

周顺武, 王传辉, 杜军, 等. 2011. 青藏高原汛期降水的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 723–732. Zhou Shunwu, Wang Chuanhui, Du Jun, et al. 2011. Characteristics of spatial and temporal distribution of precipitation in flood season over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 723–732.

青藏高原汛期降水的时空分布特征

周顺武¹ 王传辉^{1, 2} 杜军³ 马振锋⁴

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 安徽省气象局, 合肥 230061

3 西藏自治区气候中心, 拉萨 850000

4 四川省气候中心, 成都 610071

摘 要 根据 1967~2008 年青藏高原地区 67 个气象台站的月平均降水资料, 利用线性趋势分析、EOF 分解和 Morlet 小波变换等方法分析了青藏高原地区汛期 (5~9 月) 降水的时空分布特征。结果表明: 青藏高原汛期降水存在明显的区域性差异, EOF 分解揭示出青藏高原汛期存在 3 种主要的空间分布型: 南北反向型、全区一致型和东南—西北反向型。南北反向型分布存在着 3~5 a 的年际变化周期和 10~12 a 的年代际变化周期; 而全区一致型普遍存在着 5~7 a 的振荡周期。近 42 年来青藏高原北区降水主要表现为减少的趋势, 而南区呈现出增加的趋势。汛期降水的南北反向型分布主要受初夏 (5~6 月) 降水的影响, 而全区一致型分布主要受盛夏 (7~8 月) 降水的影响。

关键词 青藏高原 汛期 降水 时空分布

文章编号 1006-9585 (2011) 06-0723-10 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Precipitation in Flood Season over the Tibetan Plateau

ZHOU Shunwu¹, WANG Chuanhui^{1, 2}, DU Jun³, and MA Zhenfeng⁴

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Anhui Meteorological Bureau, Hefei 230061

3 Climate Center of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850001

4 Climate Center of Sichuan Province, Chengdu 610071

Abstract Using the monthly mean precipitation data at 67 stations over the Tibetan Plateau during 1967 to 2008, the spatial and temporal distribution characteristics of rainfall in flood season (from May to September) are analyzed through linear trend analysis, EOF, and Morlet wavelet transformation. The results indicate that there are distinct spatial variations of rainfall in the flood season in the Tibetan Plateau, which are concluded as three main patterns based on the EOF decomposition: The north-south reverse type, the whole region consistent type, and the south-east-northwest reverse type. Otherwise, the north-south reverse type has an interannual oscillation cycle of quasi-

收稿日期 2010-01-05 收到, 2011-07-20 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428505, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200906014, 中国气象局成都高原气象研究所开放实验室基金 LPM2011015

作者简介 周顺武, 男, 1968 年出生, 博士, 主要从事区域气候变化研究。E-mail: zhou@nuist.edu.cn

four years and a decadal oscillation cycle of quasi-11 years, while the whole region consistent type has a cycle of 5 - 6 years. The precipitation in the northern part of the Tibetan Plateau shows a decreasing trend, but the precipitation in the southern part of the plateau shows an increasing trend.

Key words Tibetan Plateau, flood season, rainfall, spatial and temporal distribution

1 引言

青藏高原是世界上海拔最高和地形最复杂的高原,包括西藏、青海及川西高原、滇西高原和甘南高原等广大地区,面积约为 $230 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占我国国土面积的 1/4。青藏高原的热力和动力作用对东亚乃至全球的大气环流都有重大影响(叶笃正等, 1957; Yanai et al., 1992; Zhao and Chen, 2001; 吴国雄, 2004), 汤懋苍等(1988)、汤懋苍和李存强(1992)指出青藏高原是我国东部地区不同时间尺度气候变化的启动区。因此, 长期以来青藏高原气候变化倍受关注。

青藏高原是我国主要江河的发源地, 其降水变化对中国区域水分平衡和水资源利用有着重要影响。受季风气候影响, 青藏高原降水年际变化大, 干、湿季明显, 降水主要集中在汛期(5~9月), 除喜马拉雅山脉南麓和青藏高原东南部外, 大部分地区汛期降水量可占全年降水量的 80% 以上(叶笃正和高由禧, 1979; 戴加洗, 1990; 冯松等, 1998; 周顺武等, 2000)。近年来, 我国气象工作者针对青藏高原降水做了大量研究, 并取得了很多成果(韦志刚等, 2003; 杜军和马玉才, 2004; Niu et al., 2004; 马振锋等, 2006; 李生辰等, 2007; 卢鹤立等, 2007), 大量研究结果表明, 由于青藏高原面积大、地形复杂, 该地区降水存在显著的区域性差异。

青藏高原气候研究中面临最主要的问题是资料的不足, 高原测站主要集中在东部地区, 西部不仅测站稀少, 而且许多台站建站较晚。总结以往关于青藏高原降水的研究主要存在以下问题: (1) 一些分析只是单独使用了西藏或青海的资料分别讨论了西藏(刘义军和李林, 1999; 周顺武等, 2000, 2001a; 普布卓玛和周顺武, 2002; 姚莉和吴庆梅, 2002; 杜军和马玉才, 2004) 或青海降水变化(黄玉霞等, 2006; 唐红玉等, 2007; 汪青春等, 2007; 王黎俊等, 2008), 而未将青藏

高原作为一个整体进行考虑; (2) 一些研究虽然利用了青海、西藏及其周边山区的资料, 但为了保证资料的长度, 并没有涉及到青藏高原西部(孙艳青, 2004; 黄一民, 2007; 唐红玉等, 2007); (3) 多数研究主要分析的是夏季(6~8月)降水, 而未对其前后的 5 月和 9 月降水进行分析(朱西德等, 2003; 黄玉霞等, 2006; 卢鹤立等, 2007; 王黎俊等, 2008)。

本文依据西藏、青海及其周边高海拔地区气象台站逐月降水资料, 分析整个青藏高原地区汛期降水时空分布特征, 并与以往有关对高原降水的研究作了比较, 得出一些有意义的结论。

2 资料和方法

本文利用国家气象信息中心气象资料室提供的高原地区建站至 2008 年的逐月降水资料, 同时考虑到高原西部站点稀少且建站较晚, 选取站点时在保证有足够长时间序列的前提下, 尽可能包括高原西部站点, 选取了 1967~2008 年共 42 a 的 67 个气象台站(站点位置见图 1a 中的▲), 提取出汛期(5~9月)的降水量。通过自然正交(EOF)分析方法(魏凤英, 2007)分析了汛期降水时空分布特征, 并对其主要模态的时间系数进行 Morlet 小波变换分析(邓自旺等, 1997; 魏凤英, 2007), 进一步分析汛期降水的年际和年代际变化特征。

3 青藏高原汛期降水的时空分布特征

3.1 降水场的气候特征

图 1a 给出多年平均的汛期降水量分布图。由图可见, 青藏高原汛期降水整体上呈现出由东南部向西北部递减, 超过 400 mm 降水量的区域主要出现在海拔较低的青藏高原东南部和青海东北部, 其中降水大值中心位于川西的昭觉站(834.0 mm)和西藏东部的嘉黎站(597.7 mm), 青藏高

原东南部夏半年处在西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)的西侧和印度季风的东北部,有利于西太平洋和北印度洋的暖湿气流向青藏高原输送;汛期平均降水量在 300~400 mm 的区域主要位于西藏中部和青海东南部;而包括西藏西部的阿里地区和青海西北部的柴达木盆地在内的高原内陆地区汛期降水不足 100 mm,青藏高原西北部夏半年主要受中东高压西北气流影响,同时东南部水汽向西北长距离的输送过程中,沿途受高大山脉的阻挡难以抵达遥远的高原西北,导致其西北部地区降水偏少,其中青海冷湖站汛期降水量仅为 15.5mm,为全区甚至全国最低(乔全明和张雅高,1994)。

青藏高原降水主要集中在汛期,各站汛期降水量占全年降水量的百分比分布(图 1b)与汛期平均降水量分布大致相反,表现为由东南部向西北部递增,此外西藏西南部汛期降水量占年降水量的百分比也小于 70%,这主要是由于喜马拉雅山南麓和雅鲁藏布江下游河谷地区在冬春季受南

支槽的影响,常常出现雨雪天气,降水年变化曲线呈现出双峰型(叶笃正和高由禧,1979;乔全明和张雅高,1994;孙艳青,2004);而青藏高原中部和北部大部分地区均在 85%以上,其中汛期平均降水量最少的青海西北部和西藏中西部地区,由于降水主要集中在 5~9 月,使得上述地区汛期降水量占全年的 90%以上。

汛期降水标准差分布图(图 1c)与多年平均的降水场分布相似,也呈现出由东南向西北减少的趋势,其中 3 个较大值分别位于雅鲁藏布中、下游河谷地区和川西高原,表明汛期平均降水偏多的地区更容易出现旱涝(周顺武等,2000),这可能是受季风的影响,上述地区降水年际变化波动较大;而在汛期降水较少的西藏西部和青海西北部降水变化相对较为稳定。

3.2 降水空间分布特征

青藏高原面积辽阔,地形复杂加之受不同气流的影响,降水空间分布存在明显的区域性差异,对 67 个站近 42 年汛期降水量进行标准化处理后,

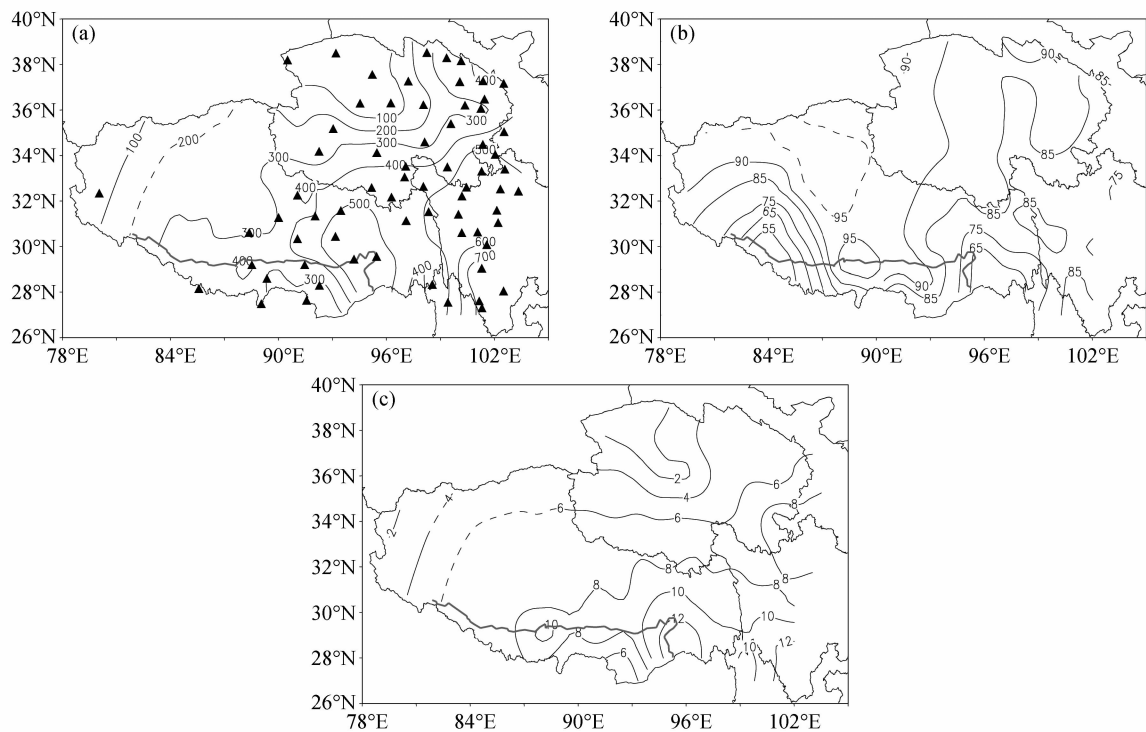


图 1 青藏高原 1967~2008 年平均 (a) 汛期降水量(单位: mm)、(b) 汛期降水占全年降水百分比(%)以及 (c) 汛期降水的标准差分布($\times 10^{-2}$)。灰粗线代表雅鲁藏布江,断线代表无站点区域的可能等值线,下同

Fig. 1 Distribution of (a) precipitation amount (mm) in flood season over the Tibetan Plateau, (b) precipitation percentage (%) in flood season to that in the whole year, and (c) the standard deviation of precipitation in flood season ($\times 10^{-2}$). Gray curves indicate the Yarlung Zangbo River, the dotted lines indicate the likely equivalent lines in non-site areas, the same below

利用 EOF 分解方法分析其主要空间分布型。表 1 给出了 EOF 分解后前 8 个方差贡献率和累积贡献率,由表可见,前 4 个模态的累积贡献达 51.81%,图 2 显示了前 4 个模态的空间分布,它们分别揭示了高原汛期降水的主要空间分布型。

表 1 青藏高原汛期降水 EOF 分解后前 8 个模态的方差贡献

Table 1 Variance percentage of EOF component of precipitation in flood season over the Tibetan Plateau

序号	方差贡献	累计方差贡献
1	18.80%	18.80%
2	17.76%	36.56%
3	9.21%	45.76%
4	6.06%	51.82%
5	4.63%	56.44%
6	4.31%	60.75%
7	3.63%	64.39%
8	3.17%	67.55%

第 1 模态大致呈南北反向分布(图 2a),图中 2 个负值中心分别位于雅鲁藏布江中段的泽当站(-0.22)和下游的林芝站(-0.22),而正值中心位于青海东部的兴海站(0.19),正负分界线大致沿唐古拉山脉北侧一线,呈西北—东南走向,这反映出青藏高原汛期降水分布的南北差异,由此可沿第 1 模态的 0 值线将青藏高原分为北区和南区。这种南北反向分布与青藏高原地形和西太平洋副热带高压的位置有关:一些年份,来自印度洋的湿润水汽难以翻越该山脉,从而导致降水出现南多北少;而某些年份,当夏季西太平洋副热带高压北跳时,青藏高原北部降水通常是增加的(戴加洗,1990)。通过对预报经验进行总结(周顺武等,2000;普布卓玛和周顺武,2002),得出有利于西藏高原夏季出现洪涝的环流型为北高南低,即西藏高原北部为高值区,南部的印度半岛维持低压。西藏及其以北地区为脊区控制,青海地区此时基本无降水。此外,假拉等(2002)的分析表明,当夏季北非高压脊线偏北(南)时,西藏高原大部分地区夏季降水偏多(少)。

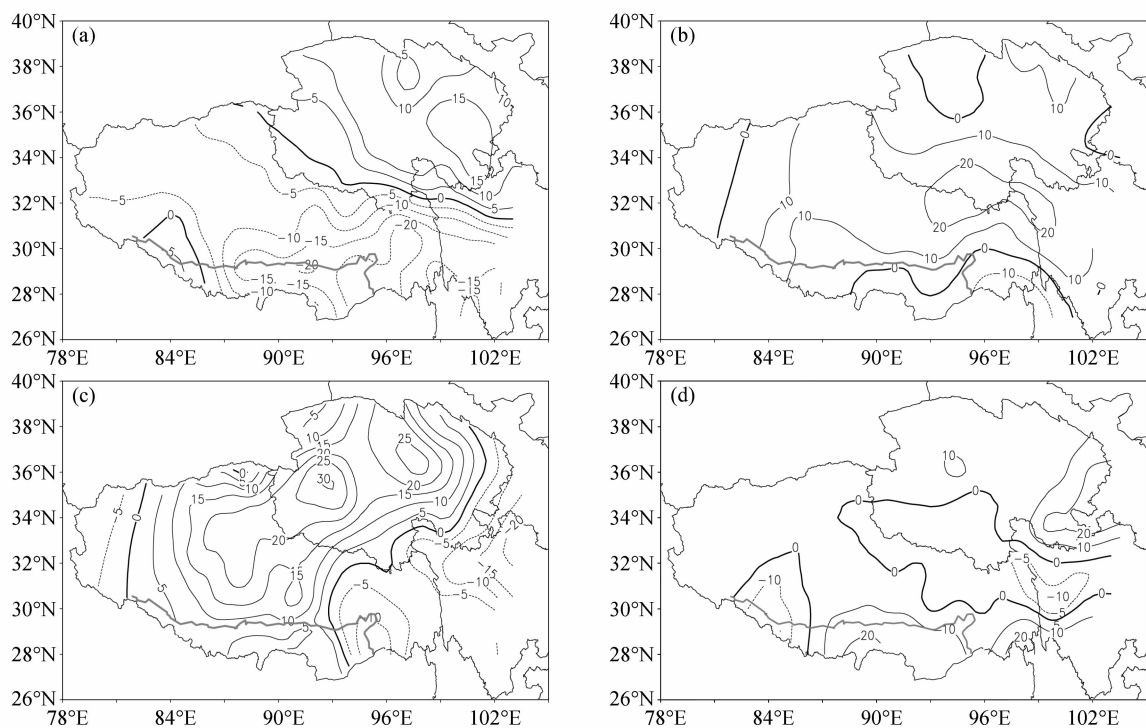


图 2 青藏高原汛期降水 EOF 分解的 (a) 第 1 模态、(b) 第 2 模态、(c) 第 3 模态和 (d) 第 4 模态的空间分布型,图中的数值均 $\times 10^2$

Fig. 2 Distribution of the (a) first, (b) second, (c) third, and (d) forth eigenvector fields of precipitation in flood season over the Tibetan Plateau, the values have been multiplied by 10

第 2 模态的分布 (图 2b) 除了西藏南部边缘和西部个别测站出现负值外, 青藏高原主体大部分地区均为一致的正值, 以青海、西藏及四川交界处为正值中心向四周逐渐减小, 这反映了青藏高原主体汛期降水变化的一致性。这种降水分布可能与夏半年青藏高原的强弱有关 (黄一民, 2007)。此类空间分布型表现出在青藏高原季风影响下的高原降水特征 (卢鹤立等, 2007)。此外, 全区一致的空间分布型与亚洲区极涡面积和强度也存在显著的负相关, 当亚洲区极涡强度偏强 (弱) 时青藏高原降水偏少 (多)。

第 3 模态的负值区主要集中在青藏高原东南部, 正值区出现在西北部 (图 2c), 表现出青藏高原汛期降水的东南—西北差异。这种分布可能与地形分布有关, 青藏高原地区海拔高度呈东低西高, 影响了东南部水汽向西北的输送 (周长艳等, 2005)。另外, 通过计算该模态的时间序列与太平洋区极涡强度指数序列同期相关系数, 发现他们存在显著的负相关关系, 表明北半球极涡强度与青藏高原降水的分布型关系密切, 但具体物理机理还有待进一步研究。

第 4 模态的大值区主要集中在青藏高原东部,

负值区位于青藏高原中东部的青海、西藏及四川交界处汇合区, 而其南北两侧为正值 (图 2d), 表现出青藏高原东部地区汛期降水从南向北呈现出“+—+”的空间分布。通过对南方涛动指数序列与该空间分布型的时间系数序列的同期相关分析, 发现两者之间存在显著的正相关, 表明热带海洋的异常在一定程度上对青藏高原地区的降水存在影响 (王善华, 1993; 周顺武等, 2001b)。该模态体现出了在东亚季风和热带系统共同影响下的降水特征。

3.3 降水时间演变特征

为了讨论青藏高原汛期降水主要模态的年际及年代际时间变化的尺度特征, 将 EOF 分解得到的前 2 个模态时间系数进行 Morlet 小波分析。图 3 和图 4 分别为前 2 个模态的时间系数的小波分析结果, 由第 1 模态时间系数的小波变化系数的实谱图 (图 3b) 可见, 青藏高原汛期降水南北反向型主要表现出 10~12 a 的年代际振荡周期, 本世纪以前也具有 3~5 a 的变化周期, 从其小波方差变化曲线 (图 3c) 可以看出, 第 1 模态时间系数有 2 个峰值, 分别对应于 4 a、11 a 的时间尺度, 这与以往对青藏高原夏季降水周期的研究 (王黎

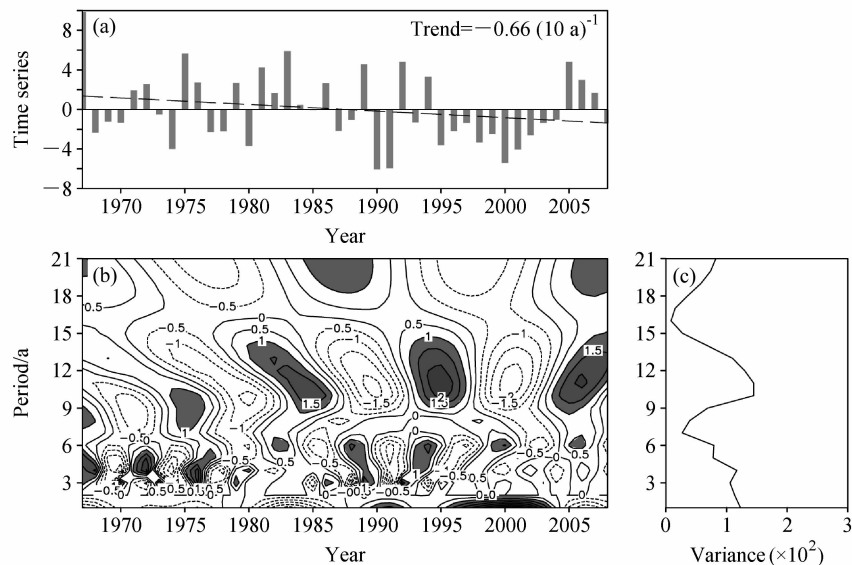


图 3 EOF 分解的青藏高原汛期降水第 1 模态 (a) 时间系数分布 (虚直线表示线性趋势线)、(b) 小波变化系数的实谱 (阴影区表示小波系数大于 1.0) 和 (c) 小波方差

Fig. 3 Distribution of (a) the first EOF mode time coefficient (the dotted line indicates the linear trend of the first EOF mode time coefficient), (b) the real part of Morlet wavelet coefficients (the shaded areas denote the values greater than 1.0), and (c) the wavelet variance of precipitation in flood season over the Tibetan Plateau

俊等, 2008) 基本一致。

第 2 模态时间系数的小波变化系数的实谱图 (图 4b) 中, 在整个分析时段普遍存在 5~7 a 的年际振荡, 表明青藏高原汛期降水全区一致型的周期较为稳定, 在其小波方差分析 (图 3c) 中, 其峰值出现在 6 a 的时间尺度上。

从图 3a 中还可以看出, 近 42 年来第 1 模态的时间系数呈明显的下降趋势, 这主要是受上世纪 90 年代中期到本世纪初的负距平的影响, 说明近几十年来青藏高原汛期降水南 (北) 区呈现出增加 (减少) 的趋势。而近 42 年来第 2 模态的时间系数呈上升趋势 (图 4a), 这表明同时期青藏高原大部分地区降水存在增加趋势。

为验证以上结论, 图 5a 和 5b 分别给出青藏高原北区和南区各站平均降水的时间序列。由图可见, 在北区 (图 5a) 汛期平均降水量为 344.97 mm, 汛期降水呈下降趋势, 线性趋势率为 $-2.15 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。在南区 (图 5b) 汛期平均降水量为 465.60 mm, 明显高于北区, 同时期南区汛期降水呈现出显著的上升趋势, 每 10 a 大约增加了 10.31 mm。

4 汛期降水南北区异常分布型的分析

以上分析得出青藏高原汛期降水主要表现为南北反向型, 而一些研究表明, 青藏高原夏季降

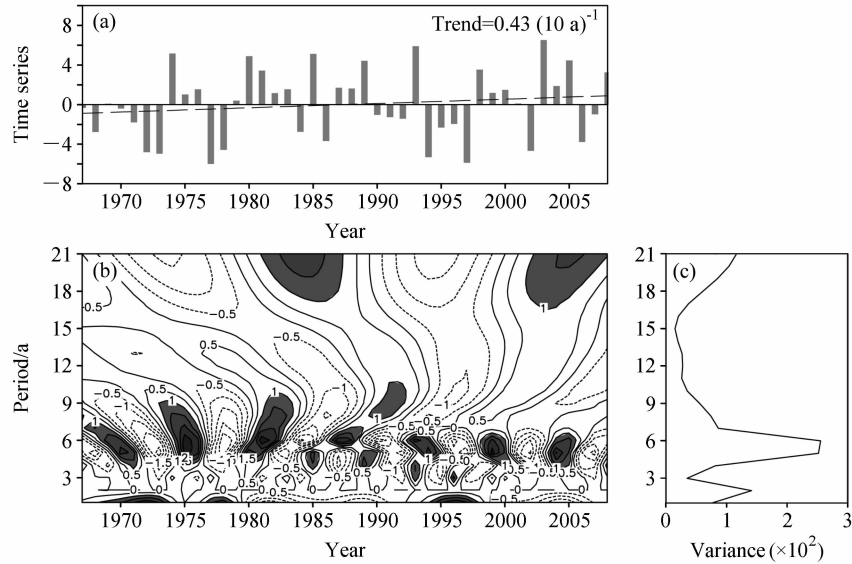


图 4 同图 3, 但为 EOF 分解的第 2 模态

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the second EOF mode

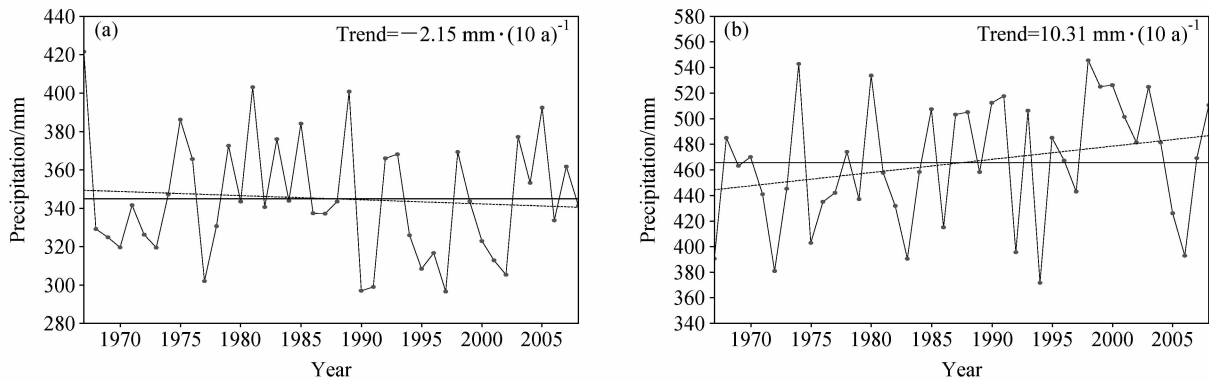


图 5 青藏高原 (a) 北区和 (b) 南区汛期降水的年变化序列, 实直线为多年降水的平均值, 虚直线为线性趋势线

Fig. 5 Time coefficient of precipitation in flood season in (a) the northern area and (b) southern area over the Tibetan Plateau, the solid line is the average of annual precipitation, the dashed line is the linear trend

水呈一致性, 这可能主要是由于分析时段的不同所致(林振耀和赵昕奕, 1996)。以下分别对青藏高原初夏(5~6月, 占全年平均降水的 28.25%)和盛夏(7~8月, 占全年平均降水的 39.35%)的降水量标准化序列进行 EOF 分解, 图 6a 和 6b 分别给出了初夏和盛夏 2 个时段降水的第 1 模态空间型。

由图 6a 可见, 青藏高原初夏降水 EOF 分解的第 1 模态空间分布型(方差贡献率为 23.17%)与汛期第 1 模态空间分布型十分相似, 也表现出高原初夏南北区降水存在反向变化关系。而青藏高原盛夏降水 EOF 分解后的第 1 模态却表现为全区一致性(图 6b, 方差贡献率为 23.54%), 与汛期第 2 模态的空间分布十分接近, 即一些研究总结出的全区一致性。

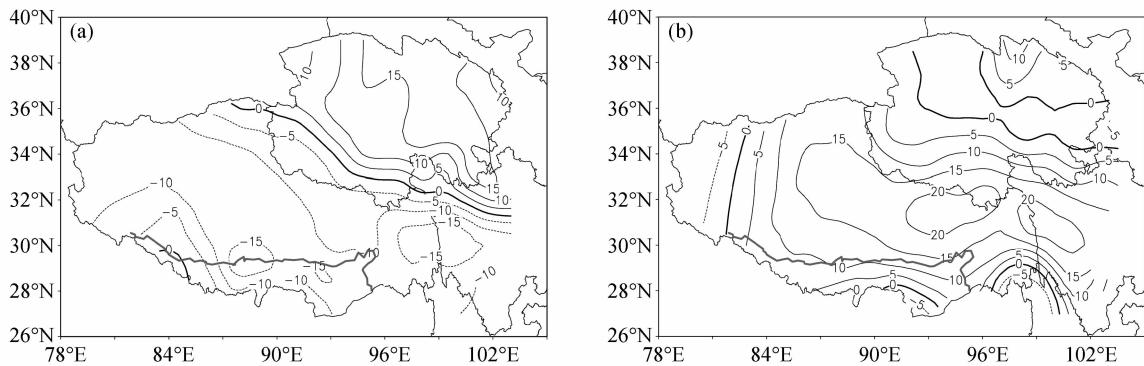


图 6 青藏高原 (a) 初夏和 (b) 盛夏降水 EOF 分解的第 1 模态分布, 图中的数值均 $\times 10^2$

Fig. 6 The distribution of the EOF mode of precipitation in (a) early summer and (b) midsummer over the Tibetan Plateau, values have been multiplied by 10^2

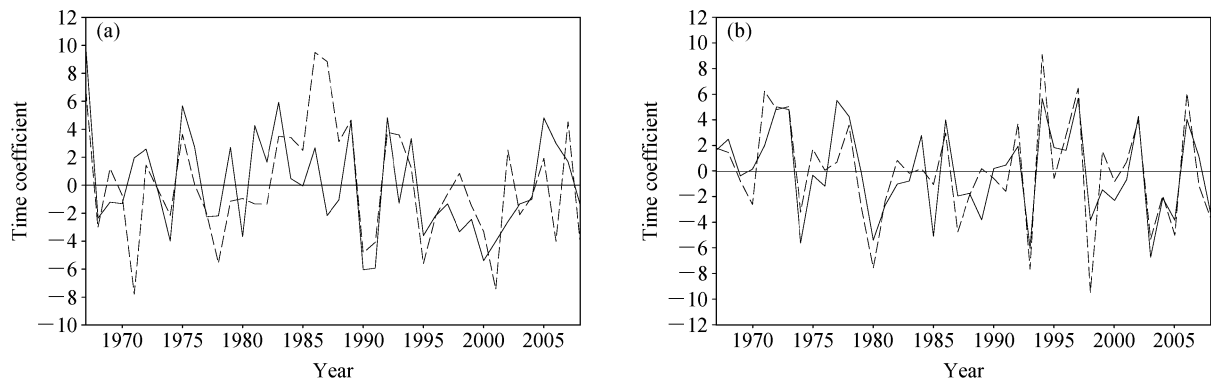


图 7 青藏高原 (a) 汛期降水第 1 模态时间系数(实线)和初夏降水第 1 模态时间系数(虚线), 以及 (b) 汛期降水第 2 模态时间系数(实线)和盛夏降水第 1 模态时间系数(虚线)演变曲线

Fig. 7 (a) Time evolution curve of the first EOF mode time coefficient of precipitation in flood season (solid line) and in early summer (dotted line) over the Tibetan Plateau; (b) time evolution curve of the second EOF mode time coefficient of precipitation in flood season (solid line) and the first EOF mode time coefficient of precipitation in midsummer (dotted line) over the Tibetan Plateau

为说明青藏高原汛期降水表现出的南北差异型(全区一致型)主要是受初夏(盛夏)降水的影响, 图 7 分别给出汛期降水第 1 模态时间系数与初夏降水第 1 模态时间系数以及汛期降水第 2 模态时间系数与盛夏降水第 1 模态时间系数年际变化曲线。由图可见, 它们都存在着较为一致的变化, 其相关系数分别为 0.51 和 0.82, 分别通过了 0.01 和 0.001 的相关性信度检验。由此可以得出, 青藏高原汛期降水表现出的南北差异型(全区一致型)可能主要受初夏(盛夏)降水的影响。

5 结论与讨论

根据 1967~2008 年青藏高原地区 67 个台站的月平均降水资料, 本文分析了该地区汛期降水

时空分布特征, 主要结论如下:

(1) 青藏高原大部分地区汛期降水降水量占全年的 80% 以上, 降水量大致由东南部向西北部随海拔递增而递减; 汛期降水较大的青藏高原中东部地区降水年变化较大, 是易发生旱涝的地区。西部和西北部降水不仅偏少, 其年降水又主要决定于汛期降水。

(2) 青藏高原汛期降水的主要存在 3 种空间分布型: 南北反向型、全区一致型、东南—西北反向型。其中以唐古拉山脉北侧为界表现出的青藏高原南北反向分布型, 可能是主要受初夏降水的影响, 而全区一致型的空间分布主要受盛夏降水的影响。

(3) 汛期降水南北反向型主要表现出 3~5 a 的年际变化周期以及 10~12 a 的年代际振荡周期, 汛期降水全区一致型在整个分析时域普遍存在 5~7 a 的年际振荡。

(4) 1967~2008 年青藏高原汛期降水南区和北区呈现出相反的变化趋势: 北区降水呈下降的趋势, 南区呈明显的增加趋势。

在以往的研究中关于青藏高原南区汛期降水, 普遍认为呈增加的趋势 (林振耀和赵昕奕, 1996; 杜军和马玉才, 2004; 缪启龙等, 2007), 而对于青藏高原北区降水变化趋势认识还存在分歧: 一些研究指出近几十年来汛期降水呈减少趋势 (韦志刚等, 2003; 吴绍洪等, 2005; 汪青春等, 2007); 但也有些研究表明变化趋势不明显 (缪启龙等, 2007; 张磊和缪启龙, 2007; 段克勤等,

2008); 甚至认为北区降水呈增加趋势 (刘吉宏等, 2009)。图 8 给出近 42 年汛期降水每 10 a 的线性增长率, 图中青藏高原大部分地区降水均表现出增加的趋势, 降水呈减少趋势的地区主要位于北区的东南部, 而这些地区恰好是北区降水相对集中的区域 (图 1a)。由此可见青藏高原降水变化趋势存在区域性差异 (王黎俊等, 2008), 不能简单的用增加或减少来概括, 它受到分析区域和时段的影响。同时, 在利用 EOF 分析青藏高原时空分布特征时, 由于所选用资料的站点数及资料的年限不同, 得出的结论可能有些差异。

青藏高原汛期降水时间跨度较大, 以上分析表明在不同时段 (初夏和盛夏) 青藏高原降水的空间分布存在一定的差异, 因而不同时段和不同区域降水的影响因子也不相同。因此在分析青藏高原降水分布异常的环流特征时, 需区分不同时段进行深入研究。

致谢 衷心感谢国家气象信息中心气象资料室 (Climatic Data Center, National Meteorological Information Center, CMA) 提供了青藏高原台站降水资料。

参考文献 (References)

- 戴加洗. 1990. 青藏高原气候 [M]. 北京: 气象出版社, 171-175. Dai Jiayi. 1990. Qinghai-Tibet Plateau Climate [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 171-175.
- 邓自旺, 尤卫红, 林振山. 1997. 子波变换在全球气候多时间尺度变化分析中的应用 [J]. 南京气象学院学报, 20 (4): 505-510. Deng Ziwan, You Weihong, Lin Zhengshan. 1997. Application of wavelet transformation to analysis of multiple time scale climate change [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 20 (4): 505-510.
- 杜军, 马玉才. 2004. 西藏高原降水变化趋势的气候分析 [J]. 地理学报, 59 (3): 375-382. Du Jun, Ma Yucai. 2004. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971 to 2000 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 59 (3): 375-382.
- 段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 2008. 青藏高原南北降水变化差异研究 [J]. 冰川冻土, 30 (5): 276-282. Duan Keqin, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. 2008. The difference in precipitation variability between the north and south Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 30 (5): 276-282.
- 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 (6): 633-636. Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. 1998. New evidences of that the

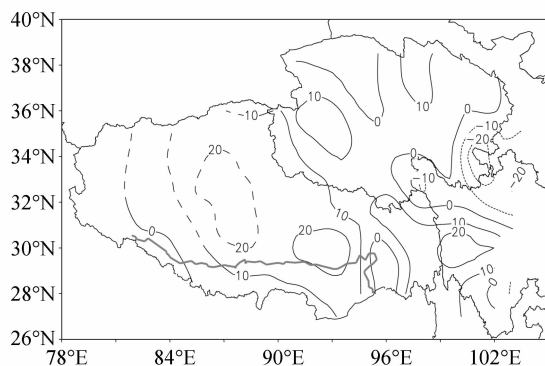


图 8 1967~2008 年青藏高原汛期降水线性趋势分布, 单位: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$

Fig. 8 Distribution of the linear trends of precipitation [$\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] in flood season over the Tibetan Plateau during 1967-2008

- Qinghai-Tibet Plateau was the source region of climatic variation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 43 (6): 633-636.
- 黄一民. 2007. 青藏高原降水时空分布特征分析 [D]. 湖南师范大学硕士学位论文, 1-65. Huang Yimin. 2007. Temporal-spatial characteristics of precipitation over the Tibetan Plateau [D] (in Chinese). Hunan Normal University Master Thesis, 1-65.
- 黄玉霞, 王宝鉴, 王鹏祥. 2006. 青海高原夏季降水异常及其水汽输送特征分析 [J]. 气象, 32 (11): 18-23. Huang Yuxia, Wang Baojian, Wang Pengxiang. 2006. Analysis of summer precipitation anomaly and water vapor transport in Qinghai Plateau [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (11): 18-23.
- 假拉, 周顺武, 丁锋. 2002. 北非高压的气候特征及其对中国夏季降水的影响 [J]. 南京气象学院学报, 25 (6): 816-822. Jia La, Zhou Shunwu, Ding Feng. 2002. The climatic character of North Africa subtropical high and its effect on summer precipitation in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (6): 816-822.
- 李生辰, 徐亮, 郭英香, 等. 2007. 近 34 a 青藏高原年降水变化及其分区 [J]. 中国沙漠, 27 (2): 307-314. Li Shengchen, Xu Liang, Guo Yingxiang, et al. 2007. Change of annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau and sub-regions in recent 34 years [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 27 (2): 307-314.
- 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), 26 (4): 354-358. Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. 1996. The spatial characteristics of air temperature and precipitation changes over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 26 (4): 354-358.
- 刘吉宏, 朱宝文, 马宗泰, 等. 2009. 青海湖北岸刚察地区近半个世纪降水变化特征分析 [J]. 青海科技, 5 (1): 36-39. Liu Jihong, Zhu Baowen, Ma Zongtai, et al. 2009. Analysis of characteristics of precipitation in northern shore of Qinghai Lake region near gangca in recently half a century [J]. Science and Technology of Qinghai (in Chinese), 5 (1): 36-39.
- 刘义军, 李林. 1999. 西藏高原降水、气温气候特征分析 [J]. 成都气象学院学报, 14 (1): 97-101. Liu Yijun, Li Lin. 1999. Climatological features of Tibetan Plateau precipitation [J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology (in Chinese), 14 (1): 97-101.
- 卢鹤立, 邵全琴, 刘纪远, 等. 2007. 近 44 年来青藏高原夏季降水的时空分布特征 [J]. 地理学报, 62 (9): 946-958. Lu Heli, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. 2007. Temporal-spatial distribution of summer precipitation over Qinghai-Tibet Plateau during the last 44 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 62 (9): 946-958.
- 缪启龙, 张磊, 丁斌. 2007. 青藏高原近 40 年的降水变化及水汽输送分析 [J]. 干旱区地理, 30 (1): 14-18. Miao Qilong, Zhang Lei, Ding Bin. 2007. Analysis of precipitation changes and water vapor in the Tibetan Plateau during the last four decades [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 30 (1): 14-18.
- 马振锋, 彭骏, 高文良, 等. 2006. 近 40 年西南地区的气候变化事实 [J]. 高原气象, 25 (4): 633-642. Ma Zhenfeng, Peng Jun, Gao Wenliang, et al. 2006. Climate variation of Southwest China in recent 40 Years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (4): 633-642.
- Niu T, Chen L X, Zhou Z J. 2004. The characteristics of climate change over the Tibetan Plateau in the last 40 years and the detection of climatic jumps [J]. Adv. Atmos. Sci., 21 (2): 193-203.
- 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 grads and their temporal-spatial distribution features in Tibet [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (2): 210-216.
- 乔全明, 张雅高. 1994. 青藏高压天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 15-17. Qiao Quanming, Zhang Yagao. 1994. Qinghai-Tibet Plateau Climate Synoptic Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 15-17.
- 孙艳青. 2004. 器测时期青藏高原降水时空变化规律探讨 [D]. 山东师范大学硕士论文, 1-45. Sun yanqing. 2004. Spatial-temporal characteristics of precipitation over the Tibetan Plateau during the modern instrumental observation period [D] (in Chinese). Shandong Normal University Master Thesis, 1-45.
- 汤懋苍, 李存强, 张建. 1988. 青藏高原及其四周的近代气候变化 [J]. 高原气象, 7 (1): 39-48. Tang Maocang, Li Cunqiang, Zhang Jian. 1988. The climate change of Qinghai-Xizang Plateau and its neighborhood [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 7 (1): 39-48.
- 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 Qinghai-Xizang Plateau was the source region of climatic variation [C] //The Proceedings of the First Symposium on the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 42-48.
- 唐红玉, 杨晓丹, 王希娟, 等. 2007. 三江源地区近 50 年降水变化分析 [J]. 高原气象, 26 (2): 47-54. Tang Hongyu, Yang Xiaodan, Wang Xijuan, et al. 2007. Analyses of precipitation change in the source regions of three rivers during 1956-2004 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (2): 47-54.
- 王黎俊, 刘彩红, 孙安平, 等. 2008. 近 45 年青海省夏季降水异常特征分析 [J]. 干旱地区农业研究, 26 (2): 225-230. Wang Lijun, Liu Caihong, Sun Anping, et al. 2008. Analysis of abnormal characteristics of summer precipitation in Qinghai during the last 45 years [J]. Agricultural Research in the Arid Areas (in Chinese), 26 (2): 225-230.
- 汪青春, 秦宁生, 张占峰, 等. 2007. 青海高原近 40 a 降水变化特征及其对生态环境的影响 [J]. 中国沙漠, 27 (1): 153-158. Wang Qingchun, Qin Ningsheng, Zhang Zhanfeng, et al.

2007. Precipitation change and its impact on eco-environment of Qinghai Plateau for the last 40 years [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 27 (1): 153–158.
- 王善华. 1993. 南方涛动和我国青藏高原降水之间是有联系的 [J]. *气象科学*, 13 (4): 410–416. Wang Shanhua. 1993. Correlations between the precipitation over the Tibet Plateau and the sea temperature of its neighbouring and the Southern Oscillation (SO) [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 13 (4): 410–416.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 42–61, 99–104. Wei Fengying. 2007. *Modern Statistical Climatic Diagnosis and Forecasting Technics* [M] (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 42–61, 99–104.
- 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, Huang 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.
- 吴国雄. 2004. 我国青藏高原气候动力学研究的近期进展 [J]. *第四纪研究*, 24 (1): 1–9. Wu Guoxiong. 2004. Recent progress in the study of the Qinghai–Xizang Plateau climate dynamics in China [J]. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 24 (1): 1–9.
- 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.
- Yanai M, Li C, Song Z. 1992. Seasonal heating of the Tibetan plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70 (1): 319–350.
- 姚莉, 吴庆梅. 2002. 青藏高原气候变化特征 [J]. *气象科技*, 30 (3): 162–164. Yao Li, Wu Qingmei. 2002. Climate change character in the Tibetan Plateau [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 30 (3): 162–164.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 54–59. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. *Qinghai–Tibetan Plateau Meteorology* [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 54–59.
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡 [J]. *气象学报*, 28 (2): 108–121. Ye Duzheng, Luo Siwei, Zhu Baozhen. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Qinghai–Xizang Plateau and its surrounding [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28 (2): 108–121.
- 张磊, 缪启龙. 2007. 青藏高原近 40 年来的降水变化特征 [J]. *干旱区地理*, 30 (2): 240–246. Zhang Lei, Miao Qilong. 2007. Precipitation changes in the Tibetan Plateau during the last four decades [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 30 (2): 240–246.
- Zhao P, Chen L X. 2001. Interannual variability of atmospheric heat source sink over the Qinghai–Xizang Plateau and its relation to circulation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (1): 106–116.
- 周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 2005. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征 [J]. *高原气象*, 24 (6): 880–888. Zhou Changyan, Li Yueqing, Li Wei, et al. 2005. Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai–Xizang Plateau and its surroundings [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (6): 880–888.
- 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): 39–45. Zhou Shunwu, Pubu Zhuoma, Jia La. 2000. Analysis of rainfall patterns during rainy season over the Tibetan Plateau [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 26 (5): 39–45.
- 周顺武, 假拉, 杜军. 2001a. 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. 2001a. 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.
- 周顺武, 假拉, 杜军. 2001b. 西藏高原夏季降水对 ENSO 的响应 [J]. *南京气象学院学报*, 24 (4): 570–575. Zhou Shunwu, Jia La, Du Jun. 2001b. Response of the summer precipitation over the Tibetan plateau to ENSO events [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 24 (4): 570–575.
- 朱西德, 李林, 秦宁生, 等. 2003. 青藏高原年降水量的气候变化及其异常类型研究 [J]. *气象科学*, 23 (4): 452–459. Zhu Xide, Li Lin, Qin Ningsheng, et al. 2003. Studies on climatic variation and anomaly types of the annual precipitation over Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 23 (4): 452–459.