

doi: 10.3788/gzxb20164504.0412006

与散射相函数相关的光源附近微区漫反射

廉 鸽, 罗 雯 倩, 王 汝 丹, 肖 立 峰, 刘 迎

(天津大学 理学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 采用 Monte Carlo 法研究散射相函数对光源附近微区内的漫反射光的影响, 分析一个半经验的漫反射解析模型与相函数相关的光学参量之间的关系. 研究表明, 来自光源附近微区的散射光对散射相函数的变化非常敏感, 敏感程度随收集孔径 φ 的增大而逐渐减弱. 当 $\varphi > 1.8$ mm 时, 散射相函数对漫反射率的影响不明显, 反射率的相对变化小于 1%; 当 $\varphi < 1.8$ mm 时, 散射相函数对漫反射率的影响高达 15.2%. 用各向异性因子 g 和二阶光学参量 γ 表征单粒子散射特性时, 散射特性的差异反应在三阶参量 δ 上. 漫反射率随 δ 的增加而减小, 并且 δ 对漫反射率的影响达到 9%.

关键词: 组织光学; 光传输理论; 散射相函数; 高阶光学参量; Monte Carlo 模拟

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0412006-5

Diffuse Reflection Associated with Scattering Phase Function from a Micro-region Close to the Source

LIAN Ge, LUO Wen-qian, WANG Ru-dan, XIAO Li-feng, LIU Ying

(Key Laboratory of Opt-Electronics Information Technology and Science of the Ministry of Education, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Influence of the scattering phase function on the diffuse reflection of a micro-region close to the source was investigated by Monte Carlo simulations, and relationship between a semi-empirical model of diffuse reflection and the optical parameters related to the phase function was analyzed. Research shows that the scattered light of the micro-region close to the source is very sensitive to the scattering phase function, and the sensitivity will gradually weaken with increasing of collection aperture φ . When $\varphi > 1.8$ mm, influence of the scattering phase function on the diffuse reflection is not obvious and relative change in reflectivity is less than 1%; when $\varphi < 1.8$ mm, influence of the scattering phase function on the diffuse reflection can reach up to 15.2%. When the anisotropic factor g and the second-order optical parameter γ are used to characterize a single-particle scattering properties, the differences of scattering properties are reflected in the third-order parameter δ . The diffuse reflectance decreases with the increasing of δ and the influence of δ on the diffuse reflectance can reach 9%.

Key words: Tissue optics; Optical transport theory; Scattering phase function; High-order optical parameter; Monte Carlo simulation

OCIS Codes: 120.5820; 170.3660; 170.5280; 170.6935

0 引言

组织的光学参量及其测量技术的研究一直受到广泛的关注, 因为这些光学参量能被进一步用于获得生物化学的、形态学的、组织化学的信息^[1-4]. 吸收系数

μ_a 、散射系数 μ_s 和各向异性因子 g 已经通过多种测量技术得到^[1], 然而这些参量因测量方法不同有很大的差异. 例如漫射近似理论仅适用于远离光源的情况, 因此在近光源区存在较大的模型误差, 导致反演光学参量准确性降低^[3]. 然而使用内窥方式进行活体检测, 或

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60278004)资助

第一作者: 廉鸽(1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生物医学光子学. Email: 15122636183@163.com

导师(通讯作者): 刘迎(1956—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为统计光学和生物医学光子学、光电子学、电子物理与技术、医学影像. E-mail: liuying56@163.com

收稿日期: 2015-10-29; 录用日期: 2015-12-25

<http://www.photon.ac.cn>

测量小体积的生物组织时,需要测量光源附近漫反射光,由于生物组织的散射相函数对漫反射光分布有较大的影响^[4],光源源附近微区的漫反射问题要比漫反射近似模型复杂得多.

2001年 Kienle 等^[5]用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)法研究了散射相函数(Scattering Phase Function, SPF)对空间分辨漫散射的影响,说明引入二价参量 γ 的必要性. $\gamma=(1-g_2)/(1-g_1)$ 是一个表征 SPF 特性的光学参量.刘迎等研究了不同 SPF 的二阶参量 γ 与 g_1 的关系^[6],并且用 MC 方法对高阶参量 γ 的范围和规律性进行了研究^[7].

根据输运方程得到的含有高阶参量 γ 的漫反射解析模型具有复杂的数学形式^[8],因此限制了这些理论的实际应用.与解析理论相比,MC 数值模拟方法不受生物组织复杂性和光收集几何的限制,能够精确地描述光与生物组织相互作用,研究者^[9-10]在对生物组织光传输特性研究时多采用此模拟方法,但计算时间较长,难以用于光学参量的反演.近年来研究者利用 MC 模拟实验方法研究了几个半经验的漫反射模型,使它们可以用来描述 MC 结果,以便克服该方法费时和没有解析解难以用于参量反演的缺点^[11-14].Amelink 等^[11-12]从朗伯-比尔定律出发,提出了一个含有参量 γ 的半经验模型,并利用该模型对几种生物介质的 γ 值进行了测量^[15].Zonios 等^[13]从光子迁移理论出发,研究了关于参量 μ_a, μ_s 半经验性质的漫反射模型,高震等^[14]从光子迁移理论和二阶相似关系出发,对 Zonios 提出的漫反射模型进行了阐述,并且基于 MC 模拟数据得到了含有高阶参量 γ 的解析表达式.

本文在 Zonios 和高震等人的研究基础上,采用 MC 方法研究 SPF 对光源附近微区内的漫反射光的影响.当 SPF 用一组参量 (g, γ) 表示时,SPF 的差异反应在三阶参量 δ 上.本文研究漫反射率随参量 δ 的变化.研究表明,来自光源附近微区的散射光对 SPF 的变化非常敏感,敏感程度随收集孔径 φ 的增大而逐渐减弱,漫反射率随 δ 的增加而减小.

1 理论和方法

1.1 散射相函数的选择

在光传输理论中,SPFP(\hat{s}, \hat{s}') (表示粒子将 \hat{s}' 方向的入射波散射到 \hat{s} 方向的概率)描述了随机散射介质中单粒子的散射特性,表征其特性的光学参量与散射体的微观结构有关^[2].各向异性因子 $g = \langle \hat{s} \cdot \hat{s}' \rangle$ 是 SPF 的一阶 Legendre 矩.本文用函数 $p_{\text{Tissue}}(x, g_{\text{HG}}, \alpha)$ ^[16] 表征单粒子的散射特性

$$p_{\text{Tissue}}(x, g_{\text{HG}}, \alpha) = \alpha p_{\text{HG}}(x, g_{\text{HG}}) + (1-\alpha) \frac{3}{8} (1+x^2) \quad (1)$$

式中 $x = \cos \theta$, HG 相函数 $p_{\text{HG}}(x, g_{\text{HG}})$ 描述了组织中粒子的散射特性,第二项是描述小粒子散射的 Rayleigh SPF,权重因子 α 表示两种粒子所占比重,且可以通过改变参量 (α, g_{HG}) 使 SPF 发生变化.对式(1)进行 Legendre 展开,得到前三阶矩 g_1, g_2, g_3 分别为

$$\begin{aligned} g &= g_1 = \alpha g_{\text{HG}} \\ g_2 &= \alpha g_{\text{HG}}^2 + 0.1(1-\alpha) \\ g_3 &= \alpha g_{\text{HG}}^3 \end{aligned} \quad (2)$$

根据二阶参量 γ 和三阶参量 δ 的定义

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1-g_2}{1-g} = \frac{1 - \left(\frac{g^2}{\alpha} + 0.1(1-\alpha) \right)}{1-g} \\ \delta &= \frac{1-g_3}{1-g} = \frac{1-g^3}{1-g} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $g = \alpha g_{\text{HG}}$ 是各向异性因子.

从式(3)中可以发现:1)参量 (α, g_{HG}) 唯一决定了 g, γ 和 δ ;2)由于各向异性因子 $g = \alpha g_{\text{HG}}$,因此只用 g 描述粒子的散射特性是不够的;3)当用参量 (g, γ) 表征单粒子散射特性时,散射特性的差异反应在三阶参量 δ 上.

图1为当 g 取不同值时, δ 随 γ 的变化曲线,曲线与 $\gamma=1.475$ 直线交点 $(0.60, 1.475), (0.65, 1.475), (0.70, 1.475), (0.75, 1.475), (0.80, 1.475), (0.85, 1.475)$, 代表了六个不同 SPF, 相应的 δ 值分别为 1.833、1.873、1.909、1.940、1.962、1.993.图1清楚地显示:当 γ 很小,不同 SPF 的 δ 值几乎相同(因此 δ 对漫反射率的影响可以忽略); δ 值的差异随 γ 增大而增大,因此当 γ 值较大时有必要考虑 δ 值对漫反射率的影响以及影响大小.

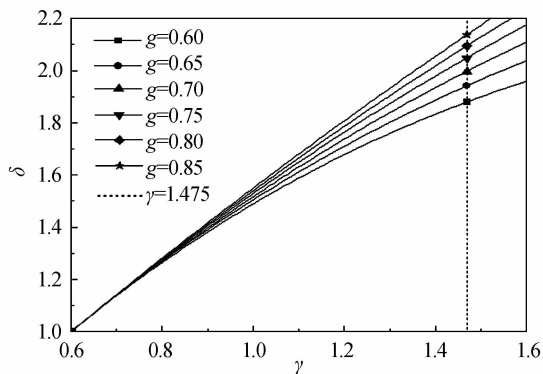


图1 g 取不同值时, γ 与 δ 之间的关系

Fig.1 Relationship between γ and δ for various g

1.2 MC 模拟研究方法

为了研究 SPF 对漫反射率的影响,选取图1中标记的 $\gamma=1.475$ 六个 SPF $(g, 1.475)$, $g=0.60 \sim 0.85$, μ_a, μ_s 的取值范围分别为 $0.001 \sim 10 \text{ mm}^{-1}$ 和 $0.5 \sim 3.0 \text{ mm}^{-1}$ (见表1).图2为漫反射测量的示意图.考虑准直无限细光束入射到一个半无限均匀介质的界面

上,介质的折射率 $n=1.4$ (设空气的折射率为 1). 采用 MC^[17] 模拟 $\mu_s, \mu_s', \text{SPF}$ 取不同值时的漫反射过程, 总共得到 $6 \times 6 \times 13 = 468$ 组漫反射率数据. 从这些数据中可以得到不同测量孔径时的反射率数据.

表 1 MC 模拟选取的参量值

g	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
μ_s'/mm^{-1}	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
μ_a/mm^{-1}	0.001	0.00214	0.00468	0.01	0.0214	
	0.0468	0.1	0.214	0.468	1	
	2.14	4.68	10			

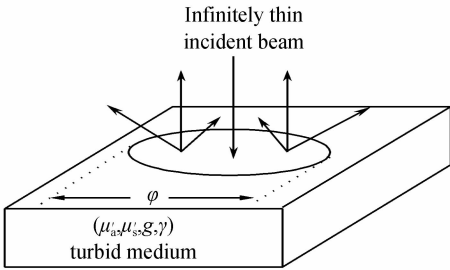


图 2 小孔径收集漫反射光示意图

Fig. 2 Diagram of diffuse reflectance measurement by a small collection aperture φ

2 结果与分析

2.1 SPF 对漫反射率的影响

图 3 为介质的 SPF 不同时的漫反射率随 φ 的变化. 图中三个 SPF 分别为 $(g=0.60, \gamma=1.475)$ 、 $(g=0.70, \gamma=1.475)$ 、 $(g=0.80, \gamma=1.475)$, 其它光学参量 $\mu_s'=2.0 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_a=0.1 \text{ mm}^{-1}$. 从图中不难发现: 在 φ 很小时, 漫反射率对 SPF 很敏感, 并且随 φ 的增大, 敏感度不断减弱. 漫反射率随 g 的增大而减小, 可归因于 g 越大, 它的 SPF 的后向散射的分量就会增加, 因此 $g=0.60$ 的漫反射率大于 $g=0.80$ 的漫反射率.

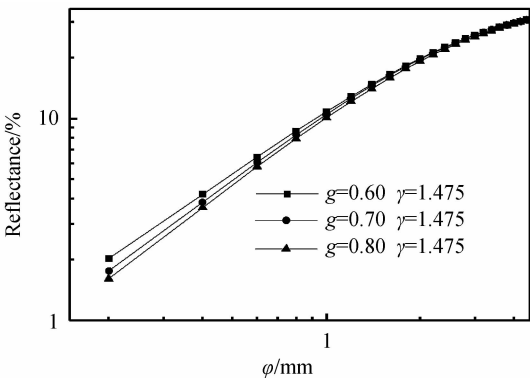


图 3 不同 SPF 下的漫反射率随 φ 的变化

Fig. 3 Change of diffuse reflectance for different SPF with φ

图 4 为不同 SPF 对漫反射率的影响. 在图 4 中, 横坐标是探测孔径 φ , 纵坐标表示以 SPF $(g=0.70, \gamma=$

$1.475)$ 为参照, 其余两个 SPF $(g=0.60, \gamma=1.475)$ 、 $(g=0.80, \gamma=1.475)$ 的漫反射率分别与参照 SPF 漫反射率的相对变化率. 从图中可看出: $\gamma=1.475, g=0.60, 0.80$ 与 $g=0.70$ 之间的漫反射率相对变化率分别高达 15.2%、8.7%, 并且随 φ 的增大而减小. 当 $\varphi > 1.8 \text{ mm}$ 时, 漫反射率的相对变化率小于 1%, 表明当 $\varphi < 1.8 \text{ mm}$ 时, 研究 SPF 对漫反射率的影响是很必要的; $\varphi > 1.8 \text{ mm}$ 时, SPF 对漫反射率的影响可忽略.

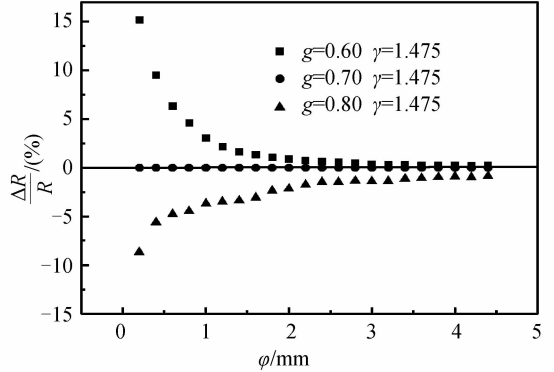


图 4 φ 取不同值时, 不同 SPF 的漫反射率与 SPF $(g=0.70, \gamma=1.475)$ 的漫反射率的相对变化率

Fig. 4 The relative rate of change between diffuse reflectance of different SPF and diffuse reflectance of SPF $(g=0.70, \gamma=1.475)$ for various φ

图 3 和图 4 表明当测量孔径 φ 很小时, 介质的单粒子散射特性(即 SPF)对漫反射率的影响很大, 并且随 φ 的增大, 漫反射率对 SPF 变得越来越不敏感. 另外, 当用参量 (g, γ) 表征单粒子散射特性时, 散射特性的差异反应在三阶参量 δ 上, 由图 3 和图 4 可知当 $\varphi > 1.8 \text{ mm}$ 时, 漫反射率不再随 δ 的变化而变化.

2.2 含有高阶参量 δ 的漫反射表达式 $R(\mu_a, \mu_s', \delta)$

为了更清楚地阐述 SPF 对漫反射率的影响, 在 Zonios 等人研究的基础上提出了一个含有 SPF 的三阶参量 δ 的半经验表达式. Zonios^[18] 研究表明, 当在光源附近很小的区域收集漫反射光时, 漫反射率表示为

$$R = \frac{k_1 \mu_s'}{1 + k_2 \mu_a} \quad (4)$$

根据图 4, 对于选定的 φ , 参量 k_1, k_2 是参量 δ 的函数.

选取 $\varphi=0.6 \text{ mm}$, 图 5 为 $\mu_a=0.1 \text{ mm}^{-1}$ 时, 不同的 SPF, 即 $(g, 1.475)$ 中 g 取不同值时, 漫反射率随 μ_s' 变化曲线. 从图中可以看出: 当 μ_a, μ_s' 和 γ 一定时, 漫反射率随 δ 的增大而减小. 当 μ_a 为其它值时, 得到与图 5 相似的曲线. 为了定量地研究 δ 对漫反射率的影响, 将 13 幅 $(\mu_a$ 值不同) 漫反射率曲线图, 共 $36 \times 13 = 468$ 个漫反射率数据, 对式(4)进行拟合, 得到

$$\begin{aligned} k_1 &= 3.305\delta^2 - 14.62\delta + 19.34, \\ k_2 &= 0.4332\delta + 0.1929 \end{aligned} \quad (5)$$

拟合优度分别为 0.993 和 0.996.

领域具有潜在的应用。

参考文献

- [1] CHEONG W F, PRAHL S A, WELCH A J, *et al.* A review of the optical properties of biological tissues[J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1990, **26**(12): 2166-2185.
- [2] BOUSTANY N N, BOPPART S A, BACKMAN V. Microscopic imaging and spectroscopy with scattered light[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2010, **12**: 285-314.
- [3] HE Chun-liu, ZHU Qi-bing, HUANG Min. Inversion of the optical properties parameters of biological tissue based on moment transformation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0217003.
- [4] KANICK S C, KRISHNASWAMY V, GAMM U A, *et al.* Scattering phase function spectrum makes reflectance spectrum measured from intralipid phantoms and tissue sensitive to the device detection geometry[J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, **3**(5): 1086-1100.
- [5] KIENLE A, FORSTER F K, HIBST R. Influence of the phase function on determination of the optical properties of biological tissue by spatially resolved reflectance[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(20): 1571-1573.
- [6] LIU Ying, ZHANG Xiao-juan, HU You-zhou. Scattering phase function of biological tissue and the properties of second-order optical parameter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 877-880.
- [7] 刘迎, 张小娟, 胡佑周. 生物组织的散射相函数及其二阶光学参量的性质[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 877-880.
- [8] TIAN Hui-juan, LIU Ying, WANG Li-jun. Influence of the third-order parameter on diffuse reflectance at small source - detector separations[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(7): 933-935.
- [9] TIAN Hui-juan, LIU Ying, WANG Li-jun, *et al.* Study of diffuse reflectance based on a hybrid diffusion approximation and simulating experiment[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(1): 243-249.
- [10] 田会娟, 刘迎, 王利军, 等. 混合漫射近似模型的漫反射理论及其模拟实验研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(1): 243-249.
- [11] WANG Ji-hui, DING Yan, CHEN Song-lin, *et al.* Transport for photon beams of finite size in biological tissues based on Monte Carlo[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0117001.
- [12] 王吉晖, 丁艳, 陈松林, 等. 有限宽光束在生物组织中传输的蒙特卡罗方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(S1): 0117001.
- [13] LAI Jian-cheng, LI Zhen-hua, WANG Qing-hua, *et al.* System model of light transporting in biological tissues and its application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1312-1317.
- [14] 来建成, 李振华, 王清华, 等. 生物组织光传输的系统模型及应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1312-1317.
- [15] KANICK S C, ROBINSON D J, STERENBORG H J C M, *et al.* Method to quantitate absorption coefficients from single fiber reflectance spectra without knowledge of the scattering properties[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(15): 2791-2793.
- [16] KANICK S C, GAMM U A, STERENBORG H J C M, *et al.* Method to quantitatively estimate wavelength-dependent scattering properties from multidiameter single fiber reflectance spectra measured in a turbid medium[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(15): 2997-2999.
- [17] ZONIOS G, DIMOU A. Modeling diffuse reflectance from

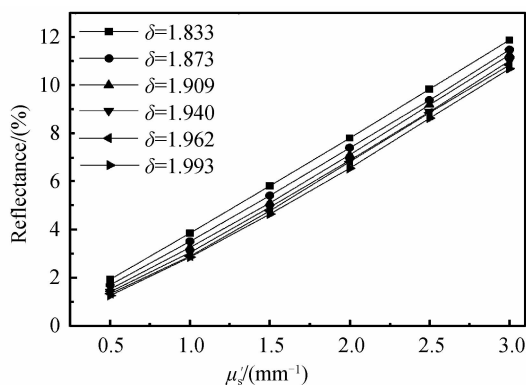


图5 $\mu_a = 0.1 \text{ mm}^{-1}$, 不同 δ 值下漫反射率随 μ_s' 的变化
Fig. 5 Change of diffuse reflectance for various δ with μ_s' when $\mu_a = 0.1 \text{ mm}^{-1}$

图6为 k_1 与 k_2 随 δ 变化的曲线。可以看出 k_1 随 δ 的增大而减小, 而 k_2 随 δ 的增大而增大。

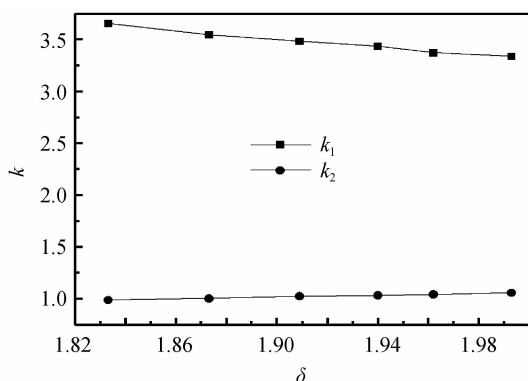


图6 k_1 与 k_2 随 δ 的变化
Fig. 6 Change of k_1 , k_2 with δ

2.3 对参量 k_1 和 k_2 的分析

k_1 和 k_2 是参量 δ 的函数。对式(4)进行全微分得到

$$\frac{dR(\mu_a, \mu_s', \delta)}{R(\mu_a, \mu_s', \delta)} = \frac{dk_1}{k_1} - \frac{dk_2}{1/\mu_a + k_2} \quad (6)$$

由式(5)得到 $dk_1/d\delta = 6.61\delta - 14.6$, $dk_2/d\delta = 0.433$ 。由于式中 $\mu_s' > 0$, $\mu_a > 0$, $\delta < 2$, 因此 $dR/d\delta < 0$, 即 $R(\mu_a, \mu_s', \delta)$ 随 δ 的增大而减小。

当 μ_a 很小时, 式(6)第二项中分母 $1/\mu_a + k_2 \gg 1$, 因而第二项会很小可以忽略。此时, 漫反射率的变化率为 $dR/R \approx dk_1/k_1$ 。取 $\delta = 1.900$, $\Delta k_1 = 3.15$, 估算得到 $\Delta R/R = \Delta k_1/k_1 \approx 9.1\%$ 。

3 结论

光源附近微区的漫反射光对 SPF 的变化非常敏感, 其敏感程度随收集孔径 φ 的增大而逐渐减弱, 当收集孔径很小时, 来自光源附近的散射光能够携带散射介质的微观结构信息。本文的研究为非接触探测物质的微观结构提供了一个新的途径, 例如可以得到反射率与散射粒子几何参量以及波长的关系, 在生物医学

- semi-infinite turbid media; application to the study of skin optical properties[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(19): 8661-8674.
- [14] GAO Zhen, MA Zhao, LIU Ying, *et al.* Semi-empirical Analytical Mode with high-order parameter of the biological tissue optical diffuse reflectance [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(13): 134208.
高震, 马招, 刘迎, 等. 含有高阶参量的生物组织光学漫反射的半经验解析模型[J]. *物理学报*, 2014, **63**(13): 134208.
- [15] GAMM U A, KANICK S C, STERENBORG H J C M, *et al.* Quantification of the reduced scattering coefficient and phase-function-dependent parameter γ of turbid media using multidiameter single fiber reflectance spectroscopy: experimental validation[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 1838-1840.
- [16] BEVILACQUA F, PIGUET D, MARQUET P, *et al.* *In vivo* local determination of tissue optical properties: applications to human brain[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(22): 4939-4950.
- [17] WANG Li-hong, JACQUES S L, ZHENG Li-qiong. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, **47**(2): 131-146.
- [18] ZONIOS G, DIMOU A. Modeling diffuse reflectance from homogeneous semi-infinite turbid media for biological tissue applications; a Monte Carlo study[J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, **2**(12): 3284-3294.