

混合漫射近似模型的漫反射理论 及其模拟实验研究^{*}

田会娟 刘 迎 王利军 张智卜 肖立峰[†]

(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)

(2008 年 2 月 24 日收到, 2008 年 4 月 25 日收到修改稿)

研究了一个改进的漫射近似模型. 该模型将漫射近似中的漫射系数 D 用描述 P_3 近似的漫射系数 D_{asym} 替代. 推导了这个混合的漫射近似模型在单点源近似和外推边界条件下的反射率 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的解析表达式, 比较了有效反照率 a' 对标准漫射近似 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 和 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的影响, 用 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 反演光学参量并求其误差, 对其适用范围进行了分析. 研究结果表明, 与漫射近似 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 仅适用于强散射和远离光源的情况相比, 改进后的混合漫射近似模型 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 能够应用于吸收系数较大的散射介质, 并能较好地描述光源附近的辐射强度分布.

关键词: 漫射近似, P_3 近似, 混合漫反射模型, 强吸收

PACC: 4210, 4225B, 0380

1. 引言

随机粒子在介质中传播的输运理论在许多领域有着重要的应用^[1-3]. 在生物医学领域, 漫反射光谱技术因能实现对生物介质的无创测量而备受关注^[4,5]. 其基本原理是依据光与生物组织相互作用的理论模型, 从测量的反射数据中通过反演算法得到该生物组织的光学参量. 目前较成功的理论是漫射近似. 然而, 漫射近似仅对高散射的弱吸收介质才是有效的, 一个典型的标准是 $a' > 0.98$ ^[5-7]. 有效反照率 a' 定义为 $a' \equiv \mu'_s / (\mu_a + \mu'_s)$, 其中 μ_a 是介质的吸收系数, $\mu'_s = \mu_s(1 - g)$ 称为传输散射系数或有效散射系数, g 称作介质的各向异性因子.

近些年来, 一些研究者采用不同方法来扩大漫射近似的适用范围^[7-12]. 例如对漫射系数 D 进行改进^[7,10-12]. 在标准的漫射近似中, 漫射系数 $D = 1/3(\mu_a + \mu'_s)$ ^[4,13]. Aronson 等^[10]给出了一个适合于吸收介质的漫射系数 $D = 1/3(\mu'_s + \alpha\mu_a)$. Ripoll 等^[12]将这个适合于吸收的漫射系数 D 用在漫射近似中, 并以实验证实改进的漫射近似能够描述光在强吸收介质中的传输. Hull 和 Foster^[7]在研究 P_3 近

似漫反射时提出了一种 P_3 近似与漫射近似的混合模型. 该理论模型将漫射近似中的漫射系数 D 用描述 P_3 近似的漫射系数 D_{asym} 替代.

本文对这个混合的漫射近似模型在单点源近似下的解进行了理论推导和模拟实验研究. 具体工作包括 1) 推导了单点源近似下的混合漫射近似模型的反射率 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的解析表达式; 2) 比较了有效反照率 a' 对标准漫射近似 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 和混合漫射近似 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的影响; 3) 用 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 反演光学参量并求其误差, 对其适用范围进行了分析.

2. 标准漫射近似解 $R_{\text{DA}}(\rho)$

在漫射近似下, 若光源不随时间变化, 辐射通量或称漫射总强度 $\varphi_0(r)$ 满足稳态的漫射近似方程^[13]

$$D\nabla^2\varphi_0(r) - \mu_a(r) = -\varphi(r), \quad (1)$$

式中 $\varphi(r)$ 是光源的总强度. 方程 (1) 的格林函数为

$$\Phi_G(r) = \frac{1}{4\pi D} \frac{1}{r} \exp[-\mu_{\text{eff}} r], \quad (2)$$

式中 $D = \mu_a / \mu_{\text{eff}}^2$, 称为漫射系数, μ_{eff} 称为等效衰减系数.

考虑无限细的准直光束沿 z 轴入射到一个半无

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60278004)资助的课题.

[†] E-mail: xiaolifeng79@126.com

限均匀介质,光源项可以等效为^[13]

$$q(z) = \frac{\alpha' \mu'_i}{4\pi} \exp(-\mu'_i z), \quad (3)$$

式中 $\mu'_i = \mu_a + \mu'_s$, α' 是等效光源的总强度,假设入射光的强度为 1,其值等于有效反照率.在漫射近似下,这个等效光源被处理为位于 z_0 处的一个点光源,其二阶矩与(3)式表示的线光源的二阶矩相等,即

$$\int_0^\infty z \alpha' \mu'_i \exp(-\mu'_i z) dz = \int_0^\infty z \alpha' \delta(z - z_0) dz. \quad (4)$$

解方程(4)可得 $z_0 = 1/\mu'_i$ (见图1).

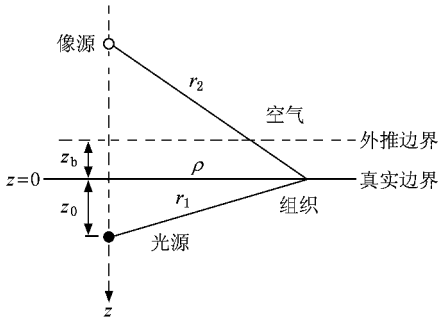


图1 单点源近似及外推边界条件的图示

对于边界的处理,目前普遍采用外推边界条件^[4].外推边界条件是假设介质的物理界面上的辐射通量并不为零,零点位于介质表面外 $z_b = 2AD$ 处. $A = (1 + R_{\text{eff}})/(1 - R_{\text{eff}})$,有效反射系数 R_{eff} 与界面的相对折射率 n_{rel} 有关,可以近似表示为^[14]

$$R_{\text{eff}} = -1.440n_{\text{rel}}^{-2} + 0.701n_{\text{rel}}^{-1} + 0.668 + 0.0636n_{\text{rel}}. \quad (5)$$

根据外推边界条件 $\varphi_0(\rho, z = -z_b) = 0$, 必须在介质外 $z = -(2z_b + z_0)$ 处引入一个镜像光源,其强度与 z_0 处的实光源相同,符号相反,如图1所示.

根据以上讨论,(1)式中的光源项 $q(r)$ 可以表示为

$$q(\rho, z) = \alpha' \delta(\rho, z - z_0) - \alpha' \delta(\rho, z + (2z_b + z_0)). \quad (6)$$

辐射通量 $\varphi_0(\rho, z) = \Phi_0(\rho, z) \otimes q(\rho, z)$, 式中符号 $\otimes$ 表示卷积.利用(2)和(6)式得到

$$\varphi_0(\rho, z) = \frac{\alpha'}{4\pi D} \left(\frac{e^{-\mu_{\text{eff}}' r_1}}{r_1} - \frac{e^{-\mu_{\text{eff}}' r_2}}{r_2} \right), \quad (7)$$

式中

$$r_1 = \sqrt{\rho^2 + (z - z_0)^2}, \quad r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z + z_0 + 2z_b)^2}.$$

对于漫射近似,辐射强度 $I(r, \hat{s})$ 能够表示为平

均漫射强度与辐射通量密度矢量 $j(r)$ 之和^[4]

$$I(r, \hat{s}) = \frac{1}{4\pi} \varphi_0(r) + \frac{3}{4\pi} j(r) \cdot \hat{s}, \quad (8)$$

根据Fick's定律 $j(r) = -D \nabla \varphi_0(r)$. 设入射光强度为 1,反射率等于介质表面漫反射光能量分布^[4,7]

$$R_{\text{DA}}(\rho) = \int_{2\pi} [1 - R_{\text{fres}}(\theta)] \frac{1}{4\pi} \times \left[\varphi_0(\rho, z=0) + 3D \frac{\partial \varphi_0(\rho, z=0)}{\partial z} \cos\theta \right] \times \cos\theta d\Omega, \quad (9)$$

式中 $R_{\text{fres}}(\theta)$ 是 Fresnel 反射系数^[15]. 对于相对折射率 $n_{\text{rel}} = 1.4$, 由(9)式得到

$$R_{\text{DA}}(\rho) = 0.118\varphi_0(\rho) + 0.306j(\rho), \quad (10)$$

式中

$$j(\rho) = \frac{\alpha'}{4\pi} \left[z_0 \left(\mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_1} \right) \frac{e^{-\mu_{\text{eff}}' r_1}}{r_1^2} + (z_0 + 2z_b) \left(\mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_2} \right) \frac{e^{-\mu_{\text{eff}}' r_2}}{r_2^2} \right],$$

$$\varphi_0(\rho) = \frac{\alpha'}{4\pi D} \left(\frac{e^{-\mu_{\text{eff}}' r_1}}{r_1} - \frac{e^{-\mu_{\text{eff}}' r_2}}{r_2} \right),$$

$$r_1 = \sqrt{\rho^2 + z_0^2},$$

$$r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z_0 + 2z_b)^2}.$$

3. 混合漫射近似模型 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$

与漫射近似相比(见(8)式), P_3 近似包括了辐射的高阶项

$$I(r, \hat{s}) = \sum_{l=0}^3 \frac{2l+1}{4\pi} \psi_l(r) P_l(r \cdot \hat{s}),$$

其辐射通量 $\psi_0(r)$ 的格林函数 $\psi_0(r)$ 可以表示为^[3]

$$\psi_0(r) = C_- Q_0(-\nu_- r) + C_+ Q_0(-\nu_+ r), \quad (11)$$

式中

$$C_- = \frac{\nu_-^5 [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - \nu_+^2]}{12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)(\nu_+^2 - \nu_-^2)},$$

$$C_+ = \frac{\nu_+^5 [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - \nu_-^2]}{12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)(\nu_-^2 - \nu_+^2)},$$

$$Q_0(x) = \frac{\exp(-x)}{x}.$$

其中

$$\nu_- = \frac{1}{\sqrt{18}} (\beta - \sqrt{\beta^2 - \gamma_a})^{1/2}, \quad (12)$$

$$\nu_+ = \frac{1}{\sqrt{18}} (\beta + \sqrt{\beta^2 - \gamma_a})^{1/2},$$

式中

$$\begin{aligned}\beta &= 27\mu_a(\mu_a + \mu'_s) + 28\mu_a(\mu_a + \mu'_s\delta) \\ &+ 35(\mu_a + \mu'_s\gamma)(\mu_a + \mu'_s\delta), \\ \gamma_a &= 3780\mu_a(\mu_a + \mu'_s)(\mu_a + \mu'_s\gamma)(\mu_a + \mu'_s\delta).\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}\gamma &= (1 - g_2)(1 - g_1), \\ \delta &= (1 - g_3)(1 - g_1),\end{aligned}\quad (13)$$

$g_1 = g$ 是散射相函数的一阶矩, g_2 和 g_3 分别是散射相函数的二阶矩和三阶矩. 对于 Henyey-Greenstein 相函数, $g_l = g^l$.

与漫射近似的格林函数(2)相比, $\psi_G(r)$ 由两项组成, 并且与辐射通量密度矢 $j_{P3}(r)$ 之间不满足 Fick's 定律, 即 $j_{P3}(r) \neq -\nabla\psi_G(r)$, 然而

$$\begin{aligned}j_{P3}(r) &= -D_{\text{asym}}\nabla[C_-Q_0(-\nu_-r)] \\ &- D_{\text{trans}}\nabla[C_+Q_0(-\nu_+r)],\end{aligned}\quad (14)$$

即 $j_{P3}(r)$ 每一项与 $\psi_G(r)$ 的对应项满足 Fick's 定律,

$$D_{\text{asym}} = \mu_a/\nu_-^2, D_{\text{trans}} = \mu_a/\nu_+^2\quad (15)$$

是相应的漫射系数, 而 ν_- 和 ν_+ 是相应的等效衰减系数. 等效衰减系数 ν_+ 仅仅对 $\rho < 2$ 个输运平均自由程范围内的光辐射分布有影响, 因此称 D_{trans} 为瞬变漫射系数. D_{asym} 与漫射系数 D 的变化趋势相同, 称为渐变漫射系数^[3]. 对于高的有效反照率介质, D_{asym} 与 D 的差别很小, 但随着吸收增加, 有效反照率降低, D_{asym} 与 D 差别越来越大.

混合漫射近似模型是用 P_3 近似的漫射系数 D_{asym} 替代漫射近似中的漫射系数 D , 使之适用于低反照率介质. 在(10)式中,

$$\begin{aligned}D &\rightarrow D_{\text{asym}} = \mu_a/\nu_-^2, \\ \mu_{\text{eff}} &= \sqrt{\mu_a/D_{\text{asym}}} = \nu_-, \\ z_b &\rightarrow 2AD_{\text{asym}} = z_{12},\end{aligned}$$

用 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 表示混合漫射近似的反射率,

$$R_{\text{Hybrid}}(\rho) = 0.118\varphi_{0,\text{Hybrid}}(\rho) + 0.306j_{\text{Hybrid}}(\rho),\quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned}j_{\text{Hybrid}}(\rho) &= \frac{\alpha'}{4\pi}\left[z_0\left(\nu_- + \frac{1}{r_1}\right)\frac{e^{-\nu_-r_1}}{r_1^2}\right. \\ &\left.+ (z_0 + 2z_b)\left(\nu_- + \frac{1}{r_2}\right)\frac{e^{-\nu_-r_2}}{r_2^2}\right],\end{aligned}$$

$$\varphi_{0,\text{Hybrid}}(\rho) = \frac{\alpha'}{4\pi D_{\text{asym}}}\left(\frac{e^{-\nu_-r_1}}{r_1} - \frac{e^{-\nu_-r_2}}{r_2}\right),$$

$$r_1 = \sqrt{\rho^2 + z_0^2},$$

$$r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z_0 + 2z_{12})^2}.$$

4. 有效反照率 a' 对 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 和 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的影响

本文采用 Wang 等^[16]编写的 Monte Carlo 模拟程序得到的反射率 $R_{\text{MC}}(\rho)$ 作为检验标准, 比较了有效反照率 a' 对 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 和 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的影响. 图 2 中纵坐标表示了漫射近似与检验标准的相对误差 $\Delta R/R = |R(\rho) - R_{\text{MC}}(\rho)|/R_{\text{MC}}(\rho)$, $R(\rho)$ 表示 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 或 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$, 横坐标是光源与探测器之间的距离 ρ .

为了比较方便, 在本文的计算中, 保持 $\mu'_s = 1.0 \text{ mm}^{-1}$, $n = 1.4$ 不变, 光源与探测器间距范围为 $\rho \leq 10 \text{ mm}$. 进行 Monte Carlo 模拟计算时, 采用了 Henyey-Greenstein 相函数, 取其参数 $g = 0.9$. 根据(13)式, 高阶参量 $\gamma = 1.9$, $\delta = 2.71$, 考虑了准直光束入射到半无限均匀介质情况, 光子个数为 10^6 .

图 2 考虑了吸收系数 μ_a 值分别为 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 mm^{-1} 六种情况, 根据有效反照率 a' 和输运平均自由程 l'_t 的定义

$$a' \equiv \mu'_s/(\mu_a + \mu'_s), l'_t \equiv 1/(\mu_a + \mu'_s),$$

相应的 a' 分别为 0.99, 0.95, 0.91, 0.83, 0.67, 0.5, 而 l'_t 数值上与 a' 相等.

从图 2 可以看到, 对于高反照率情况, 例如 $a' > 0.9$, $R_{\text{DA}}(\rho)$ 和 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 没有明显的差别, 如图 2(a)(b)(c) 所示, 甚至 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 的误差还要小于 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的误差 (见图 2(c)). 但是对于 $a' < 0.9$ 情况 (对应图 2(d)(e)(f)), 随着吸收系数 μ_a 增加, $R_{\text{DA}}(\rho)$ 误差变得越来越大, 而 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的误差要小得多. 随着吸收系数 μ_a 增加, $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的误差从 5% 增加到 20%, ρ 的适用范围分别为 $2l'_t$ — $10l'_t$, $3l'_t$ — $10l'_t$, $5l'_t$ — $10l'_t$, 即随着反照率降低, 混合漫射近似适用区域越来越远离光源, 并越来越小. 出现这种情况是由于我们对光源的近似过于简单的缘故.

图 3 显示了双点源近似下有效反照率 a' 对标准漫射近似 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 和 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 的影响, 图中相应的 a' 分别为 0.99, 0.95, 0.91, 0.83, 0.67, 0.5, 而 l'_t 数值上与 a' 相等. 比较图 2, 我们发现当 $a' < 0.67$ 时 (对应图中(e)(f)), 采用双点源近似后, 混合漫射近似模型对光源附近辐射场的描述比单点源近似要改善很多, 但是对于高反照率情况, 双点源近似反而给混合漫射近似模型带来更大的误差.

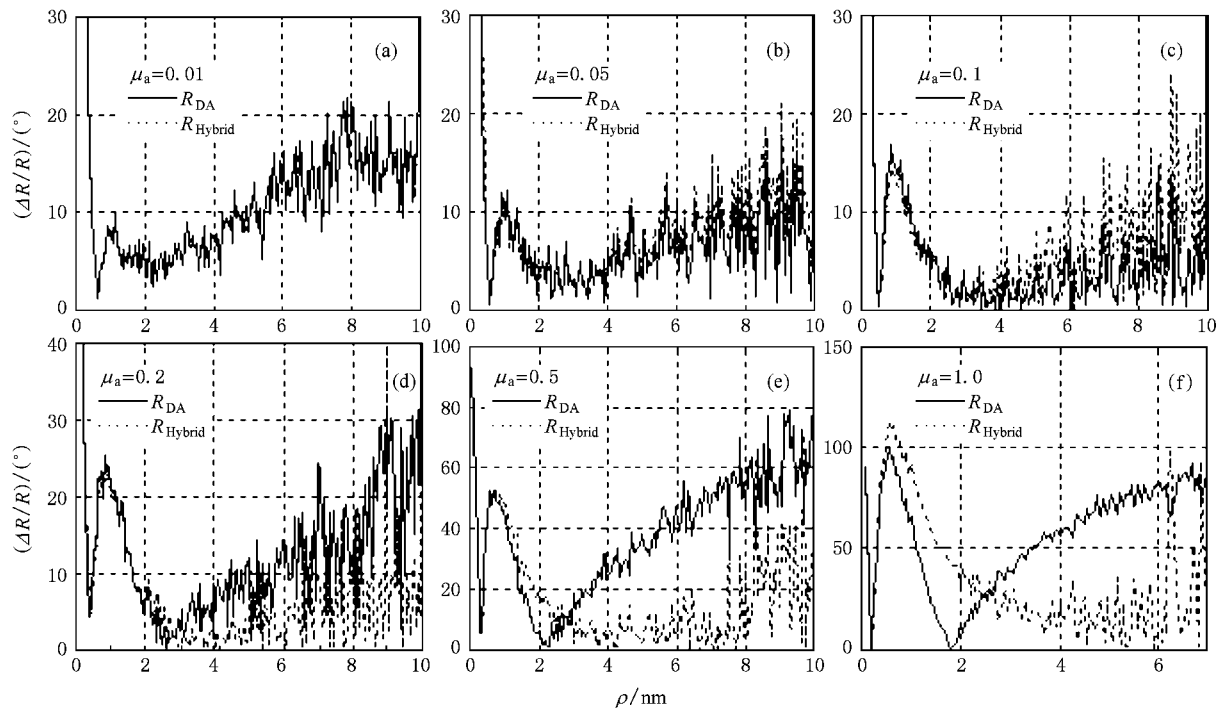


图 2 在单点源近似下 取不同的吸收系数时 标准漫射近似 $R_{DA}(\rho)$ 和混合漫射近似 $R_{Hybrid}(\rho)$ 与 Monte Carlo 模拟 $R_{MC}(\rho)$ 之间的相对误差

5. 用 $R_{Hybrid}(\rho)$ 反演光学参量及其误差

结果作为实验数据 与 $R_{Hybrid}(\rho)$ 进行拟合 反演得到组织的光学参数 μ_a 和 μ'_s 结果如图 4 和图 5 所示.

由图 4(a)可以明显看出,在吸收系数 $\mu_a = 0.01\text{--}1.0\text{ mm}^{-1}$ 的取值范围内 ($a' = 0.99\text{--}0.5$), 利

本文采用非线性最小二乘法 将 Monte Carlo 模拟

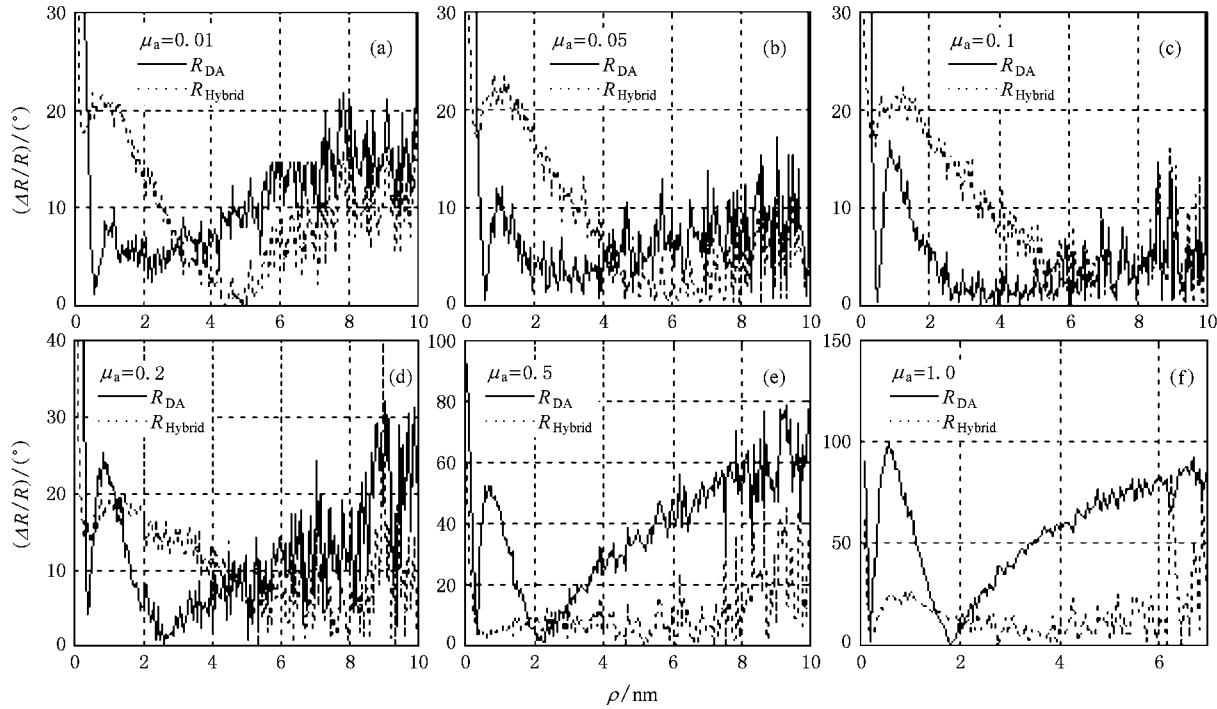


图 3 在双点源近似下 取不同的吸收系数时 标准漫射近似 $R_{DA}(\rho)$ 和混合漫射近似 $R_{Hybrid}(\rho)$ 与 Monte Carlo 模拟 $R_{MC}(\rho)$ 之间的相对误差

用混合漫射近似模型能够得到较好的反演结果.除 $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$ 以外,由 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 反演得到的吸收系数 μ_a 与 Monte Carlo 模拟所用 μ_a 之间的误差随 μ_a 的增大有所增加,但均小于 20% (见图 4(b)).

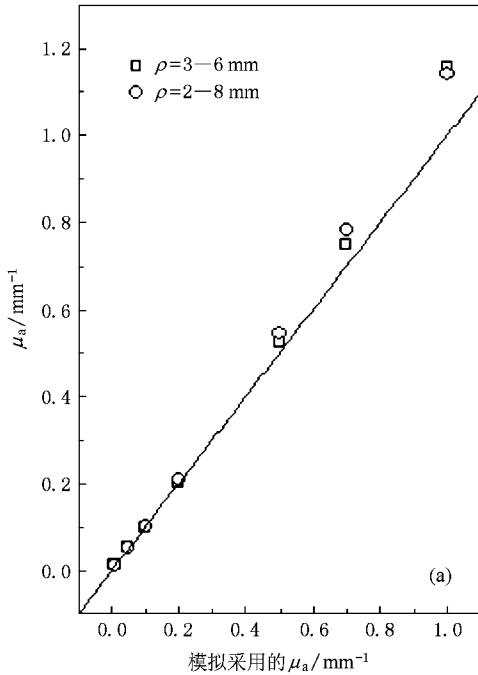


图 4 (a) 当 μ_a 值分别为 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0 mm^{-1} 时,用混合漫射近似 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 反演 Monte Carlo 模拟数据得到的 μ_a 值,斜线为反演结果与模拟中用到的 μ_a 相等时的情况 (b) 反演得到 μ_a 与模拟采用的 μ_a 之间的相对误差

据图 2 的分析知道,在反演光学参量时,选择合适的 ρ 的起始位置和范围是必要的,图 4 表示了 ρ 3—6 mm 和 ρ 2—8 mm 两种情况,并且当 $\rho_{\text{start}} = 3 \text{ mm}$ 时,得到较好的结果.

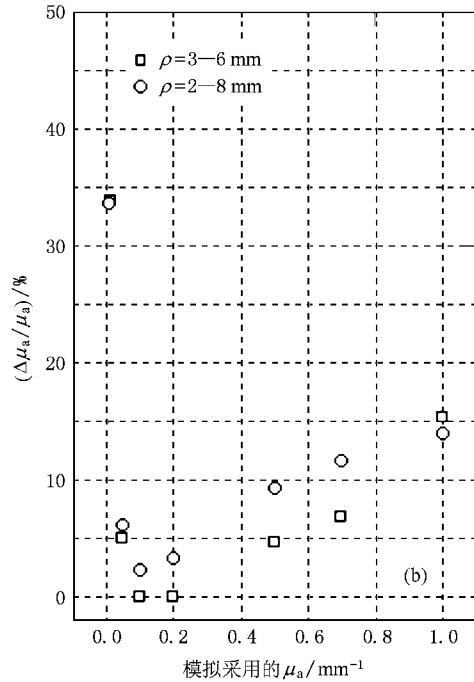


图 5 是利用混合漫射近似模型反演 μ'_s 的结果.从图 4 可以清晰地看出,选择 $\rho_{\text{start}} = 3 \text{ mm}$ 反演得到较好的结果,在 $\mu_a \leq 0.5 \text{ mm}^{-1}$ ($a' > 0.67$) 范围内,其最大误差小于 10%.随着吸收系数 μ_a 增加,反演 μ'_s 的误差增大.

6. 结 论

由以上分析可以得出,标准的漫射近似 $R_{\text{DA}}(\rho)$ 仅适用于强散射的情况,而改进后的混合漫射近似模型 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 能够应用于吸收系数较大的散射介质,并能较好地描述光源附近的辐射强度分布.因此用混合漫射近似模型 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 反演组织的光学参量时,能够得到比应用标准漫射近似模型更准确的结果.

然而以上讨论仅侧重在低反照率问题.对于低

反照率的散射介质,由于吸收系数比较大,导致远离光源处的光辐射强度很小,因此需要对光源附近的辐射场进行测量.光源附近的光辐射分布与散射相函数的高阶参量 γ 和 δ 有关^[3],本文研究的混合漫射近似模型,在 D_{asym} 包括了描述散射介质的高阶光学参量 γ 和 δ (见(13)式).为了避免参量 γ 和 δ 给本文讨论有效反照率 a' 问题带来复杂性,本文暂时搁置了对高阶参量 γ 和 δ 的讨论.另一个重要问题是光源近似.本文对单点源近似和双点源近似的研究表明,在处理低反照率问题时,同时处理好光源近似也是非常重要的.

生物组织在可见光波段($\lambda = 400\text{—}600 \text{ nm}$)和近红外波段($\lambda > 1.0 \mu\text{m}$)的有效反照率 a' 能够低至 0.5,甚至更小,因此本文的研究工作对发展漫反射光谱测量技术具有重要意义,并且对光辐射测量理论具有一定的参考价值.

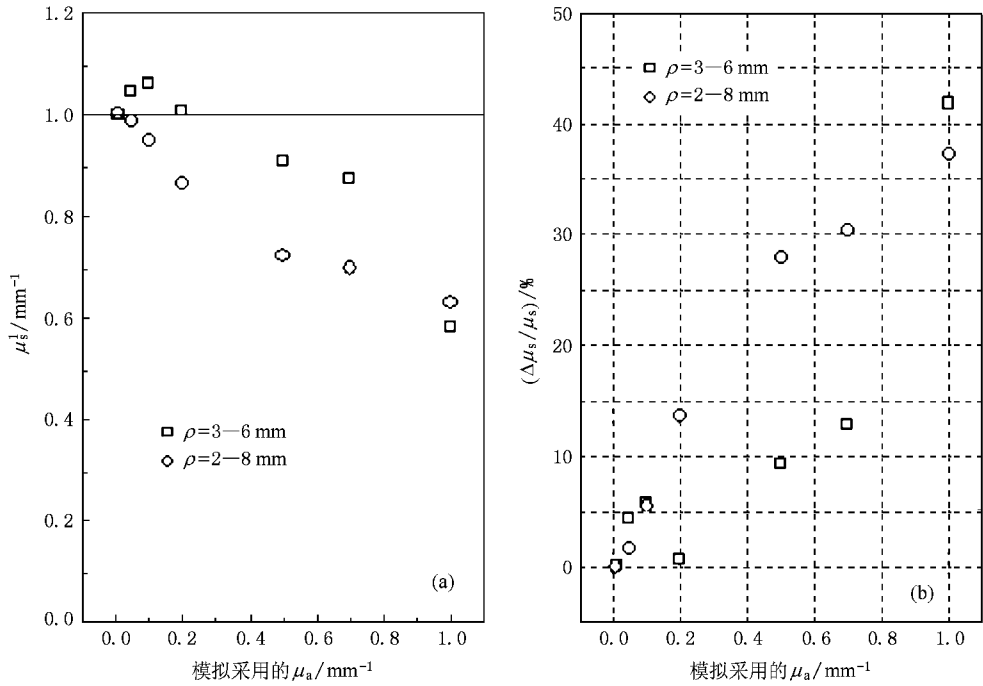


图 5 (a)当 μ_a 值分别为 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0 mm^{-1} 时,用混合漫射近似 $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ 反演 Monte Carlo 模拟数据得到的 μ'_s ,平行线为用在模拟中的 μ'_s (b)反演得到 μ'_s 与模拟采用的 $\mu'_s = 1.0 \text{ mm}^{-1}$ 之间的相对误差

[1] Huang Z Q , Ding E J 1987 *Transfers Theory* (Beijing : Science Press)(in Chinese) [黄祖洽、丁鄂江 1987 输运理论(北京 : 科学出版社)]

[2] Liang Z C , Jin Y Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 247 (in Chinese) [梁子长、金亚秋 2003 物理学报 **52** 247]

[3] Liu Y , Wang L J , Guo Y F , Zhang X J , Gao Z H , Tian H J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2119 (in Chinese) [刘 迎、王利军、郭云峰、张小娟、高宗慧、田会娟 2007 物理学报 **56** 2119]

[4] Kienle A , Patterson M S 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 246

[5] Xu H P , Farrel T J , Patterson M S 2006 *J. Biomed. Opt.* **11** 041104

[6] Fishkin J B , Fantini S , VandeVen M J , Gratton E 1996 *Phys. Rev. E* **53** 2307

[7] Hull E L , Foster T H 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 584

[8] Venugopalan V , You J S , Tromberg B J 1998 *Phys. Rev. E* **58** 2395

[9] Hayakawa C K , Hill B Y , You J S , Bevilacqua F , Spanier J , Venugopalan V 2004 *Appl. Opt.* **43** 4677

[10] Aronson R , Corngold N 1999 *J. Opt. Soc. Am. A* **16** 1066

[11] Elaloufi R , Carminati R , Greffet J J 2003 *J. Opt. Soc. Am. A* **20** 678

[12] Ripoll J , Yessayan D , Zacharakis G , Ntziachristos V 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 546

[13] Farrell T J , Patterson M S , Wilson B C 1992 *Med. Phys.* **19** 879

[14] Groenhuis R A J , Ferwerda H A , Bosch J J T 1983 *Theory Appl Opt.* **22** 2456

[15] Haskell R C , Svaasand L O , Tsay T T , Feng T C , McAdams M S , Tromberg B J 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 2727

[16] Wang L H , Jacques S L , Zheng L Q 1995 *Computer Methods and Programs in Biomedicine* **47** 131

Study of diffuse reflectance based on a hybrid diffusion approximation and simulating experiment^{*}

Tian Hui-Juan Liu Ying Wang Li-Jun Zhang Zhi-Bo Xiao Li-Feng[†]

(College of Science , Key Laboratory of Opt-electronics Information Technical Science , EMC Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 24 February 2008 ; revised manuscript received 25 April 2008)

Abstract

A modified diffusion approximation is investigated. In this theoretical model , diffusion coefficient D of the standard diffusion approximation is substituted by diffusion coefficient D_{asym} of P_3 approximation. Analytic solution $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ of this hybrid diffusion for reflectance in single source approximation and steady-state case with extrapolated boundary is obtained ; influences of the transport albedo a' on the standard diffusion approximation $R_{\text{DA}}(\rho)$ and the hybrid diffusion approximation $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ are compared ; recovering of optical parameters from diffuse reflectance $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ is demonstrated , and the errors and application ranges are studied. The results show that this hybrid diffusion approximation $R_{\text{Hybrid}}(\rho)$ can be used in strong absorption media and at short source-detector separation.

Keywords : diffusion approximation , P_3 approximation , hybrid diffusion reflectance , strong absorption medium

PACC : 4210 , 4225B , 0380

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.60278004).

[†] E-mail : xiaolifeng79@126.com