

陈涛, 智海, 林鹏飞. 2019. 青藏高原西部春季降水年代际变化趋势 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 639–649. CHEN Tao, ZHI Hai, LIN Pengfei. 2019. Study on the decadal trend of spring precipitation in the western Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 639–649. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19005

青藏高原西部春季降水年代际变化趋势

陈涛^{1,2} 智海¹ 林鹏飞³

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 西藏自治区气候中心, 拉萨 850000

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 利用ERA-Interim和APHRO_MA资料分析了1979~2007年间青藏高原西部春季(3~5月)降水的年代际变化趋势及可能原因。结果表明, 青藏高原西部局部区域春季降水呈显著减少趋势, 降水的变化趋势与其西南部辐合上升运动及阿拉伯海北部水汽含量变化存在联系。发现研究区春季降水增加时伴随其西南部显著的辐合上升异常, 同时高层(500 hPa)位势高度场负异常中心与环流的气旋式正异常中心一致, 而低层(850 hPa)的辐合上升异常相对较弱; 研究区春季降水增加同时伴随阿拉伯海北部至研究区西南部的高、低层比湿正异常, 其中低层的比湿正异常更为显著, 其正异常中心均位于阿拉伯海北部。上述区域的水汽输送能解释研究区春季降水55.3%的变化, 同时两者的变化趋势具有很好相关性。研究显示1979~2007年间研究区春季降水呈下降趋势主要是由阿拉伯海北部低层向印度次大陆水汽输送减少, 以及研究区南部高层辐合上升运动减弱造成的。青藏高原西部春季降水变化趋势和相关区域水汽变化的一致性, 可以为分析高原气候变化提供依据。

关键词 高原西部 春季降水 变化趋势 水汽输送

文章编号 1006-9585(2019)05-0639-11

中图分类号 P461.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19005

Study on the Decadal Trend of Spring Precipitation in the Western Tibetan Plateau

CHEN Tao^{1,2}, ZHI Hai¹, and LIN Pengfei³

1 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Tibet Autonomous Region Climate Centre, Lhasa 850000

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Using ERA-Interim and APHRO_MA data, the spring precipitation decadal trend in the western Tibetan Plateau during 1979–2007 and its possible causes were analyzed. The results indicate that the change in spring precipitation in the western Qinghai–Tibet Plateau presented a significant decreasing trend, which is clearly related to both the convergence rising in the southwestern Tibetan Plateau and water vapor transport from the northern Arabian Sea. A significant convergence anomaly was found to be generated when the negative high-level (500 hPa) geopotential height field and negative low-level convergence (850 hPa) were occupied, which provided the dynamic conditions for spring precipitation in the southwestern Tibetan Plateau. Moreover, the location of the negative high-level geopotential height

收稿日期 2019-01-14; 网络预出版日期 2019-05-08

作者简介 陈涛, 男, 1983年出生, 硕士研究生, 主要从事高原遥感与生态环境研究。E-mail: tibet_ct@163.com

资助项目 国家重点研发计划2018YFC1506002, 国家自然科学基金项目41665002、41465006

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1506002), National Natural Science Foundation of China (Grants 41665002 and 41465006)

field anomaly was consistent with the cyclonic anomaly center in the wind field, while that of the low-level convergence was relatively weak. The spring precipitation anomaly was accompanied by both specific humidity anomalies at the high- and low-level geopotential height fields in the northern Arabian Sea; however, the positive specific humidity anomalies of the lower layers were more significant. The water vapor transport in the northern Arabian Sea accounted for 55.3% of the total spring precipitation change in the southwestern Tibetan Plateau. The study shows that the decreasing trend of spring precipitation in the southwestern Tibetan Plateau from 1979 to 2007 was mainly caused by the decreasing water vapor transport from the lower layer of the northern Arabian Sea to the Indian subcontinent and the weakening high-level convergence of the southern Tibetan Plateau. The consistency of trend in spring precipitation in the western Tibetan Plateau and water vapor changes in related areas can provide guidance to analyze the climate change in the Tibetan Plateau.

Keywords the western Tibetan Plateau, Spring precipitation, Variation trend, Water vapor transport

1 引言

青藏高原（以下简称高原）平均海拔 4000 m 以上，中国境内的，其东缘为横断山脉，西缘与帕米尔高原相接，南缘为喜马拉雅山脉，北缘至昆仑山—祁连山，范围为（26°00′12″N~39°46′50″N，73°18′52″E~104°46′59″E）（张镱锂等，2002）。独特的地理条件使得高原成为南北极之外地球的第三大天然水库，被称为“亚洲水塔”，是多条亚洲大江大河的发源地（孙鸿烈等，2012；Yao et al., 2012）。降水是高原水资源的重要补给方式之一，也是大气水汽循环的关键环节（徐祥德等，2014；余坤伦等，2018）。在全球性升温背景下，高原作为气候变化的启动区和放大器（潘保田和李吉均，1996），其降水及水汽变化对区域及全球气候变化的响应及作用具有重要的研究意义。

高原降水具有明显的空间差异和时间变化。观测和模拟发现其空间分布呈现自东南向西北递减的形态；而且高原降水表现出明显的季节、年际和年代际特征（韦志刚等，2003；张文纲等，2009），例如，季节变化中夏季（6~8月）降水比重最大，雨季（一般指 5~9 月）降水主导年降水量变化（周顺武等，2011；齐文文等，2013；李晓英等，2016）。高原降水的空间和时间变化主要受大气环流的影响，表现为高原冬季受西风控制，高原西部因地形特征形成南支绕流、北支绕流、以及爬升气流；由于夏季西风带位于高原北侧，南侧受印度季风控制，暖湿气流经南部进入高原（Yao et al., 2013；Yang et al., 2014），这也使得高原的不同区域具有明显的季风气候特征。降水的发生与水汽输送密切相关，由于高原地形陡峭，水汽如何进入高

原一直高原降水研究的重点（段玮等，2015；林厚薄等，2016；吴国雄等，2018）。目前主要存在 3 种水汽输送机制：第一种为传统的爬坡观点，水汽沿高原东南部地势较平缓的河谷、山谷爬坡进入高原（李天航和刘宣飞，2016）；第二种为阶梯式爬升，通过高原上空的整层视热源、耦合的低层辐合高层辐散结构、垂直热对流，实现高原水汽爬升，整个过程类似热带气旋 CISK（第二类条件不稳定）机制（Xu et al., 2014）；第三种为先抬升后平流，即印度次大陆低层的强烈辐合上升将水汽输送至高层，高层辐散水汽平流进入高原（Dong et al., 2016）。

气候变化背景下高原降水量是增加还是减少，目前没有明确结论（段安民等，2016）。对于高原整体，1984~2009 年高原年平均降水没有检测到明显的变化趋势（Zhang et al., 2013），丁一汇和张莉（2008）研究 1961~2006 年高原降水得到同样的结论。不同的观点则认为 1961~2007 年高原降水呈增加趋势，倾向率为 $9.1 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ （杨春艳等，2014），类似的研究指出 1961~2010 年来高原降水呈现 $12.48 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ 的增加趋势（李林等，2010）。出现以上争议主要是由于研究时间段以及台站选择不同（段安民等，2016），同时说明了高原降水变化的复杂性。尤其是对高原的不同区域而言，1961~2015 年高原大部分区域年降水量增加，“一江两河”流域、川西南以及滇西北地区年降水量减少（冀钦等，2018）。对不同季节而言，1961~2006 年高原冬季和春季降水呈现显著增加的趋势，秋季降水表现为显著减少趋势，夏季降水变化不显著（丁一汇和张莉，2008）。关于高原降水趋势的研究大多是基于台站资料，高原上气象台站稀少，地形复杂，导致台站资料的空间代表

性受到限制(周顺武和张人禾, 2009; 赵平等, 2018), 高原西部这种现象更为突出。此外, 以上研究所指的高原均指中国境内的部分, 3000 m 等高线以上的高原包括更广阔的区域, 这些区域的降水如何变化? 这方面的研究还未见相关报道。

基于上述问题, 本文选择格点降水资料(准确度降低, 空间分辨率提高)对 3000 m 等高线以上的高原降水变化进行分析。数据显示高原西部局部区域(主体位于国境线外)年平均降水呈现显著减少趋势, 其中春季(3~5月)尤其明显, 本文从水汽输送角度分析了该区域春季降水变化趋势的可能原因。虽然高原春季降水较少, 但能够直接影响高原春季积雪日数和地表感热, 与土壤湿度之间亦存在反馈关系(王澄海和尚大成, 2007), 而这些物理量与我国东部夏季降水甚至亚洲季风均有联系(陈丽娟等, 1996; 朱玉祥等, 2007; 王澄海和崔洋, 2011; 竺夏英等, 2013; 陈宇航等, 2016; 李登宣和王澄海, 2016; 王静等, 2016; 段安民等, 2018)。因此, 关于高原春季降水的研究具有重要意义。

2 资料与方法

本文所用的资料包括日本气象厅人类自然研究所和气象研究所创建的亚洲降水产品(APHRO-MA)(Yatagai et al., 2012), 分辨率是 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度), 时间段为 1951~2007 年; 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-Interim 资料(Dee et al., 2011), 包括水平及垂直风、位势高度、比湿、地面气压(日资料和月平均资料), 选用的水平分辨率是 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度), 选取的时间段为 1979~2007 年, 主要使用 500 hPa 和 850 hPa 两个层次的数据。

文中主要使用了回归分析方法。使用最小二乘法进行线性回归分析时, 变量 X 与变量 Y 随时间变化的线性关系为

$$Y = a + bX, \quad (1)$$

其中, a 为截距, b 为回归系数。当使用 X 和 Y 的距平(异常), 截距为 0, 上式变为:

$$Y_1 = bX_1, \quad (2)$$

其中, X_1 和 Y_1 分别表示 X 和 Y 的异常。本文在进行回归分析时 X_1 使用的是标准化时间序列, 当 X_1 等于 1 时, Y_1 等于 b , 回归系数 b 表示的 Y_1 的值对应于 X_1 的标准差, 即当 X_1 变化一个标准差时, Y_1 变

化 b 个标准差(Sun and Wang, 2018)。因此, 本文第四节的回归图使用回归系数 b 来表示 X_1 和 Y_1 之间的线性关系。例如, 研究区降水标准化时间序列回归 500 hPa 位势高度异常对应于研究区降水的标准差, 表示研究区降水每增加一个标准差, 500 hPa 位势高度变化多大。本文所有的回归分析均使用预测器(自变量)的标准化时间序列(以下简称时间序列)回归目标(因变量)的距平序列。

3 研究区域及时段

使用 APHRO-MA 资料计算得到 1951~2007 年高原春季降水年变化趋势(图 1), 发现高原中东部总体表现为增加趋势, 而高原西部呈减少趋势, 且在西部 3000 m 等高线与西藏自治区西边界之间存在极值中心。该极值中心为选取的研究区(图 1 白色虚线框, 下同, 以下分析简称研究区), 范围为 ($32.125^\circ\text{N} \sim 33.375^\circ\text{N}$, $76.875^\circ\text{E} \sim 79.125^\circ\text{E}$)。

由于研究区范围相对较小, 选择高分率的 ERA-Interim 资料分析水汽输送特征。该资料从 1979 年开始, 选取 ERA-Interim 资料与 APHRO-MA 资料共有的时间段, 即 1979~2007 年为研究时间段。通过计算研究区的区域平均, 1951~2007 年研究区春季平均降水距平如图 2 所示。可以发现, 1979~2007 年的变化趋势与 1951~2007 年的变化趋势基本一致, 1951~2007 年的线性倾向率为 $-0.023 \text{ mm (d a)}^{-1}$, 1979~2007 年的线性倾向率为 $-0.038 \text{ mm (d a)}^{-1}$, 均通过 0.01 显著性检验。因此, 可以使用 1979~2007 年资料表示 1951~2007 年研究区春季降水的变化趋势。

4 春季降水回归相关物理量场异常

研究区 1979~2007 年春季降水时间序列回归的风场异常如图 3 所示。500 hPa 环流场上, 可以看到研究区降水增多伴随其西部气旋式异常以及西南部垂直风的负异常, 即下沉运动减弱或上升运动增强(图 3a), 垂直风负异常区域较大, 从气旋中心向东南延伸, 覆盖印度次大陆中西部, 最南到阿拉伯海边缘。通过检验的水平风场主要分布于气旋中心西部和南部, 通过检验的垂直风从气旋中心沿

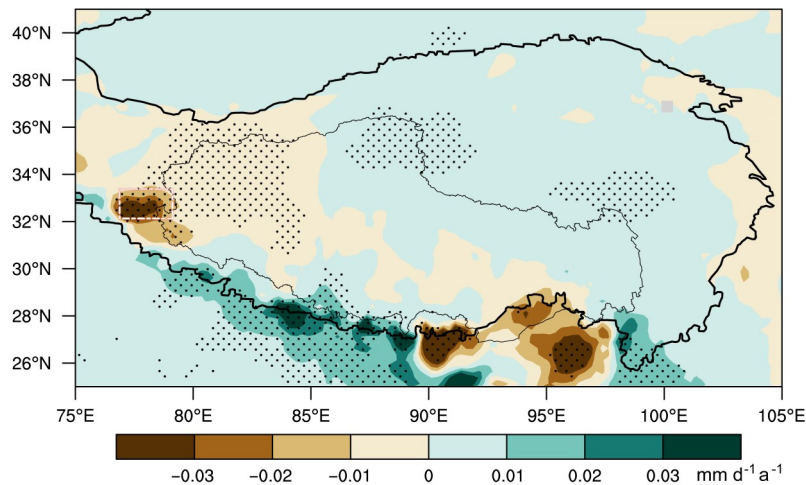


图1 1951~2007年高原春季降水年变化趋势（黑点表示通过0.01双侧 t 检验的区域，黑色粗实线为3000 m等高线，黑色细实线为西藏自治区边界，白色虚线为选取的研究区）

Fig. 1 Precipitation trend of spring in the Tibetan Plateau during 1951–2007. Dots indicate statistically significant areas ($P < 0.01$, using a two-sided t -test), the black thick solid line is attitude contour line at the 3000 m, the black thin solid line is the border of the Tibet, and the white dotted line is the selected study area

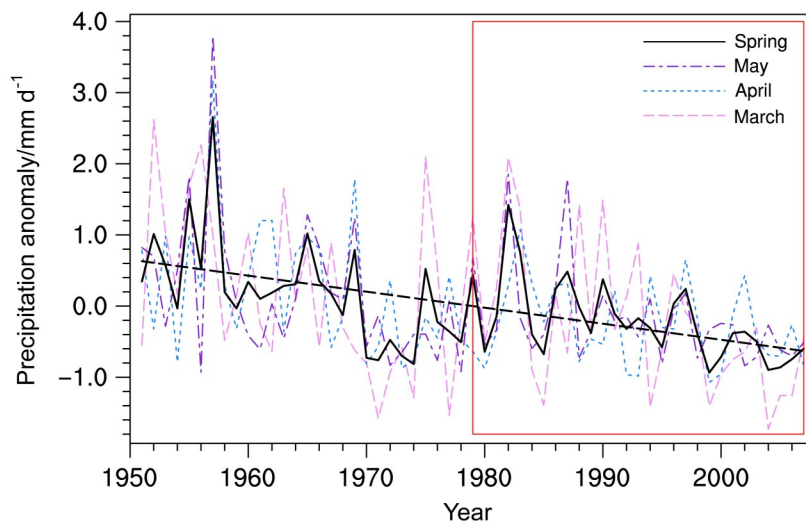


图2 研究区1951~2007年春季及3~5月降水距平（红色框表示选取的研究时间段为1979~2007年）

Fig. 2 Precipitation anomalies in spring, March, April, and May in the study area from 1951 to 2007 (red box indicates the selected study period 1979–2007)

高原3000 m等高线向东南延伸（图3b）。值得注意的是，气旋中心的垂直风通过检验区域主要分布在其东南部，该区域也是气旋式异常中水平风切变最明显的区域。850 hPa上，研究区南部存在类似的气旋式异常，但强度明显偏弱，且中心位置偏南，气旋中心附近的垂直风负异常较弱，同时在阿拉伯海和孟加拉湾上均存在较明显的反气旋式异常（图3c），水平风与垂直风通过检验的区域不连续，分布较为零散（图3d），说明对于和降水有关的环流

输送主要位于500 hPa。

图4为1979~2007研究区年春季降水时间序列回归500 hPa位势高度异常，高原整体及周边的位势高度均呈现负异常。除高原西北部以外，高原主体及印度次大陆北部均通过显著性检验，负异常的极值区位于研究区西部。负异常极值中心的位置与图3a中气旋式异常中心基本一致，与垂直风负异常中心的匹配有偏差。此外，负异常极值中心西北部的位势高度随研究区降水的变化也很大，但未通

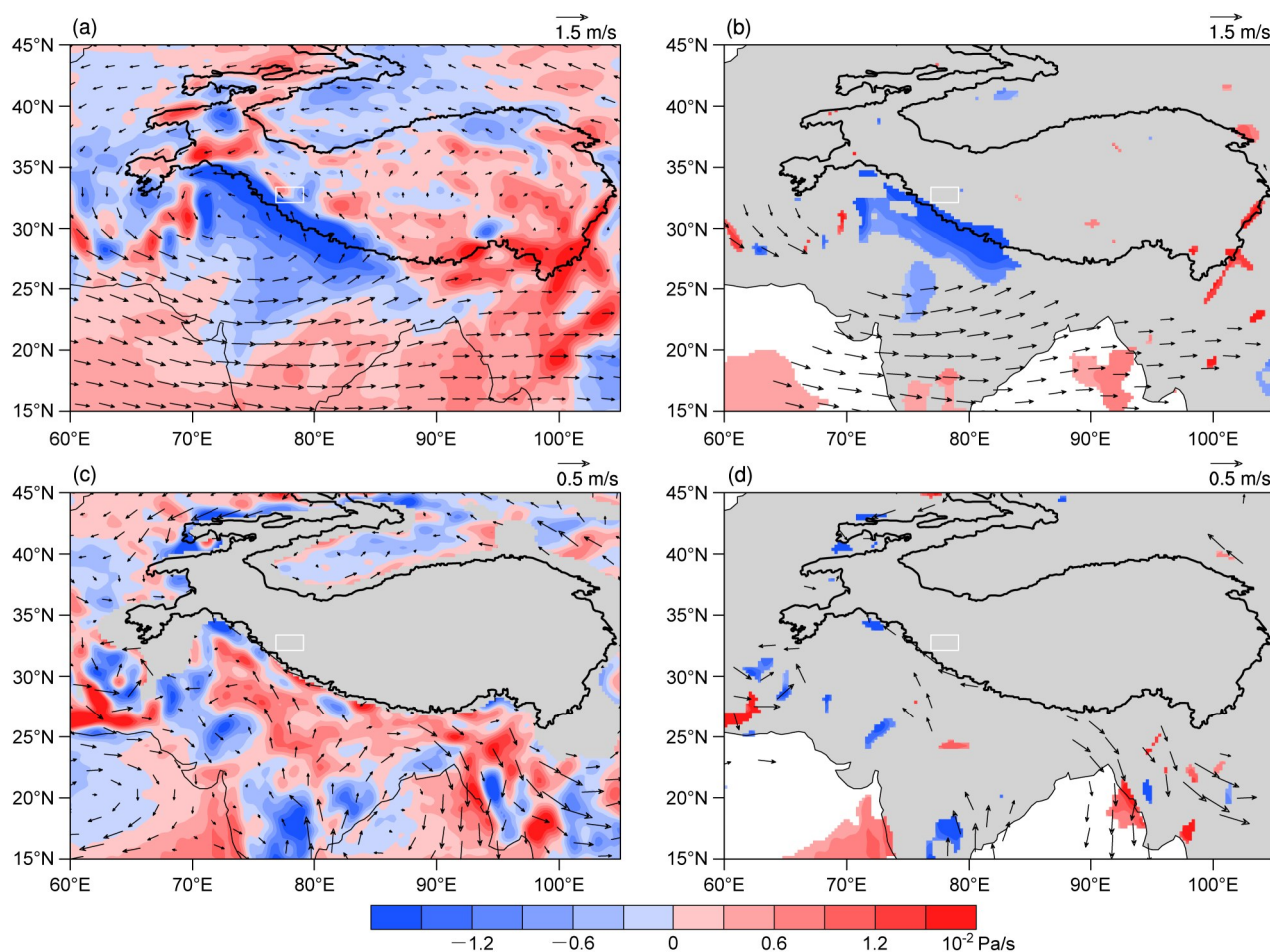


图3 1979~2007年研究区春季降水标准化时间序列回归风场异常(箭头表示水平风, 填色表示垂直风): (a) 回归的500 hPa风场异常, (b) 为(a)通过0.01双侧 t 检验的区域; (c)、(d)与(a)、(b)类似, 但为回归的850 hPa风场异常

Fig. 3 Anomalies of 500-hPa wind (a) regressed on the standardized time series of the spring precipitation in the study area from 1979 to 2007. The arrows indicate horizontal wind anomalies and the filled color indicates vertical wind; (b) shows the statistically significant areas ($P < 0.01$, using a two-sided t -test) in (a). (c) and (d) are respectively similar to (a) and (b), but are anomalies of 850 hPa wind

过显著性检验, 东南部则有较大区域通过显著性检验, 该区域与图3a中垂直风负异常区域基本相同。结合图3、图4可知, 研究区降水与其西南部500 hPa的辐合上升运动正相关。高原主体大范围通过显著性检验的负异常可能与气候变化有关, 全球变暖背景下, 高原升温更加显著(Yao et al., 2013), 根据理想气体状态方程, 气压不变(500 hPa)的情况气温升高, 将导致气体密度减小(即体积增加), 从而使500 hPa的位势高度呈现增加的趋势, 该上升趋势与研究区降水的下降趋势具有较好的负相关, 导致高原主体大部分通过显著性检验。回归的850 hPa位势高度异常(图略)在研究区南部呈不明显的正异常, 没有通过显著性检

验的区域。

大气水汽含量是影响降水的关键因素, 通过1979~2007年研究区春季降水时间序列回归高原及周边比湿异常(图5)。在500 hPa和850 hPa层次上, 研究区西南部均存在比湿正异常带。500 hPa比湿正异常带总体呈东西分布, 东部略偏北; 西部中心位于阿拉伯海北部, 通过显著性检验的范围更大; 东部中心位于研究区南部, 通过显著性检验的区域较小; 两个中心之间的区域未通过显著性检验。850 hPa比湿正异常带呈西南至东北的分布形态, 同样分成两个中心。西南部中心通过显著性检验的区域更大, 从阿拉伯海北部向北延伸至印度次大陆; 东北部的中心位于研究区西部, 通过显著

性检验的区域较小。与水平风场的气旋式异常（图3）一致，比湿正异常带从西至东也显现出气旋式偏转，在印度次大陆上向北延伸。与比湿正异常带相对应的，是高原东南部至中南半岛的比湿负异常区。即研究降水增加时，伴随着来自阿拉伯海的水汽在印度次大陆向北偏转，在研究区西南部形成比湿正异常区，气旋式偏转导致向东部的的水汽输送减弱，形成了高原东南部至中南半岛的比湿负异常区。

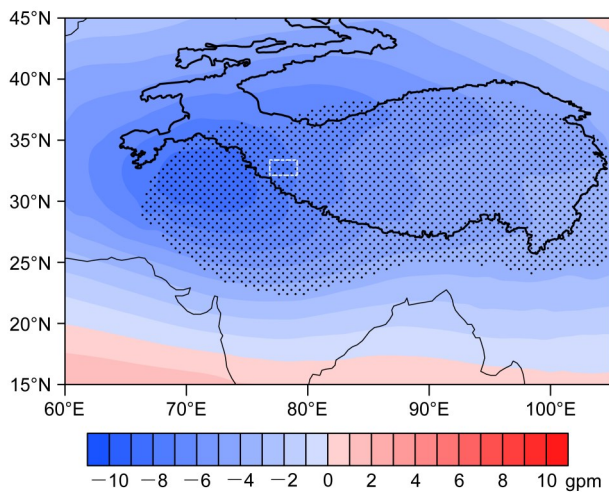
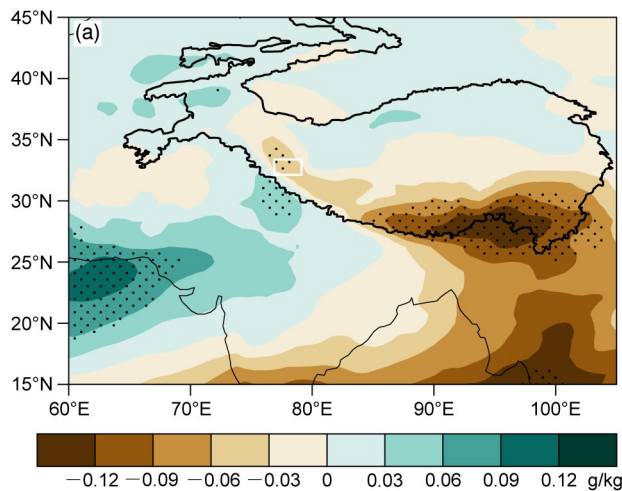


图4 1979~2007研究区年春季降水标准化时间序列回归500 hPa位势高度异常，黑点表示通过0.01双侧 t 检验的区域

Fig. 4 Anomalies of 500-hPa geopotential height regressed on the standardized time series of the spring precipitation in the study area from 1979 to 2007. The dots indicate statistically significant areas ($P < 0.01$, using a two-sided t -test)



5 春季降水趋势归因

上述的分析表明，研究区降水的变化与其西南部水汽输送有关。选择回归物理场的极值区作为关键区，建立相关参数的时间序列（关键区的区域平均）作为自变量，通过多元线性回归方程拟合研究区春季降水距平序列。多元线性回归方程的建立可以明确相关参数对研究区春季降水的影响程度，进而从水汽输送的角度解释研究区春季降水变化趋势。位势高度能表征风的辐合辐散特征，因此使用位势高度代替风场（使用风场作为参数，需要考虑纬向风、经向风、垂直风3个变量，且纬向风与经向风的关键区难以确定）。结合之前的分析，选择500 hPa位势高度（850 hPa位势高度异常没有通过显著性检验的区域）、500 hPa比湿及850 hPa比湿作为拟合参数，并根据图4、图5选取比湿及位势高度的关键区（图6）。图6a代表500 hPa及850 hPa比湿正异常极值中心（见图5）。由于500 hPa位势高度负异常极值中心与500 hPa垂直风负异常极值中心不重合，因此拟定了两个区域进行筛选。图6b代表的是图4位势高度负异常极值中心，同时是图3a中气旋式异常的中心；图6c代表图3a中垂直风负异常极值中心以及气旋式异常中水平风切变最明显的区域，该区域位于500 hPa位势高度负异常极值中心东南部，在图4中通过显著性检验。3个关键区范围分别为（20.5°N~25.5°N，60°E~

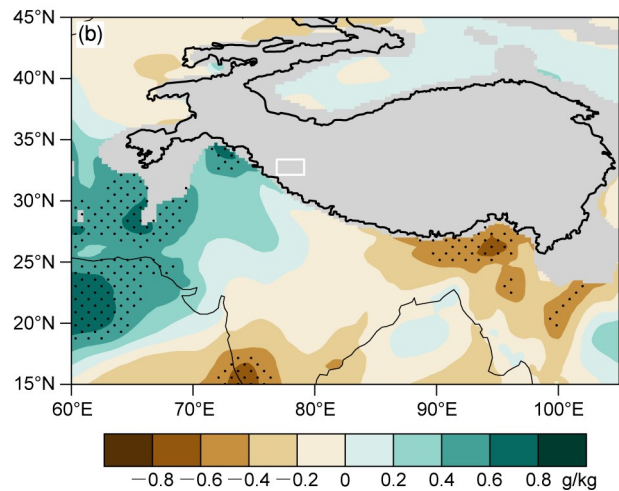


图5 研究区1979~2007年春季降水标准化时间序列回归（a）500 hPa及（b）850 hPa比湿异常。黑点表示通过0.01双侧 t 检验区域

Fig. 5 Anomalies of (a) 500-hPa and (b) 850-hPa specific humidities regressed on the standardized time series of the spring precipitation in the study area from 1979 to 2007. The dots indicate statistically significant areas ($P < 0.01$, using a two-sided t -test)

66°E)、(30°N~33°N, 68.5°E~74°E)、(25.5°N~29.5°N, 74°E~78°E)。

计算结果显示使用a关键区、b关键区建立回归模型的拟合优度为0.728, 调整 R^2 为0.474, 即可以解释研究区春季降水47.4%的变化; 使用a、c关键区建立回归模型的拟合优度为0.770, 调整 R^2 为0.545, 可以解释研究区春季降水54.5%的变化。此外, 使用a关键区、b关键区建立回归模型时3个自变量均未通过0.05显著性检验(单样本 t 检验); 使用a关键区、c关键区时有两个自变量通过0.05显著性检验。因此, 选择c关键区作为500 hPa位势高度的关键区。进一步分析, 使用a关键区、

c关键区建立的回归模型中, 500 hPa位势高度、500 hPa比湿、850 hPa比湿3个自变量的显著性分别为0.039、0.477、0.035。由于500 hPa比湿没有通过0.05显著性检验, 且方程中存在两个比湿变量, 将500 hPa比湿去除后进行回归。最终建立的二元线性回归方程为

$$y = 0.232x_1 - 0.245x_2 - 1.226 \times 10^{-8}, \quad (3)$$

其中, y 表示拟合的研究区春季降水距平, x_1 表示a关键区850 hPa比湿时间序列, x_2 表示c关键区500 hPa位势高度时间序列。回归模型的拟合优度为0.765, 调整 R^2 为0.553, 与去除500 hPa比湿前比较, 拟合优度略有降低, 但调整 R^2 略微增加。最终确定的回归模型能够解释研究区春季降水55.3%的变化, 模型整体通过0.01的显著性检验, x_1 、 x_2 两个自变量的显著性分别为0.005、0.004, 均通过0.01显著性检验。拟合结果与研究区春季降水距平如图7所示, 两条曲线变化基本一致, 研究区春季降水的变化趋势为 $-0.038 \text{ mm (d a)}^{-1}$, 拟合降水的变化趋势为 $-0.025 \text{ mm (d a)}^{-1}$, 拟合结果能够很大程度体现研究区春季降水的变化趋势。对结果有显著影响的两个自变量, x_1 、 x_2 的变化趋势分别为每年 -0.055 、 0.049 个标准差。这说明阿拉伯海向印度次大陆水汽输送的减少, 以及研究区南部位势高度增加(气旋式异常减弱), 是导致研究区春季降水呈现减少趋势的主要原因。阿拉伯海低层水汽的权重相对较高, 对研究区春季降水变化影响更大。

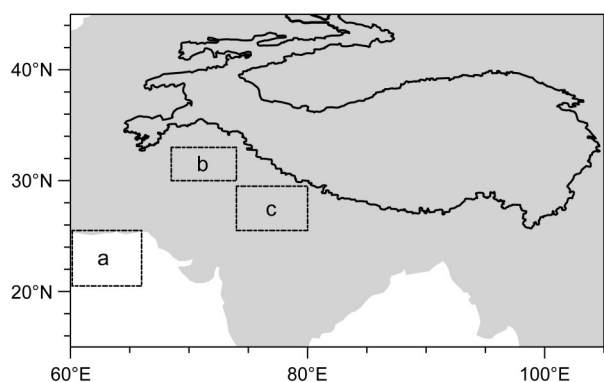


图6 水汽输送关键区位置: (a) 比湿关键区, (b) 和 (c) 位势高度关键区 (阴影是陆地)

Fig. 6 Key area locations of water vapor transport: (a) The key area of specific humidity; (b) and (c) indicate the key areas of potential height. Shaded area represents land

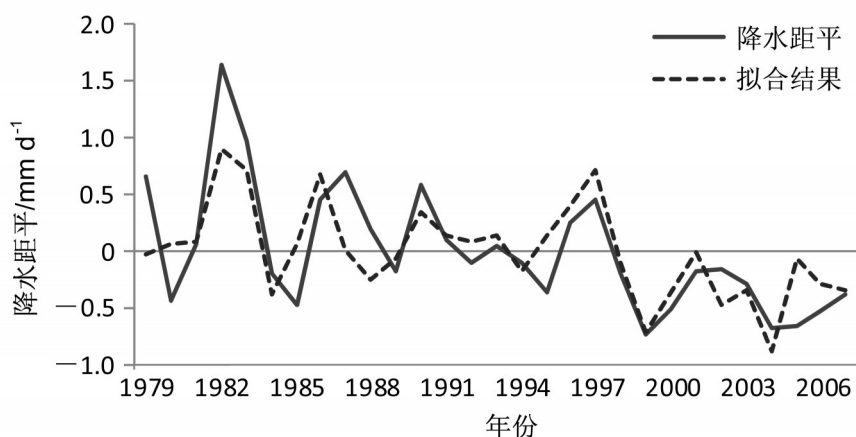


图7 研究区春季降水距平的时间序列与拟合结果

Fig. 7 Time series of spring precipitation anomalies in the study area and the result of binary linear regression

6 结论和讨论

降水一直是天气和气候研究的重点,尤其是在全球升温的情况下,高原的降水对气候变化的响应成为研究的热点。尽管现代气象科学飞速发展,但关于高原的相关研究,尤其是高原的部分区域受制于资料的限制,仍存在着很大的不确定性(战云健, 2018)。本文根据 APHRO_MA 降水资料,针对高原上测站比较稀少的西部地区,研究其降水的变化趋势和可能的原因。这个工作会对我们认识高原的气候变化和高原气候对全球变暖的响应有一定积极意义。

研究发现 1979~2007 年高原西部局部区域春季降水呈现显著减少趋势。将该区域确定为研究区,通过研究区春季降水时间序列回归与水汽输送相关的物理量异常,确定对研究区春季降水有显著影响的物理量及其分布。利用关键区 850 hPa 比湿和 500 hPa 位势高度的时间序列回归研究区春季降水异常,拟合结果在很大程度上体现了研究区春季降水的减弱趋势。结果表明阿拉伯海向印度次大陆水汽输送的减少,以及研究区西南部位势高度增加(气旋式异常减弱),是导致研究区春季降水呈现减少趋势的重要原因。

资料可信度是科学研究的基础,如果 APHRO 资料在高原西部不适用,则研究区春季降水趋势可能为虚假信号。之前的研究显示,APHRO 资料的降水总量、强度和频率的年际变化趋势在中国地区与观测基本一致,可以准确表征雨带的季节性移

动,但存在强度偏小、降水频率偏大的问题(韩振宇和周天军, 2012; 韦芬芬等, 2013)。使用狮泉河站(距离研究区最近的气象站)降水资料对 APHRO 资料进行了验证(图 8a),结果表明 1979~2007 年间两种降水资料的相关系数为 0.54,通过 0.01 水平双侧 t 检验,且线性倾向率基本一致[分别为 $0.0001 \text{ mm (d a)}^{-1}$ 、 $0.00012 \text{ mm (d a)}^{-1}$],均表明狮泉河站春季降水不存在显著的变化趋势。在研究区,使用 TRMM 卫星降水资料(Huffman et al., 2007)进行了验证(该资料从 1998 年开始),两种资料随时间的变化基本一致(图 8b)。因此,APHRO 资料在研究区适用性较高,该资料显示的研究区春季降水变化趋势较为可信。

影响降水的因素很多,本文只是从水汽输送的角度对研究区春季降水趋势进行了分析。已有研究表明,高原对流系统对当地降水的贡献可超过 70%(Hu et al., 2017),研究区的对流性降水是否对其春季降水趋势有影响?此外,春季是冬夏两种大气环流“型”的过渡季节,高原季风区西风带北跳多年平均时间为第 31 候(方韵等, 2016),即 5 月底 6 月初,西风带北跳时间的变化是否对研究区春季降水变化趋势存在影响?本文确定的研究区范围较小,是否存在其他局地因素的影响?这些问题都有待探讨。进一步分析,1979~2007 年间水汽输送的变化只对研究区春季降水造成了显著影响,研究区西南部(印度次大陆中西部)春季降水减少并不显著(图略)。如果印度次大陆水汽通过先抬升后平流的方式进入研究区(Dong et al., 2016),那么降水量

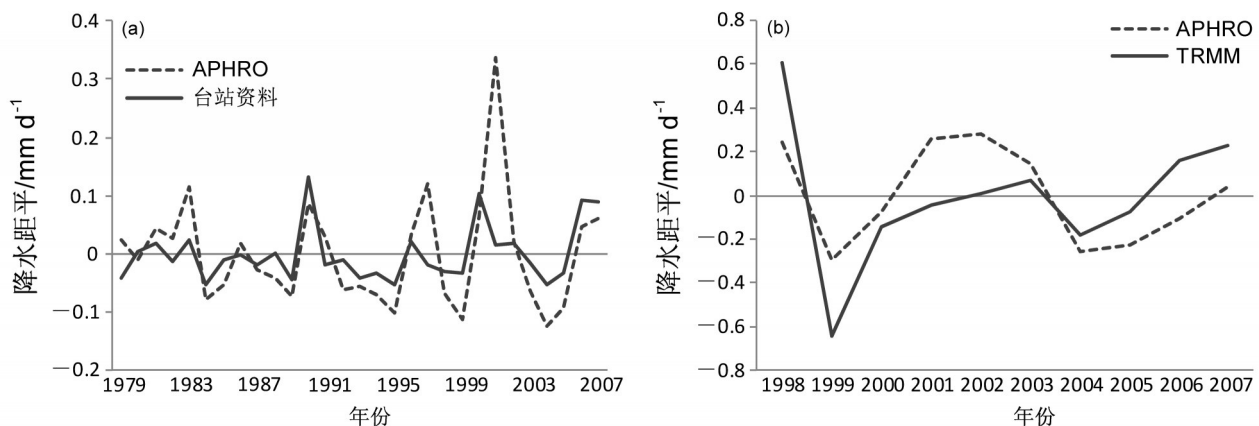


图 8 (a) 1979~2007 年狮泉河站 APHRO 资料与台站春季降水量距平比较和 (b) 1998~2007 年研究区 APHRO 资料与 TRMM 资料春季降水量距平比较

Fig. 8 (a) Comparison of spring precipitation anomalies between APHRO data and observations at Shiquanhe station from 1979 to 2007 and (b) comparison of spring precipitation anomalies between APHRO data and TRMM data in the study area from 1998 to 2007

最大的区域、降水变化最显著的区域应该是水汽抬升区,而非研究区,这说明先抬升后平流不是研究区春季降水的主要方式。考虑到西藏阿里地区的象泉河是印度河最大支流萨特累季河的源头,推测水汽可能沿河谷爬坡进入研究区,进而形成降水。研究区西南部的气旋式异常减弱,导致西风南支绕流加强,使水汽在研究区西南部的堆积减少,同时减弱了水汽爬坡输送,从而导致研究区降水的减少。

参考文献 (References)

- 陈丽娟, 吕世华, 罗四维. 1996. 青藏高原春季积雪异常对亚洲季风降水影响的数值试验 [J]. 高原气象, 15(1): 124-130. Chen Lijuan, Lü Shihua, Luo Siwei. 1996. The numerical experiment of influence of anomalous snow cover over Qinghai-Xizang Plateau in spring on summer monsoon rainfall in Asia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 15(1): 124-130.
- 陈宇航, 范广洲, 赖欣, 等. 2016. 青藏高原复杂下垫面能量和水分循环季节变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 21(5): 586-600. Chen Yuhang, Fan Guangzhou, Lai Xin, et al. 2016. Characteristics of seasonal variations of energy and water cycles over the complex underlying surface of the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(5): 586-600. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15068
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137(656): 553-597. doi:10.1002/qj.828
- 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.
- Dong W H, Lin Y L, Wright J S, et al. 2016. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent [J]. Nature Communications, 7: 10925. doi:10.1038/ncomms10925
- 段安民, 肖志祥, 王子谦. 2018. 青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲夏季风的研究进展 [J]. 大气科学, 42(4): 755-766. Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wang Ziqian. 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 755-766. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17247
- 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 2016. 1979~2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 12(5): 374-381. Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong. 2016. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979-2014 [J]. Climate Change Research (in Chinese), 12(5): 374-381. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2016.039
- 段玮, 段旭, 樊凤, 等. 2015. 青藏高原东南侧干湿季气候特征与成因 [J]. 干旱气象, 33(4): 546-554. Duan Wei, Duan Xu, Fan Feng, et al. 2015. Climatic characteristics of dry and wet season in the southeast side of the Tibetan Plateau and its causes [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 33(4): 546-554. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-04-0546
- 方韵, 范广洲, 赖欣, 等. 2016. 青藏高原季风强弱与北半球西风带位置变化的关系 [J]. 高原气象, 35(6): 1419-1429. Fang Yun, Fan Guangzhou, Lai Xin, et al. 2016. Relations between intensity of the Qinghai-Xizang Plateau monsoon and movement of the Northern Hemisphere westerlies [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(6): 1419-1429. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00106
- 韩振宇, 周天军. 2012. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性 [J]. 大气科学, 36(2): 361-373. Han Zhenyu, Zhou Tianjun. 2012. Assessing the quality of APHRODITE high-resolution daily precipitation dataset over contiguous China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(2): 361-373. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11043
- Hu L, Deng D F, Xu X D, et al. 2017. The regional differences of Tibetan convective systems in boreal summer [J]. J. Geophys. Res., 122(14): 7289-7299. doi:10.1002/2017JD026681
- Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. 2007. The TRMM multisatellite precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales [J]. Journal of Hydrometeorology, 8(1): 38-55. doi:10.1175/JHM560.1
- 冀钦, 杨建平, 陈虹举. 2018. 1961~2015 年青藏高原降水量变化综合分析 [J]. 冰川冻土, 40(6): 1090-1099. Ji Qin, Yang Jianping, Chen Hongju. 2018. Comprehensive analysis of the precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961-2015 [J]. Journal of Glaciology (in Chinese), 40(6): 1090-1099. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0415
- 李登宣, 王澄海. 2016. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系 [J]. 冰川冻土, 38(1): 89-99. Li Dengxuan, Wang Chenghai. 2016. The relation between soil moisture over the Tibetan Plateau in spring and summer precipitation in the eastern China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 38(1): 89-99. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0010
- 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
- 李天航, 刘宣飞. 2016. 高原东南角早春雨的气候特征及其成因研究 [J]. 热带气象学报, 32(5): 717-724. Li Tianhang, Liu Xuanfei. 2016. Climatic Features of early spring rains over southeastern Tibetan Plateau and their causes [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 32(5): 717-724. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.05.014
- 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
- 林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 2016. 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析 [J]. 高原气象, 35(2): 309–317. Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. 2016. Water vapor transportation and its influences on precipitation in summer over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(2): 309–317. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00146
- 潘保田, 李吉均. 1996. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——III. 青藏高原隆起对气候变化的影响 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 32(1): 108–115. Pan Baotian, Li Jijun. 1996. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change. III. The effects of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes [J]. Journal Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 32(1): 108–115. doi: 10.13885/j.issn.0455-2059.1996.01.024
- 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 2013. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征 [J]. 地理科学, 33(8): 999–1005. Qi Wenwen, Zhang Baiping, Pang Yu, et al. 2013. TRMM-data-based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 33(8): 999–1005. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2013.08.017
- Sun B, Wang H J. 2018. Interannual variation of the spring and summer precipitation over the Three River Source region in China and the associated regimes [J]. J. Climate, 31(18): 7441–7457. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0680.1
- 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设 [J]. 地理学报, 67(1): 3–12. Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. 2012. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67(1): 3–12.
- 王澄海, 崔洋. 2011. 东亚夏季风建立前青藏高原地气温差变化特征 [J]. 气候与环境研究, 16(5): 586–596. Wang Chenghai, Cui Yang. 2011. Characteristics of the difference of temperature between surface and atmosphere over the Tibetan Plateau in the early stage of East Asian summer monsoon onset [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(5): 586–596. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.05
- 王澄海, 尚大成. 2007. 藏北高原土壤温、湿度变化在高原干湿季转换中的作用 [J]. 高原气象, 26(4): 677–685. Wang Chenghai, Shang Dacheng. 2007. Effect of the variation of the soil temperature and moisture in the transition from dry-season to wet-season over northern Tibet Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(4): 677–685.
- 王静, 祁莉, 何金海, 等. 2016. 青藏高原春季土壤湿度与我国长江流域夏季降水的联系及其可能机理 [J]. 地球物理学报, 59(11): 3985–3995. Wang Jing, Qi Li, He Jinhai, et al. 2016. Relationship between spring soil moisture in the Tibetan Plateau and summer precipitation in the Yangtze River basin and its possible mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(11): 3985–3995. doi:10.6038/cjg20161105
- 韦芬芬, 汤剑平, 惠品宏. 2013. 基于雨量计的高分辨率格点降水数据与 TRMM 卫星反演降水数据在亚洲区域的比较 [J]. 南京大学学报(自然科学), 49(3): 320–330. Wei Fenfen, Tang Jianping, Hui Pinhong. 2013. Comparing high-resolution rain gauge-based precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Asia [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 49(3): 320–330. doi:10.13232/j.cnki.jnju.2013.03.009
- 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, 刘屹岷, 何编, 等. 2018. 青藏高原感热气泵影响亚洲夏季风的机制 [J]. 大气科学, 42(3): 488–504. Wu Guoxiong, Liu Yimin, He Bian, et al. 2018. Review of the impact of the Tibetan Plateau sensible heat driven air-pump on the Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 488–504. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17279
- Xu X, Zhao T, Lu C, et al. 2014. An important mechanism sustaining the atmospheric “water tower” over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 14(20): 11287–11295. doi: 10.5194/acp-14-11287-2014
- 徐祥德, 赵天良, Lu Chungu, 等. 2014. 青藏高原大气水分循环特征 [J]. 气象学报, 72(6): 1079–1095. Xu Xiangde, Zhao Tianliang, Lu Chungu, et al. 2014. Characteristics of the water cycle in the atmosphere over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72(6): 1079–1095. doi:10.11676/qxxb2014.091
- 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
- Yang K, Wu H, Qin J, et al. 2014. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. Global and Planetary Change, 112: 79–91. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.12.001
- Yao T, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. 2013. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations [J]. Rev. Geophys., 51(4): 525–548. doi:10.1002/rog.20023
- Yao T D, Thompson L G, Mosbrugger V, et al. 2012. Third pole environment (TPE) [J]. Environmental Development, 3: 52–64. doi: 10.1016/j.envdev.2012.04.002
- Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. 2012. APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges [J]. Bull. Amer. Meteor.

- Soc., 93(9): 1401–1415. doi:10.1175/BAMS-D-11-00122.1
- 余坤伦, 张寅生, 马宁, 等. 2018. GPM 和 TRMM 遥感降水产品在青藏高原中部的适用性评估 [J]. 干旱区研究, 35(6): 1373–1381. Yu Kunlun, Zhang Yinsheng, Ma Ning, et al. 2018. Applicability of GPM and TRMM remote sensing precipitation products in the central Tibet Plateau [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 35(6): 1373–1381. doi:10.13866/j.azr.2018.06.14
- 战云健. 2018. 近百年亚洲降水变化特征及其不确定性分析 [D]. 中国气象科学研究院博士学位论文, 119pp. Zhan Yunjian. 2018. Tempo-spatial characteristics of precipitation change and the uncertainties in Asia during the past 100 years [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 119pp.
- Zhang D L, Huang J P, Guan X D, et al. 2013. Long-term trends of precipitable water and precipitation over the Tibetan Plateau derived from satellite and surface measurements [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 122: 64–71. doi:10.1016/j.jqsrt.2012.11.028
- 张文纲, 李述训, 庞强强. 2009. 青藏高原 40 年来降水量时空变化趋势 [J]. 水科学进展, 20(2): 168–176. Zhang Wengang, Li Shuxun, Pang Qiangqiang. 2009. Changes of precipitation spatial-temporal over the Qinghai-Tibet Plateau during last 40 years [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 20(2): 168–176. doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2009.02.011
- 张锬铨, 李炳元, 郑度. 2002. 论青藏高原范围与面积 [J]. 地理研究, 21(1): 1–8. Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. 2002. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. Geographical Research (in Chinese), 21(1): 1–8. doi:10.3321/j.issn:1000-0585.2002.01.001
- 赵平, 李跃清, 郭学良, 等. 2018. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应: 第三次青藏高原大气科学试验 [J]. 气象学报, 76(6): 833–860. Zhao Ping, Li Yueqing, Guo Xueliang, et al. 2018. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The third Tibetan Plateau atmospheric scientific experiment [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(6): 833–860. doi:10.11676/qxxb2018.060
- 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.06.06
- 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(3): 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(3): 284–292. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.03.05
- 竺夏英, 陈丽娟, 李想. 2013. 2012 年冬春季高原积雪异常对亚洲夏季季风的影响 [J]. 气象, 39(9): 1111–1118. Zhu Xiaying, Chen Lijuan, Li Xiang. 2013. Impact of Tibetan Plateau snow cover anomaly on Asian summer monsoon in 2012 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39(9): 1111–1118. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.09.004
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系 [J]. 气象学报, 65(6): 946–958. Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Xu Huaigang. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in east China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(6): 946–958. doi:10.11676/qxxb2007.089