

两种风场分解方法计算动能 收支对比研究

汪钟兴

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

霍义强 段旭

(云南省气象台, 昆明 650034)

提 要

使用两种风场分解方法, 计算旋转风和辐散风动能收支方程各项时空平均值, 结果表明两者差异不大, 具有一定程度的可比性。

关键词: 能量学诊断 动能收支 辐散风作用

引 言

十多年前, 人们在热带气象和中尺度气象研究中发现, 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, 尤其以动能水平通量散度和动能制造更为突出, 为此建立了旋转风和辐散风动能收支方程, 力求了解动能产生、输送和转换的动力过程。

目前国内常用两种风场分解方法, 即求解泊松方程(下称P法)和直接迭代求解(下称E法), 本文选择一个暴雨实例计算比较动能收支方程各项的差异程度, 以便了解两种结果的可比性情况。

1 两种风场分解方法简述

1.1 P法^[1]

涡度和散度的表达式为

$$\zeta = \nabla^2 \psi \quad D = -\nabla^2 \chi$$

式中, ψ 为流函数, χ 为速度势。为了求得流函数和速度势, 必须求解如上泊松方程, 在给定边界条件下, 用超松弛迭代法求其数值解, 然后得出如下旋转风和辐散风

$$V_R = k \wedge \nabla \psi \quad V_D = -\nabla \chi$$

为此, 首先求出各格点上实测风涡度和散度, 再定义适当的边界条件。对于速度势, 一般在研究区边界取 $\chi=0$ 的齐次边界条件。如果在计算区有地形存在, 则在地形以下各层, 需求出围绕地形的内边界值。对于流函数则假定研究区域内向外的净质量通量为零, 因而要对边界上向外的法向速度加以订正, 即

$$\oint V_n^c dl = 0$$

式中 $V_n^c = V_n + \epsilon |V_n|$, 所取的订正量正比于向外的法向速度值。据此关系可确定订正系数

$$\epsilon = -\frac{\oint V_n dl}{\oint |V_n| dl}$$

dl 是沿边界的步长, 用上式对边界上每一点的 u, v 分量都进行订正。

由上可见, 该法不足之处在于: 边界条件选择不当会产生计算误差; 而且经三次有限差分运算, 计算精度降低; 分解后的风场范围也比原始风场的范围缩小 2 圈。

1.2 E法^[2]

该法不需要流函数和速度势, 直接对水平风场操作运算, 其要点是: 首先由实测风计

算域内各格点的涡度值,再反复调整计算格点邻近东西方向的 u_E 和 u_W 以及南北方向的 v_S 和 v_N ,调整值取为大小相等,符号相反,目的是使该计算格点的辐散值为零。调整后的风场,在该格点的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 ,使它与原来的涡度值接近一致。至此,该格点的风速调整完成,且满足散度接近零,这是一次迭代过程中该格点的计算方案,全场迭代可按行或列依次进行。并且,一次迭代过程中,调整过的风速值可以立即代入下一个格点进行计算,以加快收敛速度,直到所有格点的散度限制在预先给定的误差范围以内时,迭代才停止。需要指出的是,迭代过程结束时,得到的原始风场的无辐散部分风速分量 U'_R 和 V'_R 并不是唯一解。因为全场风速加上任意一个常数,都不会改变相对涡度值和散度值。为此根据旋转风远大于辐散风的事实,可以认为原始风场与无辐散风场的平均振幅相同,把原始风场的平均值 \bar{U} 和无辐散风场的平均值 \bar{U}'_R 的差值加到 U'_R 上去。对 V'_R 也采取相应处理,即

$$U_R = U'_R + (\bar{U} - \bar{U}'_R)$$

$$V_R = V'_R + (\bar{V} - \bar{V}'_R)$$

原始风场的无旋部分为原始风场与无辐散风场的差值。

$$\frac{\partial KD}{\partial t} = \iint -V_D \cdot \frac{\partial V_R}{\partial t} - \left[\iint -f(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\zeta(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\omega \frac{\partial k_R}{\partial p} \right. \\ \left. + \iint -\omega V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial p} \right] + \iint -V_D \cdot \nabla \varphi + \iint -\nabla \cdot k V_D + \iint -\frac{\partial \omega k}{\partial p} + \iint V_D \cdot F \\ \text{DKD} \quad \text{INTD} \quad \text{Af} \quad \text{Az} \quad \text{B} \quad \text{C} \quad \text{GD} \quad \text{HFD} \quad \text{VF} \quad \text{DD} \quad (1)$$

$$\frac{\partial KR}{\partial t} = \iint -V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial t} + \left[\iint -f(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\zeta(v_R u_D - u_R v_D) + \iint -\omega \frac{\partial k_R}{\partial p} \right. \\ \left. + \iint -\omega V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial p} \right] + \iint -V_R \cdot \nabla \varphi + \iint -\nabla \cdot k V_R + \iint V_R \cdot F \\ \text{DKR} \quad \text{INTR} \quad \text{Af} \quad \text{Az} \quad \text{B} \quad \text{C} \quad \text{GR} \quad \text{HFR} \quad \text{DR} \quad (2)$$

式中,GR 和 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 和 HFD 分别为旋转风和散度风对总动能的水

$$U_D = U - U_R$$

$$V_D = V - V_R$$

由上可见,该法不必求流函数和速度势,也不需要假定边界条件,而且具有精度可以估计的优点。

2 动能收支结果比较

为了考察两种风场分解方法对计算旋转风和辐散风动能收支的差异程度。我们选择1986年7月16—17日鄂、豫、皖、苏、鲁暴雨过程,该过程是在西风槽和副热带高压相对较为稳定,高低空急流同时存在,低涡沿切变线东移形势下产生的。

表1列出两种风场分解方法直接得出的雨区相应计算格点旋转风和辐散风的差值。可见两者最大绝对差值在高层较为明显,但平均绝对差值仍在允许范围之内。

表1 两种风场分解方法在对流层低、高层的统计结果(单位: $m \cdot s^{-1}$)

层次	最大绝对差值				平均绝对差值			
	u_R	v_R	u_D	v_D	u_R	v_R	u_D	v_D
850hPa	2.40	1.50	0.40	0.30	0.69	0.47	0.10	0.07
200hPa	4.50	3.10	1.80	1.20	1.94	1.32	0.40	0.26

其次,因为在动能收支方程中,有一项是作为余差项得到的,故该项除包含各种误差外(包括不同计算方案的差异),同时也包含真实的次网格尺度物理过程,所以还需计算如下旋转风和辐散风动能方程各项量值。

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,它包括式(1)、(2)中方括号内

A_f, A_z, B 和 C 4项,若 $C(KD, KR) > 0$,则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,该项是作为余差计算的。

表2给出两种风场分解方法得出的动能收支方程各项在雨区内的时空平均结果。就

表2 两种风场分解方法计算的动能收支(单位: $W \cdot m^{-2}$)

层次/hPa 方法	400—100		700—400		1000—700	
	P	E	P	E	P	E
DKD	0.28	0.40	0.06	0.08	0.03	0.05
GD	3.34	3.19	2.43	2.25	2.85	2.64
HFD	-8.78	-7.98	-0.61	-0.53	3.21	3.08
$C(KD, KR)$	-1.68	-1.96	1.68	1.47	4.42	4.53
VF	1.18	1.47	-0.48	-0.68	-0.70	-0.79
INTD	-0.16	-0.23	0.07	-0.01	0.02	0.09
DD	3.02	1.99	0.33	0.52	-0.84	-0.44
DKR	1.69	1.37	-0.04	0.11	0.18	0.16
GR	8.81	8.62	-3.50	-3.34	-2.11	-2.03
HFR	-7.41	-6.78	1.70	2.08	-1.36	-1.14
INTR	-0.27	-0.31	-0.11	-0.19	-0.14	-0.12
DR	2.24	1.80	0.19	0.09	-0.63	-1.08

注: $-C(KD, KR)$ 项数值参照表中 $C(KD, KR)$ 项

3 结 语

上述结果表明:两种风场分解方法所得动能收支差异不大,具有一定程度的可比性。当然计算只限一个实例,结论仅供参考。但由于E法操作简便,计算量小,不需假定边界条件等优点,作者认为使用E法为佳。

有关本例能量收支特征,作者已有阐述^[3]。

比较而言,以 $HFR, HFD, C(KD, KR)$ 和 DD, DR 项差异稍大,并且发现 HFR 和 HFD 项的绝对值在对流层高、低层以E法计算的结果偏小,中层偏大,而转换项的绝对值在对流层高、低层以E法计算的结果偏大,中层偏小。除个别项外,所有各项符号均为一致,数值也较为接近,说明两种方法计算的动能收支源汇不变,强度也相接近。

参考文献

- 1 Shukla, J and K. R. Saha. Computation of nondivergent stream function and irrotational velocity potential from the observed winds. Mon. Wea. Rev., 1974(102):419—425.
- 2 Endlich, R. M. . An iterative method for altering the kinetic properties of wind field. J. Appl. Meteor., 1967(6): 837—844.
- 3 汪钟兴. 暴雨过程环境涡散场能量收支特征. 中国科学技术大学学报, 1992, 22(3): 342—374.

The Comparison between the Two Schemes for Kinetic Energy Budgets

Wang Zhongxing

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Huo Yiqiang Duan Xu

(Meteorological Observatory of Yunan Province, Kunming 650034)

Abstract

Applying two schemes by Shukla (1974) and Endlich (1967) to separate the horizontal wind into its divergent and rotational components, time-area averaged values of budget terms of KD and KR were calculated. The results show that there are agreement in the signs and magnitudes of budget terms. Thus, it does not affect the comparison.

Key Words: energetic diagnostics kinetic energy budget effect of divergent wind