

南极臭氧洞与南极涡旋的变化 ——IAP模式的试验结果*

陈月娟

张弘

毕训强

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 通过对 IAP9 层全球大气环流模式试验结果的分析, 讨论了 1987 年南极臭氧洞对平流层大气辐射加热率和温、压、风场的影响。结果表明, 南半球高纬和极地平流层臭氧含量的耗损, 使该地区辐射加热率明显减小、气温明显下降, 等压面明显下降, 南极涡旋明显加强, 说明南极春季涡旋的强弱与该地区臭氧含量及其热状况有密切关系。

关键词 南极臭氧洞 南极涡旋 数值试验

1 引言

近十几年来, 大量观测资料表明, 地球臭氧层破坏的程度正在不断加剧。1985 年发现南极“臭氧洞”以来, 到 1987 年它变得既宽又深, 1988 年虽然有所缓解, 但 1989 年末以后到 90 年代的前几年里, 每年南半球春季都出现很强的“臭氧洞”, 在 1993 年 10 月 8 日由 Meteor 3/TOMS 甚至还观测到南极上空有臭氧总量为 85 DU 的低值区^[1], 最近的报告表明, 1994 年到 1996 年南极臭氧洞还在扩大。

臭氧对太阳紫外辐射的强烈吸收是平流层大气运动的主要热源, 平流层臭氧的存在对平流层的温度场、气压场和风场起着决定性作用。通过上下层的相互作用, 它又会影响到全球的大气环流^[2]。南半球极地和高纬地区臭氧总量严重减少时, 必然引起南半球热量的收支的改变, 从而影响南半球大气和地面的热状况, 进而影响全球大气环流和气候的变化。对此国外做过一些关于臭氧洞的气候效应的数值模拟研究, 如 1988 年 Kiehl^[3]等用 NCAR 模式模拟过高纬地区热力结构对南极臭氧洞的响应, 其模拟结果表明在 10 月份南极平流层低层的温度比控制试验低 5°C 左右。1990 年 Cariolle^[4]等也模拟到类似的结果, 南极涡旋 50 hPa 降温达 6~8°C。1994 年 Mahlman 等^[5]用 GFDL 模式进行了 5 年的积分来探讨南极臭氧洞的热力、动力作用, 结果表明南极春末由于臭氧含量的耗损平流层低层降温 8°C, 模拟的南极涡旋在 50 hPa 等压面上加深了约 180 位势米。这些结果对我们认识南极臭氧洞对全球气象场的动力和热力作用有一定好处。但这方面工作做得还不够多, 一方面, 他们模拟中用的臭氧洞资料大多是模式计算出来的, 不完全是观测资料。另一方面, 他们主要讨论了臭氧洞引起平流层辐射加热率、温

1997-09-11 收到, 1998-01-12 收到修改稿

* 国家攀登项目“气候动力学和气候预测理论”以及大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室共同资助

度场和气压场的变化, 对风场的变化很少讨论。国内这方面工作做得更少。基本上还未有人用三维大气环流模式对南极臭氧洞问题进行数值模拟。为此, 我们用 1987 年 8~12 月南半球臭氧的观测资料在 IAP9 层全球大气环流模式中进行了一次数值模拟试验。目的是: (1) 看看国内自行设计的模式对南极臭氧洞的响应如何; (2) 模拟和讨论南极臭氧洞对其他气象场的影响。本文着重讨论南极臭氧洞对南极涡旋影响的数值模拟结果。

2 试验情况简介

本试验采用的模式是中国科学院大气物理研究所曾庆存、张学洪等设计的 IAP9 层全球大气环流模式^[6~8]。试验所用的初始气象场是 IAP 模式用气候平均的海温和海冰为下边界条件, 平流层输入气候平均的臭氧含量积分得到的 1987 年 7 月 31 日的气象场。为了便于比较, 我们做了两组模拟试验: 一组是用上述的海温、海冰和臭氧的气候平均值继续积分到 1988 年 5 月 31 日 (以下称为控制试验)。另一组试验所用的下边界条件与第一组相同, 但南半球高纬和极地平流层臭氧代之以 1987 年 8 月到 12 月的实测值, 积分到 1987 年 12 月 31 日, 1988 年 1 月 1 日以后臭氧含量仍用气候平均值, 也积分到 1988 年 5 月 31 日 (以下称为有臭氧洞模拟试验), 然后逐旬、逐月地对比两组试验的结果, 找出它们的差异, 以探讨臭氧洞期间和消失后的半年内它所造成的影响。关于这次试验中臭氧资料的处理方法及其对大气加热率的计算方案我们在文献[9]中已详细介绍。

3 试验结果

我们对臭氧洞试验和控制试验的计算结果分别进行了逐旬、逐月的分析, 然后将这两组试验得到的各种气象量进行了一一对比。我们看到, 南半球高纬和极地平流层臭氧含量的变化不仅对南半球平流层的温、压、风场有明显的影响, 同时还影响到北半球和对流层, 进而对全球大气环流和气候产生影响。关于南极臭氧洞对全球地面气温、气压、风场和降水等的影响, 我们已有另文详述^[10], 这里不再重复。下面主要讨论南极臭氧洞出现之后, 平流层的气象场的变化。

3.1 臭氧洞期间辐射变温率和温度场的变化

南半球高纬和极地平流层臭氧含量的减少, 首先改变该地区的辐射变温率。图 1 是两组试验模拟的 25 hPa 等压面上纬向平均的总辐射加热率差值 (臭氧洞试验值减控制试验值, 下同) 随纬度和时间的分布。模拟过程中, 从 1987 年 8 月份开始, 随着臭氧含量的减少, 计算得到的南纬 60° 以南 200 hPa 到 25 hPa 大气层的辐射变温率也越来越小。到 1987 年 10 月份臭氧洞最深的时候, 模拟得到的在南极上空平流层的辐射变温率相对于没有臭氧洞情况下减少了 0.2~0.43°C/d, 11 月份则减少了 0.36~0.6°C/d。1987 年 12 月份南极上空臭氧含量迅速回升, 两组试验所模拟到的辐射变温率差异明显缩小, 不超过 0.2°C/d。之所以在臭氧洞情况下面 11 月份平流层的辐射加热率比 10 月份的变化更大些, 是因为虽然 11 月份南极上空臭氧含量比 10 月多些, 但

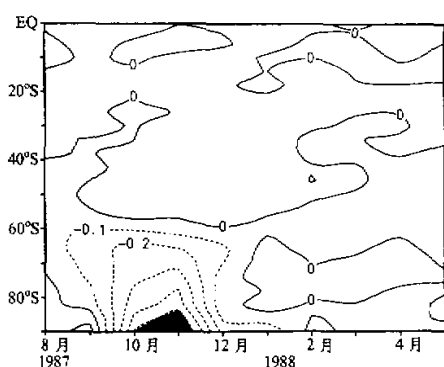


图1 南半球 25 hPa 等压面纬向平均
总辐射加热率差值分布
(单位: $^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 臭氧洞试验值减控制试验值)

因多年平均的 11 月份南极上空臭氧含量也比 10 月多, 因此 1987 年 11 月臭氧距平值并不比 10 月少多少。由于太阳赤纬的季节变化, 11 月份到达南极上空的太阳辐射却比 10 月份多了许多。(在控制试验的计算中得到 10 月份南极上空 25 hPa 附近平均太阳辐射加热率为 $1.2^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 而在 11 月则为 $1.92^{\circ}\text{C}/\text{d}$)。这才使得有臭氧洞情况下 11 月份的辐射变温率的减少量大于 10 月份。如果考虑相对变化率的话, 还是 10 月份的要大些。由于辐射变温率的上述变化, 使得在有臭氧洞情况下模拟到的南半球高纬和极地平流层的气温明

显低于不考虑臭氧洞的试验结果。两组试验模拟的 10 月和 11 月南半球 25 hPa 等压面温度差值的分布如图 2 所示。可以看出, 在臭氧洞试验中计算出的 1987 年 10 月和 11 月南极上空 25 hPa 等压面上的气温比控制试验的计算值低 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$, 这与 Kiehl 和 Cariolle 的模拟结果一致。图 3 给出两试验模拟的 25 hPa 等压面纬向平均温度差值的逐月变化。可以看出, 虽然 10 月份臭氧洞最强, 但最大降温出现在 11 月份。在臭氧洞消失之后, 从次年 1 月开始, 南极上空平流层气温恢复正常或稍有回升。

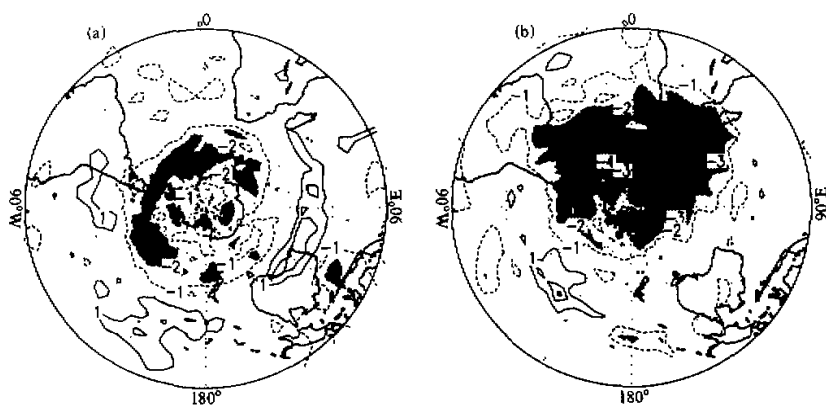


图2 南半球 25 hPa 等压面气温差值图
(a) 10 月份; (b) 11 月份 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 臭氧洞试验值减控制试验值)

3.2 臭氧洞期间南极上空气压场的变化

由于辐射变温率的这种变化和南极上空平流层明显降温, 造成了臭氧洞出现之后南极上空平流层各等压面的下降, 使南极冷涡发生明显变化。用臭氧气候平均值模拟出的平流层南极涡旋基本上以南极为中心, 等压面上的等势高度线基本上沿纬圈分布。在

臭氧洞的影响下在 200 hPa 以上南极涡旋的增强非常明显, 而且越往上 (直到模式顶层 25 hPa) 越强。图 4a 给出 1987 年 10 月份控制试验得到的南半球 25 hPa 位势高度场, 从中可以清楚地看出南极涡旋的上述特征, 75 hPa 位势场的形势与 25 hPa 类似。在考虑臭氧洞的情况下, 模拟出的平流层南极涡旋形势上与控制试验的结果差不多, 但中心数值却有很大差异。图 4b 到图 4d 分别为两试验得到 10 月、11 月、12 月 25 hPa 等压面位势高度的差值图。从图 4b 可以看出, 在臭氧洞最强的 10

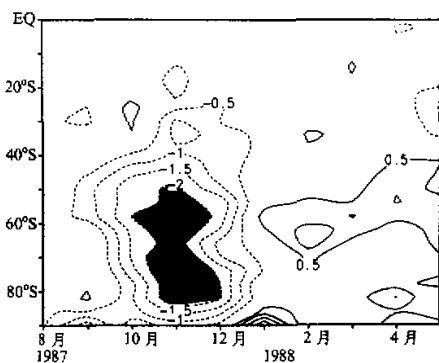


图 3 南半球 25 hPa 等压面纬向平均气温差值图
(单位: $^{\circ}\text{C}$, 臭氧洞试验值减控制试验值)

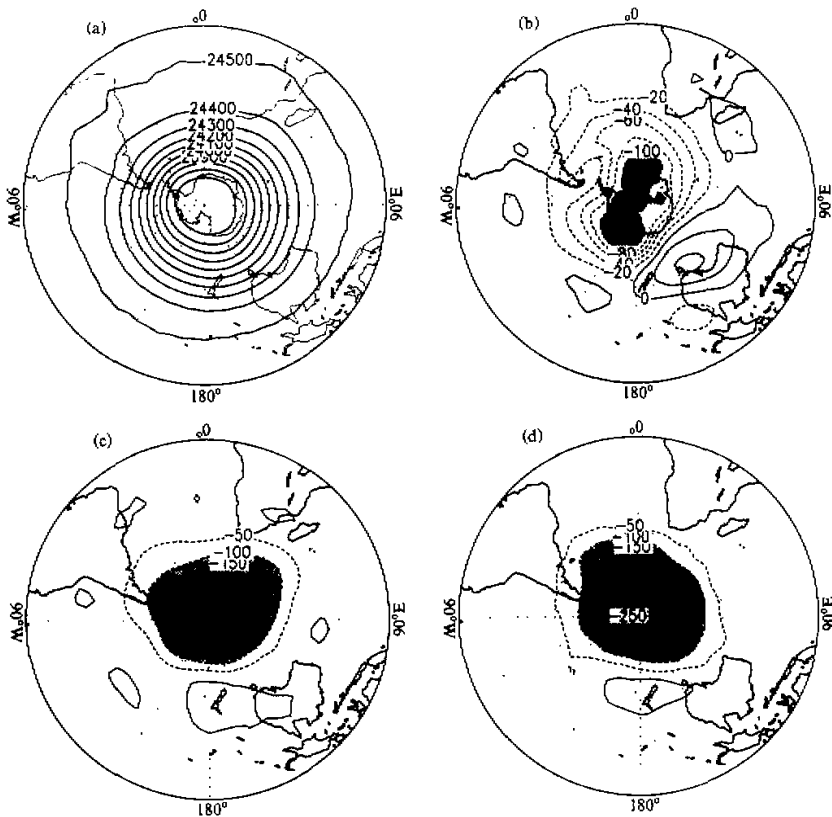


图 4 南半球 10 月份 25 hPa 等压面位势高度场 (a) 和位势高度差值图
(b) 10 月份; (c) 11 月份; (d) 12 月份 (单位: 位势米, 臭氧洞试验值减控制试验值)

月份, 模拟到南极涡旋比不考虑臭氧洞情况下的南极涡旋强得多。中心值低了 140 位势米, 在中纬度, 此等压面有所抬升, 然而这还不是南极涡旋增强最厉害的时候。模拟到 1987 年 11 月和 12 月时 (图 4c 和图 4d), 两试验的 25 hPa 位势高度差值在南极上空达到了 350 和 300 位势米。也就是说, 在臭氧洞达到最深的时候及以后的两个月里, 由于臭氧洞的影响, 南极涡旋得到明显的增强。这与 Mahlman 在 1994 年用 GFDL 模式的模拟结果一致, 只不过他给出的是 50 hPa 极涡的情况, 所以在等压面下降的数值上比我们这里给出的 25 hPa 等压面下降数值小些。1987 年 12 月之后, 随着臭氧洞的消失, 两种试验模拟到的 25 hPa 位势高度的差值迅速减少。到了 1988 年 3 月份南极上空部分地区 25 hPa 位势高度开始增加, 极涡减弱。

3.3 流场的变化

图 5a 为控制试验模拟的南半球 10 月份 25 hPa 风场图, 图 5b~5d 是两试验得到的 10 月、11 月和 12 月 25 hPa 风场差值图 (示意图) 从图 5a 可清楚地看出在臭氧含量为平均值时有很强的绕南极涡旋。从图 5b 到图 5d 可以看出臭氧洞情况下南极涡旋

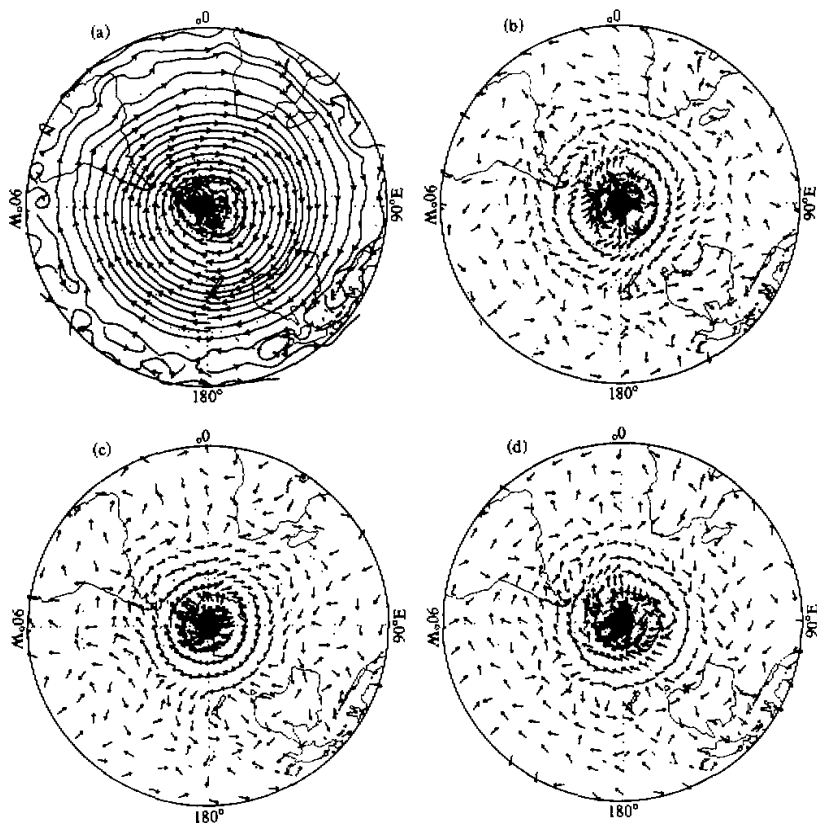


图 5 南半球 10 月份 25 hPa 风场 (a) 和风场差值图
(b) 10 月份; (c) 11 月份; (d) 12 月份 (单位: m/s, 臭氧洞试验值减控制试验值)

增强的趋势。在臭氧洞的影响下, 南极上空平流层下层等压面下降使得平流层中从南极到低纬地区之间的气压梯度增大, 一方面, 引起平流层 $50\sim 70^{\circ}\text{S}$ 区域西风加强, 两试验模拟到这一地区的平均纬向风差值随时间和纬度的分布如图 6a 所示, 在 1987 年 10 月和 11 月里其增大值达到 7 m/s , 此增量约为控制试验平均纬向风的 70%; 另一方面, 此地区向南极方向吹的平均经向风也有所增大, 增量约为 0.1 m/s , 如图 6b 所示 (图中风向从北向南为正), 此增量约为无臭氧洞试验值的 1 倍。由于吹向南极的经向风的增大, 向南极辐合的趋势加强, 这将有利于中纬度的能量和臭氧向南极地区的输送。此外, 从图 5b 到图 5d 还可以看出, 在南半球高纬平流层西风加强的同时, 经向的扰动也有所增强, 如 10 月份在印度洋的东南部和太平洋东南端向南的气流加强, 而在太平洋西南部 $40\sim 70^{\circ}\text{E}$ 处和大西洋南端向北的气流增强。从图 5c 到图 5d 可以看到在臭氧洞情况下 11 月份经向扰动更强。12 月份也还相当明显。经向扰动的这种变化有利于中纬地区含臭氧量高的空气向南极输送和极地含臭氧量低的空气向中纬地区输送。也就是说, 从 $50\sim 80^{\circ}\text{S}$ 区域向南的平均经向风加强和经向扰动的变化都有利于从 10 月份以后臭氧向南极地区输送。这或许就是 1987 年南极臭氧洞在 11 月份开始减弱, 到 12 月份逐渐消失的原因之一。

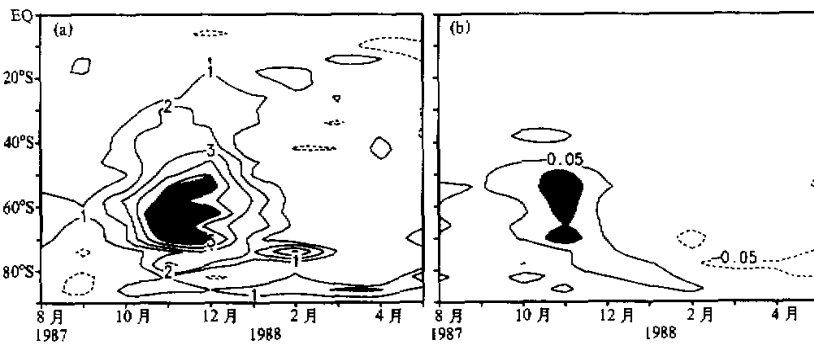


图 6 纬向风差值 (a) 和经向风 (从北向南为正) 差值 (b) 随纬度时间分布
(单位: m/s , 臭氧洞试验值减控制试验值)

4 结论和讨论

通过对 IAP9 层全球大气环流模式模拟到的在南极臭氧洞期间南半球平流层各气象要素场的分析, 可以看到, 在南极臭氧洞出现之后, 南半球高纬和极地区域平流层辐射加热率明显减小, 气温明显下降, 导致此地区等压面下降, 这些结果与 Cariolle, Kiehl 和 Mahlman 等人利用 NCAR 模式、GFDL 模式的模拟结果一致, 说明 IAP9 层模式对臭氧辐射加热率及有关的计算是成功的。我们的模拟还得出: 由于南极地区等压面下降, 南极与中纬度之间气压梯度增大, 西风气流增强, 南极涡旋增强。与此同时,

吹向南极方向的平均经向风增大。经向扰动也有所增强, 这种情况一直维持到臭氧洞消失。由此可见, 南极涡旋的强弱与臭氧洞有密切关系, 而南极涡旋的增强, 向南的平均经向风的增大和经向扰动的增强又有利于臭氧从生成区(中低纬上空)输送到南极, 而使臭氧洞趋于缓解或消失。它们之间似乎有一个相互制约的关系。这一问题还有待进一步研究和证实。

参 考 文 献

- 1 Herman J. R., P. A. Newman, R. Mcpeters et al., 1995, Meteor 3 / Total ozone mapping spectrometer observations of the 1993 ozone hole, *J. Geophys. Res.*, **100**(22), 2973~2983.
- 2 陈月娟, 毕道华, 1991, 臭氧加热作用对大气环流影响的数值试验, 中国科学(B辑), No.11, 1224~1232.
- 3 Kiehl J. T. et al., 1988, Response of a GCM to a prescribed Antarctic ozone hole, *Nature*, **332**(7), 501~504.
- 4 Cariolle D., et al., 1990, A General Circulation Model Simulation of the Springtime Antarctic Ozone Decrease and Its impact on Mid-latitudes, *J. Geophys. Res.*, **95**, 1883~1898.
- 5 Mahlman J. D. et al., 1994, Transport, radiative, and dynamical effects of the antarctic ozone hole: a GFDL "SKYHI" model experiment, *J. Atmos. Sci.*, **51**(4), 489~508.
- 6 Zhang Xuehong, 1990, Dynamical framework of IAP nine-level atmospheric general circulation model, *Advance in Atmospheric Sciences*, **7**(1), 66~67.
- 7 Liang Kinzhong, 1996, Description of a nine-level grid point atmospheric general circulation model, *Advance in Atmospheric Sciences*, **13**(13), 269~298.
- 8 毕训强, 1993, IAP 9L AGCM 模式及气候数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士论文.
- 9 张弘、陈月娟、毕训强, 1999, 南极臭氧洞对全球大气辐射加热场影响的数值模拟研究, *大气科学*, **23**(3), 340~348.
- 10 Chen Yuejuan, Zhang Hong and Bi Xunqiang, 1998, Numerical experiment on the impact of the ozone hole over Antarctica on the global climate, *Advance in Atmospheric Sciences*, **15**(3), 300~311.

The Influence of Antarctic Ozone Hole on the Antarctic Vortex — Simulated by the IAP AGCM

Chen Yuejuan and Zhang Hong

(Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Bi Xunqiang

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

Abstract Based on the results of the numerical experiment by using IAP AGCM, the influents of 1987 Ozone Hole on the radiative heating rate, air temperature, pressure and wind field in Stratosphere are discussed. It shows that the ozone depletion over high latitudes and polar region of the Southern Hemisphere led to the radiative heating rate reduced by 0.4~0.6 K / day, temperature dropped down 4~5 K, isobaric surface descended about 350 gpm in the lower stratosphere over Antarctica, and the Antarctic vortex became more stronger. It is obvious that the strength of Antarctic vortex in the Southern Hemisphere spring are closely connected with the ozone amount and thus its thermal condition.

Key words antarctic ozone hole antarctic vortex numerical experiment