

基于 MCVM 研究真实前臂结构对光传输的影响

王安乐 李 婷 邓 勇 谢添武 刘 谦 骆清铭

(华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)Britton Chance 生物医学光子学研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要 复杂生物组织中光传输的精确模拟一直是组织光学的研究热点。利用新近发布的光在体素化三维结构组织中传输的蒙特-卡罗模拟软件(MCVM),采用目前国际上分辨率最高的人体结构数据集,模拟光在人体前臂组织中的传输,得到了组织中光吸收量的分布信息和空间分布特征,探讨了前臂组织的三维解剖结构对光传输和分布的影响。结果显示,三维解剖结构对光传输和分布有显著影响;相比于前人普遍采用光在多层组织中传输的蒙特-卡罗模拟软件(MCML)和层状模型所得的模拟结果,能更真实地反映光的传输和分布。该研究可为光动力疗法(PDT)、红外疗法等光保健与治疗技术提供定量的参考信息,具有一定的临床价值。

关键词 医用光学;光吸收量分布;蒙特-卡罗模拟软件(MCVM);前臂光动力治疗

中图分类号 Q63 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0317002

Influence of Real Forearm Structure on Light Transport Based on MCVM

Wang Anle Li Ting Deng Yong Xie Tianwu Liu Qian Luo Qingming

(Britton Chance Center of Biomedical Photonics, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Accurate simulation of light propagation in complicated biological tissues has been a research focus of tissue optics. By utilizing the latest published Monte Carlo software-Monte Carlo modeling of photon migration in voxelized media(MCVM), with the human structure database of the highest resolution in the world. It is obtained the distribution of the absorption in the forearm and the effect on light transport and distribution. The results indicated that the three-dimensional anatomic structure influences the light transport and distribution obviously, and the simulation results were much closer to the real state by comparing with the results obtained previously by MCML (the Monte Carlo Modeling of light transport in multi-layered tissues) and layered tissue model. So the analysis provide the guidance to optical health care techniques, such as photodynamic therapy and infrared therapy.

Key words medical optics; absorption dose distribution; Monte Carlo software-Monte Carlo modeling of photon migration in voxelized media(MCVM); forearm; photodynamic therapy

OCIS codes 170.1610; 170.5180; 170.3660; 170.6930

1 引 言

激光技术的不断发展,促使其在医学领域中的应用越来越广泛^[1~5]。无论是用于诊断还是治疗,都与光在生物组织中的传输特性有关。在光动力治疗(PDT)、红外疗法等光保健与治疗技术中,光辐射剂量以及注入位置的选择会给治疗效果带来很大影响,并且光剂量已被广泛认为是决定 PDT 疗效的关

键要素^[6]。因此,定量地了解组织中光剂量的分布是获得较佳治疗效果的前提。目前, Monte Carlo 方法已被广泛用于模拟复杂随机介质如生物组织中光的辐射传输,且不断有新的进展^[3]。

近期发布的光在体素化组织结构中传输的蒙特-卡罗模拟软件(MCVM),能够准确地模拟光在任意三维形状和任意三维结构的组织中的传

收稿日期: 2010-06-01; 收到修改稿日期: 2010-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(60828009)和教育部长江学者和创新团队发展计划资助课题。

作者简介: 王安乐(1988—),男,硕士研究生,主要从事组织光学方面的研究。E-mail: anlehit@126.com

导师简介: 骆清铭(1966—),男,博士,教授,主要从事生物医学光子学方面的研究。E-mail: qluo@mail.hust.edu.cn

输^[7~9],可以给出组织中光吸收剂量分布的定量描述。人体前臂属于易受伤部位,已有研究表明采用红外热疗术即用低功率激光器照射疼痛部位,可以缓解局部的肌肉紧张,改善局部的血液循环供氧和组织代谢,从而减轻或消除这种疼痛性疾病^[10,11]。同时,前臂是各种皮肤疾病的易发部位,经常是光动力疗法的作用对象。所有这些问题中,都会涉及前臂经光照射后光在组织内部的分布或者光传输过程。本文将前臂组织作为模拟对象,使用 MCVM 软件,模拟了光在前臂组织中的传输,研究人体前臂组织内光剂量分布特征,分析了光分布的空间特征和前臂结构对光分布的影响。

2 方 法

MCVM 利用体素概念引入三维结构的约束,实现了光在任意三维结构介质中光传输的模拟^[7]。目前,生物医学光子学领域广泛采用光在多层介质中传输的蒙特-卡罗模拟软件 MCML。相对于 MCML,MCVM 的重要优势在于能够模拟光在三维解剖结构生物组织中的传输,能够用来分析解剖结构对光传输的影响^[7~9]。此外,MCVM 在对介质几何、光源与介质空间关系的适应能力,模拟精度及速度方面也存在优越性^[7]。MCVM 的正确运行需要准备两个数据文件:体素模型文件和模拟参数配置文件。准备好这两个文件后,就可以进行模拟,然后会得到结果为 3 个数据文件,分析处理数据文件即可得到感兴趣的结果。图 1 给出了本文使用 MCVM 模拟前臂组织中光传输的过程。具体工作过程可以分为构建模拟部位体素模型、确定组织光

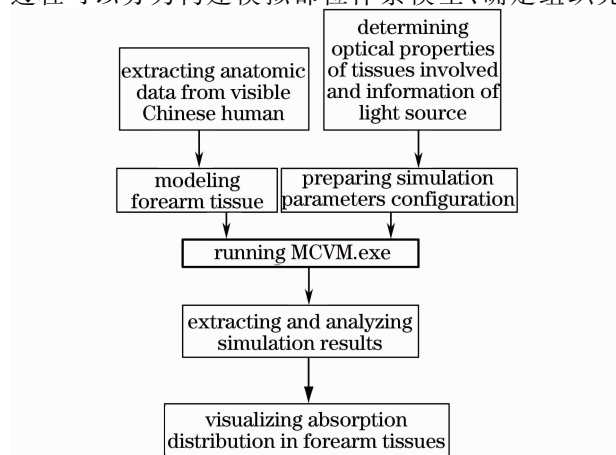


图 1 使用 MCVM 软件模拟光在前臂组织中传输的流程

Fig. 1 Simulation process of light propagation in forearm tissues with MCVM software

学参数、实验模拟和模拟结果可视化 4 个步骤。下面的内容将详细介绍每一步骤的操作。

2.1 构建模拟部位的体素模型

如图 2 所示,所选数据集来自可视中国人男一号(VCH-M1)左前臂^[12],共选取切片总数为 120 张,然后将所选体素数据集转化成 MCVM 所认可的数字组织模型文件。也就是按照一一对应的方式用不同索引值代替不同切片中的不同组织,然后再把索引值“切片”按照 MCVM 要求的格式(ASCII 格式)写入数据文件,就得到了前臂部位一段组织的数字模型。这些操作都是使用相应的 Matlab 程序完成的。本文构建体素模型的参数为:模型大小为 $8.28 \text{ cm} \times 4.80 \text{ cm} \times 8.48 \text{ cm}$,包含体素的数目为 $207 \times 120 \times 212$,每个体素大小为 $0.04 \text{ cm} \times 0.04 \text{ cm} \times 0.04 \text{ cm}$ 。

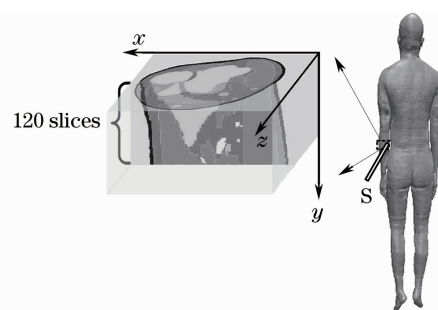


图 2 前臂组织模型示意图(S 标示光源位置)

Fig. 2 Illustration of human forearm model (S indicates the injection position of light source)

2.2 确定组织光学参数

组织的光学特性与采用的波长相关。输出波长为 633 nm 氦氖激光器,是光保健与治疗技术中最常用的波长之一,研究该波长下光在组织内的传输情况对于临床有较高的指导意义。所研究的前臂组织共涉及 6 种组织。其中,由于骨骼与肌肉间的一些结缔组织和脂肪组织很难分割开来,将它们归为光学特性相近的脂肪组织。最终确定了表 1 给出的波长 633 nm 下的 6 种组织的光学参数,其中 n 为组织的折射率, μ_a 为组织的吸收系数, μ_s 为组织的散射系数, g 为组织各向异性因子^[13~18]。

表 1 所涉及的各种组织的光学参数

Table 1 Optical parameters of tissues involved

Tissue	n	μ_a/cm^{-1}	μ_s/cm^{-1}	g
skin	1.4	0.5	187	0.81
muscle	1.9	8.7	490	0.97
skeleton	1.43	0.9	170	0.85
artery	1.4	5.8	195	0.81
vein	1.4	2.38	522	0.9
fat	1.463	0.04	12.0	0.77

2.3 模拟及数据分析

将组织的光学参数以及模拟所需设置的其他参数写入符合 MCVM 格式要求的模拟参数配置文件,然后把该文件和 MCVM 软件及建立的体素模型文件放在同一目录下,进行光在前臂组织中传输的模拟实验。模拟程序运行的时间与所使用组织模型的大小和设置的入射光子数的多少有关。模拟结果为三个数据文件:吸收信息文件、逸出光子信息文件和模拟信息文件。构成组织模型的各体素在光传输过程中对光子的吸收情况可以通过对吸收文件的可视化工作获得。MCVM 的吸收数据文件是以二维数组的形式书写的,但可以记录多达四维的光传输信息,从中既可提取出光吸收分布随时间的变化情况,又可获得光传输后光吸收分布的空间稳态信息。因为,组织的吸收量 A 和光通量 Φ 存在定量关系:

$$A = \mu_a \Phi$$

式中 μ_a 为组织的光吸收系数。只要获得组织中光吸收量的分部信息,就可得到光通量或者光剂量的信息。因此,通过模拟结果能够定量地了解组织各处的光通量分布情况,从而得到光在组织中的传输过程。

3 结果与分析

模拟设置的时间抽样间隔为 0.1 ns,抽样次数

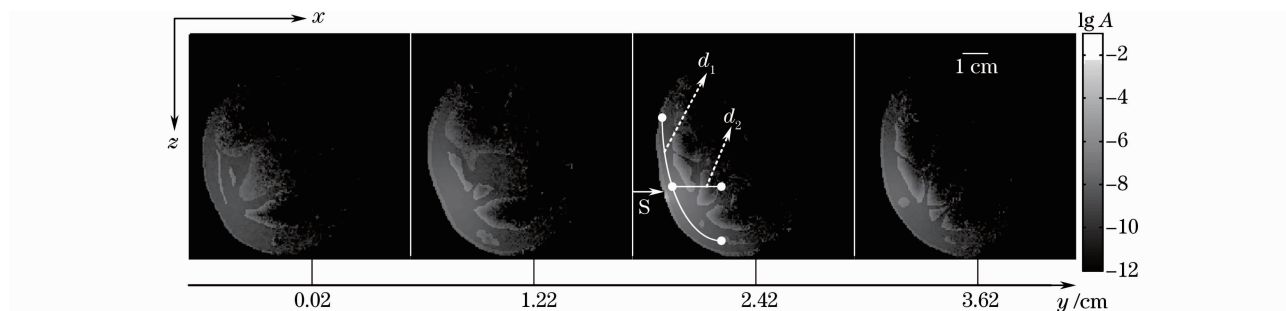


图 3 前臂不同切片处光吸收量分布(S 标示光源位置)

Fig. 3 Absorption distribution on different slices of human forearm (S indicates the injection position of light source)

组织中光吸收分布呈现出这样的特点是组织结构、组织光学特性及光源位置三者综合作用的结果: 1) 光学特性差异较大的组织,尤其是吸收系数差异较大的组织,其光吸收量的差异也较大,比如肌肉与脂肪或皮肤组织; 2) 与光源入射点的距离越大,相应的光吸收量也较小。3) 光吸收分布形成月牙状,主要由于前臂解剖结构:光的入射方向上,较小距离内出现肌肉,肌肉的吸收系数较大,导致光在该方向上难以传输较远的距离;在光入射的侧向上,在相对较远的距离内主要是皮肤和脂肪,吸收系数较小,光在

为 10 次。入射光子总数为 1×10^6 ,光源设置在第 61 张切片处,坐标为 (1.22, 2.42, 6.14) cm,入射方向角度用余弦表示为 (1.0, 0, 0),即平行于 x 轴方向。模拟使用的计算机为 Lenovo 3000G430,模拟运行时间 9.0 ± 0.6 min。下面按照不同方式给出模拟结果。

3.1 空间分辨吸收分布

图 3 给出了 1×10^6 个光子射入前臂组织后,不同位置处组织对光吸收分布的影响。所选切片间隔为 1.20 cm。由结果可以看出:不同类型的组织对光的吸收有着显著差异,肌肉虽然在皮肤层以内,但肌肉部位的光吸收量远高于周围脂肪和皮肤组织;同一切片内,吸收剂量大的区域占光传播范围的比例很小,不同切片间,靠近光源的切片,光子所能到达的区域明显比远离光源的情况大;组织间光吸收量的差异显示出了不同组织之间的边界走势信息,即前臂的三维解剖结构特征,即使在距离光源较远的切片也可以明显地观察到这个现象;光在前臂组织内三个坐标方向上的传输距离显著不同,入射方向的传输深度 (d_2) 明显小于垂直入射方向的光传输距离 (d_1) ($d_1 > d_2$),使得同一切片内的吸收分布区域呈现“月牙状”。这些分布特征对光动力治疗机其他光保健术有参考价值。

该类组织中能够传输较深,因此导致侧向传输深度远大于入射方向上的传输深度。

3.2 时间分辨吸收分布

图 4 给出了 1×10^6 个光子射入前臂组织后,随着时间的延续,相距 1.2 cm 的四张切片内光吸收量分布的变化过程:0.1 ns 时刻,光子所能到达的范围很小,能量积聚现象明显,光子沿 y 方向的传输长度小于 2.4 cm(第一张切片内在此刻没有光吸收分布);随着时间的延续,光子到达的区域范围增大,能量传播开来;0.7 ns 时刻,大量光子已被组织吸收,

仅有少量光子继续“存活”、传输;1.0 ns时刻,光传输过程几近终止,但仍有极少量光子在传播。

基于以上的模拟结果可以看出受组织结构的影响,光子在生物组织中的传输与在单一层状或多层组织中传输过程明显不同^[19,20],加上不同的组织具有不同的光学特性,光吸收的分布情况反过来体现

组织的生理结构特性。光吸收量的分布不再是MCML模拟得到的圆形波状分布,而只存在组织结构影响下无规则形状的区域。这些结果对研究光的宏观分布与组织光学参数间的经验关系是很有意义的。

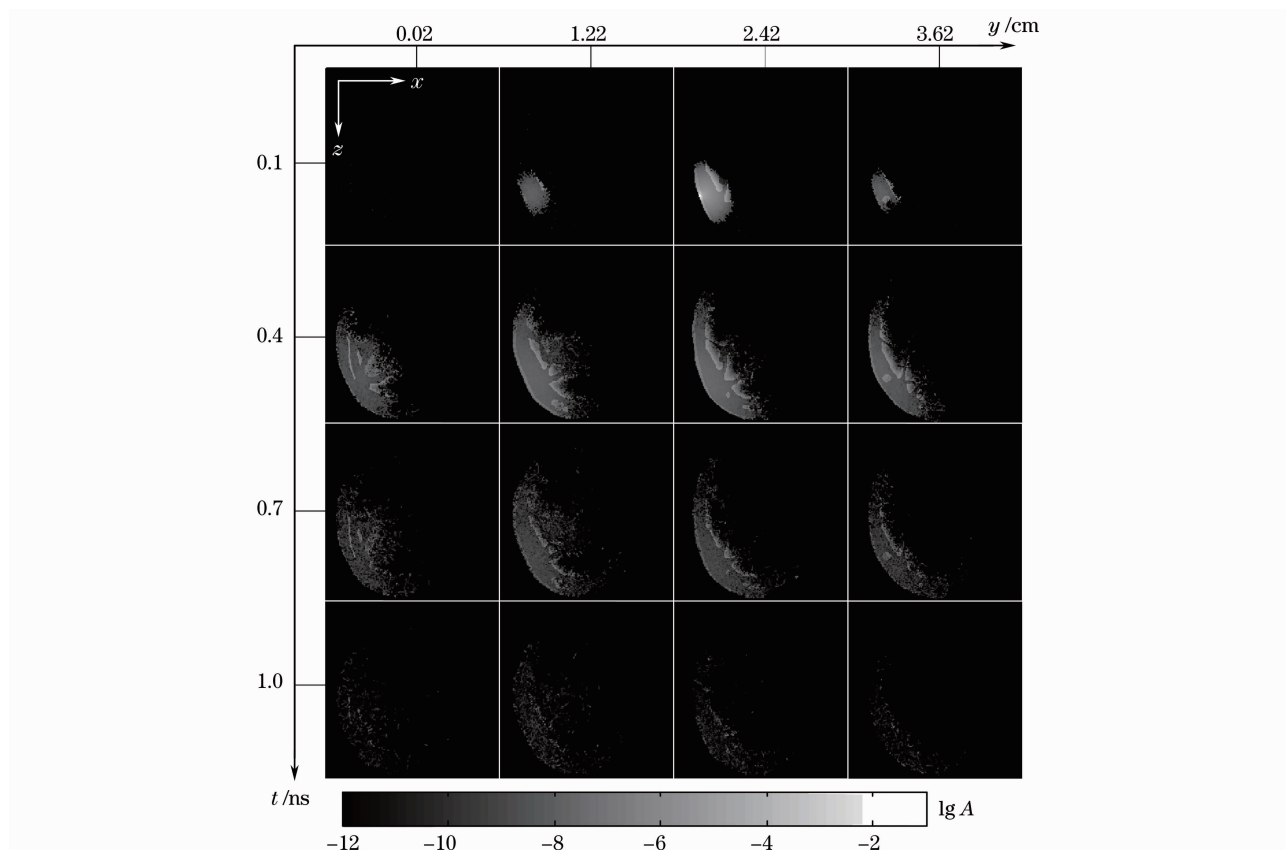


图4 光在前臂组织中的传输过程

Fig. 4 Time-resolved photon migration in human forearm tissues

4 结 论

给出了体素化的前臂组织经点光源照射后内部光吸收空间分布情况,结果显示出光在真实前臂中的空间分布呈月牙状,侧向传输距离显著大于纵向传输深度,该结果改变了研究者们以前对光在组织中吸收分布的一般认识——沿光源方向的传输深度大于或与侧向传输距离差不多。由此可见,要准确地分析光在真实组织中的分布,需要考虑真实结构的影响。在此基础之上,本文还深入探讨了前臂组织结构对光分布的影响,研究发现光分布形态与组织结构轮廓存在空间对应关系,光分布中发生突然改变的区域刚好对应不同组织的交界,并且血管和肌肉组织区域的光分布明显高于周围组织。该结果有助于优化前臂区域的光动力和红外治疗方案。

在光动力、红外疗法等光保健与治疗技术中,光辐射剂量以及注入位置的选择会给治疗效果带来很大影响,要获得较佳的治疗效果,需要有一个预测光辐射在组织内分布的方法^[21,22]。MCVM软件能够允许用户通过设定光源的位置和方向来预测出给定光源位置、给定光辐射量及给定时刻下组织各处的光吸收量,为取得较佳治疗效果提供了定量的理论依据。本文通过模拟光在真实前臂组织的传输和分布,及其对模拟结果的可视化,直观地分析了前臂结构和内部组织类型对光分布的影响,为光动力治疗等光保健技术的方案优化提供依据。

致谢 感谢华中科技大学陈尚宾、陶冶、郭青春和王侃在研究过程中的给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Xie Shusen, Li Hui, Niu Hanben *et al.*. The development and prospect of biomedical photonics[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics, Astronomy*, 2007, **37**(s1): 1~12
谢树森, 李 晖, 牛憨笨等. 生物医学光子学的发展与前瞻[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2007, **37**(s1): 1~12
- 2 Wang Zhe, Xia Lei, Gong Kai *et al.*. Positive effect of low power laser irradiation on neuron regeneration after acute spinal cord injury[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3084~3088
王 哲, 夏 雷, 龚 凯等. 激光照射对急性脊髓损伤后脊髓再生的促进作用[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 3084~3088
- 3 Chen Zhemin, Chen Jun, Shan Xiaofeng. Experimental research on fiber Bragg grating based monitor for laser thrombolysis in vitro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 1020~1024
陈哲敏, 陈 军, 山下丰. 激光融血栓的光纤光栅监控实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 1020~1024
- 4 Wang Yuhua, Yang Hongqin, Xie Shusen *et al.*. Experimental measurement of the optical transport along human meridian[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2443~2447
王瑜华, 杨洪钦, 谢树森等. 人体经络光传输特性的实验测量[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2443~2447
- 5 Pan Zhenhua, Li Yingxin, Wang Xing *et al.*. Effects of low-level laser therapy on cutaneous wound healings with three doses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 599~604
潘振华, 李迎新, 王 兴等. 3 种剂量弱激光对大鼠皮肤创伤愈合的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 599~604
- 6 Dougherty T. J.. An update on photodynamic therapy applications[J]. *Journal of Clinical Laser Medicine & Surgery*, 2002, **20**(1): 3~7
- 7 Deng Yong, Meglinski I.. Latest progress of Monte Carlo simulation of light transmission in tissues [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1396~1401
邓 勇, Meglinski, I. Monte Carlo 方法模拟光在生物组织中传播的新进展[J]. 物理学报, 2010, **59**(2): 1396~1401
- 8 Li Ting, Gong Hui, Luo Qingming. MCVM: Monte Carlo modeling of photon migration in voxelized media[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2010, **3**(2): 91~102
- 9 Gong Hui, Li Chengjun, Li Ting *et al.*. Effect of the prefrontal cortex on working memory by near-infrared imaging[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2007, **37**(s1): 110~117
龚 辉, 李成军, 李 婷等. 前额叶皮层工作记忆作用的近红外光学成像[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2007, **37**(s1): 110~117
- 10 Li Jingyu, Wang Chunping. Physical therapy methods of joint muscle pain[J]. *Chinese Community Doctors*, 1995, **10**(10): 38~39
李景玉, 王春萍. 关节肌肉疼痛的物理疗法[J]. 中国社区医师, 1995, **10**(10): 38~39
- 11 Wang Yonggang, Ma Xiaoyu, Feng Xiaoming. Discussion about the development trend of laser medicine[J]. *Infrared*, 2003, **9**(9): 26~29
王勇刚, 马晓宇, 冯小明. 浅谈激光医学及其发展趋势[J]. 红外, 2003, **9**(9): 26~29
- 12 Liu Qian, Gong Hui, Luo Qingming. Parallel visualization of visible Chinese human with extremely large datasets[C]. *IEEE-EMBS*, 2005, Page(s): 5172~5175
- 13 Cheong W. F., Prahl S. A., Welch A. J.. A review of the optical properties of biological tissues [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(12): 2166~2185
- 14 Niemz M. H.. Laser-tissue interactions: fundamentals and applications[M]. Zhang Zhenxi Transl. Xi'an: Xi'an JiaoTong University Press, 1999. 31~33
妮姆茨. 激光与生物组织的相互作用-原理及应用[M]. 张镇西译. 西安: 西安交通大学出版社, 1999. 31~33
- 15 Lin Ling, Li Gang, Wang Yanqiu *et al.*. In vivo determination of the optical properties of human fat and muscle tissues [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, **12**(4): 425~429
林 凌, 李 刚, 王燕秋等. 人体脂肪和肌肉组织光学特性的活体检测[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(4): 425~429
- 16 Chen Rong, Huang Baohua, Wang Yueyun *et al.*. The optical model of human skin [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2005, **14**(6): 401~404
陈 荣, 黄宝华, 王月云等. 皮肤的光学模型[J]. 激光生物学报, 2005, **14**(6): 401~404
- 17 A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. I. Kochubey *et al.*. Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000 nm [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(15): 2543~2555
- 18 Zhang Jizhuang, Zhang Xuexue. Effects of blood vessel parameters on the photo-thermal interactions during selective photothermolysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2202~2208
张纪庄, 张学学. 血管参数对皮肤组织选择性光热解作用中光热响应规律的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2202~2208
- 19 Lihong Wang, Steven L. Jacques, Liqiong Zheng. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. *Comput. Meth. Prog. Biol.*, 1995, **47**(2): 131~146
- 20 Lihong Wang, Gan Liang. Absorption distribution of an optical beam focused into a turbid medium [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 4951~4958
- 21 Cheng Gang, Zhong Qiu-hai. Application of mathematic modeling and simulation in photodynamic therapy research [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(1): 84~85
程 刚, 钟秋海. 数学建模与仿真在光动力疗法研究中的应用[J]. 激光杂志, 2006, **27**(1): 84~85
- 22 Li Zhongming, Zhang Zhenxi. Description of dosage on photodynamic therapy effect [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(5): 91~92
李忠明, 张镇西. 光动力作用效果的剂量学描述探讨[J]. 激光杂志, 2005, **26**(5): 91~92