

陈海山, 朱月佳, 刘蕾. 2013. 长江中下游地区冬季极端降水事件与天气尺度瞬变波活动的可能联系 [J]. 大气科学, 37 (4): 801–814, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12033. Chen Haishan, Zhu Yuejia, Liu Lei. 2013. Relationship of synoptic-scale transient eddies and extreme winter precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 801–814.

长江中下游地区冬季极端降水事件与天气尺度瞬变波活动的可能联系

陈海山^{1,2} 朱月佳^{1,2} 刘蕾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 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

3 芜湖市气象局, 芜湖 241000

摘 要 利用 ERA40、NCEP/NCAR 逐日再分析资料和长江中下游地区 85 站逐日降水资料, 从大气内部天气尺度瞬变波的角度对长江中下游地区极端降水事件进行了成因分析。研究发现瞬变波活动与极端降水的关系密切; 冬季在两支急流并存的欧亚大陆上空存在南北两支瞬变波活跃带。南支瞬变波在冬季极端降水频发、少发年存在较明显的差异。总体而言, 极端降水频发年, 瞬变波活动活跃, 欧亚大陆上空的瞬变波持续时间长、传播连续、强度偏强; 极端降水少发年, 则反之。从逐日变化来看, 南支瞬变波的强度和能量传播过程与极端降水的发生频次均具有一定的对应关系。北支瞬变波的传播及瞬变波对水汽的输送和极端降水的发生也有一定促进作用。这些结果均表明, 冬季极端降水的发生与天气尺度瞬变波的活动联系紧密, 天气尺度瞬变波的异常活动及传播可能是极端降水发生的重要条件, 研究可为极端降水的成因研究提供新的思路。

关键词 极端降水 瞬变波 天气尺度 长江中下游

文章编号 1006-9895(2013)04-0801-14

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12033

Relationship of Synoptic-Scale Transient Eddies and Extreme Winter Precipitation Events in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

CHEN Haishan^{1,2}, ZHU Yuejia^{1,2}, and LIU Lei³

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

2 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Wuhu Meteorological Bureau, Wuhu 241000

Abstract The association of extreme winter precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River including synoptic-scale transient eddies is examined by using the ERA40 and National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) daily reanalysis data and daily rainfall data reported by 85 stations. A close relationship is detected between extreme precipitation events and transient eddies. In winter, two branches of synoptic-scale transient eddies are accompanied by subtropical and polar-front jets, respectively. It is demonstrated that the south branch of the transient eddies differs during highly and less frequent years of extreme precipitation events. Overall, transient eddies become active and strong, and they spread continuously with long durations

收稿日期 2012-02-23, 2012-11-14 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2007BAC29B03, 江苏省“333 高层次人才培养工程”、“青蓝工程”和江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

作者简介 陈海山, 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为陆面过程与气候数值模拟、气候变化与短期气候预测。E-mail: haishan@nuist.edu.cn

over Eurasia during highly frequent extreme precipitation years; the reverse occurs for less frequent years. To some extent, the intensity and energy of the transient eddies both experience similar variations from the daily frequency of extreme precipitation. Moreover, the northern branch of the transient eddies and their water vapor transport are favorable for the occurrence of extreme precipitation events. Therefore, extreme winter precipitation events have a close relationship with the synoptic-scale transient eddy, implying the activity and propagation of transient eddies may be important factors in extreme precipitation events. This study is expected to provide a new perspective for the causes of extreme precipitation.

Keywords Extreme precipitation, Transient eddies, Synoptic scale, Middle and lower reaches of the Yangtze River

1 引言

全球变暖大背景下, 极端天气气候事件日趋频发, 关于极端天气气候事件的研究成为当前广为关注的科学问题。其中, 就极端降水而言, 国外学者通过观测研究指出, 近几十年来日本 (Yamamoto and Sakurai, 1999)、英国 (Osborn et al., 2000)、澳大利亚 (Easterling et al., 2000)、印度 (Goswami et al., 2006) 等地区强降水事件的频率、强度均有显著增加的趋势。总降水量的增加主要源自强降水和极端降水的贡献, 大部分地区极端降水对总降水的贡献也有增加趋势 (Karl and Knight, 1998; Manton et al., 2001)。研究表明我国极端降水的变化态势与全球的态势总体基本一致, 但具有明显的区域性特点 (Zhai et al., 2005; 任国玉等, 2010)。西部地区, 特别是西北地区极端降水事件的频率和强度有较明显增长 (邹用昌等, 2009); 长江中下游及其以南地区极端降水日数增加 (支蓉等, 2006; 闵岫和钱永甫, 2008; 杨宏青等, 2005); 而华北地区降水频次和强度减少减弱, 强降水日数减少 (严中伟和杨赤, 2000; Wang and Yan, 2009); 全国平均的总降水变化趋势不明显, 雨日有所减少 (翟盘茂等, 1999)。

极端天气气候事件是发生在特定地区的小概率事件, 其潜在变化对人类活动和自然环境的影响远大于气候平均态的变化 (Kunkel et al., 1999)。近年来, 一些学者试图探寻引发极端事件的可能因素 (张永领和丁裕国, 2004; 杨金虎等, 2008; You et al., 2009)。目前这些研究主要集中在极端事件与大尺度气候变率和海温等的关系方面, 对于极端事件成因的认识还很不够。极端气候事件属于气候异常事件, 气候异常与外源强迫作用 (海温等非绝热加热) 和大气内部动力过程这两类强迫有关 (Hoskins and Pearce, 1983; 任雪娟和张耀存, 2007)。对于中纬度大气环流而言, 大气内部动力过程的重要代表就是天气尺度瞬变波和大尺度时间平均环流的相互作用 (Holopainen et al., 1982;

Lau, 1988; 陆日宇, 2001; 刁一娜等, 2004; 蒋伶仙等, 2011; 张冬斌等, 2011)。北半球天气尺度瞬变波主要活跃于中纬度太平洋和大西洋两个纬向拉长的区域, 这两个区域被称为风暴轴 (storm track) (Blackmon, 1976), 而欧亚大陆是除风暴轴区域外瞬变波比较活跃的区域 (梅世龙, 2008)。目前的研究也认为天气尺度瞬变波活动与天气气候关系紧密 (Nakamura et al., 2002; 谭本道和潘旭辉, 2002; 董丽娜等, 2006; 徐珍, 2006)。另外, 从波动能量传播的角度探讨气象问题是气象研究的重要方面, 其中包括理论的提出与实际应用 (Yeh, 1949; Zeng, 1983; 缪锦海等, 2002; Zimin et al., 2003; 肖天贵等, 2008, 2010)。

那么渐趋频繁的极端事件是否与瞬变波的异常活动和传播有关? 陈海山等 (2012) 首先从大气内部动力过程——天气尺度瞬变波活动的角度, 研究了中国冬季极端低温与瞬变波的关系, 发现瞬变波活动的整体强度、范围和到达区域与极端低温的频发、少发存在很好的对应关系, 关键区瞬变波强度与极端低温频次的年际变化之间存在较好的一致关系。那么, 极端降水事件的发生是否也与天气尺度瞬变波的传播存在关联? 这正是本文旨在探讨的问题。鉴于冬季中纬度地区是全球大气强斜压区, 有利于瞬变波的产生、传播, 冬季波包的活动比夏季连贯 (Chang, 1999), 且对我国而言长江中下游地区是冬季极端降水发生频次较高的区域。因此, 本文选取冬季对瞬变波与长江中下游地区极端降水的联系进行研究。

2 资料与方法

降水资料采用长江中下游地区 85 站 1960~2009 年逐日资料 (已去除台站迁移或缺测大于 5% 的站点)。风场、比湿场等气象变量选自 1960~2002 年欧洲中心 ERA40 逐日再分析资料 (分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)。因 ERA40 资料年限不足所需 2002~2009 年风场、比湿场资料使用 NCEP/NCAR 逐日再

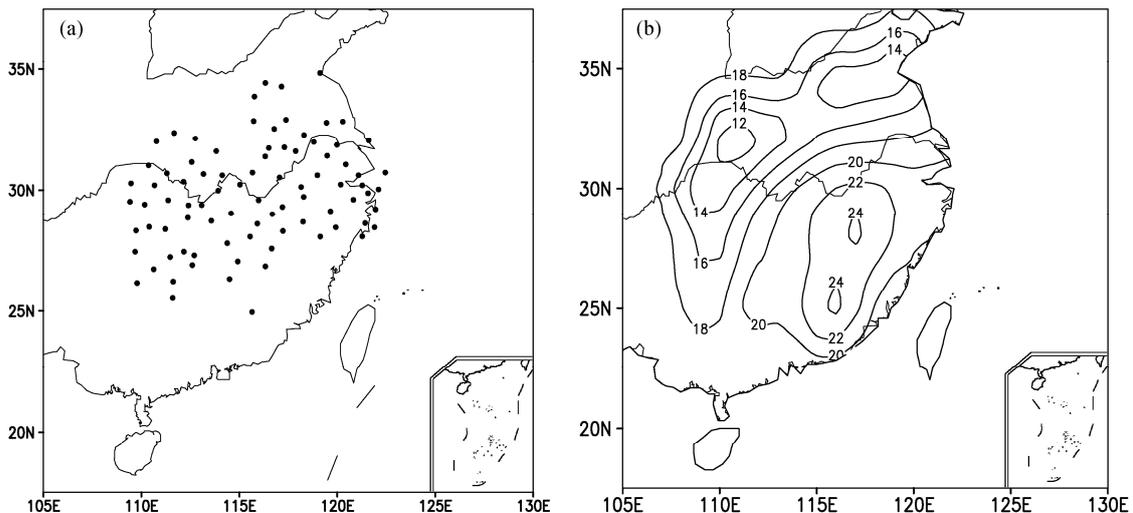


图1 长江中下游地区 85 个台站 (a) 及其阈值分布 (b, 单位: mm)

Fig. 1 Distribution of (a) 85 stations and (b) threshold of each station (units: mm) in the middle and lower reaches of the Yangtze River

分析资料 (分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)。

根据翟盘茂和潘晓华 (2003) 对极端降水事件的定义和 Bonsal et al. (2001) 提出的计算方法, 分别计算每个站各自的阈值。具体做法是: 将某站 1960~2008 年逐年冬季湿日 (日降水量 ≥ 0.1 mm) 降水量序列的第 95 个百分位值的 49 a 平均值作为该站极端降水事件的阈值, 当该站某日降水量超过这一阈值时, 则记为一次极端降水事件。图 1 为长江中下游地区 85 个台站及其阈值分布情况。其中, 最小阈值为 11.1 mm, 最大阈值 25.3 mm。文中某年冬季均指当年 12 月至次年 2 月。

采用朱伟军 (1999) 介绍的 31 点对称数字滤波器, 从逐日资料中滤出 2.5~6 d 的天气尺度瞬变波^①, 记为 v' 。该滤波器已经应用于关于瞬变波的诸多研究中, 其滤波效果与 Blackmon (1976) 设计的滤波器相当, 且也有研究指出其滤波效果优于 Butterworth 带通滤波器 (韦晋和朱伟军, 2006)。此滤波器对输入时间序列 $X(t)$, 其输出序列 $Y(t)$ 的计算方法为:

$$Y(t) = \sum_{k=0}^{15} a(k)X(t+k) + \sum_{k=1}^{15} a(k)X(t-k), \quad (1)$$

其中 $a(k)$ 为滤波系数。滤波系数可以由公式 (2) 导出, 设用对称滤波器对一个正弦波结构的原序列进行滤波, 其频率响应函数为:

$$G(F) = a(0) + 2 \sum_{k=1}^N a(k) \cos(2\pi Fk). \quad (2)$$

① 任一物理量可以对其进行时间和空间分解: $A = \bar{A} + A' = [\bar{A}] + \vec{A}' + A'$, 其中 A' 即为研究中所指的瞬变波, 严格上应为瞬变扰动, 在此沿用习惯称法, 称其瞬变波。

在本研究中, 考虑的波动的时间尺度为 2.5~6 d, 此频率响应函数在半增益点处的圆频率分别为:

$$\omega_1 = 2\pi/6.0 \text{ d}, \quad \omega_2 = 2\pi/2.5 \text{ d},$$

由此可得表 1 给出的滤波系数的具体数值。实际滤波过程中要求输入序列长度比输出序列长度前后各延长 15 d。鉴于瞬变波强度中心位于对流层上层 300 hPa 附近, 故本文重点讨论 300 hPa 高度上的瞬变波活动情况。考察波动能量传播时以波包为对象, 参考缪锦海等 (2002) 提出的直接从实际资料中提取波包的方法, 将滤波资料经 Hilbert 变换 (胡广书, 2003) 后构造解析信号, 解析信号的振幅即为瞬变波的波包。此外, 本研究还利用时滞相关方法分析瞬变波传播。

表 1 31 点对称数字滤波器滤波系数

Table 1 Values of the coefficients $a(k)$ for the 31-point symmetric digital filter

滤波系数	数值	滤波系数	数值
$a(0)$	0.44400781	$a(8)$	-0.02086656
$a(1)$	-0.06091663	$a(9)$	-0.00538411
$a(2)$	-0.28502351	$a(10)$	0.01032456
$a(3)$	0.06450856	$a(11)$	0.00944603
$a(4)$	0.04174331	$a(12)$	0.00638732
$a(5)$	0.03262632	$a(13)$	-0.00373075
$a(6)$	0.03327588	$a(14)$	-0.00722280
$a(7)$	-0.03954566	$a(15)$	0.00328247

3 长江中下游地区极端降水事件发生频次的变化特征

图 2 为 1960~2008 年长江中下游地区 49 个冬

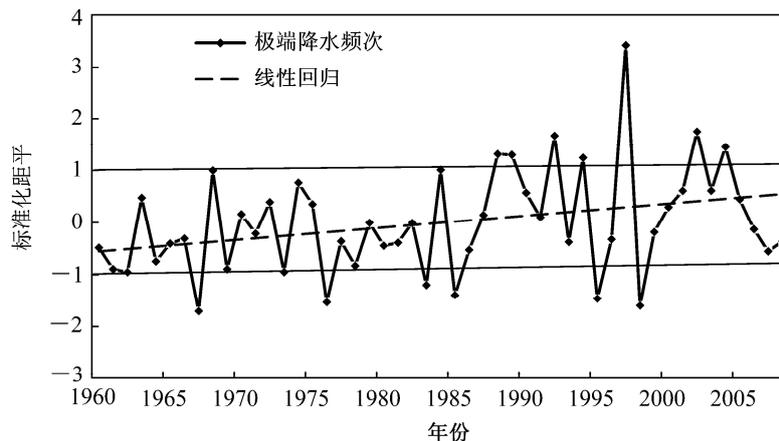


图2 1960~2008年冬季长江中下游地区极端降水频次标准化时间序列(虚线表示线性趋势)

Fig. 2 Time series of standardized winter extreme precipitation frequency in the middle and lower reaches of the Yangtze River for winters from 1960 to 2008. Dashed line represents the linear trend

季极端降水频次标准化时间序列, 该序列由逐个冬季区域平均的极端降水发生频次经标准化后求得。由图可知, 极端降水发生频次存在明显的年际变化。就长期变化而言, 近 50 年长江中下游地区冬季极端降水频次呈现显著的增加趋势, 增长率为 0.23 次/10 a。为了后文分析的需要, 定义冬季极端降水频次标准化值大于 1.0 的年份为频发年, 而小于 -1.0 的年份为少发年。则频发年有 1984、1988、1989、1992、1994、1997、2002、2004 年; 少发年有 1967、1976、1983、1985、1995、1998 年。其中, 1997/1998 年冬季为最频发年, 而 1998/1999 年冬季为最少发年。

4 长江中下游地区极端降水事件与瞬变波活动的可能联系

冬季中纬度地区是全球斜压性强盛的区域, 瞬变波活动相对于其他纬度带更为活跃。陶祖钰和胡爱学(1994)指出, 伴随欧亚大陆上空的两支急流存在两条很强的非定常扰动带。任雪娟等(2010)的研究表明, 与强盛的冬季东亚副热带急流相伴随的是较弱的南支瞬变波, 而与较弱的温带急流相伴随的北支瞬变波则十分活跃。通过普查逐日瞬变波传播图, 我们也观察到了这些现象, 以下重点从南北两支波列的传播探讨其与极端降水的联系。显然查看逐日图集是不方便的, 而利用时滞相关可以更有效地追踪波动的传播(如图3所示)。基于上述考虑, 本节的部分结果将以这种方式给出。

4.1 极端降水与南支瞬变波活动的可能联系

南支瞬变波的传播路径主要位于 30°N 副热带

地区附近, 从大西洋经过北非、青藏高原一直向下游传播至我国上空。以长江中下游地区中心点(30°N, 115°E)为基点, 根据逐年冬季 300 hPa v' 的一点时滞相关图(-2 天至+2 天), 可以判断逐年瞬变波的传播情况。图3为频发年 1997/1998 和 2002/2003 年、少发年 1998/1999 年这 3 个冬季的时滞相关图。由图可以明显看出, 波动中心随时间向下游传播。对比频发、少发年波动的传播过程, 发现与少发年份相比, 频发年高相关区, 特别是正相关的分布普遍比较集中, 波动较为连续, 在欧亚大陆上空持续时间较长, 比如 1997/1998、2002/2003(图3)、1984/1985、1989/1990、1994/1995 年等(图略), 其中 1997/1998 年极端降水最频发年波动传播最为连贯。在少发年里, 虽然能看到波动传播, 但波动在亚洲地区持续时间短, 如 1998/1999(图3)、1983/1984、1995/1996 年等(图略)。

另外, 从经度—时间剖面图上可以更清晰地反映出瞬变波的传播。这里给出以长江中下游地区中心经线 115°E 为参考经线逐年计算的时滞相关。图4为 1983/1984、1984/1985、1997/1998、1998/1999 年 4 个冬季 300 hPa 瞬变波时滞相关的经度—时间剖面图(27.5°N~35°N 平均)。可以看到, 亚洲上空有波动传播但在不同年份存在较明显的差异。频发年里瞬变波在欧亚大陆上空传播比较频繁, 一次一次地经过欧亚大陆上空, 在最频发的 1997/1998 年冬季尤其显著, 1984/1985 年也较明显(图4); 1992/1993、1994/1995、2002/2003 年的分布特征类似(图略)。另外, 这反映出瞬变波传播的持续性存在差异。总体而言, 频发年里, 可以看到波动持

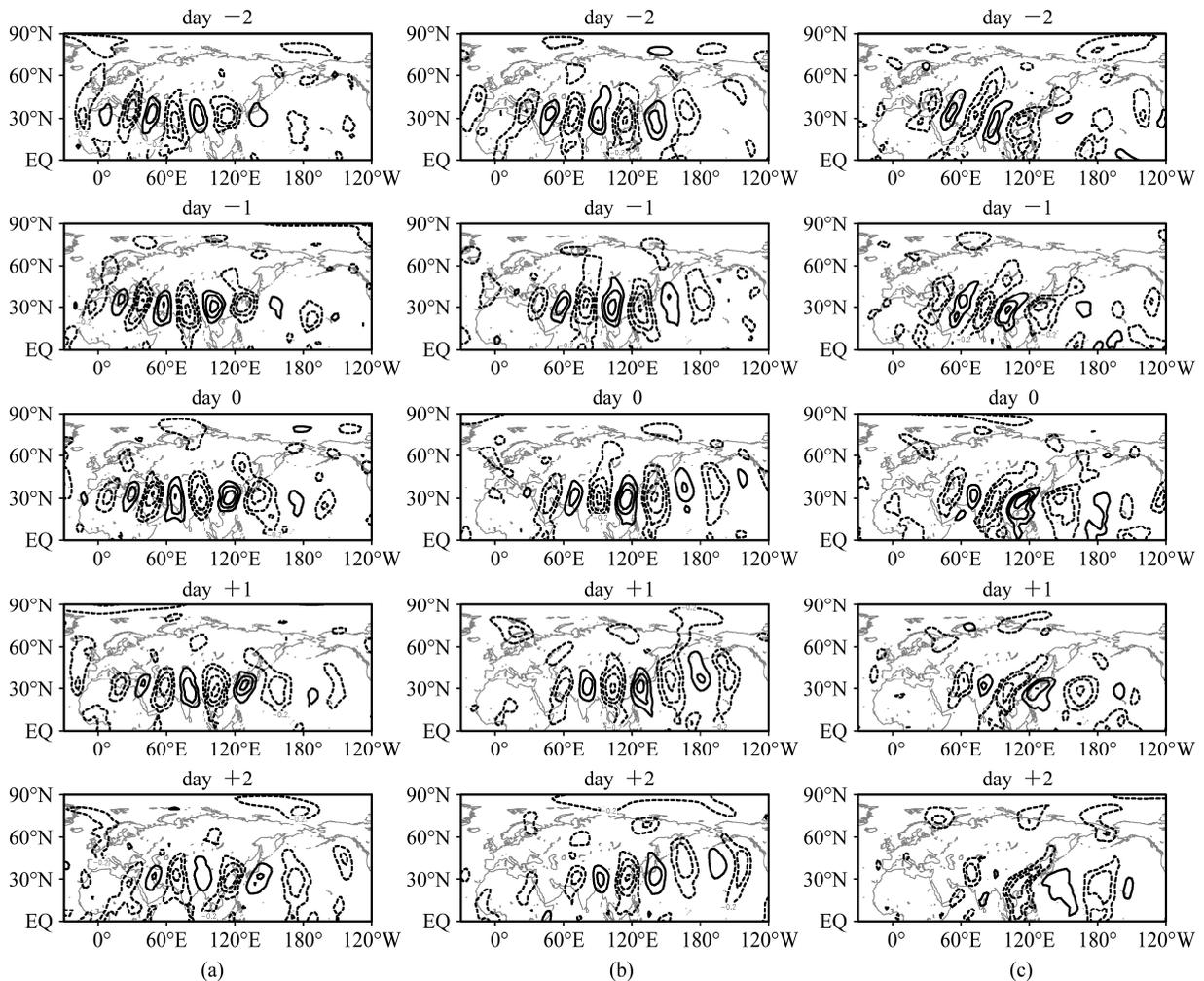


图3 基点(30°N, 115°E)处300 hPa的冬季 v' 一点时滞相关(-2天至+2天): (a) 1997/1998年, (b) 2002/2003年, (c) 1998/1999年。等值线间隔0.2, 绝对值小于0.2的等值线不显示

Fig. 3 One-point lag correlation of 300-hPa v' at the base point (30°N, 115°E) from day -2 to day +2, during winters of (a) 1997/1998, (b) 2002/2003, and (c) 1998/1999. Contour interval is 0.2 with the absolute value less than 0.2 omitted

续地在欧亚大陆上空传播, 而少发年里, 上游波动整体维持时间较短, 相对不活跃。比如 1998/1999 冬季, 1983/1984 年也较为清楚(图4)。综上, 我们对比发现, 极端降水频发和少发年里瞬变波的传播存在较明显差异, 其活动和持续性与极端降水的发生有较好的一致性。

前面的分析主要从季节平均状况来探讨极端降水与瞬变波的联系, 那么逐日的瞬变波传播是否也与极端降水之间存在联系呢? 下面主要从瞬变波强度和瞬变波能量两个方面分析这个问题, 这里用 v'^2 和波包分别描述逐日瞬变波强度和瞬变波能量。图5为瞬变波强度在1984/1985、1989/1990、1994/1995、1997/1998年4个冬季经度—时间剖面图及对应冬季长江中下游地区发生极端降水的台站占总台站的百分率。我们考虑到瞬变波本身的复

杂性, 其活动路径存在一定程度的多变性, 基于瞬变波逐日传播情况选择求平均的纬度范围。鉴于1984/1985、1989/1990年冬季瞬变波基本活跃于常年的纬度, 这里计算了27.5°N~35°N平均; 而1994/1995年冬季瞬变波的位置相对偏南, 据此考虑25°N~35°N平均; 另外, 1997/1998年冬季瞬变波活动的纬度相对偏北, 据此选择30°N~37.5°N平均。从图中可以清晰地看出瞬变波在亚洲上空一次传播过程和强度的变化以及在此期间极端降水发生情况。瞬变波传播过程与极端降水发生频次具有一定对应关系。在1984/1985、1989/1990年冬季2月中下旬的极端降水集中时段里存在明显的瞬变波传播过程。1994/1995、1997/1998年冬季在极端降水连续发生的时间里亚洲大陆上空基本都有瞬变波的传播。在最频发的1997/1998年冬季, 瞬

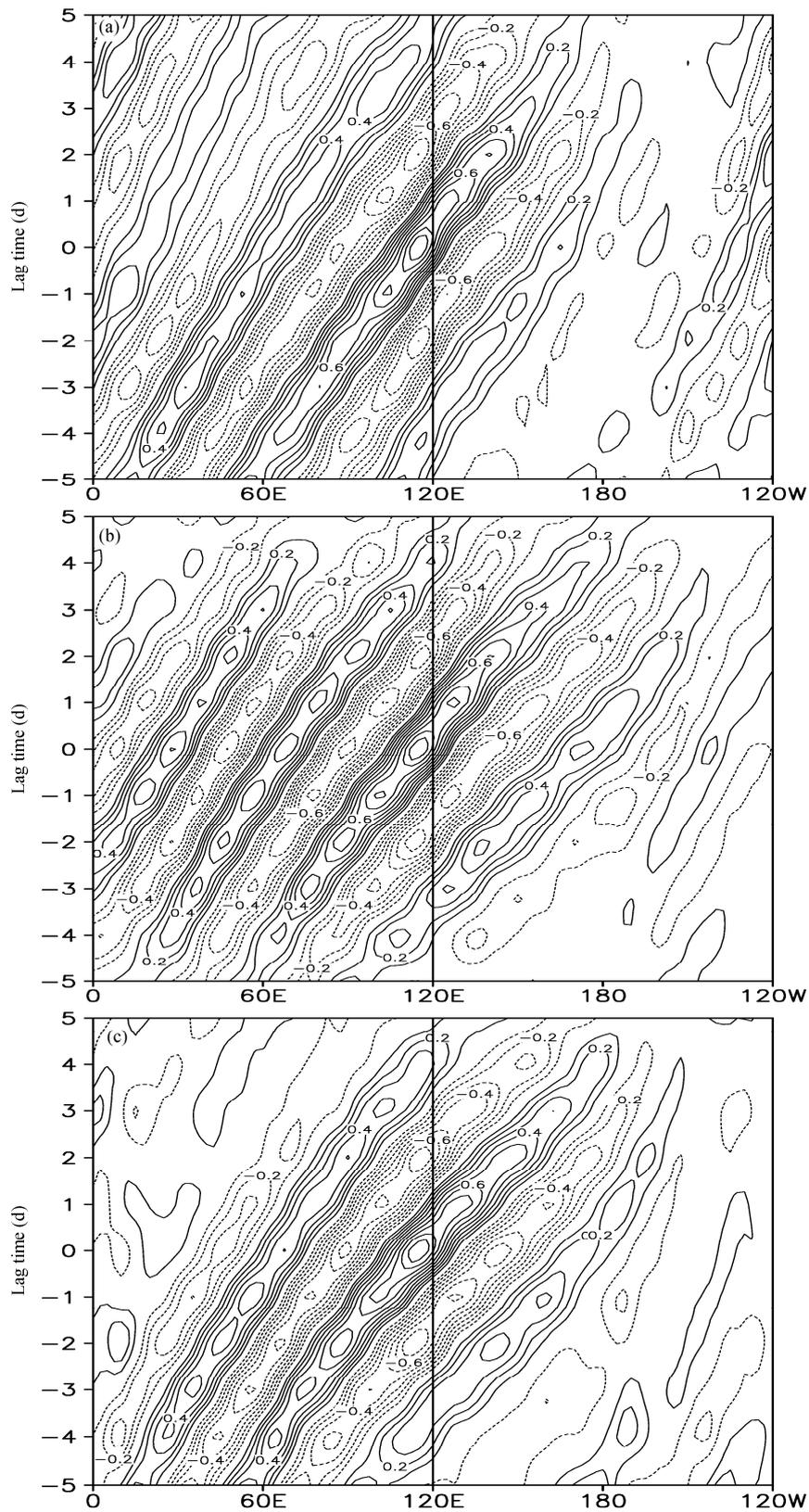


图4 冬季 300 hPa 瞬变波时滞相关(以 115°E 为参考经线, 27.5°N~35°N 平均)的经度—时间剖面: (a) 1984/1985 年, (b) 1997/1998 年, (c) 1983/1984 年和 (d) 1998/1999 年。等值线间隔 0.1, 纵坐标正值(负值)表示气象要素在参考经线上的时间序列相对于其他格点是超前(滞后)的
Fig. 4 Longitude-time cross sections of time-lagged correlation of 300-hPa transient eddies averaged over 27.5°N-35°N (The time series at 115°E is taken as the reference for the correlation) during winters of (a) 1984/1985, (b) 1997/1998, (c) 1983/1984, and (d) 1998/1999. Contour interval is 0.1, and the vertical ordinate indicates days of time lag

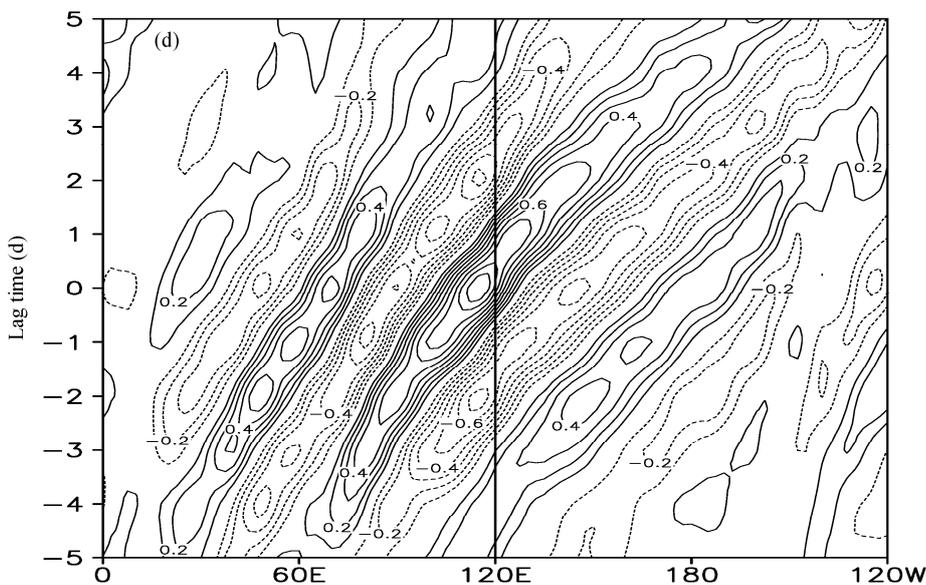


图 4 (续)

Fig. 4 (Continued)

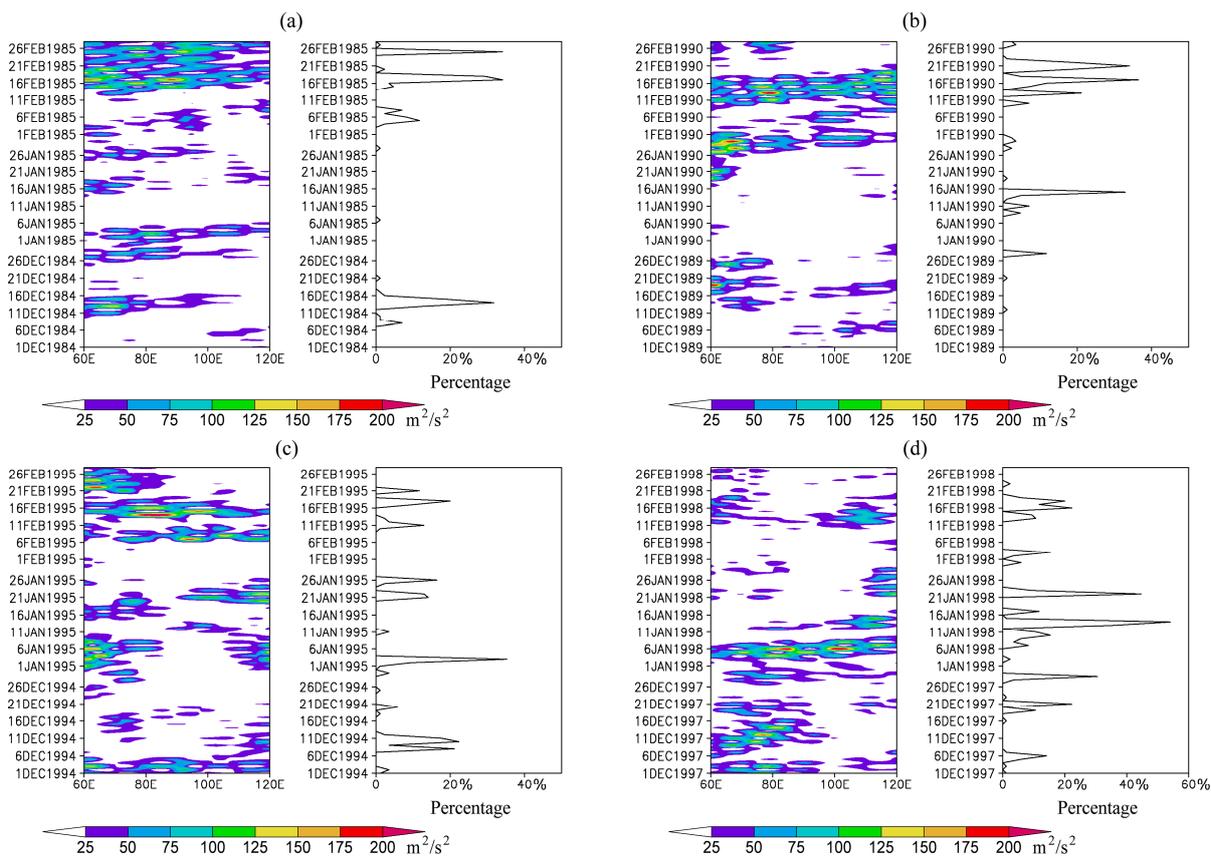


图 5 冬季逐日瞬变波强度的经度—时间剖面图(左)和逐日发生极端降水的台站百分率(右): (a) 1984/1985, 27.5°N~35°N 平均; (b) 1989/1990, 27.5°N~35°N 平均; (c) 1994/1995, 25°N~35°N 平均; (d) 1997/1998, 30°N~37.5°N 平均

Fig. 5 Longitude-time cross sections of daily transient eddy intensity (left) and time series of daily percentage of stations with extreme precipitation event (right), during winters (a) 1984/1985, (b) 1989/1990, (c) 1994/1995, and (d) 1997/1998. (a) and (b) averaged over 27.5°N-35°N, (c) averaged over 25°N-35°N, (d) averaged over 30°N-37.5°N

变波十分活跃，其强度几乎是所有冬季最强的。

另外，具有天气学意义的波包在传播过程中通常能给局地天气带来影响。为此，进一步分析了瞬变波波包（能量）的传播与极端降水的关联。图 6 为瞬变波波包在 1984/1985、1989/1990、1994/1995、1997/1998 年 4 个冬季经度—时间剖面图以及对应时次长江中下游地区发生极端降水的台站的百分率。图中各个冬季求平均的纬度范围与图 5 相同。如前所述，伴随着副热带急流，天气尺度的波包自西向东传播，将能量从上游带到长江流域，为强降水过程的发生提供了有利的条件。与图 5 显示的结果类似，随着波包大值区传播至长江中下游地区，该地区的极端降水发生也比较明显，两者之间具有一定的对应关系。1984/1985、1989/1990 年冬季的 2 月中下旬，1994/1995 年冬季的 12 月上旬、1 月初、1 月下旬，1997/1998 年冬季的 1 月上旬的极端降水发生时段里，有较明显的波包活动，可以为极端降水的发生提供能量。

此外，除了图 5、图 6 显示的年份外，还有一些年份对应比较一致；且在极端降水少发的年份，瞬变波强度也相对较弱，比如 1995/1996、1998/1999 年冬季。

4.2 极端降水与北支瞬变波活动的可能联系

北支瞬变波较南支瞬变波传播路径偏北、强度偏强，主要活跃于欧亚大陆 $50^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 一带。瞬变波从大西洋途经乌拉尔山、西伯利亚、鄂霍次克海或日本北部后向东传入太平洋，其传播路径大致呈西北—东南走向。那么，此列波对长江中下游地区的极端降水是否也可能存在一些联系呢？本节以最频发的 1997/1998 年冬季为例，进行一些初步的探讨。图 7 为 1998 年 2 月 16~18 日瞬变波传播图以及 1998 年 2 月 10~28 日瞬变波强度经度—时间剖面图（ $50^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 平均）和对应时次发生极端降水的台站的百分率。不难发现，2 月 16~18 日北支瞬变波十分活跃，且强度较强，进一步的计算还发现，期间长江中下游地区累计有 49.4% 的测站发生的极端降水。瞬变波强度的经度—时间剖面图也反映出亚洲上空北支瞬变波的活跃度与长江中下游地区的极端降水发生频次存在较一致的对应关系。这一现象在频发年 1992/1993 年、少发年 1985/1986 年等冬季也有较好体现（图略）。因此，我们认为北支瞬变波虽然路径偏北，但若其强度较强时仍可以影响我国。

4.3 瞬变波对水汽输送的作用

伊兰和陶诗言（1997）研究了瞬变波在亚洲季风区大气水分循环中的作用，指出瞬变波输送的水汽通量的量级总体比平均环流的输送小，但不可忽视。瞬变波对水汽的输送能为中高纬天气系统的发展创造充足的水汽条件，而且其对水汽的顺梯度输送通常在较高层次（700 hPa 附近）。据此，以下重点讨论 700 hPa 高度瞬变波对水汽的输送，以连续八日发生极端降水的过程（1992/1993 年冬季）为例，从另一个角度来阐述瞬变波活动与极端降水的联系。

1993 年 2 月 14~20 日长江中下游地区连续多日均有极端降水事件发生，图 8 为该过程前三天逐日和整个过程平均由瞬变波造成的水汽通量散度和瞬变波输送的矢量场。由图可明显看到在长江中下游地区存在水汽通量辐合的大值中心，表明瞬变波对水汽的输送为这一连续极端事件的发生提供水汽。通过普查其他冬季也有类似的情况出现，比如 2002/2003 年冬季等。

此外，我们分别考察了极端降水正、负异常年份瞬变波对水汽的输送情况（图 9）。对比发现，总体而言，瞬变波对水汽的输送大致表现为：长江以北水汽输送辐合，长江以南水汽输送辐散，但在正异常年里，辐合的南界位置相对偏南，特别是在沿海部分地区，量值也相对偏大，这种形势能在一定程度上为长江中下游地区极端降水的发生提供有利条件。综上我们推断，瞬变波造成的水汽输送可能在极端降水的发生中也起到了较为重要的作用。

4.4 瞬变波活动的合成分析

前面的分析指出，极端降水正、负异常年份的瞬变波传播情况存在较为明显的差异，这里我们进一步给出合成分析的结果（图 10）。结果表明，极端降水正、负异常年份的瞬变波活动呈现比较明显的差异，与之前讨论的结果类似。总体而言，频发年里，欧亚大陆上空持续有瞬变波传播，波动活跃；少发年里，瞬变波在欧亚大陆上空持续传播的时间偏短。合成分析的结果与前文展示的年份里瞬变波活动的情况比较一致。

另外，为了能较为客观的反映极端降水频发、少发年里瞬变波强度的变化差异，在此分别对极端降水正、负异常年份瞬变波强度进行合成（图 11）。发现极端降水频发的年份，中高纬度的大西洋到欧亚大陆上的瞬变波比少发年偏强，扰动更为

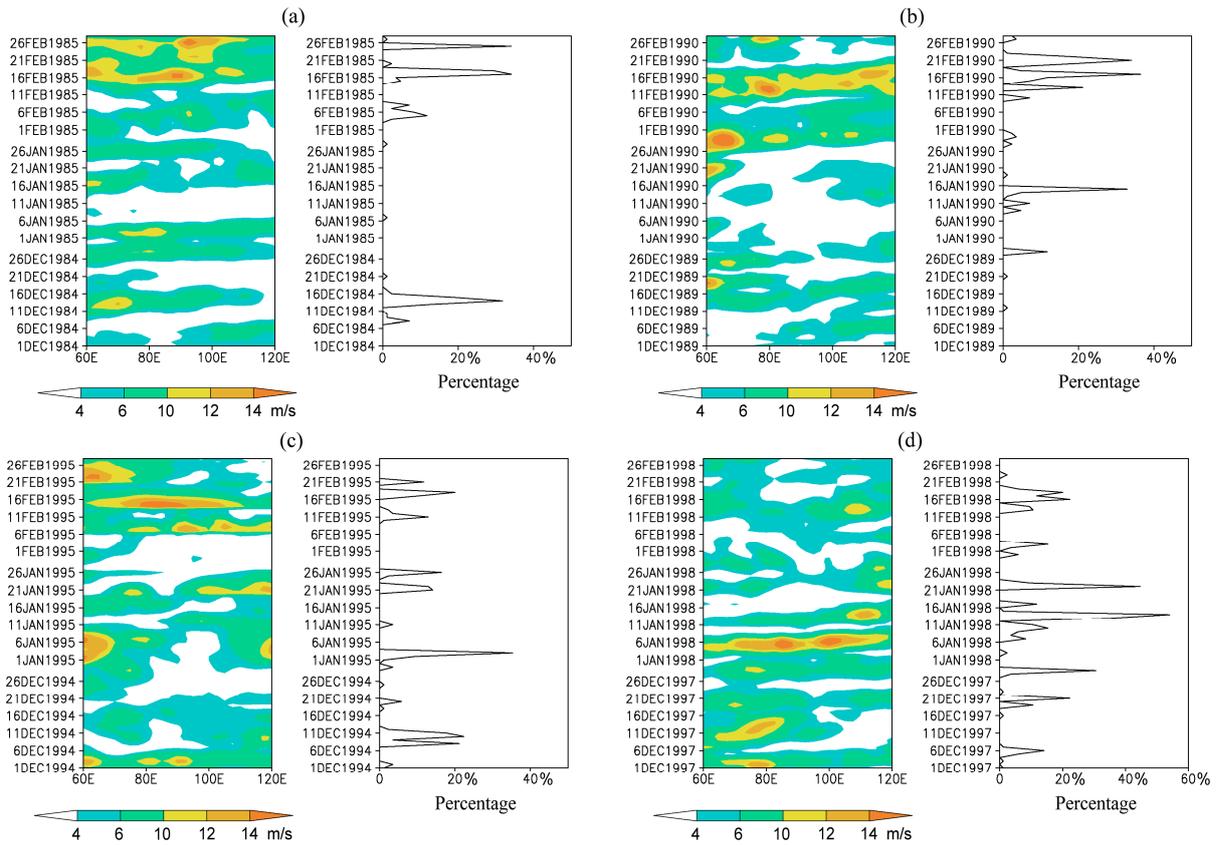


图 6 同图 5，但为瞬变波波包的经度—时间剖面

Fig. 6 Same as Fig. 5, except for the transient eddy packets (instead of transient eddy intensity)

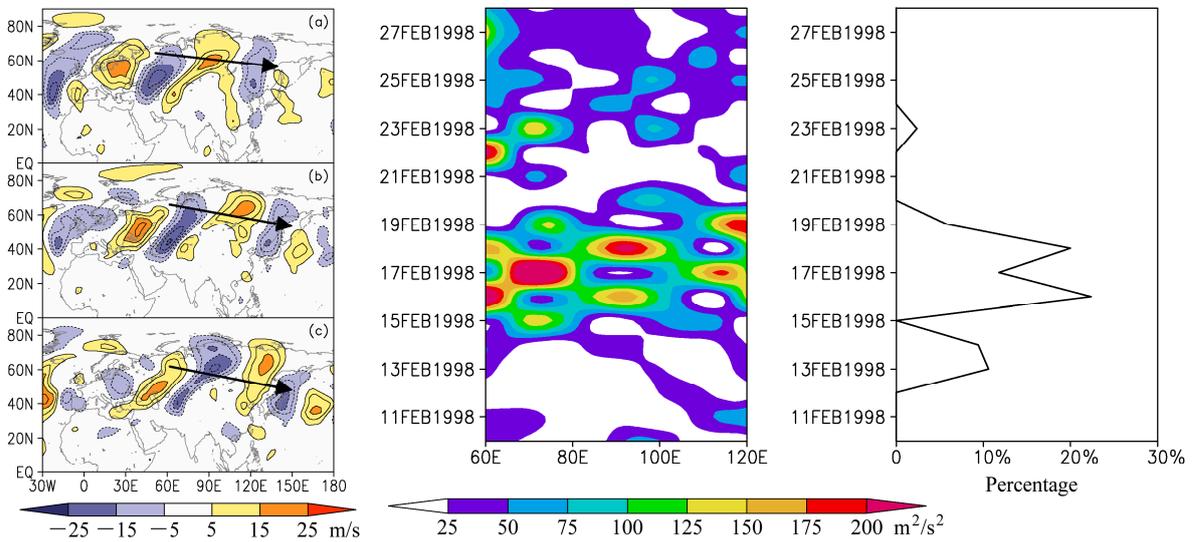


图 7 1998 年 2 月 16~18 日瞬变波传播 (左, a-c 分别代表 16~18 日, 单位: m/s)、50°N~65°N 平均的瞬变波强度经度—时间剖面图 (中, 单位: m²/s²) 和逐日发生极端降水的台站的百分率 (右, 单位: %)

Fig. 7 Propagation of transient eddies from Feb 16 to 18 in 1998 (left panel, a-c refers to Feb 16-18 respectively), longitude-time cross section of transient eddy intensity averaged over 50°N-65°N (middle panel), and time series of daily percentage of stations with extreme precipitation event (right panel in %)

频繁强烈，而少发年则相对偏弱。瞬变波的这种分布表明，在极端降水多发年和少发年瞬变波活动存在差异，两者之间存在一定联系。

5 结论

本文分析了冬季长江中下游地区极端降水发

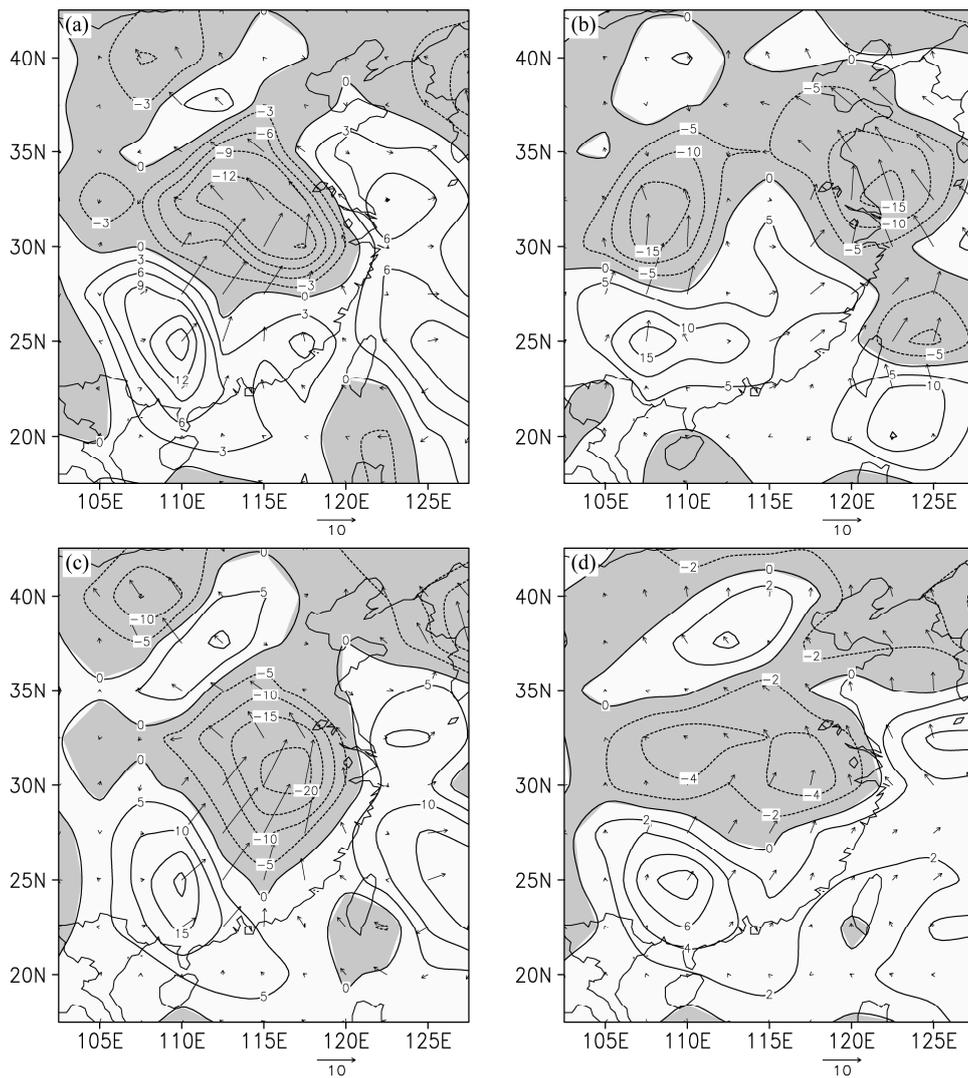


图 8 1993 年 2 月 14~16 日 700 hPa 瞬变波造成的水汽通量散度(等值线, 负值用阴影表示, 单位: $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$)及瞬变波输送矢量场(箭头, 单位: $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{hPa}^{-1}$): (a)~(c) 分别代表 14~16 日, (d) 为 14~20 日的平均

Fig. 8 Moisture flux divergence caused by transient eddies at 700 hPa (contour, shaded areas denote negative values, in $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$) and vector for water vapor transport by the transient eddy (vector, in $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{hPa}^{-1}$): (a)~(c) refer to Feb 14~16, 1993, respectively; (d) is averaged from Feb 14 to 20

生频次与天气尺度瞬变波活动的关系, 着重探讨了南支瞬变波传播与极端降水的联系, 对北支瞬变波和瞬变波对水汽输送的作用也进行了初步的分析, 结论如下:

(1) 活跃于东亚副热带地区的南支瞬变波在冬季极端降水频发、少发年存在较明显的差异。冬季极端降水频发年, 瞬变波在欧亚大陆上空持续有瞬变波传播, 波动较连续, 在极端降水最频发的 1997/1998 年冬季尤其显著; 1992/1993、1994/1995、2002/2003 年等也如此。而少发年, 瞬变波在欧亚大陆上空相对不活跃、强度偏弱。

(2) 在逐日尺度上, 南支瞬变波强度和能量的传播过程与极端降水发生频次具有一定对应关系。

在极端降水集中发生时段里, 有较明显的瞬变波活动。

(3) 北支瞬变波以及瞬变波对水汽的输送对长江中下游地区极端降水的发生也有一定促进作用, 如 1997/1998 年、1992/1993 年、1985/1986 年冬季等。

(4) 合成分析表明, 极端降水频发的年份, 从中高纬度的大西洋到欧亚大陆上的瞬变波比少发年偏强, 扰动更为频繁强烈, 而少发年则相对偏弱。

本文从大气内部瞬变波传播的角度对长江中下游地区冬季极端降水事件的成因进行了初步探讨, 总体而言, 就冬季平均状况, 频发年里欧亚大

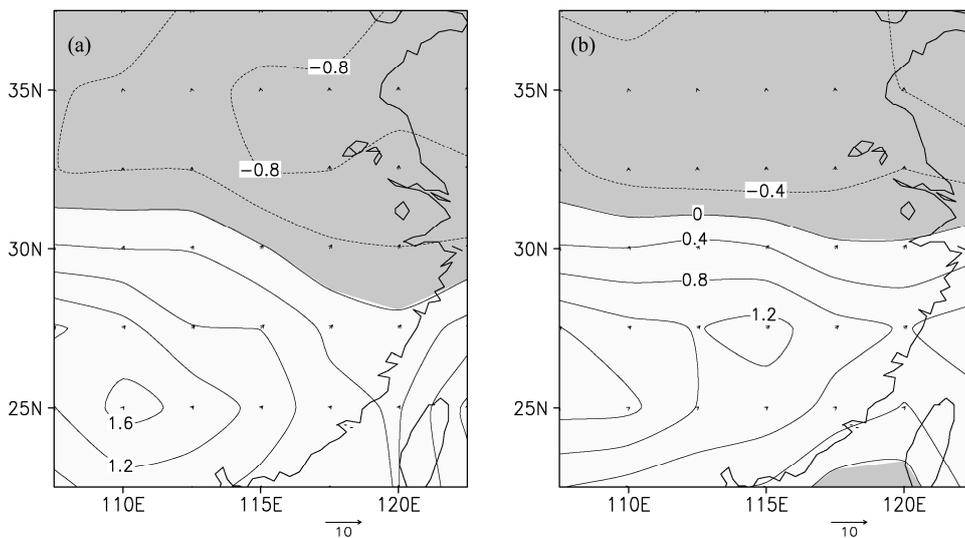


图 9 极端降水频发年 (a)、少发年 (b) 700 hPa 瞬变波造成的水汽通量散度 (等值线, 负值用阴影表示, 单位: $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$) 及瞬变波输送矢量场 (箭头, 单位: $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$) 的合成场

Fig. 9 Moisture flux divergence caused by transient eddies at 700 hPa (contour, shaded areas denote negative values, in $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$) and vector for water vapor transport by the transient eddy (vector, in $10^{-7} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$) in (a) high frequent years and (b) low frequent years of extreme precipitation

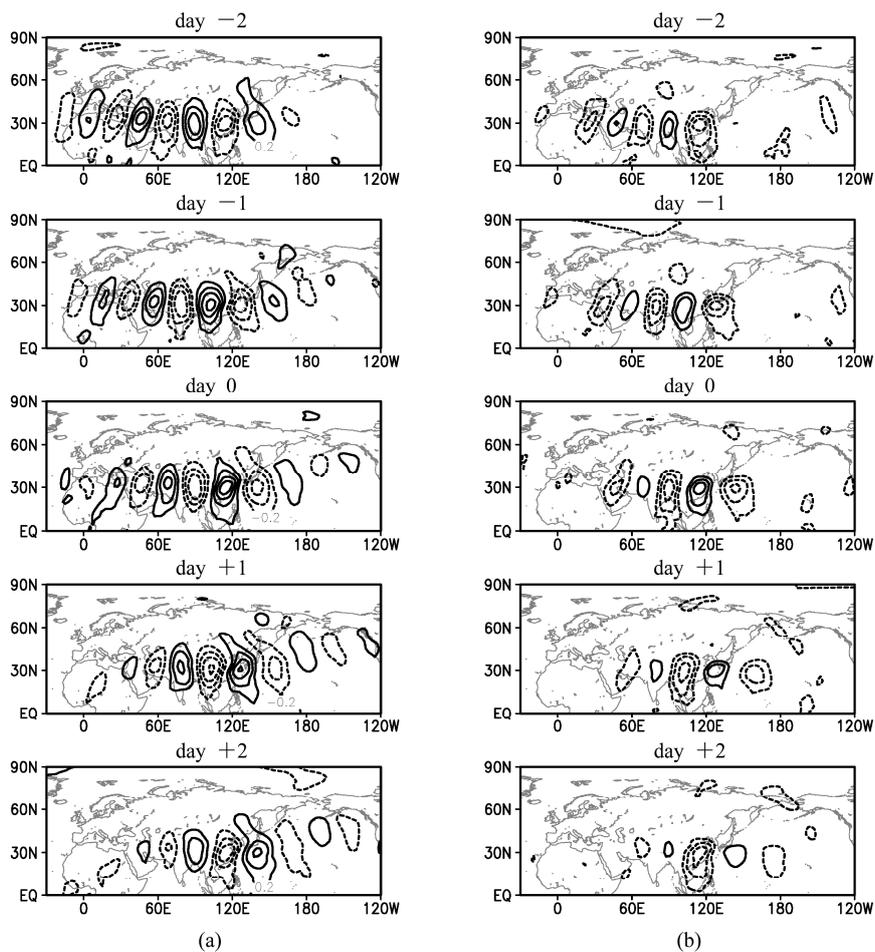


图 10 同图 3, 但 (a) 为频发年合成, (b) 为少发年合成

Fig. 10 Same as Fig. 3, except for composite results of (a) high and (b) low frequent years

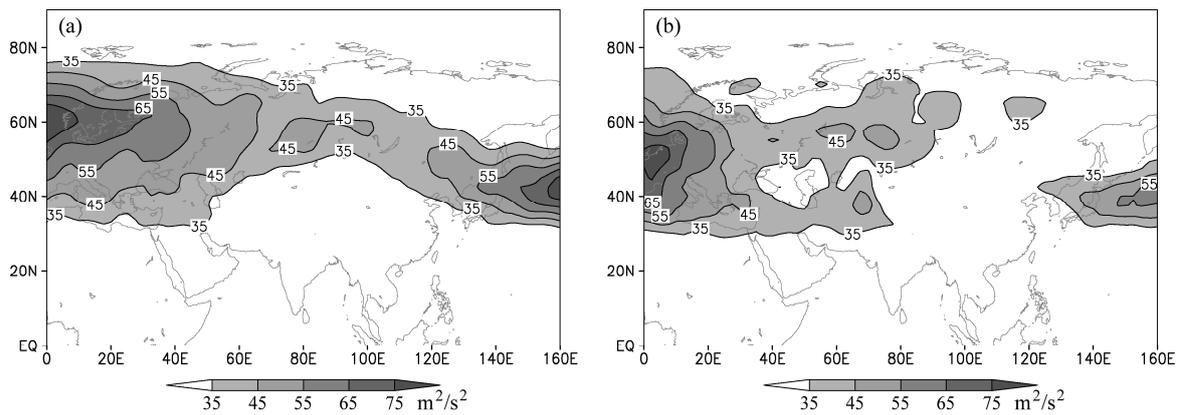


图 11 极端降水频发年份 (a)、少发年份 (b) 瞬变波强度的合成场 (单位: m^2/s^2)

Fig. 11 The distribution of winter transient eddy intensity in (a) high frequent years and (b) low frequent years of extreme precipitation events

陆上空瞬变波活跃, 传播连续, 强度偏强, 持续时间长, 少发年里则反之。在逐日尺度上, 两者也有一定的对应关系。这些结果均表明, 长江中下游地区冬季极端降水事件可能与瞬变波传播密切相关, 这为极端降水成因研究提供了新的视角, 同时也可以为冬季极端降水的监测提供一些有价值的信息。但是, 由于瞬变波活动本身的复杂性, 尤其是瞬变波活动路径的多变性, 要客观描述瞬变波的活动存在一定困难。此外, 瞬变波活动固然与冬季极端降水存在比较密切的联系, 但本文并未对瞬变波影响极端降水的可能途径进行深入分析, 下一步工作将在此基础进行深入探讨, 例如从瞬变波对异常环流维持的角度阐述这个问题。

致谢 南京信息工程大学大气资料服务中心提供资料服务; ERA40 资料取自 European Center for Medium-Range Weather Forecasts ([http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_daily/\[2012-10-01\]](http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_daily/[2012-10-01])); NCEP/NCAR 资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml> [2012-10-01]); 感谢审稿专家对本文提出的诸多有益建议!

参考文献 (References)

- Blackmon M L. 1976. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33: 1607–1623.
- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. *J. Climate*, 14 (9): 1959–1976.
- Chang E K M. 1999. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part II: Seasonal and hemispheric variations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (11): 1729–1747.
- 陈海山, 刘蕾, 朱月佳. 2012. 中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系 [J]. *中国科学 (地球科学)*, 42 (12): 1951–1965. Chen Haishan, Liu Lei, Zhu Yuejia. 2012. Possible linkage between winter

extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *Science China Earth Sciences*, doi:10.1007/s11430-012-4442-z.

- 刁一娜, 李建平, 罗德海. 2004. 阻塞流场与瞬变涡动相互作用的动力学研究 [J]. *大气科学*, 28 (6): 901–924. Diao Yina, Li Jianping, Luo Dehai. 2004. A dynamic study of the interaction between transient eddies and blocking [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (6): 901–924.
- 董丽娜, 郭品文, 李晓峰. 2006. 瞬变波活动与江淮地区夏季旱涝的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 29 (4): 470–476. Dong Lina, Guo Pinwen, Li Xiaofeng. 2006. Relationship between activity of transient waves and excessive/deficit summer rain in Changjiang-Huaihe River basin [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29 (4): 470–476.
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81 (3): 417–425.
- Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. *Science*, 314 (5804): 1442–1445.
- Holopainen E O, Rontu L, Lau N C. 1982. The effect of large-scale transient eddies on the time-mean flow in the atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39: 1972–1984.
- Hoskins B, Pearce R P. 1983. Large-scale Dynamical Processes in the Atmosphere [M]. London: Academic Press, 111–112.
- 胡广书. 2003. 数字信号处理——理论、算法与实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 156–161. Hu Guangshu. 2003. Digital Signal Processing—Theory, Algorithm, and Realization (in Chinese) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 156–161.
- 蒋伶仙, 任雪娟, 杨修群. 2011. 东亚—北太平洋大气环流和瞬变扰动的年代际变化 [J]. *气象科学*, 31 (5): 549–557. Jiang Lingxian, Ren Xuejuan, Yang Xiuqun. 2011. Interdecadal variations of atmospheric circulation and synoptic-scale transient eddy activities over the East Asian–North Pacific [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 549–557.
- Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*,

- 79 (2): 231–241.
- Kunkel K E, Pielke R A Jr, Changnon S A. 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: a review [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80 (6): 1077–1098.
- Lau N C. 1988. Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45 (19): 2718–2743.
- 陆日宇. 2001. 夏季东北亚阻塞形势维持时的天气尺度波 [J]. *大气科学*, 25 (3): 289–302. Lu Riyu. 2001. Eddies during the blocking maintenance over the Northeastern Asia in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 289–302.
- Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998 [J]. *International Journal of Climatology*, 21 (3): 269–284.
- 梅世龙. 2008. 江淮流域强降水过程与对流层上层斜压波包活动的联系 [D]. 南京信息工程大学博士论文, 126pp. Mei Shilong. 2008. Relationships between activities of baroclinic wave packets in the upper troposphere and rainstorms in reaches of Yangtze and Huaihe Rivers [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 126pp.
- 缪锦海, 肖天贵, 刘志远. 2002. 波包传播诊断的理论基础和计算方法 [J]. *气象学报*, 60 (4): 461–467. Miao Jinhai, Xiao Tianguai, Liu Zhiyuan. 2002. Theoretic foundation and computational method about the wave-packet propagation diagnosis [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (4): 461–467.
- 闵岫, 钱永甫. 2008. 我国近 40 年各类降水事件的变化趋势 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 47 (3): 105–111. Min Shen, Qian Yongfu. 2008. Trends in all kinds of precipitation events in China over the past 40 years [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 47 (3): 105–111.
- Nakamura H, Izumi T, Sampe T. 2002. Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian Winter Monsoon [J]. *J. Climate*, 15: 1855–1874.
- Osborn T J, Hulme M, Jones P D, et al. 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation [J]. *Int. J. Climatol.*, 20 (4): 347–364.
- 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 337–353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and change in mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 337–353.
- 任雪娟, 张耀存. 2007. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大气瞬变扰动的关系探讨 [J]. *气象学报*, 65 (4): 550–560. Ren Xuejuan, Zhang Yaocun. 2007. Association of winter western Pacific jet stream anomalies at 200 hPa with ocean surface heating and atmospheric transient eddies [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (4): 550–560.
- 任雪娟, 杨修群, 周天军, 等. 2010. 冬季东亚副热带急流与温带急流的比较分析: 大尺度特征和瞬变扰动活动 [J]. *气象学报*, 68 (1): 1–11. Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Zhou Tianjun, et al. 2010. Diagnostic comparison of the East Asian subtropical jet and polar-front jet: Large-scale characteristics and transient eddy activities [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 68 (1): 1–11.
- 谭本植, 潘旭辉. 2002. 1998 年夏季北半球斜压波活动与长江流域洪涝灾害分析 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 38 (3): 354–364. Tan Benkui, Pan Xuhui. 2002. Baroclinic waves of Northern Hemisphere and Yangtze River flood in the summer of 1998 [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science) (in Chinese)*, 38 (3): 354–364.
- 陶祖钰, 胡爱学. 1994. 北半球冬季非定常扰动的气候分析 [J]. *大气科学*, 18 (3): 320–330. Tao Zuyu, Hu Aixue. 1994. Climatological analysis of transient eddy in the northern winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 18 (3): 320–330.
- Wang Y, Yan Z W. 2009. Trends in seasonal total and extreme precipitation over China during 1961–2007 [J]. *Atmospheric and Ocean Science Letters*, 2 (3): 165–171.
- 韦晋, 朱伟军. 2006. 天气尺度瞬变波滤波方案比较分析 [J]. *南京气象学院学报*, 29 (4): 549–554. Wei Jin, Zhu Weijun. 2006. Comparison of two filtering ways for synoptic scale transient-waves [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29 (4): 549–554.
- 肖天贵, 孙照渤, 葛菲. 2010. 四川“9.22”暴雨过程的波包分布及传播特征 [J]. *气象科学*, 30 (2): 185–192. Xiao Tianguai, Sun Zhaobo, Ge Fei. 2010. The characteristic of wave packet propagation in 2008 Sichuan “Sep.22” heavy rainfall process [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30 (2): 185–192.
- 肖天贵, 李江林, 李湘, 等. 2008. 青藏高原夏季风强弱年波包传播特征分析 [J]. *高原气象*, 27 (5): 956–966. Xiao Tianguai, Li Jianglin, Li Xiang, et al. 2008. The distinguishing characteristics of wave-packet propagation in strong/weak Qinghai–Xizang Plateau summer monsoon year [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (5): 956–966.
- 徐珍. 2006. 夏季北太平洋风暴轴的年代际变化特征及其与同期中国降水和气温年代际变化的可能联系 [D]. 南京信息工程大学硕士论文. Xu Zhen. 2006. Decadal characteristics of summer northern Pacific Storm track and its possible relation to precipitation and temperature in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- Yamamoto R, Sakurai Y. 1999. Long-term intensification of extremely heavy rainfall intensity in recent 100 years [J]. *World Resource Review*, 11 (2): 271–281.
- 严中伟, 杨赤. 2000. 近几十年我国极端气候变化格局 [J]. *气候与环境研究*, 5 (3): 267–272. Yan Zhongwei, Yang Chi. 2000. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951–1997 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (3): 267–272.
- 杨宏青, 陈正洪, 石燕, 等. 2005. 长江流域近 40 年强降水的变化趋势 [J]. *气象*, 31 (3): 66–68. Yang Hongqing, Chen Zhenghong, Shi Yan, et al. 2005. Chang trends of heavy rainfall events for last 40 years in the Changjiang valley [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (3): 66–68.
- 杨金虎, 江志红, 白虎志. 2008. 西北区东部夏季极端降水事件同太平洋 SSTA 的遥相关 [J]. *高原气象*, 27 (2): 331–338. Yang Jinhui, Jiang Zhihong, Bai Huzhi. 2008. Teleconnection between summer extreme precipitation event of east part of northwest China and Pacific SSTA [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (2): 331–338.
- Yeh Tu-cheng. 1949. On energy dispersion in the atmosphere [J]. *J. Meteor.*, 6: 1–6.

- 伊兰, 陶诗言. 1997. 定常波和瞬变波在亚洲季风区大气水分循环中的作用 [J]. 大气科学, 55 (5): 532–544. Yi Lan, Tao Shiyuan. 1997. Role of the standing and the transient eddies in atmospheric water cycle in the Asian monsoon region [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (5): 532–544.
- You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2009. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003 [J]. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-009-0735-0.
- Zeng Qingcun. 1983. The evolution of a Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere [J]. J. Atmos. Sci., 40: 73–84.
- 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 (增刊): 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 (supplement): 1–10.
- 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.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan X H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18 (7): 1096–1108.
- 张冬斌, 金飞飞, 李建平, 等. 2011. 瞬变天气涡旋对北大西洋涛动的增强效应 [J]. 大气科学, 35 (5): 927–937. Zhang Dongbin, Jin Feifei, Li Jianping, et al. 2011. Enhancement of North Atlantic Oscillation by transient eddies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 927–937.
- 张永领, 丁裕国. 2004. 我国东部夏季极端降水与北太平洋海温的遥相关研究 [J]. 南京气象学院学报, 27 (2): 244–252. Zhang Yongling, Ding Yuguo. 2004. The teleconnection between summer extreme precipitation over East China and North Pacific SST [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (2): 244–252.
- 支蓉, 龚志强, 王德英, 等. 2006. 基于幂律尾指数研究中国降水的时空演变特征 [J]. 物理学报, 55 (11): 6185–6191. Zhi Rong, Gong Zhiqiang, Wang Deying, et al. 2006. Analysis of the spatio-temporal characteristics of precipitation of China based on the power-law exponent [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55 (11): 6185–6191.
- 朱伟军. 1999. 北半球风暴轴的时空演变及其可能机制 [D]. 南京气象学院博士学位论文, 185pp. Zhu Weijun. 1999. Spatio-temporal evolution of northern storm tracks with its possible mechanics [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 185pp.
- Zimin A V, Szunyogh I, Patil D J, et al. 2003. Extracting envelopes of Rossby wave packets [J]. Mon. Wea. Rev., 131: 1011–1017.
- 邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 2009. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异 [J]. 南京大学学报(自然科学), 45 (1): 98–109. Zou Yongchang, Yang Xiuqun, Sun Xuguang, et al. 2009. Seasonal difference of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 45 (1): 98–109.