第12卷 第2期 空间科学学报 Vol. 12, No. 2
1992 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 1992

太阳活动对 EUV 辐射在大气中吸收过程的影响*

陈耀武 徐秀娟
(中国科学院空间科学与应用研究中心，北京 100080)
洪儒珍
(美国亚拉巴马大学，亨兹维尔 35899)

摘 要

本文利用 A-E 卫星在太阳活动 21 周峰年间观测到的 EUV 辐射资料，高层大气成分的吸收截面，以及 MSIS-86 热层大气模式，研究了 EUV 辐射在大气中的吸收过程；在透射比为 $1/e$ 和 0.1/100 时分别计算了透射高度随波长及太阳活动的变化．在波长范围 50—1050 Å 内对 37 个波段分别求出了透射高度随太阳天顶角的变化．结果表明，当太阳活动增强时各波段的透射高度均升高，而且透射比越大则透射高度随太阳活动的变化也越剧烈．当透射比为一定时，太阳天顶角越大则透射高度随太阳活动的变化也越大。除此之外还存在一个相反效应，即太阳活动会使 Chapman 函数变小，这反过来又促使透射高度降低．这两种效应的综合作用结果可较好地解释某些电离层观测中的日没效应。

关键词 太阳活动，EUV 辐射，透射高度，日没效应

一、引 言

在国际日地能量计划 (STEP) 中强调，中性大气和电离大气是个统一的整体，而且是互相耦合的．通常所说的高层大气动力学实质上指的是中性大气动力学[1]，因为即使在 1000km 高度，电离大气的数密度还不到中性大气的十分之一．然而，电离大气不仅可作为中性大气动力过程，光化过程及热过程的指示器[2]，而且电离大气和中性大气相互作用的研究是解决中层和热层物理过程及了解日地关系的关键[4]．在中低纬度，太阳辐射是维持光化体系并推动大气运动的唯一能源[3]．近些年来，利用 Atmosphere Explorer (A-E) 系列卫星载的远紫外光谱仪 (EUVS) 对太阳活动 21 峰年间的太阳 EUV 辐射强度进行了测量[5,6]，得到了随太阳活动变化的重要资料．在 Solar Maximum Mission (SMM) 卫星上利用 Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM) 监测到从 1980(太阳活动高年)到 1986(太阳活动低年)，太阳常数变化了 0.1%[7]，而且其中波长

本文于 1991 年 1 月 4 日收到．
* 国家自然科学基金资助课题．

$\lambda < 1350$Å 的辐射起主要贡献[8]. 因此，EUV 辐射在高层大气中吸收过程的研究以及太阳活动对其透射高度的影响的计算对了解中低纬度动力学过程是非常重要的.

早在 1956 年，Ditchburn[9] 利用火箭探空资料研究了太阳近紫外 1000—3000Å 在大气中的吸收过程，并求得了透射比为 $1/e$ 时的透射高度. 随后渡边[10]又给出了 100—3000Å 全波段在大气中的透射高度. 但由于当时资料的局限性，上述结果只有定性性质，而且不可能求得太阳活动对 UV 和 EUV 辐射在大气中吸收过程的影响. 本文的目的是利用新的卫星观测资料进一步研究太阳活动引起的高层大气结构变化对 EUV 辐射在大气中的透射高度的影响，并讨论电离层观测中经常出现的日没效应.

二、高层大气结构变化与 EUV 透射高度

在 50—1050 Å 范围内，波长为 λ 的单色波或波段为 $\Delta\lambda$ 的窄带辐射在大气中的传输方程为

$$I_\lambda(z_p) = I_\lambda(\infty)\exp[-\tau(z_p)], \tag{1}$$

其中，$I_\lambda(\infty)$ 及 $I_\lambda(z_p)$ 分别为在大气外界及透射到大气高度 z_p 处的辐射强度，

$$\tau(z_p) = \sum_i \sigma_{ai}(\lambda)\int_{z_p}^{\infty} n_i(z)\mathrm{d}s \tag{2}$$

为透射到高度 z_p 的光学厚度，沿光路 s 对某一吸收质的气柱积分[11]为

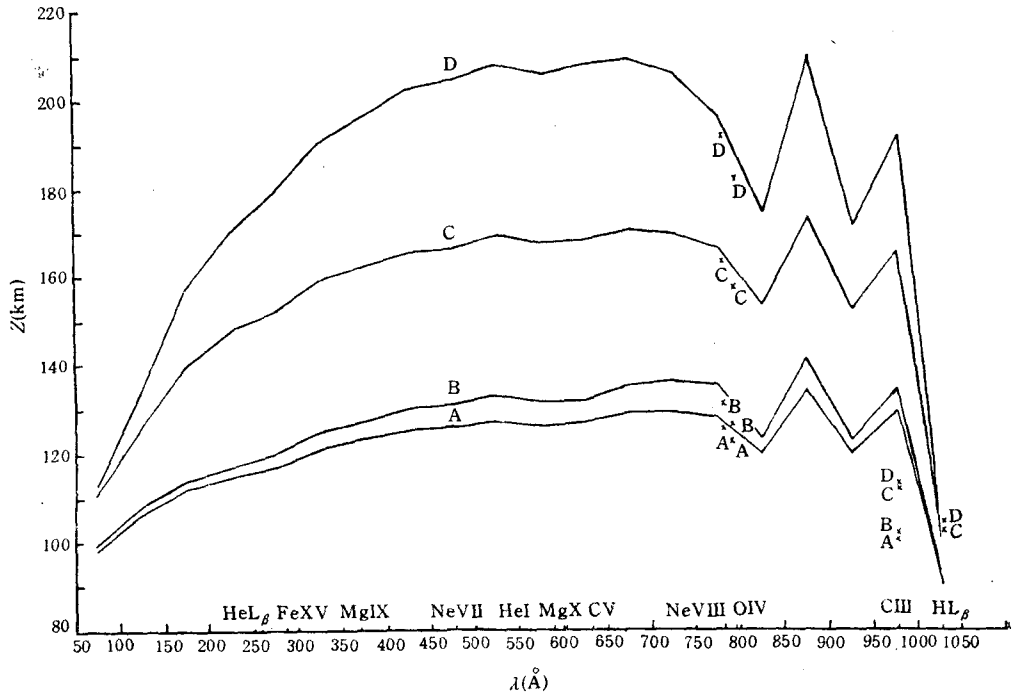
$$\int_{z_p}^{\infty} n_i(z)\mathrm{d}s = \mathrm{Ch}(z_p,\chi)\int_{z_p}^{\infty} n_i(z)\mathrm{d}z, \tag{3}$$

这里，$\mathrm{Ch}(z_p,\chi)$ 为 Chapman 掠射函数，χ 为太阳天顶角. 因此，单色辐射在大气中的透射比为

$$I_\lambda(z_p)/I_\lambda(\infty) = \exp[-\tau(z_p)], \tag{4}$$

$$\tau(z_p) = \sum_i \sigma_{ai}(\lambda)\int_{z_p}^{\infty} n_i(z)\mathrm{Ch}(z_p,\chi)\mathrm{d}z. \tag{5}$$

为求得透射高度随太阳活动的变化，必须有以下资料：1. 中性大气的吸收截面 $\sigma_{ai}(\lambda)$，其中包含电离截面；2. 中性大气成分数密度 $n_i(z)$ 及其随太阳活动的变化；3. 大气温度剖面 $T(z)$ 及其随太阳活动的变化；4. 太阳活动对 Chapman 函数的影响. 本文中将 50—1050Å 分成 37 个波段[6]，其中包括了有代表性的太阳发射线，如 HL_β、CIII、OIV、NeVIII、OV、MgX、HeI、NeVII、MgIX、FeXV 及 HeL_β 等. 在 50—1050Å 范围内，主要吸收成分为 N_2、O 和 O_2，它们所对应的电离波长分别为 $\lambda < 796$Å、$\lambda\lambda 796$—910Å 和 $\lambda\lambda 910$—1027Å[12]，它们的 $\sigma_{ai}(\lambda)$ 取自文献[6]，而大气的 $T(z)$ 和 $N_i(z)$ 及它们随太阳活动变化的资料取自 MSIS-86 热层大气模式[13]，太阳活动对 Chapman 函数的影响按文献[11]中的方法算出. 在计算中未考虑 NO 的吸收，因为 NO 主要在极区产生而且沿子午线梯度很大，其吸收在中低纬度比较起来可忽略不计[14]. 另外未考虑动力传输的作用，因为在白天分子离子的扩散可忽略，而且氧原子离子的扩散也会因分子离子的阻尼而变得很小[15]，即使考虑到它们的扩散其贡献也不大于 1%[16]. 在图 1 中分别给出了透射比为 $1/e$ 和 0.1/100 时的透射高度随太阳活动的变化，太阳活动高年和低年分别相当 $F_{10.7}$



A. 太阳低年，透射比为 0.1/100 (Solar min, transmittance 0.1/100)
B. 太阳高年，透射比为 0.1/100 (Solar max, transmittance 0.1/100)
C. 太阳低年，透射比为 $1/e$ (Solar min, transmittance $1/e$)
D. 太阳高年，透射比为 $1/e$ (Solar max, transmittance $1/e$)

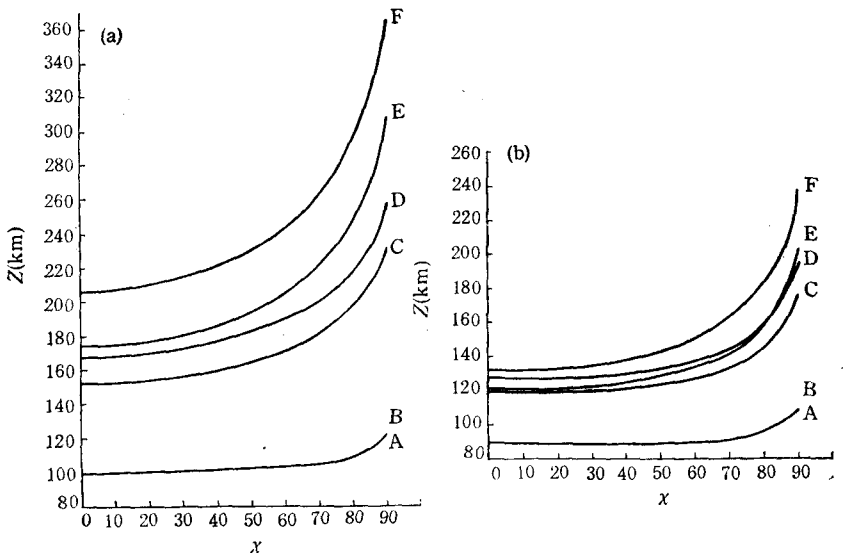
图 1　太阳 EUV 辐射在大气中透射高度随太阳活动的变化

Fig. 1　Variation of penetration height of solar EUV radiation with solar activity for an overhead sun

$= 234 \times 10^{-22}\mathrm{Wm^{-2}Hz^{-1}}$ 和 $F_{10.7} = 71 \times 10^{-22}\mathrm{Wm^{-2}Hz^{-1}}$. 由图看到：1. 太阳活动明显地影响着 EUV 的透射高度，太阳活动指数越大则透射高度越高；2. 透射比越大则透射高度越高，太阳活动的影响也越明显；3. 透射比为 0.1/100 时，这相当太阳活动高年对太阳常数的影响量级[7]，透射高度在 130km 以下，这正处在 E-F_1 谷高度，太阳活动引起 E-F_1 谷的高度和厚度变化的研究对正确了解电离层的层结高度很有意义，因为在电离层观测中无法得到 E-F_1 谷的回波；4. 在 50—100Å 和 950—1050Å 间，太阳活动的影响最小，说明其在 E 层比 F 层弱，这与文献[11]的结论一致. 这里应指出，在 50—100Å 的软 X-ray 区，主要吸收质为 N_2 和 O_2，经电离后产生 O_2^+、N_2^+、N^+ 和 O^+，平时能通量较小，只有当发生太阳耀斑时才大幅度增强，因而使电离率增加很快. 而在 950—1050Å 区，主要吸收质为 O_2，此波段内最强的太阳发射线为 HL_β 1025Å 和 CIII 977Å，它们来自太阳色球层及日冕区，并使 E 层产生 O_2^+. 虽然太阳活动对 E 层的影响比 F 层弱，但对研究日地关系至关重要，因为 E 层正处在低热层高度，在这里光化学及动力学过程十分复杂，又是当前知之甚小的高度范围，同时又是热层大气与中层大气耦合作用的区域，因而在日地关系研究中占有重要地位.

三、太阳活动与电离层日没效应

在电离层观测中，当天顶角 $\chi = 90.8°$ 时的天文日没前后[16]，经常出现电子密度的起伏，而且往往伴随E层、F_1层和F_2层高度抬升，出现散见及扩展，以及实际的日没时刻提前或推后．本文计算了在透射比分别为 $1/e$ 和 0.1/100 时透射高度随太阳天顶角及太阳活动的变化．在图2中只给出了其中三个波段，即 λλ500—550Å、λλ800—850Å 和 λλ1000—1050Å 的计算结果．由图看出：1.随着太阳天顶角的加大，太阳活动对EUV透射高度也加大，当接近天文日没时这种影响最显著，这说明此时太阳活动可使电离层峰



A: 1000—1050 Å 太阳低年 (solar min)
B: 1000—1050 Å 太阳高年 (solar max)
C: 800—850 Å 太阳低年 (solar min)
D: 800—850 Å 太阳高年 (solar max)
E: 500—550 Å 太阳低年 (solar min)
F: 500—550 Å 太阳高年 (solar max)
a: 透射比为 $1/e$ (transmittance = $1/e$)
b: 透射比为 0.1/100(transmittance = 0.1/100)

图2 透射高度随天顶角的变化

Fig. 2 Variation of penetration height with solar zenith angle

值高度抬升并促使出现散见与扩展；2.当透射比为 0.1/100 时，太阳活动的影响依然存在．实际上E层的电子密度要比F层小得多，因而回波也弱得多，但因仪器灵敏度的限制使E层的日没效应不易被分离出来．在D层，太阳活动对EUV透射高度几乎没有影响．D层的形态变化主要是由 $\lambda < 100$Å 的软X射线及 $\lambda > 1000$Å 的 HL_β 和 HL_α 的强度变化引起的，它们强烈地依赖太阳爆发．

EUV透射高度的变化意味着电子产生率的高度变化，因二者是成正比例的．电子含

量在日没时刻的快速变化无疑是由于电子产生率的快速变化造成的[16]. 为进一步说明出现上述现象的机制，再来分析(4)式和(5)式. 日没效应已经有过多种解释，但至今没有哪一种能使人完全信服，如为什么E层的散见并不像F层的扩展那么有规律，它们可能是由不同的机制引起的. 又如，为什么多数情况下扩展是向上的，向下的扩展很稀少，且扩展的幅度远远不如向上的大；日没的实际时刻有时提前于标准天文日没，有时又推迟，这显然是由于存在着一些相反的机制在制约着它们的变化. 本文认为有三个主要机制在同时起作用：1. 当透射比为一定时，太阳活动引起大气成分结构的变化造成 EUV 透射高度提高. 在太阳活动高年，$n_i(z)$ 比低年要大几个量级(见表 1)，且 $n_i(z)$ 越大导致透射高度抬升越多；2. 太阳活动使热层顶温度 $T(\infty)$ 及热层大气的温度梯度 $dT(z)/dz$ 提高，这又会使压力标高梯度 $dH_i(z)/dz$ 上升，因为在热层 $dT(z)/dz \gg dg(z)/dz$，$dT(z)/dz \gg$

表 1　热层大气结构随太阳活动的变化

Z (km)	$O(cm^{-3})$		$N_2(cm^{-3})$		$O_2(cm^{-3})$		$T(K)$	
	max	min	max	min	max	min	max	min
100	5.798E+11	4.124E+11	1.124E+13	9.576E+12	2.535E+12	2.240E+12	196	195
200	7.289E+09	3.680E+09	5.464E+09	2.487E+09	2.894E+08	1.485E+08	1220	757
300	1.777E+09	3.646E+08	4.826E+08	4.708E+07	1.845E+07	1.604E+06	1405	787
400	5.333E+08	4.202E+07	5.877E+07	1.086E+06	1.668E+06	2.159E+04	1432	788
500	1.689E+08	5.200E+06	7.874E+06	2.803E+04	1.678E+05	3.307E+02	1437	788
600	5.549E+07	6.834E+05	1.123E+06	8.040E+02	1.813E+04	5.712E+00	1438	788
700	1.883E+07	9.513E+04	1.695E+05	2.551E+01	2.088E+03	1.107E−01	1438	788
800	6.588E+06	1.399E+04	2.698E+04	8.911E−01	2.555E+02	2.395E−03	1438	788
900	2.372E+06	2.170E+03	4.516E+04	3.415E−02	3.313E+01	5.758E−05	1438	788
1000	8.784E+05	3.540E+02	7.936E+02	1.430E−03	4.542E+00	1.532E−06	1438	788

$dM(z)/dz$ ($g(z)$ 为重力加速度，$M(z)$ 为平均克分子量)，这反过来使 Chapman 函数下降，而 Chapman 函数下降又直接导致 EUV 透射高度下降[11]；3. 在低热层 (120km) 以下，经常出现由重力波引起的大气成分及温度场的中小尺度动力扰动[17]，而且由此引起的数密度 $n_i(z)$ 的起伏及 $T(z)$ 的振荡可以为正相关，也可以为负相关，这由动力扰动的空间尺度及时间尺度的大小决定[18]. 无疑，这种动力扰动会对E层的散见产生重要影响. 根据本文的计算结果，第一个机制的作用比第二个要强得多，因而二者的综合效应为：当天顶角接近标准天文日没时，太阳活动会明显抬高E层和F层的峰值高度，这是产生散见及扩展的基本原因. 但这里应特别指出，图 2 是由太阳活动高年和低年的热层大气模式算出的，它们仅代表模式化的平均状况. 在实际上，太阳活动状况是随时变化的，在太阳活动作用下，中低纬度 EUV 辐射通量及高纬区的粒子沉降会快速变化，并可造成热层大气的爆发性增温. 因此，$I_\lambda(\infty)$、$I_\lambda(z)$ 以及 $dT(z)/dz$ 和 $dH_i(z)/dz$ 对太阳活动的响应要比 $dn_i(z)/dz$ 的响应快. 因而在某些时候，Chapman 函数的变化所起的贡献有可能抵消掉，甚至超过由 $n_i(z)$ 的变化而引起的 EUV 透射高度变化. 这种情况下会出现，当 $F_{10.7}$ 通量上升，日没会在标准天文日没以后出现，即实际日没推迟，有时甚至迟于地面日没. 对E层，上述前两个机制的作用远比F层弱，但由于第三个机制的作用，会造成散

见 E_s 的形态各异。由于上述三个机制的综合作用，使电离层的日没效应带有多变的、复杂的性质，但总的现象均可用本文的理论给于较为圆满地解释。

四、结 论

1. 太阳活动可明显改变 EUV 辐射在大气中的透射高度。当透射比一定时，太阳活动越强则透射高度越高。透射比越大则太阳活动对透射高度的影响也越大。这表明，太阳活动对 F 层的影响比 E 层大。

2. 当透射比一定时，太阳天顶角越大则对透射高度的影响也越明显，太阳活动是导致日没时电离层峰值高度抬升，并促使出现散见与扩展的原因之一，但太阳活动上升又使 Chapman 函数下降并导致 EUV 透射高度降低。此外，重力波引起大气成分及温度场的振荡又可使散见与扩展有更复杂的多变性。平时观测到的日没效应即为这三个过程综合作用的结果。

3. 当透射比为 0.1/100 时，这与太阳常数的变化量值相比拟，太阳活动引起的日没效应仍可在 E 层以下显现出来，这对研究低热层高度的光化学及动力学过程会有实际意义。

参 考 文 献

[1] Marov, M. Ya. and A. P. Alpherov, *Space Res. XII*, Vol. **2**, p. 824, 1972.
[2] Lauter, A. E. and J. Taubenheim, *Space Res. XI*, p. 1005, 1971.
[3] Straus, J. M., *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. **16**, p. 183, 1978.
[4] Brasseur, G., Proc. of SCOSTEP Symposium, p. 166, 1988.
[5] Hinteregger, H. E., *Adv. Space Res.*, Vol. **1**, p. 39, 1981.
[6] Torr, M. R. and D. G. Torr and R. A. Ong, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. **6**, p. 771, 1979.
[7] Willson, R. E. and H. S. Hudson, *Nature*, Vol. **322**, p. 810, 1988.
[8] Lean, J., *J. Geophys. Res.*, Vol. **92**, p. 839, 1987.
[9] Ditchburn, R. W., *Proc. Roy. Soc.*, Ser. *A*, Vol. **236**, p. 216, 1956.
[10] Watanabe, K., *Adv. Geophys.*, Vol. **5**, p. 159, 1958.
[11] 陈耀武，徐秀娟和洪儒珍，空间科学学报，第 **10** 卷，第 265 页，1990.
[12] Winick, J. R., Solar-Terrestrial Physics, D. Reidel, p. 677, 1983.
[13] Hedin, A. E., *J. Geophys. Res.*, Vol. **92**, p. 4649, 1987.
[14] Garcia, R. A., S. Solomon, S. K. Avery and G. C. Reid, *J. Geophys. Res.*, Vol. **92**, p. 977, 1987.
[15] Schunk, R. W. and J. L. G. Walker, *Planet. Space Sci.*, Vol. **21**, p. 1875, 1973.
[16] Titheridge, J. E., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **36**, p. 1249, 1974.
[17] Chen, Y. W., F. L. Xiao and R. J. Hung, *Planet. Space Sci.*, Vol. **39**, p. 745, 1991
[18] 肖伏良，陈耀武和洪儒珍，空间科学学报，第 **11** 卷，第 278 页，1991.

EFFECTS OF SOLAR ACTIVITY ON EUV ABSORPTION PROCESSES IN THE UPPER ATMOSPHERE

Chen Yao-wu　Xu Xiu-juan

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing 100080)

R. J. Hung

(University of Alabama in Huntsville, USA)

Abstract

Using a set of aeronomical parameters, such as absorption cross sections for the dominant thermospheric constituents, EUV flux data from the Atmosphere Explorer Satellites and Hedin's MSIS-87 neutral thermospheric model, the variations of penetration heights of solar EUV radiation with maximum and minimum solar activities are numerically calculated. For transmittance being 1/e and 0.1/100, the variations of panetration height of EUV radiation in wavelength range 50—1050 A divided in 37 wavebands are also obtained. The results indicate the penetration heights are obviously controlled by solar activities, and the larger the transmittance is, the closer the correlative relation of penetration height with solar activity is. At the solar zenith angles near normal astronomical sunset, the solar activity leads to increasing the penetration heights on one hand, and to decreasing the Chapman's function, which reduces the penetration height on the other. These effects could physically explain some ionospheric phenomena observed at local sunset.

Key words　Solar activity, EUV radiation, Penetration height, Sunset effect