

北半球冬季副热带高压带维持的涡度机制*

陈秋士 林本达
(北京大学地球物理系)

提 要

本文利用涡度平衡方程讨论北半球冬季副热带高压的维持, 计算发现, 30°N 副热带高压带地区, 大型扰动所造成的涡度输送的辐散是维持该地区反气旋涡度的主要因子。这种辐散作用所造成的反气旋涡度主要发生在对流层上层, 平均经圈环流对地转涡度的输送可以把它引导到对流层下层来。此外, 我们还根据涡度输送的计算, 讨论了西风急流的维持。向北的扰动涡度输送在 45°N 上空达极大值, 因此它对中纬度西风和纬向平均急流的维持起着重要作用。但 30°N 上空, 扰动的涡度输送为零, 而平均经圈环流对地转涡度和相对涡度的输送都比较大, 因此, 可以认为副热带急流是在平均经圈环流作用下维持的。

一、引 言

自从 Jeffery^[1], Starr^[2] 等用角动量平衡考虑纬向风系的维持以来, 已经取得很多重要的结果。近年来, 这种方法也被用来研究天气系统的维持, 如台风^[3]等。角动量平衡和涡度平衡的观点有着紧密的联系, 叶笃正^[4]曾从涡度平衡的观点, 讨论了纬向风系的维持。在流场上的天气系统, 首先表现为一个一个涡旋单体的形式, 并且在大尺度运动的数值预告, 以及有关的动力学问题中, 一般都直接采用涡度方程作为基本方程, 因此从涡度观点探讨系统维持的机制, 可能更适合一些。

在南北两个半球的副热带地区, 无论冬夏, 都维持着一个副热带高压带。这副热带高压带在涡度场上表现为反气旋涡度中心。图 1

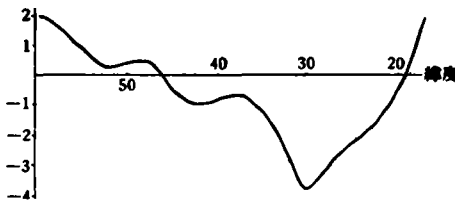


图 1 北半球冬季纬向平均的相对涡度的分布
(单位: 10^{-8}秒^{-1})

为北半球冬季纬向平均的涡度场, 它是根据 Tucker^[5]地面平均风速作出的。由图 1 可以看出, 在 30°N 附近有一强的反气旋涡度中心, 强度达 $-3.8 \times 10^{-6}\text{秒}^{-1}$ 。实际大气中, 由于地面摩擦作用, 在反气旋涡度中心地区, 必然不断耗损大气的反气旋涡度, 使副热带高压带不断地减弱。但就长期平均情况来看, 这高压总是存在着, 因此这里必然存在着和地面摩擦作用相反的机制, 不断产生反气旋涡度, 使副热带高压带得以维持。是什么机制起着这一作用现在还不清楚。弄清楚这一问题, 对了解副热带反气旋形成的本质及其在大气环流中的作用, 有十分重要的意义。本文的目的就在于初步弄清楚这一问题。

在南北两个半球的副热带地区, 无论冬夏, 都维持着一个副热带高压带。这副热带高压带在涡度场上表现为反气旋涡度中心。图 1 为北半球冬季纬向平均的涡度场, 它是根据 Tucker^[5]地面平均风速作出的。由图 1 可以看出, 在 30°N 附近有一强的反气旋涡度中心, 强度达 $-3.8 \times 10^{-6}\text{秒}^{-1}$ 。实际大气中, 由于地面摩擦作用, 在反气旋涡度中心地区, 必然不断耗损大气的反气旋涡度, 使副热带高压带不断地减弱。但就长期平均情况来看, 这高压总是存在着, 因此这里必然存在着和地面摩擦作用相反的机制, 不断产生反气旋涡度, 使副热带高压带得以维持。是什么机制起着这一作用现在还不清楚。弄清楚这一问题, 对了解副热带反气旋形成的本质及其在大气环流中的作用, 有十分重要的意义。本文的目的就在于初步弄清楚这一问题。

* 本文 1964 年 6 月 21 日收到。

二、涡度平衡方程

在常用的 x, y, p, t 的标准坐标中, 涡度方程可写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = & -\mathbf{V} \cdot \nabla_p (f + \zeta) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - (f + \zeta) \nabla_p \cdot \mathbf{V} + \\ & + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} + \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}. \end{aligned} \quad (1)$$

这里 ζ 表示相对涡度, $f = 2\Omega \sin \varphi$, $\omega = \frac{dp}{dt}$, F_x, F_y 分别表示摩擦应力在 x 和 y 方向的投影. 利用连续方程, (1) 式可改写为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\nabla_p \cdot (f + \zeta) \mathbf{V} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\omega \frac{\partial v}{\partial p} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\omega \frac{\partial u}{\partial p} \right) + \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}.$$

在某一等压面上, 将上式沿某一纬度 φ 以北的整个面积 Σ 积分, 并利用球坐标, 则得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Sigma} \zeta d\sigma = \int_0^{2\pi} \left[(f + \zeta)v - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + F_x \right] a \cos \varphi d\lambda. \quad (2)$$

这里 λ 表示经度, $d\sigma$ 为面积元素, a 为地球半径. (2) 式右端括号内第一项表示绝对涡度通过边界的向北输送; 第二项表示动量 u 在边界上的垂直对流, 因它可引起边界上 u 的变化, 故必然影响到边界内部涡度的改变; 第三项表示摩擦在边界沿纬圈方向所作的功. (2) 式表明, 某一等压面上纬度 φ 以北的总涡度的变化, 决定于上述通过边界的三种因子. 叶笃正^[4]曾经给出过和 (2) 式类似的方程. 考虑某一等压面高度上的运动, 可代表该高度厚度为 Δp 的一层的运动的平均特点, 则在两个纬度 φ_1, φ_2 ($\varphi_2 > \varphi_1$) 之间, 厚度为 Δp 的带状空气的总涡度变化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Sigma'} \zeta \frac{\Delta p}{g} d\sigma = & \frac{2\pi a \Delta p}{g} \left\{ \left(\overline{f\bar{v}} + \overline{\zeta\bar{v}} - \overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}} + \overline{F_x} \right)_{\varphi_1} \cos \varphi_1 - \right. \\ & \left. - \left(\overline{f\bar{v}} + \overline{\zeta\bar{v}} - \overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}} + \overline{F_x} \right)_{\varphi_2} \cos \varphi_2 \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Σ' 表示等压面上 φ_1, φ_2 之间的面积, 符号上横线表示沿纬圈方向的平均值. 如果只考虑地面有摩擦作用, 自由大气中, $\overline{F_x} = 0$, 则将 (3) 式应用于自由大气时, 应不包含 $\overline{F_x}$ 项. 将 (3) 式沿 0 到 P_0 积分, 并利用

$$F_x = \frac{\partial \tau_x}{\partial p},$$

这里 τ_x 表示湍流摩擦应力, 则得

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{P_0} \iint_{\Sigma'} \rho \zeta dz d\sigma = & \frac{2\pi a}{g} \int_0^{P_0} \left\{ \left(\overline{f\bar{v}} + \overline{\zeta\bar{v}} - \overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}} \right)_{\varphi_1} \cos \varphi_1 - \left(\overline{f\bar{v}} + \overline{\zeta\bar{v}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}} \right)_{\varphi_2} \cos \varphi_2 \right\} dp + \frac{2\pi a}{g} \left\{ \overline{\tau_x}_0(\varphi_1) \cos \varphi_1 - \overline{\tau_x}_0(\varphi_2) \cos \varphi_2 \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

这里 τ_x 表示地面摩擦应力. 就长期平均而言, 沿整个纬圈界面上的质量通量应为零, 并且某一纬度带内的总涡度也应近似不变, 因此, 从 (4) 式可见, 某一纬度带内地面摩擦耗

损,应和它的边界面上的相对涡度的水平输送,以及西风动量的垂直对流的总和相平衡。(3)式和(4)式即为本文所讨论的基本方程。

三、方程各项的计算结果

下面将分别计算方程(3)中各项的数值。本文所采用的资料主要有 Palmén 等^[6]所计算的冬季纬向平均经圈环流的分布; Mintz^[7]给出北半球冬季纬圈平均的西风的分布,以及 Tucker^[8]所给出的有关角动量输送的结果。

1. 相对涡度输送项 $\bar{\zeta}v$

这项精确计算比较困难。我们仿照叶笃正^[4]的近似处理。设 u 用地转风 u_g 代替,并令 $v = v_g + v_a$, 这里 v_g 表示向北气流的地转风部分, v_a 表示它的地转偏差。利用

$$\frac{\partial u_g}{a \cos \varphi \partial \lambda} + \frac{\partial (v_g \cos \varphi)}{a \cos \varphi \partial \varphi} = 0,$$

可得

$$\bar{\zeta}v = - \frac{\partial (\overline{u_g v_g \cos^2 \varphi})}{a \cos^2 \varphi \partial \varphi} - v_a \frac{\partial (u_g \cos \varphi)}{a \cos \varphi \partial \varphi}. \quad (5)$$

对于地转偏差 v_a , 满足 $\bar{v} = \bar{v}_a$; 因此, (5)式右端第二项可以写成

$$v_a \frac{\partial (u_g \cos \varphi)}{a \cos \varphi \partial \varphi} = \bar{v} \frac{\partial (\bar{u}_g \cos \varphi)}{a \cos \varphi \partial \varphi} + v'_a \frac{\partial u'_g \cos \varphi}{a \cos \varphi \partial \varphi}.$$

上式右端第二项表示由地转偏差所产生的扰动输送,考虑它可以不计¹⁾。这时(5)式可以写成

$$\bar{\zeta}v = - \frac{\partial (\overline{u_g v_g \cos^2 \varphi})}{a \cos^2 \varphi \partial \varphi} - \bar{v} \frac{\partial (\bar{u}_g \cos \varphi)}{a \cos \varphi \partial \varphi}. \quad (6)$$

(6)式右端第一项近似地代表大型涡旋所造成的涡度输送 $\bar{\zeta}'v'$; 右端第二项代表平均经圈环流所造成的相对涡度的输送 $\bar{\zeta}\bar{v}$ 。图 2 表示不同高度不同纬度扰动涡度输送的计算结果。在 30°N 以南上空为负值区,表示涡度向南输送。中纬度上空涡度均向北输送,极值位于 200—300 毫巴高度。 30°N 上空扰动涡度输送为零值区。根据方程(4),可以计算由于 $\bar{\zeta}'v'$ 所引起的宽度为 5 个纬度,厚度为 200 毫巴的纬度带内的总涡度的变化。图 3 为

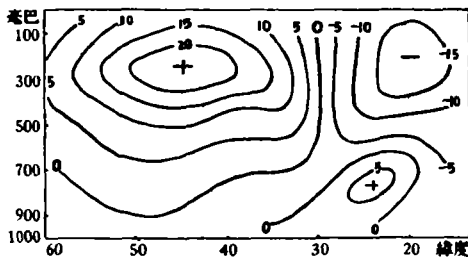


图 2 北半球冬季每 200 毫巴厚度内扰动涡度输送的分布
(单位: 10^8 克·秒⁻²)

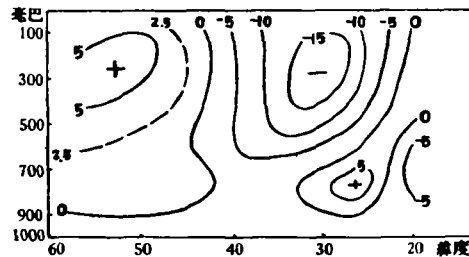


图 3 由于 $\bar{\zeta}'v'$ 所引起的宽度为 5 纬度厚度为 200 毫巴的纬度带内的涡度的变化
(单位: 10^8 克·秒⁻²)

1) 根据 Machta^[11]的简化模式估计,绕纬圈地转偏差的扰动动量输送,只约占总的扰动动量的 1%。

计算结果。从图 3 可以看出, $\overline{\zeta'v'}$ 可在 30°N 上空引起相当强的反气旋涡度增加, 在 45°N 以北的中纬度上空, 则引起气旋式的涡度增加。

图 4 为平均经圈环流对相对涡度的输送¹⁾。在 25°N 以南上空有较大正值区。在该地区平均经圈环流是向北的, 负值区表明它可将平均流场的反气旋涡度携带向北。其它地区这项的作用均较小。图 5 为这项输送所造成的涡度的改变, 在 25°N 以南的对流层上层可产生反气旋涡度。

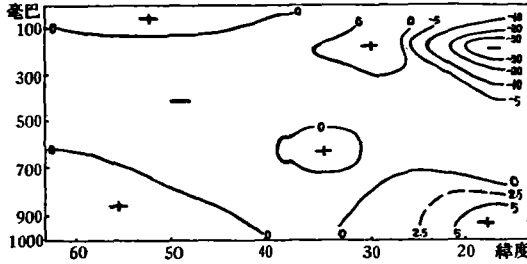


图 4 每 200 毫巴厚度内的 $\frac{2\pi a \cos \varphi \Delta p}{g} \bar{\zeta} \bar{v}$
(单位同图 2)

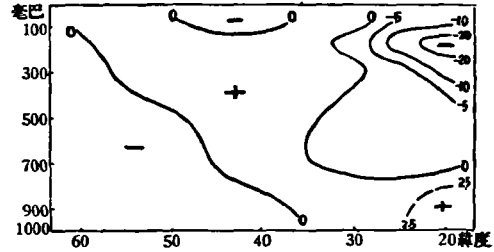


图 5 $\bar{\zeta} \bar{v}$ 所引起的宽 5 个纬度厚 200 毫巴纬度带内涡度的变化
(单位同图 2)

2. 平均经圈环流对地转涡度的输送 $f\bar{v}$

图 6 为平均经圈环流对地转涡度输送的计算结果。由于低纬度存在着 Hadley 环流, 故对流层下层地转涡度向南输送, 上层向北输送。中纬度为逆环流, 上层向南输送, 下层向北输送。图 7 为地转涡度输送所造成的涡度的变化。在 30°N 地区, 对流层下层为反气旋式涡度增加区, 上层为气旋式涡度增加区。

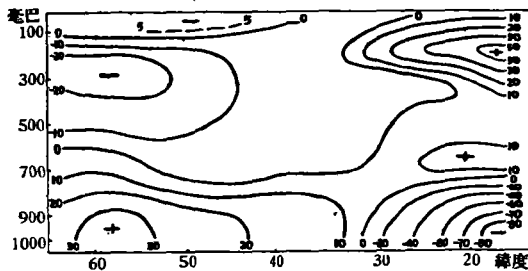


图 6 每 200 毫巴厚度的 $\frac{2\pi a \cos \varphi \Delta p}{g} f\bar{v}$
(单位同图 2)

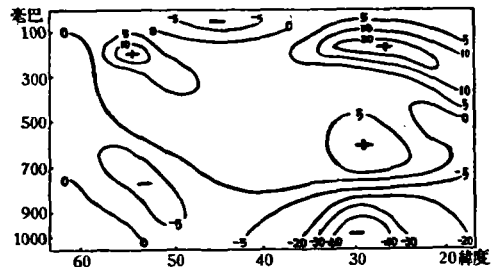


图 7 $f\bar{v}$ 所引起的宽 5 个纬度厚 200 毫巴纬度带内涡度的变化
(单位同图 2)

3. 边界上纬向动量的垂直对流 $\omega \frac{\partial u}{\partial p}$

这项的作用也可分为两个部分, 即,

1) 考虑长时间的平均时, 经圈环流的作用应包含两项, 即 $[\bar{\zeta} \bar{v}] = [\bar{\zeta}][\bar{v}] + [\bar{\zeta}' \bar{v}']$, 这里 $[\]$ 表示时间平均。我们只计算了前一项, 后一项未计算。后一项表示纬圈平均经圈环流随时间的变化和纬向气流的涡度随时间变化的相关。

$$\overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}} = \bar{\omega} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} + \overline{\omega' \frac{\partial u'}{\partial p}}$$

上式右端第一项表示平均经圈环流所引起的西风动量的垂直对流, 第二项表示垂直扰动所引起的西风动量的垂直对流。 $\bar{\omega} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p}$ 项的作用可以根据实际资料计算出来。 $\overline{\omega' \frac{\partial u'}{\partial p}}$ 比较难于计算。不过在我们所考虑的问题中, 主要讨论长期平均的情况, 任一纬度带内总涡度的局地变化为零。方程(3)中, 除 $\overline{\omega' \frac{\partial u'}{\partial p}}$ 外, 各项均可计算出来, 因此, 可以利用平衡关

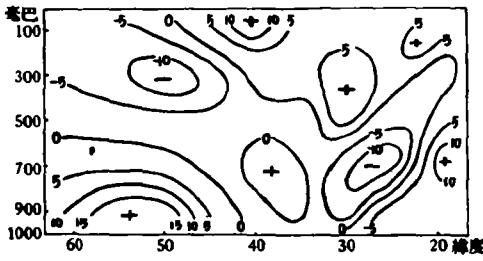


图 8 $\overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}}$ 所引起的 5 纬度宽, 200 毫巴厚的纬度带内涡度的变化 (单位同图 2)

系在每一个纬度带内把 $\overline{\omega' \frac{\partial u'}{\partial p}}$ 间接地推算出来¹⁾。现在我们只给出 $\overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}}$ 中两项所引起纬度带内涡度变化的总的结果, 如图 8 所示。从图 8 可见, 在 30°N 地区, 此项的作用能将对流层上层的反气旋涡度引导到下层来, 不过数值比起图 7 中 $\bar{f}\bar{v}$ 的作用要小得多。在中纬度 45°—60°N 地区它将对流层上层的气旋式涡度引导到下层来。

4. 地面摩擦耗损 $\bar{\tau}_{\lambda_0}$

我们采用

$$\bar{\tau}_{\lambda_0} = -K\rho_0\bar{u}_0(u_0^2 + v_0^2)^{\frac{1}{2}}$$

这里符号“0”表示地面的数值。K为地面拉力系数, Priestley^[9]取 $K = 0.0013$, Wigger^[10]取 $K = 0.03$ 。我们采用与 Tucker^[8]相同的数值, 取 $K = 1.5 \times 0.0013$ 。 $\bar{\tau}_{\lambda_0}$ 的计算结果给在图 9 上。从图 9 可以看出, 大约 45°N 以南为反气旋涡度消耗区, 在 30°N 达极大值, 其消耗率达 41×10^8 克秒⁻²。在 45°N 以北为气旋式涡度消耗区。

四、副热带高压带维持的涡度机制及其有关问题

1. 副热带高压带的维持

图 9 中还给出方程(4)中 $\overline{\zeta'v'}$, $\overline{\zeta\bar{v}}$, 和 $\overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}}$ 三项沿整个垂直空气柱积分的结果。它们三项的总和是与摩擦耗损相平衡的。从图 9 可以看出, 大型扰动 $\overline{\zeta'v'}$ 所引起的涡度的变化最为显著, 大约在 43°N 以南的区域产生反气旋涡度, 在 30°N 达极大值, 在 43°N 以北则产生气旋式涡度。平均经圈环流对相对涡度的输送所引起的涡度的变化, 在 25°N 以南可产生较大的反气旋涡度, 在其它纬度作用很小。 $\overline{\omega \frac{\partial u}{\partial p}}$ 的作用一般也较小。图 9

1) 由于在前面计算中忽略了 $v'_a \frac{\partial u'_a \cos \varphi}{a \cos \varphi \partial \varphi}$ 等项, 这里间接推算的结果, 严格说来, 应该看成方程(3)中未能计算的诸项的总和。

清楚地表明,就整个大气的垂直积分来看,广大副热带地区,特别是 30°N 副热带高压带附近,大型扰动所产生的反气旋涡度是维持该地区反气旋涡度的主要因子. 平均经圈环流对相对涡度的输送对于 25°N 以南的反气旋涡度的维持也有一定的作用.

如果考虑垂直分布的特点,由图 3 可见, $\overline{\zeta'v'}$ 在 30°N 地区所造成的反气旋涡度的增加,主要发生在 200—300 毫巴的高度,图 5 中 $\overline{\zeta'v'}$ 项在 25°N 以南的作用也是如此;可是摩擦作用所造成的反气旋涡度的耗损主要发生在地面,因此,必须要有一种机制,把上层的反气旋涡度引导到地面来. 由图 7 可以看出,平均经圈环流对地转涡度的输送所引起涡度的变化,在副热带地区的高层为正值区,低层为负值区,它却好能把上层的反气旋涡度引导到下层来. 因此,尽管平均经圈环流对地转涡度的输送沿整个空气柱垂直积分应为零,但从三度空间来考察副热带高压带的维持时,却起着十分重要的作用. 这一地区平均经向风速上层辐合,下层辐散,它能把反气旋涡度引导到下层来.

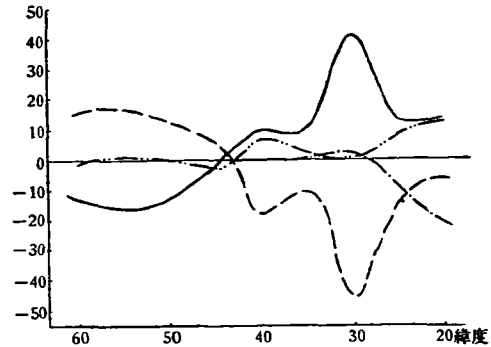


图 9 宽度为 5 个纬度整个垂直空气柱内方程(4)各项随纬度的分布

(—表示 \bar{v}_0 ; ----表示 $\overline{\zeta'v'}$; -·-·-表示 $\overline{\zeta'v'}$; ·····表示 $\omega \frac{\partial u}{\partial p}$)

2. 关于副热带急流

大气中纬向平均急流的形成问题,已有很多作者讨论过^[11]. 郭晓岚^[12]曾利用正压模式,指出了当平均纬向气流的绝对涡度分布向北单调增加时,如果流场上出现扰动的涡旋,气旋式涡度将向北输送,反气旋式涡度将向南输送. 在南北涡度交换最频繁的地带,将造成急流的生成. 这点由方程(2)可以看出来,因(2)式左端可化为沿 Σ 边界的速度环流随时间的变化,涡度的向北扰动输送可引起纬向平均西风的增强. 后来 Phillips^[13]在数值试验中,进一步说明了西风急流的产生是由西风动量的大型扰动输送的辐合所决定的. 从公式(6)可以看出,这和决定于大型扰动向北的涡度输送是一致的. 图 2 的实际结果表明,大型扰动向北输送的最大的地区是在 45°N 附近的天空,基本上位在冬季极锋急流经常出现的位置. 因此,上述理论对于中纬度西风及其有关的纬向平均急流来说,和实际情况还是一致的. 但对副热带急流而言,情况将不是这样. 冬季副热带急流平均位于 30°N 地区的上空,由图 2 可以看出,这地区正好是扰动涡度输送为零的地区,因此,不能认为副热带急流是靠大型扰动维持的. 从图 4 和图 6 来看,平均经圈环流对地转涡度和相对涡度的输送,在 30°N 上空均为正值区,而且数值也还相当大. 因此,对副热带急流的形成和维持来说,平均经圈环流将是更重要的因子.

致谢: 本文承蒙叶笃正和谢义炳先生指正,谨致以深切的谢意. 闫永泉同志协助描图,亦表感谢.

参 考 文 献

- [1] Jeffreys, H., *Q. J. R. Met. Soc.*, **52** (1926), 85—104.
- [2] Starr, V. P., *J. Met.*, **5** (1948), 39—43.
- [3] Palmen, E. and Riehl, H., *J. Met.*, **14** (1957), 150—159.
- [4] Yeh, T. C. (叶笃正), *J. Met.*, **7** (1950), 146—150.
- [5] Tucker, G. B., *Q. J. R. Met. Soc.*, **83** (1957), 290—302.
- [6] Palmen, E. and Vuorela, L. A., *Q. J. R. Met. Soc.*, **89** (1963), 131—138.
- [7] Mintz, Y., *Bull. Amer. Met. Soc.*, **35** (1954), 208—214.
- [8] Tucker, G. B., *Tellus*, **12** (1960), 134—144.
- [9] Priestley, C. H., *Aus. J. Sci. Res. Series A*, **4** (1951), 315—328.
- [10] Widger, W. K., *J. Met.*, **5** (1949), 291—299.
- [11] 叶笃正、朱抱真, 大气环流若干基本问题, 1958, 科学出版社.
- [12] Kuo, H. L. (郭晓岚), *J. Met.*, **8** (1951), 307—315.
- [13] Phillips, N., *Q. J. R. Met. Soc.*, **82** (1956), 123—164.
- [14] Machta, L., *J. Met.*, **6** (1949), 261—265.

THE VORTICITY BUDGET OF THE ZONE OF SUBTROPICAL HIGHS IN NORTHERN HEMISPHERE FOR WINTER

CHEN CHIU-SHIH AND LIN BEN-DA
(Peking University)

ABSTRACT

In this paper, the maintenance of the sub-tropical high in northern hemisphere for winter is discussed by means of the balance equation of the vorticity. The calculated results show that the divergence of the vorticity transfer due to the large-scale eddies is the dominant factor for maintaining anticyclonic vorticity in the region near 30°N . The anticyclonic vorticity due to this divergence process occurs mainly in the upper troposphere; at the same time, the transfer of earth rotation vorticity may effect the anticyclonic vorticity downward to the lower troposphere. The maintenance of the westerly jet is also discussed from the view-point of the vorticity transfer. The northward vorticity transfer by the large-scale eddies reaches its maximum value over 45°N , so that it may play an important role both for the maintenance of the mean zonal westerlies and its jet in the middle latitude. Over 30°N , however, the vorticity transfer by large scale eddies vanishes, and on the contrary, both the transfer of earth rotation vorticity and of the relative vorticity have larger value. Thus, it may be considered that the subtropical jet is maintained by the mean meridional circulation.