

腕部手厥阴心包经区域光传输特性的蒙特卡罗模拟

江怡帆 陈长水 刘荣廷 刘颂豪

(华南师范大学激光生命科学教育部重点实验室, 广东 广州 510631)

摘要 基于腕部手厥阴心包经循行区域的解剖结构,建立了腕部手厥阴心包经和旁开非经络线区域组织光传输结构的简化模型,并利用蒙特卡罗模拟的方法分别模拟了光在腕部手厥阴心包经、相邻肌腱以及旁开非经络线上的光传输特性。模拟结果表明,光沿腕部手厥阴心包经呈优势传输,与本实验室之前实验所得的结果相一致。分别计算了三个模型中各层的光通量情况,计算结果表明,腕部心包经循行区域的光传输特性主要受该区域的底层结构和底层组织成分影响,光在底层结构中也是沿腕部心包经呈优势传输的,并且该优势传输的现象与腕部心包经底层的筋膜间隙结构有关。

关键词 医用光学;光传输特性;蒙特卡罗方法;经络

中图分类号 R318.51 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1017001

Monte Carlo Simulation of Light Propagation Along the Pericardium Meridian Line at the Wrist

Jiang Yifan Chen Changshui Liu Rongting Liu Songhao

(Key Laboratory of Laser Life Science, Ministry of Education, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China)

Abstract The characteristic of light transportation along the pericardium meridian line and its surrounding areas at the wrist is studied by using Monte Carlo method. Three simplified models for Monte Carlo simulation are built based on the anatomical structure. The light propagation along the pericardium meridian line, the tendon and the non-meridian line nearby are simulated separately. The simulation results show strong accordance with the previous experimental results that the light propagation along the pericardium meridian has an advantage over its surrounding areas at the wrist. Luminous flux in different layers on the three paths are calculated, and the results show that the optical transmission characteristics in this region is mainly affected by its underlying structure and its underlying tissue composition. Besides, light transportation in the underlying tissue of the pericardium meridian line also has an advantage and the advantage transmission significantly correlates with the closed anatomical structure of the underlying tissue.

Key words medical optics; light-transport characteristic; Monte Carlo method; meridian

OCIS codes 170.3660; 170.3890; 170.6935

1 引 言

经络学说是中医理论的基础,指导着几乎所有的中医临床实践,但经络的物质基础至今仍未被发现。近几十年来,有关经络物质基础的各种学说相继提出,其中经络的筋膜学说^[1]和经络的间隙维学

说^[2]建立在经络循行部位的解剖和组织学基础上。筋膜学说认为人体筋膜支架是经络的解剖学基础;间隙维学说则认为经络的物质基础是人体中的各种间隙,间隙中的组织液是“经络物质”。原林等^[1]在数字人研究的基础上,对人体筋膜结构进行了分割、

收稿日期: 2012-04-19; **收到修改稿日期:** 2012-06-04

基金项目: 国家 973 计划(2006CB504505)和广东省中医药项目(2009436,2010461)资助课题。

作者简介: 江怡帆(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学在生物医学中的应用方面的研究。

E-mail: jiangyifan1221@yahoo.cn

导师简介: 陈长水(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事激光光学、生物光子学和光子中医药等方面的研究。

E-mail: cschen@aiofm.ac.cn(通信联系人)

标记和三维重建,构建了与古代经络记载走行相似的可视性串珠样立体结构,且经穴的定位在四肢大多数定位于肌间隔疏松结缔组织聚集处,这一结果有力地支持了经络的筋膜学说和间隙维学说。经络的现代研究始于20世纪50年代,国内外学者利用现代科学手段研究并发现了经络的一些生物物理学特性^[3~7],这些发现一定程度上证明了经络的客观存在性。在经络光传输特性的研究中,体表漫射光探测法被用于研究腕部手厥阴心包经的光传输特性,结果表明光沿心包经呈优势传导^[8~10],而当给腕部手厥阴心包经循行线施加人为因素(如艾灸、血流阻滞)时,经络的光传输特性会发生相应的变化^[11,12]。

蒙特卡罗方法是一种建立在随机数基础上的计算机随机模拟方法,能够同时获得多个物理量的模拟结果。1983年,Wilson等^[13]首次使用蒙特卡罗方法模拟激光与组织的相互作用,此后,该方法被广泛应用于模拟光在生物组织中的传输过程、生物组织光学特性参数的计算等方面^[14,15]。

为了研究腕部手厥阴心包经循行区域的解剖组织结构与光沿腕部心包经呈优势传导现象之间的关系,并对本实验室之前经络光传输特性的实验进行解释和验证,基于经络的筋膜学说和间隙维学说以及之前的实验,结合腕部手厥阴心包经循行区域的实际解剖结构和经穴定位的国家标准建立了用于蒙特卡罗模拟的简化模型,并用蒙特卡罗方法模拟了体表腕部手厥阴心包经走行区域、体表肌腱走行区域以及旁开非经络线区域的光传输情况,最后与本实验室之前的实验结果进行了比较分析。

2 模 型

图1为模拟区域的解剖结构示意图,根据中华人民共和国国家标准(GB12346-90)《经穴部位》,腕部手厥阴心包经的循行部位在掌长肌腱和桡侧腕屈肌腱之间。在图1所示解剖结构的基础上,建立了如图2所示的三个简化模型。图2(a)为腕部手厥阴心包经循行部位组织结构的简化模型,由皮肤、皮下组织、深筋膜、肌腱以及疏松结缔组织组成,其底层是一个由筋膜围成的相对闭合的腔,腔内由疏松结缔组织填充,根据文献^[16],模拟中闭合腔的宽度和深度分别设为5 mm和3 mm;图2(b)为旁开非经络线上组织结构的简化模型,由皮肤、皮下组织和疏松结缔组织三层组织构成;图2(c)为肌腱走行路径上组织结构的简化模型,由皮肤、皮下组织和肌腱

三层组成。在图2(b)和(c)中假设组织的横向尺寸无限大。对于图2(a)所示的模型,由于深筋膜和肌腱同属致密结缔组织,模拟中所用深筋膜的光学参数与肌腱相同。图2(a)和(b)中所示的疏松结缔组织由少量细胞和大量细胞间质构成,细胞间质相当于血浆,因此模拟中疏松结缔组织的光学参数为不含血小板的血浆的光学参数,而由于血浆的有效散射系数非常小($\mu'_s=0.02\text{ mm}^{-1}$),为非高散射介质,因此研究中光子在经络模型的底层筋膜间隙结构的传输过程仅考虑填充其中的疏松结缔组织(血浆)对光子的吸收。由于此处筋膜的厚度相对于皮肤、皮下组织以及筋膜间隙的深度来说非常薄,因此当光子到达四周的筋膜边界时仅考虑筋膜反射和透射。

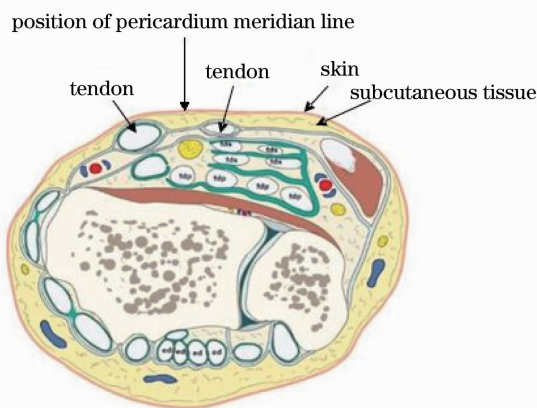


图1 蒙特卡罗模拟区域的断面解剖示意图
Fig.1 Sectional anatomical structure of Monte Carlo simulation area

生物组织的光学特性可由吸收系数 μ_a 、有效散射系数 μ'_s 和各项异性因子 g 来描述,其中 $\mu'_s = \mu_s(1-g)$, μ_s 为组织的散射系数。光子在组织中的传输由两个随机过程组成,一个描述了光子在散射过程中走过的步长 s ,由 $s = -\frac{\ln(\xi)}{\mu_t}$ 确定,其中 μ_t 为总衰减系数, $\mu_t = \mu_a + \mu_s$, ξ 为0~1之间均匀分布的随机数;另一个是光子在散射过程中的偏转角度,由Henyey-Greenstein相函数确定。光子在组织中的吸收由光子在组织中权重的变化表示为

$$\Delta w = \frac{\mu_a}{\mu_t} w, \quad (1)$$

光子的初始权重设为1。光子在组织分界面的反射率由菲涅耳定律计算得到,模拟的光子数为 10^6 个,光子垂直于皮肤表面入射,光子在组织中传输时的位置由笛卡尔坐标系确定。探测示意图如图3所示。

表1给出了用于模拟的各层组织的光学参数和厚度,所有光学参数都从已发表的文献中取得,波长

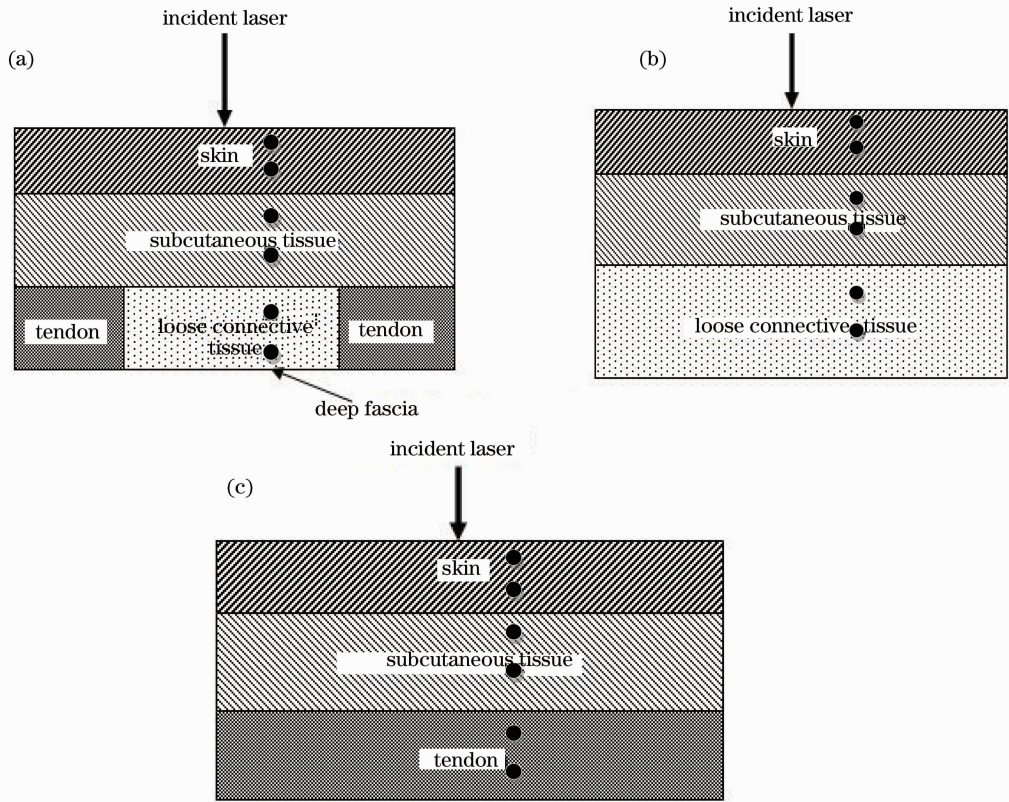


图 2 用于蒙特卡罗模拟的简化模型。(a)腕部手厥阴心包经循行路径；(b)旁开非经路线；(c)肌腱走行路径
 Fig. 2 Simplified model for Monte Carlo simulation. (a) On pericardium meridian line at the wrist;
 (b) on non-meridian line nearby; (c) on tendons

表 1 蒙特卡罗模拟中各层组织的光学参数

Table 1 Optical parameters of tissue for Monte Carlo simulation

Tissue	Absorption coefficient μ_a / mm^{-1}	Transporting scattering coefficient μ'_s / mm^{-1}	Anisotropy factor g	Refractive index n	Thickness of each layer d / mm
Skin	0.04	0.98	0.90	1.4	1
Subcutaneous tissue	0.12	1.12	0.75	1.4	3
Loose connective tissue (blood plasma)	0.02	0.02	0.25	1.35	—
Tendons (deep fascia)	0.01	1	0.95	1.47	—

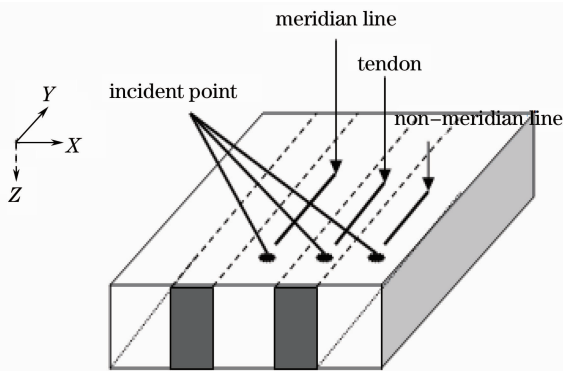


图 3 模拟探测示意图

Fig. 3 Scheme of simulation detecting

范围 $600 \sim 1000 \text{ nm}$ ^[17~19]。模拟过程基于 MCML 程序^[20]并由 Matlab 软件编写实现。

3 蒙特卡罗模拟结果和讨论

图 4 为蒙特卡罗模拟得到的体表漫射光强度随入射点和探测点之间距离增加的变化规律拟合曲线，三条拟合曲线分别表示腕部心包经循行路径、旁开非经路线以及肌腱走行路径上的光传输情况。图中的横坐标为入射点与探测点之间的距离，纵坐标为模拟中探测到的体表漫射光强度。图中曲线是体表探测值的拟合曲线，为指数函数，并与蒙特卡罗模拟中的体表探测值高度相关 ($R^2 > 0.9$)，表明无论

在经络线还是非经络线上,随着入射点与探测点之间距离的增加,体表漫射光强度都呈指数衰减。表 2 为三条路径上蒙特卡罗模拟所得漫射光强度比较,每条路径取 10 个探测点,每个探测点的光强由从该点逸出组织表面的所有光子的权重求和得到。结果表明腕部手厥阴心包经路径上的漫射光强度最大,其次为肌腱走行路径,旁开非经络线上漫射光强度最小,且配对检验差异显著($P < 0.05$),如图 5 所示。

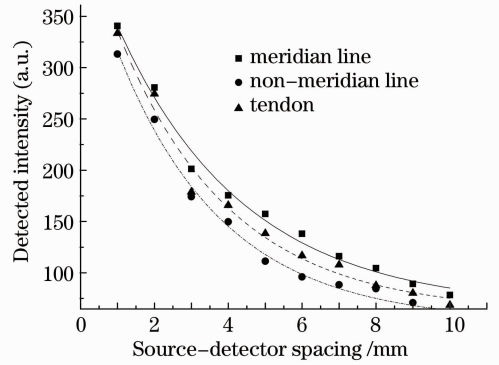


图 4 三条路径上蒙特卡罗模拟结果

Fig. 4 Results of Monte Carlo simulation on three paths

表 2 三条路径上蒙特卡罗模拟结果数据比较

Table 2 Comparison of the Monte Carlo simulation data on three paths

Distance/mm	Meridian line (relative intensity)	Tendon (relative intensity)	Non-meridian line (relative intensity)
1	340.69	333.52	313.18
2	280.51	274.51	249.43
3	201.31	178.78	174.19
4	175.49	165.91	149.67
5	157.30	138.43	111.26
6	138.13	116.70	95.95
7	116.07	107.78	88.42
8	104.53	87.65	84.51
9	89.20	80.21	70.92
10	78.28	68.48	54.57
Mean	168.15 ± 85.40	155.20 ± 87.19	139.21 ± 84.19
Function	$y = 369.02\exp(-0.29x) + 62.7$	$y = 387.74\exp(-0.32x) + 56.1$	$y = 374.05\exp(-0.33x) + 47.8$
Correlation coefficient	$R^2 = 0.989$	$R^2 = 0.975$	$R^2 = 0.990$

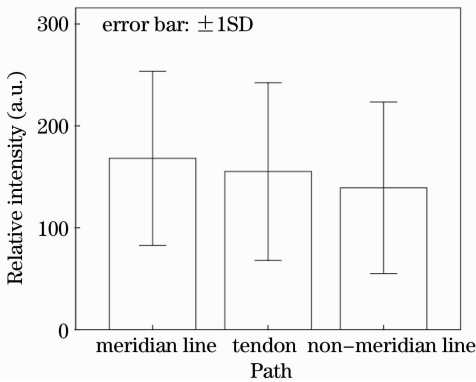


图 5 蒙特卡罗模拟中三条路径上漫射光强度的差异

Fig. 5 Different intensity of diffuse light on three paths in Monte Carlo simulation

图 6 为实验中三条探测路径上的光传输情况,图中三条不同路径上的体表漫射光强度呈指数衰减规律,且强度值有显著差异。在之前的实验中获得了腕部手厥阴心包经区域的漫射光分布图,在该分布图上,体表漫射光在腕部手厥阴心包经走行区域

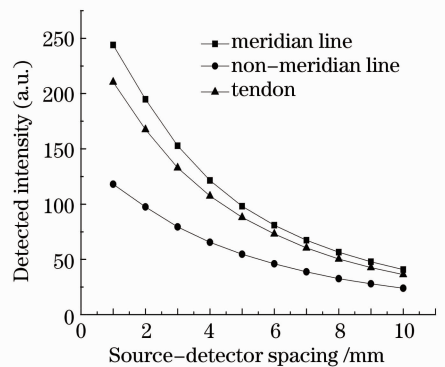


图 6 实验中三条探测路径光传输情况

Fig. 6 Light transportation along different paths in experiment 出现峰值,而在肌腱走行部位显示有明显的凹陷^[8]。提取心包经、肌腱和非经络线三条路径上的漫射光强度值如表 3 所示,腕部手厥阴心包经上漫射光强度最强,肌腱走行区域次之,旁开非经路线上最小,且差异显著,如图 7 所示($P < 0.05$),与蒙特卡罗模拟结果一致。

表3 三条探测路径上实验数据比较

Table 3 Comparison of experimental data on three detected paths

Distance /mm	Meridian line /mV	Tendon /mV	Non-meridian line /mV
1	243.88±46.69	210.36±41.87	118.01±26.67
2	194.82±39.51	167.43±34.30	97.50±20.65
3	152.81±31.10	132.87±28.02	79.41±17.12
4	121.40±25.13	107.45±25.00	65.56±13.61
5	98.15±20.23	88.07±20.99	54.64±10.82
6	80.96±16.58	73.08±18.27	46.02±8.51
7	67.33±14.05	60.42±15.28	38.84±7.01
8	56.61±11.75	50.42±12.79	32.60±5.52
9	47.88±9.63	42.68±11.04	27.96±4.42
10	40.77±8.36	36.33±9.36	23.97±3.66
Mean	110.46±22.30	96.91±21.69	58.45±11.80

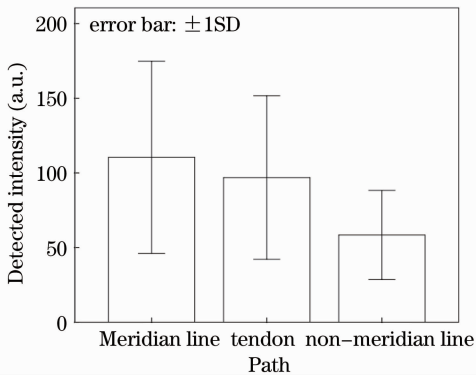


图7 实验中三条路径漫射光强度的差异

Fig. 7 Different intensity of diffuse light on three paths in the experiment

为了考察光子在组织内部的传输情况,分别在三个模型中每层取两个点,点的坐标位置在每个模型中相同,并计算所取点处的光通量(图2)。取光通量对数作图,结果如图8所示,其中深度为0.5 mm和1 mm处为皮肤层的两点,2 mm和3 mm处为皮下组织的两点,4 mm和5 mm处为三个模型中底层组织

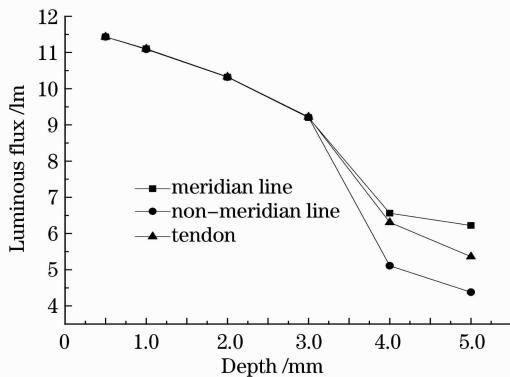


图8 三条路径上不同层的光通量

Fig. 8 Luminous flux in different layers on three simulated paths

的两点。由图8可知,该分层组织模型的光通量随组织深度的增加而衰减,在皮肤层和皮下组织层中所取点的光通量之间无差异,而在三个模型的底层组织中所取点处光通量的差异明显,心包经循行路线上底层筋膜间隙结构中光通量最高,其次为肌腱走行路径的底层组织,旁开非经络线上底层组织的光通量最小。

4 讨 论

在之前的实验中获得了两个主要结果:1)体表漫射光在腕部心包经上的强度最大,即光沿心包经呈优势传输;2)三条路径上体表漫射光均随入射点和探测点距离的增加呈现指数衰减。三条路径上蒙特卡罗模拟结果与实验结果一致。从模拟区域的解剖组织结构来看,以肌腱走行区域的模拟结果为参照,当模型底层无相对闭合的筋膜间隙结构,即旁开非经络线路径时[图2(b),底层组织成分与图2(a)中间隙填充成分相同],该路径上的漫射光强度均值在蒙特卡罗模拟和实验中分别为 139.21 ± 84.19 和 58.45 ± 11.80 ,低于肌腱的 155.20 ± 87.19 和 96.91 ± 21.69 ;当模型底层加入筋膜间隙结构后[图2(a)],即腕部心包经循行路径,该路径上的漫射光强度均值在蒙特卡罗模拟和实验中分别提升至 168.15 ± 85.40 和 110.46 ± 22.30 ,高于肌腱走行区域的漫射光强度均值,且为三条路径中最高,表明筋膜间隙结构与体表漫射光强度的提升有关。

从三层组织模型中光通量的分布来看,三个模型中光通量随组织深度的增加而衰减,皮肤层和皮下组织层中光通量的分布无明显差异,而当光在底层组织中传输时光通量差异明显。腕部手厥阴心包经循行路径模型的底层光通量最大,其次为肌腱走行路径的

底层组织,旁开非经络线上底层组织的光通量最小,表明在底层组织中光也沿经络线呈优势传输。

在腕部心包经循行线底层有一个由筋膜围成的相对闭合结构,其中填充了吸收、低散射、低各向异性的疏松结缔组织成分。由于该闭合结构的存在,光子与底层组织两侧筋膜边界发生相互作用,形成反射和透射,导致光子留在探测范围内继续传输的概率增大,从而增加了该闭合结构内的光通量,同时也增大了其逸出人体表面后被探测器探测到的概率,使腕部心包经区域光传输增强。去除该闭合结构后(旁开非经络线),该层光通量明显下降,低于肌腱走行路径,表明底层结构的差异导致了不同路径上的光传输差异。比较肌腱走行路径和旁开非经络线底层组织可知,二者仅有组织成分不同,即组织的光学特性参数不同,但二者在底层的光通量差异显著,表明底层组织成分的差异也是影响光传输的因素之一。

因此,三条路径上,在体表和底层组织中光都沿腕部心包经呈优势传输,该优势传输的现象主要与循行区域底层的结构和组织成分有关,腕部心包经循行线底层的筋膜间隙结构增强了经络线上的光传输,表明筋膜间隙与经络的物质基础有关。

5 结 论

基于腕部手厥阴心包经区域的解剖结构和组织构成建立了蒙特卡罗模拟模型,对腕部手厥阴心包经循行区域、旁开非经络线区域和肌腱走行区域的光传输特性用蒙特卡罗方法进行了模拟。结果表明,在三条路径上体表漫射光都随着入射点与探测点距离的增加呈指数衰减,但不同路径漫射光强度值有显著差异,腕部手厥阴心包经循行路径漫射光强度值最大,其次为肌腱走行路径,旁开非经络线路径上的漫射光强度值最小,与本实验室之前的实验结果一致。计算了三个模型中各层的光通量情况,并对三条路径上的蒙特卡罗模拟结果作了比较分析。分析表明,腕部心包经循行区域的光传输特性主要受该区域的底层结构和底层组织成分影响,并且光在三条路径的底层结构中同样沿腕部心包经呈优势传输,该优势传输的现象主要与循行区域的底层结构和组织成分有关,腕部心包经循行线底层的筋膜间隙结构加强了经络线上的光传输。

参 考 文 献

1 Yuan Lin, Jiao Peifeng, Tang Lei *et al.*. The material basis of

- the TCM meridian theory, connective tissue, fascia, autologous monitoring system[J]. *China Basic Science*, 2005, **7**(3): 44~47
- 2 Zhang Shenghong, Chen Jing, Li Peibin. Meridian is dimensional systems of the body clearance[J]. *Discovery of Nature*, 1997, **16**(3): 66~71
张声阁, 陈 静, 李佩斌. 经络就是人体间隙维系统[J]. 大自然探索, 1997, **16**(3): 66~71
- 3 Hu Xianglong, Wu Baohua. Natural display of body surface meridian line[J]. *Acupuncture Research*, 1993, **18**(2): 83~89
胡翔龙, 吴宝华. 人体体表经脉循行路线的自然显示[J]. 针刺研究, 1993, **18**(2): 83~89
- 4 Sun Pingsheng, Zhang Jiangyan, Zhang Kexin. New progress of sound track calibration of the large intestine meridian through the surface line [J]. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 1997, (5): 3~6
孙平生, 张江艳, 张柯欣. 用声轨迹标定大肠经体表线路研究的新进展[J]. 辽宁中医杂志, 1997, (5): 3~6
- 5 Zhang Changlin. Electromagnetic standing wave superimposed on the background as the meridian system [J]. *Acupuncture Research*, 1995, **20**(4): 52~62
张长琳. 电磁驻波叠加作为经络系统的背景[J]. 针刺研究, 1995, **20**(4): 52~62
- 6 Shen Xueyong, Wei Jianzi, Zhang Yihe *et al.*. Study on volt-ampere (V-A) characteristics of human acupoints[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2006, **26**(4): 267~271
沈雪勇, 魏建子, 张一和 等. 人体穴位伏安特性研究[J]. 中国针灸, 2006, **26**(4): 267~271
- 7 Yan Zhiqiang, Shi Yanqing, Wang Yizhong *et al.*. Research on the high luminescence characteristics of the fourteen main meridians on human body [J]. *Acupuncture Research*, 1989, **14**(3): 389~394
严智强, 史燕清, 王一等. 人体十四正经高冷光特性的研究[J]. 针刺研究, 1989, **14**(3): 389~394
- 8 Deng Xin, Chen Changshui, Jiang Yifan *et al.*. Study of light-transport properties of human pericardium meridian [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0817001
邓 鑫, 陈长水, 江怡帆 等. 点阵结合法进行人体手厥阴心包经的光传播特性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0817001
- 9 Shusen Xie, Hongqin Yang, Hui Li *et al.*. Optically noninvasive measurement of the light transport properties of human meridians [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(12): 928~931
- 10 C. H. Choi, K. S. Soh, S. M. Lee *et al.*. Study of propagation of light along an acupuncture meridian[J]. *J. Optical Society of Korea*, 2003, **7**(4): 245~248
- 11 Liu Xiangrong, Chen Changshui, Yu Jinwang *et al.*. Study on optical transport of pericardium meridian and surrounding non-meridian tissue before and after moxibustion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0404003
刘湘容, 陈长水, 余锦望 等. 艾灸前后手厥阴心包经及其周边非经络组织的光传输特性探究[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 0404003
- 12 Wang Yuhua, Yang Hongqin, Xie Shusen *et al.*. Experimental measurement of the optical transport along human meridian direction[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
- 13 B. C. Wilson, G. Adam. A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue [J]. *Med. Phys.*, 1983, **10**(6): 824~830
- 14 A. Bilenca, A. Desjardins, B. E. Bouma *et al.*. Multicanonical Monte-Carlo simulations of light propagation in biological media [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(24): 9822~9833

- 15 F. Botta, A. Mairani, G. Battistoni *et al.*. Calculation of electron and isotopes dose point kernels with FLUKA Monte Carlo code for dosimetry in nuclear medicine therapy[J]. *Med. Phys.*, 2011, **38**(7): 3944~3954
- 16 Xie Haoran. The accurate measurement of the meridian points [J]. *Shanghai J. Acupuncture and Moxibustion*, 1988, (2): 33~35
谢浩然. 经络穴位的准确测量[J]. 上海针灸杂志, 1988, (2): 33~35
- 17 A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. V. Tuchin. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: a review [J]. *J. Innovative Optical Health Sciences*, 2011, **4**(1): 9~38
- 18 A. Kienle, C. Wetzel, A. Bassi *et al.*. Determination of the optical properties of anisotropic biological media using an isotropic diffusion model[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2007, **12**(1): 014026
- 19 M. Meinke, G. Müller, G. Mueller *et al.*. Optical properties of platelets and blood plasma and their influence on the optical behavior of whole blood in the visible to near infrared wavelength range[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2007, **12**(1): 014024
- 20 L. Wang, S. L. Jacques, L. Zheng. MCML: Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, **47**(2): 131~146

栏目编辑：韩 峰