

用位势涡度坐标分析 TOMS 臭氧总量趋势

W. J. Randel 吴费

(美国大气研究中心)

摘要 位势涡度(PV)可近似当作随极涡移动的坐标,进而对由 Nimbus 7 号臭氧总量测绘分光仪(TOMS)测量的全球臭氧数据进行分析。分析时段是在皮纳图博火山爆发以前,即由 1978 年 11 月到 1991 年 3 月。TOMS 资料重新用 PV 坐标作图,并计算多种变化趋势,由此可以表示冬季极涡内部和外围臭氧亏缺的特点。这些分析结果显示,无论在哪一半球极涡外围都有很大的臭氧亏缺地区。再者,这些材料表明,北半球中纬度冬春季节臭氧亏缺,不单单是由臭氧已亏缺的空气由极涡内部向极涡外围的输送而造成。

关键词 O₃ 总量变化趋势 位势涡度坐标

1 引言

全球臭氧总量的减少现象,在最近 20 年已经通过地面和卫星上的各式各样观测技术为人察觉(WMO, 1991; Stolarski 等, 1992)。一种对于发现臭氧变化趋势(以下译为趋势)特别有用的仪器,是由卫星 Nimbus 7 号携带的臭氧总量测绘分光仪(TOMS),它提供自 1978 年 11 月开始一直到 1993 年 5 月初近于全球范围内的臭氧气柱总量分布图的逐日资料。Stolarski 等(1991)曾用这些资料,表明全球范围内的臭氧每 10 年约丧失 -2.6%。这些丧失的最大值在北半球中纬度(30°—60°)的冬春季节以及南半球高纬度全年(尤以 9、10 月份最大),而在两半球低纬度近于无变化。该文研究提出许多有趣问题,其中之一是,北半球中纬度臭氧丧失的起因问题。是丧失先出现在极涡内部而后输送到中纬度去呢?还是在极涡以外就地发生化学过程而臭氧耗损呢?这些问题由于在 Stolarski 等(1991)文中把纬向平均法应用于 TOMS 资料而弄得多少有点混淆不清。在北半球冬季平流层,极涡常常大体上移出极地,以致纬向

平均法可能混淆了极涡内部和极涡以外两种过程。

本文的目的在于,利用位涡(PV)作为一种近似随极涡移动的坐标来分析这些年的 TOMS 资料。我们的动机是,描述相对于极涡结构观测到的臭氧亏缺的时空特征。用美国气象局(NMC)平流层业务分析资料求出的位涡场,定出极涡的结构(McIntyre 和 Palmer, 1982; Buchart 和 Remsberg, 1986; Schoeberl 等, 1989, 1992; Norton, 1994),再按 PV 坐标平均 TOMS 资料,最后同 Stolarski 等文(1991)一样,进行趋势分析。

2 资料与分析

本文利用 1978 年 11 月到 1991 年 5 月雨云 7 号卫星上 TOMS(第 6 次改型)的资料分析气柱臭氧(column ozone)。没有考虑这时段以后的资料,是由于在 1991—92 和 1992—93 年北半球两个冬季观测到臭氧有很大的亏损(Gleason 等, 1993; Bojkov 等, 1993; Kerr 等, 1993; Komhyr 等, 1994),而这两次亏损可能是同 1991 年 6 月皮纳图博火山喷发的影响有关。

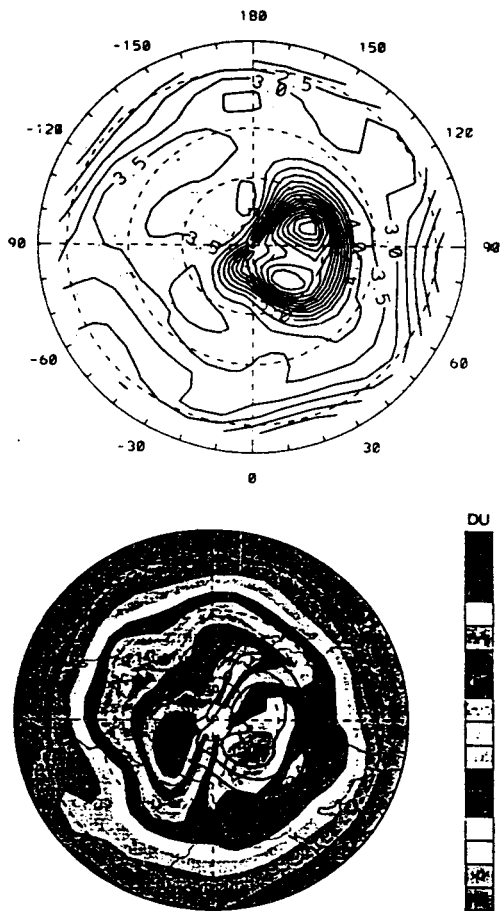


图1 a(上幅图)为1986年3月16日520K等位温面上的位涡(PV)场,单位为 $10^{-5} \text{K m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。b(下幅图)为同一天TOMS臭氧总量场,单位为Dobson单位。三条粗线表示由上幅图PV场得出的极涡边沿和极涡边界地区

利用美国国家气象中心(NMC)平流层业务分析的逐日风场和温度场计算位势涡度(V_P),把结果内插到等熵面上。 V_P 计算式为

$$V_P = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

这里所用的都是标准符号(例如见Butchart和Remsberg,1986)。TOMS和 V_P 两种资料都是按 5° 纬度 $\times 10^\circ$ 经度网格采样的。例如,图1a给出1986年3月15日520K等熵面上的 V_P 场,520K面在21km或在50hPa等压面高度附近。选520K面是因为这个高度

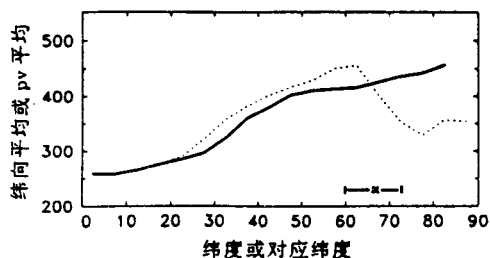


图2 1994年3月16日TOMS臭氧总量(纵坐标,单位DU)在南北方向的结构,实线为由纬向平均法算得,虚线为沿等 V_P 线平均算得。这里的 V_P 平均值是用特选等 V_P 线的对应纬度点绘出来的。标有x的线段表示该天算得的极涡边沿和边界区域(即图1b中三条粗等值线表示的区域)的对应纬度

(21km)是在按密度加权计算臭氧混合比最大高度附近,也就是在对气柱臭氧贡献最大的层次附近,从而选择520K等熵面以分析TOMS资料。再者,本文所得结果对所用的等熵面的高度并不敏感。图1a中的 V_P 场表现出有一个略微拉长的极涡,离开极点指向亚洲;这一天的 V_P 结构呈现出中纬度 V_P 梯度较微弱的典型特征(即'surf带'),在极涡边沿可定出一 V_P 梯度很强的区域,而在极涡内部 V_P 梯度又要弱一些。图1b为1986年3月15日对应的臭氧总量场,其中叠加上三条图1a中的 V_P 等值线。中间一条 V_P 等值线为计算的极涡边沿(V_P 梯度最大),而内外等值线定义极涡边沿的边界区(即 V_P 梯度最强地区);这些等值线是用Nash等(1994)一文中的客观判据计算出来的。从图1b上立即可识别出一个特点:臭氧总量最大数值,或者在极涡的外围,或者在其边沿附近,而在极涡中心附近有一很明显的最小。出现这种结构的结果是,如沿着等 V_P 线计算平均值,在极涡内部的臭氧总量有个很清楚的最小;而如作纬向平均,臭氧总量会向极点单调地增加。这种结果很清楚地如图2所示,图中把纬向平均结果同图1b中对资料作

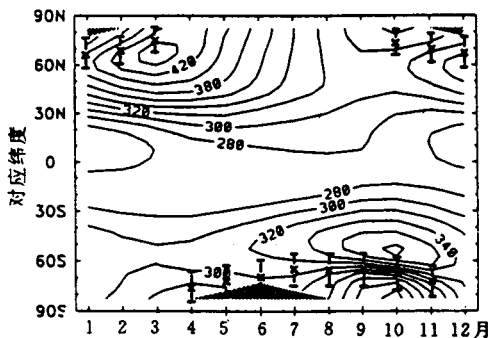


图3 按 V_p 坐标(用转换成的对应纬度表示)绘制的 TOMS 臭氧总量的季节变程(单位 DU)。标有 X 的线段表示每个冬季月份统计上的极涡边沿和边界区域

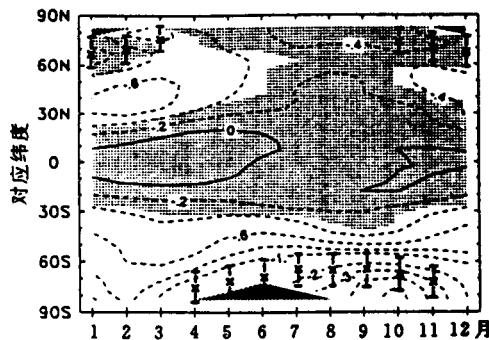


图4 由按 V_p 坐标(已转换成相当纬度)平均的数据算出的 TOMS 臭氧总量线性趋势;等值线为 0, -0.2, -0.4, ..., -1.0, -2.0, -3.0...%/年。阴影区表示在该地区按 2σ 水准看统计趋势与零差不多。带 X 的线段表示每个冬季月份的统计极涡的边沿和边界区域

结果作为与几条特选等 V_p 线所围面积相当 V_p 平均的结果放在一起做对比(把 V_p 平均的纬度的函数点绘出来的)。在隆冬季节因极夜地区上空 TOMS 资料无法获得,用 V_p 坐标具有进一步的优点。对于极涡偏离极点的情况, V_p 平均的结果伸展到更高的相当纬度,比用纬向平均资料所给出的纬度要高。

为了计算本文所用的月平均资料,用逐日 TOMS 和 V_p 资料把 TOMS 资料绘在 V_p 坐标上,而且计算出沿各条 V_p 等值线的平均值。这些逐日资料按 V_p 场被转换成相当纬度,然后计算出逐月平均值(每个月至少用 5 天的资料)。图 3 给出约由 13 年资料计算得的 TOMS 臭氧季节变程图。图中包括了表示每个冬季月份气候上的极涡边沿和边界区域的线条,它们是由逐日资料所得到的这些量的频率直方图推导出来的。图 3 所示的季节变程特点是,在北半球冬春季节,极涡边沿稍微朝向赤道一侧有一气柱臭氧最大中心,这个中心在定性上与南半球冬春所观测的最大中心有相似之处(南半球中心也是在这些分析的极涡边沿略微朝向赤道一些)。在极涡边沿附近这个臭氧总量的最大中心是同 Schoeberl 等(1992)文中用 V_p 坐标对飞机资料的分析(如他们文中图片 2 所示)相一致,也同平流层低层极涡边沿附近的最大下沉速

度中心相一致,但这个下沉中心不是在极涡中心(Mahlman 等,1980;Schoeberl 等,1992;Manney 等,1994)。我们提醒一句,TOMS 资料的纬向平均(如 Bowman 和 Krueger, 1985)在北半球由于极涡的非对称性,未能呈现出这种结构。

3 变化趋势

把随季节而变的线性回归分析应用于逐月平均数据,得到臭氧总量的变化趋势(以下称为趋势)。统计模式包括线性趋势、太阳黑子周、准两年振荡(QBO)以及厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)效应,而余差被模拟为一阶自回归,这些计算是仿效 Randel 和 Cobb 在 1994 年所用的算法。误差估计值中包含每年 0.13% 的仪器趋势误差(Stolarski 等,1991)。图 4 给出随月和对应该纬度而变的合成趋势。图中阴影区表示,如以 2σ 为水准来讨论问题,算得的趋势与零差不多。表示每个冬季月份气候学统计的极涡边沿和边界区域位置的带 X 的线段(同图 3 一样),也包括在图 4 中。

从图 4 中看到的臭氧总量趋势,同 Stolarski 等(1991)的纬向平均结果相似,而我们

表 1 按臭氧趋势方程(1)估算的极涡交换率

月份	极涡的外边界	$\frac{\partial}{\partial t}$ (外围趋势) DU/年/月	内部趋势 DU/年	内部面积 外围面积	交换率 月 ⁻¹
11月	61.3°	-0.30	-1.29	0.27	0.9
12月	58.3°	-0.41	-0.79	0.35	1.5
1月	57.6°	-0.39	-0.77	0.37	1.4
2月	59.8°	-0.15	-1.47	0.31	0.3

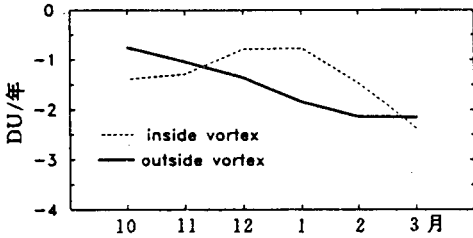


图 5 北半球冬春季节按极涡外边界以内区域和以外区域(这些区域已在图 3—4 中求出并列举在表 1 上)平均的臭氧总量趋势(DU/年)。这些趋势曲线的 1σ 不确定性水准,在极涡内部和外部分别为 0.7 和 0.35DU/年

的计算结果,很清楚地把趋势按极涡的位置划分开。图 4 中结果呈现出,在南半球整年内在极涡以外有显著的负趋势。南半球极涡以外这种一年到头臭氧亏缺的现象,至少部分地可能是由于离开南极臭氧洞的臭氧已亏损的空气,随着极涡崩溃进入中纬度的输送造成的,这种现象持续到随后几年(Sze 等, 1989; Prather 等, 1990; Malhman 等, 1994)。图 4 也显示出在北半球冬春季节极涡外围有显著的臭氧总量亏缺;北半球这种臭氧亏缺比起南半球中纬度亏缺更加依赖于季节,而很少持续到夏季(这种现象表示北半球很少有年际“记忆能力”)。按本文所算得的北半球中纬度趋势量级,约比 Stolarski 等(1991)纬向平均结果低 20%,而我们的南半球春季结果略微比他们高一些。把 V_p 平均结果同纬向平均结果作直接对比,表现出 V_p 平均的年际方差变小而且 V_p 分析的趋势不确定性较小;这意味着,纬向平均数据里年际变率的一部分乃是与极涡变率相关联的人为产品。

图 5 给出北半球冬春季节极涡以内和以外对应纬度带区域平均的臭氧亏缺值,其值是以 DU/年为单位计算的,而不是用%/年为单位。极涡以外的数值是指 30°到极涡外边界(根据图 3—4 的结果和表 1 的数值)的平均值;而极涡以内的值是指极涡外边界到 85°N 的区域平均。极涡以内的趋势在仲冬(12—1 月)为最小,这与仲冬臭氧化学耗损所要求的缺少太阳光这点相符合。相反地,极涡以外的趋势,在整个冬春季随着时间推移不断地增加。

就目前对北半球冬季中、高纬度臭氧耗损的了解来看,在图 4—5 上极涡外围所看到的臭氧亏缺有三种可能原因:1)在极涡内部[由于极地平流层云(PSC)诱导的化学反应,如 Webster 等(1993)所述],臭氧可能受到耗损,这种臭氧受耗损的空气然后被输送到中纬度[参看 Adkinson 等人文中(1989)就南半球所说的例子];2)极涡空气可能经受到化学过程,然后混合到中纬度,就地出现臭氧耗损(Tuck 等, 1992; Norton 和 Chipperfield, 1994);或者 3)中纬度臭氧亏缺可能同与极涡相联的 PSC 过程无关,或者只是附加上这种过程[可能与中纬度硫酸盐气溶胶有关;见 Hofmann 和 Solomon, 1989]。我们可以根据已经给出的极涡以内和以外 TOMS 臭氧亏缺的观测结果(图 5),以及所知的极涡面积,定量地估计维持机制方程(1)必须的穿越极涡的交换率,这只是为了说明造成初冬和春季之间中纬度所观测到的趋势增加的原因。这个交换率是由借助于下式的质量连续原理估计的:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\text{极涡外围 } O_3 \text{ 趋势}] = [\text{极涡内部 } O_3 \text{ 趋势}] \cdot \left[\frac{\text{极涡内部面积}}{\text{极涡外围面积}} \right] \cdot [\text{交换率}] \quad (1)$$

表 1 列出用(1)式计算的交换率和图 5 中的数据,并给出整个极涡空气体积,在仲冬时节为了输送 O_3 已耗损的空气,必须每个月涌入中纬度 1 次或 2 次,才能完全说明所观测到

的中纬度臭氧耗损的季节性增加现象(虽然这些估计,考虑到估计趋势和时间微商的不确定性,应该只能作定性看待)。这种估计的交换率是远大于根据水平质量通量估计值的计算结果(Waugh 等, 1994; Dahlberg 和 Bowman, 1994), 也大于由平均垂直速度推断的(Schoeberl 等, 1992)以及由三维轨迹计算推导(Mannev 等, 1994)的计算结果。我们的结论是, 在 TOMS 数据中看到的极涡外围臭氧亏缺是由于上述机制(1)以外的其他过程造成的。

4 总结

本文的动机是根据位涡分析研究相对于极涡坐标的臭氧趋势。这种环绕位涡等值线求平均的方法, 比纬向求平均方法更具有物理意义, 而且事实上有一部分纬向平均数据的年际变率, 当用位涡坐标研究资料时被除掉了。这种位涡法的趋势分析(图 4)显示出, 南北半球极涡外围都出现臭氧亏缺; 南半球中纬度一年到头有臭氧亏缺, 而北半球只在

冬春之际出现亏缺。北半球极涡内部的趋势在仲冬极夜之际呈现最小, 而北半球极涡外围的趋势在整个冬春之际随时间而增加。我们已用了极涡外围这个时间增加, 来估计要是这些亏缺在极涡内部出现而且随后向中纬输送所必需的质量流量率。结果(见表 1)表明, 在仲冬每月有 1—2 次极涡体积的交换率, 其值远远大于其他的(见上述)极涡流量率估计值。因而我们得出结论, 中纬度臭氧亏缺是由于中纬度原地的多种过程而发生的, 这些过程可能是与极涡加工过的空气输送到中纬度有关联, 或者是与本底硫酸盐气溶胶的化学反应有关。后面这种机制也由图 4 上北半球初冬之际(11 月、12 月)所观测到的臭氧亏缺所揭示出来; 在高纬出现 PSC 阈值以前这些就很好出现了。

求是译自 *Geophysical Res. Letters*, 22(6): 683—686, 1995. 译者得到自然科学基金资助

郝望校