

全思航, 朱克云, 任景轩, 等. 2019. 1979~2015 年青藏高原低涡降水特征分析 [J]. 气候与环境研究, 24 (1): 105-115. Quan Sihang, Zhu Keyun, Ren Jingxuan, et al. 2019. Analysis of characteristics of low vortex precipitation in the Tibetan Plateau from 1979 to 2015 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (1): 105-115, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17116.

## 1979~2015 年青藏高原低涡降水特征分析

全思航<sup>1</sup> 朱克云<sup>1</sup> 任景轩<sup>2</sup> 张明俊<sup>1</sup> 张杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

<sup>2</sup> 中国人民解放军 78127 部队, 成都 610031

**摘要** 为了研究青藏高原低涡降水长期特征, 利用 1979~2015 年高原低涡数据集、依照高原低涡降水范围, 匹配高原各站逐日降水信息, 对高原低涡降水特征进行统计分析。结果表明, 青藏高原低涡降水量呈上升趋势, 大值中心位于西藏那曲地区, 呈向东南凸出递减分布, 并以夏季低涡降水为主, 全年和夏季高原低涡降水量与总降水量均存在明显的正相关关系。安多站高原低涡降水呈下降趋势, 但对年降水的平均贡献率高达三成; 那曲站与托托河站高原低涡降水在总体上却呈上升趋势, 递增率分别为 0.2 mm/a 和 0.7 mm/a, 其中那曲低涡频次与低涡降水强度的正相关系数达 0.66, 而托托河低涡降水占总降水的百分比却呈下降趋势。高原低涡日降水量等级主要以小雨为主, 但中雨却是低涡降水量的主要贡献者。趋势分析发现高原低涡降水递增中心位于青海北部, 递增率达到 0.9 mm/a, 次中心在西藏西南部雅鲁藏布江沿线地区; 同时, 高原低涡引发小雨降水基本呈全区一致增加趋势, 中心位于西藏东北部和青海西南部地区; 中雨降水上升趋势主要集中在西藏西南部、青海地区以及四川西部, 其中青海南部存在较为明显上升中心区, 下降趋势主要分布在西藏北部和东部。

**关键词** 高原 低涡降水 时空分布 降水量级

文章编码 1006-9585 (2019) 01-0105-11

中图分类号 P467

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17116

## Analysis of Characteristics of Low Vortex Precipitation in the Tibetan Plateau from 1979 to 2015

QUAN Sihang<sup>1</sup>, ZHU Keyun<sup>1</sup>, REN Jingxuan<sup>2</sup>, ZHANG Mingjun<sup>1</sup>, and ZHANG Jie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Atmosphere Sciences Academy of Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

<sup>2</sup> Chinese People's Liberation Army 78127 Unit, Chengdu 610031

**Abstract** In order to study long-term precipitation characteristics of the Tibetan Plateau vortex, statistical analysis of precipitation characteristics associated with the Tibetan Plateau vortex over the past 37 years has been conducted based on the dataset of the Tibetan Plateau vortex from 1979 to 2015. Precipitation areas as well as daily precipitation amount observed at weather stations in the Tibetan Plateau are also used. The results show that annual vortex precipitation exhibits an upward trend. The precipitation center is located at Naqu of the Tibetan Plateau, and decreases eastward. The precipitation is largely comprised of summer low vortex precipitation, while both summer precipitation and annual precipitation have a significant positive correlation with total precipitation. The vortex precipitation is declining at Anduo station, whereas its average contribution to annual total is as high as 33%. The vortex precipitation generally shows an upward trend at Naqu and

收稿日期 2017-07-29; 网络预出版日期 2018-01-22

作者简介 全思航, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事高原气候方面研究。E-mail: 448369907@qq.com

通讯作者 朱克云, E-mail: zhuky@cuit.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金重大研究计划项目 91537214

Funded by National Natural Science Foundation of China Major Research Program (Grant 91537214)

Toto River stations with the increasing rates of 0.21 mm/a and 0.65 mm/a, respectively. The correlation coefficient between low vortex frequency and low vortex precipitation is 0.66 at Naqu area however, the percentage of precipitation accounted for by the vortex precipitation in the Toto River shows a decreasing trend. The low vortex precipitation in the Tibetan Plateau is dominated by light rainfall, while moderate rainfall is the main contributor to total vortex rainfall. The trend analysis shows that the largest increase center of the Tibetan Plateau vortex precipitation is located in northern Qinghai, where the increasing rate reaches 0.88 mm/a, and the second largest center is located along the Yarlung Zangbo River in southwestern Tibet. At the same time, light rainfall induced by the low vortex basically increases in the whole region with the center located in northeastern Tibet and southwestern Qinghai. The upward trend of moderate rainfall is mainly found in southwestern Tibet, Qinghai region and western Sichuan. An obvious rising center is located in southern Qinghai with an increasing rate of up to 0.67mm/a, and the downward trend is mainly distributed in northeastern Tibet.

**Keywords** Tibetan Plateau, Vortex precipitation, Temporal and spatial distribution, Precipitation magnitude

## 1 引言

根据拉萨会战组定义：高原低涡是 500 hPa 等压面上反映的生成于青藏高原、有闭合等高线的低压或三站风向呈气旋性环流的低涡。它是生成于青藏高原主体上的一种次天气尺度低压涡旋（陈功和李国平，2011），平均水平尺度为 400~500 km（叶笃正和高由禧，1979），是夏季影响高原的主要降水系统之一，同时对高原临近地区天气也有重要影响，甚至可以引发我国长江中下游、黄淮流域和朝鲜半岛、日本等地的大范围灾害性天气过程，因此受到广大学者的普遍重视，同时也取得许多重要成果（李国平，2013）。早期，陶诗言等（1984）利用青藏高原科考资料分析发现，高原低涡源地主要集中在祁连山以北和祁连山—祁连山之间；随着研究的深入发现，高原低涡生成源地主要分布在西藏双湖、那曲和青海扎仁克吾一带，且大多数为暖性涡（李国平等，2014），并从动力学上论证了“涡眼”结构的存在（李国平等，2002；李国平和徐琪，2005）。同时，高原低涡的发展与附近大气柱加热场以及潜热的变化都存在密切关系（Wang, 1987；Wang and Orlanski, 1987；罗四维等，1991；杨洋等，1992；刘云丰和李国平，2016），近期一些的研究也表明高原低涡的发生发展与水汽凝结潜热密切相关（林志强等，2014a, 2014b）。

降水是水循环中一个至关重要的环节，对地方经济和社会发展有着重要影响。自 1998 年至今出版的“青藏高原低涡切变线年鉴”，较为全面地对高原低值系统进行了统计分析，对高原低涡的移动与降水有了更深认识（李跃清等，2010）。卓嘎等（2013）研究指出西藏地区大气可降水量在空间上从东南向西北逐渐递减，且表现出显著的季节性

差异。傅云飞等（2008）通过分析 TRMM（Tropical Rainfall Measuring Mission）卫星资料、GPCP（Global Precipitation Climatology Project）降水资料指出夏季青藏高原降水主要集中在其东南部。将高原低涡与西南低涡引发的强降水进行对比研究后发现，高原低涡降水强度与范围均要比西南低涡大，且有着明显的能量变化特征（黄楚惠和李国平，2009；董元昌和李国平，2015；蒋璐君等，2015）。郁淑华等（2012，2013）统计分析了 1998~2004 年冬、夏半年不同生命史青藏高原低涡活动对我国和四川盆地东、西部降水的影响。

青藏高原不仅是天气变化的“启动区”，也可能是我国百年尺度气候变化的“启动区”，被认为是“全球气候变化的驱动力与放大器”（卢鹤立等，2007），此外高原低值系统引发降水释放大量非绝热加热，直接影响地区感热和潜热的变化，进而导致大气热源的变化，引起海陆热力差异，因此认为对高原长时间尺度的低涡降水研究是必要的。本文利用 1979~2015 年的观测资料，针对夏季高原地区主要降水系统——高原低涡引发的降水特征进行系统研究，这将有助于进一步了解高原低涡的降水特点以及青藏高原地区降水的气候变化特征，为持续开展对低值系统的内在变化及其对气候变化影响的后续研究，尤其是热力及其反馈机制研究奠定基础，同时为有效应对全球气候变化提供参考。

## 2 资料与方法

选用国家气象信息中心提供的高原地区站点分布较为均匀的 73 个站点降水资料，包括西藏 21 个、青海 29 个、四川 16 个、甘肃 3 个、新疆 3 个和云南 1 个站点，对张明俊（2017）推出的 1979~2015 年的高原低涡数据集中的源地信息、路径信息

进行降水匹配, 并进行综合分析。这套高原低涡数据集是利用 ERA-Interim 再分析资料, 采用客观识别与补充修正相结合的识别法构建, 并以《青藏高原低涡切变线年鉴》(李跃清等, 2010) 作为参考标准分析验证了其准确性、稳定性与可靠性, 优于利用 NCEP/NCAR 资料建立的高原低涡数据集, 有效弥补《青藏高原低涡切变线年鉴》时间短、源地信息把握不准的不足。

考虑到高原低涡结构和降水特征(蒋璐君等, 2015), 参照西南低涡降水范围标准(卢敬华, 1986), 在进行相关统计的基础之上定义距低涡中心 500 km 的范围内的降水为高原低涡降水。同时, 鉴于高原地区的降水特征, 参照高原地区日降水等级标准(按日雨量), 定义小雨 0.0~5.0 mm、中雨 5.1~14.9 mm、大雨 15.0~24.9 mm、暴雨 25.0~49.9 mm 和大暴雨 50.0 mm 以上。

### 3 高原低涡降水变化特征分析

#### 3.1 高原低涡基本特征

本文利用张明俊(2017)统计出的高原低涡频数、源地等信息进一步对高原低涡路径以及其降水进行分析。

图 1 是高原低涡源地分布图。从图中可以看出, 高原低涡源地存在一高值集中地区, 位于青藏那曲双湖一带, 沿那曲双湖中心向四周幅散, 主要存在 4 个大值中心分别位于: 那曲地区双湖中部、西南部、西北部和尼玛北部, 同时高原低涡生成源地还

存在 4 个次大值中心分别位于: 那曲地区双湖东北部、阿里地区改则东部、玉树州治多西部和格尔木附近。从高原低涡时间变化来看(图略), 1979~2015 年共生成高原低涡 1721 个, 平均每年生成 46.5 个, 但各年高原低涡生成个数存在明显差异。1980 年、1985 年、1996 年、2008 年, 高原低涡明显偏多, 尤其是在 1980 年生成 67 个高原低涡, 为历年之最。而 1982 年、1986 年、1990 年则为高原低涡的明显少发年, 最少的 1986 年只有 33 个, 与 1980 年相比相差达 34 个之多。周期分析结果表明, 高原低涡存在着较为明显的准 4 a、14 a 周期变化。

#### 3.2 降水时间变化特征

图 2a 为高原低涡年降水量时间变化图, 可以看出 1979~2015 年高原低涡降水量呈上升趋势, 且降水量波动剧烈呈多峰多谷变化。其中 1998 年、2007 年和 2008 年为高原低涡降水量高值年, 2008 年最多为 76.6 mm, 占全年总降水量的 16.4%。1983 年高原低涡降水量最少为 17.8 mm, 占全年总降水量的 4.5%, 与最高年降水量相差 58.8 mm。而从高原低涡降水量与高原降水量趋势可以明显看出二者存在一定的对应关系, 二者相关系数高达 0.59, 通过了置信度为 99% 的显著性检验。同时可以看出高原低涡降水量同低涡降水量占总降水的百分比变化趋势存在一定相似性, 但在 1994 年、2003 年、2007 年等年存在相反的变化趋势。考虑到原低涡生成频数对高原低涡降水量的影响, 通过计算发现二者的相关系数达 0.46, 同样通过了置信度为 99% 的显著性检验。此外, M-K 突变检验结果表明, 高原

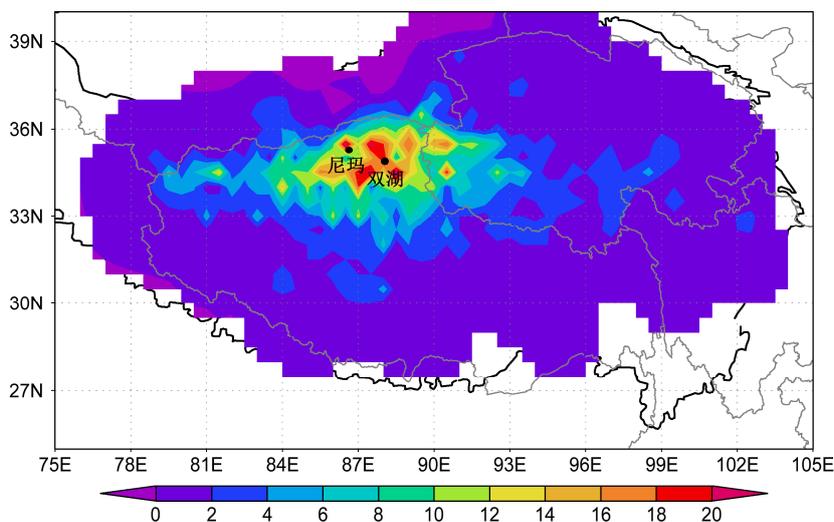


图 1 高原低涡源地(生成频数)分布图

Fig. 1 The Tibetan Plateau vortex source (generation frequency) distribution

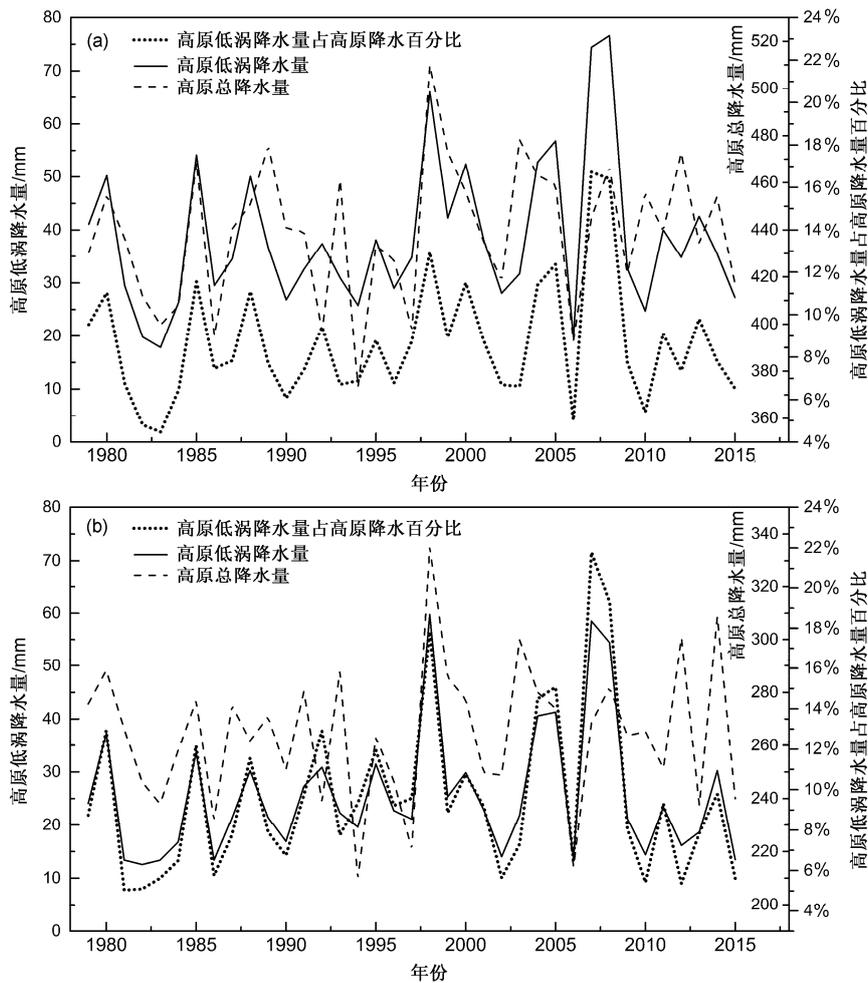


图2 1979~2015年(a)年平均和(b)夏季平均高原低涡降水量和高原低涡降水量占高原降水量百分比随时间变化

Fig. 2 Temporal variations of (a) annual and (b) summer mean Tibetan Plateau vortex precipitation and its percentage in total Tibetan Plateau precipitation during 1979–2015

降水与高原低涡降水均在1997年存在突变，这也表明二者的变化趋势有着明显的一致性。

由于高原低涡降水以夏半年为主且主要集中在6、7、8月，因此本文重点分析了高原低涡夏季降水特征。图2b为高原低涡夏季降水量时间变化图，从图中可以看出，高原低涡夏季降水量年变化明显呈多峰多谷型，低涡夏季降水量约为25.7 mm，占全年低涡降水量的66.8%，同时占夏季总降水量的9.6%，相较年占比增多了0.9%。此外，趋势分析结果表明夏季高原低涡降水与高原低涡年降水同样呈增多趋势，强度略低，但在1996~1997年、2007~2008年二者变化趋势相反。

进一步对比分析发现，在夏季高原低涡降水量与高原降水量关系相较于全年更为密切。具体来看，低涡降水量与低涡降水量占比相关系数高达0.98，与高原降水量相关系数达0.63，这优于年平

均状况，这也说明夏季高原低涡降水对高原降水影响更大，是高原地区夏季降水的最主要来源之一。究其原因，主要是因为高原低涡夏季降水量与高原低涡夏季生成频数存在明显的正相关关系，相关系数达到了0.61，而高原低涡增长在夏季呈明显增加趋势，这也说明夏季高原低涡生成频数增多，伴随水汽条件转好，降水也逐渐增多。此外，周期变化分析结果表明，高原低涡年降水存在两个准周期振荡，分别为4 a、10 a，且两个周期振荡信号均较强，而高原低涡夏季降水同样存在一个准10 a周期，通过周期分析可以进一步对未来高原低涡降水的变化趋势进行推断。

图3为高原低涡月降水量变化图。从图中可以看出高原低涡降水主要发生在6~8月，但5月降水量也不容忽视。其中以6月为最多，平均降水量达10.4 mm，约占全年高原低涡降水量的1/3。7月

次之,达到 8.4 mm,5 月和 8 月也分别达到了 6.1 mm 和 6.9 mm。虽然 5 月低涡降水不及 6 月,但 5 月高原低涡降水却占总降水量的百分比最多,主要是因为 6~8 月受高原切变线、南支槽和局地热力影响使得高原总降水增多趋势更为明显。相关分析结果表明,高原低涡月降水量与高原低涡月生成频数相关系数为 0.72,且通过置信度为 99%的显著性检验。

### 3.3 降水空间分布特征

图 4 为高原低涡降水量空间分布图。从图中可以看出,高原低涡降水量存在一大值中心主要位于安多—那曲—索县一带,其中西藏安多站高原低涡年降水量为 151.8 mm,西藏索县、那曲次之,分别达到 131.7 mm 和 115.1 mm。从整体上看,高原低

涡降水量以安多—那曲—索县为中心逐步向外呈递减趋势,但同时也存在向东南凸出现象。这种分布状态与高原低涡源地频数分布以及高原低涡的移动路径存在密切关系。具体来看,高原低涡频数分布大值中心位于那曲—双湖一带,而高原低涡降水大值区主要集中在安多—那曲—索县一带,主降水区位于高原低涡源地的东南部 100~200 km 处,这与高原低涡的降水特点是相符的,而向东凸出减弱则主要是高原低涡以东移和北移路径为主所决定的,这与前人研究的高原低涡降水个例结果也较为相一致(董元昌和李国平, 2015; 蒋璐君等, 2015)。总结分析认为高原低涡降水集中在安多—那曲—索县地区的主要原因有:一是由于此区域南部 200 km 附近为雅鲁藏布江流域,水汽条件较好;二是由于此区域西北部 100~200 km 处为高原低涡源地。因此认为该区域可以作为高原低涡降水的重点研究区域,同时也可以对此区域的高原热量分布进行探究,从而进一步揭示高原热力反馈机制。

同时本文也对高原 73 站高原低涡年降水量占高原年降水量百分比进行了分析(图略)。分析结果表明,低涡和青海西南部地区。具体来看,西藏安多站所占百降水占比高地区主要集中在高原中部,即西藏北部分比高达 33.2%,托托河次之为 31.3%,那曲站达 25.4%

根据高原低涡降水的分布特征以及高原低涡各站降水对高原降水的贡献特征,本文选取西藏安多、那曲和青海托托河站做进一步分析(图 5)。

安多高原低涡降水量波动变化明显,2008 年高原低涡降水量达到最大,为 268.2 mm,占当年高原

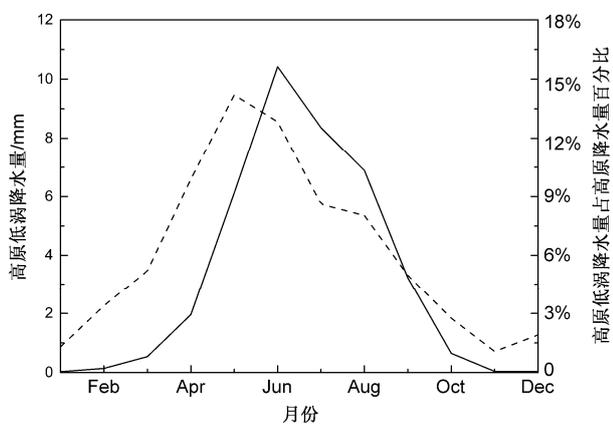


图 3 1979~2015 年月平均高原低涡降水量(实线)和高原低涡降水量占高原降水量百分比(虚线)

Fig. 3 Monthly Tibetan Plateau vortex precipitation (solid line) and its percentage in total Tibetan Plateau precipitation (dashed line) during 1979-2015

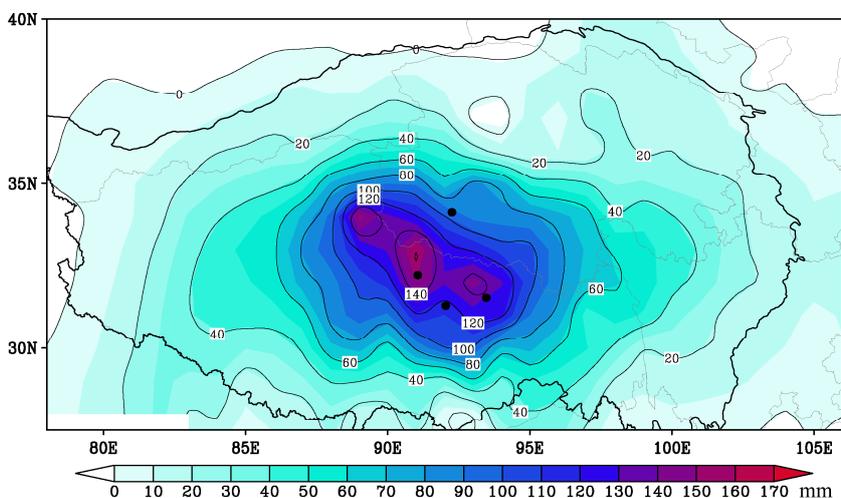


图 4 1979~2015 年平均高原低涡年降水量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual low vortex precipitation in the Tibetan Plateau averaged during 1979-2015

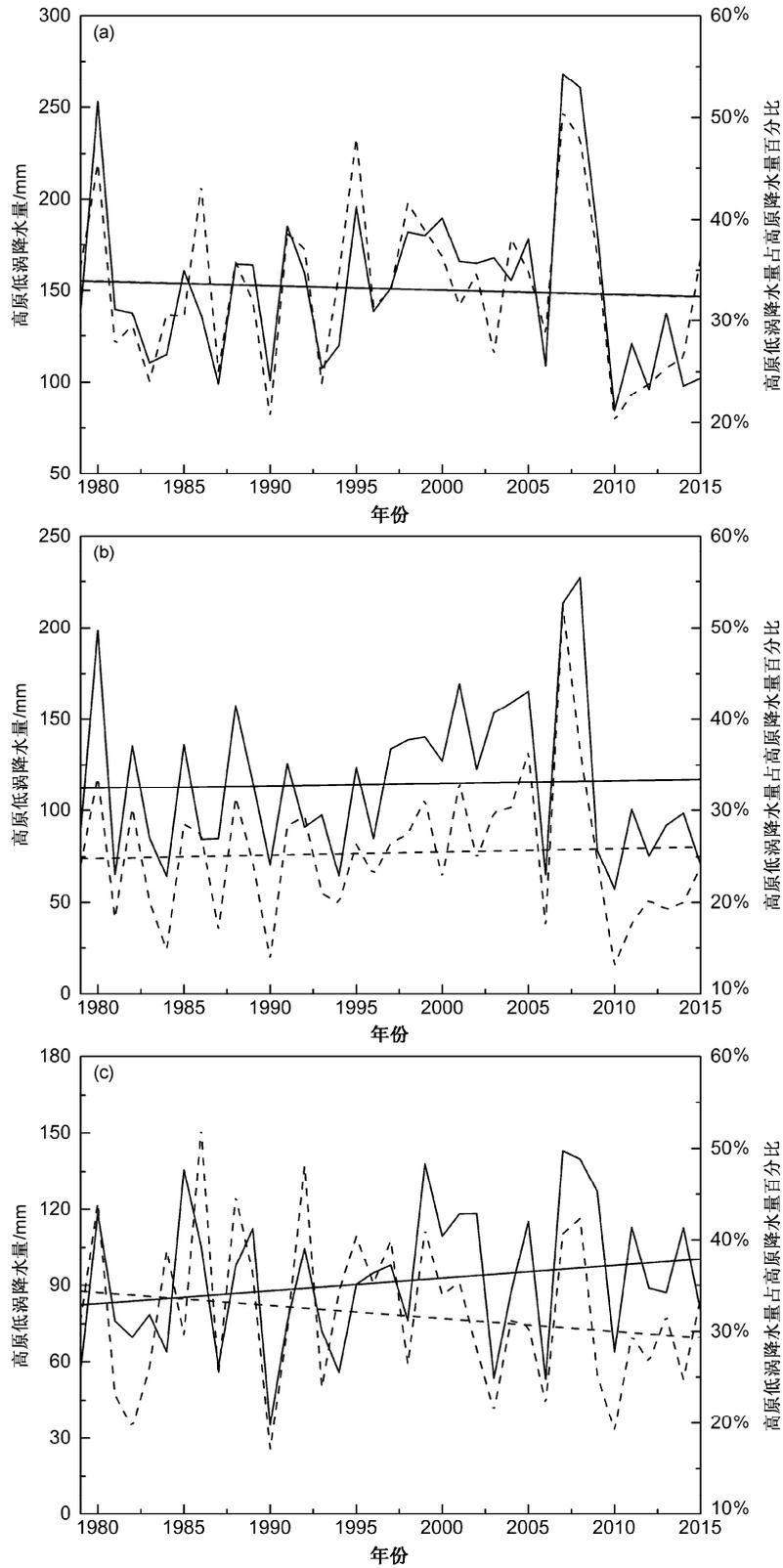


图5 1979~2015年高原低涡年降水量(实线)和高原低涡降水占高原降水百分比(虚线)随时间变化:(a)安多;(b)那曲;(c)托托河

Fig. 5 Temporal variations of the annual Tibetan Plateau vortex precipitation (solid line) and its percentage in total Tibetan Plateau precipitation (dashed line) during 1979–2015: (a) Amdo; (b) Naqu; (c) Toto

年降水量的 50.5%。就总体而言, 虽然低涡降水量呈下降趋势, 但其对年降水量的贡献仍较大, 平均贡献率高达三成。此外, 除 2002~2004 年、2010~2015 年, 安多低涡降水量与其占年降水量百分的变化在比较一致的, 这也可以说明低涡降水是安多总降水的主要部分, 但在个别年份总降水量仍受其它系统降水影响较为严重。

那曲高原低涡降水量的变化形式与安多比较一致, 均存在两个较高的波峰, 但在总体上却呈上升趋势, 递增率为 0.2 mm/a。那曲低涡降水主要集中在夏半年, 以 6、7、8 月为主, 占全年低涡降水量的 68.0%。而其占总降水量的百分比以 2007 年为最高, 达 52.4%, 2010 年最低为 13.1%。相关分析结果表明, 那曲地区低涡频数与低涡降水强度存在明显的正相关关系, 年相关系数为 0.66, 其中 8 月相关系数最高, 达 0.83, 均通过了置信度为 99% 的显著性检验。

托托河高原低涡降水量变化呈上升趋势, 递增率为 0.7 mm/a。年均低涡降水量为 92.5 mm, 约占总降水的 31.3%。但从长期来看, 托托河低涡降水量占总降水量的百分比却呈下降趋势, 与安多和那曲存在显著不同, 这是由于托托河降水在长时间尺度上的增长趋势要比托托河高原低涡降水增长趋势快, 因此导致托托河低涡降水占总降水的百分比呈下降趋势。

此外, 从三站低涡降水月变化趋势可以看出, 6 月和 5 月同样为低涡降水最多月份和所占总降水百分比最多月份, 但 4 月低涡降水量所占百分比也有了明显提高, 分别达到了 52.7%、37% 和 52.2%。

### 3.4 降水不同量级对比

近 37 年高原低涡不同量级降水日数的分析结果表明 (见表 1), 高原低涡引发小雨 15863 d、中雨 5601 d、大雨 1094 d、暴雨 217 d、大暴雨 2 d。小雨发生频数最多, 占总日数 69%, 其次中雨为 25.3%, 大雨、暴雨、大暴雨日数之和不足 6%。而高原低涡引发不同量级降水量的结果表明: 虽然低涡降水以小雨日数为最多, 但是累计小雨降水量仅为所有高原低涡总降水量的 25.8%, 而累计中雨降水量却占总降水量的 48.3%, 为第一贡献, 大雨、暴雨、大暴雨的总贡献率也达到了 25.9%。综合来看, 高原低涡降水等级日数最多的是小雨日, 但中雨日带来的降水量却是低涡降水量的主要贡献者, 对当地的生态维持和防灾减灾的影响也最为重要。

表 1 1979~2015 年高原低涡不同量级降水日数贡献、降水量贡献

Table 1 Contributions of rainy days and rainfall at different magnitudes associated with the Tibetan Plateau vortex during 1979-2015

	降水日数贡献	降水量贡献
小雨	69.0%	25.8%
中雨	25.3%	48.3%
大雨	4.8%	19.4%
暴雨	0.9%	6.3%
大暴雨	0.0%	0.1%

进一步分析发现高原低涡发生频数与各站累计降水日数存在明显的正相关关系, 相关系数为 0.58。不同量级的降水日数也与高原低涡发生频数存在不同相关关系, 其中小雨量级与高原低涡频数相关性最高为 0.62, 中雨为 0.50, 二者均通过了置信度为 99% 的显著性检验。

为了进一步了解高原低涡降水的特点, 本文分析了高原低涡不同量级降水的空间分布。从图 6 可以看出, 小雨发生频数较高, 且最多频数主要集中在青海西南部以及西藏东北部一带, 有 5 站超 600 d, 最多为西藏班戈达 825 d。中雨最高频数发生在西藏那曲县, 达 319 d。大雨降水日数最多在西藏安多地区, 达 63 d, 此外西藏安多、索县、嘉黎 3 个站点达 50 d 以上。暴雨有 5 站超过 10 d 以上, 分布在高原中南部, 其中西藏波密发生达 13 日。特别指出, 安多站不论是暴雨、大雨、中雨还是小雨均为发生频次较高站, 这与高原低涡源地所在一致。

### 3.5 降水空间变化趋势

图 7 是高原低涡降水空间变化趋势图。从图中可以看出高原大部分地区降水变化呈上升趋势, 主要集中在西藏西南部、青海地区以及四川西部, 上升趋势平均为 0.3 mm/a, 尤其是在青海北部递增率达到 0.9 mm/a, 此外西藏西南部雅鲁藏布江沿线上升趋势也达到 0.5 mm/a 以上。但西藏东部高原低涡降水呈下降趋势, 平均下降趋势为 0.2 mm/a, 最大不及 0.4 mm/a。

考虑到高原低涡不同量级降水特点, 本文对高原低涡小雨降水、中雨降水空间变化趋势进行了分析 (图 8a、8b)。结果表明, 小雨基本呈全区一致增加趋势, 并主要集中西藏东北部以及青海西南部地区, 最高递增率达 0.5 mm/a。而中雨同高原低涡总降水的空间变化趋势大致相似, 上升趋势主要集

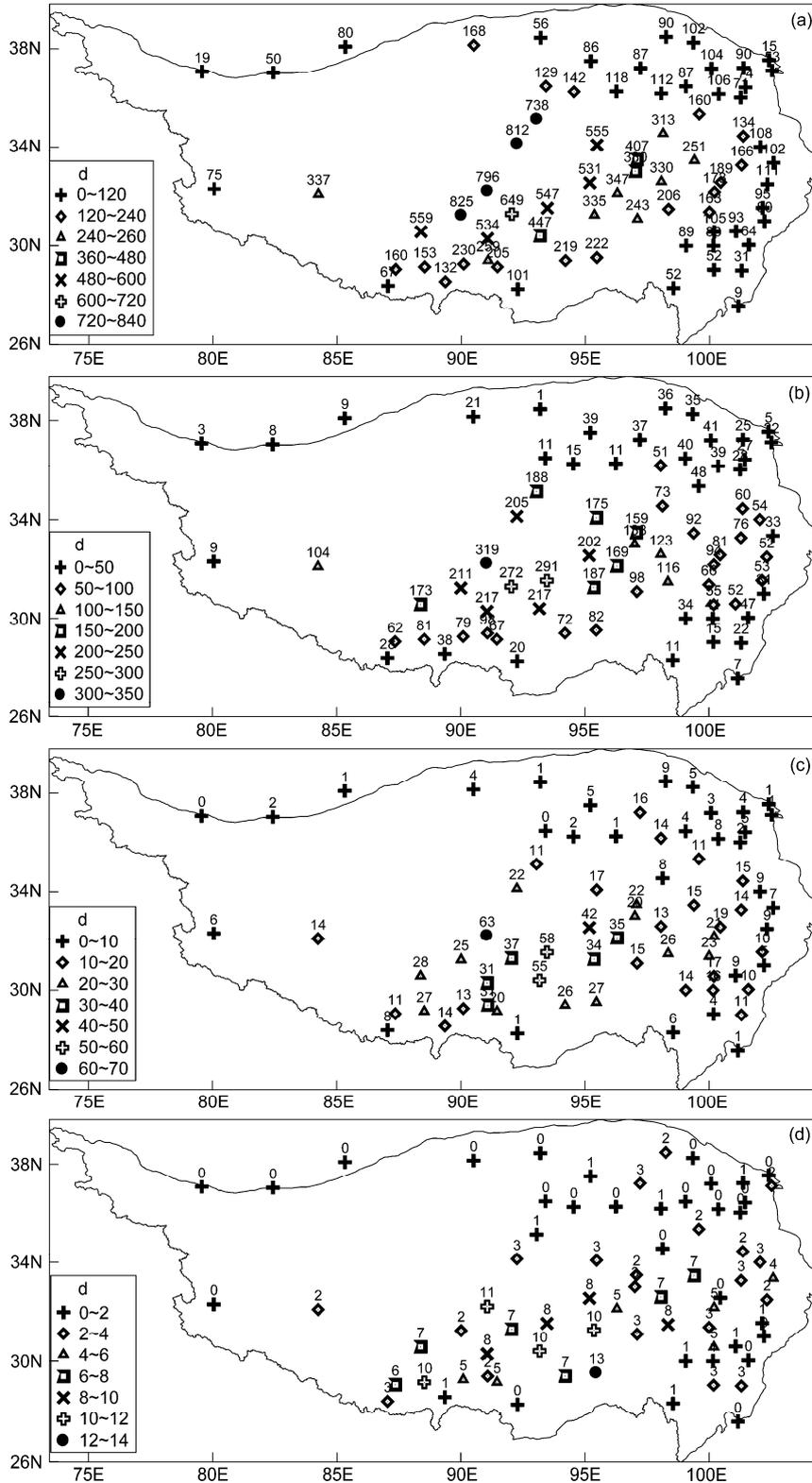


图6 1979~2015年高原低涡降水不同降水量级总降水日数空间分布：(a) 小雨；(b) 中雨；(c) 大雨；(d) 暴雨

Fig. 6 Spatial distributions of the Tibetan Plateau vortex precipitation days at various magnitudes during 1979–2015: (a) Light rainfall; (b) moderate rainfall; (c) heavy rainfall; (d) rainstorm

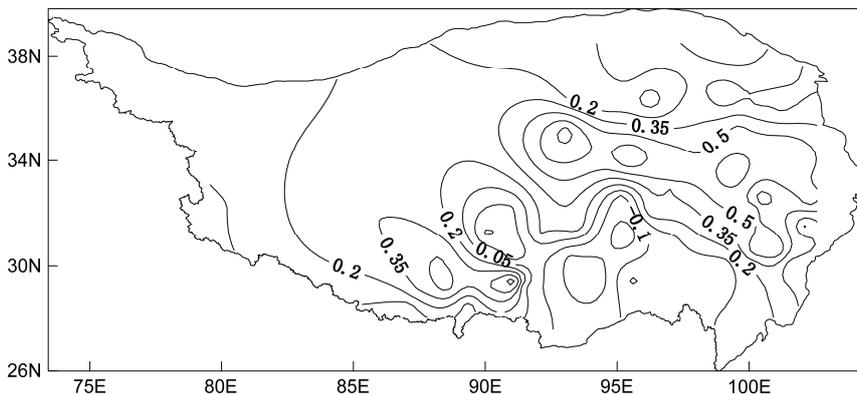


图 7 1979~2015 年高原低涡年降水量变化趋势 (单位: mm/a) 的空间分布  
 Fig. 7 Spatial variation trend (mm/a) of annual Tibetan Plateau vortex precipitation during 1979-2015

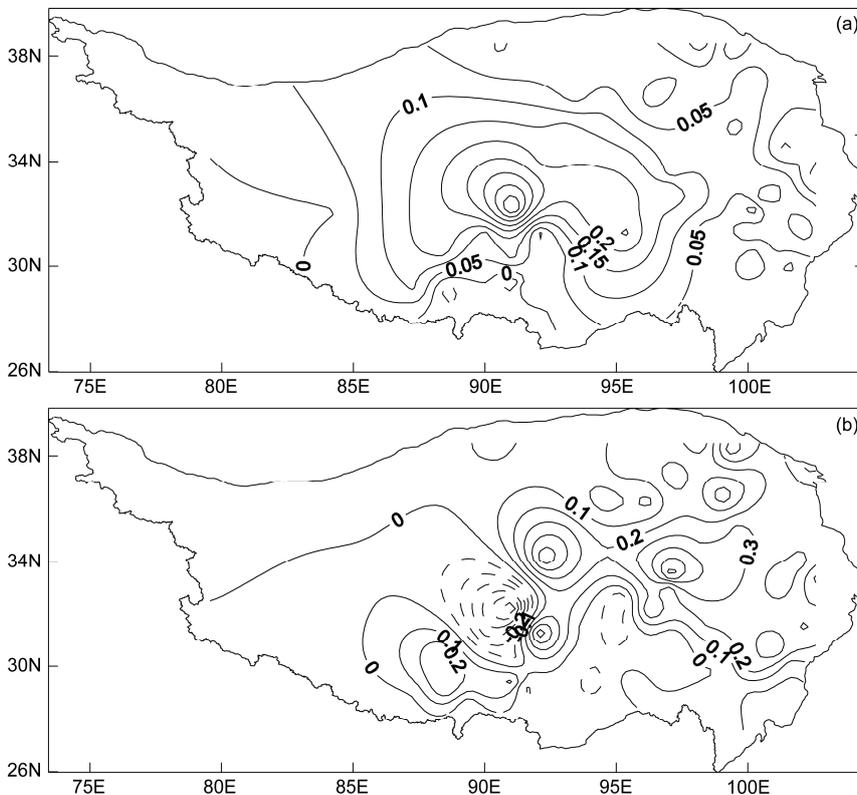


图 8 1979~2015 年高原低涡降水不同降水量级年降水量变化趋势 (单位: mm/a) 的空间分布: (a) 小雨; (b) 中雨  
 Fig. 8 Spatial variation trends (mm/a) of the Tibetan Plateau vortex precipitation at different magnitudes during 1979-2015: (a) Light rainfall; (b) moderate rainfall

中在西藏西南部、青海地区以及四川西部, 平均为 0.2 mm/a, 尤其是在青海南部存在较为明显的上升趋势, 递增率达到 0.7 mm/a; 下降趋势主要分布在西藏北部和东部, 递减率达 0.1 mm/a。

#### 4 总结

利用 1979~2015 年高原低涡数据集, 根据高

原低涡降水范围, 匹配高原 73 站点逐日降水信息, 对高原低涡降水特征进行分析研究, 得到以下结论:

(1) 高原低涡降水总体呈增多趋势, 夏季是低涡降水集中时段, 其与同时段高原总降水量均存在较好的对应关系, 相关系数分别达 0.59 和 0.63, 同时与低涡生成频数的相关系数也达 0.46 和 0.61。

(2) 高原低涡降水量大值中心位于安多—那

曲—索县一带，并且呈向东南凸出递减分布状态。其中，安多站低涡降水量呈下降趋势，但对年降水量的平均贡献率高达三成；那曲低涡降水量在总体上呈上升趋势，递增率分别为 0.2 mm/a，并与那曲地区低涡频数存在明显的正相关关系，而托托河虽然低涡降水量呈上升趋势，但其占总降水量的百分比却呈下降趋势。

(3) 高原低涡日降水量主要以小雨为主，而中雨却是低涡降水量的主要贡献者，其中小雨主要集中在青海西南部以及西藏东北部一带，中雨最多发生在西藏那曲。此外，小雨与高原低涡个数相关系数为 0.62，中雨为 0.50。

(4) 高原低涡降水量在西藏西南部、青海地区以及四川西部呈明显增多趋势，中心位于青海北部，递增率达到 0.9 mm/a，次中心在西藏西南部雅鲁藏布江沿线地区。递减区主要位于西藏东部。

(5) 高原低涡引发小雨降水基本呈全区一致增加趋势，中心位于西藏东北部和青海西南部地区，最高递增率达 0.5 mm/a。而中雨降水上升趋势主要集中在西藏西南部、青海地区以及四川西部，其中高原东北部存在较为明显的上升趋势，递增率达到 0.7 mm/a，下降趋势主要分布在西藏北部和东部，递减率为 0.1 mm/a。

### 参考文献 (References)

陈功, 李国平. 2011. 夏季青藏高原低涡的切向流场及波动特征分析 [J]. 气象学报, 69 (6): 956–963. Chen Gong, Li Guoping. 2011. Characteristics of the tangential flow field of the Tibetan Plateau vortices and associated waves [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (6): 956–963, doi:10.11676/qxxb2011.083.

董元昌, 李国平. 2015. 大气能量学揭示的高原低涡个例结构及降水特征 [J]. 大气科学, 39 (6): 1136–1148. Dong Yuanchang, Li Guoping. 2015. The structure and precipitation characteristics of typical Tibetan Plateau vortices as revealed by energy analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1136–1148, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14263.

傅云飞, 刘奇, 自勇, 等. 2008. 基于 TRMM 卫星探测的夏季青藏高原降水和潜热分析 [J]. 高原山地气象研究, 28 (1): 8–18. Fu Yunfei, Liu Qi, Zi Yong, et al. 2008. Summer precipitation and latent heating over the Tibetan Plateau based on TRMM measurements [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28 (1): 8–18, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2008.01.002.

黄楚惠, 李国平. 2009. 基于螺旋度和非地转湿  $Q$  矢量的一次东移高原低涡强降水过程分析 [J]. 高原气象, 28 (2): 319–326. Huang Chuhui, Li Guoping. 2009. A case study of plateau vortex moving east ward with heavy rainfalls based on helicity and non-geostrophic wet  $Q$ -vector [J].

Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (2): 319–326.

黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等. 2011. 一次高原低涡东移引发四川盆地强降水的湿螺旋度分析 [J]. 高原气象, 30 (6): 1427–1434. Huang Chuhui, Li Guoping, Niu Jinlong, et al. 2011. Moist helicity analysis of a heavy rainstorm in Sichuan Basin induced by plateau vortex moving eastward [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (6): 1427–1434.

蒋璐君, 李国平, 王兴涛. 2015. 基于 TRMM 资料的高原涡与西南涡引发强降水的对比研究 [J]. 大气科学, 39 (2): 249–259. Jiang Lujun, Li Guoping, Wang Xingtao. 2015. Comparative study based on TRMM data of the heavy rainfall caused by the Tibetan Plateau vortex and the southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 249–259, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.13260.

李国平. 2013. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题 [J]. 沙漠与绿洲气象, 7 (3): 1–6. Li Guoping. 2013. Advances in Tibetan Plateau vortex and southwest vortex research and related scientific problems [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 7 (3): 1–6, doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2013.03.001.

李国平, 徐琪. 2005. 边界层动力“抽吸泵”对青藏高原低涡的作用 [J]. 大气科学, 29 (6): 965–972. Li Guoping, Xu Qi. 2005. Effect of dynamic pumping in the boundary layer on the Tibetan Plateau vortices [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 965–972, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.06.12.

李国平, 赵邦杰, 杨锦青. 2002. 地面感热对青藏高原低涡流场结构及发展的作用 [J]. 大气科学, 26 (4): 519–525. Li Guoping, Zhao Bangjie, Yang Jinqing. 2002. A dynamical study of the role of surface sensible heating in the structure and intensification of the Tibetan Plateau vortices [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 519–525, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.04.09.

李国平, 赵福虎, 黄楚惠, 等. 2014. 基于 NCEP 资料的近 30 年夏季青藏高原低涡的气候特征 [J]. 大气科学, 38 (4): 756–769. Li Guoping, Zhao Fuhu, Huang Chuhui, et al. 2014. Analysis of 30-year climatology of the Tibetan Plateau vortex in summer with NCEP reanalysis data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 756–769, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13235.

李跃清, 郁淑华, 彭骏, 等. 2010. 青藏高原低涡切变线年鉴 [M]. 北京: 科学出版社, 195pp. Li Yueqing, Yu Shuhua, Peng Jun, et al. 2010. The Yearbook of Low Vortex and Shear Line in Qinghai–Tibet Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 195pp.

林志强, 德庆, 文胜军, 等. 2014a. 西藏高原汛期大到暴雨的时空分布和环流特征 [J]. 暴雨灾害, 33 (1): 73–79. Lin Zhiqiang, De Qing, Wen Shengjun, et al. 2014a. Spatio-temporal distribution and general circulation of heavy rainfall in rainy season over Tibetan Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33 (1): 73–79.

林志强, 假拉, 薛改萍, 等. 2014b. 1980—2010 年西藏高原大到暴雪的时空分布和环流特征 [J]. 高原气象, 33 (4): 900–906. Lin Zhiqiang, Jia La, Xue Gaiping, et al. 2014b. Spatial-temporal distribution and general circulation of heavy snow over Tibet Plateau in 1980–2010 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (4): 900–906, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00069.

刘云丰, 李国平. 2016. 夏季高原大气热源的气候特征以及与高原低涡生成的关系 [J]. 大气科学, 40 (4): 864–876. Liu Yunfeng, Li Guoping. 2016. Climatic characteristics of atmospheric heat source over the Tibetan

- Plateau and its possible relationship with the generation of the Tibetan Plateau vortex in the summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 864–876, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15184.
- 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. Temporo-spatial distribution of summer precipitation over Qinghai-Tibet Plateau during the last 44 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 62 (9): 946–958, doi:10.11821/xb200709006.
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论 [M]. 北京: 气象出版社, 275pp. Lu Jinghua. 1986. An Introduction to the Southwest Vortex (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 275pp.
- 罗四维, 杨洋, 吕世华. 1991. 一次青藏高原夏季低涡的诊断分析研究 [J]. 高原气象, 10 (1): 1–12. Luo Siwei, Yang Yang, Lv Shihua. 1991. Diagnostic analyses of a summer vortex over Qinghai-Xizang Plateau for 29–30 June 1979 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 10 (1): 1–12.
- 陶诗言, 罗四维, 张鸿材. 1984. 1979 年 5~8 月青藏高原气象科学实验及其观测系统 [J]. 气象, (7): 2–5. Tao Shiyang, Luo Siwei, Zhang Hongcai. 1984. Meteorological science experiment and observation system of Qinghai-Tibet Plateau from May to August in 1979 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), (7): 2–5.
- Wang B, Orlanski I. 1987. Study of a heavy rain vortex formed over the eastern flank of the Tibetan Plateau [J]. Mon. Wea. Rev., 115 (7): 1370–1393, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1370:SOAHRV>2.0.CO;2.
- Wang B. 1987. The development mechanism for Tibetan Plateau warm vortices [J]. J. Atmos. Sci., 44 (20): 2978–2994, doi:10.1175/1520-0469(1987)044<2978:TDMFTP>2.0.CO;2.
- 杨洋, 罗四维. 1992. 夏季青藏高原低涡的能量场分析 [J]. 应用气象学报, 3 (2): 198–205. Yang Yang, Luo Siwei. 1992. Energy analyses of vortices over the Qingzang Plateau in summer [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 3 (2): 198–205.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 122–260. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 122–260.
- 郁淑华, 高文良, 彭骏. 2012. 青藏高原低涡活动对降水影响的统计分析 [J]. 高原气象, 31 (3): 592–604. Yu Shuhua, Gao Wenliang, Peng Jun. 2012. Statistical analysis on influence of Qinghai-Xizang Plateau vortex activity on precipitation in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (3): 592–604.
- 郁淑华, 高文良, 彭骏. 2013. 近 13 年青藏高原切变线活动及其对中国降水影响的若干统计 [J]. 高原气象, 32 (6): 1527–1537. Yu Shuhua, Gao Wenliang, Peng Jun. 2013. Statistical analysis of Shearline activity in QXP and its influence on rainfall in China in recent 13 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (6): 1527–1537, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00149.
- 张明俊. 2017. 高原低涡气候特征及其与地表温湿参数关系研究 [D]. 成都信息工程大学硕士学位论文, 10–16. Zhang Mingjun. 2017. The research on the climate characteristics of Tibetan Plateau vortex and its relationship to ground surface temperature and moisture parameters [D]. M.S. thesis (in Chinese), Chengdu University of Information Technology, 10–16.
- 卓嘎, 边巴次仁, 杨秀海, 等. 2013. 近 30 年西藏地区大气可降水量的时空变化特征 [J]. 高原气象, 32 (1): 23–30. Zhuo Ga, BianBa Ciren, Yang Xiuhai, et al. 2013. Spatial and temporal changes of atmospheric Precipitable water in Tibet region in recent 30 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (1): 23–30, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00003.