

嫦娥四号着陆区织女陨坑电场环境数值模拟*

甘红^{1,2} 李雄耀^{3,4} 魏广飞^{3,4}

1(贵州理工学院分析测试中心 贵阳 550003)

2(澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室 澳门 999078)

3(中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心 贵阳 550081)

4(中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

摘要 由于太阳紫外、X 射线和太阳风粒子作用, 近月表形成尘埃等离子体环境, 而月表陨坑地形使得这种尘埃等离子体环境更为复杂. 本文以位于嫦娥四号着陆区的织女陨坑为研究对象, 基于高程数据构造了该陨坑的三维模型. 根据太阳-月球关系和陨坑地理坐标信息, 计算了陨坑白天任意时刻的有效太阳辐照度分布, 探讨了不同时刻陨坑内外的光照面积占比, 得到陨坑随地方时而发生的遮蔽效应特征. 同时, 基于月表充电方程计算了织女陨坑在不同地方时条件下的平衡表面电势、德拜鞘高度和电场强度分布, 发现陨坑自身遮蔽效应对坑内电场环境影响十分明显. 以坑底中心为例, 讨论了地方时和纬度对类织女陨坑的平衡表面电势、德拜鞘高度及电场强度的影响, 结果表明三者变化特征均以正午时刻及赤道为界呈对称分布, 越接近 12:00 LT 或者越接近赤道, 坑底中心的平衡表面电势和电场强度越高, 德拜鞘高度越低.

关键词 月球, 嫦娥四号, 织女陨坑, 电场, 数值模拟

中图分类号 P 184

Electric Fields Distribution of Zhinyu Crater in Chang'E-4 Landing Area

GAN Hong^{1,2} LI Xiongyao^{3,4} WEI Guangfei^{3,4}

1(Analyzing and Testing Center, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003)

2(State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078)

3(Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081)

4(Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

Abstract Solar radiation and solar wind create a complex dust-plasma environment in lunar crater. Based on the elevation data obtained from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) onboard Lunar

* 国家自然科学基金项目 (41572037, 41803052, 41903058), 月球与行星科学国家重点实验室 (澳门科技大学) 开放课题项目 (119/2017/A3), 贵州省科技计划项目 ([2019]2830) 和贵州理工学院高层次人才科研启动经费项目 (XJGC20181290) 共同资助
2018-12-18 收到原稿, 2020-01-14 收到修定稿
E-mail: ganhong06@gmail.com

Reconnaissance Orbiter (LRO), we constructed a three-dimensional model of Zhinyu crater which located in the Chang'E-4 landing area, and then calculated the effective solar irradiance and the percentage of illuminated area at different local time in the lunar daytime. The results show that the crater self-shading effect plays an important role in crater illumination conditions, and the percentage of illuminated area reaches 100% only during 10:30 LT–13:30 LT. In addition, we calculated the distributions of equilibrium surface potential, Debye length and electric field at different local time, which were found to be highly dependent on the crater self-shading effect. Finally, we discussed the relationship of equilibrium surface potential, Debye length and electric field at the bottom of Zhinyu-like crater with local time and latitude. The results show that the distributions of equilibrium surface potential, Debye length and electric field are symmetric along the time of 12:00 LT and lunar equator. These values almost remain unchanged on the shadow areas and change slightly on the sunlit areas, but change dramatically at the dead zone.

Key words Moon, Chang'E-4, Zhinyu crater, Electric fields, Numerical simulation

0 引言

1968年美国勘探者7号在月球日落后一小时的西方地平线上拍摄到月球辉光^[1]。随着此次辉光的发现, Rennilson等^[2]对勘探者早期拍摄的图像进行了重新分析, 识别出勘探者1, 5, 6号中拍摄的辉光, 这种辉光由悬浮的带电尘埃散射太阳光而形成。随后的阿波罗系列任务^[3,4]、月球车2号^[5]、克莱门汀^[6]探测器等进一步证实了辉光现象的存在。

月尘带电和月球全球性静电场是尘埃悬浮运动以及产生月球地平辉光的主要因素, 尘埃可从月表迁移至几千米高空^[7]。月球没有大气层和全球性磁场, 太阳辐射、太阳风等离子体可以直接到达月表, 并与月表物质相互作用使之带电。由于这些物质电导率极低, 在月表超高真空环境下基本不导电, 因此其一旦带上电荷可以长时间保存而不发生转移^[8]。带电的月表物质吸引大量等离子体在近月表汇集, 形成全球性的静电场。这些带电物质特别是粒径小于 $100\mu\text{m}$ 的月尘在静电场中迁移运动^[9], 最终形成月面复杂的尘埃等离子体环境^[10]。

根据阿波罗登月探测报告, 带电月尘容易附着并污染光学镜头, 导致运动机械机构卡死, 引起太阳能电池阵失效, 热控系统以及密封机构发生故障等^[11–13], 甚至对航天员健康造成威胁^[14]。中国月球车—玉兔号出现的机构控制异常, 推测可能是月球车受到月尘的影响, 例如尘埃进入某些关键部件如轴承、齿轮等密封机械结构而产生磨损, 也可能是月尘

覆盖在月球车表面影响散热, 进而烧毁机构控制模块或信号传递模块造成控制失效^[15]。总之, 运动尘埃是月面探测和月面作业的重大安全隐患, 是未来月球探测需考虑的关键因素之一^[16]。

2005年美国科罗拉多大学成功研制等离子鞘套实验装置^[17], 用于研究真空环境下尘埃因光电发射^[18]或二次电子发射带电^[19], 以及尘埃在等离子体环境中的迁移特性。研究结果证实带电尘埃在等离子体环境中可以发生水平和垂向迁移^[19–21], 同时给出了运动尘埃颗粒的粒径、速度、带电量分布特征^[22]。2016年中国科学院地球化学研究所搭建了月球尘埃环境模拟研究平台, 对尘埃带电迁移过程进行模拟, 研究电子束轰击和/或紫外光照射下尘埃的运动速度以及运动尘埃的粒径分布特征。受实验条件等限制, 实验模拟不能有效模拟大尺度(几千米甚至几十千米)的月表尘埃运动。

受太阳风和太阳紫外辐射作用的影响, 月表形成了复杂的等离子体环境, 广泛分布的陨坑使得太阳风和紫外辐射通量分布极不均匀。随着纬度和地方时的变化, 陨坑内电场环境更加复杂多变。从全球尺度来看, 随着月表昼夜变化, 在晨昏线附近会产生极强的电场, 且微小的太阳高度角变化会引起显著的尘埃浮扬^[23], 这直接导致尘埃向撞击坑和阴影区迁移^[24,25]。

在早期理论模型中, 通常弱化地形的影响, 仅考虑全球尺度的电场分布及其对尘埃运动的影响, 主要分为月球白天和夜晚的垂向迁移及晨昏线处的水平

迁移^[23,25,26]。但是,地形遮蔽效应会改变局部等离子体环境^[27,28],数值模拟结果表明晨昏线区域细微的表面带电差异会引起大规模尘埃迁移^[25]。因此,地形地貌以及光照条件对月表等离子体环境的影响是一个亟待解决的重要问题,也是行星科学界关注的焦点问题之一。这对分析复杂地形条件下尘埃的动力学特征以及未来月面探测中尘埃天气的预警具有重要作用。

关于陨坑对表面等离子鞘层形成及带电尘埃运动规律的影响已开展了大量研究。2005年Cowell等^[9]通过构造陨坑深径比为0.25的简单陨坑,模拟了Eros小行星表面赤道地区坑内带电尘埃颗粒的运动特征。Hughes等^[29]进一步建立Eros小行星表面陨坑的几何光照模型,模拟尘埃的静电迁移和尘埃池的形成。2011年Likhanskii等^[30]采用三维离子群(3-D Particle In Cell)模型模拟简单陨坑表面在不同太阳入射角下等离子体鞘的分布特征。Poppe等^[31,32]建立了PIC数值模拟程序,对月球表面鞘层进行模拟。通过构造一个位于赤道地区直径7m、深1m的简单陨坑,采用3-D PIC方法模拟不同太阳天顶角条件下的尘埃等离子体环境,结果表明陨坑内形成了复杂的水平和垂向电场分布^[27]。Piquette等^[28]拓展了Poppe等的工作,在简单陨坑坑缘靠近日出方向增加一个1m³立方体遮挡物,研究不同太阳天顶角条件下不对称地形(复杂陨坑)的等离子体环境,发现较小粒径的月尘更易迁移至阴影区。但是,已有研究主要针对赤道地区的陨坑,且仅考虑了太阳高度角的影响,而数值模拟又局限于米级撞击坑,针对地方时和纬度对千米级月面陨坑电场环境影响的研究较为缺乏。在不同纬度和时刻条件下,陨坑周围等离子体环境及月面电场分布特征受地形遮蔽影响,变得更加复杂。

本文以位于嫦娥四号着陆区的织女陨坑为研究对象,利用高程数据获取陨坑的形貌特征并采用数学方法构建三维陨坑模型。根据太阳-月球位置关系以及陨坑地理坐标,计算该陨坑在白天任意时刻的有效太阳辐照度,研究不同时刻陨坑内外光照面积占比和陨坑自身遮蔽效应特征。基于空间等离子体理论,分析不同时刻织女陨坑的平衡表面电势(ϕ_s),德拜鞘高度(λ_D)和电场强度(E_s)分布,探讨地方时和纬度对类织女陨坑坑底中心 ϕ_s , λ_D 和 E_s 的影响。

1 数值模拟

1.1 简单陨坑及光照模型

月表典型的地形地貌特征是广泛分布的撞击坑,如图1(a)所示。从直径几百千米的撞击盆地至米级陨坑,其形态包括多环盆地、带中央峰的陨坑和碗形的简单陨坑等。研究表明,直径小于15km的陨坑多以简单陨坑为主^[33]。即使在地形相对平缓的嫦娥四号、五号(预)着陆区,仍然分布着大量直径几十米至几千米的陨坑,如图1(b)所示。

从数值模拟角度看,形态结构简单的碗形陨坑易于通过函数进行三维构建。一般通过截取球面的部分曲面,由曲面向周围延伸平面来进行模拟。陨坑形态特征通常由坑深与坑径比值表示,即深径比(Δ)。研究表明,月球上直径小于15km的简单陨坑中,深径比满足 $1/6 < \Delta < 1/5$ 的陨坑均可用截取的球面来近似^[33,34]。陨坑的地形或高程(z)分布可由水平方向的笛卡儿坐标(x, y)表示为^[35]

$$z = R - h - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}. \quad (1)$$

其中, $R = (r^2 + h^2)/(2h)$ 为与月表相交的大球半径, h 为陨坑深度, r 为陨坑半径(见图2)。

由式(1)可知,当确定陨坑直径($2r$)和深度后可建立 xy 水平方向和 z 垂直方向的陨坑曲面坐标,即构建简单陨坑的三维地形。这里对位于嫦娥四号着陆区中央附近的织女陨坑(176.15°E, 45.34°S)建立三维模型并分析其表面电场环境。该陨坑所在位置见图1中蓝色方框标记处。

图3(a)为织女陨坑光学影像,可以看出坑形呈典型碗状。坑壁和坑缘周围较为光滑,在坑缘周围有显著的岩块分布。相比陨坑规模,岩块对地形的影响可以忽略。图3(b)为织女陨坑高程分布,从图3(b)中可以看出,织女陨坑周围地形较为平坦,没有大的地形起伏,不过坑缘略高于周边区域,如图3(c)剖面高程图所示。坑缘到坑底呈现平滑过渡,没有地形突变。因此,从形貌角度而言,采用截取球面曲面的方法模拟织女陨坑是可行的。利用经过陨坑中心的剖面(见图3c),可以进一步确定织女陨坑的直径约3.7km,深度图约0.7km。 $\Delta = 0.7/3.7 \approx 0.189$,介于 $1/6$ 与 $1/5$ 之间。图4给出了基于 $\Delta = 0.189$ 的织女陨坑三维模型。

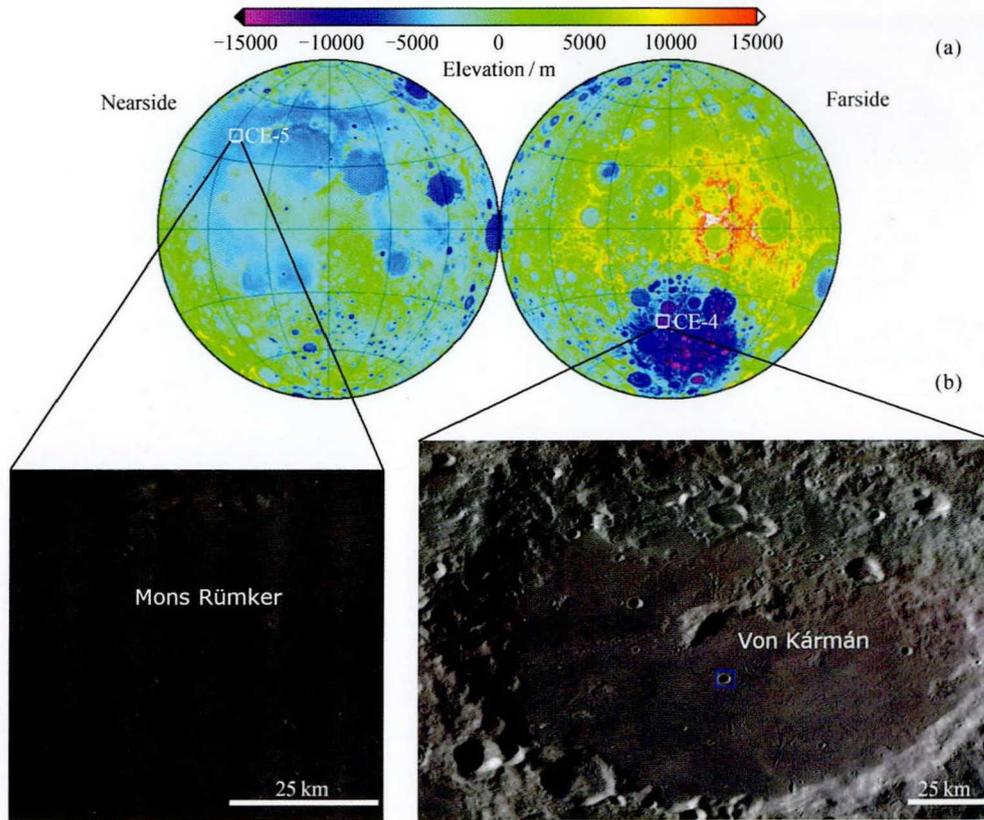


图 1 月球高程图 (a) 和嫦娥四号、五号 (预) 着陆区光学影像 (b). 数字高程图基于 LOLA 数据绘制*, 光学影像来自 LROC 广角相机数据**

Fig. 1 Lunar elevation (a) and optical images of Chang'E-4/5 (candidate) landing areas (b). The elevation map is created from LOLA data*, and the optical images are obtained by LROC WAC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Wide Angle Camera)**

月球水平表面任一位置的太阳高度角 (β) 可用纬度 (λ)、太阳赤纬 (δ)、时角 (h_a) 表示为^[36]

$$\sin \beta = \cos \lambda \cos \delta \cos h_a + \sin \lambda \sin \delta. \quad (2)$$

当 $\sin \beta < 0$ 时, 太阳位于地平线以下. 对于地形起伏的月球表面, 需进一步考虑斜坡面上的局部太阳高度角 (θ). 为方便计算陨坑内不同斜坡位置的太阳高度角, 这里进一步将陨坑模型三角网格化, 即以连续的三角网格来模拟陨坑的地形变化^[29]. 任意三角网格平面的太阳高度角可表示为^[36]

$$\sin \theta = \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta \cos(\Delta\alpha). \quad (3)$$

其中, $\Delta\alpha$ 为太阳方位角 (α) 与地形坡度的差值. 当 $\sin \theta < 0$ 时, 假设太阳位于以该局部坡面延伸的

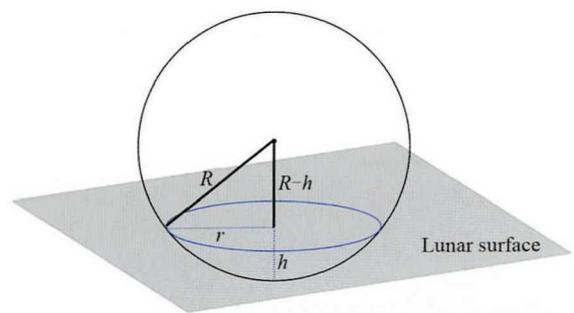


图 2 简单陨坑模型构建. 蓝色圆弧表示陨坑边缘, 灰色区域表示月球表面, 二者位于同一平面

Fig. 2 Schematic of simple crater construction. The blue circle denotes crater rim and the gray area denotes lunar surface. Both of them are located in the identical plane

*<http://oderest.rsl.wustl.edu/GDSWeb/GDSLORADR.html>

**<http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexMapSearch.aspx>

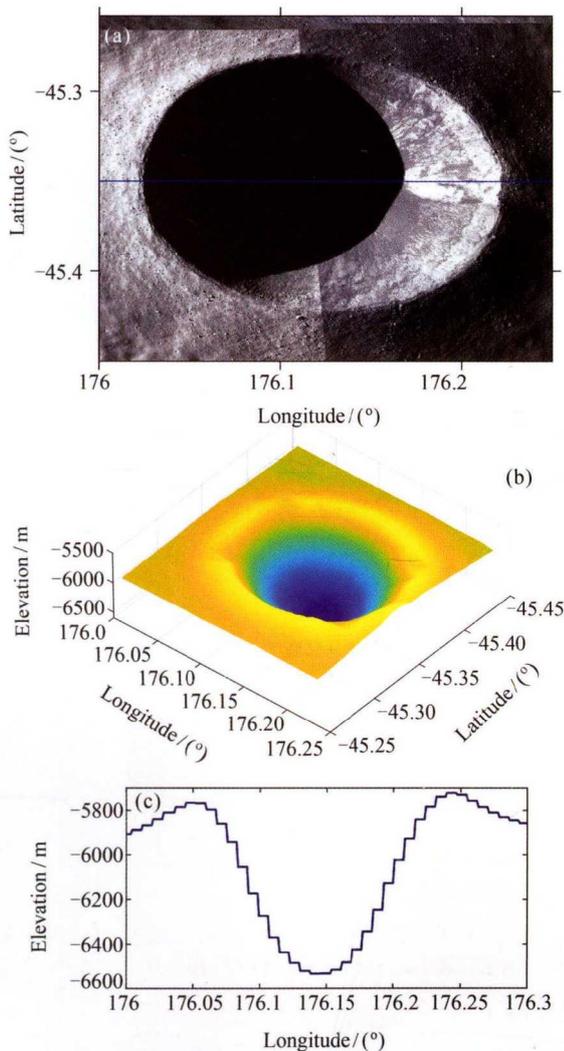


图3 织女陨坑 (176.15°E, 45.34°S) 的光学影像 (a)、高程图 (b) 和剖面高程图 (c)。 (c) 中剖面位置为 (a) 中蓝线标记位置

Fig. 3 Optical image (a), elevation (b) and elevation profile (c) of Zhinyu crater (176.15°E, 45.34°S). The elevation profile in (c) is marked by blue line in (a)

无限平面以下, 即坡面存在自身遮蔽效应。

假设太阳为点光源且入射到月表的太阳光为平行光, 由式 (2) 和式 (3) 可知, 陨坑的太阳辐射环境主要取决于纬度和地方时 (即时角 h_a) 的影响。对于位置确定的织女陨坑, 地方时是影响其热辐射环境的主要因素, 如图 5 所示。陨坑边缘水平区域太阳辐照度分布均匀, 随时间表现出一致的变化。而陨坑内太阳辐照度分布表现出较大的差异, 越接近黎明/傍晚时刻 (见图 5a, e), 陨坑的遮蔽效应越明显。随时间变化, 坑内光照区与阴影区的面积及位置均发生变化,

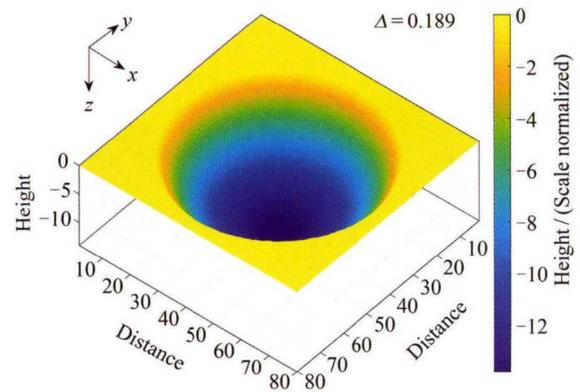


图4 无量纲的织女陨坑 (176.15°E, 45.34°S) 三维模型
Fig. 4 Dimensionless three-dimensional model of Zhinyu crater (176.15°E, 45.34°S)

如图 5(b) (d) 所示。正午时刻 (见图 5c) 太阳光照区面积达到最大, 即陨坑接受的太阳辐射最多。

为进一步量化陨坑自身遮蔽效应, 图 6 给出织女陨坑不同时刻的光照面积占比, 即陨坑 (含陨坑边缘水平区域) 的光照面积占总面积的比值。当光照面积占比达到 100% 时, 研究区内无自身遮蔽效应。由图 6 可知, 在 10:30 LT—13:30 LT, 陨坑的光照面积占比达到 100%, 即仅有近正午 3h 时间内陨坑不存在自身遮蔽效应, 其他时间段 (06:00 LT—10:30 LT 和 13:30 LT—18:00 LT) 均存在不同程度自身遮蔽效应。相应地, 图 5(a)~(e) 的光照面积占比分别约为 80.9%, 99.5%, 100%, 95.7%, 80.9%。由图 5 和图 6 可以看出, 中纬度地区陨坑坑壁能接受长时间持续光照的区域非常有限, 整个陨坑不存在自身遮蔽效应的时间也十分有限, 且坑内光照区域和阴影区域随时间交替变化。

1.2 月面充电

月球白天时, 月表物质受太阳紫外、X 射线照射以及太阳风粒子不断轰击而带电, 在月面及近月表等离子体环境中形成全球性静电场。忽略太阳风粒子的反射、散射及月表物质的溅射、二次电子发射等, 月面充电电流主要来自于光电子电流 (J_p) 和等离子体电子电流 (J_e)、离子电流 (J_i)。等离子体离子电流包括太阳风质子和正离子产生的电流, 相对于太阳风质子产生的电流, 正离子电流可忽略, 即 J_i 为太阳风质子电流。当静电势达到稳定时, 月面充电电流达到平衡, 即 $dQ/dt = J_p + J_e + J_i = 0$ 。对于月表白天光照区, 太阳紫外、X 射线等照射月表物质, 激发光电

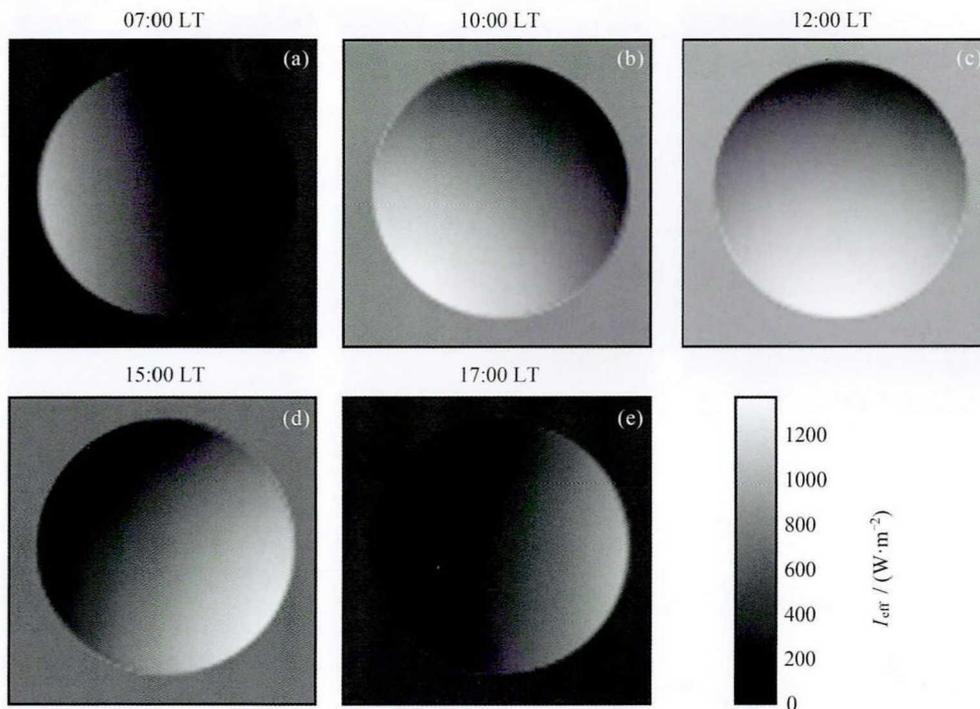


图 5 织女陨坑 (176.15°E, 45.34°S) 在不同时刻的太阳辐照度分布. 太阳常数取值为 $1366 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 当 $I_{\text{eff}} = 0$ 时表示该位置完全被遮蔽

Fig. 5 Distribution of solar irradiance at different local time for Zhinyu crater (176.15°E, 45.34°S). The solar constant is $1366 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, and it is self-shaded as $I_{\text{eff}} = 0$

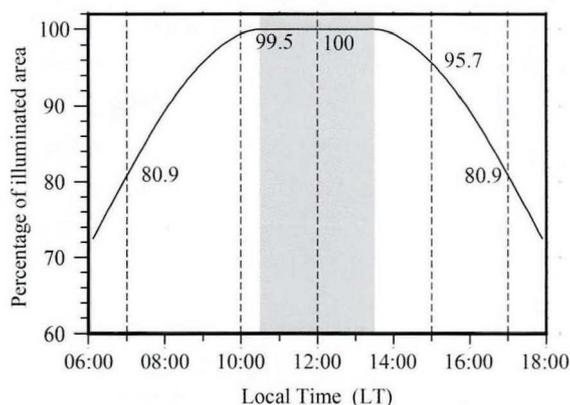


图 6 织女陨坑 (176.15°E, 45.34°S) 在不同时间的光照面积占比. 当光照面积占比达 100% 时, 陨坑无自身遮蔽效应
Fig. 6 Percentage of illuminated area at different local time for Zhinyu crater (176.15°E, 45.34°S). When the percentage of illuminated area reaches 100%, the crater is completely illuminated without self-shading effect

壤为理想的绝缘体物质, 相邻颗粒间无电荷转移, 即月面无电流发生.

当月面带正电时, 近月表形成德拜鞘 (光照区德拜鞘也称光电鞘), 静电势通常为几伏至十几伏, 鞘层高度为米级 [37]; 当月面带负电时, 近月表也形成德拜鞘, 静电势从零到负一百伏. 月球夜晚, 由于尾迹效应, 大量电子在月球背光面汇集, 极端天气条件下, 静电势甚至可达 -4.5 kV [38], 但这里对极端天气不做讨论. 随着时间推移, 月面光照区和明暗区发生变化, 其带电特征也随之改变, 且月面的充电速度取决于太阳紫外辐射、等离子体通量、电子/光电子速度和温度等, 这里仅研究充电电流达到平衡状态时月面的电场环境特征.

根据 Stubbs 等 [26] 的分析模型, 月球白天光照区充电电流平衡满足 $J_p + J_e = 0$, 当月表电势 $\phi_0 > 0$ 时, 光电子电流密度为

$$J_p = -en_{p0} \left(\frac{k_B T_p}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{|e\phi_0|}{k_B T_p} \right). \quad (4)$$

式中: $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ 为 Boltzmann 常数; e 和 m_e

子产生的光电子电流占主导, $J_p \gg J_e \gg J_i$, 月面带正电, 忽略 J_i , 则 $J_p + J_e = 0$; 对于月球夜晚, 没有光电子电流, 月面带负电, 则 $J_e + J_i = 0$. 在此假设月

分别为元电荷 (1.6×10^{-19} C) 和电子质量 (9.11×10^{-31} kg); T_p 为光电子温度; ϕ_0 为月面电势, 即距月表高度为 0 时的静电势, 当充电平衡时, $\phi_0 \approx \phi_s$; n_{p0} 为月表的光电子浓度, 与太阳的入射角度有关, 可表示为

$$n_{p0} = - \left(\frac{2\pi m_e}{k_B T_p} \right)^{1/2} \frac{J_{p0} \cos \chi}{e D^2}, \quad (5)$$

其中, J_{p0} 为月表太阳垂直入射点的光电子电流密度, χ 为太阳天顶角, D 为日月之间的距离 (单位 AU), 此处取 1. 此时, 电子受月面电场吸引, 满足 $q\phi_0 \leq 0$, 则等离子体电子电流密度为

$$J_Q = -qn_0 \left(\frac{k_B T_Q}{2\pi m_Q} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

其中: n_0 为无穷远处 (即德拜鞘外) 的等离子体浓度; q 为粒子电荷, 粒子为电子时 $q = -e$, 粒子为离子 (本文指质子) 时 $q = e$; J_Q , T_Q 和 m_Q 分别代表粒子的电流密度、温度和重量, 粒子为电子时 $Q = e$, 粒子为离子时 $Q = i$. 此处粒子为电子, 则 $Q = e$, $q = -e$.

当 $\phi_0 > 0$ 时, $\phi_s > 0$, 平衡表面电势 ϕ_s 可表示为

$$\phi_s = - \frac{k_B T_p}{e} \ln \left(- \frac{en_0}{J_{p0} \cos \chi} \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \right). \quad (7)$$

其中, T_e 为等离子体电子温度.

对于月球白天光照区, 当月表电势 $\phi_0 \leq 0$ 时, $\phi_s \leq 0$. 如靠近晨昏线附近处, 其光电子电流密度为

$$J_p = -en_{p0} \left(\frac{k_B T_p}{2\pi m_e} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

此时, 电子受月面电场排斥, 满足 $q\phi_0 > 0$, 则等离子体电子电流密度为

$$J_Q = -qn_0 \left(\frac{k_B T_Q}{2\pi m_Q} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{|q\phi_0|}{k_B T_Q} \right). \quad (9)$$

此处, 粒子为电子, 则 $Q = e$, $q = -e$. 由以上公式可得 ϕ_s 为

$$\phi_s = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(- \frac{J_{p0} \cos \chi}{en_0} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{k_B T_e}} \right). \quad (10)$$

对于月球夜晚, 靠近晨昏线附近处 (不考虑尾迹效应) 无光电子电流, 月表电势 $\phi_0 \leq 0$, 其充电电流平衡满足 $J_e + J_i = 0$. 对于离子, $Q = i$, $q = e$, 满足 $q\phi_0 \leq 0$, 根据式 (6) 可得等离子体离子电流密度; 对于电子, $Q = e$, $q = -e$, 满足 $q\phi_0 > 0$, 根据式 (9)

可得到等离子体电子电流密度. 平衡表面电势为

$$\phi_s = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(\sqrt{\frac{m_e T_i}{m_i T_e}} \right). \quad (11)$$

其中, m_i 和 T_i 分别为离子质量 (1.67×10^{-27} kg, 假设全部为质子) 和等离子体离子温度.

2006 年 Stubbs 等 [39] 提出, 在晨昏线附近靠近光照区一侧存在一个 $\phi_s = 0$ 的转换区域, 称为盲区, 该位置处 $J_p + J_e = 0$. 根据 Stubbs 等 [26] 的研究, 该位置的太阳天顶角为

$$\chi_{Dz} = \cos^{-1} \left[- \frac{en_0}{J_{p0}} \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \right]. \quad (12)$$

盲区两侧, 月面带电属性和德拜鞘高度存在显著差异. 盲区至晨昏线范围内月面带负电, 德拜鞘高度为几米至几十米; 反之, 盲区至光照区一侧带正电, 德拜鞘高度约为 1 m. 德拜鞘的高度指示了平衡表面电势对周围等离子体环境的影响范围. 带正电的月面受光电子和等离子体电子、离子共同作用屏蔽; 带负电的月面受等离子体电子、离子屏蔽. 由于电子的质量更小, 热运动速度更快, 因此在德拜长度的近似计算中认为离子是不动的, 仅构成密度均匀的正电背景, 主要通过电子的吸引或排斥达到静电平衡. 则德拜鞘高度可表示为 [26]

$$\begin{cases} \lambda_D = \left\{ \frac{\varepsilon_0 k_B T_p}{e^2 [n_{p0} + n_0 (T_p/T_e)]} \right\}^{1/2}, & \phi_s > 0; \\ \lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_0 k_B T_e}{n_0 e^2} \right)^{1/2}, & \phi_s < 0. \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F·m⁻¹ 为真空介电常数. 假设平衡表面电势从月面到德拜鞘边界为单调递减, 则根据式 (7)、(11) 和 (13), 可计算月表电场强度 $E_s = \phi_s/\lambda_D$.

由于陨坑地形的影响, 月球白天形成局域光照区和阴影区, 光照区与阴影区之间的过渡区存在盲区 and 类似晨昏线的明暗交界. 织女陨坑直径约 3.7 km, 深度约 0.7 km, 过陨坑中心的坑面弧长 L 约 4.04 km. 光照区和晨昏线附近的德拜长度通常在 10 m 以下, 满足 $\lambda_D \ll h < L$. 因此, 可将局部陨坑表面视为无限平面, 同时忽略地形遮蔽产生的阴影区尾迹效应, 根据 Stubbs 等的分析模型, 对于陨坑光照区, 忽略 J_i , 充电电流平衡满足 $J_p + J_e = 0$, 同月球白天光照区; 对于陨坑阴影区, 没有光电子电流, 电子由于热运动在阴影区大量汇集, 最终电子电流和离子电流达

到充电电流平衡, 满足 $J_e + J_i = 0$, 同月球夜晚近晨昏线处.

近月表的空间等离子体环境随太阳活动周期变化. 太阳风分为快慢两种, 慢太阳风是持续不断外流的日冕等离子体, 速度较小, 到达地月系统附近时速度一般在 $450 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右. 这里选取月面最典型的慢太阳风环境, 研究月球白天陨坑表面的充电过程和电场环境特征, 计算中涉及的参数取值见表 1^[26].

2 模拟结果与讨论

对于光滑月球表面, 赤道地区接受最强的太阳辐射和最大的等离子体通量. 但特殊的陨坑地形使坑内不同位置接受的太阳辐射和等离子体通量表现出极大的差异. 图 7 给出织女陨坑白天不同时刻的电势分布. 与太阳辐射度的分布相似, 坑内电势分布不均匀且随时间不断变化; 陨坑边缘平面区域的电势表现为均匀分布, 且随时间变化极小. 具体来看, 在接近黎明 (07:00 LT, 图 7a) 或黄昏 (17:00 LT, 图 7e) 时刻, 陨坑的遮蔽效应最为明显. 两个时刻平

衡表面电势均在 $-47.34 \sim 1.92 \text{ V}$ 范围内, 但仅有能够接收太阳辐照的坡面以带正电势为主, 并且在正对太阳的坡面边缘处电势达到最大值. 在 10:00 LT (图 7b) 和 15:00 LT (图 7d) 时刻, 陨坑的遮蔽效应相对减小, 正电势分布区域更广, 平衡表面电势范围分别为 $-47.34 \sim 2.27 \text{ V}$ (图 7b) 和 $-47.34 \sim 2.22 \text{ V}$ (图 7d). 正午时刻 (12:00 LT, 图 7c), 平衡表面电势范围为 $-10.9 \sim 2.30 \text{ V}$, 无陨坑自身遮蔽效应, 且坑内外的电势差也达到最小. 从图 7(c) 还可以看出纬度

表 1 模拟计算中的参数、符号及取值

Table 1 Major parameters with their symbols and values in the simulating calculation

参数	取值
等离子体电子温度 T_e/K	1.4×10^5
等离子体离子温度 T_i/K	1.0×10^5
光电子温度 T_p/K	1.7×10^4
鞘外等离子体浓度 n_0/cm^{-3}	10.0
太阳直射点光电子电流密度 $J_{p0}/(\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	-4.5

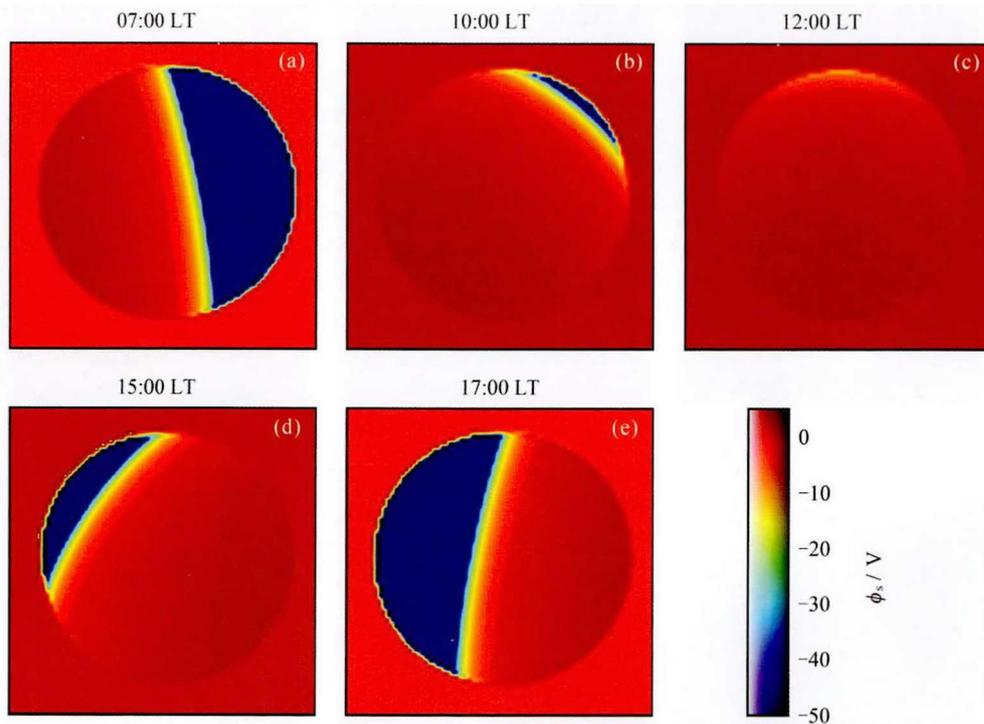


图 7 不同地方时条件下织女陨坑 (176.15°E , 45.34°S) 的电势分布

Fig. 7 Potential distribution of Zhinyu crater (176.15°E , 45.34°S) at different local time

效应对陨坑电势的影响,即使在正午时刻陨坑内仍然存在零电势区域.

总体而言,受地方时和陨坑地形的影响,陨坑内光照区和陨坑边缘水平区域的月面以带正电为主,且电势的变化范围较小.正午时刻平衡表面电势达最大值(2.30 V),而且越接近正午时刻陨坑内正电势分布区域越大,整体平均电势也越大.陨坑内阴影区主要受太阳风电子和离子影响,尽管阴影区面积随时间变化,但在确定的等离子环境条件下,阴影区平衡电势不随时间变化,且区域内电势分布均一,均为-47.34 V.但是,本模型忽略了地形因素产生的尾迹效应.在阴影区,除了等离子体电子和离子的热运动,还有坑面对太阳辐射、等离子体粒子、光电子、二次电子等的反射、散射以及磁场导致的粒子回旋运动等,使其部分进入阴影区,对阴影区平衡表面电势产生一定影响.因此,阴影区的平衡表面电势并非均一分布,与理论值存在偏差,有待进一步讨论.

此外,光照区与阴影区随时间交替变化,盲区位置也随之发生移动,在光电子电流和/或太阳风电子电流的作用下,平衡表面电势发生转变,电势差可达50 V左右.若邻近区域存在正负电势转变或较大

电势差,将导致电场发生畸变,即可能产生水平方向电场.由图7可知,对于陨坑表面,由于地形遮蔽效应影响,最大电势差发生在明暗边界附近.陨坑自身遮蔽效应产生的明暗边界分为两种:一是陨坑内部光照区-盲区-阴影区的过渡型明暗边界,二是陨坑边缘光照区-阴影区的突变型明暗边界.对于过渡型明暗边界,在盲区两侧存在月面正负电势转变,而在明暗边界处电势发生突变,即其两侧存在较大电势差.对于突变型明暗边界,月面正负电势转变发生在陨坑边缘,且两侧存在较大电势差.这种正负电势转变或电势突变区域可能存在一定的局域水平电场.

由式(13)可知,盲区两侧的德拜鞘高度存在显著差异,在光照区一侧由光电子和太阳风电子共同决定,而在阴影区一侧主要由太阳风电子决定.图8给出不同地方时条件下织女陨坑的德拜鞘高度分布.图8(a)~(e)中陨坑内盲区靠近光照区一侧的德拜鞘高度最大值均为1.64 m,而最小值差别较小,分别为0.87, 0.77, 0.76, 0.78和0.87 m,越接近正午时刻光照区德拜鞘高度最小值越小,且德拜鞘最小高度产生位置为陨坑内太阳直射坡面的坑壁边缘处;盲区靠近阴影区一侧的德拜鞘高度分布均一,为8.16 m.从

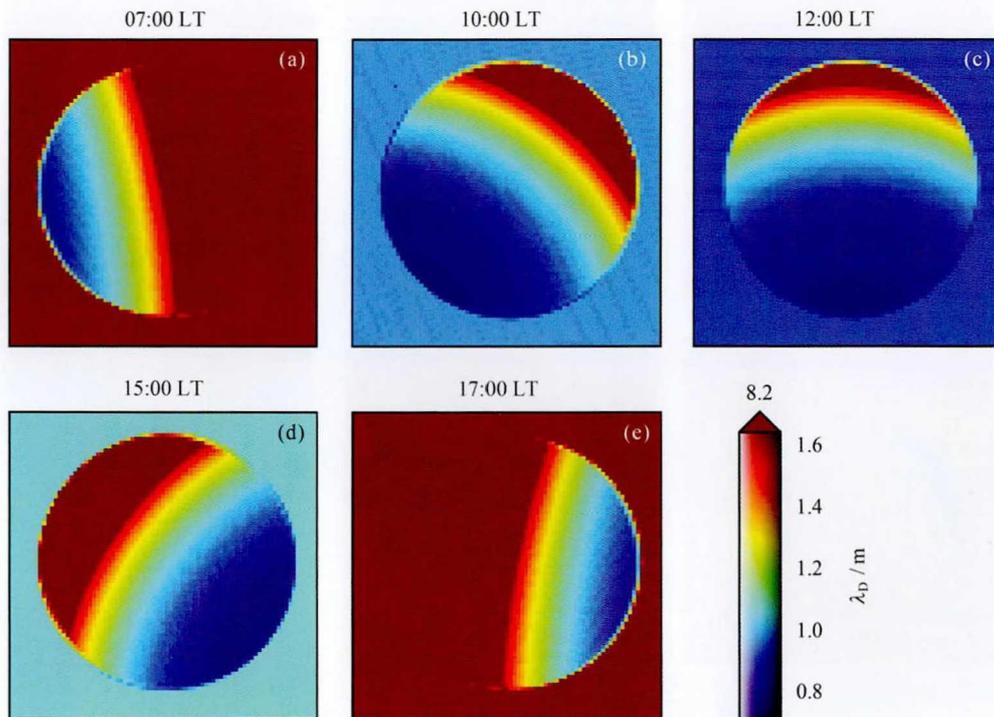


图8 不同地方时条件下织女陨坑(176.15°E, 45.34°S)的德拜鞘高度分布
Fig.8 Debye length of Zhinyu crater (176.15°E, 45.34°S) at different local time

变化趋势看,从光照区到盲区,德拜鞘高度逐渐增加;从盲区到阴影区,德拜鞘高度在盲区附近骤变,增加至 8.16 m,并在阴影区内保持不变。陨坑外的平面区域,德拜鞘高度分布均一旦随时间变化。图 8(b)~(d) 中陨坑边缘平面区域的德拜鞘高度分别为 0.97, 0.91 和 1.10 m;图 8(a) (e) 中均为 8.16 m。两者之间存在显著差异的原因是图 8(a) (e) 时刻陨坑整体处于月面晨昏线附近靠近盲区位置,陨坑边缘平面区域的光电子发射减少,德拜鞘高度发生变化。

假设平衡表面电势从月面到德拜鞘边界单调递减,则根据织女陨坑的电势分布和德拜鞘高度特征可进一步得到陨坑内外的电场强度分布(不考虑水平电场,仅为月面垂向电场强度分布)。如图 9 所示,(a)~(e) 的电场强度范围分别为

$$\begin{aligned} & -5.80 \sim 2.22, -5.80 \sim 2.95, -1.34 \sim 3.02, \\ & -5.80 \sim 2.83, -5.80 \sim 2.22 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}. \end{aligned}$$

电场强度分布与电势表现出很大的相似性,在光照区越接近正午时刻陨坑内的整体电场强度越大。图 9(c) 时刻陨坑光照面积占比达到 100%,其最小电场强度为 $-1.34 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$;其他时刻电场强度最小值均发生在

阴影区内,且电场强度为恒定值 $-5.80 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。坑缘水平区域的电场强度表现出随时间变化的特征,且任意时刻区域内电场强度均匀分布。

由于陨坑地形的遮蔽效应,在明暗边界附近存在正负电势转变和/或较大的电势差,可能存在一定的局域水平电场。对于陨坑边缘突变型的明暗边界,电势差约为 50 V,边界处的电场强度可达几十 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$,即存在相对强烈的水平电场。对于陨坑内过渡型的明暗边界,在明暗边界处电势发生突变,两侧存在较大电势差,即存在较大的水平电场;而在盲区两侧存在正负电势转变,可能存在水平电场。由于本模型忽略了地形尾迹效应的影响,对于阴影区电场环境特征分析具有一定局限性,因此暂不对明暗边界处水平电场强度进行计算。为进一步研究过渡型明暗边界盲区附近的水平电场,假设盲区是一条没有宽度的线,盲区附近太阳光平行入射。鉴于所探讨的慢太阳风条件下陨坑德拜鞘高度范围约为 $0 \sim 8.16 \text{ m}$,因此这里对盲区两侧距盲区 50 m 范围内的月面电场进行讨论。

如图 10 所示,不考虑电场方向, E_{vd} 和 E_{vt} 分别表示盲区光照侧和明暗边界侧的垂向电场强度。远离

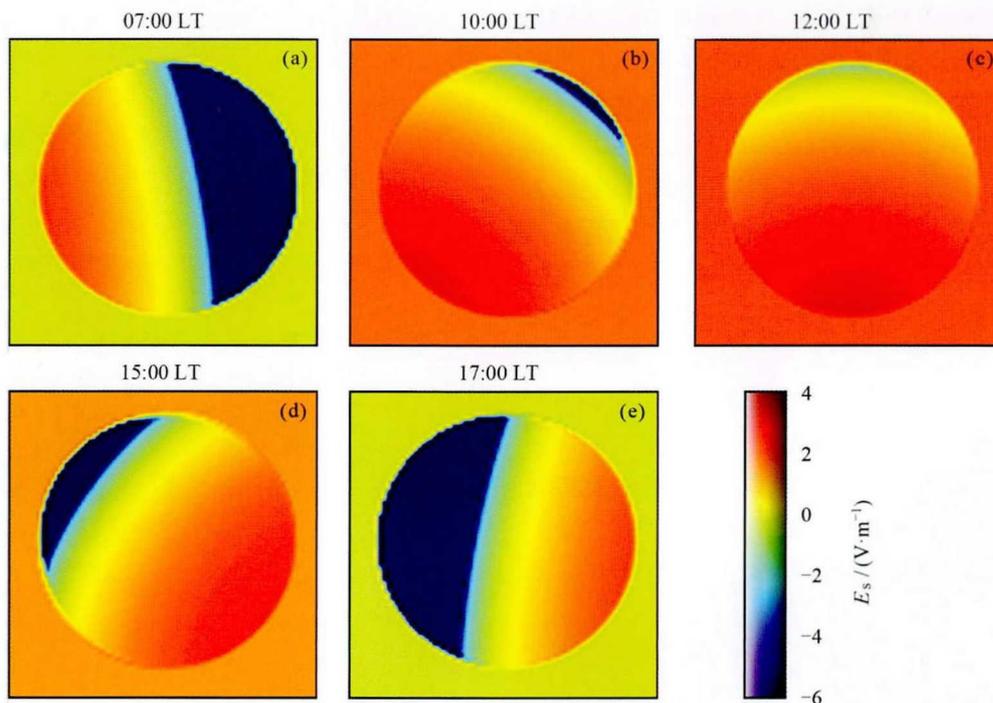


图 9 不同地方时条件下织女陨坑 (176.15°E , 45.34°S) 的表面电场强度分布

Fig. 9 Electric field distribution of Zhinyu crater (176.15°E , 45.34°S) at different local time

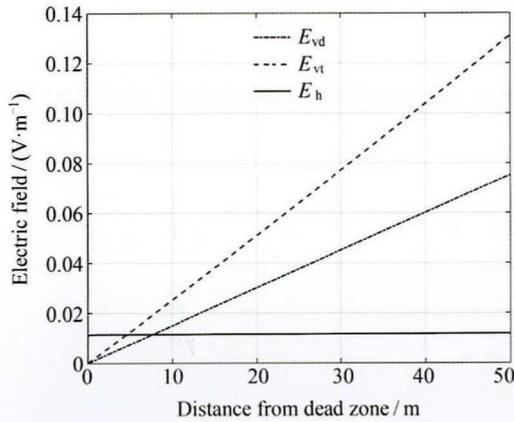


图 10 织女陨坑内盲区两侧垂向和水平电场强度分布. 不考虑电场方向, E_{vd} 为光照侧垂向电场强度, E_{vt} 为明暗边界侧垂向电场强度, E_h 为水平电场强度
 Fig. 10 Electric field distribution near the dead zone of Zhinyu crater. E_{vd} and E_{vt} correspond to the vertical electric field at the lit side and the terminator side, respectively. E_h indicates the horizontal electric field

盲区时, 盲区两侧的垂向电场强度呈增加趋势, 其最大值分别为 75 和 $131 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$. E_h 为距盲区等距的两点之间的水平电场强度 (假设两点之间的水平电场为匀强电场), 当远离盲区时, 水平电场强度从 $11\sim 12 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ 略有增加. 显然在距盲区 4.58 m 的范围内, 水平电场强度大于垂向电场强度. 但是在整个距盲区 10 m 的范围内, 水平和垂向电场强度都在 $25 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ 以下. 当距盲区的距离增加至 7.66 m 时, 垂向电场强度高于水平电场强度. 因此, 这里认为月球白天织女陨坑以垂向电场为主, 仅在明暗边界处存在相对强烈的水平电场, 特别是陨坑边缘突变型的明暗边界, 可能会有强烈的尘埃水平运动. 由图 7 可知, 随着地方时变化, 产生水平电场的位置发生变化, 尘埃的水平运动区域也将不断改变.

综上所述可知, 地方时是影响织女陨坑平衡表面电势、德拜鞘高度和电场强度分布特性的重要因素. 随着时间变化, 陨坑坡面的局部太阳高度角发生变化, 可能存在陨坑的自身遮蔽效应, 致使月面电场发生变化.

为方便讨论, 假设在月表任意纬度位置存在具有与织女陨坑特征相同 (即 $\Delta = 0.189$) 的千米级简单陨坑分布. 考虑到陨坑内同一时间不同位置的太阳方位均不同, 这里选择坑底中心作为研究对象, 探讨纬度对其电场环境的影响. 图 11 给出了纬度为 0° ,

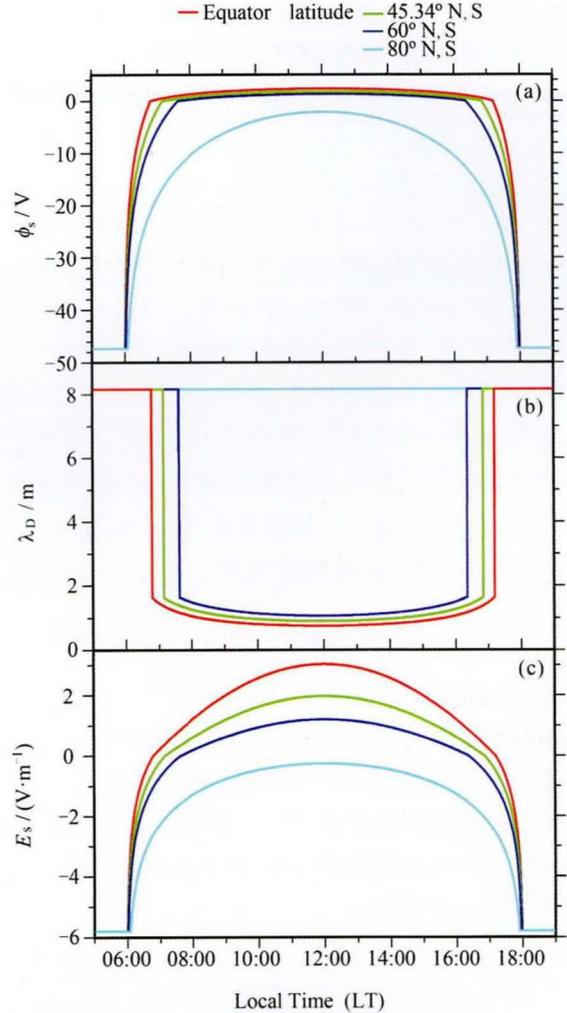


图 11 不同纬度的类织女陨坑坑底平衡表面电势 (a), 德拜鞘高度 (b), 电场强度 (c) 随地方时的变化 (45.34°S 为织女陨坑所在纬度)
 Fig. 11 Surface potential (a), Debye length (b) and electric field (c) at the bottom of Zhinyu-like crater from different latitudes varying with local time (Zhinyu crater is located at 45.34°S)

45.34°N/S , 60°N/S 和 80°N/S 的类织女陨坑坑底的平衡表面电势、德拜鞘高度、电场强度随地方时的变化. 可以看出, 无论是在低纬还是在中高纬地区, 平衡电势、德拜鞘高度和电场强度均以正午 $12:00 \text{ LT}$ 为界对称分布, 且越接近正午时刻 ϕ_s 和 E_s 越大, λ_D 越小.

对于赤道、 45.34°N/S 和 60°N/S 位置的类织女陨坑, $06:00 \text{ LT} - 12:00 \text{ LT}$ 时电势不断增加, 但是纬度越低, 越先到达零电势 (即盲区) 并转变为正电势, 其到达零电势的时刻分别为 $06:48 \text{ LT}$, $07:08 \text{ LT}$,

07:38 LT, 对应的电场强度由负变正. 06:00 LT 至零电势时刻, 电势和电场强度快速变化; 零电势时刻之后, 电势为正且电势和电场强度随时间变化不大. 此外, 德拜鞘高度在盲区也发生骤变, 由 8.16 m 突变至大约 1 m 及以下. 在正午时刻 (12:00 LT), 相对于 45.34°N/S 和 60°N/S 位置, 赤道位置的陨坑中心电势达到最大值 2.31 V, 德拜鞘高度达到最小值 0.76 m, 对应的电场强度为 $3.04 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. 然而对于 80°N/S 位置的类织女陨坑, 由于其始终处在月面盲区至明暗交界的范围内, 平衡表面电势和电场强度始终为负且在正午时刻达到最大值, 而德拜鞘的高度为 8.16 m 并在整个月球白天保持不变. 在 12:00 LT—18:00 LT 时间范围内的 ϕ_s , E_s 和 λ_D 与 06:00 LT—12:00 LT 时间范围内的呈对称分布, 这里不再阐述.

此外, 从陨坑分布的空间范围看, 纬度效应也是影响陨坑电场环境的重要因素. 图 12 进一步给出不同时刻类织女陨坑坑底 ϕ_s , E_s 和 λ_D 随纬度的变化. 对于月球白天, 以赤道为界, 陨坑坑底的 ϕ_s 和 E_s 特征呈对称分布; 随着纬度增加, ϕ_s 和 E_s 逐渐减小, 到一定纬度后坑底完全被遮蔽, 其值降为 0 并继续减小为负值, 在极点达到最小值. 07:00 LT, 10:00 LT 和 12:00 LT 的零电势点 (即盲区) 纬度分别发生在 36.93°N/S, 76.18°N/S 和 78.10°N/S, 即越接近黎明或傍晚时刻坑底的遮蔽效应越明显, ϕ_s 和 E_s 降为 0 的纬度越低. 相应地, 德拜鞘高度也发生骤变. 对于靠近晨昏线附近 (例如 06:30 LT, 始终处在盲区与晨昏线之间) 的 ϕ_s 和 E_s 始终为负并由赤道向高纬度地区不断减小, λ_D 则不随纬度变化, 电势最小值为 -47.34 V , 德拜鞘高度为 8.16 m, 电场强度最小值为 $-5.80 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

3 结论

月表的各种地形地貌, 特别是月表遍布的陨坑地形, 使得近月表太阳辐射和等离子体环境变得复杂, 形成复杂的月面电场环境. 月表电场的形成与分布特征对带电尘埃的静电迁移具有重要影响. 本文以嫦娥四号着陆区的织女陨坑为研究对象, 基于 LOLA 数据得到该陨坑的深径比, 建立了陨坑的三维模型和白天任意时刻的光照模型. 基于月表充电方程, 得到了不同时刻陨坑的平衡表面电势、德拜鞘高度、电

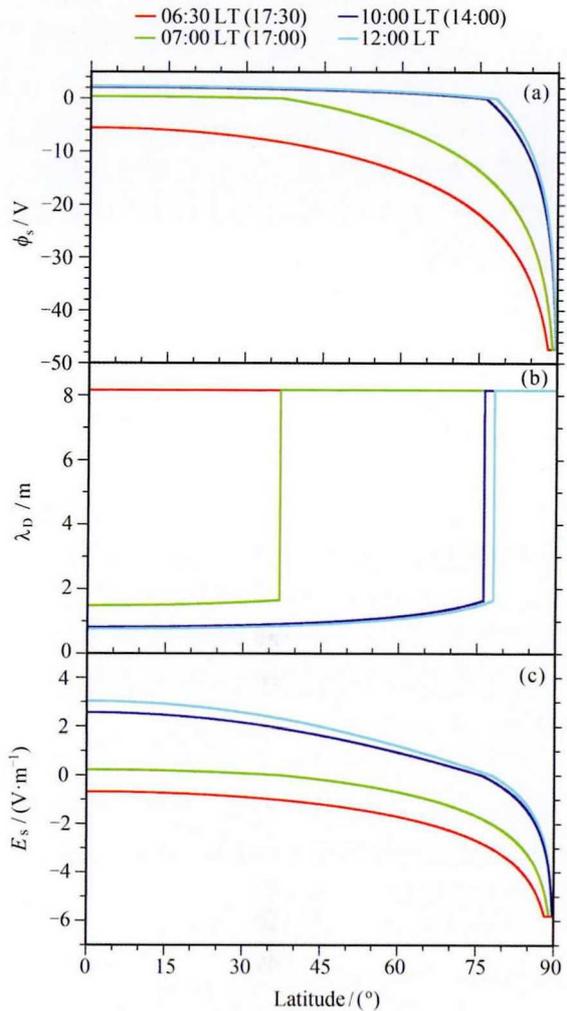


图 12 不同时刻类织女陨坑坑底平衡表面电势 (a), 德拜鞘高度 (b) 及电场强度 (c) 随纬度的变化

Fig. 12 Surface potential (a), Debye length (b) and electric field (c) at the bottom of Zhinyu-like crater variation with latitude

场强度分布特征. 研究了不同地方时和纬度条件下类织女陨坑坑底中心的平衡表面电势、德拜鞘高度和电场强度特征. 主要结论如下.

(1) 织女陨坑仅在 10:30 LT—13:30 LT 时间段内光照面积占比达 100%, 不存在自身遮蔽效应; 其他时间段, 受自身遮蔽效应影响, 光照区与阴影区随时间不断交替变化, 电场环境更加复杂.

(2) 织女陨坑的有效太阳辐照度随着时间不断变化, 其平衡表面电势、德拜鞘高度、电场强度也随之变化. 陨坑内 ϕ_s 和 E_s 表现出很好的相似性, 由光照区向盲区逐渐减小, 在盲区附近迅速减小; 陨坑外 ϕ_s 和 E_s 分布均一但随时间变化. 不考虑尾迹效应, 阴

影区内 ϕ_s 和 E_s 为恒定值 (-47.34 V , $-5.80\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$). λ_D 在陨坑内表现为与 ϕ_s 和 E_s 相反的趋势, 在陨坑外则分布均匀且随时间变化, 特别是 07:00LT 和 17:00LT 时刻, 整个陨坑处于月面盲区至晨昏线之间, 陨坑外德拜鞘高度为 8.16 m. 陨坑内外最大平衡表面电势、最大电场强度和最小德拜鞘高度均发生在坑壁边缘的太阳直射点. 由于 $\lambda_D \ll h < L$, 整个研究区 (含盲区两侧) 以垂向电场为主, 仅在明暗交界处存在较大的局域水平电场.

(3) 为研究地方时和纬度对类织女陨坑电场环境的影响, 以坑底为研究对象, 分析连续变化的地方时和纬度对 ϕ_s , E_s 和 λ_D 的影响. 研究发现, 以正午时刻和赤道为界, ϕ_s , E_s 和 λ_D 呈对称分布, 且越接近正午时刻/赤道, ϕ_s 和 E_s 越大, λ_D 越小. 相比高纬度地区, 中低纬度的变化特征更为显著, 即变化速率更快、幅度也更大. 盲区为零电势区, 德拜鞘高度在此发生骤变; 盲区至阴影区, ϕ_s 和 E_s 迅速降低, λ_D 不变.

坑底中心只是陨坑中一个相对特殊的位置, 其他任意坡面位置的平衡表面电势、电场强度随着地方时和纬度的变化也表现出类似的变化特征, 使得陨坑内形成非常复杂的电场环境.

参考文献

- [1] CRISWELL D R. Horizon-glow and the Motion of Lunar Dust, in Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space [M]. Dordrecht: Springer, 1973: 545-556
- [2] RENNILSON J J, CRISWELL D R. Surveyor observations of lunar horizon-glow [J]. *Moon*, 1974, **10**(2): 121-142
- [3] MCCOY J E, CRISWELL D R. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust [R]//Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Universities Space Research Association, 1974: 2991-3005
- [4] ZOOK H A, MCCOY J E. Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(11): 2117-2120
- [5] SEVERNY A B, TEREZ E I, ZVEREVA A M. The measurements of sky brightness on lunokhod-2 [J]. *Moon*, 1975, **14**(1): 123-128
- [6] ZOOK H A, POTTER A E, COOPER B L. The lunar dust exosphere and clementine lunar horizon glow [R]//Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Universities Space Research Association, 1995: 26
- [7] CALLE C I. Measuring electrostatic phenomena on Mars and the Moon [C]//Proceedings of the Institute of Electrostatics Japan. Florida: NASA, 2001: 169-279
- [8] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook-A User's Guide to the Moon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 27-60
- [9] COLWELL J E, GULBIS A A S, HORÁNYI M, et al. Dust transport in photoelectron layers and the formation of dust ponds on Eros [J]. *Icarus*, 2005, **175**(1): 159-169
- [10] KONG Linggao, WANG Shijin, WANG Xinyue, et al. Lunar surface plasma dusty environment and exploration [R]//Annual Symposium of Committee of Deep Space Exploration Technology Chinese Society of Astronautics. Hangzhou: Society of Astronautics, 2012: 1021-1026 (孔令高, 王世金, 王馨悦, 等. 月表尘埃等离子体环境及其探测 [R]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会学术年会. 杭州: 中国宇航学会, 2012: 1021-1026)
- [11] WAGNER S A. The Apollo Experience Lessons Learned for Constellation Lunar Dust Management [R]. Washington: NASA Technical Report, 2006
- [12] GAIER J R. The Effects of Lunar Dust on EVA Systems during the Apollo Missions [R]. Cleveland: NASA Technical Report, 2007
- [13] GAIER J R, JAWORSKE D A. Lunar dust on heat rejection system surfaces: problems and prospects [J]. *AIP Conf. Proc.*, 2007, **880**: 27-34
- [14] BUHLER C R, CALLE C I, CLEMENTS J S, et al. Test method for in situ electrostatic characterization of lunar dust [C]//2007 IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2007: 1-19
- [15] NIE Jinqiao. Study on the Surface of the Moon: Lunar Sheath under Complex Topography [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (聂金桥. 月表复杂地貌形态下的月球表面鞘层研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016)
- [16] HORÁNYI M, WALCH B, ROBERTSON S, et al. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust [J]. *J. Geophys. Res. Planets*, 1998, **103**(E4): 8575-8580
- [17] COLWELL J E, HORÁNYI M, ROBERTSON S, et al. Behavior of charged dust in plasma and photoelectron sheaths [J]. *Dust Planet. Syst.*, 2007, **643**: 171-175
- [18] SICKAFOOSE A A, COLWELL J E, HORÁNYI M, et al. Experimental levitation of dust grains in a plasma sheath [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2002, **107**(A11): SMP-37
- [19] WANG X, HORÁNYI M, ROBERTSON S. Investigation of dust transport on the lunar surface in a laboratory plasma with an electron beam [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2010, **115**(A11): 1-6
- [20] WANG X, HORÁNYI M, ROBERTSON S. Experiments on dust transport in plasma to investigate the origin of the lunar horizon glow [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2009, **114**(A5). DOI: 10.1029/2008JA013983
- [21] WANG X, HORÁNYI M, ROBERTSON S. Dust transport near electron beam impact and shadow boundaries [J]. *Planet. Space Sci.*, 2011, **59**(14): 1791-1794
- [22] WANG X, PILEWSKIE J, HSU H W, et al. Plasma

- potential in the sheaths of electron-emitting surfaces in space [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**(2): 525-531
- [23] WANG J, HE X, CAO Y. Modeling electrostatic levitation of dust particles on lunar surface [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2008, **36**(5): 2459-2466
- [24] BORISOV N, MALL U. Charging and motion of dust grains near the terminator of the Moon [J]. *Planet. Space Sci.*, 2006, **54**(6): 572-580
- [25] FARRELL W M, STUBBS T J, VONDRAK R R, *et al.* Complex electric fields near the lunar terminator: the near-surface wake and accelerated dust [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(14). DOI: 10.1029/2007GL029312
- [26] STUBBS T J, FARRELL W M, HALEKAS J S, *et al.* Dependence of lunar surface charging on solar wind plasma conditions and solar irradiation [J]. *Planet. Space Sci.*, 2014, **90**: 10-27
- [27] POPPE A R, PIQUETTE M, LIKHANSKII A, *et al.* The effect of surface topography on the lunar photoelectron sheath and electrostatic dust transport [J]. *Icarus*, 2012, **221**(1): 135-146
- [28] PIQUETTE M, HORÁNYI M. The effect of asymmetric surface topography on dust dynamics on airless bodies [J]. *Icarus*, 2017, **291**: 65-74
- [29] HUGHES A M, WILNER D J, CALVET N, *et al.* An inner hole in the disk around *tw* hydrae resolved in 7 mm dust emission [J]. *Astrophys. J.*, 2007, **664**(1): 536-542
- [30] LIKHANSKII A, POPPE A R, PIQUETTE M, *et al.* Plasma sheath at Moon craters: from sunrise to sunset [R]. Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Universities Space Research Association, 2011: 2285
- [31] POPPE A R, HORÁNYI M. Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2010, **115**(A8). DOI: 10.1029/2010JA015286
- [32] POPPE A R, HALEKAS J S, HORÁNYI M. Negative potentials above the day-side lunar surface in the terrestrial plasma sheet: evidence of non-monotonic potentials [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, **38**(2): L02103
- [33] PIKE R J. Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon [C]//Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications. New York: Pergamon Press, 1977: 489-509
- [34] STOPAR J D, HAWKE B R, ROBINSON M S, *et al.* Distribution, occurrence, and degradation of impact melt associated with small lunar craters [R]. Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Universities Space Research Association, 2012: 115-118
- [35] DAVIDSSON B J R, RICKMAN H, BANDFIELD J L, *et al.* Interpretation of thermal emission. I. The effect of roughness for spatially resolved atmosphereless bodies [J]. *Icarus*, 2015, **252**: 1-21
- [36] AHARONSON O, SCHORGHOFER N. Subsurface ice on Mars with rough topography [J]. *J. Geophys. Res. Planets*, 2006, **111**(E11): 23723
- [37] HALEKAS J S, DELORY G T, STUBBS T J, *et al.* The dynamic plasma and electric field environment near the lunar terminator and polar regions [R]. NLSI Lunar Science Conference. Moffett Field: Lunar Science Institute, 2008: 1415
- [38] HALEKAS J S, DELORY G T, LIN R P, *et al.* Lunar surface charging during solar energetic particle events: measurement and prediction [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2009, **114**(A05110). DOI: 10.1029/2009JA014113
- [39] STUBBS T J, VONDRAK R R, FARRELL W M. A dynamic fountain model for lunar dust [J]. *Adv. Space Res.*, 2006, **37**(1): 59-66