

影响华北盛夏降水的水汽路径客观定量化的研究*

叶敏¹⁾ 吴永萍^{1)†} 周杰¹⁾ 吴浩¹⁾ 涂钢²⁾

1) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) (吉林省气象科学研究所, 中高纬度环流系统与东亚季风开放实验室, 长春 130062)

(2013年10月17日收到; 2014年3月10日收到修改稿)

基于1951—2011年美国气象环境预报中心/美国国家大气研究中心再分析资料以及国家气候中心提供的中国160站月平均降水资料, 定义垂直于某一截面的平均水汽通量为描述水汽路径强度的客观化指标, 计算发现与华北降水密切相关的水汽路径有5条: 孟加拉湾水汽路径、太平洋水汽路径、西南和东南汇合水汽路径(以下简称汇合水汽路径)、由西输入水汽路径以及南海水汽路径. 研究表明, 汇合水汽路径、由西输入水汽路径及南海水汽路径有明显的年代际变化, 这种年代际变化是与华北盛夏降水量的年代际变化基本一致的. 通过滑动相关分析可以发现, 对华北盛夏降水产生影响的主要是由西输入水汽路径, 这可能是受西风带的影响. 通过合成分析的结果同样表明由西输入华北的水汽输送增强时, 伴随着太平洋水汽路径的输送明显增强, 绕过了华南和长江中下游直接输送至华北和东北, 从而引起华北和东北的降水量偏多; 虽然其他水汽路径对华北盛夏降水的影响相对比较小, 但是2000年开始, 孟加拉湾水汽路径对华北盛夏降水的影响逐渐增强.

关键词: 降水, 水汽路径, 水汽输送

PACS: 92.70.Ly

DOI: 10.7498/aps.63.129201

1 引言

华北地区夏季持续干旱会对工农业生产带来重要影响, 对华北降水的研究具有极其重要的意义^[1-3]. 华北地区夏季降水的气候背景十分复杂^[4-6], 目前已有不少对华北地区旱涝的成因分析^[7-9], 它不仅与中高纬大气环流异常有关^[10,11], 同时与热带环流以及季风异常也有很大关系. 华北地区降水的年际和年代际变化都非常明显^[12-15]. 在年代际时间尺度上, 20世纪50年代到1964年华北降水处于偏多阶段, 20世纪70年代末以来处于偏少阶段^[16,17]. 陆日宇^[18]分析了华北汛期降水量的年际变化对应的环流和海温异常, 发现海温异常在赤道东太平洋有显著的信号, 而且华北汛期降水和赤道东太平洋海温对应的东

亚高空急流变化具有明显的相似性. 一般认为, 影响中国夏季降水的水汽主要来自孟加拉湾、南海越赤道气流和西太平洋的水汽输送^[19], 因此也可以从水汽输送的角度来研究影响华北地区盛夏降水量的水汽路径. 吴永萍等^[20,21]分析了塔里木盆地的水汽输送与降水及当地地形的关系, 研究表明该区降水与垂直方向的水汽输送存在较一致的明显上升趋势. 汤绪等^[22]的研究指出降水场、比湿场、风场、水汽输送场所描述的东亚夏季风边缘带位置基本一致, 大致沿西南-东北走向自西向东经过黄河上游-河套-华北北部-东北. 梁萍等^[23]认为来源于西太平洋及高纬西风带的水汽输送对华北的暴雨产生重要的作用, 而来自孟加拉湾的水汽输送对暴雨也存在一定的影响. 蔡英等^[24]的研究指出, 华北湿年的水汽场主要表现为来自南海和东海的强水汽输送带. 此外, 刘芸

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB955902, 2013CB430204)、国家自然科学基金(批准号: 41175067, 41105055, 41175084, 41375079)、公益性行业科研专项(批准号: GYHY201106016)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(批准号: CXLX13_894)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wuyup1888@sina.com

芸和丁一汇^[25]研究了印度夏季风与中国华北降水的遥相关,结果表明,来自低纬的西南风水汽输送和源自西太平洋的副热带高压南侧的东南风水汽输送共同作用,有利于华北地区降水偏多. 郝立生等^[26]的研究结果表明,影响华北夏季降水的主要是西南风水汽通道、东南风水汽通道和偏西风水汽通道. 此外, Simmonds等^[27]及田红等^[28]的研究则强调了中纬度西风带的水汽输送对华北降水的作用. 目前关于水汽路径与降水关系的研究已有不少工作^[29-35],周晓霞等^[36]已对与降水相关的水汽输送特征及其与华北汛期降水的影响进行了研究,并将水汽通道分为经向通道和纬向通道来分析,发现不同的水汽通道对华北降水的影响区域不同,通过对整层水汽EOF分析(经验正交分析)^[37],结果表明华北汛期水汽主要来自亚洲季风水汽输送,其次是西风带的水汽输送,它们与降水具有相似的年代际变化. 综上所述,虽然前人已经取得了很多研究成果,但是并没有给出水汽输送的客观定量化的研究,因此需要更加深入地给出不同来源的水汽在其输送过程中形成的水汽路径的客观定量化指标. 本文从水循环要素水汽输送出发,将其看成一个整体,定义垂直于某一横截面的平均水汽通量为描述水汽路径的客观化指标,并研究影响华北降水的各个水汽路径的指标的时间演化规律及其与华北和中国降水的关系.

2 资料和研究方法

本文所用的资料为1951—2011年美国气象环境预报中心/美国国家大气研究中心的风场(单位气柱内各层大气的 x 方向风速水平分量 u 和 y 方向风速水平分量 v)、比湿 q 、地面气压 p 的日平均资料,水平格距 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;国家气候中心提供的1951—2011年160个站的月平均降水资料. 华北地区包括朱日和、多伦、赤峰、承德、张家口、呼和浩特、北京、天津、石家庄、德州、邢台、安阳、潍坊、济南、临沂、菏泽、长治、太原、临汾等19个站点.

本文主要运用了相关分析、合成分析等气象上常用的分析方法. 水汽输送通量的计算方法如下:单位气柱整层大气水汽输送通量矢量 \mathbf{Q} 可以分解为经向和纬向水汽输送通量,分别为

$$Q_v(x, y, t) = \frac{1}{g} \int^{p_s} q(x, y, p, t) v(x, y, p, t) dp, \quad (1)$$

$$Q_u(x, y, t) = \frac{1}{g} \int^{p_s} q(x, y, p, t) u(x, y, p, t) dp, \quad (2)$$

式中, \mathbf{u} , \mathbf{v} 为该单位气柱内各层大气的风速矢量, q 是比湿, g 是重力加速度,积分是以从地面到 p_s (即300 hPa)的垂直积分作为整层积分,并定义垂直于某一截面的平均水汽通量作为描述水汽路径的客观定量指标.

为了分析不同水汽路径与华北夏季降水之间的年际变化的关系随时间的变化,采用了滑动相关系数(林学椿^[38]):

$$R_n = \frac{\sum_{i=t-n+1}^t (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=t-n+1}^t (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{i=t-n+1}^t (y_i - \bar{y}_i)^2}}, \quad (3)$$

其中,

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t x_i, \quad (4)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t y_i, \quad (5)$$

$t = n, n+1, n+2, \dots, n$ 为滑动窗口长度.

参照文献^[38]用不同窗口试验的结果,本文选取 n 为11年进行滑动,滑动相关值记在窗口的第六年,得到滑动相关值的逐年变化曲线. 由于我们取 $n = 11$,所以 $\alpha = 0.05$ 时, $|r| \geq 0.6$.

本文中华北地区盛夏的降水量是指华北各站点7, 8月份降水量的平均值,我们分别将1951—1980年、1961—1990年、1971—2000年、1981—2010年称为第一、第二、第三、第四气候态.

3 结果与分析

3.1 影响华北夏季降水的水汽路径的定义

中国上空在不同气候态下均存在三支明显的水汽路径(图1). 其中,西北水汽北退至黄河以北,处于一年中的最北位置,主要覆盖西北、华北北部和东北地区;来自孟加拉湾和印度洋的西南水汽长驱直入中国上空,此时正值印度风鼎盛时期,这支水汽路径的北界延伸到黄淮之间,覆盖了西南、华南、中华和华中南部广大地区;随着西太平洋副热带高压增强和西伸北抬,副高西缘的东南气流将南海水汽也输送到中国大地上空,形成一支东南水汽路径,主要盛行于华南和华东上空. 通过分析不同

气候态下的水汽输送通量的分布, 可以认为, 整层积分下输入中国上空的水汽路径是相对稳定的. 尽

管如此, 不同水汽路径的水汽输送通量仍会随着时间而变化.

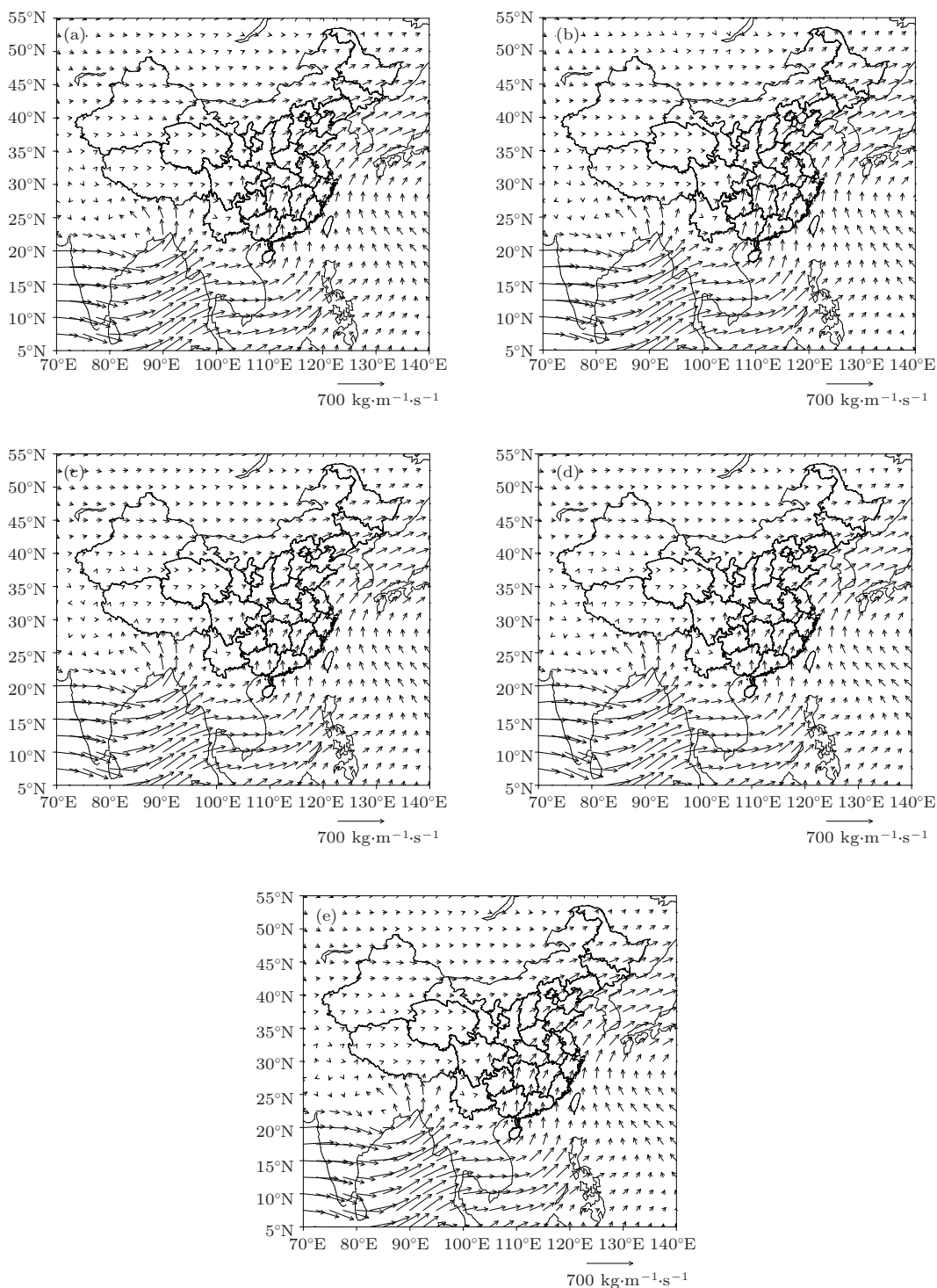


图1 不同气候态和1951—2011年中国7, 8月份水汽输送通量场 (a) 第一气候态; (b) 第二气候态; (c) 第三气候态; (d) 第四气候态; (e) 1951—2011年

首先计算了华北地区盛夏的降水量与水汽输送通量的相关场, 即华北的平均降水量与每个格点的水汽输送通量求相关, 而水汽输送通量的经向输送和纬向输送则由(1)和(2)式求得.

从相关场的分布(图2(a))来看, 水汽输送通量与降水量相关性显著, 主要有两个正相关的高值区, 一个分布在35°N—45°N之间, 另一个为20°N—30°N, 105°E—110°E. 而负相关的高值区

主要在5°N—10°N之间. 水汽输送经向和纬向通量的反正切值的分布(图2(b))是用来计算水汽输送通量的角度. 根据华北降水与水汽输送通量的相关场, 选择相关显著的区域, 以及水汽输送经向和纬向通量的反正切值的分布情况(图2(b)), 定义了5条水汽路径: 孟加拉湾水汽路径、太平洋水汽路径、西南和东南汇合水汽路径(以下简称汇合路径)、由西输入水汽路径以及南海水汽路径(图3). 具体计算时, 选择单位时间内垂直通过整层截面单位边界长度的水汽输送通量值为该路径的客观定

量指标, 简称水汽路径强度指数. 这与传统的水汽路径相比有其特有的优势: 首先, 水汽路径的确定不仅结合了传统意义上的水汽路径; 另外还考虑了华北地区的盛夏降水的情况, 即计算了华北地区盛夏的降水量与水汽输送通量的相关. 此外, 给出了不同水汽路径的客观定量化的定义, 选择单位时间内垂直通过整层截面单位边界长度的水汽输送通量值为水汽路径的客观定量指标, 不同于以往的只关注经向输送或只关注纬向输送.

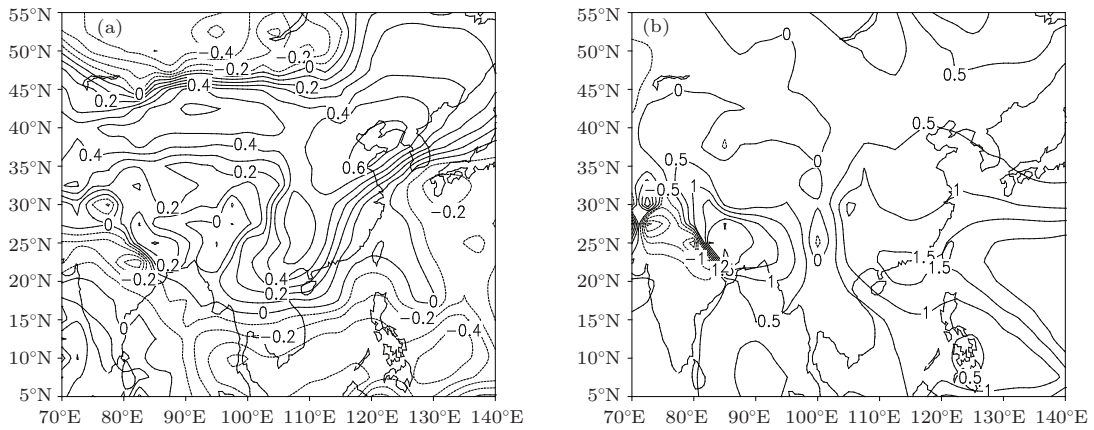


图2 华北降水量与水汽输送通量的相关场(a)及经向和纬向输送通量的反正切值的分布(b)

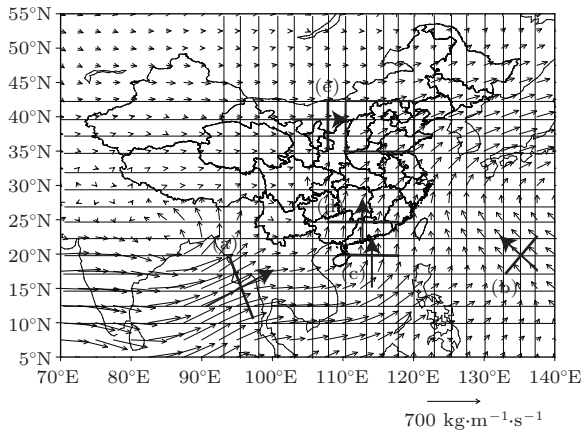


图3 1951—2011年7、8月份平均水汽输送通量场及五条水汽路径黑色方框粗线为华北地区, 粗线为不同水汽路径的垂直截面, 带箭头的粗线是水汽输送的方向 (a) 孟加拉湾水汽路径; (b) 太平洋水汽路径; (c) 南海水汽路径; (d) 汇合水汽路径; (e) 由西输入水汽路径

表1为不同水汽路径强度指数的特征值以及华北7、8月份降水量的相关分析. 5条水汽路径中, 平均指数最大的为孟加拉湾水汽路径, 但其与华北7、8月份降水呈现负相关关系, 可能是由于孟加拉湾水汽路径影响华北降水主要是通过由孟加

拉湾直接向东输送的水汽与南海以及太平洋水汽路径的水汽汇合后输送至华北以及东北等中国北方地区, 而此定义下的孟加拉湾水汽路径的方向是指向东北方向的, 由于受到高原阻隔, 此水汽路径的水汽不会直接输送至华北, 所以不是直接相关的, 并且在输送过程中会受到其他水汽路径的水汽输送的影响. 由图3可见, 相关系数比较大的为由西输入的(e)路径和西南和东南水汽汇合的(d)路径, 而相关系数较小的为太平洋水汽路径和南海水汽路径. 与华北盛夏降水相关较大(通过0.05信度检验)的水汽路径为由西输入的(e)路径和西南和东南水汽汇合的(d)路径以及成负相关的孟加拉湾水汽路径(a).

3.2 不同水汽路径指标与华北盛夏降水的11年滑动相关分析

为了揭示不同水汽路径与华北盛夏降水的滑动相关系数的长期变化特征和差异, 计算了各个水汽路径指标与华北盛夏降水之间的11年滑动相关系数(如图4所示). 各个水汽路径的滑动相关系数

表1 不同水汽路径强度指数的平均值、标准差以及与华北7, 8月份降水量的相关系数

水汽路径	平均值/kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	标准差/kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	相关系数
孟加拉湾	312.98	60.24	-0.28**
太平洋	138.27	36.99	-0.12
南海	146.29	33.09	0.15
汇合路径	138.51	43.81	0.43**
由西输入	73.72	26.83	0.51**

注: **表示通过0.05的信度检验.

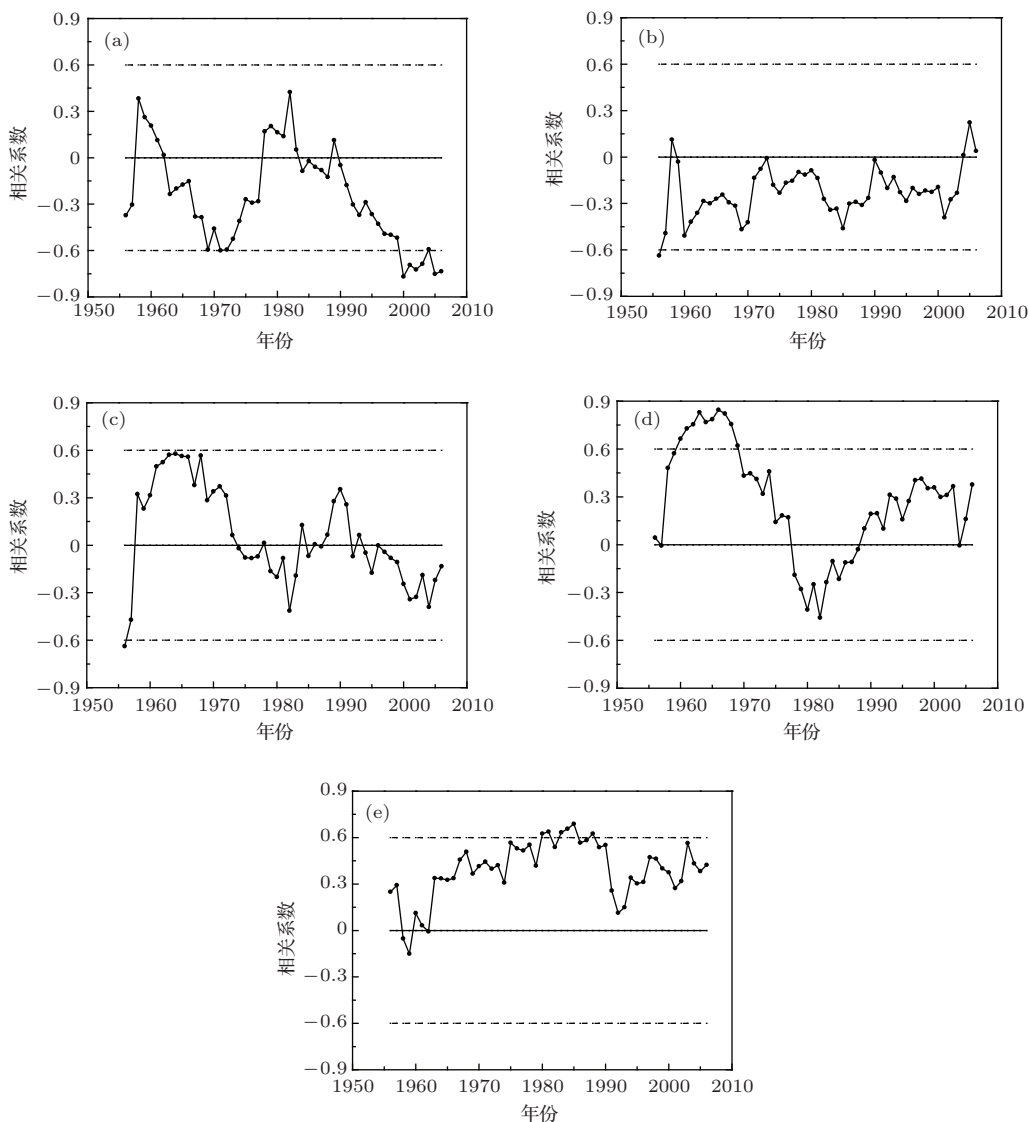


图4 各个水汽路径指标与华北盛夏降水之间的11年滑动相关系数, 虚线为相关系数的0.05信度检验 (a) 孟加拉湾水汽路径; (b) 太平洋水汽路径; (c) 南海水汽路径; (d) 汇合水汽路径; (e) 由西输入水汽路径

的长期变化特征如下: 1) 孟加拉湾水汽路径, 孟加拉湾水汽路径指标与华北盛夏降水在1960—1980年为显著的负相关时期, 之后转为正相关, 而1990年至今又为负相关时期, 且从2000年开始其负相关系数值相对比较大, 通过了0.05的信度检验, 孟

加拉湾水汽路径对华北盛夏降水逐渐产生影响, 其中的成因分析还有待进一步研究; 2) 太平洋水汽路径, 2000年以前, 除1958年外太平洋水汽路径指标与华北盛夏降水都成负相关, 而2004年开始转为正相关, 但均没有通过0.05的信度检验; 3) 南海

水汽路径, 20世纪70年代中期以前, 南海水汽路径指标与华北降水成正相关, 之后转为负相关, 但在1990年左右出现了短时间的正相关时期, 但是均没有通过0.05的信度检验; 4) 汇合水汽路径, 1975年之前汇合水汽路径与华北盛夏降水为正相关, 且1960年到1970年为显著的正相关时期, 通过了0.05的信度检验, 之后转为负相关, 而1990年开始又转为正相关; 5) 由西输入水汽路径, 20世纪60年代初至今由西输入水汽路径与华北盛夏降水一直成正相关, 但相关系数的值的波动性比较大, 显著相关的时间段为1980—1990年.

通过分析可以发现: 对华北盛夏降水影响最大的是向东输出和由西输入水汽路径, 这主要是受西风带的影响. 虽然其他水汽路径的影响相对比较小, 但是2000年开始, 孟加拉湾水汽路径对华北盛夏的降水的影响逐渐增强, 具体的原因有待进一步研究.

3.3 不同水汽路径对中国盛夏降水的影响

通过不同水汽路径与中国7, 8月份的降水量的相关分析(图5)可知: 孟加拉湾水汽路径和南海水汽路径与华南降水的正相关性较好, 其中孟加拉湾水汽路径与四川盆地和华北南部的降水呈负相关; 由西输入水汽路径与整个华北和东北降水有很好的正相关性, 部分地区的相关系数达到了0.4以上, 这主要是受西风带的影响, 而负相关区域也比较一致, 位于长江中下游; 另外还有一个重要的水汽路径即西南和东南水汽汇合的水汽路径, 此路径与中国东部除华南南部以外都有很好的正相关, 与西南地区的正相关性也很明显; 太平洋水汽路径与华北中部的降水有很好的负相关性. 此外, 对于不同水汽路径, 水汽通量与华北的相关性和水汽通量与长江中下游的相关性正好呈反位相关系.

图6给出了不同水汽路径的距平的时间序列, 并选择一个标准差为标准, 找出了不同路径的水汽

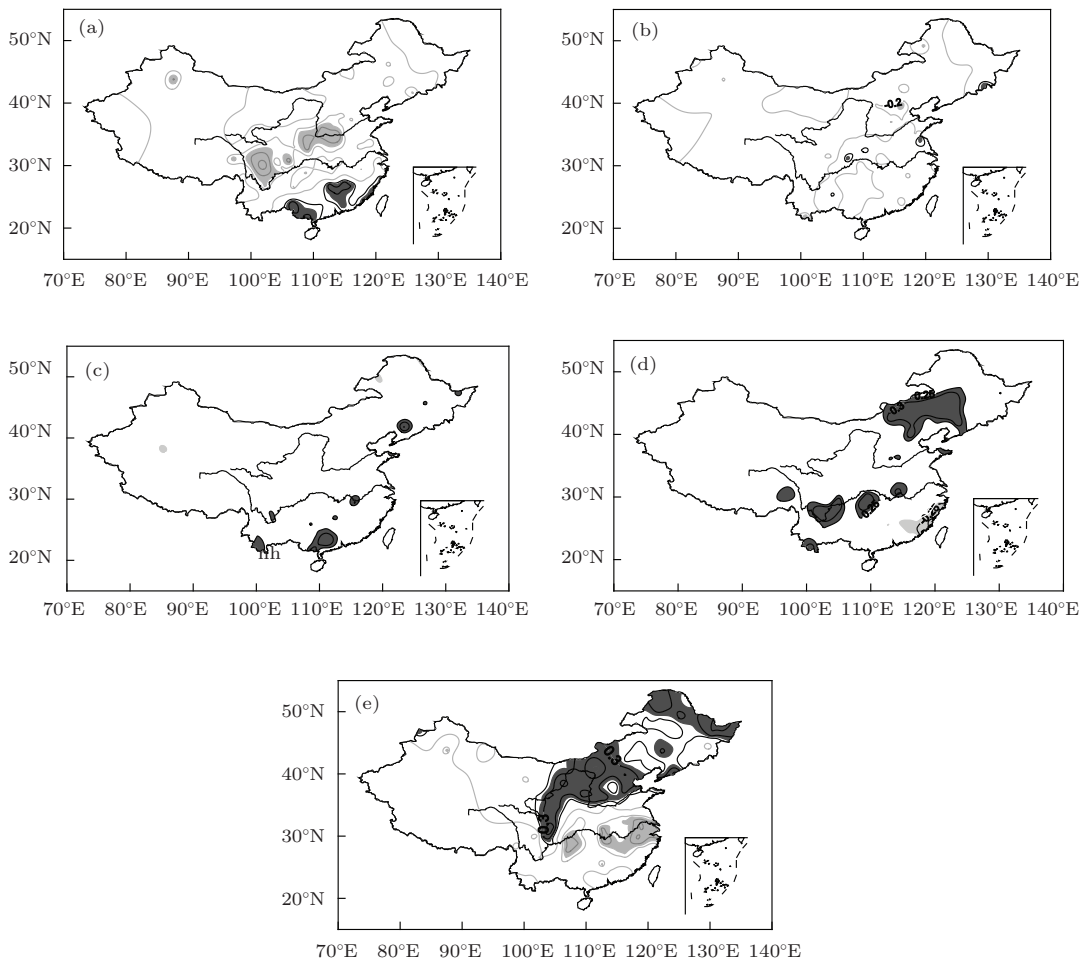


图5 不同水汽路径与中国7, 8月份降水的相关场, 灰色为负相关; 黑色为正相关 (a) 孟加拉湾水汽路径; (b) 太平洋水汽路径; (c) 南海水汽路径; (d) 汇合水汽路径; (e) 由西输入水汽路径

表2 不同水汽路径指标的强弱年分布表

水汽路径	水汽输送强(弱)年份	
孟加拉湾	强年	1952, 1961, 1967, 1968, 1972, 1978, 1982, 1994, 1997, 2002, 2006
	弱年	1954, 1955, 1983, 1988, 1995, 1998, 2010
太平洋	强年	1951, 1952, 1965, 1979, 1987, 1995, 1997, 1999, 2000, 2003, 2006, 2010
	弱年	1966, 1977, 1988, 1991, 1996, 1998, 2008, 2011
南海	强年	1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1959, 1963, 1987, 1997
	弱年	1962, 1977, 1978, 1984, 1986, 1989, 1990, 1992, 2000, 2001, 2009, 2011
汇合路径	强年	1954, 1955, 1957, 1963, 1964, 1969, 1987, 1998
	弱年	1972, 1984, 1985, 1986, 1989, 1990, 1992, 2000, 2002, 2004, 2009, 2011
由西输入	强年	1951, 1953, 1957, 1958, 1959, 1960, 1961, 1966, 1967, 1973
	弱年	1974, 1980, 1991, 1999, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2007, 2008, 2011

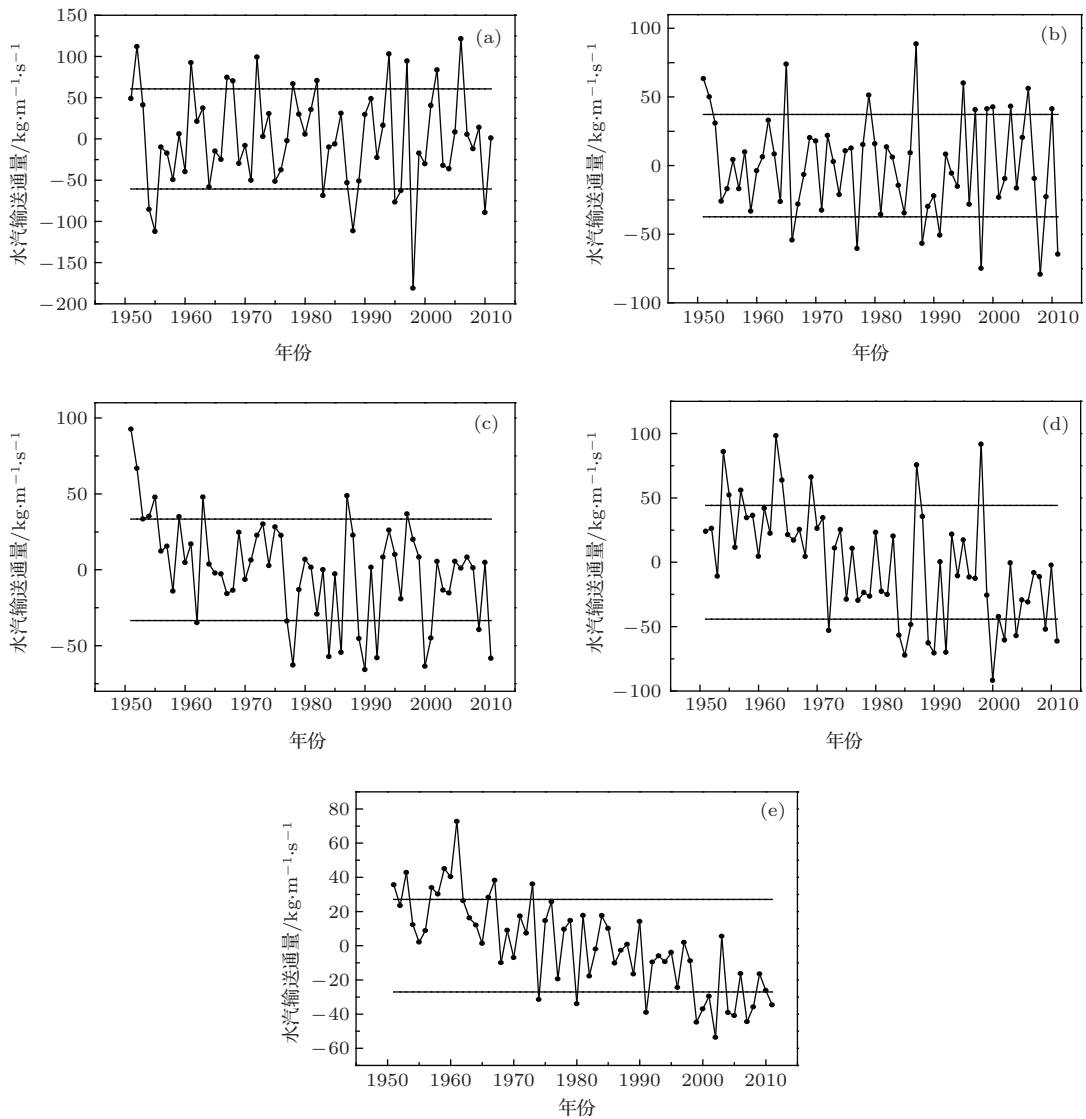


图6 不同水汽路径的距平的时间序列 (a) 孟加拉湾水汽路径; (b) 太平洋水汽路径; (c) 南海水汽路径; (d) 汇合水汽路径; (e) 由西输入水汽路径

通量的强弱年, 具体分布情况见表 2. 而华北 7, 8 月份降水量的强年为 1959, 1963, 1964, 1973, 1976, 1994, 1996 年; 弱年为 1968, 1972, 1980, 1983, 1986, 1989, 1991, 1997, 1999, 2001, 2002 年. 在华北降水偏多的 7 个年份里, 有 3 年向东输出水汽路径的水汽输送通量也偏多, 而降水偏少的 11 年里, 有 5 年向东输出水汽路径的水汽输送通量偏少. 此外, 汇合水汽路径、由西输入水汽路径、向东输出水汽路径及南海水汽路径有明显的年代际变化, 这种年代际变化与黄荣辉等 [16]、张庆云 [17] 所研究的华北汛期降水的年代际变化以及叶敏等 [39] 所研究的华北干旱的年代际变化是一致的, 即 20 世纪 50 年代至 1964 年华北降水处于偏多阶段, 20 世纪 70 年代末

以来处于偏少阶段. 大量研究表明, 赤道中东太平洋海温 [16,40]、中纬度海-气相互作用 [41]、北大西洋和北太平洋涛动 [42]、亚洲季风环流的减弱 [43] 等可能对华北降水的年代际变化产生影响. 这与本文中孟加拉湾水汽路径和太平洋水汽路径存在明显的年际变化相呼应.

图 7 为不同水汽路径的强年和弱年的水汽输送的合成图, 图 8 为不同水汽路径的强年和弱年的降水量的合成图. 降水合成分析的检验采用的是 t 检验 [44], 置信度为 0.05. 由图 7(a) 可知, 随着孟加拉湾水汽路径的水汽通量的增加, 我国南海的向东输送的水汽输送通量以及来自太平洋的水汽输送通量也会增强. 与图 8(a) 中华南南部的降水量的

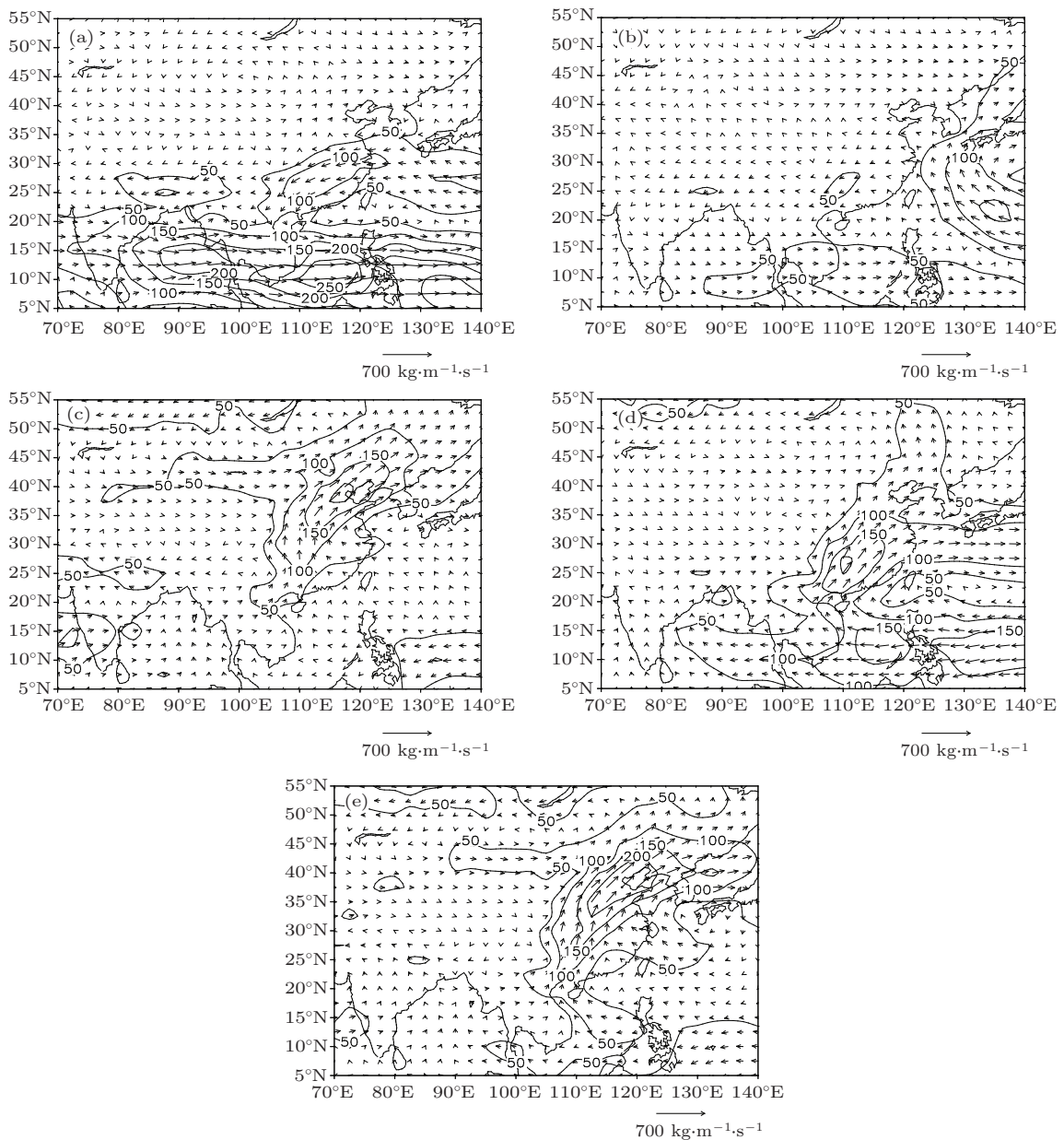


图 7 不同水汽路径的强年和弱年的水汽输送的合成图 (a) 孟加拉湾水汽路径; (b) 太平洋水汽路径; (c) 南海水汽路径; (d) 汇合水汽路径; (e) 由西输入水汽路径

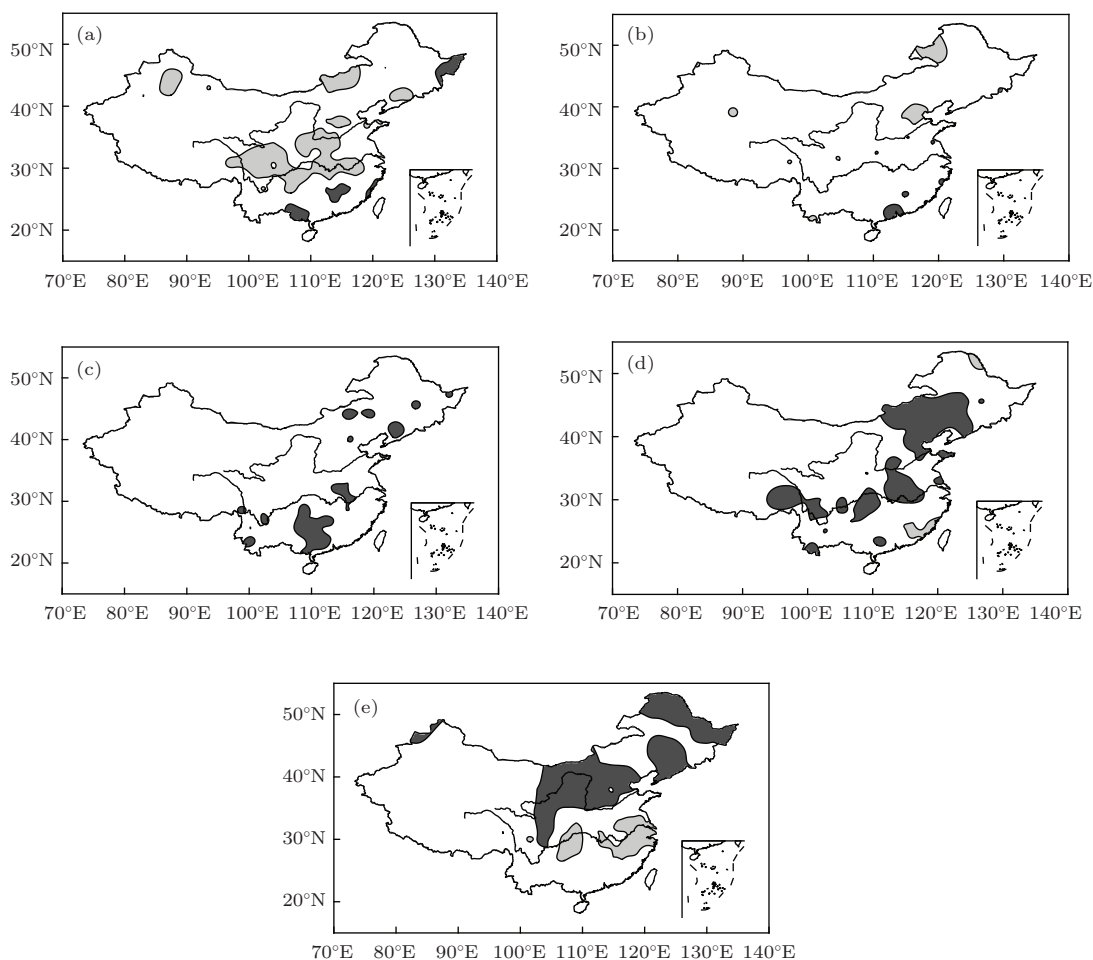


图8 不同水汽路径的强年和弱年的降水的合成图, 灰色为负, 黑色为正 (a) 孟加拉湾水汽路径; (b) 太平洋水汽路径; (c) 南海水汽路径; (d) 汇合水汽路径; (e) 由西输入水汽路径

大值区以及图5(a)中的正相关大值区相一致. 太平洋水汽路径增强, 来自太平洋的东南水汽增多, 部分水汽输送至长江与黄河之间, 使得降水量增多, 如图8(b)所示. 图8(c)表明, 南海水汽路径的水汽输送通量加强时, 西太平洋纬向输送加强, 其中10°N—20°N的向西输送加强, 有利于太平洋水汽路径的东南水汽流与西南水汽流汇合, 进而有利于华南地区、华北等地区的降水. 图7(d)表明, 汇合水汽路径的水汽输送通量增强是因为西太平洋的向西输送的纬向水汽输送通量明显增强, 与此同时, 南海水汽路径的水汽也增多. 汇合水汽路径的水汽沿西南方向输送至华北和东北地区, 这与图5(d)和图7(d)所示的华北和东北的降水量明显增多是相一致的. 汇合水汽对长江流域的降水量的增加也有一定的影响. 在汇合水汽增强时, 华南地区的降水量减少, 可能是因为虽然输入的水汽增多, 但同时输出的水汽更多, 导致净输入量减少. 图8(e)为由西输入水汽路径的强年和弱年的合成分析差值场, 由西输入水汽路径的水汽输送增强的

大值区相同, 而输出的差值更大. 且由图6(e)和图8(e)可以看出, 水汽输送增强时, 同时伴有来自太平洋水汽路径的东南输送明显增强, 水汽输送绕过华南和长江中下游直接输送至华北和东北, 从而引起华北和东北的降水量偏多, 而华南和长江流域的降水量明显偏少.

4 结 论

本文从水循环要素水汽输送出发, 不同于以前的研究中将纬向或经向输送分开来分析, 而是将其看成一个整体, 根据华北降水与水汽输送通量的相关场, 选择相关显著的区域, 以及水汽输送经向和纬向通量的反正切值的分布情况, 选择了五条水汽路径: 孟加拉湾水汽路径、太平洋水汽路径、汇合水汽路径、由西输入水汽路径以及南海水汽路径. 在此基础上定义垂直于某一截面的平均水汽通量为描述水汽路径的客观化指标来研究水汽路径, 并研究影响华北降水的各个水汽路径的指标的时间演

化规律及其与华北和中国降水的关系. 得出以下结论: 1) 汇合水汽路径、由西输入的水汽路径及南海水汽路径有明显的年代际变化, 这种年代际变化与华北盛夏降水的年代际变化相一致, 即20世纪50年代至1964年华北降水量和汇合水汽路径、由西输入的水汽路径及南海水汽路径的水汽输送均处于偏多阶段, 20世纪70年代末以来处于偏少阶段; 2) 通过分析各个水汽路径指标与华北盛夏降水之间的11年滑动相关系数, 可以发现对华北盛夏降水产生影响的主要是由西输入水汽路径, 这主要是受西风带的影响, 虽然其他水汽路径的影响相对比较小, 但是2000年开始, 孟加拉湾水汽路径对华北盛夏的降水的影响逐渐显现出来; 3) 对不同的水汽路径进行相关分析表明, 孟加拉湾水汽路径与四川盆地和华北南部的降水呈负相关; 由于受西风带的影响, 由西输入水汽路径与整个华北和东北降水有很好的正相关性; 汇合水汽路径与中国东部除华南南部以外都有很好的正相关; 太平洋水汽路径与华北中部的降水有很好的负相关性; 此外, 对于不同水汽路径, 水汽通量与华北的相关性和水汽通量与长江中下游的相关性正好相反, 这正说明了华北的降水与长江中下游的降水呈不同分布; 4) 通过合成分析可以看出汇合水汽路径的水汽输送通量增强时, 因为西太平洋的向西输送的纬向水汽输送通量明显增强, 与此同时, 南海水汽路径的水汽也增多, 汇合水汽路径的水汽沿西南方向输送至华北和东北地区, 从而有利于华北和东北地区的降水; 由西输入水汽路径水汽输送增强时, 同时伴有来自太平洋水汽路径的东南输送明显增强, 水汽输送绕过华南和长江中下游直接输送至华北和东北, 从而引起华北和东北的降水量偏多, 而华南和长江流域的降水量明显偏少, 所以, 可以认为通过这种方法找到的水汽路径与华北的降水的有一定的相关性. 但是研究中发现, 定义的水汽路径是从影响降水的关键的水汽输送的角度来做的, 没有覆盖水汽输送的全过程, 因此还存在一定的局限性, 下一步的研究可以从这一角度出发进行更深入的研究.

参考文献

- [1] Feng G L, Sun S P, Zhao J H, Zheng Z H 2013 *Sci. China Earth Sci.* **56** 1576
- [2] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, Chou J F 1993 *Q. J. Meteorol. Soc.* **119** 547
- [3] Huang J P, Wang S W 1992 *Sci. China B* **35** 207
- [4] Yang J, Wang Q G, Zhi R, Feng G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029204 (in Chinese) [杨杰, 王启光, 支蓉, 封国林 2011 物理学报 **60** 029204]
- [5] Yang P, Hou W, Feng G L 2012 *Chin. Phys. B* **21** 019201
- [6] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng G L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 079201
- [7] Huang J P, Ji M X, Liu Y Z, Zhang L, Gong D Y 2013 *Adv. Climate Change Res.* **9** 9 (in Chinese) [黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 张镭, 龚道溢 2013 气候变化研究进展 **9**]
- [8] Huang J P, Yi Y H 1991 *Sci. China B* **34** 1246
- [9] Wang X J, Zhi R, He W P, Gong Z Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 029201
- [10] Feng G L, Yang H W, Zhang S X, Wang K, Shen B Z 2012 *Chin. J. Atmos. Sci.* **36** 1009 (in Chinese) [封国林, 杨涵海, 张世轩, 王阔, 沈柏竹 2012 大气科学 **36** 1009]
- [11] Feng G L, Dong W J, Jia X J, Cao H X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1181 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 贾晓静, 曹鸿兴 2002 物理学报 **51** 1181]
- [12] Zhao S R, Song Z S 1999 *Plateau Meteorol.* **18** 535 (in Chinese) [赵声蓉, 宋正山 1999 高原气象 **18** 535]
- [13] Feng G L, Dai X G, Wang A H, Chou J F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 606 (in Chinese) [封国林, 戴新刚, 王爱慧, 丑纪范 2001 物理学报 **50** 606]
- [14] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *The Theory and Method about the Spatial and Temporal Distribution of the Observation Data's Nonlinear* (Beijing: China Meteorological Press) p227 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 龚志强, 侯威, 万仕全, 支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 (北京: 气象出版社) 第227页]
- [15] Feng G L, Hou W, Dong W J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 962 (in Chinese) [封国林, 侯威, 董文杰 2006 物理学报 **55** 962]
- [16] Huang R H, Xu J H, Zhou L T 1999 *Plateau Meteorol.* **18** 465 (in Chinese) [黄荣辉, 徐予红, 周连通 1999 高原气象 **18** 465]
- [17] Zhang Q Y 1999 *Plateau Meteorol.* **18** 486 (in Chinese) [张庆云 1999 高原气象 **18** 486]
- [18] Lu R Y 2005 *Chin. Sci. Bull.* **50** 1131 (in Chinese) [陆日宇 2005 科学通报 **50** 1131]
- [19] Liu G W 1997 *Atmospheric Processes in Hydrologic Cycle* (Beijing: Science Press) p120 (in Chinese) [刘国纬 1997 水文循环的大气过程 (北京: 科学出版社) 第120页]
- [20] Wu Y P, Wang C H, Shen Y P 2011 *J. Glaci. Geocr.* **33** 1268 (in Chinese) [吴永萍, 王澄海, 沈永平 2011 冰川冻土 **33** 1268]
- [21] Wu Y P, Shen Y P, Li B L 2012 *Ecol. Complex.* **9** 63
- [22] Tang X, Qian W H, Liang P 2006 *Plateau Meteorol.* **25** 375 (in Chinese) [汤绪, 钱维宏, 梁萍 2006 高原气象 **25** 375]
- [23] Liang P, He J H, Chen L X, Li W 2007 *Plateau Meteorol.* **26** 460 (in Chinese) [梁萍, 何金海, 陈隆勋, 李薇 2007 高原气象 **26** 460]
- [24] Cai Y, Qian Z A, Song M H 2003 *Plateau Meteorol.* **22** 14 (in Chinese) [蔡英, 钱正安, 宋敏红 2003 高原气象 **22** 14]

- [25] Liu Y Y, Ding Y H 2008 *Acta Meteorol. Sin.* **66** 789 (in Chinese) [刘芸芸, 丁一汇 2008 气象学报 **66** 789]
- [26] Hao L S, Ding Y H, Min J Z, Zhang X D 2011 *Chin. J. Atmos. Sci.* **35** 217 (in Chinese) [郝立生, 丁一汇, 闵锦忠, 张晓东 2011 大气科学 **35** 217]
- [27] Simmonds I D B, Hope P 1999 *J. Climate* **12** 1353
- [28] Tian H, Guo P W, Lu W S 2004 *J. Trop. Meteor.* **20** 401 (in Chinese) [田红, 郭品文, 陆维松 2004 热带气象学报 **20** 401]
- [29] Chen M, Pollard D, Barron E J 2005 *J. Hydrol.* **301** 14
- [30] Tian H, Guo P W, Lu W S 2002 *J. Nanjing Inst. Meteor.* **25** 496 (in Chinese) [田红, 郭品文, 陆维松 2002 南京气象学院学报 **25** 496]
- [31] Zhou T J, Yu R C 2005 *J. Geophys. Res.* **110** D08104
- [32] Gong Z Q, Zhao J H, Feng G L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 099205 (in Chinese) [龚志强, 赵俊虎, 封国林 2013 物理学报 **62** 099205]
- [33] Dai X G, Zhang K J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 199201 (in Chinese) [戴新刚, 张凯静 2012 物理学报 **61** 199201]
- [34] Su H J, Wang Q G, Yang J, Qian Z H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109202 (in Chinese) [苏海晶, 王启光, 杨杰, 钱忠华 2013 物理学报 **62** 109202]
- [35] Huang J P, He M, Yan H R, Zhang B D, Bi J R, Jin Q J 2010 *Chin. J. Atmos. Sci.* **34** 548 (in Chinese) [黄建平, 何敏, 阎虹如, 张北斗, 闭建荣, 靳秦建 2010 大气科学 **34** 548]
- [36] Zhou X X, Ding Y H, Wang P X 2008 *Chin. J. Atmos. Sci.* **32** 345 (in Chinese) [周晓霞, 丁一汇, 王盘兴 2008 大气科学 **32** 345]
- [37] Wei F Y 1999 *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology* (Beijing: China Meteorological Press) p115 (in Chinese) [魏凤英 1999 现代气候统计诊断与预测技术 (北京: 气象出版社) 第 115 页]
- [38] Lin X C 1978 *Chin. J. Atmos. Sci.* **2** 55 (in Chinese) [林学椿 1978 大气科学 **2** 55]
- [39] Ye M, Qian Z H, Wu Y P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 139203 (in Chinese) [叶敏, 钱忠华, 吴永萍 2013 物理学报 **62** 139203]
- [40] Zhou L T, Huang R H 2003 *Clim. Environ. Res.* **8** 274 (in Chinese) [周连重, 黄荣辉 2003 气候与环境研究 **8** 274]
- [41] Li C Y, Miao Q H 1996 *Clim. Environ. Res.* **1** 124 (in Chinese) [李崇银, 缪清海 1996 气候与环境研究 **1** 124]
- [42] Li C Y, Li G L 1999 *Chin. Sci. Bull.* **44** 1765 (in Chinese) [李崇银, 李桂龙 1999 科学通报 **44** 1765]
- [43] Wang H 2001 *Adv. Atmos. Sci.* **18** 376
- [44] Shi N, Gu W B 1993 *Meteor. Monthly* **19** 32 (in Chinese) [施能, 古文保 1993 气象 **19** 32]

Objective quantification of the water vapor path influencing precipitation in North China in summer*

Ye Min¹⁾ Wu Yong-Ping^{1)†} Zhou Jie¹⁾ Wu Hao¹⁾ Tu Gang²⁾

1) (College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

2) (Laboratory for Middle-High Latitude Circulation and East Asian Monsoon Research, Jilin Institute of Meteorological Science, Changchun 130062, China)

(Received 17 October 2013; revised manuscript received 10 March 2014)

Abstract

Based on the data of daily wind and specific humidity, surface pressure from NCEP/NCAR and the data of monthly average precipitation of 160 stations in China from National Climate Center, and according to correlation filed of precipitation with water vapor transport, the water vapor transport which is perpendicular to a cross section is defined as an objective indicator of vapor transport path, and six mainly vapor transport paths are found for North China. The results show that the confluent water vapor path, the water vapor path which outputs to the east, the water vapor path which inputs from the west and the water vapor path from the South China Sea have obvious inter-decadal variation, and the inter-decadal variation is basically the same as the inter-decadal variation of summer precipitation in North China. It is found that the water vapor path which outputs to the east and the water vapor path which inputs from the west have main influence on the precipitation in North China on summer though sliding correlation analysis. It is influenced by westerly. Second, the water vapor transport of water vapor path which is from the west of North China increases, at the same time which is from the southeast of the Pacific Ocean is enhanced obviously. Then water vapor which passes through the middle and lower Yangtze river and the South China and directly transports to the North China and Northeast China, results in heavy precipitation of North China and Northeast China and slight precipitation of the south and the Yangtze river. However, the water vapor from the bay of Bengal began to influence the precipitation in North China in summer from 2000.

Keywords: precipitation, vapor transport path, water vapor transport

PACS: 92.70.Ly

DOI: 10.7498/aps.63.129201

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB955902, 2013CB430204), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175067, 41105055, 41175084, 41375079), the Meteorological Special Project of China (Grant No. GYHY201106016), and the Postgraduate Research and Innovation Project of Jiangsu Province, China (Grant No. CXLX13_894).

† Corresponding author. E-mail: wuyip1888@sina.com