

文章编号:1004-4213(2011)01-0068-5

空间分辨漫反射的一阶散射参量灵敏度

张小娟¹, 杨薇¹, 刘迎²

(1 中国民航大学 理学院, 天津 300300)

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

摘要:以输运理论的 P_3 近似为基础, 推导了空间分辨漫反射的一阶散射参量灵敏度的解析表示, 并进行了数值分析, 比较了散射参量对 P_3 近似和漫射近似漫反射的影响. 结果表明: 在距光源两个输运平均自由程以内, 该灵敏度与相应于漫射近似的灵敏度差别较为明显; 距离光源约四个输运平均自由程附近, 该灵敏度等于零, 并且与光源之距与相应于漫射近似情况也不同; 该灵敏度等于零的源-探测器之距随组织散射参量增大而减小, 且组织吸收越弱这种变化越明显. 本研究对于在一阶散射参量灵敏度等于零处, 利用漫反射获取组织吸收信息具有重要的理论意义.

关键词:漫反射; P_3 近似; 灵敏度

中图分类号: TN247 Q631

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114001.0068

0 引言

输运理论能够描述光在随机介质中传播规律, 随机介质的光学性质用吸收系数 μ_a 、散射系数 μ_s 和散射相函数 $p(\theta)$ 描述^[1-2]. 在输运理论的应用领域之一——生物医学光学中, 深入认识光在生物组织中的传播规律是发展各种疾病的无创诊断和治疗手段的前提和基础^[3-4]. 研究表明, 组织表面的漫反射光与组织的光学性质参量有关, 并携带有丰富的组织内部信息^[5]. 为了从组织表面的漫反射中准确获取内部信息, 需要确定最佳的探测距离. 为此, 有学者分别从理论和模拟角度进行了研究. 输运理论的一阶近似——漫射近似^[6]是许多测量技术的理论基础, 在漫射近似下, 辐射强度只与 μ_a 和有效散射系数 μ'_s 有关, $\mu'_s = \mu_s(1-g)$, g 是 $p(\theta)$ 的一阶勒让德矩, 称作介质的各向异性因子. 1997 年 Kumar 等^[7] 和 2001 年 Hanli Liu^[8] 分别在漫射近似及其修正解的基础上通过讨论漫反射对一阶散射参量的灵敏度, 来寻求最佳的探测距离以达到对组织吸收参量的有效测定. 蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 是处理生物组织光传输问题的模拟方法, 2000 年王峰等^[9] 和 2005 年罗云瀚等^[10] 分别用 MC 方法研究多层组织的穿透深度等来确定最佳探测距离, 以达到对组织吸收信息的有效测量.

输运理论的高阶近似—— P_3 近似与散射相函数的高阶矩有关. 2001 年 Hull 等^[11] 研究了半无限介质的 P_3 近似解, 显示了 P_3 近似解和漫射近似解在描述光源附近漫反射的差别, 并引入了描述相函数的高阶

参量 γ 和 δ . 2006 年高宗慧等^[12] 对 P_3 近似解作了详细阐述, 并与漫射近似和 MC 模拟结果进行了比较, 指出了 P_3 近似的应用范围. 本文则在 Kumar 等^[7] 和 Hanli Liu^[8] 基础上运用输运理论的高阶近似来研究漫反射对一阶散射参量灵敏度, 为最佳探测距离提供理论参考. 本文以 P_3 近似理论为工具, 推导了 S_{ps} 的解析表示 (S_{ps} 表示了由于 μ'_s 的变化导致漫反射变化的相对量, 反映了 μ'_s 对 P_3 近似漫反射的影响), 在此基础上, 进行了数值分析, 比较了 μ'_s 对漫射近似和 P_3 近似漫反射的影响. 这为确定最佳的漫反射测量距离以获取组织吸收及其变化信息提供了重要的理论依据.

1 P_3 近似空间分辨漫反射率

考虑无限细激光束垂直入射到半无限均匀介质表面 (图 1), 通过求解输运方程得 P_3 近似漫反射率, 可以表示为^[11-12]

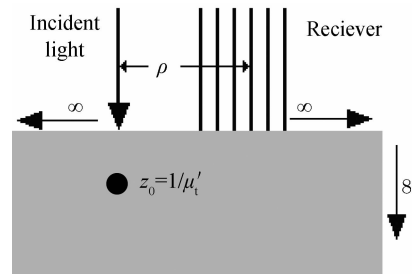


图 1 空间分辨漫反射测量示意图

Fig. 1 Sketch map of spatial-resolved diffuse reflectance measurement

$$R(\rho; \gamma; \delta) = \sum_{l=0}^3 \frac{2l+1}{4\pi} \Psi_l(\rho; \gamma; \delta) S_l(\rho; z_0) \quad (1)$$

基金项目:国家自然科学基金 (No. 60278004)、中央高校基本科研业务费专项 (No. ZXH2010D015) 和中国民航大学科研启动基金 (No. 05QD12X) 资助

第一作者: 张小娟 (1973—), 副教授, 博士, 主要研究方向为生物医用光学和统计光学. Email: lzhangxiaojuan@126.com

收稿日期: 2010-08-10; **修回日期:** 2010-10-11

式中 ρ 表示探测器与光源之间的距离, $z_0 = 1/(\mu'_s + \mu_a)$ 是将光源近似成点光源后的位置, $S_l(\rho; z_0)$ 只与一阶参量 μ_a 和 μ'_s 有关, 式(1)中的 $\Psi_l(\rho; \gamma; \delta)$ 不仅与一阶参量 μ_a 和 μ'_s 有关, 还与高阶参量 γ 和 δ 有关

$$\gamma = (1 - g_2)/(1 - g_1), \delta = (1 - g_3)/(1 - g_1) \quad (2)$$

式中 g_n 是相函数 $p(\theta)$ 的 n 阶勒让德矩^[11-12].

$$\begin{aligned} \Psi_l(\rho; \gamma; \delta) = & C_- h_l(-v_-) [Q_l(-v_- r_1) - \\ & Q_l(-v_- r_3)] + C_+ h_l(-v_+) \\ & [Q_l(-v_+ r_1) - Q_l(-v_+ r_2)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 C_{\pm} 和 $h_l(v_j)$ 是只与光学参量有关的量, $Q(x)$ 与 ρ 有关, 这里 x 对应式中的 $-v_- r_1, -v_- r_3, -v_+ r_1, -v_+ r_2$,

$$\begin{aligned} r_1^2 = & \rho^2 + z_0^2, r_2^2 = \rho^2 + (z + z_0 + 2z_{b1})^2, \\ r_3^2 = & \rho^2 + (z + z_0 + 2z_{b2})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中的 $z_{b1} = 2A\mu_a/v_+^2, z_{b2} = 2A\mu_a/v_-^2$ 是两个外推边界的位置^[12-13], 当折射率为 1.4 时, $A = 2.94$. V_+ 和 V_- 分别为

$$v_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{18}} (\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \gamma_a})^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$v_- = \frac{1}{\sqrt{18}} (\beta - \sqrt{\beta^2 - \gamma_a})^{\frac{1}{2}}$$

式中,

$$\begin{aligned} \beta = & 27\mu_a(\mu_a + \mu'_s) + 28\mu_a(\mu_a + \mu'_s\delta) + \\ & 35(\mu_a + \mu'_s\gamma)(\mu_a + \mu'_s\delta) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\gamma_a = 3780\mu_a(\mu_a + \mu'_s)(\mu_a + \mu'_s\gamma)(\mu_a + \mu'_s\delta)$$

式(3)中的 $C_{\pm}, h_l(v_j)$ 和 $Q(x)$ 的具体形式可参见文献[12].

2 漫反射对一阶散射参量的灵敏度

漫反射率 $R(\rho; \gamma; \delta)$ 对一阶散射参量的灵敏度定义为: $S_{ps} = -\frac{1}{R(\rho; \gamma; \delta)} \frac{\partial R(\rho; \gamma; \delta)}{\partial \mu'_s}$, 单位为长度单位. S_{ps} 表示了由于一阶散射参量 μ'_s 的变化导致漫反射率变化的相对量, 反映了 μ'_s 对 P_3 近似漫反射的影响. 利用式(1)~(6), 推导后得到

$$S_{ps} = -R^{-1} (V_{iso_1} + V_{tran} + V_{iso_2} + V_{asym}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{iso_1} = & \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] [C_+ h_l(-v_+) Q_l(-v_+ r_1) + C_+ h'_l(-v_+) Q_l(-v_+ r_1) + C_+ h_l(-v_+) \cdot \\ & Q'_l(-v_+ r_1)] S_l(\rho; z_0) + \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] C_+ h_l(-v_+) Q_l(-v_+ r_1) S'_l(\rho; z_0) \\ V_{tran} = & \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] [C_+ h_l(-v_+) Q_l(-v_+ r_2) + C_+ h'_l(-v_+) Q_l(-v_+ r_2) + C_+ h_l(-v_+) \cdot \\ & Q'_l(-v_+ r_2)] S_l(\rho; z_0) + \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] C_+ h_l(-v_+) Q_l(-v_+ r_2) S'_l(\rho; z_0) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_{iso_2} = & \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] [C_- h_l(-v_-) Q_l(-v_- r_1) + C_- h'_l(-v_-) Q_l(-v_- r_1) + C_- h_l(-v_-) \cdot \\ & Q'_l(-v_- r_1)] S_l(\rho; z_0) + \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] C_- h_l(-v_-) Q_l(-v_- r_1) S'_l(\rho; z_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{asym} = & \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] [C_- h_l(-v_-) Q_l(-v_- r_3) + C_- h'_l(-v_-) Q_l(-v_- r_3) + C_- h_l(-v_-) \cdot \\ & Q'_l(-v_- r_3)] S_l(\rho; z_0) + \sum_{l=0}^3 [(2l+1)/4\pi] C_- h_l(-v_-) Q_l(-v_- r_3) S'_l(\rho; z_0) \end{aligned}$$

式中 $C_{\pm}(v_{\pm}), h'_l(v_j), Q'_l(x)$ 分别表示 $C_{\pm}(v_{\pm}), h_l(v_j), Q_l(x)$ 对其宗量 v_j 或 x 的导数.

$$C_+ = \{5v_+^4 v_+ [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - v_-^2] - 2v_+^5 v_- v'_- + 3\mu_a v_+^5\} / 12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)(v_-^2 - v_+^2) - \{v_+^5 [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - v_-^2] [(v_-^2 - v_+^2) + 2(\mu_a + \mu'_s)(v_- v'_- - v_+ v'_+)]\} / 12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)^2 (v_-^2 - v_+^2)^2 \quad (9)$$

$$C_- = \{5v_-^4 v'_- [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - v_+^2] - 2v_-^5 v_+ v'_+ + 3\mu_a v_-^5\} / 12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)(v_+^2 - v_-^2) - \{v_-^5 [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - v_+^2] [(v_+^2 - v_-^2) + 2(\mu_a + \mu'_s)(v_+ v'_+ - v_- v'_-)]\} / 12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)^2 (v_+^2 - v_-^2)^2$$

$$h'_1(v_j) = \frac{\mu_a v'_j}{v_j^2}, h'_2(v_j) = \frac{3\mu_a v_j - 6\mu_a(\mu_a + \mu'_s) v'_j}{2v_j^3} \quad (10)$$

$$h'_3(v_j) = -\frac{9}{14} \frac{\mu_a(\mu_a + \mu'_s\delta) v_j - \mu_a(\mu_a + \mu'_s) [(\mu_a + \mu'_s\delta) v'_j + v_j\delta]}{(\mu_a + \mu'_s\delta)^2 v_j^2} + \frac{3}{14} \frac{v'_j(\mu_a + \mu'_s\delta) - v_j\delta}{(\mu_a + \mu'_s\delta)^2}$$

$$\begin{aligned} Q'_0(x) = & Q_0(x)(1-x^{-1})x', Q'_1(x) = [Q_1(x)(1-x^{-1}) + Q_0(x)x^{-2}]x' \\ Q'_2(x) = & [Q_2(x)(1-x^{-1}) + Q_0(x)(3x^{-2} - 6x^{-3})]x' \end{aligned} \quad (11)$$

$$Q'_3(x) = [Q_3(x)(1-x^{-1}) + Q_0(x)(6x^{-2} - 30x^{-3} + 45x^{-4})]x'$$

式(9)~(11)中的 v'_+, v'_-, x' 分别表示 v_+, v_-, x 对一阶散射参量 μ'_s 的导数.

$$\dot{v}_{\pm} = \frac{1}{2\sqrt{18}}(\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \gamma_a})^{1/2} [\beta' \pm \frac{1}{2}(\beta^2 - \gamma_a)^{\frac{1}{2}}(2\beta\beta' - \gamma_a')] \quad (12)$$

$$x' = -(v_j r_i + v_j' r_i') \quad (13)$$

式中 β' 和 γ_a' 是 β 和 γ_a 对一阶散射参量 μ_s' 的导数, r_i' 是 r_i 对其宗量 v_j 和 μ_s' 的导数.

$$\begin{aligned} \beta' &= 27\mu_a + 28\mu_a\delta + 35\delta(\mu_a + \mu_s'\gamma) + 35\gamma(\mu_a + \mu_s'\delta) \\ \gamma_a' &= 3780\mu_a[(\mu_a + \mu_s'\gamma) \cdot (\mu_a + \mu_s'\delta) + \gamma(\mu_a + \mu_s') \cdot (\mu_a + \mu_s'\delta) + \delta(\mu_a + \mu_s') \cdot (\mu_a + \mu_s'\gamma)] \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_1' &= z_0(\rho^2 + z_0^2)^{-1/2} z_0' = -z_0^3(\rho^2 + z_0^2)^{-1/2} \\ r_2' &= -8A\mu_a v_+^{-3} [\rho^2 + (z + z_0 + 2z_{b_1})^2]^{-1/2} \cdot (z + z_0 + 2z_{b_1}) v_+ \\ r_3' &= -8A\mu_a v_+^{-3} [\rho^2 + (z + z_0 + 2z_{b_2})^2]^{-1/2} \cdot (z + z_0 + 2z_{b_2}) v_- \quad (15) \end{aligned}$$

对于式(8)中各项的 $S_i'(\rho; z_0)$ 分别为

$$\begin{aligned} S_1'(\rho; z_0) &= k_2 [(-z_0^2)(\rho^2 + z_0^2)^{1/2} + z_0^4(\rho^2 + z_0^2)^{-1/2}] / (\rho^2 + z_0^2) \\ S_2'(\rho; z_0) &= 3k_3 \cdot [(-z_0^3)(\rho^2 + z_0^2) + z_0^5] / (\rho^2 + z_0^2)^2 + 3k_5 \cdot \rho^2 z_0^3 / (\rho^2 + z_0^2)^2 \\ S_3'(\rho; z_0) &= k_4 \cdot [(-15z_0^4)(\rho^2 + z_0^2)^{3/2} + 15z_0^6(\rho^2 + z_0^2)^{1/2}] / 2(\rho^2 + z_0^2)^3 + \\ &\quad \frac{15k_6 z_0^2 \rho^2 - (\rho^2 + z_0^2)^{2/3} + 3z_0^2(\rho^2 + z_0^2)^{1/2}}{2(\rho^2 + z_0^2)^3} \\ &\quad \frac{3k_2 z_0^2 - (\rho^2 + z_0^2)^{1/2} + z_0^2(\rho^2 + z_0^2)^{-1/2}}{2(\rho^2 + z_0^2)} \quad (16) \end{aligned}$$

结合前述的相关表达式, 就可得到 P_3 近似漫反射率对一阶散射参量的灵敏度 S_{ps} .

3 结果与讨论

根据分析, $S_{ps}(\rho)$ 是生物组织的光学参量 μ_a 、 μ_s' 、 γ 和 δ 的函数. 为了分析和比较的方便, 在数值计算中, 选取 $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_s' = 1.00 \text{ mm}^{-1}$, γ 和 δ 分别为 1.9 和 2.71, 介质的折射率 $n = 1.4$. 根据所设参量值, 得到输运平均自由程 $l_t \equiv 1/(\mu_a + \mu_s') \approx 1/\mu_s' = 1 \text{ mm}$. 图 2 是一阶散射参量灵敏度的数值计算结果, 其中的实线是 $S_{ps}(\rho)$, 虚线是相应于漫射近似下的 $S_{ms}(\rho)$, $S_{ms}(\rho)$ 的具体解析见参考文献

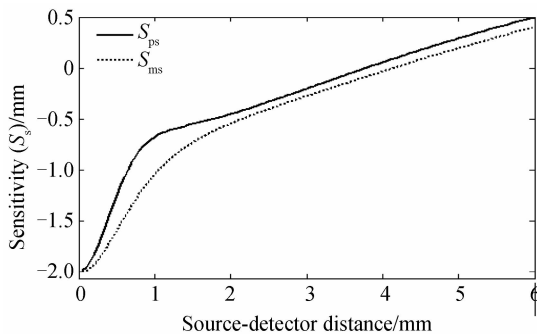


图 2 P_3 近似和漫射近似空间分辨漫反射对一阶散射参量的灵敏度

Fig. 2 Sensitivities of first-order scattering parameter for spatial-resolved diffuse reflectance of P_3 approximation and diffusion approximation

[8]. 从图 2 可以看出: 1) 在 $\rho < 2l_t$ 区域, $S_{ps}(\rho)$ 和 $S_{ms}(\rho)$ 明显不同, 如在 $\rho = 1l_t$ 处, $S_{ps}(\rho)$ 达 -70% , 而 $S_{ms}(\rho)$ 达 -105% , 这源于 $S_{ps}(\rho)$ 与散射相函数的高阶参量 γ 和 δ 有关, 能描述光源附近区域散射参量对反射率的影响; 2) 在 $\rho \geq 2l_t$ 区域, $S_{ps}(\rho)$ 和 $S_{ms}(\rho)$ 基本变化趋势相近, 但曲线并不重合, 随着 ρ 的变化约为 $0.25/l_t$, 这表明在漫射近似区域, 二阶参量 γ 的影响是不能忽略的; 3) 在约 $\rho < 4l_t$ 的区域, 灵敏度 $S_{ps}(\rho)$ 和 $S_{ms}(\rho)$ 都系统上为负, 即 μ_s' 的增加引起反射率的增加, 表明通过表层组织的背向散射几率高; 而在约 $\rho > 4l_t$ 区域, 灵敏度 $S_{ps}(\rho)$ 和 $S_{ms}(\rho)$ 都系统上为正, 即 μ_s' 的增加引起反射率的降低, 表明通过深层组织的前向散射几率高; 4) 在 $\rho = 4l_t$ 附近, 分别有 $S_{ps}(\rho) = 0$ 和 $S_{ms}(\rho) = 0$, 即 μ_s' 的变化对反射率的影响最弱, 反射率的影响主要由组织吸收的变化引起, 故在 $S_{ps}(\rho) = 0$ 和 $S_{ms}(\rho) = 0$ 的位置处由反射率可最大限度地获取组织吸收及其变化信息; 但其所处位置是不同的, 分别为 $\rho = 3.8l_t$ 和 $\rho = 4.1l_t$.

从图 2 得到的对应 $S_{ps}(\rho) = 0$ 的距离 $\rho = 3.8l_t$, 因在上述讨论中输运平均自由程 $l_t \equiv 1/(\mu_a + \mu_s') \approx 1/\mu_s'$, $\rho_{S_{ps}=0}$ (对应 $S_{ps}(\rho) = 0$ 的 ρ 简称为 $\rho_{S_{ps}=0}$) 随 μ_s' 增大而减小, 遵循规律 $\rho_{S_{ps}=0} = 3.8/\mu_s'$. 若组织的光学参量 μ_a 相对于 μ_s' 不可近似忽略时, 输运平均自由程 $l_t \equiv 1/(\mu_a + \mu_s') = 1/\mu_t'$, 则这时 $\rho_{S_{ps}=0} = 3.84/\mu_t'$, $\rho_{S_{ps}=0}$ 与 μ_s' 和 μ_a 均有关. 为了讨论这种关联性, 分别对 $\mu_a = 0.01, 0.05, 0.1 \text{ mm}^{-1}$ 的 $\rho_{S_{ps}=0}$ 随 μ_s' 变化情况绘成曲线图 3. 在图 3 中, 当 $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$ 时, 对于 μ_s' 的变化范围 $1 \text{ mm}^{-1} \sim 2 \text{ mm}^{-1}$, $\rho_{S_{ps}=0}$ 从约 3.8 mm 变化到约 1.9 mm; 当 μ_a 相对较大时, $\rho_{S_{ps}=0}$ 减小且受 μ_s' 的变化影响相对减弱, 如对应 $\mu_a = 0.1 \text{ mm}^{-1}$, 对于 μ_s' 的变化范围 $1 \text{ mm}^{-1} \sim 2 \text{ mm}^{-1}$, $\rho_{S_{ps}=0}$ 从约 2.8 mm 变化到约 1.6 mm; $\rho_{S_{ps}=0}$ 对范围 $2 \text{ mm}^{-1} \sim 3 \text{ mm}^{-1}$ 内的 μ_s' 以及 μ_a 的敏感度相对都很弱, $\rho_{S_{ps}=0}$ 均值约为 1.5 mm. 对于不同 μ_s' 的组织虽

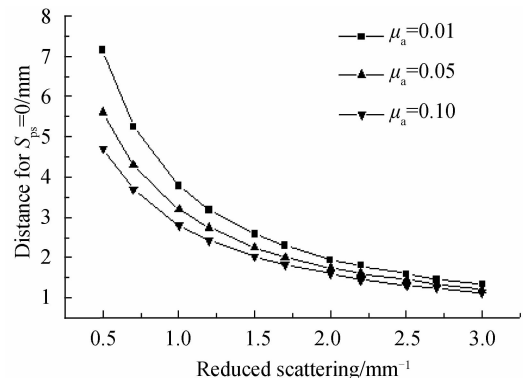


图 3 不同吸收参量下, $\rho_{S_{ps}=0}$ 随散射参量的变化情况
Fig. 3 The change of $\rho_{S_{ps}=0}$ with reduced scattering at different absorption.

然不存在唯一确定的 $\rho_{S_{ps}=0}$,但可以据此得出规律找到相应的最佳探测距离 $\rho_{S_{ps}=0}$,如当组织吸收相对较强时,对于给定 μ'_s 范围的相应 $\rho_{S_{ps}=0}$ 变化范围较小且更靠近光源,则可以此研究为基础通过测量最佳探测距离处的漫反射获取关于组织吸收变化的更有效信息.

4 结论

通过以上对 $S_{ps}(\rho)$ 的分析,可以得到以下结论:

1) $S_{ps}(\rho)$ 和 $S_{ms}(\rho)$ 的明显差别主要在近光源区域,如 $\rho=1l_i$ 处二者相差 35%,这是由于 $S_{ps}(\rho)$ 与相函数高阶参量 γ 和 δ 有关,能描述近光源区域散射参量对反射率的影响;而 $S_{ms}(\rho)$ 只涉及相函数的一阶勒让德矩 g ,所以不能准确描述近光源区域相应情况;2) 在远离光源的漫射近似区域, $S_{ps}(\rho)$ 和 $S_{ms}(\rho)$ 仍有较小差别,表明相函数高阶参量对漫射近似区域仍有影响.再次说明了在漫射近似区域, γ 的影响是不能忽略的;3) 在 $\rho=3.8l_i$ 和 $\rho=4.1l_i$ 处,分别有 $S_{ps}(\rho)=0$ 和 $S_{ms}(\rho)=0$,说明此 ρ 处漫反射率受组织散射变化影响最弱,其漫反射率变化主要由吸收变化引起,故可在此处通过测量漫反射率获取组织吸收及其变化信息;同时有 $\rho_{S_{ps}=0} \neq \rho_{S_{ms}=0}$ (对应 $S_{ps}(\rho)=0$ 和 $S_{ms}(\rho)=0$ 的 ρ 分别简写为 $\rho_{S_{ps}=0}$ 和 $\rho_{S_{ms}=0}$),由 P_3 近似理论得到的 $\rho_{S_{ps}=0}$ 比漫射近似理论得到的 $\rho_{S_{ms}=0}$ 更靠近光源,更加说明以 P_3 近似理论为基础分析光源附近组织问题的必要性.这对于由漫反射测量获取活体组织吸收及其变化信息,或以此为依据进行光学探针设计以进一步进行生物学诊断治疗等具有重要意义,同样也对检测组织散射及其变化信息具有重要的理论参考价值.

参考文献

- [1] 黄祖洽,丁鄂江. 输运理论[M]. 北京:科学出版社,1987.
 [2] 石丸. 随机介质中波的传播和散射[M]. 黄润恒,周诗健,译. 北京:科学出版社,1986.
 [3] 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.
 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.

- [4] WANG Xi-chang, HUA Zhen, MENG Zhao-kun. Time domain model of light transport in multi-layer matched biological tissues[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7):1061-1065.
 王喜昌,华臻,孟兆昆. 光在多层匹配生物组织中的时域传输模型[J]. 光子学报,2006, **35**(7):1061-1065.
 [5] ZHANG Lin, ZHANG Lian-shun, XU Tang, *et al.* In vitro and in vivo noninvasive measurements for the optical properties of the biological tissues[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1377-1381.
 张琳,张连顺,许棠,等. 生物组织光学参量的离体和体无创测量[J]. 光子学报,2004, **33**(11):1377-1381.
 [6] KIENLE A, PATTERSON M S. Improved solutions of the steady state and the time-resolved diffusion equation for reflectance from a semi-infinite turbid medium[J]. *JOSA A*, 1997, **14**(1):246-254.
 [7] KUMAR G, SCHMITT J M. Optimal probe geometry for near-infrared spectroscopy of biological tissue[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(10):2286-2293.
 [8] LIU H L. Unified analysis of the sensitivities of reflectance and path length to scattering variations in a diffusive medium. [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(10):1742-1746.
 [9] WANG Feng, DING Hai-shu, LIN Fang. The influence of probe geometry on the sensitivity of tissue oximeter using near infra-red spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, **20**(4):585-588.
 王峰,丁海曙,林方. 传感器几何结构对近红外组织氧合检测仪灵敏度的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2000, **20**(4):585-588.
 [10] LUO Yun-han, CUI Hou-xin, GU Xiao-yu, *et al.* Determination of optimal source-detector separation in measuring chromophores in layered tissue with diffuse reflectance [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, **3**(11):659-661.
 [11] HULL E L, FOSTER T H. Stead-state reflectance spectroscopy in the P_3 approximation[J]. *JOSA A*, 2001, **18**(3):584-599.
 [12] GAO Zong-hui, LIU Ying, GUO Yun-feng, *et al.* Study of spatially resolved diffuse reflection based on P_3 approximation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1220-1225.
 高宗慧,刘迎,郭云峰,等. 基于 P_3 近似的空间分辨漫反射研究[J]. 光学学报,2006, **26**(8):1220-1225.
 [13] HASKELL R C, SVAASAND L O, TSAY T, *et al.* Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer[J]. *JOSA A*, 1994, **11**(10):2727-2741.
 [14] 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.
 [15] LIU Ying, WANG Li-jun, GUO Yun-feng, *et al.* Sensitivity of spatially-resolved Diffuse reflectance to high-order optical parameters[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4):2119-2123.
 刘迎,王利军,郭云峰,等. 空间分辨漫反射的高阶参量灵敏度[J]. 物理学报,2007, **56**(4):2119-2123.

Sensitivities of the Spatial-resolved Diffuse Reflectance First-order Scattering Parameter

ZHANG Xiao-juan¹, YANG Wei¹, LIU Ying²

(1 College of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(2 Department of Physics, College of Science; Key Laboratory of Opt-electronics Information Technical Science
(Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The sensitivity expression of spatial-resolved diffuse reflectance to first-order scattering parameter was derived and numerically analyzed based on the P_3 approximation of transport theory, and the influence of scattering parameter on the P_3 approximation and diffusion approximation reflectance were also compared. The results show that; the sensitivity is distinct with that of the diffusion approximation in the region of about two transport mean free paths; the sensitivity to scattering parameter equals zero at the distance about four transport mean free paths which differs with the diffusion approximation; the optimum source-detector distance decreases with the increase of the scattering coefficient, and this change becomes more obvious with lower absorption. The research has theoretical significance to obtain absorption information of tissue with diffuse reflectance at the optimum source-detector distance.

Key words: Diffusing reflectance; P_3 approximation; Sensitivity