

秦育婧, 卢楚翰. 2013. 利用高分辨率 ERA-Interim 再分析资料对 2011 年夏季江淮区域水汽汇的诊断分析 [J]. 大气科学, 37 (6): 1210–1218, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12163. Qin Yujing, Lu Chuhan. 2013. Diagnostic study of summer moisture sinks over the Yangtze–Huaihe River basin in 2011 based on high-resolution ERA-Interim reanalysis data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1210–1218.

利用高分辨率 ERA-Interim 再分析资料对 2011 年夏季江淮区域水汽汇的诊断分析

秦育婧^{1,2} 卢楚翰²

¹ 南京信息工程大学资料同化研究与应用中心, 南京 210044

² 南京信息工程大学大气科学学院/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 利用水平分辨率接近 $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ 、垂直方向 60 层的 ERA-Interim 再分析资料, 分析了 2011 年夏季江淮区域水汽汇的演变及各项的贡献, 研究了与水汽辐合项有关的水汽输送及相应的月平均环流和天气尺度扰动。结果表明: (1) ERA-Interim 再分析资料对江淮区域夏季水汽平衡有较好的描述能力。由水汽辐合项与水汽局地变化项计算的水汽汇值和用降水与蒸发求得的水汽汇值高度一致, 说明该资料可用于研究江淮区域的水汽汇。(2) 2011 年夏季江淮区域整体处于水汽汇区, 且水汽汇值具有明显的 2~6 天的天气尺度振荡。降水对水汽汇的贡献远大于蒸发, 而水汽辐合项与水汽局地变化项对水汽汇均有较大贡献, 并且对水汽汇具有超前 1~2 天的指示作用。(3) 月平均环流和天气尺度扰动均通过与水汽输送密切相关的水汽辐合项对江淮区域水汽汇产生显著影响。月际尺度的水汽汇变化与大尺度大气环流尤其是副高有密切关系; 而江淮流域及西南地区的天气扰动对江淮区域水汽汇的天气尺度振荡起到至关重要的作用。

关键词 水汽汇 水分收支 ERA-Interim 再分析资料 江淮区域

文章编号 1006-9895(2013)06-1210-09

中图分类号 P448

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12163

Diagnostic Study of Summer Moisture Sinks over the Yangtze–Huaihe River Basin in 2011 Based on High-Resolution ERA-Interim Reanalysis Data

QIN Yujing^{1,2} and LU Chuhan²

¹ Center of Data Assimilation for Research and Application, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044

² Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The summer moisture sink and its components in the Yangtze–Huaihe River basin (YHRB) in 2011 were investigated using high-resolution ERA-Interim reanalysis data at a horizontal resolution of approximately $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ with 60 σ vertical levels. The associated large-scale general circulation and synoptic disturbances were also investigated. The results can be summarized as follows. 1) Summer water vapors over the YHRB are well matched based on the water vapor balance equations used for the ERA-Interim data. The moisture sink derived from water vapor convergence minus

收稿日期 2012-10-07, 2013-04-20 收修定稿

资助项目 国家重点基础发展计划项目 2010CB428602, 国家自然科学基金资助项目 41205065、41005046, 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介 秦育婧, 女, 1982 年出生, 博士, 主要从事大气环流异常与短期气候预测研究。E-mail: qinyujing@nuist.edu.cn

通讯作者 卢楚翰, E-mail: luchuhan@nuist.edu.cn

the local moisture tendency is highly consistent with its counterpart derived from precipitation minus evaporation (P-E), indicating good performance of the ERA-Interim reanalysis in describing moisture sinks for the YHRB region. 2) On a monthly mean basis, the YHRB area was a moisture sink in summer 2011, and its evolution exhibits a pronounced 2–6-day synoptic fluctuation. The contribution of precipitation to the moisture sink is notably larger than that of evaporation during the rainy season. Conversely, both moisture convergence and the local moisture tendency play an important role in the moisture sink, with a 1–2-day predictable skill for its daily change. 3) Combined with water vapor transport associated with moisture convergence, both the large-scale circulation and local synoptic weather systems contribute greatly to the YHRB regional moisture sink. In particular, the position of the western Pacific subtropical high is closely related to the regional moisture sink on a monthly mean basis, whereas local weather disturbances over the YHRB and southwestern China primarily impact the regional moisture sink on a synoptic basis.

Keywords Moisture sink, Water budget, ERA-Interim reanalysis, Yangtze-Huaihe River basin

1 引言

作为水分循环的一个重要分量, 大气的水汽收支不仅与大气环流和天气系统中的水汽含量多寡有关, 而且通过潜热释放和辐射作用对能量输送和平衡产生重要影响 (Webster, 1994; Serreze et al., 1995), 是气候系统中一个重要的热力过程。相对于地表水循环过程, 水循环的大气过程具有更大的空间尺度, 在区域水分循环中有十分重要的作用。因此对区域水汽收支的研究, 有助于揭示区域水循环规律, 加强对区域水循环的理解。

近年来, 随着观测资料的日益丰富及全球再分析资料的陆续发布, 学者们对区域水汽收支开展了许多有意义的工作。丁一汇和胡国权 (2003) 分析了 1998 年中国大洪水时期的全球水汽背景, 指出降水主要来自水汽的辐合项, 辐合主要发生在大气低层, 且长江流域的强降水过程与大尺度水汽辐合的极大值密切相关。Zhou and Yu (2005) 研究了与夏季中国典型异常降水型相联系的大气水汽输送, 发现夏季的两个异常降水型的水汽来源皆不同于正常情况下的季风降水。周玉淑等 (2005) 通过对 2003 年 6 月 21 日~7 月 11 日强梅雨期间水汽输送流函数及非辐散分量、势函数与辐散分量以及江淮地区水汽收支的分析, 发现大气中的水汽输送和辐合对梅雨和梅雨锋系双锋结构的形成提供了必要的条件。赵瑞霞等 (2008) 研究了夏季风期间与不同月份长江流域水汽收支的年际变化显著相关的大尺度水汽输送, 并分析了水汽收入多寡年对应的不同环流异常配置。Zhang et al. (2009) 揭示了近五十年来长江中下游流域夏季水汽收入的明显增多导致该区域降水以及径流出现增长趋势。Feng and Zhou (2012) 利用多来源的资料研究了青藏高原夏季水汽输送, 就气候状况而言, 青藏高原在夏

季是水汽汇, 通过南边界的水汽输送, 是青藏高原西南部夏季降水的主要水汽源, 来自西边界的水汽仅为南边界的 32%。但通过西边界的水汽输送对青藏高原西南部夏季降水的年际变化起主要作用。

研究区域水汽收支所需的观测资料难以获取, 尤其是土壤含水量、蒸发及径流等要素, 这给区域水分收支的研究带来了很大困难。ERA40, NCEP/NCAR 等再分析资料发布之后, 区域水分平衡的估算能力有了较大提高 (Oki et al., 1995; Mo and Higgins, 1996)。这些资料综合了地面、探空、卫星等观测资料, 经过天气模式的客观同化, 为水分收支分析提供了所需的各种要素。但为了使模式的部分输出量与实测接近, 同化过程中进行了余项订正, 因而其水分收支并不平衡, 存在一个虚假“余项” (Kanamitsu and Saha, 1996; Roads et al., 1999)。评估发现, 在特定海域特别是中、低纬度, ERA 资料与 NCEP/NCAR 资料的结果相差较大 (周天军, 2003); ERA40 及 NCEP/NCAR 等再分析资料对我国区域水分平衡的描述与实际观测仍然存在差异 (张文君等, 2007)。在江淮区域, ERA40 及 GAME 资料优于 NCEP/NCAR 资料 (韩荣青等, 2004; 赵瑞霞和吴国雄, 2007)。但对有限区域的水分平衡估算而言, ERA40 等资料的水平空间分辨率相对较粗, 对次网格过程有所忽略, 这可能是它们与实际观测误差的来源之一。最近, ECMWF 发布了另一套分辨率更高且接近实时更新的再分资料 (ERA-Interim), 该资料被认为是 ERA40 的升级, 它在大气质量守恒、水分收支和能量循环等方面有了显著的改善 (Berrisford et al., 2011)。ERA-Interim 的水平分辨率由 ERA40 的 T159 提升至 T255 (由之转换为 N128 即 512×256 的高斯格点网格), 接近 $0.7^\circ \times 0.7^\circ$, 在本文所研究的区域内水平分辨率为 $73 \text{ km} \times 73 \text{ km}$, 明显高于 2.5 度粗网

格的分辨率 (258 km×258 km)。且该资料采用原始的 60 混合 σ 层, 使垂直分辨率也有所提高。利用该套原始网格的再分析资料估算区域水分收支, 将避免空间插值所导致的误差, 同时也能降低水汽辐合项垂直积分时低层积分的计算复杂程度。

江淮区域是我国主要的工业发达地区。由于地处东亚季风影响区, 江淮区域水分循环的时空变化十分明显, 旱涝灾害时有发生。研究表明, 温度、降水、蒸发、径流以及各要素间的相互作用, 对江淮区域的气候变化及社会经济存在显著影响 (Gong et al., 2006; Jiang et al., 2006; Zhang et al., 2006)。因此, 研究江淮区域水汽收支具有重要的科学意义。2011 年夏季江淮流域降水总体偏多, 在 6 月份梅雨期间更是出现了四次大范围的强降水, 局部地区降水距平百分率达 100% 以上, 皖、湘、鄂、赣、苏、浙等省份旱涝急转, 出现严重的洪涝灾害。本文将采用 ERA-Interim 再分析资料中的 6 小时原始模式输出资料, 分析 2011 年夏季江淮区域水汽汇的演变及各项的贡献, 并在此基础上研究与水汽辐合项有关的水汽输送及相应的月平均环流和天气尺度扰动特征。

2 资料和方法

2.1 资料

使用资料为: (1) ERA-Interim 再分析资料 (Berrisford et al., 2009) 中的 6 小时原始模式输出的风场 (u 、 v)、比湿场 (q)、位势场 (z), 以及 12 小时预报场中的降水 (P) 和蒸发 (E), 水平分辨率接近 $0.7^\circ \times 0.7^\circ$, 垂直方向为 60 混合 σ 层。时段为 2011 年 6 月 1 日 00 时 (协调世界时, 下同) 到 2011 年 8 月 30 日 18 时。(2) 气象科学数据共享服务网提供的中国逐日格点降水量实时分析系统 (1.0 版) 降水集, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时段同 (1), 文中称为观测降水。

2.2 方法

如图 1 所示, 本文所指的江淮区域范围是 ($26^\circ\text{N} \sim 34^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$)。江淮区域水汽平衡方程表达式如下:

$$\iint_A (P - E) dA = - \iint_A \frac{\partial w}{\partial t} dA - \iint_A \nabla \cdot (\mathbf{v}q) dA, \quad (1)$$

其中, $\iint_A dA$ 表示对江淮区域面积积分,

$$w = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q dp, \quad \mathbf{v}q = \left(\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} u q dp, \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} v q dp \right), \quad \text{本文}$$

所用资料为原始的 60 混合 σ 层, 因此垂直积分是由 p_s 到模式大气层顶, 这就避免了地形对计算结果的影响。 $\iint_A (P - E) dA$ 为直接由降水和蒸发求得的江淮区域水汽汇, 反映了大气与下垫面的水分净交换量, 简记为 I_{P-E} ; $\iint_A (\partial w / \partial t) dA$ 为江淮区域局地水汽变化量, 简记为 I_w ; $-\iint_A \nabla \cdot (\mathbf{v}q) dA$ 表示江淮区域的水汽辐合量。

由格林定理, $-\iint_A \nabla \cdot (\mathbf{v}q) dA$ 又可以表示为:

$$-\iint_A \nabla \cdot (\mathbf{v}q) dA = - \oint_{\partial A} (\mathbf{v}q, \mathbf{n}) dl, \quad (2)$$

其中, ∂A 为江淮区域的边界, $\mathbf{n}$ 为边界的法向单位向量。因此, 可以利用边界流入量来估算江淮区域整层的水汽辐合量 (丁一汇和胡国权, 2003; 周玉淑等, 2005; 赵瑞霞等, 2008)。这种算法计算简便且能很好地描述各边界上的水汽输送, 是常用的计算方法。 $-\oint_{\partial A} (\mathbf{v}q, \mathbf{n}) dl$ 表示由边界流入量计算的江

淮区域水汽汇, 简记为 I_{cv} 。但若得到水汽辐合量在区域内的空间分布, 还需引入格点辐合量的算法。根据散度公式, 相应格点上整层水汽辐合量的球坐标公式为:

$$C = - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial uq}{\partial \lambda} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial (vq \cos \varphi)}{\partial \varphi} = - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial uq}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial vq}{\partial \varphi} - \frac{vq}{a} \tan \varphi, \quad (3)$$

其中, a 为地球半径, λ 为经度, φ 为纬度, (uq, vq)

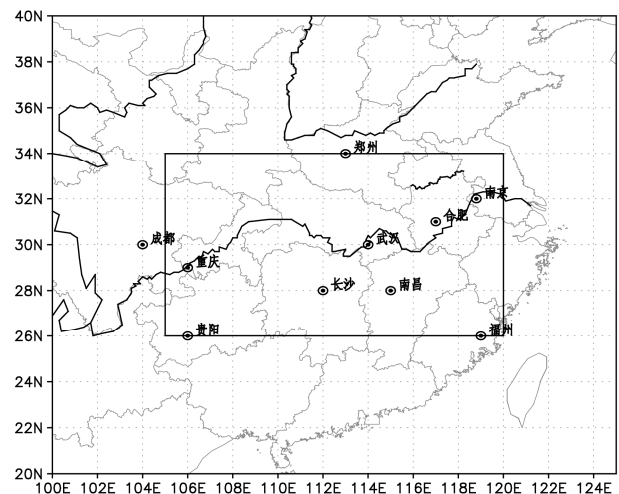


图 1 江淮区域范围 ($26^\circ\text{N} \sim 34^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$) (矩形)

Fig. 1 A map of the Yangtze-Huaihe River basin (YHRB: $26^\circ\text{N} \sim 34^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$) as indicated by the rectangle

均对应风速与比湿乘积的垂直积分。假设由该公式所得的差分方案较为准确, 根据质量守恒原理, 由各格点相加的水汽辐合量应该与由边界输入估算的水汽辐合量 I_{cv} 相等。

则 (1) 式可简写为 $I_{p-E} = I_{cv} - I_w$, 将 $I_{cv} - I_w$ 记为 I_A 。 I_A 即为由局地水汽变化量 I_w 和水汽辐合量 I_{cv} 倒算的江淮区域水汽汇。

总水汽输送及水汽汇可以分解成定常部分及瞬变部分。定常分量利用月平均资料计算, 瞬变分量由一日四次的资料与月平均资料的差值计算。具体计算方案可参见文献 (周天军等, 2001)。

3 江淮区域水汽汇

3.1 水汽汇特征

图 2 给出了江淮区域水汽汇 I_{p-E} 和 I_A 的时间演变。可以看出, I_A 和 I_{p-E} 的演变非常一致, 二者的相关系数达 0.99, 满足 (1) 式, 这表明 ERA-Interim 资料能很好地描述江淮区域的水汽收支平衡。而 I_A 与 I_{p-E} 在振幅较小处的微小差异可能与模式同化时陆面过程对蒸发表达不够有关 (张文君等, 2007)。

就季节平均而言, 2011 年夏季江淮地区是水汽汇区, 平均水汽汇值为 $3.57 \times 10^{12} \text{ kg d}^{-1}$, 说明江淮地区夏季水分由大气向地面输送, 这与雨季的特征是对应的。就月平均而言, 6 月的平均水汽汇值最大, 达 $7.25 \times 10^{12} \text{ kg d}^{-1}$, 7 月水汽汇值明显减小, 平均值降至 $1.37 \times 10^{12} \text{ kg d}^{-1}$, 8 月水汽汇月均值回

升至 $2.09 \times 10^{12} \text{ kg d}^{-1}$; 且月平均观测降水量的变化与水汽汇变化一致。由图 2 还可以看出, 水汽汇和降水均有明显的 2~6 天的天气尺度振荡, 且它们呈一致性变化, 在 6 月 4~7 日、9~12 日、14~16 日、18~19 日的大范围强降雨过程均对应水汽汇的峰值。观测降水与 I_A 和 I_{p-E} 的相关系数分别达 0.9 和 0.93。需要说明的是虽然月、季尺度江淮地区水汽汇均为正值, 但逐日的水汽汇在某些时段仍出现了负值 (即为水汽源)。这也说明了水汽汇的天气尺度振荡也是很重要的。

此外, ERA-Interim 资料江淮区域水汽汇与观测降水的相关系数 (0.90) 高于相同时段 NCEP/NCAR 再分析资料江淮区域水汽汇与观测降水的相关系数 (0.73)。这应该是高分辨率资料相较于低分辨率资料在区域水汽收支计算方面有所改善的表现。

3.2 水汽汇各项的演变

图 3 给出了江淮区域水汽汇 I_A 、水汽辐合量 I_{cv} 及局地水汽变化量 I_w 的时间演变。可以看出水汽辐合量 I_{cv} 与水汽汇 I_A 的变化有较好的对应关系, 相关系数为 0.62, 说明水汽辐合项 I_{cv} 对水汽汇的贡献显著。仔细分析还可发现, I_{cv} 的位相大约比 I_A 超前 1 天, 其超前一天的相关系数为 0.78, 较同期大有提高, 说明 I_{cv} 对区域水汽汇有一定的预报技巧。局地水汽量 I_w 亦具有与 I_A 和 I_{cv} 相当的振幅, 因此局地水汽变化至少在天气尺度上是不能忽略的。 I_w 与同期 I_A 相关系数为 -0.25, 而与滞后两天的 I_A 相关系数为 0.33, 说明水汽的局地变化项对水

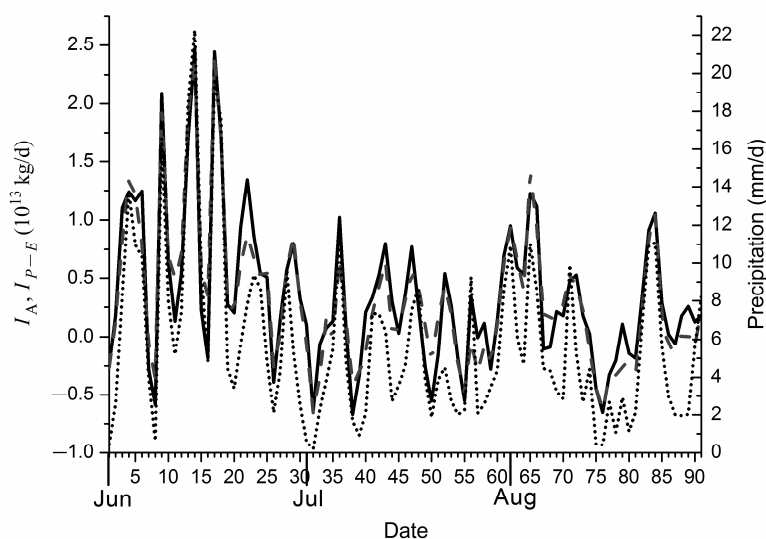


图 2 2011 年 6 月 1 日至 8 月 30 日江淮区域水汽汇 I_A (实线)、 I_{p-E} (虚线) 及区域平均的观测降水 (点线, 对应右坐标) 的变化

Fig. 2 Time series of regional moisture sink I_A (solid line), I_{p-E} (dashed line), and regional mean station precipitation (dotted line, corresponding to the right vertical coordination) over YHRB from June 1 to August 30 in 2011

汽汇也具有较好的指示作用(以上相关系数均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验)。

图 4 给出了 2011 年 6 月 1 日至 8 月 30 日江淮区域水汽汇 I_{P-E} 、区域总降水量 P_r 、区域总蒸发

E_r 以及区域平均的观测降水。可以看出, ERA-Interim 资料降水量 P (为 12 小时预报场) 与观测降水相关系数达到 0.93, 说明它对江淮流域降水有较好的预报效果。同时降水量 P_r 与水汽汇 I_{P-E} 位相

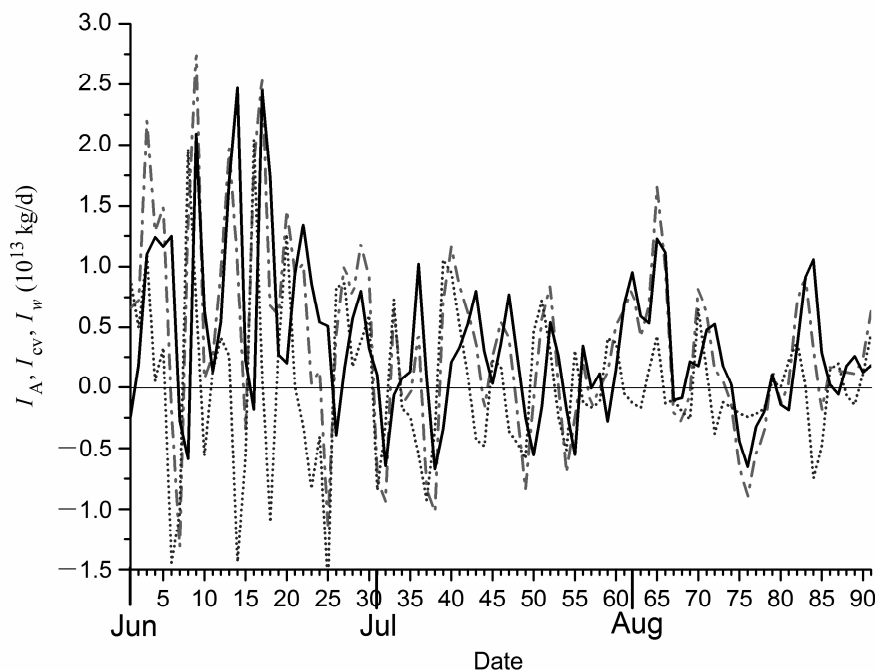


图 3 2011 年 6 月 1 日至 8 月 30 日江淮区域 I_A (实线), 水汽辐合量 I_{cv} (点划线) 及局地水汽变化量 I_w (点线) 的变化

Fig. 3 Time series of regional moisture sink I_A (solid line), moisture convergence I_{cv} (dash-dotted line), and local moisture tendency I_w (dotted line) over YHRB from June 1 to August 30 in 2011

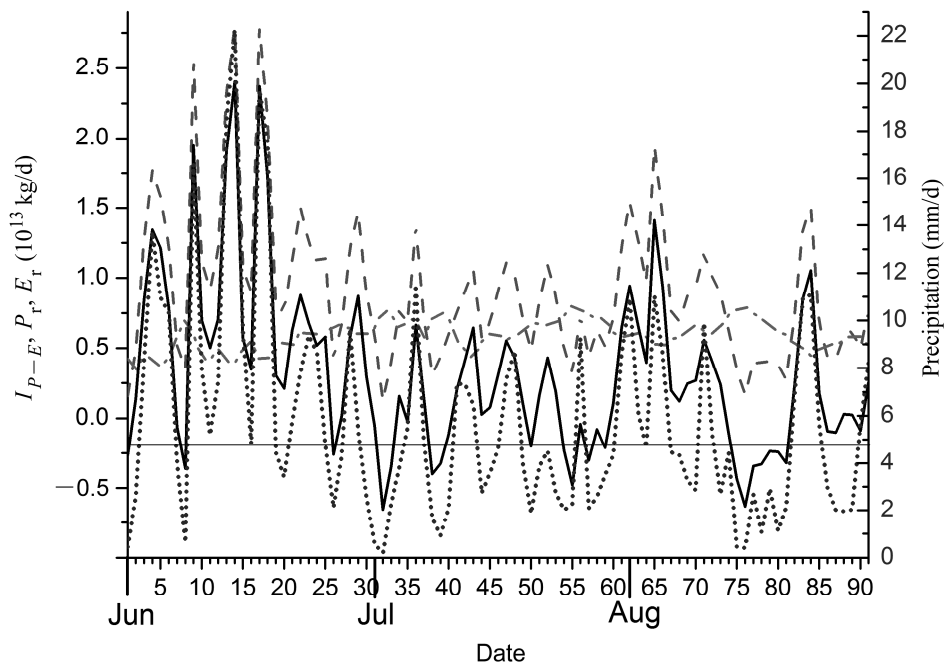


图 4 2011 年 6 月 1 日至 8 月 30 日江淮区域水汽汇 I_{P-E} (实线), 区域总降水量 P_r (虚线), 区域总蒸发 E_r (点划线) 以及区域平均的观测降水量 (点线, 对应右坐标)

Fig. 4 Time series of regional moisture sink I_{P-E} (solid line), precipitation P_r (dashed line), evaporation E_r (dashed-dotted line), and regional mean station precipitation (dotted line, corresponding to the right vertical coordination) over YHRB from June 1 to August 30 in 2011

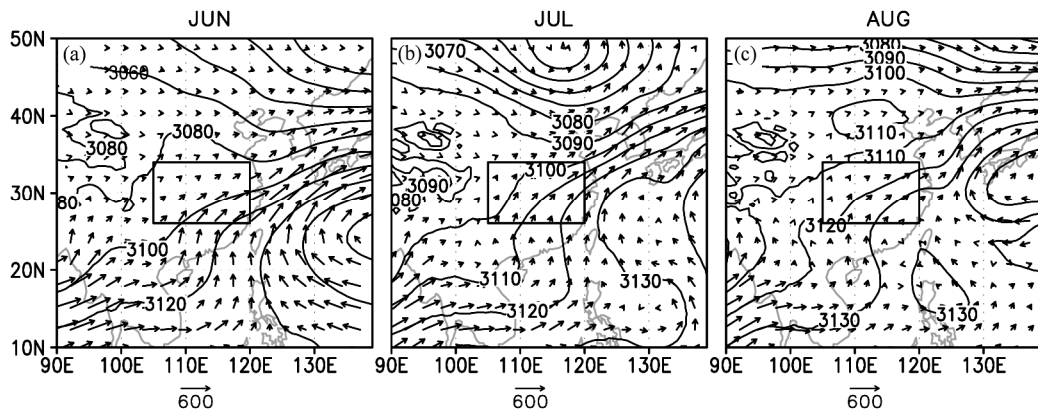


图 5 2011 年夏季逐月平均 700 hPa 位势高度 (等值线, gpm) 和整层水汽通量 (矢量, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$): (a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月。矩形框标出了江淮流域范围

Fig. 5 The distribution of monthly mean 700-hPa geopotential height (contour, gpm) and vertically integrated water vapor fluxes (vector, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) over YHRB in 2011: (a) June; (b) July; (c) August. The solid rectangle denotes the YHRB region

一致, 振幅相当, 呈显著的正相关关系, 相关系数高达 0.99。而蒸发 E_r 的振幅远小于降水量 P_r 及水汽汇 I_{P-E} , 总体来说降水量 P_r 比蒸发 E_r 大一个量级, 说明 2011 年夏季江淮地区总降水量 P_r 对水汽汇的贡献远大于蒸发 E_r 。降水对水汽汇的主导贡献在一定程度上弥补了分析中忽略对地表径流净输入产生的蒸发量不足。在逐日演变中, 某些时段蒸发 E_r 大于降水量 P_r , 说明若对天气尺度水汽汇进行分析, 蒸发 E_r 的变化也不能完全被忽略。

值得注意的是, 再分析资料中降水量 P 和蒸发 E 的估算都是通过天气预报模式的对流、大尺度降水以及表面水分相互作用等参数化后作预报实现的, 其准确性依赖于再分析系统的同化方案及参数化方案, 与实际观测存在一定误差。因此, 利用水汽辐合量 I_{cv} 及局地变化量 I_w 计算的水汽汇 I_A 应比用预报量 P 和 E 估算的水汽汇 I_{P-E} 更为合理。且水汽辐合量 I_{cv} 与大气环流异常的对应关系也更为直接。

4 水汽汇与环流异常

4.1 月平均环流

图 5、6 分别给出了 2011 年夏季逐月平均的 700 hPa 位势高度和整层水汽通量, 以及江淮区域月平均水汽汇各项值及区域边界水汽输入输出值。可以看出, 6 月, 副高西伸至 120°E 以西, 脊线大约在 22°N 附近; 中纬度西风槽位于朝鲜半岛以北地区。在副高及西风槽的共同引导下, 水汽通过西南气流从孟加拉湾及南海向华南、华东地区输送, 并一直延伸至朝鲜半岛南部及日本。这条水汽

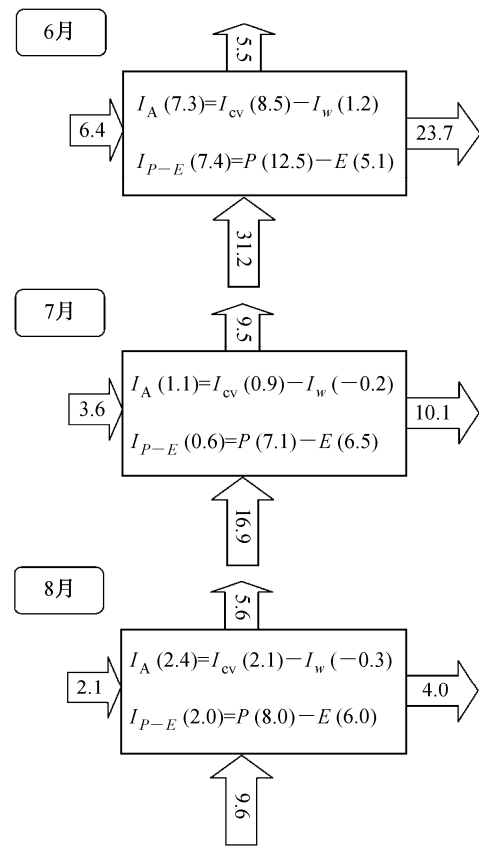


图 6 2011 年夏季江淮区域月平均水汽汇各项值及区域边界水汽输入输出值, 区域边界位置见图 5 中的矩形框。单位: 10^{12}kg d^{-1}

Fig. 6 Conceptual chart of monthly mean values for regional moisture sink terms over YHRB and moisture fluxes crossing each of the four YHRB borders. The four YHRB borders are indicated as solid rectangle in Fig.5. Unit: 10^{12}kg d^{-1}

输送带造成了江淮区域南边界和东边界较大的水汽通量。由图 6 也可看出, 其南边界输入量和东边界输出量较大, 西边界的输入量和北边界的输出量

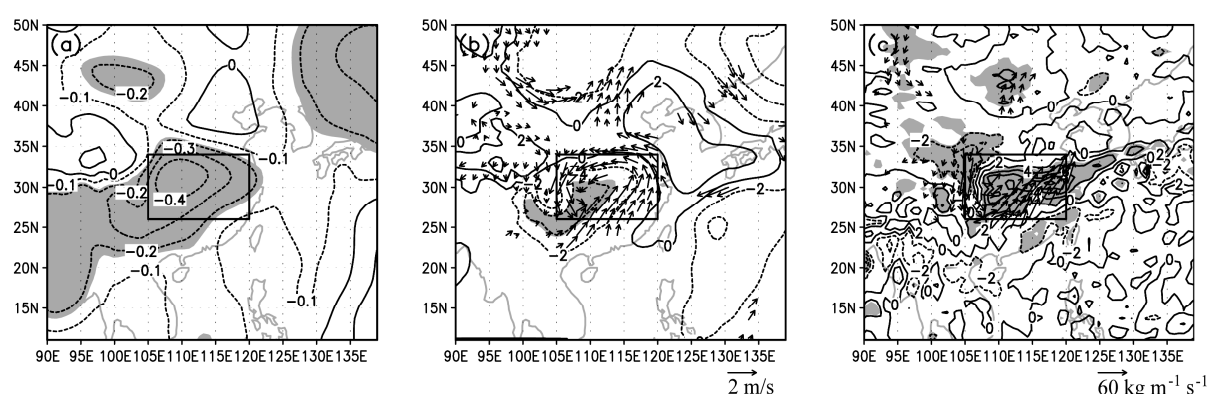


图 7 (a) 2011 年夏季逐日江淮区域水汽汇 I_A 与 700 hPa 位势高度场的相关系数, 阴影区通过 0.1 显著性水平的 t 检验; (b) 2.5~6 天带通滤波的 I_A 标准化序列对 700 hPa 位势高度距平 (等值线, m) 以及风场距平 (矢量箭头, m s^{-1}) 的回归系数, 阴影区和矢量均通过 0.1 显著性水平的 F 检验; (c) 2.5~6 天带通滤波的 I_A 标准化序列对整层水汽辐合量距平 (等值线, kg s^{-1}) 及水汽通量距平 (矢量箭头, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 的回归系数, 阴影区和矢量均通过 0.1 显著性水平的 F 检验

Fig. 7 (a) Simultaneous correlation coefficients between daily time series of regional mean moisture sink I_A over YHRB and 700-hPa geopotential height field, shaded areas denote values passing Student's t -test at 0.1 significance level; (b) regression coefficients of 700-hPa geopotential height anomalies (contour, m) and wind field anomalies on 2.5–6 day band-passed time series of I_A ; (c) same as (b) but for anomalous vertically integrated moisture convergence (contour, kg s^{-1}) and anomalous vertically integrated moisture fluxes (vector, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$). Shaded areas and vectors in (b) and (c) denote values passing F -test at 0.1 significance level

相对较小。这与周玉淑等 (2005) 揭示的 2003 年梅雨期江淮流域水汽收支情况较为相似。7 月, 副高西伸北抬, 水汽输送大值带随之北抬至华北—朝鲜半岛一带。造成江淮区域南边界输入减小和北边界输出增大, 同时东边界的水汽输出也有明显减少。因此, 虽然 7 月江淮地区仍为水汽汇区, 但量值明显降低。8 月, 副高进一步西伸北抬, 进入江淮区域的水汽通量减小, 但此时东边界和北边界的输出量减小更为明显, 江淮区域的水汽汇值反而有所增加。由图 6 还可知道, 水汽辐合项对月平均的水汽汇起主导作用。

由以上分析可知, 2011 年夏季江淮区域月际尺度的水汽汇变化与大尺度大气环流尤其是副高有密切关系。大尺度大气环流主要通过影响与水汽输送密切相关的水汽辐合量对江淮区域的水汽汇造成影响。

4.2 天气尺度扰动

图 7a 给出了 2011 年夏季江淮区域水汽汇 I_A 与 700 hPa 位势高度的相关系数。可以看出, 与江淮区域水汽汇显著相关的环流异常主要位于江淮流域及西南地区, 表现为负相关关系, 说明江淮流域及西南地区对流层低层气压异常偏低时, 江淮地区降水往往增多。从 2.5~6 天带通滤波后的 I_A 序列对 700 hPa 位势高度及风场距平的回归场也可以看出 (图 7b), 江淮流域及西南地区为异常低压, 伴

随着气旋式的异常风场, 这说明该地区的天气尺度的扰动与江淮区域的水汽汇显著相关。图 7c 给出了 2.5~6 天带通滤波后的 I_A 序列对整层水汽通量和水汽辐合量的回归系数。可以发现, 显著异常的整层水汽辐合出现在江淮区域。即江淮区域水汽辐合量增大时, 天气尺度水汽汇聚明显增多, 反之亦然。因此, 江淮流域及西南地区的天气尺度扰动对江淮区域水汽汇及降水的天气尺度振荡起到至关重要的作用。

计算了江淮区域定常及瞬变分量对区域边界水汽输送量及水汽汇的贡献率 (表 1)。可以看出, 瞬变分量对各边界的水汽输送量均在 75% 以上, 定常分量比例则只占其 25% 以下。与之对应, 江淮区域水汽汇的瞬变分量在 6 月与 8 月均占较大比例; 但 7 月定常分量较大, 贡献率为 82.9%, 这是由于

表 1 2011 年夏季江淮区域定常及瞬变分量对区域边界水汽输送量及水汽汇的贡献率

Table 1 Contribution of stationary and transient components to total monthly mean values for regional moisture sink over YHRB and moisture fluxes crossing each of the four YHRB borders

	左边界		右边界		下边界		上边界		水汽汇	
	定常	瞬变	定常	瞬变	定常	瞬变	定常	瞬变	定常	瞬变
6 月	21.8%	78.2%	23.9%	76.1%	24.8%	75.2%	12.3%	87.7%	38.2%	61.8%
7 月	19.5%	80.5%	24.8%	75.2%	24.9%	75.1%	15.7%	84.3%	82.9%	17.1%
8 月	13.9%	86.1%	24.6%	75.4%	23.7%	76.3%	15.6%	84.4%	29.6%	70.4%

各边界输送量瞬变部分的总体辐合较弱,使得区域水汽汇值本身较小所致。瞬变分量对水汽输送和区域水汽辐合的高贡献率进一步印证了天气扰动对江淮区域水汽汇聚及降水量变化的显著作用。

5 结论和讨论

本文利用 ERA-Interim 的原始模式输出资料,详细分析了 2011 年夏季江淮区域水汽汇的演变及各项的贡献,研究了与水汽辐合项有关的水汽输送及相应的月平均环流和天气尺度扰动。得到以下主要结论:

(1) ERA-Interim 再分析资料对江淮区域夏季水汽平衡有较好的描述能力。由水汽辐合项 I_{cv} 与水汽局地变化项 I_w 计算的水汽汇值 I_A 和用降水量 P 与蒸发 E 求得的水汽汇值 I_{P-E} 高度一致,说明该资料可用于研究江淮区域的水汽汇。

(2) 2011 年夏季江淮区域整体处于水汽汇区,且水汽汇值具有明显的 2~6 天的天气尺度振荡。降水量 P 对水汽汇的贡献远大于蒸发 E ,而水汽辐合项 I_{cv} 与水汽局地变化项 I_w 对水汽汇均有较大贡献,并且对水汽汇具有超前 1~2 天的指示作用。

(3) 月平均环流和天气尺度扰动均通过与水汽输送密切相关的水汽辐合项对江淮区域水汽汇产生显著影响。月际尺度的水汽汇变化与大尺度大气环流尤其是副高有密切关系;而江淮流域及西南地区的天气尺度扰动对江淮区域水汽汇的天气尺度振荡起到至关重要的作用。

虽然 ERA-Interim 再分析资料对江淮区域水分平衡有较好描述,但其中也存在一定误差。由图 6 可以看出,在降水比较充足的 6 月, I_{P-E} 和 I_A 之间的差异较小,而当降水量减少,蒸发量增大时(7 月和 8 月),两者差异有所增大。这可能是同化系统对蒸发量的体现不够所致。由于陆面过程的复杂性,再分析资料中对于陆气交换的表达还不够完善,导致蒸发量的估算存在较大的不确定性(伊兰和陶诗言, 1996; 张文君等, 2007)。这是区域水汽收支研究中值得注意的问题。

致谢 感谢欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和中国气象科学数据共享服务网提供的高分辨率资料数据集。感谢审稿专家和编辑对本文的改进提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

Berrisford P, Dee D, Fielding K, et al. 2009. The ERA-Interim archive [R].

ECMWF, ERA Report Series 1, 16pp.

Berrisford P, Kallberg P, Kobayashi S, et al. 2011. Atmospheric conservation properties in ERA-Interim [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137: 1381–1399.

丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. *气象学报*, 61 (2): 129–145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over china during the 1998 severe flood periods [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (2): 129–145.

Feng L, Zhou T J. 2012. Water vapor transport for summer precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata set analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, D20114, doi:10.1029/2011JD017012.

Gong L B, Xu C Y, Chen D L, et al. 2006. Sensitivity analyses of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) catchment and its subregions [J]. *J. Hydrol.*, 329: 620–629.

韩荣青, 李维京, 胡国权, 等. 2004. GAME 再分析资料与 NCEP 再分析资料在 1998 年 HUBEX 试验期的对比分析 [J]. *应用气象学报*, 15 (2): 141–151. Han Rongqing, Li Weijing, Hu Guoquan, et al. 2004. A comparison of reanalysis data between GAME and NCEP/NCAR during the period of HUBEX [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (2): 141–151.

Jiang T, Su B D, Hartmann H. 2006. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River basin [J]. *Geomorphology*, 85: 143–154.

Kanamitsu M, Saha S. 1996. Systematic tendency error in budget calculations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124: 1145–1160.

Mo K C, Higgins R W. 1996. Large-scale atmospheric moisture transport as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalyses [J]. *J. Climate*, 9: 1531–1545.

Oki T, Musiak K, Matsuyama H, et al. 1995. Global atmospheric water balance and runoff from large river basins [J]. *Hydrological Processes*, 9: 655–678.

Roads J, Chen S, Kanamitsu M, et al. 1999. Surface water characteristics in NCEP global spectral model and reanalysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 19307–19327.

Serreze M C, Barry R G, Walsh J E. 1995. Atmospheric water vapor characteristics at 70°N [J]. *J. Climate*, 8: 719–731.

Webster P J. 1994. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions [J]. *Rev. Geophys.*, 32: 426–476.

伊兰, 陶诗言. 1996. 东亚季风区地气系统的水平衡 [J]. *气候与环境研究*, 1 (1): 63–80. Yi Lan, Tao Shiyan. 1996. Water balance in land-atmospheric system over the East Asian monsoon region [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 1 (1): 63–80.

赵瑞霞, 吴国雄. 2007. 长江流域水分收支以及再分析资料可用性分析 [J]. *气象学报*, 65 (3): 416–427. Zhao Ruixia, Wu Guoxiong. 2007. Water budget for the Yangtze River basin and evaluation of ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (3): 416–427.

赵瑞霞, 吴国雄, 张宏. 2008. 夏季风期间长江流域的水汽输送状态及其年际变化 [J]. *地球物理学报*, 51 (6): 1670–1681. Zhao Ruixia, Wu Guoxiong, Zhang Hong. 2008. Seasonal characteristic and interannual variability of the atmospheric hydrological cycle in the Yangtze River

- basin during the summer monsoon period [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 51 (6): 1670–1681.
- Zhang Q, Liu C L, Xu C Y, et al. 2006. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China [J]. J. Hydrol., 324: 255–265.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 2007. 中国东部水分收支的初步分析 [J]. 大气科学, 31 (2): 329–345. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2007. A preliminary analysis on the moisture budget of East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 329–345.
- Zhang Z X, Zhang Q, Xu C Y, et al. 2009. Atmospheric moisture budget and floods in the Yangtze River basin, China [J]. Theor. Appl. Climatol., 95: 331–340.
- 周天军. 2003. 利用不同资料估算的全球海气间淡水交换量之比较 [J]. 自然科学进展, 13 (9): 946–950. Zhou Tianjun. 2003. The comparison of global air–sea exchanging quantity of fresh water calculated by different data [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 13 (9): 946–950.
- Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J. Geophys. Res., 110, D08104, doi:10.1029/2004JD005413.
- 周天军, 宇如聪, 张学洪, 等. 2001. 海气耦合气候模式对大气中水汽输送、辐散辐合与海气间水通量交换的模拟 [J]. 大气科学, 25 (5): 598–608. Zhou Tianjun, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. 2001. Features of atmospheric moisture transport, convergence and air–sea freshwater flux simulated by the coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (5): 598–608.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 195–204.