

从雨云 7 号 TOMS 资料推算出臭氧 总量变化趋势

R. S. Stolarski P. Bloomfield

R. D. McPeters J. R. Herman

摘要 雨云 7 号卫星上的臭氧总量测绘分光仪(TOMS), 11 年多以来一直测量着全球臭氧柱总量。最近在资料分析上加以改进, 得到一种用以确定并消除定标漂移的技术, 使记录尽头处的资料相对于记录开头的资料来说可精确到 $\pm 1.3\%$ (2σ)。由 TOMS 总臭氧资料时间序列已拟合得出一个统计模式, 其中包括季节变化项、线性趋势项、准 2 年振荡(QBO)项、太阳活动周项以及二阶自回归噪音项。就这个统计模式拟合于 65°N 到 65°S 纬圈之间平均的 TOMS 资料来看, 所得到的线性趋势项为 $-0.26 \pm 0.14\%$ / 年, 即从 1978 年 11 月到 1990 年 5 月共 11.6 年中变化 -3% 。这种变化趋势在赤道近于零 ($0.0002 \pm 0.2\%$ / 年), 向两极增加。在 50°N 年平均趋势为 $-0.5 \pm 0.21\%$ / 年。在这 11.6 年期间 50°N 的趋势, 表现出强烈的季节变化, 在冬季和初春(即 2、3 月份)大于 -0.8% / 年, 在夏季(7、8 月份)约为 -0.2% / 年。

关键词 臭氧季节变化, 臭氧趋势

1 引言

人们很早就预测到由于人类活动, 特别是由于释放氟氯化碳进入大气圈, 会出现平流层臭氧总量的减少(Molina 和 Rowland, 1974)。不过在发现南极春季臭氧迅速减少成臭氧洞(Farman 等, 1985), 以及有报告论述北半球中纬度冬季臭氧减少(WMO, 1990)以前, 这种预测一直是理论范畴的事。

本文根据雨云 7 号卫星上臭氧总量测绘分光仪(TOMS), 自 1978 年 10 月底发射那天起直到现在所测得的整个气柱臭氧总量资料, 研

究由其算得的变化趋势。TOMS 是一种横穿天底轨道扫描的 Ebert-Fastie 单色仪, 每天提供一张演算得出的全球臭氧分布图。仪器在 6 个波长处测量地球的紫外反射率。与 360 和 380nm 地面反射率的测量相配合, 6 个波长中的 4 个(312.5, 317.5, 331.2 和 339.8nm)成对地被用来测量臭氧总量。

TOMS 或者任何其他卫星的主要不足之处是, 难于随着时间保持定标。根据以各种不同波长对测量臭氧需要有内在一致性的原则, 已经发展了一种新办法, 来决定 TOMS 仪器的刻度漂移。这种方法产生了一套与 Dobson 测站网

无关的、经过定标的臭氧总量资料。这种再加工资料称为版本 6 的资料*。现在可从国家空间科学资料中心(NSSDC, National Space Science Data Center)得到。通过定标和分析对误差传播作了评估,结果表明以记录开始为准在记录结束时,臭氧测量值可精确到 $\pm 1.3\%$ (2σ) (Herman 等, 1991)。这个结果通过当卫星越过上空之际同世界标准 Dobson 测量仪(#83)的对比,以及通过同 Dobson 测站网内许多测站综合记录的对比(McPeters 和 Komhyr, 1991),得出进一步确证。本文是检验 TOMS 所得出的作为纬度和季节的函数的变化趋势。

2 统计模式

臭氧变化趋势(以下以英文字 Trend 表示),以及太阳活动周(以下以英文字 Solar 表示)和准两年振荡(以下仍以 QBO 表示)信号,已经利用回归分析由 TOMS 资料估计出来。所用的回归模式为

$$O_3(t) = \mu + \alpha \cdot Trend + \beta \cdot QBO + \gamma \cdot Solar + \text{噪音} \quad (1)$$

这里 μ, α, β 和 γ 都是待定常数。

为了表征臭氧资料的噪音,(1)式首先分别地对各年每周进行拟合。在大多数纬度带,噪音序列显示出二阶自回归结构,尽管在有些例子中二阶项是统计学不显著的。考虑到自回归结构本身有季节性结构的可能性,假设一阶和二阶自回归项两者是一个常数加上一个年变程的形式。

一旦噪音的统计结构被决定,回归模式(1)式用广义最小二乘法,对全体资料集再进行拟合。季节模式包含一个常数加上年变化和 6 个月、4 个月和 3 个月三个谐波。趋势模式包含一个受年和半年变化项调整过的、全部资料记录的线性趋势。准两年振荡模式包含一个乘以后延的、经过平滑的新加坡 30hPa 风(通过与 J. Angell 私人通信得到)的系数,在 30hPa 上这个系数有一把年变化计算在内的项。最后,太阳活动周模式包含一个乘上已平滑的 Ottawa 测量的 10.7cm 太阳辐射通量(来自 U. S. 商务部关

于太阳地球物理资料的报告)的系数,该系数也是把年变化计算在内。在推论这些不同子模式的参数时,噪音模式的参数视为已知。

3 全球平均结果

对 TOMS 资料能够进行全球积分,从而可得到全球平均的时间序列。因 TOMS 在极夜地区无法测量,只有在 65°S 到 65°N 之间地区才有整年测量资料,已对该区进行了面积权重平均的计算。其面积覆盖率为全球的 90%,但不包括南极臭氧洞区域。把(1)式的统计模式拟合于这个时间序列,得到下列参数:

$$Trend = -0.26 \pm 0.14\% / \text{年}, \text{或者}$$

在 11.6 年资料记录时期为 -3%。

$$Solar = 3.7 \pm 0.6 DU / (F10.7 \text{ 的 } 100 \text{ 单位}), \text{或者}$$

在每一太阳活动周为 1.5%

$$QBO = -0.4 \pm 0.1 DU / (30hPa \text{ 上每 } 10 \text{ knots 风速}),$$

或者在每一 QBO 时期内为 1%

太阳活动周项和 QBO 项的单位在“随纬度而变的趋势”一节中加以解释。太阳项和 QBO 项都与臭氧趋势专家小组的发现(WMO, 1990)相一致。趋势的误差估计是,综合仪器趋势误差 $\pm 0.13\%$ /年和因模式拟合的统计误差 $\pm 0.04\%$ /年的平方和的平方根(RSS)估计值 2σ 。

4 趋势随纬度随季节而变

以%/年为单位表示的线性趋势项,根据统计模式推算的结果,它作为从 60°S 到 60°N 之间的纬度的函数,表示在图 1 上。图中所示的许多竖条线是,来自于上述模式的 2σ 统计不确定性和 11 年记录期内的绝对误差 $\pm 1.3\%$ 的均方根和。对 20°S 到 10°N 纬度带内的观测趋势从统计学上看与零没有差别。氟化碳(fluorocarbon)对臭氧因气相均匀化学过程而产生作用的许多模式,预测在这 11.6 年期限内热带臭氧变化为 1%。一个典型的例子如图中实线所示(与 Jackman 私人通信,他用的是 Douglass 等 1989 年模式)。如果趋势真实地如

* 按 Herman 等人称为新的自身校正法。

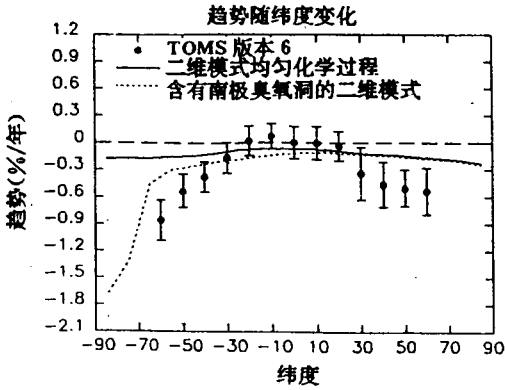


图 1 用统计模式推断的、作为纬度的函数的季节平均臭氧变化趋势项。误差竖条线表示 2σ 统计误差加上在 11 年期间的 $\pm 1.3\%$ (2σ) 估计仪器趋势不确定性。实线为只含有均匀气相化学过程的二维模式计算结果。虚线为类似的二维模式结果,但在南极春季加上臭氧洞

在 20°S 到 10°N 内所示的近于零,那么我们会作出如下结论:这些模式高估了纯气相氯化化学效应。然而图中所示的误差竖条线会得出的结论是:观测资料与模式预测相符合。TOMS 资料在 11.6 年内的趋势准确度,不足以分辨出小于 1% 的预期变化。

在两个半球 20 度纬度向极的一侧, TOMS 资料展现出,在统计学上有显著意义的趋势。到 60°S 负趋势约为 0.9% /年,并且由于接近南极臭氧洞地区负趋势随纬度增加而增大。一种合理的解释是,这种现象是由于来自南极臭氧洞地区缺少臭氧的空气同较低纬度空气的混合过程,造成一种臭氧稀薄效应。在整个北半球中纬度也可以看到统计(学上有)显著(意义的)趋势。统计的不确定性,会因气象上变率程度大一些而更大一些。由 40°N 到 60°N 的负趋势约为 0.4 到 0.5% /年。有可能这种变化是由于北极极涡里极地化学过程的影响所致。

为使极地处理过程的问题检验得更精细些,图 2 给出推演出来的以纬度和季节为坐标的趋势图。在赤道附近可见到,一个为零,或为稍微有点正值的趋势。向南趋势变为负的,而且负值增大,在 10 月份有一季节性的负值最大

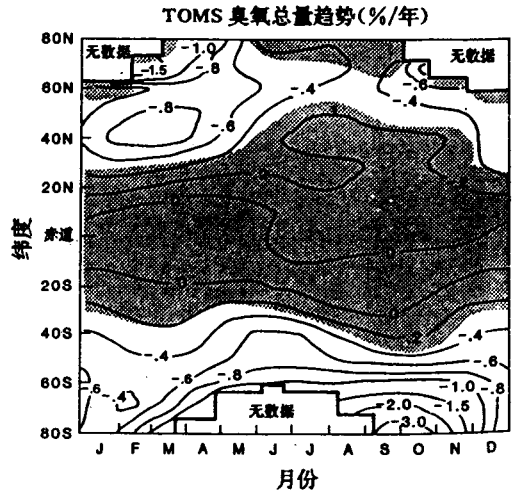


图 2 从统计模式得到的、作为纬度和季节的函数的趋势项。季节变化是只对年和半年两个谐波的拟合。阴影区表示在该区的趋势以 2σ 水准来看在统计学上与零没有差别。显著性是由绝对误差和统计误差两者估计值的均方根和来决定。粗实线朝向极地一侧是极夜,没有 TOMS 测量是可能的

区。在北半球中纬度,有着较大的季节变化,其最大中心在冬季,这种情况与 Bojkov 等人 (1990) 先前发现相一致。从定量来看,有许多地方与 Bojkov 等人以地面 Dobson 分光光度计测得的、时间一直延续到 1986 年底资料为依据的分析结果有差异。他们的冬季趋势为大约 -0.1 到 -0.3% /年并向极地增加。这里 TOMS 资料的趋势远大于此,达到 -0.8% /年以上,最大中心正好在 40°N 的北面。

在图 2 中还显示出统计学上有显著意义的趋势区。阴影区为按 2σ 水准看在统计学上与零没有差别的区域。非阴影区为统计(学上有)显著(意义)趋势区。约在 40°S 以南的整个区域为统计显著趋势区。在北半球,冬季大约从 30°N 到 60°N 为统计显著的趋势区,春季显著区域延伸到 80°N 。在夏、秋两季,显著区域回缩成 10 个纬度宽,界于 50°N 到 60°N 之间。

以一年 12 个月份为坐标的图 3,更为直接地展示出两半球趋势的对比。上幅图表示 60°N 趋势同 60°S 趋势(往前移了 6 个月)的对比,附

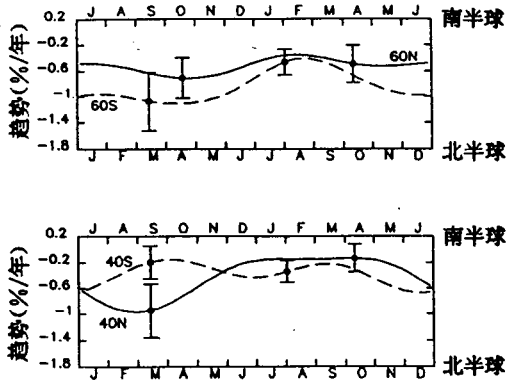


图3 北南半球趋势的对比,以一年12个月份为横坐标,a)60纬度,b)40纬度。图中的误差竖条线只包含 2σ 统计误差。南半球资料已作了相对于北半球前移6个月;南半球的月份标在每幅图的上方,北半球的月份标在图的下方

上几条 2σ 误差竖条线。两个趋势曲线的季节形势是一样的,但 60°S 趋势要大一些。下幅图显示出 40°N 和 40°S 的结果。两半球的季节特性是不同的, 40°N 冬季和初春趋势大,并有一个或多或少的年变化成分,而 40°S 表现出有一个半年变化成分,整个季节差小得多。 40°N 冬季趋势比 40°S 冬季趋势要大,比合并的 2σ 误差竖条线还大一些。

图2上在 70°N 到 80°N 之间极夜刚过以后2月底和3月初有一个小块趋势数值很大的区域。虽然这些趋势符合统计显著性检验,但严重地受到1990年极端低数据的影响。1990年春天臭氧极低的数据可能是平流层动力过程年际变率的一种具体表现,由于此臭氧总量的空间分布与前些年大不一样。还有人建议,北半球高纬度1990年春天臭氧资料可能受到1989年底大太阳质子事件的影响(Reid等,1991)。不用1990年资料,对统计模式也做过拟合, 40°N 处中纬度值基本未变,但高纬的峰值消失。

对本文所看到的、北半球中纬度趋势较大的可能解释是,本文所用资料一直延伸到1990年中,而Bojkov等人的结果是根据一种于1970年开始、连续延长只到1986年的趋势。他们得到的是这17年的平均趋势,而TOMS资料得

到的是1979年一直延长到1990年中的平均趋势。如果这种负趋势是由于碳氟化合物的氯均匀气相化学过程而造成的,那么预计这种负趋势会随时间略有增加。如果这种负趋势是由于改变着北北极涡内部正常气相化学过程的非均相反应而造成的,那么通过氯二聚物项(Molina和Molina,1987)在氯的总浓度中会有显著的二次项,从而引起这种负趋势加速。

把TOMS结果和Dobson测站结果进行比较的另一个复杂因素是,北半球对流层里臭氧是增加的,部分地补偿了平流层中臭氧层的减少。TOMS对于对流层低层臭氧的测量不是十分敏感(Klenk等,1982),将会稍微偏高地估算北半球这种负趋势。然而能够对可能误差作出一个很保守的估计。瑞士Payerne站的一系列气球探测,已经测得对流层臭氧的最大趋势(Staeheliu和Schmid,1991)。他们的结果显示,对流层2月份臭氧在1979年到1988年期间由19.4DU增加到29.4DU。 45°N 2月份TOMS纬向平均臭氧的变化为下降了9%或下降了35DU。假如TOMS测量到的只是对流层增加量9.5DU的一半,那么真正的趋势就是减少了8%,即减少了30DU,也就是说趋势低估了1%。就夏季条件作类似的分析,结果趋势误差会小于0.5%。由于北半球范围内对流层臭氧变化几乎肯定要小于北欧观测值,北半球TOMS臭氧趋势误差因TOMS对对流层臭氧的敏感度变小,应该不会大于百分之0.5。赤道地区和南半球的对流层趋势误差可忽略不计。

图2中数据的一个有趣特征是,北半球冬季趋势往南一直达到 30°N 。这种情况可能是由于极涡受波动而变形,或者由于极涡崩溃,结果使极地经过处理过的空气而后被输送到中纬度。空气因非均相过程使活性氯含量有所增加,当其被输送远离极地,结果造成在远离极地的地方活性氯总量呈负梯度。在远离极地的地方可用于使氯破坏过程的太阳光增加,同时还与活性氯浓度相重叠就可能造成在远离极地的地方破坏最大。可是这是定性的理由,还没有定量模式来表明与所观测的趋势相一致,而且科学

界内也还没有一种关于在冬季有多少化学上受扰动的空气,可被输送到中纬度去的一致意见(可以参看 Tuck, 1989; Schoeberl 和 Hartmann, 1991; Hartmann 等, 1989)。另外一种可能性是, N_2O_5 与 H_2O 在硫酸气溶胶背景下的非均相反应, 扰乱了 NO_x 从而扰乱了氯化学过程(例如 Brasseur 等, 1990)。

5 结论

由 1978 年 11 月到 1990 年 5 月共 11 年 7 个月的 TOMS 资料显示出, 有一统计学上有意义的全球平均(65°S 到 65°N)的变化趋势。这种趋势随纬度而变, 赤道附近近似零, 向两极增加, 这表明这种趋势的来源有可能是一种高纬度过程。南半球臭氧的变化趋势大一些, 并同来自于南极臭氧洞的稀释效应

相一致。北半球的变化趋势同由均一气相氯化学过程所预计的相比, 也明显地要大一些。北半球中纬度臭氧趋势, 显示出有很明显的季节变程, 最大值在冬末(2、3 月份)。最大中心在 40 纬度附近, 臭氧降低值大于 0.8%/年。因为由观测到的臭氧亏损, 在 50°N 以南 1 月初为 0.6%/年, 把这些结果解释为是由于北极非均相化学过程引起的, 必须小心谨慎。为要决定实测臭氧降低现象的机制, 需要做详细模式模拟研究, 还需要对氯-臭氧化学过程中各种物质做进一步测量。

6 参考文献(略)

求是译自 *Geophysical Research Letters*, 18 (6): 1015—1018

郝望校. 本译文得到自然科学基金的赞助