

1991年江淮特大暴雨的位涡 分析与冷空气活动*

陆 尔 丁一汇 李月洪

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

文章用位涡分析讨论1991年5—7月江淮特大暴雨期间的冷空气活动特征及其对暴雨形成的作用。结果表明,在持续的东亚阻塞形势下,中高纬冷空气分三次以低频振荡(15—20天)的形式南下、侵入江淮流域。南下冷空气在江淮一带被来自低纬的西南暖气流和东南暖气流所切断,形成一高位涡冷空气中心,它与两支暖气流相互作用,维持梅雨锋,从而形成持续性暴雨。冷、暖气流相互作用的结果使东亚温度场呈现南北暖、中间冷的形式。

关键词:暴雨;位势涡度;冷空气活动。

1 引 言

1991年5—7月江淮地区出现了持续性特大暴雨。它的形成原因是复杂的^[1],是多尺度环流与降水系统相互作用的产物。从大尺度条件看,目前一般的看法是强调三个方面的异常特征。一是西太平洋副热带高压北上早,5月25日以后持久地稳定在20°—25°N。二是欧亚大陆中高纬出现持久的阻塞形势,它引导冷空气不断南下到江淮流域,并与来自南面的暖湿季风气流相遇,造成了梅雨期的三场暴雨过程。三是出现三次明显的季风涌(偏南风加强)。随着每次涌的出现,高温高湿的不稳定热带气团从海上被带到江淮地区。

本文旨在详细确证其中第二个条件对江淮暴雨的重要作用。在我国许多历史上著名大暴雨的个例研究中,都指出了冷空气活动的重要性^[2]。最近毕慕莹和丁一汇^[3]进一步指出,江淮流域暴雨出现的一种有利大尺度形势是东亚的偶极型阻塞。这种形势使东亚地区的西风带分支,其中偏南的一支可以持续地稳定在30°—35°N,导致锋区移至比常年更偏南的位置上,降水系统仍可连续地沿这支西风带移过长江流域。我们采用位涡分析的方法^[4-5],表征阻塞形势和追踪冷空气的活动。

1993年3月23日收到,1993年5月20日收到修改稿。

* 本研究得到国家自然科学基金的资助。

2 计算方法和资料

等熵面上的位势涡度(IPV)定义为

$$IPV = (\zeta_s + f) \left(-g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (1)$$

式中 ζ_s 为等熵面上的相对涡度, f 为柯氏参数, $-g \frac{\partial \theta}{\partial p}$ 表示静力稳定度, θ 为位温.

在气压(p)坐标下, ζ_s 的表达式为

$$\zeta_s = \zeta_p + \left(\frac{\vec{V}}{\partial p} \times \nabla \theta \right) \cdot \vec{k} / \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (2)$$

因此, p 坐标下式(1)写成

$$IPV = (\zeta_p + f) \left(-g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) - g \left(\frac{\vec{V}}{\partial p} \times \nabla \theta \right) \cdot \vec{k} \quad (3)$$

上式右端第二项在热成风条件(绝热无摩擦)下,恒等于零.对于短期过程,局地位涡的变化主要由平流引起,气团本身的位涡基本守恒.但若气团在运动过程中停留时间较长,则气团与环境场可能发生热交换,位涡会发生变化.在我们的分析中已注意到这个问题.

计算使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)未初始化的逐日(12UTC)网格点资料,垂直方向分7层(1000、850、700、500、300、200、100hPa),水平网格距为 2.5×2.5 经纬度,要素包括各等压面的高度、温度、水平风速(u 、 v 分量)和相对湿度.分析的时段为1991年5—7月.

降雨量取自江淮流域10个测站(常州、无锡、高淳、扬州、南通、南溪、桐城、庐江、黄山、马鞍山)的日雨量测值.根据文献[1],梅雨期各时段划分如下:5月18日入梅,7月14日出梅;三场暴雨出现的时段分别为5月18—26日,6月2—19日和6月30日—7月13日;5月27日—6月1日为第一次间歇期,6月20—29日为第二次间歇期.以下将重点讨论上述三场暴雨过程中的冷空气活动.

3 暴雨期间的阻塞形势和温度场

根据500hPa高度场的分析,可以发现1991年梅雨期的三场暴雨期间,欧亚大陆中高纬地区均盛行明显的阻塞形势.根据阻塞高压的不同位置,又可分为两种形式:一是“双阻型”(图略)(发生在第一场暴雨期间),在俄罗斯西部和阿拉斯加、白令海一带各存在一阻塞高压,在中、东西伯利亚为一宽广的低压槽,这类似于一般的梅雨形势.另一种是东亚“偶极型”阻塞形势(图略)(发生在暴雨的第三阶段),在勒拿河至东西伯利亚一带形成一大范围的阻塞高压,其南侧(鄂霍次克海南部和日本地区)有一深厚的低压系统.根据丁一汇等的研究^{[6][7]}，“偶极型”配置在1954年和1980年的大暴雨中也出现过.第二场暴雨期间(图略),大尺度形势的特点是由“双阻型”向“偶极型”过渡.此时西侧的阻塞高压崩溃,东侧阻高加强,其间的低涡也有所减弱.

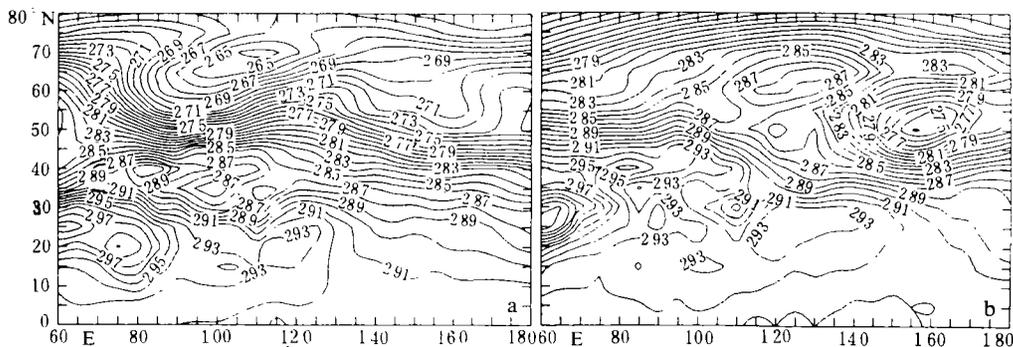


图1 第一场暴雨(a)、第三场暴雨(b)期间850hPa的平均温度场(单位:K)

由图1a可以见到:第一场暴雨期间受“双阻型”高压的影响,在江淮流域出现了一个东西向的温度槽。后两场暴雨期间(图1b)(第2场暴雨图略),在东亚阻塞高压低层的东北气流引导下,冷空气沿东北—西南路径侵入江淮流域,形成了近于东西走向的温度槽。仔细分析东亚地区(70°—115°E, 45°N以南)的温度场,可以发现三场暴雨过程有相似的温度分布形式,其特点是(1)江淮地区呈一低温带,这主要是冷空气南下侵袭的结果。另外,由于冷中心与暴雨区位置相吻合,因而由降水质点的蒸发作用而造成的降温可能也有一定贡献;(2)江淮以南为广大的暖区。这里盛行来自热带的暖湿空气,因而温度偏高;(3)江淮流域以北的黄河流域和华北地区,也存在一暖区,且呈舌状,从西向东伸展到115°E。结果使东亚温度场上形成中间冷、南北暖的形式。丁一汇等^[7]曾指出过江淮流域以北的这种增暖现象。Kato^[8]从热力学上分析了其成因,指出这是由于华北地区地表面强烈的感热通量使南下冷空气变性而造成的。我们在作位涡分析时发现,这一暖带是来自高原地区的西南暖气流持续侵入北方的结果,至少部分原因是如此。江淮流域以北低层明显增暖,使得这个地区的温度梯度反向,这种异常的温度梯度可能使梅雨锋的低层结构发生很大的变化,如梅雨锋在低层消失,甚至坡度转变为向南倾斜。谢义炳^[9]曾指出梅雨锋具有赤道锋的特征,可能与温度场的这种变化有密切关系。后来邱炳焕和丁一汇^[10]、张丙辰^[11]的个例分析支持了这种看法。这也是江淮梅雨锋的低层结构与东段(日本地区)梅雨锋结构明显不同之处,后者具有较强的中纬度斜压锋区结构。

4 位涡场分析与冷空气活动

图2是1991年5—7月逐日位涡沿110°E的纬度-时间剖面图。这个剖面通过了主要暴雨区。该图有两个重要特征:一是在30°N附近出现持续的高位涡带,而在其北侧(40°—60°N)呈现为宽广的低位涡带,这与位涡由极地向赤道递减的气候条件正好相反。江淮地区的高位涡空气是中高纬地区的高位涡冷空气向南输送的结果,而江淮以北的低位涡空气则是低纬的低位涡暖空气向北平流造成的。这说明梅雨期一方面有强冷空气从中高纬持续南下、侵入江淮流域,同时低纬也有暖气流北上,形成了明显的冷暖空气的经向交换。

二是从时间演变看,江淮地区在梅雨期以低频振荡的形式(15—20天周期)出现了三次高位涡时段,它们分别与梅雨季三场暴雨出现的时段(图2b)是一致的.这些结果表明异常强的冷空气南下,侵入江淮流域是三场暴雨发生的一个重要条件.

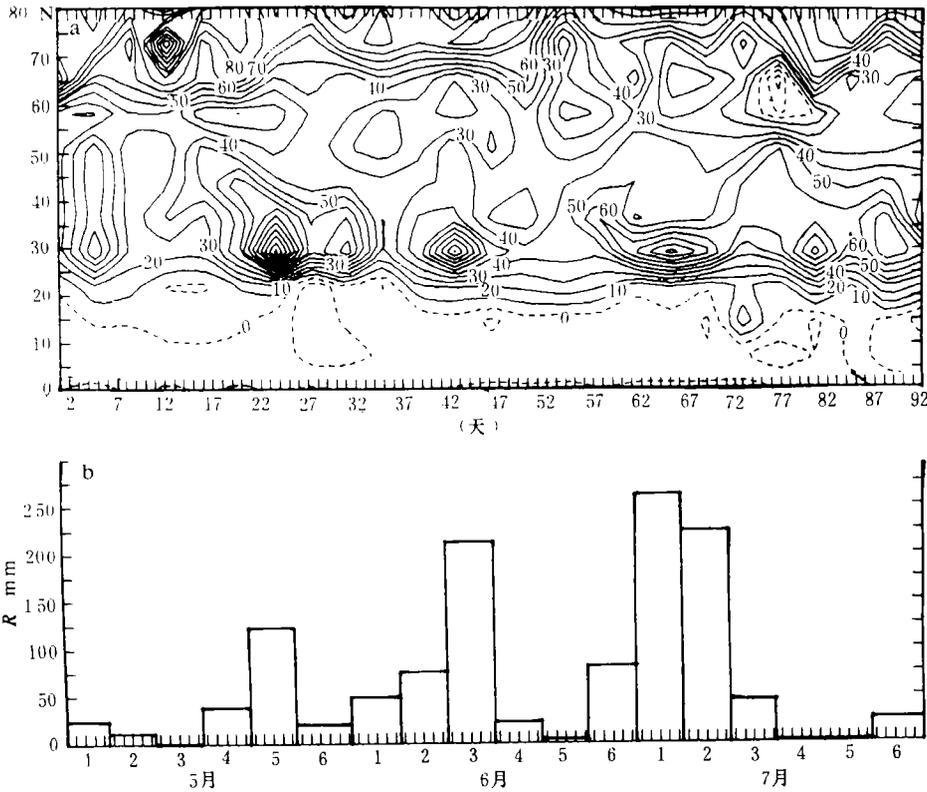


图2 (a)1991年5—7月850hPa位涡沿110°E的纬度-时间剖面图(单位: $10^{-8}K \cdot m^2 \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$ (以下简称位涡单位)) (b)1991年5—7月逐候降雨量R(mm)的时间演变图(由江淮流域暴雨区的10个站平均得到(见文中说明)).

图3是三场暴雨期间平均位涡的纬度-高度分布.从图中可见,三场暴雨期间位涡的空间分布特征是基本相似的.低层(850hPa和700hPa)江淮地区(30°N)出现高位涡的峰值,其中850hPa层的位涡峰值在这个纬带上是最显著的,这表明冷空气南下到江淮暴雨区主要发生在大气低层,尤其在850hPa最强烈.以后随高度减弱,到500hPa已经不清楚.但第三场暴雨(图3c)江淮地区的位涡峰值一直伸展到500hPa,因而这场暴雨的冷空气特别深厚,这与这个时期出现了整个雨季最强的降水有密切关系.500hPa以上各层位涡的分布(图略)与平均情况下位涡的分布特征相似,即由高纬向赤道递减.因此江淮流域中高层的冷空气活动很弱.

从各暴雨时段平均位涡的经度-高度分布图(图略)可进一步看出,江淮一带的位涡峰值在850hPa上均出现于110°E附近,这与江淮的强暴雨相一致.在700hPa上峰值西移位于100°E,这就是说由低层向中高层高位涡峰值似有西偏的趋势,这是梅雨区斜压结构的一种表现.

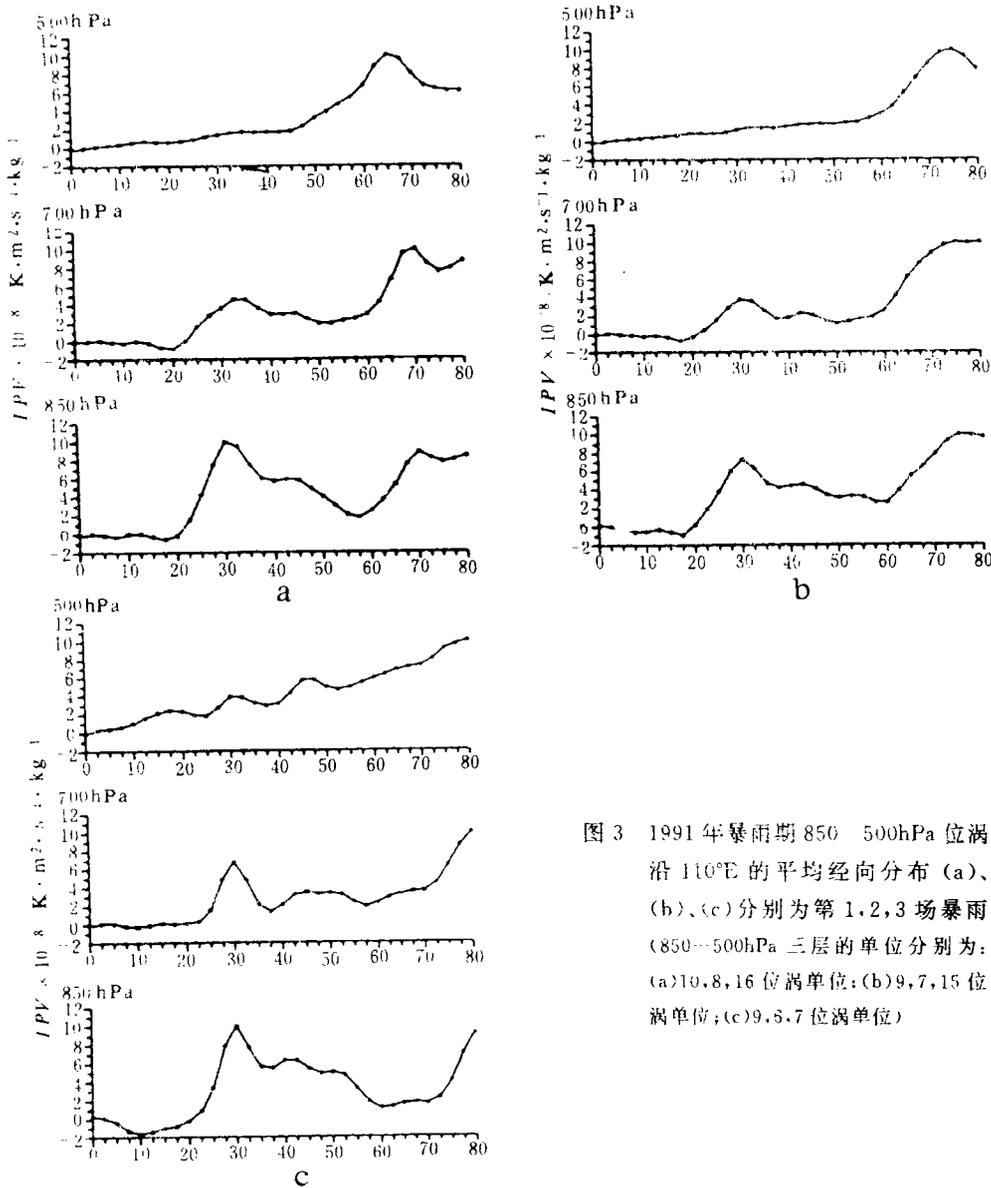


图3 1991年暴雨期850—500hPa位涡沿110°E的平均经向分布(a)、(b)、(c)分别为第1、2、3场暴雨(850—500hPa三层的单位分别为:(a)10,8,16位涡单位;(b)9,7,15位涡单位;(c)9,8,7位涡单位)

5 暴雨期间三次冷空气活动南侵的过程分析

以上分析表明,中高纬强冷空气持续南下侵入江淮流域是三场大暴雨形成的一个重要尺度条件.那么中高纬冷空气到达江淮流域的具体过程如何呢?根据5—7月逐候平均位涡场演变分析(图4),发现冷空气南下的过程和路径是与整个大尺度环流形势及其演变相关联的.

(1)入梅和第一场暴雨

从图4(a)中可看到,5月第3候在100°E的东、西两侧(40°—55°N)各存在一位涡低值区(<30位涡单位).这意味着有两支来自较低纬度的暖空气分别沿西南、东南方向向北推进.在这两支暖气流中间的区域(100°—110°E)则有高位涡空气从中高纬向南输送.

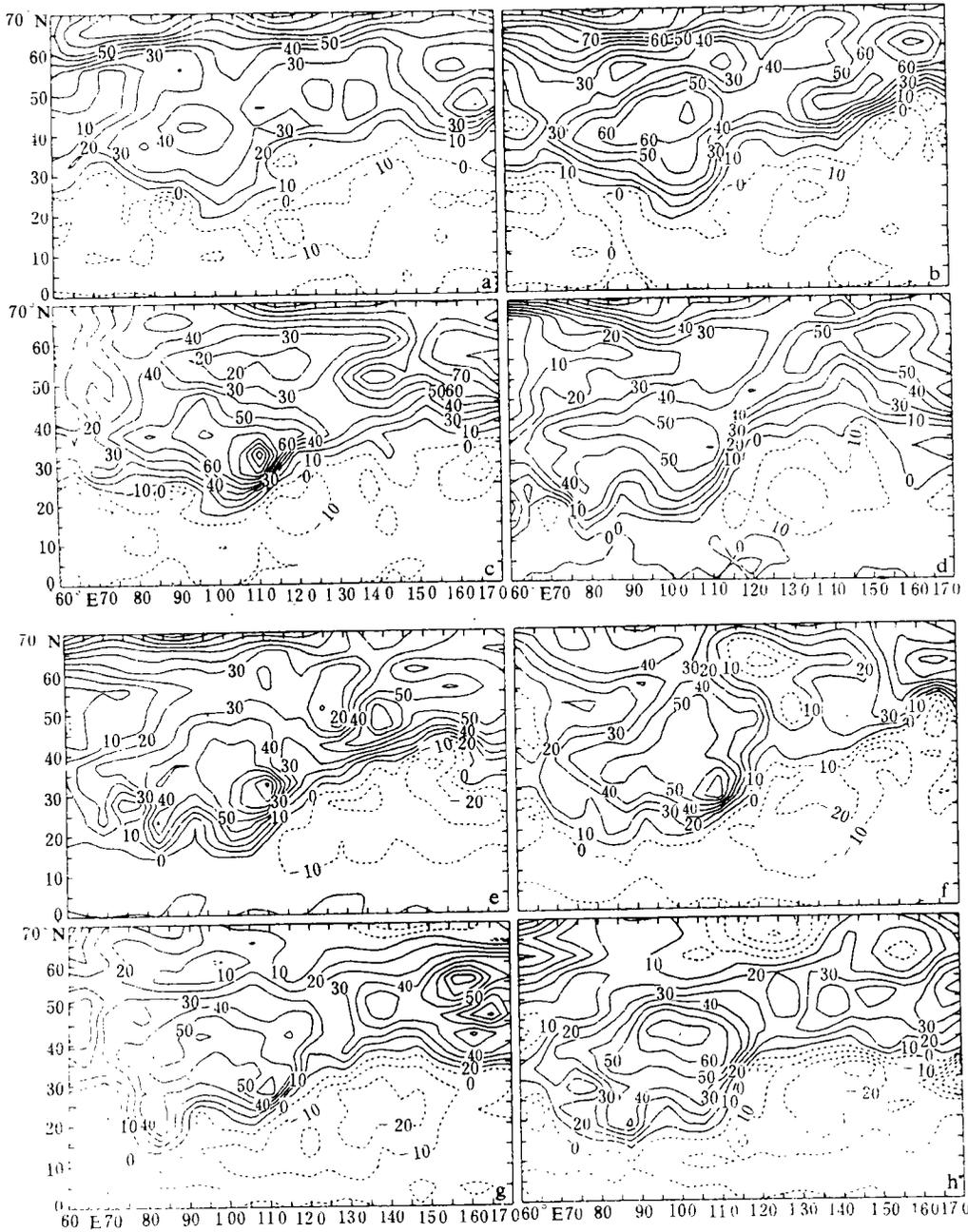


图4 850hPa 候平均位涡场(单位同图2(a)) (a)、(b)、(c)分别为1991年5月第3、4、5候, (d)、(e)分别为6月第2、3候, (f)、(g)、(h)分别为7月第1、2、3候

可以推断,冷空气从北方已侵入江淮流域,这是入梅前的形势. 5月第4候(图4(b)),上述形势进一步发展,暖气流继续加强北推,尤其是西侧的暖气流加强得更显著,迅速地向东北方向推进. 30单位的等值线已向东扩展到120°E,近于被切断. 这一候是江淮入梅的大致日期. 至5月第5候(图4(c)),南下的高位涡冷空气已完全被切断,同时西南的暖气流也在北方被切断,形成一独立的低位涡单体,使东亚位涡场形成南面(江淮地区)为高位涡,北面为低位涡的异常偶极型配置. 如果和高度场的分析(图略)比较,可以看到由位涡场描述的冷暖空气活动比高度场更清楚,尤其是这种切断过程. 注意东侧的冷空气在这个过程中不断加强,持续不断地输入到江淮流域,在其上空形成一强冷涡. 图4(c)上还值得注意的是,因冷暖空气的交绥,江淮高位涡中心东南侧的等值线十分密集,它与江淮梅雨锋和雨带的位置、走向是基本相符的.

(2)第二场暴雨

这场暴雨雨量集中在6月第2、3候(图4(d)、(e)). 这两候位涡场形势与5月第4候相似,高位涡空气沿东北—西南路径侵入江淮流域. 其中雨量最大的第3候,西南暖气流和东南暖气流均很强盛,把来自中高纬的高位涡冷空气完全切断在江淮流域.

(3)第三场暴雨

7月第1候(图4(f))的位涡场形势与5月第3候相似. 开始西南暖气流相对较弱,而

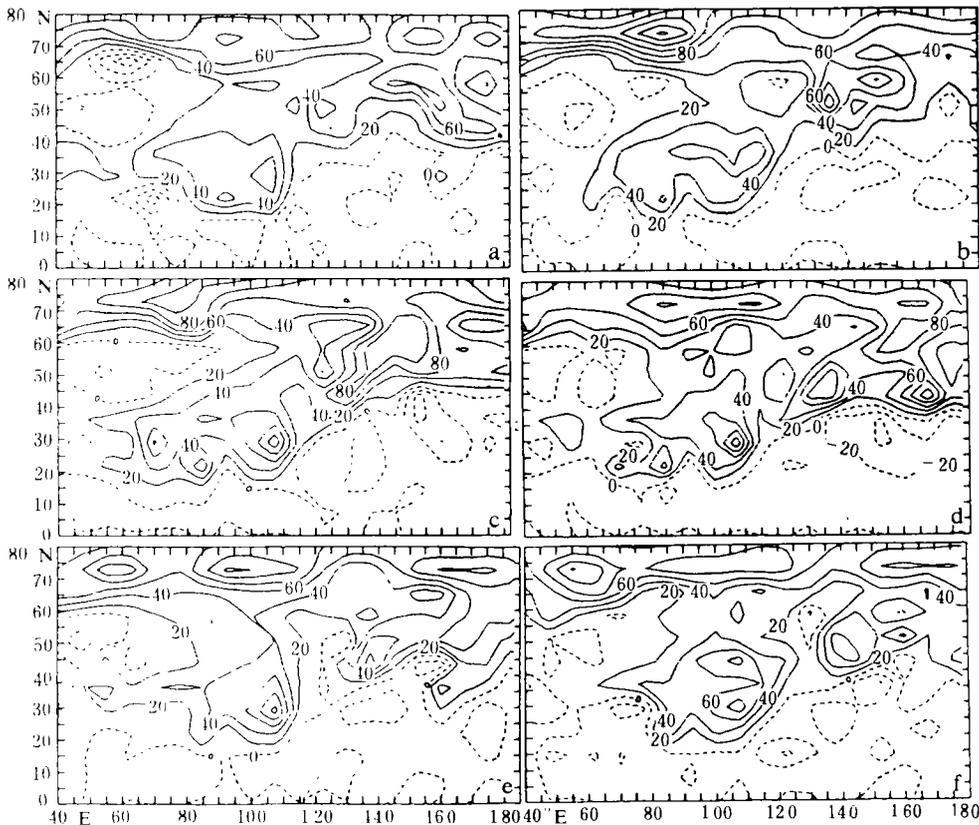


图5 第二场暴雨期间850hPa逐日位涡演变(单位同图2(a)) (a) (f)分别为6月9-14日的逐日位涡分布

东南暖气流则异常活跃,负位涡空气抵达 60°N 以北很北的纬度,同时大范围冷空气从中高纬地区南下. 7 月第 2、3 候(图 4(g)、(h)),冷空气继续沿东北—西南路径南下. 由于西南、东南两支暖气流长时期持续北上,使高纬的广大地区(60° — 70°N)聚积了大量来自低纬的暖空气,呈一位涡低值带(新北上的暖空气位涡值很低;先前到达的暖空气因受非绝热和混合作用而变性,位涡值略升高). 尤其是 7 月第 3 候,该地区出现了负位涡中心. 另一方面,高位涡空气中心的轴线呈东北—西南向,这指示冷空气活动的路径是从东北向西南的. 这与东亚阻塞形势下低层盛行大范围东北气流有密切关系.

第三场暴雨的雨量集中在 7 月第 1、2 候. 7 月 14 日出梅,可以看到图 4(h)中高位涡空气中心已偏向西北方,主体不在江淮流域.

为了更清楚地考察冷空气活动的过程和路径,以第二场暴雨为例逐日分析了位涡场的演变. 图 5 是 6 月 9—14 日的逐日位涡场. 仔细分析这六张图,可以获得这样几点印象: ①低位涡的两支暖气流有时均很强盛,并于我国东北一带相交汇,这时江淮地区被切断出一孤立的高位涡冷空气中心. 如 6 月 9、10 日(图 5(a)、(b)). ②从高位涡中心的轴线看,这次过程冷空气活动以东北—西南路径为主. ③冷空气沿此路径南下的过程并不是连续的,而是表现为两次脉动过程(9 日和 11 日),其间因南来的暖空气北上运动强烈,冷空气被暂时切断,如 10 日、13 日、14 日. 对于其它暴雨时段也发生类似的过程. 总之,根据位涡分析,可以更清楚地分析大尺度冷暖空气运动的特征.

6 结 论

(1)1991 年江淮流域三场暴雨期间,欧亚大陆均存在阻塞形势,特别是第三场特大暴雨期间,东亚维持着“偶极型”阻塞系统. 在持续的阻塞形势下,东亚中高纬有强冷空气以低频振荡(周期为 15—20 天)的形式侵入江淮流域,这是导致三场暴雨发生的一个重要因子.

(2)根据位涡分析揭示出 1991 年 5—7 月冷空气主要从北方或东北方南下,从大气低层(850hPa)进入我国江淮流域. 三场暴雨期间,冷空气活动以东北—西南路径为主. 受东、西两侧暖气流的影响,南下冷空气在江淮流域被切断,形成高位涡的冷空气中心. 并与暖气流相互作用,维持梅雨锋,从而形成持续性暴雨.

(3)冷、暖气流相互作用的结果,使江淮一带的温度场呈现中间(江淮地区)冷、南北暖的型式. 这是东亚梅雨季一种十分独特的温度场型式. 它影响着梅雨锋的中低层结构与环流条件.

参 考 文 献

- 1 丁一汇主编. 1991 年江淮持续性特大暴雨的研究. 北京:气象出版社,1993.
- 2 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,1980.
- 3 毕慕莹,丁一汇. 1980 年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的位涡分析. 应用气象学报,1992,3(3):145—156.
- 4 Shutts G. J. The propagation of eddies in different jet-stream eddy vorticity forcing of blocking flow fields. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1983, 109:737—761.

- 5 Iliari L. A diagnostic study of the potential vorticity in a warm blocking anticyclone. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 3518—3526.
- 6 Ding Yihui and Reiter E. R. A relationship between planetary waves and persistent rain and thunderstorms in China. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B*, 1982, **31**: 221—252.
- 7 Ding Yihui. Summer monsoon rainfalls in China. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 1992, **70**: 373—396.
- 8 Kato K. Air mass transformation over the semiarid region around North China and abrupt change in the structure of the Baiu front in the early summer. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 1987, **65**: 737—750.
- 9 谢义炳. 中国夏半年降水系统的研究. 气象学报, 1956, **27**(1): 1—24.
- 10 邱炳煊, 丁一汇. 1973年梅雨期的环流结构研究. 夏季梅雨降水的形成和预报专刊, 北京: 科学出版社, 1979, 23—32.
- 11 张丙辰. 长江流域梅雨暴雨的研究. 北京: 气象出版社, 1990, 269页.

ISENTROPIC POTENTIAL VORTICITY ANALYSIS AND COLD AIR ACTIVITY DURING THE PERIOD OF EXCESSIVELY HEAVY RAIN OVER CHANGJIANG-HUAIHE RIVER BASIN IN 1991

Lu Er Ding Yihui Li Yuehong

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Isentropic potential vorticity (IPV) analysis method is used in this paper to investigate the feature of cold air activity during the period of the 1991 excessively heavy rain, and its effect on the formation of the three episodes of heavy rain occurring in this meiyu season over Changjiang-Huaihe River basin. It is shown that under the persistent East Asian blocking situation cold air in mid-high latitudes vigorously invades Changjiang-Huaihe River basin three times with the mode of a low frequency oscillation (15-20 days). Over this region, the cold air is cut off by southwest and southeast warm airflows and interacts with warm airflows, and which leads to maintain the meiyu front, and cause persistent heavy rainfalls. Because of the interaction between cold and warm airs, the low-level temperature distribution in East Asia is shown up with a sandwiched pattern: cold air in Changjiang-Huaihe River basin, and warm air to the south and the north. Such thermal structure may induce certain change of meiyu front structure and it is worthwhile to pay more attention to it.

Key words: Heavy rain; Isentropic potential vorticity; Cold air activity.