

月表有效太阳辐照度实时模型

李雄耀¹, 王世杰^{1*}, 程安云^{1,2}

1 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002
2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 月表太阳辐射是深入研究月表温度分布的关键问题之一. 本文根据月表有效太阳辐照度与太阳常数、太阳辐射入射角以及日月距离之间的关系, 建立月表有效太阳辐照度的实时模型. 该模型在 1950~2050 年的 100 年内的理论误差百分比小于 0.28%, 相对前人提出的模型在精度上有了很大程度的提高, 能较为真实地反映月表有效太阳辐照度随时间的变化规律. 计算结果表明 2007 年月表太阳辐照度的年变化范围在 1321.5~1416.6 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 平均为 1368.0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. 通过对月表太阳辐射入射角计算结果的分析, 证实了月球的两极可能存在极昼极夜.

关键词 月球, 月表, 太阳辐射, 模型

文章编号 0001-5733(2008)01-0025-06 中图分类号 P184 收稿日期 2006-09-05 2007-08-24 收修定稿

A lunar surface effective solar irradiance real-time model

LI Xiong-Yao¹, WANG Shi-Jie^{1*}, CHENG An-Yun^{1,2}

1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Information about solar irradiance on the lunar surface is the key to understanding lunar-surface temperature distribution. In this study, we have constructed a lunar-surface effective solar irradiance real-time model in terms of the relationship between solar irradiance and solar constant, solar radiation incidence angle and the Sun-Moon distance. The theoretical erroneous percentage of this model is less than 0.28% during 100 years from 1950 to 2050. These indicate that the model can accurately reflect the variation of effective solar irradiance on the lunar surface. The result showed that the total solar irradiance on the lunar surface would change from 1321.5 to 1416.6 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ in 2007. And the average is 1368.0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. We also validated the possibility of existing polar day and polar night at the lunar poles by analyzing the result of solar radiation incidence angle.

Keywords Moon, Lunar surface, Solar radiation, Model

1 引 言

月表温度分布是研究月球内部热演化模型的基本边界条件,也是解译微波探测数据的必要参数. 太阳辐射是月球表层月壤的外部热源,控制着月表温度的昼夜变化,是研究月表温度分布的关键因素. 太阳辐射强度通常用辐照度表征,目前对月表辐照度变化规律的研究鲜有报道. 大部分学者将月表太

阳辐照度视为常量,不考虑它随时间的变化. 此外,太阳辐射入射角也只简单地认为它按照某种余弦规律变化. Cremers 等^[1]在研究 Apollo 12 登陆点的月表温度, Pugh 等^[2]在利用红外观测数据阐述月表温度,以及 Racca^[3]在研究月表热特性时,都认为月表太阳辐照度为一常数,它不随时间发生变化,而影响月表温度变化的有效太阳辐照度(太阳辐照度矢量的法向分量)在夜间恒等于零,白昼则按不同的余弦规律变化. 在研究月球表层温度及热物理性质时,

基金项目 国家自然科学基金(40473053)和中国科学院知识创新导向项目(KZCX2-YW-110)资助.

作者简介 李雄耀,男,1978年生,助研,主要研究方向为月球与行星科学.

* 通讯作者 王世杰, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

Jones 等^[4]进一步考虑了日月距离和入射角对月表有效太阳辐照度的影响,认为它按 2π 倍的月球周期分数的余弦曲线变化,其振幅等于经过日月距离修正后的太阳辐照度与测点月面纬度余弦的乘积,但其处理过于简单,不能准确反映月表太阳辐射的复杂变化.已有的研究表明,太阳常数(1 AU 处的太阳辐照度)大致在 $1363.0 \sim 1368.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的范围内变动 (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftp/solarirradiance.html>).考虑到日地月轨道系统在近日点和远日点的极限情况,初步计算结果表明,月表太阳辐照度的变化范围在 $1311.3 \sim 1423.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,其变化幅度超过 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.此外,在实际的天体运行中,天体是按照 Kepler 第二定律在各自的椭圆轨道上运动,再加上月球的公转和自转影响,月表太阳辐射入射角的变化并不是严格按照余弦规律变化.基于 Jones 的思路,本文为了更清楚准确地描述月表太阳辐射及日月距离、太阳辐射入射角的变化规律,应用 Variations Séculaires des Orbites Planétaires 87(VSOP87)行星轨迹理论和 éphémérides Lunaires Parisiennes 2000/82(ELP2000-82)月球轨迹的半解析理论^[5,6],分别计算任意时刻太阳的地心黄经、日地距离以及月球的地心黄纬、月球的地心黄经、地月距离等日地月轨道系统的基本参数,通过分析太阳和月球在地心黄道坐标系中的位置关系,确定日月距离以及太阳辐射入射角随时间、太阳直射经纬度等的变化关系,建立了月表有效太阳辐照度的实时模型.

2 月表有效太阳辐照度

2.1 模型介绍

由图 1 可知,月表有效太阳辐照度(I)可表示为月表太阳辐照度(E_{sm})与太阳辐射入射角(i)余弦之积,

$$I = E_{sm} \cdot \cos i, \quad (1)$$

I 、 E_{sm} 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, i 单位为 $^\circ$.

由(1)式可知,影响月表有效太阳辐照度的两个因素为月表太阳辐照度和太阳辐射入射角.下面对这两个影响因素逐一进行分析.

首先,月表太阳辐照度可以通过对太阳常数的距离修正得到^[7-9].如果不考虑太阳辐射在太空传输过程中因其他天体或宇宙尘埃的反射散射所产生的能量衰减,则有

$$E_{sm} = S_0 R_{sm}^{-2}, \quad (2)$$

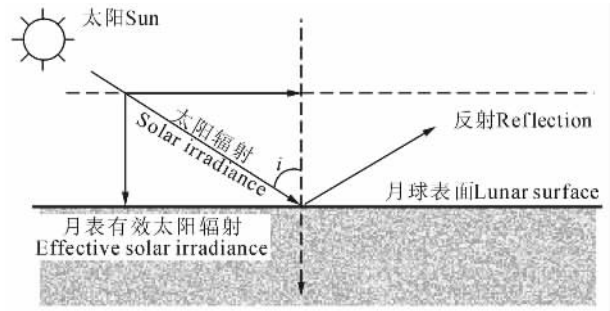


图 1 月表有效太阳辐照度几何示意图

Fig.1 Schematic diagram of the solar irradiance on lunar surface
 S_0 为太阳常数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, R_{sm} 为相对于 1 AU 的无量纲日月距离.

同时,根据太阳、地球和月球三者共同组成的几何关系(图 2)可得,

$$R_{sm} = R_{em} \sin W_{em} / \sin W_{sm}, \quad (3)$$

W_{em} 为月球的地心黄纬,单位为 $^\circ$, R_{em} 为地月距离,单位为 AU,它们可由 ELP2000-82 月球轨迹半解析理论的相关公式计算得到^[5], W_{sm} 为月球的日心黄纬,根据天文学原理有^[10]

$$W_{sm} = W_{em} R_{em} / R_{se}, \quad (4)$$

R_{se} 为日地距离,可根据 VSOP87 行星轨迹理论的相关公式求出^[5].因此,月表太阳辐照度可表示为

$$E_{sm} = \frac{S_0 \sin^2(W_{em} R_{em} / R_{se})}{R_{em}^2 \sin^2 W_{em}}. \quad (5)$$

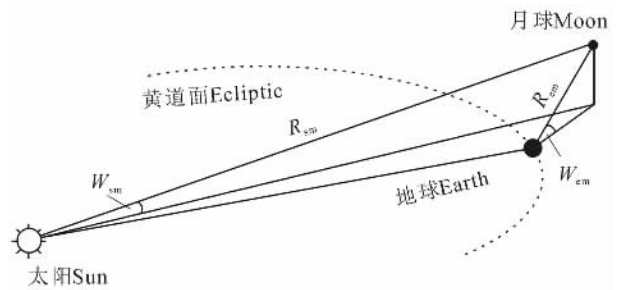


图 2 太阳和月球的几何关系

Fig.2 Geometric relationship in the Sun-Moon system

其次,假设月球为一理想球体,不考虑因地形起伏引起的太阳辐射入射角的变化.根据太阳和月球位置、太阳直射点以及测点的几何关系可得出任意月面经纬度点的太阳辐射入射角与月球半径、日月距离以及太阳直射点月面经纬度之间的关系.为了与 Apollo、Clementine、Lunar Prospector 的探测数据相对应,本文月面经纬度仍采用 1974 年以前的定义,即以月球中心指向地球中心的方向上的经线为本初子午线,沿逆时针方向为 $0^\circ \sim 180^\circ$,顺时针方向 $0^\circ \sim$

-180° 纬度以月球赤道为 0°, 北半球为正, 南半球为负^[11,12]. 由图 3 可知:

$$i = A_i + B_i, \quad (6)$$

其中,

$$A_i = \arccos\left[-\sin W_n \sin W_d + \cos W_n \cos W_d \cos(J_n - J_d)\right], \quad (7)$$

$$B_i = \arcsin\left[R_{\text{moon}} \sin A_i / \left(\frac{R_{\text{em}}^2 \sin^2 W_{\text{em}}}{\sin^2(W_{\text{em}} R_{\text{em}}/R_{\text{se}})}\right) + R_{\text{moon}}^2 - \frac{2R_{\text{em}} R_{\text{moon}} \sin W_{\text{em}} \cos A_i}{\sin(W_{\text{em}} R_{\text{em}}/R_{\text{se}})}\right]^{1/2}, \quad (8)$$

R_{moon} 为月球平均半径, 等于 $1.161363636 \times 10^{-5}$ AU, J_n 、 W_n 和 J_d 、 W_d 分别为测点和太阳直射点的月面经纬度, 单位为°. J_d 和 W_d 可以根据月球的天平动原理得到^[10].

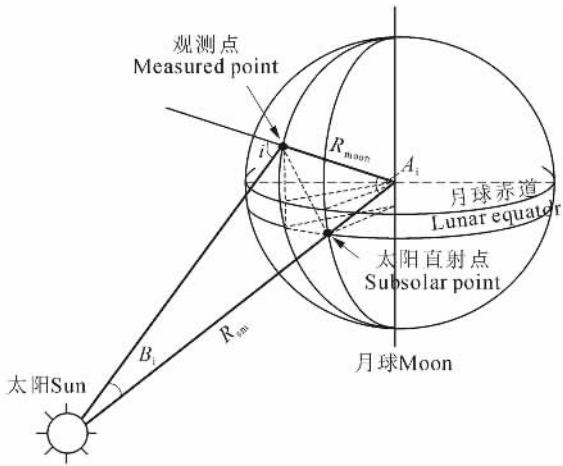


图 3 月表太阳辐射入射角示意图

Fig.3 Schematic diagram of the solar radiation incidence angle on lunar surface

通过上述分析可知, 月表有效太阳辐照度可表示为

$$I = \frac{S_0 \sin^2(W_{\text{em}} R_{\text{em}}/R_{\text{se}}) \cos(A_i + B_i)}{R_{\text{em}}^2 \sin^2 W_{\text{em}}}. \quad (9)$$

2.2 误差分析

由误差传递原理可知, 系统总误差等于各变量误差与其偏导数乘积绝对值之和. 根据式(1)和(2)可得,

$$I = S_0 R_{\text{sm}}^{-2} \cos i. \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 月表有效太阳辐照度的误差是由太阳常数、日月距离和太阳辐射入射角的误差传递引起的, 它可以表示为

$$\sigma_I = \left| \frac{\partial I}{\partial S_0} \sigma_{S_0} \right| + \left| \frac{\partial I}{\partial R_{\text{sm}}} \sigma_{R_{\text{sm}}} \right| + \left| \frac{\partial I}{\partial i} \sigma_i \right|, \quad (11)$$

σ_{S_0} 为太阳常数误差, $\sigma_{R_{\text{sm}}}$ 为日月距离误差, σ_i 为月表

太阳辐射入射角误差. 将式(10)代入后可得,

$$\sigma_I = \frac{\cos i}{R_{\text{sm}}^2} \sigma_{S_0} + \frac{2S_0 \cos i}{R_{\text{sm}}^3} \sigma_{R_{\text{sm}}} + \frac{S_0 \sin i}{R_{\text{sm}}^2} \sigma_i. \quad (12)$$

研究^[13~16]表明, 太阳常数的变化与太阳活动有着密切联系, 它在 11 年的周期呈强弱交替变化的趋势. PMOD 模型对太阳常数观测数据的拟合结果表明, 太阳常数的变化范围在 $1361.8 \sim 1369.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间 (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarirradiance.html>; <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>; <http://remotesensing.oma.be/solarconstant/sarr/sarr.txt>). 取平均值(即 $S_0 = 1365.5 \pm 3.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)时, 其误差可表示为

$$\sigma_{S_0} \leq 3.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (13)$$

由 VSOP87 理论可知, 日月距离的误差为

$$\sigma_{R_{\text{sm}}} \leq 9.13 R_{\text{sm}} \times 10^{-6} \text{ cy}^{-1}. \quad (14)$$

由式(7)可知, 由于 W_d 很小, A_i 与 J_d 的误差应在同一数量级, 即 10^{-9} cy^{-1} ^[10]. 同时, 由于日月距离远大于月球半径, B_i 很小. 因而, 月表太阳辐射入射角误差主要来源于 A_i , 其数量级也约为 10^{-9} cy^{-1} , 即

$$\sigma_i \leq 10^{-9} \text{ cy}^{-1}. \quad (15)$$

将式(13)~(15)代入式(12)得,

$$\sigma_I = \frac{3.7 \cos i}{R_{\text{sm}}^2} + \left[\frac{18.26 S_0 \cos i}{R_{\text{sm}}^2} \times 10^{-6} + \frac{S_0 \sin i}{R_{\text{sm}}^2} \times 10^{-9} \right] N, \quad (16)$$

N 为相对 2000 年 1 月 1 日 12 时的年数. 由日地月轨道系统的几何关系可知, 当地球处于近日点, 并且月球处于太阳和地球之间的连线上时, R_{sm} 取得最小值 0.980466 AU ^[11,17,18]. 月表太阳辐射入射角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化. 因此, 从 1950 ~ 2050 年的 100 年内月表有效太阳辐照度的误差变化范围为

$$0 \leq \sigma_I \leq 3.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, \quad (17)$$

该时期内, 月表有效太阳辐照度的误差百分比小于 0.28%.

3 结果分析

根据上述模型, 作者在 Visual C++ 6.0 开发平台上编写了相应的计算程序, 并计算了 Apollo 11、12、15 和 17 登陆点在其登陆时刻附近一个周期内月表有效太阳辐照度的变化, 计算结果的理论误差在

3.3~3.4 $W \cdot m^{-2}$ 之间,误差百分比约为 0.24% ~ 0.25%。利用 Apollo11、12、15 和 17 的计算结果分别对 Cremers^[1]和 Jones^[4]所提出的月表有效太阳辐照度模型进行了检验(图 4)。结果表明,这两种模型在计算任意时刻的月表太阳有效辐照度时产生较大的误差,均不能真实反映月表有效太阳辐照度随时间的变化规律。Cremers 模型在计算 Apollo 11、12、15 和 17 登陆点的月表有效太阳辐照度时产生的最大相对误差分别为 568.9、554.0、75.7 $W \cdot m^{-2}$ 和 699.7 $W \cdot m^{-2}$,最大相对误差百分比均超过 200%。而

Jones 提出的月表有效太阳辐照度模型在同样计算时产生的最大相对误差分别为 24.6、17.7、13.8 $W \cdot m^{-2}$ 和 15.6 $W \cdot m^{-2}$,最大相对误差百分比分别为 71.5%、44.5%、57.4%和 37.8%。此外,由图 4 还可以看出,Cremers 模型的昼夜变更时间与月表有效太阳辐照度的转折点并不一致,意味着月表在日落后或日出前还受到太阳辐射,这与实际情况不符。总的来说,这两种模型在日月距离、入射角与时间关系的处理上过于简单,相对本文模型的计算结果,存在较大误差。

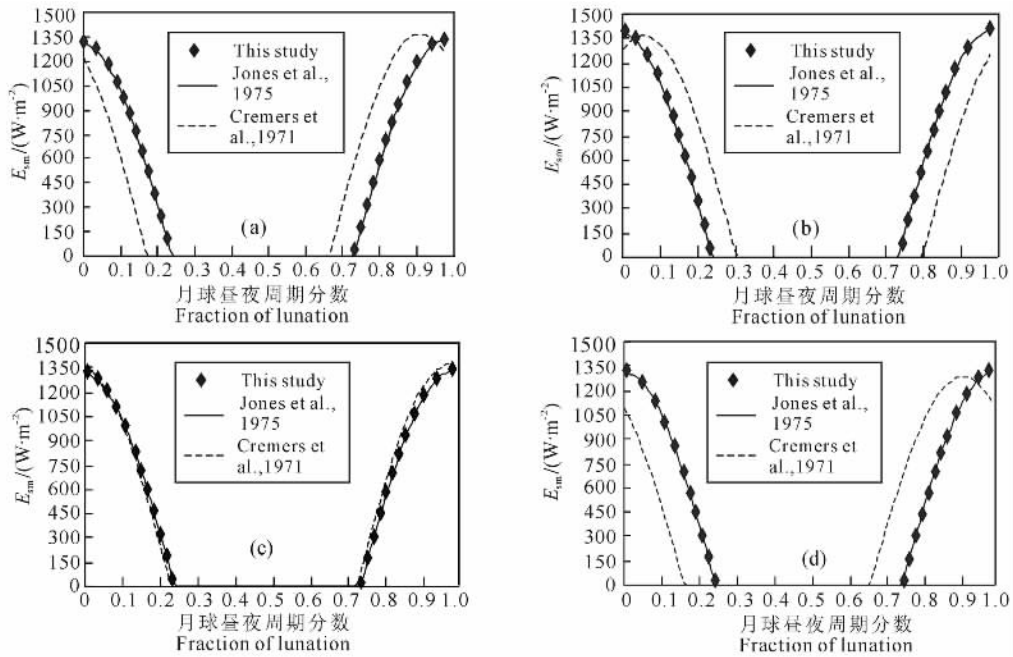


图 4 月表有效太阳辐照度时间变化曲线

(a~d)分别对应 Apollo 11、12、15 和 17 四个登陆点。

Fig.4 The effective solar irradiance changing with time on lunar surface

(a~d) corresponding to Apollo 11, 12, 15 and 17 landing sites, respectively.

此外,作者还计算了 2007 年全年月表太阳辐照度的变化情况(图 5),可以看出随着地球从近日点向远日点运动,月表太阳辐照度由 2007 年初至 2007 年 6 月呈逐渐减弱的趋势,当地球从远日点向近日点运动时,即从 2007 年 6 月至 2007 年末,其变化呈相反趋势由弱逐渐变强。同时由于月球绕地球的公转,它在整体的由强变弱再变强的趋势中存在多个小周期的强弱起伏。此外,由于月球的黄赤交角约为 1.54242° ^[10],太阳直射月面纬度只能在大致 $\pm 1.54242^{\circ}$ 之间的范围内变化,利用 Meeus 给出的算法,计算了 2007 年太阳直射月面纬度的变化情况,其变化范围为 $-1.5441^{\circ} \sim +1.6047^{\circ}$,周期约为一年(图 6)。太阳直射月面纬度的变化规律说明月球南北两极在理论上会出现极昼极夜现象,极昼极夜区

域大致为 $\pm 90^{\circ} \mp 1.5^{\circ}$ 。利用本文模型对月球两极在 2007 年内的有效太阳辐照度变化进行计算,结果发现月球北极从 3 月 5 日到 8 月 30 日太阳辐射入射角小于 90° ,即出现极昼现象,其他时间太阳辐射入射角大于 90° ,出现极夜现象,南极则相反(图 7)。该年内南北两极的最大有效太阳辐照度分别为 $37.3 W \cdot m^{-2}$ 和 $38.0 W \cdot m^{-2}$ 。最近研究也证实了在月球北极地区出现极昼现象^[19]。图 8 给出了除月球两极的极昼极夜地区以外的其他纬度地区太阳辐射入射角以及月表有效太阳辐照度随纬度的变化关系,其变化规律基本上是以赤道为对称轴,太阳辐射入射角向两旁逐渐增大,有效太阳辐照度则向两旁逐渐减弱,其峰值分别由直射经线向两侧逐渐增大和减弱。为更清晰描述月表有效太阳辐照度的分布状

况 ,文中给出了 2007 年 12 月 20 日 0 时月表有效太阳辐照度的全球分布(图 9)。由图可以看出 ,它在月表的分布呈环带状 ,以太阳直射点为中心向四周递减。同时 ,计算结果的统计表明月表太阳辐照度该年内的变化在 $1321.5 \sim 1416.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间 ,平均为 $1368.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,一个月内的变化最小幅度为 $6.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,最大为 $23.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

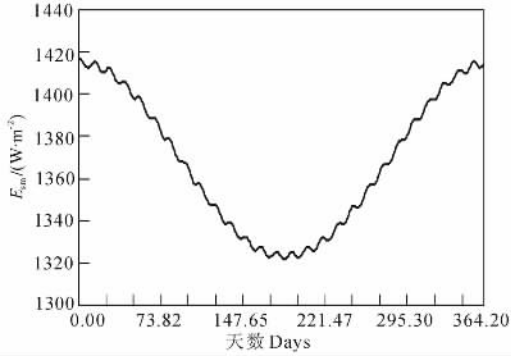


图 5 位于 0N0E 的月面点 2007 年全年月表太阳辐照度的时间变化曲线

Fig.5 The annual change of solar irradiance on lunar surface in 2007 at 0N0W selenographic point

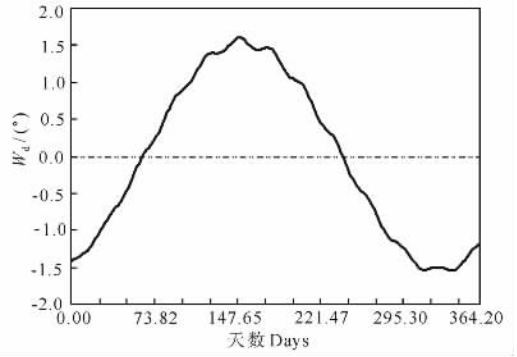


图 6 2007 年太阳直射月面纬度的时间变化曲线

Fig.6 The annual change of subsolar selenographic latitude in 2007

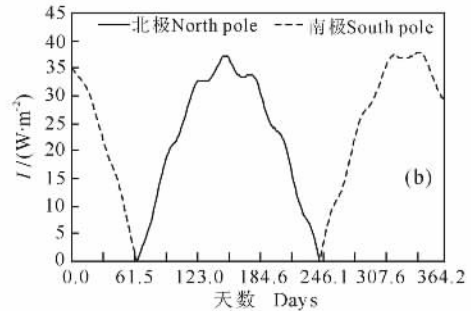
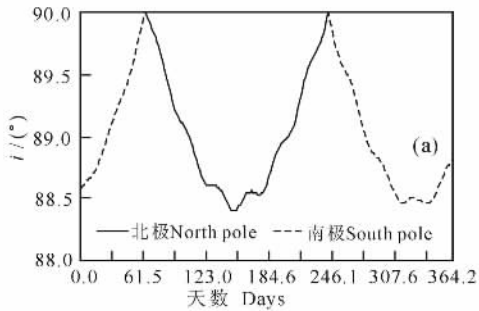


图 7 2007 年月球两极太阳辐射入射角 (a) 和月表有效太阳辐照度 (b) 的时间变化曲线

Fig.7 The annual change of solar radiation incidence angle (a) and effective solar irradiance (b) at the lunar poles in 2007

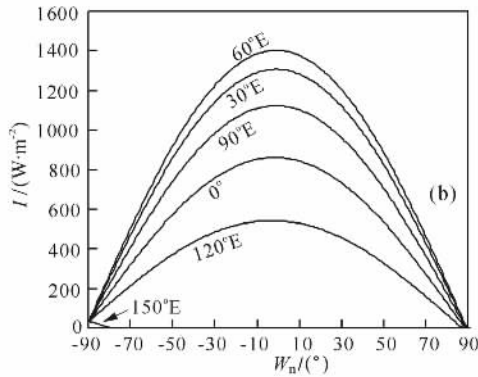
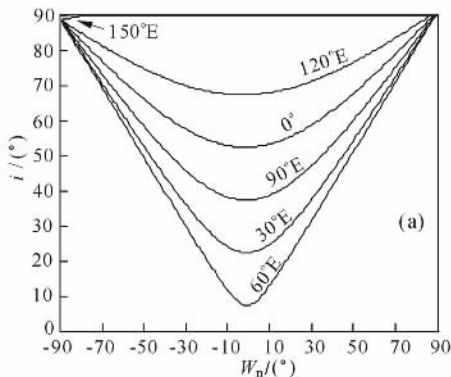


图 8 不同经度太阳辐射入射角 (a) 和月表有效太阳辐照度 (b) 随纬度的变化曲线

Fig.8 The solar radiation incidence angle (a) and the effective solar irradiance (b) changing with the selenographic latitude in different selenographic longitudes

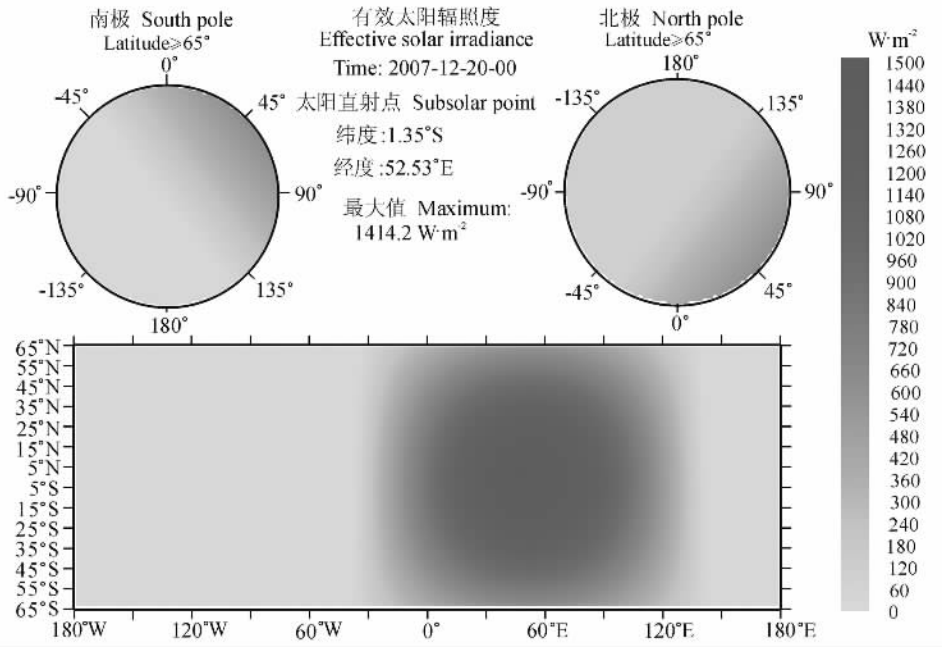


图9 2007年12月20日0时月表有效太阳辐照度的全球分布图

Fig.9 Global distribution of the effective solar irradiance on lunar surface at 0 o'clock on December 20, 2007

100年内的理论误差百分比小于0.28%，能较为真实地反映月表有效太阳辐照度随时间的变化规律。数值模拟结果表明，由于地球在椭圆轨道上绕太阳公转的同时月球也绕地球公转，因此，月表的太阳辐照度在整体的由强变弱再变强的趋势中存在多个小周期的强弱起伏，2007年月表太阳辐照度的年变化范围在1321.5~1416.6 W·m⁻²之间，平均为1368.0 W·m⁻²。通过对月表太阳辐射入射角计算结果的分析，从理论上证实了月球的两极可能存在极昼极夜；同时模拟结果表明，2007年月球南北两极的最大有效太阳辐照度分别为37.3 W·m⁻²和38.0 W·m⁻²。

参考文献 (References)

[1] Cremers C J, Birkebak R C, White J E. Lunar surface temperatures from Apollo 12. *The Moon*, 1971, **3**: 346 ~ 351

[2] Pugh M J, Bastin J A. Infrared observations of the Moon and their interpretation. *Earth, Moon, and Planets*, 1972, **5**: 16 ~ 30

[3] Racca G D. Moon surface thermal characteristics for moon orbiting spacecraft thermal analysis. *Planet. Space Sci.*, 1995, **43**: 835 ~ 842

[4] Jones W P, Watkins J R, Calvert T A. Temperatures and thermophysical properties of the lunar outermost layer. *The Moon*, 1975, **13**: 475 ~ 494

[5] Chapront-Touzé M, Chapront J. The Lunar ephemeris ELP 2000. *A&A*, 1983, **124**: 50 ~ 62

[6] Bretagnon P, Francon G. Planetary theories in rectangular and spherical variables VSOP 87 solutions. *A&A*, 1988, **202**: 309 ~ 315

[7] Owczarek S. Vector model for calculation of solar radiation intensity and sums incident on tilted surfaces: identification for the three sky

condition in Warsaw. *Renewable Energy*, 1977, **11**: 77 ~ 96.

[8] Maxwell E L. Metstat-the solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Solar Energy*, 1998, **26**: 263 ~ 279

[9] 刘浩, 尹宝树. 一个用于实时计算的太阳辐射模型. *海洋与湖沼*, 2006, **37**(6): 493 ~ 497

Liu H, Yin B S. A real-time irradiation model. *Oceanologia & Limnologia Sinica* (in Chinese), 2006, **37**(6): 493 ~ 497

[10] Meeus J. *Astronomical Algorithms*. Virginia: Willmann-Bell Inc., 1991

[11] Heiken G, Vaniman D, French B M. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991

[12] Davies M E, Colvin T R. Lunar coordinates in the regions of the Apollo landers. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 20277 ~ 20280

[13] Solanki S K, Fligge M. Solar irradiance since 1874 revisited. *Geophysical Research Letters*, 1998, **3**: 341 ~ 344

[14] Willson R C. Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22. *Science*, 1997, **26**: 1963 ~ 1965

[15] Willson R C. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21 - 23. *Geophysical Research Letters*, 2003, **5**: 1199 ~ 1202

[16] Fröhlich C. Total solar irradiance variations since 1978. *Adv. Space Res.*, 2002, **10**: 1409 ~ 1416

[17] 郭瑞涛编著. *地球概论*. 北京: 北京师范大学出版社, 1988

Guo R T ed. *Introduction to the Earth* (in Chinese). Beijing: Beijing Normal University Press, 1988

[18] Duke M B. The lunar environment. In: Eckart P ed. *The Lunar Base Handbook*. New York: The McGraw-Hill Companies Inc., 1999. 105 ~ 151

[19] Bussey D Ben J, Fristad K E, Schenk P M, et al. Constant illumination at the lunar north pole. *Nature*, 2005, **343**: 842

(本文编辑 何 燕)