0254-6124/2006/26(2)-098-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Liao Hairen, Wang Jingsong. Modification and application of $E_{10.7}$ index in the band of soft X-ray. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(2): 98—103

$E_{10.7}$ 指数在软 X 射线谱段的修正应用*

廖海仁[1] 王劲松[1,2]

[1](北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

[2](中国气象局国家空间天气监测预警中心)

摘 要 表征 EUV 辐射通量的 $E_{10.7}$ 指数在越来越多的研究和应用中被用来代替传统的 $F_{10.7}$ 指数. X 射线对地球 D 层和 E 层的电离起着重要作用, 但由于 D 层观测数据的不足和 E 层电离源的多样性, 难以被用来考虑 X 射线对电离层的影响. 火星电离层下层的电离源几乎是单一的软 X 射线, 这为研究 X 射线对电离层的作用提供了可能性. 通过研究火星电离层下层的峰值电子浓度对 $E_{10.7}$ 的依赖关系, 发现即便经过必要的修正, 这种关系对不同的观测时段并不具备一致性. 通过理论推导和数据分析, 得到了一种特别用于描述太阳软 X 射线辐射通量的新指数, 即 $X_{\rm s}$ 指数, 用来替代 $E_{10.7}$ 指数. $X_{\rm s}$ 指数在描述火星电离层下层对太阳辐射的依赖关系时, 不同的观测时段有很好的一致性, 表明 $X_{\rm s}$ 指数在表征太阳软 X 射线辐射强度方面比 $E_{10.7}$ 指数更加合适.

关键词 $E_{10.7}$ 指数; EUV 软 X 射线; 火星电离层; $X_{\rm s}$ 指数

中图法分类号 P 353

Modification and Application of $E_{10.7}$ Index in the Band of Soft X-Ray

LIAO Hairen[1] WANG Jingsong[1,2]

[1](*School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing* 100871)

[2](*National Center for Space Weather Monitoring and Warning, China Meteorological Administration*)

Abstract The $E_{10.7}$ index representing the solar EUV irradiance flux has been used to replace the traditional $F_{10.7}$ index in more and more researches and applications. X-rays are important ionization source of the terrestrial D and E layer. Due to lack of enough observation to the D layer and versatile ionization sources of E layer, it is difficult to study the influence of X-rays to terrestrial ionosphere. The dominant ionization source for the secondary layer of Martian ionosphere is soft X-ray. This makes it possible to study the X-ray influence on the ionosphere. By studying the dependence of Martian ionospheric secondary layer peak density to $E_{10.7}$, it is found that even after necessary corrections, the dependences are in disagreement for different data sets. After data and theoretical analysis, a new index $X_{\rm s}$ is introduced to represents the solar soft X-ray irradiance flux. After replacing $E_{10.7}$ with this $X_{\rm s}$ index, the peak density dependences upon the solar irradiance are in good agreement for different data sets, indicating $X_{\rm s}$ index is a better measure of solar soft X-ray irradiance than $E_{10.7}$ index.

Key words $E_{10.7}$, EUV Soft X-rays, Martian ionosphere, Index $X_{\rm s}$

* 国家自然科学基金面上项目资助 (40374058)

2005-06-06 收到原稿, 2005-12-15 收到修定稿

1 引言

$E_{10.7}$ 指数是 Solar2000 太阳辐射模型中引进的一个新的太阳辐射指数，其物理意义是在地球大气层顶部的积分 EUV 能量通量. $E_{10.7}$ 指数在越来越多的研究和应用中代替传统的 $F_{10.7}$ 指数. 然而，$E_{10.7}$ 指数并不能很好地反映太阳辐射中 X 射线强度的变化 [1]，而 X 射线对地球 D 层和 E 层影响很大 [2],[3]. 由于 E 层的电离源的复杂性 (X 射线和 EUV 辐射的贡献难以确定 [4]) 和 D 层观测数据的不足，所以它们难以被用来研究 X 射线对地球电离层的影响.

火星电离层观测到的电子浓度剖面绝大部分呈现明显的两层结构 [5]. 火星电离层下层的电离源几乎是单一的软 X 射线辐射 [6]，这为研究 X 射线对电离层的影响提供了可能性.

我们分析了火星全球勘探者 (MGS) 通过掩星方法获得的火星电离层电子浓度剖面数据 [7]. 由于观测时火星处的软 X 射线通量无法得到，首先使用经过距离和方向修正的 $E_{10.7}$ 指数作为火星处太阳 X 射线辐射的近似. 研究火星电离层下层的峰值浓度随太阳辐射、太阳天顶角 (SZA) 的变化关系. 然后通过理论与观测的比较来推断观测时段火星处软 X 射线辐射通量与修正的 $E_{10.7}$ 关系，定义出专门用于描述太阳软 X 射线辐射通量的指数，即 $X_{\rm s}$ 指数. 最后将这种关系回推到地球距离处，得到软 X 射线通量与 $E_{10.7}$ 的关系.

2 $E_{10.7}$ 指数及其不足

尽管人们在很早就意识到，10 cm 射电辐射不参与任何大气的加热、电离或离解过程，由于长期以来没有连续的太阳 EUV 辐射谱的观测数据，基于地面观测的 10 cm 射电辐射通量而得到的 $F_{10.7}$ 指数，一直作为 EUV 辐射的表征被广泛使用. 但有研究表明，在太阳活动剧烈的条件下，用 $F_{10.7}$ 指数代替总体的 EUV 辐射通量可能有 +60%—−50% 的误差 [8].

$E_{10.7}$ 指数为在 Solar2000 太阳辐射模型中引进的一个新的太阳辐射指数 [9]. 它的定义是太阳在 1 AU 处的实时 EUV 能量通量，以与传统的 $F_{10.7}$ 指数相同的单位 ($10^{-22}\,{\rm cm}^{-2}\cdot{\rm Hz}^{-1}$) 表示出. Solar2000 是以观测的太阳辐射 (从 X 射线到红外辐射，即 1—10^6 nm) 数据为基础构建的经验太阳辐射模型 [10].

$E_{10.7}$ 的建模结果表明，对于中长期的变化，$E_{10.7}$ 几乎与 $F_{10.7}$ 等效. 但是对于天变化和更小时间尺度上的变化，两者却有很大的不同，即 $F_{10.7}$ 比 $E_{10.7}$ 变化幅度更大 [9].

由于与传统的 $F_{10.7}$ 指数相比，$E_{10.7}$ 指数具有众多明显的优点 [8],[9]，$E_{10.7}$ 指数自从推出以来，在越来越多的研究和应用中作为 EUV 辐射的表征得到使用.

地球电离层 F 层的电离源主要为 17—91.1 nm 的 EUV 辐射和 He I 58.4 nm，He II 30.4 nm 辐射射线 [4]. 对于 F 层的研究曾长期使用 $F_{10.7}$ 指数，但是越来越多地为 $E_{10.7}$ 指数所替代.

D 层的电离源有 0.1—1 nm 的太阳 X 射线、宇宙线和 Lyman-α (121.6 nm) 辐射. 一般情况下，80—90 km 之间，0.1—1 nm 的太阳 X 射线是主要的电离源. Lyman-α 辐射对 70—80 km 的电离起很大作用. 宇宙线则是更低层大气的电离源 [3]. 但是在太阳扰动期间，X 射线的变化很大，可能成为更低高度大气主要的电离源 [11].

E 层主要离子是 O_2^+ 和 NO^+，其离子产生过程非常复杂，对其有贡献的辐射有 1—17 nm 的 X 射线，91.1—102.7 nm 的 EUV 辐射以及太阳 Lyman-β (102.6 nm) 射线. X 射线对 E 层的电离的重要性可能超过 EUV 辐射. 但是 X 射线和 EUV 对于 E 层电离贡献的相对大小不是十分清楚，可能随着太阳活动周期的变化而变化. 而且 X 射线产生的光电子可能产生二次电离，所以 E 层的电离过程十分复杂 [4].

虽然 X 射线对于地球 D 层和 E 层的电离起着重要作用，但是由于 D 层和 E 层电离源的复杂性以及 D 层的观测数据的缺乏，使得研究 X 射线对电离层的影响十分困难.

长期以来，对于软 X 射线太阳辐射的观测数据较为缺乏，包括 Solar2000 在内的太阳辐射模型对于软 X 射线谱段的建模在很长时间内都存在着不足，$E_{10.7}$ 指数在描述太阳 X 射线辐射通量方面也存在明显的不足 [1]. 对此，需要新的解决方案.

3 火星电离层简介

火星电离层的电子浓度剖面大都呈现明显的两层结构. 图 1 为由 MGS 探测到火星电离层的众多电子浓度剖面中的两个. 火星电离层上层的峰值高度约为 135 km, 主要离子成分是 O_2^+, 由到达火星的太阳 EUV 辐射和 He Ⅱ 30.4 nm 辐射所控制; 下层的峰值高度约为 110 km, 主要的离子成分是 O_2^+ 和 NO^+, 其峰值浓度主要由软 X 射线 (3—4.9 nm) 所控制 [2],[5],[6]. Rishbeth 等将火星电离层的下层和上层分别类比于地球电离层的 E 和 F_1 层 [6]. Lyman-β 射线是地球 E 层的重要电离源, 由于它不电离火星大气的主要成分 CO_2, 所以它对火星电离层下层的电离不起主要作用 [6].

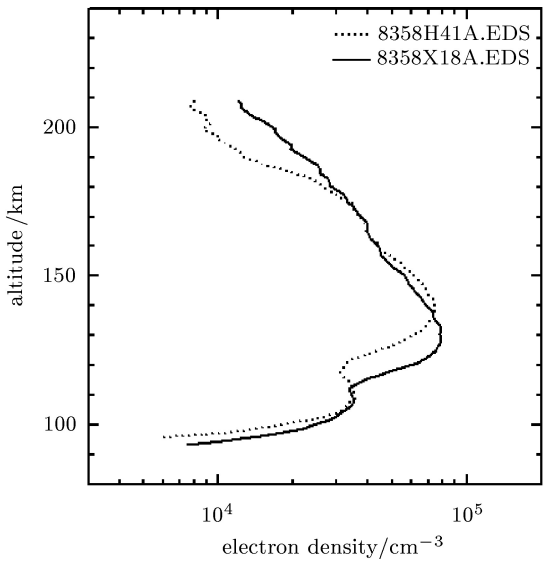

图 1 MGS 探测到的火星电离层的两个电子浓度剖面

Fig.1 Two Martian ionospheric electron density profiles observed by MGS

火星电离层下层的电离源几乎是单一的软 X 射线 [6], 因此火星电离层可以成为软 X 射线建模的辅助. Fox[1],[12] 曾利用太阳辐射对火星电离层的下层的影响对标准太阳辐射模型在波长短于 20 nm 的太阳辐射通量进行重新建模, 建议在 20 nm 以下的太阳辐射不应只是增加一个常数因子, 而是波长越短, 增加的因子数应该越大.

4 火星电离层下层峰值电子浓度随太阳辐射的变化

选取了截止至 2004 年底 MGS/RS 小组公布的火星电离层电子浓度剖面数据中观测时间连续各约半个地球年 (即一个火星季节) 的两段数据进行分析. 表 1 列出了这两段数据的基本情况. 其中 L_s 是太阳经度 (Solar Longitude), 表征火星上的季节变化 (变化范围 0°—360°, 0° 为春分点), SZA 为太阳天顶角, LAT 为纬度. 这两段数据占已经获得的数据的 90%, 观测对应的季节、太阳天顶角跨度和地理纬度都非常类似, 因此非常适合于作对比研究.

对这两段数据的火星电离层下层峰值浓度与太阳辐射及 SZA 的关系进行了研究, 所有的数据都进行了天平均以消除经度效应 [13]–[15].

在火星轨道处的软 X 射线通量和 EUV 辐射通量没有直接观测数据, 但是 EUV 辐射通量可以由地球距离处的 $E_{10.7}$ 经过距离和方向修正得到. 由于目前并没有一个可靠的描述软 X 射线通量的指数, 首先用修正过的 $E_{10.7}$ (记为 $E'_{10.7}$) 作为太阳辐射输入的近似来考察火星电离层下层峰值浓度 N_m 与太阳辐射之间的关系. 图 2 给出了火星电离层下层峰值浓度、SZA、$E'_{10.7}$ 随太阳经度 (L_s) 的变化. 从图 2 可以看出, 峰值浓度总体上随着 SZA 的减少而增加, 这与经典的 Chapman 理论的预计一样, 而其峰值浓度短时间尺度上的起伏与太阳辐射的起伏有着很好的对应关系.

若以 $E'_{10.7}$ 表征太阳辐射, 则有 [16]

$$\frac{\mathrm{d}\ln N_m}{\mathrm{d}\ln(E'_{10.7}\cos\chi)} = k. \tag{1}$$

其中, χ 为 SZA, k 为由光化学过程决定的一个参数. 对于标准的 Chapman 层, $k = 0.5$; 对于火星电离层的上层, 曾经获得 $k \approx 0.36$[2],[16].

表 1 两个时段数据的基本情况

Table 1 Summary of two investigated data sets

时段 (剖面数)	日期	L_s/(°)	SZA/(°)	LAT/(°N)
Ⅰ (1572)	2000-11-1—2001-6-6	70.1—173.8	71.8—86.9	63.4—85.5
Ⅱ (1805)	2002-11-1—2003-6-4	89.0—197.3	71.0—83.7	60.6—84.4

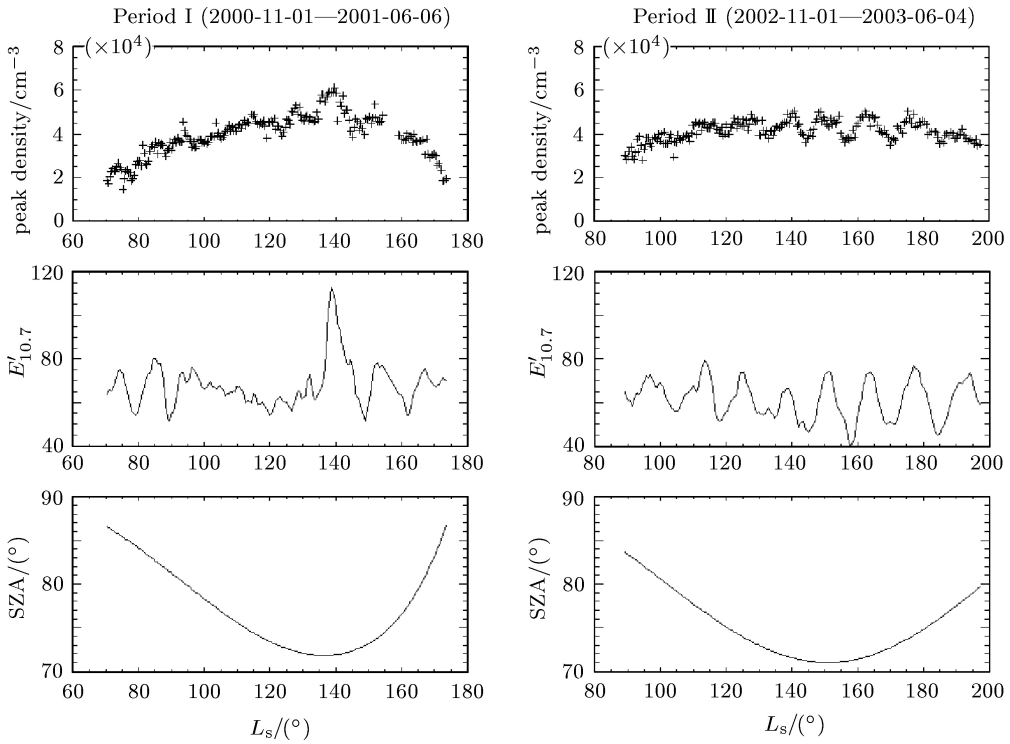

图 2 火星电离层下层峰值浓度及相应的太阳天顶角 (SZA) 和修正的 $E_{10.7}$ 指数随 L_s 的变化 (修正的 $E_{10.7}$ 用 $E'_{10.7}$ 表示，是在 1 AU 的 $E_{10.7}$ 考虑到日地、日火的距离差异及地球与火星的公转相位差后经修正得到的)

Fig.2 Variations of the secondary peak density and corresponding adjusted $E_{10.7}$ and Solar Zenith Angle (SZA) variations with solar longitude (L_s). The adjusted $E_{10.7}$, which is denoted as $E'_{10.7}$, is derived from $E_{10.7}$ index with considering the attenuation of the solar radiation flux from the Earth orbit to the Mars orbit and the time shift caused by the angle of Earth-Sun-Mars

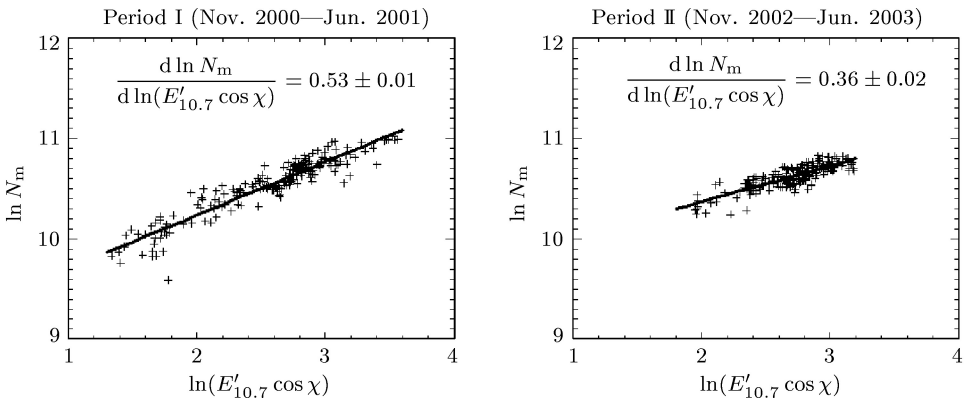

图 3 火星下层峰值浓度与 $E'_{10.7}$ 及 χ(SZA) 的关系

Fig.3 Martian secondary peak density versus $E'_{10.7}$ and χ (SZA)

图 3 显示了两个时段中 N_m 与 $E'_{10.7}$ 与 SZA 的相互关系. 对于时段 I, $k = 0.53$, 对于时段 Ⅱ, $k = 0.36$.

5 X_s 指数的引入

从表 1 中可以看出，两个时段所处的季节、观测数据的太阳天顶角跨度和地理纬度都非常类似,

这意味着可以期望这两个时段能有一致的结果. 事实上, 两个时段的 k 值有很大差别, 这是值得注意和讨论的.

经过分析, 我们认为最可能的原因在于两个时段太阳辐射情况的不同. 从图 2 的两个时段中 $E'_{10.7}$ 随 $L_{\rm s}$ 的变化可以粗略看出这种不同. 表 2 总结了两个时段的太阳辐射情况. 可以看出, 时段 I 的平均 $E'_{10.7}$ 比时段 II 约大 10%, 标准偏差比时段 II 约大 20%, 表明时段 I 比时段 II 的太阳活动更剧烈, 变化更大.

表 2 两个时段的太阳辐射情况

Table 2 Solar radiation conditions during the considered two periods

时段 (天数)	$E'_{10.7}$ 最小值	$E'_{10.7}$ 最大值	平均 $E'_{10.7}$
I (209)	51.3	113.1	67.8±10.4
II (216)	40.1	79.4	61.5±8.6

在上述分析中, 使用 EUV 表征的 $E_{10.7}$ 指数作为导致火星电离层下层电离的太阳辐射输入的近似. 事实上, 以上已经说明, 火星电离层下层的主要电离源是软 X 射线, 而不是 EUV 辐射. 因此, 对于火星电离层下层而言, $E_{10.7}$ 指数不能作为一个很好的太阳辐射输入的表征.

以下我们尝试引入一个描述火星轨道处软 X 射线辐射通量的指数 $X'_{\rm s}$, 并期待利用这个指数作为火星电离层下层太阳辐射的输入时, 在两个时段能取得一致的结果. 理论上的考虑, 如果 $E'_{10.7}$ 能很好地描述软 X 射线通量的情况, 则对于时段 I、II 有 $k_{\rm I}=k_{\rm II}$, 但实际上 $k_{\rm I}=0.53\pm0.01$, $k_{\rm II}=0.36\pm0.02$, 两者并不相等. 对于新的指数 $X'_{\rm s}$, 必须满足

$$\frac{{\rm d}\ln N_{\rm m}}{{\rm d}\ln(X'_{\rm s}\cos\chi)}=\gamma, \tag{2}$$

对于时段 I、II, γ 应该是同一个值.

方程 (1)(2) 经过简单的变形, 可以得到

$$N_{{\rm m}i}=N_{0i}(E'_{10.7{\rm i}}\cos\chi_i)^{k_i},\quad i={\rm I},\,{\rm II}; \tag{3}$$

$$N_{{\rm m}i}=N_x(X'_{{\rm si}}\cos\chi_i)^{\gamma},\quad i={\rm I},\,{\rm II}. \tag{4}$$

其中, $N_{0{\rm I}}$、$N_{0{\rm II}}$ 是从观测数据拟合得到的, 从拟合数据可以推得

$$N_{0{\rm I}}=9.7\times10^4\ {\rm cm}^{-3},$$

$$N_{0{\rm II}}=1.6\times10^5\ {\rm cm}^{-3}.$$

N_x 和 γ 是待定的值, 但对于时段 I 和 II 取值一定相同.

由式 (3), (4) 可以推得,

$$X'_{{\rm si}}=\left(\frac{N_{{\rm m}i}}{N_x}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\left(\frac{N_{{\rm m}i}}{N_{0i}}\right)^{-\frac{1}{k_i}}E'_{10.7{\rm i}},\quad i={\rm I},\,{\rm II}. \tag{5}$$

我们的目标是找到某一 γ 和 N_x 值, 使得 $X'_{\rm s}$ 与 $E'_{10.7}$ 的关系对于 I、II 时段是一致的.

经过迭代, 发现在 $\gamma=0.46$, $N_x=2.0\times10^5\ {\rm cm}^{-3}$ 时, 两个时段 $X'_{\rm s}$ 与 $E'_{10.7}$ 的关系的一致性最好. 这时得到的 $X'_{\rm s}$ 与 $E'_{10.7}$ 的关系为

$$X'_{\rm s}=0.34E'_{10.7}-2.3. \tag{6}$$

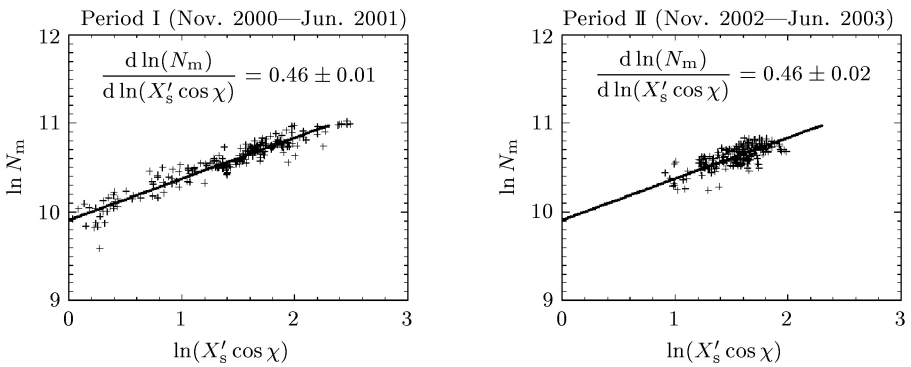

图 4 $N_{\rm m}$ 与 $X'_{\rm s}$ 及 SZA (χ) 的关系 ($X'_{\rm s}$ 为新引入的描述火星轨道处软 X 射线辐射输入的指数. $X'_{\rm s}$ 与 $E'_{10.7}$ 的近似关系为 $X'_{\rm s}=0.34E'_{10.7}-2.3$)

Fig.4 $N_{\rm m}$ versus $X'_{\rm s}$ and SZA (χ) ($X'_{\rm s}$ is a newly introduced index that represents the solar soft X-ray irradiance flux at Mars orbit. The relationship between $X'_{\rm s}$ and $E'_{10.7}$ is $X'_{\rm s}=0.34\ E'_{10.7}-2.3$)

利用 $X'_{\rm s}$ 指数，重新考察 $N_{\rm m}$ 与太阳辐射的关系，发现两个观测时段有了很好的一致性 (见图 4). 这说明， $X'_{\rm s}$ 指数成功地描述了太阳软 X 射线辐射对火星电离层下层电离源的通量.

如果将 $X'_{\rm s}$ 回推到地球距离处，则可以得到地球轨道处一个描述软 X 射线辐射通量的指数 $X_{\rm s}$ 与 $E_{10.7}$ 的关系

$$X_{\rm s} = 0.34E_{10.7} - 5.3, \qquad (7)$$

值得指出的是, 由于太阳辐射有很强的时变性, 采用不同时段的数据分析，上述结论可能会有所不同. 因此普适的 $X_{\rm s}$ 指数需要更多数据的支持.

6 总结

X 射线对于地球电离层的 D 层和 E 层的电离有着重要的影响，但是由于电离源的复杂性，难以单独研究 X 射线对电离所起的作用. 火星电离层下层的光化学过程几乎受单一的软 X 射线控制. 通过分析火星电离层的观测数据和理论推导，首先得到火星距离处描述软 X 射线通量新的指数 $X'_{\rm s}$ 指数与修正的 $E_{10.7}$ 指数 $E'_{10.7}$ 的关系，结果表明这一新的指数很成功地描述了太阳软 X 射线辐射对火星电离层下层的电离源的通量. 同样，经过适当变换可以得到地球距离处描述 X 射线通量的指数 $X_{\rm s}$. 这种 $X_{\rm s}$ 指数可以用来考察地球 E 层和 D 层对太阳辐射的细微依赖关系.

参考文献

[1] Fox J L. Response of the Martian thermosphere/ionopshere to enhanced fluxes of solar soft X-rays. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: doi:10.1029/2004JA010380

[2] Hantsch M H, Bauer S J. Solar control of the Mars ionosphere. *Planet. Space Sci.*, 1990, **38**:539—542

[3] Margatet G K, Christopher T R. Introduction to space physics. Beijing: Science Press, 2001. in Chinese (Margaret G K, Christopher T R. 太空物理学导论. 北京：科学出版社， 2001)

[4] Rishbeth H, Garriott O K. Introduction to Ionospheric Physics. New York: Academic Press, 1969

[5] Bougher S W, Engel S, Hinson D, Forbes J. Mars Global Surveyor radio science electron density profiles: Neutral atmosphere implications. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**:3091—3094

[6] Rishbeth H, Mendillo M. Ionospheric layers of Mars and Earth. *Planet. Space Sci.*, 2004, **52**:849—852

[7] Hinson D P, Simpson R A, Twicken J D, Tyler G L, Flasar F M. Initial results from radio occultation measurements with Mars global surveyor. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:26 297—27 012

[8] Tobiska W K. Validating the solar EUV proxy $E_{10.7}$. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12):29 969—29 978

[9] Tobiska W K *et al.* The Solar2000 empirical solar irradiance model and forecast tool. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2000, **62**:1233—1250

[10] Tobiska W K. Solar2000 irradiances for climate change, aeronomy, and space systems engineering. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**(8):736—746

[11] Xiong Nianlu. Introduction to Ionospheric Physics. Wuhan: Wuhan University Press, 1999. in Chinese (熊年禄等. 电离层物理导论. 武汉：武汉大学出版社， 1999)

[12] Fox J L, Zhou P, Bougher S W. The Martian thermosphere/ionosphere at high and low solar activities. *Adv. Space Res.*, 1995, **17**(11):203—218

[13] Bougher S W *et al.* MGS Radio Science electron density profiles: Interannual variability and implications for the Martian neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: doi:10.1029/2003JE002154

[14] Wang J S, Nielsen E. Evidence for topographic effects on the Martian ionosphere. *Planet. Space Sci.*, 2004, **52**:881—886

[15] Wang J S, Nielsen E. Solar wind modulation of the Martian ionosphere observed by Mars Global Surveyor. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**:2277—2281

[16] Breus T K *et al.* Effect of the solar radiation in the topside atmosphere/ionosphere of Mars: Mars Global Surveyor observations. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: doi:10.1029/2004JA010431