0254-6124/2019/39(3)-342–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CHEN Shanqiang, LIU Siqing, CHEN Dong, LIN Ruilin, SHI Liqin, CAO Yong. A model for real-time calculation of the atmospheric neutron (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(3): 342-348. DOI:10.11728/cjss2019.03.342

大气中子实时计算模式*

陈善强[1,2] 刘四清[1,2] 陈 东[1]
林瑞淋[1] 师立勤[1,2] 曹 勇[3]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(哈尔滨工业大学深圳研究生院 深圳 518055)

摘 要 为实时评估 0∼100 km 高度范围内的大气中子全球分布, 对宇宙线在地磁场和大气中的传输过程进行了分析. 利用蒙特卡罗方法工具包 Geant 4, 预先计算不同能量的粒子在大气层中产生的次级粒子能谱分布, 形成大气次级粒子数据库, 并与相关模型进行对比, 验证了该数据库的有效性和可靠性. 以实测或预报的空间环境参数作为输入, 计算同步轨道银河宇宙线和太阳质子事件能谱以及 100 km 高度上的地磁垂直截止刚度, 最终得到大气层顶上的粒子能谱. 通过对大气次级粒子数据库的线性插值, 实现 1 h 分辨率的大气中子能谱和辐射剂量全球分布的实时计算.

关键词 银河宇宙线, 太阳质子事件, 大气中子, Geant 4, 有效剂量

中图分类号 V 520, O 242

A Model for Real-time Calculation of the Atmospheric Neutron

CHEN Shanqiang[1,2] LIU Siqing[1,2] CHEN Dong[1]

LIN Ruilin[1] SHI Liqin[1,2] CAO Yong[3]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen* 518055)

Abstract In order to evaluate the global distribution of atmospheric neutron at 0∼100 km altitude for real time, the propagation of cosmic rays in the geomagnetic field and the atmosphere is analyzed. By using the TSY05 and MAGNETOCOSMICS model, the real-time calculation of global geomagnetic cut-off rigidities with 1 h resolution is realized. The spherical shell geometry model is established at intervals of 1 km using NLRMSISE-00 model, and the spectrum distribution of secondary particles

* 青年科学基金项目 (75035A050) 和深圳科技计划项目 (JCYJ20160817172025986) 共同资助

2018-06-12 收到原稿, 2019-01-07 收到修定稿

通信作者 刘四清, E-mail: liusq@nssc.ac.cn

generated by different particles is calculated by the Monte Carlo simulation techniques, namely, the Geant 4 toolkit, then an atmospheric neutron database is created. Compared with EXPACS model, the validity and reliability of the database are verified. Based on the observed or predicted space environment parameters, the energy spectra of the cosmic ray and the solar proton event in the synchronous orbit are calculated, and the effective vertical cut-off rigidities in function of latitude and longitude at the altitude of 100 km. The atmospheric neutron and effective dose are calculated by using linear interpolation per hour.

Key words Cosmic rays, Solar proton event, Atmospheric neutron, Geant 4, Effective dose

0 引言

银河宇宙线和太阳宇宙线进入地磁场范围后, 受到地球磁场的偏转. 只有足够高能量的粒子才能入射到大气层上并与大气成分发生核相互作用, 产生中子、质子、正负电子、正负 μ 介子、γ 射线等次级粒子, 形成大气高能辐射环境. 这些次级粒子能够引起单粒子及辐射剂量等效应, 影响航空飞机和临近空间飞行器的安全运行, 造成辐射剂量超标等危害 [1,2]. 除飞行实验探测外, 已开展了大量大气中子及其效应的计算机仿真模拟研究. 例如, NAIRAS[3] 采用求解粒子传输方程数值解的方法得出了大气中子分布, 并给出实时航空辐射剂量. Sato 等 [4−6] 分别利用不同的蒙特卡罗工具包模拟宇宙线在大气中的传输过程.

在以往研究的基础上, 本文构建了一个银河宇宙线和太阳质子事件引起的大气中子能谱实时计算模式. 利用该模式能够提供航空高度上的辐射剂量全球分布. 该模型主要利用蒙特卡罗方法, 预先计算不同能量质子和 α 粒子与地球大气的核相互作用产生的次级粒子能谱, 以实时探测的空间环境参数作为银河宇宙线、地球大气、地磁场等模型的输入参数, 实现对 0~100 km 高度范围内大气中子等次级粒子能谱及其辐射剂量的实时计算. 将本文的模式与相关模型进行对比, 并以地磁暴事件和太阳质子质子事件为例, 验证了该系统的有效性和可靠性.

1 大气中子实时计算框架

大气中子实时计算框架主要包括空间环境模块、银河宇宙线模型、太阳宇宙线模型、地磁截止刚度计算模型、地球大气模型及大气次级粒子数据库等. 其主要流程如图 1 所示. 空间环境模块每小时获取和计算一次各模型所需空间环境参数, 分发给后续模型, 然后通过对大气次级粒子数据库的线性插值, 更新大气中子能谱及有效剂量, 并绘图输出.

2 宇宙线

银河宇宙线 (GCR) 是来自太阳系以外的高能带电粒子, 其主要成分是质子、α 粒子、重粒子等. 其

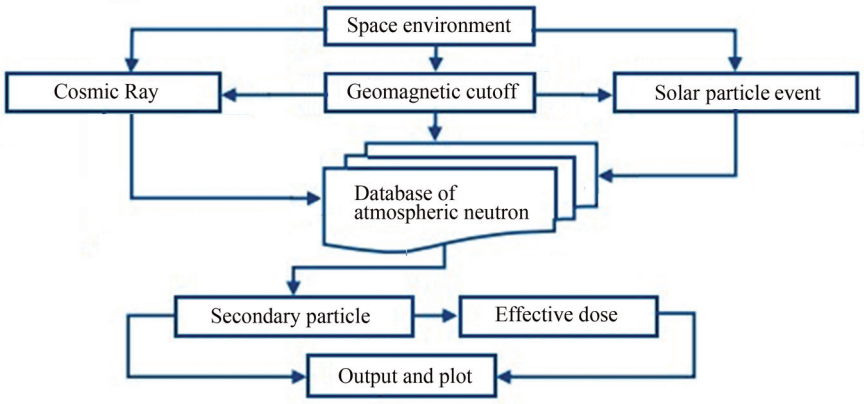

图 1 大气中子实时计算流程

Fig. 1 Flowchart for calculating the real-time atmospheric neutron

中质子约占 90% 左右, α 粒子约占 10% 左右, 其他粒子占比 1% 左右. 银河宇宙线受太阳活动的调制, 其强度变化也表现出明显的 11 年周期性. 目前工程上比较常用的银河宇宙线模型主要有 CREME96 和 Badhwar-O'Neill[7,8]. O'Neill 等 [8] 通过求解 Fokker-Planck 方程得到银河宇宙线能谱, 其最新版本为 BON14. 图 2 显示了 CREME96 和 BON14 模型在太阳活动低年的质子和 α 粒子能谱. 在低能段, CREME96 模型包含了异常银河宇宙线成分, 通量较大. $<100\,\mathrm{MeV}$ 的粒子对大气中子的贡献不大, 因此可以认为两个模型在 $>100\,\mathrm{MeV}$ 区域中基本一致. 这里选择 BON14 模型作为大气中子实时计算模型的银河宇宙线计算模块.

太阳质子事件 (SPE) 是偶发性的太阳爆发活动, 其主要成分为高能质子, 也包括少量的重离子成分. 每次太阳质子事件的能谱均不相同. Xapsos 等 [9] 建议采用 Weibull 函数拟合太阳质子事件积分能谱. 其表达式为

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\kappa E^{\alpha}). \tag{1}$$

其中: Φ 为粒子能量大于 E 的质子积分能谱; Φ_0, κ, α 为拟合参数. 对 GOES 卫星 5 min 实时探测数据求每小时平均值, 并采用 Marquardt-Levenberg 迭代优化算法进行拟合, 得到式 (1) 的拟合参数, 进而求导获得太阳质子事件微分能谱. 利用上述方法计算 2017 年 9 月 10 日大质子事件的拟合能谱, 结果如图 3 所示. 图 3 黑线为 Weibull 函数拟合能谱, 红线为 GOES 卫星观测结果.

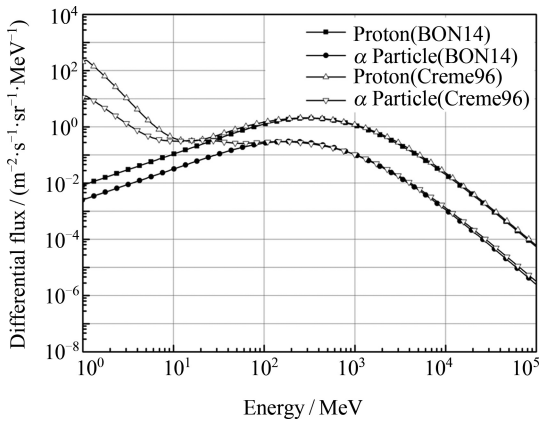

图 2 太阳活动低年银河宇宙线能谱

Fig. 2 Energy spectra of GCR during the solar minimum

3 全球实时地磁垂直截止刚度分布

3.1 地球磁场模型

地球磁场包括内源场和外源场. 国际参考地磁场 (IGRF) 是国际通用的内源场模型 [10], 而 Tsyganenko 系列模型为目前常用的外源场模型, 包括 TSY89, TSY96, TSY05[11−13]. TSY89 模型采用 Kp 指数表征地磁活动状况, 而 TSY05 模型采用行星际磁场分量、太阳风动压 P_{dyn}、地磁 Dst 指数以及 W_1~W_6 参数表征, 能够更好地反映磁暴期间的地磁场变化 [13]. 因此, 在计算 1 h 分辨率的全球实时地磁截止刚度时, 采用内源场 IGRF12 和外源场 TSY05 模型描述地磁场.

Tsyganenko[14] 利用 ACE 卫星数据, 给出 2016 年前的 TSY05 模型输入参数. ACE 卫星的探测数据坏点较多, 这里采用了 DSCOVR 卫星数据, 对每小时探测数据取平均值后再计算 W_1~W_6 参数. 图 4 显示了 2016 年年积日 296−302 日 (10 月 22−29 日) 的模型参数, 黑线为文献 [14] 给出的结果, 红线为基于 DSCOVR 数据所得结果. 从图 4 可以看出, 本文计算结果与文献 [14] 的结果基本一致, 其中差异来源于 ACE 和 DSCOVR 卫星的定标差异. 本文计算结果可以作为 TSY05 模型的输入数据源.

3.2 反向追迹计算方法

带电粒子在地球磁场中运动时, 受洛伦兹力的影响而发生偏转, 有

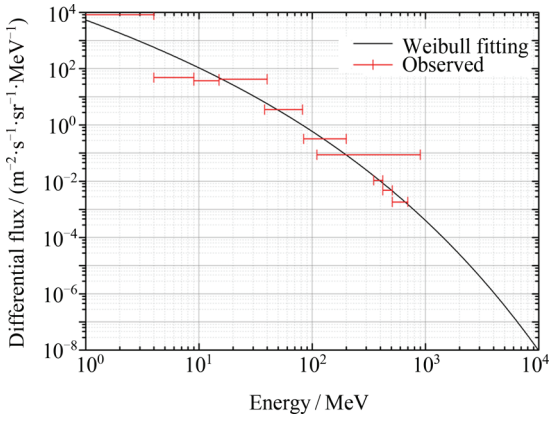

图 3 2017 年 9 月 10 日 18:00 UT−19:00 UT 的太阳质子能谱

Fig. 3 SPE energy spectra at 18:00 UT−19:00 UT on September 10, 2017

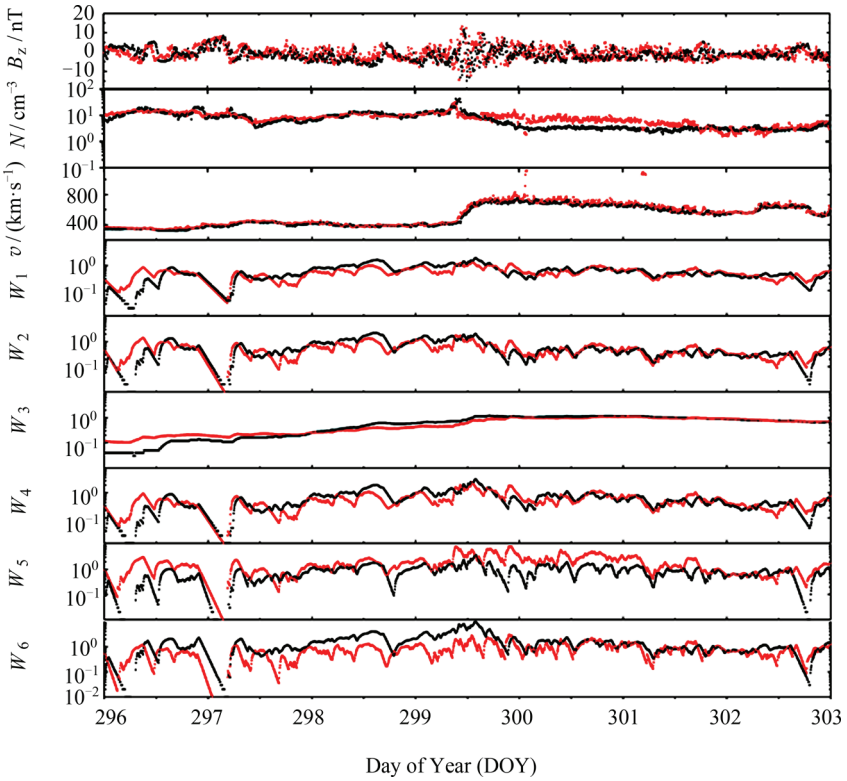

图 4　2016 年年积日 296—302 日的太阳风密度 N、速度 v、行星际南向磁场分量 B_z 及 TSY05 模型输入参数 W

Fig. 4　Solar wind density N and speed v, southward component of interplanetary magnetic field B_z, and W parameters of TSY05 from DOY 296 to 302 in 2016

$$m\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}t^2}=q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}+qE. \tag{2}$$

由式 (2) 可知, 具有相同能量和入射方向的正负粒子在地磁场中的运动轨迹相同, 即从磁层内某一位置发射的粒子能够穿越磁层顶, 具有相反电荷的磁层外粒子可以沿相同路径到达该位置. 地磁场对粒子的屏蔽作用可以采用带电粒子能够沿垂直方向到达磁场内某一位置的最小刚度来描述, 此最小刚度称为地磁垂直截止刚度. 采用龙格库塔方法求解洛伦兹方程, 已开发了地磁截止刚度的计算程序 [15,16]. 采用龙格库塔方法求解带电粒子在地磁场中的运动轨迹时, 每步均需要计算粒子当前位置的地磁场强度. 这导致程序非常耗时, 不适用于地磁截止刚度的实时计算.

为满足实时计算的需求, 本文在 QinetiQ 公司开发的地磁截止刚度的计算程序 MAGNETOCOSMICS 的基础上, 预先利用内源场 IGRF12 和外源场 TSY05 模型, 以 0.2 R_e 为间隔建立地磁场三维网格, 采用线性插值的方法计算任意位置的地磁场强度, 同时对 QinetiQ 的源代码进行并行化处理. 这里计算了 2016 年 10 月 25 日 18:00 UT—19:00 UT 时刻 (地磁暴期间) 100 km 高度上的地磁垂直截止刚度, 如图 5 所示. 根据图 5 中的地磁截止刚度可以获得 100 km 高度地球大气层顶位置上的银河宇宙线和太阳宇宙线能谱.

4　基于 Geant 4 的粒子传输计算程序

大气中子是由高能粒子在地球大气中传输, 并与大气成分的核相互作用产生的, 其通量由宇宙线强度、大气密度和成分沿高度上的分布共同决定. 美国海军研究实验室在 MSISE-90 模型基础上开发了 NLRMSISE-00 大气模型, 主要描述 0~1000 km 范围内的大气温度、密度、主要成分数密度, 其模型的空间环境参数包括前一天太阳 $F_{10.7}$ 射电流量、81 天平均太阳 $F_{10.7}$ 射电流量及当天地磁 Ap 指数 [17].

Geant 4 蒙特卡洛粒子输运工具包 [18,19] 广泛应用于空间辐射效应分析. 这里从大气几何建模、物理过程选择、次级粒子统计等方面介绍基于 Geant 4

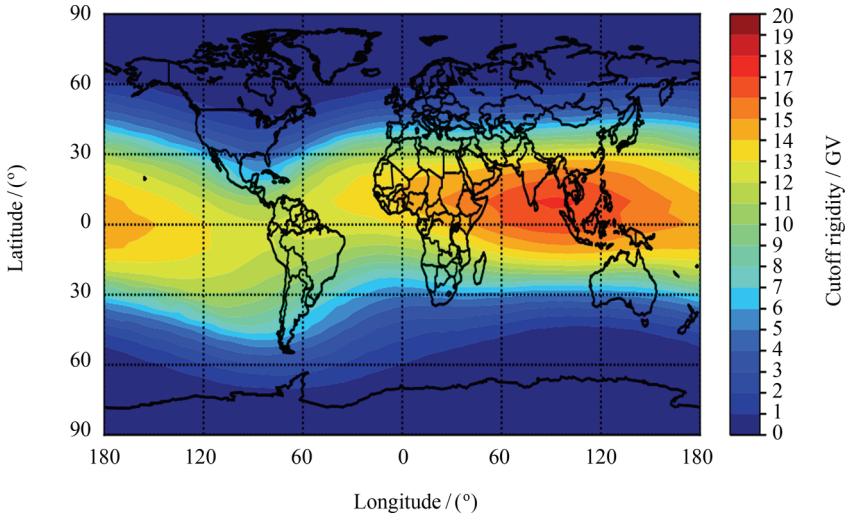

图 5 2016 年 10 月 25 日 18:00 UT—19:00 UT 地磁暴期间 100 km 高度上的地磁垂直截止刚度全球分布

Fig. 5 Vertical geomagnetic cutoff rigidity of 100 km height during geomagnetic storm at 18:00 UT—19:00 UT on 25 October 2016

的粒子传输计算程序. 根据 NLRMSISE-00 模型和环境参数, 以 1 km 为间隔建立大气分层球壳几何模型. 选择 Geant 4 中的 QGSP_BIC_HP 物理过程, 例如 G4EmStandardPhysics_option3, G4IonPhysics, G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP, G4HadronElasticPhysics 等描述粒子大气分层球壳模型中的运动 [15]. 地球大气总厚度约为 1026 g·cm^{-2}, 这导致大气中子的蒙特卡罗模拟非常耗时. 为实时给出银河宇宙线和太阳宇宙线引起的大气中子能谱, 预先计算 0.1~10 000 GeV 质子和 α 粒子在大气中的输运过程, 统计大气中子等次级粒子在几何模型边界上的分布, 形成大气次级粒子数据库.

在实际使用时, 根据 $F_{10.7}$ 的 81 天均值及当天 Ap 指数预测值, 计算当天大气密度在 0~100 km 高度上的分布, 并将高度 km 转换为 g·cm^{-2}, 在预先计算的归一化大气中子数据库中进行线性插值, 结合银河宇宙线和太阳质子事件能谱, 即可获得任意位置上的中子、质子等粒子能谱. 为验证该数据库的准确性, 图 6、图 7 和表 1 给出了极区 10, 20, 60 km 高度上的大气次级粒子能谱及其有效剂量. 有效剂量的计算采用 ICRP PUBLICATION123 中的转换系数 [20], 并与 Sato 等 [4] 的 EXPACS 模型进行比较.

表 2 中的结果与同类软件的计算结果基本一致, 有效剂量最大误差为 16.47%. 上述结果可用于大气次级粒子的实时计算.

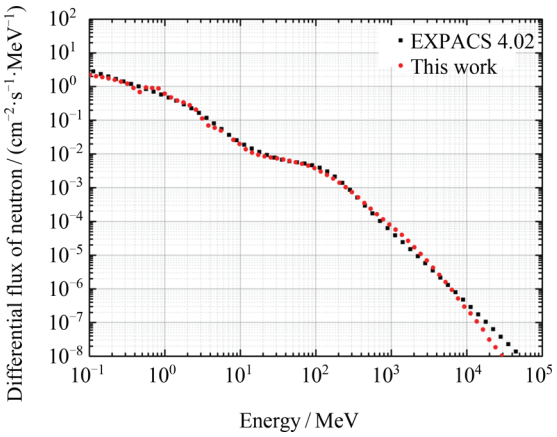

图 6 极区 10 km 高度上的大气次级中子能谱

Fig. 6 Energy spectra of atmospheric neutron at 10 km height above the polar region

5 系统运行验证

以 2016 年 10 月 25 日 18:00 UT—19:00 UT 地磁暴期间和 2017 年 9 月 10 日大质子事件期间的系统运行情况和计算结果为例, 测试整个系统的可靠性. 2016 年 10 月 25 日 18:00 UT—19:00 UT 时刻地磁截止刚度全球分布如图 5 所示. 此次地磁暴期间, 无太阳质子事件发生, 因此仅考虑银河宇宙线产生的有效剂量. 银河宇宙线在 10 km 高度上产生的有效剂量如图 8 所示.

表 1 极区不同高度处的有效剂量 (μSv·h^{-1})

Table 1 Effective dose above the polar region (μSv·h^{-1})

模型	高度/km	中子	质子	光子	正负电子	正负介子	总计
本模型	10	2.73	1.05	0.51	0.41	0.20	4.90
	20	6.24	6.24	1.07	1.16	0.25	14.96
	60	2.01	11.09	0.34	0.33	2.5×10^{-3}	13.77
EXPACS	10	2.85	1.15	0.56	0.51	0.20	5.27
	20	6.91	6.78	1.23	1.52	0.26	16.70
	60	2.19	11.64	0.33	0.36	2.5×10^{-3}	14.52

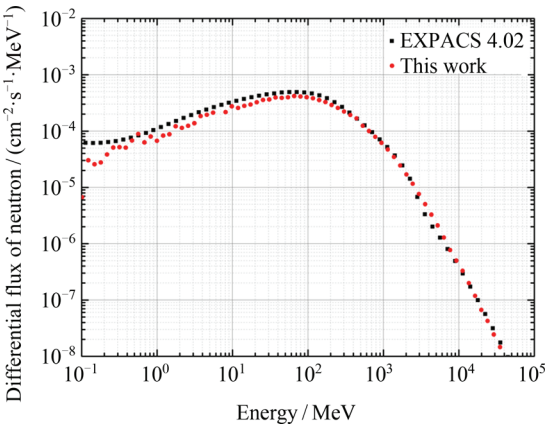

图 7 极区 10 km 高度上的大气次级质子能谱

Fig. 7 Energy spectra of atmospheric proton at 10 km height above the polar region

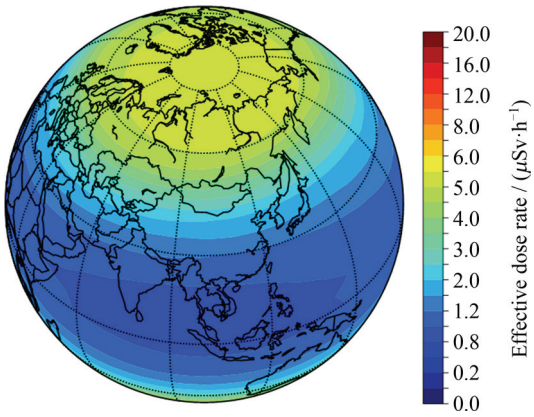

图 8 在 10 km 高度上银河宇宙线引起的有效剂量

Fig. 8 Effective dose rate at 10 km height induced by GCR

2017 年 9 月 10 日大质子事件的拟合能谱如图 3 所示, 假设其他空间活动状况与 2016 年 10 月 25 日相同, 此次太阳质子事件在 10 km 高度上产生的有效剂量如图 9 所示.

由图 8 和图 9 可知, 此次太阳质子事件在极区引起的有效剂量与银河宇宙线相当, 但由于太阳质子事件的粒子刚度较低, 对低纬度地区有效剂量的贡献可以忽略.

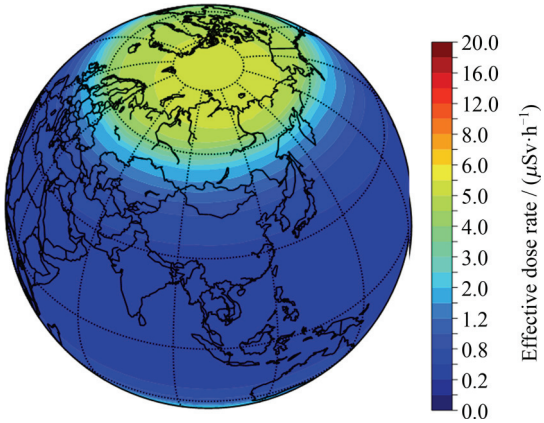

图 9 10 km 高度上太阳质子事件引起的有效剂量

Fig. 9 Effective dose rate at 10 km induced by SPE

6 结论

基于空间环境数据和蒙特卡罗工具包 Geant 4, 构建了一套实时计算大气中子能谱和辐射剂量的软件, 并与同类软件进行对比, 具体结论如下.

(1) 编写了基于 Geant 4 的粒子传输计算程序, 形成了大气次级粒子数据库. 在不考虑地磁截止刚度的情况下, 与同类模型进行了对比验证, 在 10, 20, 60 km 高度上, 总有效剂量的最大误差为 16.47%.

(2) 实现了 1 h 分辨率大气中子等次级粒子能谱及其有效剂量的实时计算. 该系统可以实时响应空间环境变化, 给出任意位置的大气中子等次级粒子能

谱和有效辐射剂量.

致谢 O'Neill 教授提供了 BON14 银河宇宙线模型.

参考文献

[1] TABER A, NORMAND E. Single event upset in avionics [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(2): 120-126

[2] XUE Haihong, WANG Qunyong, CHEN Dongmei, *et al.* Neutron single event effects testing and evaluation method for avionics [J]. *J. Beijing Univ. Aeron. Astron.*, 2015, **41**(10): 1894-1901 (薛海红, 王群勇, 陈冬梅, 等. 航空电子设备 NSEE 试验评价方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, **41**(10): 1894-1901)

[3] MERTENS C J, TOBISKA W K, BOUWER D, *et al.* Development of the nowcast of atmospheric ionizing radiation for aviation safety (NAIRAS) model [C]//1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. San Antonio, Texas: AIAA, 2009: 3633-978

[4] SATO T. Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: extension of PARMA/EXPACS [J]. *Plos One*, 2015, **10**(12): e0144679

[5] NESTERENOK A. Numerical calculations of cosmic ray cascade in the Earth's atmosphere results for nucleon spectra [J]. *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*:*B*, 2013, **295**: 99-106

[6] CAI Minghui, HAN Jianwei, LI Xiaoyin, *et al.* A simulation study of the atmospheric neutron environment in near space [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2009, **58**(9): 6659-6664 (蔡明辉, 韩建伟, 李小银, 等. 临近空间大气中子环境的仿真研究 [J]. 物理学报, 2009, **58**(9): 6659-6664)

[7] TYLKA A J, ADAMS J H, BOBERG P R, *et al.* CREME96: a revision of the cosmic ray effects on microelectronics code [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2002, **44**(6): 2150-2160

[8] O'NEILL P M, GOLGE S, SLABA T C. Badhwar-O'Neill 2014 Galactic Cosmic Ray Flux Model Description, TP-2015-218569 [R]. NASA Technical Report, 2015

[9] XAPSOS M A, BARTH J L, STASSINOPOULOS E G, *et al.* Characterizing solar proton energy spectra for radiation effects applications [J]. *Nucl. Sci. IEEE Trans.*, 2000, **47**(6): 2218-2223

[10] THÉBAULT E, FINLAY C C, BEGGAN C D, *et al.* International geomagnetic reference field: the 12th generation [J]. *Earth Planets Space*, 2015, **67**(1): 1-19

[11] TSYGANENKO N A, MAGNETOSPHERIC A. Magnetic field model with a warped tail current sheet [J]. *Planet. Space Sci.*, 1989, **37**(1): 5-20

[12] TSYGANENKO N A, STERN D P. Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 1996, **101**(A12): 27187-27198

[13] TSYGANENKO N A, SITNOV M I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2005, **110**(A3): A0320

[14] TSYGANENKO N A. TS05_Data_and_Stuff [EB/OL]. [2018-06-11]. http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/TS-05_data_and_stuff

[15] ZHEN Jie, CHU Wei. Numerical computation of proton geomagnetic vertical cutoff rigidities on 7—8 November 2004 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(3): 250-257 (甄杰, 楚伟. 质子地磁垂直截止刚度在 2004 年 11 月 7—8 日两个时刻处的数值模拟 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(3): 250-257)

[16] DESORGHER L, FLUECKIGER E O, BUETIKOFER R, *et al.* Geant4 application for simulating the propagation of cosmic rays through the Earth's magnetosphere [C]//International Cosmic Ray Conference, 2003. DOI:10.5140/JASS.2011.28.2.117

[17] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issue [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A12): 1468

[18] ASAI M, DOTTI A, VERDERI M, *et al.* Recent developments in Geant4 [J]. *Ann. Nucl. Energy*, 2015, **82**: 19-28

[19] LIN Z W, ADAMS J H, BARGHOUTY A F, *et al.* Comparisons of several transport models in their predictions in typical space radiation environments [J]. *Adv. Space Res.*, 2012, **49**(4): 797-806

[20] DIETZE G, BARTLETT D T, COOL D A, *et al.* ICRP PUBLICATION 123: assessment of radiation exposure of astronauts in space [J]. *Ann. ICRP*, 2013, **42**(4): 1-3