

太阳准周期变化对北半球夏季平流层加热率的影响

陆晏,郭栋*,陶丽*,张峰,刘仁强,苏昱丞

南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: dongguo@nuist.edu.cn; taoli@nuist.edu.cn

2016-01-24 收稿, 2016-03-04 接受

国家自然科学基金资助项目(41305039; 91537213; 41375098; 41575040); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

摘要 采用1979—2013年6—8月欧洲中期数值预报中心ERA-Interim逐月再分析资料和2004—2010年6—8月美国国家大气和海洋管理局太阳光谱辐照度资料,利用北京气候中心大气辐射模式,计算了北半球平流层夏季臭氧加热率(Ozone Heating Rate, OHR)和净加热率(Net Heating Rate, NHR),分析了太阳准11 a变化中太阳活动强年与弱年纬向平均OHR(NHR)的差异,并讨论了差异形成的原因。结果表明:太阳活动强年比弱年的紫外辐射明显要强,导致OHR、NHR整层增强,且随高度增加而增加;臭氧浓度在平流层下层较小,在平流层上层较大,该变化导致OHR、NHR有类似的变化型,且稍向高处偏移;OHR、NHR在平流层上层的变化,由紫外辐射和臭氧共同作用,其他地区均为臭氧起主要作用。

关键词

太阳循环;
紫外辐射;
臭氧;
加热率;
平流层

臭氧对紫外辐射的吸收是平流层的主要热源,对平流层辐射平衡起到重要作用(Solomon et al., 2007; Xiao and Li, 2011)。太阳循环能够直接影响平流层的加热率,也能够通过影响光化学反应,影响臭氧分布,间接影响平流层加热率(Haigh, 1994; Solomon et al., 2007)。而平流层的温度结构又会影响平流层的BD(Brewer-Dobson)环流、行星波的传播破碎和化学反应的反应速率,从而通过辐射过程和动力、化学过程耦合影响整个平流层气候,甚至对流层气候造成影响(Haigh, 1996; Shindell et al., 1999; Mohanakumar, 2008; 卢楚翰等, 2012)。

太阳循环,特别是紫外辐射的变化,能够直接影响平流层的加热率。但是以前的工作低估了紫外辐射准11 a循环的变化幅度,也低估了紫外辐射准11 a循环对平流层加热率的影响。Haigh et al. (2010)将新一代的光谱资料SORCE卫星上的SIM(Spectral Irradiance Monitor)资料,与其他几种光谱资料进行对比,发现在2004—2007年太阳活动下降期,新资料紫外辐射的减小幅度要比之前估计得大

4~6倍。因此,使用新一代高精度的SIM资料,估算光谱准11 a变化对平流层加热率的影响是必要的。

紫外辐射的变化也能影响臭氧分布变化,从而间接地影响平流层加热率(Haigh, 1994; Solomon et al., 2007; Gray et al., 2009; Guo et al., 2015)。研究表明若平流层温度变化仅由辐射变化引起,则数值上明显偏小(Frame and Gray, 2010)。模拟结果显示,在太阳活动下降期,紫外辐射变化使得45 km以下平流层臭氧减少,而45 km以上平流层臭氧增加(卢楚翰等, 2012)。Soukharev and Hood(2006)和Randel and Wu(2007)通过多元回归分析发现紫外辐射可直接影响平流层顶的臭氧产生率,使得平流层顶在紫外辐射准11 a周期内能产生3%的变化。Egorova et al.(2005)采用化学气候模式,发现在准11 a周期内通过改变紫外光谱能量的变化,臭氧在平流层中部浓度最高的位置也相应的产生了2%的变化。杨守懋等(2014)通过合成分析得到太阳活动强年平流层下层臭氧浓度较强,且平流层上层的

引用格式: 陆晏,郭栋,陶丽,等,2017.太阳准周期变化对北半球夏季平流层加热率的影响[J].大气科学学报,40(6):729-736.

Lu Y, Guo D, Tao L, et al., 2017. Influence of solar quasi-periodic variation on stratospheric heating rate in the Northern Hemisphere in summer[J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 729-736. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160124001. (in Chinese).

臭氧混合比与太阳辐射加热有明显的正相关(黄富祥等,2009)。因此,紫外辐射变化改变臭氧能够强烈影响平流层加热率。然而,该机制的研究多为定性的统计分析,所以使用辐射模式较精确地定量计算其作用是有意义的。

另外,不少太阳循环对平流层辐射平衡的研究使用的是年平均资料(Shibata and Kodera, 2005)。然而,在平流层冬季,太阳辐射较弱,特别是在极区附近,存在极夜,所以太阳辐射过程较弱。而对平流层冬季辐射平衡起到主导作用的是行星波作用产生的 BD 环流和大气热辐射。因此,使用全年的资料分析太阳循环的作用,难以将这些复杂过程进行分离。而单独对夏季平流层进行分析,更容易抓住过程的本质。

综上,由于新一代 SIM 资料是高精度的光谱辐照度监控器,它在很大程度上使得对太阳辐照度能量的测量更加准确。并且对紫外辐射循环通过臭氧变化影响平流层加热率的机制分析多为定性的统计分析,所以使用辐射模式较精确地定量计算其作用是有一定参考意义的。为了分离辐射过程和其他过程的作用,单独对夏季平流层进行分析也是合理的而必要的。因此,本文利用 SIM 等资料和大气辐射模式,定量的分析了太阳紫外循环通过紫外辐射变化和臭氧变化对夏季平流层的臭氧加热率(Ozone Heating Rate, OHR)和净加热率(Net Heating Rate, NHR)的影响。

1 资料和方法

1.1 资料

欧洲中期数值预报中心的 1979—2013 年全球 6—8 月 ERA-Interim 逐月再分析资料的温度和臭氧浓度资料,垂直 1 000~1 hPa 有 37 层,水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Dee et al., 2011)。使用 2004—2010 年的新一代的光谱资料 SORCE 卫星上的 SIM 资料(Harder et al., 2005),以及美国国家大气与海洋管理局提供的 1979—2013 年 6—8 月太阳 10.7 cm 辐射通量(F10.7)资料。

1.2 方法

标准化的 F10.7 能够很好地表征太阳活动(图 1)。将大于 0.5 个标准差和小于 -0.5 个标准差的年份选为太阳活动强弱年。太阳活动强年有 12 a 为:1979、1980、1981、1982、1988、1989、1990、1991、1999、2000、2001、2002 年;太阳活动弱年有 14 a 为:1984、1985、1986、1987、1994、1995、1996、1997、

2005、2006、2007、2008、2009、2010 年。

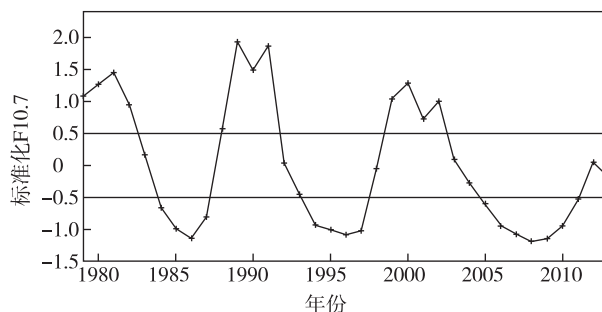


图 1 标准化 F10.7 (太阳 10.7 cm 辐射通量) 的 annual 变化

Fig.1 Interannual variation of standardized F10.7 (solar 10.7 cm radiation flux)

利用 BCC-RAD 模式(Zhang et al., 2003, 2006a, 2006b, 2015; Lu et al., 2009, 2011; Zhang and Li, 2013),该模式气体吸收方案采用 Zhang et al. (2003, 2006a, 2006b) 发展的相关 K 分布方案,水云的光学特性采用相关 K 分布方案重排(Lu et al., 2011),冰云采用 Zhang et al. (2015) 发展的方案,辐射传输算法有二流累加算法(Lu et al., 2009)和四流球函数展开累加算法两种(Zhang and Li, 2013)。在本文计算中,辐射传输算法选用更为精确的四流球函数展开累加辐射传输算法(Zhang and Li, 2013)。Randles et al. (2013) 对 BCC-RAD 等模式的模拟性能进行了评估,发现 BCC-RAD 能较好地描述辐射传输过程,特别是短波辐射过程。因此,通过该模式来分析太阳紫外辐射对平流层加热率的影响。

模式中太阳光谱从 204 nm 到 1×10^6 nm,分为 17 个气体吸收带,吸收臭氧的主要紫外波段(204~455 nm)和部分可见光带(455~833 nm)。计算 OHR 时,将模式中除臭氧之外的其余 6 种气体的浓度均设为 0,仅考虑臭氧的加热作用。计算 NHR 时,除臭氧外的其余气体,均为气候态,不考虑其变化。原因是其他气体的准 11 a 变化不明显。模式中时间从夜间 00 时开始每半小时积分一次,最后输出日平均结果。

2 太阳活动强弱年加热率的差异

图 2 是纬圈平均 OHR 垂直经向分布的气候场(图 2a)及太阳活动强弱年的差异场(图 2b)。如图 2a 所示,OHR 随高度上升逐渐增大,平流层顶附近为 OHR 的大值区,且在中低纬和极地存在两个大值中心,中低纬地区,可达 12 K/d,极地地区,最大

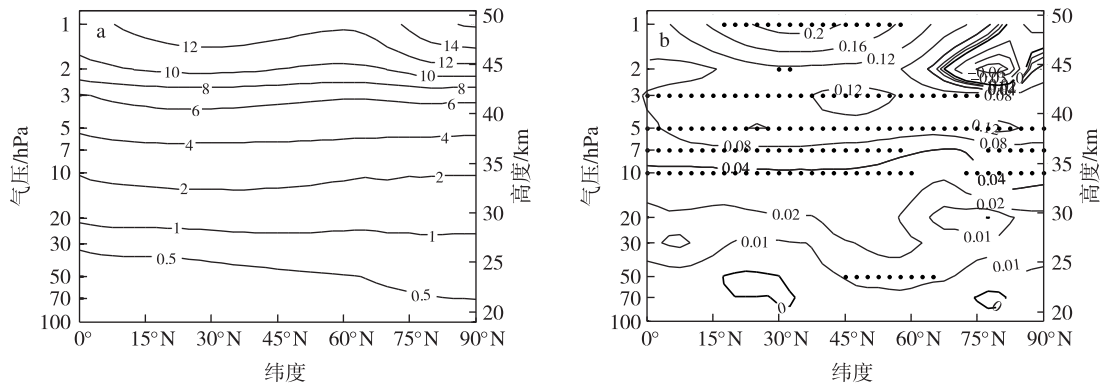


图2 纬圈平均的 OHR 气候场(a)以及太阳活动强年与弱年的 OHR 差异场(b)的垂直经向剖面(黑点表示通过 0.1 信度的显著性检验;单位:K/d)

Fig.2 Latitude-pressure cross sections of (a) zonal mean OHR climate field and (b) OHR differences between the strong and weak solar activity years(Black dots are significant at the 0.1 level;units:K/d)

OHR 为 16 K/d。OHR 随高度增大的原因是太阳辐射先被平流层高层的臭氧吸收,剩下的再被下层的臭氧吸收(Lacis and Hansen, 1974)。又因为 OHR 中心所在的位置主要与臭氧浓度、太阳高度角以及日照时长有关(Lacis and Hansen, 1974;王卫国等, 2008)。当夏季太阳直射 23.5°N(北回归线)附近,北半球低纬地区出现太阳高度角的极大值,所以 OHR 在低纬地区有极大值;而极地地区的大值中心主要由于夏季北半球极地地区为极昼现象,日照时间最长,所以 OHR 在该地区为最大值。图 2b 表明, OHR 随高度和纬度有明显的变化。太阳活动强年比弱年 OHR 在北半球中低纬,从赤道至 65°N 中,平流层整层几乎所有地区均增强,强度从下向上逐渐增大,平流层顶达最大,为 0.2 K/d,最大值区通过 0.1 信度的显著性检验。平流层下层低纬有很小的 OHR 低值区。北半球高纬,平流层上层太阳活动强年较弱年 OHR 弱,达-0.1 K/d,而平流层中下

层高纬则与中低纬变化一致,均从下向上逐渐增强,达 0.12 K/d;平流层中层几乎都通过 0.1 信度的显著性检验。

图 3 是纬圈平均的 NHR 垂直经向分布气候场(图 3a)及太阳活动强弱年的差异场(图 3b)。如图 3a 所示,NHR 在北半球平流层中低纬地区几乎整层为正,最大值在平流层顶附近,最大值为 3 K/d,而在北半球平流层中高纬地区,除平流层上层 10~2 hPa 为正外,几乎整层为负,最大负中心位于平流层顶为-3 K/d。图 3b 表明,在辐射加热和冷却的共同作用下,太阳活动强年比弱年 NHR 在平流层低层减弱,达-0.02 K/d;在平流层中层基本上均增强,通过了 0.1 信度的显著性检验,最大达到 0.2 K/d;在平流层顶附近,均减弱,且极地减弱最大,为-0.9 K/d,极地附近通过了 0.1 信度的显著性检验。

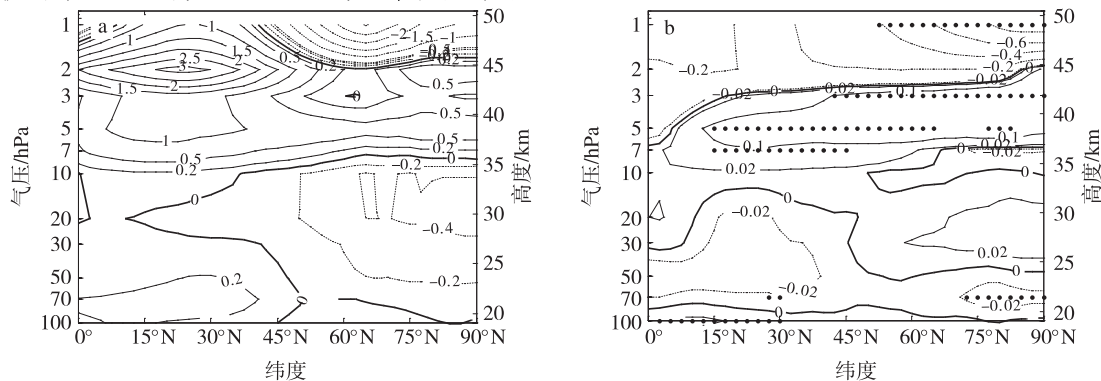


图3 纬圈平均的 NHR 气候场(a)以及太阳活动强年与弱年的 NHR 差异场(b)的垂直经向剖面(黑点表示通过 0.1 信度的显著性检验;单位:K/d)

Fig.3 Latitude-pressure cross sections of (a) zonal mean NHR climate field and (b) NHR differences between the strong and weak solar activity years(Black dots are significant at the 0.1 level;units:K/d)

3 加热率对太阳循环的响应机制

3.1 辐射变化对加热率的影响

利用 2004—2010 年的 SIM 资料,根据 F10.7 (图 1),选取 2008 年为太阳活动弱年,2004 年为太阳活动中值年,外插得到太阳活动强年的太阳辐照度。分别计算了模式各谱段太阳活动强(弱)年太阳辐照度及变率(表 1)。由表 1 可知,太阳活动强年比弱年紫外波段太阳辐照度偏强,其变化幅度随着紫外波长的减小而增大,极紫外区域达到 7.16%左右。而可见光在太阳活动强弱年几乎不发生变化,红外部分的变率约为-1.09%。

表 1 臭氧吸收光谱划分及太阳活动强(弱)年的辐照度和变率

Table 1 Classification of ozone absorption spectrum, and the irradiance in the strong and weak solar activity years and its variability

波长/ nm	太阳活动强年辐 照度/(W·m ⁻²)	太阳活动弱年辐 照度/(W·m ⁻²)	变率/ %
204~233	1.141 9	1.065 6	7.16
233~270	3.684 5	3.536 0	4.20
270~286	3.259 8	3.164 9	3.00
286~303	8.009 5	7.952 2	0.72
303~322	12.155 5	12.030 3	1.04
322~455	176.553 0	176.095 0	0.26
455~833	595.832 0	595.832 0	0
833~1923	469.818 0	469.818 0	0
>1923	86.911 6	87.871 5	-1.09

因为臭氧主要通过吸收紫外辐射和部分可见光对大气进行加热,所以分谱考虑紫外和可见光能量的变化,能较为精确的计算出太阳活动对加热率的变化。仅考虑辐射变化对臭氧加热率的直接影响,将臭氧浓度设置为气候场,根据表 1 结果,分谱计算太阳活动强弱年 OHR 的变化。结果如图 4 所示,由于紫外和可见光的变化,OHR 在太阳活动强年要明显大于太阳活动弱年。强弱年的 OHR 差值随着高度上升逐渐增大,在平流层顶达到 0.35 K/d,极地地区最大为 0.45 K/d。另外,OHR 差值在北半球的中低纬地区和极地地区分别有一个大值中心,主要是受到太阳高度角和日照时长的影响,使得夏季太阳直射区和极昼区的变化较强。

NHR 的变化与 OHR 类似(图略)。其原因是太阳活动强弱年,紫外辐射尤其是远紫外辐射的变

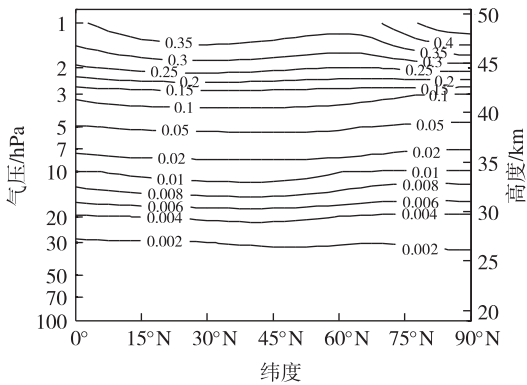


图 4 臭氧分布不变情况下模拟的太阳活动强年与弱年的纬圈平均 OHR 差异场的垂直经向剖面(单位: K/d)

Fig.4 Latitude-pressure cross section of simulated zonal mean OHR differences between the strong and weak solar activity years with constant ozone distribution(units:K/d)

化最大,所以以辐射加热为主,而红外辐射引起的加热率变化仅为-1.09%。这样由于光谱变化而引起的辐射冷却效应就比辐射加热效应小得多。由于辐射冷却效应主要由温度以及 H₂O、CO₂ 等气体引起,而模式计算中这些量均使用气候态,所以辐射冷却效应几乎不存在。

3.2 臭氧变化对加热率的影响

图 5a 是北半球夏季平流层太阳活动强年比弱年臭氧浓度混合比差异的垂直经向分布。结果表明臭氧浓度变化显著。对于太阳活动强年,北半球平流层下层,10 hPa 以下,几乎所有纬度均臭氧浓度较大,最大中心为中纬地区,达 1.0×10⁻⁷ mol/mol,平流层上层,10 hPa 以上,臭氧浓度均较小,且在低纬和极区有两个低值中心,分别为-2.0×10⁻⁷ mol/mol 和-2.5×10⁻⁷ mol/mol,均通过 0.1 信度的显著性检验。即夏季北半球地区,太阳活动强年比弱年,平流层上层的臭氧浓度偏少,且极地地区臭氧浓度偏少最显著。

在太阳辐射不变的情况下,太阳活动强弱年臭氧的辐射强迫导致的 OHR 变化(图 5b)与臭氧变化的分布形势(图 5a)类似,但略微的向高处偏移。主要是因为紫外辐射尤其是紫外辐射的 Hartley 吸收带,只需 0.14 cm,STP(标况下)的臭氧就能吸收 99%的太阳入射能量,所以在平流层上层的加热要明显大于下层(Lacis and Hansen, 1974;毕道华和陈月娟,1993)。如图 5b 所示,太阳活动强年比弱年,OHR 平流层中下层整层较强,中高纬最强达 0.08

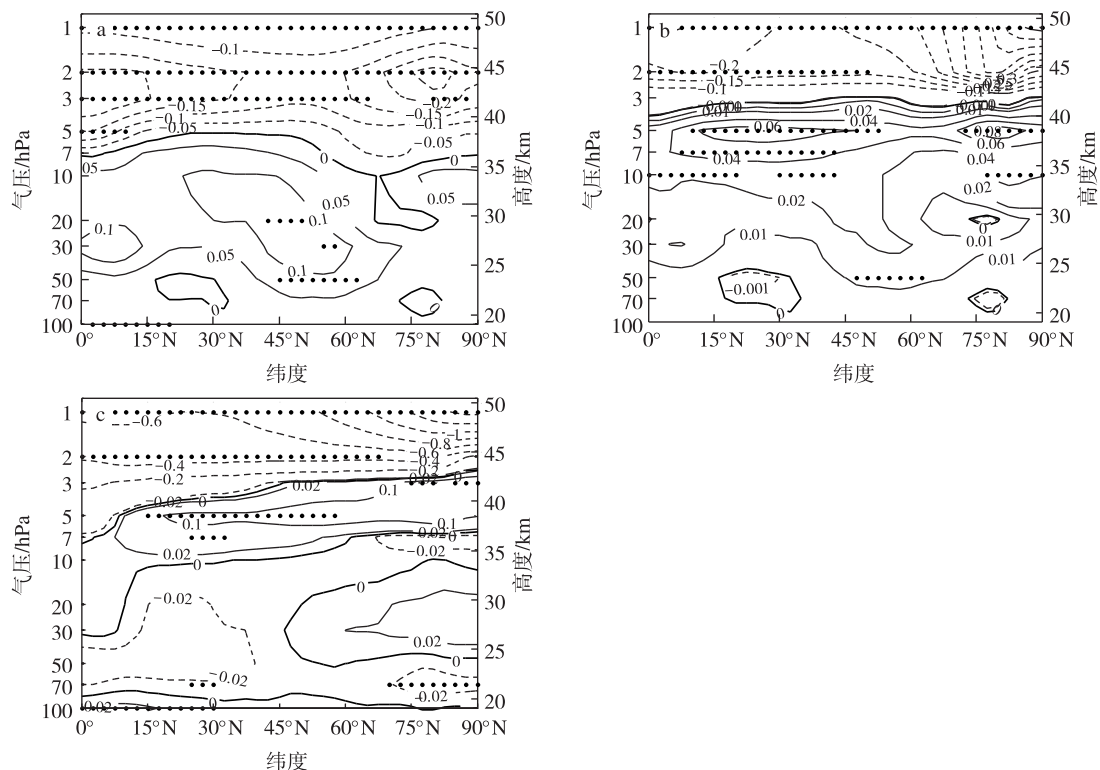


图5 太阳辐照度不变情况下模拟的太阳活动强年与弱年的纬圈平均臭氧浓度混合比差异(a;单位: 10^{-6} mol/mol)、OHR 差异(b;单位:K/d)和 NHR 差异(c;单位:K/d)的垂直经向剖面图(黑点表示通过 0.1 信度的显著性检验)

Fig.5 Latitude-pressure cross sections of simulated zonal mean (a) ozone concentration mixing ratio(unit: 10^{-6} mol/mol), (b) OHR(units:K/d) and (c) NHR(units:K/d) differences between the strong and weak solar activity years with constant solar irradiance(Black dots are significant at the 0.1 level)

K/d,中低纬强达 0.06 K/d,两个大值中心均通过 0.1 信度的显著性检验;而平流层上层整层减弱,低纬地区达-0.25 K/d,高纬地区变化大于低纬地区,达-0.55 K/d,且平流层顶均通过 0.1 信度的显著性检验。这主要是因为平流层臭氧吸收紫外辐射的效率随着高度增加和极地地区的极昼现象,所以该地区变化比中低纬地区变化大。

由于长波的辐射冷却效应还与温度相关,使得太阳活动强年比弱年,NHR 的变化与 OHR 的变化不完全相同。如图 5c 所示,平流层上层 NHR 更小,低纬达-0.6 K/d,极区达-1.4 K/d,平流层下层中高纬较强,为 0.02 K/d,中低纬较弱,为-0.02 K/d,而平流层中层则均较强,最大达 0.1 K/d,且在平流层顶和平流层中上层中低纬地区均通过了 0.1 信度的显著性检验。

综合辐射(图 4)和臭氧(图 5b,5c)的总效应(图 2b,3b)可知:对于太阳活动强年比弱年的 OHR 和 NHR 变化,平流层上层,尤其平流层顶附近,紫外辐射的作用较臭氧的作用强,平流层下层则主要

由臭氧浓度决定,紫外辐射的变化对之影响较小。

4 结论

本文利用 SIM 等资料和大气辐射模式,定量的分析了太阳紫外循环通过紫外辐射变化和臭氧变化对夏季平流层的臭氧加热率(OHR)和净加热率(NHR)的影响。结果如下:

1)臭氧不变时,北半球夏季平流层太阳活动强年比弱年,紫外辐射加热明显较强,导致 OHR 整层较强,且随高度增加而增强,强度从 0.002 K/d 增至 0.45 K/d,由而红外冷却较弱,NHR 的变化与 OHR 基本一致。

2)太阳辐射不变时,北半球夏季平流层太阳活动强年比弱年,臭氧浓度在平流层下层较大,上层较小,导致 OHR、NHR 也有类似的分布,并向高处偏移。OHR 在平流层下层,最大可达 0.06 K/d,上层低纬地区达-0.25 K/d,高纬地区达-0.55 K/d;NHR 则在平流层下层中低纬较弱,中高纬较强,平流层上层同样较弱,低纬达-0.6 K/d,极区达-1.4

K/d。

3) 对于太阳活动强年比弱年的 OHR 和 NHR 变化,平流层上层紫外辐射的作用较臭氧的作用强,平流层下层则主要由臭氧浓度决定,紫外辐射的变化对之影响较小。

本文通过 BCC-RAD 辐射模式,定量计算并分析了夏季太阳活动通过紫外辐射变化和臭氧变化对平流层加热率的影响,但是仍然有一些问题值得进一步研究。本文仅考虑了辐射和臭氧的辐射效应,并没有讨论紫外辐射对臭氧化学的影响,这需要利

用化学气候模式进行模拟分析。另外,在夏季,辐射对平流层环流起到重要作用,而在冬季,动力过程则起主导作用,因此在进一步研究冬季平流层环流时,一定要计算动力过程特别是行星波传播破碎的影响。

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵意见与建议。感谢欧洲中期数值预报中心和美国国家大气与海洋管理局提供的资料。

参考文献 (References)

- 毕道华,陈月娟,1993.多层模式中臭氧加热率的计算及其对大气温度场的影响[J].大气科学,17(5):513-522. Bi D H, Chen Y J, 1993. The calculation of ozone heating rate for the multi-layer model and the influence of ozone heating on the temperature field[J]. Chin J Atmos Sci, 17(5): 513-522. (in Chinese).
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 137(656): 553-597.
- Egorova T, Rozanov E, Zubov V, et al., 2005. Influence of solar 11-year variability on chemical composition of the stratosphere and mesosphere simulated with a chemistry-climate model[J]. Advances in Space Research, 35(3): 451-457.
- Frame T H A, Gray L J, 2010. The university of reading. The 11-yr solar cycle in ERA-40 data: An update to 2008[J]. J Climate, 23(8): 2213-2222.
- Gray L J, Rumbold S, Shine K P, 2009. Stratospheric temperature and radiative forcing response to 11-year solar cycle changes in irradiance and ozone[J]. J Atmos Sci, 66(8): 2402-2417.
- Guo D, Su Y C, Shi C H, et al., 2015. Double core of ozone valley over the Tibetan Plateau and its possible mechanisms[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 130/131: 127-131.
- Haigh J D, 1994. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate[J]. Nature International Weekly Journal of Science, 370(6490): 544-546.
- Haigh J D, 1996. The impact of solar variability on climate[J]. Science, 271(5618): 63-72.
- Haigh J D, Winning A R, Toumi R, et al., 2010. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate[J]. Nature, 467(7316): 696-699.
- Harder J, Lawrence G, Fontenla J, et al., 2005. The spectral irradiance monitor: Scientific requirements, instrument design, and operation modes[J]. Solar Physics, 230(1/2): 141-167.
- 黄富祥,刘年庆,赵明现,2009.青藏高原对流层臭氧含量变化的太阳周期活动信号分析[J].地球物理学报,52(9): 2201-2209. Wang F X, Liu N Q, Zhao M X, 2009. Solar cycle signal of tropospheric ozone over the Tibetan Plateau[J]. Chin J Geophys, 52(9): 2201-2209. (in Chinese).
- Lacis A A, Hansen J, 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere[J]. J Atmos Sci, 31(1): 118-133.
- 卢楚翰,王蕊,秦育婧,等,2012.平流层异常下降对 2009 年 12 月北半球大范围降雪过程的影响[J].大气科学学报,28(2): 145-156. Lu C H, Wang R, Qin Y J, et al., 2012. Effect of stratospheric downward propagation on the large-scale snowfall of Northern Hemisphere in December 2009[J]. Trans Atmos Sci, 35(3): 304-310. (in Chinese).
- Lu P, Zhang H, Li J, 2009. A comparison of two-stream DISORT and Eddington radiative transfer schemes in a real atmospheric profile[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 110: 129-138.
- Lu P, Zhang H, Li J, et al., 2011. Correlated K-distribution treatment of cloud optical properties and related radiative impact[J]. J Atmos Sci, 68(11): 2671-2688.
- Mohanakumar K, 2008. Stratosphere troposphere interactions: An introduction [M]. Berlin: Springer; 1-416.
- Randel W J, Wu F, 2007. A stratospheric ozone profile data set for 1979-2005: Variability, trends, and comparisons with column ozone data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 112(D6): 382-388.
- Randles C A, Kinne S, Myhre G, et al., 2013. Intercomparison of shortwave radiative transfer schemes in global aerosol modeling: Results from the AeroCom radiative transfer experiment[J]. Atmos Chem Phys, 12(12): 32631-32706.
- Shibata K, Kodera K, 2005. Simulation of radiative and dynamical responses of the middle atmosphere to the 11-year solar cycle[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67(1/2): 125-143.
- Shindell D T, Miller R L, Schmidt G A, et al., 1999. Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing[J]. Nature, 399(6735): 452-455.

- Solomon S, Qin D, Manning M, et al., 2007. Climate change 2007: The physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 996.
- Soukharev B E, Hood L L, 2006. Solar cycle variation of stratospheric ozone: Multiple regression analysis of long-term satellite data sets and comparisons with models[J]. J Geophys Res Atmos, 111(D20): 5025-5030.
- 王卫国, 袁敏, 王颢樾, 等, 2008. 对流层—平流层之间过渡层中臭氧含量及其加热率的变化研究[J]. 地球物理学报, 51(5): 1309-1320. Wang W G, Yuan M, Wang H Y, et al., 2008. A study of ozone amount in the transition layer between troposphere and stratosphere and its heating rate [J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(5): 1309-1320. (in Chinese).
- Xiao D, Li J P, 2011. Mechanism of stratospheric decadal abrupt cooling in the Early 1990s as influenced by the Pinatubo eruption[J]. Chinese Science Bulletin, 56(8): 772-780.
- 杨守懋, 王娟怀, 史成, 2014. 11 年周期太阳活动对气象要素的影响研究[R]//第 31 届中国气象学会年会 S7 中高层大气及其与对流层的耦合. 北京. Yang S M, Wang J H, Shi C, 2014. Research for the effects of the 11 years solar code on meteorological factors[R]//The thirty-first China meteorological society annual meeting of S7 in the upper atmosphere and its coupling with the troposphere. Beijing. (in Chinese).
- Zhang F, Li J, 2013. Doubling-adding method for delta-four-stream spherical harmonic expansion approximation in radiative transfer parameterization [J]. J Atmos Sci, 70(10): 3084-3101.
- Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, et al., 2003. An optimal approach to overlapping bands with correlated k distribution method and its application to radiative calculations[J]. J Geophys Res Atmos, 108(D20): ACL 10-1.
- Zhang H, Shi G Y, Nakajima T, et al., 2006a. The effects of the choice of the K-interval number on radiative calculations[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 98(1): 31-43.
- Zhang H, Suzuki T, Nakajima T, et al., 2006b. Effects of band division on radiative calculations[J]. Optical Engineering, 45(1): 016002.
- Zhang H, Chen Q, Xie B, et al., 2015. A new parameterization for ice cloud optical properties used in BCC-RAD and its radiative impact[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 150: 76-86.

Influence of solar quasi-periodic variation on stratospheric heating rate in the Northern Hemisphere in summer

LU Yan, GUO Dong, TAO Li, ZHANG Feng, LIU Renqiang, SU Yucheng

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change(ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Ozone absorption of ultraviolet radiation is a main heat source and plays an important role in radiation balance of stratosphere. Solar cycle, especially ultraviolet radiation, can directly affect the stratospheric heating rate. According to the data from SIM(Spectral Irradiance Monitor) on the satellite SORCE, it indicates that the reduction of ultraviolet radiation is more than four to six times as prior research results in the weak solar activity years from 2004 to 2007. The variation of ultraviolet radiation can affect the stratospheric heating rate by changing ozone distribution. Through qualitative research, ozone concentration mixing ratio shows strong positive anomaly in lower stratosphere, and also indicates positive correlation with solar heating rate in upper stratosphere in the strong solar activity years. In addition, lots of studies of stratospheric radiation balance used the annual average data. However, BD(Brewer-Dobson) circulation relates with planetary wave effects and atmospheric thermal radiation plays a main role in stratospheric radiation balance in winter. To understand the essence, analysis of summer stratosphere is particularly significant. Thus, the main purpose of this paper is using the data of SIM and the mode of atmospheric radiation model to quantitatively study the effects of variations of ultraviolet radiation and ozone concentration mixing ratio in the solar cycle on the ozone heating rate(OHR) and the net heating rate(NHR). Based on the BCC-RAD Model, OHR and NHR in stratosphere in the Northern Hemisphere in summer are calculated by using the ERA-Interim monthly reanalysis data from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF) during 1979—2013 and the solar spectral irradiance data from National Oceanic and Atmosphere Administration(NOAA) from 2004 to 2010. Variations of zonal mean OHR(NHR) in strato-

sphere in the 11-yr solar cycle are discussed, and the causes of differences between the strong and weak solar activity years are discussed. The results can be summarized as follows: Compared to the weak solar activity years, the ultraviolet radiation is stronger in the strong solar activity years, which results in the positive anomalies of OHR and NHR in whole stratosphere, and the anomalies increase with height. Ozone concentration mixing ratio shows negative (positive) anomaly in lower (upper) stratosphere, which leads to the similar pattern of both OHR and NHR, and slightly upward migration (because of the efficiency of ozone absorption in ultraviolet increases with height). As for OHR and NHR in upper stratosphere, the ultraviolet radiation plays a main role at stratopause, and ozone takes the most important part in other spaces. In this paper, the effects of ultraviolet radiation to ozone in chemistry are not discussed. In order to systematically study the influence of solar cycle on stratosphere, it needs to use chemical climate model for more detail simulation analysis.

solar cycle; ultraviolet radiation; ozone; heating rate; stratosphere

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20160124001

(责任编辑: 张福颖)