

CO₂ 倍增后的气候变化与中层大气

D. Rind 等

(美国宇航局戈达德空间飞行中心空间研究所)

1 前言

目前预测指出,随痕量气体浓度的增加,到下世纪中叶,地球气候将同今天有明显差异。按目前和预计的痕量气体增长速度,约在2040年将达到相当于CO₂加倍的辐射效果。Hansen等人利用GISS 9层全球气候模式发现约在2060年地面增温将同CO₂加倍时的增温相当。随着对流层的增暖平流层辐射冷却将加剧。

在相同时段内,人为释放的氟气可能对中层大气(大致在10—100公里)中的臭氧有重大影响。南半球臭氧洞现象和刚刚探测到的北半球臭氧变化均认为是这种影响的结果。已使用各种模式预测下世纪中叶的臭氧变化(Brasseur等,1985;Isaksen和Stordal,1986;Connell和Wuebbles,1986),若氟里昂生产明显减少,实际估计值可能要改变,但臭氧的长期变化可能还是这样(NASA,1988)。因为还有诸如甲烷和水汽等其它气体变化,

预报未来大气的任务变得更加复杂。

有人利用二维平流层模式企图定量研究氟气引起的臭氧耗损对气候变化的影响(Wuebbles等,1983;Brasseur和DeRudder,1987;Ramanathan等,1987)。结果表明由于预测的温度变化臭氧耗损略有改善。Brasseur和Hitchman(1988)指出CO₂增加造成的平流层温度变化本身将影响臭氧分布。本文三维模式结果表明气候变化对中层大气温度和动力学的效应也将影响臭氧分布。

目前已有几个公认能较好模拟CO₂倍增对对流层气候影响的模式(Manabe和Wetherald,1975;Hansen等,1984;Washington和Miehl,1984;Manabe和Wetherald,1987;Wilson等,1987)。这些模式给出的全球年平均地面气温变化的大小基本一致,增暖4—5℃,但其解释各抒己见。

有关CO₂倍增对中层大气气候影响的报道很少。Fels等(1980)研究了平流层对包括CO₂倍增在内的各种辐射扰动的敏感性。

表 1 试验说明

2CO ₂	对流层和平流层 CO ₂ 加倍,海温增值至 CO ₂ 倍增后平衡气候值
ALT	对流层和平流层 CO ₂ 加倍,海温增值至 GFDL 模式中 CO ₂ 倍增后运行值,高纬增暖剧烈
ATM	对流层和平流层 CO ₂ 加倍,海温指定为当前值
ATM-A	类似 ATM,但 CO ₂ 加倍限于对流层
2CO ₂ -A	类似 2CO ₂ ,但 CO ₂ 加倍限于对流层
STRAT	类似 ATM,但 CO ₂ 加倍限于平流层
RAD	类似 2CO ₂ ,但 100hPa 以上仅有辐射过程,(无动力学过程;也进行 1×CO ₂ 的对照试验)

由于海温用了保持当前值,故限制了对流层响应的可能影响。本文研究了 CO₂ 倍增对中层大气气候变化的所有影响,大量试验结果表明对流层变化在改变 CO₂ 加倍后的中层大气动力学方面起着重要作用。

2 模式与试验

采用 GISS 全球气候中层大气模式(GC-MAM)。分辨率 8°纬度×10°经度,垂直方向从地面到 85 公里,且包含 GISS 气候模式全部过程(如:原始方程组的数值解法、辐射和地表通量计算以及考虑对流和云参数化的完整水份循环等)。另外,根据线性饱和理论,对重力波产生、传播、分裂和拖曳进行参数化,它们是模式风和温度场的函数。GCMAM 一般能真实模拟出对流层和中层大气平均场及其变率。主要不足是平流层下部长波能量略有减少,模式顶的温度太低以及南极平流层下部温度太高。

为了研究中层大气对 CO₂ 倍增气候的响应,首先让整个大气 CO₂ 加倍(从 315ppm 到 630ppm),并利用 GISS 9 层气候模式 CO₂ 加倍时产生的边界条件。9 层模式运算时允许海温变化,平衡后产生的平均增暖为 4.2℃。在 GISS 模式中置入 2 倍 CO₂ 标准条件的试验称为“2CO₂”。

为研究中层大气变化原因及其对对流层的敏感性,进行了大量附加试验。其中之一就是所有层 CO₂ 加倍,海温用当前值来限制对流层响应。该试验除使用了年循环外,其他与 Boville(1986)的相似。这个仅大气中浓度变化的试验称为“ATM”。固定海温,加倍 CO₂ 使全球对流层年平均气温微弱增暖 0.37℃。

目前对 CO₂ 倍增后的对流层经向温度响应,不同模拟之间有本质差异。分歧之一就是与中层大气有关系。GFDL 模式(Manabe 和 Wetherald,1986)得出高纬地区的气温比 GISS 和 NCAR 模式变化加剧。这种差异至少在用 GISS 模式估算两种不同增暖分布时影响了对流层长波能量的模拟变化(Rind,1987)。为了包含目前模拟对流层响应的变化范围,我们进行了第三个试验,即大气 CO₂ 浓度加倍,海温像提供给 GFDL 模式的一样,高纬地区增暖加剧,这个试验称为“ALT”。

为弄清中层大气变化是否主要受对流层变化的控制或受就地影响的控制,为把动力影响和辐射影响分离开来,对三个冬季重新运算,100hPa 以上 CO₂ 浓度再置为 315ppm。第一年运算称为“2CO₂-A”,海温保持 CO₂ 倍增气候值。第二年运算称为“ATM-A”,海温维持为当前值。第三年运算称为“STRAT”,仅平流层内的 CO₂ 加倍。最后进行了一个试验,100hPa 以下才有动力学过程,而中层大气内只有辐射响应,进行了 1×CO₂ 的运算,也进行了 2CO₂ 的运算,这个 2CO₂ 试验称为“RAD”。概况见表 1。

3 结果

为了集中反映主要试验结果,我们汇编成一系列问题并进行回答。

问题 1:CO₂ 加倍时中层大气真的变冷吗?

增大 CO₂ 浓度将导致中层大气长波辐射增加和较冷的温度。2CO₂ 产生的温度变化是:对流层有剧烈增暖,GISS 模式中的峰值

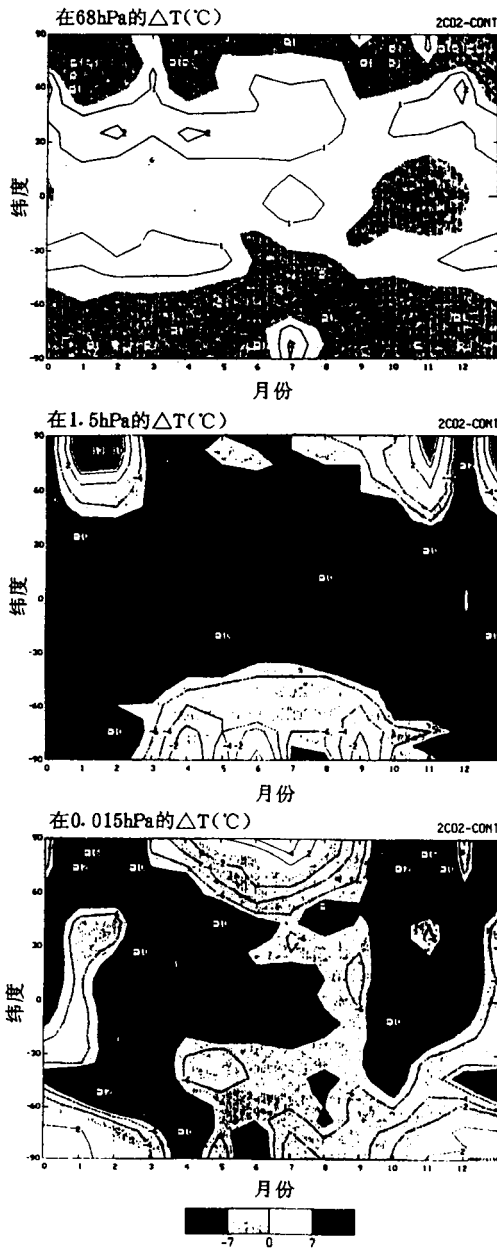


图2 2CO₂ 试验中各月份的温度变化:68hPa (上),1.5hPa(中),0.015hPa(下)

出现在热带对流层上部且中层大气中大部分有剧烈冷却。热带平流层顶冷却峰值约为10℃。所有季节中冷却占支配地位,这同预期基本一致。

然而,冬半年北半球极地平流层却发生增暖。图2给出中层大气三层的月均温度变化,即平流层低层(68hPa),平流层上层(

1.5hPa),中间层(0.015hPa)。图2中冬季北半球高纬平流层上部增暖非常明显,南半球冬季也有弱增暖。极地增暖与预期的不一致。

为了研究辐射响应的作用,进行了RAD的试验,试验的结果是所有中层大气均冷却。其结果与上述2CO₂ 试验结果相比较,说明动力学变化起了改变温度廓线的作用。ATM、2CO₂-A 和 ATM-A 试验均得到相同结论。CO₂ 仅在平流层加倍的STRAT 试验,同样极地增暖。仅在ALT 试验中,实际增暖并非出现在极地。因此,动力增暖似乎是CO₂ 倍增辐射作用的垂直差异的结果。

表2 12—2月中层大气余差环流与变化 (变化结果指最后一年冬季)

最大流函数及变化(10 ⁷ kg s ⁻¹)				
试验	位置	余差流函数	涡动	重力波
对照试验	39°N,46hPa	-419(±24)	-294	-124
Δ2CO ₂	39°N,46hPa	-93	-41	-90
Δ2CO ₂ -A	39°N,46hPa	-168	-87	-120
ΔATM	39°N,46hPa	-101	-108	-29
ΔATM-A	31°N,46hPa	-42	-23	-57
ΔSTRAT	16°N,21hPa	-41	-35	11
ΔALT	39°N,46hPa	-62	-45	-30

高纬最大流函数及变化(10 ⁷ kg s ⁻¹)				
试验	位置	余差流函数	涡动	重力波
对照试验	55°N,46hPa	-278(±12)	-236	-66
Δ2CO ₂	55°N,10hPa	-30	-47	-7
Δ2CO ₂ -A	55°N,46hPa	-40	-66	23
ΔATM	70°N,46hPa	-32	-50	-6
ΔATM-A	70°N,21hPa	-7	-3	-5
ΔSTRAT	55°N,10hPa	-18	-16	-4
ΔALT	55°N,46hPa	-21	8	-11

问题2:CO₂ 倍增气候中中层大气余差环流发生何种变化?

图5 是不同季节余差环流的变化,负值(阴影区)表示顺时针气流加强。所有季节内南半球中层大气余差环流均增强(即高层由赤道流向极地的气流加强,低层气流相反),变化量级是对照试验值的10%。这种平流层顶向极地的强热量平流和极地附近的强下沉运动类型是极地动力增暖的主要原因。

余差环流受非绝热加热、涡动和重力波

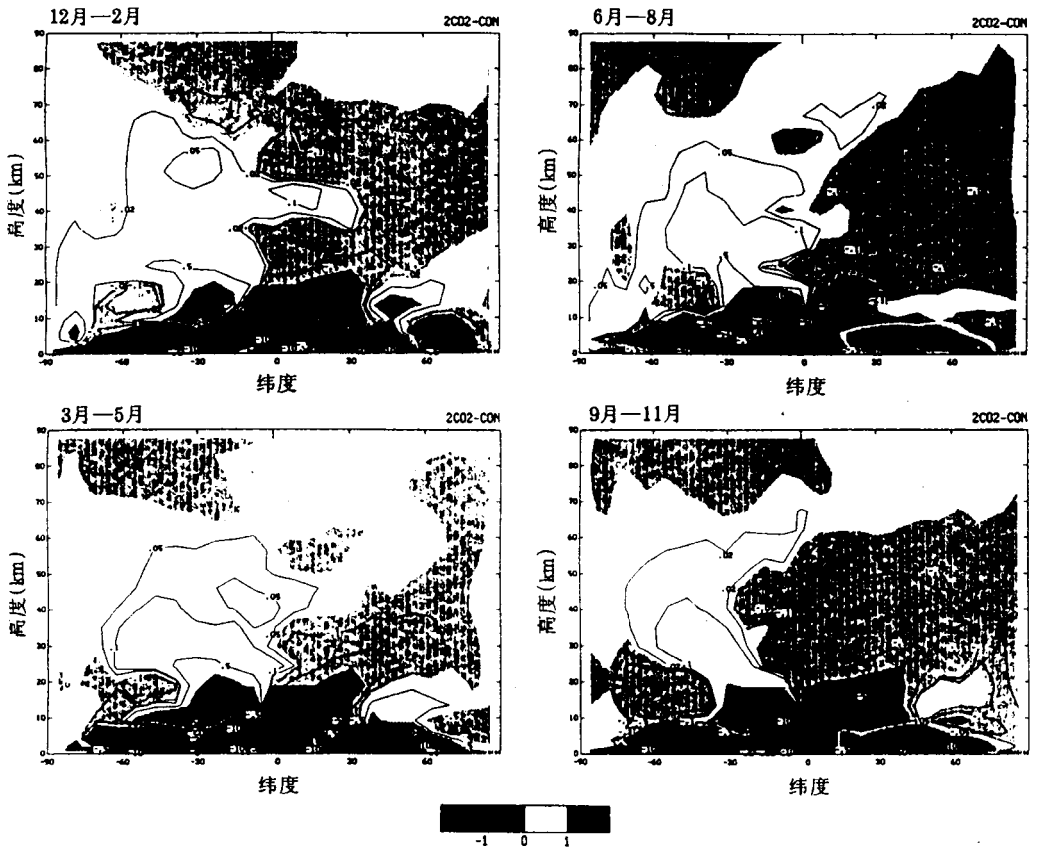


图5 2CO₂ 试验中各季节余差环流的变化. 图中数值为 2CO₂ 试验比对照试验的余差环流流函数的改变, 单位为 10^9kg s^{-1} . 北(南)半球负(正)值表示向极环流加强

作用三者控制。表 2 是表 1 各试验中余差流函数值变化情况以及由涡动和重力波作用产生的相对贡献。

包括 ATM-A, 2CO₂-A 和 STRAT 试验在内, 所有试验得出余差环流增强, 通常比标准差(括号中数值)大一倍以上。高纬主要是涡动作用, 中纬主要是涡动与重力波作用。表 2 说明中层大气重力波拖曳增大对余差环流加速起重要作用。

问题 3: 为什么涡动强迫作用会增强?

2CO₂、ATM 和 ALT 三个试验中层大气大部分涡动能量增加。表 3 定量描述了各季节两个半球 4 个层次的变化情况。每个层次的 24 个个例中, 21 个对流层涡动能量减

少, 19 个中层大气涡动能量增加。

表 3 括号中的数值为 1—3 波定常的加上瞬变的涡动动能百分比变化。2/3 的个例中对流层行星长波能量减少; 而中层大气长波能量的例子中约有 80% 是增加的; 平流层下部的长波能量 23/24 的情况下均增加。

涡动能量如何增加呢? 表 4 给出北半球对流层和平流层下部冬季能量收支情况。尽管海温增暖, 经向温度梯度减小, 大气斜压性降低, 整个对流层涡动动能减少, 但对流层定常 1 波涡动能量却是增加的。对流层下部增暖和 平流层下部冷却降低了垂直稳定度, 导致最长波的有效位能的全部增长, 它可能更多地受大尺度垂直静力稳定度变化的影响。

表 3 涡动能量百分率变化(括号内为 1—3 波)

	对流层	平流层下部	平流层上部	中间层
北半球				
冬季				
ATM	1.9(3.9)	2.4(5.3)	7.5(10.4)	3.5(2.6)
2CO ₂	-4.7(6.4)	10.2(22.9)	1.9(-0.2)	9.8(7.9)
ALT	-9.3(-1.7)	-0.0(0.5)	6.7(7.7)	8.6(11.3)
标准差	3.7	2.8	5.4	5.6
春季				
ATM	-1.6(-2.3)	-1.1(-2.3)	-13.4(-19.7)	-8.3(-12.2)
2CO ₂	-6.0(2.4)	15.0(30.4)	-7.2(-12.4)	6.2(10.6)
ALT	-14.7(-9.1)	5.3(9.1)	-4.4(-10.5)	-1.4(-4.7)
标准差	1.9	3.1	7.5	4.2
夏季				
ATM	-2.9(4.2)	7.1(16.7)	0.2(1.2)	-0.3(-1.8)
2CO ₂	-13.2(-12.7)	37.6(58.5)	4.4(-1.1)	9.4(11.3)
ALT	-14.2(-3.9)	20.1(29.7)	5.6(3.9)	3.3(0.8)
标准差	1.5	3.0	7.3	1.9
秋季				
ATM	-2.8(-0.9)	0.6(0.3)	0.2(2.6)	3.4(4.9)
2CO ₂	-11.2(-1.7)	13.3(32.5)	17.3(21.6)	19.5(24.5)
ALT	-12.8(0.3)	4.0(17.6)	9.5(14.4)	17.9(23.1)
标准差	2.2	6.2	4.0	5.8
南半球				
冬季				
ATM	-0.7(-1.8)	0.9(9.0)	16.1(14.8)	7.7(11.3)
2CO ₂	-10.4(-9.3)	-0.4(1.3)	1.9(1.2)	2.4(0.3)
ALT	-15.3(-13.0)	-1.3(7.0)	3.1(6.8)	-4.6(-7.2)
标准差	4.0	4.3	10.1	1.6
春季				
ATM	-2.2(-0.9)	5.1(10.0)	10.0(14.7)	3.9(4.8)
2CO ₂	-12.4(-3.7)	2.6(15.1)	6.7(11.0)	16.9(19.0)
ALT	-18.5(-18.3)	-3.6(1.6)	12.2(20.9)	8.6(8.7)
标准差	1.4	5.3	7.9	3.1
夏季				
ATM	2.0(3.6)	12.6(17.9)	-1.2(-4.7)	-3.0(-4.2)
2CO ₂	-7.0(0.2)	28.3(40.7)	8.4(11.0)	19.1(24.7)
ALT	-17.4(-13.7)	7.0(16.8)	-2.2(-2.0)	5.9(7.6)
标准差	4.4	5.9	5.8	0.8
秋季				
ATM	0.2(-2.3)	3.9(9.8)	4.7(9.2)	2.2(5.0)
2CO ₂	-11.6(2.2)	12.9(33.3)	3.6(8.4)	16.8(23.6)
ALT	-15.5(-9.9)	0.4(7.7)	3.4(7.8)	6.6(10.2)
标准差	3.8	4.6	6.3	1.2

尽管 ALT 高纬暖洋面提供了 2 波定常涡动能量增加,但三个试验中也发现高层 1 波能量增加。为了说明涡动能量增加路径,图 7 给出不同试验中 EP 通量和纬向风的变化。

在对流层,垂直传播增长主要始于涡动能量增长的中纬度上层,进入中层大气的路径取决于与风场结构有关的折射特征变化。试验中对流层纬向风响应差异取决于较暖海面

表 4 12—2 月北半球对流层和平流层下部能量收支(能量: 10^7J , 变率: 10^2W)

对照试验	ΔATM	$\Delta 2\text{CO}_2$	ΔALT	标准差	
对流层(984—100hPa)					
涡动动能	2809	52.3	-132.5	-260.1	105.0
定常涡动动能	83.8	50.0	-11.5	-17.20	32.3
定常 1 波涡动动能	140	65.6	54.5	36.9	19.6
纬向动能	1728	68.2	325.9	-122.9	22.7
涡动有效位能	6957	32.3	-518.3	-145.5	116.0
纬向有效位能	12920	-173.3	-157.0	-1911.4	259.3
涡动有效位能→涡动动能	681	9.0	-68.0	-89.0	37.8
纬向有效位能→纬向动能	162	9.0	19.9	-1.5	31.1
纬向动能→涡动动能	-39	10.0	15.1	15.9	19.5
涡动有效位能产生	581	-57.8	-163.0	-53.0	27.1
纬向有效位能产生	1507	-88.6	-256.1	-355.8	45.2
涡动动能消亡	411	-10.8	13.3	22.4	10.0
纬向动能消亡	192	-5.2	-11.1	6.5	5.9
平流层下部(100—10hPa)					
涡动动能	288	6.8	29.3	-0.1	8.2
定常涡动动能	78	0.3	5.8	10.1	2.4
定常 1 波涡动动能	17	5.1	9.0	3.3	6.1
纬向动能	218	67.9	150.5	-9.1	34.4
涡动有效位能	328	12.8	13.1	-0.5	6.4
纬向有效位能	201	-22.3	-10.4	-16.9	18.2
涡动有效位能→涡动动能	-72	2.8	0.1	4.5	6.2
纬向有效位能→纬向动能	15	1.5	13.3	4.4	0.9
纬向动能→涡动动能	3	-2.3	1.5	1.9	1.3
涡动有效位能产生	-16	-2.5	-0.6	-0.3	1.8
纬向有效位能产生	-12	5.1	-2.4	-0.7	2.7
涡动动能消亡	9	-0.4	-2.1	0.1	1.2
纬向动能消亡	18	4.4	14.0	2.5	1.7
100hPa ω'	112.5	-2.2	-0.28	-11.7	6.9

加热的不同。平流层西风增强是同强余差平流和强 EP 通量辐散相联系的。而中间层西风减弱是由于强 EP 通量辐合和重力波拖曳增加。

能量流的分布也受对流层涡动能量变化的影响。在所有试验中高纬地区向上通量都增加。

平流层下部行星长波能量增加是与能量生成和对流层传播的增长相联系的。能量生成的增加来自位能增加和 200—50hPa 高纬极大冷却。

这些结果有助于解释余差环流涡动强迫增长的原因。平流层下部涡动能量增加导致高层 EP 通量辐合增加; 涡动强迫增加又有

助于南北半球中层大气产生正环流的流函数, 导致极地增暖。中间层对平流层顶附近向极流增加的响应是产生反环流, 它增加了冬季极地中间层内上升气流和冷却, 以及增加了夏季极地中间层内下沉气流和增暖。

问题 4: 重力波拖曳变化如何影响结果?

如表 2 所示, 重力波拖曳增加部分是由于中纬度余差流函数的增加。2CO₂ 试验中重力波、地形波、风切变和对流的源强度均增加。这个试验中对流层西风普遍增强, 将导致强地形波和切变波产生。另外, 随气候增暖, 穿透对流增强, 将增加高相速重力波的振幅。但是平流层下部纬向风强度也增加, 它使得重力波破碎非常困难。ALT 试验中纬向动能

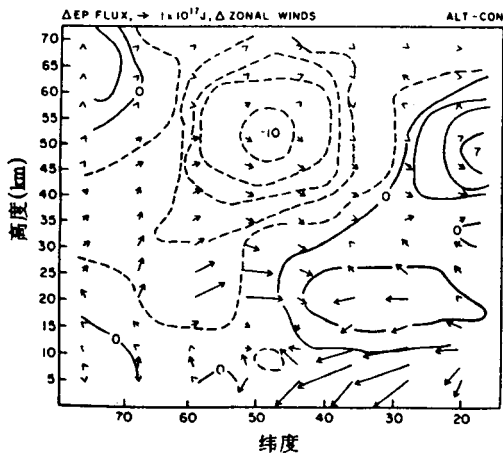
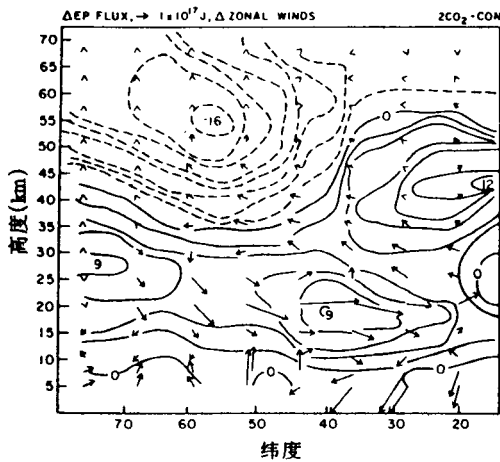
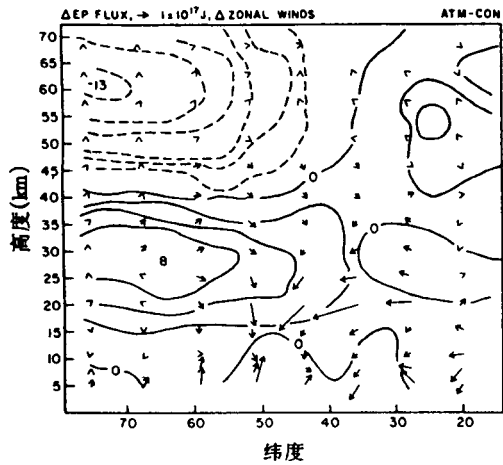


图7 12—2月北半球EP通量(箭头)与纬向风(等值线)变化。各个图的左上角给出箭头长度所对应的EP变化值 $1 \times 10^{17} \text{J}$ ，为画图方便 20km

以下箭头长度已缩减到 1/10

的减少(表4)是由于高纬温度变幅较大,所以,重力波变化有些点不重要了(表2)。

问题5: CO_2 加倍时平流层突然增暖会变化吗?

随涡动能变化和传播特性的改变,平流层动力增暖的可能性将会发生改变。“突然增暖”指涡动能迅速大增和纬向动能迅速大减。在对照试验中,突然增暖发生在12月, 2CO_2 试验中,突然增暖提前1个月发生,然后1—2月又重复出现,导致春季最后一次增暖延迟。这些变化在 2CO_2 、ATM 和 ALT 试验中都有。

为了解释这些变化原因,我们讨论了气候变化强迫下北半球各事件冬季演变情况。图9以示意图方式阐明了其要点。表明各月高纬增暖与冷却的区域由垂直EP通量变化决定的行星波向上传播的增长。高纬增暖产生的真实纬向减弱是同EP通量辐合相联系的,大致与增暖区域相近。图9的增暖是相对于对照试验而言的,虽不总是却常常同实际的突然增暖事件相联系。

图9描述了9—4月相对增暖和冷却区域明显向下传播的情况。类似现象也在南极发生,5月份中间层的相对增暖区向下传,7月份传到平流层下部(图2)。

南半球冬季变化比北半球冬季晚1个月(如:南半球平流层中部增暖在6月,而北半球在11月)。这种延迟现象的出现同对照试验中经向降水分布的南北半球差异有关。北半球当前气候模式中最大降水出现在11月 20°N 上;相应的南半球月份(5月)最大降水却出现在赤道附近。其差异与北半球陆地面积大有关,它使得夏季热带辐合带更偏向极地。

CO_2 倍增气候中,加热增加是由于对照试验中湿对流过程更大,于是加热“变化”在北半球11月比南半球5月更偏向极地,使得对流层上部最大纬向风增加和发生折射变化。因此,北半球中纬度11月垂直能量输送增大,而南半球5月不增大。南半球中层大气

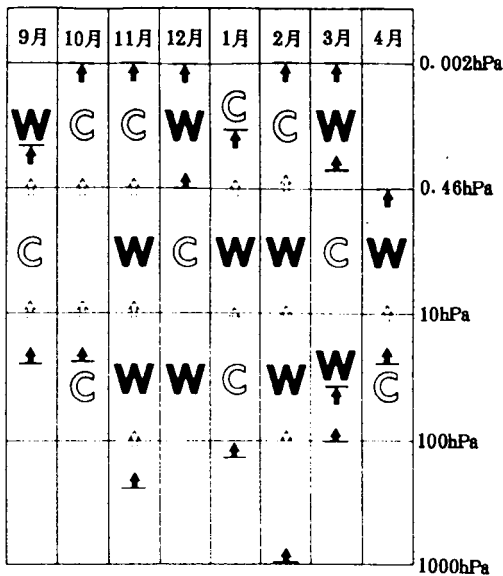


图9 2CO₂、ALT、ATM 试验中层大气(9—4月)温带温度相对变化的示意图。W与C表示比对照试验暖和冷,黑箭头表示EP通量增加层次的底和顶,虚箭头表示某层上EP通量增加

5月份实际上涡动能量是减少的,涡动风速变小,于是6月份高纬西风增大。这种风场变化有利于6月份能量向垂直方向和极地输送,中层大气涡动能量增加和相对变暖。

问题6:平流层增暖出现时间的变化主要取决于对流层过程改变还是平流层冷却?

平流层增暖的平均时间和特征的变化应是臭氧输送的重要结果(例如Leovy等,1985)。如果这是真实变化,那么以上讨论的涡动能量传播类型的改变是其中一种解释。另一种可能性是增暖出现的时间可能受到辐射效应的影响。当平流层CO₂增加时行星波增强,其辐射耗散增多有助于平流层增暖比对照试验来得早(11月)又去得迟。

上述冬季类型强调了对流层强烈影响的过程。低纬度加热改变了大气折射特性,也改变了影响长波产生和传播的对流层稳定性和经向温度梯度。假如这是真的,不管平流层辐射情况如何,只要对流层发生变化,就会有相似结果。

为了检验这个假说,我们研究了仅仅在

对流层内CO₂倍增时平流层增暖的情形(ATM-A, 2CO₂-A)。在所试验的三个冬季中,突然增暖事件发生的时间很接近对照试验,都在12月。其结果可能证实了辐射冷却增加的重要性。

4 讨论

4.1 动力学考虑

上述试验得到许多有趣关系,有的完全出乎意料。最重要的一个就是所有季节中层大气涡动能量增加。以前的CO₂倍增气候试验中,由于对流层涡动能量都减少,预计平流层涡动能量也应减少。中层大气涡动能量增加是对余差环流增强和冬季极地平流层顶动力增暖的原因。

涡动能量增加是同对流层增暖和平流层冷却的辐射温度变化相联系的。各种模式对CO₂倍增后的对流层增暖模拟结果虽有不同,但各种试验结果均出现在允许范围内。虽然没有证据说明不同中层大气模式间大气辐射标准是完全可以比拟的,但平流层热力冷却增加是预料结果,且不同模式间差异不可能很大。

对流层风场结构和涡动能量传播特征的变化也影响中层大气涡动能量变化。这种作用随高纬温度增暖的相对大小而变,如2CO₂、ALT和ATM间的差异所指。

最后,某些证据表明,由于垂直去稳作用有利于平流层当地涡动能量产生。若平流层涡动能量的产生主要由辐射去稳作用引起的话,那么所有CO₂倍增模式中给定相似的辐射方案,均能很好地模拟出来。

一旦涡动能量增加,就可以理解会出现余差环流增强和极地增暖变化的现象。在2CO₂/ALT试验中,对流层西风增强(减弱)往往产生强(弱)地形波和切变波源。然后又加强(削弱)平流层西风。在气候增暖时对流源一般增强。这些结论似乎是合理的,但必须强调重力波和大气环流间相互作用是高度非线性的,它使得实际的重力波作用及其变化

非常不确定。

如上述问题 3 所说,平流层余差正环流增强是同中间层反环流增强相联系的。其变化造成中间层冬极点附近更冷却和夏极点更增暖。但是中间层的温度变化的大小须细心考察。

对流层响应也是由 CO_2 加倍后增暖大小决定的,目前各种大气环流模式(GCM)约增暖 $4-5^\circ\text{C}$, 2CO_2 和 ALT 试验中增暖 4.2°C 。Wetherald 和 Manabe(1988)曾强调指出对流层上部云量和垂直分层对增暖大小的重要性。

所有试验(2CO_2 除外)中海温的任意规定有另一个效应:允许海陆温差发生变化,以提供对流层长波产生所需的位能。ALT 试验中,2 波能量增加似乎与这个现象有关。这一点对用模式重新进行试验时很有用,因为高纬增暖自然加剧。

CO_2 加倍不在平流层,仅在对流层, $200-50\text{hPa}$ ($12-20$ 公里)层内冬季温度常比所有层 CO_2 加倍或不加倍要冷。对流层 CO_2 增加及其相联的云和湿度增加是允许对流层上部有更多的能量向上辐射。随着平流层 CO_2 减少,吸收的和向下再辐射的能量减少。模式中变冷中心在 68hPa ,尽管这个高度上 CO_2 值不增加。

由于 CO_2 源在对流层,对流层到平流层 CO_2 值是递减的,但在试验中的递减比实际要大些。Angell(1986)分析 1960—1985 年探空资料得到对流层上部和平流层下部变冷 0.5°C 。这同 Hansen 等(1988)从气候模拟的结果不同,他们的模式中 CO_2 随高度均匀变化,得到对流层上部增暖,但 ATM-A 和 2CO_2 -A 试验中对流层上部也变冷,这定性地表明模式结果与观测值相一致,强调了对流层与平流层 CO_2 浓度差异的重要性。

臭氧随中层大气温度和动力学变化而变化。平流层温度变冷导致光解作用减弱,臭氧浓度和太阳紫外加热增加,反过来部分补偿 CO_2 造成的冷却(如 Fels 等,1980)。另一方

面,增加大气扰动将使 CO_2 增加,反过来可能减少臭氧。南极臭氧“洞”中臭氧减少可能已对平流层环流造成了影响(Kiehl 等,1982)。

在平流层环流变化加剧,毫无疑问臭氧将重新分布。尤其 CO_2 加倍试验产生一个非常强大的余差环流,它可能影响臭氧和其它痕量气体。同时注意到所有三个试验中春季南极平流层实质上是变冷。Shine(1987)曾强调臭氧分布对决定该区温度廓线的重要性。随着传输变化,臭氧重新分布,对该区温度和臭氧洞化学性质的影响将可能非常不同。为了能更好地了解 CO_2 增加对中层大气的效应,将需要一个相互作用模式,它能精确地模拟包括臭氧洞在内的平流层臭氧。

4.2 中层大气变化的可能结果

热带平流层垂直平流和水平混合既控制平流层臭氧分布又控制许多痕量气体的衰减率。 CO_2 倍增时平流层环流扰动的增长或多或少直接改变了大气组成及其化学性质。平流层 CO_2 加倍最明显的两个变化是平流层温度降低和热带平流层净上升速度增加。

预计平流层顶(50km)附近温度变化可达 -10°C ,平流层中部(30km)约 -4°C ,这同目前 2 维平流层化学模式得到的结果(Eckman 等,1987;Brasseur 等,1988)相似。这些化学模式中 CO_2 倍增的影响主要是辐射冷却增强。平流层下部冷却可减少臭氧衰减率,使得臭氧柱含量增加 $1-4\%$ 。本研究证实用更完整的大气环流模式研究也能得到这样大的温度变化,它是平流层直接辐射冷却的产物。因此我们支持化学模式得到的初步结论,即 CO_2 加倍臭氧柱含量会增加。

只有使用 3 维模式才能预测大气 CO_2 加倍后平流层环流的增强。它对平流层影响具有双重性:(1)增加全球 N_2O 消失和氟氯化(CFCl₃、CF₂Cl₂、C₂F₂Cl₃、CF₃Br)充分卤化;(2)热带到中纬度平流层下部臭氧的再分布,减少热带臭氧柱含量。

余差环流从热带到中纬度快速输送能增

强臭氧柱含量的经向梯度。另一方面,若涡动能量也增加,则中纬度与热带间臭氧顺梯度涡动混合反过来可增加到足以抵消甚至于使臭氧梯度的变化倒转。高纬余差环流的增加可提供向对流层更大的向下输送。从而影响对流层臭氧本底值。关于环流变化对痕量气体和臭氧的影响目前正在使用具有 GCM 风场的三维化学输送模式进行研究。

最后,对流层增暖平流层冷却可能会改变对流层顶本身高度。冬季极地下面变暖

到上面变冷的转变层次在 ATM 试验中最低($\sim 400\text{hPa}$),ALT 试验中最高($\sim 50\text{hPa}$);而热带地区 ATM 试验中这个层次最低($\sim 125\text{hPa}$), 2CO_2 试验中最高($\sim 60\text{hPa}$)。这些差异是各试验中输入的对流层加热不同的直接结果。

解明恩摘译自 *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(4): 475—494

朱福康校