

陈际龙, 黄荣辉. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国陆地旱涝的关系. 地球物理学报 2008, 51(2): 352 ~ 359

Chen J L, Huang R H. Interannual and interdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 352 ~ 359

亚洲夏季风水汽输送的年际年代际 变化与中国旱涝的关系

陈际龙, 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心 北京 100080

摘 要 利用 1958 ~ 2002 年的 NCEP-R1 和 ERA-40 逐日再分析资料以及中国 160 站点月平均降水资料探讨了亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化及其与中国降水异常的关系. 分析结果表明, 亚洲夏季风水汽输送和中国夏季降水的异常主模态呈现显著的准两年变化周期. 当南亚夏季风纬向水汽输送偏强(弱)时, 东亚—西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常有利于长江中下游地区和江淮流域的水汽辐合(正)异常与华南和华北地区的水汽辐合(正/负)异常, 从而引起中国东部的经向三极子雨型, 即长江中下游地区和江淮流域的偏旱(涝)与华南和华北地区的偏涝(旱). 1970s 年代末之后, 亚洲夏季风水汽输送的年代际减弱与西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常相配合, 导致长江中下游地区的持续偏涝与华南和华北地区的持续偏旱. 从中国夏季降水异常与水汽通量辐合异常的同相对应关系来看, ERA-40 资料对亚洲夏季风水汽输送年际年代际变化的描述能力强于 NCEP-R1 资料.

关键词 亚洲夏季风, 年际变化, 年代际改变, 偶极型水汽输送异常, 三极子雨型

文章编号 0001-5733(2008)02-0352-08 中图分类号 P467 收稿日期 2006-02-15, 2007-10-23 收修定稿

Interannual and interdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China

CHEN Ji-Long, HUANG Rong-Hui

Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract The NCEP/NCAR reanalysis data (NCEP-R1) and the ECMWF reanalysis data (ERA-40) for the period of 1958 ~ 2002 are used to estimate interannual and interdecadal variations of vertically integrated moisture transport (VIMT) by Asian summer monsoon (ASM) and investigate their association with summer rainfall anomalies based on monthly precipitation at 160 stations in China. The results show that both VIMT by ASM and summer rainfall in China exhibit obvious biennial rhythms as revealed by time coefficient of the leading EOF mode. When summer VIMT is strong (weak) in the south Asia monsoon region, a dipole VIMT anomaly in the East Asia—western North Pacific is propitious to negative (positive) VIMT convergence anomalies in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Yangtze-Huaihe valley but positive (negative) VIMT convergence anomalies in South China and North China, which result in a meridional tripole structure of rainfall anomalies in eastern China, i. e., droughts (floods) in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Yangtze-Huaihe valley but floods (droughts) in South China and North China. On interdecadal scale, persistent floods in the middle and lower reaches of the Yangtze River but persistent droughts in South China and

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403600), 国家自然科学基金项目(40705034, 40725016)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(1AP07118)资助.

作者简介 陈际龙, 男, 1974 年生, 博士, 副研究员, 主要从事季风与海陆气相互作用的研究. E-mail: cjl@mail.iap.ac.cn

North China are mainly linked with weakening of VIMT by ASM and a dipole VIMT anomaly in the western North Pacific after the end of 1970s. In view of the in-phase relationship between summer rainfall anomalies and VIMT convergence anomalies in China, the analysed results also show interannual and interdecadal variations of VIMT by ASM can be better described by the ERA-40 reanalysis than the NCEP-R1 reanalysis.

Keywords Asian summer monsoon, Interannual variation, Interdecadal change, A dipole VIMT anomaly, A tripole rainfall anomaly

1 引言

水循环是一个与人类活动息息相关的复杂过程,渗透到气候系统的各个环节,因此,加强水循环过程对气候变化影响的研究意义重大.亚洲季风,尤其是夏季风,可从热带太平洋或印度洋携带充沛的水汽到陆地并形成降水,而降水的多寡可引起大范围的旱涝灾害,从而会给季风区各国的国民经济和人民生活带来严重影响.中国地处东亚强季风区,东亚夏季风的进退与中国夏季雨带的分布关系密切^[1~3].早期的许多研究^[4~7]已说明亚洲季风环流和水汽输送对于中国区域内的降水和水分平衡起着重要作用.

近十年来,随着“气候变率和可预报性”(CLIVAR)和“全球能量和水分循环试验”(GEWEX)等大型国际计划的实施和它们的联合“协同强化观测”(CEOP),用于气候研究的再分析资料得到充分发展和完善,其中 NCEP/NCAR 再分析资料(NCEP-R1)^[8]和 ECMWF 再分析资料(ERA-40)^[9]等的时间序列均超过 40 年.目前, NCEP-R1 资料已被广泛应用于水汽输送与中国夏季降水的关系研究^[10~16]中,而 ERA-40 资料针对中国区域水汽输送的研究甚少^[16].从大气水分平衡方程^[17]来看,季风环流是水汽输送的载体,而水汽输送的变化控制着水分汇聚,进而成云致雨.最近,陈际龙等^[18]的研究指出,ERA-40 资料对亚洲夏季风水汽输送气候态的描述能力似乎强于 NCEP-R1 资料.然而,季风具有显著的年际和年代际变化特征^[19,20],再分析资料的选择不当可能导致虚假的结论^[21,22].与水汽输送气候学特征的研究相比,亚洲夏季风水汽输送的变异规律及其对中国旱涝灾害的影响还不是很清楚,有待于进一步探讨.为此,本研究主要关注亚洲夏季风水汽输送的年际和年代际变化特征及其与中国降水异常的关系,同时利用大气水平平衡方程检验两套再分析资料描述亚洲夏季风水汽输送变异的能力.

2 水汽输送与大气水平衡

由于大气水汽主要集中在对流层,因此,单位气柱内整层水汽输送通量的计算公式为

$$Q = \frac{1}{g} \int_{100}^{P_s} qV dp = \frac{1}{g} \int_{100}^{P_s} q(u, v) \lambda dp, \quad (1)$$

q 和 V 分别表示该单位气柱各层大气的比湿和矢量风, u 和 v 分别为纬向风和经向风分量, P_s 是地表气压, g 是重力加速度.

球坐标系下,水汽通量辐合 C 可由(2)式计算,即

$$C = -\nabla \cdot Q \\ = -\frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial Q_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{\partial Q_\varphi \cos \varphi}{\partial \varphi} \right), \quad (2)$$

其中 λ 、 φ 分别为经度和纬度, a 是地球半径. C 表示水汽输送的源汇.若 $C < 0$,即为水汽辐散,或为水汽输送源,相反,若 $C > 0$,即为水汽辐合,或为水汽输送汇.

若忽略大气中液态和固态水,那么夏季平均的大气水平平衡方程^[17]可表达为

$$[P] \approx [C] + [E], \quad (3)$$

P 是降水, E 是蒸发, $[\]$ 表示夏季平均.(3)式表明某个地区的夏季降水主要来源于流进此地区水汽的辐合和由此地区蒸发而来的水汽.

根据公式(1)和(2),水汽输送通量及其辐合由 NCEP-R1 和 ERA-40 逐日再分析资料导出;中国 160 站点的月平均降水资料由中国气象局提供.为保持资料的统一性,这里仅取共同年限 1958~2002 年,夏季取 6、7、8 三个月平均,水汽输送通量 Q 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,水汽通量辐合 C 的单位可转化为 mm .图 1 给出了 1958~2002 年夏季平均的 ERA-40 水汽输送通量.陈际龙等^[18]的研究表明,热带暖湿水汽随亚洲夏季风环流扩展并辐合是促使夏季风雨带形成的关键因素.在中国区域,影响夏季降水的水汽主要属于外界输入,且蒸发的年际变化幅度很小^[23].因此,中国夏季降水异常主要取决于水汽通

量辐合的变化,即中国夏季降水异常应与水汽通量辐合异常呈同相对应关系,且数量级相当.本文主要探讨亚洲夏季风水汽输送(即图 1 所示虚线框内的水汽输送)的变异特征及其与中国夏季降水异常的关系.诊断分析方法主要包括经验正交函数(EOF)分解、线性回归等.

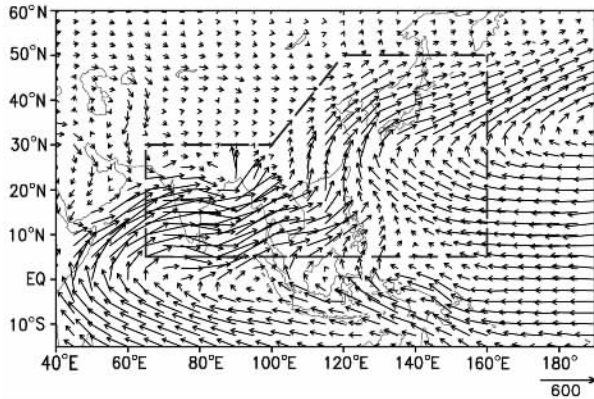


图 1 1958~2002 年夏季平均的 ERA-40 水汽输送通量(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 1 Climatology of summer moisture flux from ERA-40 reanalysis for the period of 1958~2002 (unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

3 亚洲夏季风水汽输送的年际变化与中国降水异常

为了研究亚洲夏季风水汽输送的年际变化规律,选取图 1 所示虚线框内的水汽输送通量异常进行向量 EOF 分解. NCEP-R1 资料和 ERA-40 资料的 EOF 第一模态(EOF1)方差贡献分别为 24.3% 和 26.5%,说明 EOF1 模态能在一定程度上代表水汽输送的主要年际变化时空特征.参考 EOF1 模态的标准化时间系数(即主成分)对水汽输送矢量异常作线性回归,即可得到相应的空间型.图 2 给出了亚洲夏季风水汽输送 EOF1 模态的空间型和主成分.由图 2 可知, NCEP-R1 资料和 ERA-40 资料的 EOF1 模态相当一致,南亚季风区为纬向水汽输送异常,而东亚—西北太平洋地区水汽输送表现为偶极型异常.若南亚夏季风纬向水汽输送偏强,则东亚—西北太平洋地区 $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间为气旋式水汽输送异常,而 $30^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 之间为反气旋式水汽输送异常;反之,若南亚夏季风纬向水汽输送偏弱,则东亚—西北太平洋地区 $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间为反气旋式水汽输送异常,而 $30^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 之间为气旋式水汽输送异常.为方便讨论, NCEP-R1 和 ERA-40 水汽输送 EOF1 模

态的主成分分别记为 T_N 和 T_E ,如图 2c 所示,实线对应 T_N ,虚线对应 T_E , T_N 和 T_E 的年际变化非常一致,两者的相关系数高达 0.99,而且均呈现出 2~3 年的变化周期,这说明亚洲夏季风水汽输送具有准两年振荡的特征.

那么,亚洲夏季风水汽输送 EOF1 模态是否能很好解释中国夏季降水的主要年际变化特征?为此,对中国 160 站点的夏季降水进行 EOF 分解,第一模态的方差贡献仅为 15.7%,这与降水的强局地性有关.图 3 给出了中国陆地夏季降水 EOF1 模态的空间型和主成分.从图 3a 可以看到,中国夏季降水 EOF1 模态的空间型主要表现为中国东部地区的经向三极子分布,显著的负信号位于长江中下游地区和江淮流域,而显著的正信号位于华南和华北地区.这表明华南和华北地区夏季降水异常往往与长江中下游地区和江淮流域的夏季降水异常反相,若长江中下游地区和江淮流域的夏季降水偏多,则华南和华北地区夏季降水往往偏少;反之,若长江中下游地区和江淮流域的夏季降水偏少,则华南和华北地区夏季降水往往偏多.为方便讨论,中国夏季降水 EOF1 模态的主成分记为 T_R ,从图 3b 可以看出, T_R 有显著的 2~3 年的变化周期,即中国东部的夏季风降水也具有准两年振荡的特征. T_N 与 T_R 之间的相关系数为 0.347, T_E 与 T_R 之间的相关系数为 0.364,均超过 98% 的信度检验,这表明亚洲夏季水汽输送通量 EOF1 模态与中国夏季降水 EOF1 模态有很好的对应关系.中国夏季风降水和东亚水汽输送的准两年周期振荡可能与西太平洋暖池的热状况变化有密切关系^[24],这里不再另作讨论.

从中国夏季降水异常与水汽辐合异常的同相对应关系可知,水汽辐合正异常对应降水偏多,而水汽辐合负异常对应降水偏少.结合图 2 和图 3 可知,当南亚夏季风纬向水汽输送偏强时,东亚—西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常有利于长江中下游地区和江淮流域的水汽辐合负异常与华南和华北地区的水汽辐合正异常,从而导致长江中下游地区和江淮流域降水偏少,华南和华北地区降水偏多;反之,当南亚夏季风纬向水汽输送偏弱时,东亚—西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常有利于长江中下游地区和江淮流域的水汽辐合正异常与华南和华北地区的水汽辐合负异常,从而导致长江中下游地区和江淮流域降水偏多,华南和华北地区降水偏少.

T_N 与 T_R 的相关系数小于 T_E 与 T_R 的相关系

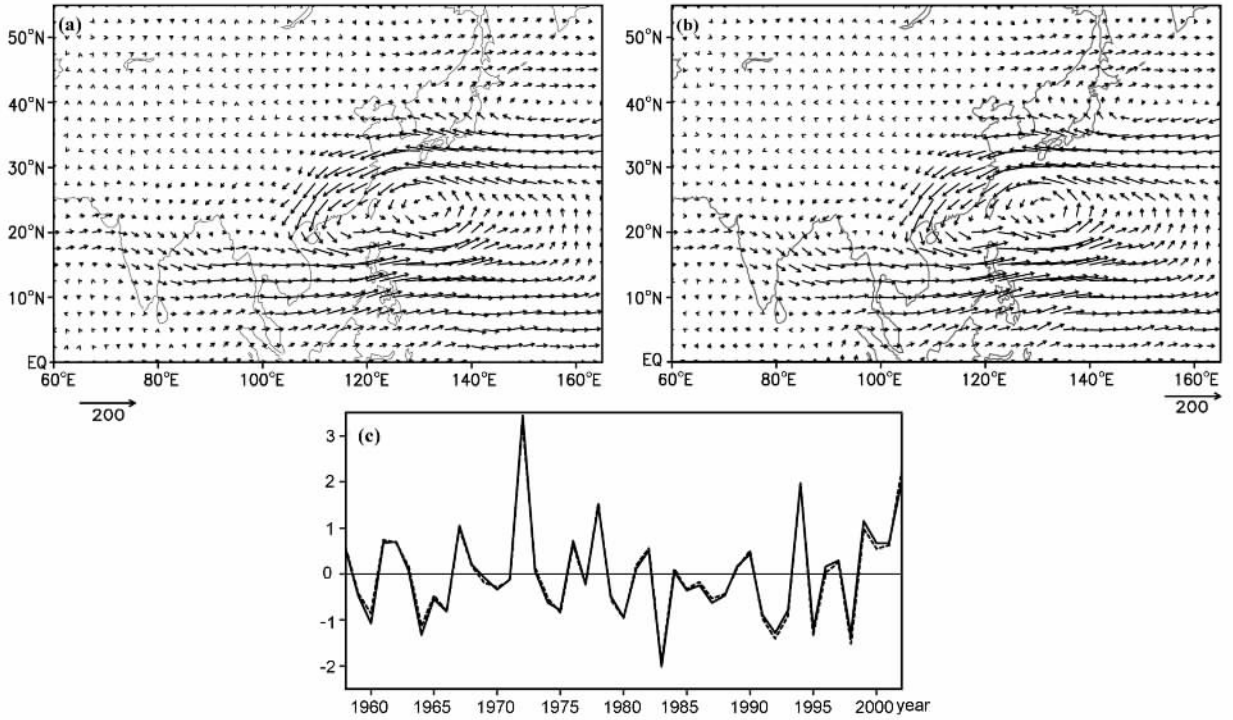


图 2 亚洲夏季风水汽输送 EOF 分解的第一模态

(a) NCEP-R1 空间型 ;(b) ERA-40 空间型 ;(c) 主成分 .(a)和 (b)中的矢量单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. (c)中实线和虚线分别是 NCEP-R1 和 ERA-40 的主成分 .

Fig.2 NCEP-R1 (a) and ERA-40 (b) spatial patterns for the leading EOF mode of summer moisture transport by Asian summer monsoon and their corresponding principal components (c)

Vectors in Fig.2a and Fig.2b are in units of $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. The solid and dashed lines in Fig.2c indicate NCEP-R1 and ERA-40 principal components , respectively.

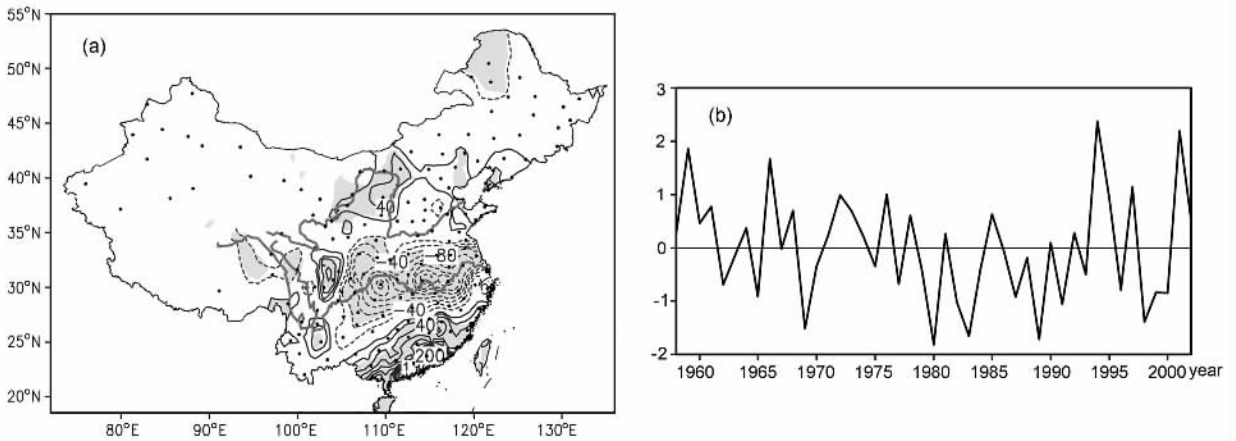


图 3 中国陆地夏季降水 EOF 分解的第一模态 :(a) 空间型 ;(b) 主成分

(a) 中的等值线间隔为 20 mm , 零线略去 , 阴影表示信度超过 95% , 黑点代表中国 160 站点位置 , 灰粗线表示长江黄河 .

Fig.3 The spatial pattern (a) and the principal component (b) for the leading EOF mode of summer rainfall in China

The contour interval in Fig.3a is 20 mm , and zero contour is not shown , and shading denotes significance at 95% confidence level. Black dots in Fig.3a indicate locations of 160 observational stations in China , and the grey thick curves denote the Yangtze River and the Yellow River.

数 这似乎暗示 ERA-40 资料对水汽输送年际变化的描述能力要强于 NCEP-R1 资料 . 以中国夏季降水

异常与水汽辐合异常的同相对应关系为依据可以检验不同再分析资料描述水汽输送年际变化的能力 .

为此,用 T_R 对 NCEP-R1 和 ERA-40 的水汽通量辐合进行线性回归,如图 4. 与图 3a 所示的中国东部经向三极子型降水异常相似,图 4a 和图 4b 的中国东部水汽辐合异常信号大致呈现从南到北的正负正分布. 这表明 NCEP-R1 资料和 ERA-40 资料对水汽输

送的年际变化都有较好的描述. 但从显著阴影区来看,ERA-40 水汽辐合异常与中国夏季降水异常的同相对应关系更为合理. 可见,相对 NCEP-R1 资料而言,ERA-40 资料更适合描述亚洲夏季风水汽输送的年际变化.

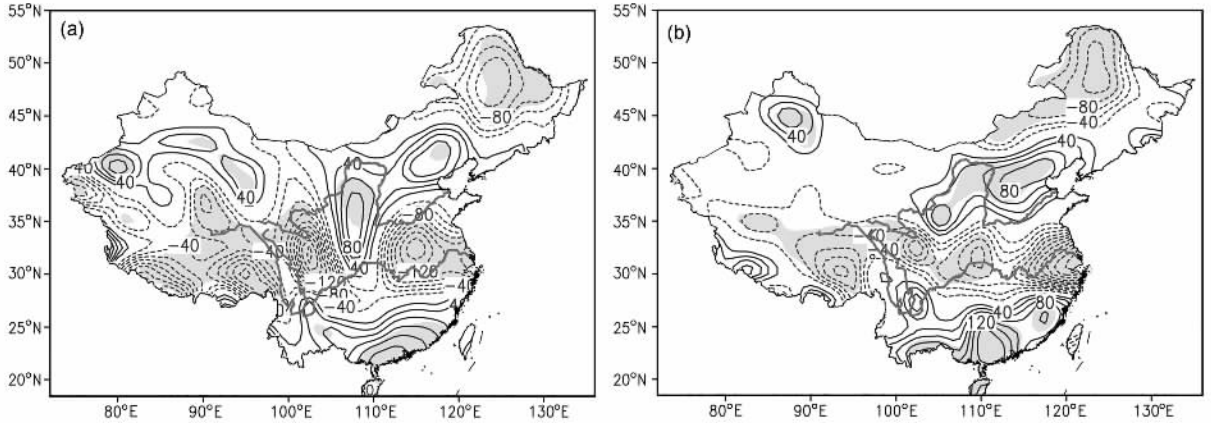


图 4 主成分 T_R 回归的水汽通量辐合

(a) NCEP-R1 水汽通量辐合;(b) ERA-40 水汽通量辐合. 等值线间隔为 30 mm, 零线略去. 阴影表示信度超过 95%. 灰粗线表示长江黄河.

Fig. 4 Regression pattern for summer moisture flux convergence from NCEP-R1 (a) and ERA-40 (b) reanalysis with respect to T_R

The contour interval is 30 mm, and zero contour is not shown. Shading denotes significance at 95% confidence level. The grey thick curves denote the Yangtze River and the Yellow River.

4 亚洲夏季风水汽输送的年代际减弱与中国持续旱涝

除了年际变化外,亚洲夏季风还有显著的年代际变化^[19,20],如 1970s 年代末的亚洲夏季风减弱^[25],与此相应,中国东部地区旱涝发生的频率和面积都明显增加^[26]. 由于资料长度所限,本文仅探讨 1970s 年代末亚洲夏季风水汽输送的年代际改变(1981~2002 年期间与 1958~1976 年期间的夏季平均之差)与中国旱涝的关系.

图 5 给出了 1970s 年代末亚洲夏季风水汽输送通量的年代际变化趋势. 从图 5a 的 NCEP-R1 资料来看,与 1970s 年代末之前相比,1970s 年代末之后的主要表现为亚洲夏季风水汽输送显著减弱,这与亚洲夏季风年代际减弱^[25]的观点相吻合. 从图 5b 的 ERA-40 资料来看,1970s 年代末之后主要表现为西北太平洋地区和孟加拉湾—印度半岛地区水汽输送的偶极型异常,图 5a 中也存在类似的水汽输送偶极型异常,但是位置稍有差异. 其中西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常在两套资料中的表现相对一

致,15°N~30°N 之间为反气旋式水汽输送异常,30°N~50°N 之间为气旋式水汽输送异常. 然而,图 5a 和图 5b 的最大差别在于,ERA-40 资料的亚洲夏季风水汽输送减弱不如 NCEP-R1 资料显著. 另外,NCEP-R1 资料中蒙古地区强大的反气旋式水汽输送异常在 ERA-40 资料中也不明显,这与 Inoue 等^[22]针对海平面气压的分析结果一致. 由此可见,不同资料可能导致相当不同的结论.

针对再分析资料的可靠性,Yang 等^[21]的研究指出 1968 年之前的 NCEP-R1 资料在某些地区存在系统性误差. 这里不妨以中国夏季降水异常与水汽辐合异常的同相对应关系为依据来检验两套再分析资料描述水汽输送年代际变化的能力. 图 6 给出了 1970s 年代末中国陆地夏季降水和水汽通量辐合的年代际改变. 从图 6a 可以看到,与 1970s 年代末之前相比,1970s 年代末之后的降水异常大致呈经向三极子型分布,即长江中下游地区持续偏涝,而华南和华北地区持续偏旱,这与黄荣辉等^[26]的结论一致. 结合图 6b 和图 6c 可知,NCEP-R1 资料的水汽辐合异常与中国东部经向三极子旱涝型的同相对应关系不如 ERA-40 资料合理. 显然,ERA-40 资料对亚洲

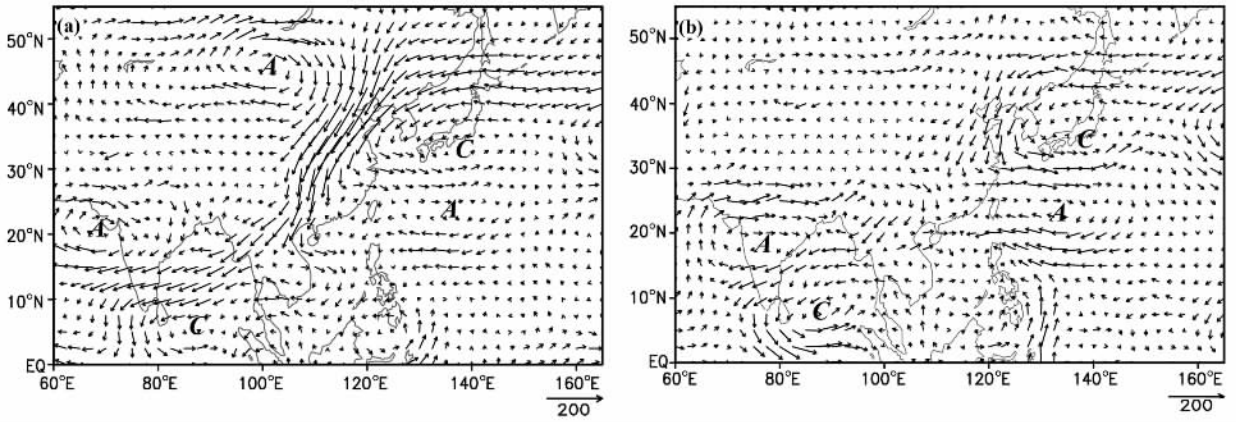


图 5 1970s 年代末亚洲夏季风水汽输送通量的年代际改变：NCEP-R1 (a) 和 ERA-40 (b)

矢量单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，C 代表气旋式，A 代表反气旋式。

Fig.5 Interdecadal change of NCEP-R1 (a) and ERA-40 (b) moisture transport by Asian summer monsoon around the end of 1970s

Vector is in units of $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. C and A indicate cyclonic and anticyclonic, respectively.

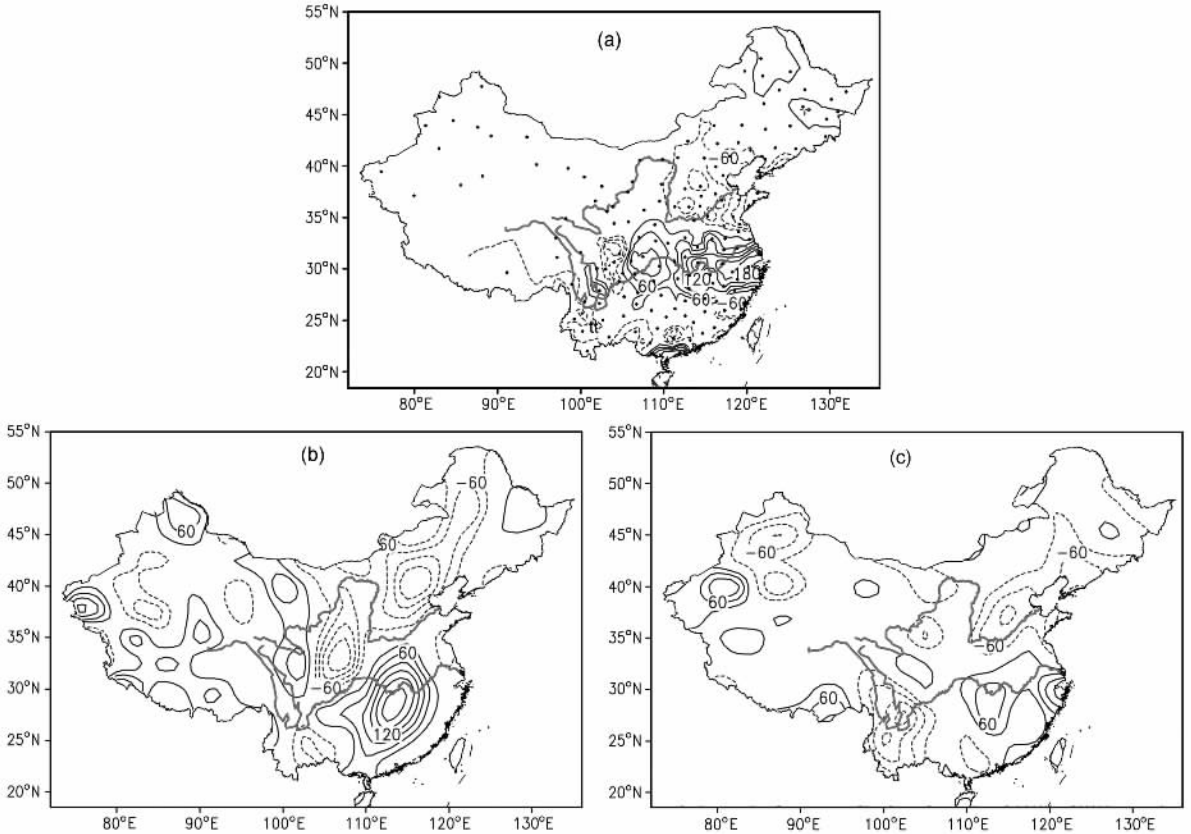


图 6 1970s 年代末中国陆地夏季降水 (a) 以及 NCEP-R1 (b) 和 ERA-40 (c) 水汽通量辐合的年代际改变

等值线间隔为 30 mm，零线略去。灰粗线表示长江黄河。(a) 中的黑点代表中国 160 站点位置。

Fig.6 Interdecadal change of summer rainfall in China (a) and moisture flux convergence

from NCEP-R1 (b) and ERA-40 (c) reanalysis around the end of 1970s

The contour interval is 30 mm, and zero contour is not shown. The grey thick curves denote the Yangtze River

and the Yellow River. Black dots in Fig.6a indicate locations of 160 observational stations in China.

夏季风水汽输送年代际变化的描述能力强于 NCEP-R1 资料。

以上分析同时表明，1970s 年代末之后，与亚洲夏季风水汽输送的减弱和西北太平洋地区水汽输送

的偶极型异常相对应,长江中下游地区为水汽辐合正异常,而华南和华北地区为水汽辐合负异常,从而导致长江中下游地区持续偏涝,而华南和华北地区持续偏旱。

5 结论与讨论

利用 1958~2002 年的 NCEP-R1 和 ERA-40 再分析资料以及中国 160 站点降水资料,结合大气水分平衡方程对亚洲夏季风水汽输送和中国夏季降水的年际年代际变化特征及相互关系进行探讨,得到如下结论:

亚洲夏季风水汽输送和中国夏季降水的异常主模态呈现显著的准两年变化周期。当南亚夏季风纬向水汽输送偏强时,东亚—西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常有利于长江中下游地区和江淮流域的水汽辐合负异常与华南和华北地区的水汽辐合正异常,从而导致长江中下游地区和江淮流域的偏旱与华南和华北地区的偏涝;反之,当南亚夏季风纬向水汽输送偏弱时,东亚—西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常有利于长江中下游地区和江淮流域的水汽辐合正异常与华南和华北地区的水汽辐合负异常,从而导致长江中下游地区和江淮流域的偏涝与华南和华北地区的偏旱。1970s 年代末之后,与亚洲夏季风水汽输送的年代际减弱和西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常相关联,长江中下游地区为水汽辐合正异常,而华南和华北地区为水汽辐合负异常,从而导致长江中下游地区持续偏涝,而华南和华北地区持续偏旱。由此可见,中国东部夏季降水异常的经向三极子型分布主要由东亚—西北太平洋地区水汽输送的偶极型异常引起,但这种偶极型异常的年际和年代际机理有待进一步研究。

从中国夏季降水异常与水汽辐合异常的同相对应关系可以看出,ERA-40 资料描述亚洲夏季风水汽输送年际年代际变化的能力强于 NCEP-R1 资料。因此,在做气候分析,尤其是涉及到年代际变化问题时,选用 ERA-40 资料可能更为合理。

审图号 GS(2008)B25。

参考文献 (References)

- [1] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamurti T N eds. Monsoon Meteorology. Oxford University Press, 1987. 60~92
- [2] 陈隆勋,朱乾根,罗会邦等. 东亚季风. 北京:气象出版社, 1991. 362
- [3] Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al. The East Asian Monsoon (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362
- [4] Ding Y. Monsoons over China. Kluwer Academic Publisher, 1994. 419
- [5] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, 1: 1~26
- [6] Zhu K Z. Southeast monsoon and rainfall in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1934, 1: 1~26
- [7] 徐淑英. 我国水汽输送与平衡. 气象学报, 1958, 29: 33~43
- [8] Xu S Y. Water vapor transport and balance over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, 29: 33~43
- [9] 陆渝蓉,高国栋. 中国大气中的水汽平均输送. 高原气象, 1983, 2: 34~48
- [10] Lu Y R, Gao G D. The mean water vapor transport over China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1983, 2: 34~48
- [11] 吴国雄. 大气水汽的输送和收支及其对副热带干旱的影响. 大气科学, 1990, 14: 53~63
- [12] Wu G X. Transports and budgets of atmospheric water vapor and their impacts on subtropical drought. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1990, 14: 53~63
- [13] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77: 437~471
- [14] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 2005, 131: 2961~3012
- [15] Zhang R H. Relations of water vapor transport from India monsoon with that over East Asia and summer rainfall in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, 18: 1005~1017
- [16] 田红,郭品文,陆维松. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系. 南京气象学院学报, 2002, 25: 496~502
- [17] Tian H, Guo P W, Lu W S. Features of water vapor transfer by summer monsoon and their relations to rainfall anomalies over China. *J. Nanjing Inst. Meteor.* (in Chinese), 2002, 25: 496~502
- [18] 王会军,薛峰. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响. 地球物理学报, 2003, 46: 18~25
- [19] Wang H J, Xue F. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-Hemispheric water vapor transport and on the East Asian summer rainfall. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46: 18~25
- [20] 徐祥德,陈联寿,王秀荣等. 长江流域梅雨带水汽输送源-汇结构. 科学通报, 2003, 48: 2288~2294
- [21] Xu X D, Chen L S, Wang X R, et al. Moisture transport source-sink structure of the Meiyu rainbelt along the Yangtze River valley. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, 48: 2288~2294
- [22] Zhou T J, Yu R C. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: D08104, doi:10.1029/2004JD005413
- [23] 陈艳,丁一汇,肖子牛等. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响. 大气科学, 2006, 30: 25~37
- [24] Chen Y, Ding Y H, Xiao Z N, et al. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese),

- 2006, **30**: 25 ~ 37
- [16] 张文君, 周天军, 宇如聪. 中国东部水汽收支的初步分析. 大气科学, 2007, **31**: 329 ~ 345
Zhang W J, Zhou T J, Yu R C. A preliminary analysis on the moisture budget of East China. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007, **31**: 329 ~ 345
- [17] Peixoto J P, Oort A H. *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 1992. 520
- [18] 陈际龙, 黄荣辉. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 II : 夏季风水汽输送. 大气科学, 2007, **31**: 766 ~ 778
Chen J L, Huang R H. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian monsoon subsystems, Part II : water vapor transport by summer monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007, **31**: 766 ~ 778
- [19] Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons : processes, predictability, and prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14451 ~ 14510
- [20] Huang R H, Zhou L T, Chen W. The progresses of recent studies of the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 55 ~ 69
- [21] Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *J. Climate*, 2002, **15**: 306 ~ 325
- [22] Inoue T, Matsumoto J. A comparison of summer sea level pressure over East Eurasia between NCEP/NCAR reanalysis and ERA-40 for the period 1960 - 99. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82**: 951 ~ 958
- [23] Simmonds I, Bi D, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. *J. Climate*, 1999, **12**: 1353 ~ 1367
- [24] 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚等. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因. 大气科学, 2006, **30**: 545 ~ 560
Huang R H, Chen J L, Huang G, et al. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 545 ~ 560
- [25] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **17**: 376 ~ 385
- [26] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北的干旱化趋势. 高原气象, 1999, **18**: 465 ~ 476
Huang R H, Xu Y H, Zhou L T. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18**: 465 ~ 476

(本文编辑 何 燕)