

斯堪的纳维亚臭氧亏损和地面加热*

周立波 邹捍 季崇萍

(中国科学院大气物理研究所环境与极地研究部, 北京 100029)

吴瑞欢

(浙江省萧山市气象局, 萧山 311200)

摘要 研究表明, 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。对臭氧亏损和地面加热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的感热通量、潜热通量、净辐射通量以及总的热通量关系极其密切, 其相关系数均在 -0.87 以上。由此, 我们认为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; 地面加热; 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, 使地球的生物圈受到保护。臭氧的消亡主要是由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造成。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]。自发现南极臭氧洞^[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)会造成臭氧的化学削减, 即北极臭氧减少的机制与南极很相似^[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月份^[11,12]; 模式研究指出冬季北极20 km以下出现一个强烈的臭氧亏损区^[13]; 最近的研究发现脱氮过程是造成北极臭氧减少的一个新的因子^[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。因此, 北极臭氧亏损的确切机制还有待研究。邹捍等^[15,16]在分析了青藏高原臭氧亏损的机制, 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。

斯堪的纳维亚是一个人口相对密集的地区, 在该区出现臭氧低值会严重损害人类健

1999-11-19收到, 2000-01-06收到修改稿

* 本工作得到中国科学院大气物理研究所重点创新项目8-2212支持和国家海洋局“中国首次北极科学考察”研究经费支持

康。同时, 研究该区域的臭氧亏损对了解斯堪的纳维亚地区紫外辐射以及北极地区臭氧亏损的机制都是很重要的。本文将通过研究该地区气候平均臭氧的季节变化和地面加热来揭示导致该地区臭氧亏损的可能机制。

2 资料和方法

本文使用的大气臭氧资料是由美国国家宇航局 (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, 观测时间是从 1979 年至 1992 年。大气环流资料来自于同时间的 NCAR/NCEP 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 ($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{E}$, $55^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$), 对感热通量、潜热通量等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区域平均范围的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亏损区, 该低值区覆盖了整个挪威中部和邻近的挪

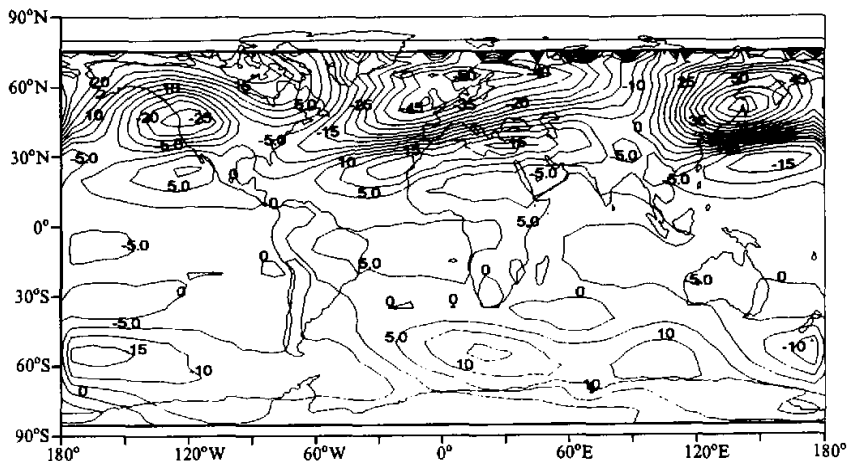


图 1 1979~1992 年冬季臭氧纬向偏差的分布
单位: DU, 等值线间隔: 5 DU

威海域。臭氧亏损最大值位于 (64°N , 8°E), 最大亏损区为 -50 DU, 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 $0 \sim -0.5$ DU。图 2 是臭氧的区域平均、同纬度的纬向平均及其纬向偏差的季节变化。臭氧纬向平均的季节变化呈正弦扰动, 在 3 月出现最大值为 425 DU, 9 月出现最小值为 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明显地看出, 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%。

3.2 感热通量

图 3 给出了 1979~1992 年冬季地面向大气输送感热通量的分布状况。可以看出, 感热通量在斯堪的纳维亚地区有一个明显的高值区, 该高值区覆盖了挪威中部和邻近的挪威海域。在臭氧亏损极大值的斯堪的纳维亚地区, 地面向大气输送的感热通量也出现极大值, 两者十分相似; 冬季的感热通量明显比夏季的强。在冬季, 斯堪的纳维亚地区地面向大气输送的感热通量平均达到 $75 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上 (中心值为 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上); 而夏季其覆盖范围明显缩小, 中心值也显著降低 (几乎为 0)。图 4 给出了斯堪的纳维亚地区地面向大气输送的感热通量区域平均及纬向偏差和臭氧亏损纬向偏差的季节变化。可以看出, 感热通量和臭氧亏损基本反向相关: 冬季臭氧亏损极大值 (-54 DU, 1 月份) 对应感热通量输送的极大值 (区域平均为 $29.1 \text{ W}/\text{m}^2$, 1 月份; 纬向偏差为 $30.2 \text{ W}/\text{m}^2$, 1 月份); 夏季的臭氧亏损极小值 (盈余) (1.9 DU, 7 月份) 对应感热通量输送的极小值 (区域平均 $5.0 \text{ W}/\text{m}^2$, 8 月份; 纬向偏差为 $-7.6 \text{ W}/\text{m}^2$, 7 月份)。相关分析表明该地区臭氧亏损和地面向大气输送感热通量区域平均及纬向偏差的相关系数分别达到 -0.89 和 -0.94 。

3.3 潜热通量

从冬季地面向大气输送潜热通量的分布 (图 5) 可知, 潜热通量在大部分挪威海区

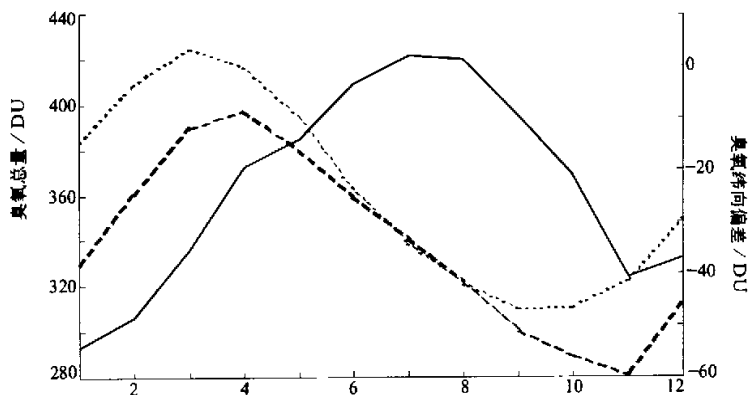


图 2 1979~1992 年斯堪的纳维亚地区臭氧总量的季节变化
实线: 臭氧纬向偏差; 虚线: 臭氧总量; 点线: 臭氧纬向平均;

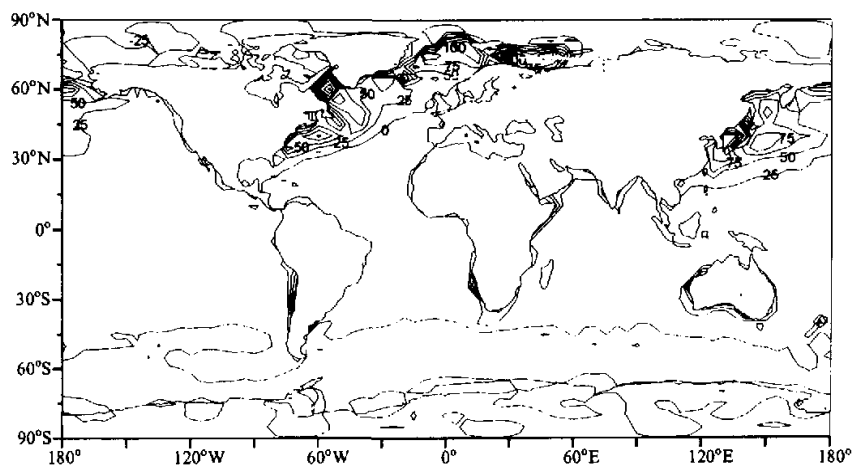


图3 1979~1992年冬季地面向大气输送的感热通量分布
单位: W/m^2 , 等值线间隔: $25 \text{ W}/\text{m}^2$

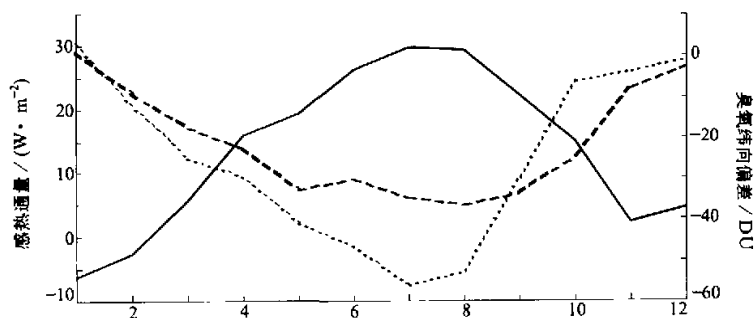


图4 斯堪的纳维亚地区臭氧总量和地面向大气输送的感热通量的季节变化
实线: 臭氧纬向偏差; 虚线: 感热通量; 点线: 感热通量纬向偏差

是高位, 与臭氧亏损极大值相对应, 其量级和感热通量一样 (平均值为 $75 \text{ W}/\text{m}^2$ 左右), 但范围略小。夏季的潜热通量范围和数值都有明显减少。地面对大气输送潜热通量的区域平均和纬向偏差分别在 12 月和 6 月出现极大值和极小值 (图 6), 而斯堪的纳维亚地区的臭氧亏损的纬向偏差出现极值的月份分别为 1 月和 7 月, 即滞后了 1 个月。同样的相关分析表明臭氧偏差和潜热通量的区域平均及纬向偏差的相关系数分别为 -0.84 和 -0.87 , 说明该地区的臭氧亏损和潜热通量关系也十分密切。

3.4 地面加热

图 7 给出了地面向大气输送的净长波辐射、感热通量、潜热通量和总热通量的纬向偏差。地面对大气的加热 (包括净长波辐射、感热通量和潜热通量) 的纬向偏差 ($5^\circ\text{W} \sim 5^\circ\text{E}$, $55 \sim 65^\circ\text{N}$) 在冬季出现最大值和夏季出现最小值。总热通量分别在 1 月出现最

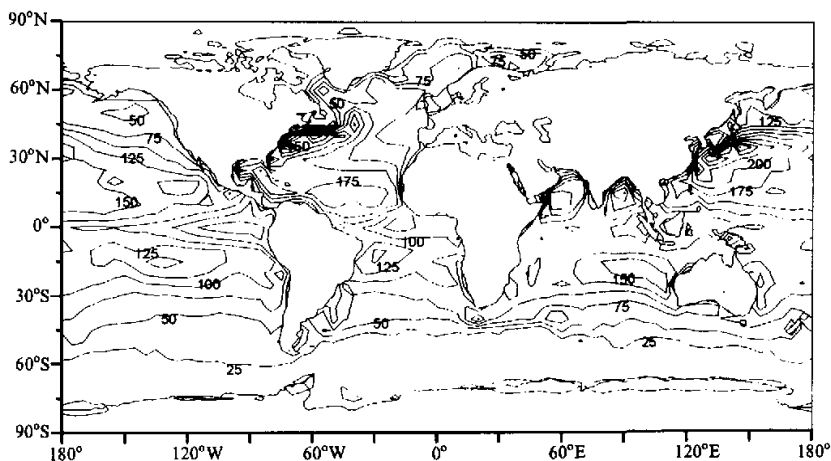


图5 1979~1992年冬季地面向大气输送潜热通量的分布
单位: W/m^2 , 等值线间隔: $25 \text{ W}/\text{m}^2$

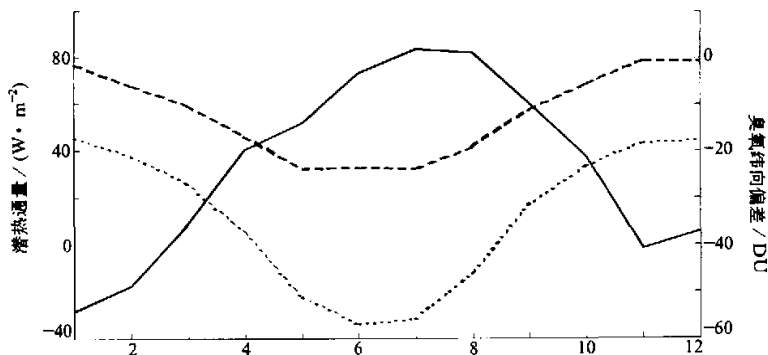


图6 斯堪的纳维亚地区臭氧总量和地面向大气输送的潜热通量的季节变化
实线: 臭氧纬向偏差; 虚线: 潜热通量; 点线: 潜热通量纬向偏差

大值 ($94.96 \text{ W}/\text{m}^2$) 和 7 月出现最小值 ($-37.88 \text{ W}/\text{m}^2$), 与臭氧亏损的出现极值时间一致。臭氧的纬向偏差与各个热通量分量 (净长波辐射通量、感热通量、潜热通量) 纬向偏差的相关系数分别为 -0.96 、 -0.89 、 -0.87 , 而臭氧和总热通量的相关系数达到了 -0.90 。由此我们认为可能是地面加热引发的抬升造成了斯堪的纳维亚地区上空的臭氧亏损。

4 结论

对 TOMS 臭氧和 NCEP 大气环流资料的分析发现:

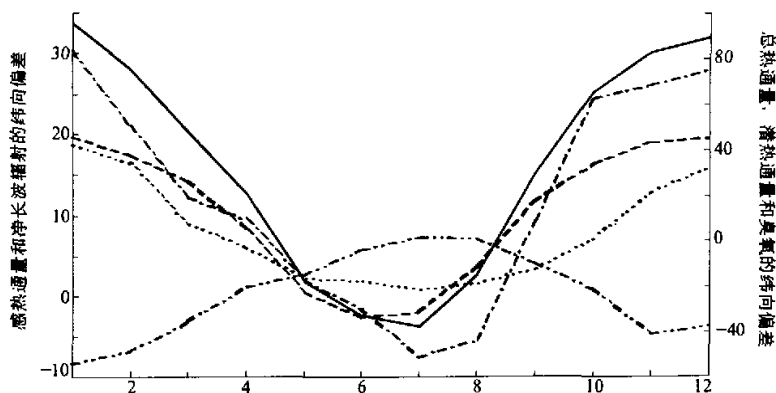


图7 地面向大气输送的总热通量(实线)、感热通量(点实线)、潜热通量(虚线)、净长波辐射(点线)和臭氧纬向偏差(点虚线)的季节变化

(1) 冬季斯堪的纳维亚地区存在严重的臭氧亏损区, 亏损中心最大值达-50 DU (1月), 臭氧亏损季节变化的最大值出现在1月(-54.3 DU), 大约相当于该月平均臭氧总量的16%。

(2) 斯堪的纳维亚地区地面向大气输送的净长波辐射、感热通量、潜热通量和总热通量的纬向偏差与该地区臭氧亏损纬向偏差的相关系数分别为-0.96、-0.89、-0.87和-0.90, 表明该地区地面加热与臭氧亏损密切相关。

因此, 斯堪的纳维亚地区地面对大气的加热引起的抬升可能导致该地区的臭氧亏损, 但这需要进一步的工作和资料加以证实。

致谢 特别感谢中国科学院大气物理研究所叶笃正院士和高登义教授的指导和建议, 和 Ms. Patricia 等人 (NASA Goddard Space Flight Center) 提供的 TOMS 臭氧总量资料

参 考 文 献

- Appenzeller, C., J. R. Holton, Seasonal variation of mass transport across the tropopause, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D10), 15071~15078.
- 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.
- 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.
- Stolarski, R. S. et al., Measured trends in stratospheric ozone, *Science*, 1992, **256**, 342~349.
- 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.
- Kundsen, B. M., N. Larsen, I. S. Mikkelsen, J.-J. Morcrette, G. O. Braathen, 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.

- 7 Muller R., P. J. Crutzen, J.-U. Grooß, C. Bruhl, J. M. Russell III, H. Gernandt, D. S. McKenna and A. F. Tuc, Severe chemical ozone loss in the Arctic during the winter of 1995-96, *Nature*, 1997, **389**, 709~712.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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. Stabelin and C. Varotsos, Observed evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in winter 1991-92, *Nature*, 1995, **375**, 131~134.
- 11 Braathen, G. O., M. Rummukainen, E. Kyro, U. Schmidt, A. Dahlback, T. S. Jørgensen, 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.
- 12 Orsolini, Y., D. Cariolle and M. De que, 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.
- 13 Henriksen, K., E. I. Terez, G. A. Terez, V. Roldungin, T. Svenøe 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.
- 14 Waibel, A. E., Th. Peter, K. S. Carslaw, H. Oelhaf, G. Wetzol, P. J. Crutzen, U. Poschl, A. Tsias, E. Reimer and H. Fischer, Arctic Ozone Loss Due to Denitrification, *Science*, 1999, **283**(5410), 2064~2069.
- 15 Zou Han, Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(9), 1029~1032.
- 16 Zou Han and Y. Gao, Vertical ozone profile over Tibet using SAGE I and II data, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**(4), 505~512.

The Scandinavia Ozone Loss and the Surface Heating

Zhou Libo, Zou Han and Ji Chongping

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Wu Ruihuan

(Meteorological Bureau of Xiaoshan in Zhenjiang Province, Xiaoshan 311200)

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 the minimum 1.9 DU in July. Correlation analysis on the ozone loss and the surface-air heat fluxes showing high correlation coefficients indicates that the possible mechanism of the Scandinavia ozone loss can be the upward mass transfer due to the surface heating.

Key words: ozone; surface heating; Scandinavia