

王小玲, 丁一汇, 张庆云. 2017. 中国东部夏季持续强降水发生的主要环流模态和水汽输送研究 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 221–230. Wang Xiaoling, Ding Yihui, Zhang Qingyun. 2017. Circulation pattern and moisture transport for summertime persistent heavy precipitation in eastern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 221–230, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16056.

中国东部夏季持续强降水发生的主要环流模态和水汽输送研究

王小玲^{1,2,3} 丁一汇³ 张庆云¹

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

摘要 利用 1957~2011 年我国 502 个测站逐日降水资料, 定义区域平均降水量连续 5 d 超过 1 个标准差为 1 次区域性持续强降水, 分析了我国东部 (105°E 以东) 长江流域、华北和东北地区夏季 (6~8 月) 的强降水, 共得到 74 个个例, 并探讨了造成长江流域和华北地区持续性强降水的主要环流与水汽输送模态。结果表明, 中高纬出现阻塞形势是造成我国东部夏季区域性持续强降水的主要环流型, 占比 86%。其中影响长江流域强降水的主要阻塞形势为中阻型 (贝加尔湖为高压脊) 和双阻型 (乌拉尔山和鄂霍次克海同时出现高压脊); 影响华北地区强降水的主要阻塞形势为中阻型。同时, 必须建立一条自热带海洋至降雨区的水汽通道, 长江流域强降水的水汽通道为印度洋—孟加拉湾—南海; 对于华北地区, 除此水汽通道外, 西北太平洋水汽输送也是一个重要水汽来源。长江流域强降水的异常水汽输送在菲律宾北部出现反气旋中心, 导致从南海有异常水汽输送并在长江流域辐合, 这一反气旋中心对应 500 hPa 上西太平洋副热带高压的加强; 华北地区强降水的异常水汽输送在渤海—朝鲜半岛出现反气旋中心, 异常水汽来自南海和西北太平洋。渤海—朝鲜半岛在 500 hPa 出现正高度异常对维持华北地区持续降水有重要作用。深厚的上升运动或低层辐合高层辐散是华北与长江流域持续强降水发生的共同特点。中阻型和双阻型的长江流域强降水在水汽输送上没有明显差异, 而是动力上升条件的分布差异决定了雨带主要位置的不同。

关键词 夏季 区域性持续强降水 环流模态 水汽输送通道

文章编号 1006-9585 (2017) 02-0221-10

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16056

Circulation Pattern and Moisture Transport for Summertime Persistent Heavy Precipitation in Eastern China

WANG Xiaoling^{1,2,3}, DING Yihui³, and ZHANG Qingyun¹

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ Laboratory of Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Based on daily precipitation data collected at 502 gauge stations in China during 1957–2011, regional-persistent heavy precipitation is defined to be the precipitation with regional mean precipitation larger than one standard

收稿日期 2016-03-15; 网络预出版日期 2016-06-08

通讯作者 王小玲, 女, 1976 年出生, 高工, 主要从事极端气候事件研究。E-mail: xlwang@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375055, 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB417205

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375055), National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2012CB417205)

deviation for five consecutive days. In total there are 74 regional-persistent heavy precipitation events in the Yangtze River basin, North China, and Northeast China in the summer (June to August). The main circulation pattern and moisture transport corresponding to the regional-persistent heavy precipitation events in the Yangtze River basin and North China are analyzed. The results show that the blocking high in the middle and high latitudes of Eurasia is the main circulation pattern for the regional-persistent heavy precipitation. The blocking high in the 500-hPa geopotential height field appeared in 86% of the heavy precipitation events. The main blocking patterns for heavy precipitation in the Yangtze River basin are central-blocking (there is a ridge near the Baikal Lake) and double-blocking (there are ridges near the Ural Mountains and the Okhotsk Sea at the same time). For heavy precipitation in North China, the main circulation pattern is central-blocking. The moisture transport from the tropical ocean to the regions of heavy precipitation is vital. For the Yangtze River basin, the moisture is largely from the Indian Ocean–Bay of Bengal–South China Sea. For North China, in addition to the moisture transport from the Indian Ocean–Bay of Bengal–South China Sea, moisture from the western North Pacific is also important. There is an anticyclonic center in the region to the north of the Philippines, which is favorable for abnormal moisture transport from the South China Sea to the Yangtze River basin. Corresponding to the anticyclonic center, the western North Pacific subtropical high at the 500 hPa strengthens. For the heavy precipitation in North China, the anticyclonic center favorable for abnormal moisture transport is located at the Bohai Sea–Korean Peninsula, and more moisture is pulled from the South China Sea and the western North Pacific. The positive geopotential height anomalies in the Bohai Sea–Korean Peninsula at 500 hPa are important for persistent heavy precipitation in North China. One common feature for the heavy precipitation in the Yangtze River basin and North China is the deep upward movement or divergence at upper levels and convergence at lower levels. There is no obvious difference in the moisture transport between central-blocking and double-blocking circulation patterns for heavy precipitation over the Yangtze River basin. However, the difference in upward movement determines the difference in precipitation location.

Keywords Summer, Regional-persistent heavy precipitation, Circulation pattern, Moisture transport

1 引言

我国处于东亚季风区，降水的时空分布极不均匀。在降水集中出现的主汛期，一次强降雨过程带来的降水量可以达到几百毫米甚至上千毫米，往往造成严重的灾害。因而，极端强降水引起了学者的普遍关注（翟盘茂等，1999，2003）。区域性的持续异常强降水由于影响范围大，往往造成更为严重的灾害和损失，受到全社会的普遍关注。早在1960年代，邹浩等（1964）就指出长江中下游梅雨期在 $50^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 地区观测到阻塞高压或高压脊，他们的存在使得东亚上空 $35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内不断有短波槽向东传播。陶诗言（1980）进一步指出当下游有高压脊发展和稳定时，可使上游系统移速减慢，在稳定的大尺度形势和持续的水汽供应条件下，强降雨可以持续5 d以上。东亚夏季风降水是中高纬与低纬共同作用、多种尺度天气系统相互作用的结果（张庆云和陶诗言，1998；丁一汇，2005），近年来针对异常强降水的个例分析均表明这一特征（矫梅燕等，2006；谌芸等，2012）。随着夏季风的向北推进，我国的雨带自南向北移动，环流形势也出现相应

调整。对于不同地区的持续性强降水，除了有共同的环流特征外，还应有其自身特征。因此，认识我国不同地区的持续性强降水出现的大尺度环流条件对提高灾害性天气的预报准确率和防灾减灾有重要意义。

陶诗言（1980）对我国的暴雨天气形势和中小尺度特征做了全面的分析，大大提高了对我国暴雨发生条件和机制的认识。鲍名（2007）根据我国暴雨（日降水量大于等于50 mm）的出现区域，将区域持续性暴雨分为四种地域类型，并分析了持续3 d以上的暴雨过程的环流特征。本文将针对持续5 d以上的区域性强降水，分别讨论出现在长江流域和华北地区的持续强降水的大尺度环流模态，进一步揭示不同地区区域性持续强降水出现的中高纬环流特征、低纬水汽输送以及动力条件等，以期提高对我国区域性持续强降水的天气气候条件认识。

2 资料和方法

本文所用1957~2011年我国502个测站逐日降水资料来自中国气象局国家气象信息中心；同时期NCEP逐日再分析资料用于分析环流特征，

包括位势高度、水平经向风和纬向风、气温、绝对湿度、垂直速度以及海平面气压。选取我国东部(105°E 以东)长江流域、华北和东北地区(图 1), 利用算术平均法求取区域平均的夏季(6~8 月)降水量, 区域平均降水量连续 5 d 超过 1 个标准差, 定义为 1 次区域性持续强降水。由于华南地区的降水主要出现在 4~6 月, 6~8 月强降水个例有一部分与台风活动有关, 因此这里不讨论华南地区。本文所用气候平均值为整个时段的平均。旋转经验正交函数(EOF)(陈佩英, 1985; 黄嘉佑, 1988)用于提取欧亚中高纬夏季位势高度场的主要模态。

3 阻塞形势是造成我国夏季区域性持续强降水的主要环流型

本文共得到长江流域、华北地区和东北地区夏季的区域性持续强降水 41 例、21 例和 12 例, 共计 74 例。从 74 个个例出现的时间来看, 区域性持续强降水主要出现在各个区域的主汛期, 出现时间与我国雨带的自南向北移动过程一致。长江流域有 2/3 的个例出现在梅雨期(6 月下旬至 7 月上旬); 华北和东北地区的区域性持续强降水主要出现在 7 月下旬至 8 月上旬(分别为 62%和 75%)。从不同区域的个例数量来看, 长江流域的个例数远大于华北和东北区, 这与我国持续性暴雨的主要空间分布

一致(鲍名, 2007)。

依据每一个强降水个例出现期间的 500 hPa 高度场特征, 可分为阻塞型(64 例)以及持续西风波动型(10 例)。阻塞型即在鄂霍茨克海、乌拉尔山或贝加尔湖地区分别出现高压脊, 即中阻型(贝加尔湖阻塞型)、双阻型(乌拉尔山和鄂霍茨克海同时出现阻塞)、鄂霍茨克阻塞和乌拉尔阻塞。对欧亚中高纬地区(40°N~65°N, 40°E~160°E)1957~2011 年夏季平均的 500 hPa 位势高度场进行旋转经验正交函数展开, 结果表明, 本文涉及到的阻塞型分别对应着正交函数展开后的 4 个特征向量, 也就是说, 这几种阻塞型在统计上是互相独立的, 每一种阻塞型都有一定的代表性。在本研究的个例中, 阻塞型达到了 86%。陶诗言(1980)指出, 当阻塞形势出现在鄂霍茨克海, 乌拉尔山或贝加尔湖地区时, 对我国的暴雨有重要的影响。这也进一步说明阻塞在维持大尺度环流稳定的重要性, 它是我国东部持续性强降水的主要条件之一。持续西风波动型数量较少, 本文将不做研究。

我们分别统计了各环流型的持续强降水个例数和比例, 见表 1。可以看出, 对于长江流域, 中阻型和双阻型是造成区域性持续强降水的主要环流型, 而中阻型也是造成华北和东北地区区域性持续强降水的主要环流型。由于东北地区的持续强降水个例较少, 本文重点分析长江流域和华北地区持续强降水的环流模态。

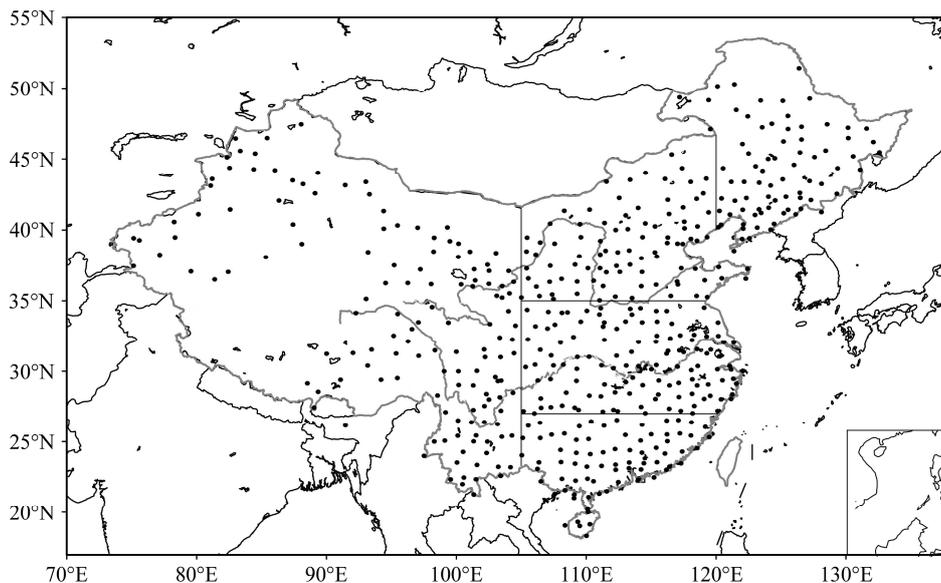


图 1 我国 502 个测站分布及东部区划

Fig. 1 Distribution of 502 gauge stations and subregions in China

表 1 不同环流形势的区域性持续强降水个例及比例
Table 1 Numbers of regional-persistent heavy precipitation events under different circulations and their percentages in the total number for different regions

区域	持续强降水个例 (比例)			
	中阻型	双阻型	双阻过渡型	持续西风波动型
长江流域	15 (36.6%)	15 (36.6%)	8 (19.5%)	3 (7.3%)
华北	7 (33.3%)	5 (23.8%)	6 (28.6%)	3 (14.3%)
东北	4 (33.3%)	3 (25.0%)	1 (8.3%)	4 (33.3%)

注：双阻过渡型指乌拉尔阻塞和鄂霍茨克阻塞。

4 中阻型和双阻型长江流域强降水的环流模态

中阻型长江流域的持续性强降水个例中，欧亚中高纬地区贝加尔湖附近为高压脊，脊前高空槽自鄂霍茨克海向南伸至长江地区上空（图 2a）；而双阻型则与中阻型相反，在乌拉尔山和鄂霍茨克海同时存在高压脊，贝加尔湖为宽广的槽区，我国东部上空受分支气流影响（图 2b）。两种环流型在低纬地区均为正高度距平控制，西太平洋副热带高压偏强。对应的降水分布表明，中阻型异常雨带位于长江及其以北地区，而双阻型异常雨带则略偏南 1 个纬度，位于沿江及以南地区（图 2c、2d）。

中阻型和双阻型均可观测到来自印度洋—孟加拉湾—南海的强烈水汽输送通道（图 3a、3b），来自热带洋面的大量水汽在长江流域出现大范围的辐合，为长江流域强降水的持续提供源源不断的水汽。两类环流型的水汽输送通道没有差别，此时决定雨带主要位置的因素为动力条件。与中阻型相比，双阻型的水汽更为深厚（图 3c、3d），水汽辐合更为强烈（图 3a、3b）。菲律宾北部出现异常的反气旋中心（图 3e、3f），导致由南海向长江流域输送的水汽异常偏多，而这一特征在梅雨偏多年也往往被观测到（江志红等，2013）。长江至华南地区为大范围的水汽异常辐合区。

对于中阻型（图 4a），东亚高空急流风速极大中心位于 115°E~150°E，异常降水区位于急流入口区右侧，处于有利的上升运动区；纬向风在贝加尔湖以南至我国华北地区的负异常表明纬向环流偏弱，有利于冷空气活跃；长江流域上空大范围的纬向风正异常区表明该区域高空锋区较强。而对于双阻型（图 4b），高空急流极大风速中心较中阻型位置偏西，急流与降雨区的配置不如中阻型典型。低层 850 hPa 上（图 4c、4d），两种环流型均在菲律宾北部出现异常反气旋中心，异常西南风和异常东北风在长江流域辐合，双阻型辐合线的位置较中阻

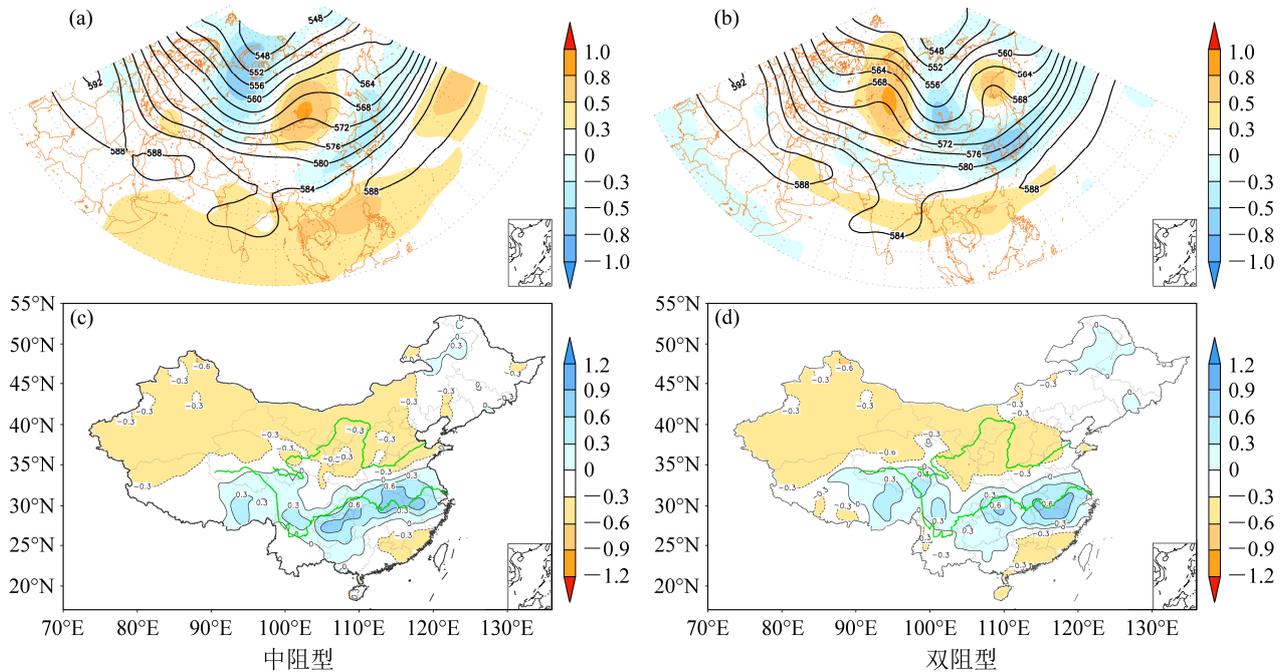


图 2 长江流域 (a、c) 中阻型和 (b、d) 双阻型持续性强降水环流形势的 (a、b) 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm) 及其标准化距平 (填色), (c、d) 降水量标准化距平

Fig. 2 (a, b) The geopotential heights (contour, units: dagpm) and anomalies (shaded) at 500 hPa, and (c, d) precipitation anomalies under (a, c) central-blocking and (b, d) double-blocking circulation patterns for the regional-persistent heavy precipitation in the Yangtze River basin

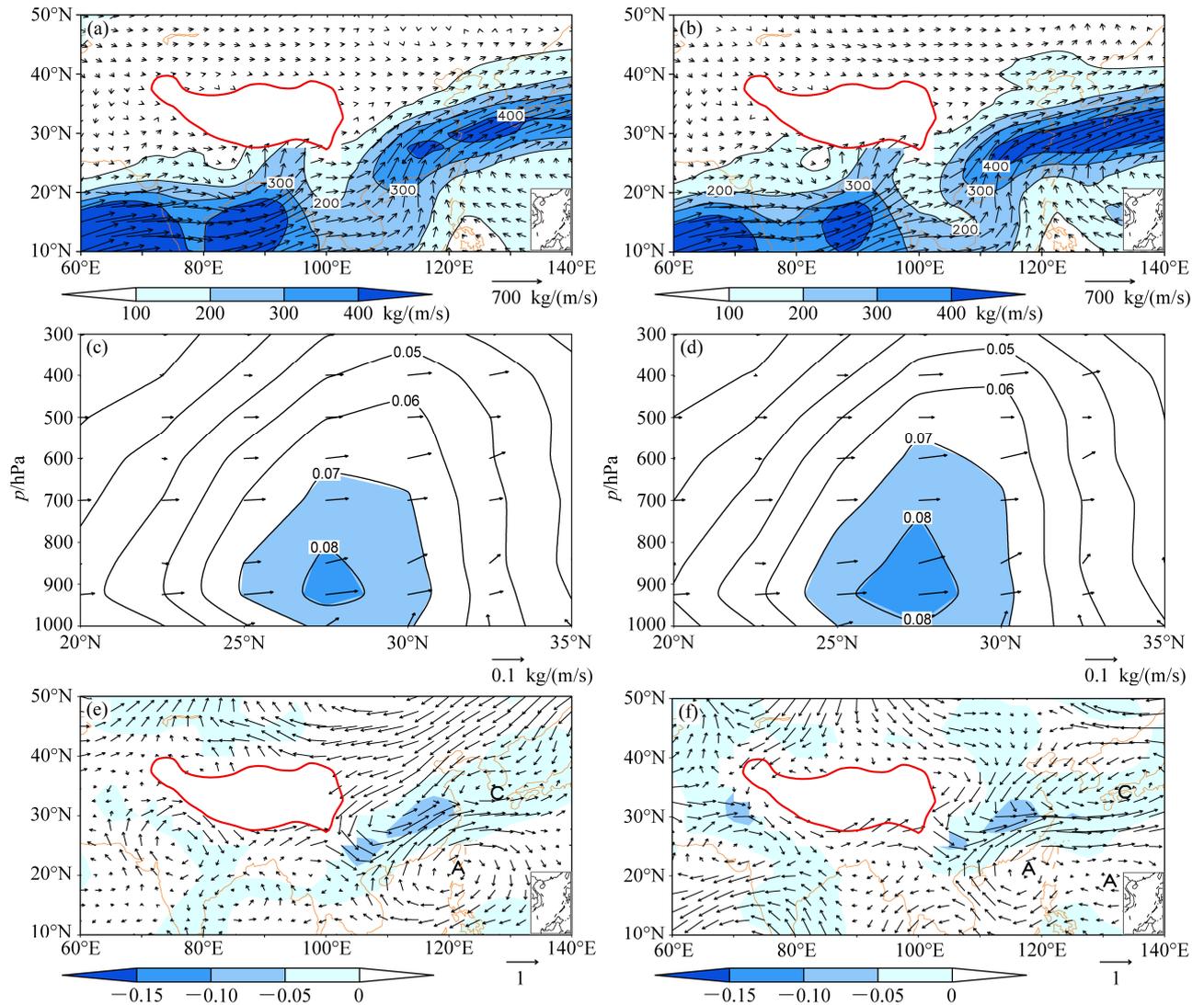


图3 长江流域中阻型(左列)和双阻型(右列)持续强降水:(a, b)垂直积分水汽输送;(c, d)沿122.5°E水汽输送高度—纬度剖面;(e, f)水汽输送标准化距平(填色区域表示水汽异常的辐合区)

Fig. 3 (a, b) Vertically integrated moisture transport, (c, d) latitude–height cross sections of moisture transport along 122.5°E, and (e, f) normalized anomalies of vertically integrated moisture transport (the shaded area illustrates the abnormally convergent region) under central-blocking (left column) and double-blocking (right column) circulation patterns for the regional-persistent heavy precipitation in the Yangtze River basin

型略偏南,由此导致雨带位置略有不同。菲律宾北部的这一异常反气旋中心与500 hPa位势高度场异常偏高相对应。

无论是中阻型还是双阻型,在异常降水区上空200 hPa均观测到了异常的辐散(图5、图6)850 hPa为异常辐合区,高层辐散、低层辐合使得异常降水区处于深厚的上升运动区,上升运动的异常超过1个标准差。仔细对比中阻型和双阻型的垂直速度可以发现,双阻型的最大上升运动中心比中阻型略偏南,这就是在水汽输送相似的情况下,动力条件决定了雨带的主要位置。

5 中阻型华北强降水的环流模态

中阻型的500 hPa高度场(图7a)在贝加尔湖以北地区为高压脊,气流在高压脊南侧出现分支,华北上空受南支气流短波槽影响。中高纬阻塞形势的稳定维持,使得天气尺度系统在华北地区多次出现,造成持续强降水(图7b)。

与长江流域强降水的水汽输送不同,华北地区中阻型强降水的水汽输送除了来自印度洋—孟加拉湾—南海的强烈水汽之外,西北太平洋水汽输送

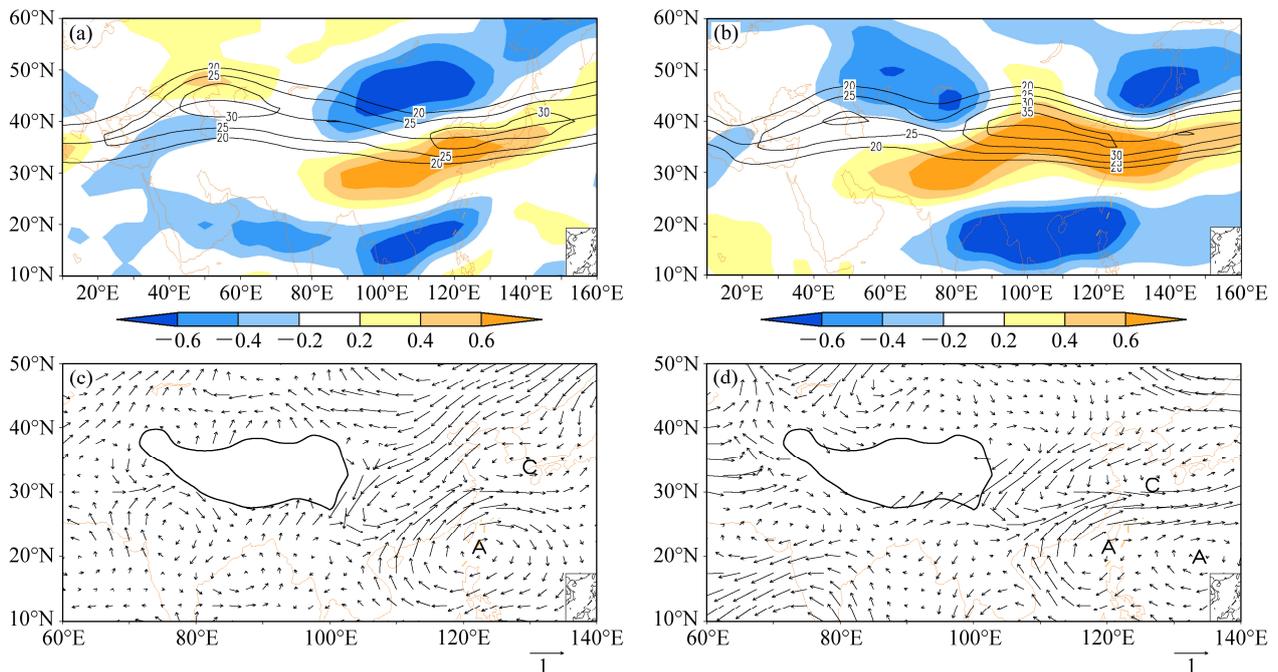


图4 长江流域 (a、c) 中阻型和 (b、d) 双阻型持续强降水 (a、b) 200 hPa 纬向风标准化距平 (填色) (黑色等值线为高空急流, 单位: m/s) 以及 (c、d) 850 hPa 风场标准化距平

Fig. 4 (a, b) Normalized anomalies of zonal winds (colored) at 200 hPa (colored) (solid lines illustrate the jet stream, units: m/s), and (c, d) normalized anomalies of winds at 850 hPa under (a, c) central-blocking and (b, d) double-blocking circulation patterns for the regional-persistent heavy precipitation in the Yangtze River basin

也有重要贡献 (图 8a), 这一特征在其他环流型下均有观测到。相同量级的水汽输送随高度的分布不如长江区强, 其水汽更集中在近地面 (图 8b)。水汽输送异常的水汽输送在朝鲜半岛西部海面上空出现反气旋中心, 源自南海和西北太平洋的异常水汽源源不断地向华北地区输送 (图 8b)。这一异常反气旋中心在其他环流型下 (双阻型除外) 也均存在。

高空锋区在华北地区上空加强 (图 9a), 降雨区位于高空急流轴南侧。巴尔克什湖至贝加尔湖宽广地区的纬向风减弱, 经向风扰动加强, 有利于冷空气南下。在低层 850 hPa, 异常南风向北推进到 40°N 以北; 朝鲜半岛出现反气旋中心, 赤道辐合带向北推进到 23°N 附近 (图 9b)。对应 500 hPa 上, 渤海—朝鲜半岛上空为正高度距平, 在鄂阻型、乌阻型和西风带短波槽型的异常降水个例中, 甚至出现了闭合的 588 dagpm。也就是说渤海—朝鲜半岛上空的正高度异常和辐散对华北的持续强降水维持有重要作用。华北地区处于高层辐散、低层辐合的深厚上升运动区 (图 10)。

6 结论和讨论

在我国东部季风区, 不同区域夏季持续性强降水的大尺度环流形势有共同特征: 在行星尺度上, 中高纬的槽脊相对稳定少动, 往往有阻塞形势存在, 为区域性持续强降水的维持提供了大尺度背景; 同时, 必须建立一条自热带海洋至降雨区的水汽通道, 将来自热带洋面的丰沛水汽不断输送到降雨区, 并且出现大范围强烈的水汽通量辐合; 高空锋区加强, 低层偏南风携带大量水汽推进到降雨区; 降雨区上空高层辐散、低层辐合, 处于强烈的垂直上升运动区; 上升区的位置决定了持续性强降水的空间分布。

中高纬出现阻塞形势是造成我国夏季区域性持续强降水的主要环流型, 占比 86%。其中影响长江流域的主要阻塞型为中阻型和双阻型, 影响华北地区的主要阻塞型为中阻型。长江流域强降水的水汽通道为印度洋—孟加拉湾—南海; 而对于华北, 除此水汽通道外, 西北太平洋水汽输送也是一个重

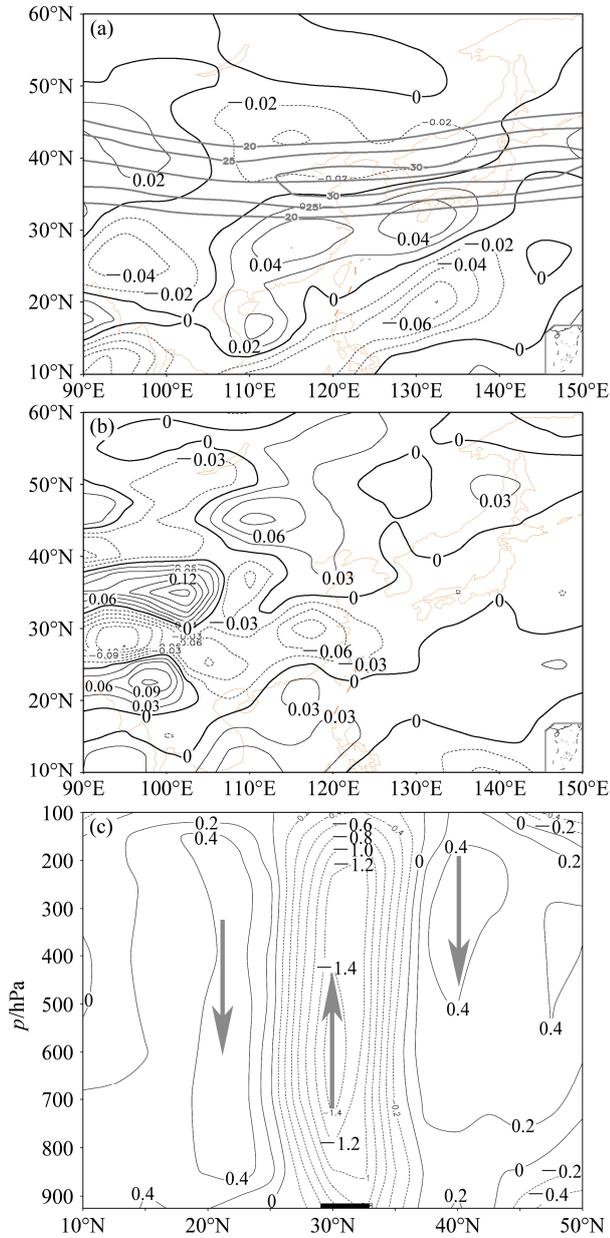


图5 长江流域中阻型强降水环流型 (a) 200 hPa 散度标准化距平 (黑色等值线) 及纬向风分布 (粗灰实线, 单位: m/s)、(b) 850 hPa 散度标准化距平、(c) 沿 115°E 的垂直速度标准化距平纬度—高度剖面 (箭头分别表示上升/下沉运动, 横坐标上粗黑线表示雨带的主要纬度范围)

Fig. 5 (a) Standardized divergence anomaly (black contour) and the zonal wind (thick grey solid lines) at 200 hPa, (b) standardized divergence anomaly at 850 hPa, and (c) latitude-height cross sections of vertical velocity along 115°E under the central-blocking circulation pattern for the regional-persistent heavy precipitation in the Yangtze River basin (arrows illustrate ascending/ descending motion; the very thick black line along the x-axis illustrates the rainbelt)

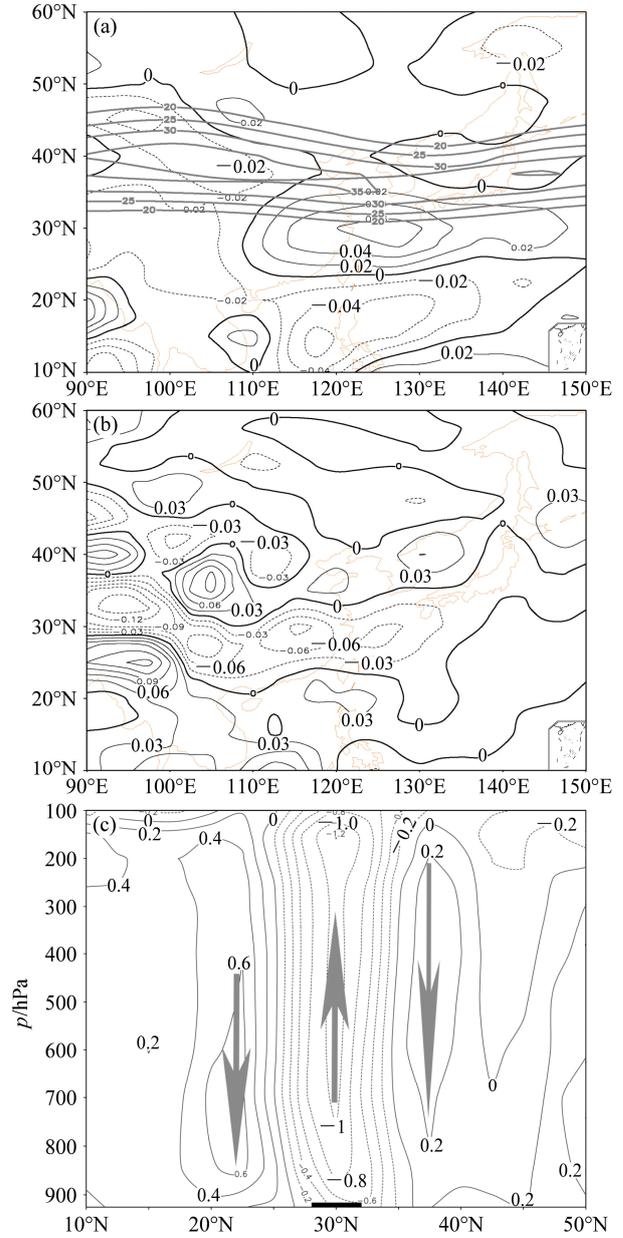


图6 同图5, 但为长江流域双阻型强降水环流型

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the double-blocking circulation pattern

要水汽来源。长江流域降水的异常水汽输送在菲律宾北部出现反气旋中心, 导致从南海有异常水汽输送并在长江流域辐合, 这一反气旋中心对应 500 hPa 上西太平洋副热带高压的加强; 华北地区强降水的异常水汽输送在渤海—朝鲜半岛出现反气旋中心, 来自南海和西北太平洋的异常水汽输送到华北低纬地区; 赤道辐合带北移到 23°N 附近。渤海—朝鲜半岛在 500 hPa 出现正高度异常对维持华北地区持续强降水有重要作用。中阻型和双阻型的长江流域

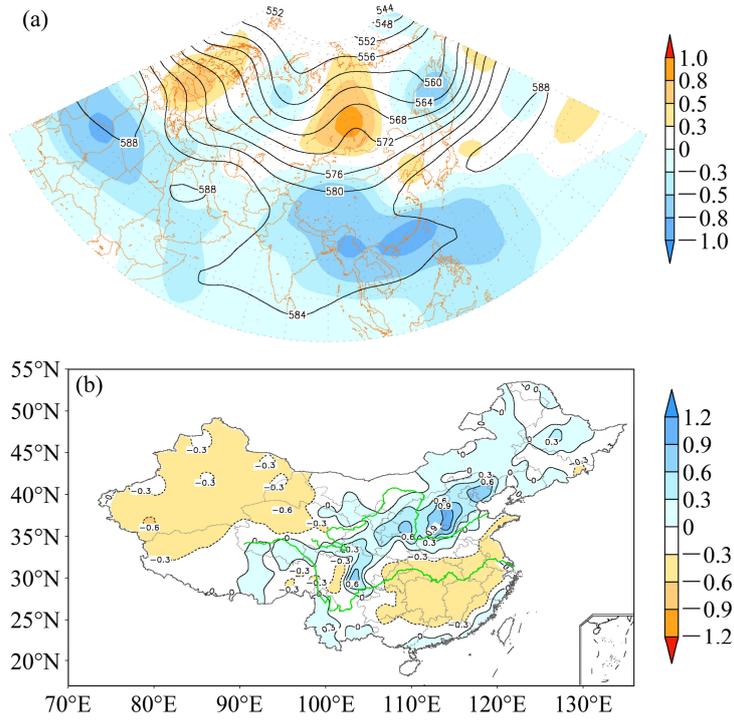


图7 华北地区中阻型持续性强降水环流形势的 (a) 500 hPa 高度 (等值线, 单位: dagpm) 及其标准化距平 (填色), (b) 降水量标准化距平
Fig. 7 (a) The geopotential heights (contour, units: dagpm) and standardized anomalies (shaded) at 500 hPa, and (b) standardized precipitation anomalies under central-blocking circulation pattern for the regional-persistent heavy precipitation in North China

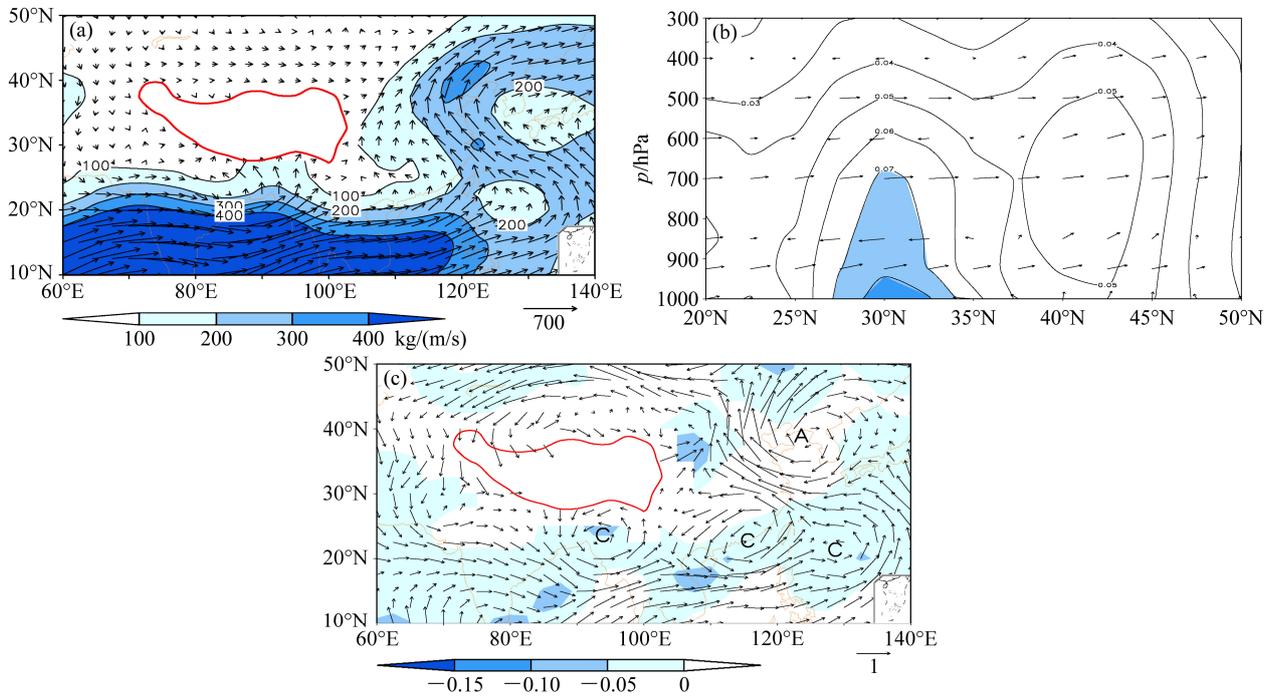


图8 华北地区中阻型持续强降水: (a) 垂直积分水汽输送; (b) 沿 122.5°E 水汽输送高度-纬度剖面; (c) 水汽输送标准化距平 (填色区域表示水汽异常的辐合区)
Fig. 8 (a) Vertically integrated moisture transport, (b) latitude–height cross sections of moisture transport along 122.5°E, and (c) normalized anomalies of vertically integrated moisture transport (the shaded area illustrates the abnormally convergent region) under central-blocking pattern for the regional-persistent heavy precipitation in North China

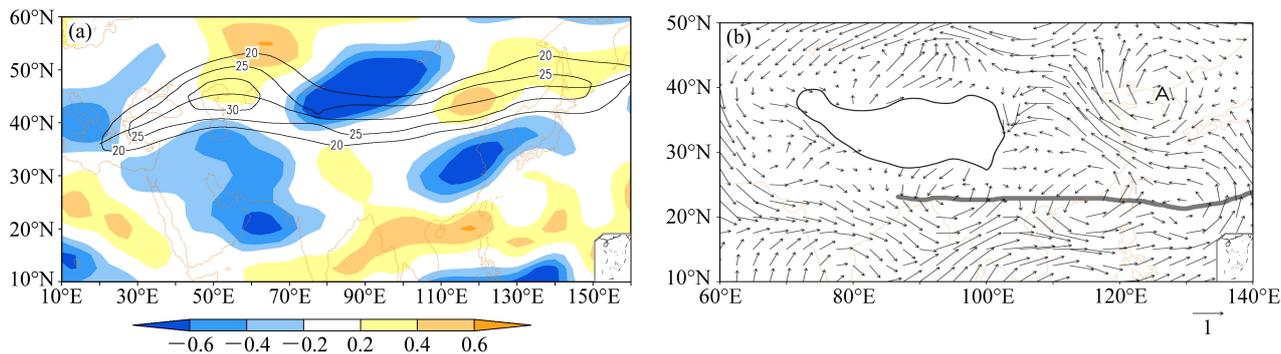


图9 华北地区中阻型持续性强降水环流形势的 (a) 200 hPa 纬向风标准化距平 (填色) (黑色等值线为高空急流, 单位: m/s)、(b) 850 hPa 风场标准化距平 (粗灰线表示赤道辐合带位置)

Fig. 9 (a) Standardized anomalies of zonal winds at 200 hPa (colored) (solid lines illustrate the jet stream, units: m/s), and (b) standardized anomalies of winds at 850 hPa under the central-blocking pattern for the regional-persistent heavy precipitation in North China (the heavy line in gray indicates the intertropical convergence zone)

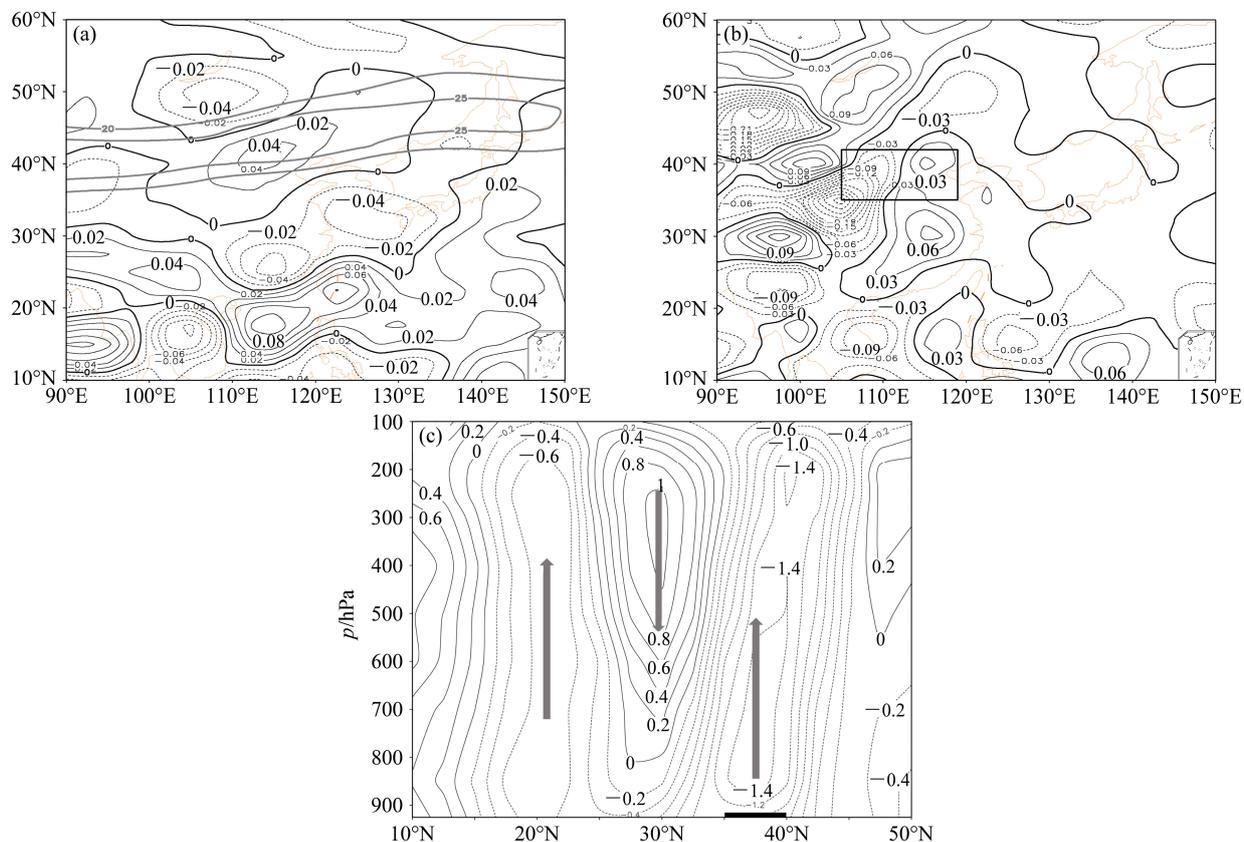


图10 同图5, 但为华北地区中阻型强降水环流型, 图b中方框表示主要降水区

Fig. 10 Same as Fig. 5, but for the central-blocking pattern for the regional-persistent heavy precipitation in North China. The box in (b) indicates the major precipitation region

强降水在水汽输送上没有明显差异, 动力上升条件决定了雨带的主要位置, 中阻型主要雨带位于长江及其以北, 双阻型雨带位置略偏南 1~2 个纬度。

本文讨论的阻塞型是指中高纬有明显的高压脊存在, 不是根据定义计算的严格意义上的阻塞高压, 因此, 阻塞型或阻塞形势在本文 500 hPa 环流

场中比阻塞高压更普遍出现。对于东北和华北地区, 持续性强降水个例尽管较长江流域少, 尤其是东北地区, 对于持续时间和强度都比较极端的大范围强降水而言, 还是有一定的代表性的。另外, 由于篇幅所限, 本文暂不讨论西北太平洋副热带高压对区域性持续强降水的影响。

参考文献 (References)

- 鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景 [J]. 大气科学, 31 (5): 779–792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 779–792, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.03.
- 陈佩英. 1985. 川东盛夏干旱的气候趋势分析 [J]. 高原气象, 4 (3): 274–278. Chen Peiying. 1985. Analysis of climate trend on midsummer droughts in eastern Sichuan [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 4 (3): 274–278.
- 谌芸, 孙军, 徐珺, 等. 2012. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考 [J]. 气象, 2012, 38 (10): 1255–1266. Chen Yun, Sun Jun, Xu Jun, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part I: Observation and thinking [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (10): 1255–1266, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2012.10.012.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 212–249. Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 212–249.
- 黄嘉佑. 1988. 转动主分量分析在天气气候分析中的应用 [J]. 气象, 14 (9): 47–51, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.1988.9.013. Huang Jiayou. 1988. Rotated principal component in weather and climate analysis [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 14 (9): 47–51.
- 江志红, 任伟, 刘征宇, 等. 2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析 [J]. 气象学报, 71 (2): 295–304. Jiang Zhihong, Ren Wei, Liu Zhengyu, et al. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71 (2): 295–304, doi: 10.11676/qxxb2013.017.
- 矫梅燕, 毕宝贵, 鲍媛媛, 等. 2006. 2003年7月3~4日淮河流域大暴雨结构和维持机制分析 [J]. 大气科学, 30 (3): 475–490. Jiao Meiyuan, Bi Baogui, Bao Yuanyuan, et al. 2006. Thermal and dynamical structure of heavy rainstorm in the Huaihe River basin during 3–4 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 475–490, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.11.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 35–41. Tao Shiyan. 1980. China's rainstorm (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 35–41.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 56 (2): 199–211. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56(2): 199–211, doi: 10.11676/qxxb1998.019.
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 57 (2): 208–216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (2): 208–216, doi: 10.11676/qxxb1999.019.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. 地理学报, 58 (S): 1–10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (S): 1–10, doi: 10.11821/xb20037s001.
- 邹浩, 钱自强, 朱翠英, 等. 1964. 长江流域中下游梅雨时期 500 毫巴环流形势的分析 [J]. 气象学报, 34 (2): 174–184. Zou Hao, Qian Ziqiang, Zhu Cuiying, et al. 1964. An analysis on the 500 mb circulation during Mai-Yü period in the lower and middle Yantze [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34 (2): 174–184, doi: 10.11676/qxxb1964.018.