

# 光在柱状生物组织中传输的特性

孙美秀<sup>1,3</sup> 张立云<sup>2</sup> 康美玲<sup>1</sup> 姜琛昱<sup>1</sup> 张春平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国医学科学院生物医学工程研究所, 天津 300192  
<sup>2</sup>军事交通学院, 天津 300161  
<sup>3</sup>南开大学物理科学学院光子学中心, 天津 300094

**摘要** 利用蒙特卡罗方法对同一组光学参数分别模拟了半无限大平面、单层柱状和双层柱状生物组织中的吸收光子数密度, 结果显示不同边界情况下光在生物组织中的传输有明显的差别。讨论了边界对生物组织中光传播的影响, 模拟了柱状生物组织中的能流率随空间坐标的变化, 并与实验结果进行了比较, 验证了模拟计算的正确性。

**关键词** 生物光学; 柱状生物组织中的光传输; 蒙特卡罗模拟; 光学特性参数

**中图分类号** R318.51      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/CJL201239.1004001

## Property of Light Propagation in Columnar Biological Tissue

Sun Meixiu<sup>1,3</sup> Zhang Liyun<sup>2</sup> Kang Meiling<sup>1</sup> Jiang Chenyu<sup>1</sup> Zhang Chunping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Biomedical Engineering, Chinese Academy of Medical Science, Tianjin 300192, China  
<sup>2</sup>Basic Department of Military Transportation College, Tianjin 300161, China  
<sup>3</sup>Photonics Center, College of Physics, Nankai University, Tianjin 300094, China

**Abstract** The number density of photons absorbed in semi-infinite plane, simple columnar and double columnar biological tissues is numerically studied with Monte-Carlo method, respectively. The same optical parameters are used in the simulation for the three situations. The results show that the boundary employed in the simulation has important effect on the light propagation in tissue. The effect of boundary on light propagation in tissue is investigated. Energy flow rate in biological tissue as a function of radial distance is simulated and the results agree well with experimental results.

**Key words** biotechnology; light propagation in columnar biological tissue; Monte Carlo simulation; optical properties parameters

**OCIS codes** 170.3660; 170.4580; 290.7050

## 1 引 言

激光医疗诊断的一个重要问题就是提前预知光在生物组织中的传输和分布<sup>[1]</sup>。光在组织中的传输和分布主要由生物组织的光学特性和组织宏观结构决定。在研究光在生物组织中的传输过程中, 对于边界的处理一般都采用平面边界, Preece 等<sup>[2]</sup>用蒙特卡罗方法模拟了人眼的反射波谱, 其模拟结果与实验结果符合得很好。钱盛友等<sup>[3]</sup>对生物组织中有有限束宽光吸收进行了蒙特卡罗模拟, 其结果的合理性亦得到证实。林煜<sup>[4]</sup>对双层生物组织模拟体中的

光分布进行了蒙特卡罗模拟, 并用实验验证了模拟的正确性<sup>[5]</sup>。但是对于生物组织的一些实际结构, 诸如血管、动脉之类, 平面边界显然不适用, 因此需要研究圆柱边界条件下生物组织中光的传输与分布, 这对于管状类组织的光诊断和治疗有着重大的指导意义。Sassaroli 等<sup>[6]</sup>研究了超短脉冲激光在柱状生物组织中传输, 比较了漫射近似方法和蒙特卡罗方法, 其中入射光是沿圆柱侧面入射。Kienle 等<sup>[7]</sup>研究了各向异性生物组织中的光传输, 其中散射体的形状为圆柱和椭球, 整个介质采用的是半无

**收稿日期:** 2012-04-20; **收到修改稿日期:** 2012-07-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(81101170)资助课题。

**作者简介:** 孙美秀(1979—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事组织光学及疾病无创检测等方面的研究。

E-mail: sunmeixiu@gmail.com

限大的平面边界。

本文利用本实验室编制的一套圆柱边界条件下光束沿圆柱轴方向入射到生物组织中传播的蒙特卡罗模拟程序<sup>[8,9]</sup>,对同一组光学参数分别模拟了半无限大平面、单层柱状和双层柱状生物组织中的吸收光子数密度。结果显示光在不同生物组织边界的传输情况有明显的差别;模拟了在圆柱边界条件下,生物组织中的能流率随空间的变化,并与实验结果进行了比较,验证了模拟计算的正确性。

## 2 圆柱边界条件下光传输的计算

圆柱边界条件下光束在生物组织中的传播与平面边界条件的主要区别在于边界的形状不是简单的平面。在圆柱边界条件下,光子在其他地方的传播与在平面边界条件下相同,因此光子在边界附近传播的情况是模拟圆柱边界条件下光束在生物组织中传播的重点。

### 2.1 单层圆柱边界条件下光传输的计算

圆柱边界的生物组织模型及坐标选取如图1所示,光子在其他地方的传播与在平面边界条件下相同,因此在这里介绍光子在边界附近传播的情况。处理圆柱边界条件下介质中的光传播所用坐标系为笛卡尔坐标系,如图1所示,管状的生物介质的半径为 $R$ ,大于 $R$ 的空间为周围介质。入射光沿 $z$ 轴传播。设光子从点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 沿 $\overline{AB}$ 方向发出, $B$ 为边界上一点, $\overline{AB}$ 方向单位矢量为 $\mathbf{S}_{AB}\{i_a, j_a, k_a\}$ (以下用 $\{x, y, z\}$ 代表3个分量为 $x, y, z$ 的矢量),柱半径为 $R$ 。

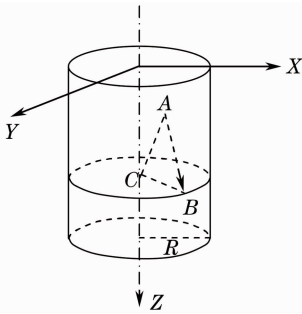


图1 坐标系示意图

Fig.1 Coordinate system diagram

如果光子达到边界上 $B$ 点 $(x_b, y_b, z_b)$ ,则 $B$ 点坐标满足如下关系:

$$\begin{cases} x_b = x_a + i_a k \\ y_b = y_a + j_a k \\ z_b = z_a + k_a k \end{cases} \quad (1)$$

$k =$

$$-\frac{(x_a i_a + y_a j_a) + \sqrt{R^2(i_a^2 + j_a^2) - (i_a y_a - j_a x_a)^2}}{i_a^2 + j_a^2} \quad (2)$$

设光子在边界被折射后的坐标为 $D(x_d, y_d, z_d)$ ,被反射后的坐标为 $D'(x_{d'}, y_{d'}, z_{d'})$ ,取 $k' = \Delta L - k$ 作为下一次发射的步长,其中, $\Delta L$ 为本次光子行程,那么光子在边界处被折射或反射后的坐标满足:

$$\begin{cases} x_d(x_{d'}) = x_b + i_d(i_{d'})k' \\ y_d(y_{d'}) = y_b + j_d(j_{d'})k' \\ z_d(z_{d'}) = z_b + k_d(k_{d'})k' \end{cases} \quad (3)$$

式中 $k'$ 为正常数。

对于折射情况下光子传输的方向矢量为

$$\begin{cases} k_d = \frac{n_1}{n_2} k_a \\ i_d = -c C_\delta y_{b'} \pm \frac{\sqrt{(c C_\delta y_{b'})^2 - (1 - a^2) C_\delta^2 + x_{b'}^2}}{\sqrt{(c C_\delta y_{b'})^2 - (1 - a^2) C_\delta^2 + x_{b'}^2}} \\ j_d = (C_\delta + y_{b'} i_d) / x_{b'} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_\delta = \frac{n_1}{n_2} (i_m i_a + j_m j_a + k_m k_a), \quad (5)$$

式中 $i_m, j_m, k_m$ 为与入、折射光线的分界面平行方向上单位矢量在各个坐标轴上的投影分量, $n_1$ 为入射光线所在的介质的折射率, $n_2$ 为折射光线所在的介质的折射率。

对于反射情况下光子传输的方向矢量为

$$\begin{cases} k_{d'} = k_a \\ i_{d'} = c C'_\delta y_{b'} \pm \frac{\sqrt{(c C'_\delta y_{b'})^2 - (1 - a^2) C_\delta'^2 + x_{b'}^2}}{\sqrt{(c C'_\delta y_{b'})^2 - (1 - a^2) C_\delta'^2 + x_{b'}^2}} \\ j'_{d'} = (-C'_\delta + y_{b'} i_{d'}) / x_{b'} \end{cases} \quad (6)$$

$$C'_\delta = -(i_m i_a + j_m j_a + k_m k_a). \quad (7)$$

上述情况下要求 $x_{b'} \neq 0$ ,对于 $x_{b'} = 0$ 的情况,容易证明:若 $x_{bp} = 0$ ,则

$$\begin{cases} i_d = \frac{n_1}{n_2} i_a \\ k_d = \frac{n_1}{n_2} k_a \\ j_d = \text{sgn}(j_a) \sqrt{1 - i_d^2 - k_d^2} \end{cases} \quad (8)$$

### 2.2 双层圆柱边界条件下光传输的计算

双层圆柱边界的生物组织模型及坐标选取如图2所示,管状的生物介质的内半径为 $R_1$ ,小于 $R_1$ 的空间为第一层介质,管壁厚为 $R_2 - R_1$ ,管壁内的空间为第二层介质,大于 $R_2$ 的空间为周围介质。平圆光束沿 $z$ 轴入射,光子在边界以外的其他地方的传输情况与平面边界条件相同,当光子到达边界处,

光子的传输规则同单层圆柱边界条件下的光子的传输规则相同。在这里分析光子在传输过程中能否与界面相交。光子在双层圆柱边界条件下的组织中传播时能否与界面相交可利用图 3 所示情况进行判断。

由图 3 可以看出,图 3(a)、(d)、(e)、(f)、(i)、(j)、(k)几种情况不会发生光子在界面处的反射或折射,图 3(b)、(c)、(g)、(h)几种情况则会发生光子在界面处的反射或折射。具体规则如下:

i) 当光子初始位置  $A$  在第二层介质内,光子末位置  $D$  在第二层介质外(即  $D$  在第一层介质内或周围介质内),或相反,光子末位置  $D$  在第二层介质内,初始位置  $A$  在第二层介质外(即  $A$  在第一层介质内或周围介质内),则发生界面反射或折射。如图 3(b)和(g)所示;

ii) 当光子初始位置  $A$  及末位置  $D$  都在第二层介质内,且  $\overline{AD}$  到介质中心的距离小于或等于  $R_1$  ( $R_1$  为第一层介质的半径),同时  $A$  和  $D$  要位于  $\overline{AD}$  到介质中心的距离所在的直线的异侧,则发生界面反射或折射。如图 3(c)所示;

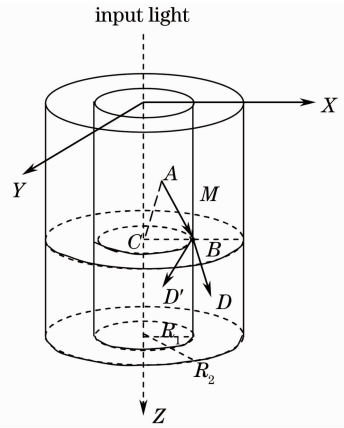


图 2 坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate system diagram

iii) 当光子初始位置  $A$  及末位置  $D$  均在周围介质内,且  $\overline{AD}$  到介质中心的距离小于或等于  $R_2$  ( $R_2$  为第二层介质的半径),同时  $A$  和  $D$  要位于  $\overline{AD}$  到介质中心的距离所在的直线的异侧,则发生界面反射或折射。如图 3(h)所示。

其余不符合以上 3 种情况的皆不发生光子在界面处的反射或折射。

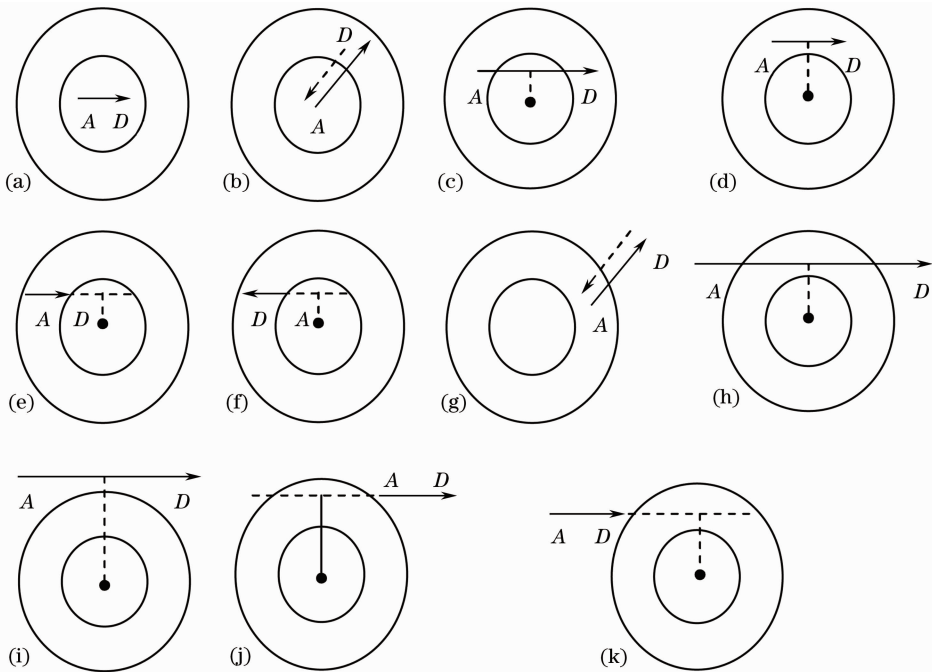


图 3 光子在边界传输时的不同情况

Fig. 3 Different situations of photos propagating over the boundary

### 3 圆柱边界条件下光传输的模拟结果

#### 3.1 3 种边界条件的比较

图 4~6 分别是半无限大平面、单层柱状和双层柱状生物组织中的光子数密度的模拟结果。其中散

射系数  $\mu_s = 100 \text{ cm}^{-1}$ , 吸收系数  $\mu_a = 0.5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $g = 0.9$ ; 对于半无限平面, 介质内的折射率  $n_2 = 1.4$ , 周围介质的折射率为  $n_1 = 1.0$ ; 对于单层柱状生物组织, 圆柱半径  $R = 1 \text{ mm}$ , 介质内的折射率  $n_1 = 1.5$ ,

周围介质的折射率  $n_2 = 1.4$ ; 对于双层柱状生物组织, 第一层介质半径为  $R_1 = 0.5 \text{ mm}$ , 第二层介质半径为  $R_2 = 1 \text{ mm}$ , 第一层介质内的折射率  $n_1 = 1.5$ , 第二层介质内的折射率  $n_2 = 1.2$ , 周围介质的折射率为  $n_3 = 1.4$ 。

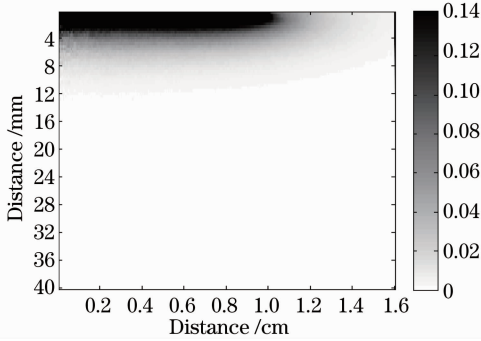


图 4 半无限大生物组织中的光子吸收数密度

Fig. 4 Number density of photon absorption in the semi-infinite biological tissue

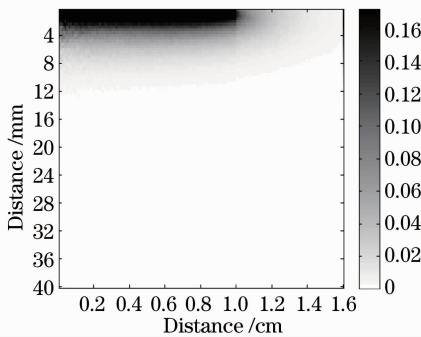


图 5 圆柱边界条件下生物组织中的光子吸收数密度

Fig. 5 Number density of photon absorption in the biological tissue under the cylindrical boundary condition

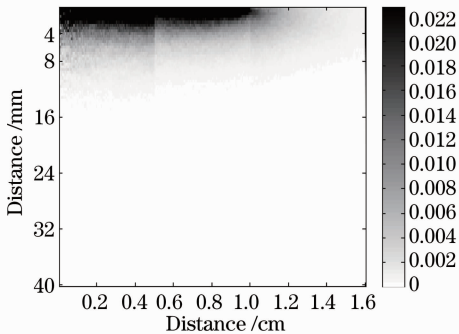


图 6 双层圆柱边界条件下生物组织中光子吸收数密度

Fig. 6 Number density of photon absorption in biological tissue under the condition of double cylindrical boundary

由图 4 可见, 如果将生物组织视为半无限大边界条件时, 更多的光子沿着径向传播; 而单层圆柱边界条件下的生物组织中的光子数密度模拟出现了明

显的分层情况, 在边界处部分光子透过边界, 而其余的光子在边界处被反射; 对于双层圆柱边界, 在  $R = 0.5 \text{ mm}$  和  $R = 1 \text{ mm}$  的边界处出现了明显的分层情况, 边界的存在使部分光子被边界反射, 并向  $z$  轴正方向传输。图 4~6 灰度图显示出光子在 3 种边界条件下数密度的直观表示, 可见对于实际的生物组织, 在不同的边界条件下模拟出的光在生物组织中的传输有明显差别。

### 3.2 理论与实验的比较

实验装置如图 7 所示, 其中光束聚焦在样品表面, 模拟样品的外层为中空(外径为  $40 \text{ mm}$ , 内径为  $15 \text{ mm}$ )的有机玻璃圆桶, 中空的柱状有机玻璃中充入质量分数为  $10\%$  的 Intralipid 溶液构成单层圆柱模拟样品, 有机玻璃的吸收和散射系数很小, 折射率  $n = 1.49$ 。有机玻璃的外壁用砂纸打磨, 然后包上黑色绝缘胶带, 从而把传输到外壁的光吸收掉并防止其表面的镜面反射。配置的质量分数为  $10\%$  的 Intralipid 溶液的光学特性参数为  $\mu_s = 2 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_a = 0.003 \text{ mm}^{-1}$ 。能流率由粘贴在光纤探测端的两向同性小球测量。各向同性小球是特制的各向同性散射球, 采用白色尼龙棒材料, 在球形磨具上采用加热注塑的工艺制成。实验表明, 这种材料对 He-Ne 光束有很好的散射性。测量到的圆柱边界条件下的能流率随空间距离的变化如图 8 和图 9 所示。图 10 为用蒙特卡罗方法模拟圆柱边界条件下, 生物组织中光子数密度灰度图与光子数密度分布标尺, 光学特性参数的选取与实验中的参数是一致的, 选取的圆柱内的折射率为  $1.4$ , 圆柱外的折射率为  $1.49$ , 内径为  $15 \text{ mm}$ 。图 10 中横轴代表半径, 纵轴代表射入深度, 由图 11 可以看出在半径  $R = 0.75 \text{ mm}$  处有明显的分层结构。图 11 和图 12 是利

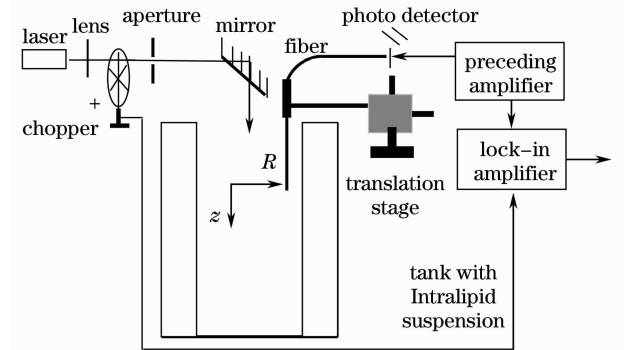


图 7 测定质量分数为  $10\%$  的 Intralipid 溶液中散射光分布的实验装置

Fig. 7 Experimental setup for measuring scattered light in Intralipid- $10\%$  solution

用图 10 的模拟结果画出的能流率随空间距离的变化。比较图 8 与图 11,可以看出光子在  $R=3, 4, 5$  mm处,实验与模拟的结果都是能流率在离开边界 2 mm 后,随着轴向距离的增加而单调减小,在  $z$  较大处趋于重合,随着  $R$  的增大,能流率随轴向距离的变化趋于平缓。在模拟结果中,在  $z=1$  mm 处能流率出现了极大值,随着  $R$  的增加,极大值减小,极大值的出现是由于光子在生物组织中的散射和边界共同作用的结果。比较图 9 与图 12 可以看出能流率在  $z$  取不同值时,实验与模拟的结果都是能流率随着径向距离的变化单调递减。实验结果在  $z$  由 5 mm 变为 8 mm 时,能流率随轴向距离的变化衰减很快,模拟结果中,在  $z$  由 3 mm 变为 6 mm 时,能流率随轴向距离的衰减没有实验结果快,但与  $z$  取 9 mm,12 mm 相比要快。模拟结果由于格子的限制, $R$  的取值有所不同,应该反映的是相同的变化结果,都是在逐步远离  $z$  轴的过程中,能流率随径向距离的变化,模拟结果显示,在边界处能流率有明显的

变化,这在光子数密度图中表现为明显的分层结构。由此可以得到,实验与模拟结果反映圆柱边界条件下生物组织中光传输的趋势是一致的,一些细节上的区别是由于能流率的取值单位以及  $z$  的取值等因

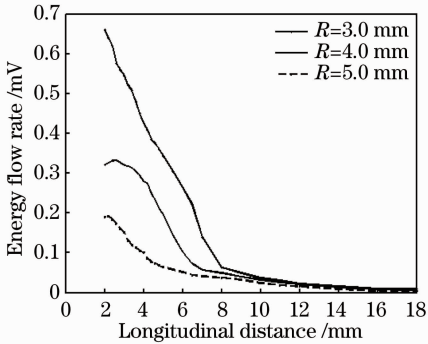


图 8 质量分数为 10% 的 Intralipid 中的能流率在圆柱边界条件下沿距离  $z$  的分布  
Fig. 8 Energy flow rate distribution of Intralipid-10% under the cylindrical boundary condition along the  $z$  axis

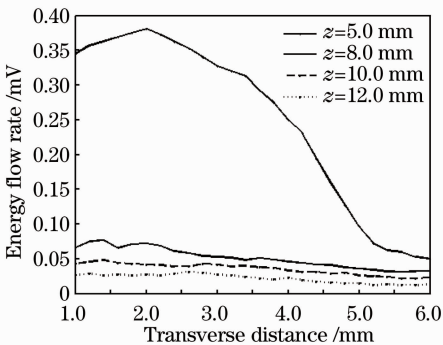


图 9 质量分数为 10% 的 Intralipid 中的能流率在圆柱边界条件下沿距离  $R$  的分布  
Fig. 9 Energy flow rate distribution of Intralipid-10% under the cylindrical boundary condition along  $R$

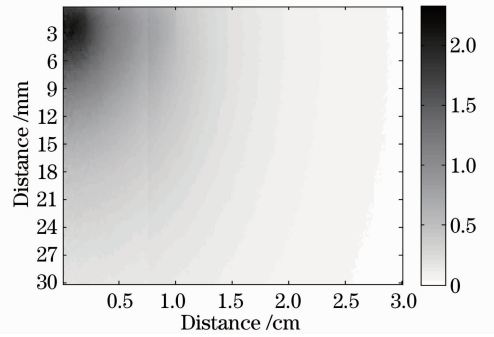


图 10 圆柱边界条件下生物组织中的光子数密度模拟图  
Fig. 10 Photon number density in biological tissue under cylindrical boundary conditions by Monte Carlo simulation

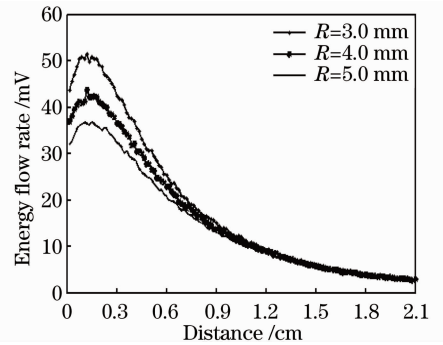


图 11 圆柱边界条件下,能流率随轴向距离变化的蒙特卡罗模拟

Fig. 11 Flow rate distribution under the cylindrical boundary condition along the  $z$  axis by the Monte Carlo simulation

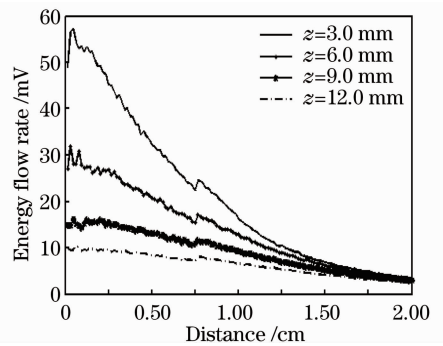


图 12 圆柱边界条件下,能流率随径向距离变化的蒙特卡罗模拟

Fig. 12 Flow rate distribution under the cylindrical boundary condition along the  $R$  direction by the Monte Carlo simulation

素造成的,一方面验证了模拟的正确性,另一方面也给出了质量分数为 5.18% 的 Intralipid 溶液在柱状边界条件下光传输的能流率随空间变化的特性。

## 4 结 论

利用本实验室编制的一套圆柱边界条件下光束入射到生物组织中传播的蒙特卡罗程序,对同一组光学参数分别模拟了半无限大平面、单层和双层柱状生物组织边界条件下的吸收光子数密度,结果显示对于实际的生物组织,在不同的边界情况下模拟出的光在生物组织中的传输有明显的差别,因此在利用蒙特卡罗方法对生物组织中光传输性质进行模拟时,应该根据生物组织的实际形状选择合适的边界条件。模拟了圆柱边界条件下,生物组织中的能流率随空间的变化,并与实验结果进行了比较,验证了圆柱边界条件下的光传输模拟的正确性。

## 参 考 文 献

1 J. R. Mourant, T. Fuselier, J. Boyer *et al.*. Predictions and measurements of scattering and absorption over broad wavelength ranges in tissue phantoms [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4): 949~957

2 S. J. Preece, E. Claridge. Monte Carlo modeling of the spectral reflectance of the human eye [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, **47**(16): 2863~2877

3 Qian Shengyou, Xing Da. Monte Carlo simulation of light absorption in biological tissue for finite size beam [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2002, **11**(2): 93~97  
钱盛友,邢达.生物组织中有限束宽光吸收的蒙特卡罗模拟 [J]. *激光生物学报*, 2002, **11**(2): 93~97

4 Lin Yu. Monte Carlo modeling of light distribution in two-layer tissue [J]. *Laser Journal*, 1997, **18**(1): 52~55  
林煜.双层生物组织中光分布的蒙特卡罗模拟 [J]. *激光杂志*, 1997, **18**(1): 52~55

5 Lin Yu. Experimental study of light distribution in two-layer tissue [J]. *Laser Journal*, 1997, **18**(6): 49~51  
林煜.双层生物组织模拟体中光分布的实验研究 [J]. *激光杂志*, 1997, **18**(6): 49~51

6 A. Sassaroli, F. Martelli, D. Imai *et al.*. Study on the propagation of ultra-short pulse light in cylindrical optical phantoms [J]. *Phys. Med. Biol.*, 1999, **44**(11): 2747~2763

7 A. Kienle, C. Wetzel, A. Bassi *et al.*. Determination of the optical properties of anisotropic biological media using an isotropic diffusion model [J]. *J. Biomedical Optics*, 2007, **12**(1): 014026

8 Xinyu Wang, Lin Zhang, Chunping Zhang *et al.*. Simulation of light propagation in bio-tissue under cylindrical boundary condition [J]. *J. Modern Optics*, 2005, **52**(16): 885~895

9 Lin Zhang, Xinyu Wang, Meixiu Sun *et al.*. Monte Carlo simulation for the light propagation in two-layered cylindrical biological tissues [J]. *J. Modern Optics*, 2007, **54**(10): 1395~1405

栏目编辑:韩峰