

南极臭氧洞对全球大气辐射加热场 影响的数值模拟研究^{*}

张 弘 陈月娟

毕训强

(中国科学技术大学地球空间科学系, 合肥 230026)

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 为了探讨南极臭氧洞对全球气候的影响状况, 我们用 IAP 9 层全球大气环流模式进行了南极臭氧洞气候效应的数值试验。本文分析了本次试验中南极臭氧洞引起的大气辐射加热场的变化, 结果表明, 南半球高纬和极地平流层臭氧含量的严重减少, 不仅影响该地的大气辐射加热场, 同时也使北半球平流层大气的辐射加热场发生改变。虽然对流层中层所受影响较少, 但对流层下层南北半球的大气总辐射加热率的变化却相当明显, 这些影响将使全球大气温场产生明显变化。

关键词 南极臭氧洞 数值试验 辐射加热场

1 引言

臭氧是地球大气中的一种重要组成成分, 主要分布在 10~40 km 高度处, 其浓度最大值在平流层 20~25 km 附近。臭氧对波长小于 $0.3\mu\text{m}$ 太阳紫外辐射有强烈的吸收作用, 使得到达地面的太阳紫外辐射强度大大降低, 成为地球上人类和生物的自然保护伞; 同时, 由于臭氧主要存在于平流层而强烈吸收太阳紫外辐射, 对密度很小的平流层大气来说, 它是最主要也是最直接的能源。因此臭氧含量及其分布的变化将直接影响到平流层的温度结构, 进而影响该层乃至全球大气环流状况^[1]。

近年来, 由于人类活动对大气臭氧层的破坏越来越严重, 全球范围平流层臭氧总量日益减少, 特别是南极臭氧洞的出现, 引起各国政府、公众和科学家的普遍关注。所谓南极臭氧洞是指在南极的春天(每年 10 月)南极大陆上空臭氧总量急剧下降, 形成一个面积与极地涡旋相当的臭氧总量低值区。自 1985 年 Farman 等^[2]首先指出南极哈利湾(Halley Bay)站($75^{\circ}31'S$, $26^{\circ}44'W$)臭氧总量在南半球春季特别是在 10 月份有着极其明显的下降趋势来, 每年都观测到南极臭氧洞现象。平流层臭氧含量明显减少后, 直接影响大气对短波辐射的吸收, 引起平流层热力学和动力学性质的改变, 并且最终影响到对流层。因此平流层臭氧含量的变化是气候的重要扰动因子之一。国内外对臭氧洞问题的研究取得了相当进展, 特别是在臭氧洞的观测分析、臭氧洞的产生机理等方面。对臭氧洞的气候效应的数值模拟国外做了一些, 如 1988 年 Kiehl^[3]等用 NCAR 模

1997-09-11 收到, 1998-04-30 收到再改稿

^{*} 本工作获中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室和国家基础性研究重大关键项目“气候动力学和气候预测理论研究”资助, 本试验在大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室完成

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, 11 月份平流层增温推迟; 1990 年 Cariolle^[4]等也模拟到类似的结果, 南极涡旋 50 hPa 降温达 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$, 11 月末的最后增温推迟了两星期; 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, 结果表明南半球春末南极平流层低层降温 8°C 。这些结果对我们认识南极臭氧洞的气候效应有一定好处。但这方面工作做得还不够多, 特别是国内这方面工作做得更少。为了探讨南极臭氧洞对全球气候影响的状况和可能机制, 我们在中国科学院大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室利用 IAP 9 层全球大气环流模式进行了南极臭氧洞气候效应的数值试验。本文首先讨论南极臭氧洞的热力作用, 主要分析南极臭氧洞引起的大气辐射加热场和大气温度场的变化。

2 数值试验概况

2.1 模式简介

IAP 9 层模式是一包括对流层和平流层低层的全球格点模式, 与国外同类模式相比, 该模式在动力框架和计算格式方面都有较优越的特性: 依照实际大气温度全球平均的垂直廓线作为模式标准大气, 将热力学变量 (温度、位势高度和地面气压) 相对于这个标准状态的偏差作为预报量; 模式使用“混合” σ 坐标, 将不规则的地表面变成坐标平面, 同时还引入一套变量替换; 模式致力于满足差分方程组与微分方程组总体属性等物理系统内在的协调性, 差分计算方案精确地保持微分方程组中的能量转换关系。

IAP 模式的物理过程参数化方案也有其优越的特色。模式中对大尺度上升运动造成的凝结和积云对流作用产生的凝结这两种降水过程作了深入、细致的考虑; 对于摩擦项 (象水平扩散、垂直运动、地形重力波拖曳) 及地面过程分别作了细致的描述。太阳短波辐射、地气系统长波辐射的计算引进了 NCAR CCM1 的参数化方案。该模式已相当成功地进行了气候平均态、季节变化、低频振荡及遥相关等数值模拟^[6,7]。南极臭氧含量的变化首先通过辐射过程来影响大气, 因此在这里主要介绍辐射过程的计算方案。

(1) 太阳短波辐射

太阳净向下短波辐射通量分为两部分: 可见光及紫外光谱段 ($0\sim 0.9\ \mu\text{m}$) 和近红外谱段 ($0.9\sim 4.0\ \mu\text{m}$), 按照整个大气柱是晴空、非重叠云或重叠云, 这两部分通量又各自分为三个部分。在模式大气顶层的太阳入射为 $S_I = S_0 \cos \xi \cdot f_d \varepsilon$, 其中 S_I 为日射, S_0 为太阳常数 ($1373\ \text{W}/\text{m}^2$), ξ 为太阳天顶角, f_d 为白天日照份量, ε 为离心力因子。模式大气顶层总的太阳辐射通量中, 可见光及紫外光谱段占 64.7%, 近红外谱段占 35.3%。在各种气体对太阳辐射的吸收中, 臭氧在可见光及紫外谱段的吸收 $\xi_{\text{O}_3}(p_s)$ 按 Lacis 和 Hansen^[8]公式表示:

$$\xi_{\text{O}_3}(p_s) = \frac{0.2118x}{1 + 0.042x + 0.000320x^2} + \frac{1.082x}{(1 + 138.6x)^{0.805}} + \frac{0.0658x}{1 + (103.6x)^3},$$

等式右边第一项为臭氧在可见光谱段的吸收, 后两项为臭氧在紫外谱段的吸收。表达式中的 x 为臭氧含量, 折算到厘米单位 cmSTP。这里需要说明的是, 虽然 IAP 模式在平

流层只有两层,但在计算臭氧含量 x 时,是将 100 hPa 到 0.5 hPa 的大气分为 16 个小层,逐层计算其 x ,然后累加到 IAP 模式的计算层。因此对 x 的计算是相当准确的。

水汽在近红外谱段对直射阳光的吸收:

$$\xi_{\text{H}_2\text{O}}(p_s) = \frac{W_{\text{eff}}}{a + b(W_{\text{eff}})^c + dW_{\text{eff}}}$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 及 W_{eff} 按文献[9]给出。

水汽在近红外谱段对漫射阳光的吸收:

$$\xi_{\text{H}_2\text{O}}(p_s) = \frac{2.9x}{(1 + 141.5x)^{0.635} + 5.925x}$$

到达地面的太阳辐射通量包括地表可见光及紫外谱区净向下太阳辐射通量和地表近红外谱区净向下通量。大气中的太阳短波辐射加热计算分成三个区域:云之上、云中和云之下,云中情况又分为非重叠云和重叠云两种情况。

(2) 地气系统长波辐射

计算地气系统长波辐射,同样考虑云之上、云中和云之下三个区域的辐射通量。

由于辐射和云的参数化公式比较琐碎,许多公式在此略过,详细参见文献[10]。

2.2 初始资料和试验方案

1987 年南极臭氧洞是目前为止研究的比较多的臭氧洞。图 1 显示 1987 年臭氧洞发展变化过程,它从 8 月份开始出现,以后逐渐加深,10 月份臭氧含量降到最低,某些高度上竟减少 97%,11 月份臭氧含量开始回升,但仍旧有减弱的明显痕迹,12 月以后基本上恢复到正常状态。

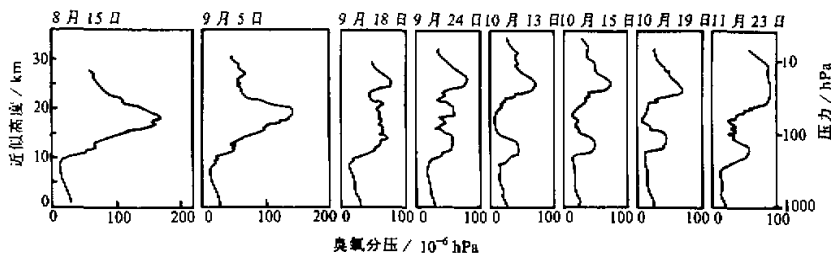


图 1 1987 年南极 Halley Bay 站臭氧分压廓线变化过程 (引自文献[11])

考虑到 1987 年的观测和分析资料也比较完善,所以模拟试验选择从 1987 年 8 月份开始。试验所用的初始气象场是 IAP 9 层模式用实测的逐月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从 1978 年 11 月积分得到的 1987 年 7 月 31 日的气象场。为了分析臭氧洞对全球气候造成的影响,我们作了两个试验积分,一个是用上述逐月海温、海冰和气候平均臭氧含量继续积分到 1988 年 5 月 31 日,称为控制试验,另一个试验所用下边界条件与前者相同,但南半球高纬和极地平流层臭氧总量代之以 1987 年 8 月到 12 月的实测值,积分到 1987 年 12 月 31 日,从 1988 年 1 月 1 日起臭氧含量仍用气候平均值,也积分到 1988 年 5 月 31 日,称为臭氧洞试验,这样便于分析

南半球 8~12 月臭氧含量变化对当年和次年上半年气候的影响。我们的试验与 Kiehl 的工作类似, 他们的试验中各月臭氧耗损也是纬度和时间的函数, 不随其他因素如环流而改变, 但他们的积分只从 8 月到 12 月, 没有跨年。

为了在臭氧洞试验的模拟过程中输入 1987 年臭氧洞的资料, 首先从文献[12]上读出 1987 年 8~12 月南半球各测站的臭氧总量观测资料, 绘成南半球臭氧总量的纬度分布图。试验中 40°S 以北到北半球各纬度的臭氧总量仍用气候平均值, 而从 40°S 到南极各纬度的臭氧总量参照所绘分布图给出。这些值与 8~12 月 40°S 到南极各纬度的气候平均臭氧总量之差, 为 1987 年 8~12 月臭氧总量距平, 即认为是 1987 年 8~12 月臭氧总量的变化量。考虑到这些变化量主要出现在臭氧层, 所以将此变化量按一定的比例分配至 15~176 hPa 层中。

图 2 给出用于臭氧洞试验的臭氧分布。图 2a 是两试验臭氧总量差值的季节变化, 可见臭氧洞的范围很清楚: 从 8 月到 12 月, 从 40°S 到南极, 其中 10 月南极臭氧总量减少最多, 减少量达 180 Du, 超过多年平均 10 月份该地区臭氧总量的 50%; 图 2b 是两试验 10 月份在 77.7°S 臭氧分压垂直廓线, 可见在 175 hPa 至 15 hPa, 臭氧洞试验中的臭氧分压只有控制试验值的 1/3 左右, 与实际观测也较一致。

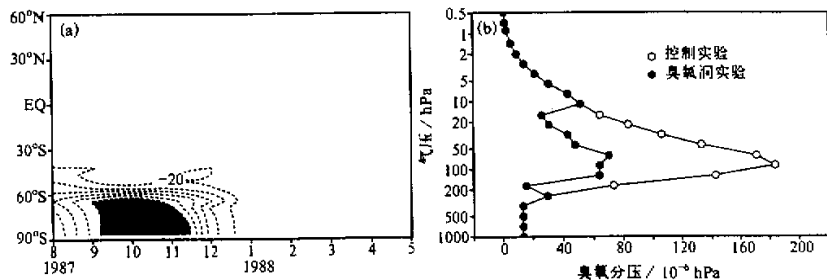


图 2 臭氧洞试验与控制试验

(a) 臭氧总量差值的季节变化 (等值线间隔: 20 Du); (b) 10 月份 77.7°S 臭氧分压垂直廓线

3 数值试验结果

如前所述, 臭氧对太阳紫外辐射有强烈的吸收作用, 它是平流层最主要也是最直接的热源。因此, 南半球极地和 high 平流层臭氧含量的减少, 首先改变该地区的辐射加热率。

计算结果表明, 从 1987 年 8 月开始, 随着臭氧含量的减少, 相比于控制试验, 臭氧洞试验中 60°S 以南 200 hPa 到 25 hPa 平流层低层的辐射加热率开始变小, 两试验差值逐渐明显。图 3 是 25 hPa 等压面纬向平均的短波辐射加热率差值 (臭氧洞试验值与控制试验值之差, 下同) 随纬度和时间的分布, 该图清楚显示了 25 hPa 等压面纬向平均的短波辐射加热率的变化过程。从 8 月上旬开始, 此时 70°S 以南基本上还未受到太阳照射, 南半球极地和 high 上空臭氧含量的减少引起的短波辐射加热率的变化开始出现在 60°S 附近。随着时间的增加, 短波辐射加热率减少的区域逐渐向南扩展, 而且减少

由于南半球高纬和极地平流层辐射加热率的显著减小, 使得臭氧洞试验模拟的南半球高纬和极地平流层气温明显低于控制试验结果。图 6 给出两试验模拟的平流层气温差值, 其中图 6a 为南半球 11 月份 25 hPa 等压面上温度差值分布, 图 6b 表示 25 hPa 等压面各月纬向平均气温差值分布。由图 6a 可以看出臭氧洞试验中 11 月南极附近上空 25 hPa 等压面的气温比控制试验结果低 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$; 由图 6b 可以看出, 从 10 月到 12 月, 由于臭氧洞造成的 25 hPa 纬向平均气温下降在 60°S 以南都很明显, 11 月份下降最多。这结果与国外许多模式的结果如 Cariolle 和 Malhman 的得出结果都比较一致。从图 6b 还可以看出, 南极臭氧含量减少对北半球 25 hPa 层温度场也有明显影响, 这种情况在 Malhman 用 GFDL 模式进行的模拟中也很清楚 (详见文献[5]中的图 4)。这种影响与前面提到的在北半球高纬地区平流层总辐射加热率的变化有关。这种影响在臭氧洞最强时主要出现在 60°N 以北, 从 11 月份开始逐渐向南扩展, 到臭氧洞消失后南半球平流层气温基本恢复正常时, 北半球极地所受影响还很明显, 而且不少地方温度比控制试验的温度偏低。

如前所述, 图 4 和图 5 不仅给出了南极臭氧洞引起的对流层顶以上辐射加热率的变化情况, 同时也给出它们在对流层中层和下层的变化。在图 4a 和图 5a 上, 在对流层中

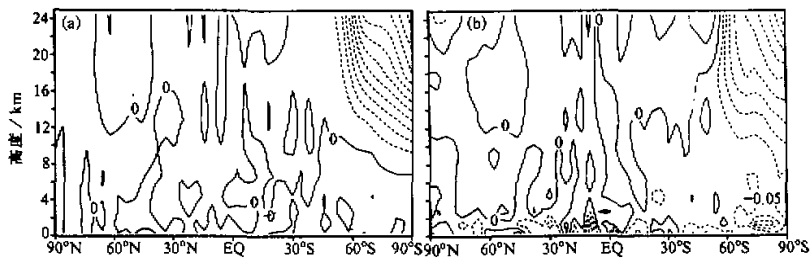


图 5 10 月份纬向平均 (a) 短波辐射和 (b) 总辐射加热率差值随高度和时间的分布
(等值线间隔: $0.05^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

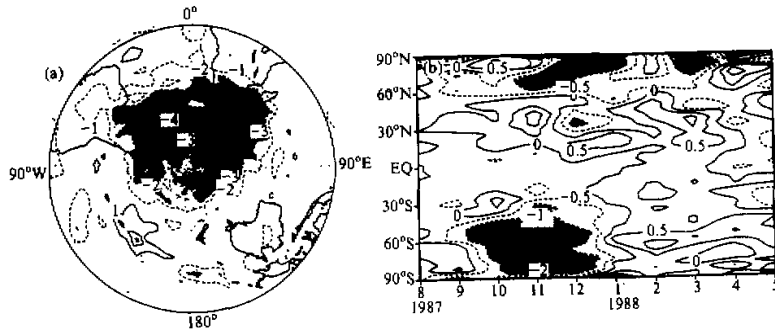


图 6 (a) 模拟的南半球 11 月份 25 hPa 等压面温度差值分布 (等值线间隔: 1.0°C) 和
(b) 25 hPa 等压面纬向平均温度差值随纬度和时间的分布 (等值线间隔: 0.5°C)

层太阳辐射加热率基本上没有多少变化, 在下层稍有增加但不太明显, 这是由于上层臭氧减少, 到达下层的太阳辐射有些增加的缘故; 而在图 4b 和图 5b 上近地面层各个纬度区域和各月份臭氧洞引起的总辐射加热率变化都比较明显, 其变化幅度在 10 月份可达 $\pm 0.14^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 很明显这是受到长波辐射影响所致。由于南极臭氧洞引起的总辐射加热率在全球各纬度带下层的明显变化将会引起全球各地近地面气温和气压的变化, 进而引起风场和环流场的变化乃至全球气候的变化。由于篇幅所限, 该问题我们将另文详述。这里讨论为何在南极的臭氧洞会引起全球各纬度低层大气总辐射加热率的变化。因为大气总辐射加热率包括大气吸收太阳辐射引起的加热率和大气长波辐射降温率, 如前所述, 在对流层下层, 太阳辐射加热率受臭氧洞影响不大, 所以总辐射加热率的变化主要是大气长波辐射降温率变化引起的, 而大气长波辐射降温率的变化又主要受气温、水汽含量和云的影响。在我们的计算

中, 南半球高纬和极地平流层臭氧含量的减少, 首先导致该地区辐射加热率减少和该地区气温下降, 于是南半球高纬和极地平流层各等压面下降, 造成南北向气压梯度的变化, 使得水平风场发生变化, 这种变化不仅出现在南极上空, 同时在低纬地区和北半球也有反应。图 7 是臭氧洞试验与控制试验得到的 10 月份经圈环流差值图。可以看

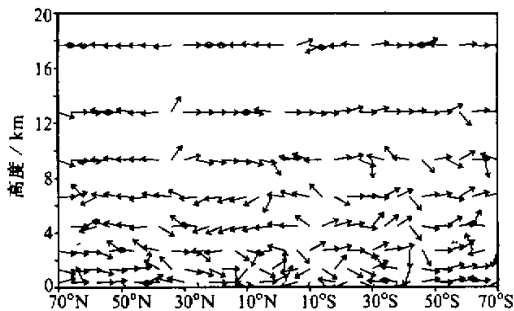


图 7 10 月份 75°W 经圈环流差值图

出臭氧洞的影响还以相当快的速度使下层风场和垂直运动发生变化, 这一方面使热量和水汽水平输送和垂直输送发生改变, 另一方面, 垂直运动还使空气绝热升温或降温, 这也就是臭氧洞引起的动力作用。热力作用和动力作用的综合结果造成温度场的变化, 而水汽、温度或云的变化反过来又影响总辐射加热场的变化。图 8 给出

我们模拟得到的各纬度带平均的近地面气温差值随时间的变化。可以看出, 在南北半球高纬到极地区域近地面气温受臭氧洞的影响很明显, 正如上面所述气温变化不仅受辐射降温率的影响, 同时还受到动力作用。总的来说, 从 9 月份到 10 月份, 70°S 以南近地面气温有所增加, 这一方面是因为平流层臭氧含量的减少使到达地面的太阳辐射有些增加, 另一方面也因为此地

区风场和垂直运动的变化, 使温度发生变化。正因为 10 月份这里温度偏高, 放射的长波辐射增加, 长波辐射降温率增大。这就是为什么从图 4b 和图 5b 可以看到 10 月份这

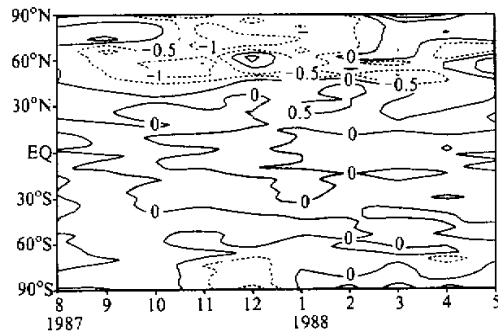


图 8 纬向平均近地面温度差值随纬度和时间的分布
(等值线间隔: 0.5°C)

里总辐射加热率减小的原因。也正因为这样, 从 10 月份开始此地区气温下降, 到 12 月份气温降到最低, 而长波辐射降温率减小, 总辐射加热率增大。这在图 4b 上看得很清楚, 只不过图 4b 的正负辐射加热中心不在地面上, 因而在图 8 上未看到相应的温度变化中心。上述气温与总辐射加热率的变化关系和温度变化中心在 850 hPa 的气温差值随时间的分布图上可以明显看到 (图略)。在图 5b 中北纬近赤道地区加热率明显减少, 主要是因为风场的变化造成此地区水汽的辐散辐合、云量的变化引起的。从模拟到的气层的水汽含量和云量、降水量来看, 在 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 之间地区从 9 月到 11 月降水量和云量减少, 因而长波辐射降温率增大, 总辐射加热率变小。但由于此地区空气下沉增温, 最终使得下层气温变化不大 (见图 8)。北半球高纬地区近地面温度的变化主要由动力作用引起, 这里不详细讨论。

4 结论及讨论

从数值模拟的结果看, 南半球极地和 high 平流层臭氧含量严重减少, 对大气辐射加热场和大气温度场的影响很明显, 因此臭氧含量的变化直接左右高层大气热力学状态的变化。模拟结果还显示出平流层臭氧含量的变化对近地面大气辐射加热率和温度场也有明显影响, 因而也必将影响风压场和水汽分布以至整个大气环流。所以平流层臭氧含量的变化是大气环流和气候的重要扰动因子, 在做短期气候预测时, 有必要考虑平流层臭氧含量的年际变化。

用 IAP 9 层模式模拟到南极臭氧洞期间的辐射加热率不仅在南半球极地和 high 地区有明显变化, 而且北半球 high 地区也受到影响。很明显, 北半球平流层辐射加热率的变化主要是动力作用引起当地气温变化进而导致长波辐射的变化; 而下层总辐射加热率的变化则是动力与热力作用共同引起下层温度、水汽、云量等的变化进而影响下层的长波辐射。但在北半球 high 动力作用是否有这么强还值得进一步的研究。另外因 IAP 9 层模式的计算层最高取在 25 hPa, 只能考虑平流层低层, 对于平流层中上层因臭氧洞产生的影响无法分析和研究。而国外的一些模式其模式顶层和垂直分辨率较高, 能模拟出平流层余差环流的加强、平流层上层因动力绝热加热引起的增温等。因此为更全面、更深入地研究南极臭氧洞对全球气候的影响, 有必要发展更细致、在平流层有更多层次的大气环流模式。在我们的模拟试验中, 两组试验所用的海温和海冰一直保持相同, 也就是没有考虑臭氧洞的气候影响在海洋中的反映, 只考虑它对陆地下边界的影响, 这样做是考虑到 IAP 9 层模式尚未与海洋模式耦合, 如果考虑臭氧洞对海冰及海温的影响而又不考虑海流的作用, 可能会造成另一种误差。因此, 如果用海气耦合的模式来进行臭氧洞的气候效应的试验, 或许会得到更为符合实际的效果。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Farman, J. C. et al., 1985, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315, 207~210.

- 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(D2), 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 Xinzhong, 1996, Description of a nine-level grid point atmospheric general circulation model, *Advance in Atmospheric Sciences*, 13(3), 269~298.
- 8 Lacis, A. A. and J. E. Hansen, 1974, A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 31, 118~133.
- 9 Kratz, D. P. and R. D. Cess, 1985, Solar absorption by atmospheric water vapor: a comparison of radiation models, *Tellus*, 37B, 55~63.
- 10 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, 210pp.
- 11 曹凤中, 1990, 臭氧层空洞的报告, 北京: 中国环境科学出版社, 122pp.
- 12 Monthly Ozone Data for the World, 1987, Atmospheric Environment Service, Canada, 339~498.

A Numerical Study of the Impact of Antarctic Ozone Hole on the Globally Atmospheric Radiative Heating Field

Zhang Hong and Chen Yuejuan

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

Bi Xunqiang

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

Abstract In order to study the impact of Antarctic Ozone Hole on the global climate, a numerical experiment was carried out with IAP 9L AGCM. This paper emphasizes on the radiative heating field affected by the Ozone Hole. Experiments show that the reduction of ozone in high latitude and polar region of the Southern Hemisphere affected radiative heating fields not only the local but also of the Northern Hemisphere Stratosphere. Although the total radiative heating field in the middle troposphere changed little, it changed considerably in the lower troposphere of both Hemisphere. These effects made the global temperature field change obviously.

Key words antarctic ozone hole numerical experiment radiative heating field