

叶敏, 封国林. 2015. 长江中下游地区夏季降水的水汽路径的客观定量化研究 [J]. 大气科学, 39 (4): 777–788. Ye Min, Feng Guolin. 2015. Objective quantification of moisture transport that influences summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 777–788, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.141208.

长江中下游地区夏季降水的水汽路径的 客观定量化研究

叶敏^{1,2} 封国林^{1,2}

¹ 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002

² 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 本文根据中国台站降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了长江中下游地区夏季降水的水汽路径并给出了客观定量化的定义。结果表明: (1) 影响长江中下游地区夏季降水的水汽路径主要是来自南界的水汽输送, 据此定义了南界水汽路径的面积、中心强度、向东延伸格点的位置以及边界强度等指标; (2) 对各个指标的时间演化特征进行了分析, 南界水汽路径的面积指标和中心强度指标有下降的趋势, 各个指标在 20 世纪 90 年代前后都有一个明显的转折, 面积指标、中心强度指标、边界纬向强度指标都有明显的年代际的变化; (3) 对各指标与中国夏季降水和前冬海表温度进行相关分析, 夏季南界水汽路径影响我国不同地区的降水, 南界水汽路径的面积指标、中心强度指标与前一年冬季西太平洋的海温呈显著负相关, 与赤道中太平洋和东太平洋前一年冬季的海温呈显著正相关, 即前冬东太平洋发生 El Niño 时, 有利于夏季西太平洋水汽输送增强, 进而有利于长江中下游地区夏季降水偏多。

关键词 降水量 水汽路径 水汽输送通量

文章编号 1006-9895(2015)04-0777-12

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14208

Objective Quantification of Moisture Transport that Influences Summer Rainfall in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

YE Min^{1,2} and FENG Guolin^{1,2}

¹ College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002

² National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Daily wind, specific humidity, and surface pressure data from NCEP/NCAR, and monthly average rainfall data from 160 stations of National Climate Center in China are used to examine summer rainfall-influencing moisture transport in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Results show the moisture originates along the south boundary. On the basis of this, area, center intensity, eastern ridge point, and boundary intensity indices are defined. It can be found that the moisture transport influences rainfall in different areas over China in summer through correlation analysis. A significant turning point comes in the 1990s to all indices. There're obvious interdecadal changes in indices of area, central intensity, and zonal intensity in the boundary. Correlation analysis shows that moisture transport influences summer rainfall in different areas over China, and that area and center intensity indices are negatively correlated with the

收稿日期 2014-06-16; **网络预出版日期** 2014-10-09

资助项目 国家自然科学基金项目 41375078、41175067, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430204

作者简介 叶敏, 女, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事水分循环研究。E-mail: minye1104@163.com

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

western Pacific SST, but positively correlated with the eastern and equatorial Pacific SST. It also shows that higher winter eastern Pacific SST strengthens moisture transport from the western Pacific during summer, which enhances summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords Precipitation, Moisture transport path, Moisture transport

1 引言

20 世纪 80 年代以来, 随着全球进一步变暖, 区域干旱和洪涝事件更为频繁 (IPCC, 2013)。长江中下游地区是我国重要的工农业基地, 也是经济和科技文化发达地区; 同时, 长江中下游地区又是我国降水异常、旱涝频繁发生的地区之一 (黄荣辉等, 2011; 赵俊虎等, 2011; 叶敏等, 2013; 张庆云和郭恒, 2014)。1998 年长江流域的洪涝灾害给我国造成了巨大的经济损失 (李维京, 1999), 所以对长江中下游地区夏季降水进行更深入的研究, 具有重要的现实意义。长江中下游地区夏季降水的预测是我国汛期旱涝预测的重要内容 (Fan et al., 2008), 而目前动力和统计预报、动力—统计相结合的气候预测以及集成预报都没有将水分循环考虑进去 (王启光等, 2011; 封国林等, 2012, 2013)。从全球来看, 如果没有蒸发, 大气中现有的水汽转化为降水的时间不超过 10 天 (张学文和周少祥, 2010)。但实际观测的全球的年降水量远大于大气中的水汽含量, 表明观测到的降水是水分不断循环的结果。因此, 汛期旱涝预测不考虑水分循环是根本性的缺陷。另外, 回归到降水研究本质, 从全球视野重新诊断水汽输送和垂直运动影响汛期降水才是症结所在, 因此对水分循环尤其是水汽输送的研究具有重要意义 (Vecchi et al., 2006)。而本研究则侧重于研究水分循环的诸多要素中的基础要素之一的水汽输送 (刘国纬, 1997), 水汽输送过程形成的水汽路径是源于客观事实的, 不同水汽路径的异常变化会影响不同地区的降水 (周晓霞等, 2008)。

关于长江中下游地区夏季降水的影响因子已有不少研究工作: 黄嘉佑等 (2004) 的工作表明, 前期冬季极涡的强弱, 对长江中下游夏季降水有明显影响; He et al. (2001) 从西太平洋副热带高压 (副高) 的垂直结构及年际变化特征的角度研究发现, 副高面积、强度和脊线位置与长江中下游夏季降水有较好关系; 前期北极涛动对北半球许多地区的气候变化都有重要作用 (Thompson and Wallace, 2000; Thompson et al., 2000), 春季北极涛动偏强的年份, 夏季长江中下游降水偏少, 反之亦然 (龚

道溢等, 2000); 魏凤英 (2006) 研究指出, 影响长江中下游夏季降水异常的因子潜在结构主要包括以年代际尺度因子和海气年际尺度因子两类。然而纵观所有与降水有关的影响因子, 水汽输送才是最直接和最重要的因素。谢义炳和戴武杰 (1959)、Murakami (1959) 早在上世纪 50 年代就指出中国夏季降水的两个水汽来源: 一是从太平洋高压南沿以南风及东南风的形式进入我国内陆, 二是印度低压的东南方以西南风的形式进入我国西南部。而来自孟加拉湾经中南半岛和来自华南的水汽输入是长江中下游地区水汽的主要来源 (谢安等, 2002)。关于水汽路径与降水关系已有不少研究工作 (Simmonds et al., 1999; Chen et al., 2005; Zhou and Ru, 2005; 封国林等, 2012; 吴永萍, 2011; Wu et al., 2012), 其中周晓霞等 (2008) 针对水汽输送对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, 发现不同的水汽通道对华北降水的影响区域不同。纵观以往对不同水汽路径及其对长江中下游地区夏季降水影响的研究工作, 定性研究居多, 量化地研究偏少。叶敏等 (2014) 对影响华北盛夏降水的水汽路径进行了客观量化的研究, 但定义的水汽路径没有覆盖水汽输送的全过程, 因此还存在一定的局限性。

基于此, 本研究针对长江中下游地区, 从物理的角度对影响长江中下游地区夏季降水的南边界的水汽路径的方向和强度做客观量化的描述, 并对水汽路径的各个指标与降水和前期海温进行相关分析, 以期为基础于水分循环的中国夏季旱涝预测研究提供一定的参考。

2 资料和方法

本文用到的资料主要包括: 1951~2011 年 NCEP/NCAR 再分析资料的风场 (u 、 v)、比湿 q 、地面气压 p_s 的日平均资料, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的海表温度的月平均资料, 水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$; 国家气候中心 1951~2011 年 160 个站的月平均降水资料。

本文主要运用了相关分析和合成分析等气象

上常用的分析方法。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, 计算方法分别为

$$Q_v(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, p, t) v(x, y, p, t) dp, \quad (1)$$

$$Q_u(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, p, t) u(x, y, p, t) dp, \quad (2)$$

式中, u 、 v 为该单位气柱内各层大气的纬向、经向风速, q 是各层大气的比湿, g 是重力加速度, 从地面 (p_s) 到 300 hPa 的垂直积分作为整层积分。

3 水汽路径的定义

在夏季整层水汽输送图上, 中国上空均有两支明显的水汽路径 (图 1)。其中, 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、华中和华北南部广大地区; 随着副高增强和西伸北抬, 副高西缘的东南气流将南海水汽也输送到中国大陆上空, 形成一支东南水汽路径, 主要盛行于华南和华东上空。下面对影响长江中下游夏季降水的关键水汽路径进行研究。

3.1 南界水汽路径

用“箱体”模型描述长江中下游地区水汽收支变化特征, 定义 ($27.5^\circ\text{N} \sim 32.5^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} \sim 122.5^\circ\text{E}$) 区域为长江中下游地区整层水汽收支“箱体”模型计算范围, 长江中下游地区“箱体”模型边界水汽收支计算如下:

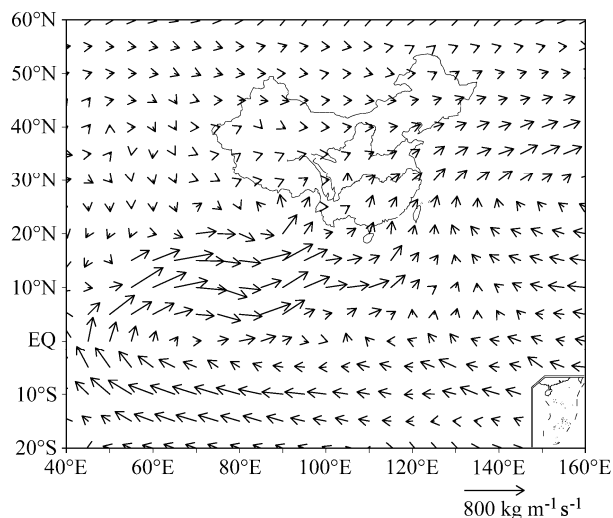


图 1 1951~2011 年夏季整层水汽输送通量场 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Fig. 1 Moisture transport fluxes in summers of 1951–2011 (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$$Q_W = \sum_{\varphi_1}^{\varphi_2} Q_u(\lambda_1, y, t), \quad (3)$$

$$Q_E = \sum_{\varphi_1}^{\varphi_2} Q_u(\lambda_2, y, t), \quad (4)$$

$$Q_S = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_v(x, \varphi_1, t), \quad (5)$$

$$Q_N = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_v(x, \varphi_2, t), \quad (6)$$

$$Q_T = Q_W - Q_E + Q_S - Q_N, \quad (7)$$

式中, Q_W 、 Q_E 、 Q_S 、 Q_N 分别为长江中下游地区西、东、南、北 4 个边界水汽收支; Q_T 为区域边界总体水汽收支; λ_1 、 λ_2 、 φ_1 、 φ_2 分别为各边界对应的纬度和经度。图 2 为 1951~2011 年长江中下游地区各个边界水汽收支的年际变化。南界和西界是主要的水汽输入边界, 而北界和东界是主要的水汽输出边界。南界水汽输入量和北界水汽输出量的变化趋势一致, 均呈明显下降趋势, 就大多数年份来说, 长江中下游地区南界水汽的输入量大于北界水汽输出量。西界水汽输入量则与东界水汽输出量的变化一致, 且前者明显小于后者。由其多年平均水汽输送可知, 东界输出的水汽除来自于西界输入的水汽之外, 还有来自于南界输入的水汽, 以及长江中下游地区地面蒸发的水汽。

由 1951~2011 年长江中下游地区夏季水汽净输入量和降水的年际变化曲线 (图 3a) 及其 11 年滑动平均曲线 (图 3b) 可见, 长江中下游地区夏季降水和水汽净输入量二者均有显著的年际变化, 且变化基本一致, 两者的相关系数达 0.77, 表明长江中下游地区夏季降水的水汽来源主要为从外界输入的水汽, 此外两者也均有明显的年代际变化且变化趋势基本一致。从多年平均的各边界的水汽收支图 (图 4) 可知, 水汽的净输入量为 $3.54 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$, 其中南界水汽输入量大于北界水汽输出量, 东界水汽输出量大于西界水汽输出量, 这与图 2 的结果一致。南界水汽输入量比西界水汽输入量大了接近 5 倍, 说明长江中下游的水汽来源主要是从南边输入的水汽, 谢安等 (2002) 的研究也表明了这一点。通过计算长江中下游南边界和西边界的平均水汽输送通量与长江中下游夏季降水的相关系数, 分别为 0.47 和 -0.01, 更好的说明了南界水汽输送对长江中下游夏季降水影响的重要性。由南界输入的水汽中一部分形成长江中下游地区的降水, 另一部分则分别从东边界和北边界输出, 因此对主要水汽输

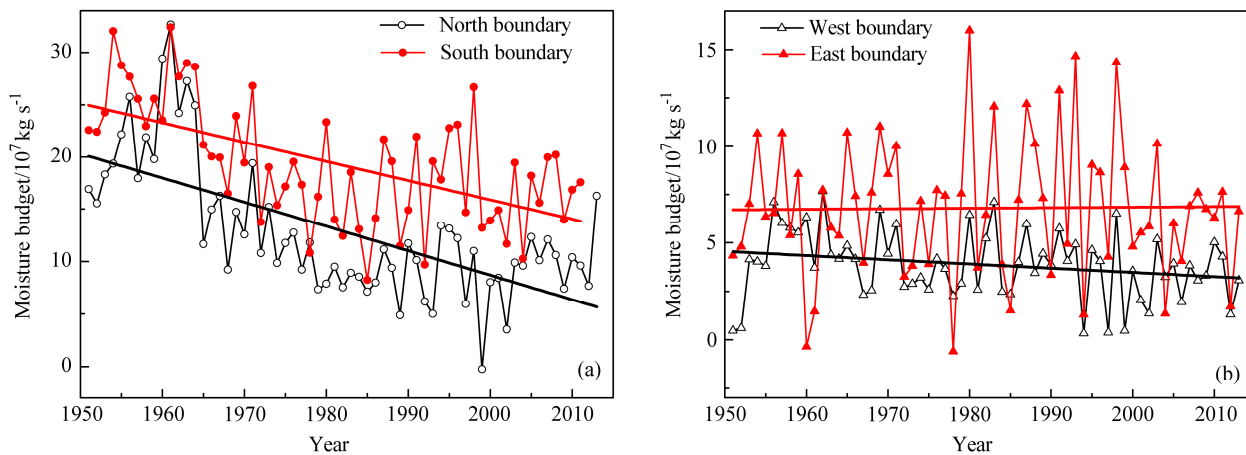


图2 1951~2011年长江中下游地区各个边界的水汽收支的时间序列

Fig. 2 Moisture budget over the middle and lower reaches of the Yangtze River on each boundary in summers of 1951–2011

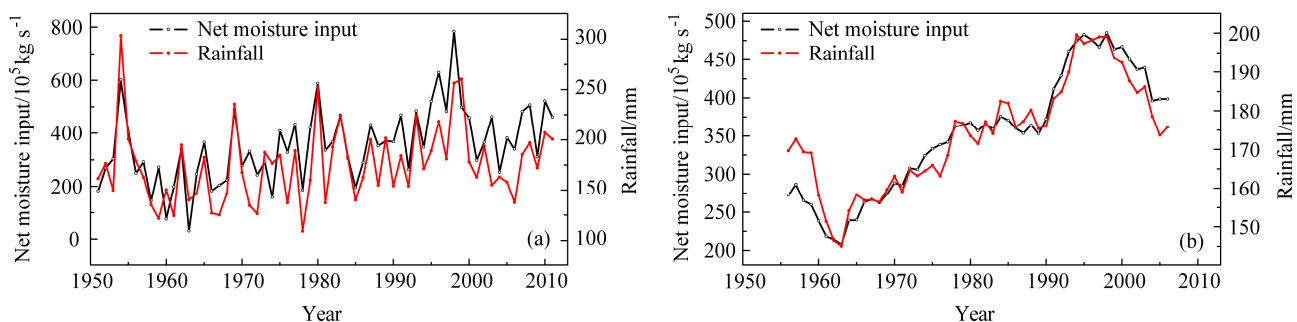


图3 1951~2011年长江中下游地区夏季水汽净输入量和降水的(a)年际变化曲线和(b)年代际变化曲线

Fig. 3 (a) Interannual variation and (b) interdecadal variation of net moisture input and rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River in summers of 1951–2011

入的南界水汽路径进行研究具有极其重要的意义。

3.2 南界水汽路径的边界经向和纬向强度指标的定义

对于南界输入的水汽,对其水汽输送通量的经向强度、纬向强度以及总强度与长江中下游夏季降水进行相关分析,结果表明纬向强度的水汽输送通量和总水汽输送通量与长江中下游夏季降水的相关较显著,其中纬向强度与长江中下游夏季降水的相关系数则最高,为0.65,总强度与长江中下游夏季降水的相关系数为0.47,而经向强度仅为0.13。因此对于南界的水汽输送,重点关注并研究此边界范围(25°N, 110°E~122.5°E)的纬向强度。通过对长江中下游夏季降水与水汽输送经向强度的相关场(图略)分析,确定边界经向强度指标为范围(25°N, 85°E~95°E)的平均经向水汽输送通量。

3.3 南界水汽路径的向东延伸格点位置指标以及中心强度指标的定义

根据图3a,选取大于和小于一倍标准差的年份分别作为长江中下游地区降水的强年和弱年,强年包括1954年、1969年、1980年、1983年、1993年、1996年、1998年和1999年,共8年;弱年包括1958年、1959年、1961年、1966年、1967年、1971年、1972年、1976年、1978年和1981年,共10年。由长江中下游地区夏季降水强年和弱年的水汽输送通量图(图5)可见,降水强年南界输入水汽的水汽路径,即 $270 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 等值线所包围的范围向东延伸的格点的经度值(图5a),明显小于降水弱年合成的水汽输送通量图中南界输入水汽的水汽路径的 $270 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 等值线向东延伸的格点的经度值(图5b)。向东延伸的格点的经度值偏小即偏西,表明西太平洋水汽输送的强度偏强或

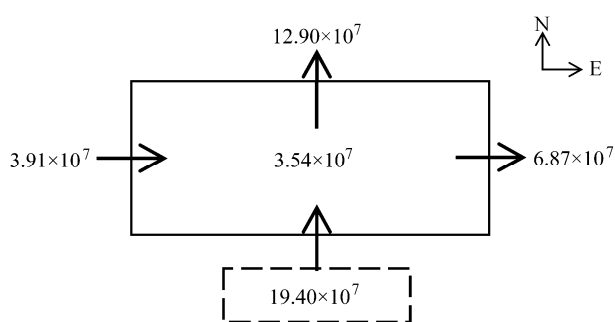


图4 1951~2011年长江中下游地区各个边界的水汽收支情况(单位: kg s^{-1})

Fig. 4 Mean moisture budget over the middle and lower reaches of the Yangtze River on each boundary for 1951–2011 (units: kg s^{-1})

孟加拉湾水汽输送偏弱, 则有利于汇合水汽向长江中下游地区输送。据此将向东延伸格点位置作为长江中下游地区水汽路径的客观定量指标之一, 并分为经度值和纬度值。由长江中下游地区夏季降水强年和弱年水汽输送通量的合成差值场(图5c), 阴影部分通过95%的信度检验(施能等, 2004), 可见, 对于南界水汽路径而言, ($5^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$) 范围的水汽输送通量总强度与长江中下游夏季降水的关系最密切。因此, 在对水汽路径定义时会选取其中心区域(12.5°N , $80^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$) 的水汽输送通量总强度作为水汽路径定义的另一个重要指标。基于以上研究, 下节给出南界输入水汽路径指标的客观量化定义。

3.4 南界水汽路径的定义及与风场类似定义的对比

研究对象是越赤道气流经过孟加拉湾、南海以及从太平洋输送至我国的水汽路径, 以下简称南界水汽路径, 选取($0^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$) 为所研究水汽路径的范围, 由长江中下游夏季降水的强年和弱年水汽输送通量的合成差值场可见, 通过95%的信度检验的显著区域位于($5^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$), 但由于考虑到 $270 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 等值线向东延伸的格点最远到 122.5°E , 因此将经度值扩展到 122.5°E , 而纬度范围则相应的扩展到($0^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$)。仿照副高的定义, 定义的指标(图6): (1) 水汽输送通量的 $270 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 等值线包围的格点数, 即面积指标 A ; (2) 水汽输送通量的 $270 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 等值线内水汽输送通量的中心值, 即中心强度指标 B ; (3) 水汽输送通量的 $270 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 等值线向东延伸的格点的位置, 分为经度值 C_1 和纬度值 C_2 , 即向东延伸格点位置指标; (4) 输送至中国东部的

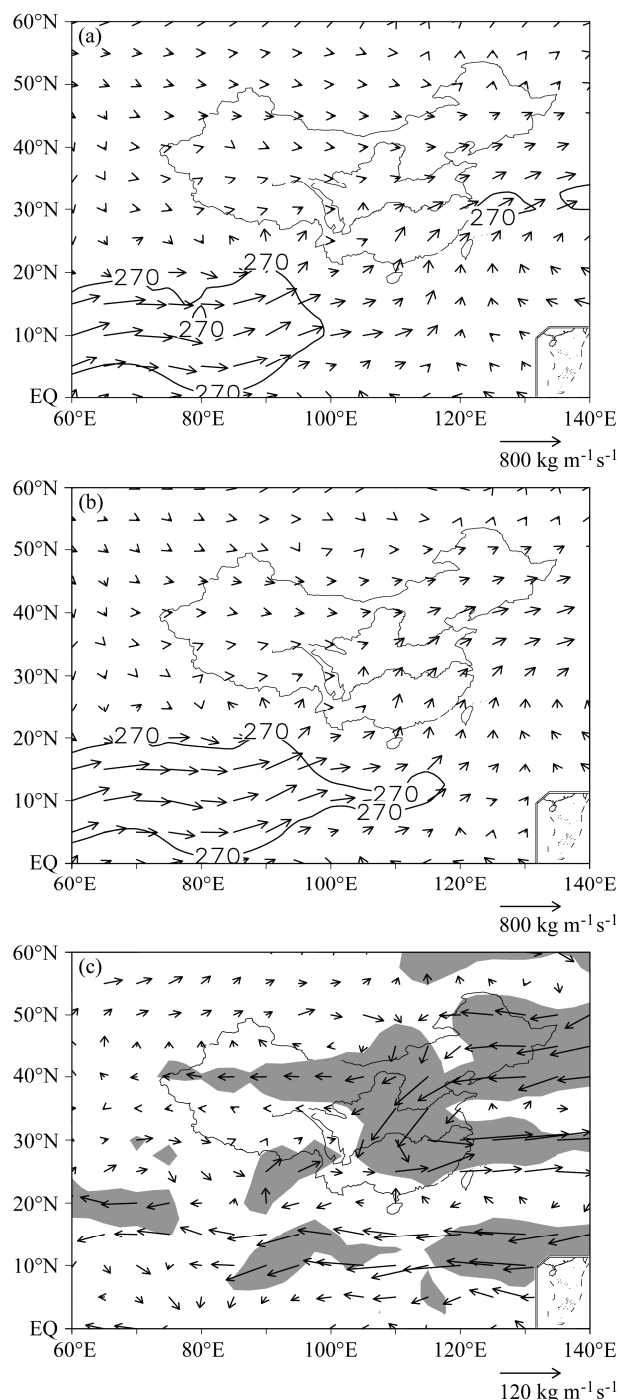


图5 长江中下游地区夏季降水(a)强年和(b)弱年的水汽输送通量的合成及(c)合成差值场, 阴影部分通过95%的信度检验

Fig. 5 Composite moisture fluxes in (a) strong, (b) weak rainfall years, and (c) the differences of composite moisture fluxes between weak and strong rainfall years over the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer (shadings indicate over 95% confidence level)

水汽输送通量的强度, 分为经向强度 D_1 和纬向强度 D_2 , 即边界强度指标。根据定义计算了1951~2011年的南界水汽路径的各个指标的值, 分析了不

同指标的年际和年代际变化,并将以上四个指标与中国夏季的降水做了相关。考虑到海温的慢变性和影响的持续性,将其与前一年冬季海温做了相关分析。

由之前分析可知,长江中下游地区夏季降水与南边界水汽经向强度的相关系数最小(0.13),与总强度的相关系数次之(0.47),而与纬向强度的相关最为显著(0.65)。长江中下游南侧的纬向风强度与长江中下游夏季降水的相关系数为 0.52,低于与纬向水汽输送强度的相关,可见用纬向水汽输送强度指示长江中下游夏季降水量的多寡更为合适。此外,我们选取与水汽定义一致的范围,计算了以风场定义的各种指标。具体来说,面积指标(E)定义为该范围内风速超过 6 m s^{-1} 的格点数,中心强度指标(F)与水汽路径的中心强度指标一致,向东延伸格点指标指 6 m s^{-1} 等值线向东延伸格点的经度(G_1)和纬度值(G_2),边界经向强度指标(H_1)和纬向强度指标(H_2)与水汽路径的边界强度指标一致。相关分析表明(表 1),上述各个指标与长江中下游夏季降水的相关均比较显著。但与以水汽定义的各项指标相比,以风场定义的指标中除向东延伸格点的经度值与长江中下游夏季降水的相关较高以外,其他指标与降水的相关均偏低,尤其以风场定义的向东延伸格点的纬向值以及边界纬向强度指标与降水的相关明显不如以水汽定义的类似指标(表 1)。上述结果进一步说明以水汽定义的指标优于仅反映环流状况(如风场)的指标,更有利于指示长江中下游夏季降水变化。同时,这也表明汛期旱涝预测不考虑水分循环是一个重要缺陷。

表 1 南界水汽路径的指标和风场类似定义的指标与长江中下游地区夏季降水的相关系数

Table 1 In summer, the correlation coefficients between indices of south-boundary moisture path (indices of wind field) and rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River

水汽场指标与降水		风场指标与降水	
水汽指标	相关系数	风场指标	相关系数
A	-0.36**	E	-0.34**
B	-0.45**	F	-0.42**
C_1	-0.14	G_1	-0.34**
C_2	0.41**	G_2	0.32
D_1	0.35**	H_1	0.25
D_2	0.52**	H_2	0.50**

**表示通过 99%的信度(统计)检验。

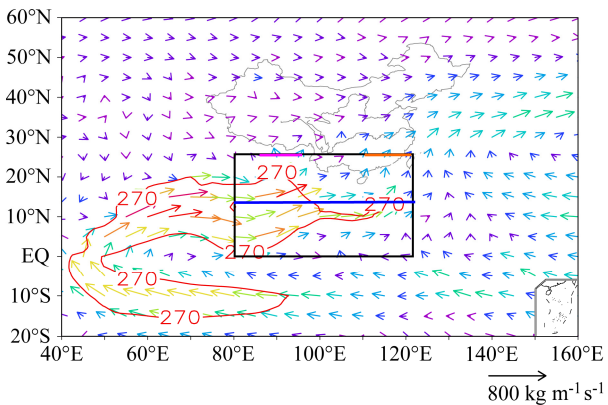


图 6 南界水汽路径的定义示意图。红色曲线是水汽输送通量 $270\text{ kg m}^{-1}\text{ s}^{-1}$ 的等值线;矩形框是所研究的水汽路径的范围;箭头为整层积分的水汽输送方向;蓝色实线为中心强度指标的范围;紫色实线为边界经向强度指标的范围;橙色实线为边界纬向强度指标的范围

Fig. 6 Definition of the south-boundary moisture path. The red curve is the contour of $270\text{ kg m}^{-1}\text{ s}^{-1}$ moisture transport flux; rectangle area is the range of moisture path; arrows are the direction of the integrated moisture transport fluxes; the blue line is the range of center intensity B ; the purple line is the range of meridional intensity on the boundary D_1 ; the orange line is the range of zonal intensity on the boundary D_2

4 南界水汽路径各个指标的分析

图 7 是南界水汽路径各个指标的时间序列图,由于各个指标的物理单位不一致,因此将各个指标进行标准化处理。从南界水汽路径的各个指标的线性趋势系数可以看出,面积指标和中心强度指标有下降的趋势。由南界水汽路径的各个指标的 11 年滑动平均可以看出,南界水汽路径的各个指标在 20 世纪 90 年代前后都有一个明显的转折。而面积指标、中心强度指标和纬向强度指标都有明显的年代际的变化。由向东延伸格点的实际时间序列(图略)可以看出,向东延伸的格点的经度值只有个别年份在 117.5°E 以西,绝大多数年份在 117.5°E 以东;而其纬度值则在平均值附近振荡,即在 10°N 和 12.5°N 之间变化,极少的个别年份会出现变化,1954 和 1998 年是水汽路径的向东延伸格点位置偏北最明显的两年,而这两年是东部绝大部分地区的夏季降水距平百分率均为正(图 8),尤其是长江中下游地区的降水明显偏多,均发生重大洪涝灾害,其中 1954 年发生的历史罕见的特大洪水,淹没农田 317 万公顷,受灾人口 1888 万人,死亡 3.3 万人,直接经济损失达 100 亿元;1998 年发生的持续特大范围降雨过程造成的直接经济损失达上千亿元,死亡

人数为 1320 人。1956 年和 2011 年则是水汽路径的向东延伸格点位置偏南较明显的两年, 而这两年我国长江以南地区的夏季降水距平百分率几乎都为负 (图 8), 长江中下游大部分地区的降水偏少。需要说明的是, 对于向东延伸的格点的经度值和纬度值指标, 其在常年情况的值基本不变或变化幅度很小, 即多年处于相同的值上 (图 7c 和图 7d), 但由于其出现不同于常态的值时, 其对应的降水分布则不同。就其对长江中下游夏季的降水的关系而言,

向东延伸的格点的位置偏西, 则降水偏多, 反之偏少; 向东延伸的格点的纬度值偏北, 则降水偏多, 反之偏少。进一步说明了向东延伸格点的经度值和纬度值的定义的实际意义。

下面给出了南界水汽路径的各个指标之间及其与长江中下游夏季降水的相关系数表, 如表 2 所示, 由表可以看出面积指标、中心强度指标以及向东延伸的经度值指标和长江中下游夏季降水呈负相关, 其中面积指标以及中心强度指标与降水的相

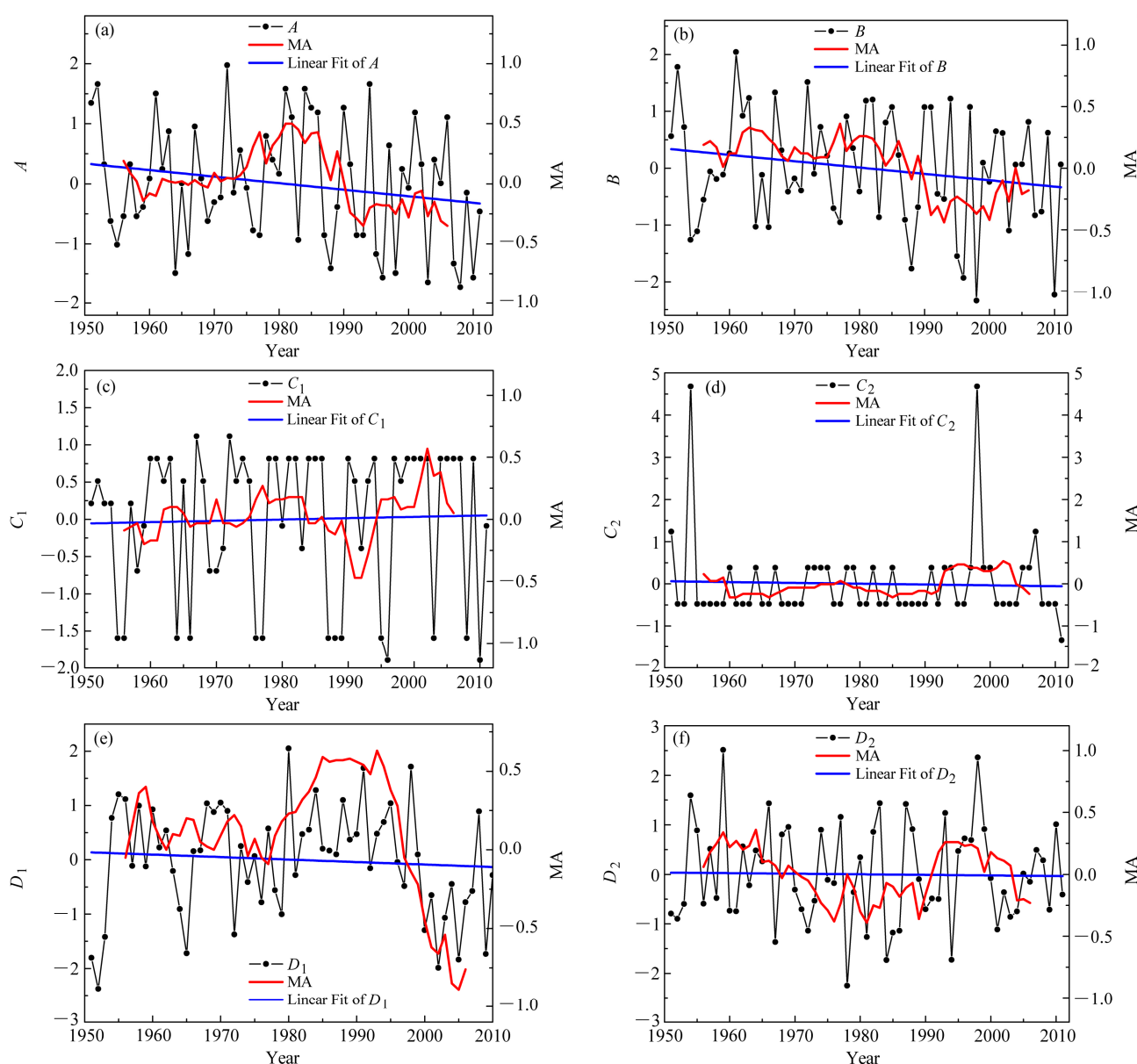


图 7 南界水汽路径各个指标的标准化时间序列: (a) 面积 A ; (b) 中心大值 B ; (c) 向东延伸的格点的经 C_1 ; (d) 向东延伸的格点的纬度 C_2 ; (e) 边界经向强度 D_1 ; (f) 边界纬向强度 D_2 。红色实线是 11 年的滑动平均 (MA), 蓝色实线表示线性拟合

Fig. 7 Standardized time series of the indices of south-boundary moisture path: (a) Area A ; (b) center intensity B ; (c) longitude of eastern ridgepoint C_1 ; (d) latitude of eastern ridgepoint C_2 ; (e) meridional intensity on the boundary D_1 ; (f) zonal intensity on the boundary D_2 . The red solid line is the 11-year moving average (MA), and the blue solid lines represent the linear fitting

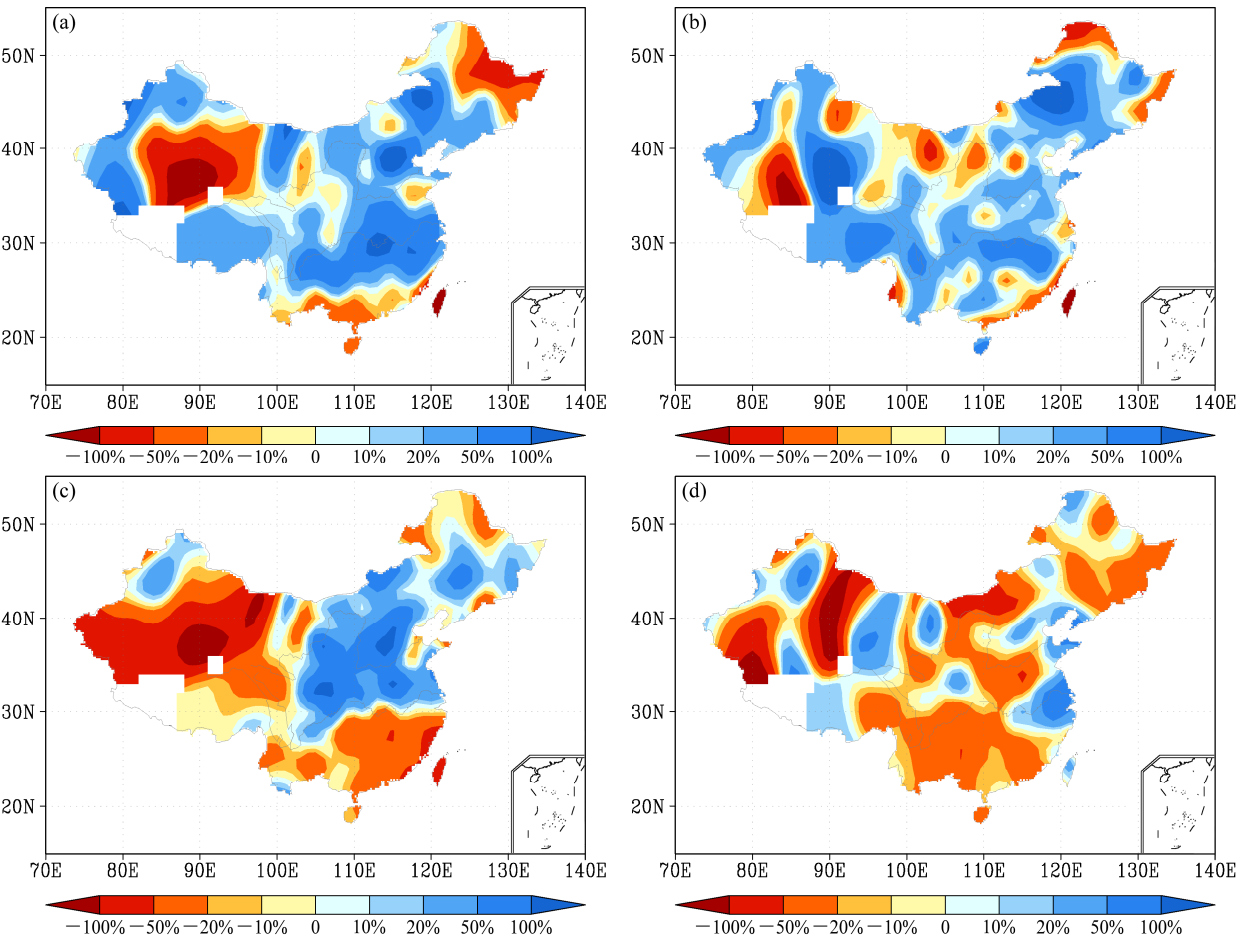


图 8 典型年份的中国夏季降水距平百分率: (a) 1954 年; (b) 1998 年; (c) 1956 年; (d) 2011 年
Fig. 8 The rainfall anomaly percentage in summer over China: (a) 1954; (b) 1998; (c) 1956; (d) 2011

表 2 南界水汽路径的各个指标之间及其与长江中下游夏季降水的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between different indices of south-boundary moisture path and those with rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer

	相关系数						
	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i> ₁	<i>C</i> ₂	<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂
<i>A</i>	−0.36**	1	0.91**	0.76**	−0.05	−0.25	−0.62**
<i>B</i>	−0.45**		1	0.75**	−0.17	−0.30	−0.61**
<i>C</i> ₁	−0.14			1	0.27	−0.26	−0.37**
<i>C</i> ₂	0.41**				1	0.09	0.27
<i>D</i> ₁	0.35**					1	0.25
<i>D</i> ₂	0.52**						1

注: *P* 为长江中下游地区夏季降水量, 其他同表 1。

**表示通过 99%的信度(统计)检验。

关系数通过了 99%的信度检验。向东延伸格点的经度值指标与降水相关表明, 向东延伸的越多, 长江

中下游地区的夏季降水则偏少, 反之, 则偏多。向东延伸格点的纬度指标、边界的经向强度指标以及纬向强度指标则与长江中下游夏季降水呈很好的正相关, 并且其与降水的相关均通过了 99%的信度检验。另外, 南界水汽路径各个指标之间的相关表明, 面积指标、中心强度指标以及向东延伸格点的经度值指标三者之间的相关更好, 尤其是前两者。

在此基础上, 为了更清楚地看出南界水汽路径的各个指标与降水的相关关系, 将南界水汽路径的各个指标与中国夏季降水做相关, 由于面积指标、中心强度指标以及边界纬向强度指标都有明显的年代际变化, 并且其与长江中下游夏季降水的相关均通过 99%的信度检验, 而向东延伸格点的纬度指标虽然没有明显的年代际变化, 但其与降水的相关较高, 所以这里只给出这四个指标与长江中下游地区的区域的夏季降水的相关场的分析。图 9 为

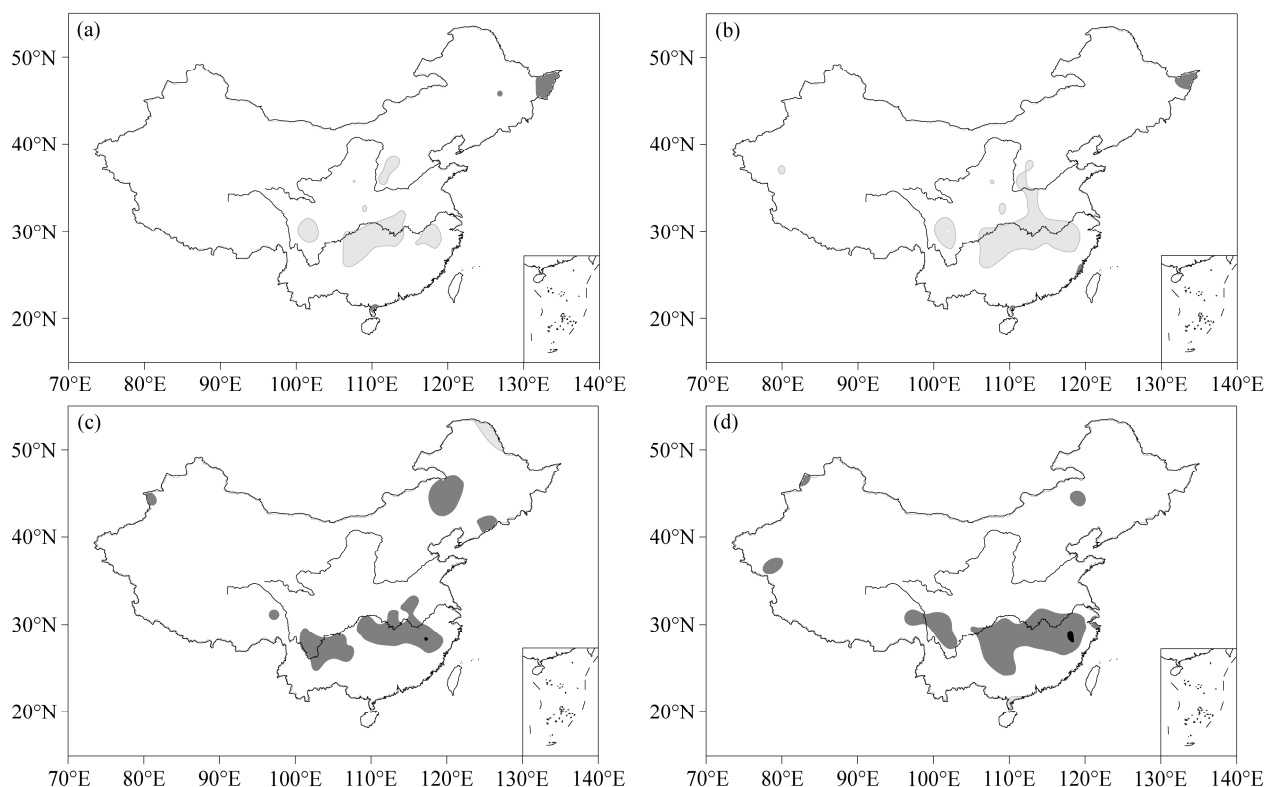


图9 南界水汽路径的各个指标与中国夏季降水的相关场:(a)面积 A ;(b)中心大值 B ;(c)向东延伸的格点的经度 C_1 ;(d)边界纬向强度 D_2 。深(浅)色阴影表示为正(负)相关显著性通过95%的信度检验

Fig. 9 The correlation distribution between indices of south-boundary moisture path and rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer: (a) Area A ; (b) center intensity B ; (c) longitude of eastern ridge point C_1 ; (d) zonal intensity on the boundary D_2 . Dark (light) shadings indicate positive (negative) correlation over 95% confidence level

1951~2011 年南界水汽路径的这四个指标与中国夏季降水的相关场,面积指标主要与我国长江流域的夏季降水呈负相关,中心大值指标主要与我国长江流域及黄河流域的河套地区的夏季降水呈负相关且通过了95%的信度检验。通过前面的分析可知,面积指标和中心强度指标两者的相关系数为0.91(表2),具有较好的一致性,两者与向东延伸格点的经度值指标的相关达到了0.75和0.76(表2),表明面积指标和中心强度的值偏小时,向东延伸格点偏西,西太平洋水汽输送的强度偏强或孟加拉湾水汽输送偏弱,则有利于汇合水汽向长江中下游地区输送,进而有利于长江流域的夏季降水,即降水偏多,反之亦然,这与Zhang(2001)的研究结果一致。图9c和9d表明,向东延伸格点的纬向值指标与我国的长江中下游和西南地区东部呈很好的正相关,另外与中国北方地区呈正相关,因为向东延伸的格点的位置偏北则表明水汽向北输送的强度偏强,有利于水汽向我国北方输送。纬向强

度与长江中下游地区呈正相关,纬向输送加强可能会有利于长江中下游地区夏季的降水,这可能主要受副高北边缘偏西风的影响。

5 南界水汽路径各个指标与前冬海温的相关关系分析

中国处于东亚季风区,面向太平洋,毗邻印度洋,太平洋和印度洋的海表热容量及海温异常等因素对中国气候异常有重要影响,陈烈庭(1997)、陶诗言等(1988)关于海温异常对气候的影响的研究已有不少,但是南界水汽路径与海温异常的关系还没有系统的研究。考虑到海温的“记忆”能力,即海温的慢变性和影响的持续性,将定义的夏季的南界水汽路径的各个指标与前冬的海温做了相关分析(图10),其相关通过了95%的信度检验。冬季海温的异常与夏季南界水汽路径的关系密切,南界水汽路径的面积指标、中心强度指标与冬季西太平洋($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$)的海温呈负相关,

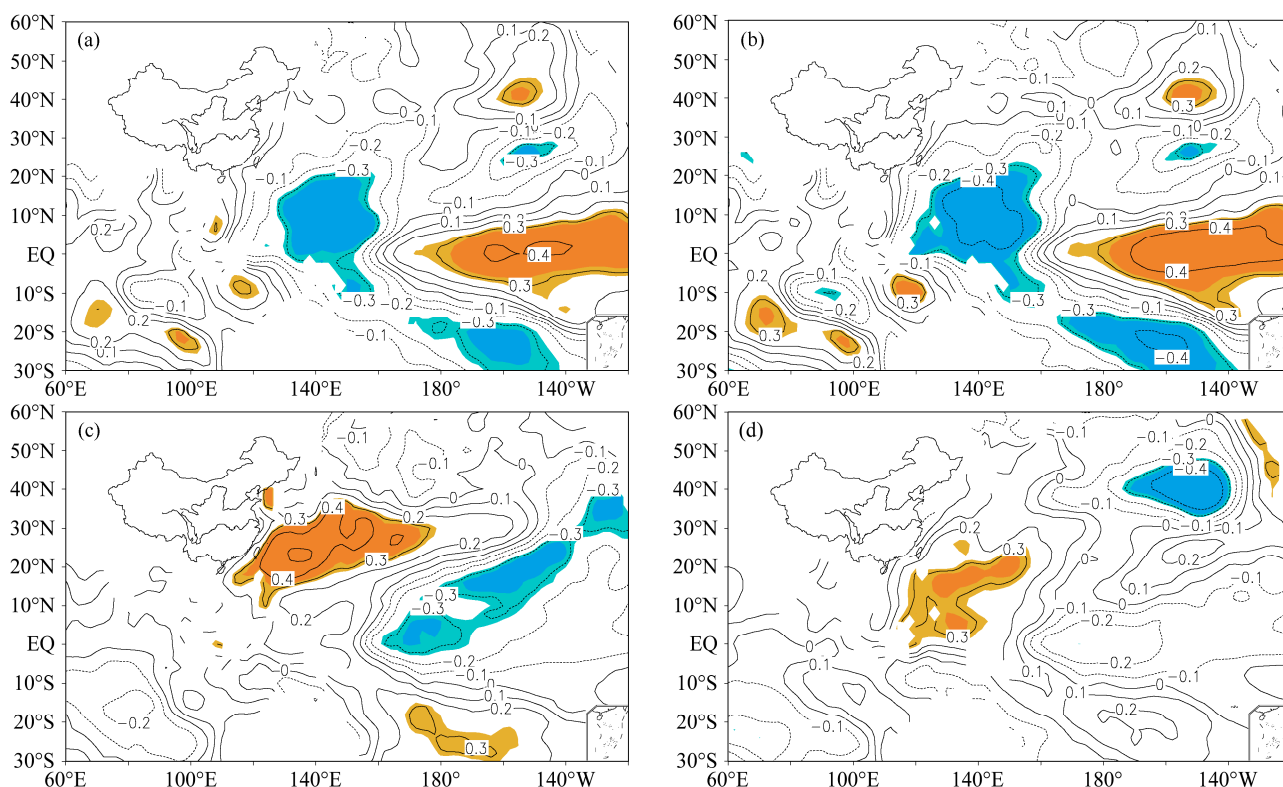


图 10 南界水汽路径的各个指标与前冬海温的相关场: (a) 面积 A ; (b) 中心大值 B ; (c) 向东延伸的格点的经度 C_1 ; (d) 边界纬向强度 D_2 。红、蓝色阴影分别表示为正、负相关通过 95% 的信度检验

Fig. 10 The correlation distribution between indices of south-boundary moisture path and SST in the previous winter: (a) Area A ; (b) center intensity B ; (c) longitude of eastern ridgepoint C_1 ; (d) zonal intensity on the boundary D_2 . Red (blue) shadings indicate positive (negative) correlation over 95% confidence level

与赤道中太平洋和东太平洋 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 的海温呈正相关。前冬东太平洋发生 El Niño 时, 有利于夏季西太平洋水汽输送增强, 进而有利于长江中下游地区夏季降水偏多, 这与图 9a、9b 的结果一致。此外, 中心强度指标还受印度洋海温的影响, 与其范围 ($10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{E}$) 的前一年冬季海温呈正相关。向东延伸格点的纬度值指标及边界纬向强度指标则与西太平洋 ($10^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 前一年冬季海温呈很好的正相关, 且向东延伸格点的纬度值指标通过信度检验的相关区域较大。

6 结论与讨论

本文定义了影响长江中下游夏季降水的南界水汽路径, 即对南界水汽路径用定量化的指标进行了描述和分析, 水汽路径的不同指标与不同地区的降水有关系, 所得结论如下:

(1) 对于南界水汽路径, 其不同的指标会影响

我国不同地区的降水, 而且有可能呈正好相反的关系。面积指标、中心大值指标主要与我国长江中下游的夏季降水呈负相关且通过了 99% 的信度检验。向东延伸的格点纬度指标、边界纬向和经向强度指标则与长江流域夏季降水呈很好的正相关且通过了 99% 的信度检验。

(2) 南界水汽路径的面积指标和中心强度指标有下降的趋势, 各个指标在 20 世纪 90 年代前后都有一个明显的转折。而面积指标、中心强度指标、边界纬向强度指标都有明显的年代际的变化。

(3) 通过对水汽路径的各个指标与冬季海温做相关, 分析可发现前冬太平洋和印度洋海温都会对南界水汽路径各指标有一定的影响, 南界水汽路径的面积指标、中心强度指标与冬季西太平洋 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 的海温呈负相关, 与赤道中太平洋和东太平洋 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 的海温呈正相关。前冬东太平洋发生 El Niño 时, 有利于夏季西太平洋水汽输送增强, 而西太平洋水

汽输送加强则有利于长江中下游地区夏季降水加强。

目前影响中国长江中下游夏季降水的南界水汽路径的定义还是比较初步的工作, 首先选择的区域不只是孟加拉湾, 还包括了南海, 而实际上在这个区域内也有太平洋水汽输送的作用, 准确地说应该是三个水汽的综合作用, 即有一个相互牵制的过程, 尤其是向东输送的孟加拉湾水汽与向西输送的西太平洋水汽。比如定义的向东延伸的格点的经度值与长江中下游夏季降水呈负相关, 表明向东延伸的格点的经度值偏小即偏西, 则说明西太平洋水汽输送的强度偏强或孟加拉湾水汽输送偏弱, 则有利于汇合水汽向长江中下游地区输送, 反之亦然, 这与 Zhang (2001) 的研究结果一致, 即孟加拉湾水汽输送和西太平洋的水汽输送强度是反的, 孟加拉湾水汽输送强时, 西太平洋的水汽输送强度弱, 长江中下游降水少。因此, 这个工作有一定的实际意义, 但仍然存在一些不足, 水汽路径的定义还不够全面, 需要进一步深入下去。

参考文献 (References)

- 陈烈庭. 1997. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响 [J]. 大气科学, 1 (1): 1–12. Chen Lieting. 1997. The effects of the anomalous sea-surface temperature of the equatorial eastern Pacific Ocean on the tropical circulation and rainfall during the rainy period in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 1 (1): 1–12.
- Chen M, Pollard D, Barron E J. 2005. Hydrologic processes in China and their association with summer precipitation anomalies [J]. J. Hydrol., 301: 14–28.
- Fan Ke, Wang Huijun, Choi Yong-Jean. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (4): 602–609.
- 封国林, 杨涵涓, 张世轩, 等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探 [J]. 大气科学, 36 (5): 1009–1026. Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1009–1026.
- 封国林, 孙树鹏, 赵俊虎, 等. 2013. 基于 2009 年初长江中下游地区持续阴雨过程的 10–30 天延伸期稳定分量的提取及配置分析 [J]. 中国科学, 43 (5): 836–847. Feng Guolin, Sun Shupeng, Zhao Junhu, et al. 2013. Analysis of stable components for extended-range (10–30 days) weather forecast: A case study of continuous overcast-rainy process in early 2009 over the mid-lower reaches of the Yangtze River [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 43 (5): 836–847.
- 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 2000. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关 [J]. 科学通报, 47 (7): 546–549. Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2000. The significant correlation of summer rainfall over Yangtze River and pre-Arctic Oscillation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 47 (7): 546–549.
- He Jinhai, Zhou Bing, Wen Min, et al. 2001. Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacific subtropical high [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (4): 497–510.
- 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 28 (4): 517–526. Huang Jiayou, Liu Ke, Zhao Xinyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (4): 517–526.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press. (http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Uq_tD7KBRR1 [2013-09-30]).
- 李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响 [J]. 气象, 25 (4): 20–25. Li Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (4): 20–25.
- 刘国纬. 1997. 水文循环的大气过程 [M]. 北京: 科学出版社, 120pp.
- Liu Guowei. 1997. Atmospheric Processes in Hydrologic Cycle (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 120pp.
- Murakami T. 1959. The general circulation and water vapor balance over the Far East during the rainy season [J]. Geophys. Mag., 29 (2): 137–171.
- 施能, 顾骏强, 黄先香, 等. 2004. 合成风场的统计检验和蒙特卡洛检验 [J]. 大气科学, 28 (6): 950–956. Shi Neng, Gu Junqiang, Huang Xianxiang, et al. 2004. Significance test and Monte Carlo test used in composite analysis of window field and applications [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 950–956.
- Simmonds I, Bi D H, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer [J]. J. Climate, 12 (5): 1353–1367.
- 陶诗言, 朱文妹, 赵卫. 1988. 论梅雨的年际变异 [J]. 大气科学, 12 (特刊): 13–21. Tao Shiyan, Zhu Wenmei, Zhao Wei. 1988. Interannual variability of Meiyu rainfalls [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12 (s1): 13–21.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. J. Climate, 13 (5): 1000–1016.
- Thompson D W J, Wallace J M, Hegerl G C. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends [J]. J. Climate, 13 (5): 1018–1036.
- Vecchi G A, Soden B J, Wittenberg A T, et al. 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing [J]. Nature, 441 (7089): 73–76.

- 王启光, 封国林, 郑志海, 等. 2011. 长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量预测研究 [J]. 大气科学, 35 (2): 287–297. Wang Qiguang, Feng Guolin, Zheng Zhihai, et al. 2011. A study of the objective and quantifiable forecasting based on optimal factors combinations in precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 287–297.
- 魏凤英. 2006. 长江中下游夏季降水异常变化与若干强迫因子的关系 [J]. 大气科学, 30 (2): 202–211. Wei Fengying. 2006. Relationships between precipitation anomaly over the middle and lower reaches of the Changjiang River in summer and several forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 202–211.
- 吴永萍, 王澄海, 沈永平. 2011. 1960–2009 年塔里木河流域降水时空演化特征及原因分析 [J]. 冰川冻土, 33 (6): 1268–1273. Wu Yongping, Wang Chenghai, Shen Yongping. 2011. Spatiotemporal evolution of precipitation over Tarim River basin during 1960–2009: Characteristics and reasons [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 33 (6): 1268–1273.
- Wu Yongping, Shen Yongping, Li B L. 2012. Possible physical mechanism of water vapor transport over Tarim River basin [J]. Ecological Complexity, 9: 63–70.
- 谢安, 毛江玉, 宋焱云, 等. 2002. 长江中下游地区水汽输送的气候特征 [J]. 应用气象学报, 13 (1): 67–77. Xie An, Mao Jiangyu, Song Yanyun, et al. 2002. Climatological characteristics of moisture transport over Yangtze River basin [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (1): 67–77.
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算 [J]. 气象学报, 30 (2): 173–185. Xie Yibing, Dai Wujie. 1959. Certain computational results of water vapour transport over eastern China for a selected synoptic case [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 30 (2): 173–185.
- 叶敏, 钱忠华, 吴永萍. 2013. 中国旱涝时空分布特征分析 [J]. 物理学报, 62 (13): 139203, doi:10.7498/aps.62.139203. Ye Min, Qian Zhonghua, Wu Yongping. 2013. Spatiotemporal evolution of the droughts and floods over China [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 62 (13): 139203, doi:10.7498/aps.62.139203.
- 叶敏, 吴永萍, 周杰, 等. 2014. 影响华北盛夏降水的水汽路径客观定量化的研究 [J]. 物理学报, 63 (12): 129201, doi:10.7498/aps.63.129201. Ye Min, Wu Yongping, Zhou Jie, et al. 2014. Objective quantification of the water vapor path influencing precipitation in North China in summer [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 63 (12): 129201, doi:10.7498/aps.63.129201.
- Zhang Renhe. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (5): 1005–1017.
- 张庆云, 郭恒. 2014. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究 [J]. 大气科学, 38 (4): 656–669. Zhang Qingyun, Guo Heng. 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 656–669.
- 张学文, 周少祥. 2010. 空中水文学初探 [M]. 北京: 气象出版社, 20pp. Zhang Xuewen, Zhou Shaoxiang. 2010. Discussion on Hydrology in the Air (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 20pp.
- 赵俊虎, 封国林, 王启光, 等. 2011. 2010 年我国夏季降水异常气候成因分析及预测 [J]. 大气科学, 35 (6): 1069–1078. Zhao Junhu, Feng Guolin, Wang Qiguang, et al. 2011. Cause and prediction of summer rainfall anomaly distribution in China in 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1069–1078.
- Zhou Tianjun, Ru Congyu. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J. Geophys. Res., 110 (D8): D08104, doi:10.1029/2004JD005413.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 影响华北汛期降水的水汽输送过程 [J]. 大气科学, 32 (2): 345–357. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July–August [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 345–357.