

孔海江. 2014. 利用局地经向环流对河南一次连阴雨过程的定量诊断. 气象, 40(12):1481-1490.

利用局地经向环流对河南一次 连阴雨过程的定量诊断^{*}

孔海江^{1,2}

1 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003

2 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 利用 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NCEP/NCAR 再分析资料和改进的局地经向环流线性模式, 定量诊断了 2011 年 9 月 5—19 日河南省秋季连阴雨天气的形成机理, 并利用局地经向环流的垂直分量与降水量滞后相关的分析, 研究了这次连阴雨过程主要物理因子的演变特征。结果表明: (1) 潜热加热、平均经向温度平流、平均西风动量的纬向平流和平均纬向温度平流是导致 2011 年 9 月河南省秋季连阴雨天气形成的主要物理因子。(2) 潜热加热和平均纬向温度平流是造成此次连阴雨发生的主要物理因子; 平均纬向温度平流、平均经向温度平流和平均西风动量的纬向平流是造成此次连阴雨发展或持续的主要物理因子; 潜热加热、平均西风动量的纬向平流和平均纬向温度平流是造成此次连阴雨结束的主要物理因子。

关键词: 秋季连阴雨, 局地经向环流, 物理因子, 诊断分析

中图分类号: P448

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.12.006

Quantitative Diagnosis on a Continuous Rain Event in Henan by Using Local Meridional Circulation Model

KONG Haijiang^{1,2}

1 Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: Based on $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NCEP/NCAR reanalysis data and the improved local meridional circulation model, quantitative diagnosis for the mechanism was performed on a continuous autumn rain event in Henan Province from 5 to 19 September 2011, and evolution characteristics of the main physical factors for the continuous autumn rain event were proposed by means of lag correlation analysis of the upward branch of a local meridional circulation and precipitation over Henan. The results showed that, (1) latent heating, average meridional temperature advection, zonal advection of westerly momentum and average zonal temperature advection are the main physical factors which caused the continuous rainy weather to occur over Henan Province in September 2011. (2) The latent heating and average zonal temperature advection are the main physical factors for the start of the rainy weather; zonal advection of average westerly momentum and average meridional temperature advection as well as average zonal temperature advection are the physical factors for the continuous rainy weather; latent heating, zonal advection of average westerly momentum, average meridional temperature advection and average zonal temperature advection are also the main physical factors for the continuous rainy weather ending.

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2012-035)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006041)和中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室项目(Z201003)共同资助

2014年2月18日收稿; 2014年6月5日收修定稿

第一作者: 孔海江, 主要从事灾害性天气诊断、数值模拟和中期天气预报研究. Email: hjkong2012@gmail.com

Key words: autumn continuous rainfall, local meridional circulation, physical factors, diagnostic analysis

引言

连阴雨是影响农业生产的主要农业气象灾害,20世纪90年代针对连阴雨开展了一系列研究(钟元等,1992;朱盛明,1991;施宁,1990;刘延英等,1990;孙锦铨等,1991),主要从天气气候特征、连阴雨静止锋的结构、低纬及南半球环流与连阴雨的关系等方面研究了长江中下游春季连阴雨天气的演变规律。最近的研究(鲍媛媛等,2003;王秀文等,2005;张涛,2008)总结了北方连阴雨天气的大气环流特征。孔海江等(2011)和谷秀杰等(2011)分别诊断分析了2009和2005年发生在河南省的秋季连阴雨的异常环流特征及其可能原因。于文勇等(2012)研究了中国地区降水持续性的季节变化特征,发现黄淮地区秋季的降水平均持续时间较其他季节长。刘璐等(2012)提出一种以典型K阶自回归AR(K)预测模式为主的连阴雨预报方法。柳艳菊等(2012)分析了2011年秋季华西秋雨的异常特征和气候背景,认为2011年9月开始的La Nina事件和年代际变化可能是华西秋雨异常偏多的重要原因。蔡芎宁等(2012)对2011年9月华西秋雨形成的主要物理机制的诊断分析表明,巴尔喀什湖以北的高压脊稳定维持,与偏强、偏西的副热带高压共同作用造成冷暖空气在华西交汇;华西地区北部强能量锋区的作用,东路干冷空气的汇入,激发了不稳定能量的释放,而对流凝结潜热的正反馈作用,使华西地区北部对流得以维持,强降雨能够长时间持续。袁旭等(2013)研究了华西秋雨起止与秋冬季节大气环流转换,指出华西秋雨的建立对应于东亚夏季风开始向冬季风转变,华西秋雨的结束则对应于孟加拉湾热带西南季风结束和东亚冬季风完全建立。陈桂兴等

(2007)利用局地经向环流线性模式,定量分析了导致2003年黄淮秋汛的主要物理因子,得到了一些在短期预报中有意义的结论。

上述研究大多是利用观测资料或再分析资料所做的诊断分析,而有关定量诊断连阴雨天气的形成机理的研究较少。因此,有必要对连阴雨天气形成机理的定量诊断做进一步的研究。

1 资料与方法

1.1 资料

定量诊断分析选取的模拟区域为 $5^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $107.5^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 。选用2011年8—10月共92 d的NCEP/NCAR逐日再分析资料(Kalnay et al,1996)进行模拟,选取连阴雨及其前后10 d(2011年8月26日至9月29日)共35 d的模拟结果用来分析导致连阴雨演变的物理因子。

1.2 局地经向环流诊断模式简介

袁卓建等(1998)将全球纬向平均的经向环流理论工作推广到研究局地经向环流演变机制,推导出一个地球P坐标系下的局地经向环流诊断方程。该方程的具体推导过程可参见文献(袁卓建等,1998;2000;Yuan et al,2000)。

局地经向环流诊断方程的数学模型利用P坐标系的原始方程组,将经向运动方程用梯度风平衡关系式替代进行简化。将连续方程、运动方程3个分量式、热力学第一定律、水汽守恒方程和状态方程有机结合起来,得到诊断局地纬向平均的经向环流函数的椭圆型线性方程。

数学模型具体形式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\bar{\sigma}_s}{a^2 \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \varphi} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial p} \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{a^2 \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \varphi} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \varphi} + \frac{f_A \zeta_a}{\cos \varphi} \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial p} \right) = \frac{\partial}{\partial p} \left[f_A \left(-\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \lambda} + \bar{F}_\lambda - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \lambda} - \frac{\bar{u}'}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}'}{a} \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \varphi} - \frac{\bar{\omega}'}{\omega'} \frac{\partial \bar{u}'}{\partial p} + \frac{\bar{u}' \bar{v}' \tan \varphi}{a} + f \bar{v}_{HC} - \bar{v}_{HC} \frac{\partial \bar{u} \cos \varphi}{a \cos \varphi \partial \varphi} - \bar{\omega}_{zc} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} \right) \right] - \\ \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{R \bar{Q}}{p c_p} - \frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}_{HC}}{a} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \varphi} + \bar{\sigma}_s \bar{\omega}_{zc} - \frac{\bar{u}'}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}'}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}'}{a} \frac{\partial \bar{\alpha}'}{\partial \varphi} + \bar{\sigma}_s' \bar{\omega}' \right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,局地纬向平均 $\overline{(\quad)} = \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\quad) d\lambda \right] / (\lambda_2 - \lambda_1)$, $\lambda_1 = 107.5^\circ\text{E}$, $\lambda_2 = 120^\circ\text{E}$, $(\quad)'$ 为相对于纬向平均的扰动量; $\sigma_s = \frac{\alpha}{\theta} \left(-\frac{\partial\theta}{\partial p} \right)$ 为静力稳定度; Φ 为位势高度; φ 为纬度; λ 为经度; $a = 6371 \text{ km}$ 为地球半径; p 为气压; α 为比容; u, v, ω 分别为 λ, φ, p 方向的速度分量; F_λ 为 x 方向的摩擦力; f 为科氏参数; $v = v_{HC} + v_{MC}$, v_{HC} 表示 v 中构成水平环流的分量, v_{MC} 表示 v 中构成经圈环流的分量; $\omega = \omega_{ZC} + \omega_{MC}$, ω_{ZC} 表示 ω 中构成纬向环流的分量, ω_{MC} 表示构成经圈环流的分量; \dot{Q}/c_p 为非绝热加热率; $R = 287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为气体常数; $c_p = 1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为定压比热; ψ 为经向环流流函数, 其与 v_{MC} 和 ω_{MC} 的关系为:

$$v_{MC} = -\frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial\psi}{\partial p} \quad (2)$$

$$\omega_{MC} = \frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial\psi}{\partial\varphi} \quad (3)$$

式(1)右边的强迫因子可分为两大类:动力强迫因子和热力强迫因子。其中动力强迫因子包括,气压梯度力(第 I 项),摩擦力(第 II 项),平均西风动量的纬向平流(第 III 项),涡动西风动量的纬向平流(第 IV 项),涡动西风动量的经向平流(第 V 项),涡动西风动量的垂直对流(第 VI 项),曲率项(第 VII 项),地转偏向力(第 VIII 项),平均西风动量的经向平流(第 IX 项),以及平均西风动量垂直输送(第 X 项);热力强迫因子包括:感热通量 \dot{Q}_{SF} , 潜热通量 \dot{Q}_{LF} , 潜热加热 \dot{Q}_L 以及太阳短波和大气长波净辐射 \dot{Q}_R (第 XI 项)的 \dot{Q} 为这些因子的总效果,即 $\dot{Q} = \dot{Q}_{SF} + \dot{Q}_{LF} + \dot{Q}_L + \dot{Q}_R$, 平均纬向温度平流(第 XII 项),平均经向温度平流(第 XIII 项),平均温度垂直对流(第 XIV 项),涡动纬向温度平流(第 XV 项),涡动经向温度平流(第 XVI 项)以及涡动温度垂直对流(第 XVII 项)。

在求解式(1)的数值解之前,必须先给定式(1)右边的各强迫项,其中作为已知的 v_{HC} 和 ω_{ZC} 没有观测资料,只能通过计算得到。由于过去的研究(覃慧玲等, 2004; 梁肇宁等, 2004; 陈桂兴等, 2004b)近似取 $v_{HC} \approx v_g$, 而地转风 v_g 在赤道附近误差较大。故本研究采用邹海波等(2011)提出的用旋转风估算水平环流经向分量。即:

$$v_{HC} = \frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial\psi_{HC}}{\partial\lambda} \quad (4)$$

式中, ψ_{HC} 为水平环流流函数,由求关于 ψ_{HC} 的泊松方程的数值解得到:

$$\nabla^2 \psi_{HC} = \zeta = \frac{1}{a\cos\varphi} \left[\frac{\partial v}{\partial\lambda} - \frac{\partial(u\cos\varphi)}{\partial\varphi} \right] \quad (5)$$

把 v_{HC} 代入方程并对连续方程从对流层顶向下积分至 p 层,可得到等压面 p 上另一个已知量 ω_{ZC} :

$$\omega_{ZC} = - \int_{p_T}^p \left(\frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial u}{\partial\lambda} + \frac{\partial v_{HC} \cos\varphi}{a\cos\varphi \partial\varphi} \right) dp \quad (6)$$

由于式(1)是关于 $\bar{\psi}$ 的线性方程,式(1)的解具有可叠加性或者可分解,当局地纬向平均场满足一定的稳定条件时,可利用中央差分格式和超松弛迭代法(袁卓建等, 2000)求式(1)的数值解。从而可以定量讨论式(1)右边各项对局地纬向平均的经向环流的单独贡献。

根据线性叠加原理,局地经向环流诊断方程可以用来定量地分析并找出不同地区、不同环境和不同季节的经向环流演变的主要机制。

2 连阴雨天气过程概况

2011 年 9 月 5—19 日河南省出现了一次长达 15 d 的连阴雨天气。2011 年 9 月河南省区域平均的累计降水量为 1961 年以来历史同期的第三位,同时在降水相对集中的 9 月中旬,比历史同期偏多 4 倍以上,为 1961 年以来的历史同期最大值。降水从东南向西北递增(图略),豫西大部的降水量超过了 300 mm, 117 个站中共有 30% 的测站的降水量为建站以来的同期最大值。

连阴雨期间东亚大气环流持续异常(图略),巴尔喀什湖以北地区高压脊持续维持,大兴安岭以西的中蒙边界有一低槽。大兴安岭到蒙古国一带持续维持负距平。日本、经朝鲜半岛到江淮流域一带维持正距平。副高异常偏西、偏北。

3 连阴雨的形成功能机理分析

东亚季风区天气、气候变化与局地经向环流(热带季风和副热带季风环流)紧密联系(Tao et al, 1987),并且造成东亚季风区降水的水汽输送以经向特征为主(黄荣辉等, 1998)。因此,可以用局地经向环流模式进行定量诊断分析。

3.1 经向环流强度

利用局地经向环流模式定量诊断一般选用

500 hPa 垂直速度来表示经向环流的强度(陈桂兴等,2004b;覃慧玲等,2004)。对于秋季连阴雨天气来讲,由于季节的原因,其降水强度、对流高度与盛夏相比可能会偏弱、偏低。本文计算了2011年9月连阴雨期间700和500 hPa的垂直速度与同期河南省区域平均降水量的相关系数,发现700 hPa垂直速度与降水量的相关系数更大(图略)。因此,本文选用700 hPa垂直速度来表示经向环流的强度。

3.2 模式性能检验

利用局地经向环流模式指的是反用局地经向环流诊断方程的解的线性叠加原理,分别求出该方程右边每个强迫力独自对河南省范围内经向环流垂直分支的贡献值,通过比较各强迫力的贡献大小和分布形势,从而找到贡献最大的强迫过程及其对应的天气系统。为了确保各项贡献大小定量比较的可信度,需要对模式进行模拟性能检验。利用邹海波等

(2011)提出的模式性能检验方法,计算出经向环流垂直分支的“观测”值和模拟值。若模拟场与“观测”场的分布形势、中心位置及中心量级吻合程度高,则认为该模式模拟性能好,诊断分析具有一定的可信度。

下面列出2011年8月26日至9月29日的“观测”场(图1a)与模拟结果(图1b)的对比。从图1可以看出,在河南省范围内($31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$)模拟结果与“观测”结果时间演变和纬度分布吻合较好(35°N 同期相关系数为0.8691),在强度的模拟上略有差异,强度的模拟比观测偏弱。陈桂兴等(2007)指出2003年黄淮汛期期间,强的上升运动与强降水存在显著对应关系,并且在强降水发生前3d左右,上升运动出现在 35°N 以北,再向南传播到黄淮流域并显著加强。从图1可以看出,河南省连阴雨的开始也与经向环流的关系密切。开始是由提前3d左右的 35°N 以北的上升运动南移到河南省并加强引起。

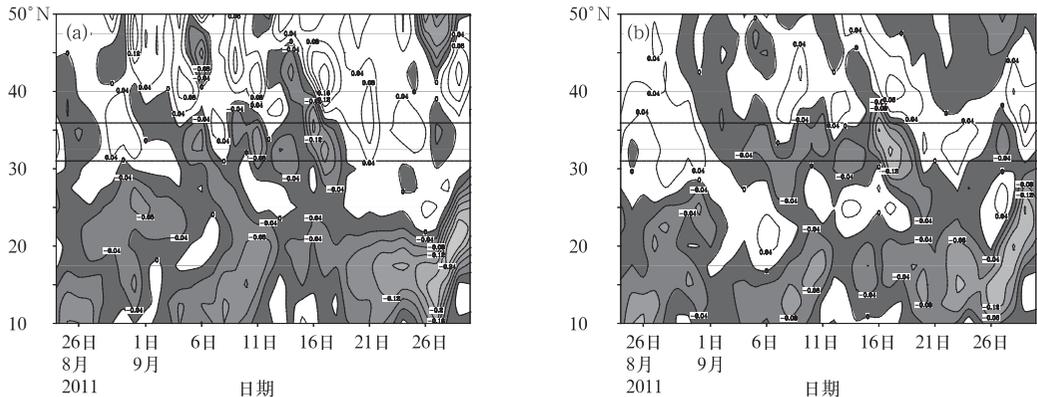


图1 2011年秋季连阴雨期间 $107.5^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的逐日700 hPa的经向环流垂直分量 $\overline{\omega_{MC}}$ (阴影区为上升运动区,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$;图中两条直线分别表示河南省南北界的纬度)
(a)“观测”,(b)模拟

Fig. 1 Zonal circulation vertical component $\overline{\omega_{MC}}$ at 700 hPa from 107.5°E to 120°E during the continuous rain days in autumn 2011
(The shaded area stands for the upward motion, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$; two lines in the graph respectively stand for the latitude of north and south of Henan Province)
(a) observed, (b) simulated

3.3 连阴雨期间平均垂直速度和主要因子的贡献

地转平衡关系在中纬度可以较好地得到满足,所以局地经向环流模式中科氏力和气压梯度力的大小几乎相等,但方向相反,它们两者强迫出的经向环流的垂直速度的大小也几乎相等,符号相反(图略)。两者对局地经向环流的贡献基本抵消。因此,讨论

有南北风辐合造成水汽抬升的经向环流垂直分支的成因时,可以不考虑科氏力和气压梯度力的贡献。

为找出导致2011年河南省秋季连阴雨发生的主要物理因子,利用陈桂兴等(2004a)提出的各因子对经向环流演变的贡献百分比公式:

$$P(j) = \frac{\sum_{i=1}^j (A_{i,j} B_{i,j})}{\sum_{i=1}^j (B_{i,j}^2)} \quad (7)$$

式中, i 和 j 分别代表逐日变化和纬度变化, t 为所研究的时间长度, 从 8 月 26 日至 9 月 29 日共 35 d, 所以, $t=35$; $A_{i,j}$ 为某因子单独激发的贡献, $B_{i,j}$ 为所有因子和开边界共同作用所激发的贡献, $P(j)$ 为该因子贡献百分比的纬度分布。得到在 2011 年 8 月 26 日至 9 月 29 日主要物理因子的贡献百分比的纬度分布, 如图 2 所示, 在 2011 年 8 月 26 日至 9 月 29 日期间, 河南省范围 ($31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$) 平均的潜热加热所激发的贡献最大, 占 46.54%, 而且潜热加热的垂直速度从低纬到高纬有一个明显减小趋势, 这与各纬度的气候条件相对应。平均经向温度平流所激发的贡献占 15% 以上, 另有一成左右是由平均西风动量纬向平流激发所造成。平均纬向温度平流所激发的贡献占了 5.79%。这 4 种因子对垂直速度的贡献合计占了将近 78%。模式的边界效应和其他 13 个因子对河南省连阴雨天气过程上升运动的单个贡献都小于 5%, 本文不做详细讨论。因此, 潜热

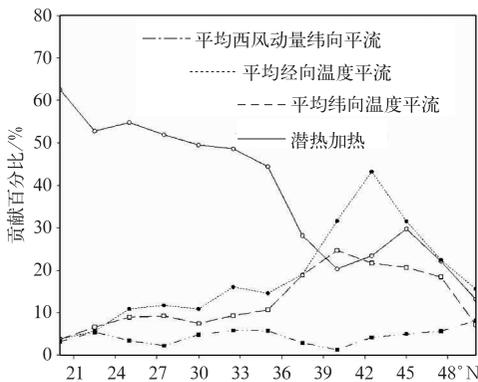


图 2 2011 年秋季连阴雨期间及其前后 10 d 内 (2011 年 8 月 26 日至 9 月 29 日) 主要物理过程的贡献百分比的纬度分布

[实线为潜热加热, 河南省范围 $31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ (下同) 平均的潜热加热的贡献占 46.54%; 点线为平均经向温度平流输送占 15.34%; 点划线为平均西风动量纬向平流占 9.98%; 长虚线为平均纬向温度平流输送占 5.79%]

Fig. 2 The meridional distribution of the contributions (in percentage) made by the main processes to the gross from 26 August to 29 September 2011

[Solid line stands for the contribution made by the latent heating, it accounts for 46.54% which is averaged over $31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ in the range of Henan Province (the same as below); the dotted line is for the average meridional temperature advection, which accounts for 15.34%; the dotted-dashed line is for the zonal advection of westerly momentum which accounts for 9.98%, and the long dashed line is for the horizontal temperature advections which accounts for 5.79%]

加热、平均经向温度平流、平均纬向温度平流和平均西风动量的纬向平流是导致此次连阴雨天气的经向环流上升支演变的主要物理因子。对这次连阴雨天气过程的诊断分析, 也应主要对这 4 种物理因子的分析为主。

下面具体分析这 4 种因子的贡献。图 3 是与 2011 年 9 月 5—19 日连阴雨过程对应的经向环流垂直分量在经向和垂直方向上的分布。其中, 图 3a 是所有因子和开边界共同激发的垂直速度, 在 $20^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 之间形成两个主要的闭合经向环流, 分别在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 和 $26^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 上升, 在 $20^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 和 $36^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 下沉, 垂直速度略向北倾斜。图 3b 是潜热加热所激发的垂直速度, 由图 3b 可以看出, 潜热加热的上升运动大值区在 500 hPa 以下。而图 3c 和 3d 所示由平均经向温度平流和西风动量的纬向平流所激发的上升运动的大值区在 500 hPa 以上。单纯由水汽凝结释放潜热造成的上升运动, 是造成此次连阴雨天气发生的主要物理因子。由于副热带高压位置比常年同期偏北 5 个纬度 (图略), 副高北部是冷性低槽, 造成南北经向温度梯度加大, 与之前的研究 (陈桂兴等, 2007) 相比, 由平均经向温度平流的激发作用也增大。因此, 副热带高压位置持续异常造成的平均经向温度平流是造成此次连阴雨天气过程的重要物理因子。图 3d 所示的西风动量的纬向平流对垂直速度的贡献占了将近 10%, 其激发的上升运动大值区主要位于 500~200 hPa, 并且上升运动向北倾斜较明显。高空 200 hPa 风场图 (图略) 上, 2011 年 9 月 5—19 日, 高空西风急流持续异常, 并且河南省位于高空西风急流入口区, 由高空西风急流持续异常造成的平均西风动量的纬向平流也是造成此次连阴雨天气过程的物理因子。平均纬向温度平流 (图 3e 所示) 对垂直速度的贡献占了将近 6%, 它主要影响豫南地区。

3.4 造成此次连阴雨演变的物理因子

此次连阴雨天气的发生与中高纬上升运动的向南传播有关, 还与其在河南加强相联系 (图 1)。故分析与主要物理因子相关的天气形势及上升运动经向传播和加强的作用, 通过这次连阴雨天气过程来探讨造成此次连阴雨过程演变的物理因子。

3.4.1 造成此次连阴雨发生的物理因子

如果某个物理因子所激发的上升运动主要出现在降水开始前 (降水期间), 其局地变化超前 (同步或

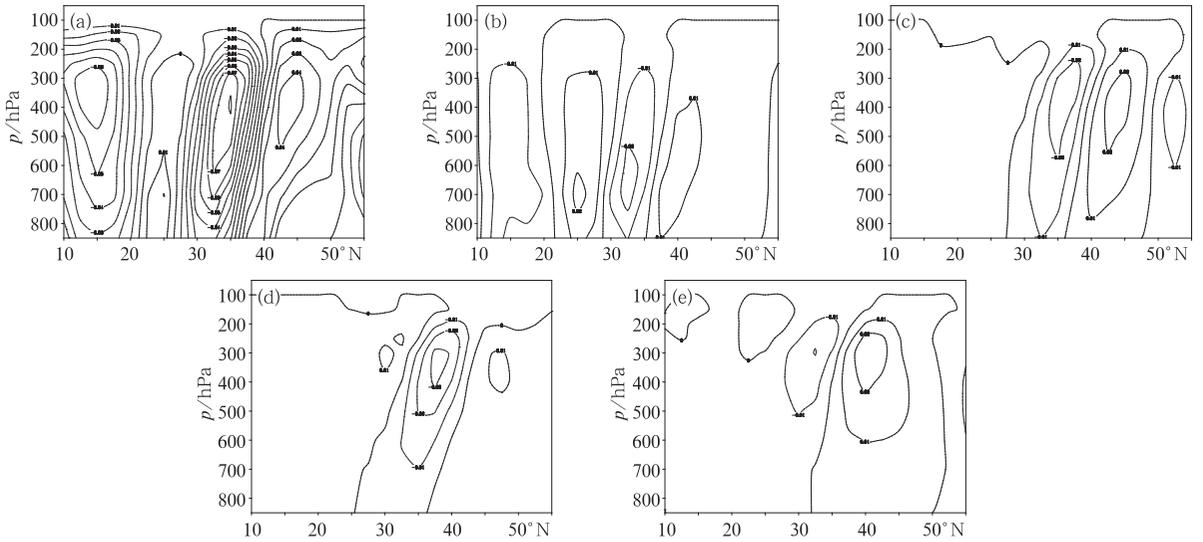


图 3 2011 年秋季连阴雨期间对应的纬向(107.5°~120°E)平均的经向环流垂直分量在经向和垂直方向上的分布(单位: hPa · s⁻¹)
 (a)所有因子和开边界所激发, (b)由潜热加热所激发, (c)平均经向温度平流所激发, (d)平均西风动量的纬向平流, (e)平均纬向温度平流所激发

Fig. 3 The meridional-vertical distribution of the vertical component of zonally averaged (107.5°-120°E) meridional circulation during the continuous rain days in autumn 2011 (unit: Pa · s⁻¹)

(a) all the factors and boundary, (b) latent heat, (c) the average meridional temperature advection, (d) the zonal advection of average westerly momentum, and (e) the average horizontal temperature advectons

滞后)于总体上升运动和降水,则该因子有利于天气过程的启动(增强或持续)。

先看潜热加热,潜热加热作为产生上升运动的主要物理因子,在此次连阴雨过程开始 4 d 前

(图 4a)由潜热加热激发的上升运动出现在 35°~40°N,并随时间向南传播。同时在 10°~15°N 激发出上升运动向北传播,大约 1 d 后。在 15°~22°N 激发出下沉运动也向北传播。说明潜热加热对副热

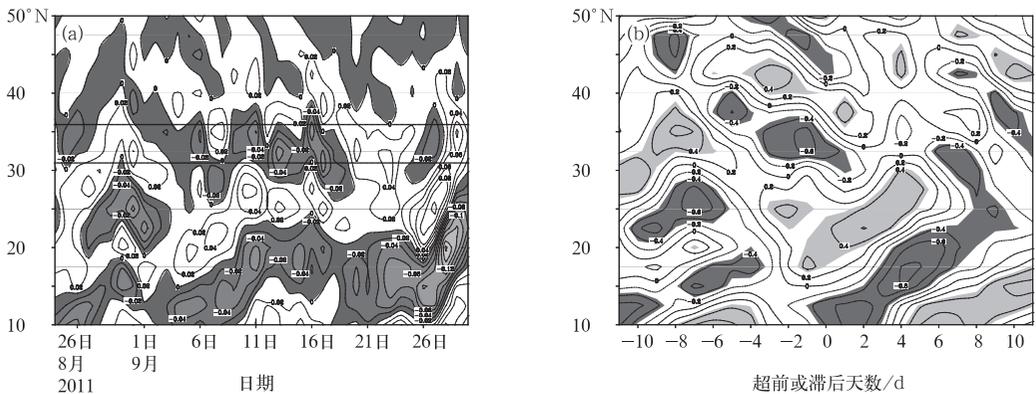


图 4 (a)模拟的由潜热加热所激发的垂直速度的纬向-时间分布(阴影表示上升运动区,单位: Pa · s⁻¹), (b)由潜热加热所激发的垂直速度与河南省逐日降水量的超前滞后相关(阴影区表示通过相关检验的区域)

Fig. 4 (a) The zonal-time distribution of the simulated vertical velocity induced by latent heat (shading stands for the ascending motion area, unit: Pa · s⁻¹), (b) the lead-lag correlation coefficient of the vertical velocity and the daily precipitation in Henan (Shaded areas stand for the parts having passed correlation test)

带高压的位置有一定的作用。吴国雄等(2002)也指出潜热加热对副热带高压的强度和形态起重要的修正作用。

在连阴雨过程开始 3 d 前(图 4b),在 30°~34°N 有潜热加热激发的垂直运动向南传播。由于式(1)中绝热过程 $\left[\frac{R}{pc_p} Q = \frac{R}{pc_p} (Q_1 + Q_2) \right]$,在加热区北侧有: $-\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{RQ_2}{pc_p} \right) > 0$,即在潜热加热区北侧,激发的经向环流是上升运动;在潜热加热区南侧,激发的经向环流是下沉运动(对应副热带高压区域)。

在连阴雨过程开始 0~3 d 前合成的潜热加热所激发的局地平均经向环流图(图略)来看,分别有两强两弱的上升运动,两个强的上升支分别位于 10°~15°N 和 33°~36°N,其中位于 33°~36°N 的上

升支向南传播与位于 17°~22°N 的下沉支的向北传播(图 4a)为连阴雨的开始酝酿条件。

前面指出,平均纬向温度平流也是造成此次连阴雨发生的物理因子。连阴雨过程前 6 d,先在 35°~40°N 所激发的经向环流上升支(图 5a 和 5b),然后在连阴雨开始 3 d 前向南传播到河南省,造成河南省连阴雨的开始。由平均纬向温度平流激发的上升运动主要在河南省的偏南地区。

从平均纬向温度平流所激发的垂直速度与河南省逐日降水量的超前滞后相关图(图 5b),可以发现,连阴雨过程前 1~6 d,由平均纬向温度平流所激发的垂直速度与连阴雨的开始有较大关系,这充分说明平均纬向温度平流也是造成此次连阴雨发生的主要物理因子之一。这种相关可以持续到连阴雨天气发生后的 1~2 d,说明平均纬向温度平流也是造成此次连阴雨持续或增强的主要物理因子之一。

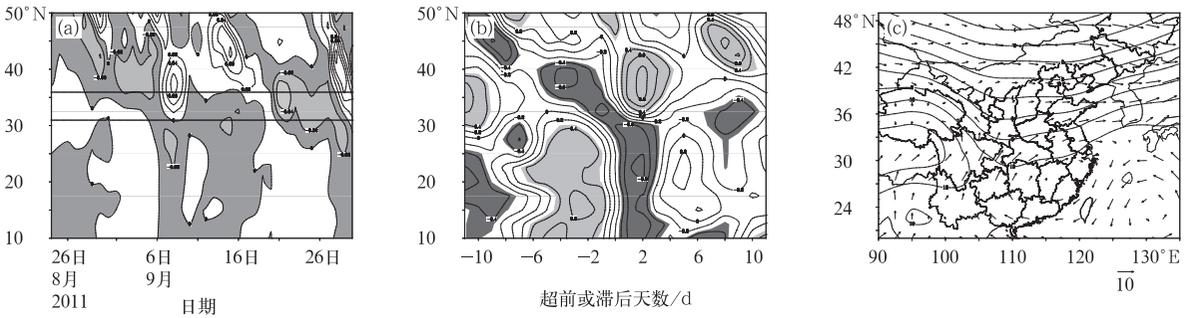


图 5 (a) 模拟的由平均纬向温度平流所激发的垂直速度的纬向-时间分布(阴影表示上升运动区,单位: Pa · s⁻¹), (b) 由平均纬向温度平流所激发的垂直速度与河南省逐日降水量的超前滞后相关(阴影区表示通过相关检验的区域), (c) 连阴雨期间 700 hPa 水平风场和温度场(实线)

Fig. 5 (a) The zonal-time distribution of the simulated vertical velocity induced by the average zonal temperature advection (shading stands for the ascending motion area, unit: Pa · s⁻¹), (b) the lead-lag correlation coefficient of the vertical velocity and the daily precipitation in Henan (shaded areas stand for the parts having passed correlation test), and (c) horizontal wind (arrow) and temperature fields (solid line) at 700 hPa during the continuous rain days

由式(1)第 XII 项,由于

$$-\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(-\frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \lambda} \right) = -\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(-\frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{R}{P} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \lambda} \right) \propto -\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(-\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \lambda} \right)$$

由图 5c 中看出,河南位于槽前暖平流区,并有风速辐合(30°N 比 35°N 的风速大),因此, $\partial \bar{T} / \partial \lambda < 0$,则有 $-\bar{u} \partial \bar{T} / \partial \lambda > 0$,由于 30°N 比 35°N 的风速大,通过计算可知,因此 $-\partial / \partial \varphi (-\bar{u} \partial \bar{T} / \partial \lambda) < 0$,即 $\psi >$

0,由袁卓建等(1998)分析结果, $\psi > 0$ 周围出现顺时针经向环流(由东向西看剖面)。这项将在槽前暖平流区激发出上升运动。因此,700 hPa 温度槽前暖平流和风速辐合造成的平均纬向温度平流所激发的上升运动对此次连阴雨的发生有重要作用。

由上面分析可知,潜热加热和平均纬向温度平流是造成此次连阴雨发生的主要物理因子。

3.4.2 造成此次连阴雨发展或持续的物理因子

第 1 节指出,平均经向温度平流和平均西风动

量的纬向平流也是造成此次连阴雨的主要物理因子。先讨论平均经向温度平流,图 6a 所示,连阴雨过程前由平均经向温度平流激发的上升运动相对偏弱,虽然也有向 31°~36°N 的传播,但是从平均经向温度平流所激发的垂直速度与河南省逐日降水量的超前滞后相关图 6b 来看,连阴雨前期通过检验的部分很少。其滞后 0~4 d 通过了相关检验,说明连阴雨开始以后,由平均经向温度平流激发的上升运动对连阴雨的发展或持续有重要作用。

从连阴雨期间,由于 $-\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(-\frac{\overline{v_{HC}}}{a}\frac{\partial\bar{\alpha}}{\partial\varphi}\right) = -\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(-\frac{\overline{v_{HC}}}{a}\frac{R}{P}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\varphi}\right) \propto -\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(-\overline{v_{HC}}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\varphi}\right)$,槽前暖平流区 $\overline{v_{HC}} > 0$, $\frac{\partial\bar{T}}{\partial\varphi} < 0$ (图 5c), 则有 $-\overline{v_{HC}}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\varphi} > 0$, 即 $-\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(-\overline{v_{HC}}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\varphi}\right) < 0$, 即 $\psi > 0$, 出现顺时针经向环流 (由东向西看剖面)。

再讨论平均西风动量的纬向平流,由图 7a 所

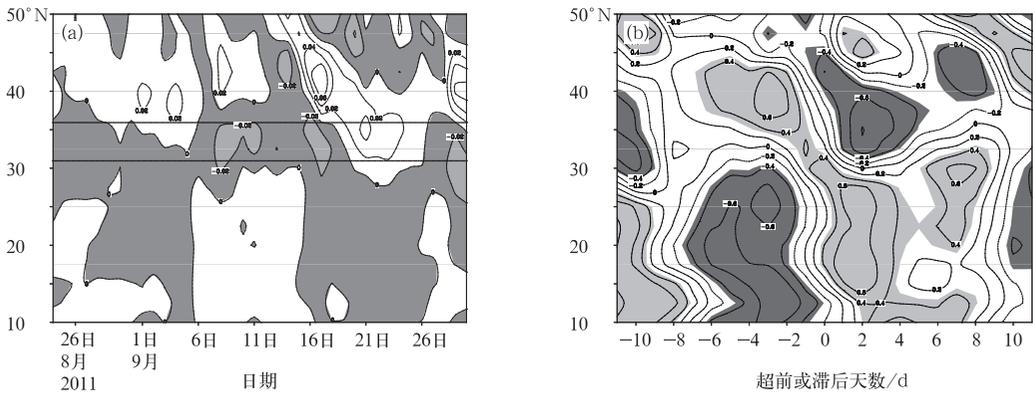


图 6 (a) 模拟的由平均经向温度平流所激发的垂直速度的纬向-时间分布(阴影表示上升运动区,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 由平均经向温度平流所激发的垂直速度与河南省逐日降水量的超前滞后相关(阴影区表示通过相关检验的区域)

Fig. 6 (a) The zonal-time distribution of vertical velocity induced by the average meridional temperature advection (shading stands for the ascending motion area, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) the lead-lag correlation coefficient of the vertical velocity and the daily precipitation in Henan (shaded areas stand for the parts having passed correlation test)

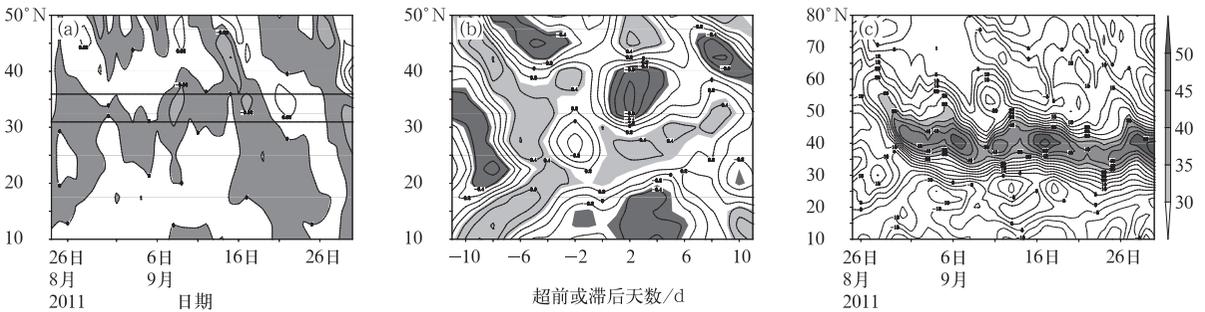


图 7 (a) 模拟的由平均西风动量的纬向平流所激发的垂直速度的纬向-时间分布(阴影表示上升运动区,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 由平均西风动量的纬向平流所激发的垂直速度与河南省逐日降水量的超前滞后相关(阴影区表示通过相关检验的区域), (c) 西风急流的纬度-时间剖面图(110°~116°E 平均的 200 hPa u 风,阴影表示 u 风 $> 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 (a) The zonal-time distribution of vertical velocity induced by the zonal advection of averaged westerly momentum (shading stands for the ascending motion area, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) the lead-lag correlation coefficient of the vertical velocity and the daily precipitation in Henan (shaded areas stand for the parts having passed correlation test), (c) the latitude time cross-sectional view of westerly jet at 200 hPa (u wind averaged in 110°-116°E at 200 hPa, shading stands for u wind greater than $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

示,平均西风动量的纬向平流激发的上升运动主要从 9 月 6 日开始持续到 9 月 14 日,在 9 月 15 日有个间断,16—19 日再次持续。由平均西风动量的纬向平流激发的上升运动与降水的相关滞后 3~4 d (图 7b),说明平均西风动量的纬向平流对于本次连阴雨的增强和持续有一定的作用。由平均西风动量的纬向平流所激发的局地平均经向环流图(图 3d)可知,平均西风动量的纬向平流所激发的上升运动在 28°~36°N 之间,且随高度向上往北倾斜。上升速度的大值区主要在对流层中高层(500~250 hPa)。由图 7c 西风急流的纬度-时间剖面图也可以看出,西风急流在 9 月 5 日明显增强,并且南压至 40°N 附近,维持在这个纬度,9 月 15 日前后急流轴北抬,对应连阴雨出现 1 d 的间歇,此后急流轴南压并加强,阴雨天气再次持续。随着急流轴的南压至 37°N 附近,连阴雨结束。

从前面所述平均纬向温度平流图(图 6b)也可以看出,平均经向温度平流所激发的垂直速度与河南省逐日降水量的滞后 0~2 d,相关通过检验。说明平均纬向温度平流对此次连阴雨的增强和持续有一定的作用。

由 3.4.1 关于平均纬向温度平流和本节的分析可知,平均纬向温度平流、平均经向温度平流和平均西风动量的纬向平流是造成此次连阴雨发展或持续的主要物理因子。

3.4.3 造成此次连阴雨结束的物理因子

从前面所述潜热加热、平均纬向温度平流作为此次连阴雨的酝酿启动和持续有重要作用。连阴雨结束也应考虑这两种物理因子。从图 3a 也可以看出,它们在 9 月 19 日前后都激发出较强的下沉运动,不再有利于降水的持续。而平均纬向温度平流(图 5a)虽然在 19 日前后也激发出下沉运动,但其量级较小,对连阴雨结束的作用有限。

平均西风动量的纬向平流在 19 日后也激发出了下沉运动(图 7a),下沉运动的速度值相对较大,其对连阴雨结束的作用也比较明显。

由上面分析可知,潜热加热、平均西风动量的纬向平流和平均纬向温度平流是造成此次连阴雨结束的主要物理因子。

4 结论和讨论

(1) 用局地经向环流模式定量诊断 2011 年 9

月河南省秋季连阴雨天气过程发现,潜热加热、平均经向温度平流、平均西风动量的纬向平流和平均纬向温度平流是形成 2011 年 9 月河南省秋季连阴雨天气的主要物理因子。

(2) 通过分析主要物理因子所激发的上升运动的局地变化与降水出现的时间关系,初步得到造成此次连阴雨演变的物理因子。潜热加热和平均纬向温度平流是造成此次连阴雨发生的主要物理因子;平均纬向温度平流、平均经向温度平流和平均西风动量的纬向平流是造成此次连阴雨发展或持续的主要物理因子;潜热加热、平均西风动量的纬向平流和平均纬向温度平流是造成此次连阴雨结束的主要物理因子。

(3) 一个地区降水过程与该地上空暖湿空气的上升有必然联系,而上升运动的出现和维持则由多原因造成。本文对造成连阴雨过程出现的上升运动的成因进行定量诊断,以确定出形成此次连阴雨过程的主要物理因子。由于某个物理因子所激发的上升运动主要出现在降水开始前(降水期间),其局地变化超前(同步或滞后)于总体上升运动和降水,则该因子有利于天气过程的启动(增强或持续)。从而可以找出预报该类天气的可能的预报因子。

致谢:感谢中山大学袁卓建教授惠许使用其研发的局地经向环流模式。感谢江西省气象科学研究的邹海波工程师在模式安装调试方面的帮助。

参考文献

- 鲍媛媛,阿布力米提,李峰,等. 2003. 2001 年华西秋雨时空分布特点及其成因分析. 应用气象学报,14(2):215-222.
- 蔡蓁宁,康志明,牛若芸,等. 2012. 2011 年 9 月华西秋雨特征及成因分析. 气象,38(7):828-833.
- 陈桂兴,冯业荣,袁卓建,等. 2007. 2003 年天气气候异常灾害机理的定量分析 II——黄淮秋汛. 热带气象学报,23(4):355-364.
- 陈桂兴,黎伟标,袁卓建,等. 2004a. 1998 年长江流域洪水期大气季节内振荡特征及机理研究. 中国科学(D 辑),34(6):562-572.
- 陈桂兴,袁卓建,梁建茵,等. 2004b. 南海夏季风经向环流的 20 年平均 4—6 月演变机制. 气候与环境研究,9(4):605-618.
- 谷秀杰,孔海江,王友贺. 2011. 2005 年河南省秋季持续阴雨天气成因分析. 气象与环境科学,34(2):44-48.
- 黄荣辉,张振洲,黄刚,等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. 大气科学,22(4):460-469.
- 孔海江,吴胜安,王蕊,等. 2011. 2009 年秋季河南省一次长连阴雨天气成因分析. 气象与环境学报,27(2):39-44.
- 梁肇宁,温之平,袁卓建. 2004. 影响 1991 年和 1994 年南海夏季风爆发迟早的物理因子探讨. 大气科学,28(2):216-230.
- 刘璐,马杰. 2012. 陕西苹果成熟期连阴雨指数及预报方法研究. 气

- 象, 38(8):1012-1016.
- 柳艳菊, 孙冷, 孙丞虎, 等. 2012. 2011 年秋季华西秋雨异常及成因分析. 气象, 38(4):456-463.
- 刘延英, 彭治班. 1990. 连晴和连阴雨前两支气流变化的一般特点. 应用气象学报, 1(3):298-304.
- 覃慧玲, 简茂球, 袁卓建, 等. 2004. 1984 年南海夏季风经向环流强迫因子的诊断分析. 热带气象学报, 20(1):39-50.
- 施宁. 1990. 长江中下游春季连阴雨及厄尔尼诺年的环流背景. 气象, 16(12):8-14.
- 孙锦铨, 陈永秀. 1991. 长江中下游春季连阴雨天气气候分析. 气象, 17(5):29-34.
- 王秀文, 李月安. 2005. 北方麦收期间连阴雨天气环流特征. 气象, 31(9):52-56.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 科学出版社.
- 于文勇, 李建, 宇如聪. 2012. 中国地区降水持续性的季节变化特征. 气象, 38(4):392-401.
- 袁旭, 刘宣飞. 2013. 华西秋雨起止与秋冬季节大气环流转换. 气象学报, 71(5):913-924.
- 袁卓建, 王同美. 1998. 局地经向环流的诊断方程. 东亚季风和中国暴雨——庆贺陶诗言院士八十华诞. 北京: 气象出版社, 496-505.
- 袁卓建, 王同美, 郭裕福. 2000. 东亚季风经向环流数值模拟及结果分析 I. 算法设计. 中山大学学报(自然科学版), 39(6):112-116.
- 张涛. 2008. 北方罕见连阴雨南方大范围秋旱. 气象, 34(1):118-123.
- 钟元, 吴钟凌. 1992. 长江中下游地区春季连阴雨-连晴天气过程的中期振荡. 气象学报, 50(2):199-209.
- 朱盛明. 1991. 长江中下游春季连阴雨、连晴天气研究. 气象, 17(5):20-28.
- 邹海波, 刘熙明, 吴俊杰, 等. 2011. 定量诊断 2008 年初南方罕见冰冻雨雪天气. 热带气象学报, 27(3):345-356.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3):437-470.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A Review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60-92.
- Yuan, Z J, Wang T M, He H Y, et al. 2000. A comparison between numerical simulations of forced local Hadley (Anti-Hadley) circulation in East Asian and Indian monsoon regions. Adv Atmos Sci, 17(4):538-554.