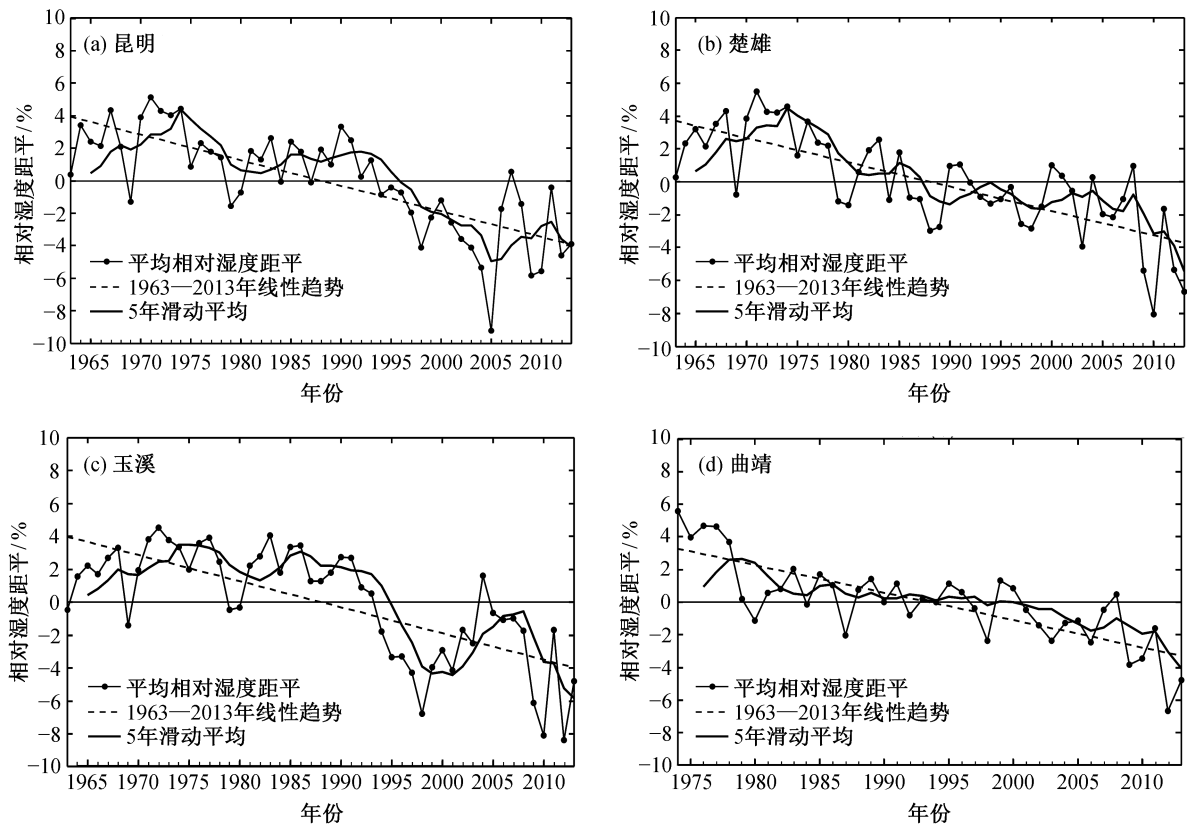


图 9 1963—2013 年滇中地区不同城市相对湿度距平序列

Fig. 9 Variations of annual relative humidity anomaly in Kunming, Chuxiong, Yuxi and Qujing during 1963–2013

率分别为 $-1.57\%/10a$, $-1.48\%/10a$, $-1.59\%/10a$ 和 $-1.68\%/10a$ 。1985 年之前, 4 个城市的年均相对湿度的距平值基本上为正, 1970 年是相对湿度较低的一年; 1985 年之后, 各个城市的相对湿度表现出不同的变化特征。

昆明和玉溪的相对湿度变化特征相似。1985—1993 年, 这两个城市的相对湿度距平值为正, 但是, 从 1994 年开始, 年均相对湿度迅速下降。玉溪的下降速度更快, 在 1998 年达到最低值, 昆明则在 2005 年达到最低值。随后, 两地的相对湿度均有所回升, 但近几年又开始下降。与这两个城市相比, 楚雄和曲靖的年均相对湿度变化相对简单, 整体上呈下降趋势。另外, 曲靖的年均相对湿度距平在 1985—1995 年相对稳定, 1995 年以后呈明显的下降趋势。

2.3.2 滇中地区各季节平均相对湿度的变化特征

图 10 给出近 51 年滇中地区四季平均相对湿度距平的年际变化, 总体上呈明显的下降趋势。各个季节的下降幅度差别不大, 分别为 $-1.32\%/10a$, $-1.53\%/10a$, $-1.59\%/10a$ 和 $-1.83\%/10a$ 。与降水的变化不同, 相对湿度距平在春、冬季的波动比夏、

秋季更明显。滇中地区春季的相对湿度在 20 世纪 90 年代以前维持在较高水平, 90 年代后期开始逐渐下降。夏、秋季节, 相对湿度的波动幅度相对较小。冬季相对湿度的下降幅度是 4 个季节中最大的, 特别是 2009 年冬季, 滇中地区的相对湿度距平达到 1963—2013 年间的最低值。

3 结论

本文通过对滇中地区 4 个城市(昆明、楚雄、玉溪和曲靖) 51 年来(1963—2013 年)的温度、降水和相对湿度进行统计分析, 得到以下结论。

1) 1963—2013 年, 滇中地区年均气温整体上呈上升趋势, 增温主要发生在近二十几年。通过小波分析发现, 在 36 年的时间尺度上, 气温的变化存在一冷一暖两个时期, 20 世纪 80 年代初和 2000 年左右分别对应冷、暖时期的中心。滇中地区 4 个城市的平均气温都呈上升趋势, 其变化趋势与该地区的整体变化一致。其中, 昆明作为城市化发展最快的城市, 增温幅度最大。滇中地区四季的平均气温都呈上升趋势, 但增温幅度有所不同, 冬季最大, 春季次之, 夏秋最小。

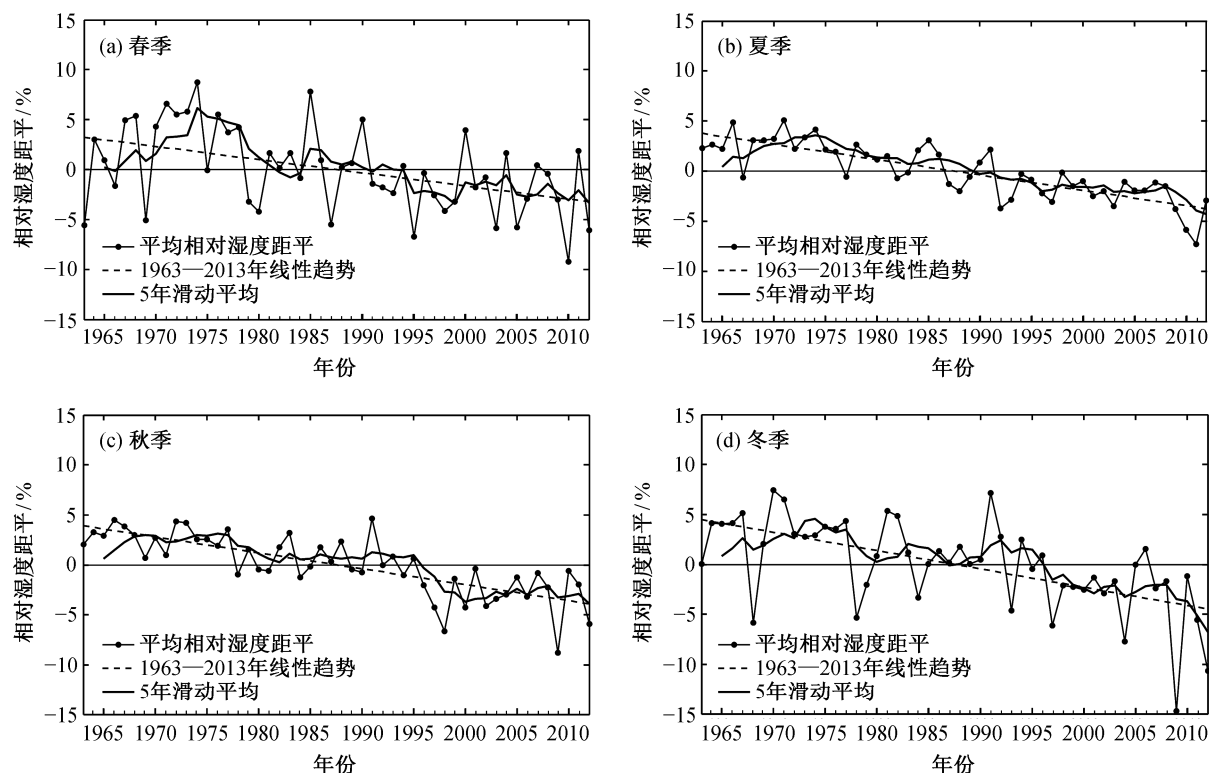


图 10 1963—2013 年滇中地区四季相对湿度距平序列

Fig. 10 Variations of relative humidity anomaly in spring, summer, autumn and winter in Dianzhong region during 1963–2013

2) 近 51 年来, 滇中地区的降水量呈波动性变化, 且有微弱的减小趋势, 其气候倾向率为 $-1.8 \text{ mm}/10\text{a}$ 。通过小波分析可以发现, 年降水存在 32 年的周期变化。在 1963—2013 年期间, 滇中地区的年降水量经历“多→少→多→少”的变化。4 个城市中, 昆明的降水量下降幅度最大, 仅有楚雄的降水量有略微上升的趋势。滇中地区近 51 年来春季和冬季的年降水量呈上升趋势, 夏季和秋季的年降水量呈下降趋势。夏季的降水距平波动幅度最大, 冬季的降水距平波动幅度最小。

3) 滇中地区近 51 年以来的年均相对湿度与降水量一致, 也呈减弱趋势。通过小波分析可以发现, 在 36 年较大时间尺度, 相对湿度表现为一干一湿两个时期; 在 16~32 年时间尺度上, 滇中地区的相对湿度在近 51 年内存在“两高两低”4 个时期。4 个城市的变化与滇中地区的平均水平较为一致, 51 年的总体趋势均为减小。四季平均相对湿度的距平变化与全年变化一致, 均为显著下降趋势, 各个季节的总体下降幅度差别不大。春、冬季年际间的波动比夏、秋季更明显。

4) 比较各要素的小波变换结果可以发现, 不同气象要素的周期变化具有一定的相关性。在 36 年以上的较大时间尺度, 相对湿度的变化呈现一干一湿两个时期, 相对湿度的干(湿)时期与气温暖(冷)时期相对应。在 16~32 年时间尺度上, 相对湿度“两高两低”4 个时期的交替出现与降水量的周期振荡一致。20 世纪 90 年代中期以来, 云南滇中地区的气候呈暖干化趋势。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014
- [2] 丁一汇, 任国玉. 中国气候变化科学概论. 北京: 气象出版社, 2008
- [3] 卢爱刚, 康世昌, 庞德谦, 等. 全球升温下中国各地气温变化不同步性研究. 干旱区地理, 2009, 32(4): 506-511
- [4] Miranda P M A, Tome A R. Spatial structure of the evolution of surface temperature (1951-2004). Climatic Change, 2009, 93: 269-284
- [5] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. Nature, 1990, 347: 169-172
- [6] Peterson T C, Gallo K P, Lawrimore J, et al. Global rural temperature trends. Geophysical Research Letters, 1999, 26(3): 329-332
- [7] Yi Y H, Wang S W. Abrupt warming of global climate in the 1980s. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(20): 1713-1716
- [8] Shi Y, Shen Y, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China. Climatic Change, 2007, 80: 379-393
- [9] 虞海燕, 刘树华, 赵娜. 1951—2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 302-316
- [10] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. International Journal of Climatology, 1996, 16(4): 361-377
- [11] 赵娜, 刘树华, 虞海燕. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析. 大气科学, 2011, 35(2): 183-195
- [12] 郑思轶, 刘树华. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响. 气候与环境研究, 2008, 13(2): 123-133
- [13] 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 云南近 46 年降水及气温变化趋势的特征分析. 灾害学, 2010, 25(1): 39-44
- [14] 何萍, 李宏波, 黄惠. 1960—2009 年云南高原楚雄市气候年代际变化特征及城市气候分析. 地理科学进展, 2011, 30(1): 65-72
- [15] 纪智荣, 黄中艳, 谢国清. 1961—2010 年云南干湿气候变化. 气象科技, 2013, 41(6): 1073-1079
- [16] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 中国东北地区近百年气温序列的小波分析. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 122-125
- [17] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析. 地理研究, 2009, 28(2): 354-362
- [18] 马明敏, 姜晓艳, 刘树华, 等. 近 47 年城市化发展对沈阳区域局地气候的影响研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(1): 108-114
- [19] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 我国近 59 年日照时数变化特征及其与温度、风速、降水的关系. 气候与环境研究, 2011, 16(3): 389-398

- [20] 郑建萌, 任菊章, 张万诚. 云南近百年来温度雨量的变化特征分析. 灾害学, 2010, 25(3): 24-31
- [21] 倪惠, 杨雪艳. 长春市空气相对湿度的气候特征分析. 吉林气象, 2001(3): 12-13
- [22] 罗云峰, 吕达人, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征. 大气科学, 2002, 26(6): 721-730
- [23] 蒋冲, 王飞, 喻小勇, 等. 秦岭南北近地面水汽时空变化特征. 生态学报, 2013, 33(12): 3805-3815
- [24] 陈少勇, 王劲松, 石圆圆, 等. 中国东部季风 1961—2006 年年均气温变化特征. 资源科学, 2009, 31(3): 462-471
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版, 2009
- [26] Clemen T. The use of scale information for integrating simulation models into environmental information systems. Ecological Modeling, 1998, 108: 107-113
- [27] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 503-509
- [28] 李春强, 杜毅光, 李保国. 1965—2005 年河北省降水量变化的小波分析. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1340-1344
- [29] 李春梅, 李双成, 王红亚. 贵州麦岗水库小流域降水变化特征的小波分析. 地理科学进展, 2012, 31(1): 32-39
- [30] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 79(1): 61-78
- [31] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究. 北京: 气象出版社, 1999
- [32] Fan Z X, Bräuning A, Thomas A, et al. Spatial and temporal temperature trends on the Yunnan Plateau (Southwest China) during 1961-2004. International Journal of Climatology, 2011, 31(14): 2078-2090
- [33] 刘德, 李永华, 何卷雄. 重庆市夏季气温及降水变化的小波分析. 高原气象, 2003, 22(2): 173-178
- [34] 何云玲, 鲁枝梅. 近 60 年昆明市气候变化特征分析. 地理科学, 2012, 32(9): 1119-1124
- [35] 解明恩, 张万诚. 云南短期气候预测方法与模型. 北京: 气象出版社, 2000