

占瑞芬, 李建平. 亚洲夏季平流层-对流层水汽交换年际变化与亚洲夏季风的联系. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3181-3193, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.001.

Zhan R F, Li J P. Relationship of interannual variations of the stratosphere-troposphere exchange of water vapor with the Asian summer monsoon. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(10): 3181-3193, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.001.

亚洲夏季平流层-对流层水汽交换年际变化与 亚洲夏季风的联系

占瑞芬^{1,2}, 李建平²

1 中国气象局上海台风研究所, 中国气象局台风预报技术重点开放实验室, 上海 200030

2 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

摘 要 亚洲地区是物质由对流层向平流层输送的主要通道, 在平流层-对流层交换中扮演着积极的角色. 本文主要利用卫星资料和欧洲中心 ERA40 再分析资料, 借助 Wei 诊断模式研究亚洲地区夏季上对流层-下平流层 (UTLS) 水汽分布和平流层-对流层水汽交换特征, 重点着眼于水汽交换的年际变化, 并探讨其与亚洲夏季风的联系. 结果表明, 季风区 UTLS 水汽较赤道地区偏多, 且通过磁带记录信号的传播, 可穿越对流层顶影响下平流层水汽的多寡. 夏季平流层-对流层水汽交换表现出明显的年际特征, 其年际变化与亚洲季风强弱变化有密切联系, 尤其与南亚夏季风的关系更为显著. 在亚洲夏季风影响下, 亚洲地区出现异常的大气环流和垂直运动, 从而影响平流层-对流层之间水汽的交换. 这些结果对认识其它大气成分的输送过程也具有重要的指示意义.

关键词 平流层-对流层交换, 水汽, 亚洲夏季风, 年际变化

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.001

中图分类号 P421

收稿日期 2011-10-13, 2012-09-04 收修定稿

Relationship of interannual variations of the stratosphere-troposphere exchange of water vapor with the Asian summer monsoon

ZHAN Rui-Fen^{1,2}, LI Jian-Ping²

1 Laboratory of Typhoon Forecast Technique, Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract As the main passage of mass transport from the troposphere to the stratosphere, the Asian monsoon region plays a vital role in the Stratosphere-Troposphere Exchange (STE). This study investigates the distribution and exchange of water vapor in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS), and focuses on the interannual variability of water vapor exchange and its relationship with the Asian summer monsoon, by using the Wei method with satellite data and reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for the period 1958–2001. The results show that the UTLS over the Asian monsoon region is wetter than that over the equator. The STE of water vapor in the Asian monsoon region affects the content of LS water vapor by the propagation of tape recorder. The summer STE of water

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403600)和国家自然科学基金项目(40805040, 41075071)共同资助.

作者简介 占瑞芬, 女, 1979 年生, 副研究员, 博士, 研究方向: 平流层-对流层交换、台风气候等. E-mail: zhanrf@mail.typhoon.gov.cn

vapor has obvious interannual variations besides interdecadal variations. Further analysis shows that the interannual variations of the water vapor exchange are closely related to the Asian summer monsoon, especially to South Asian summer monsoon. The Asian summer monsoon activity largely affects them by triggering the anomalous atmospheric circulation and vertical motion. The results have important implications for understanding the transport of other components in the atmosphere.

Keywords Stratosphere-Troposphere Exchange (STE), Water vapor, Asian summer monsoon, Interannual variation

1 引言

对流层和平流层有着完全不同的热力、动力和化学成分特性,这两个区域之间的物质和化学成分的交换是控制自然和人为排放的化学微量物质对大气成分影响的主要过程,其化学效应还会影响上对流层-下平流层(Upper Troposphere and Lower Stratosphere, UTLS)的辐射通量平衡^[1-5],因而对引起全球气候变化的辐射强迫有重要影响。

20 世纪 40 年代以前,人们普遍认为平流层处于辐射平衡之中,而其化学成分仅仅受到对流层向上扩散的影响^[6],即所谓的一维交换观点。然而在分析平流层极干现象时, Brewer^[6]发现所有进入平流层的空气都必须穿越冷热带对流层顶,在其冻干作用下水汽混合比降低。因此提出平流层-对流层交换的二维图像,即空气穿越热带对流层顶后在平流层向下、向极方向移动,由于质量连续的约束,在热带外是一支进入对流层的返回流。1956 年 Dobson 进一步指出^[7],这种向极、向下的环流与中纬度下平流层臭氧偏高是对应的。这一理论在定性上被后来的大量观测数据所证实^[8],但在量值上与实际不符。为了弥补这一不足, Newell 和 Gould-Stewart^[9]提出了平流层“喷泉”机制,认为进入平流层的空气具有强的地域依赖性和时域锁相,即仅仅是在最冷的地区最冷的时间进入平流层。然而,随着卫星资料的广泛应用和平流层-对流层交换的深入研究,该机制也受到了诸多质疑^[10]。1995 年 Chen^[11]首次强调夏季风环流在平流层-对流层交换中的作用,此后很多工作^[12-16]都指出亚洲季风区/青藏高原是对流层向平流层输送的重要通道。计算表明^[14],在对流层顶附近 7—9 月占热带地区面积 8% 的亚洲季风区/青藏高原地区,其对流层向平流层水汽输送占热带总的净输送的 75%。Evans 等^[17]和 Smith 等^[18]也提出假说,认为季风对流的加强可能

可以部分解释平流层水汽的增加。

国内 STE 研究与国际上对这一问题的关注几乎同步开展,但规模要小得多^[5]。早在 20 世纪 50 年代,赵九章等老一辈科学家就开始关注臭氧探测和平流层研究。周秀骥等^[19]对青藏高原臭氧低值区的发现及其成因研究曾是 1999 年我国十大科学新闻之一。郑向东等^[20]根据大气臭氧探空资料进行研究,指出臭氧分布与天气系统之间的联系;崔宏等^[21]估算了东亚地区一次平流层-对流层交换过程导致的穿越对流层顶的臭氧通量;王卫国等^[22-23]利用 Wei 方法诊断了全球 STE 时空变化特征;而许多学者^[3, 24-28]分析北半球或全球 STE 后强调了亚洲季风区/青藏高原地区的 STE 对全球平流层、对流层交换研究的重要性。进一步,占瑞芬和李建平^[27]指出,亚洲地区 STE 整体上具有明显的年代际变化特征,且其年代际变化主要与青藏高原和西北太平洋大气热源的年代际转型有关。

由上述可知,平流层-对流层交换在地气辐射平衡和光化学反应中具有重要作用,而亚洲地区作为平流层-对流层交换的主要通道,可能在全球气候变化中扮演着积极的角色。这些研究刻画了平流层-对流层交换的关键环节,然而大多或以某些特殊年份进行分析,或对气候态进行研究,对水汽交换的年际变化涉及较少,尤其是其物理成因的研究还尚不多见,平流层-对流层水汽交换的过程与定量化是一个仍未解决的重要问题。为此,本文主要对平流层-对流层水汽交换的年际变化进行分析,并探讨不同季风子系统在其年际变化中的作用,以期对深入认识平流层-对流层交换过程进而对认识全球气候变化有所帮助。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所使用的资料主要有:

(1) 欧洲中期数值天气预报中心 (ECMWF) 1958—2001 年的一日四次和逐月 ERA40 全球再分析资料, 水平格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度, 垂直层选取 1000 hPa 到 10 hPa 共 18 个标准等压面。

(2) 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 1958—2001 年 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的 EXRSST 全球逐月海表温度资料。

(3) 美国宇航局 (NASA) Aqua 卫星携带的大气红外传感器 (AIRS) 提供的上对流层水汽混合比资料。AIRS 在 $3.7 \sim 15.4 \mu\text{m}$ 有 2378 个光谱通道, 其中 $6.23 \sim 7.63 \mu\text{m}$ 和 $3.63 \sim 3.83 \mu\text{m}$ 两个波段共 41 个光谱通道用于湿度反演, AIRS 拥有极高的光谱分辨率, 结合先进的微波探测器 (AMSU), 可以在部分云的条件下对大气做精确的温、湿度廓线反演。AIRS 垂直范围从地面到 50 hPa (约 20 km), 水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬度, 全球共 360×180 个网格点。本文垂直层选取 500 hPa 到 100 hPa 共 7 个标准等压面, 时间选取 2003—2005 年。AIRS 上对流层水汽产品主要是把两个等压面平均的水汽混合比作为较低等压面的数据, 例如 200 hPa 水汽混合比实际上是指 200 hPa 和 150 hPa 两个等压面上水汽混合比的平均值。

(4) 美国高层大气研究卫星 (UARS) 卤素掩星试验 (HALOE) 提供的水汽混合比资料。HALOE 是一个掩星红外临边探测器, 其宽带辐射技术可以从 $6.61 \mu\text{m}$ 光谱通道对 $10 \sim 85 \text{ km}$ 高度进行湿度反演, 水平精度为 $200 \sim 400 \text{ km}$ 。本文选取的垂直层为 $100 \sim 10 \text{ hPa}$, 为了与欧洲中心资料一致, 选取的时段为 1993—2001 年。该数据是轨道数据, 为此我们利用 Cressman 内插函数将其插值到 $24^{\circ} \times 4^{\circ}$ 经纬网格上, 时间也处理成逐月平均。

需要说明的是, AIRS 水汽数据在 $500 \sim 100 \text{ hPa}$ 热带地区与飞机探测和探空气球观测数据的误差在 25% 以内^[29], 在 300 hPa 以下, 大致有 10% 的偏干^[30], 而在 100 hPa 以上则有明显的湿偏差^[31]。Montoux 等^[32]在对 UTLS 中常用的几种卫星观测的水汽资料进行评估后认为, 在 20 km 以上的平流层, HALOE 精度最高; $16 \sim 20 \text{ km}$ 之间精度随高度下降, 偏差大致为 10%; 在上对流层, 由于水汽混合比变化较大, 包括 HALOE 资料在内的遥感观测失去了可靠性, AIRS 观测可信度最高。因此在讨论上对流层水汽分布时, 本文主要利用 AIRS 数据, 而在讨论下平流层水汽分布时, 则主要根据 HALOE 数据。此外, 从下文分析中也可以看出,

两种卫星资料所揭示夏季风的影响是一致的, 即夏季风区水汽均是偏多的。

2.2 平流层-对流层水汽交换的计算方法 (Wei 方法)

根据 Wei 公式^[33], p 坐标系下平流层-对流层空气质量交换公式为:

$$\begin{aligned} F(m) &= \frac{1}{g} \left(-\omega + V_h \cdot \nabla P_{\text{tp}} + \frac{\partial P_{\text{tp}}}{\partial t} \right) \\ &= \left(-\frac{\omega}{g} + \frac{1}{g} V_h \cdot \nabla P_{\text{tp}} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial P_{\text{tp}}}{\partial t} \\ &= F_{\text{AM}} + F_{\text{TM}}, \end{aligned} \quad (1)$$

平流层-对流层水汽交换公式可写为:

$$\begin{aligned} F(q) &= \frac{q}{g} \left(-\omega + V_h \cdot \nabla P_{\text{tp}} + \frac{\partial P_{\text{tp}}}{\partial t} \right) \\ &= \left(-\frac{q\omega}{g} + \frac{q}{g} V_h \cdot \nabla P_{\text{tp}} \right) + \frac{q}{g} \frac{\partial P_{\text{tp}}}{\partial t} \\ &= F_{\text{AQ}} + F_{\text{TQ}}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ω 为垂直速度, V_h 为水平风场, P_{tp} 为对流层顶气压, q 为比湿, g 是重力加速度, $F_{\text{AM}} (F_{\text{AQ}})$ 为空气运动引起的质量 (水汽) 交换, $F_{\text{TM}} (F_{\text{TQ}})$ 为对流层顶运动引起的质量 (水汽) 交换。正值表示对流层向平流层输送, 而负值表示平流层向对流层输送。为减小时空算法上的误差, 本文在利用 (1)、(2) 式时采用了 Siegmund^[34] 提出的平流方案。

应当指出的是, 上述公式对资料的时空分辨率比较敏感, 原因之一是由于平流层-对流层之间存在较小尺度的交换。前人结果表明^[4, 34], 若资料的时空分辨率过粗, 则估算结果虚假偏大。对于时间分辨率, 如果从 3 小时减小到 6 小时, 局地瞬时的通量没有显著变化, 但当进一步减小到 12 小时, 通量将会发生显著变化; 对于水平分辨率, 由 $8^{\circ} \times 10^{\circ}$ 增加到 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 时, 净通量变化一倍, 当进一步增加到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 时, 净通量只变化 10%。因此他们认为如果研究小尺度过程应该采用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、6 小时时空分辨率资料, 但在研究大尺度特征时采用 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、6 小时时空分辨率资料是既经济又合理的。本文就将选取空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间分辨率为 6 小时的 ERA40 全球再分析资料来计算通量, 后处理成相应的时空尺度。

2.3 ERA40 再分析资料集中 UTLS 水汽资料的可靠性分析

考虑到卫星观测的水汽数据年限较短, 且时空连续性很差, 不适合用来研究水汽交换的气候问题, 本文主要利用 ERA40 再分析资料计算平流层-对流层水汽交换。ERA40 的风场和温度场数据同化了大量的观测资料, 可靠性非常高; 但相对来说水汽数据

同化的观测资料较少,通常被认为是模式输出数据^[35],因此在进行通量计算前有必要对其可靠性进行讨论.又因为平流层-对流层水汽交换主要发生在 UTLS 层,且本文关注的是热带和副热带地区,所以下面主要讨论热带和副热带地区 UTLS 水汽的精度.

Oikonomou 和 O'Neill^[36]利用多种卫星资料和飞机探测资料对 ERA40 水汽资料进行了详细地评估.他们指出,在热带和副热带上对流层,ERA40 均较飞机观测偏湿,前者偏湿 20%~30% 左右,后者偏湿幅度为 20%;在热带下平流层,ERA40 较卫星观测偏湿 10%~20%,在副热带地区则是偏干 10%;而在热带对流层顶附近,ERA40 水汽值与 MLS 卫星观测较为一致,前者仅偏湿几个百分比.虽然在数值上 ERA40 水汽数据在 UTLS 地区具有一定的不确定性,但是其空间分布和垂直分布型与卫星观测却较为一致^[36-37],尤其是在亚洲季风区 ERA40 水汽数据与卫星观测数据非常类似^[38].此外,研究表明在年际尺度上 ERA40 资料很好地揭示了 UTLS 水汽与印度夏季风^[34]及 ENSO 之间的关系^[37].

本文主要研究亚洲夏季风强弱对平流层-对流层水汽交换的影响,而并不是关注其交换的绝对值问题,因此从上述分析可知,本文利用 ERA40 的水汽数据进行研究是可行的.

2.4 其它方法

类似于占瑞芬和李建平^[27],本文主要选取对流层顶的热力学定义.此外,本文还使用功率谱分析、9 点高斯滤波、相关分析、合成分析等方法来分别考察水汽交换的年际变化特征、年际尺度上水汽交换和亚洲季风的关系及可能影响机理.其中在探讨不同季风子系统在水汽交换年际变化中的作用之前,我们利用高斯滤波器滤去各要素的年代际变化,仅对 10 年以下周期的年际分量进行讨论.

3 上对流层-下平流层水汽分布特征

图 1 为赤道地区和季风区 HALOE 水汽混合比的时间-高度剖面.与 Mote 等^[39]提出的磁带记录信号(Tape recorder)一致,两个地区下平流层水汽都具有明显的年循环,且冬夏水汽信号随时间呈 e-折指数减弱向上传播,表明通过磁带记录信号的传播水汽交换变化可以影响下平流层水汽的多寡.然而,不同地区传播的速度和到达的高度有所不同.对

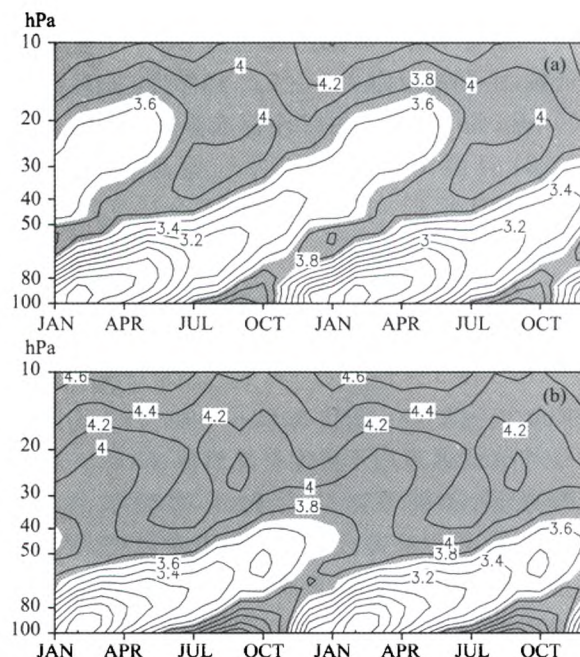


图 1 1993—2001 年沿 40°E—180°E 平均的(a)赤道地区(5°S—5°N)和(b)季风区(10°N—25°N) HALOE 水汽混合比(单位: $\mu\text{L/L}$)的时间-气压剖面(阴影 $\geq 3.7 \mu\text{L/L}$)
Fig. 1 Time-pressure sections of water vapor mixing ratio (unit: $\mu\text{L/L}$) from HALOE satellite data averaged over (a) the equator (5°S—5°N, 40°E—180°E) and (b) the Asian monsoon region (10°N—25°N, 40°E—180°E) for the period 1993—2001. Areas in which the water vapor mixing ratio is more than $3.7 \mu\text{L/L}$ are shaded

于赤道地区(图 1a),2 月份,水汽混合比在 100 hPa 达最小,后干舌随时间向上传播,在滞后大致 7 个月后又上升到 50 hPa 附近,14~15 个月后又到达 20 hPa 左右,后逐渐消失;而 9 月份,水汽混合比在 100 hPa 达最大,大致为 $4.2 \mu\text{L/L}$,且湿舌也随时间向上伸展,其速度与干舌相当.对于季风区(图 1b),冬春季较赤道地区偏干,且干舌传播高度仅到 40 hPa 左右;而夏秋季明显较赤道地区偏湿,且湿舌伸展的高度较高范围较广.

图 2 为 40°E—180°E 平均的夏季上对流层水汽纬度-高度剖面图.可以看出,总体上随着高度升高,水汽迅速减少,且水汽极轴偏向北半球的季风区,即季风区水汽较其它地区偏多.对赤道地区而言,水汽混合比等值线在对流层顶附近密集,且穿越对流层顶之后迅速减小,这与对流层顶强脱水作用有关.值得注意的是,夏季北半球季风区对流层顶较赤道地区更高,对流层顶温度更冷(图略),但是在对流层顶附近,水汽并没有急剧减少,其等值线穿越

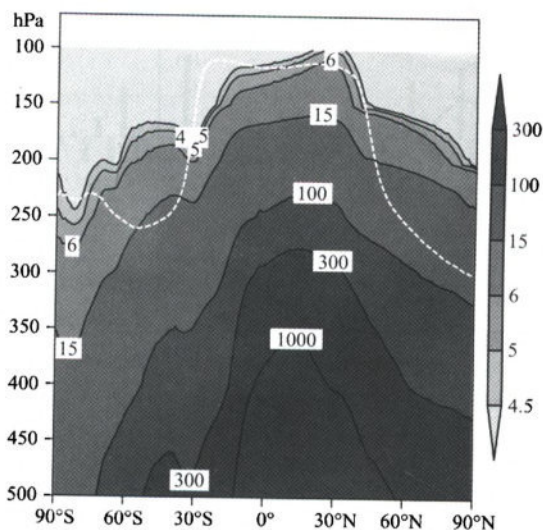


图2 2003—2005年沿40°E—180°E平均的夏季AIRS水汽(实线,单位:μL/L)和对流层顶(粗虚线)的纬度-高度分布

Fig. 2 Latitude-pressure section of water vapor mixing ratio (solid line, unit: $\mu\text{L/L}$) and tropopause (dash-thick line) from AIRS satellite data averaged over 40°E—180°E in boreal summer for the period 2003—2005

对流层顶直接进入到下平流层,即季风区高的水汽分布可以直接跨越对流层顶进入到下平流层.这种分布与另一微量气体HCN的分布基本是类似的,可能与该地区季风活跃、穿越对流层顶的物质输送偏强有关^[40].

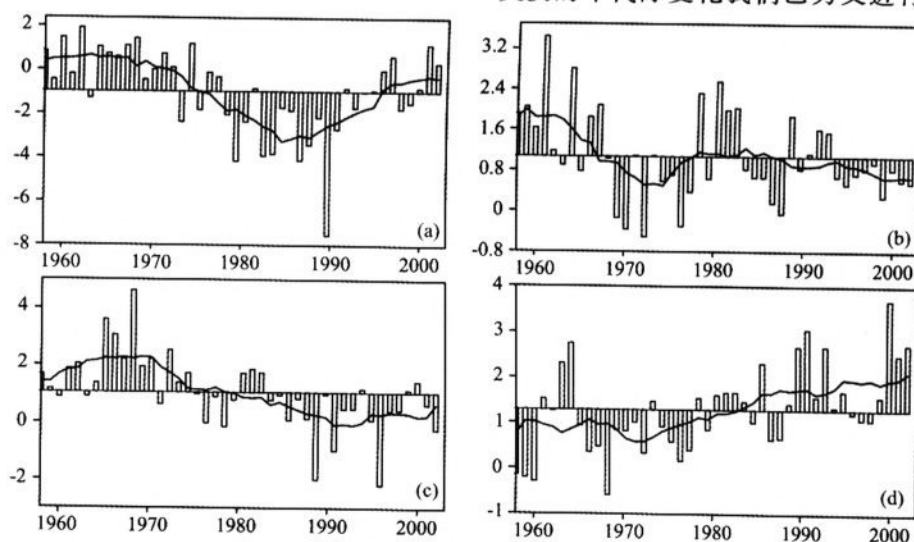


图3 夏季(6—8月)区域平均的平流层-对流层水汽交换(单位: $10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的年际序列(柱图)及11年滑动平均序列(实线). (a)青藏高原(75°E—105°E, 25°N—40°N); (b)南亚(70°E—100°E, 0°—25°N); (c)东亚(110°E—125°E, 20°N—35°N); (d)西北太平洋(120°E—160°E, 10°N—20°N)

Fig. 3 Interannual variability (bar) and 11-yr running mean (solid line) of stratosphere-troposphere exchange (STE) of water vapor in boreal summer (June–August) over (a) the Tibetan Plateau (75°E—105°E, 25°N—40°N), (b) South Asia (70°E—100°E, 0°—25°N), (c) East Asia (110°E—125°E, 20°N—35°N), and (d) the western North Pacific (120°E—160°E, 10°N—20°N). Unit: $10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

4 亚洲季风区平流层-对流层水汽交换的年际变化

亚洲地区可分为以下四个关键区:高原大地形(75°E—105°E, 25°N—40°N)、南亚地区(70°E—100°E, 0°—25°N)、东亚地区(110°E—125°E, 20°N—35°N)和西北太平洋关键地区(120°E—160°E, 10°N—20°N).我们首先分析上述四个区域夏季(6—8月)水汽净交换的时间序列(图3),图中横线为各自44年的平均值,曲线为11年滑动平均结果.由图可见,各个区域夏季平流层-对流层水汽交换具有显著的年际变化和年代际变化,其中前三个区域具有明显的减弱趋势,而西北太平洋关键区水汽交换则具有明显的上升趋势,表明西北太平洋区域在平流层-对流层交换中作用加强,显示出了其独特性,这与文献[27]的结论是一致的.分别对四个区域夏季水汽交换的时间序列进行功率谱分析(图4),可以看到,四个区域除了具有明显的年代际周期外,也具有显著的年际周期,主要集中在2—4年,此外,西北太平洋关键区水汽交换也具有明显的6—10年周期.

以上分析表明,夏季平流层-对流层水汽交换具有显著的年际变化和年代际变化.关于夏季水汽交换的年代际变化我们已另文进行了详细分析^[27],

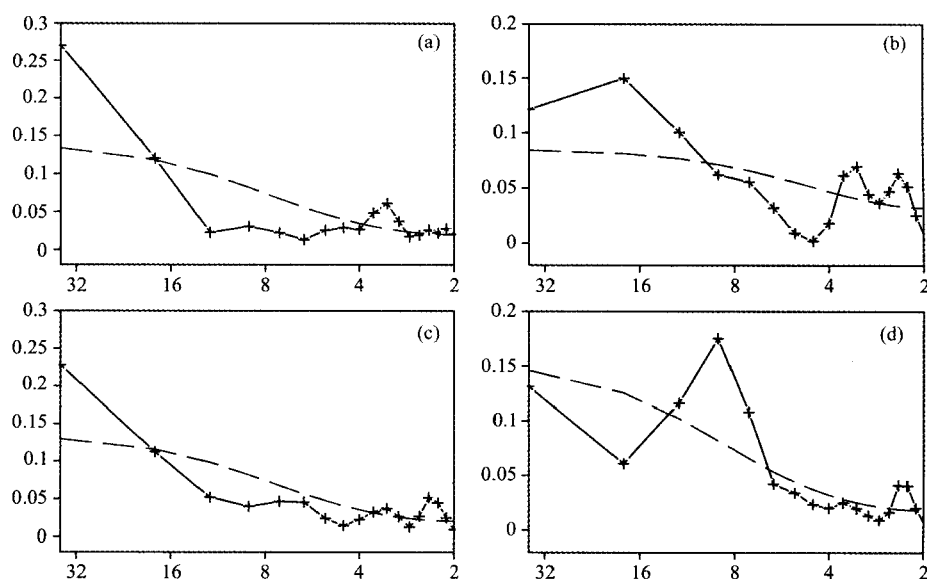


图4 对图3时间序列的功率谱分析. 图中长虚线表示95%置信水平的白噪声检验曲线. 横坐标单位:年

Fig. 4 The power spectra for time series in Fig. 3. The long dashed lines are the 95% confidence curve, and abscissa presents the period of year

这里主要关注其年际变化特征,并试图探讨不同季风子系统在其年际变化中的作用.在分析之前,我们利用高斯滤波器滤去各要素的年代际变化,仅对10年以下周期的年际分量进行讨论.

5 年际尺度上平流层-对流层水汽交换与亚洲夏季风的关系

亚洲夏季风作为全球最显著的季风系统,不仅与亚洲地区天气和气候密切相关,而且也是影响全球大气环流的重要因子之一.那么水汽交换的年际变化与亚洲夏季风强弱之间是否存在内在的联系?如果存在,其影响机理又是什么?下面我们将试图对上述问题作出回答.

5.1 亚洲夏季风指数定义

亚洲季风主要由南亚季风和东亚季风组成,而东亚季风又可分为南海-西太平洋热带季风和东亚副热带季风,其中南海夏季风可以很好地指示东亚副热带夏季风和西北太平洋夏季风.研究表明^[41],南亚季风和东亚季风既有联系又有区别,是亚洲季风系统中两个独立的子系统,因此它们与水汽交换的关系也可能存在异同.本文利用Li和Zeng^[42]定义的南亚季风指数(SASM)和南海季风指数(SCSSM)来探讨年际尺度上水汽交换与亚洲季风强弱之间的关系.南亚夏季风指数定义为夏季

(6—8月)850 hPa面上区域(5°N—22.5°N, 35°E—97.5°E)平均的标准化季节变率;南海夏季风指数定义为夏季(6—8月)925 hPa面上区域(0°—25°N, 100°E—125°E)的标准化季节变率.标准化季节变率 $\delta_{m,n}^*$ 的计算公式为:

$$\delta_{m,n}^* = \frac{\|\bar{\mathbf{V}}_1 - \bar{\mathbf{V}}_{m,n}\|}{\|\bar{\mathbf{V}}\|} - 2, \quad (3)$$

其中 $\bar{\mathbf{V}}_1$ 是1月气候平均风矢量, $\bar{\mathbf{V}}$ 是1月和7月气候平均风矢量的平均, $\bar{\mathbf{V}}_{m,n}$ 是某年(n)某月(m)的月平均风矢.

我们选择上述季风指数进行研究原因有三,其一是该指数能统一表征不同区域季风活动,因此便于比较南亚夏季风和南海夏季风的相对贡献;其二是该指数与其它季风指数有很好的正相关关系,李建平和曾庆存^[43]计算了几个常用季风指数之间的相关,发现该指数的总体表现最好,代表性更高;其三是该指数与全球各海区夏季降水和海平面气压异常有较好的大范围统计相关,因此在区域代表性上可能更优.由NCEP/NCAR再分析资料计算得到的各区域季风指数可以从网页上下载(<http://web.lasg.ac.cn/staff/ljp/index.html>),而本文使用的季风指数是根据(3)式利用ERA40再分析资料计算得到的.

图5为计算得到的南亚夏季风和南海夏季风指数年际分量的标准化时间序列.如果把大于(小于)

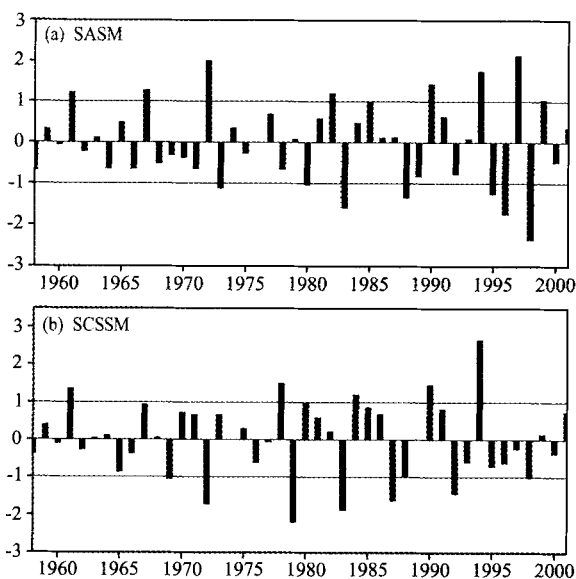


图 5 1958—2001 年(a)南亚夏季风和(b)南海夏季风年际分量的标准化时间序列

Fig. 5 Normalized time series of the interannual components for (a) the South Asian summer monsoon (SASM) and (b) the South China Sea summer monsoon (SCSSM) during 1958—2001

1 个标准化单位的年份作为典型正(负)异常年,则对于南亚季风区典型正异常年共包括 9 年:1961, 1967, 1972, 1982, 1985, 1990, 1994, 1997, 1999; 负异常年共包括 7 年:1973, 1980, 1983, 1988, 1995, 1996, 1998. 对于南海季风区,典型正异常年共包括 6 年:1961, 1978, 1980, 1984, 1990, 1994; 负异常年共包括 8 年:1969, 1972, 1979, 1983, 1987, 1988, 1992, 1998.

5.2 水汽交换与亚洲夏季风的关系

5.2.1 个例分析

由图 5 可见,亚洲夏季风在 1994 年偏强,1995 年偏弱,因此首先选取这两年进行个例分析.图 6 为亚洲季风区 6—9 月平均的 HALOE 水汽混合比高度剖面.可以看到,强季风年 100 hPa 及以上层明显较弱季风年偏湿,偏湿幅度大约在 $0.2 \mu\text{L/L}$. 进一步计算该地区平流层-对流层水汽交换值,发现 1994 年夏季水汽交换通量为 $0.8 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而 1995 年夏季水汽交换通量仅为 1994 年夏季的近一半.也就是说,季风偏强可能有利于季风区上层丰富的水汽穿越对流层顶进入到下平流层,从而使得季风区 UTLS 层水汽含量增加.

5.2.2 相关分析

分别计算年际尺度上南亚夏季风指数和南海夏季风指数与夏季平流层-对流层水汽交换的相关,结

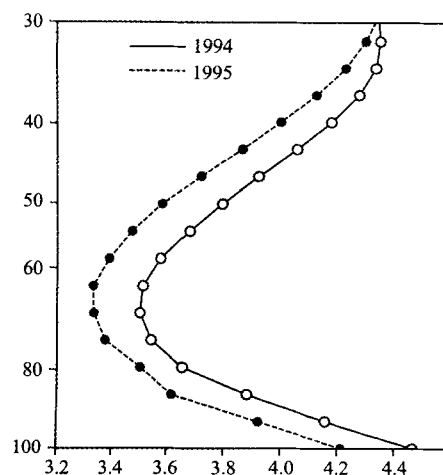


图 6 强弱季风年(1994 年和 1995 年)6—9 月季风区 (10°N — 25°N , 40°E — 180°E)平均的 HALOE 水汽混合比 (单位: $\mu\text{L/L}$)气压剖面

Fig. 6 Vertical sections of water vapor mixing ratio (unit: $\mu\text{L/L}$) from HALOE satellite data averaged over the Asian monsoon region (10°N — 25°N , 40°E — 180°E) in the years 1994 and 1995

果如图 7 所示.从图 7a 可以清楚看到,在年际尺度上南亚夏季风与亚洲大部分地区的水汽交换都具有很好的正相关关系,尤其在印度北部—高原南部、孟加拉湾及 150°E — 160°E , 15°N — 30°N 的西太平洋地区二者正相关尤为显著,表明南亚夏季风偏强有利于这些地区对流层向平流层异常的水汽输送.此外,在阿拉伯海、印度半岛中部、菲律宾北部及东亚大部二者为较强的负相关,表明南亚夏季风增强有利于这些地区平流层水汽的向下输送.从图 7b 可以发现,在年际尺度上,南海夏季风与水汽交换在 130°E 以东的中西太平洋、阿拉伯海及印度西部有大范围的正相关,而在阿拉伯半岛、印度东部—青藏高原、中南半岛东部、菲律宾及其邻近海域以及 30°N 以北的西北太平洋地区为显著的负相关.需要说明的是,我们也计算了东亚夏季风指数与水汽交换的相关(图略),其分布与图 7b 极为类似,表明南海夏季风在水汽输送中的作用与东亚夏季风类似,因此再次验证用南亚季风指数和南海季风指数定量分析亚洲夏季风的作用是合理的.

进一步研究发现,图 7a 与水汽交换年际分量 EOF 分析的第一模态(图略)较为一致,南亚夏季风指数与 EOF 第一特征向量对应的时间系数之间的相关系数可达 0.45,通过了 99% 置信度检验,因此可以认为,在年际尺度上南亚夏季风对夏季平流层-对流层水汽交换的影响最为重要.此外,图 7b 与

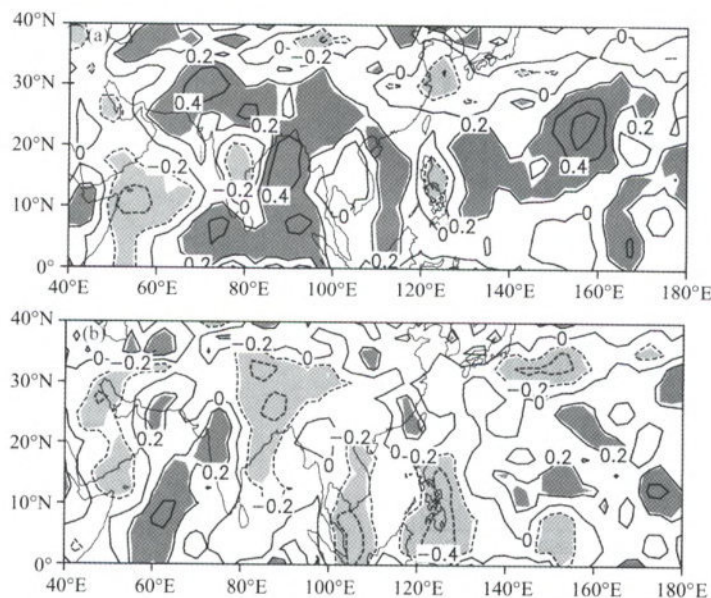


图7 (a)南亚夏季风和(b)南海夏季风年际分量与亚洲地区夏季平流层-对流层水汽交换年际分量的相关分布

深色(浅色)阴影区表示通过95%置信度检验的正(负)相关区。

Fig. 7 Correlations of the summer STE of water vapor over Asia with (a) the SASM and (b) the SCSSM on interannual scale

The positive (negative) correlations significant at 95% confidence level are heavy (light) shaded.

EOF分析第三模态(图略)几乎接近反位相,且南海夏季风指数与第三模态时间系数之间的负相关达到-0.41,也通过了99%置信度检验,因此可以认为,在年际尺度上南海夏季风与水汽交换的关系也是密切的,但是与南亚夏季风相比,其作用明显较弱。

5.3 亚洲夏季风影响水汽交换的可能机制分析

以上分析表明,亚洲地区平流层-对流层水汽交换的年际变化与亚洲夏季风的强弱有密切的关系,尤其与南亚夏季风的关系更为显著,那么,在年际尺度上亚洲夏季风是如何影响水汽交换的?不同季风子系统其影响范围是否具有区域性?下面我们就将进一步分析其可能的影响机制。

5.3.1 南亚夏季风强弱变化对水汽交换年际变化的影响

图8为强、弱南亚夏季风年对应的夏季高低层环流场合成差。由图8a可见,南亚季风异常偏强年,对流层低层从我国华南到热带中太平洋地区维持一强大的异常气旋,而我国江淮流域至日本以东为一异常反气旋,这表明西太平洋副热带高压偏弱偏北,有利于热带西太平洋对流活跃和日本海附近下沉运动的加强。此外,索马里越赤道气流异常加强,经阿拉伯海后向东穿越孟加拉湾和中南半岛,最后进入到热带西太平洋地区,这一环流型有利于这些地区对流层水汽的输送。需要特别注意的是,在

阿拉伯半岛有异常强的偏北风进入到阿拉伯海西岸,将有利于这一地区水汽偏少。在对流层高层(图8b),异常风场最明显的特征就是南亚反气旋增强,且有两个异常中心,一个位于青藏高原上空,一个位于日本海上空。以往研究表明^[16,44],由南亚反气旋引起的对流过射和缓慢上升运动是上对流层物质进入到下平流层的两种有效方式。因此,南亚夏季风偏强时对应的高层异常流场有利于上对流层水汽输送到平流层。

图9a—9c分别为强、弱南亚夏季风年对应的地面~300 hPa垂直积分的水汽通量散度、夏季150 hPa垂直速度($\omega > 0$ 表示下沉运动, $\omega < 0$ 表示上升运动)和垂直积分视热源年际分量的合成差分布。可以看到,南亚夏季风偏强年,水汽通量辐合区(小于0的区域)主要集中在青藏高原、孟加拉湾西北部、南海及10°N—25°N之间的广大中西太平洋一带(图9a),同时这些地区也对应强的异常热源(图9c)和上升运动(图9b)。在这些地区的两侧则为水汽通量辐散区、异常强的冷源区和下沉区。事实上图9a—9c的分布也类似于图7a的相关分布,表明南亚夏季风的加强或减弱对应了季风热源的增强或减弱,而热源的变化能激发出异常的垂直运动、季风环流和水汽辐合辐散,从而有利于水汽向上或向下传输。

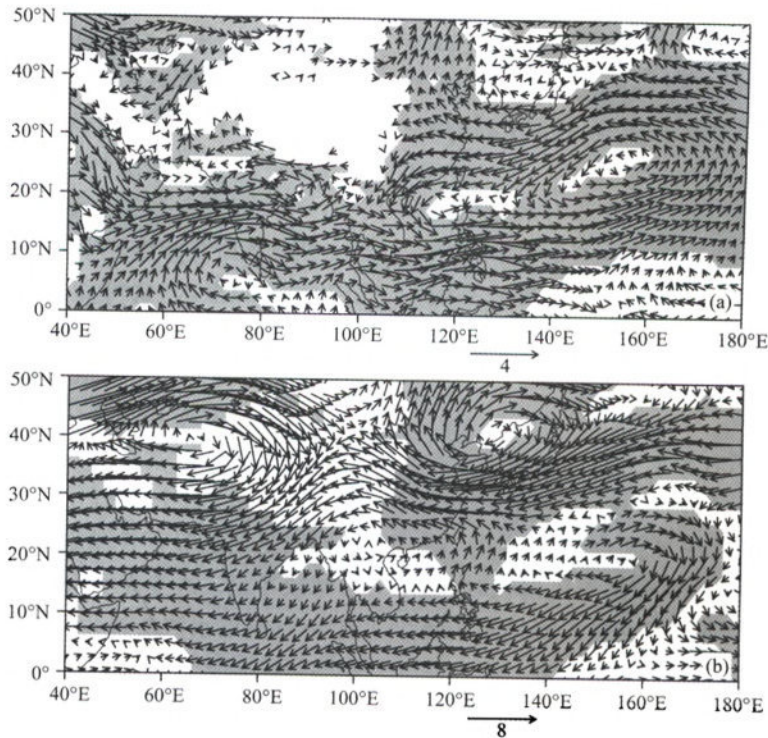


图 8 南亚夏季风强、弱年 (a) 850 hPa 和 (b) 200 hPa 夏季风场年际分量合成差(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
阴影区表示通过 95% 置信度检验的区域。

Fig. 8 Composite differences between strong and weak SASM years in the interannual components of summer wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 850 hPa and (b) 200 hPa
Areas significant at 95% confidence level are shaded.

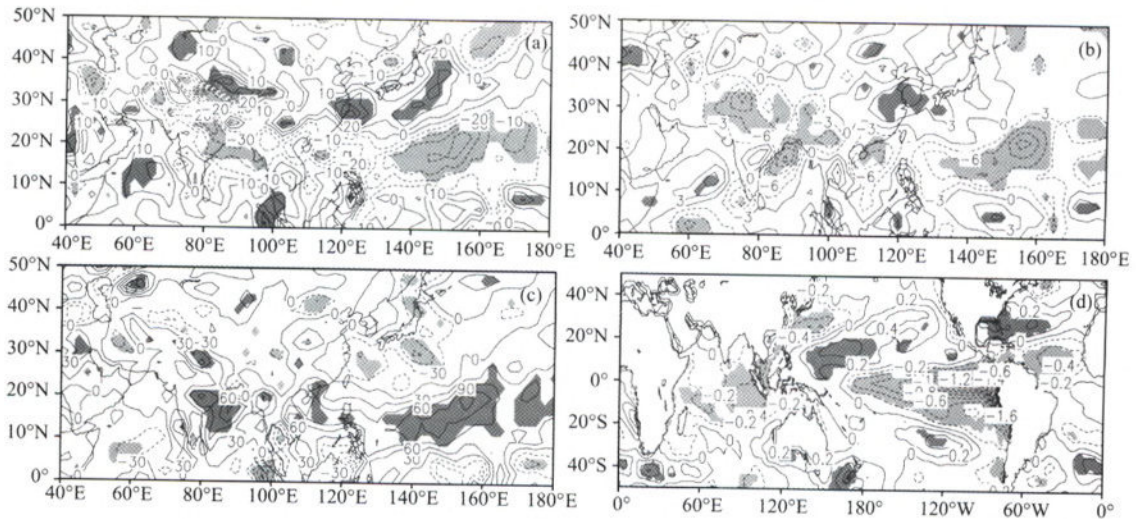


图 9 南亚夏季风强、弱年 (a) 地面~300 hPa 积分的水汽输送通量散度(单位: $10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 150 hPa 夏季垂直速度(单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (c) 夏季视热源 Q_1 (单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 和 (d) 前期(春季)海温(单位: $^{\circ}\text{C}$) 合成差
深色(浅色)阴影区表示通过 95% 置信度检验的正(负)差值区。

Fig. 9 Composite differences between strong and weak SASM years in (a) water vapor flux divergence integrated from surface to 300 hPa (unit: $10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 150 hPa vertical velocity (unit: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (c) the mean atmospheric heat sources anomalies integrated from surface to 100 hPa (Q_1 , unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) in boreal summer, and (d) sea surface temperature anomaly (SSTA) in previous season (spring, unit: $^{\circ}\text{C}$)
Positive (negative) areas significant at 95% confidence level are heavy (light) shaded.

图 9d 为强、弱南亚夏季风前期海温的异常分布。可以看出,强季风年,前期海温为典型的 La Niña

型分布:赤道东太平洋海表温度异常偏冷,而赤道西太平洋地区异常偏暖,西太平洋暖池热源加强。此

外印度洋和中国邻近海域异常偏冷, 结果有利于海陆热力差异增大. 事实上, 研究表明这种海温分布型确实是有利于随后南亚夏季风的增强和相应海域热源的加强或减弱^[45].

总之, 前期海温为 La Niña 型分布有利于南亚夏季风的增强, 结果激发出异常的垂直运动和大气环流, 影响水气的水平和垂直输送, 最终影响平流层-对流层之间水气的交换.

5.3.2 南海夏季风强弱变化对水汽交换年际变化的影响

南海夏季风强弱变化对水汽交换年际变化也有一定的影响. 类似地, 我们给出了强、弱南海夏季风年对应的夏季对流层高低层环流合成差值场(图 10). 低层风场显示(图 10a), 南海夏季风偏强时, 从中国东部到热带西太平洋地区有一强大的异常气旋存在, 而此气旋以北为一异常反气旋环流. 这表明南海季风槽加强, 而副高偏弱偏北. 高层风场(图 10b)则显示在 30°N 以北为一异常反气旋, 且中心主要位于东亚地区.

图 11a—11c 为强、弱南海夏季风年对应的地面~300 hPa 垂直积分的水汽通量散度、夏季 150 hPa 垂直速度和垂直积分视热源年际分量的合成差分布.

由图可见, 南海夏季风增强时, 我国华南地区—菲律宾以东洋面为显著的水汽辐合、异常上升和热源区, 尤其是在菲律宾以东洋面, 热源非常显著, 因而有利于在这一地区激发出气旋性异常环流、上升运动和产生水汽辐合. 而在青藏高原、印度东部—孟加拉湾、中南半岛及赤道西太平洋地区为显著的异常下沉和水汽辐散区, 这可能与这些地区异常冷源分布有关. 将图 11a—11c 和图 7b 的相关分布进行比较, 不难发现异常热源激发出的气旋和上升运动大致对应着强的正相关区, 而冷源激发出的异常反气旋和下沉运动基本对应着显著的负相关区. 此外需要注意的是, 图 11a—11c 除了 80°E 以东, 25°N 以南地区是通过显著性检验, 其它通过显著性检验的区域较零星. 这些表明南海夏季风热源的变化对平流层-对流层水汽交换也具有重要作用, 尤其是中南半岛以东地区其作用较显著, 而以西地区作用较弱, 进一步说明了南海夏季风的影响具有局地性.

图 11d 给出的是强、弱南海夏季风年前期海温的异常分布. 从图中可以看出, 前期海温主要表现为弱的 La Niña 型分布, 并且印度洋和中国东部海域为负海温距平. 菲律宾以东洋面为正海温距平, 这个地区正好对应着夏季的强热源区, 而南赤道印

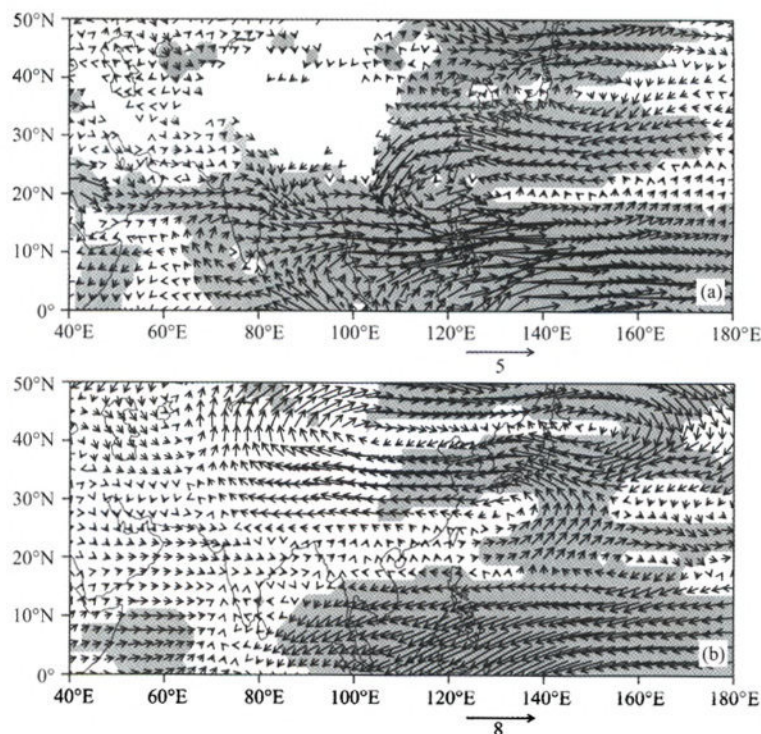


图 10 同图 8, 但为南海夏季风强弱年风场合成差

Fig. 10 The same as Fig. 8, but for composite differences between strong and weak SCSSM years in wind fields

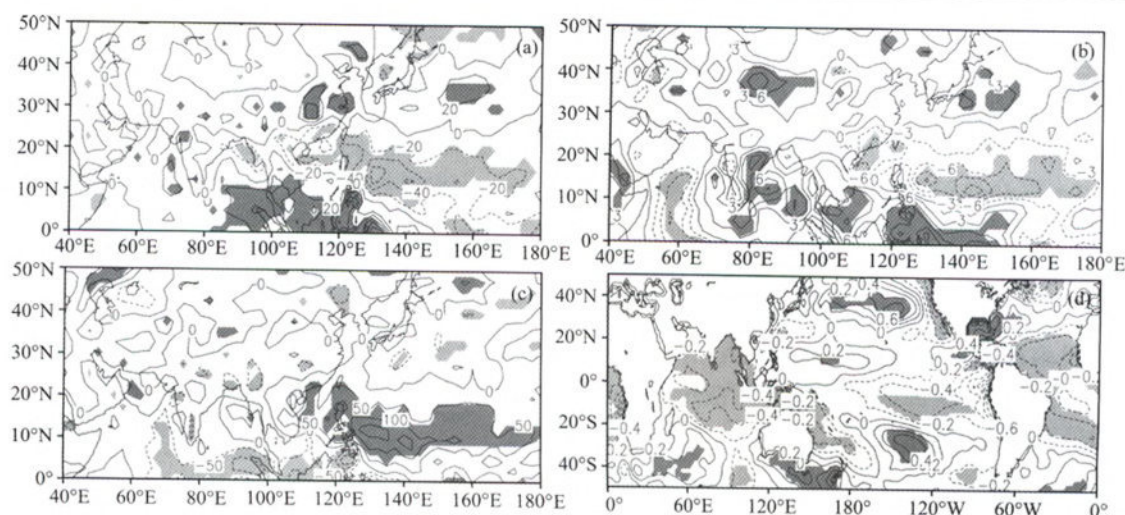


图 11 同图 9, 但为南海夏季风强弱年合成差场

Fig. 11 The same as Fig. 9, but for composite differences between strong and weak SCSSM years

度洋—南赤道西太平洋的负海温距平则对应了夏季强的冷源区。这表明前期海温异常导致异常冷热源的存在,并且冷源和热源可一直维持到夏季,使南海夏季风加强或减弱,从而通过改变低层环流和高层垂直运动对平流层-对流层水汽交换产生重要影响。

总之,在年际尺度上南亚夏季风和南海夏季风的强弱变化对亚洲地区夏季水汽交换都有重要作用,但具体来说,南亚夏季风的作用更为显著,且影响的范围较广;南海夏季风作用稍弱,且其作用范围仅限于中南半岛以东地区,具有一定的局地性。亚洲夏季风对水汽交换的影响机制大致如图 12 所示,可以概括为:前期海温为 La Niña 型分布有利于相应地区热源的变化,春季到夏季热源的维持使得随后南亚夏季风和南海夏季风增强,在不同的亚洲夏季风子系统影响下,亚洲地区出现异常的垂直运动和大气环流,从而影响平流层-对流层之间水汽的交换。在西太平洋地区,南亚夏季风和南海夏季风的作用一致,均有利于该地区 5°—25°N 范围内向上水汽交换的加强;而在中南半岛以西地区,水汽交换主要受南亚夏季风影响。

6 结论和讨论

本文对亚洲地区夏季平流层-对流层水汽分布及水汽交换特征进行了分析,重点着眼于年际尺度,并探讨了其与亚洲夏季风的联系。结果表明,通过磁带记录信号的传播水汽交换变化可以影响下平流层水汽的多寡,且季风区下平流层-上对流层水汽均较赤道地区偏多。

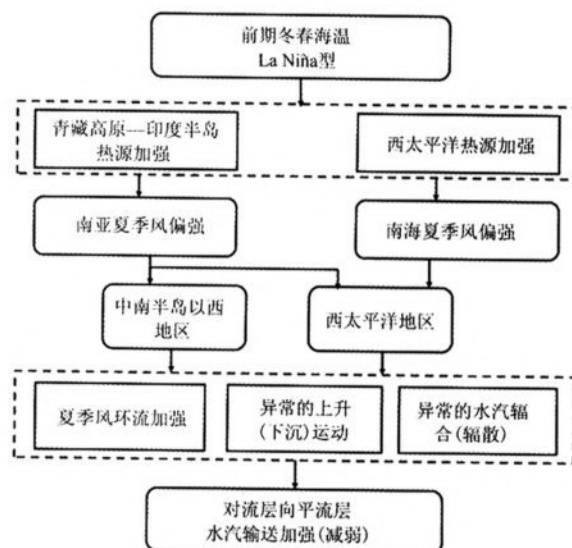


图 12 亚洲夏季风影响平流层-对流层水汽交换机制示意图

Fig. 12 Schematic diagram showing the modulation of the summer Asian monsoon in the STE

在年际尺度上,水汽交换与亚洲季风强弱变化有密切联系,尤其与南亚夏季风的关系更为显著。南亚夏季风与亚洲大部分地区的水汽交换都具有很好的正相关关系,尤其在印度北部—高原南部、孟加拉湾及 150°E—160°E, 15°N—30°N 的西太平洋地区二者正相关尤为显著;南海夏季风与水汽交换在 130°E 以东的中西太平洋、阿拉伯海及印度西部有大范围的正相关,而在阿拉伯半岛、印度东部—青藏高原、中南半岛东部、菲律宾及其邻近海域以及 30°N 以北的西北太平洋地区为显著的负相关。亚洲夏季风影响水汽交换的可能机制为:前期海温为 La Niña 型分布有利于相应地区热源的变化,而热源从春季到夏季的维持使得随后南亚夏季风和南海夏季

风增强,在强的亚洲夏季风影响下,亚洲地区出现异常的垂直运动和大气环流,从而影响平流层-对流层之间水汽的交换.在西太平洋地区,南亚夏季风和南海夏季风的作用一致,均有利于该地区 5°N — 25°N 范围内向上水汽交换的加强;而在中南半岛以西地区,水汽交换主要受南亚夏季风影响.

应该看到,虽然本文对亚洲地区夏季平流层-对流层水汽交换的年际变化及可能影响机理进行了研究,但还有很多重要问题值得进一步深入.例如,影响中高纬地区水汽交换的因子是什么?在外强迫上本文仅分析了前期海温的影响,事实上,其它外强迫,如青藏高原积雪、海冰等对亚洲季风环流的年际变化也有重要的作用,因此亚洲地区水汽交换的影响机理还需要进一步深入及利用模式作进一步验证.

致谢 感谢两位匿名审稿人为本文的修改提出了宝贵意见.

参考文献(References)

- [1] Ramaswamy V, Schwarzkopf M D, Shine K P. Radiative forcing of climate from halocarbon-induced global stratospheric ozone loss. *Nature*, 1992, 355(6363): 810-812.
- [2] Toumi R, Bekki S, Law K S. Indirect influence of ozone depletion on climate forcing by clouds. *Nature*, 1994, 372(6504): 348-351.
- [3] 丛春华, 李维亮, 周秀骥. 青藏高原及其邻近地区上空平流层-对流层之间大气的质量交换. *科学通报*, 2001, 46(22): 1914-1918.
Cong C H, Li W L, Zhou X J. Regional mass exchange between stratosphere and troposphere over Tibetan and neighborhood area. *Chin. Sci. Bull.* (in Chinese), 2001, 46(22): 1914-1918.
- [4] 杨健, 吕达仁. 2000 年北半球平流层、对流层质量交换的季节变化. *大气科学*, 2004, 28(2): 294-300.
Yang J, Lü D R. Diagnosed seasonal variation of stratosphere-troposphere exchange in the northern hemisphere by 2000 data. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, 28(2): 294-300.
- [5] 陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望. *大气科学*, 2006, 30(5): 813-820.
Chen H B, Bian J C, Lü D R. Advances and prospects in the study of stratosphere-troposphere exchange. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, 30(5): 813-820.
- [6] Brewer A W. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1949, 75(326): 351-363.
- [7] Dobson G M B. Origin and distribution of the polyatomic molecules in the atmosphere. *Proc. Roy. Soc. London A*, 1956, 236(1205): 187-193.
- [8] Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, 1995, 33(4): 403-439.
- [9] Newell R E, Gould-Stewart S. A stratospheric fountain. *J. Atmos. Sci.*, 1981, 38(12): 2789-2796.
- [10] Rosenlof K H. How water enters the stratosphere. *Science*, 2003, 302(5651): 1691-1692.
- [11] Chen P. Isentropic cross-tropopause mass exchange in the extratropics. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(D8): 16661-16673.
- [12] Dethof A, O'Neill A, Slingo J M, et al. A mechanism for moistening the lower stratosphere involving the Asian summer monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, 125(556): 1079-1106.
- [13] Bannister R N, O'Neill A, Gregory A R, et al. The role of the S. E. Asian Monsoon and other seasonal features in creating the 'tape recorder' signal in the unified model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2003, 130(599): 1531-1554.
- [14] Gettelman A, Kinnison D E, Dunkerton T J, et al. The impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: D22101, doi: 10.1029/2004JD004878.
- [15] Fu R, Hu Y L, Wright J S, et al. Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2006, 103(15): 5664-5669.
- [16] Park M, Randel W J, Gettelman A, et al. Transport above the Asian summer monsoon anticyclone inferred from Aura MLS tracers. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112: D16309, doi: 10.1029/2006JD008294.
- [17] Evans S J, Toumi R, Harries J E, et al. Trends in stratospheric humidity and the sensitivity of ozone to these trends. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D8): 8715-8725.
- [18] Smith C A, Toumi R, Haigh J D. Seasonal trends in stratospheric water vapour. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(12): 1687-1690.
- [19] 周秀骥, 罗超, 李维亮等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. *科学通报*, 1995, 40(15): 1396-1398.
Zhou X J, Luo C, Li W L, et al. Variation of total ozone over China and the Tibetan Plateau low center. *Chin. Sci. Bull.* (in Chinese), 1995, 40(15): 1396-1398.
- [20] 郑向东, 李维亮, 周秀骥等. 臭氧垂直分布个例观测中次峰现象的诊断分析. *自然科学进展*, 2001, 11(11): 1181-1185.
Zheng X D, Li W L, Zhou X J, et al. Diagnostic analysis of subpeaks in the ozone profile measurements. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2001, 11(11): 1181-1185.
- [21] 崔宏, 赵春生, 秦瑜等. 一次平流层对流层交换过程中臭氧通量的估算. *科学通报*, 2004, 49(5): 506-513.
Cui H, Zhao C S, Qin Y, et al. An estimation of ozone flux in a stratosphere-troposphere exchange event. *Chin. Sci. Bull.* (in Chinese), 2004, 49(5): 506-513.
- [22] 王卫国, 樊雯璇, 金建德等. 全球穿越对流层顶质量通量的时空变化特征. *高原气象*, 2007, 26(5): 910-920.
Wang W G, Fan W X, Jin J D, et al. The characteristics of spatial-temporal variations of the global cross-tropopause

- mass flux. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, 26(5): 910-920.
- [23] 王卫国, 樊雯璇, 吴润等. 全球平流层-对流层之间臭氧通量的时空演变研究. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1595-1607.
Wang W G, Fan W X, Wu J, et al. A study of spatial-temporal evolvement of the global cross-tropopause ozone mass flux. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6): 1595-1607.
- [24] Zhan R, Li J, Gettelman A. Intraseasonal variations of upper tropospheric water vapor in Asian monsoon region. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, 6(4): 8069-8095.
- [25] 郭冬, 吕达人, 孙照渤. 全球平流层-对流层质量交换的季节变化特征. *自然科学进展*, 2007, 17(10): 1391-1400.
Guo D, Lü D R, Sun Z B. Seasonal variation of global stratosphere-troposphere mass exchange. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2007, 17(10): 1391-1400.
- [26] 占瑞芬, 李建平. 青藏高原地区大气红外探测器(AIRS)资料质量检验及揭示的上对流层水汽特征. *大气科学*, 2008, 32(2): 242-260.
Zhan R F, Li J P. Validation and characteristics of upper tropospheric water vapor over the Tibetan plateau from AIRS satellite retrieval. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2008, 32(2): 242-260.
- [27] 占瑞芬, 李建平. 青藏高原和热带西北太平洋大气热源在亚洲地区夏季平流层-对流层水汽交换的年际变化中的作用. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2008, 38(8): 1028-1040.
Zhan R F, Li J P. Influence of atmospheric heat sources over the Tibetan Plateau and the tropical western North Pacific on the inter-decadal variations of the stratosphere-troposphere exchange of water vapor. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2008, 38(8): 1028-1040.
- [28] 陈斌, 徐祥德, 卞建春等. 夏季亚洲季风区对流层向平流层输送的源区、路径及其时间尺度的模拟研究. *大气科学*, 2010, 34(3): 495-505.
Chen B, Xu X D, Bian J C, et al. Sources, pathways and timescales for the troposphere to stratosphere transport over Asian monsoon regions in boreal summer. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2010, 34(3): 495-505.
- [29] Hagan D E, Webster C R, Farmer C B, et al. Validating AIRS upper atmosphere water vapor retrievals using aircraft and balloon in-situ measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31(21): L21103, doi: 10.1029/2004GL020302.
- [30] Tobin D C, Revercomb H E, Knuteson R O, et al. Atmospheric radiation measurement site atmospheric state best estimates for Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapour retrieval validation. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: D09S14, doi: 10.1029/2005JD006103.
- [31] Gettelman A, Weinstock E M, Fetzer E J, et al. Validation of Aqua satellite data in the upper troposphere and lower stratosphere with in-situ aircraft instruments. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31(22): L22107, doi: 10.1029/2004GL020730.
- [32] Montoux N, Hauchecorne A, Pommereau J P, et al. Evaluation of balloon and satellite water vapour measurements in the Southern tropical and subtropical UTLS during the HIBISCUS campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, 9(14): 5299-5319.
- [33] Wei M Y. A new formulation of the exchange of mass and trace constituents between the stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 1987, 44(20): 3079-3086.
- [34] Siegmund P C, Velthoven P F J van, Kelder H. Cross-tropopause transport in the extratropical northern winter hemisphere, diagnosed from high-resolution ECMWF data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, 122(536): 1921-1941.
- [35] Trenberth K T, Fasullo J, Smith L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Clim. Dynam.*, 2005, 24(7-8): 741-758.
- [36] Oikonomou E K, O'Neill A. Evaluation of ozone and water vapor fields from the ECMWF reanalysis ERA-40 during 1991-1999 in comparison with UARS satellite and MOZAIC aircraft observations. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: D14109, doi: 10.1029/2004JD005341.
- [37] Xie F, Tian W, Austin J, et al. The effect of ENSO activity on lower stratospheric water vapor. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11(2): 4141-4166.
- [38] Kunze M, Braesicke P, Langematz U, et al. Influences of the Indian summer monsoon on water vapor and ozone concentrations in the UTLS as simulated by Chemistry-Climate Models. *J. Climate*, 2010, 23(13): 3525-3544.
- [39] Mote P W, Rosenlof K H, McIntyre M E, et al. An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(D2): 3989-4006.
- [40] Randel W J, Park M, Emmons L, et al. Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere. *Science*, 2010, 328(5978): 611-613.
- [41] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asia summer monsoon over China. // Chang C P, Krishnamurti T N eds. *Monsoon Meteorology*. New York: Oxford University Press, 1987: 50-92.
- [42] Li J P, Zeng Q C. A unified monsoon index. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(8): 1274, doi: 10.1029/2001GL013874.
- [43] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系. *气候与环境研究*, 2005, 10(3): 351-365.
Li J P, Zeng Q C. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10(3): 351-365.
- [44] Dessler A E, Sherwood S C. Effect of convection on the summertime extratropical lower stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: D23301, doi: 10.1029/2004JD005209.
- [45] Slingo J M, Annamalai H. The El Niño of the century and the response of the Indian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, 128(6): 1778-1797.

(本文编辑 何 燕)

作者: 占瑞芬, 李建平, ZHAN Rui-Fen, LI Jian-Ping
作者单位: 占瑞芬, ZHAN Rui-Fen(中国气象局上海台风研究所, 中国气象局台风预报技术重点开放实验室, 上海 200030; 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), 李建平, LI Jian-Ping(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)
刊名: 地球物理学报 **ISTIC SCI PKU**
英文刊名: Chinese Journal of Geophysics
年, 卷(期): 2012, 55(10)
被引用次数: 1次

参考文献(45条)

1. Ramaswamy V; Schwarzkopf M D; Shine K P Radiative forcing of climate from halocarbon-induced global stratospheric ozone loss 1992(6363)
2. Toumi R; Bekki S; Law K S Indirect influence of ozone depletion on climate forcing by clouds 1994(6504)
3. 丛春华; 李维亮; 周秀骥 青藏高原及其邻近地区上空平流层-对流层之间大气的质量交换[期刊论文]-科学通报 2001(22)
4. 杨健; 吕达仁 2000年北半球平流层、对流层质量交换的季节变化[期刊论文]-大气科学 2004(02)
5. 陈洪滨; 卞建春; 吕达仁 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望[期刊论文]-大气科学 2006(05)
6. Brewer A W Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere 1949(326)
7. Dobson G M B Origin and distribution of the polyatomic molecules in the atmosphere 1956(1205)
8. Holton J R; Haynes P H; McIntyre M E Stratosphere-troposphere exchange 1995(04)
9. Newell R E; Gould-Stewart S A stratospheric fountain 1981(12)
10. Rosenlof K H How water enters the stratosphere[外文期刊] 2003(5651)
11. Chen P Isentropic cross-tropopause mass exchange in the extratropics[外文期刊] 1995(08)
12. Dethof A; O'Neill A; Slingo J M A mechanism for moistening the lower stratosphere involving the Asian summer monsoon 1999(556)
13. Bannister R N; O'Neill A; Gregory A R The role of the S.E Asian Monsoon and other seasonal features in creating the 'tape recorder' signal in the unified model 2003(599)
14. Gettelman A; Kinnison D E; Dunkerton T J The impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere 2004
15. Fu R; Hu Y L; Wright J S Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau[外文期刊] 2006(15)
16. Park M; Randel W J; Gettelman A Transport above the Asian summer monsoon anticyclone inferred from Aura MLS tracers 2007
17. Evans S J; Toumi R; Harries J E Trends in stratospheric humidity and the sensitivity of ozone to these trends 1998(08)
18. Smith C A; Toumi R; Haigh J D Seasonal trends in stratospheric water vapour[外文期刊] 2000(12)
19. 周秀骥; 罗超; 李维亮 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心[期刊论文]-科学通报 1995(15)
20. 郑向东; 李维亮; 周秀骥 臭氧垂直分布个例观测中次峰现象的诊断分析[期刊论文]-自然科学进展 2001(11)
21. 崔宏; 赵春生; 秦瑜 一次平流层对流层交换过程中臭氧通量的估算 2004(05)
22. 王卫国; 樊雯璇; 金建德 全球穿越对流层顶质量通量的时空变化特征[期刊论文]-高原气象 2007(05)
23. 王卫国; 樊雯璇; 吴润 全球平流层-对流层之间臭氧通量的时空演变研究[期刊论文]-地球物理学报 2006(06)
24. Zhan R; Li J; Gettelman A Intraseasonal variations of upper tropospheric water vapor in Asian monsoon region 2006(04)

25. 郭冬;吕达人;孙照渤 [全球平流层、对流层质量交换的季节变化特征](#)[期刊论文]-[自然科学进展](#) 2007(10)
26. 占瑞芬;李建平 [青藏高原地区大气红外探测器\(AIRS\)资料质量检验及揭示的上对流层水汽特征](#)[期刊论文]-[大气科学](#) 2008(02)
27. 占瑞芬;李建平 [青藏高原和热带西北太平洋大气热源在亚洲地区夏季平流层-对流层水汽交换的年代际变化中的作用](#)[期刊论文]-[中国科学d辑](#) 2008(08)
28. 陈斌;徐祥德;卞建春 [夏季亚洲季风区对流层向平流层输送的源区、路径及其时间尺度的模拟研究](#)[期刊论文]-[大气科学](#) 2010(03)
29. Hagan D E;Webster C R;Farmer C B [Validating AIRS upper atmosphere water vapor retrievals using aircraft and balloon in-situ measurements](#) 2004(21)
30. Tobin D C;Revercomb H E;Knuteson R O [Atmospheric radiation measurement site atmospheric state best estimates for Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapour retrieval validation](#) 2006
31. Gettelman A;Weinstock E M;Fetzer E J [Validation of Aqua satellite data in the upper troposphere and lower stratosphere with in-situ aircraft instruments](#) 2004(22)
32. Montoux N;Hauchecorne A;Pommereau J P [Evaluation of balloon and satellite water vapour measurements in the Southern tropical and subtropical UTLS during the HIBISCUS campaign](#) 2009(14)
33. Wei M Y [A new formulation of the exchange of mass and trace constituents between the stratosphere and troposphere](#) 1987(20)
34. Siegmund P C;Velthoven P F J van;Kelder H [Crosstropopause transport in the extratropical northern winter hemisphere, diagnosed from high-resolution ECMWF data](#) 1996(536)
35. Trenberth K T; Fasullo J; Smith L [Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor](#) 2005(7-8)
36. Oikonomou E K; O'Neill A [Evaluation of ozone and water vapor fields from the ECMWF reanalysis ERA-40 during 1991-1999 in comparison with UARS satellite and MOZAIC aircraft observations](#) 2006
37. Xie F; Tian W; Austin J [The effect of ENSO activity on lower stratospheric water vapor](#) 2011(02)
38. Kunze M; Braesicke P; Langematz U [Influences of the Indian summer monsoon on water vapor and ozone concentrations in the UTLS as simulated by ChemistryClimate Models](#) 2010(13)
39. Mote P W; Rosenlof K H; McIntyre M E [An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor](#)[外文期刊] 1996(D2)
40. Randel W J; Park M; Emmons L [Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere](#) 2010(5978)
41. Tao S Y; Chen L X [A review of recent research on the East Asia summer monsoon over China](#) 1987
42. Li J P; Zeng Q C [A unified monsoon index](#)[外文期刊] 2002(08)
43. 李建平;曾庆存 [一个新的季风指数及其年际变化与雨量的关系](#)[期刊论文]-[气候与环境研究](#) 2005(03)
44. Dessler A E; Sherwood S C [Effect of convection on the summertime extratropical lower stratosphere](#) 2004
45. Slingo J M; Annamalai H [The El Niño of the century and the response of the Indian summer monsoon](#) 2000(06)

引证文献(1条)

1. 刘诚. 白文广. 张兴赢. 张鹏 [针对SCIAMACHY探测器问题的CO₂柱浓度反演算法改进与地基验证](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2013(3)

引用本文格式: 占瑞芬. 李建平. ZHAN Rui-Fen. LI Jian-Ping [亚洲夏季平流层-对流层水汽交换年际变化与亚洲夏季风的联系](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2012(10)