

有限厚均匀及层状组织的光学参数测量

喻碧莺 李 晖

(福建师范大学物理与光电信息科技学院福建省光子技术重点实验室,
医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要 生物组织表面时间分辨漫射光中包含有组织体的光学特性信息,通过测量组织表面的漫射光可间接获得组织的光学参数,从而得到与组织光学参数密切相关的组织的结构及生理和病理状态信息。在多程测量的基础上,使用单参数(约化散射系数)最小二乘牛顿法拟合方法和双参数(约化散射系数、幅度因子)最小二乘牛顿法拟合方法,得到有限厚均匀组织的反射率分布和透射率分布公式中除去包含测量位置的指数项的其它部分对测量位置皆具有弱依赖性的结论,并对拟合结果进行了分析讨论;而对于有限厚平板状双层组织,可根据对反射测量结果及透射测量结果进行拟合所得的约化散射系数间的差异及常数因子的正负判断双层组织的可能结构分布。

关键词 医用光学与生物技术;光学参数测量;时间分辨漫射光谱;多程测量;蒙特卡罗模拟;最小二乘拟合

中图分类号 R318.51 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0235

Time-resolved Optical Parameters Determination for the Finite-Thickness Homogeneous and Layered Tissue

Yu Biying Li Hui

(Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education, School of Physic and Optoelectronic Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract The diffusion light detected from bio-tissue surface contains tissue optical parameters information. So tissue optical parameters can be obtained indirectly by the diffusion light measuring, then optical parameters resolved tissue structure, physiology and pathology state information can be obtained finally. A multi-distance measurements method is employed in this paper. A single parameter (reduced scattering coefficient) fitting method and a double parameters (reduced scattering coefficient and amplitude factor) fitting method on the basis of the least square Newton fitting algorithm is used to derive the optical parameters respectively. For the finite-thickness homogenous tissue, it can be concluded that the rest terms in expressions of diffusion reflectance and transmittance for the corresponding tissue geometries that subtract the exponential term contained source-detector distance depend on the detected position weakly. And some discussions are included. Additionally, the probable structure information for the finite-thickness two-layered slab tissue can be obtained from the diffusion reflectance and transmittance measurements according to the discrepancies of fitting reduced scattering coefficient and the sign (positive or negative) of the amplitude factor.

Key words medical optics and biotechnology; optical parameters determination; time-resolved diffusion spectroscopy; multi-distance measurements; Monte-Carlo simulation; least square fitting algorithm

1 引 言

生物组织表面时间分辨漫射光中包含有组织体的光学特性信息^[1,2]。将组织表面测量得到的实验数据或者蒙特卡罗(MC)模拟数据拟合相应的漫射方程即可得到组织的光学参数,从而得到与组织光

学参数密切相关的组织的结构及生理和病理状态信息^[3,4]。因此,研究如何从漫射光中更为准确地提取组织的光学特性参数对于利用光学手段进行医学诊断和治疗具有重大的意义。

当前,组织表面光分布的漫射解所使用的边界

基金项目: 国家自然科学基金(60578056)、福建省自然科学基金(A0520001)、教育部优秀青年教师资助项目(BD5050)和福建省教育厅 B 类项目(JB08061)资助课题。

作者简介: 喻碧莺(1980—),女,助教,主要从事激光医学及组织光学等方面的研究。E-mail: hli@fjnu.edu.cn

条件主要有零边界条件、部分流边界条件和外推边界条件^[5~7]。不同的边界条件对拟合得到的光学参数的精度有着很大的影响。R. K. Wang 等^[8]通过同时测量两个不同位置的时间分辨漫反射率,再加上漫射理论来计算半无限大均匀组织的光学参数。其得到的吸收系数 μ_a 和约化散射系数 μ'_s 均能达到较高的精度,并且得到的 μ'_s 不依赖于所使用的边界条件。但此法在测量原理上假设漫射系数 $D = 1/3\mu'_s$, 这与 D. J. Durian 等^[9] 和 R. Aronson 等^[10] 得到的在漫射理论中不能轻易忽略吸收系数对漫射系数的影响的实验结论不符,故若要获得较高的计算精度,该法较适用于 $\mu'_s \gg \mu_a$ 的介质。此后, F. Martelli 等^[11] 在此基础上提出了一个称为多程测量的方法(MDM)。与 R. K. Wang 等^[8] 使用计算的方式来获得组织光学参数不同的是,该法通过将同时测量的两个不同位置的时间分辨漫反射率数据相除并取其自然对数后再去拟合其相应公式,获得了无吸收半无限大均匀组织及半无限大层状组织的光学参数(μ'_s),并且从中得到层状组织的结构信息,但未对有限厚度层状组织进行研究。本文将使用 MDM 方法通过漫反射及漫透射两种测量方式对有限厚均匀介质及有限厚双层介质进行研究,这样组织上下表面的光学参数均能够通过拟合得到。同样,由于该法中测量原理的限制,即该法较适用于 $\mu'_s \gg \mu_a$ 的介质,为了方便起见,本文中设组织体为无吸收介质。

2 多程测量方法的理论基础

厚度为 d 的有限厚平板状均匀介质的漫反射解及漫透射解^[6,7]可分别表示为

$$R(r, t) = h_{\text{homo-slab}}(d, \mu_a, \mu'_s, n, t) \exp\left(-\frac{r^2}{4Dct}\right), \quad (1)$$

$$T(r, t) = h'_{\text{homo-slab}}(d, \mu_a, \mu'_s, n, t) \exp\left(-\frac{r^2}{4Dct}\right), \quad (2)$$

其中 $D = 1/3\mu'_s$ 为漫射系数, c 为光在组织中的传播速度。

从式中可知,对于同一介质, h 或 h' 函数与测量位置无关而与介质本身的性质及所使用的边界条件有关。通过将两个源探测器位置 r_1 和 r_2 处的时间分辨漫反射(漫透射)解相除,即可消去函数 h 或 h' , 那么通过对公式(1)及公式(2)进行变形即可得

$$\ln\left[\frac{R(r_2, t)}{R(r_1, t)}\right] = -\frac{r_2^2 - r_1^2}{4Dct}, \quad (3)$$

$$\ln\left[\frac{T(r_2, t)}{T(r_1, t)}\right] = -\frac{r_2^2 - r_1^2}{4Dct}, \quad (4)$$

同样,对于双层有限厚板状介质时间分辨漫反射解和漫透射解^[12]亦可分别表示为

$$R(r, t) = h_{\text{layered-slab}}(d_0, d_1, \mu_{a0}, \mu_{a1}, \mu'_{s0}, \mu'_{s1}, n, t) \times \exp\left(-\frac{r^2}{4D_0ct}\right), \quad (5)$$

$$T(r, t) = h'_{\text{layered-slab}}(d_0, d_1, \mu_{a0}, \mu_{a1}, \mu_{s0}, \mu_{s1}, n, t) \times \exp\left(-\frac{r^2}{4D_1ct}\right), \quad (6)$$

其中, $D_0 = 1/3\mu'_{s0}$ 为层状介质上表面的漫射系数, $D_1 = 1/3\mu'_{s1}$ 为层状介质下表面的漫射系数。下标 0, 1 分别表示介质的上层和下层。同样,通过将两个源探测器位置 r_1 和 r_2 处的时间分辨漫反射(漫透射)解相除,即可消去函数 h 或 h' , 那么通过对所得公式进行变形可分别得到与公式(3)和公式(4)相似的表达式,如下所示

$$\ln\left[\frac{R(r_2, t)}{R(r_1, t)}\right] = -\frac{r_2^2 - r_1^2}{4D_0ct}, \quad (7)$$

$$\ln\left[\frac{T(r_2, t)}{T(r_1, t)}\right] = -\frac{r_2^2 - r_1^2}{4D_1ct}, \quad (8)$$

研究表明,半无限大层状介质漫反射解中函数 h 对测量位置 r 具有弱依赖性^[11], 因此,我们认为有限厚介质的反射解中的函数 h 和透射解中函数 h' 对测量位置 r 应亦具有弱依赖性。故在式子中分别加入常数因子 A 及 A' , 如下所示

$$\ln\left[\frac{R(r_2, t)}{R(r_1, t)}\right] = A - \frac{r_2^2 - r_1^2}{4D_0ct}, \quad (9)$$

$$\ln\left[\frac{T(r_2, t)}{T(r_1, t)}\right] = A' - \frac{r_2^2 - r_1^2}{4D_1ct}, \quad (10)$$

使用公式(9)和公式(10)分别对有限厚均匀板状介质和有限厚双层介质进行研究。对于层状介质,通过测量公式(9)中的 $\ln[R(r_2, t)/R(r_1, t)]$, 使用最小二乘拟合算法可获得 μ'_{s0} 及常数因子 A , 通过测量(10)式中的 $\ln[T(r_2, t)/T(r_1, t)]$, 使用最小二乘拟合算法可获得 μ'_{s1} 及常数因子 A' 。对于有限厚均匀介质,其反射和透射测量分别采用单参数(μ'_s)拟合和双参数拟合(μ'_s, A 或 μ'_s, A')两种方法。

3 光学参数反演及数据分析

设 $r_2 > r_1$ 。考虑到曲线拟合的精度及曲线尾部数据波动增强所带来的不利影响, MC 模拟的 $\ln[R(r_2, t)/R(r_1, t)]$ 及 $\ln[T(r_2, t)/T(r_1, t)]$ 曲线的拟合范围分别取 $R(r_2, t)$ 和 $T(r_2, t)$ 曲线的峰值位置作为起始位置,取曲线下降沿的值为曲线峰值的 1/100 处作为终止位置。对于有限厚介质的 MC 模拟,为了得到数据波动性较小的结果,取入射光子

数为 5×10^8 , 组织各层折射率均取 1.4, 各向异性因子均取 $g=0.9$, 吸收系数 μ_a 均取 0. 最小二乘拟合算法程序由 Matlab 工具箱^[13]提供的牛顿法等权重拟合函数 lsqcurvefit 编写。

3.1 有限厚均匀平板状介质

对于有限厚均匀平板状介质, 取介质约化散射系数 $\mu'_s=1 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_a=1$, 厚度 $d=4 \text{ mm}$, 选取 $r_1=5.25 \text{ mm}$, $r_2=10.25 \text{ mm}$ 进行反射测量, 对 MC 模拟数据 $\ln[R(r_2, t)/R(r_1, t)]$ 分别采用单参数 ($\mu'_{s, \text{fit-s}}$) 及双参数 ($\mu'_{s, \text{fit}}$, A_{fit}) 最小二乘拟合方法。图 1(a) 和图 1(b)

分别为单参数和双参数拟合曲线。其中单参数拟合的结果为 $\mu'_{s, \text{fit-s}}=0.94 \text{ mm}^{-1}$, 双参数拟合的结果为 $\mu'_{s, \text{fit}}=0.99 \text{ mm}^{-1}$, $A_{\text{fit}}=0.05$ 。显然, 双参数拟合所得的约化散射系数的值更接近于真实值, 具有更高的精确度。其原因容易从图 1(a) 及图 1(b) 中得知, 即双参数拟合方法使 MC 模拟结果与拟合曲线间的吻合程度更好, 尤其是在 $t < 175 \text{ ps}$ 部分。这也证明了我们在理论部分所做的有限厚均匀平板状介质漫反射解中的函数 $h_{\text{homo-slab}}$ 对测量位置 r 具有弱依赖性的推论是正确的。

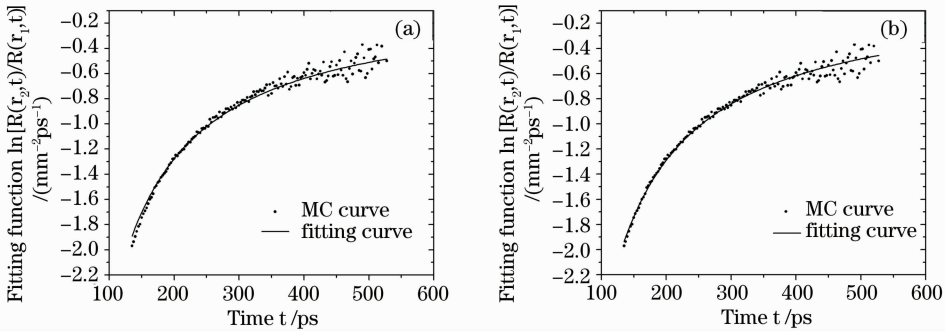


图 1 有限厚均匀板状介质单参数拟合曲线(a)和双参数拟合曲线(b)

Fig.1 Single parameter fitting curve (a) and double parameters fitting curve (b) for the finite-thickness homogeneous slab

与反射测量一样, 对漫透射测量数据作同样的处理。我们得到当 $r_1=5.25 \text{ mm}$, $r_2=10.25 \text{ mm}$ 时, 单参数拟合的结果 $\mu'_{s, \text{fit-s}}=0.94 \text{ mm}^{-1}$, 双参数拟合的结果为 $\mu'_{s, \text{fit}}=0.98 \text{ mm}^{-1}$, $A_{\text{fit}}=0.04$ 。即双参数拟合所得的约化散射系数的值更接近于真实值。这也同样证明, 在理论部分所做的有限厚均匀平板状介质漫透射解中的函数 $h'_{\text{homo-slab}}$ 对测量位置 r 具有弱依赖性的推论是正确的。

分别改变有限厚均匀平板状介质的厚度 d 及 μ'_s , 选取 $r_1=5.25 \text{ mm}$, $r_2=10.25 \text{ mm}$ 及 $r_1=10.25 \text{ mm}$, $r_2=15.25 \text{ mm}$ 两组数据, 分别进行反射测量和透射测量, 并且采用单参数 ($\mu'_{s, \text{fit-s}}$) 及双参数 ($\mu'_{s, \text{fit}}$, A_{fit} 或 $\mu'_{s, \text{fit}}$, A'_{fit}) 拟合两种方法。结果如表 1 所示。

从表 1 中可知: 若保持其它参数不变, 只改变介质的厚度, 即 μ'_s 分别取 0.5 mm^{-1} , 1 mm^{-1} , 1.5 mm^{-1} , 2 mm^{-1} , 对于每个 μ'_s , 改变介质的厚度。那么对于有限厚均匀平板状介质的单参数拟合情况, 随着介质厚度的增大, 无论是反射测量还是透射测量, 其拟合精度都有所提高, 并且不管介质的厚度如何变化, 对于同一介质, 在相同测量方式下两组不

同位置所得的拟合结果差异很小; 若保持其它参数不变, 只改变介质的约化散射系数 μ'_s , 那么随着 μ'_s 的增大, 无论是反射测量还是透射测量, 其拟合精度也都有所提高, 并且与其它参数保持不变只改变介质的厚度情况相同的是, 无论介质的 μ'_s 如何变化, 只要是同一介质, 其在相同测量方式下的拟合结果几乎相同。但总体上来说, 单参数拟合所得曲线和 MC 模拟曲线间或多或少存在偏差, 即吻合程度不是很理想, 尤其是当介质光学厚度较小时两者之间的偏差更为明显, 而当组织光学厚度较大时, 拟合结果与 MC 模拟曲线间虽然吻合但模拟数据波动性大且可用数据点较少。

表中 R_{ij} , T_{ij} 分别表示反射测量与透射测量, 以下标 i 区分不同组织, 下标 j 表示不同的测量位置, j 取 1 和 2 分别代表 $r_1=5.25 \text{ mm}$, $r_2=10.25 \text{ mm}$ 和 $r_1=10.25 \text{ mm}$, $r_2=15.25 \text{ mm}$ 时的漫反射/漫透射测量; 下标 p 表示拟合结果中所得的拟合曲线和 MC 模拟曲线间偏差较大, 下标 q 表示拟合结果与 MC 模拟曲线间虽然吻合但模拟数据波动性大且可用数据点较少。

表 1 有限厚均匀板状介质反射测量和透射测量的单参数及双参数拟合结果

Table 1 Single parameter and double parameters fitting results for the reflectance measurement and the transmittance measurement of the finite thickness homogeneous slab medium

测量方式	μ'_s/mm^{-1}	d/mm	$\mu'_{s,\text{fit-s}}/\text{mm}^{-1}$	$\mu'_{s,\text{fit}}/\text{mm}^{-1}$	A_{fit}	A'_{fit}
R_{11}	0.5	3	0.40 _p	0.43 _p	0.05	—
R_{12}	0.5	3	0.41 _p	0.46 _p	0.09	—
T_{11}	0.5	3	0.40 _p	0.43 _p	—	0.05
T_{12}	0.5	3	0.42 _p	0.46 _p	—	0.10
R_{21}	0.5	6	0.45	0.48	0.03	—
R_{22}	0.5	6	0.46	0.49	0.05	—
T_{21}	0.5	6	0.45	0.47	—	0.02
T_{22}	0.5	6	0.46	0.48	—	0.03
R_{31}	1	3	0.91	0.94	0.04	—
R_{32}	1	3	0.93	0.98	0.09	—
T_{31}	1	3	0.92	0.98	—	0.08
T_{32}	1	3	0.92	1.00	—	0.11
R_{41}	1	4	0.94	0.99	0.05	—
R_{42}	1	4	0.95	1.02	0.09	—
T_{41}	1	4	0.94	0.98	—	0.04
T_{42}	1	4	0.95	0.98	—	0.03
R_{51}	1.5	3	1.43	1.49	0.07	—
R_{52}	1.5	3	1.44	1.49	0.06	—
T_{51}	1.5	3	1.42	1.45	—	0.01
T_{52}	1.5	3	1.44	1.46	—	0.03
R_{61}	1.5	4	1.46	1.49	0.02	—
R_{62}	1.5	4	1.46	1.53	0.07	—
T_{61}	1.5	4	1.45	1.54	—	0.08
T_{62}	1.5	4	1.47	1.46	—	-0.01
R_{71}	2	2	1.91	1.93	0.02	—
R_{72}	2	2	1.94 _q	1.79 _q	-0.20	—
T_{71}	2	2	1.90	1.99	—	0.10
T_{72}	2	2	1.95 _q	1.51 _q	—	-0.69
R_{81}	2	3	1.94	1.97	0.03	—
R_{82}	2	3	1.96	1.96	0	—
T_{81}	2	3	1.94	2.00	—	0.06
T_{82}	2	3	1.97 _q	1.91 _q	—	-0.06

对于有限厚均匀平板状介质的双参数拟合情况,当介质光学厚度较小时,那么无论是反射测量还是透射测量,一般来说,两组位置所得的拟合结果 $\mu'_{s,\text{fit}}$ 精度都较低(如 $i = 1$ 所示),其拟合曲线与 MC 模拟曲线间偏差较大,且在 $r_1 = 10.25 \text{ mm}$, $r_2 = 15.25 \text{ mm}$ 位置所得 $\mu'_{s,\text{fit}}$ 的拟合精度比同种测量方式下 $r_1 = 5.25 \text{ mm}$, $r_2 = 10.25 \text{ mm}$ 位置的拟合精度高;而当介质光学厚度逐渐增大时,相同测量方式下两组位置所得的拟合结果 $\mu'_{s,\text{fit}}$ 逐渐接近,但在介质的 $\mu'_s = 2 \text{ mm}^{-1}$ 时,两种不同测量方式下两组位置的拟合结果 $\mu'_{s,\text{fit}}$ 却相差较大,甚至于同种测量方式下的拟合结果亦差距较大(如 $i = 7$ 和 8 时)。其原因可能是对于光学厚度较小的介质,在距离入射光

源较远处,大部分光子未能经历足够多的散射就从介质边界逃逸出去,从而使得该处探测到的光分布较不符合漫射理论的要求,引起拟合精度的下降;而对于光学厚度较大的介质,由于大部分光子在接近入射光源处即已经历多次散射并且逃逸出介质,造成到达较远处光子数减小,使得测量数据波动增强,且在拟合范围内的可用数据点减少,从而引起拟合精度下降。所以对于光学厚度较小的组织,要获得较为好的拟合结果,应选取相对远离光源而又满足漫射近似的位置进行测量,而对于光学厚度较大的组织,则应选取相对靠近光源且又满足漫射近似的位置进行测量。

若保持其他参数不变,只改变介质的约化散射系

数 μ'_s 。如当介质厚度取 3 mm, μ'_s 分别取 0.5 mm⁻¹, 1 mm⁻¹, 1.5 mm⁻¹, 2 mm⁻¹ 时, 对于漫反射测量, 随着 μ'_s 的增大, 其拟合精度在 μ'_s 取 0.5 mm⁻¹ 及 1 mm⁻¹ 时明显提高, 在 μ'_s 为 1.5 mm⁻¹ 及 2 mm⁻¹ 时其相对误差小于 3%; 对于漫透射测量, 随着 μ'_s 的增大, 可发现在 μ'_s 取 0.5 mm⁻¹、1 mm⁻¹ 及 1.5 mm⁻¹ 时, 对于同种介质, 在 $r_1 = 10.25$ mm, $r_2 = 15.25$ mm 两个位置测量结果的拟合精度比在 $r_1 = 5.25$ mm, $r_2 = 10.25$ mm 两个位置测量结果的拟合精度高; 而当 μ'_s 取 2 mm⁻¹ 时, 其所得的结论正好相反。所以对于高散射组织应选取较为靠近光源的入射位置且满足漫射近似的位置进行测量, 尤其是对于透射测量更应如此。此外, 无论是反射测量还是透射测量, 随着 μ'_s 的增大, 在其值为 2 mm⁻¹ 且 $j=2$ 时, 常数因子出现 0 或负值。通过大量的模拟计算, 发现当常数因子出现负值时有可能代表了该介质为高散射介质且其光学厚度较大。

比较有限厚均匀平板状介质的单参数和双参数拟合结果, 得到的结论是: 单参数拟合在任何条件下, 其拟合曲线和 MC 模拟曲线间都或多或少存在偏离, 尤其在介质光学厚度较小时其偏离程度更大, 而双参数拟合时的曲线偏离只发生在光学厚度较小

的情况。并且一般来说, 双参数拟合结果的精度要比单参数拟合结果的精度高, 但在组织体为高散射介质(如 $\mu'_s = 2$ mm⁻¹) 且 $j=2$ 时, 单参数拟合结果的精度比双参数拟合的精度高。根据上面的分析可知, 其原因是对于高散射介质, 在距离光源较远处, 其探测到的光信号波动大且可用于拟合的数据点减少, 从而造成拟合结果与真实值之间的差异增大。排除了较远处数据波动因素对拟合精度的影响后, 容易得到: 对于有限厚均匀平板状介质, 无论是反射测量还是透射测量, 双参数拟合要优于单参数拟合。这也说明了有限厚均匀板状介质漫反射和漫透射公式中不包含与测量位置 r 有关的指数项的其它部分对测量位置 r 具有弱依赖性。

3.2 有限厚双层板状介质

对于有限厚无吸收双层平板状介质, 设介质上下层的约化散射系数为 μ'_{s0} 和 μ'_{s1} , 其对应的上下层厚度为 d_0 和 d_1 , 选取 $r_1 = 5.25$ mm, $r_2 = 10.25$ mm 及 $r_1 = 10.25$ mm, $r_2 = 15.25$ mm 两组数据, 分别进行反射测量和透射测量。对所得 MC 数据进行最小二乘拟合, 其中反射测量拟合结果为 $\mu'_{s0,fit}$ 和 A_{fit} , 透射测量拟合结果为 $\mu'_{s1,fit}$ 和 A'_{fit} 。如表 2 所示。

表 2 有限厚双层板状介质反射测量和透射测量的双参数拟合结果

Table 2 Double parameters fitting results for the reflectance measurement and the transmittance measurement of the finite thickness two-layered slab medium

探测方式	μ'_{s0}/mm^{-1}	μ'_{s1}/mm^{-1}	d_0/mm	d_1/mm	$\mu'_{s0,fit}/\text{mm}^{-1}$	$\mu'_{s1,fit}/\text{mm}^{-1}$	A_{fit}	A'_{fit}
R ₁₁	0.5	1.5	1	4	0.99	—	-0.06	—
R ₁₂	0.5	1.5	1	4	1.00	—	-0.07	—
T ₁₁	0.5	1.5	1	4	—	1.23	—	0.04
T ₁₂	0.5	1.5	1	4	—	1.16	—	0.003
R ₂₁	0.5	1.5	4	4	0.57	—	-0.07	—
R ₂₂	0.5	1.5	4	4	0.60	—	-0.06	—
T ₂₁	0.5	1.5	4	4	—	0.93	—	0.06
T ₂₂	0.5	1.5	4	4	—	0.85	—	0.04
R ₃₁	0.5	1.5	4	1	0.55	—	0.04	—
R ₃₂	0.5	1.5	4	1	0.56	—	0.05	—
T ₃₁	0.5	1.5	4	1	—	0.59	—	0.06
T ₃₂	0.5	1.5	4	1	—	0.57	—	0.04

表中 R_{ij} , T_{ij} 代表的含义与表 1 相同。

当 $\mu'_{s0} = 0.5$ mm⁻¹, $\mu'_{s1} = 1.5$ mm⁻¹ 时, 分别改变 d_0, d_1 的厚度。首先改变 d_0 , 保持 d_1 不变, 如 $d_1 = 4$ mm, 分别取 $d_0 = 1$ mm 和 $d_0 = 4$ mm (如 $i=1$ 和 2 所示)。从中可知, 其它参数不变, 随着 d_0 的增大, 在相同测量位置, 反射测量和透射测量数据受 μ'_{s0} 的影响增大, 其拟合结果 $\mu'_{s0,fit}, \mu'_{s1,fit}$ 减小并往 $\mu'_{s0} = 0.5$ mm⁻¹ 靠近, 常数因子 $A_{fit} < 0, A'_{fit} > 0$ 。与有限

厚均匀介质情况不同的是由于其它层的存在, $\mu'_{s0,fit}, \mu'_{s1,fit}$ 各自与其对应的真实值差异较大, 尤其是在其它层厚度较大时更甚。改变 d_1 , 保持 d_0 不变, 如 $d_0 = 4$ mm, 分别取 $d_1 = 1$ mm 和 $d_1 = 4$ mm (如 $i=3$ 和 2 所示)。从中可知, 其它参数不变, 随着 d_1 的增大, 在相同测量位置, 反射测量和透射测量数据受 μ'_{s1} 的影响增大, 尤其是透射测量, 其拟合结果 $\mu'_{s0,fit}, \mu'_{s1,fit}$ 增大并往 $\mu'_{s1} = 1.5$ mm⁻¹ 靠近, 且

常数因子 A_{fit} 、 A'_{fit} 均大于 0。同样,与有限厚均匀介质情况不同的是,由于其他层的存在, $\mu'_{s0,\text{fit}}$ 、 $\mu'_{s1,\text{fit}}$ 各自与其对应的真实值差异较大,尤其是在其他层厚度较大时更甚。

分别取上下层约化散射系数 μ'_{s0} 、 μ'_{s1} 为 0.5 mm^{-1} , 1 mm^{-1} , 1.5 mm^{-1} , 2 mm^{-1} 的两两组合,并分别改变 d_0 保持 d_1 不变和改变 d_1 保持 d_0 不变(数据未给出)。从结果中可知,反射测量和透射测量所得拟合结果 $\mu'_{s0,\text{fit}}$ 、 $\mu'_{s1,\text{fit}}$ 变化趋势与上文同种情况相似,而常数因子 A_{fit} 和 A'_{fit} 在某些情况下出现负值。当组织的厚度较小时,拟合结果中所得的拟合曲线和 MC 模拟曲线间偏差较大;当厚度增大到一定程度时,拟合结果与 MC 模拟曲线间虽然吻合但模拟数据波动性大且可用数据点较少。

与有限厚均匀平板状介质的分析相同,排除了光学厚度不够大及较远处数据波动等因素对拟合结果造成的影响后,分析所得数据可知:若在同样的测量位置,拟合的 $\mu'_{s0,\text{fit}}$ 、 $\mu'_{s1,\text{fit}}$ 结果相近,那么可能说明该组织中的某一层相对于另一层来说其光学厚度很小或者两层组织的光学特性相近;若 $\mu'_{s0,\text{fit}}$ 、 $\mu'_{s1,\text{fit}}$ 结果相差较大,那么根据所得约化散射系数的大小可能判断该双层组织的光学参数间的高低分布(若 $\mu'_{s0,\text{fit}}$ 明显大于 $\mu'_{s1,\text{fit}}$,代表上层组织相对于下层组织来说为高散射介质,反之亦然);若拟合的常数因子 A_{fit} 在 R_{ij} 下为负值,则可能说明该双层组织中上层组织的约化散射系数小于下层的,并且两者之间差异较大,且其下层组织的光学厚度应比上层组织的光学厚度大;若 A_{fit} 在测量方式为 R_{i1} 时为负值,而在测量方式为 R_{i2} 时为正值,则可能说明该双层组织的上层相对于下层来说为低散射介质,但两者之间差异较小,而且下层组织的光学厚度大于上层组织的;若 A'_{fit} 在测量方式为 T_{i2} 时出现负值,则可能说明该双层组织中某一层为高散射介质,且其中高散射层的光学厚度大于另一层的光学厚度。结合所得的 $\mu'_{s0,\text{fit}}$ 、 $\mu'_{s1,\text{fit}}$ 拟合结果和常数因子 A_{fit} 、 A'_{fit} 的正负可获得有限厚双层组织可能的结构分布信息。但需要注意的是,若双层组织的光学厚度不够大,那么所得的拟合结果可能因测量数据与漫射理论间差距较大而引起较大的误差,从而给出该双层组织可能结构的错误信息。

4 结 论

本文介绍了多程测量方法在半无限大组织漫反射测量应用中的发展过程及其理论基础,并认为有

限厚板状均匀介质和有限厚平板状双层介质的漫透射测量也应与半无限大组织的漫反射测量一样具有相似的理论公式,且同样可用于反演生物组织光学参数。

对有限厚均匀平板状介质和有限厚平板状双层介质进行反射和透射相结合的测量方式,可从所拟合的光学参数中获得组织体的结构信息。对于有限厚均匀平板状介质,使用单参数拟合和双参数拟合的方法,得到有限厚均匀组织的反射率分布和透射率分布公式中除去包含测量位置指数项的其它部分,即函数 $h_{\text{homo-slab}}$ 及 $h'_{\text{homo-slab}}$ 对测量位置 r 皆具有弱依赖性的结论。并且均匀介质的反射测量和透射测量的拟合结果较为接近真实值,且在相同测量位置,约化散射系数的拟合结果近乎相等。

对于有限厚双层平板状组织,可根据反射及透射测量的拟合结果 $\mu'_{s0,\text{fit}}$ 、 $\mu'_{s1,\text{fit}}$ 间的差异,常数因子 A_{fit} 、 A'_{fit} 的正负判断该双层组织的可能结构分布。但应注意的是,本文结论都是在有限厚组织具有一定光学厚度的基础上得到的,若组织光学厚度太小,则在组织表面测量得到的光分布不满足漫射近似,那么该结论是不成立的;而若光学厚度太大,则在透射测量上由于漫射光信号太弱引起的数据波动太大,从而使所得的结果与实际不符。

参 考 文 献

- 1 F. F. Jobsis. Noninvasive infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters [J]. *Science*, 1977, **198**(4323): 1264~1267
- 2 J. C. Hebden, A. Gibson, T. Austin *et al.*. Imaging changes in blood volume and oxygenation in the newborn infant brain using three-dimensional optical tomography [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2004, **49**(7): 1117~1130
- 3 L. H. Wang, S. L. Jacques, L. Q. Zheng. MCML-Monte Carlo modeling of photon transport in multi-layered tissues [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, **47**: 131~146
- 4 L. H. Wang. Rapid modeling of diffuse reflectance of light in turbid slabs [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(4): 936~944
- 5 R. C. Haskell, L. O. Svaasand, T. T. Tsay *et al.*. Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2727~2741
- 6 M. S. Patterson, B. Chance, B. C. Wilson. Time resolved reflectance and transmittance for the noninvasive measurement of tissue optical properties [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2331~2336
- 7 A. Kienle, M. S. Patterson. Improved solutions of the steady-state and the time-resolved diffusion equations for reflectance from a semi-infinite turbid medium [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(1): 246~254
- 8 R. K. Wang, Y. A. Wickramasinghe. Fast algorithm to determine optical properties of a turbid medium from time-resolved measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(31): 7342~7351

- 9 D. J. Durian. The diffusion coefficient depends on absorption [J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(19): 1502~1504
- 10 R. Aronson, N. Corngold. Photon diffusion coefficient in an absorbing medium[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(5): 1066~1071
- 11 F. Matelli, A. Sassaroli, Y. Yamada *et al.*. Method for measuring the diffusion coefficient of homogeneous and layered media[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(20): 1508~1510
- 12 F. Matyrlli, A. Sassaroli, Y. Yamada *et al.*. Analytical approximate solutions of the time-domain diffusion equation in layered slabs[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(1): 71~80
- 13 Zhang Zhixing. Matlab program design and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002, 353~358
- 张智星. Matlab 程序设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002, 353~358