

“94·7”北京大暴雨的能量转换

谷笏鸣

(北京市气象科学研究所, 100081)

提 要

用尺度分离的方法,对1994年7月华北一次暴雨过程中雨区内的能量制造和转换进行了计算,目的在于揭示暴雨前后不同的能量制造和转换特征。

关键词: 尺度分离 尺度相互作用 动能 转换

引 言

1994年7月12日08时到13日08时,在华北地区发生了一次暴雨过程。本文旨在从尺度分离的角度来探求这次过程中,动能制造项和转换项在暴雨前后的变化。

7月11日08时到12日08时,暴雨过程尚未开始,在华北只有少数区域日雨量达到50mm,最大降水只有159mm。12日08时到13日08时为暴雨过程强烈发展时段,华北相当大的地区日雨量在100mm以上,最大单站降水达391mm。因此,本文分别选取11日20时和12日20时作为暴雨发生前和发生时的代表时刻,计算分析这两个时刻的动能制造和转换项。

1 尺度分离和动能方程

对于任意的物理量,多次使用九点平滑方法可将其分解为天气尺度场和次天气尺度场,九点平滑表达式如下:

$$A_{i,j} = A_{i,j} + \frac{S(1-S)}{2}(A_{i-1,j} + A_{i,j+1} + A_{i+1,j} + A_{i,j-1} - 4A_{i,j}) + \frac{S^2}{4}(A_{i-1,j+1} + A_{i+1,j-1} + A_{i+1,j+1} + A_{i-1,j-1} - 4A_{i,j})$$

因此,速度场、位势场及摩擦力场可分解为天气尺度场和次天气尺度场:

$$\vec{v} = \vec{v} + \vec{v}'$$

$$\Phi = \Phi + \Phi'$$

$$\vec{F} = \vec{F} + \vec{F}'$$

本文所用尺度分离响应曲线图如图1。

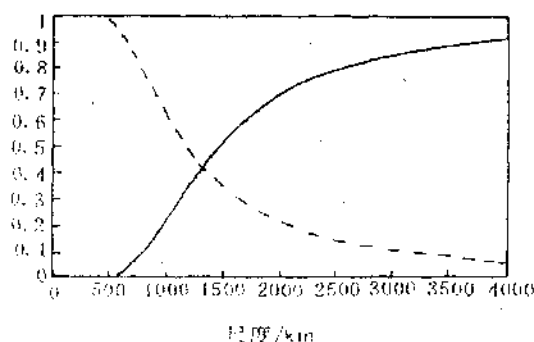


图1 天气尺度(实线)和次天气尺度(虚线)响应曲线图

总动能可以表示为:

$$k = \bar{k} + k' = \vec{v} \cdot \vec{v}'$$

其中, $\vec{v} \cdot \vec{v}'$ 是天气尺度和次天气尺度速度的点乘,本文中暂称其为尺度相互作用动能。

对运动方程做尺度分离,可得天气尺度运动方程:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \omega \frac{\partial \vec{v}}{\partial p} = -\nabla \Phi - f \vec{v} \times \vec{v} + \vec{F} + \vec{I} + \vec{J}$$

其中

$$\bar{I} = -[(\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v} - (\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v}]$$

$$\bar{J} = -(\omega \frac{\partial \bar{v}}{\partial p} - \omega \frac{\partial \bar{v}}{\partial p})$$

分别代表次天气尺度对天气尺度流场的水平和垂直作用。用总的运动方程减去天气尺度运动方程可得次天气尺度运动方程:

$$\frac{\partial \bar{v}'}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v}' + \omega \frac{\partial \bar{v}'}{\partial p} = -\nabla \Phi' - kf \times \bar{v}' + \bar{F}' - \bar{I} - \bar{J}$$

分别用 $\bar{v}$ 和 $\bar{v}'$ 点乘天气尺度和次天气尺度运动方程可得两种尺度动能方程。

$$\frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{k} + \omega \frac{\partial \bar{k}}{\partial p} = -\bar{v} \cdot \nabla \Phi + \bar{v} \cdot \bar{F} + \bar{I} \cdot \bar{v} + \bar{J} \cdot \bar{v}$$

$$\frac{\partial \bar{k}'}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{k}' + \omega \frac{\partial \bar{k}'}{\partial p} =$$

$$-\bar{v}' \cdot \nabla \Phi' + \bar{v}' \cdot \bar{F}' - \bar{I} \cdot \bar{v}' - \bar{J} \cdot \bar{v}'$$

将两种尺度运动方程代入尺度相互作用动能 $\bar{v} \cdot \bar{v}'$ 的时间变化式,可得尺度相互作用动能的变化方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{v} \cdot \bar{v}'}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla (\bar{v} \cdot \bar{v}') \\ & + \omega \frac{\partial \bar{v} \cdot \bar{v}'}{\partial p} = -(\bar{v}' \cdot \nabla \Phi + \bar{v} \cdot \nabla \Phi') \\ & + \bar{v}' \cdot \bar{F} + \bar{v} \cdot \bar{F}' \\ & - \bar{I} \cdot \bar{v} - \bar{J} \cdot \bar{v} + \bar{I} \cdot \bar{v}' + \bar{J} \cdot \bar{v}' \end{aligned}$$

其中, $-\bar{v}' \cdot \nabla \Phi$ 和 $-\bar{v} \cdot \nabla \Phi'$ 分别是次天气

尺度速度场穿越天气尺度高度场和天气尺度速度场穿越次天气尺度高度场做功的动能制造项。两者之和构成对尺度相互作用动能的贡献。定义:

$$-(\bar{v}' \cdot \nabla \Phi + \bar{v} \cdot \nabla \Phi') = GKMS;$$

$$-\bar{v} \cdot \nabla \Phi = GKS; -\bar{v}' \cdot \nabla \Phi' = GKM;$$

$$\bar{I} \cdot \bar{v} = VLI; \bar{J} \cdot \bar{v} = VLJ;$$

$$-\bar{I} \cdot \bar{v}' = VSI; -\bar{J} \cdot \bar{v}' = VSJ;$$

$$GKMS + GKS + GKM = GK.$$

VLI, VLJ, VSI, VSJ 为尺度相互作用中造成的动能转移。从两种尺度及尺度相互作用动能方程不难看出,天气尺度动能与次天气尺度动能并不直接转化,而是通过和尺度相互作用动能之间的转化来实现。本文重点在于研究动能制造项和转换项,所以平流项和摩擦项未作计算。

2 资料及分析

本文所用资料为 MM4 客观分析结果,格式为 90km×90km 正方网格。以 12 日 20 时在暴雨区里的点为资料点,求区域平均值,计算了 11 日 20 时和 12 日 20 时高层(100—300hPa)、中层(300—700hPa)、低层(700—1000hPa)及整层(100—1000hPa)的 $GKS, GKM, GKMS, GK, VLI, VLJ, VSI$ 和 VSJ (见附表)。

附表 7 月 11 日、12 日 20 时动能方程各项空间平均值/ $W \cdot m^{-2}$

	层/hPa	GKS	GKM	GKMS	GK	VLI	VLJ	VSI	VSJ
12 H	100—300	2.67	6.16	5.33	8.16	0.11	-0.04	0.08	-0.01
	300—700	0.95	6.18	1.85	2.99	0.19	0.15	-0.06	0.20
	700—1000	0.13	-0.03	0.04	0.13	0.19	-0.03	0.01	-0.02
	100—1000	3.75	0.31	7.22	11.28	0.27	0.09	-0.14	0.17
13 H	100—300	0.72	-0.02	0.95	1.65	-1.22	-0.02	-0.11	-0.05
	300—700	0.65	-0.31	0.72	1.06	-0.85	-0.19	0.77	0.97
	700—1000	-0.41	0.06	-0.36	-0.76	-0.29	0.15	0.44	0.00
	100—1000	0.96	-0.27	1.31	2.60	-2.36	-0.07	1.19	0.92

从表中不难看出,各项都是中、高层数值较大,低层数值相对较小,说明无论是能量制

造项还是转换项都是高层起主要作用。在暴雨前, $GKS, GKM, GKMS$ 的整层积分都为

正,说明天气尺度和次天气尺度风场做功使两种尺度的动能及尺度相互作用动能增加。 VLI 、 VLJ 之和与 VSI 、 VSJ 之和均为正,说明能量由尺度相互作用动能向两种尺度动能转化。暴雨发生时, GKS 、 $GKMS$ 仍为正,而 GKM 变为负,说明次天气尺度风场做功使次天气尺度动能减少。 VLI 、 VLJ 之和为负、 VSI 、 VSJ 之和为正,说明在暴雨时,天气尺度动能向尺度相互作用动能转化,而后者又向次天气尺度动能转化。动能制造的整层积分如图2所示。

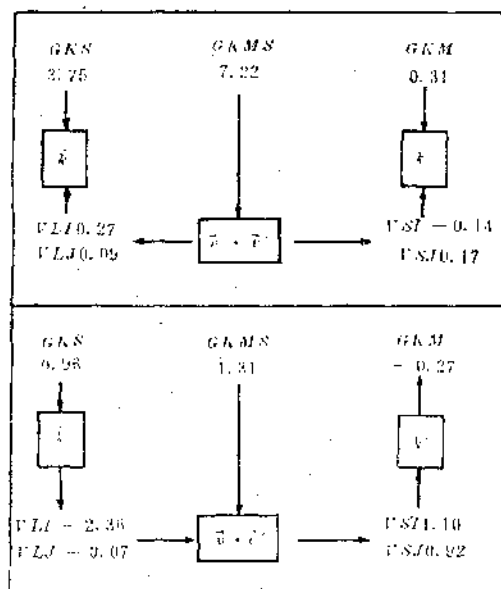


图2 7月11日(上)、12日(下)20时动能制造及转化的整层积分示意图

比较两个时刻的各项整层积分值可见:

(1)暴雨时相对于暴雨前,动能制造项的大小减小了。 GKM 的能量产生项符号有所改变。暴雨前次天气尺度风场做功使次天气尺度能量增加,暴雨时使其减少。

(2)暴雨时相对于暴雨前,能量转换项的大小大大增大了。天气尺度动能和尺度相互作用动能之间的能量转化方向有所改变,雨前是使天气尺度能量增加,雨时是使其减小。

(3) VLI 比 VLJ 的值大许多, VSI 与 VSJ 基本相同,说明天气尺度动能和尺度相互作用动能的转化主要由动量的水平相互作用来完成,而尺度相互作用动能与次天气尺度动能的转化则由动量的水平和垂直相互作用共同完成。

由于本文只是针对一个个例进行了计算,所以结论只适用于本个例,要求得共同规律,还需要对更多的例子进行计算分析。

参考文献

- 1 陈受钧,谢安.次天气尺度与天气尺度系统间动能交换的诊断分析.气象学报,39(4).
- 2 Shou Jun CHEN, Le-Sheng BAI. An Approach to kinetic Energy Diagnosis of Meso-Synoptic Scale Interactions. Mon. Wea. Rev., Vol 118:2774-2780.

Energy Transformation of "94.7" Torrential Rain in Beijing

Gu Jiarning

(Beijing Institute of Meteorological Science, 100081)

Abstract

Using the scale-separation method, the energy generation and transformation during a torrential rain in July 1994 in Huabei area are calculated, with the purpose of finding the characteristics of energy generation and transformation before and during the torrential rain.

Key Words: scale-separation kinetic energy scale-interaction transformation