

斯堪的纳维亚臭氧亏损和物质输送*

邹捍 周立波 季崇萍 王维 蹇泳啸

(中国科学院大气物理研究所环境与极地研究部, 北京 100029)

摘 要 冬季在北极的斯堪的纳维亚地区存在一个明显的臭氧亏损区, 亏损区的中心值达-50 DU。对臭氧亏损和地面温度进行相关分析后指出: 斯堪的纳维亚地区的臭氧亏损和该地区地面温度和地面热通量关系极其密切, 进一步分析物质的向上输送表明冬季斯堪的纳维亚地区的臭氧亏损可能是由于地面加热引发的物质抬升所造成的。

关键词: 臭氧; 物质输送; 斯堪的纳维亚

1 引言

大气中的臭氧是一种温室气体。它吸收太阳的短波辐射和地气系统的长波辐射, 加热大气。通过调整大气的加热场, 大气臭氧含量和分布的变化能够影响全球气候变化。同时, 大气中的臭氧吸收来自太阳的紫外辐射, 使地球的人类及生物圈受到保护。臭氧的消亡主要通过光化学反应和有氮氧化物、氢氧根、氯与溴参与的催化反应以及粒子表面的非均相反应。同时, 大气环流及涡旋的输送对臭氧的分布起着非常重要的作用^[1]。自南极臭氧洞发现^[2]以来, 人们对全球臭氧的下降趋势进行了大量的研究^[3~5]。

最近的地面和高空观测、化学分析以及数值模拟研究证实北极的臭氧也在减少。个例研究发现, 在强烈的极涡条件下, 极地平流层云(PSCs)会造成臭氧的化学减少, 即北极臭氧减少的机制与南极臭氧洞的很相似^[6~10]。但也有个例研究发现许多不同于南极臭氧洞的现象, 如臭氧低值出现在极涡出现前期的1月^[11~12]; 模式研究指出冬季北极臭氧亏损出现的高度较低, 在20 km以下^[13]; 最近的研究发现脱氮过程也是造成北极臭氧减少的一个因子^[14]。这些研究都指出北极臭氧亏损的机制可能不同于南极的臭氧亏损, 至少1991/1992年冬季的北极臭氧亏损不能用南极臭氧洞的机制来解释^[11]。因此, 北极臭氧亏损的确切机制还有待研究。

邹捍等^[15~16]分析了青藏高原臭氧亏损的机制。他们研究了TOMS臭氧和地面对大气加热的关系后指出, 青藏高原臭氧亏损主要是由地面加热导致的物质抬升所造成的。

斯堪的纳维亚是欧洲主要人类居住区, 该地区臭氧低值会严重损害人类健康。同时, 研究该区域的臭氧亏损对了解北极地区臭氧亏损的机制是非常重要的^[17~19]。本文试图通过研究该地区气候平均臭氧的季节变化和物质传输来揭示导致该地区臭氧亏损的可能机制。

2001-03-01收到, 2001-04-05收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目40075029, 国家海洋局“中国首次北极科学考察”和中国科学院重大项目KZ951-A-205-05联合资助

2 资料和方法

本文使用的大气臭氧资料是由美国航空和航天局 (NASA) 提供的全球大气臭氧分布资料 (TOMS version 7), 该资料是由 Nimbus-7 卫星上搭载的臭氧观测光谱仪观测得到的, 观测时间是 1979~1992 年。大气环流资料来自于同时时间的 NCEP/NCAR 再分析资料。研究所用的月平均资料是对 1979~1992 年的臭氧和大气环流资料进行气候平均后得到的。对斯堪的纳维亚臭氧进行区域平均的范围为 ($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{E}$, $55^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$), 对地面温度和热通量进行区域平均的范围为 ($5^{\circ}\text{W}\sim 5^{\circ}\text{E}$, $55^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$)。这里, 地面热通量区域平均范围比高层臭氧范围西移主要是考虑到大气的斜压性。为了减去太阳季节变化造成的纬向平均的化学和动力学效果, 我们对臭氧总量和地面热通量均进行了纬向偏差计算。具体定义为: 纬向偏差 = 区域平均 - 纬向平均。

3 讨论

3.1 斯堪的纳维亚地区臭氧低值

图 1 给出了臭氧纬向偏差的全球分布。可以看出在冬季 (12~2 月) 斯堪的纳维亚及其邻近区域存在一个严重的臭氧低值区, 覆盖了整个挪威中部和邻近的挪威海域。臭氧亏损最大值 -50 DU 位于 (64°N , 8°E), 大约相当于该区域臭氧总量的 15%。而夏季该区域臭氧亏损非常小, 只有 $0\sim -0.5\text{ DU}$ 。图 2 是斯堪的纳维亚的臭氧区域平均、同纬圈平均以及纬向偏差的季节变化图。这里的臭氧总量纬向偏差是局地臭氧亏损 (排除因太阳季节变化引起的光化学和大气输送变后)。

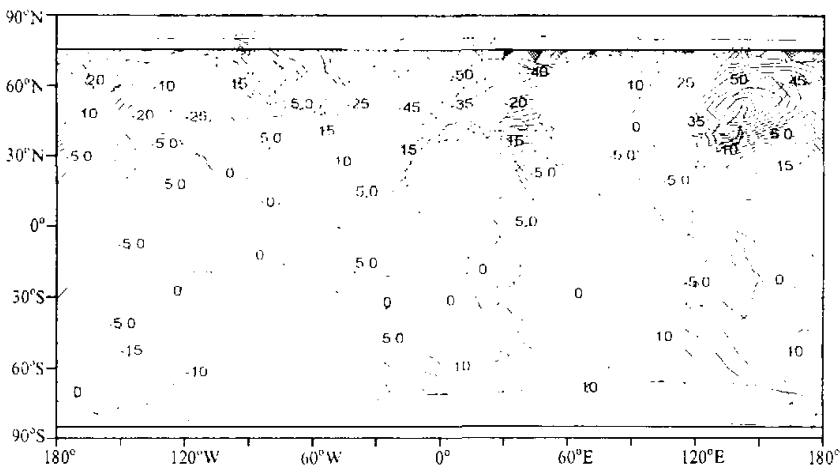


图 1 1979~1992 年冬季 (12~2 月) 全球臭氧纬向偏差分布
单位: DU, 等值线间隔: 5 DU

臭氧纬向平均 ($55\sim 65^{\circ}\text{N}$) 的季节变化呈正弦扰动, 在 3 月出现最大值 425 DU, 9 月出现最小值 310 DU。这与北半球其他纬度的臭氧纬向平均变化很相似。同纬向平均相比, 斯堪的纳维亚地区臭氧的区域平均存在一个滞后的最大值 (出现在 4 月, 397 DU) 和最小值 (11 月, 281 DU)。从纬向偏差的季节变化可以看出, 在夏季该地区出现最大臭氧盈余 (1.9 DU, 7 月) 和冬季出现最大臭氧亏损 (-54.3 DU, 1 月), 亏损相当于 1 月平均臭氧总量的 16% 左右。

3.2 地面温度

图 3 给出了地面温度的区域平均 T_1 、纬向平均 T_2 和纬向偏差 ΔT 的季节变化。与 $55\sim 65^{\circ}\text{N}$ 纬向平均变化相比, 斯堪的纳维亚地区冬季地面温度的区域平均变化比夏季

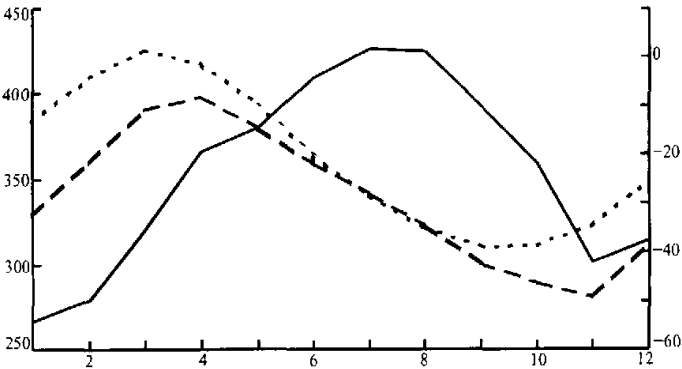


图 2 1979~1992 年斯堪的纳维亚地区臭氧总量的季节变化
虚线: 总量; 点线: $55\sim 65^{\circ}\text{N}$ 的纬圈平均; 实线: 纬向偏差

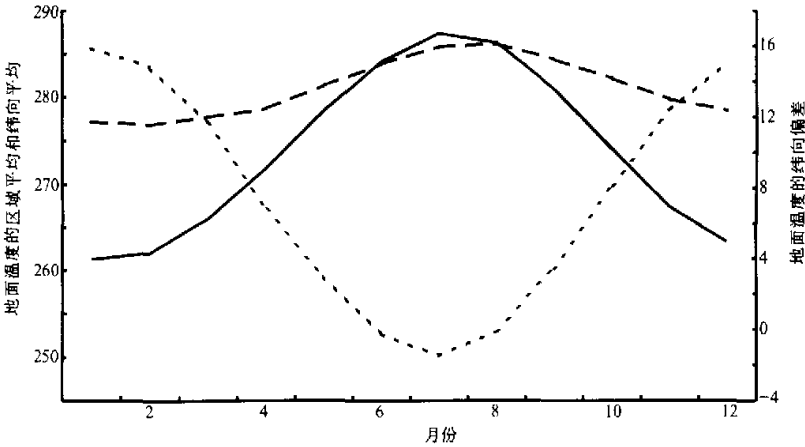


图 3 1979~1992 年气候平均地面温度的季节变化
实线: 区域平均; 虚线: 纬圈平均; 点线: 纬向偏差, 单位: K

的大。地面温度的纬向偏差在1月达到极大值(15.84 K), 7月达到极小值(-1.52 K), 这与臭氧亏损纬向偏差的极大值和极小值相对应。图4给出了1979~1992年逐月地面温度的纬向偏差与臭氧纬向偏差。可以看出, 地面温度纬向偏差的极大值大多对应于斯堪的纳维亚地区的臭氧亏损。相关分析表明: 1979~1992年间气候平均的相关系数为-0.98; 1979~1992年间逐月地面温度纬向偏差和臭氧纬向偏差季节变化间的相关系数为-0.76。统计分析中的 F 值分别为188.26和227.56。信度 $(1-\alpha)$ 为99%的标准 F 值为 $F_{\alpha}(12)=9.33$, $F_{\alpha}(168)=6.63$, 所以, $F \gg F_{\alpha}$, 上述相关分析的相关性显著。

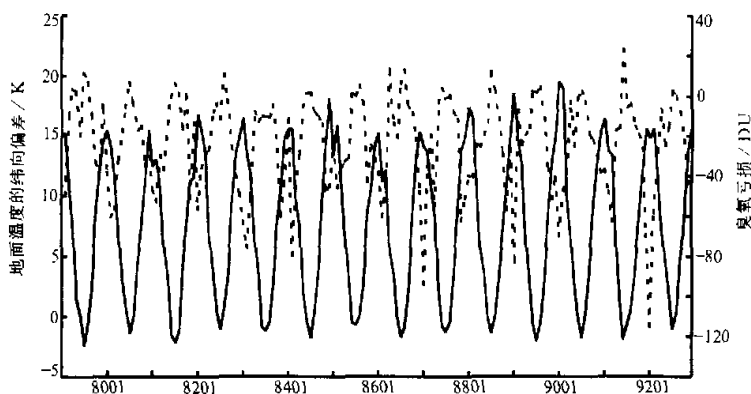


图4 1979~1992年逐月地面温度和臭氧亏损的季节变化

实线: 地面温度的纬向偏差; 虚线: 臭氧亏损

3.3 地面加热

图5为斯堪的纳维亚地区臭氧纬向偏差与地面对大气总加热量纬向偏差的季节变化。可以看出, 臭氧亏损与加热量的纬向偏差间存在很好的相关。它们同时在1月出现极大值(加热为 73.95 W m^{-2} , 臭氧亏损为 -54.3 DU), 7月出现极小值(加热为 -27.93 W m^{-2} , 臭氧亏损为 1.9 DU), 该地区臭氧总量纬向偏差与地面对大气加热纬向偏差间的相关系数为-0.90, 其 F 检验值为33.73, 通过显著性检验。

3.4 物质输送

地面对大气的加热最终将导致物质的向上输送, 因此我们有必要分析斯堪的纳维亚地区上空物质垂直运动的过程。图6给出了斯堪的纳维亚上空等物质面高度的季节变化。330 K以下等熵面在7月位置较低, 以后逐渐上升, 1月达到最高, 从1月到7月逐渐下降。330 K以上等熵面也有同样的变化趋势, 但幅度明显变小。可以认为, 330 K以下高度中, 从夏季到冬季存在物质抬升过程, 在330 K附近物质向该地区以外的大气辐散。图7是不同高度上等物质面高度和局地臭氧亏损的相关系数。可以看出, 在330 K以下其相关系数都在-0.85以上。在375 K层附近出现相关系数降低, 这可能是对流层顶对垂直物质输送的强迫作用。因此, 可以看出低层物质向上输送和330 K附近的物质辐散与斯堪的纳维亚地区臭氧亏损密切相关。

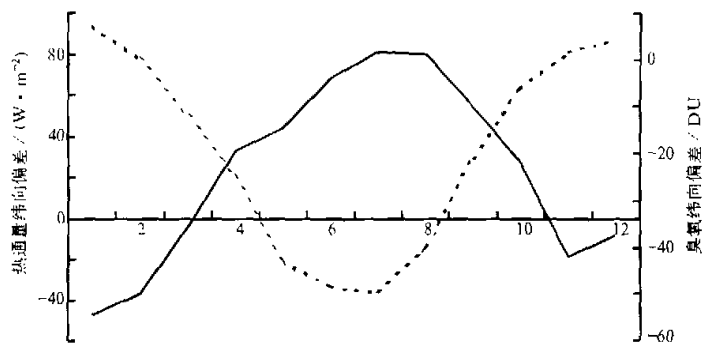


图 5 臭氧纬向偏差和地面对大气加热纬向偏差的季节变化
实线: 臭氧纬向偏差; 虚线: 热通量纬向偏差

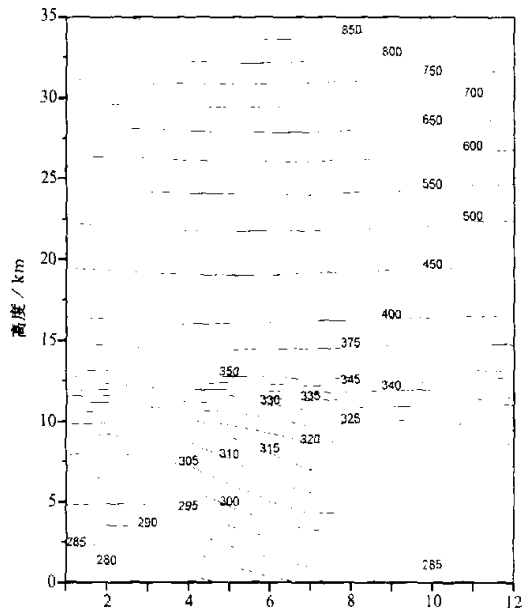


图 6 斯堪的纳维亚地区等物质面高度的季节变化
曲线上的数值代表各等物质面 (单位: K)

4 结论

对 TOMS 臭氧和 NCEP / NCAR 大气环流资料的分析发现:
(1) 冬季斯堪的纳维亚地区存在严重的臭氧亏损区, 中心值达到-50 DU。最大臭氧局地亏损出现在 1 月, 达到-54.3 DU, 大约相当于该月平均臭氧总量的 16%。

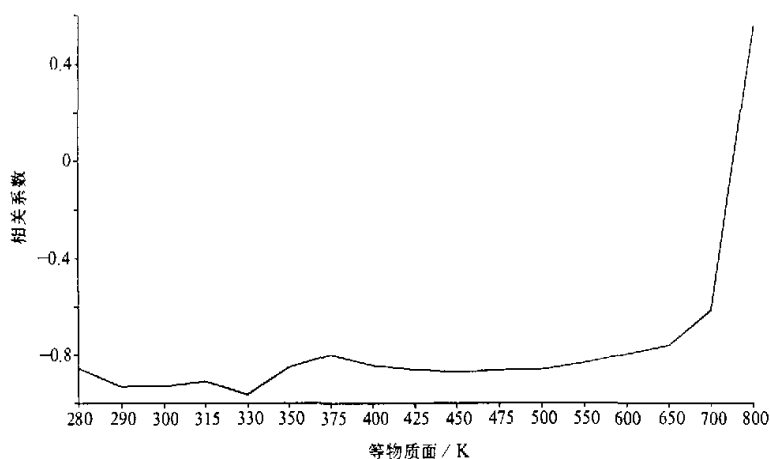


图7 臭氧亏损和等物质面高度的相关系数

- (2) 斯堪的纳维亚地区的地面温度与臭氧偏差关系密切。
- (3) 斯堪的纳维亚地区地面向大气输送总热量与臭氧局地亏损密切相关。
- (4) 地面加热导致的垂直物质输送以及高层物质辐散与斯堪的纳维亚臭氧总量亏损密切相关。

因此, 可以认为, 斯堪的纳维亚地区冬季地面温度纬向偏差上升, 加热大气, 导致物质抬升可能是该地区臭氧亏损的主要原因, 但需要进一步的工作和资料加以证实。另外, 可以将该地区的地面温度作为局地臭氧亏损的预报因子。

致谢 中国科学院大气物理研究所叶笃正院士和高登义教授为本研究提供了指导和建议, Ms. Patricia 等人 (NASA Goddard Space Flight Center) 向作者提供了 TOMS 臭氧总量资料, 在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Appenzeller, C. and J. R. Holton, Seasonal variation of mass transport across the tropopause, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D10), 15071~15078.
- 2 Farman, J. G. and J. D. Shaklin, Large losses of total ozone in Antarctic reveal seasonal $\text{ClO}_x / \text{NO}_x$ interaction, *Nature*, 1985, **315**, 207~210.
- 3 Bojkov, R. D., L. Bishop, W. J. Hill, G. C. Reinsel and G. C. Tiao, A statistic trend analysis of revised Dobson total ozone data over the Northern Hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**, 9785~9807.
- 4 Stolarski, R. S., R. Bojkov, L. Bishop, C. Zerefos, J. Stachdin and J. Zawodny, Measured trends in stratospheric ozone, *Science*, 1992, **256**, 342~349.
- 5 Reinsel, G. C., G. C. Tiao, D. J. Wuebbles, J. B. Kerr, A. J. Miller, R. M. Nagatani, L. Bishop, and L. H. Ying, Seasonal trend analysis of published ground-based and TOMS total ozone data through 1991, *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D3), 5449~5464.
- 6 Kundsén, B. M., N. Larsén, I. S. Mikkelsen, J.-J. Morcrette, G. O. Braathén, E. Kyro, H. Fast, H. Gernandt, H.

- Kanzawa, H., Nakane, V., Dorokhov, V., Yushkov, G., Hansen, M., Gil and R. J. Shearman, Ozone depletion in and below the Arctic vortex for 1997, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(5), 627~630.
- Müller R., P. J. Crutzen, J.-U. Groß, C. Brühl, J. M. Russell III, H. Gernandt, D. S. McKenna and A. F. Tuck, Severe chemical ozone loss in the Arctic during the winter of 1995-96, *Nature*, 1997, **389**, 709~712.
- Pierce, R. B., T. D. Fairlie, E. E. Remsburg, J. M. Russell III, W. L. Grose, HALOE observations of the Arctic vortex during the 1997 spring: horizontal structure in the lower stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(22), 2701~2704.
- Rex, M., N. R. P. Harris, P. Von Der Gathen, R. Lehmann, G. O. Braathen, E. Reimer, A. Beck, M. P. Chipperfield, R. Alfier, M. Allaart, F. O'Connor, H. Dier, V. Dorokhov, H. Fast, M. Gil, E. Kyro, Z. Litynska, I. S. Mikkelsen, M. G. Molyneux, H. Nakane, J. Notholt, M. Rummukainen, P. Viatte and J. Wenger, Prolonged stratospheric ozone loss in the 1995-96 Arctic winter, *Nature*, 1997, **389**, 835~838.
- Gathen, P., M. Rex, N. R. P. Harris, D. Lucic, B. M. Knudsen, G. O. Braathen, H. D. Backer, R. Fabian, H. Fast, M. Gil, E. Kyro, I. S. Mikkelsen, M. Rummukainen, J. Stahelin and C. Varotsos, Observed evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in winter 1991-92, *Nature*, 1995, **375**, 131~134.
- Braathen, G. O., M. Rummukainen, E. Kyro, U. Schmidt, A. Dahlback, T. S. Jorgensen, R. Fabian, V. V. Rudakov, M. Gil and R. Borchers, Temporal development of ozone with the Arctic vortex during the winter of 1991/92, *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**(13), 1407~1410.
- Orsolini, Y., D. Cariolle, M. Déqué, Ridge formation in the lower stratosphere and its influence on ozone transport: A general circulation model study during late January 1992, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(D6), 11113~11135.
- Henriksen, K., E. I. Terez, G. A. Terez, V. Roldungin, T. Svenoe and S. H. H. Larsen, On the stationarity of the ozone layer in Norway and U.S.S.R., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**(2), 145~154.
- Waibel, A. E., Th. Peter, K. S. Carslaw, H. Oelhaf, G. Wetzel, P. J. Crutzen, U. Poschl, A. Tsias, E. Reimer and H. Fischer, Arctic Ozone Loss Due to Denitrification, *Science*, 1999, **283**(5410), 2064~2069.
- Zou Han, Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(9), 1029~1032.
- Zou Han and Gao Yongqi, Vertical ozone profile over Tibet using SAGE I and II data, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**(4), 505~512.
- 周立波, 邹捍, 季崇萍, 吴瑞欢, 斯堪的纳维亚臭氧亏损和地面加热, 气候与环境研究, 2000, **5**(3), 233~241.
- 周立波, 邹捍, 季崇萍, 斯堪的纳维亚上空的臭氧亏损和北大西洋海温, 大气科学, 2001, **25**(2), 253~259.
- 邹捍, 周立波, 季崇萍, 王维, 蹇泳啸, 吴瑞欢, 斯堪的纳维亚臭氧亏损及其可能机制, 自然科学进展, 2001, **11**(3), 277~281.

Scandinavia Ozone Loss and Upward Mass Transfer

Zou Han, Zhou Libo, Ji Chongping, Wang Wei and Jian Yongxiao

(Environment and Polar Program, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Analysis on TOMS ozone shows a clear ozone loss, -50 DU (15% of the total ozone), over the Scandinavia. The seasonal ozone loss has the maximum -54 DU in January and minimum 1.9 DU in July. Correlation analysis showing high correlation coefficients between the ozone loss and the surface temperature and the upward mass transferring indicates that the possible mechanism of the Scandinavian ozone loss can be the upward mass transfer due to the surface heating.

Key words: ozone; mass transfer; Scandinavia.