

## 能量学诊断研究新进展

汪钟兴

(中国科学技术大学,合肥 230026)

## 提 要

作者概述了近几年来能量学诊断研究在如下两个方面的进展 ①旋转风和辐散风动能收支,尤其分析动能的产生、输送、转换和耗散过程的意义和特征,②动能尺度相互作用方程,它揭示出 $k$ 和 $k'$ 之间的交换只能通过 $\hat{v}v'$ 来实现,而且两种尺度流场和质量场之间的相互作用所制造的动能常向两种尺度系统转换。

**关键词** 能量学诊断 尺度相互作用 旋转风和辐散风动能收支

## 引 言

能量学诊断有助于揭示各类天气系统发生发展的内在物理过程和动力学机理,故为天气动力学重要研究课题之一。近年来,尤其在如下两方面有了新进展 ①在中尺度系统分析和热带气象研究中发现,辐散风虽比旋转风约小一个量级,但前者与非地转和非绝热过程相联系,故对天气系统发展有重要影响,尤其对动能水平通量散度和动能制造,为此建立了旋转风和辐散风动能收支方程,从中能清楚地了解到两者产生、输送和转换的具体动力过程,②暴雨产生常常是多尺度系统相互作用的产物,不同尺度系统有各自不同的动力学性质,因而用适当方法将它们分离出来,研究各尺度系统之间的相互作用,也建立了反映尺度相互作用的动能方程。

## 1 旋转风和辐散风动能产生、输送和转换特征

## 1.1 风场分解

按 Helmholtz 原理,水平风场可分解为辐散风和旋转风两部分,相应单位质量气块的总动能为

$$k = k_D + k_R + V_R \cdot V_D \quad (1)$$

式中, $k_D = \frac{1}{2} V_D \cdot V_D$ ,  $k_R = \frac{1}{2} V_R \cdot V_R$  分别为辐散风动能和旋转风动能。谢安等<sup>[1]</sup>研究江

淮流域梅雨期次天气尺度扰动动能平衡时给出扰动区域动能各组成部分的分布,表明 $k_R$ 远大于 $k_D$ ,并且在500hPa以上交叉项动能 $V_R \cdot V_D$ 为负值,故 $k_R > k$ ,而在500hPa以下交叉项动能为正值,故 $k > k_R$ 。若用实测风的旋转部分表示风场时,在对流层下半层动能将偏小,上半层动能将偏大,700hPa以下若不考虑辐散风,动能将损失15%—37%,故在数值预报模式中,利用实测风作初始场将会明显改善预报结果。

至于风场的分解方法,过去沿用求解 Poisson 方程,该法的不足之处在于计算结果依边界条件的取法不同而有异,而且需经过3次有限差分运算,致使计算精度降低;分解后的风场范围也比原始风场的范围少2圈。近年来,国外普遍采用 Endlich<sup>[2]</sup>的直接分解方法,该法的要点是 ①先由实测风计算域内各格点的涡度值,②反复调整计算格点邻近东西方向格点的 $u_E$ 和 $u_W$ ,调整值取为大小相等,符号相反,南北方向格点的 $v_S$ 和 $v_N$ 也作相同的调整,目的是使该计算格点的辐散值为0,③调整后的风场,其涡度值必定不同于原来的涡度值,故再调整 $u_S$ 和 $u_N$ 以及 $v_E$ 和 $v_W$ ,使与原来的涡度值接近一致,④在调整后的旋转风分量 $u$ 和 $v$ 分量上加上一

个常修正量,为使计算域内区域平均值与实测风的区域平均值两者相一致,再将实测风与其相减则得到辐散风分量。可见,该法不求流函数和速度势,不需边界条件,而且具有精度可以估计的优点。

1.2 旋转风和辐散风动能收支

计算有限区域总动能时,需对水平面积为A,垂直方向自地面到大气顶积分

$$K = KR + KD + \iint V_R \cdot V_D \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial KD}{\partial t} = & \iint -V_D \cdot \frac{\partial V_R}{\partial t} - \left[ \iint -f(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\zeta(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\omega \frac{\partial k_R}{\partial p} \right. \\ & DKD \quad INTD \quad C1 \quad C2 \quad C3 \\ & \left. + \iint -\omega V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial p} \right] + \iint -V_D \cdot \nabla \varphi + \iint -\nabla \cdot kV_D + \iint -\frac{\partial \omega k}{\partial p} + \iint V_D \cdot F \quad (4) \\ & C4 \quad GD \quad HFD \quad VF \quad DD \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial KR}{\partial t} = & \iint -V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial t} + \left[ \iint -f(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\zeta(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\omega \frac{\partial k_R}{\partial p} \right. \\ & DKR \quad INTR \quad C1 \quad C2 \quad C3 \\ & \left. + \iint -\omega V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial p} \right] + \iint -V_R \cdot \nabla \varphi + \iint -\nabla \cdot kV_R + \iint V_R \cdot F \quad (5) \\ & C4 \quad GR \quad HFR \quad DR \end{aligned}$$

图1为开域涡散场动能收支各项之间关系示意图。A为有效位能, KR、KD和DKR、DKD分别表示偶散场动能及其时间变率, VRVD和DVRVD表示相互作用动能及其时间变率,GR的GD分别为旋转风和散度风穿越等压线产生的动能制造或耗散项, HFR

其中,  $K = \iint k$ ,  $KR = \iint k_R$  和  $KD = \iint k_D$ ,  $\iint = \frac{1}{gA} \iiint dx dy dp$ 。总动能时间变率为  $\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial KR}{\partial t} + \frac{\partial KD}{\partial t} + \iint \frac{\partial V_R \cdot V_D}{\partial t}$  (3)

对全球闭域而言,式(2)右端最后一项为零。对于开域积分形式的涡散场能量收支方程可导出以下形式<sup>[3]</sup>

和HFD分别为旋转风和散度风对总动能的水平通量散度项, VF为散度风对总动能的垂直通量散度项, C(KD, KR)表示涡散场能量的相互转换,它包括(4)、(5)两式中方括号内C1、C2、C3和C4四项,其中C1和C2项决定于 $v_R$ 和 $v_D$ 的大小和相对方向,当两者呈90°时,两项达最大值, C3项表示旋转风动能的垂直交换, C4项则涉及旋转风和散度风的相对配置及散度风的垂直分布。C(KD, KR) > 0, 表示散度风动能向旋转风动能转换, 若C(KD, KR) < 0, 则转换方向相反, DR和DD分别为次网格尺度“摩擦”项, 它包括摩擦耗散以及次网格尺度与网格尺度之间的动能交换, 由于该项是作为余差计算的, 因而不可避免地包括计算误差和资料误差在内。INTR和INTD项是由动能交叉项产生的, 故表示两类风场之间的相互作用。

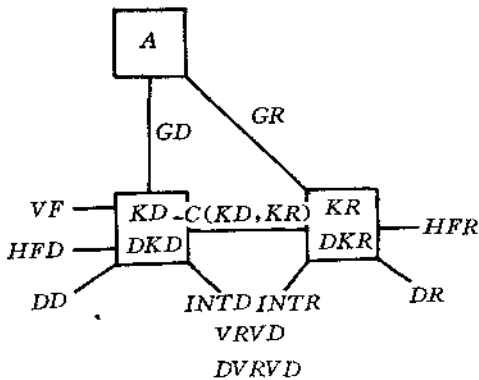


图1 开域涡散场动能收支示意图  
连线表示收支状况和转换方向

对于全球闭域而言,则偶散场动能收支

和转换由图 2 所示。可见有效位能只能转换为辐散风动能,然后再向旋转风动能转换,促使天气系统演变。

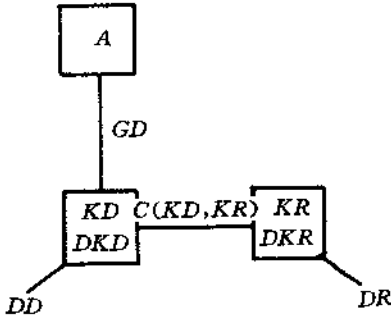


图 2 区域涡散场动能收支示意图

### 1.3 实例诊断

#### 1.3.1 美国中南部强风暴<sup>[3]</sup>

收支诊断发现,虽然两个强风暴的天气形势各不相同,但能量收支却有不少共性。对流层高层的收支状况决定着整个气层,就  $k_R$  而言,旋转风动能通量辐合是主要能源,而旋转风产生项则是主要能汇,就  $k_D$  而言,辐散风产生项和“摩擦”项是主要能源,辐散风动能通量辐散是主要能汇。在整个过程中,DKD 变化很小,充分说明  $k_D$  起着“催化剂”的作用。两例的差异在于能量转换项,个例 1 C1 作用最大,其次是 C3,而个例 2 则以 C3 作用最大,其次是 C2,再次是 C1,因此造成两例的能量转换方向相反。

#### 1.3.2 西太平洋台风<sup>[4]</sup>

扰动阶段各气层动能增加,主要由 GD 项产生,GR 项是破坏动能的,由于后者比前者大得多,消耗的动能由散度风动能通量辐合来补充,其次积云对流的反馈也是重要能源。发展阶段则旋转风和辐散风一致产生动能,在成熟阶段 GR 作用更强,就整层积分而言,GR 约为 GD 的三倍半,HFR 也成为主要动能输入项,能量转换过程更为激烈,但各阶段均以 C1 作用最大,C2 次之。

#### 1.3.3 江淮暴雨过程<sup>[5,6,7]</sup>

比较伴有低空急流和不伴有低空急流两类暴雨过程的诊断表明,辐散风动能产生、转换和输送过程是完全相同的,对流层高层 GR 和 GD 均制造动能,并向四周环境输出,这种能量过程均比对流层中、低层更为强烈。主要差异在于对流层中、下层两例的 GR 符号相反。由于对流层上层的能量收支是主导,大致决定整层的能量收支,故两类降水过程能量生消及其转换特征基本上相同。

对于梅雨锋上移动性次天气尺度涡旋引起的暴雨,也采用准拉格朗日坐标系的旋转风和辐散风动能方程作了类似的收支计算。

#### 1.3.4 次天气尺度低空急流<sup>[8]</sup>

对比伴有暴雨和不伴有暴雨的两类低空急流涡散场能量方程的诊断结果说明 a 两类低空急流维持的动力过程是不同的,一类由辐散风制造动能,并向旋转风转换来维持,另一类则由旋转风直接制造的, b 高、低空急流风场的水平和垂直分布与  $k_R$ 、 $k_D$  的生消及其转换直接有关, c 对流层低层辐散风动能向旋转风动能转换是暴雨过程的必要但并不充分的条件,即暴雨区必有正能量转换,但正能量转换区并不一定有暴雨,还与其它动力、热力和水汽条件有关。

### 2 不同尺度系统动能相互作用过程

#### 2.1 中尺度滤波

Barnes<sup>[9]</sup>提出的以权重函数为基础的滤波方法,在国外得到广泛应用,该法优点在于同时完成二维场的插值和滤波。Barnes 滤波器的响应函数为

$$R = R_0(1 + R_0^{g-1} - R_0^g)$$

$$R_0 = \exp(-4\pi^2 c/\lambda^2)$$

分别选取不同的权重参数  $c$  和  $g$ ,就确定了所采用的低通滤波器性质, $c$  取值越小,截止波长越短。两个低通滤波器相减得到带通场为

$$F_B(i, j) = r[F_1(i, j) - F_2(i, j)]$$

相应的响应函数为  $R_B = r(R_1 - R_2)$ 。 $r$  是最大响应差的倒数,乘上这个数后,人为地在响应

差为最大值的波长处( $\lambda_{max}$ )使带通响应函数又恢复到1。但是这样做又使带通场中所保留的各种尺度的系统被同等程度地放大,也就是说在我们所关心的分离尺度系统被恢复到最大响应函数值的同时,也增大了周围尺度系统的强度和范围,为此作者<sup>[16]</sup>应用自适应原理,根据带通场中相对变化的大小,使最大响应函数自动集中在最大响应波长附近的窄波带内。

## 2.2 不同尺度系统相互作用动能方程组

Holopainen 等<sup>[11]</sup>曾利用滤波分离尺度研究了次网格尺度运动在急流出口区的加速作用。陈受钧等<sup>[12]</sup>采用 sharp 滤波方法分离

$$\frac{\partial \hat{K}}{\partial t} + V \cdot \nabla \hat{K} + \omega \frac{\partial \hat{K}}{\partial p} = -\hat{V} \cdot \nabla \hat{\phi} + \hat{V} \cdot \hat{F} + I \cdot \hat{V} + J \cdot \hat{V} \quad (6)$$

DKL    HADL    VADL    GL    DIL    CHL    CVL

$$\frac{\partial K'}{\partial t} + V \cdot \nabla K' + \omega \frac{\partial K'}{\partial p} = -V' \cdot \nabla \phi + F' \cdot V' - I \cdot V' - J \cdot V' \quad (7)$$

DKD    HADD    VADD    GD    DID    CHD    CVD

$$\frac{\partial \hat{V} \cdot V'}{\partial t} + V \cdot \nabla (\hat{V} \cdot V') + \omega \frac{\partial \hat{V} \cdot V'}{\partial p} = - (V' \cdot \nabla \hat{\phi} + \hat{V} \cdot \nabla \phi) + (\hat{F} \cdot V' + F' \cdot \hat{V}) - I \cdot \hat{V} - J \cdot \hat{V} + I \cdot V' + J \cdot V' - CHL - CVL - CHD - CVD \quad (8)$$

DKLD    HADLD    VADLD    GLD    DILD

式中,  $I = -[(\hat{V} \cdot \nabla)V - (V \cdot \nabla)\hat{V}]$ ,  $J = -\left(\omega \frac{\partial \hat{V}}{\partial p} - \omega \frac{\partial V'}{\partial p}\right)$

分别表示中尺度运动加在天气尺度运动上的水平方向“应力”和垂直方向“应力”。符号 $\hat{\quad}$ 表示经低通滤波的天气尺度系统, $'$ 表示经高通滤波的中尺度系统。

由该动能方程组可见 ①同一种尺度流场和质量场的相互作用只能引起该尺度系统自身动能的增减,而不能引起另一种尺度系统动能的变化,一种尺度流场和另一种尺度质量场之间相互作用只能改变 $\hat{V} \cdot V'$ ,② $\hat{K}$ 和 $K'$ 之间的转换必须通过 $\hat{V} \cdot V'$ ,即由 $CHL$ 、 $CVL$ 和 $CHD$ 、 $CVD$ 转换项来实现。若各转换项均为正值,说明 $\hat{V} \cdot V'$ 减少,而 $\hat{K}$ 和 $K'$ 增加,即由 $\hat{V} \cdot V'$ 转换给 $\hat{K}$ 和 $K'$ ,若各转换项为负值,则转换方向相反。

出天气尺度和次天气尺度系统,然后推出动能相互作用方程,诊断了华北暴雨和江淮梅雨期暴雨过程中,两种尺度系统的相互作用。但他们应用的方程形式只能了解不同尺度系统相互作用的整体效果,而不能了解其中具体的物理过程。为此,Carney 和 Vincent<sup>[13]</sup>建立统一表示不同尺度相互作用的动能方程组,并诊断了强对流系统与天气尺度环境场之间的相互作用。最近,陈受钧等<sup>[14]</sup>又重新导出显式表示不同尺度相互作用的动能方程组,从中能够清楚地讨论尺度相互作用的具体过程,文中导出的天气尺度和中尺度系统的动能方程组为

## 2.3 实例诊断

### 2.3.1 华北暴雨<sup>[14]</sup>

降水区内各动能产生项和动能转换项的总特征是 不同尺度流场和质量场相互作用引起的动能产生项( $GLD$ )为最大,且为正值,它只能产生 $\hat{V} \cdot V'$ ,再主要通过水平动能转换项( $CHL$ 和 $CHD$ )将能量转换给 $\hat{K}$ 和 $K'$ 。

### 2.3.2 梅雨期暴雨<sup>[15,16]</sup>

计算方程(6)、(7)和(8)的收支表明,天气尺度动能变化特征是对流层各层次 $GL$ 制造的动能,在中、高层向周围环境水平输出,水平和垂直方向的动能转换因符号相反彼此抵消后,在中、低层实现天气尺度动能向中尺

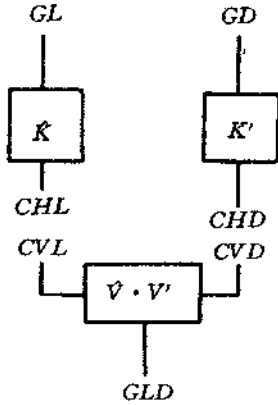


图3 动能相互作用示意图

度系统转换,高层转换方向相反,整层积分说明暴雨系统是天气尺度的动能源。余差项  $DIL$  各层为正,反映次网格系统动能反馈作用不可忽视。中尺度动能收支各项量值均小于天气尺度相应各项,并且  $GD$  消耗的动能由周围环境动能水平输入及水平动能转换来补充,余差项  $DID$  各层也为正值,就整层而言,该项与动能产生项近乎平衡。相互作用动能收支特征为  $GLD$  在对流层高层产生的动能除向环境输出外,并供给水平动能转换,以实现次天气尺度动能向天气尺度转换。在中、低层  $GLD$  则是消耗动能的,它将由环境动能输入及天气尺度动能转换来补充。

利用中尺度资料对比暴雨区和非暴雨区各阶段动能特征,发现两者收支状况恰好相反。尤其在发展阶段, $GLD$  持续向两种尺度系统输送动能,该项是中尺度系统演变的重要能源。

### 2.3.3 赤道辐合区多台风过程<sup>[17]</sup>

进一步将总动能分解为大尺度平均动能和扰动动能、台风尺度平均动能和扰动动能以及各相互作用项,计算各相应收支方程发现在多台风扰动发展中,大尺度动能转换的贡献不足 20%,说明台风发展主要依靠积云对流以及这种对流激发的短波系统,这个事实进一步肯定了热带低纬地区逆尺度能量输送的特征。

## 3 结语

能量学诊断在于揭示能量产生、输送、转换及其不同尺度系统能量相互作用的物理图象,进而将热力学、动力学和能量学三者相结合综观研究,必将对各类天气系统演变机理得出新认识,因而能量学的深入研究是很有前途的,它既为改善降水预报模式提供科学依据,也可发展中尺度系统诊断工具和方法。

目前国内外研究结果差异较大,这是由于系统本身强度不同或处在不同阶段或动力过程相互有别,或由于计算方法不同,选择计算区域也不同等等原因造成的,因而难以比较,总体能量收支及其尺度相互作用的物理图象难以概括,故采用统一的分析方法,有针对性地对灾害性天气系统作系统且全面的研究十分必要。

能量学诊断分析结果的可信度在于资料的质量及分析方法的精度,故改进分析方法是相当关键的步骤。在计算收支时,由于余差项包含有各种误差(观测误差、分析误差等),也包含真实的次网格尺度物理过程,故估计探空资料误差对计算结果所造成的影响十分必要。常用的方法是在资料中引入随机误差,比较两者计算结果的差异来分析随机误差的影响。有人<sup>[13]</sup>检验了涡散场动能收支方程(4)和(5)各项的结果表明  $INTR$  和  $DVRVD$  项的相关系数为 0.62(最小), $DKD$  项为 0.76, $DK$ 、 $DKR$  和  $INTD$  项的平均相关系数为 0.88,其余各项均大于 0.90,出乎意外的是  $DR$  和  $DD$  项的相关系数达最高(分别为 0.97 和 0.94)。再计算收支各项的平均绝对偏差值,其结果也与上述相关系数的分析情况相似。当然,用不同的方法对不同的个例作误差估计,其结果会有不同。但一般均以含有时间偏导数项的误差为最大,说明使用时空分辨率较高的观测资料可使收支计算结果更为可靠。

## 参考文献

- 1 谢安,肖文俊,陈受钧 梅雨期间次天气尺度扰动的动能

- 平衡 气象学报,1980,38(4) 351—358
- 2 Endlich, R M , An iterative method for altering the kinetic properties of wind fields J Appl Meteor ,1967, 6 837—844
- 3 Buechler, D E and H E Fuelgerg, Budgets of divergent and rotational kinetic energy during two periods of intense convection Mon Wea Rev , 1986, 114 95—114
- 4 丁一汇, 刘月贞 台风中动能收支的研究 中国科学, 1985, 10 956—966
- 5 汪钟兴 暴雨过程环境涡散场能量收支特征 中国科技大学学报, 1992, 22(3) 342—347
- 6 汪钟兴 暴雨过程环境涡散场能量转换特征 大气科学, 1993, 17(2) 185—191
- 7 汪钟兴, 刘勇 梅雨锋次天气尺度涡旋旋转风和辐散风动能演变过程 高原气象, 1994, 13(1) 28—34
- 8 汪钟兴, 矫梅燕 两类低空急流能量学诊断 热带气象学报, (待刊)
- 9 Barnes, S L , A technique for maximizing details in numerical weather analysis 1964, 3 396—409
- 10 刘金良, 汪钟兴 自适应原理在尺度分离技术中的应用 热带气象学报, 1993, 9(1) 85—89
- 11 Holopainen, E and P Nurmi Acceleration of a diffluent Jet stream by horizontal sub-grid scale procession Tellus, 1979, 31 246—248
- 12 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, 1981, 39(4) 408—415
- 13 Carney, T Q and D G Vincent, Meso-synoptic scale interactions during AVE/SESAME 1 10—11, April 1979, Mon Wea Rev , 1986, 114 353—370
- 14 Shou-jun Chen, Le-Sheng Bai, E C Kung, An approach to kinetic energy diagnosis of meso-synoptic scale interactions, Mon Wea Rev , 1990, 118 2774—2780
- 15 汪钟兴, 刘金良 暴雨系统不同尺度动能相互作用过程 中国科技大学学报, 1994, 24(3)
- 16 张向东, 余志豪, 陆汉城 梅雨锋中尺度系统及其大尺度运动相互作用的能量学研究 热带气象, 1991, 7(1) 72—81
- 17 薛建康, 丁一汇 赤道辐合区中多台风期大尺度和台风尺度的动能收支及其相互作用 大气科学, 1993, 17 (5) 592—603

## Recent Advances in Diagnostic Studies of Energetics

Wang Zhongxing

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

### Abstract

Recent advances in diagnostic studies of energetics over the past several years are generalized on the following topics (1) Budgets of divergent and rotational kinetic energy, particularly the significance and analyses of generation, transport, conversion and dissipation (2) Scale interaction equations of kinetic energy show that the exchanges between  $K^{\bar{}}$  and  $K^{\prime}$  can only be accomplished through  $\bar{V} \cdot V'$  and the kinetic energy produced by interactions between wind and mass field in both scales and transformed into synoptic and mesoscale systems

**Key Words** energetic diagnostics scale interaction budgets of rotational and divergent kinetic energy