

编者按 经络学说是中华民族独有的中医学的基本理论之一,是中华民族宝贵的遗产. 它以一种完全不同于现代医学理论的方式, 阐述人体的机能调控和生命过程, 因此多年来始终受到国内外学者的关注. 我国自建国初期便开始了经络研究, 40余年来取得了一定的成就. 但长期以来, 经络研究始终处在争论中, 在争论中前进和发展. 学术界存在不同意见, 甚至看法迥异. 争论的焦点在于: (i) 经络是客观存在的, 还是虚幻的? (ii) 如果是客观存在的, 其物质基础是什么? 在物质基础的研究方面, 多数学者认为是神经系统, 少数学者认为是其他组织. 在经络的研究手段方面, 存在着生物物理学派、生理学派及临床学派等.

复旦大学费伦教授领导的课题组利用各种现代化的科研手段对经络的物质基础及功能性特征进行了探索, 取得了一些新的发现, 并提出了一些新的思路和看法. 本着尊重科学、尊重事实的态度, 本刊发表该课题组的《经络物质基础及其功能性特征的实验探索和研究展望》一文, 以达到百家争鸣的目的, 但这仅仅是一家之言, 其研究成果是初步的、探索性的. 这一课题还有待医学、物理学、化学、生物学等各学科领域的专家深入研究和论证.

## 经络物质基础及其功能性特征的实验 探索和研究展望

费伦<sup>①</sup> 承焕生<sup>②</sup> 蔡德亨<sup>③</sup> 杨世坝<sup>④</sup> 许建荣<sup>④</sup> 陈尔瑜<sup>⑤</sup>  
党瑞山<sup>⑤</sup> 朮宏<sup>⑥</sup>\* 沈雪勇<sup>⑦</sup> 唐颐<sup>⑧</sup>

(①复旦大学测试中心, 上海 200433; ②复旦大学现代物理研究所, 上海 200433; ③上海宝山针灸专科医院, 上海 200071; ④上海市第六人民医院放射科, 上海 200233; ⑤第二军医大学解剖学教研室, 上海 200433; ⑥复旦大学应用力学系生物医学工程研究所, 上海 200433; ⑦上海中医药大学针灸系, 上海 200032; ⑧复旦大学化学系, 上海 200433. \*联系人)

摘要 人体经络穴位的物质基础是以结缔组织为基础, 连带其中的血管、神经丛和淋巴管等交织而成的复杂体系. 与穴位位置相对应的深层组织结构中, 富集有 Ca, P, K, Fe, Zn, Mn 等元素. 这个物质基础中的液晶态胶原纤维具有高效率传输红外光的特征波段. 在此基础上, 本文展望了研究经络穴位的未来发展方向, 并提出了进一步研究的思路与手段.

关键词 经络 结缔组织结构 钙库 红外光传输

经络学说是中医学说的重要组成部分, 但长期以来现代生物学和医学界在经络存在的客观性、经络的物质基础和本质等重要问题上, 存在着极大的争议. 这些重要问题应该通过严格的实验探索、验证, 从科学理论上给予系统的阐明, 从而使这一宝贵遗产与现代科学接轨、融合, 确立其应有的学术地位, 产生更大的作用. 通过研究我们发现:

(1) 经络穴位的物质基础是在以结缔组织为基础, 连带其中的血管、神经丛和淋巴管等交织而成的复杂体系之中. 这个体系我们称之为结缔组织结构, 它不仅是各种器官、组织和细胞的载体, 并且与细胞进行着物质、信息和能量的传输和调节, 构成一个对生物机体内外环境能作出反应的动态平衡体系.

(2) 初步发现, 与穴位位置相对应的深层结缔组织结构中, 富集有 Ca, P, K, Fe, Zn, Mn 等, 本文称之为特定元素. 其功能之一可能是在穴位的局部区域内起着存储和应急调节  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  浓度的作用, 而这两者是重要的信使物质, 在人体各种生理活动中发挥着重要的作用.

(3) 初步发现, 这个物质基础中的液晶态胶原纤维具有高效率传输红外光的特征波段. 还可能存在着具有受激自发辐射功能的超晶格微结构, 预示着人体内部可能存在着一个生物光子系统, 在信息、能量的交换等生理活动中起着极其重要的作用.

## 1 实验与结果

经络学说的核心内容可概括为: “内属腑脏, 外络肢节”<sup>[1]</sup> “行气血, 营阴阳”<sup>[2]</sup> “决生死, 处百病, 调虚实”<sup>[3]</sup>, 中医中药和针灸推拿在临床医学中的特殊疗效已是不容否认的事实, 并为当今世界许多国家医药管理机构所认可. 因此经络现象必有其内在的物质基础.

### 1.1 穴位的形态学实验定位

人体上众多穴位是各条经脉线上的重要功能点, 针刺穴位时, 受施者和施针者都会分别感到“得气”<sup>1)</sup>和“鱼吞钩饵”<sup>2)</sup>的针感, 这是用以判断穴位是否准确的唯一测试指标, 所以穴位是经络能为人们检查到的唯一“窗口”. 我们认为, 从穴位入手, 才有可能找到探索经络物质基础的通道. 本研究采用磁共振成像(MRI)造影、解剖、X射线计算机断层扫描(XCT)3种方法来给穴位定位.

(1) 磁共振成像造影定位. 根据中医学说中关于“药物归经”<sup>3)</sup>的论述及MRI造影原理, 选择柴胡和羌活这两种对MRI呈现高信号的传统中药, 经过提取、浓缩、灭菌制成含量为0.05 g/mL的针剂, 分别注入志愿者“阳陵泉”(属胆经)和“秩边”(属膀胱经)穴位内, 用MRI设备(日本 Shimadzu SMT-100)在志愿者的下肢及臀部扫描, 对比注射前后两个穴位区MRI的差异, 发现柴胡和羌活都分别富集于上述两个穴位中, 呈现某种特征分布的形貌并定向扩散, 扩散的方向与胆经、膀胱经的走向相对应. 图1(a)和(b)分别为柴胡注射前和注射后

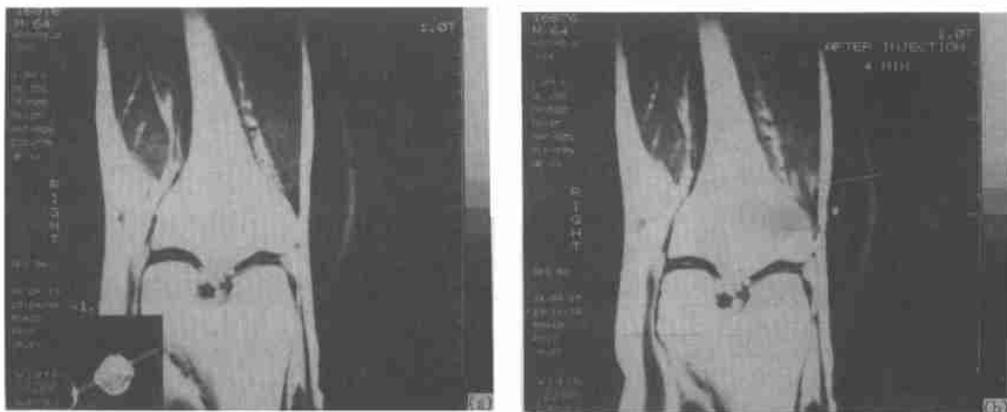


图1 志愿者右下肢“阳陵泉”穴位在注入柴胡提取液针剂前后的MRI对比

(a)注射前的MRI, 左下角表示MRI扫描层面与“阳陵泉”的相对位置和取向; (b)注射后4 min时的MRI, 箭头所指为柴胡制剂富集在“阳陵泉”穴位中的结缔组织上具有的特定形态特征, 扩散方向与足少阳胆经经脉相一致. 图中上方为肢体远侧, 下方为肢体近侧

1) “得气”是指受施者在扎入穴位、捻针刺穴位时, 在穴位中产生酸、胀、麻等感觉, 并且循经传递

2) “鱼吞钩饵”是指施针者扎入穴位后, 通过捻针刺刺激穴位, 当受施者感觉“得气”的同时, 施针者会在针尖上产生“沉、紧、涩”的感觉

3) 冠宗《本草衍义》, 宋代

4 min 时的 MRI 图象,可见柴胡沿着胆经方向扩散. 图 2 表明羌活的扩散方向在秩边穴以上部位与脊柱平行,在秩边穴以下部位向外侧倾斜,正好与膀胱经走向一致. MRI 造影还显示出这两个穴位的三维位置都与人体内的结缔组织结构关系密切. 联系到经络学说中关于“经脉十二者伏行分肉之间,深而不见”<sup>[4]</sup>的描述,肌肉所附着的骨膜及骨间膜等结缔组织结构正好与经络走向相对应,这表明通过 MRI 造影获得的关于某些结缔组织结构与经络相关的信息决非是偶然的.

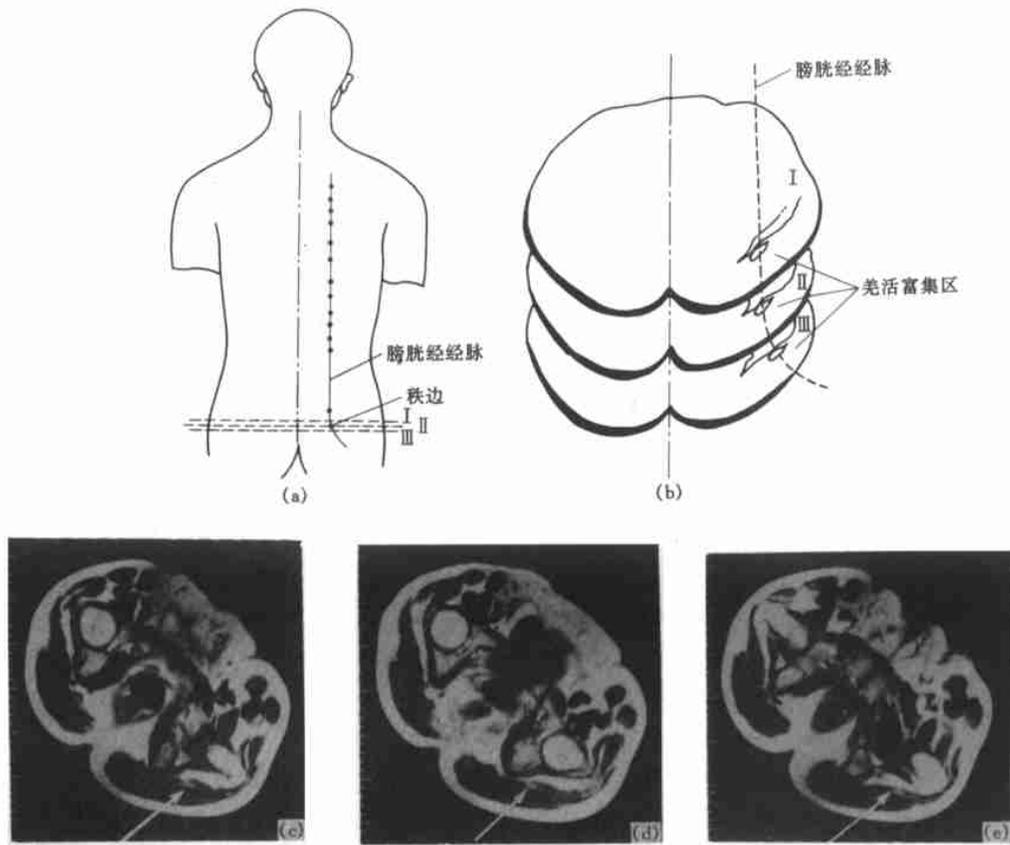


图 2 志愿者右臂部“秩边”穴位在注射羌活提取液针剂后的 MRI

(a) 示意膀胱经经脉的走向及 MRI 断层扫描 3 个层面(虚线)的间隔,“秩边”穴在中层; (b) 将 3 个层面叠成立体示意,显示上中下 3 个富集区的连线与膀胱经走向一致; (c)、(d)、(e) 分别为注射羌活制剂 4、8、16 min 后的 MRI 显示羌活提取液分别富集在上中下 3 个层面中箭头所指的位置上

(2) 解剖学定位. 为了将 MRI 定位深入一步,对一条离体人小腿和 3 具完整人尸体标本中胆经、胃经、肺经上 73 个穴位的位置进行了解剖学定位<sup>[5, 6]</sup>. 凭借资深针灸医生的临床经验,先将针扎入穴位中相当于“地”<sup>[1]</sup>的深度,然后解剖、观察针尖所在的位置. 统计结果表明:

1) 从皮肤将针扎入穴位时,在浅、中、深 3 个层次上都会产生不同强度的针感和疗效. 经络学中对这 3 个层次冠以“天”、“人”、“地”3 个名称,其中“地”的针感最为强烈,易于定位. 本文关于“经络的物质基础”的探索,主要集中于“地”的位置,关于“天”、“人”等位置的系统研究有待今后进一步开展

胆经、胃经和肺经<sup>5,9</sup>上的各个穴位“地”深度的位置全都与结缔组织结构关系密切。

(3) X射线计算机断层扫描(XCT)定位. 为了进一步验证解剖学的定位, 先后请4位不同资历的针灸医生在两位志愿者的“外丘”与“阳交”穴位上凭针感将针扎入“地”的深度, 然后用XCT(日本 Shimadzu 600S)显示针尖的位置, 其结果均与解剖学定位的位置相符(图3).



图3 针扎入“外丘”和“阳交”穴位中“地”深度位置的XCT

XCT显示针尖分别处于腓骨骨膜与骨间膜交界处(a)和腓骨骨膜与后外肌间隔交界处(b), 表明“地”的深度都是某些结缔组织结构

3种形态学定位实验表明, 穴位与体内结缔组织结构关系密切, 由此推断人体内广泛分布的结缔组织结构与穴位经络系统之间存在某种相关性. 这使我们把探索经络物质基础的注意力集中到这类过去较少被人重视的生物结构上.

本实验用一种新型的手持式视频显微镜( $\times 160 \sim \times 2500$ , Hi-Scope Video Microscope System, 美国 Questar 公司)观察对应于“足三里”穴位的组织结构标本, 发现其中除了结缔组织外, 还布满了毛细血管、神经丛和淋巴管, 形成了一个以结缔组织为基础, 由这些结构交织而成的极其复杂的结构体系. 假定这类复杂结构体系就是体现穴位经络本质的物质基础, 则经络的各种功能必定是这些组织协同作用产生的. 如果能用多种实验, 从多种角度上证实这类复杂结构体系中确实存在着经络穴位的各种功能, 则其物质基础也随之证实了. 经络学说中描述的某些“功能”是十分抽象的, 目前尚难以用实验直接测定, 因此基本的途径是寻找与经络功能含义相关的某些化学、物理学特征作为经络功能的表征来探索.

### 1.2 经络穴位功能性特征的探索之一——发现穴位中存在一种“钙库”

生物机体内的  $Ca^{2+}$  是一种重要的信使物质, 它参与多种生理过程. 文献[7, 8]报道了针刺家兔和人体的穴位时, 穴位深层“组织”中的  $Ca^{2+}$  浓度呈显著升高的现象. 我们推测此种  $Ca^{2+}$  浓度的升高, 可能会诱发一系列与经络功能相关的生理作用. 然而, 此种  $Ca^{2+}$  源自何处? 文献[9]介绍了结缔组织基质中“蛋白聚糖吸引和聚集  $Ca^{2+}$  ...”, 蛋白聚糖分子之间隙又可使磷

酸钙以微晶胶体形式存在...”。据此推断: 结缔组织结构中, 很可能储存着某种形式的亚稳态结合钙, 并可能与针刺穴位时释放  $Ca^{2+}$  相关。

本实验采用质子激发 X 射线荧光发射 (PIXE) 技术测定结缔组织中的钙含量。采用外束技术: 从串列静电加速器 (NEC9SDH-2 型, 美国 National Electrostatics Corp) 得到初始能量为 1.5 MeV 的质子束 (束斑直径: 1mm, 束流: 0.2 nA) 穿过厚度为 7.5  $\mu$ m 的 Kapton 薄膜而进入大气, 并继续穿越 5mm 而到达样品, 因 Kapton 膜和空气的阻挡作用, 质子束到达样品表面的实际能量为 1.0 MeV, 可穿透样品的深度为 25  $\mu$ m。样品置于二维扫描平台上。采用 Si (Li) 探测器测定样品发射的 X 射线, 由 X 射线能谱上的峰值能量可以确定元素种类, 从峰面积经计算可以得到该元素的含量。实验中采用 PIXE 能谱上氩峰面积进行入射质子束流的归一化处理, 因空气中氩 (Ar) 的含量是恒定的。

在测定下巨墟穴位的首次实验中, 就发现下巨墟穴位结缔组织结构中的钙含量比离穴位中心点 20 mm 处的在经非穴区高数十倍 (图 4(a)、(b))。从图中也可看到除了钙外, 穴位区也存在着 K, P, Fe, Zn 等的富集。我们还对骨、肌肉、深筋膜和骨膜进行了 PIXE 测定, 其钙、磷元素的含量见表 1。可见穴位区组织中的钙含量稍低于胫骨表面 (同一数量级), 但大大高于

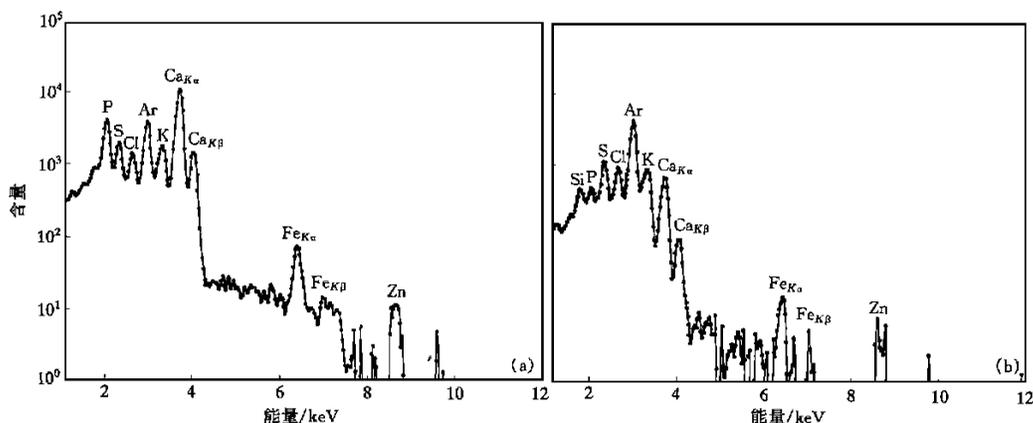


图 4 “下巨墟”穴位深层“地”的位置上(a)及相距 20 mm 在经非穴处(b)结缔组织的 PIXE 能谱

表 1 PIXE (束斑 1 mm) 测定穴位与非穴位区组织结构的 Ca/P 含量

样品名称	取样位置	Ca(质量分数)	P(质量分数)	Ca/P
骨骼肌	紧贴骨间膜, 外丘穴位处	0.06	0.32	0.19
骨骼肌	远离骨间膜, 外丘穴位处	0.016	0.29	0.06
骨骼肌	紧贴骨间膜, 光明穴位处	0.041	0.26	0.16
骨骼肌	远离骨间膜, 光明穴位处	0.123	0.33	0.37
胫骨骨膜	外面非穴位区	0.168	0.646	0.26
胫骨骨膜	内面(与胫骨接触面)非穴位区	0.278	0.653	0.43
神经膜	胫神经	0.075	0.27	0.28
成人胫骨	浅表面	27.3	12.69	2.15
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$		39.9	18.5	2.15
穴位 ( $n=10$ )	小腿骨间膜, 骨膜	$9.18 \pm 0.28^a)$	$4.55 \pm 0.14^a)$	$2.19 \pm 0.07^a)$

a) 以平均数 ± 标准差表示

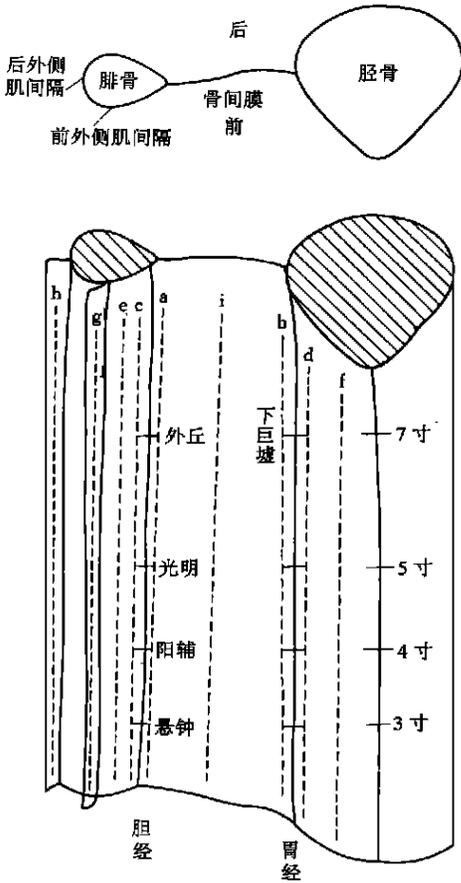


图5 人右下肢胆经、胃经穴位富集区的  
3寸至7寸段扫描示意

经扎针定位及解剖,将与穴位对应的结缔组织结构暴露在外,然后用质子静电加速器进行PIXE纵向扫描。a~i虚线为扫描线,其中a和b为贴近足少阳胆经和足阳明胃经经脉线的扫描线

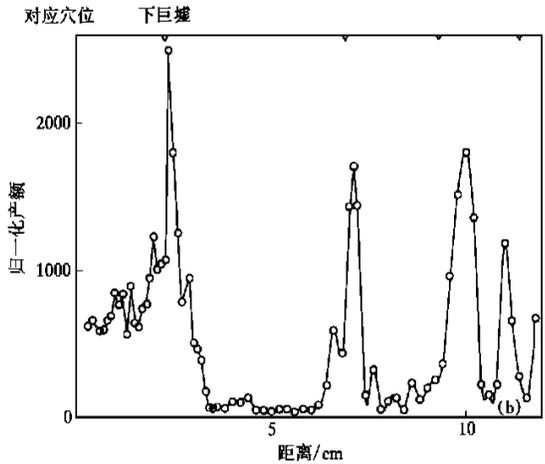
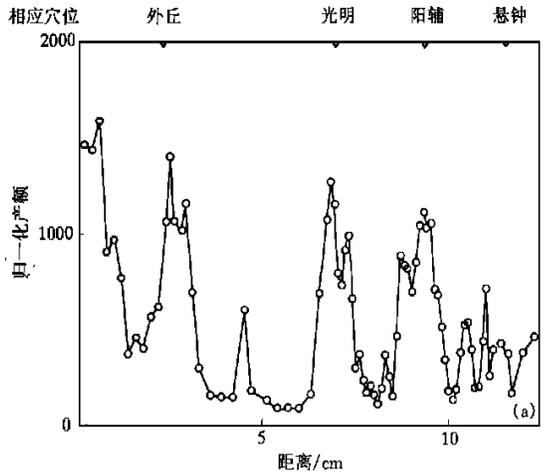


图6 PIXE扫描Ca产额分布

(a) PIXE(束斑1mm)纵向扫描骨间膜与腓骨骨膜交界处(沿足少阳胆经经脉)Ca交额的分布;(b) PIXE(束斑1mm)纵向扫描骨间膜与胫骨骨膜交界处(沿足阳明胃经经脉)Ca产额的分布

其他组织。

本研究先后对7条离体人小腿胆经、胃经上穴位密集区段(3~7寸<sup>1)</sup>)进行如图5所示的纵向扫描。图6(a)、(b)分别为图5中a、b两条对应于胆经、胃经的扫描线上各点钙产额的纵向分布,可见其峰值的纵向位置都与足少阳胆经和足阳明胃经区段中的各穴位位置相吻合,并与等寸线相对应。图6(b)中“下巨墟”穴位以下的3个钙产额峰值位置未能在经络穴位图上找到与之相对应的已有名称的穴位。但经临床针刺志愿者下肢该3个峰值位置,均能产生针

1) 寸为中医“同身寸”的简称

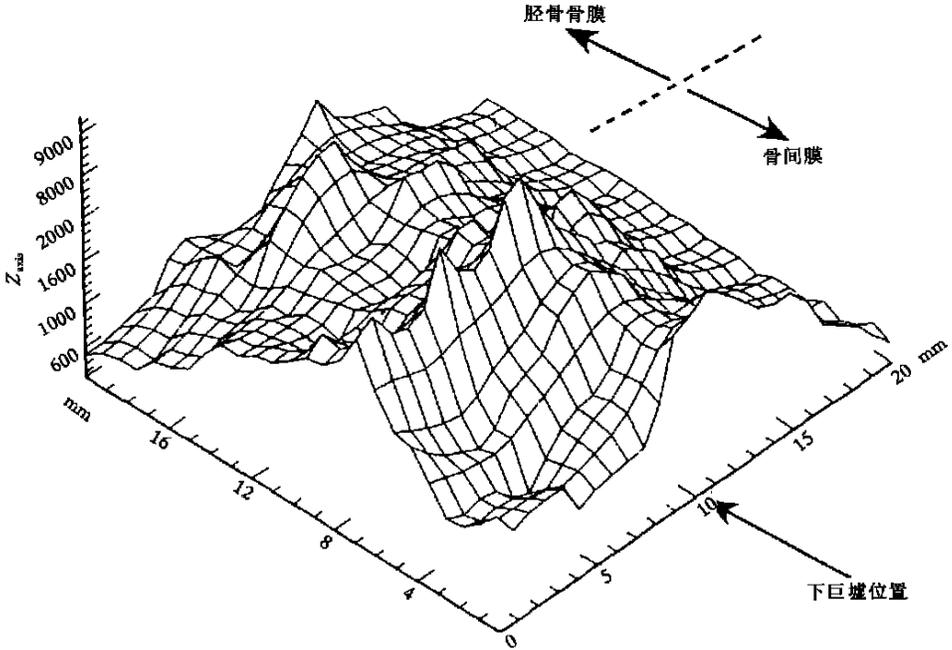


图7 PIXE(束斑1 mm)扫描显示“下巨墟”穴位“地”深度结缔组织结构中Ca产额的二维分布

感。图7是“下巨墟”穴位及其周围结缔组织结构中钙产额的二维分布。“下巨墟”附近横向非穴位的结缔组织结构中钙的产额虽比“下巨墟”穴位低,但比纵向在经非穴(经络线上的非穴位)区要高得多,呈一横向富集带。图8为人右下肢胆经、胃经区段PIXE扫描所测数据归纳成钙富集区特异性分布的示意图。图中“●”表示Ca点状富集区;“--”表示Ca横向带状富集区。分析以上各实验结果可归纳为如下4个特征:

(i) 传统经络图上的穴位位置处均为点状钙富集区。其钙含量较在经非穴区高数十倍,较非经非穴区高100~200倍。

(ii) 点状钙富集区之间的纵向连线,呈一含量不均等的钙纵向富集带,其含量较非经非穴区组织高数倍至十数倍,这两条纵向钙富集带与传统经络图上的胃经、胆经经脉的走向相吻合。

(iii) 7寸平面点状钙富集区之间的横向连线上也呈现一横向钙富集带,其钙含量较非经非穴区组织高数十倍,比纵向钙富集带还高!其形态特征尚未见经络学说中有相关的描述。

(iv) 用PIXE测定7个人小腿样本,获得了相同的钙富集区特异性分布,并与传统经络穴位图中穴位位置之间存在形态

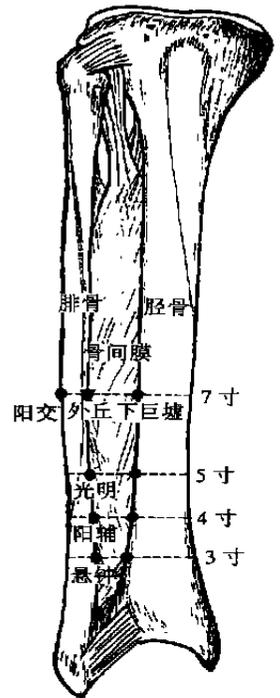


图8

学相关性。

根据以上4点归纳,我们发现了一种“钙库”,它存在于穴位深层处结缔组织结构之中,因其含量高、分布面积大,而结缔组织结构中细胞极少,因而不可能在细胞之中,也不在骨骼之中。这种“钙库”可能在特定的区域内起应急调节细胞外的  $Ca^{2+}$  浓度和储存亚稳态结合钙的作用。

### 1.3 经络穴位功能性特征的探索之二——胶原纤维中存在一个红外光传输的特征波段

结缔组织是生物进化历程中最早出现、分化水平最低的原始组织。本世纪60年代以来,对结缔组织,特别是对胶原蛋白分子结构的研究已相当详细<sup>[10, 11]</sup>,图9是这种由3根 $\alpha$ 螺旋多肽链绞合起来的胶原蛋白的示意图。从物理学角度来理解,它是一种三维长程有序的结构,应具有液晶态性质。从图10中可以看出这种在电子显微镜下显示明暗横纹(轴周期)的胶原原纤维,甚至还含有超晶格结构的特征,因而它必定还具有更深层次的各种物理学效应。基于以上的认识,再联系到经络针灸学中关于针灸治疗的描述,我们开展了对胶原纤维中红外光波长/传输特性的实验研究。样品取自手术后人下肢与足少阳胆经经脉相对应的深筋膜,用冷冻切片技术,垂直于胶原纤维束的方向切片,样品厚度为0.1 mm左右,将湿润的样品置于载玻片上,利用红外光谱仪(美国Bio-Rad公司,FTS-185型)中的显微分析系统(UMA500),借助显微镜中的光学物镜调整样品在光路中的二维位置,使密集的胶原纤维束的截面对准视野中的“十”字形中心,然后进行波数扫描,所得结果见图11。在波数  $3750\text{ cm}^{-1}$  (波长  $2.66\ \mu\text{m}$ ) 处,透光度最高值达到76%,接近于载玻片自身的最高透过率,初步显示出胶原纤维的纵轴向

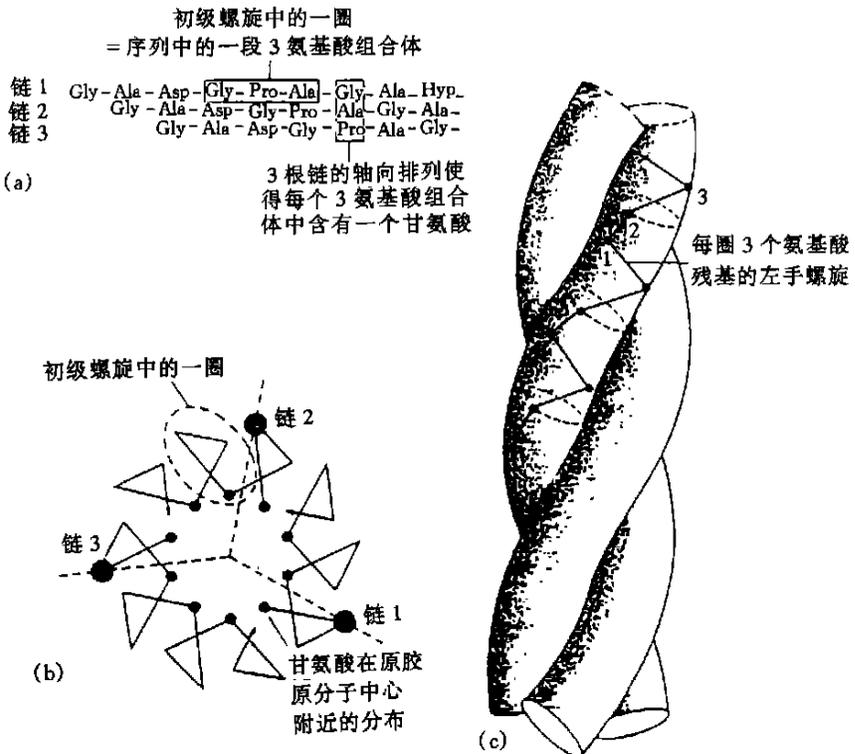


图9 原胶原纤维结构示意图(引自参考文献[10])

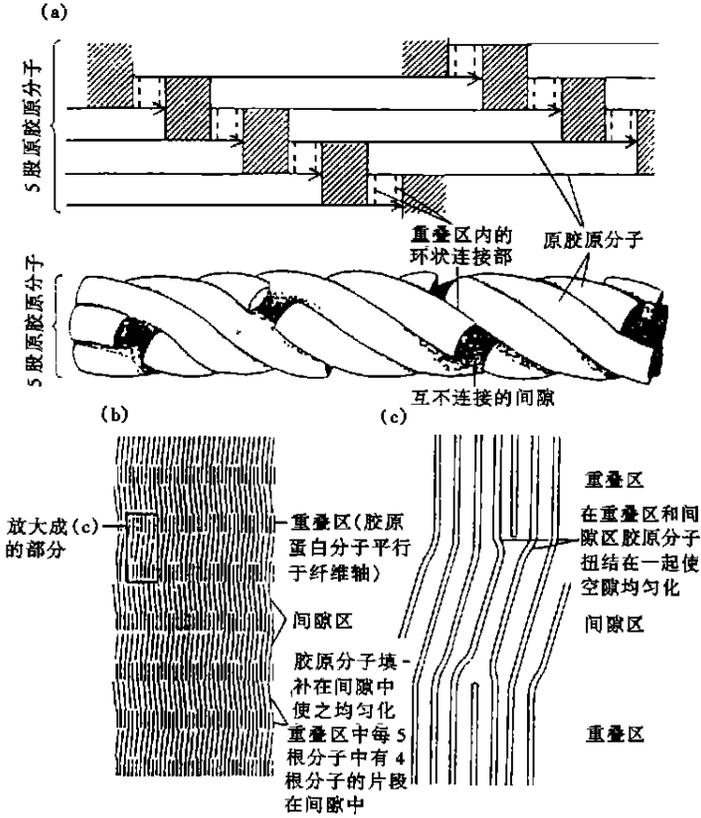


图 10 由 5 股原胶原纤维绞合成微纤维的结构示意图(引自参考文献 [10])

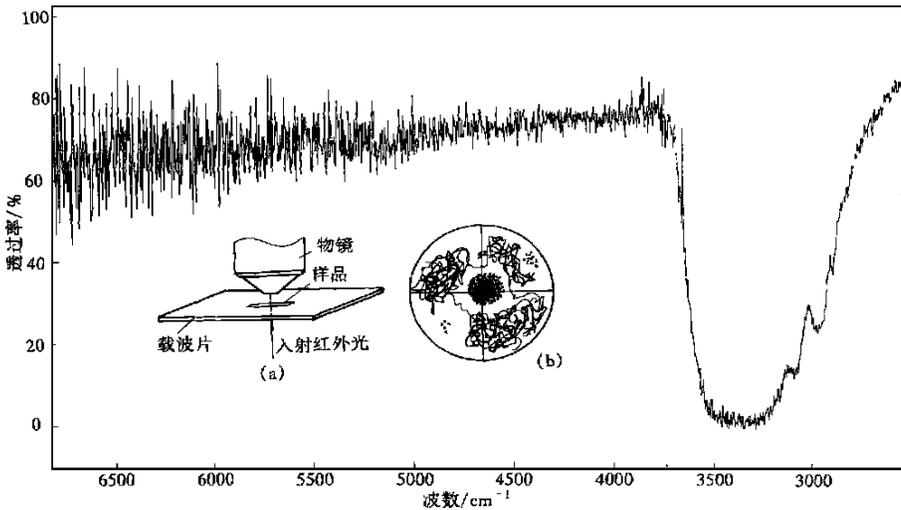


图 11 显微红外光谱法测定红外光在胶原纤维中轴向透过率的波长特性

(a) 样品在红外显微镜中的相对位置, (b) 红外显微视野

在近红外波段具有较高的透光度. 为扩大波数的测量范围, 我们又在另一台红外谱仪(美国 Nicolet 公司, 5DX 型)上进行实验, 新鲜样品(长 30 mm, 宽 10 mm, 厚 1 mm)取自离体人下肢与足阳明胃经经脉相对应的深筋膜. 用两块 KRS-5 红外透明玻片将样品夹在中间, 调整样品在光路中的位置, 使样品中胶原纤维束的纵轴与光轴平行, 图 12 为其波数/透光度曲线, 发

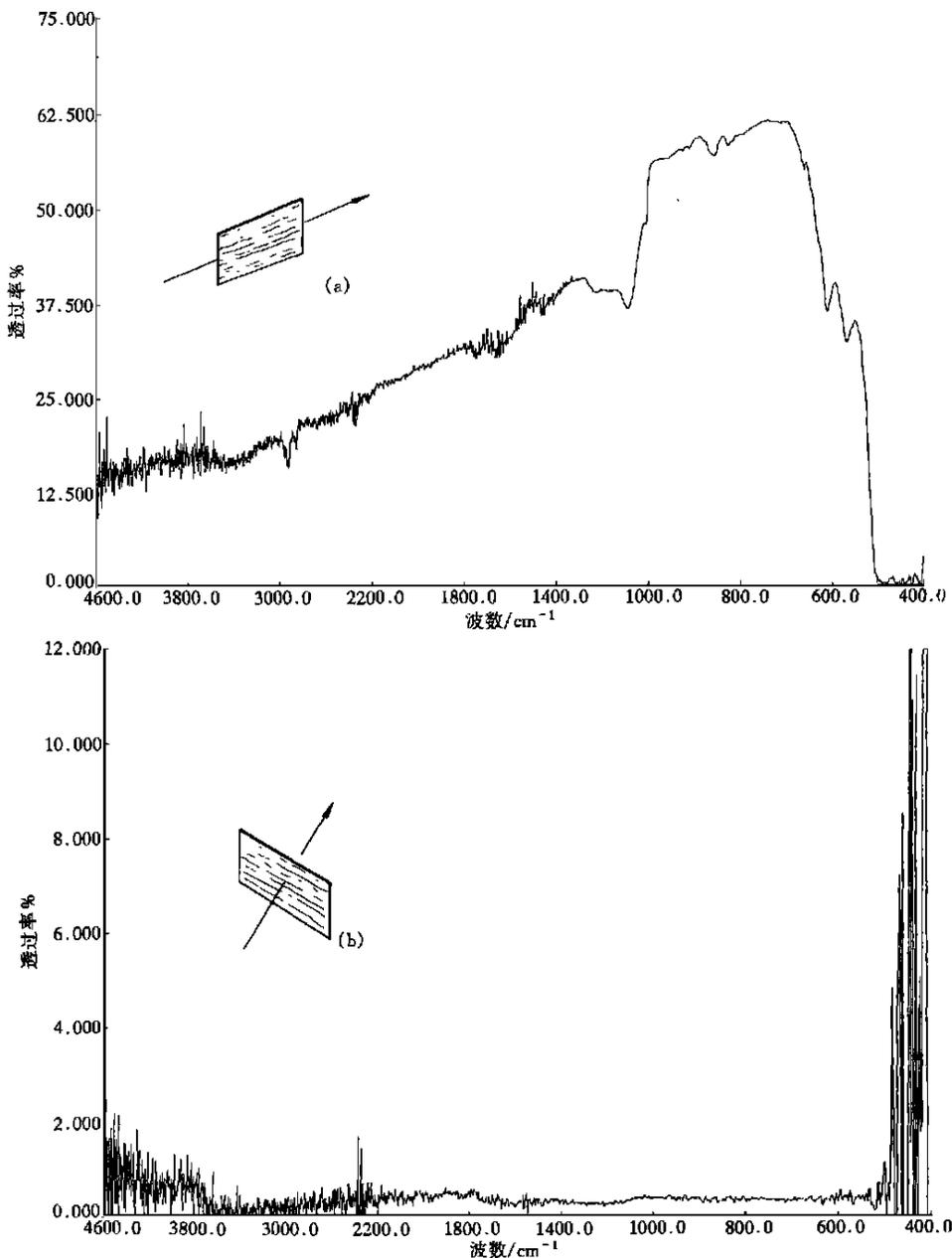


图 12 红外光谱法测定沿胶原纤维轴向(a)和垂直于胶原纤维轴向(b)的透率/波长特性

现在  $1\ 100 \sim 500\ \text{cm}^{-1}$  的波数范围(波长范围  $9 \sim 20\ \mu\text{m}$ )内存在一个较高效率的红外传输特征波段,其透光度为 62%。如果考虑到红外光通过空气与胶原纤维界面时因反射而造成的损失,其实际透光度还应大得多。如将样品的侧面垂直置于光轴上,即胶原纤维束的纵轴与光轴垂直,虽然膜厚只有 1 mm,其透光率仅为 0.4%(图 12(b)),这个实验初步显示了与穴位、经络区相对应的结缔组织结构的胶原纤维中存在着各向异性的光学传输性质。光子既能看作为能量又可看作为信息的载体,许多经络现象是与能量、信息相关的。胶原纤维轴向远红外高通透性,可能具有某些特殊的生理功能。

## 2 讨论与展望

### 2.1 对细胞间质的再认识

从解剖学实验定位中,发现穴位处的基础都是一类生物进化历程中最早出现、分化水平最低的结缔组织,连同它内部固有的两种细胞:未分化的间充质细胞和成纤维细胞(后者由前者分化而成,又是胶原蛋白和基质的直接生产者)构成为生物机体中不可缺少的重要组成部分。结缔组织不仅是各种组织、器官细胞的载体,更是与细胞进行着物质交换、信息交换、可能还存在着能量交换等作用。因此,可以认为结缔组织中必定还潜在着许多尚未被发现的功能,对整个生命机体的生理活动起着十分重要的作用和影响。此外,结缔组织所形成的一个全身性的网络可与经络的概念相比拟。

### 2.2 “钙库”

前述 1.2 节中发现与穴位位置相对应的结缔组织结构中,可能存在一个局部区域内起到应急调节细胞间质中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的“钙库”,这仅是在 7 条离体人小腿样本上得到的局部规律。但如要证实“钙库”与穴位相关是一种普遍规律,还须对全身 300 多个穴位进行全面解剖学定位和 PIXE 扫描测试。

“钙库”中的磷也是呈富集状态的,各个穴位 Ca 与 P 之间的重量比均为  $W_{\text{Ca}}/W_{\text{P}}=2.19$ ,离散度很小(图 13),较之骨骼中羟基磷灰石的  $W_{\text{Ca}}/W_{\text{P}}=2.15$ ,还要高 0.04。从这个差值反映出存在于细胞间质中的是未知的钙磷化合物。基于它可能是一种在细胞间质的局部区域内起调节  $\text{Ca}^{2+}$  浓度、针刺时释放  $\text{Ca}^{2+}$  的“钙库”物质,它应该是一种亚稳态的钙磷化合物。在探索其物理化学状态、性质和结构的实验研究中,我们碰到的复杂背景情况是:细胞间质中的基质是一类分子量很大的多糖类物质,如透明质酸、硫酸软骨素等,它们与大量水分子构成具有复杂

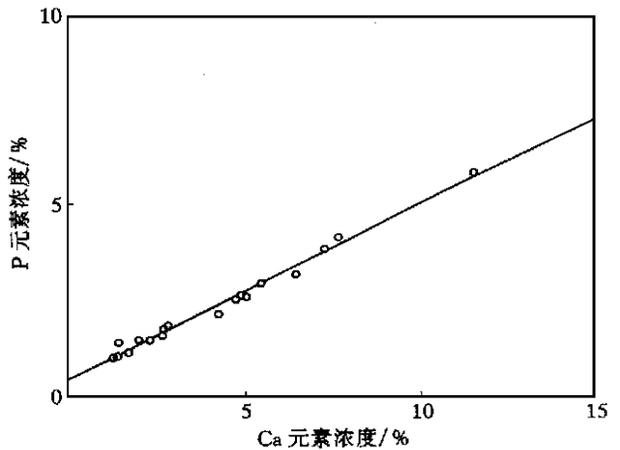


图 13 不同穴位区 Ca, P 元素相对含量

构象的胶体,凝胶与溶胶并存,两者之间没有明显的边界。图 14 是典型的被称为基质分子筛的电子显微镜示意图。其中的蛋白聚糖和氨基聚糖大分子之间形成“试管刷”型立体结构<sup>[12]</sup>。

可见大分子之间的连接点都是严格定位的, 庞杂而有序, 形成具有多重结构特征的超大分子体系. 这个体系的综合功能必然要远远超出单个大分子的功能. 从微观层次去分析, 例如图 15(a)是 6-硫酸软骨素的一条单股糖链, 其主链上的某些区段, 可作多种自由度的空间位置改变(图 15(b)), 表现为在水溶液状态下的无序构象, 在应力作用下会缓慢流动, 具有流变力学和粘弹性的特征, 从而产生为适应外部环境对这个体系的作用而必须具备的柔顺性<sup>[13]</sup>. 我们要研究的对象正好处于这样一个极为复杂的生化环境中(绝不仅仅是一个分子筛), 重量比为 2.19 的钙磷化合物很可能以氢键的形式与蛋白聚糖大分子中众多的羟基(-OH)缔合成某种亚稳态的结构. 面对这样一个复杂体系, 使我们的实验研究在理论上、

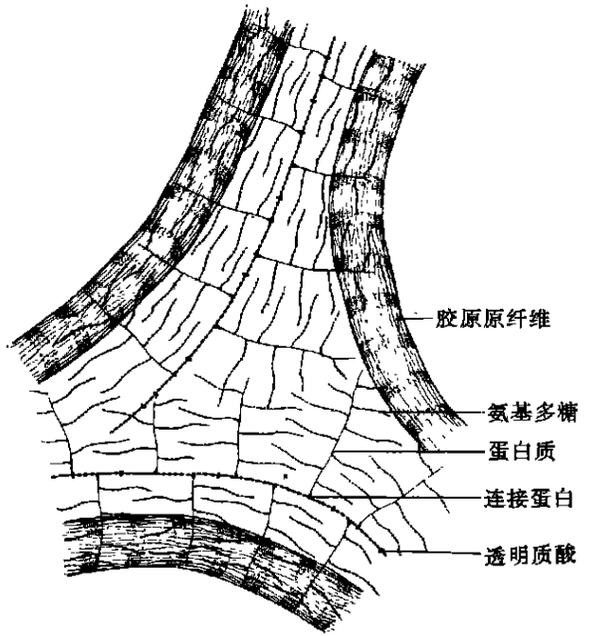


图 14 基质分子筛模式图(引自参考文献[12])

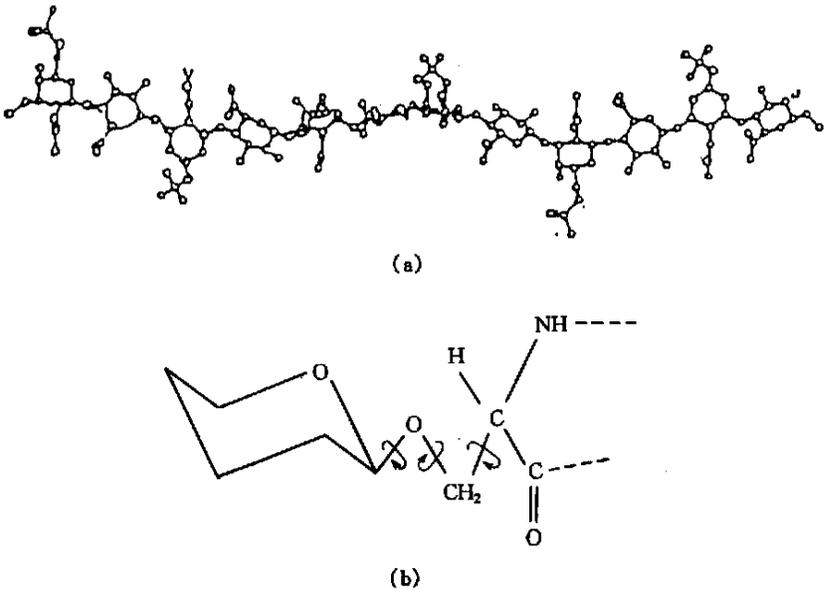


图 15 单股链及其局部结构示意图

(a) 6-硫酸软骨素的单股糖链, (b) 氧-糖苷连接到丝氨酸的结构示意(引自参考文献[13])

实验方法和技术上都碰到了很大的困难.

鉴于穴位中磷元素也呈富集状态, 这就有可能利用<sup>31</sup>P 磁共振成像和计算机图象三维重构技术, 检测一幅活体全身<sup>31</sup>P 三维分布图. 如果也能证实特定元素富集区与穴位、经络的<sup>31</sup>P

核磁共振(MRI)的解剖学位置相对应,则其意义将是很大的,不仅实验探索的进程可以大大加快,还可从另一种实验途径验证这些元素与穴位和经络之间存在的相关性,又由于这是在活体上用无损方法测得,更接近于穴位和经络的自然状态.除了上述的形态学实验验证外,还可利用同一台设备的 *in-vivo* 方法,获取能反映<sup>31</sup>P在穴位中所处化学状态的<sup>31</sup>P NMR谱,以提供<sup>31</sup>P分子的结构及其微环境、扩散动力学等信息,还可以利用 *in-vivo* 传统针灸学中关于循经感传的临床技术,测定穴位“得气”前后,其<sup>31</sup>P的状态变化,间接地获得Ca元素的状态变化.

1980年Cohen等人<sup>[14]</sup>为探测人体中的弱磁场,采用超导量子干涉器件(SQUID)测得人体头部及前臂上的弱磁场呈特异性分布(图16).两者的位置分别与头部经络的走向,以及本文2.2中Ca, P, K, Fe, Zn, Mn等元素富集区在下肢的横向带状分布相似. Cohen解释磁力线的特异分布是由于 $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ 沿着肌纤维其浓度呈梯度分布产生极化电流造成的.他们的研究与本文的研究出于完全不同的目的,但获得极为相似的实验结果,其间必定存在着某种内在的相关性.一种可能性是:穴位区组织中既然存在着“钙库”,也就可能存在“钾库”,两者都在局部区域内起着调节细胞外间质中 $Ca^{2+}$ 和 $K^+$ 浓度的作用,因而必有其运输 $Ca^{2+}$ 和 $K^+$ 的某种通道.基于这一推测,可用同位素标记示踪以及激光共聚焦显微镜等实验手段进行验证.但仍难以解释前臂上若干磁力线呈横向带状特异性分布的实验现象.引起磁力线特异性分布另一种可能的解释是特异分布的Mn, Fe等原子当处于某种结构状态下有可能产生磁性,这当然也要做一系列的实验验证.其反证是用SQUID测定 $K^+$ 不再流动的尸体标本的磁力线分布.

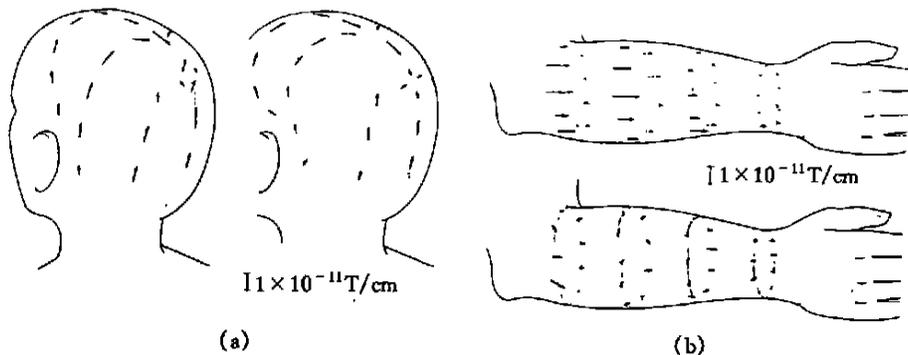


图16 人体头部(a)及前臂上部(b)弱磁场的特异性分布(引自参考文献[14])

PIXE证实穴位区富集有Ca, P, K, Fe, Zn, Mn等元素,但是这些元素以何种物理化学状态储存于结缔组织结构的哪些成分之中, $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ 等又通过哪些通道,被输送到哪些结构中去,产生或诱发出哪些生理作用,这在研究经络功能的机制时是必须搞清的.

### 2.3 对胶原纤维中存在生物光子学现象的观测

不同组织的胶原纤维由于其中的胶原蛋白类型不同,其红外传输的特征波段可能有差别.与不同经脉相对应的结缔组织结构中其胶原蛋白的类型也可能不同,从而其红外传输特征波段也可能有差异.

胶原纤维中具有如此高的红外光透光度的特征波段,并呈现各向异性的性质,其内部必然

存在着与此类光学特征相应的某些特征结构. 图 10(a)显示胶原原纤维中前后两根胶原蛋白的连接处存在着一个间隙,它是轴周期 D 中的暗区,其宽度为  $0.6D(-38\text{ nm})^{[11]}$ .

从构/效关系的角度分析: 间隙两侧分别为前后两根胶原蛋白氨基酸的 C 端和 N 端,两者的电荷密度不同,沿着间隙的纵轴,理应存在一个呈梯度分布的不均匀电场;还由于胶原蛋白中 3 根  $\alpha$  多肽链在绞合中依次错开一个氨基酸重叠在一起(图 9(a)),因此在垂直于轴向的各个平面上,其电荷密度也不均匀,从而在间隙中形成一个绕轴旋转的螺旋状梯度电场. 这样的间隙在胶原原纤维中是呈周期性排列的,属于长程有序的超晶格结构.

从热力学观点来看,该间隙中不可能是真空的,但目前还不清楚是哪一类介质充满其中.但是间隙中所含的介质与胶原蛋白两者的折射率应有差别,因此光子在此种折射率呈周期性变化的结构中运输,将类似于电子在周期性电场中的运动,会呈现出光子的能带结构及相应的能隙,因而这类胶原原纤维很可能是一种生物光子学晶体.

如果运输中的光子在轴周期中的介质中(间隙中和胶原蛋白中)传输时所受到的非线性压缩作用与色散展宽作用互相补偿,则应产生光孤子效应,呈现出极高的传输效率.

由于间隙中存在不均匀电场和能带结构,根据现代光子学(Photonics)关于腔量子电动力学效应的<sup>[15]</sup>这种间隙还可能是一种微腔受激自发辐射的微结构.

这种轴周期性排列特征不仅存在于胶原纤维中,凡是与生物力学相关的组织如肌纤维等也具有这种微结构,这从另一个角度反映出此种微结构与力学、能量之间存在着相关性.

图 17<sup>[11]</sup>是某种细胞通过二根纤维粘连蛋白分子(Fibronectin molecule)与细胞间质中的胶原原纤维粘连在一起的示意图. 联系到胶原纤维中存在一个高效率传输红外光的特征波段,可以推断:图 17 显示细胞与细胞间质、细胞与细胞之间互相进行信息、能量传输的可能通道.

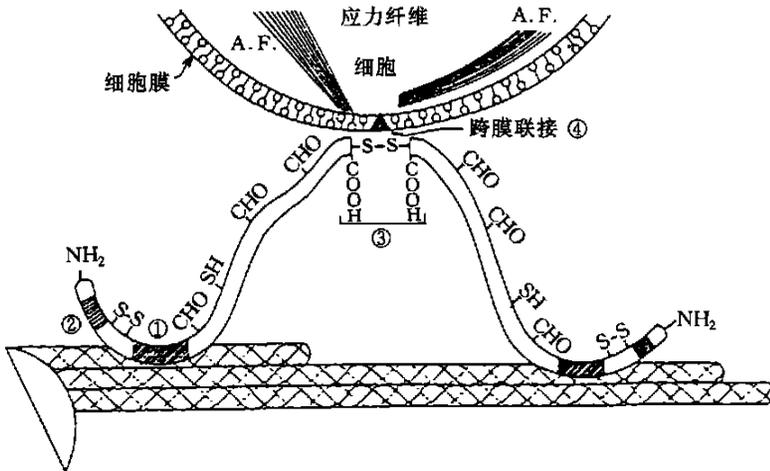


图 17 纤连蛋白分子连结细胞和胶原纤维的示意图(引自参考文献 11)

沿着这一思路继续探索,有可能会在人体中发现一个与生物光子学相关的生理系统. 它和与能量、信息有关的经络现象之间可能存在着某种相关性,或可有助于阐明针灸的机制.

### 3 结论

根据本文的 3 个发现,我们认为,经络现象是人体内各种生命物质之间相互作用的复杂活

动的综合反映,不是某种组织的单一功能可以解释的。但是这3个发现仅仅是一个开端,展现在眼前的是一片极其诱人的生命科学的处女地,有可能在不太遥远的将来揭示出经络的实质;这对生命科学本身也会产生较大的影响和拓展,还可能对物理学、胶体化学、材料科学等其他学科产生影响。

致谢 本研究工作长期来得到魏瑚同志的关心、指导和多方支持。另外,上海第二医科大学王惠宁教授在中药制剂,中国科学院上海有机化学研究所冯祖儒研究员和吴天明高级工程师在红外显微光谱,聂崇实教授在激光拉曼光谱以及复旦大学测试中心的马礼敦教授和沈孝良高级工程师在X射线衍射,黄月芳高级工程师在红外传输等实验研究方面都给我们以无私的支援,对此我们一并表示感谢。本工作为国家攀登计划(批准号:JL93014)资助项目。

### 参 考 文 献

- 1 河北医学院校释. 灵枢经校释, 海论第三十三, 上册, 卷六. 北京: 人民卫生出版社, 1982. 511
- 2 河北医学院校释. 灵枢经校释, 本脏第四十七, 下册, 卷七. 北京: 人民卫生出版社, 1982. 49
- 3 河北医学院校释. 灵枢经校释, 经脉第十, 上册, 卷三. 北京: 人民卫生出版社, 1982. 219
- 4 河北医学院校释. 灵枢经校释, 经脉第十, 上册, 卷三. 北京: 人民卫生出版社, 1982. 263
- 5 党瑞山, 陈尔瑜, 沈雪勇, 等. 手太阴肺经穴位与结缔组织结构的关系. 上海针灸杂志, 1997, 16(4): 28
- 6 陈尔瑜, 沈雪勇, 党瑞山, 等. 胆经颈以下穴位与结缔组织结构和钙元素富集的关系. 上海针灸杂志, 1998, 17(2): 47~49
- 7 郭义, 徐汤苹, 陈进生, 等. 家兔经穴钙离子浓度特异性研究. 针刺研究, 1991, 16(1): 66
- 8 郭义, 陈进生, 徐汤苹, 等. 针刺对家兔经穴钙离子浓度的影响. 世界针灸杂志, 1991, 11(3): 170
- 9 陈俊生. 生理化学, 下册. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. 640~645
- 10 Woodhead Galloway J. Collagen: the anatomy of a protein. London: Edward Arnold Ltd, 1980. 14~41
- 11 Nimi M E. Collagen, Biochemistry, Vol I. New York: CRC Press 1988. 2~30.
- 12 钱令忠主编. 组织学与胚胎学 第3版. 北京: 人民卫生出版社, 1988. 28
- 13 Yamoto Y, Lusher R E. Optical process in microcavities. Phys Today, 1993, 6: 66
- 14 Cohen D, Phiti Y, Cuffin B N, et al. Magnetic fields produced by steady currents in the body. Proc Natl Acad Sci USA, 1980, 77(3): 1447
- 15 Yablonovich E. Photons band-gap structure. J Opt Sc Am, 1993, 10: 283

(1997-09-30 收稿, 1998-01-13 收修改稿)