



不同太阳辐射指数对大气模型精度的影响分析

汪宏波^{①②*}, 赵长印^①

① 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;

② 中国科学院研究生院, 北京 100039

* E-mail: whb@pmo.ac.cn

收稿日期: 2008-04-08; 接受日期: 2008-09-16

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10773033)

摘要 利用 2001 至 2005 年 CHAMP 卫星加速仪资料反演的大气点密度数据, 结合大气模型 CIRA72, DTM94, NRLMSISE00 和 JB2006, 分析了不同辐射指数 $F_{10.7}$, $E_{10.7}$, S_{10} , Mg_{10} 对模型精度的影响. 结果表明: (i) 在低太阳辐射($F_{10.7} < 160$)时, 用 $E_{10.7}$ 取代 $F_{10.7}$ 能使模型精度提高约 15%, 但在强太阳辐射($F_{10.7} > 200$)时, $E_{10.7}$ 计算的误差弥散度急剧增大, 从而导致模型精度降低; (ii) S_{10} 和 Mg_{10} 指数在中低太阳辐射时对模型精度影响不大, 在强太阳辐射时能降低误差的弥散度, 与 $E_{10.7}$ 联合使用能使模型精度提高约 20%; (iii) 多种指数联合建模的 JB2006 模型比 DTM94 精度高; (iv) 低太阳辐射情形下, JB2006 与 NRLMSISE00 精度接近, 强太阳辐射情形下 $E_{10.7}$ 计算的 JB2006 比 NRLMSISE00 剪度高, 特别是在 2003 年 10 月的太阳爆发中, JB2006 与 CHAMP 观测最接近. 总之, 不同的指数对模型精度的贡献体现在不同的方面. $E_{10.7}$ 指数主要是在中低太阳辐射时降低模型的平均误差; S_{10} 和 Mg_{10} 指数主要是在强太阳辐射时降低模型误差的弥散度.

关键词

太阳辐射指数
CHAMP
加速仪资料
大气模型

大气阻力是影响近地卫星运动的一个重要摄动源, 而大气密度模型又是大气阻力计算中最主要的误差来源. 早在第一颗人造卫星上天以来, 国外就开展了大气模型的研究. 1964 年 Jacchia 提出 Jacchia64 模型^[1], 以扩散平衡方程的数值积分为基础, 较完整地考虑了大气密度随高度、纬度、地方时、周年、太阳辐射指数和地磁指数的变化规律, 之后还发表 Jacchia71 和 Jacchia77 等修订版本, 该系列模型是最早的“三维大气密度模型”, 直到今天仍然是很多大气模型的建模基础. 其他研究机构也相继推出了一些著名的大气模型, 如 NASA MET, DTM78, DTM94, MSIS90, NRLMSISE00 等.

由于高层大气变化极其复杂, 建模数据的精度有限, 从 Jacchia64 发表以来的 40 多年间, 几乎所有

模型的内符合误差始终处于 15%~20% 之间. 尽管人们不断地使用精度更高的数据对模型参数进行改进, 但“15%”的误差似乎成为大气模型“精度的极限”^[2].

国外已经有研究者开始寻找制约模型精度的瓶颈, 一个可能的因素就是太阳辐射指数. 现有的大气模型都采用太阳 10.7 cm 辐射流量 $F_{10.7}$, 但事实上这种波长的辐射基本不对大气加热^[3]. 相反地, 那些对大气有加热效应的辐射在穿过大气层的过程中被吸收了, 地面上测量不到, 因此只能借用 $F_{10.7}$ 间接地描述太阳辐射对大气的加热程度.

Tobiska^[3]在 2000 年提出一种新的太阳辐射指数 $E_{10.7}$, 并称在大气模型中使用该指数取代 $F_{10.7}$ 能明显提高 SME 卫星轨道半长径衰减的预报精度. 2006 年 Bowman 等人^[2]提出另外两种指数 S_{10} 和 Mg_{10} , 并

以CIRA72模型为基础,将3种指数 $F_{10.7}$ 、 S_{10} 、 Mg_{10} 联合建模得到JB2006大气模型. 据称在400 km高度平静地磁的情形下,模型内符合误差从16% (CIRA72)减小到10%. 由此可见,建模中采用新的太阳辐射指数是提高大气模型内符合精度的一种有效途径. 但是新的辐射指数能否提高大气模型的外符合精度,有多大程度的提高,这些才是模型使用者们最为关心的问题,它关系到这些新指数的实用性和普适性.

CHAMP卫星是德国在2000年7月发射的一颗重力卫星,运行在高度454 km、倾角87°的近圆极轨道上. 卫星安装了星载加速仪,能实时精密地测量作用在卫星质心的非引力加速度,例如大气阻力、太阳光压、地球反照等. 本文将利用2001~2005年CHAMP卫星加速仪资料反演的大气点密度数据,对4种大气模型(CIRA72, DTM94, NRLMSISE00, JB2006)在使用不同辐射指数时的外符合精度进行分析,为今后在卫星定轨和预报工作中辐射指数的选择提供参考.

1 大气模型和太阳辐射指数

1.1 用于比较的大气模型

CIRA72全称是“国际参考大气模型1972”. 它实际上是Jacchia71模型,在1972年做了微小改动后被国际空间研究委员会(COSPAR)命名为CIRA72^[1]. 它能计算90~2500 km的大气密度.

DTM94模型采用扩散平衡方程的分析解形式,联合卫星阻力资料、大气成分和温度资料估计模型系数. 卫星定轨实践表明,DTM94是一种较为实用的大气模型.

NRLMSISE00是美国海军研究实验室(NRL)在2001年发表的大气模型. 它以MSISE90模型为基础,主要改进在于500 km高度以上增加了一种新的大气成分:氧离子(O^+)或热氧原子(hot-oxygen). 模型作者认为,这种新成分对卫星受到的大气阻力贡献很大,应该计入气体总密度中.

JB2006(Jacchia-Bowman 2006)是Bowman等人2006年10月发表的采用多种太阳辐射指数的大气模型. 它以CIRA72模型为基础,采用指数组($F_{10.7}$ 、 S_{10} 、 Mg_{10})代替 $F_{10.7}$ 计算外层温度,其他的物理方程与CIRA72基本相同. JB2006模型是对多种辐射指数联

合建模的一次有益尝试.

1.2 太阳辐射指数

太阳活动对大气密度的影响,主要是太阳辐射对大气的加热,使得大气升温,密度增大. 大气模型中通过输入太阳辐射指数,计算外层温度随辐射强度的变化,从而刻画出大气密度的27 d变化(太阳自转引起),11 a变化(太阳活动周期)等.

$F_{10.7}$ 是太阳10.7 cm波长(2800 MHz)射电辐射流量,由位于加拿大英属哥伦比亚彭带克顿市的射电天文台每天17时(UTC)对太阳进行观测得到. 它的单位是“sfu”(太阳辐射通量, $1 \text{ sfu} = 1 \times 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)^[2]. 20世纪60年代,人们发现 $F_{10.7}$ 与大气密度有较强的相关性,后来一直使用它描述太阳辐射水平,在当时的精度需求下取得了较好的效果.

$E_{10.7}$ 是太阳光谱中波长为1~105 nm的辐射流量. 2000年美国空间环境技术中心SpaceWX发布了“SOLAR2000太阳经验发光模型”, $E_{10.7}$ 就是该模型描述太阳对大气加热效应的指数. 由于对大气有加热效应的辐射基本都集中在1~105 nm的波段,故SpaceWX认为 $E_{10.7}$ 比 $F_{10.7}$ 更能精确描述太阳对大气的加热程度,它的单位与 $F_{10.7}$ 一致,可以无需修改地输入大气模型^[3].

S_{10} 是太阳光谱中波长为26~34 nm的辐射流量. 1995年底美国宇航局(NASA)和欧空局(ESA),向距离地球 $150 \times 10^4 \text{ km}$ 的太阳-地球Lagrange-L1点的晕轨道发射了SOHO卫星,卫星上携带了“太阳极紫外监听器(SEM)”. 仪器每隔15 s监测一次波长为26~34 nm的辐射. SpaceWX对SEM的测量数据进行处理后得到指数 S_{10} ,单位是“sfu”.

Mg_{10} 是MgII指数归算到sfu单位后的数值. 美国国家海洋气象局的两颗卫星NOAA16和NOAA17测量波长为280 nm的辐射流量,再与太阳连续谱流量求比值得到MgII指数. Thuillier等人^[4]就研究了基于MgII指数的DTM大气模型,据称在轨道预报中比传统的 $F_{10.7}$ 大气模型精度高.

从数据来源看, $F_{10.7}$ 是地面测量值,有专门机构管理和发布; $E_{10.7}$ 是SOLAR2000模型值,依赖于模型数据的更新; S_{10} 和 Mg_{10} 是卫星的空间测量值,依赖于卫星计划的实施. 相比于 $F_{10.7}$,其他3种指数更新

较慢, 特别是 S_{10} 和 Mg_{10} 指数, 可用的数据仅为 1996 至 2005 年, 目前只能用于事后的分析研究.

1.3 不同辐射指数之间的比较

由于 4 种指数的单位是一致的, 可以直接比较它们在数值上的差异. 图 1(a) 是 1947 年以来的 5 个太阳活动周期内 $E_{10.7}$ 与 $F_{10.7}$ 的比较. 可以看出早期差异达到 150. 1960 年后两种数据的差值在 ± 70 以内. 太阳活动峰年的差异比谷年大, 从平均值上看 $E_{10.7}$ 比 $F_{10.7}$ 大 20 左右. 图 1(b) 说明 $E_{10.7}$ 有多种版本, 随着 SOLAR2000 的版本升级, $E_{10.7}$ 的数值也有细微变化. 图中给出了 2.30 版本(2006 年 11 月发布)和 2.31 版本(2007 年 7 月发布)之间的差异, 大约在 $-30 \sim 20$ 之间,

太阳活动剧烈时差异最大, 太阳活动平静时差异在 ± 10 以内.

图 2 显示了 2001~2003 年 4 种指数的 27 d 平均变化. 可以看出, 指数的长期变化规律是一致的. 太阳活动峰年时 $E_{10.7}$ 数值在 4 种指数中最大, 其他 3 种指数较为接近, 但 $F_{10.7}$ 起伏较大, S_{10} 和 Mg_{10} 变化相对平稳.

2 大气模型中使用不同太阳辐射指数时精度的比较

首先利用 2001~2005 年 CHAMP 加速仪资料反演出大气点密度(计算方法见文献[5]), 共得到 1599 d 近

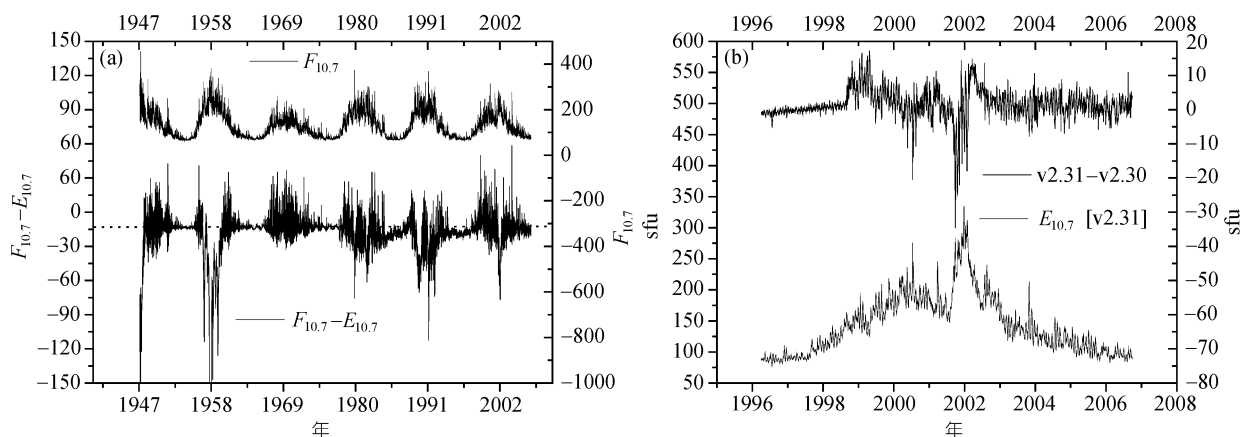


图 1 $E_{10.7}$ 和 $F_{10.7}$ 的比较以及 $E_{10.7}$ 版本间差异

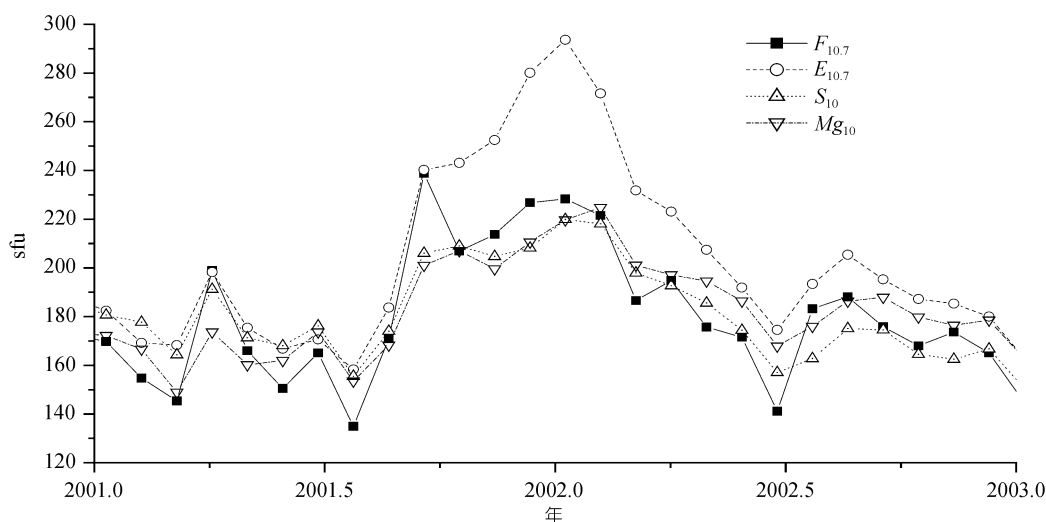


图 2 太阳活动峰年 4 种辐射指数的 27 d 平均变化

800 万个点密度资料, 再根据 CHAMP 卫星星历调用大气模型(CIRA72, DTM94, NRLMSISE00, JB2006)计算模型密度, 将模型密度和 CHAMP 点密度求比值, 即 $R = \rho_{\text{model}}/\rho_{\text{champ}}$; 再对 R 进行统计分析, 计算均值 $\bar{R}$ 和方差 σ , 则 $(\bar{R}-1)$ 代表模型的相对误差, σ 代表模型误差的弥散程度.

我们从 3 个方面进行比较: (i) 用 $E_{10.7}$ 取代 $F_{10.7}$, 观察 4 个模型的精度是否有明显提高; (ii) 比较 CIRA72 和 JB2006 模型, 分析 S_{10} 和 Mg_{10} 指数能否提高模型精度; (iii) 观察 JB2006 和 DTM94,

NRLMSISE00 模型在太阳剧烈爆发事件中的响应, 以及它们在较长时期内精度的比较.

图 3 是 2001~2005 年辐射指数 $F_{10.7}$ 和 $E_{10.7}$ 的变化以及样本数随 $F_{10.7}$ 的分布. 可以看出, 这段时间辐射流量从 70~260 都有分布, 并且样本数充足.

2.1 $E_{10.7}$ 取代 $F_{10.7}$ 对模型精度的影响

首先统计模型误差的 27 d 平均值. 图 4 是模型误差随时间的变化. 可以看出, 用 $F_{10.7}$ 计算的模型误差普遍在 -30% 附近, 这表明 4 个模型都低估了大气真实密度. 用 $E_{10.7}$ 代入模型, 2003 年后的误差普遍减小

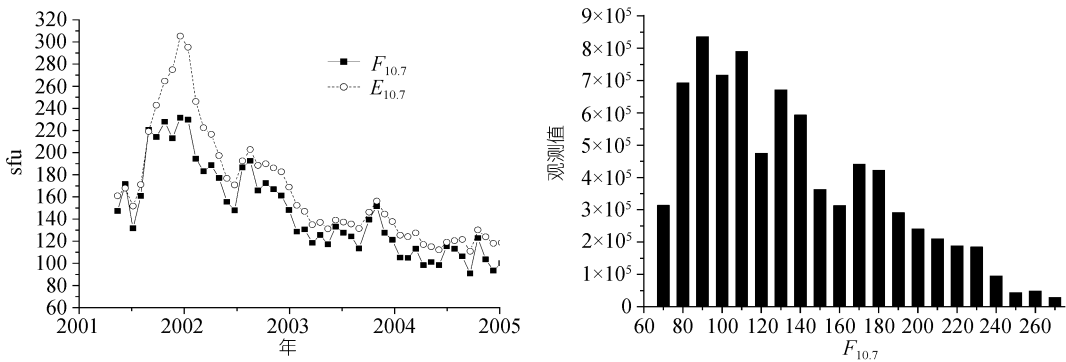


图 3 2001~2005 年太阳辐射指数的变化以及样本在不同太阳辐射时的分布

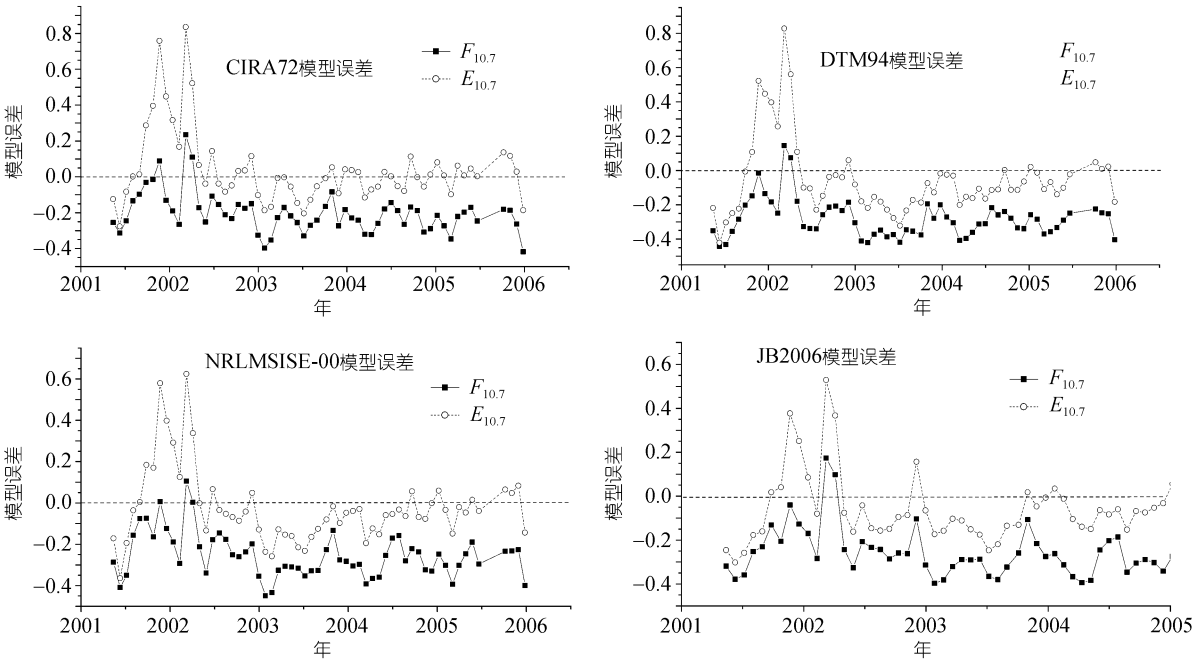


图 4 分别用 $F_{10.7}$ 和 $E_{10.7}$ 计算的 4 个模型精度

了 15%。但是 2002 年前后模型误差却很大, CIRA72 和 DTM94 最大达到 80%, NRLMSISE00 和 JB2006 也达到了 60%, 考虑到 2002 年处于太阳活动峰年, 这种现象表明在强太阳辐射时 $E_{10.7}$ 可能会导致模型误差增大到难以接受的程度。

为分析这种现象, 我们统计了误差均值随辐射强度的变化。图 5 只给出了 NRLMSISE00 的结果, 其他 3 个模型结果类似。从误差均值上看, 辐射小于 200 时, $E_{10.7}$ 计算的模型误差明显比 $F_{10.7}$ 模型误差小 (注: 为简便起见, 下文均简称“ $E_{10.7}$ 误差”和“ $F_{10.7}$ 误差”)。当辐射大于 200 时, $E_{10.7}$ 误差由负转为正, 高估了大气密度, 误差绝对值增大到 25%, 而 $F_{10.7}$ 误差约 10%。

从误差的均方差 σ 上看, 当辐射流量小于 160 时, 均方差都在 20% 以内, $E_{10.7}$ 均方差比 $F_{10.7}$ 略大 5%。当辐射流量大于 160 时, $E_{10.7}$ 均方差急剧增大, 在 200 附近达到最大, 比 $F_{10.7}$ 均方差大 10%~20%。

分析评估模型的精度需要考虑两个因素, 一是模型误差的均值 ($\bar{R}-1$), 一是误差的弥散程度 (均方差 σ), 前者刻画了模型误差的平均水平, 后者反映了模型误差是否稳定。当辐射流量大于 160 时, $E_{10.7}$ 误差弥散度比 $F_{10.7}$ 大 10%~20%, 模型误差很不稳定, 从而导致模型精度降低。只有当辐射流量小于 160 时, 误差均值减小了 15%, 而误差弥散度仅增大了 5%, 用 $E_{10.7}$ 代替 $F_{10.7}$ 才能对大气模型精度有实质性的提高。

此外图 5 中 $F_{10.7} > 160$ 时 $E_{10.7}$ 误差弥散度急剧增大, 可能有两方面原因: 一是现有模型是基于 $F_{10.7}$ 建模的, 模型系数与 $E_{10.7}$ 不完全自洽; 另一方面在强太阳辐射时 $E_{10.7}$ 自身可能存在较大误差, 因为辐射越强 $E_{10.7}$ 版本间的差异越明显 (图 1), 表明该指数仍然在改进中。

2.2 新增 S_{10} 和 Mg_{10} 指数对 CIRA72 模型精度的影响

JB2006 是在 CIRA72 模型的基础上建立的, 仅增加了 S_{10} 和 Mg_{10} 两个指数计算外层温度, 因此比较 CIRA72 和 JB2006 的模型误差就可以分析 S_{10} 和 Mg_{10} 对模型精度的影响。

图 6 是两个模型在使用 $F_{10.7}$ 的情形下的误差。可以看出: 就误差平均值而言 CIRA72 比 JB2006 略小, 但在强太阳辐射 ($F_{10.7} > 200$) 时, JB2006 误差比 CIRA72 更稳定, CIRA72 误差范围是 -35%~20%, 而 JB2006 误差范围是 -35%~7%。

图 7 是两个模型在使用 $E_{10.7}$ 的情形下的误差。可以看出: 误差均值在强太阳辐射时从 CIRA72 的 30% 减小到 JB2006 的 10%, 精度提高了 20%, 误差弥散度也明显减小, JB2006 最大误差 40%, 而 CIRA72 的最大误差达到 80%。

综合分析后我们认为, 采用 S_{10} 和 Mg_{10} 指数在低太阳辐射时对模型精度影响不大, 在强太阳辐射 ($F_{10.7} > 200$) 时能明显降低误差的弥散度, 将它们与 $E_{10.7}$ 联合使用可以使模型精度提高 20%。

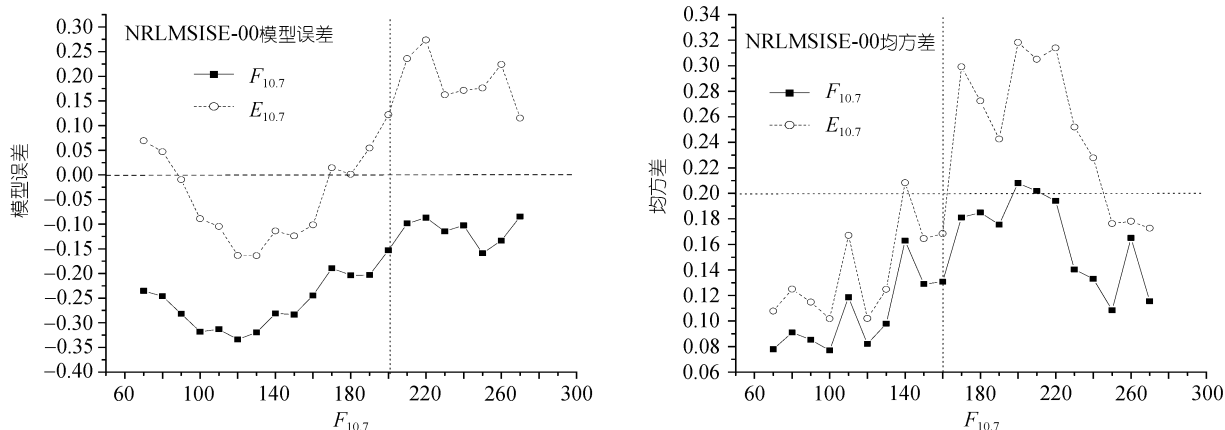
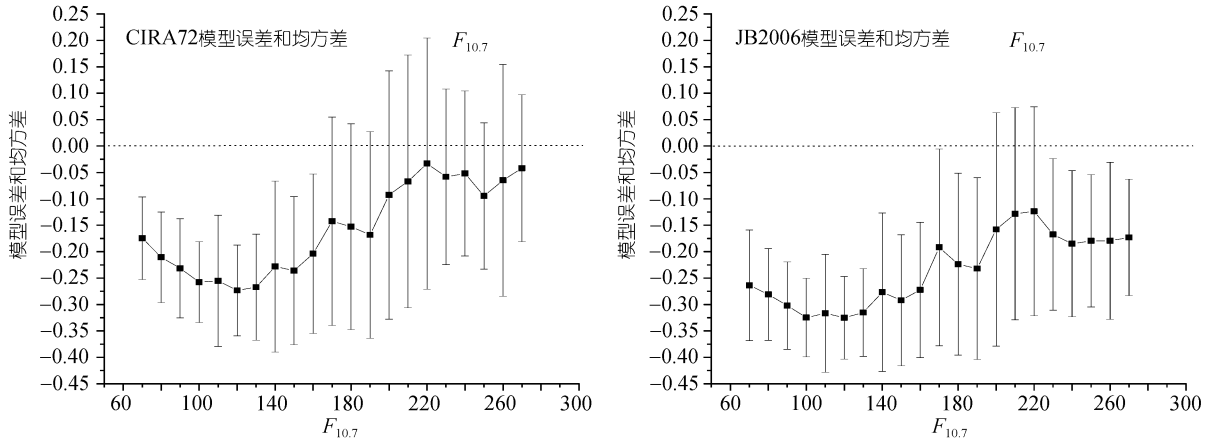
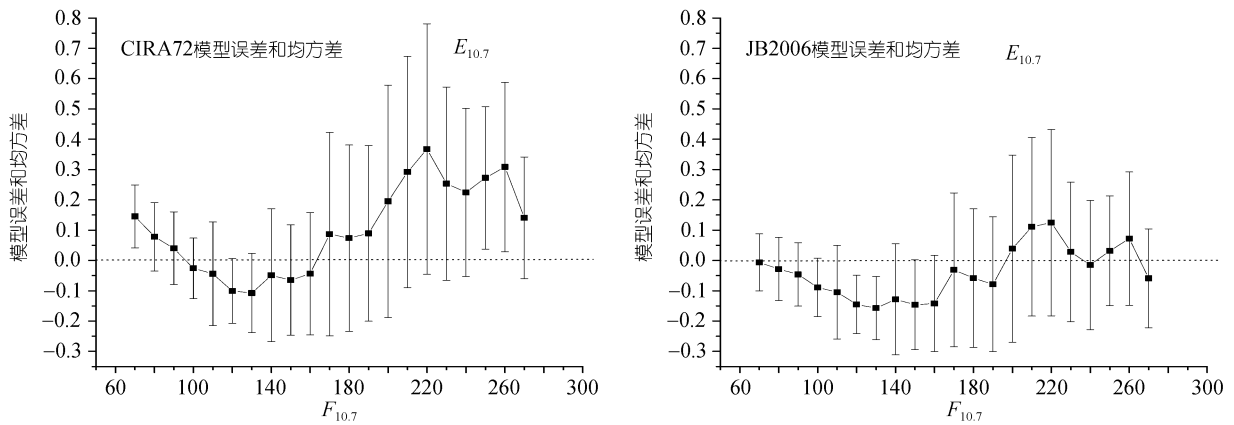


图 5 模型误差及均方差随辐射强度的变化

图 6 CIRA72 和 JB2006 模型误差及方差随辐射流量的变化($F_{10.7}$)图 7 CIRA72 和 JB2006 模型误差及方差随辐射流量的变化($E_{10.7}$)

2.3 JB2006 模型精度与 DTM94 和 NRLMSISE00 模型的精度比较

JB2006 是第一个基于多种太阳辐射指数的大气模型, 上文已经讨论了新增 S_{10} 和 Mg_{10} 指数使得模型精度与 CIRA72 相比在强太阳辐射时有一定的提高. 但是 CIRA72 毕竟是一种较早期的大气模型, 我们有必要将 JB2006 和最新最常用的模型 (DTM94, NRLMSISE00) 进行比较, 从而了解多指数建模的方法的应用前景. 我们从太阳爆发短期事件和长期变化趋势两方面进行分析.

2.3.1 2003 年 10 月太阳爆发事件中模型的响应

2003 年 10 月 17 日至 11 月 10 日, 太阳发生了一次剧烈爆发, 25 d 内 $F_{10.7}$ 指数从 90 增大到 280, 又迅

速恢复到 90, 见图 8. 其他 3 种指数也存在一次涨落, 但涨幅都比 $F_{10.7}$ 小 ($E_{10.7}$ 峰值 215, S_{10} 峰值 162, Mg_{10} 峰值 197). 特别地, S_{10} 的峰值时刻滞后其他指数 5 d. 太阳爆发还引发了多次磁暴, 最大 A_p 指数达到 400.

图 9 和 10 比较了 CHAMP 观测和模型在 25 d 中每天的密度平均值. 图 9 中模型使用 $F_{10.7}$, 图 10 中模型使用 $E_{10.7}$. 可以看出, 与 DTM94 和 NRLMSISE00 相比, JB2006 的密度值更接近 CHAMP 点密度值, 特别是太阳爆发后的恢复期, 用 $E_{10.7}$ 计算的 JB2006 密度与 CHAMP 观测几乎重合. 此外, 从细节变化上看, JB2006 曲线形状更接近于 CHAMP 观测.

通过剧烈太阳和地磁爆发时 CHAMP 观测密度中的快变信号, 我们还发现模型与观测有着明显差异, 具体表现在: (i) DTM94 和 JB2006 模型对地磁

爆发的响应滞后 4~6 h 不等, NRLMSISE00 模型几乎没有刻画出地磁活动引起的密度短期起伏; (ii) 在密度峰值的大小上, 模型与观测有明显差异, 特别是 NRLMSISE00 模型的峰值密度仅为观测的 50% 左右. 这些都表明受建模机制和样本分布的限制, 模型在刻画局部大气的细节变化时仍有不足.

2.3.2 2001~2005 年模型精度的比较

利用 CHAMP 点密度资料, 分别比较 JB2006 与 DTM94, NRLMSISE00 的误差均值和方差. 图 11 是模型误差均值的比较, 用 $F_{10.7}$ 计算时, JB2006 误差均值介于 DTM94 和 NRLMSISE00 之间; 用 $E_{10.7}$ 计算时, JB2006 误差均值最小, 在强太阳辐射时尤为明显. 图 12 是误差方差的比较, 强太阳辐射时, DTM94 方差最大, JB2006 和 NRLMSISE00 方差接近.

综合分析后我们认为: (i) JB2006 比 DTM94 模型

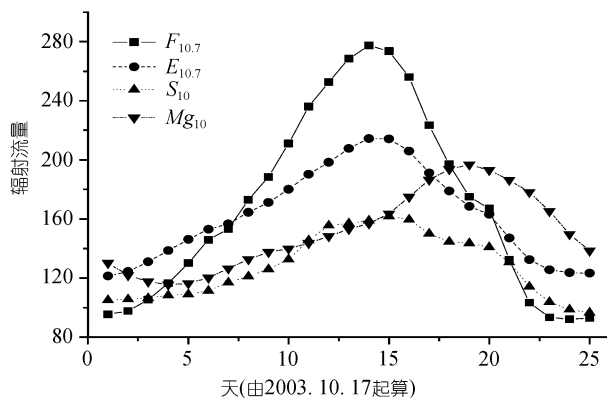


图 8 2003 年 10 月太阳爆发事件中 4 种指数的变化

精度略高; (ii) 低太阳辐射情形下, JB2006 与 NRLMSISE00 精度接近, 强太阳辐射情形下, 用 $E_{10.7}$ 计算的 JB2006 比 NRLMSISE00 精度高, 这说明采用多种太阳辐射指数联合建模的 JB2006 精度能与目前较好的

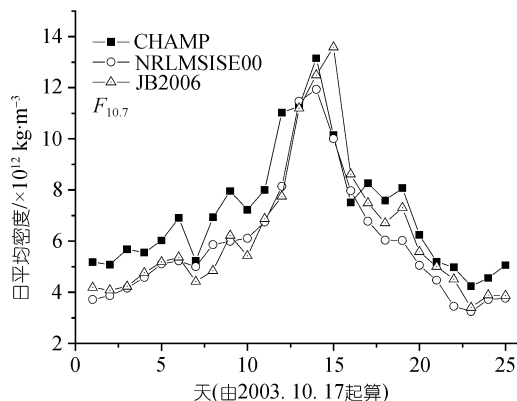
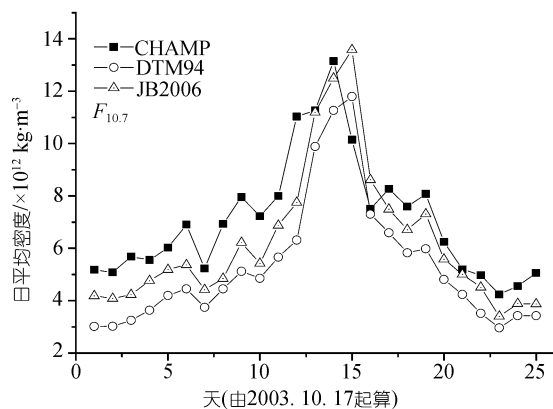


图 9 JB2006, DTM94, NRLMSISE00 每天平均密度与 CHAMP 点密度的比较($F_{10.7}$)

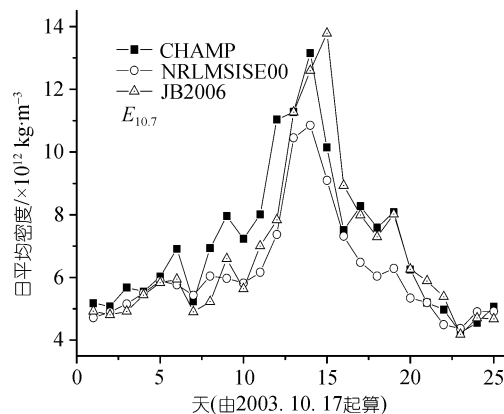
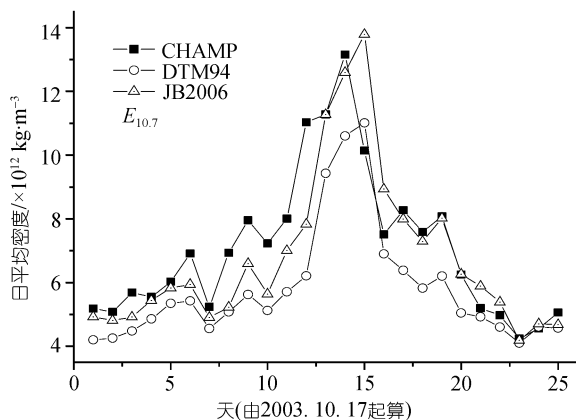


图 10 JB2006, DTM94, NRLMSISE00 每天平均密度与 CHAMP 点密度的比较($E_{10.7}$)

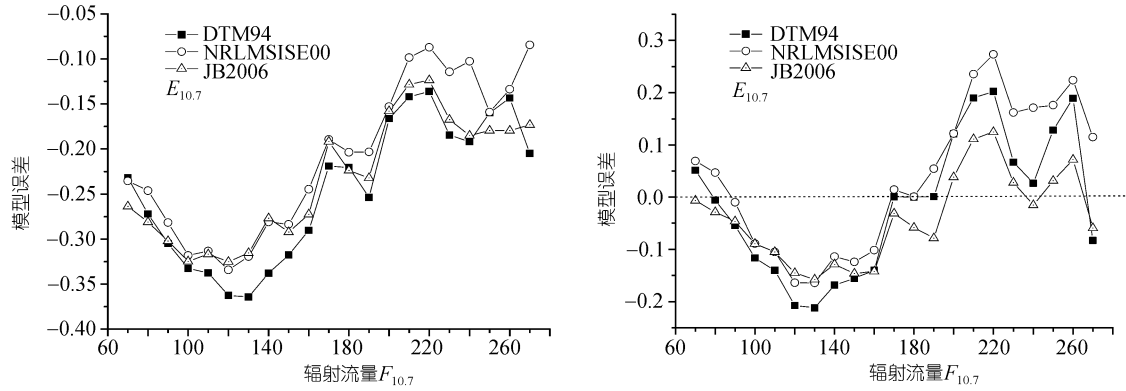


图 11 JB2006, DTM94, NRLMSISE00 模型误差均值的比较

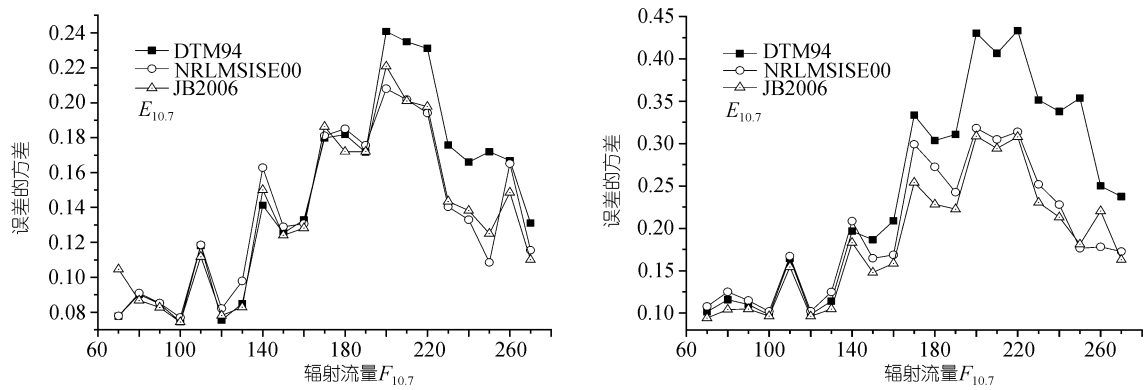


图 12 JB2006, DTM94, NRLMSISE00 模型误差方差的比较

单指数模型 DTM94 和 NRLMSISE00 相媲美, 特别是在强太阳辐射时采用 $E_{10.7}$, S_{10} , Mg_{10} 的组合, 能有效提高精度。

3 新指数的应用效果检验

前文指出, $E_{10.7}$ 在中低太阳辐射条件下能明显改善大气模型的精度, S_{10} 和 Mg_{10} 指数在强太阳辐射时能降低模型误差的弥散度, 这些结论是通过 CHAMP 点密度资料统计分析得到的。我们还初步检验了这些指数在卫星轨道预报工作中的应用效果, 方法如下: 利用 CHAMP 星历作为标准轨道, 取 3 段资料(每段资料的弧长为两天)进行定轨, 同时求解大气阻力系数 C_D ; 再将不同的指数代入大气模型, 将轨道外推 7 d; 最后对比预报轨道与标准轨道, 分析在使用不同指数情形下的预报精度, 结果见表 1 和 2。在表 1 中太阳辐射处于中低活动水平, 使用 $E_{10.7}$ 指数的预报误差较小; 在表 2 中太阳辐射处于中高活动水

平, 使用了 S_{10} 和 Mg_{10} 指数的 JB2006 模型轨道预报误差较小, 因此初步检验表明, $E_{10.7}$, S_{10} , Mg_{10} 指数能在一定程度上改善轨道预报精度。

表 1 $F_{10.7}$ 和 $E_{10.7}$ 指数对预报精度的影响(大气模型选用 NRLMSISE00)

序号	起始时间	$F_{10.7}$ 变化范围	预报 7 d 的位置误差/km	
			$F_{10.7}$	$E_{10.7}$
1	2003.10.05	100~120	4.35	2.32
2	2004.08.12	120~150	3.10	1.87
3	2005.04.22	77~95	3.77	0.63

表 2 S_{10} 和 Mg_{10} 指数对预报精度的影响(大气模型选用 NRLMSISE00 和 JB2006)

序号	起始时间	$F_{10.7}$ 变化范围	预报 7 d 的位置误差/km	
			NRL	JB
4	2002.01.15	200~260	7.55	4.23
5	2002.04.01	190~220	9.02	1.70
6	2002.06.01	130~180	7.16	3.23

4 结论

首先比较了 4 种太阳辐射指数 $F_{10.7}$, $E_{10.7}$, S_{10} , Mg_{10} 之间的差异. 平静太阳活动时指数间的差异稳定在 ± 20 以内, 在剧烈太阳活动时差异增大 ± 70 左右.

在大气模型中用 $E_{10.7}$ 代替 $F_{10.7}$ 发现: 在低太阳辐射($F_{10.7} < 160$)时, $F_{10.7}$ 计算的模型误差约 30%, 而使用 $E_{10.7}$ 能使模型精度提高约 15%; 但在强太阳辐射($F_{10.7} > 200$)时 $E_{10.7}$ 会导致误差发散, 模型精度降低.

通过比较 CIRA72 和 JB2006 的精度, 分析了 S_{10} 和 Mg_{10} 指数对模型精度的影响. 结果表明: 在中低太阳辐射时影响不大, 但在强太阳辐射时 S_{10} 和 Mg_{10}

指数能显著降低模型误差的弥散度, 与 $E_{10.7}$ 联合使用能使模型精度提高约 20%.

对 2003 年 10 月太阳剧烈爆发事件的研究发现, 采用多指数建模的 JB2006 比 DTM94 和 NRLMSI-SE00 更能精确地反映大气密度随太阳活动的细节变化. 较长期内的精度分析表明: JB2006 比 DTM94 精度略高; 在低太阳辐射情形下, JB2006 与 NRLMSI-SE00 精度接近, 特别是在强太阳辐射时采用 $E_{10.7}$, S_{10} , Mg_{10} 的组合能有效提高模型精度.

总之, $E_{10.7}$, S_{10} , Mg_{10} 这 3 种新的太阳辐射指数能在一定程度和一定条件下提高大气模型的精度, 具有广阔的应用前景. 它们的提出开辟了大气模型的一种新的研究途径.

致谢 研究中使用的 JB2006 模型和 Mg_{10} 及 S_{10} 的最新指数值由 R. Bowman, W. kent Tobiska 提供, $E_{10.7}$ 指数由美国空间环境技术中心(SpaceWX)提供, 在此表示感谢.

参考文献

- 1 Marcos F A, Bowman B R, Sheehan R E. Accuracy of earth's thermospheric neutral density models. AIAA 2006—6167
- 2 Bowman B R, Tobiska W K, Marcos F A. A new empirical thermospheric density model JB2006 using new solar indices. AIAA 2006—6166
- 3 Tobiska W K. Validating the solar EUV proxy $E_{10.7}$. J Geophys Res, 2001, 106(A12): 29969—29978 [\[DOI\]](#)
- 4 Thuillier G, Bruinsma S. The Mg II index for upper atmosphere modeling. Ann Geophys-Germany, 2001, 19: 219—228
- 5 汪宏波 赵长印. 用 CHAMP 加速仪数据校验太阳活动峰年的大气模型精度. 天文学报, 2008, 49 (2): 168—178