

文章编号: 2096-1618(2020)06-0644-09

急流背景下华南前汛期极端降水与大气河的关系

梁爽¹, 肖天贵¹, 罗亚丽²

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要:为更好地分析近年来极端降水事件与大气河的关系, 利用1998–2015年ECMWF的再分析格点资料和区域自动站日降水资料研究华南前汛期极端降水事件中, 不同类型急流对应大气河的变化, 结果表明: 对华南前汛期降水产生影响的湿冷空气大多由西南方向进入华南地区, 逐步对降水的发生和维持提供动力作用; 根据影响极端降水事件的急流类型, 分为3大类、4小类, 并对不同类型对应存在的大气河进行分析; 对应为孟加拉湾–南海大气河、孟加拉湾–云贵高原大气河以及中南半岛–南海大气河作用在极端降水事件上。

关键词:气候变化; 极端降水; 大气河; 华南前汛期; 高低空急流

中图分类号: P442.3

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.011

0 引言

提出全球气候变暖以来, 这一现象引起了社会各界的广泛关注, 同时人们对由全球变暖导致的极端气候事件也越关心。IPCC第四次^[1]报告中将极端气候事件定义为从概率发生的角度来看, 发生概率特别小的事件, 一般取占该天气现象的10%及以下的为极端气候事件, 其中的极端降水——连同洪水、山体缓坡和其他连带灾害——是全球最致命的气候事件。而大型风暴导致的降水量受到空气中水汽含量的限制, 当空气中的水汽含量增加时, 极端降水事件中的降雨量也增大了。

中国对于极端降水事件的气候特征研究已经小有成效, 翟盘茂等^[2]结合全球变化的特点, 讨论了中国近50年极端降水事件的变化特征; 杨金虎等^[3]通过对不同台站极端降水阈值定义, 统计中国近45年西北汛期极端降水事件的发生频次, 并分析了其时空分布特征; 孙婧超等^[4]等通过波扰动能量等分析了华南地区区域性日降水极端事件的统计特征和其环流异常。

华南前汛期作为中国每年的第一个雨季, 通常占全年降水量的一半, 影响区域包括两广以及海南省, 其中绝大多数暴雨过程都和冷暖空气交汇以及华南上空的高低空急流有关。这一雨季强对流天气频发, 常伴有冰雹、强雷电、雷雨大风等天气, 而且容易引发洪水, 形成洪涝灾害以及山体滑坡和泥石流等次生灾害。因此, 及时和准确预报这些极端降水事件对减少灾害的发生至关重要。

国外对于暴雨对应的水汽输送研究很多, 并通过水汽通道的研究, 定义了大气河^[5]的概念。大气河是

位于对流层下层的, 天气尺度的下场水汽输送路径, 是中纬度地区近地面水汽输送的主要途径。在中国, 田红等^[6]利用再分析资料讨论了夏季东亚季风区水汽输送特征, 划分出中国大陆的3条来自低纬度的水汽通道, 并定义和计算了水汽通道强度指数来研究其年际变化; 章新平等^[7]通过对不同季节降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与温度、降水量的联系, 研究了3条与亚洲降水的水汽路径演变过程。

高低空急流的演变与强降水的水汽输送发生密切相关, 朱乾根等^[8]利用华南前汛期的降水试验数据研究了低空急流与暴雨落区上空水汽演变的关系; 张俊岚等^[9]对影响持续性降雪天气过程的水汽条件进行分析, 发现急流的建立和维持是水汽长距离输送至南疆的重要条件。

目前, 对影响降水的高低空急流和水汽输送虽有不少, 但通过高低空急流分布将极端降水事件进行分类, 进而研究水汽通道甚至大气河对其影响的研究不多。文中研究将不同急流类型对应大气河的存在, 讨论其对华南前汛期极端降水事件的影响和作用。

1 资料和计算方法

1.1 资料

降水资料为华南地区110个区域自动站1998–2015年5、6月的逐日降水数据, 同时对各个站点进行检查, 将其中缺测量较多的站点进行剔除。天气系统的分类使用MICAPS系统200 hPa、850 hPa位势高度场和风场的逐日数据。

欧洲中期数值预报中心的再分析格点资料(ERA–Interim), 空间分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, 时间间隔为

6 h,物理量为垂直方向上 1000 ~ 200 hPa共 22 层的水平风(u,v)、比湿(q)和地面气压(sp)。按急流类别对极端降水个例进行算术平均,进而用于计算各层和整层的水汽通量以及描述对应层次的环流形势。

1.2 计算方法

单层大气水汽通量分量: $q_u=uq/g,q_v=vq/g$

整层大气水汽通量分量: $q_u=-\frac{1}{g}\int_{p_s}^p uqdp,$

$q_v=-\frac{1}{g}\int_{p_s}^p vqdp$

水汽通量散度: $\nabla\cdot(Vq/g)=\frac{\partial(q_u)}{\partial x}+\frac{\partial(q_v)}{\partial y}$

式中, q 为比湿(g/kg), u,v 为水平风速(m/s), g 为重力加速度(m/s^2), p 为该层气压(hPa), p_s 为地面气压(hPa);单层大气水汽通量和整层大气水汽通量的单位均为 $g/(s\cdot hPa\cdot cm)$,水汽通量散度的单位为 $10^5kg/(m\cdot s)$

2 降水特征概述

2.1 日平均降水

由罗亚丽等^[10]定义,华南地区(下文简称为关键区域)由110 °E ~ 117 °E,20 °N ~ 25 °N确定,其中包括广东省和广西省及南海北部的一部分组成。

关键区域日平均降水量在沿海地区达到较高值,大部分超过150 mm,最高值出现在广西与广东沿海的交界处、广东中部和广东南部的沿海地区,同时通过500 hPa的高度场和850 hPa比湿分布(图略)分析可以发现,湿冷空气大多数情况从西南进入关键区域。

2.2 极端降水事件筛选

根据黄玲等^[11]的研究表明,华南地区 4 月的日均降水量远低于 5 月和 6 月,而且在 6 月 15 日后,从华南地区登陆的台风会影响极端降水的分析,因此沿用这一条件,选择 5 月 1 日~6 月 15 日为时间范围。同时,为消除台风登陆对极端降水与高地空急流之间的影响,排除了 1998~2015 年受台风影响的年份,分别是 1999 年(玛姬,6 月 6~8 日)、2006 年(珍珠,5 月 17~18 日)、2011 年(莎莉嘉,6 月 10~11 日)和 2014 年(海贝思,6 月 15~17 日)。

文中将极端降水事件定义为研究时间范围内所有日降水量的前 5%^[11],由此筛选出共 24 次极端降水事件。

2.3 极端降水事件分类

根据 MICAPS 中200 hPa、500 hPa和850 hPa的高度

场以及风场判定每个极端降水事件在高低空的天气系统(200 hPa上风速>30 m/s、700 hPa上风速>16 m/s、850 hPa或925 hPa上风速>12 m/s),将 24 次极端降水事件分为 3 大类(表 1),分别是高空急流型、低空急流型、高低空急流型其中高空急流型出现 2 次,占比8.4%。低空急流型出现 20 次,占比83.3%,低空急流型根据其 850 hPa的天气形势分为低槽型和气旋型,低槽型是指华南地区上方有一向南方延伸的深槽影响极端降水事件,出现 6 次,占比 25%,气旋型是指华南上空有水平气旋直接影响极端降水事件,出现 12 次,占比58.3%。高低空急流型也出现 2 次,占比8.3%。

表 1 极端降水事件分类		
急流类型(占比%)		日期
高空急流型(8.4%)		20000509,20100519
低空急流型 (83.3%)	低槽型 (25%)	19980609, 20100506, 20100522, 20100609, 20130522,20150523
	气旋型 (58.3%)	20010607, 20010613, 20030606, 20030610, 20050615, 20070519, 20070609, 20080606, 20080613, 20090523, 20100601, 20100614, 20130515,20150520
	高低空急流型(8.3%)	20010521,20050505

3 合成分析结果

为考察 3 大类急流天气分型对应的环流形势和大气河形势,分别绘制了所需层次的风场(高度场)、水汽通量及水汽通量矢量和整层水汽通量矢量及水汽通量散度的分布情况。

3.1 高空急流影响下大气河与极端降水

朱乾根等^[8]指出,在高空急流的右侧辐散区,多有暴雨发生,而且对应的急流多为西或西南风。并且在急流轴上,由于急流轴内部的摩擦力作用,减小了地转偏向力,同时偏差风与气压梯度力方向相同。

高空急流型的200 hPa平均风场中(图 1a),关键区域的西北部体现明显的西风,同时关键区域的剩余部分为明显的西南风,而且有辐散的情况发生。在关键区域上方,中国中部到经华东地区向东北延伸,高空有一支最大风速为50 m/s的高空急流,它的急流核位于山东半岛附近。两次高空急流型的极端降水事件,在整层水汽通量上(图 1b),关键区域的左前方和南海的上空均显示为水汽通量散度的负值,左前方的数值为-700 kg/(m·s),在 130 °E, 21 °N 的位置达到-1000 kg/(m·s),说明在该区域存在一个闭合的水汽辐合区(即水汽汇区),这与大气河的定义相吻合。在关键区域附近水汽通量矢量表现为辐合的趋势,说

明水汽通量不断地向华南地区输送,其中南海地区的输送量最大。因此,高空急流型的极端降水事件中主要从孟加拉湾输送到华南地区的水汽通道为大气河。

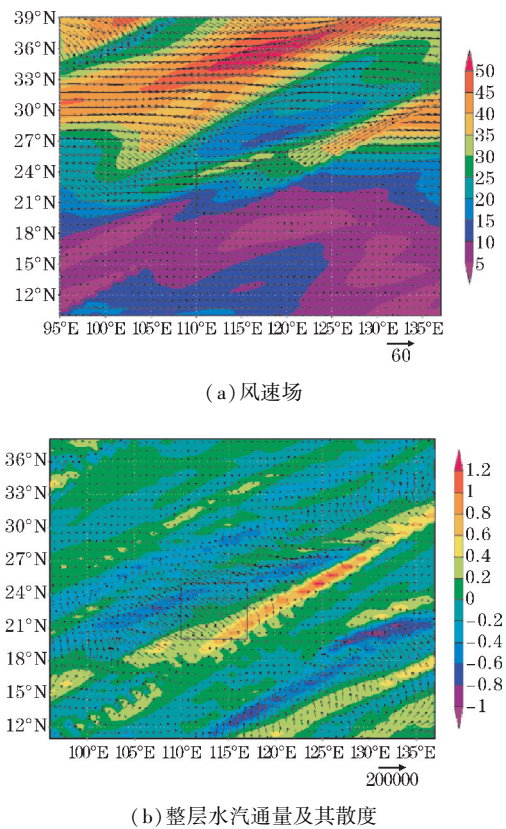


图 1 高空急流型合成 200 hPa 风速场和整层水汽通量及其散度分布图(箭头为水汽通量矢量,填色为散度)

3.2 低空急流影响下大气河与极端降水

由低槽型和气旋型组成低空急流型占极端降水事件的主要部分,低空急流是与强降水相联系的位于对流层下部的水平动量相对集中的大风速带,中心风速在700 hPa大于16 m/s、在850 hPa大于12 m/s,这种对夏季强降水产生较大影响的低空急流在急流轴上下均存在明显的风速垂直切变。低槽型和气旋型两种天气形势在850 hPa上对于急流的不同影响也会作用在水汽的输送上。

3.2.1 低槽-低空急流型

位于 500 hPa 的低槽(图略)在极端降水事件发生时,槽线大多位于关键区上空温带气旋的后部,同时给极端降水提供较充足的水汽供应和动力作用支持。在 850 hPa 上(图 2),关键区域的右后方有一明显存在的低空急流,风速最大值高达 27 m/s,这与朱乾根提出的低空急流左前方的辐合区多有暴雨发生,同时从急流轴两侧的风场分析来看,左侧有辐散存在,右侧有辐合存在,使低空急流不断加强。

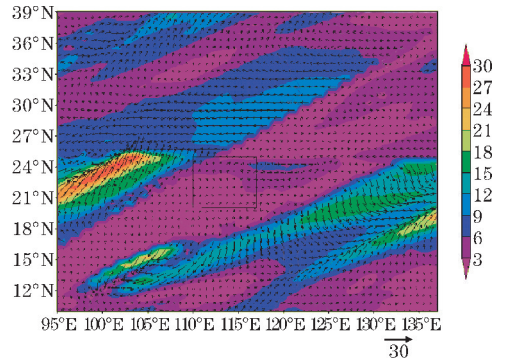
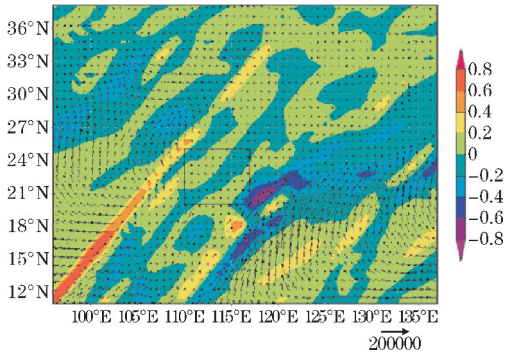
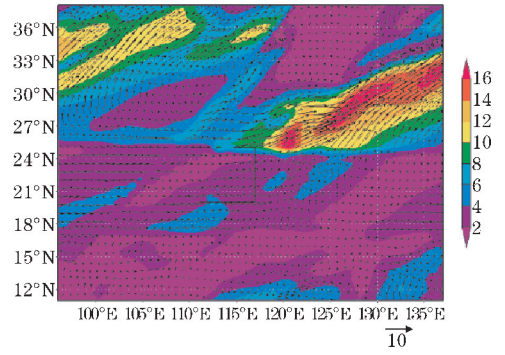


图 2 低槽-低空急流型合成 850 hPa 风速场

对应低槽型的低空急流,在整层水汽通量和水汽通量散度上(图 3a),关键区域的右后方,位于南海北部有一辐合的大值区,数值高达 $-800 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,说明在这一类的极端降水事件中,华南地区的右侧一直维持着一个水汽汇区,并且表现为向关键区域辐合的趋势。在 850 hPa 的水汽通量和水汽通量矢量上(图 3b),关键区域的左前方存在水汽通量的大值区,其中最高值达 $14 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$,结合对极端降水事件发生前后的水汽通量分析,发现这种低空急流类型的水汽是从孟加拉湾产生的大气河跨过云贵高原到达南海北部从而影响关键区域的,同时由于 500 hPa 的太平洋副高存在,使关键区域上空的水汽达到较高值,从而对极端降水事件提供充足的水汽供应。



(a) 整层水汽通量散度(填色为散度)



(b) 850 hPa 水汽通量(填色为矢量大小,箭头为矢量方向)
图 3 低槽-低空急流型合成水汽通量散度及矢量分布图

3.2.2 气旋-低空急流型

在气旋型低空急流对应的 850 hPa 风场上

(图 4),能看到明显的低空急流位于关键区域右后方,而且急流轴存在于115 °E,21 °N的位置上,最大风速高达16 m/s。在这个类型合成的极端降水事件中,低空急流一直位于华南地区的右侧,并且表现为稳定的西南风,导致了对流不稳定的发生和发展,并为对流云的维持提供重要条件,这对水汽的稳定输送提供了源源不断的动力支持。

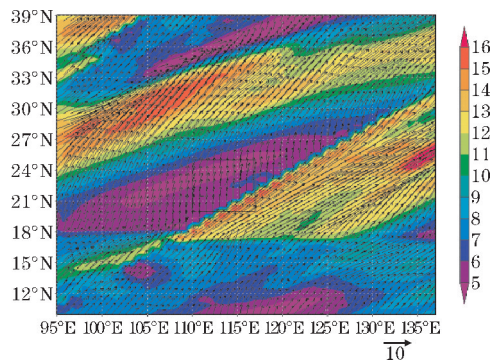
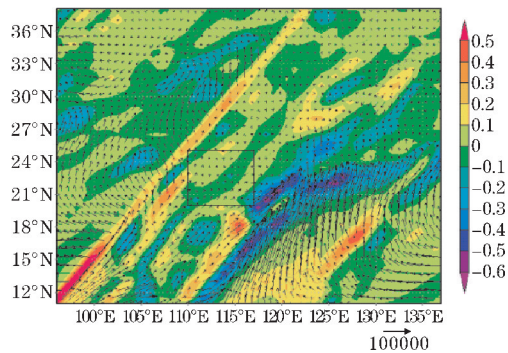
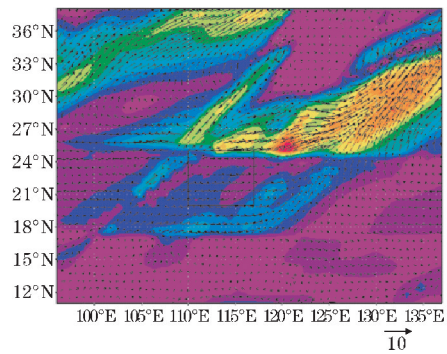


图 4 气旋-低空急流型合成 850 hPa 风速场

在整层水汽通量及其散度上(图 5a),同样表现为南海北部的水汽辐合,大值区位于120 °E,21 °N的位置,水汽通量散度达 $-700 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,并且逐渐形成了一个闭合的水汽气旋,这与大气河的存在条件相符合。而在850 hPa水汽通量图上(图 5b),虽然关键区域的右前方同样存在大值区,与整层水汽通量散度上的水汽辐合区相对应,但是水汽通量的最高值也仅为



(a) 整层水汽通量(填色为散度)



(b) 850 hPa 水汽通量矢量和水汽通量大小

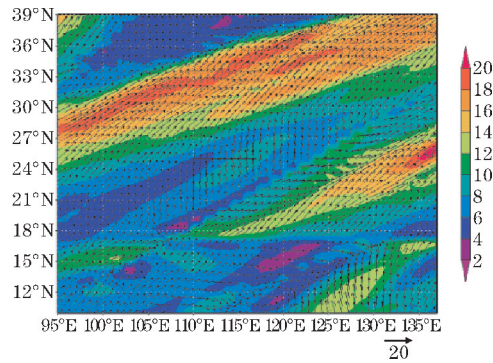
图 5 气旋-低空急流型合成水汽通量分布图

$6 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$,可能是由于 12 个极端降水事件在合成的过程中有的个例在850 hPa上水汽通量不够明显,导致最后合成的结果不能很好地说明在这一层上低空急流与水汽的对应关系,但是前面的分析结果已经体现了以通过中南半岛到南海的水源给这一类型极端降水提供了稳定的水汽支持,同样也表明该水汽通道为中南半岛经南海延伸到关键区域的大气河。

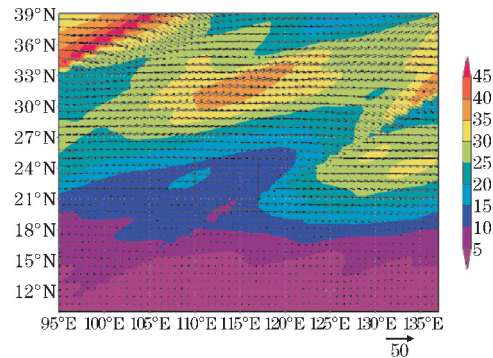
3.3 高低空急流影响下大气河与极端降水

在高低空急流型的极端降水事件中,850 hPa 上(图 6a)能够明显看到关键区域的右后方存在一低空急流,且范围较大,其急流轴的风速达到20 m/s位于135 °E,24 °N的区域上,并且为西南低空急流。同时该类型的低空急流,平均状况的高度场显示为东侧存在西太平洋副热带高压,但是强度较弱,位于孟加拉湾的低槽较深,与青藏高原的浅脊相配合,引导来自极涡的冷空气南下,最后导致与西南低空急流交汇,关键区域的极端降水事件。

200 hPa 风场上(图 6b),关键区域的左前方,存在一高空急流,急流轴的风速达到40 m/s,同时在关键区域内,表现为西风,这与朱乾根研究发现的中国暴雨往往发生在高空急流右后方的结论相吻合。与低空西南急流配合来看,低空急流源源不断地提供了能量的输送,维持极端降水事件在低空的对流不稳定性,造成强对流的发生发展;同时高空的急流导致冷空气对关键区域的间接作用,产生的强辐散也给高空的对称不稳定提供能量上的维持,继而为高低空急流耦合的发展以及加强提供充足的动力条件。



(a) 850 hPa 风速场

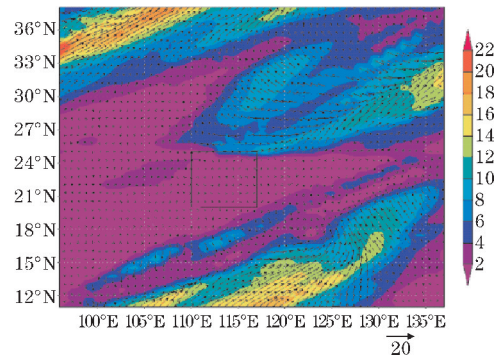


(b) 200 hPa 风速场

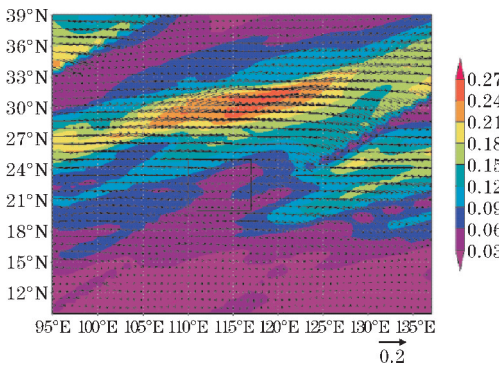
图 6 高低空急流型合成水平风场

对 850 hPa 的水汽通量及水汽通量矢量(图 7a)来看,低空急流存在的位置上,水汽通量也达到一个较高值,大值区的中心为 $16\text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$,较好地反映了低空急流维持对充足水汽供应的作用,而且随着低空急流的加强,水汽通量也逐步增加。环流形势上浅脊深槽的配置在水汽的辐合区也有很好地体现。

在该类型的极端降水事件发生时,由于高层的水汽量很小,所以对应200 hPa的水汽通量及其矢量图上(图 7b),形势的异常不是很明显,但也能看出与高空急流相对应的位置上,有一水汽通量的大值区,体现出在这一高度上的环流形势对维持水汽供应的作用。



(a)850 hPa 水汽通量矢量和水汽通量大小



(b)200 hPa 水汽通量矢量和水汽通量大小

图7 高低空急流型合成水汽通量分布图

高低空急流耦合的情况下,通过对整层水汽通量及其散度(图 8)的分析,可以看出在南海的北部以及

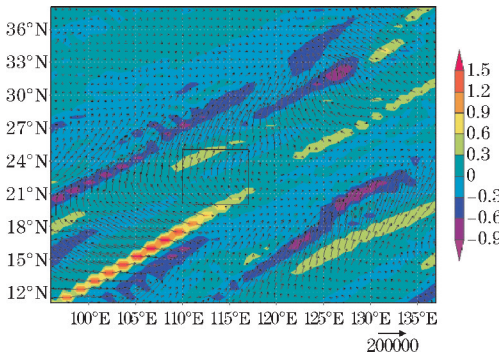


图8 高低空急流型合成整层水汽通量及其散度
(箭头为水汽通量,填色为水汽通量散度)

靠近孟加拉湾地区有两处较明显的水汽辐合情况,中心数值均为 $-900\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,说明这种类型的极端降水事件中,来自孟加拉湾和南海的两个通道,源源不断地向华南地区输送水汽,也就确定高低空急流型的降水事件里从孟加拉湾和南海输送到关键区域的水汽通道为大气河。

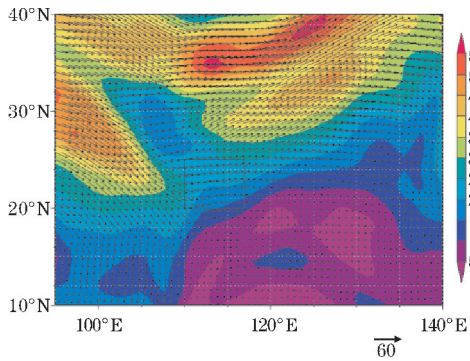
可见,在高低层急流耦合的配置下,对应低层水汽通道的建立,是水汽通量散度中心的形成和极端降水事件的必要条件,同时,低层水汽的逐步增加,也是对流不稳定发生发展的重要条件。

4 个例分析

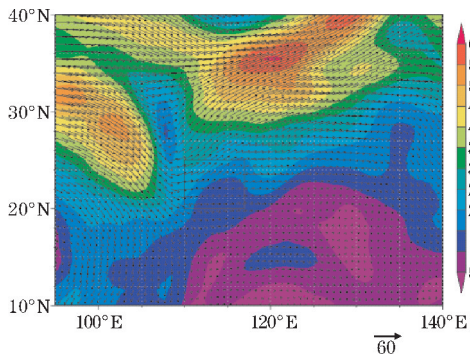
根据文中的分类标准,从3大类、4小类中各选取一个极端降水时间进行逐6 h(0时、6时、12时、18时)的分析。经过筛选,高空急流型中选择20100519降水事件进行分析,低槽-低空急流型中选择20150523降水事件进行分析,气旋-低空急流型中选择20090523降水事件进行分析,高低空急流型中选择20010521降水事件进行分析。

4.1 高空急流型(20100519)

该极端降水事件中位于200 hPa(图9)的高空急流一直在关键区域的左侧影响降水的发生和发展,从图中可以看出高空急流不断向东发展。同时,山东半岛到朝鲜一带高空也有一支高空急流,其风速最高达到 60 m/s 。



(a)00 时



(b)06 时

图9 2010年5月19日200 hPa水平风速场

在整层水汽通量上(图略),大值区分别位于孟加拉湾、泰国湾和北部湾上空,并且在 4 个时次上均表现为强度稳定的趋势,于 0-6 时强度达到 $1600\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。其中由泰国湾和孟加拉湾输送到北部湾的水汽,受海岸山地作用抬升在关键区域声控形成显著的地形降水。

4.2 低空急流型

4.2.1 低槽-低空急流型(20150523)

该极端降水事件中位于 850 hPa(图 10)的低空急流一直在关键区域的正上空和右侧上空对降水的发生和发展产生相应的作用,并且在关键区域有明显的辐合作用,这一低空急流的最大风速达到 24 m/s 。在 0-6 时,位于关键区域右侧的低空急流强度最大,对极端降水的发展起重要作用。

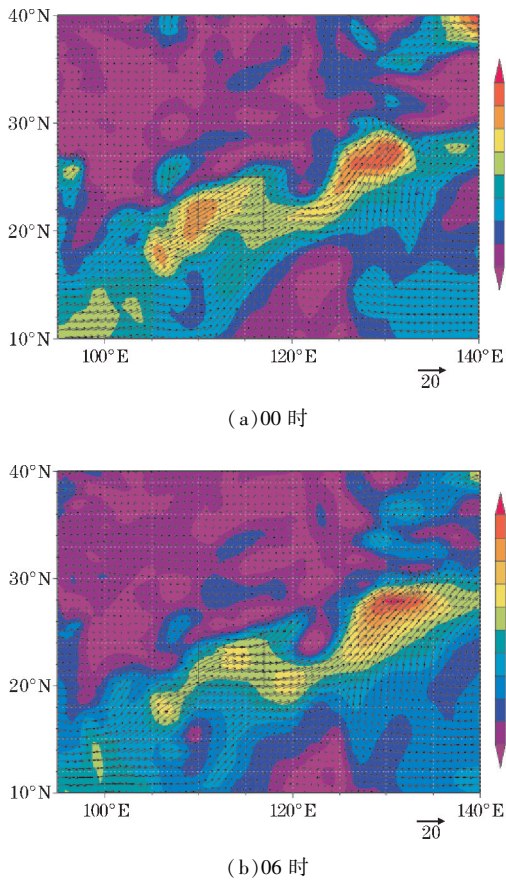


图 10 2015 年 5 月 23 日 850 hPa 水平风速场

从 500 hPa 上(图略)的等高线上可以看出,在中国的中部到关键区域,存在一明显低槽,并且槽线不断向东移动,与 850 hPa 的低空急流相配合形成垂直环流,为华南的极端降水提供所需的水汽条件和准地转条件支持。

在整层水汽通量图上,大值区分别位于云贵高原和南海区域的上空,贯穿南海区域的大气河水平尺度

超过 2000 km ,且中心强度在 12 时达到最大值 $1500\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。对于关键区域的极端降水提供充足的水汽条件,同时稳定维持降水的强度。

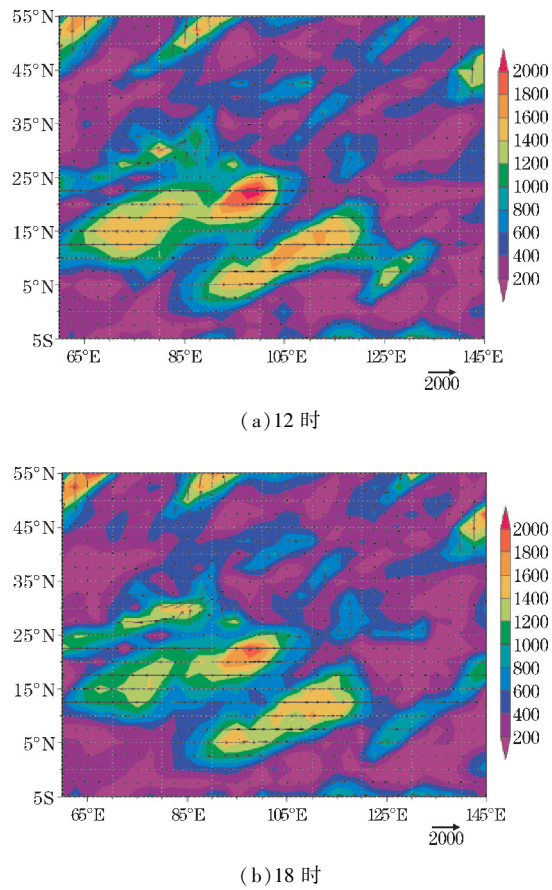


图 11 2015 年 5 月 23 日整层水汽通量及其矢量
(阴影为水汽通量大小,箭头为矢量方向)

4.2.2 气旋-低空急流型(20090523)

在这一极端降水事件中,850 hPa(图 12)的风场上有明显的气旋存在,并一直保持为闭合状态,同时中心风速维持在 $14\sim16\text{ m/s}$,并且随时间变化范围逐渐变大又逐渐变小,使暖湿气流稳定地对极端降水产生影响。

该极端降水事件对应的整层水汽通量图(图 13)上,表现为中南半岛到南海的大气河形势,在 06 时水汽通量大值区中心强度达到最大 $1800\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,与低空急流相配合极端降水提供充足的动力支持和水汽支持。

4.3 高低空急流型(20010521)

这一极端降水事件中,850 hPa(图 14)的风场上低空急流位于关键区域的右侧,并且急流核的位置保持稳定,与 200 hPa(图略)的高空急流相互作用形成次级环流,作用在极端降水上,为降水的维持和发展提供动力支持。

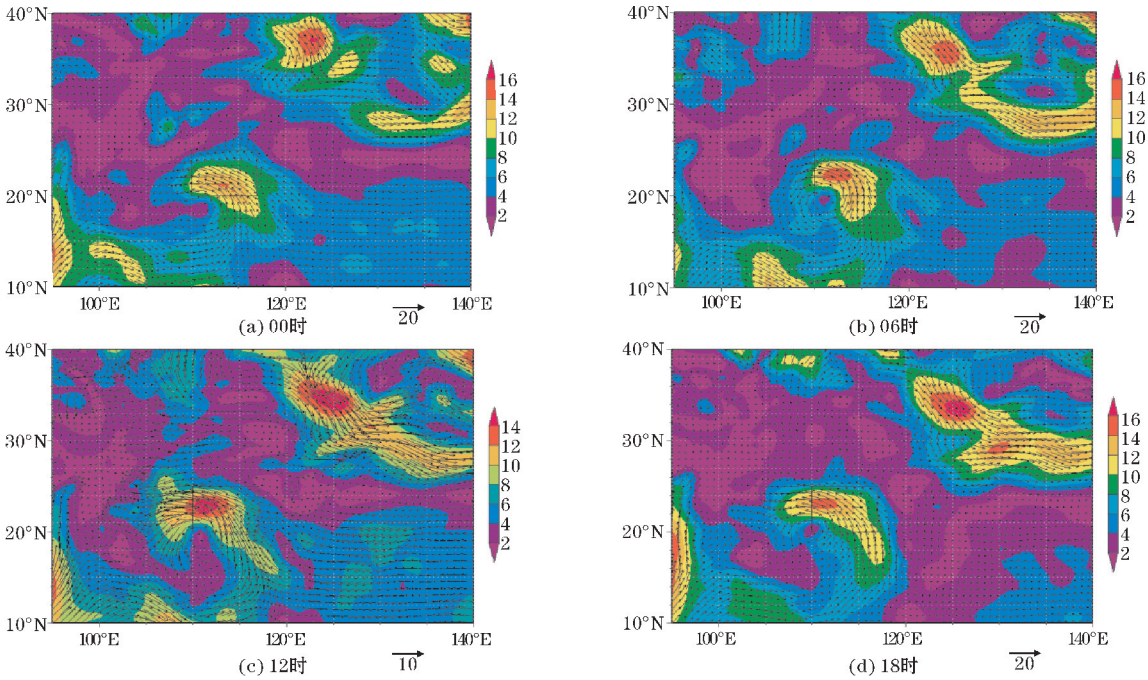


图 12 2009 年 5 月 23 日逐 6 h 850 hPa 水平风速场

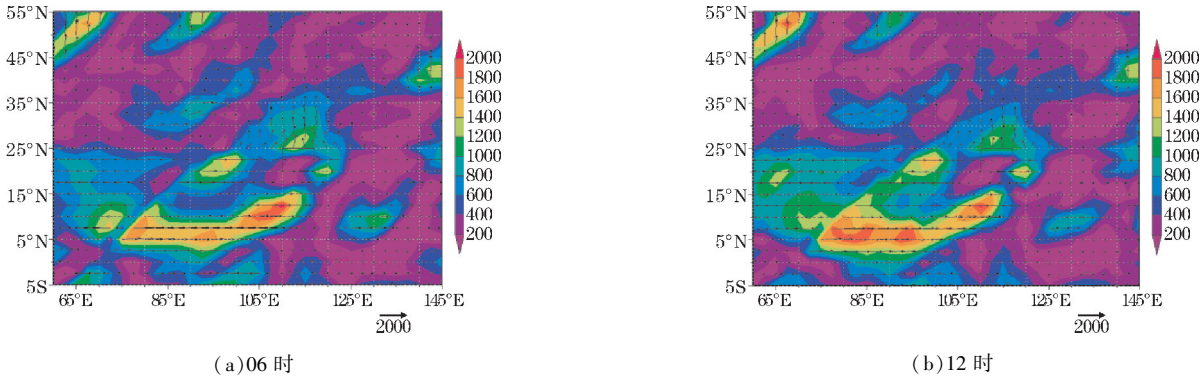


图 13 2009 年 5 月 23 日整层水汽通量及其矢量 (阴影为水汽通量大小, 箭头为矢量方向)

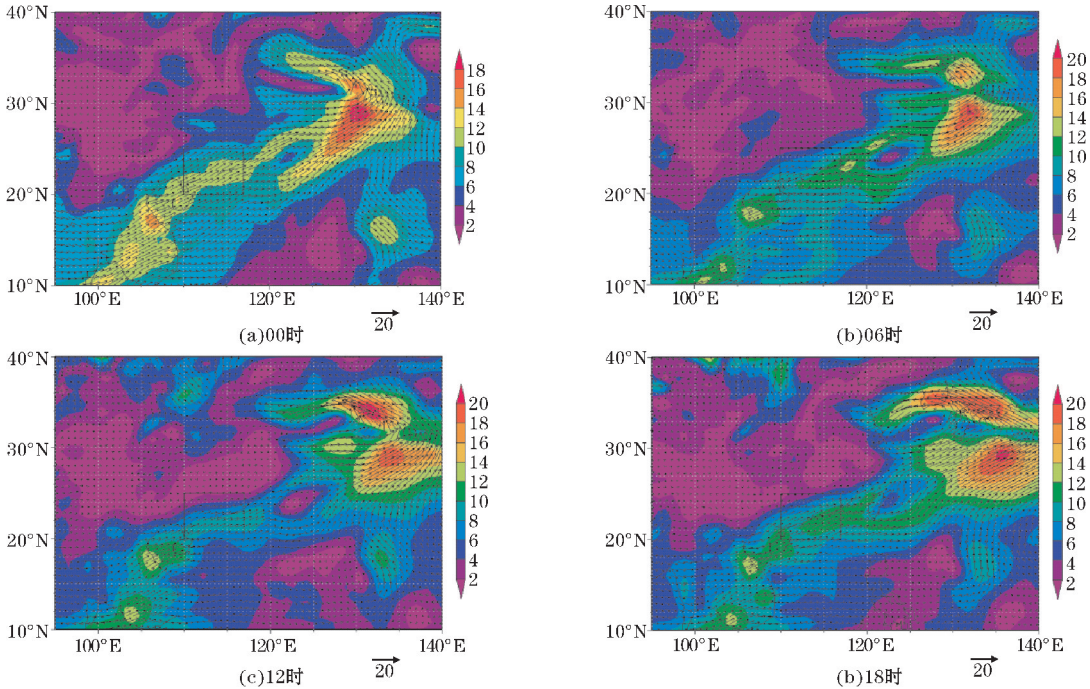
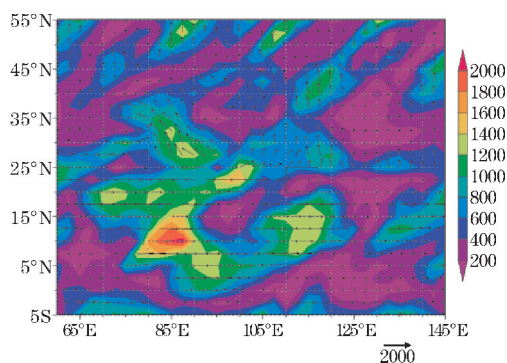
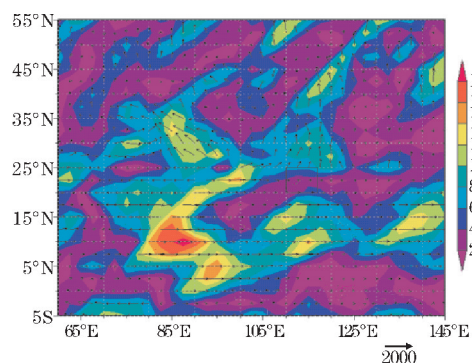


图 14 2001 年 5 月 21 日逐 6 h 850 hPa 水平风速场

在整层水汽通量上(图15)表现为南海源地的大气河,大值区的中心强度维持在 $1200 \sim 1400 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,并随着时间变化,向关键区域方向移动,和高低空急流耦合形成的次级环流共同发展和关键区域的地形作用共同对降水产生影响。这与文中提到的高低空急流型极端降水事件中孟加拉湾和南海为共同源地的大气河结论略有冲突,可能是由于合成分析的影响,在后续的工作中将进行细化研究。



(a) 00 时



(b) 06 时

图15 2001年5月21日整层水汽通量及其矢量
(阴影为水汽通量大小,箭头为矢量方向)

5 结论和讨论

按照高低空急流的不同环流形势配置,将1998–2015年发生在5月1日–6月15日的24个极端降水事件进行分类。利用华南地区110个区域自动站的降水观测数据和空间分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$,时间间隔为6 h的ECMWF再分析格点资料,从各层及整层的水汽通量及其散度入手,对各类天气形势对应的水汽通道展开研究,分析高低空急流的不同情况对能量和水汽供应的影响,特别讨论大气河的水汽源地是什么位置,得到如下结论:

(1) 华南前汛期的降水在广西与广东沿海的交界处、广东中部和广东南部的沿海地区达到较高值,且对降水产生影响的湿冷空气大多由西南方向进入华南地

区,逐步对降水的发生和维持提供动力作用。

(2) 通过高低空急流的有无,将24次极端降水事件分为3大类:“高空急流型”“低空急流型”“高低空急流型”,其中“低空急流型”又根据对流层的环流形势分为“低槽–低空急流型”和“气旋–低空急流型”,其中“气旋–低空急流型”的极端降水事件发生的次数最多,共12次。

(3) “高空急流型”的极端降水事件发生时,华南地区东南方向的水汽辐合区明显,同时高空急流对冷空气在高空的强辐散,提供了重要条件,从孟加拉湾到南海的大气河对这类极端降水具有重要作用。

(4) “低槽–低空急流型”的极端降水事件发生时,在研究区域的右侧,有一稳定发展的水汽汇区,给降水的发生发展提供必要的水汽供应,同时存在的低空急流两侧辐散辐合程度相差明显,使低空急流不断加强,来自孟加拉湾经过云贵高原的大气河强大的水汽输送能力给这类极端降水提供充沛的水源。

(5) “气旋–低空急流型”的极端降水事件发生时,有一跨度较大的低空急流位于研究区域的右侧,导致低层对流不稳定的发生和发展,整层水汽对应位置存在水汽汇区,且稳定维持,形成闭合的水汽气旋,大气河的存在不是很明显,但也可以看出从中南半岛向南海的水汽通道。

(6) “高低空急流型”的极端降水事件发生时,高层和低层的环流形势相配合,水汽通过低空急流输送,高空急流建立对称不稳定,为极端降水事件提供重要动力条件,同时整层的水汽通量表现出该类型对应的大气河为孟加拉湾和南海共同提供。

总的来说,华南前汛期的极端降水事件受高低空急流和水汽供应的影响很大,而且不同源地的大气河对降水的影响也不同。但是极端降水的发生和发展机制又和动力、热力等多方面都有关系,文中仅通过急流和水汽的输送,基于大气河的背景讨论了大气河对华南前汛期极端降水的作用。后续将从其他方面入手,对华南前汛期的极端降水进行研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 翟盘茂,王萃萃,李威. 极端降水事件变化的观

- 测研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 144-148.
- [3] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国西北极端降水事件年内非均匀性特征分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 178-184.
- [4] 孙婧超, 管兆勇, 李明刚, 等. 华南地区7-10月两类区域性极端降水事件特征及环流异常对比[J]. 气象学报, 2019, 77(1): 45-59.
- [5] Zhu Y, Newell R E. A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers[J]. Monthly Weather Review, 1998, 126(3): 725-735.
- [6] 田红, 郭品文, 陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(4): 401-408.
- [7] 章新平, 刘晶森, 田立德, 等. 亚洲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿不同水汽输送路径的变化[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 699-708.
- [8] 朱乾根, 洪永庭, 周军. 大尺度低空急流附近的水汽输送与暴雨[J]. 大气科学学报, 1985(2): 131-139.
- [9] 张俊岚, 刘勇达, 杨柳, 等. 2008年初南疆持续性降雪天气过程水汽条件分析[J]. 气象, 2009, 35(11): 55-63.
- [10] Luo Y, Zhang R, Wan Q, et al. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 98(5).
- [11] Huang L, Luo Y, Zhang D L. The Relationship Between Anomalous Presummer Extreme Rainfall Over South China and Synoptic Disturbances[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2018, 123(7): 3395-3413.
- [12] 文宝安. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用——水汽通量与水汽通量散度[J]. 气象, 1980(6): 34-36.
- [13] 韩洁, 管兆勇, 李明刚. 夏季长江中下游流域性极端日降水事件的环流异常特征及其与非极端事件的比较[J]. 热带气象学报, 2012, 28(3): 367-378.
- [14] 孙颖姝, 王咏青, 沈新勇, 等. 一次“大气河”背景下东北冷涡暴雨的诊断分析[J]. 高原气象, 2018(4): 970-980.
- [15] 岳俊, 李国平. 大气河对2013年“7.9”四川盆地持续性暴雨作用的诊断分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2015, 30(1): 72-80.
- [16] 农孟松. 高低空急流对广西强降雨作用的初步分析[C]. 中国气象学会年会灾害性天气系统的活动及其预报技术分会场, 2006.
- [17] 常飞. 华南前汛期降水特征及典型暴雨个例数值模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.

Relationship between Extreme Precipitation Events and Atmospheric Rivers in the Early Flood Season in South China under the Background of Jet Stream

LIANG Shuang¹, XIAO Tianguai¹, LUO Yali²

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to better analyze the relationship between extreme precipitation events and atmospheric rivers in recent years, the reanalysis grid data from 1998 to 2015 of ECMWF and the daily precipitation data of regional automatic stations were used to study the extreme precipitation events in the pre-flood season in South China, where different types of jets correspond to the atmospheric rivers. The results of the changes in the river show that most of the humid and cold air that affects the precipitation in the first flood season of South China are from the southwest direction and enters the South China, and gradually provides a driving force for the occurrence and maintenance of precipitation; according to the type of rapids affecting extreme precipitation events, it is divided into 3 large categories, 4 subcategories, and the atmospheric rivers corresponding to different types are analyzed. ; corresponding to the Bay of Bengal-South China Sea atmospheric river, Bay of Bengal-Yungui Plateau atmospheric river, and Indochina-South China Sea atmospheric river acting on extreme precipitation events.

Keywords: climate change; extreme precipitation; atmospheric river; pre-flood season in South China; high and low jet