

赤曲, 周顺武, 多典洛珠, 等. 2020. 1961~2017 年雅鲁藏布江河谷地区夏季气候暖干化趋势 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 281-291. CHI Qu, ZHOU Shunwu, DUODIAN Luozhu, et al. 2020. Warming and Drying Trend of Summer Climate along the Yarlung Zangbo River Valley Area from 1961 to 2017 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (3): 281-291. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19004

1961 ~ 2017 年雅鲁藏布江河谷地区夏季 气候暖干化趋势

赤曲^{1,2} 周顺武¹ 多典洛珠^{1,3} 王传辉⁴ 孙阳¹

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/资料同化研究与应用中心, 南京 210044
2 西藏自治区气象台, 拉萨 850000
3 拉萨市气象台, 拉萨 850000
4 安徽省气象局, 合肥 230061

摘要 基于 1961~2017 年青藏高原腹地雅鲁藏布江河谷地区 4 个站 (拉萨、日喀则、泽当和江孜) 夏季 (6~8 月) 月平均气温、降水和相对湿度等观测资料, 分析了该地区夏季气候年际和年代际演变特征, 并探讨了气温、降水和相对湿度在年际和年代际时间尺度上的相互关系以及与总云量和地面水汽压的联系。结果表明: (1) 1961~2017 年该地区夏季气候出现了暖干化趋势。气温 (相对湿度) 显著升高 (下降), 降水趋势变化不明显; 本世纪初气温 (相对湿度) 均发生了显著的突变。(2) 该地区夏季气候因子间在年际和年代际时间尺度上存在密切关系: 气温与相对湿度和降水均存在明显的负相关, 降水与相对湿度为正相关。(3) 该地区夏季气候因子间的年际和年代际变化与同期总云量和地面水汽变化有关。1961~2017 年总云量持续减少是气温显著升高的主要原因之一, 气温的显著升高和降水变化不明显又造成了相对湿度的显著下降。

关键词 雅鲁藏布江河谷 气候 年际和年代际变化 暖干化 总云量 地面水汽压

文章编号 1006-9585(2020)03-0281-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19004

Warming and Drying Trend of Summer Climate along the Yarlung Zangbo River Valley Area from 1961 to 2017

CHI Qu^{1,2}, ZHOU Shunwu¹, DUODIAN Luozhu^{1,3}, WANG Chuanhui⁴, and SUN Yang¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Joint Center for Data Assimilation Research and Applications, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2 Meteorological Observatory of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000
3 Lhasa Meteorology Bureau, Lhasa 850000
4 Anhui Provincial Meteorological Bureau, Hefei 230061

Abstract Based on observations of monthly mean temperature, precipitation, and relative humidity at Lhasa, Shigatse, Zedang, and Jiangzi stations over the Yarlung Zangbo River valley in the hinterland of the Tibetan Plateau in the past 57

收稿日期 2019-01-11; 网络预出版日期 2019-08-27

作者简介 赤曲, 男, 1983 年出生, 硕士研究生, 主要从事青藏高原气象学研究。E-mail: 471749976@qq.com

通讯作者 周顺武, E-mail: zhou@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41765012、41175081、41605039

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41765012, 41175081, and 41605039)

years (1961–2017), the evolution characteristics of interannual and interdecadal variations of the climate series in the region are analyzed. The relationships between the climate series and their connections to the total cloud cover and surface water vapor pressure during the same period on interannual and interdecadal scales are also discussed. The results show the following: (1) In the past 57 years, the summer climate in the region has exhibited a trend of warming and drying. The temperature (relative humidity) increased (decreased) significantly, and the precipitation trend is not obvious. (2) A close relationship exists between the summer climate factors in the region and the interannual and interdecadal variations: A significant negative correlation exists between temperature and relative humidity (precipitation), while a significant positive correlation exists between precipitation and relative humidity; (3) The interannual and interdecadal variations of summer climatic factors in the region are related to the total cloud cover and surface water vapor changes over the same period. The continuous reduction of the total cloud cover in the past 57 years is one of the main causes of the significant increase in temperature; however, the significant increase in temperature and the change in precipitation do not cause a significant decrease in relative humidity.

Keywords Yarlung Zangbo River valley, Climate, Interannual and interdecadal variation, Warming and drying, Total cloud cover, Surface water vapor pressure

1 引言

IPCC 第五次报告指出 (IPCC, 2013), 自工业革命以来, 全球经历着以变暖为主要特征的气候变化。1901~2012 年全球陆地和海洋气温大约升高了 0.89°C; 气候变暖对全球或区域水资源、生态系统和人类健康等自然系统和人类社会产生了重要影响。青藏高原 (简称高原) 平均海拔超过 4000 m (伸入对流层中层), 面积约为 240 万 km² (约占我国陆地面积的 1/4), 加之其复杂的地形地貌, 形成了独特的高原气候。作为气候变化的“敏感区”, 高原气候对气候变化的响应具有一定的超前性 (汤懋苍和李存强, 1992), 也是气候变化的“启动区” (冯松等, 1998; 李潮流和康世昌, 2006)。因此一直以来高原气候变化倍受关注。

最新研究进一步证实了高原趋于增暖的事实 (郑然等, 2015; 焦洋等, 2016; 吴成启和唐登勇, 2017)。由于高原面积广以及降水的空间差异明显 (汤懋苍等, 1998; 李林等, 2010), 高原降水趋于增多还是减少一直存在较大的争议 (韦志刚等, 2003; 丁一汇和张莉, 2008), 但总体上呈增多趋势 (姚莉和吴庆梅, 2002; 吴绍洪等, 2005; 李晓英等, 2016)。有关高原干湿状况的研究表明, 高原整体趋于暖湿化, 相对湿度呈升高趋势 (吴绍洪等, 2005; 卢爱刚, 2013)。

西藏高原 (简称西藏) 作为高原的主体, 近几十年增暖明显 (徐宗学等, 2007; 戴睿等, 2012; 杨春艳等, 2014); 同时期西藏降水整体趋于增多, 但不显著 (杜军和马玉才, 2004; 杨志刚等, 2014; 杨春艳等, 2014)。关于西藏干湿状况, 学者认为有趋

于湿润化的特点。徐宗学等 (2007) 基于西藏 25 个气象站资料, 分析了 1961~2001 年相对湿度变化趋势, 指出年平均相对湿度呈升高趋势。杨春艳等 (2014) 分析西藏 38 个气象站资料后, 发现 1961~2010 年相对湿度出现上升趋势。

以往针对高原气候的研究多侧重于整体气候变化, 很少涉及典型区域气候。雅鲁藏布江中游河谷地区 (简称沿江) 地处高原腹地, 是西藏的经济和文化中心。根据旱涝程度对西藏气候进行区域划分, 认为沿江是对旱涝异常敏感的区域 (周顺武等, 2000; 普布卓玛和周顺武, 2002)。周顺武等 (2001) 基于沿江 4 个气象站 (拉萨、日喀则、泽当和江孜) 42 年的观测资料, 分析了 1957~1998 年沿江夏季气温和降水的变化特征, 指出该地区夏季显著增温的同时, 降水呈明显的下降趋势。同样基于这 4 个站的资料, 李海东等 (2010) 发现在 1973~2007 年期间, 沿江年平均气温上升明显, 年降水增加趋势不明显。同时以往研究主要关注气温和降水 2 个主要因子, 很少与其他因子一起综合讨论, 也缺少气候因子间相互关系的分析。本文以沿江作为典型研究区域, 选取多个气候因子, 利用最新的观测资料, 采用多种统计诊断方法分析该地区夏季气候的多时间尺度变化特征; 同时探讨各气候因子在年际和年代际时间尺度上联系以及与云量和地面水汽压之间关系。

2 资料和方法

本文采用西藏自治区气象局信息网络中心整编提供的西藏常规气象站的月值资料, 选取沿江的拉

萨、泽当、日喀则和江孜 4 个气象站（站点位置见图 1）夏季（6~8 月）的月平均气温、降水和相对湿度以及总云量和地面水汽压资料。由图 1 并结合站点的信息表（表 1）可知，4 个站均位于雅鲁藏布江中游河谷；各站海拔均在 3500 m 以上，但海拔差 < 500 m，各站基本处在同一纬度，东西直线距离不超过 300 km，属于同一气候区（林振耀和赵昕奕, 1996）。鉴于 4 个站建站时间的不同，1961 年以后资料较为完整可靠，故选取 1961~2017 年上述 4 个站夏季资料，并通过算术平均建立沿江夏季各气候因子的时间序列。

利用一元线性回归和滑动趋势系数来分析各气候因子长期变化趋势；其中滑动趋势系数从 1961 年开始计算直到记录结束，增量为 1 a，最短滑动窗口为 5 a（Guo et al., 2017）。使用 Morlet 小波分析气候序列的周期特征（Torrence and Compo, 1998）。选用 10 a 滑动 t 检验和累积距平综合分析气候序列的突变特征（周顺武等, 2001）。采用相关分析法分析各气候因子在年际和年代际变化上相互关系（魏凤英, 2007; 黄嘉佑和李庆祥, 2015）。此外，提取气候序列的年代际信号时采用了 9 点高斯滤波（蓝柳茹, 2016）。文中统计显著性检验均采用 t 检验方法（黄嘉佑和李庆祥, 2015）。

3 沿江夏季气候的年际及年代际变化特征

3.1 沿江夏季气温的年际和年代际变化特征

为了揭示近 57 a 沿江夏季气温的演变特征，图 2 给出了 1961~2017 年沿江夏季气温距平序列及对应的滑动趋势系数。由图 2a 可见，沿江夏季气温（柱状）具有明显的年际变化特征，小波分析结果（图略）显示其存在显著准 3 a 的年际振荡（通过了 95% 的信度水平）；同时近 57 a 沿江夏季气温呈显著增暖趋势（粗实线），在 25 a 以上时间窗口对应的所有基准年里均通过了 95% 的信度检验（图 2b），其气候倾向率为 $0.32^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，高于 1951~2002 年全国年平均增温率 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ （任国玉等, 2005），也高于 1961~2010 年高原年平均增温率 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ （吴成启和唐登勇, 2017），更明显高于该地区近 42 a（1957~1998 年）夏季增温率 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ （周顺武等, 2001）。同时由图 2a 中的气温距平序列（柱状）和 9 点高斯滤波曲线（虚线）可见，沿江夏季气温存在明显的年代际特征：即 1960 年代初期到 1980 年代初期处于偏冷期，1980 年代中期到 2000 年代初逐步趋暖，进入

表 1 雅鲁藏布江河谷地区 4 个气象站信息

Table 1 Information of the four meteorological observatories along the Yarlung Zangbo River valley area

站名	经度	纬度	海拔高度/m	建站时间
拉萨	91.13°E	29.67°N	3650.1	1955年1月
日喀则	88.88°E	29.25°N	3837.0	1955年12月
泽当	91.77°E	29.25°N	3553.2	1956年9月
江孜	89.60°E	28.92°N	4041.0	1956年11月

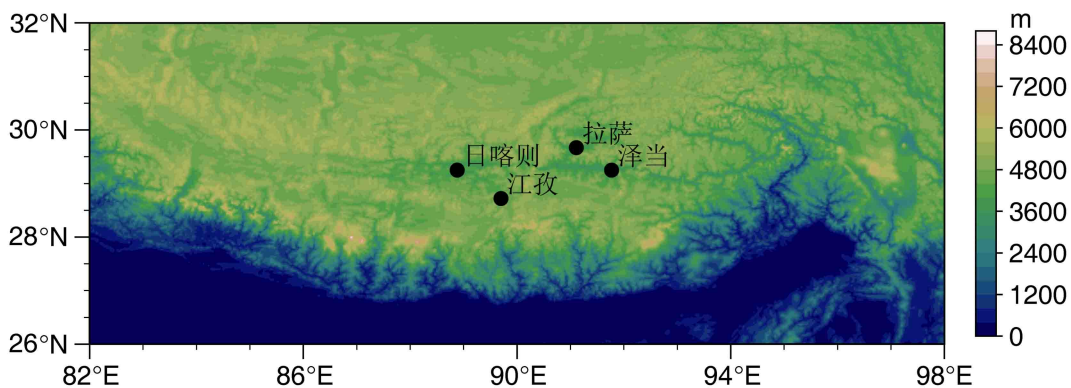


图 1 雅鲁藏布江河谷地区 4 个气象站位置分布及周围地形（单位：m）

Fig. 1 Locations and surrounding terrain (m) of the four stations along the Yarlung Zangbo River valley area

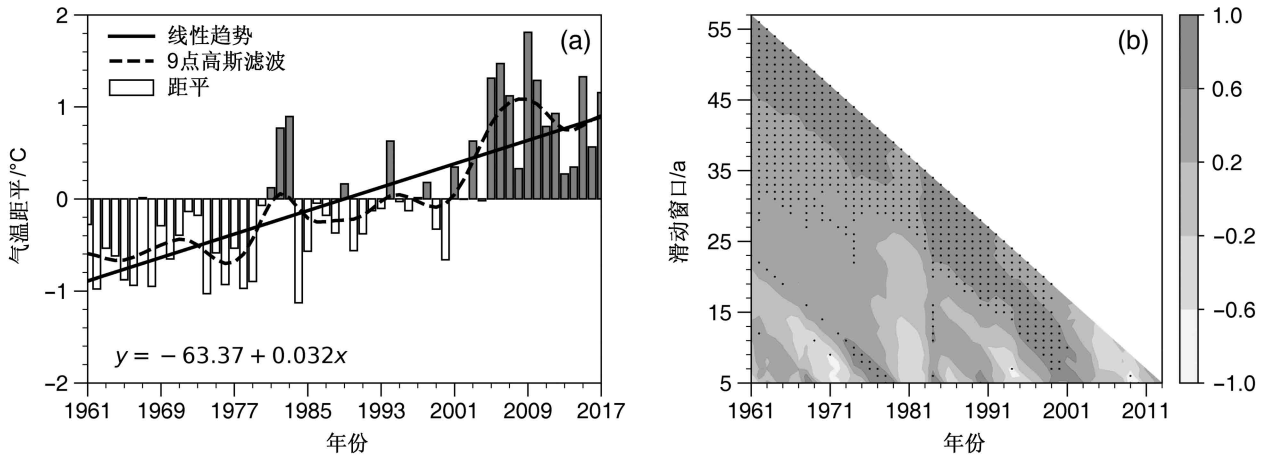


图2 (a) 1961~2017年雅鲁藏布江河谷地区夏季气温距平序列(柱状, 单位: °C)及(b)对应的滑动趋势系数(打点区表示通过95%的信度检验)

Fig. 2 (a) Summer temperature anomaly series (bars, units: °C) and (b) corresponding sliding trend coefficient (dotted areas are for values exceeding the 95% confidence level) along the Yarlung Zangbo River valley area from 1961 to 2017

本世纪后处于明显偏暖期, 且2001~2010年间增温更加明显, 随后近5a略有下降(但未通过信度检验)。

以上分析表明沿江夏季气温存在显著的增暖趋势, 那么是否存在突变? 为此, 首先计算该时间序列的10a滑动的 t 统计量, 并进行显著性检验, 同时计算累积距平值。图3给出了沿江夏季气温序列10a滑动的 t 检验和累积距平曲线。由图可知, 滑动 t 统计量最小值出现在2004年, 且通过了99%信度检验, 说明2004年前后的气温均值存在着明显的差异; 结合累积距平曲线可见, 累积距平自1961~2004年均一直下降, 随后一直上升, 并且在2004年出现了明显的转折。由此可知, 本世

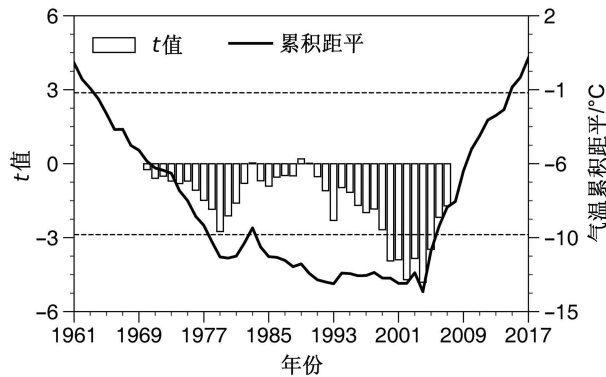


图3 雅鲁藏布江河谷地区夏季气温序列10a滑动 t 检验(柱状)和累积距平(曲线, 单位: °C)(虚线表示99%的信度水平线)

Fig. 3 The 10-year moving t -test (the bar) and cumulative departure (curve, units: °C) of summer temperature along the Yarlung Zangbo River valley area (the dashed lines indicate 99% confidence level)

纪初沿江夏季气温发生了显著的暖突变。

3.2 沿江夏季降水的年际和年代际变化特征

图4给出了1961~2017年沿江夏季降水距平序列及对应的滑动趋势系数。由图4a可见, 沿江夏季降水具有明显的年际振荡, 小波分析结果(图略)显示其存在准4a的周期特征(通过了95%的信度水平); 同时近57a沿江夏季降水显示出微弱的增多趋势(但不显著), 其气候倾向率为3.12 mm/10 a, 这与周顺武等(2001)指出的1957~1998年沿江夏季降水呈下降趋势的结论有所相悖, 这主要是分析时段不同造成的。进一步结合降水距平序列、9点高斯滤波曲线(图4a)及滑动趋势系数(图4b)发现, 沿江夏季降水存在明显的年代际变化: 即1960年代中期到1980年代中期为少雨期, 随后降水趋于增多, 至本世纪初均为多雨期; 2001~2012年为少雨期; 近5a降水有所增多。

3.3 沿江夏季相对湿度的年际和年代际变化特征

图5给出了1961~2017年沿江夏季相对湿度距平序列及对应的滑动趋势系数。由图5a可知, 近57a沿江夏季相对湿度呈现显著下降趋势, 其下降率为-1.39%/10 a(通过了95%的信度检验); 且进入本世纪后下降趋势更加突出, 这与近10a高原东部相对湿度显著减少的结论相一致(谢欣汝等, 2018)。进一步由相对湿度距平序列、9点高斯滤波曲线(图5a)以及对应的滑动趋势系数(图5b), 可以看出, 在年代际时间尺度上沿江夏季1960年代初期至2000年代初期均为相对高湿期, 进入本世纪后一直处于相对干燥期。

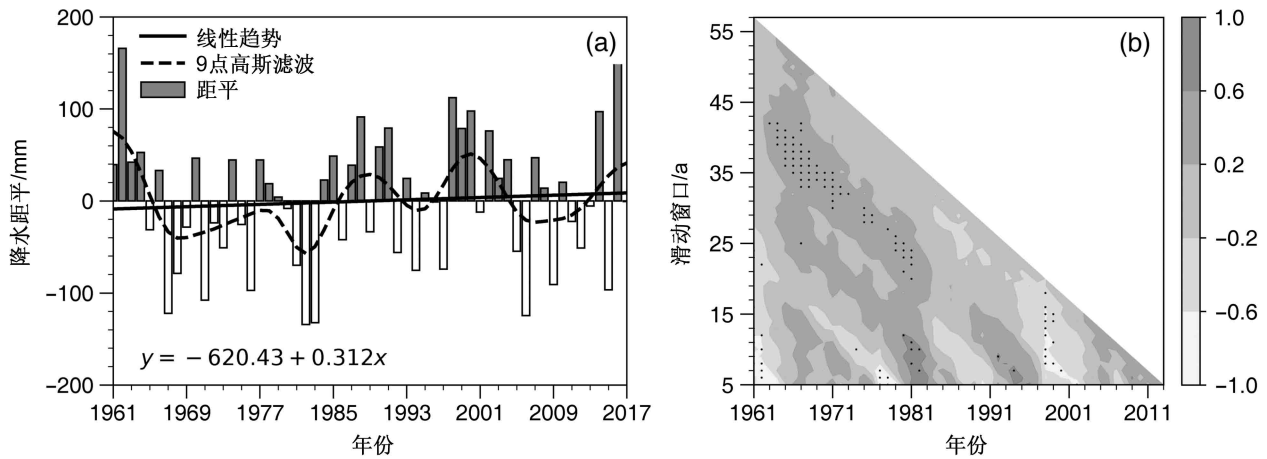


图 4 同图 2，但为降水量距平序列（单位：mm）

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the precipitation anomaly (mm)

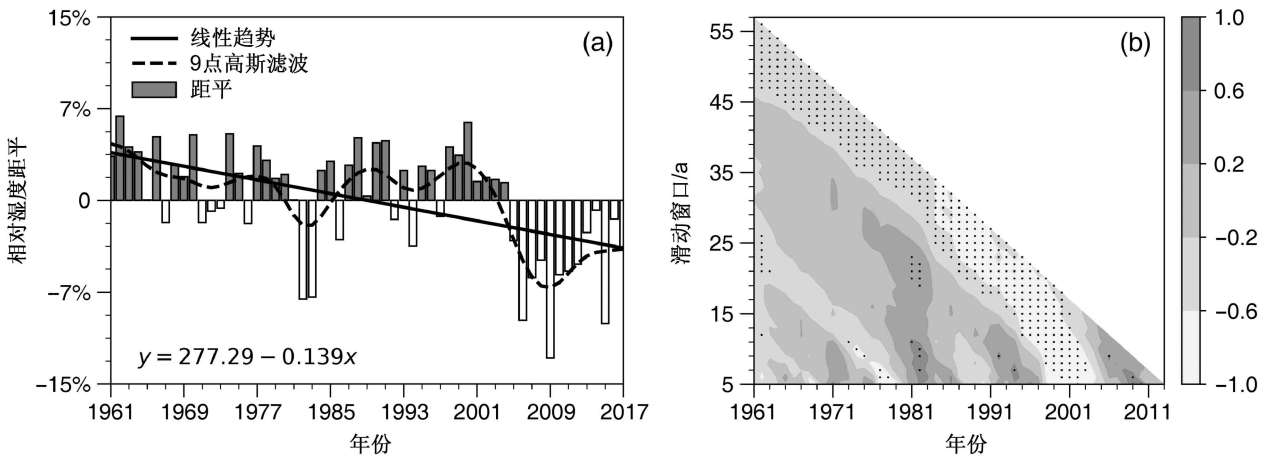


图 5 同图 2，但为相对湿度距平序列（单位：%）

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the relative humidity anomaly (%)

为了比较沿江夏季相对湿度在不同年代的差异。图 6 给出了沿江夏季相对湿度序列 10 a 滑动 t 检验和累积距平曲线。如图所示，滑动 t 统计量在 1981 年出现了正值到负值的转变（未通过信度检验），相应的累积距平曲线也出现了由持续上升到小幅下降的转折。说明沿江夏季相对湿度在 1980 年代经历了相对高湿期到相对干燥期的年代际转折，但不显著；而显著的年代际跃变出现在本世纪初，2004 年为 t 统计量最大值年，且通过了 99% 信度检验；该年累积距平值也发生了前期持续升高到随即下降的明显转变。由此可判断出，沿江夏季相对湿度在本世纪初同气温一道发生了显著的气候突变。

由以上分析可知，沿江夏季气候普遍具有 3~4 a 的年际振荡；在年代际时间尺度上，沿江夏季气候 1980 年代初和 2000 年代初均发生了年代际

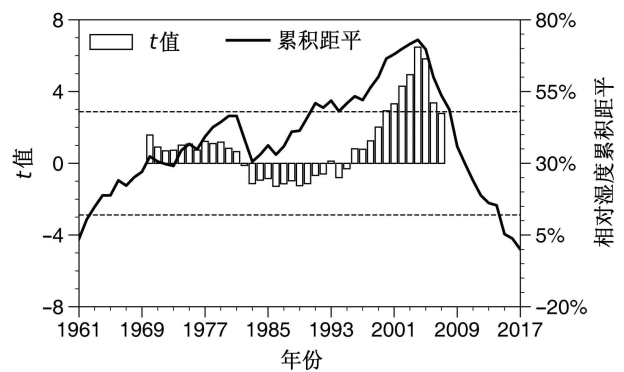


图 6 同图 3，但为相对湿度序列（单位：%）

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for relative humidity (%)

转折；尽管沿江夏季降水变化趋势不明显，但由于气温显著升高和相对湿度显著下降，近 57 a 沿江夏季气候存在明显的暖干化趋势，这种暖干化趋势进入本世纪后有所加剧。

4 沿江夏季各气候因子在年际和年代际时间尺度上的联系

降水和气温作为表征一个地区气候状况的最基本的因子,在年际和年代际时间尺度上存在显著的相关性(张素琴等,1994;周晓霞等,2007);而相对湿度作为表征干湿状况的主要气候因子,与降水和气温的变化有着密切的联系(周顺武等,2015)。以下分析沿江夏季气温、降水和相对湿度在年际和年代际时间尺度上的关系。

鉴于沿江夏季各气候因子存在不同变化趋势,首先对上述原始标准化序列去除线性趋势(简称无趋势序列),再对无趋势序列进行9点高斯滤波(简称滤波序列),图7a和图7b分别为1961~2017年沿江夏季各气候因子无趋势序列以及滤波序列。在年际时间尺度上沿江夏季气温与降水存在

反位相变化(图7a),气温的高值年对应降水低值年,呈显著负相关(相关系数 $r=-0.58$,显著水平 $p<0.01$);在年代际时间尺度上气温与降水存在反位相关系,气温高值期对应着降水低值期,亦呈显著的负相关($r=-0.4$, $p<0.01$)。

由图7a、图7b可知,沿江夏季相对湿度和降水在年际和年代际变化上均存在较高的同步性,相对湿度随降水变化而波动,呈显著的年际正相关($r=0.8$, $p<0.01$)和显著的年代际正相关($r=0.69$, $p<0.01$)。这主要是降水的增加有利于地面蒸发,进一步导致相对湿度的增加,空中水汽含量的增多为降水提供水汽条件。而相对湿度与气温表现为反位相变化关系,气温正位相对应相对湿度负位相,呈显著的年际负相关($r=-0.77$, $p<0.01$)和显著的年代际负相关($r=-0.84$, $p<0.01$)。一方面,相对湿度的增加通过降水的增多导致气温偏低;另一方面,相同水汽含量的情况下,气温的升高空气

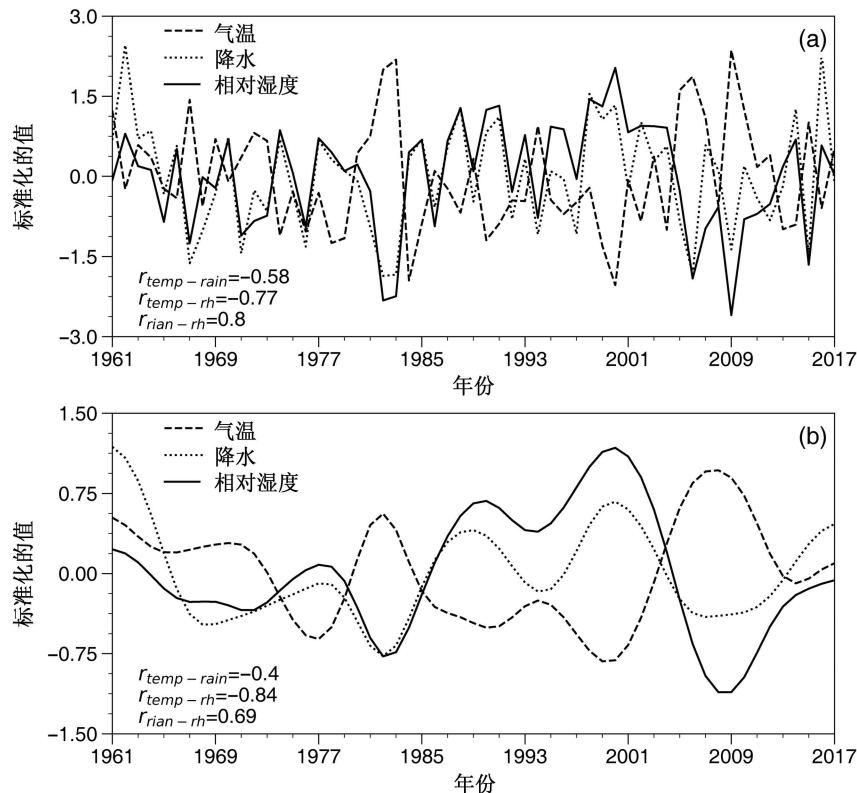


图7 1961~2017年雅鲁藏布江河谷地区夏季气温、降水量和相对湿度气候序列去趋势后标准化序列:(a)无趋势序列;(b)9点高斯滤波后的序列; $r_{temp-rain}$ 、 $r_{temp-rh}$ 和 $r_{rain-rh}$ 表示(a)年际和(b)年代际时间尺度上气温与降水量、气温与相对湿度和降水量与相对湿度之间的相关系数

Fig. 7 Standardized series after de-trending the summer climate series of temperature, precipitation, and relative humidity along the Yarlung Zangbo River valley area from 1961 to 2017: (a) No trend series; (b) nine-point Gaussian-filtered series. $r_{temp-rain}$, $r_{temp-rh}$, and $r_{rain-rh}$ represent the correlation coefficients between temperature and precipitation, temperature and relative humidity, precipitation and relative humidity on the (a) interannual and (b) interdecadal time scales

中含水能力增强, 又导致相对湿度的下降。综上所述, 沿江夏季气候因子在年际和年代际变化上存在显著相关的内在联系, 这种内在关系表明了沿江夏季气候是属于干热、湿凉型(周晓霞等, 2007)。

5 沿江夏季气候与总云量和地面水汽压的关系

以上的分析表明, 沿江夏季气候因子在年际和年代际变化上存在显著的相关性, 这种密切关联的内在联系与很多因子有关。云对地球气候系统的辐射能量收支和水分循环过程起着重要作用, 对气候变化有调节作用。云量是制约温度变化的重要因素, 也是影响降水的主要因子(吴伟和王式功, 2011; 李跃清和张琪, 2014)。地面水汽压是表征大气中水汽含量的重要物理量, 可以用来估算空中水汽含量(杨景梅和邱金桓, 2002), 虽然在日值上反映大气中水汽含量存在一定偏差, 但在月和年的时间尺度上却具有较高的可信度(王炳忠和刘庚山, 1993)。以下分别分析沿江夏季气候分别与总云量和地面水汽压的关系。

5.1 沿江夏季气候与总云量的关系

鉴于近 57 年的沿江夏季总云量存在显著的减少趋势(图略), 为突出沿江夏季降水、气温和总云量之间的关系, 对 1961~2017 年的沿江夏季各气候序列去除线性趋势后, 再进行标准化处理, 进

而分析三者之间的关系(图 8)。由图 8 可见, 近 57 a 沿江夏季气温与总云量间存在反位相变化的显著负相关($r=-0.5$, $p<0.01$); 而夏季降水与总云量存在更显著正相关($r=0.78$, $p<0.01$); 这表明, 沿江夏季降水和气温的变化与总云量存在着密切关系: 总云量显著减少使得太阳辐射增加明显, 从而导致增温; 降水和总云量之间存在协同一致的变化关系, 但总体趋势上一致性较弱。

5.2 沿江夏季气候与地面水汽压的关系

通过对近 57 a 沿江夏季降水与地面水汽压的相关分析(图 9)。发现沿江夏季降水与地面水汽压之间存在很好的线性拟合关系($R^2=0.54$), 即两者之间存在同位相变化的显著年际正相关($r=0.73$, $p<0.01$); 多项式拟合结果显示两者具有较为一致的阶段性变化特征。因此, 沿江夏季降水的变化可以较好地反映地面水汽压的变化特征。

相对湿度是地面水汽压和饱和水汽压的百分比, 饱和水汽压又是温度的函数。为了揭示近 57 a 来沿江夏季相对湿度与气温和降水显著相关的年际变化特征以及解释相对湿度显著下降的原因。以降水序列表征地面水汽压变化, 以气温序列代表饱和水汽压的变化, 计算了两者(均进行标准化处理)比值(即降水/气温), 将该比值称为相对湿度的计算值, 图 10 给出相对湿度的计算值与实际值在年际变化上的对应关系。由图可见, 两者具有一致的年际变化, 存在很好的线性拟合关系($R^2=0.57$),

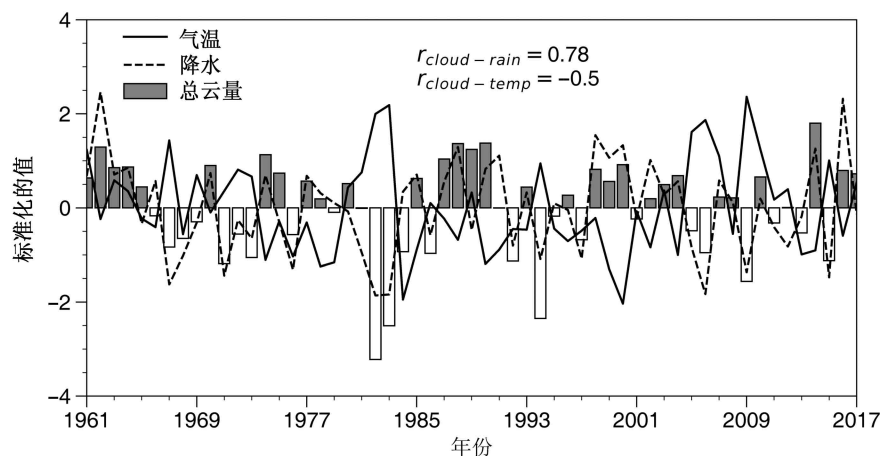


图 8 1961~2017 年雅鲁藏布江河谷地区夏季气温、降水量、总云量气候序列去趋势后标准化序列。 $r_{\text{cloud-temp}}$ 和 $r_{\text{cloud-rain}}$ 分别表示总云量与气温和降水之间的相关系数

Fig. 8 Standardized series after de-trending the summer climate series of temperature, precipitation, and relative humidity along the Yarlung Zangbo River valley area from 1961 to 2017. $r_{\text{cloud-temp}}$ and $r_{\text{cloud-rain}}$ represent the correlation coefficient between total cloud cover and temperature and precipitation

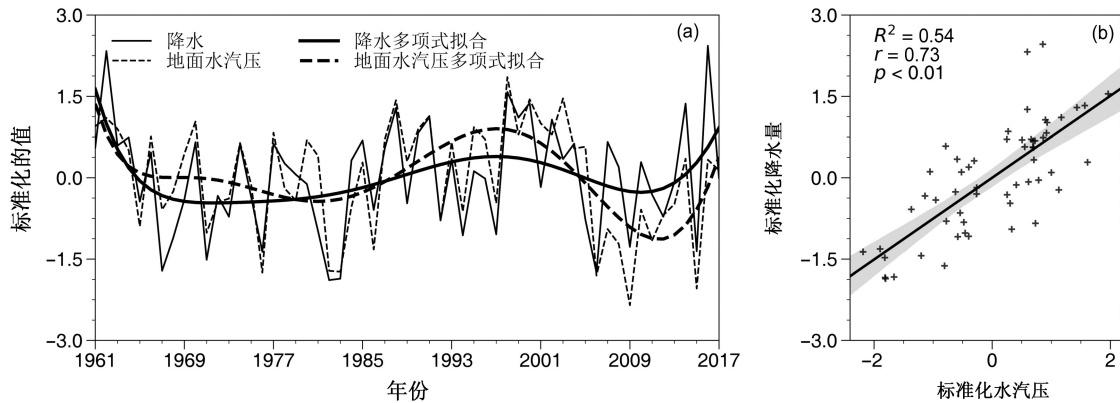


图9 1961~2017年雅鲁藏布江河谷地区夏季降水与地面水汽压 (a) 标准化序列及 (b) 对应关系。 r 、 p 和 R^2 分别表示相关系数、显著水平和决定系数

Fig. 9 (a) Standardized series of summer precipitation and water vapor pressure and (b) the correspondence between them along the Yarlung Zangbo River valley area from 1961 to 2017. r , p , and R^2 represent correlation coefficient, significant level, and coefficient of determination

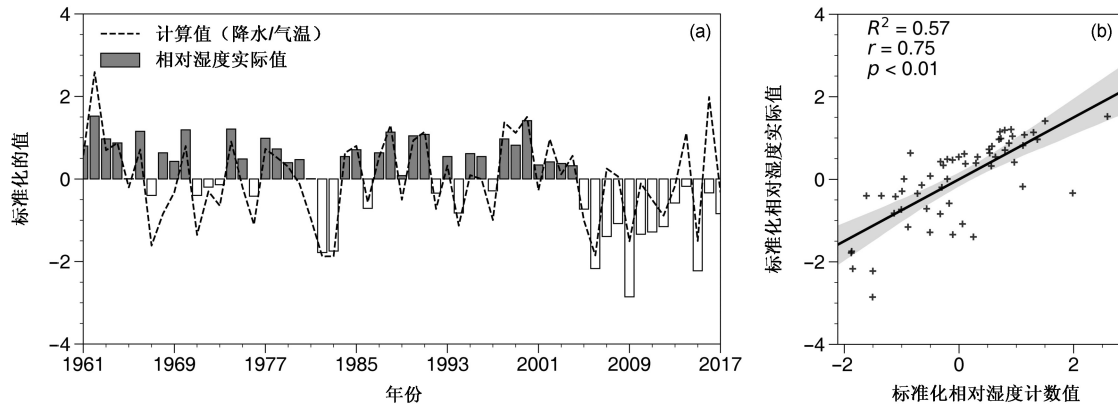


图10 1961~2017年雅鲁藏布江河谷地区 (a) 相对湿度实际值与计算值 (降水/气温) 标准化序列及 (b) 对应关系。 r 、 p 和 R^2 分别表示相关系数、显著水平和决定系数

Fig. 10 (a) Standardized series of calculated relative humidity (summer precipitation and temperature ratios) and actual relative humidity and (b) the correspondence between them over the Yarlung Zangbo River valley area from 1961 to 2017. r , p , and R^2 represent correlation coefficient, significant level, and coefficient of determination

呈显著的正相关 ($r=0.75$, $p<0.01$)。沿江夏季地面水汽压的变化可以解释相对湿度与气温和降水间显著相关的内在联系: 沿江夏季气温不断升高, 使空气中饱和水汽压逐渐增大, 空气中能够容纳的水汽含量随之增加, 但降水变化并不显著, 即实际水汽变化不明显, 导致相对湿度显著下降。这也意味着, 近 57 a 沿江夏季气候趋于暖干化可能是降水和气温两个主要气候因子长期变化的结果。

6 结论与讨论

本文以高原腹地雅鲁藏布江流域中游河谷地区作为典型研究区域, 选取气温、降水和相对湿度这些基本气象要素作为主要气候因子, 分析了

1961~2017年沿江夏季气候变化特征。同时探讨了各气候因子在年际和年代际时间尺度上相互关系以及与总云量和地面水汽压的联系。得出了如下的主要结论:

(1) 1961~2017年, 沿江夏季气候存在暖干化趋势, 气温显著升高 (增温率约为 $0.32^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$), 相对湿度显著下降 (下降率为 $-1.39\%/10\text{ a}$), 降水趋势变化不明显, 这种变化趋势进入本世纪后有所加剧。在年际时间尺度上, 沿江夏季气候普遍存在 3~4 a 年际振荡; 在年代际时间尺度上, 沿江夏季气候在 1980 年代初和 2000 年代初经历了年代际转折, 其中气温和相对湿度在本世纪初发生了显著的气候突变。

(2) 1961~2017年, 沿江夏季各气候因子之

间在年际和年代际时间尺度上都存在显著的相关。气温与降水、与相对湿度之间存在反位相变化的年际和年代际变化;而降水与相对湿度具有较为一致的年际和年代际变化。上述气候因子间的这种年际和年代际变化,表明了沿江夏季气候进入干热、湿凉阶段。

(3) 沿江夏季各气候因子之间在年际和年代际时间尺度上变化与该地区总云量和地面水汽压存在显著相关。沿江夏季总云量持续减少是气温显著升高的主要原因之一,气温显著升高,使空气中饱和水汽压逐渐增大,空气中能够容纳的水汽含量随之增加;但降水变化不显著,即实际水汽变化不明显,导致了相对湿度显著下降。

本文选取沿江 4 个台站的地面气温、降水和相对湿度 3 个主要气候因子,分析了该地区气候在年际和年代际时间尺度上的联系,事实上三者之间具有复杂的内在联系:降水与大气凝结高度上的相对湿度有关。考虑到拉萨夏季其抬升凝结高度约在 500~400 hPa (德庆等, 2015), 通过比较 500 hPa、400 hPa 和近地面的相对湿度的年际变化(图略),发现大气的相对湿度与近地面的相对湿度存在很好的一致性,因此地面相对湿度与降水关系密切。同样地,降水与凝结高度上的饱和温度有关,研究表明高原对流层中层大气的温度与近地面的温度之间也具有较好的一致性(周顺武和张人禾, 2009)。因此在相同水汽含量的情况下,温度的变化直接影响相对湿度,进而影响降水。

气候因子在年际和年代际变化上的内在联系与很多因子有关,本文只讨论了与总云量和地面水汽压的联系,还无法全面认识各因子间相互影响的内在关系。大气环流因子是气候异常的最直接最重要的影响因素,有必要进一步探究大气环流影响沿江夏季气候的机理。

参考文献 (References)

戴睿, 刘志红, 娄梦筠, 等. 2012. 西藏地区 50 年气候变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 26(12): 97-102. Dai Rui, Liu Zhihong, Lou Mengjun, et al. 2012. Characteristics of climatic variation in Tibet area for last 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 26(12): 97-102. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2012.12.031

德庆, 代华光, 德吉卓玛, 等. 2015. 基于探空资料的拉萨短期降水预报特征分析 [J]. *高原山地气象研究*, 35(2): 17-23. De Qing, Dai Huaguang, Deji Zhuoma, et al. 2015. Study of short-term

precipitation forecasts indexes of Lhasa based on sounding data [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 35(2): 17-23.

丁一汇, 张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较 [J]. *大气科学*, 32(4): 794-805. Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 794-805. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.08

杜军, 马玉才. 2004. 青藏高原降水变化趋势的气候分析 [J]. *地理学报*, 59(3): 375-382. Du Ju, Ma Yucai. 2004. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971 to 2000 [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 59(3): 375-382. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2004.03.007

冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 1998. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据 [J]. *科学通报*, 43(20): 1745-1749. Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. 1998. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(20): 1745-1749. doi:10.1007/BF02883978

Guo J P, Su TN, Li Z Q, et al. 2017. Declining frequency of summertime local-scale precipitation over eastern China from 1970 to 2010 and its potential link to aerosols [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 44(11): 5700-5708. doi:10.1002/2017GL073533

黄嘉佑, 李庆祥. 2015. 气象数据统计分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1-50. Huang Jiayou, Li Qingxiang. 2015. *Statistical Analysis Methods of the Meteorological Data (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-50.

IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

焦洋, 游庆龙, 林厚博, 等. 2016. 1979~2012 年青藏高原地区地面气温时空分布特征 [J]. *干旱区研究*, 33(2): 283-291. Jiao Yang, You Qinglong, Lin Houbo, et al. 2016. Spatiotemporal distribution of surface temperature over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2012 [J]. *Arid Zone Research (in Chinese)*, 33(2): 283-291. doi:10.13866/j.azr.2016.02.09

蓝柳茹. 2016. 西伯利亚高压的年际和年代际异常特征及其对中国冬季气温的影响 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 15-16.

Lan Liuru. 2016. *Interannual and interdecadal anomaly features of Siberian high and their impact on winter temperature of China* [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 15-16.

李潮流, 康世昌. 2006. 青藏高原不同时段气候变化的研究综述 [J]. *地理学报*, 61(3): 327-335. Li Chaoliu, Kang Shichang. 2006. Review of studies in climate change over the Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 61(3): 327-335. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2006.03.012

李海东, 沈渭寿, 余光辉, 等. 2010. 雅鲁藏布江中游河谷气温时序变化的小波分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 19(S2): 87-93. Li Haidong, Shen Weishou, She Guanghui, et al. 2010. Wavelet analysis

- of annual temperature Variation in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River valley, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese)*, 19(S2): 87–93.
- 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 2010. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究 [J]. *气候变化与研究进展*, 6(3): 181–186. Li Lin, Chen Xiaoguang, Wang Zhenyu, et al. 2010. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 6(3): 181–186. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2010.03.005
- 李晓英, 姚正毅, 肖建华, 等. 2016. 1961~2010 年青藏高原降水时空变化特征分析 [J]. *冰川冻土*, 38(5): 1233–1240. Li Xiaoying, Yao Zhengyi, Xiao Jianhua, et al. 2016. Analysis of the spatial-temporal variation characteristics of precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 through 2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 38(5): 1233–1240. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0144
- 李跃清, 张琪. 2014. 西南地区夏季云量与降水的关系特征分析 [J]. *自然资源学报*, 29(3): 441–453. Li Yueqing, Zhang Qi. 2014. Contemporaneous relationships between summer cloudiness and precipitation over Southwest China [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 29(3): 441–453. doi:10.11849/zrzyxb.2014.03.008
- 林振耀, 赵昕奕. 1996. 青藏高原气温降水变化的空间特征 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 39(4): 442–448. Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. 1996. Spatial characteristics of changes in temperature and precipitation of the Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 39(4): 442–448.
- 卢爱刚. 2013. 全球变暖对中国区域相对湿度变化的影响 [J]. *生态环境学报*, 22(8): 1378–1380. Lu Aigang. 2013. Impacts of global warming on air humidity in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences (in Chinese)*, 22(8): 1378–1380. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2013.08.017
- 普布卓玛, 周顺武. 2002. 西藏地区旱涝等级划分及时空分布特征 [J]. *高原气象*, 21(2): 210–216. Pubu Zhuoma, Zhou Shunwu. 2002. Classification of drought and flood grades and their temporal/spatial distribution features in Tibet [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21(2): 210–216. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.02.015
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 63(6): 942–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63(6): 942–956. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.06.011
- 汤懋苍, 李存强. 1992. 关于“青藏高原是气候启动区”的分析事实 [C]/中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 42–48. Tang Maocang, Li Cunqiang. 1992. On the facts of that the Tibetan Plateau was the source region of climatic variation [C]/The Proceedings of the First Symposium on the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 42–48.
- 汤懋苍, 白重瑗, 冯松, 等. 1998. 本世纪青藏高原气候的三次突变及与天文因素的相关 [J]. *高原气象*, 17(3): 250–257. Tang Maocang, Bai Chongyuan, Feng Song, et al. 1998. Climate abrupt change in the Qinghai–Xizang Plateau in recent century and its relation to astronomical factors [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 17(3): 250–257. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1998.03.004
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79(1): 61–78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2
- 王炳忠, 刘庚山. 1993. 我国大陆大气水汽含量的计算 [J]. *地理学报*, 48(3): 244–253. Wang Bingzhong, Liu Gengshan. 1993. An estimation of total atmospheric water vapor in the mainland of China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 48(3): 244–253. doi:10.11821/xb199303006
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 1–298. Wei Fengying. 2007. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 1–298.
- 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 2003. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化 [J]. *大气科学*, 27(2): 157–170. Wei Zhigang, Hang Ronghui, Dong Wenjie. 2003. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27(2): 157–170. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.02.03
- 吴成启, 唐登勇. 2017. 近 50 年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征 [J]. *水土保持研究*, 24(6): 262–266, 272. Wu Chengqi, Tang Dengyong. 2017. Change of temperature in the Tibetan Plateau in the context of global warming in recent 50 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 24(6): 262–266, 272. doi:10.13869/j.cnki.rswc.2017.06.040
- 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 2005. 青藏高原近 30 年气候变化趋势 [J]. *地理学报*, 60(1): 3–11. Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. 2005. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 60(1): 3–11. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2005.01.001
- 吴伟, 王式功. 2011. 中国北方云量变化趋势及其与区域气候的关系 [J]. *高原气象*, 30(3): 651–658. Wu Wei, Wang Shigong. 2011. Tendency change of cloud cover over northern China and its relation with regional climate [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30(3): 651–658.
- 谢欣汝, 游庆龙, 林厚博. 2018. 近 10 年青藏高原中东部地表相对湿度减少成因分析 [J]. *高原气象*, 37(3): 642–650. Xie Xinru, You Qinglong, Lin Houbo. 2018. Surface relative humidity decreases and its cause over the Qinghai–Tibetan Plateau in recent ten years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 37(3): 642–650. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00091
- 徐宗学, 张玲, 黄俊雄, 等. 2007. 西藏地区气温、降水及相对湿度的趋势分析 [J]. *气象*, 33(7): 82–88. Xu Zongxue, Zhang Ling, Huang Junxiong, et al. 2007. Long-term trend of temperature, precipitation and relative humidity in the Tibetan region [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33(7): 82–88. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.07.010
- 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 2014. 西藏高原气候变化及其差异性 [J]. *干旱区地理*, 37(2): 290–298. Yang Chunyan, Shen Weishou, Lin Naifeng. 2014. Climate change and its regional differences over the Tibet Plateau [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 37(2):

- 290-298. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.02.008
- 杨景梅, 邱金桓. 2002. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究 [J]. *大气科学*, 26(1): 9-22. Yang Jingmei, Qiu Jinheng. 2002. A method for estimating precipitable water and effective water vapor content from ground humidity parameters [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26(1): 9-22. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.01.02
- 杨志刚, 建军, 洪建昌. 2014. 1961~2010 年西藏极端降水事件时空分布特征 [J]. *高原气象*, 33(1): 37-42. Yang Zhigang, Jian Jun, Hong Jianchang. 2014. Temporal and spatial distribution of extreme precipitation events in Tibet during 1961-2010 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 33(1): 37-42. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00147
- 姚莉, 吴庆梅. 2002. 青藏高原气候变化特征 [J]. *气象科技*, 30(3): 163-164, 143. Yao Li, Wu Qingmei. 2002. Climate change character in the Tibetan Plateau [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 30(3): 163-164, 143. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2002.03.007
- 张素琴, 任振球, 李松勤. 1994. 全球温度变化对我国降水的影响 [J]. *应用气象学报*, 5(3): 333-339. Zhang Suqin, Ren Zhenqiu, Li Songqin. 1994. The influence of fluctuation of global temperature on precipitation in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 5(3): 333-339.
- 郑然, 李栋梁, 蒋元春. 2015. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征 [J]. *高原气象*, 34(6): 1531-1539. Zheng Ran, Li Dongliang, Jiang Yuanchun. 2015. New characteristics of temperature change over Qinghai-Xizang Plateau on the background of global warming [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34(6): 1531-1539. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00123
- 周顺武, 张人禾. 2009. 青藏高原地区上空 NCEP/NCAR 再分析温度和位势高度资料与观测资料的比较分析 [J]. *气候与环境研究*, 14(2): 284-292. Zhou Shunwu, Zhang Renhe. 2009. Comparison of NCEP/NCAR reanalysis data and radiosonde data about temperature and geopotential height of upper air over the Tibetan Plateau [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14(2): 284-292. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.03.05
- 周顺武, 普布卓玛, 假拉. 2000. 西藏高原汛期降水类型的研究 [J]. *气象*, 26(5): 39-43. Zhou Shunwu, Pubu Zhuoma, Jia La. 2000. Analysis of rainfall patterns during rainy season over the Tibetan Plateau [J]. *Meteorological Monthly*, 26(5): 39-43. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2000.5.010
- 周顺武, 假拉, 杜军. 2001. 近 42 年西藏高原雅鲁藏布江中游夏季气候趋势和突变分析 [J]. *高原气象*, 20(1): 71-75. Zhou Shunwu, Jia La, Du Jun. 2001. Analyses of climatic trend and jump over middle reaches of Yarlung Zangbo River in Tibetan Plateau in recent 42 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 20(1): 71-75. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2001.01.012
- 周顺武, 马悦, 宋瑶, 等. 2015. 中国东部地区冬季和夏季地面湿度空间分布特征的对比分析 [J]. *气候与环境研究*, 20(5): 589-599. Zhou Shunwu, Ma Yue, Song Yao, et al. 2015. Comparison between the spatial distribution of surface humidity in winter and summer over East China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20(5): 589-599. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15035
- 周晓霞, 王盘兴, 段明铿, 等. 2007. 我国季平均气温和降水局地同时相关的时空特征 [J]. *应用气象学报*, 18(5): 601-609. Zhou Xiaoxia, Wang Panxing, Duan Mingkeng, et al. 2007. Spatial and temporal structures of relationship between seasonal mean temperature and rainfall in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 18(5): 601-609. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.05.004