

文章编号: 0258-7025(2002)02-0189-03

弱激光照射改善红细胞变形性的物理机理的分形研究

刘晓然^{1,2}, 陆建¹, 王亚伟¹, 骆晓森¹, 倪晓武¹, 陶月玉³, 张道斌³

(¹ 南京理工大学应用物理系, 江苏南京 210094; ² 海军工程大学电子工程学院, 江苏南京 211800; ³ 海军 414 医院心血管科, 江苏南京 210015)

摘要 在弱激光血管内照射前后红细胞变形指数、红细胞刚性指数等指标均有明显改善的临床应用结果基础上, 采用分形理论研究了蛋白质的弹性模量与谱维数的标度关系, 得到了激光照射增加了红细胞膜中的蛋白质分子谱维数而改善了红细胞变形能力的结论。

关键词 弱激光血管内照射疗法, 分形, 弹性模量, 红细胞变形性

中图分类号 R 318.51 文献标识码 A

Fractal Analysis on the Physical Mechanism of Intravascular Low-reaction-level Laser Irradiation Therapy Improving the Deformity of Erythrocyte

LIU Xiao-ran^{1,2}, LU Jian¹, WANG Ya-wei¹, LUO Xiao-sen¹,
NI Xiao-wu¹, TAO Yue-yu³, ZHANG Dao-bin³

(¹ Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)
(² The School of Electronic Engineering, Navy University of Technology, Nanjing 211800)
(³ Departments of Angiocardiopathy, 414 Navy Hospitals, Nanjing 210015)

Abstract Using the fractal theory, this paper studies the ILLIT's effects on the deformity of erythrocyte. The results of theoretical analysis indicate that ILLIT surely can decrease the elastic modulus of protein, which is advantageous to improve the deformity of erythrocyte.

Key words ILLIT, fractal, elastic modulus, the deformity of erythrocyte

1 引言

弱激光血管内照射疗法(ILLIT)可以提高红细胞的变形能力,从而改善血液动力学性质和组织的微循环,使患者的病情得到明显改善或好转^[1],但未见有对其作用或治疗机理进行深入的分析 and 研究的报道。本文在利用 ILLIT 临床治疗前后患者的红细胞变形指数、红细胞刚性指数等指标均有显著改善的临床实验结果基础上,采用分形理论研究了蛋白质的弹性模量与谱维数的关系,得到了激光照射

增加了红细胞膜中的蛋白质分子谱维数而改善了红细胞变形能力的结论,从而初步解释了 ILLIT 提高红细胞变形能力的治疗机理。

2 对象与方法

2.1 治疗对象

冠心病或不稳定性心绞痛患者共 100 例,其中弱激光治疗组(A 组)50 例,对照组(B 组)50 例。A 组:男性 31 例,女性 19 例。年龄 50~73 岁,平均年

收稿日期 2000-02-23;收到修改稿日期 2001-03-08

基金项目 国家“九五”科技攻关项目(项目编号 96-B11-04-03-02)和国家教委“跨世纪优秀人才培养计划”专项基金资助。

作者简介 刘晓然(1964—)男,海军工程大学电子工程学院副教授,博士,主要从事光子生物医学及测试技术研究。E-

mail:lxw@mail.njust.edu.cn

龄 59.47 ± 6.35 岁。患者心功能在 II-III 级范围。治疗方法为弱激光 + 药物; B 组: 男性 33 例, 女性 17 例。年龄 50 ~ 75 岁, 平均年龄 60.13 ± 6.48 岁。患者心功能在 II-III 级范围。治疗方法为药物。

两组患者年龄、性别、心功能、治疗前各项观察指标和用药种类(硝酸酯类、钙拮抗剂、 β -受体阻滞剂、血管紧张素转换抑制剂等常用的治疗冠心病药品, 但无各种具有活血化淤等功能的中药)、剂量、疗程等均无显著性差异 ($p > 0.05$)。

2.2 治疗方法

采用 HLL-1 型弱氦氖激光血管内照射仪及一次性无菌光纤头。激光波长为 632.8 nm, 经前臂外周静脉血管进行 ILLIT 照射, 功率为 3.0 mW 左右, 每次 60 min, 每日一次, 连续 10 次为一个疗程, 以观察一个疗程为限。

3 结果

弱激光治疗组(A组)的红细胞变形指数和刚性指数在治疗前后的比较(见表1), 其统计学处理结果为 $p < 0.05$, 表明有显著性差异。对照组(B组)的红细胞变形指数和刚性指数在治疗前后的比较(见表2), 其统计学处理结果为 $p > 0.05$, 表明无显著性差异。

表1 A组50例病人治疗前后指标

Table 1 Indexes before/after treatment of A group (50 CASES)

Indexes	Before treatment	After treatment
Deformity	1.35 ± 0.14	1.82 ± 0.15
Rigidity	4.68 ± 0.47	3.56 ± 0.43

表2 B组50例病人治疗前后指标

Table 2 Indexes before/after treatment of B group (50 CASES)

Indexes	Before treatment	After treatment
Deformity	1.38 ± 0.13	1.42 ± 0.13
Rigidity	4.54 ± 0.41	4.49 ± 0.46

4 理论分析与讨论

静止时的红细胞为 $8 \mu\text{m}$ 的双凹圆盘形, 受外力作用时, 容易变形, 除去外力又容易恢复原状。由于这种显著的可变形性, 红细胞能通过比其双凹圆盘形直径还小的毛细血管, 因此, 红细胞的变形性在血

液循环中, 特别是在微循环中起着重要作用, 而且对动脉硬化或血栓形成的非常狭窄的血管中的循环, 红细胞的可变形性也起着重要作用^[2]。所以红细胞的变形性是血液流变学和血液动力学中的主要指标, 具有重要的临床意义。

和所有其他细胞一样, 红细胞被一层细胞膜包裹着, 细胞膜是一种由约 50% 脂类和约 50% 蛋白质所组成的复杂而有组织的结构。物理学研究表明, 膜是以液晶状态存在的, 因此可以说, 蛋白质是游弋于脂类的海洋里^[3]。显然, 红细胞的变形指数和刚性指数由红细胞膜的弹性模量所决定, 且弹性模量越小时越易变形^[2]。而红细胞膜的弹性模量则主要由膜中蛋白质集合体的弹性所决定。

蛋白质分子在红细胞膜中的排列结构比较特殊, 其力学性质相当复杂, 为讨论问题的方便, 我们采用蛋白质的分形模型^[4], 假定血液中红细胞膜弹性体包含 N 个质量为 M 的蛋白质分子, 这些蛋白质分子组成一块均匀且各向同性的整体。当它的体积发生变化, 即产生形变时, 其弹性能量 E 可以表示为^[4]

$$E = \frac{1}{2} N c \epsilon^2 \quad (1)$$

式中, c 为每个蛋白质分子的近似弹性模量, ϵ 为体积相对变化率。

另外, 在 N 个蛋白质分子组成的构像空间里, 沿着轴向的形变是线性的, 形变量为 ξ 时, 上述系统的弹性能量还可以写成^[4]

$$E = \frac{1}{2} M \omega^2 \xi^2 \quad (2)$$

上式中的 ξ 可表示为

$$\xi^2 \propto N L^2 \epsilon^2 \quad (3)$$

式中, L 为线性尺度。

比较(1)式和(2)式, 可得

$$c \propto M L^2 \omega^2 \quad (4)$$

另外, 根据分形理论可知, 对于无序结构的蛋白质分子而言, 态密度 $\rho(\omega)$ 可表示为^[5]

$$\rho(\omega) \propto \omega^{d_{fr}-1} \quad (5)$$

式中 d_{fr} 为谱维数。

因此(4)式可改写为

$$c \propto M L^2 \rho^{2/d_{fr}}(\omega) \quad (6)$$

这样通过标度关系(5)式, 得到了蛋白质分子的弹性模量 c 与谱维数 d_{fr} 的关系, 即当谱维数 d_{fr} 发生变化时, 弹性模量 c 将随之变化。

在临床上, 红细胞的变形指数 DI 表示为细胞长

轴与短轴之比,刚性指数 IR 则与全血和血浆黏度及红细胞压积有关,两者都是由红细胞膜的弹性模量 c 决定^[6]。因此当红细胞的弹性模量发生变化时,变形指数和刚性指数也随之而变。

在对病人实施弱激光血管内照射疗法时,激光束主要在红细胞膜双层结构的脂质与蛋白质连接处进行作用,激光能量使红细胞膜中蛋白质分子的电子能级发生变化而产生构像变化,这一构像变化与体系相应的自由度密切相关^[3]。对于生物分子而言,分子的低频振动与其生物学功能紧密相关,构像变化的结果导致与蛋白质分子低频振动部分有关的自由度数量增加^[7],因而蛋白质分子的谱维数 d_f 增加。从(6)式可以看出,激光照射的结果减少了红细胞膜的弹性模量,使得红细胞膜的变形指数变大而刚性指数变小,从而提高了红细胞的变形能力。

临床应用结果显示患者经 ILLLI 前后红细胞变形指数变大,红细胞刚性指数减少,其红细胞的变形能力得到了显著改善,与以上理论分析结果基本相符。当然,由于血液及其红细胞结构的复杂性,因

而还有其他因素可能影响红细胞变形能力,本文的结论只是对 ILLIT 改善红细胞变形能力的物理机理的一种解释。

参 考 文 献

- 1 Zhu Ping. Intravascular Low-Reaction-Level Laser Irradiation Therapy [M]. Nanning : Guangxi Sci. and Tech. Press , 1999. 40 ~ 51 , 27 (in Chinese)
- 2 Oka S. . Biorheology [M]. Kyoto : Mohalafusa , 1984. 94 , 108 (in Japanese)
- 3 M. V. Volkenstein. Physics and Biology [M]. New York : Academic Press , 1982. 77 ~ 78 , 53
- 4 H. J. Stapleton , J. P. Allen , C. P. Flynn *et al.* . Fractal form of proteins [J]. *Phys. Rev. Lett.* , 1980 , **45** (17) : 1456 ~ 1459
- 5 Li Houqiang , Wang Fuquan. Fractal Theory and Its Applications in Molecular Science [M]. Beijing : Science Press , 1993. 257 ~ 258 (in Chinese)
- 6 Zhao Chunting , Zhao Ziwen. Clinical Hemorheologic Characteristics [M]. Beijing : Demos Hygiene Press , 1997. 40 ~ 51 (in Chinese)
- 7 Liu Songhao , Meng Yaoyong. Laser biology [J]. *Physics* (物理) , 1992 , **2**(9) : 513 ~ 517 (in Chinese)

征 订 启 事

经国家科学技术部批准,本刊 2002 年第二季度将出版增刊一期,内容为“第十五届全国激光学术会议”论文集,收集会议上发表的约 200 多篇论文,主要包括:激光物理,超短脉冲激光与非线性光学,全固态激光器及各类新型激光器,光通信有源及无源器件,光束传输、控制及光束质量,激光光学材料、薄膜及元器件,工业激光及应用,医用激光及激光与生物组织相互作用等。

本期增刊约 800 页,定价为 160.00 元(含邮寄费)。如需订阅的单位或个人请将款从邮局汇至上海市 800-211 信箱《中国激光》编辑部苏笑珍收。

《中国激光》编辑部

2002 年 2 月