

斯堪的纳维亚臭氧亏损及其可能机制*

邹捍¹ 周立波¹ 季崇萍¹ 王维¹ 蹇泳啸¹ 吴瑞欢²

1. 中国科学院大气物理研究所环境与极地研究部, 北京 100029; 2. 浙江省萧山市气象局, 萧山 311200

摘要 卫星资料分析表明: 北极地区的一个重要臭氧亏损区域位于斯堪的纳维亚 (Scandinavia) 上空, 冬季臭氧总量亏损为 50 DU, 相当于当地臭氧总量的 15%. 研究表明: 冬季北大西洋暖流向北输送热量造成斯堪的纳维亚附近的高海温是该地区臭氧局地亏损的原因. 冬季北大西洋东部的高海温对大气进行局地加热, 使得整层物质抬升, 进而在 330 K 等熵面高度附近造成臭氧辐散, 使得该区域整层大气臭氧总量减少.

关键词 臭氧 北极 北大西洋暖流

地面和高空观测、化学分析以及数值模拟研究证实北极也同南极一样存在臭氧局地亏损和减少趋势. 关于北极臭氧亏损的机制, 有人认为可能与南极臭氧洞的机制相似^[1]. 例如, 在冬末春初强极涡条件下, 1994, 1996 和 1997 年平流层低层温度和臭氧减少密切相关^[2-6]. Waibel 等^[7]最近发现脱氮过程是造成北极臭氧减少的一个新的因素. 但是, 其他个例研究表明: 1991/92 冬季北极臭氧极小值出现在 1 月份 (远远早于极涡的出现), 臭氧亏损位于较低的高度 (425 K 等位温面, 远远低于南极臭氧亏损的高度)^[8,9]. Orsolini 等^[10]在模式研究中也证实了 1991/92 冬季北极强烈的臭氧亏损区出现在 20 km 以下. Henriksen 等^[11]还发现挪威和前苏联的臭氧观测中没有臭氧减少的趋势. 这些研究都从不同侧面反映出: 北极臭氧亏损的机制可能不同于南极的臭氧亏损. 因此, 北极臭氧亏损的机制有待于进一步研究.

邹捍等分析了青藏高原臭氧亏损的机制^[12,13]. 他们研究了 TOMS 臭氧和地面对大气加热的关系后指出: 青藏高原地区臭氧亏损的季节变化与该地区地面对大气的加热密切相关, 相关系数达 -0.97. 他们发现了在 18 km 以下存在向上的物质输送, 并且在该上升区域的顶部 (即 18 km 高度) 处出现臭氧的最大亏损. 因此, 他们认为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.

斯堪的纳维亚是欧洲的重要地区, 臭氧亏损造成的 UVB 辐射加强将严重损害当地的地面生物系统. 斯堪的纳维亚位于北极地区, 研究该区域的臭氧亏损对了解北极地区臭氧亏损的机制有重要意义. 本文将通过卫星和气候资料分析, 研究斯堪的纳维亚地区的臭氧亏损, 给出其气候平均意义下的描述, 并提出不同于南极臭氧亏损的物理机制.

2000-04-14 收稿, 2000-07-20 收修改稿

* 中国科学院重大项目 (KZ951-A-205-05)、中国科学院大气物理研究所知识创新项目 (8-2212)、国家自然科学基金项目 (批准号: 40075029)、国家海洋局“中国首次北极科学考察”和中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室研究经费资助

1 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. 大气环流和海表温度(SST)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(0~10°E, 55~65°N),对大气环流资料进行区域平均的范围为(5°W~5°E, 55~65°N). 这里,同高层臭氧范围相比,地面热通量和海表温度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,我们对臭氧总量和大气环流资料(海表温度除外)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.

2 斯堪的纳维亚臭氧亏损

图 1 给出了冬季(12~2月)气候平均(1979~1992年)臭氧总量纬向偏差的全球分布.可以看出在冬季斯堪的纳维亚及其邻近区域存在一个严重的臭氧亏损区,覆盖了整个挪威中部和邻近的挪威海域,其中心位于(64°N, 8°E),最大亏损达到 -50 DU(Dobson Unit)以上,大约相当于该区域平均臭氧亏损的 15%. 夏季该区域的臭氧亏损很小,为 0~-0.5 DU. 图 2 给出了斯堪的纳维亚地区臭氧总量的季节变化. 55~65°N 中纬向季节平均臭氧总量呈正弦变化,在 3 月出现极大值(425 DU),9 月出现极小值(310 DU),这与北半球其他纬度带臭氧总量纬向平均的变化很相似. 同臭氧总量纬向平均变化相比,斯堪的纳维亚地区的臭氧总量存在一个滞后的极大值(4 月, 397 DU)和极小值(11 月, 281 DU). 该地区的臭氧总量纬向偏差变化为:冬季出现臭氧亏损极大值(1 月, -54.3 DU),该值相当于该月平均臭氧总量的 16% 左右;夏季出现

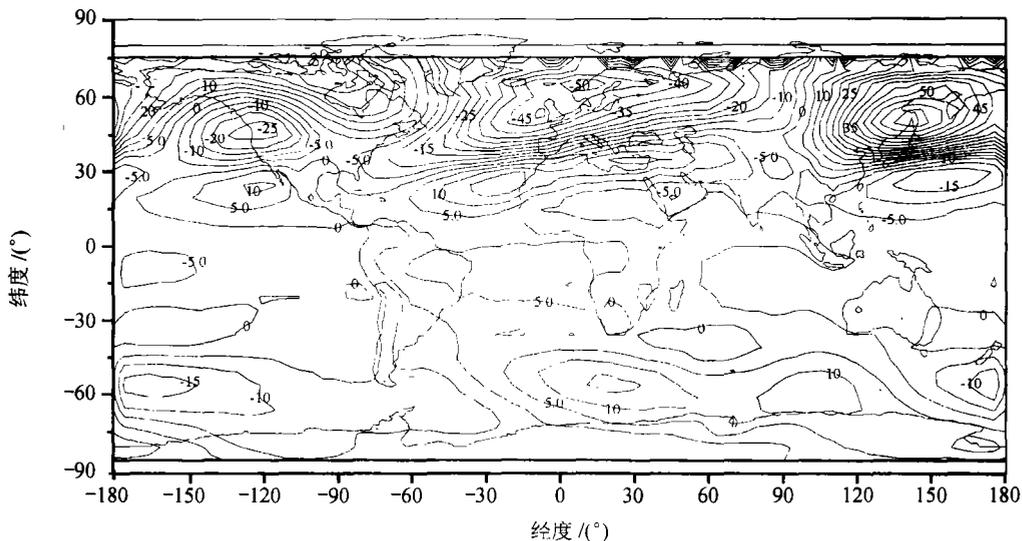


图 1 1979~1992 年冬季(12~2月)臭氧纬向偏差的分布

单位: DU, 等值线间隔: 5 DU

臭氧亏损极小值(7月, 1.9 DU).

3 讨论

邹捍等^[12,13]在青藏高原臭氧亏损的研究中提出:青藏高原地面对大气的加热作用是该地区5月出现臭氧亏损的根本原因. 在对斯堪的纳维亚地区臭氧亏损的研究中,虽没有象青藏高原那样抬高的地形加热,但当冬季该区域周边陆地和海域冷却时,北大西洋暖流从墨西哥湾带来的热量同样能在该区域产生对大气的局地加热. 这种热力作用形成该地区物质的抬升,将低层贫臭氧空气向上输送,冲淡整层的臭氧浓度.

3.1 北大西洋暖流

图3给出了1979~1992年冬季(12~2月)气候平均海表温度(SST)分布. 北大西洋暖流强烈地向北输送热量,从而导致沿挪威海岸直至斯堪的纳维亚中部形成一条6.0℃的暖舌,而SST在北大西洋西部为0℃左右,造成了海温巨大的东西向差异. 相比之下,夏季北大西洋海温的东西向差异要比冬季弱得多. 图4给出了北大西洋东(SST₁)、西(SST₂)部SST及其东西向差异(ΔSST)的季节变化曲线. 可以看出:北大西洋海温东西向差异(ΔSST)在冬季出现极大值(1月, 8.03℃),夏季出现极小值(7月, 3.31℃). 比较ΔSST和臭氧纬向偏差的季节变化曲线可以看出,臭氧亏损极大值对应ΔSST的极大值,臭氧亏损极小值对应ΔSST的极小值,两者出

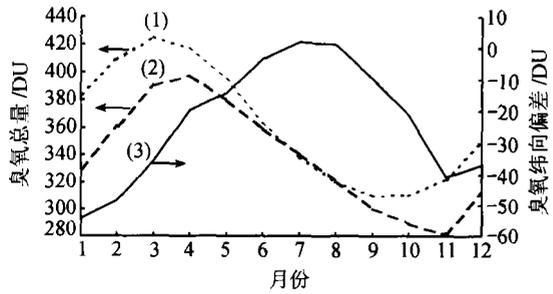


图2 1979~1992年斯堪的纳维亚地区臭氧总量季节变化
1为纬向平均臭氧总量(55~65°N),2为斯堪的纳维亚地区(0~10°E, 55~65°N)臭氧总量,3为斯堪的纳维亚臭氧总量的纬向偏差

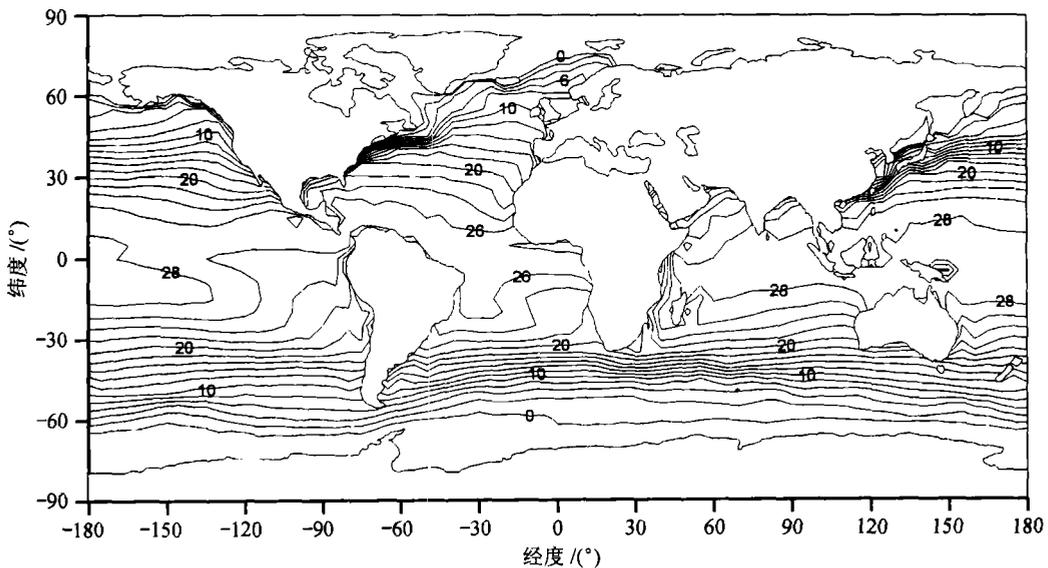


图3 1979~1992年冬季(12~2月)全球海表温度(SST)分布
单位:℃,等值线间隔:2℃

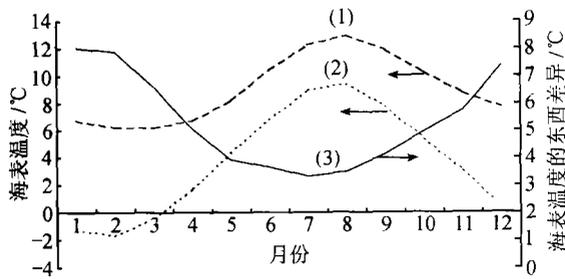


图 4 北大西洋海表温度季节变化

1 为北大西洋东部(0~10°W, 55~65°N)海温(SST₁), 2 为北大西洋西部(10~70°W, 55~65°N)海温(SST₂), 3 为北大西洋海温东西向差异(ΔSST)

(加热为 94.96 W/m^2 , 臭氧亏损为 -54.3 DU), 7 月出现极小值(加热为 -37.88 W/m^2 , 臭氧亏损为 1.9 DU), 该地区臭氧总量的亏损与地面对大气加热纬向偏差间的相关系数为 -0.90 . 因此, 北大西洋暖流带对大气的加热与该地区大气臭氧亏损密切相关.

3.3 物质的向上输送

地面对大气的加热最终将导致物质的向上输送. 图 6 给出了斯堪的纳维亚上空等物质面的季节变化. 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 1~7 月逐渐下降. 在 330 K 以上等熵面也有同样的趋势, 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. 这一物质抬升辐散过程造成低层贫臭氧空气进入该地区, 高层高臭氧浓度空气向外辐散, 最终造成整层大气臭氧总量亏损. 由于 1 月份的物质抬升和 330 K 附近的辐散最为严重, 当地臭氧总量亏损的极大值也出现在这个月份. 因此, 可以认为北大西洋暖流导致的物质抬升与该地区臭氧亏损的关系密切.

4 结论

对 TOMS 臭氧和 NCEP 大气环流资料的分析发现:

(1) 从冬季气候平均的臭氧纬向偏差分布图上看, 斯堪的纳维亚地区存在严重的臭氧亏损, 其亏损中心值达 50 DU ; 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) 斯堪的纳维亚地区臭氧亏损的季节变化与北大西洋东西向海温差异(ΔSST)密切相关, 其相关系数为 -0.96 ;

(3) 该地区地面对大气加热与臭氧亏损密切相关, 其相关系数为 -0.90 ;

现极大值和极小值的月份也是一致的. 斯堪的纳维亚臭氧亏损和北大西洋东西向海温差异的相关系数为 -0.96 . 此外, 1979~1992 年中 168 个月的 ΔSST 与臭氧亏损间的相关系数为 -0.70 . 因此, 北大西洋暖流导致的北大西洋东部高海温对斯堪的纳维亚地区臭氧亏损有重要影响.

3.2 地面对大气输送的热通量

图 5 为斯堪的纳维亚地区臭氧亏损与该地区地面对大气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良好的相关, 即它们同时在 1 月出现极大值

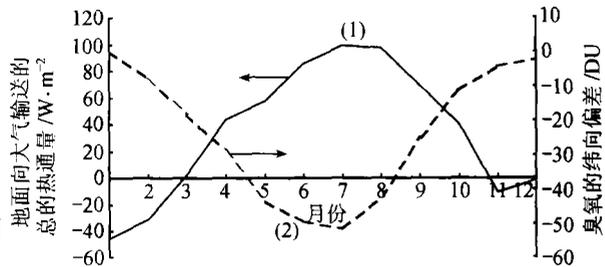


图 5 斯堪的纳维亚地区臭氧纬向偏差和地面-大气总热通量纬向偏差的季节变化

1 为臭氧纬向偏差, 2 为热通量纬向偏差

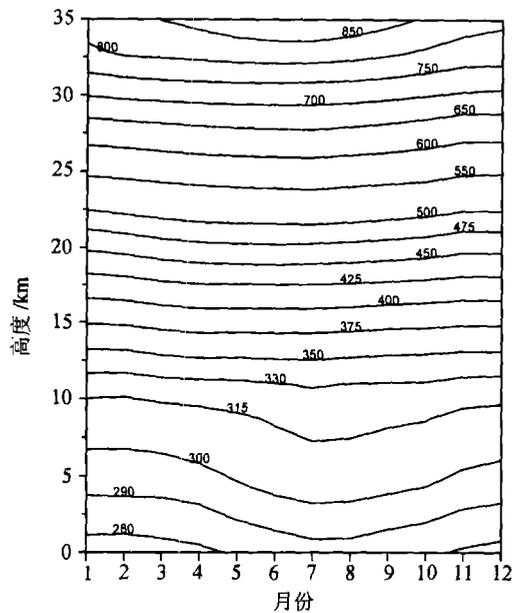


图6 斯堪的纳维亚地区上空等熵面高度季节变化

图中数字为位势温度,单位:K

(4) 该地区臭氧极大值以下的物质向上输送与当地大气臭氧总量亏损关系密切。

以上结果表明,北大西洋暖流加热造成的物质抬升可能对冬季斯堪的纳维亚地区臭氧亏损有重要的贡献。

致谢 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。同时,作者向提供 TOMS 臭氧总量资料的(NASA Goddard Space Flight Center)Ms. Patricia 等及提供 NCAR/NCEP 资料的美国大气研究中心表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Brune W H, et al. The potential ozone depletion in Arctic Polar stratosphere. *Science*, 1991, 252: 1260
- 2 Coy L, et al. Meteorology of the polar vortex: Spring 1997. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(22): 2693
- 3 Kundsén B M, et al. Ozone depletion in and below the Arctic vortex for 1997. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(5): 627
- 4 Manney G L, et al. Evidence for Arctic ozone depletion in late February and early March 1994. *Geophys Res Lett*, 1995, 22(21): 2941
- 5 Manney G L, et al. MLS observations of Arctic ozone loss in 1996-97. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(22): 2697
- 6 Müller R, et al. Severe chemical ozone loss in the Arctic during the winter of 1995-96. *Nature*, 1997, 389: 709
- 7 Waibel A E, et al. Arctic ozone loss due to denitrification. *Science*, 1999, 283(5410): 2064
- 8 McCormack J P, et al. The frequency and size of ozone "mini-hole" events at northern midlatitudes in February. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(21): 2647
- 9 Gathen P, et al. Observed evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in winter 1991-92. *Nature*, 1995, 375: 131
- 10 Orsolini Y, et al. 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
- 11 Henriksen K, et al. On the stationarity of the ozone layer in Norway and USSR. *J Atmos Terr Phys*, 1993, 55(2): 145
- 12 Zou H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. *Geophys Res Lett*, 1996, 23(9): 1029
- 13 Zou H, et al. Vertical ozone profile over Tibet using SAGE I and II data. *Adv Atmos Sci*, 1997, 14(4): 505