张洁,周天军,宇如聪,等. 2009. 中国春季典型降水异常及相联系的大气水汽输送 [J]. 大气科学, 33 (1): 121-134. Zhang Jie, Zhou Tianjun, Yu Rucong, et al. 2009. Atmospheric water vapor transport and corresponding typical anomalous spring rainfall patterns in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 121-134.

中国春季典型降水异常及相联系的大气水汽输送

张洁^{1,2} 周天军¹ 宇如聪³ 辛晓歌^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029
2 中国科学院研究生院,北京 100049
3 中国气象局,北京 100081

摘 要利用经验正交函数分解方法,揭示了中国春季典型降水异常型的分布特征,讨论了对应的水汽输送场和 大尺度环流形势。结果表明,降水异常的前三个模态对应的异常水汽输送源地都与气候平均源地存在差异。第一 模态中,降水大值区位于华南沿海,伴随西太平洋副高的加强以及东亚西风急流的西南向移动,水汽主要来源于 菲律宾和中国南海地区;第二模态中,降水大值区位于长江中下游地区,西太平洋副高及东亚西风急流均较气候 平均位置偏北,水汽主要来源于赤道西太平洋,同时赤道印度洋的西风水汽输送也为降水提供了部分水汽;第三 模态中,降水中心位于黄淮流域,500 hPa 高压异常中心北移至日本海附近,同时东亚西风急流大大减弱,水汽源 地位于中纬度西北太平洋。在气候平均态下,来自青藏高原南缘的西风水汽输送是中国春季降水的重要水汽源 地之一,但与此输送带对应的异常输送,在与前三个降水异常典型模态所对应的水汽输送异常场中均没有体现。 关键词 降水 水汽输送 西太平洋副高 东亚西风急流

文章编号 1006 - 9895 (2009) 01 - 0121 - 14 中图分类号 P426 文献标识码 A

Atmospheric Water Vapor Transport and Corresponding Typical Anomalous Spring Rainfall Patterns in China

ZHANG Jie^{1, 2}, ZHOU Tianjun¹, YU Rucong³, and XIN Xiaoge ^{1, 2}

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The atmospheric water vapor transports associated with typical anomalous spring rainfall patterns have been investigated using NCEP/NCAR, ERA40 monthly mean reanalysis data and precipitation data of 160 stations in China during 1951 – 1999. Results show that origins of water vapor supply related to anomalous rainfall patterns are different from the climate mean situation. In anomalous pattern 1, with a heavier rainbelt along the South China coast, the main moisture comes from the Philippine Sea and the adjacent South China Sea. The background large-scale circulation changes include the intensification of the western Pacific subtropical high (WPSH) and the south-west shift of the East Asian jet stream (EAJS). In anomalous pattern 2, with a main rainbelt along the middle and

收稿日期 2007-08-10,2007-09-28 收修定稿

作者简介 张洁,女,1983年出生,博士生,主要从事东亚气候变化的观测分析和数值模拟研究。E-mail: zhangj@mail. iap. ac. cn

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40625014、40221503,优秀国家重点实验室研究项目基金 40523001,国家重点基础研究发展规划 项目 2006CB403603

lower reaches of the Yangtze River, the origins of water vapor supply contain the western tropical Pacific and the tropical Indian Ocean. Both the WPSH and the EAJS move to the north of their normal position. In anomalous pattern 3, a rainy region is located in the Huaihe River valley. The moisture originates from the northwestern Pacific. The 500-hPa anticyclone anomaly moves to northeastern China and the EAJS is weaker than its normal condition. Although water vapor transport along the southern edge of the Tibetan Plateau is one of the main branches in the climate mean pattern, none of the typical water vapor transport related to typical anomalous rainfall reflects this water vapor flow.

Key words precipitation, water vapor transport, the western Pacific subtropical high, East Asian jet stream

1 引言

中国位于东亚季风区,东亚季风的年际以及年 代际变率对中国降水的时空变化特征有重要影响。 围绕着东亚夏季风的年际及年代际变率特点和成 因,国内外学者开展了较为深入的研究 (Chang et al., 2000; 郭其蕴等, 2003; 黄荣辉等, 2003; Yu et al., 2004a; Zhou et al., 2006)。相对于夏季, 以往的研究工作对春季关注不多。有限的研究表 明,中国春季的气候变化有着不同于夏季的鲜明特 点,并同样具有多时间尺度变化特征。在年际变率 上,研究发现华北春季降水与 ENSO 有密切的关 系,在 El Niño 发生年及次年,华北春季降水偏多 (王群英等, 1999); Wang et al. (2002) 指出江南地 区春季降水与副热带高压、东亚西风急流、极涡以 及太平洋海温异常都有密切的联系,而与亚洲低纬 地区大气环流的联系并不明显。在年代际尺度上, 春季气候亦表现出独特的变化特征。最近几十年, 青藏高原下游地区表现出与全球增暖相左的变冷趋 势,这种变冷现象是欧亚大陆副热带地区变冷的区 域体现,与北大西洋涛动 (NAO) 的年代际变化存 在显著联系 (Yu et al., 2004b; Li et al., 2005)。 Xin et al. (2006) 发现东亚对流层中上层在春末存 在显著的变冷趋势,这种冷异常信号通过局地大气 环流,导致中国东南部降水自20世纪80年代以来 显著减少。此外,陆日宇(2001)和周连童等 (2006)均指出华北春季降水有增加趋势。由此可 见,春季气候异常,无论从年际还是年代际变化 上,都表现出诸多不同于夏季的特征。因此,有必 要加强针对春季气候异常的研究。

旱涝等降水异常与水汽输送异常存在着直接的 联系。包括水汽输送等水循环活动异常,无论从资 料诊断还是数值模拟的角度,都是气候变率研究中 重点关注的话题之一(周天军等,2000,2001; Zhou et al., 2002; He et al., 2007)。例如, 观测 分析指出,在全球水循环中,副热带大洋上空是重 要的水汽辐散区,东亚季风区在夏季是全球最强的 水汽辐合区(周天军等, 1999); Li (1999) 通过分 析晚春和夏季中国南海水汽通量及水平衡,发现中 国南海地区是水汽的汇,就气候平均意义而言,其 作用相当于一个"水库";丁一汇等(2003)计算了 1998年中国大洪水时期的水汽收支,指出辐散风 造成的质量辐合对降水的贡献最大; He et al. (2007)系统考察了亚澳季风区的水汽输送形势在 不同的季节转换期的表现,并指出南亚季风区与东 亚季风区的西风水汽输送特征有显著差异;黄荣辉 等(1998)比较了东亚季风区水汽输送特征与南亚 季风区的差别,发现东亚季风区经向水汽输送大于 纬向水汽输送,水汽的辐合主要由季风气流引起的 水汽平流(湿平流)造成。最近, Zhou et al. (2005) 讨论了与中国夏季降水典型异常型相对应的水汽输 送的变化,指出引起夏季降水变化的水汽输送异 常,在源头上与气候平均情况不同。中国夏季降水 年际变化的典型分布之一表现为长江中下游多雨, 与之对应的异常水汽输送一支来自热带西南方向, 其直接源地是孟加拉湾,但源头可追溯至菲律宾 海,另一支来自中纬度东北方向,二者在长江中下 游辐合;与淮河流域多雨降水型相对应的异常水汽 输送主要来自副热带的西南方向,其直接源地是南 海,但是源头可追溯到东海以及临近的 20°N~ 25°N 副热带太平洋。

与此前针对春季气候异常的研究工作较少相对 应,对春季水汽输送特征的研究也亟待加强,因而 本文的主要目的是参照 Zhou et al. (2005)的研究 方法,考察中国地区春季降水异常的主要模态,并 重点分析与降水典型异常紧密联系的水汽输送变 化。本文试图重点回答以下两方面问题:首先,中 国春季典型降水异常的雨型分布特征如何?其次, 与之对应的水汽输送异常及环流异常的特征如何? 结果表明,中国春季降水主要有3种典型异常降水 分布形式,且不同的降水异常模态对应的异常水汽 输送以及环流异常特征具有显著差异。

本文其他部分安排如下:第2节扼要介绍所使 用的资料和分析方法;第3节分析春季降水的气候 形势以及降水异常的主要模态;第4节讨论与主要 降水异常型相联系的水汽输送以及大尺度环流形 势;最后给出主要结论。

2 资料和分析方法

本文所用的降水资料是由中国气象局收集整理的中国 160 站逐月降水资料,时间跨度为 1951~ 1999年,站点分布如图 1a 所示。所用的环流资料 分别来自两套月平均再分析格点资料:NCEP/ NCAR 再分析资料(Kalnay et al., 1996)和 ERA40 再分析资料(Uppala et al., 2005)。涉及 的物理量有比湿、位势高度资料及风场资料。文中 以逐年 3~5 月平均的降水量作为当年春季降水量 指标。

由于 300 hPa 以上的水汽输送较小(Zhou, 2003), 本文在计算整层水汽输送时,只考虑 300 hPa 以下的 层次,即 1000、925、850、700、600、500、400、 300 hPa。为了消除地形对计算整层水汽输送的影 响,文中的垂直积分是从地表气压(Ps)开始的, 即地形高度以下的虚假水汽不计算在内。

此前的定量估算表明,定常分量是决定水汽输送的重要部分,而瞬变分量在水汽通量场上是小量(周天军等,1999)。因此,本文只关注水汽输送的定常部分。

研究中采用的分析方法主要包括经验正交函数 (EOF)分解、回归分析和合成分析方法。全文所 用的信度检验均为 *t* 检验。

3 中国春季降水和水汽输送的气候形 势以及典型的春季降水异常型

为了了解中国春季降水和水汽输送的主要分布 特征,考察了1951~1999年的多年平均的春季 (MAM)降水量(图1b)以及整层水汽输送(图 1c)。考虑到西部站点资料可信度相对低,本文选 取95°E以东站点的降水资料进行分析。如图1a和 1b所示,降水变率以及降水量大值区均集中于中



图 1 (a) 春季台站降水的标准偏差,黑点为观测站点的位置, 阴影为标准偏差大于 0.5 mm/d 的区域; (b) 1951~1999 年气 候平均的春季降水场形势,阴影为降水量大于 6 mm/d 的区域; (c) 气候平均态下春季水汽输送型(单位: kg·m⁻¹·s⁻¹) Fig. 1 (a) Standard deviation (shaded: >0.5 mm/d) of MAM (Mar - May) mean rainfall from the station data, dots indicate locations of the observational stations; (b) climate mean (1951 – 1999) MAM rainfall pattern, regions with rainfall larger than 6 mm/d are shaded; (c) vertically integrated climate mean MAM water vapor transport (kg·m⁻¹·s⁻¹)

国东部地区,降水最强中心位于闽浙赣三省交界区域 (26°N~30°N,115°E~120°E),降水量由中国 东南部分别向东北和西北部递减。由 NCEP/ NCAR 再分析资料得到的相应水汽输送(图 1c)可 以看到,影响中国春季降水的水汽输送带主要有两 支:一支是副热带高压西北侧的西南风气流输送, 其水汽输送强度达到 110 kg·m⁻¹·s⁻¹;另一支是 青藏高原南侧副热带西风气流水汽输送,水汽输送 量值大约为 150 kg·m⁻¹·s⁻¹。这两支水汽输送带 交汇于中国南部地区,并进一步向东北方向推进, 为我国东南部地区提供丰沛的水汽。不难发现,气 候平均降水中心的位置与水汽输送高值区极为吻 合,体现了水汽输送和降水之间的密切联系。

为了揭示春季降水变率的主要空间分布特征, 采用 EOF 分析方法对 1951~1999 年春季降水距平 场做分解,得到方差贡献率较大的前3个特征向量 场,方差贡献率分别为29.8%、15.4%和8.1%。 这3个模态通过了 North 准则检验 (North et al., 1982),彼此独立。图2和图3分别是前三个模态 的空间分布和所对应的标准化时间序列。如图 2a 所示,在中国春季降水 EOF1 的空间分布中,最强 的正距平区位于华南地区, 而最大的负距平区位于 黄淮以及华北地区。这说明华南地区春季降水异常 往往与黄淮及华北地区春季降水异常相反。由其相 对应的第一主分量时间序列 PC1(图 3a)可知, PC1 序列有明显的年代际尺度变化特征。从 20 世 纪 60 年代中期到 80 年代中期,华南地区春季降水 有增加趋势,而黄淮和华北地区春季降水有减少趋 势。

中国春季降水 EOF2 的空间分布如图 2b 所示, 最强正距平处于长江中下游地区。由其对应的主分 量时间序列 PC2 (图 3b) 表明, PC2 序列也呈现出 明显的年代际变率特征,自 20 世纪 80 年代以来, 长江中下游地区(指长江中下游及其以南至 24°N 的地区)降水呈减少趋势。这一模态所反映的降水 异常的空间分布以及时间演变形式特征,与 Xin et al. (2006)指出的中国晚春降水的年代际变化基本 一致。

EOF3 的空间分布如图 2c 所示,主要表现华北 和黄淮流域的春季降水异常,最强异常中心位于黄 淮流域。如图 3c 所示, PC3 的变化主要表现为年 际变率特征,而且与 El Niño 有较好的对应关系。 在 1998 年强 El Niño 年春季,黄淮流域和华北地区 降水偏多; 1991~1994 年为持续时间较长的弱 El Niño 年, PC3 也表现出弱的正异常。1951~1998



图 2 1951~1999 年平均的中国春季降水异常百分比(%,相 对于气候平均降水):(a) EOF1;(b) EOF2;(c) EOF3。阴影: 超过 5 %显著性水平的区域

Fig. 2 The leading modes of MAM mean rainfall anomaly percentage (%, relative to climate mean state) for 1951–1999: (a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3. Shaded regions indicate significant anomalies at the confidence level of 95% using a Student's *t* test

年间,有12个春季处于El Niño期,王群英等 (1999)对这12个春季的同期华北降水异常做了分 析,发现有8次降水出现正距平。这表明在El



图 3 与前三个降水模态对应的标准化主分量时间序列:(a) EOF1;(b) EOF2;(c) EOF3。粗实线:对主分量进行9点平滑的结果

Fig. 3 The normalized principal components (PCs) of precipitation anomalies corresponding to the leading modes of (a) EOF1 (b) EOF2 and (c) EOF3. The thick solid line represents the 9year running average of the PC

Niño 年的春季,华北降水偏多。本文结果从另外 一个角度验证了此结论。王群英等(1999)还指出 发生 El Niño 的次年春季,华北春季降水也是偏多 的,PC3 在一定程度上反映了这一特征。

Tian et al. (1998) 将江南春雨期定义为 12~ 26 候,该时期处于南海季风爆发前期,与本文关注 的时段基本一致。图 1b 所描述的中国春季降水的 气候态分布,与万日金等(2006)给出的江南春雨 气候型较为吻合,降水大值区主要位于中国东部地 区,包括长江中下游地区以及华南地区。因此,本 文中对应于春季华南地区降水异常的第一模态和对 应于长江中下游地区降水异常的第二模态,都反映 了江南春雨的强度变化。

虽然长江中下游地区和华南地区均属于江南春 雨区,但两者的年代际演变是反位相的——20世 纪 70 年代后华南降水增多、而长江中下游地区降 水减少。通过将 PC1 和 PC2 分别与 3~5 月逐月降 水求回归,我们考察了降水第一、二模态表现最突 出的月份。结果表明,华南降水异常在这 3 个月均 有表现,且均通过 5%显著性检验;长江中下游地 区的降水异常主要出现在 4、5 月份,也通过了 5% 显著性检验(图略)。

黄淮及华北地区春季降水量明显小于江南春雨 期降水量(图1b)。我们同样将PC3与3~5月逐 月降水求回归,结果表明,对应于黄淮及华北地区 春季降水异常的第三模态主要出现在5月份,这与 任宏利等(2004)对2002年春季降水距平百分率 的分析结果一致(图略)。

上述分析表明,春季降水变率的前三个模态具 有鲜明的空间分布及时间变率差异,三者可以解释 春季降水变化总方差的53.3%。降水的变化主要 来自水汽输送的变化,后者则由大尺度环流形势的 改变所控制。那么,与上述典型春季降水异常型相 对应的水汽输送异常和环流异常特征如何?这是下 面我们将要回答的问题。

4 水汽输送异常分析

4.1 水汽输送以及相应的大尺度环流型

水汽输送和大尺度环流形势有密切的关系。研 究表明(Tao et al., 1987; Wang et al., 2002; Zhang et al., 2006),西太平洋副高和对流层上层西风急 流是影响中国气候的重要环流系统。为讨论与不同 典型降水异常模态对应的水汽输送异常和环流形 势,将前三个 EOF 模态的主分量序列 PC 分别与整 层水汽输送、500 hPa 位势高度场和 200 hPa 纬向 风场的距平求回归,回归系数的分布即可揭示相应 的水汽输送异常和环流异常。这里所用的环流资料 为 NCEP/NCAR 再分析资料。

图 4a 给出了第一模态降水异常相应的水汽输 送形势,可以看出,在西北太平洋地区存在一个异 常反气旋,其西北侧异常西南风,将菲律宾以及中 国南海的水汽输送至华南沿海地区,并与源于中纬 度向南的水汽汇合。在这两支气流的共同作用下, 华南地区降水偏多。常越等(2006)细致分析了华 南前汛期旱涝年水汽输送合成场的形势,其结果与 PC1 对应的水汽输送异常型一致,都说明了来源于 西太平洋的水汽输送变化和来自中国北方的水汽输



图 4 第一模态降水异常相应的要素场: (a) 垂直积分的水汽输 送异常与 PC1 的回归系数 (矢量,单位: kg·m⁻¹·s⁻¹), 阴影 为通过 5%显著性检验的区域; (b) 500 hPa 位势高度异常 (单 位: gpm)和 (c) 200 hPa 纬向风异常 (单位: m/s) 与 PC1 的回 归系数 (等值线), 阴影分别表示气候态下 500 hPa 位势高度和 200 hPa 纬向风的形势

Fig. 4 (a) Anomalies of vertically integrated water vapor transport (kg \cdot m⁻¹ \cdot s⁻¹) regressed upon the PC of rainfall EOF1 (vectors), the shaded regions are significant at the confidence level of 95% using a Student's *t* test; anomalies of (b) 500-hPa geopotential height (gpm) and (c) 200-hPa zonal wind (m/s) regressed upon the PC of rainfall EOF1 (contours), the shaded regions indicates the climate mean 500-hPa geopotential height and 200-hPa zonal wind

送变化对华南降水异常的重要作用。简茂球等 (2007)发现华南地区春季水汽汇在过去几十年里 存在明显的增强趋势。这与 EOF1 对应的华南降水 年代际演变形式相吻合。相应的 500 hPa 位势高度 异常场(图 4b),主要表现为高压异常中心与气候 平均西太平洋副高位置重合,对应于副高西北侧水 汽输送的加强;此外,在日本群岛附近,存在一个 低压异常,对应北支异常水汽输送通道。在 200 hPa,长江以南地区表现为西风异常(图 4c)。该异 常正好位于气候平均东亚西风急流中心的西南侧, 意味着急流轴的南侧西风增强,相应的高层辐散也 加强,有利于我国华南地区深对流增强和降水量增 加。

第二模态降水异常所对应的水汽输送形势见图 5a。水汽输送异常表现为:赤道太平洋水汽经赤道 东风带向西输送至中南半岛附近,随后分为两支, 一支折向北,转为东南风水汽输送,另一支继续西 行,与源于赤道印度洋的水汽交汇于孟加拉湾,成 为南风水汽输送带。两支水汽输送带在100°E附近 汇合后,向长江中下游以南地区输送水汽。在对应 的500 hPa 位势高度异常场中(图5b),西太平洋 上的高压异常位于西太平洋副高气候平均位置的北 面,对应的水汽输送带(图5a)也较 EOF1(图4a) 略偏北。200 hPa 西风急流中心西退并北移(图 5c),高层辐散中心相应北进。

图 6a 给出了第三模态降水异常对应的水汽输 送形势。主要表现为南支暖湿水汽输送带与西风干 冷水汽输送带,在河套地区汇合。南支暖湿水汽经 由中国东海、台湾海峡向北输送,其源地可追溯至 中纬度西北太平洋。500 hPa 的位势高度场异常 (图 6b),主要表现为位于日本海上空的高压异常 和鄂霍次克海地区的低压异常。王冀等(2005)指 出,出现这种气压配置型时,极地冷空气不易向南 扩散,暖空气势力较强。同时,日本海上空的高压 异常,使东亚大槽较常年偏弱,有利于我国东部南 支水汽北上(马京津等,2006)。200 hPa 东风异常 中心处于气候态西风急流的位置上(图 6c),这意 味着高层西风急流大大减弱,西风异常位于东北地 区上空。以上分析表明,影响该降水异常的环流系 统,主要来自中高纬度。

为进一步揭示高低层环流与降水的联系,图7 给出了对应于不同异常降水模态主降水异常中心的 水汽辐合和200 hPa辐散风场的时间序列。选取的 区域分别为:华南地区(20°N~25°N,110°E~ 120°E),长江下游地区(28°N~32°N,110°E~





120°E) 以及黄淮地区 (30°N~44°N, 110°E~ 130°E)。

三个模态对应的低层水汽辐合与高层风辐散的 演变形势都非常一致(图7)。结合各主要模态对应 的主分量(图3)可以看到,出现降水正异常时,水 汽辐合和高层风辐散都大大加强。对应于华南降水 偏多的 EOF1 模态,PC1 与降水中心区水汽辐合和 200 hPa 辐散场的相关系数均为 0.41;对应于长江 中下游以南地区降水偏多的 EOF2 模态,PC2 与降 水中心区水汽辐合和 200 hPa 辐散场的相关系数分 别为 0.41 和 0.35;对应黄淮降水偏多的 EOF3 模 态,PC3 与降水中心区水汽辐合和 200 hPa 辐散场 的相关系数分别为 0.32 和 0.23。可见,前三个主



图 6 同图 4, 但为降水异常第三模态 EOF3 Fig. 6 Same as Fig. 4, except for EOF3

分量都与降水中心的水汽辐合有很好的相关性,通 过了5%的显著性检验。第一、二主分量与高层辐 散的相关也通过了5%的显著性检验,而第三主分 量对应的大尺度环流与降水异常的相关性相对较 弱,这是因为该模态对应的高层辐散较弱(图 6c), 影响该降水异常的环流系统主要来自中高纬度。

上述分析表明,水汽输送形势与大尺度环流型 有非常紧密的联系。本文还采用了合成分析方法, 进一步考察各春季降水前三个异常模态对应的 500 hPa 位势高度场的表现(图略)。结果发现,合 成结果与前三个 EOF 模态的主分量序列对应的 500 hPa 位势高度场的回归系数分布形势(图 4b、 5b、6b)十分一致。



图 7 对应于不同异常降水模态主降水异常中心的水汽辐合场和 200 hPa 风辐散场的时间序列: (a) EOF1, 华南地区平均; (b) EOF2, 长 江下游地区平均; (c) EOF3, 黄淮地区平均

Fig. 7 Time evolutions of the water vapor convergence and 200-hPa wind vector divergence corresponding to different EOF modes of the precipitation anomalies: (a) EOF1, averaged over South China; (b) EOF2, averaged over the middle and lower reaches of the Yangtze River; (c) EOF3, averaged over the Huaihe River valley

4.2 水汽输送的垂直结构

东亚地区复杂的地形以及再分析资料较低的垂 直分辨率都将影响垂直积分的准确性。基于这些考 虑,有必要对水汽输送场进行可信性评估。鉴于水 汽分布主要位于对流层中下层、大气低层的水汽输 送形势主导着水汽输送的总体特征,下面分别用 NCEP/NCAR和ERA40两套资料给出各主要模态 对应的 850 hPa和 500 hPa水汽输送异常场。

图 8 和图 9 分别给出 NCEP/NCAR 资料得到的、与降水异常对应的 850 hPa 和 500 hPa 水汽输送异常。由图 8a 可见,第一模态中,西北太平洋上

有很强地反气旋性水汽输送,其西北侧恰好位于华 南地区,对华南降水有很大贡献,水汽主要来源于 菲律宾和南海;第二模态(图8b)中,水汽输送深 入长江中下游地区,主要体现出源于赤道东风带的 水汽输送,水汽主要来源于赤道西太平洋;第三模 态(图8c)能很好地反映出西北太平洋地区的反气 旋型水汽通道,水汽主要来源于中纬度西北太平 洋。

比较图 8 和图 9 可以看到,850 hPa 水汽输送 强度明显大于500 hPa 水汽输送的强度,可见水汽 输送主要集中于低层,对流层中层 500 hPa 中纬度



图 8 NCEP/NCAR 资料得到的 850 hPa 水汽输送与春季降水异常主分量(a) PC1、(b) PC2 和 (c) PC3 的回归系数分布图(单位: kg・m⁻¹・s⁻¹)。阴影为超过 5%显著性水平的区域

Fig. 8 Regression of anomalous 850-hPa water vapor transport upon (a) PC1, (b) PC2 and (c) PC3 of anomalous MAM rainfall EOF from NCEP/NCAR data. Shaded regions indicate significant values at the confidence level of 95% using a Student's t test (units: kg·m⁻¹·s⁻¹)

地区主要表现为西风干冷空气平流。西风干冷空气 平流在第二模态(图 9b)和第三模态(图 9c)对应 的 500 hPa 水汽输送场中较为显著,均超过 5%显 著性水平。第一模态中,华南沿海地区低层水汽充 沛,但 500 hPa 的冷空气异常不明显。

Yang et al. (2002) 指出 NCEP/NCAR 再分析 资料在 1968 年以前的时段上可靠性较差。因此, 为了验证以上分析结果的正确性,有必要采用独立 于 NCEP/NCAR 再分析资料的资料与其对比。图 10 和图 11 为由 ERA40 资料得到的、与前三个典 型降水异常模态对应的 850 hPa 和 500 hPa 水汽输送图。

基于两套不同资料的结果在目标区域的水汽输送特征基本一致,例如,华南沿海地区均处于赤道太 平洋反气旋性水汽环流的控制范围(图 8a、图 10a); 长江中下游地区以及黄淮流域均受西南风水汽输送 控制(图 8b、c,图 10b、c),对流层中层 500 hPa 主 要为西风冷空气平流(图 9b、c,图 11b、c)。

两套资料所揭示的水汽输送强度有所不同。在 850 hPa 水汽输送场上,第一模态中,NCEP/



图 9 同图 8, 但为 500 hPa Fig. 9 Same as Fig. 8, except for 500 hPa

NCAR 资料在赤道西太平洋表现为闭合的强反气旋性水汽输送环流,而 ERA40 资料所反映的反气旋性环流相对较弱;第二模态中,NCEP/NCAR 水汽输送的强度明显强于 ERA40 资料,前者能输送至 30°N 以北;第三模态中,虽然 NCEP 资料的显著性区域面积较小,但两套资料反映的与黄淮和华北降水异常相联系的水汽输送强度相当。这说明由 NCEP/NCAR 资料得到的对流层低层水汽输送强度总体上强于 ERA40 资料。在 500 hPa 水汽输送 场上,第一、三模态的水汽输送强度在 ERA40 中较强,而在第二模态中,ERA40 反映的水汽输送强度弱于 NCEP/NCAR 资料的结果。尽管两套资料

所反映的水汽输送强度有所不同,但是它们所反映 的异常水汽源地是相近的。

5 结论

本文分析了 1951~1999 年中国春季降水异常的典型模态,并讨论了与之对应的水汽输送异常的 分布特征以及大尺度环流异常型。主要结论如下:

(1)中国东部春季降水异常的第一模态解释了 总方差的29.8%,表现为华南降水异常,对应的异 常水汽输送主要来源于菲律宾和中国南海地区;第 二模态解释了总方差的15.4%,表现为长江中下游 地区以南降水异常,对应的异常水汽输送主要来源



图 10 同图 8, 但为 ERA40 资料 Fig. 10 Same as Fig. 8, except for ERA40 data

于赤道太平洋以及赤道西印度洋;第三模态解释了 总方差的8.1%,表现为华北和黄淮流域降水异常, 异常水汽输送主要来源于东海,其源地可追踪至中 纬度西太平洋。

(2)第一、二模态对应的主分量表现出较明显 的年代际变率,而第三模态主要表现为年际变率。 第一主分量 PC1 在 1958~1972 年表现为负位相, 对应华南降水偏少;在 1973~1989 年则位于正位 相,对应华南降水偏多。第二主分量 PC2 在 1978 年前后由正位相转变为负位相,对应于长江中下游 以南地区降水减少。第三主分量 PC3 主要表现为 年际变率特征,并与 ENSO 事件有一定的对应关 系,在 El Niño 年的春季,华北和黄淮流域降水偏多。

(3) 与中国春季异常降水模态对应的异常水汽 输送形势,主要由大尺度环流形势的变化决定, 500 hPa 副高以及 200 hPa 西风急流位置对降水中 心的位置及强度都有重要影响。第一模态中,西太 平洋副高加强,同时气候态急流轴的南侧西风增 强;第二模态中,西太平洋上的高压异常以及高空 西风异常中心均较气候平均位置偏北;第三模态 中,500 hPa 反气旋异常位于日本海附近,高层西 风急流减弱。

(4) 比较 ERA40 资料和 NCEP/NCAR 资料分



图 11 同图 9, 但为 ERA40 资料 Fig. 11 Same as Fig. 9, except for ERA40 data

别得到的单层水汽输送场,虽然两者表现的水汽输送强度不尽相同,但它们所反映的水汽输送形式以 及水汽源地的地理位置相近。

参考文献 (References)

- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. Journal of Climate, 13 (24): 4310-4325.
- 常越,何金海,刘芸芸,等. 2006. 华南旱、涝年前汛期水汽输送特 征的对比分析 [J]. 高原气象, 25 (6): 1064-1070. Chang Y, He J, Liu Y, et al. 2006. Features of moisture transport of in pre-summer flood season of drought and flood years over South

China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (6): 1064 - 1070.

- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. 气象学报, 61 (2): 129 - 145. Ding Y, Hu G. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (2): 129-145.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2003. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响 [J]. 地理学报, 58 (4): 569 576. Guo Q, Cai J, Shao X, et al. 2003. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 569 576.
- He J, Sun C, Liu Y, et al. 2007. Seasonal transition features of

large-scale moisture transport in the Asian-Australian monsoon region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (1): 1-14.

- 黄荣辉,张振洲,黄刚,等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及 其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. 大气科学,22(4):460-469. Huang R, Zhang Z, Huang G, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22(4):460-469.
- 黄荣辉,陈文,丁一汇. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究 [J]. 大气科学,27 (4):485-501. Huang R, Chen W, Ding Y, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 485-501.
- 简茂球,秦晓昊,乔云亭,等. 2007. 中国南方春季大尺度大气水汽 汇时空变化特征 [J]. 气候变化研究进展,3(2):74-79. Jian M, Qin X, Qiao Y, et al. 2007. Spatial and temporal variations of large-scale atmospheric moisture sinks over Southern China in spring [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (2): 74-79.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 77 (3): 437 – 471.
- Li J, Yu R, Zhou T, et al. 2005. Why is there an early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau [J]. J. Climate, 18: 4660-4668.
- Li W. 1999. Moisture flux and water balance over the South China Sea during late boreal spring and summer [J]. Theoretical and Applied Climatology, 64: 179-187.
- 陆日宇. 2001. 与华北地区春季降水量异常关联的大气环流异常 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 400-408. Lu R. 2001. Atmospheric circulation anomaly associated with the spring rainfall anomaly in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 400-408.
- 马京津,高晓清,曲迎乐. 2006. 华北地区春季和夏季降水特征及 与气候相关的分析 [J]. 气候与环境研究,11 (3): 321 – 329. Ma J, Gao X, Qu Y. 2006. The character of precipitation and its relation to climate change over North China in spring and summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 321 – 329.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev, 110 (7): 699-706.
- 任宏利,张培群,李维京,等. 2004. 中国西北东部地区春季降水及 其水汽输送特征 [J]. 气象学报, 62 (3): 365 - 374. Ren H, Zhang P, Li W, et al. 2004. Characteristics of precipitation and water vapor transport during springtime in the eastern Northwest China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (3): 365 - 374.
- Tao S, Chen L. 1987. A Review of Recent Research on the East

Asian Summer Monsoon in China [M]. Oxford: Oxford University Press.

- Tian S F, Yasunari T. 1998. Climatological aspects and mechanism of spring persistent rains over central China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 76 (1): 57 – 71.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (612): 2961-3012.
- 万日金,吴国雄. 2006. 江南春雨的气候成因机制研究 [J]. 中国科学(D辑),36 (10):936-950. Wan R, Wu G. 2006. The possible causes of the spring persistent rains over southeastern China [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 36 (10):936-950.
- 王群英, 龚道溢. 1999. 华北降水资源的变化及其与厄尔尼诺的关系 [J]. 自然资源学报, 14 (2): 103 108. Wang Q, Gong D. 1999. Variation of rainfall over North China and its possible connection to El Niño [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 14 (2): 103-108
- Wang H, Xue F, Zhou G. 2002. The spring monsoon in south china and its relationship to large scale circulation features [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (4): 651-664.
- 王冀, 江志红, 张艳梅, 等. 2005. 东北地区春季气温异常环流背景 分析 [J]. 气象科技, 33 (2): 128 - 132. Wang J, Jiang Z, Zhang Y, et al. 2005. Spatial characteristics of anomalous circulation in cold/warm years in spring in Northeast China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 33 (2): 128 -132.
- Xin X, Yu R, Zhou T, et al. 2006. Drought in late spring of South China in recent decades [J]. J. Climate, 19: 3197-3206.
- Yang S, Lau K M, Kim K M. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies [J]. Journal of Climate, 15 (3): 306-325.
- Yu R, Wang B, Zhou T. 2004a. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (L22212): 10.1029/2004GL021270.
- Yu R, Zhou T. 2004b. Impacts of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (L12204); doi: 10.1029/2004 GL019814.
- Zhang Y C, Kuang X Y, Guo W D, et al. 2006. Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia [J]. Geophysical Research Letters., 33 (11): L11708, doi: 10.1029/ 2006GL026377
- Zhou J, Li Z. 2002. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM. Climate Dynamics, 19 (2): 167 – 180.
- 周连童,黄荣辉. 2006. 我国华北地区春季降水的年代际变化特征 及其可能成因的探讨 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 441 - 450. Zhou L, Huang R. 2006. Characteristics of interdecadal variability of spring precipitation in North China and its possible cause

[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 441-450.

- 周天军,张学洪,王绍武. 1999. 全球水循环的海洋分量研究 [J]. 气象学报,57 (3):264-282. Zhou T, Zhang X, Wang S. 1999. The air sea freshwater exchange derived from NCEP/ NCAR reanalysis data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 57 (3): 264-282.
- 周天军,张学洪,俞永强. 2000. 气候系统模式中海气水通量交换 的耦合方法 [J]. 科学通报,45 (19): 2097 – 2100. Zhou T, Zhang X, Yu Y. 2000. The couple methods of sea-air-water exchange in climate model [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese),45 (19): 2097 – 2100.
- 周天军, 宇如聪, 张学洪, 等. 2001. 海气耦合气候模式对大气中水 汽输送、辐散辐合与海气间水通量交换的模拟 [J]. 大气科学,

- 25 (5): 596 608. Zhou T, Yu R, Zhang X, et al. 2001. Features of atmospheric moisture transport, convergence and air-sea freshwater flux simulated by the coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (5): 596 – 608.
- Zhou T. 2003. Comparison of the global air-sea freshwater exchange evaluated from independent datasets [J]. Progress in Natural Science, 13 (8): 626-631.
- Zhou T, Yu R. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J. Geophys. Res., 110 (D08104): doi: 10.1029/2004JD005413.
- Zhou T, Yu R. 2006. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J].J. Climate, 19 (22): 5843 - 5858.

新书介绍

—《Regional Climate Studies of China》

由符淙斌等人主编的《Regional Climate Studies of China》一书已于 2008 年 8 月由世界著名的科学技术出版集团 Springer 公司正式出版。

这本英文专著是应 Springer 公司 "Regional Climate Studies" 丛书编委会之邀组织编写的。书中系统 总结了过去十余年来我国学者在中国区域气候研究领域的最新进展和成果。全书共分 11 章, 计 476 页, 包 括插图 164 幅, 表格 42 件。

本书内容涵盖了中国和东亚季风气候的基本特征、与太平洋和印度洋海温变化相联系的年际-年代际时间尺度上的气候变率,以及利用我国丰富的代用气候环境指标开展的古代(特别是全新世以来)气候变化研究。青藏高原对我国气候形成和变异的影响以及北方干旱化等问题具有显著的中国区域特色,书中为此专门设立了相应章节进行总结和探讨。同时,在极端气候事件、土壤湿度、未来气候变化情景预测以及气候变化对农业、水资源影响和适应对策被日益关注的今天,本书还分别介绍了我国学者在上述领域取得的最新研究成果。

区域气候模式是开展气候变化机理和趋势预测研究的有力工具,本书也介绍了我国发展的区域环境系统集成模式及其应用效果,以及我国科学家发起的亚洲区域模式比较计划的主要进展。

丛书编委会对本书的编写质量给予了充分肯定,认为该书:"第一次全面系统地向国外读者总结了过 去十年来关于中国区域气候变化的最新研究成果。本书的显著特色之一就是将一系列基于先进科技手段, 如野外实验观测和遥感,以及数值模拟研究等获得的关于区域气候变化的知识进行了有机的综合集成,将 极大地促进我们对中国区域气候变化的认识水平"。