

木卫二上由潮汐引起的冰火山

李 力 陈出新

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026. E-mail: chuxin@ustc.edu.cn)

摘要 通过对木卫二潮汐耗散的估计, 并结合观测资料, 得出活动的木卫二上的地质构造运动可能形成火山. 考虑到木星引起的潮汐扰动较强, 假设由潮汐直接引起火山活动, 通过理想流体的 Bernoulli 方程计算了火山的喷射速度和高度, 给出了尺度的估计, 得到了活动火山在木卫二表面的大致分布情况.

关键词 木卫二 引潮力 冰火山

木卫二(Europa)半径为 1560 km, 质量为 4.8×10^{22} kg, 公转轨道半长轴为 6.7×10^5 km^[1], 自转周期和绕木星公转周期相等, 为 3.55 d^[2], 是一颗同步自转的卫星. 由于距木星较近, 木卫二及另一颗大卫星木卫一都受到木星强大的潮汐作用.

尽管卫星的轨道演化最终将使木卫二形成同步自转的圆轨道这一潮汐耗散最小的情况^[3], 但 Peale 等人认为, 由于 3 颗较近的伽利略卫星(木卫一、二、三)的引力摄动, 木卫二的轨道有较小的受迫偏心率, 即使是在同步自转的情况下, 也具有不可忽略的潮汐耗散^[4]. Peale 等人还给出了潮汐热的初步结果^[5,6], 但 Squyre 等人给出了更合理的结果^[7], 本文参考这个数据.

木卫二具有分层结构. 最外层为固态的壳, 主要成分为冰. 其下是液态的水层. 根据 Anderson 等人的观测^[1], 冰-水层的总厚度约为 150 km. 再往内为固态的核. 潮汐热及木卫二内核重元素衰变产生的放射热共同构成木卫二的内部热源, 可以维持较薄的冰层, 同时为木卫二的地质构造运动提供能量, 将可能形成类似地球上的火山结构. 内部的液态水将在木星强大的引潮力作用下通过火山管道喷射, 火山锥主要由冰构成, 形成冰火山.

火山的活动涉及多种复杂因素, 但在木卫二上则可能存在直接由潮汐引起的火山活动, 本文只限于讨论这类火山活动. 假设火山管道的直径很小, 流体的流动则是定常的. 同时忽略流体的黏滞性, 这在流体通过较短管道(火山管道的长度为表面冰层的厚度)的情况下是可接受的. 这样, 可用理想不可压缩

流体的 Bernoulli 方程求得火山喷口的流速及喷射高度. 此外, 木星的引潮作用在木卫二的不同位置的大小是不同的, 因此, 由潮汐引起的火山活动的强度将随 System III 经度和纬度而变化(木星系统中, System III 是以木卫二中心为原点, y 轴指向木星中心, x 轴沿木卫二绕木星公转方向而建立的坐标系).

1 活动的木卫二及可能存在的冰火山

对木卫二表面的观测, 并未发现有大量的陨石坑结构^[8], 因此木卫二确是活动的. 木卫二的表面广泛存在着暗条纹结构, 这些暗条纹可能是由较低层的物质(温度较高的冰或液态水)向上涌, 填充表面的断裂带所致^[9,10], 类似于地球上的海底扩张. 木卫二的液态海洋可能存在大尺度的全球范围的对流^[11], 类似于地球上的地幔对流. 因此, 木卫二可能具有类似地球的板块构造. 板块(冰层)的俯冲带以及幔对流的上升区都有可能形成火山结构. 美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的在 System III 15° S, 215° W 处的一张像片¹⁾(像片 1)显示了可能存在火山. 像片 1 中明显的暗条纹宽度约为 20 km^[9], 则该火山口的直径约为 2 km, 火山管道的直径估计为~10 m 量级.

为将其与陨石坑相区别, 另有一张 NASA 提供的木卫二上的陨石坑像片²⁾(像片 2). 陨石对较脆的冰的撞击将在陨石坑的周围形成大面积的裂纹. 像片 1 中并不存在明显的裂纹. 相比较可以认为像片 1 中有一个火山. 由后文的讨论得知, 木卫二的火山喷发时, 液态水的喷射高度在几百米的量级. 由于分辨率的

1) <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00518>

2) <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01211>

限制, 从该像片上不能看出该火山是否在喷发.

2 冰火山活动强度及分布的估计

如在表面冰层存在一个火山, 则覆盖在冰层下的液态水可能在木星的引潮力作用下通过火山管道喷出. 讨论如下:

冰层的平均厚度可由热传导平衡得出. 对于薄的冰层, 可认为温度梯度(∇T)的值为常量, 则有

$$\frac{k\Delta T}{L}=q \tag{1}$$

$k=3.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 为冰的热传导系数, L 即为冰层厚度, $q=5.2\times10^{-2}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1[7]}$ 为表面平均热流(包括潮汐热及放射热). $\Delta T=T_b-T_s$, $T_b=273\text{ K}$, 为冰层下表面温度. T_s 为冰层上表面温度. 对 T_s 有不同的看法^[7,12], 这里取 $T_s=140\text{ K}^{[7]}$. 这样, 冰层的平均厚度约为 8700 m , 与冰-水层的总厚度(150 km)相比确实很薄.

在 System III 坐标系中, 对木卫二表面一点(纬度为 θ , 经度为 λ), 只考虑木星的潮汐作用, 则在一阶近似下, 潮汐引起的势扰动为

$$\frac{3GM_JR_e^2}{2R^3}\cos^2\lambda\cos^2\theta=\frac{3GM_J}{2R^3}y^2, \tag{2}$$

其中, $M_J=1.9\times10^{27}\text{ kg}$, 为木星质量, G 为万有引力常量, $R_e=1.6\times10^3\text{ km}$, 为木卫二半径, $R=6.7\times10^5\text{ km}$, 为公转轨道的半长轴. 这里还忽略了冰层在潮汐势扰动下的形变, 将木卫二视作球体, 如图 1. 考虑理想不可压缩流体的情况. 取流线 1 至 2. 对 1, 引

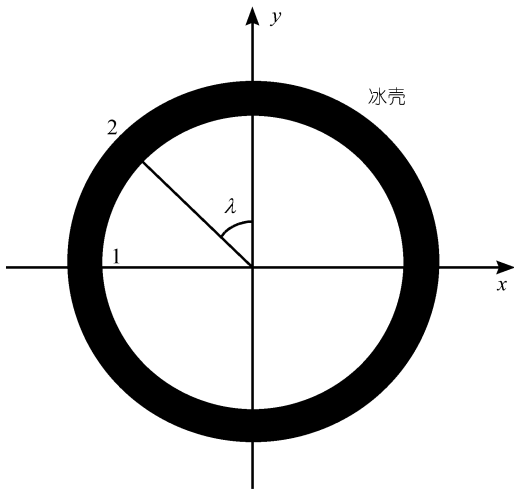


图 1 System III 坐标系

1 示 $x\div -R_e$, $y=0$. 2 示冰层中一个细的管道(即火山管道)的上端

潮力的作用使得整个 $y>0$ 的半球内的液态水都有向火山管道流动的趋势, 因此流速近乎为 0. 假设流体运动是定常的($\partial\bar{V}/\partial t=0$)、无旋的, 由 Bernoulli 方程, 有

$$\frac{p_1}{\rho_w}+\phi_1+\varphi_1=C, \tag{3}$$

ρ_w 为液态水的密度, ϕ_1 为重力势, φ_1 为潮汐势. p_1 为 1 点流体的压力, 由此处冰层的平衡, 可得

$$p_1=p_0+\rho_i gL, \tag{4}$$

$p_0\sim10^{-5}\text{ Pa}$, 为木卫二的大气压, 可忽略. $\rho_i=900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 为冰的密度. $L=8700\text{ m}$, 为冰层厚度. $g\div1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 为木卫二表面的重力加速度. 因此,

$$\frac{\rho_i}{\rho_w}gL+\phi_1+\varphi_1=C. \tag{5}$$

对 2 点, 有

$$\frac{\rho_2}{\rho_w}+\frac{1}{2}V^2+\phi_2+\varphi_2=C, \tag{6}$$

p_2 为 2 点流体的压力, 即为大气压, 可忽略. V 即为流速, 故

$$\frac{1}{2}V^2+\phi_2+\varphi_2=C. \tag{7}$$

联立(5)和(6)式, 可得

$$V^2=\frac{2\rho_i}{\rho_w}gL+2(\phi_1-\phi_2)+2(\varphi_1-\varphi_2). \tag{8}$$

重力势之差 $\phi_1-\phi_2=-gL$, 潮汐力引起的扰动势之差($\varphi_1-\varphi_2$)已由(2)式给出. 因此,

$$V=\sqrt{\frac{3GM_JR_e^2}{R^3}\cos^2\lambda\cos^2\theta-\frac{gL}{5}}. \tag{9}$$

假设在木卫二赤道面正对木星处(对应 $\lambda=0$, $\theta=0$)有一火山, 此时 $V\div30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 喷射高度 $h=\frac{V^2}{2g}\div300\text{ m}$, 对应最强的冰火山.

火山能够喷发的必要条件是 $V\geq0$, 即

$$\frac{3GM_JR_e^2}{R^3}\cos^2\lambda\cos^2\theta\geq\frac{gL}{5}, \tag{10}$$

这导致木卫二表面活动火山的分布有一个范围. 代入数据, 即应满足

$$\cos^2\lambda\cos^2\theta\geq0.67. \tag{11}$$

分布图是围绕 $\pm y$ 轴的两个圆面, 圆面对木卫二中心的张角约为 70° .

因此, 像片 1 中的火山位于 15° S , 215° W , 则

$\cos^2 \lambda \cos^2 \theta \doteq 0.64$, 接近活动区域的边界. 上面的计算假设了冰层的厚度是均匀的, 考虑到实际上冰层的厚度不可能完全均匀, 若此处冰层较薄, 则也有可能喷发, 但流速已相当小. 这种情况下充满火山管道中的液态水可能已凝结成冰, 故该火山处于活动状态的可能性很小.

与木卫一相比较, 木卫二的火山活动是很弱的. Peale 等人的分析认为木卫一“可能发生着广泛的和不时发作的表面火山作用”^[4], 实际的观测也证实了这一点. 火山喷射高度甚至可达上百千米(NASA 提供了相关的观测数据及像片), 这可能是由于对木卫一而言, 潮汐热及木星的引潮力都远大于木卫二的缘故.

3 结论及讨论

通过本文的讨论, 我们认为活动的木卫二在自身的地质构造作用下可能形成火山结构, 因此现在的木卫二上可能存在处于活动状态的火山, 这是火山活动的地质条件. 由于受到木星的引潮力较大, 则可能存在直接由潮汐引起的火山活动, 这是火山活动的天文条件, 与地球上的情况不同. 本文讨论的由潮汐直接引起的活动火山, 喷射速度在 $\sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级, 喷射高度在 $\sim 100 \text{ m}$ 量级. 并且由于木卫二各处的潮汐扰动不同, 活动火山在木卫二表面的大致分布将满足 System III 经度和纬度应有 $\cos^2 \lambda \cos^2 \theta \geq 0.67$.

然而本文的计算并未考虑流体的黏滞性, 因此实际火山活动的强度可能比计算值略小, 但不存在数量级的差异. 并且, 冰层厚度的不均匀性也将会使实际火山活动的强度、活动火山的分布与计算值存在一定的差异. 此外, 火山活动实际也并非完全由潮汐引起, 比如地球上的情况. 熔融物质(对于木卫二即为液态水)和能量的储存及释放涉及复杂的地质条件,

即使在地球上的情况亦不是完全清楚, 但这已超出了本文的讨论范围.

本文仍可认为大致得出了木卫二及类似木卫二结构的星体火山活动的基本趋势. 进一步的更精确的研究还要有待于对木星系统更深入的观测.

致谢 本工作为国家自然科学基金资助项目(批准号: 40174026 和 40074041).

参 考 文 献

1 Anderson J D, Lau E L, Sjogren W L, et al. Europa's differentiated internal structure: Inferences from two Galileo encounters. *Science*, 1997, 276: 1236~1239

2 Geissler P E, Greenberg R, Hoppa G, et al. Evidence for non-synchronous rotation of Europa. *Nature*, 1998, 391: 368~370

3 陈道汉, 刘麟仲, 著. 现代行星物理学. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 204~211

4 Peale S J, Cassen P, Reynolds R T. Melting of Io by tidal dissipation. *Science*, 1979, 203: 892~894

5 Cassen P, Reynolds R T, Peale S J. Tidal dissipation on Europa: A correction. *Geophys Res Lett*, 1980, 7: 987~989

6 Peale S J, Cassen P. Contribution of tidal dissipation to lunar thermal history. *Icarus*, 1978, 36: 245~269

7 Squyres S W, Reynolds R T, Cossen P M, et al. Liquid water and active resurfacing on Europa. *Nature*, 1983, 301: 225~226

8 Turtle E P, Pierazzo E. Thickness of a Europan ice shell from impact crater simulation. *Science*, 2001, 294: 1326~1328

9 Sullivan R, Greeley R, Homan R, et al. Episodic plate separation and fracture infill on the surface of Europa. *Science*, 1998, 391: 371~373

10 Pappalardo R T, Head J W, Greeley R, et al. Geological evidence for solid-state convection in Europa's ice shell. *Nature*, 1998, 391: 365~368

11 Finnerty A A, Ransford G A, Pieri D C, et al. Is Europa surface cracking due to thermal evolution? *Nature*, 1981, 289: 24~27

12 Ross M N, Schubert G. Tidal heating in an internal ocean model of Europa. *Nature*, 1987, 325: 133~134

(2002-10-08 收稿, 2003-02-10 收修改稿)