

· 专论与综述 ·

生物物理新技术新方法在 LB 膜结构与功能研究中的应用^{*}

朱 杰

(西北农林科技大学生命科学院 陕西 杨凌 712100)

摘要: 现代生物物理技术与方法的发展为 LB 膜科学的基础研究提供了丰富的手段,使单分子膜科学取得了令人瞩目的进步。文章就单分子膜研究领域物理新技术与新方法如 LB 膜仪、表面粘度计、X 射线与中子散射技术、布鲁斯特角光学显微镜、电子显微镜、原子力显微镜等的基本实验原理及其在单分子膜物理特性与功能研究中的应用作简单介绍;并鉴于各种仪器的优缺点,作者提出了多仪器联合对单分子膜进行研究的方案和前景进行了探讨。

关键词: 生物物理技术与方法; LB 膜; 结构与功能;

Application of Modern New Physical Techniques and Methods in the Structure and Functions of Langmuir- Blodgett Films

ZHU Jie

College of Life Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, 712100 China

ABSTRACT: The development of modern physical techniques have provided abundant means for the groundwork in LB film and strengthened the improvement of LB film techniques. This paper mainly introduces the new techniques in the structure and functions of LB film such as LB film maker, X-ray diffraction, optical microscope, electronic microscope and atomic force microscope with the details in their detection principles and the application domains; and whereas the shortcoming and excellence of different equipments, the author ended the paper with the discussion on the united research projects and the bright prospects.

Key words: Physical Techniques; Langmuir- Blodgett Film; Structure and Function

溶解在水中的双亲分子可以在界面上自动铺展形成单分子层的膜, LB 膜技术是将气/液界面上的单分子层膜转移到固体表面并实现连续转移组装的技术,它是由 Langmuir 和 Blodgett 共同建立的^[1-2]。单层厚度在零点几纳米至几纳米的 LB 膜具有高度各向异性的层状结构且在理论上几乎没有缺陷;运用 LB 膜技术还可实现单一物质和多种物质在 LB 膜上的分子组装,形成具有特殊性能分子有序体。生命科学与膜科学是密不可分的,一切生命活动、新陈代谢都与生物膜上的一系列物理、化学过程相联系,通过分子组装可对生物膜进行模拟,研究成膜分子间的作用,进而了解生物膜的结构与功能,已给生物学带来了深远的影响;将 LB 膜作为载体,可对其他生物大分子的性能进行研究;利用 LB 膜技术还可对药物制剂进行包裹,从而在方剂化学和生物医学工程中大有作为;通过功能分子的组装亦可开发出多种生物功能器件,以满足工程上的需求;利用单分子膜可以对一些固体材料进行表面修饰,改善或增加固体材料的应用性能,从而推进材料科学的发展;而利用单分子膜作为水蒸发的阻止剂,可解决干旱地区储水流失及农田水损失问题;这些特点是其他技术所无法比拟的,

因而近年来 LB 膜正以其重要的理论价值和广阔的应用前景深受科技界的关注。为了对单分子膜的物理性质进行研究,了解其结构与功能间的关系,必须发展对气/液界面单分子膜的原位表征技术。

1 LB 膜仪

LB 膜仪主要由铺展单层膜的槽、膜天平、压膜及镀膜装置组成,是制备和测量单分子膜的有力工具。通过研究单分子膜表面压力与分子面积的关系曲线, LB 膜仪可用于成膜条件的筛选,亦可计算成膜物质的分子量;通过控制平衡态的滑障 (Barriers) 的压膜速度,可研究单分子膜的弹性;运用 LB 膜技术还可实现多种物质的分子组装并将单层膜转移至基板以用于其它研究。

1.1 成膜质量的研究

随着表面浓度的增大,分子面积减小,分子间作用力加强,表面压增大进而获得与压缩表面积相似的效果。Masami 等^[1]发现在表面浓度很低时,外推表面浓度至零计算得出的成膜物质分子量与实际分子量一致。底液水相中其他物质的

* (基金项目:教育部科学技术研究重点项目(No. 104167);国家自然科学基金资助项目(No. 20572067))

作者简介:朱杰(1980-)男,土家族,湖南张家界人,硕士,助教,中国物理学会,美国化学学会,中国细胞生物学会会员。

主要从事农业环境生物物理、分子生物物理与理论生物物理的研究与应用工作。 e-mail: jiesy-zhu@126.com

(收稿日期:2006-02-16 接受日期:2006-03-09)

加入也会对膜的性质产生影响。由于电解质盐析作用的缘故, 底液中无机电解质的加入利于离子型双亲分子膜的凝聚; 但对于非离子型的双亲分子则相反, 这可能是因为成膜分子的极性基与离子的结合使分子间电性排斥增强。Gerick 等详细地研究了乙醇、氯仿、己烷和苯等铺展溶剂对不溶膜性质的影响。实验显示, 氯仿是最合适的铺展溶剂, 不同溶剂形成的膜分子有序度的差别主要在气态及扩展膜阶段而非凝聚态^[1]。

1.2 膜弹性的研究

程控滑障(bariers)作低频小幅的正弦振动时, 记录表面压 π 和分子面积 A 随时间的变化, 就可以计算它们的相位差 θ 和动态弹性的振幅 $|\varepsilon| = -\Delta\pi_{\max}/\Delta A_{\max}$, 进而得到膨胀弹性 ε_0 和膨胀粘度 κ 。滑障振幅越大, 表面压变化越大; 但振幅过大可能会丢失膜状态变化的信息, 并引起膜不可逆的膨胀压缩行为。何平笙等^[2]用此法研究了分子结构、亚相离子、pH 对硬脂酸单分子膜弹性的影响。当单分子膜在低表面压区时, 弹性几乎是常数; 随表面压增加, 弹性将逐渐减小。Kragel 等用本方法发现磷脂在空气/水界面上单分子膜的膨胀模量与膜的相态有很大关系, 表明单分子膜的弹性是不同膜状态间的分子重排、交换和再定位的过程^[2]。

2 表面粘度计

从单分子膜的 $\pi-A$ 曲线中, 可以了解到膜的许多性质, 但要进一步了解膜中分子的结构, 排列取向情况, 就必须测量其它物理量如表面粘度。表面粘度表征膜对液体表面粘滞性质的影响。测定表面粘度的狭缝粘度计实质就是一个二维毛细管粘度计, 用狭缝粘度计测量表面粘度时, 经常只需测量粘度计高表面压一端的表面压, 而另一端的表面压就近似为零^[3]。表面粘度的测定, 可弥补表面压等手段获得的信息的不足, 为分子间的相互作用、分子微观形态、离子吸附等提供信息。

Sacchetti 等^[1]全面研究了测量表面粘度的方法及技术, 同时指出传统的玻璃/石蜡仪器的不足, 并建议对膜天平的表面用聚四氟乙烯进行处理; 经长期研究总结出, 狭缝粘度计中的缝宽以 0.15-0.25cm 为宜, 且由于高分子的松弛效应, 表面膜需放置 15min 以达到构象平衡; Jarvis 利用狭缝粘度计对大量有机物表面膜的粘度进行了测量, 对其中一些物质的粘度特性, 影响因素作了研究, 并对前人的工作作了一定的总结^[1]; Gerieke 等研究了铺展溶剂对不溶膜粘度的影响, 结合其它研究手段提供的相关信息, 为表面膜微观结构的研究提供了有力依据; Nobuhiko 等人^[4]通过聚乙烯醇醇辛醛膜表面粘度的测定, 证明了表面膜中分子是彼此分离而没有缠结的。

3 波谱学方法

$\pi-A$ 曲线和表面粘度的成功测量使 LB 膜的研究更进了一步, 但膜分子具体形态及分子间的相互作用了解得还远远不够。波谱学方法是测量物质的三维结构、形态的成熟技术, 因而将之应用于表面膜的研究中来是顺理成章的, 而且随着光学仪器的发展, 其在表面膜的研究中的作用也日渐显著。通过吸收、反射、透过光谱可对膜进行更为深入的研究。

3.1 表面增强拉曼光谱(SERS):

表面增强拉曼光谱(SERS)技术是研究表面界面有关分子结构及其相互作用的强有力手段。对于有序分子膜及生物膜体系, SERS 技术可以直接提供成膜分子在膜中的取向、分子间相互作用以及单分子膜与基底间的相互作用等大量的结构信息。戴树玺等^[5]采用纳米银胶作为成膜亚相, 原位获得了十八胺单分子膜、十八胺/卵磷脂复合膜的表面增强拉曼信号。研究表明, 增强主要来源于亚相中的银粒子与成膜分子之间较强的作用; 通过在磷脂膜内添加十八胺分子辅助增强而获取了卵磷脂的分子振动信息。

3.2 X 射线衍射方法(XRD)

X 射线波长小于原子间距和分子间距, 但又基本在同一量级, 可用于了解原子和分子的堆积排布及其有序度等信息, 不过这种方法要求膜有结晶性。XRD 可以确定液晶中链烃的组合状态, 还可以确定二级结构的晶型和晶格维度, 也可测量单分子膜的静态弹性等力学性质。何平笙等^[6]用小角 X 射线衍射测定硬脂酸、花生酸及其混合酸的多层 LB 膜结构, 并成功地对各衍射峰的构成进行了指认。Zakri 等^[7]用 XRD 得到了在空气/界面上六方结晶正癸醇单分子膜的面内弹性模量, 在 4°C 时求得膜的弹性常数。Venien 等^[8]研究了水面上蛋白质单分子膜的二维结晶特征, 其面内剪切弹性值与电子显微镜观察到的结晶碎片的形态、性质和大小相符, 较小的布喇格峰的幂指数 n 值说明了这种多晶态膜的弹性主要由结晶碎片间的软颗粒边界决定, 或者存在向表面外的弯曲形变。邓穗平等^[9]全面论述了 X-射线衍射分析技术在测定长链脂肪族化合物 LB 膜、长链芳香族化合物 LB 膜、聚合物 LB 膜、无机超微粒子与有机物混合 LB 膜等结构研究中的应用。

3.3 表面光散射法(SLS)

在没有外来扰动时, 液体表面上的分子热运动能使表面产生振幅很小的毛细波-横切波, 表面光散射(SLS)所能检测到的毛细波波长约为 100 μ m, 相应频率约为 105Hz; 当界面上存在弹性与两边介质都不同的分子膜时, 在表面内将有纵向的波动-膨胀波。毛细波可用光散射来直接检测, 而膨胀波则对散射光无直接影响, 但毛细波和膨胀波会因耦合衰减而振荡, 因而可观察到共振效应^[2]。Sakamoto 等^[10]通过考察十四酸单分子膜的相转变和临界行为发现, 在液态区和气态区的膜弹性都随温度上升而降低, 并算出了二维范德华状态方程的两个参数和临界温度。动态表面弹性数据表明, 膜的中等浓度区是两个不同吸附阶段之间的转变区, 其弹性行为可用松弛过程中膜内部的分子重排来解释。Sharpe 等^[2]发现, 随着单分子膜从气相到凝聚相转变, 膜的膨胀弹性呈不连续的增加, 增加值与二维熔体的理论预测值相符。

4 光学显微镜

4.1 荧光显微技术

荧光显微镜是研究不溶膜的一个有力工具, 利用它可以直接观察到不溶膜表面的结构和形貌。Nahmen 等^[11]利用荧光显微镜对脂类混合单分子膜的相行为进行了探讨。王少鹏等^[11]在国内首家建立了荧光显微镜膜天平系统; 利用该系统对气/液界面上荧光标记的不同的脂类单分子层的相状态进

行了观测;对不同压力下 DMPE 单分子层及不同比例混合的 DMPE/胆固醇单分子层的荧光显微镜图象进行了分析处理,并给出了理论上的解释。

4.2 Brewster 角显微镜

Brewster 角显微镜因为可以直接显示不溶膜的图像,因而越来越受到重视和应用。张恒建等^[12]对磷脂 DMPC 与蛋白质组成的复合单分子膜在压缩过程中的相变进行了研究,同时通过 Brewster 角显微镜观察了磷脂与蛋白质在空气/水界面处发生的自组装过程。实验发现在不同表面压时,复合膜上将会出现不同形貌,从而证实了膜构象与蛋白质种类的关系。陈启斌等^[13]测定了偶联表面活性剂 PBDOAB 在 NaBr 溶液气/液界面上的 π -A 曲线,并用 Brewster 角显微镜观察了 PBDOAB 在该界面上的区域结构。结果显示, PBDOAB 在界面上生成了凝聚态的环状区域结构,并且结构内的分子取向呈中心对称。

5 电子显微镜

何新安等^[14]将吸附了绿藻蛋白质的磷脂膜在适当的表面压下被转移至铜网,获得了蛋白膜的透射电子显微镜图象。照片显示蛋白质在 DPPE 膜上分布基本有序。袁锋等^[15]合成了荧光素二长碳链衍生物,并在显微镜下观察研究了它的 LB 膜表面结构,图像显示它的 LB 膜基本是均匀有序的;多层膜也有良好的二维有序性,用透射电子显微镜测出单层膜厚度约 2.5nm,荧光素部分的取向接近平行基片,同层分子及层间分子间有较强相互作用。何新安^[14]测定了 R-藻红蛋白(R-PE)在气/液界面上的 π -A 曲线,结果表明 R-PE 具有很好的成膜性能,且由 π -A 曲线求得单分子占有面积与 R-PE 以盘形态“平躺”于液面上时的分子占有面积相同。R-PE LB 膜的透射电子显微镜(TEM)图像说明 R-PE 分子在基片上的取向是其盘平面与基片表面平行。曾鑫华等^[16]用扫描电子显微镜对磷脂 DPPC 的 LB 膜诱导过饱和溶液中生长的草酸钙晶体进行图像分析,在膜压很小时,几乎没有草酸钙晶体,随着膜压增大,草酸钙晶体的密度增加、尺寸增大。作为模板的 DPPC 的 LB 膜的膜压不同时,可以诱导生成具有不同形状、不同密度和尺寸的 CaC₂O₄ 晶体。实验得出, LB 膜中 DPPC 分子间的距离与 CaC₂O₄ 晶体的结构相匹配是 CaC₂O₄ 晶体定向生长的主要原因。

6 原子力显微镜(AFM)

原子力显微镜(AFM)是研究不溶膜形貌的最有力的工具,它通过控制及检测试样表面与扫描探针的相互作用来获取试样的表面形态,其分辨率可达到原子级。根据探针与试样表面的距离及力的关系,AFM 可在斥力区或引力区进行观测。引力区的观测使面内分辨率降低,但可以减少探针对于试样表面的损害;而对表面结构比较稳定的试样,斥力区的观测则可提高其面内分辨率。AFM 工作时,可根据需要采用恒力、等高或轻巧模式来获取试样表面图像。

袁春波等^[17]用 AFM 研究了磷脂 DMPC 三层 LB 膜的分子排列结构。结果显示,液体压缩相中的磷脂分子排列紧密,取向一致,分子间作用力较大,因而能够得到分子图像;而液体

扩张相中的磷脂分子排列松散,取向混乱,分子间的作用力较弱,难于得到分子图像。在液体压缩相中磷脂分子以单斜晶格结构排列,分子间隔为 0.72nm,分子高度为 2.1nm。袁春波等^[18]还研究了二棕榈酸磷脂酸(DPPA)的单层、双层和三层 LB 膜的分子排列结构,分子分辨的 AFM 图象显示, DPPA LB 膜中分子排列具有长程的取向和位置有序。DPPA 分子的晶格排列随着 LB 膜层数的增加由单层和双层的六方晶格转变成三层的正交晶格。李新民等^[19]用原子力显微镜观察到亚相中 Eu³⁺ 诱导二棕榈酰磷脂酰胆碱 LB 单分子膜出现有规则周期性条纹结构。史立新等^[20]采用 AFM 观察了不同电场诱导组装的酶/聚电解质多层膜表面酶分子的聚集拓扑形貌,研究了膜表面粗糙度和表面形貌随电压变化的关系以及酶在膜表面聚集形态的不同对酶活力的影响。实验表明,不同的组装方法对膜表面酶分子的形态和分布具有很大影响,在较低电压下,酶分子以分子簇形式存在;而较高电压下,酶分子在膜上以聚集体形式存在。

7 结语

对于单分子膜结构与功能关系的研究不仅有利于促进生物膜模型理论的发展,也有利于该物理概念在材料科学、环境科学和生物医学基础研究与工程技术中的应用,因而深入了解上述物理技术与方法是十分重要的。但上述生物物理新技术与新方法只是 LB 膜研究中新开发的基本表征手段,每种仪器总是各有优缺点, LB 膜技术在 LB 膜的制备与单分子面积测量上具独特的功能,在膜弹性的测量中也十分突出,但所测参数所能反映的物理属性十分有限;X 射线衍射技术对于确定 LB 膜的液晶态的种类,特别是对于各种近晶型液晶态的鉴别以及对于分子取向和有序程度的研究最为有效,但其数据的或得不够直观、形象;荧光显微镜和布鲁斯特角显微镜可以获得直观的脂筏分布情况,但他们的分辨率十分有限,而且还需要对 LB 膜进行一定的前期处理;扫描探针显微镜可以给出单分子膜的厚度值和超精细结构(纳米结构),同时也可对膜分子层进行超微操纵,显示出了极大的应用前景,但是作为一种新兴的研究手段,其在 LB 膜的结构与功能的表征中还有待进一步的开发。因而在研究中不能孤立地去考虑问题,而应综合利用各种仪器的优点以获得研究对象的全方位信息。另外,在原有仪器的基础上开发新的功能亦是充分利用有限资源、推进研究的较好途径。

参考文献

- [1] HuJie, Zhu Puxin, Ways and current situation of monolayer studies, *Leather Sci and Eng*, 2004, (1): 42- 47
- [2] 何平笙. 空气/水界面单分子膜的弹性[J]. *化学通报*, 2001, (10): 608- 613
- [3] Nobuhiro S, Shinzaburo I, Masahide Y. Energy transfer and trap site formation in a photopolymer film containing carboxyl groups and benzylidene ketone dyes *Macromolecules*, 1998, 31: 2673- 2675
- [4] Nobuhiro S, Shirzaburo I, Masahide Y. Photoinduced electron transfer in nanostructures of ultrathin polyimide films containing porphyrin moieties *Polym. J.*, 1996, (9): 784

(下转第 80 页)

- 凋亡的研究[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2002, 23(2): 70- 73
- [21] Tham K M, Moon C D. Apoptosis in cell culture induced by infectious bursal disease virus following in vitro infection [J]. Avian Dis., 1996, 40, 109- 113
- [22] Jungmann A, Nieper H, Muller H. Apoptosis is induced by infectious bursal disease virus replication in productively infected cells as well as in antigen- negative cells in their vicinity [J]. J Gen Virol., 2001, 82 (Pt5): 1107- 1115
- [23] Azad A A, Jagadish M N, Brown M A, et al. Deletion mapping and expression in Escherichia coli of the large genomic segment of a birnavirus [J]. Virology. 1987, 161(1): 145- 152
- [24] Ian GMacreadie, Paul RV, Anthony JC, et al. Passive protection against infectious bursal disease virus by viral VP2 expressed in yeast [J]. Vaccine, 1990, 8(6): 549- 552
- [25] 于涟, 宋坤华, 金勇丰, 等. 传染性法氏囊病毒 HZ96 VP2 cDNA 结构分析及在大肠杆菌中的表达[J]. 细胞与分子免疫学杂志, 1999, 15(2): 97- 100
- [26] 姜平, 陈溥言, 蔡宝祥, 等. IBDV 南京野毒株 VP2 结构蛋白克隆与表达[J]. 南京农业大学学报, 1996, 19(4): 61- 65
- [27] 王笑梅, 王牟平, 高宏雷, 等. 传染性法氏囊病毒 VP2 在酵母细胞内的高效表达及其免疫原性研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4): 443- 447
- [28] Wang MY, Kuo YY, Lee MS, et al. Self- assembly of the infectious bursal disease virus capsid protein, rVP2, expressed in insect cells and purification of immunogenic chimeric rVP2H particles by immobilized metal- ion affinity chromatography [J]. Biotechnol Bioeng., 2000, 67(1): 104- 111
- [29] Hu Y C, Bentley W E. Enhancing yield of infectious Bursal disease virus structural proteins in baculovirus expression systems: focus on me-
- dia, protease inhibitors, and dissolved oxygen [J]. Biotechnol Prog., 1999, 15(6): 1065- 1071
- [30] 宋坤华, 金勇丰, 于涟, 等. 重组家蚕病毒表达传染性法氏囊病毒 VP2 蛋白[J]. 生物化学与生物物理学报, 2000, 32(3): 281- 284
- [31] Yu L, Song K H, Zhang Y Z, et al. Study on immunogenicity of infectious bursal disease virus VP2 protein expression in silkworm [J]. J Zhejiang Univ., 2000, 26(1): 9- 16
- [32] Tsukamoto K., Kojima C., Komori Y., et al. Protection of chickens against very virulent infectious bursal disease virus (IBDV) and Marek's disease virus (MDV) with a recombinant MDV expressing IBDV VP2 [J]. Virology, 1999, 257(2): 352- 362
- [33] Darteil R., Bubbol M., Laplace E., et al. Herpesvirus of turkey recombinant viruses expressing infectious bursal disease virus (IBDV) VP2 immunogen protection against an IBDV virulent challenge in chickens [J]. Virology, 1995, 211(2): 481- 490
- [34] Sheppard M, Werner W, Tsatas E, et al. Fowl adenovirus recombinant expressing VP2 of infectious bursal disease virus induces protective immunity against bursal disease [J]. Arch Virol., 1998, 143(5): 915- 930
- [35] 刘毅, 金宁一, 郭志儒, 等. 传染性法氏囊病毒 VP2/VP0 基因在重组鸡痘病毒中的表达[J]. 中国兽医学报, 1999, 19(2): 126- 128
- [36] Heine HG, Boyle DB. Infectious bursal disease virus structural protein VP2 expressed by a fowlpox virus recombinant confers protection against disease in chickens [J]. Arch Virol., 1993, 131(3- 4): 277- 292
- [37] Bayliss CD, Peters RW, Cook JK, et al. A recombinant fowlpox virus that expresses the VP2 antigen of infectious bursal disease virus induces protection against mortality caused by the virus [J]. Arch Virol., 1991, 120(3- 4): 193- 205

(上接第 76 页)

- [5] 戴树玺, 张兴堂, 李蕴才, 等. 气液界面磷脂单分子膜的表面增强拉曼光谱[J]. 物理化学学报, 2003, (12): 1123- 1126
- [6] 何平笙, 白建民, 徐百. 长链脂肪酸 LB 膜的 X 射线衍射研究[J]. 高等学校化学学报, 1989, (3): 284- 287
- [7] Zakri C, Renault A, Rieu J P et al. Determination of the in- plane elastic tensor of crystalline decanol monolayers on water by x- ray diffraction Phys[J]. Rev. B, 1997, (55): 14163- 14173
- [8] Uemien B C, Lenne P F, Zakri C et al. Characterization of the Growth of 2D Protein Crystals on a Lipid Monolayer by Ellipsometry and Rigidity Measurements Coupled to EM [J]. Biophys. J., 1998, (74): 2649- 2657
- [9] 邓穗平, 周娜, 欧阳健明. LB 膜的 X- 射线衍射分析[J]. 昆明理工大学学报, 2004, (2): 121- 125
- [10] Sakamoto N, Sakai K, Takagi K. Phase transition and critical behavior in Langmuir films of myristic acid [J]. Phys. Rev. E, 1996, 53: 6164- 6168
- [11] 王少鹏, 隋森芳. 荧光显微镜对气/液界面上脂类单分子层的原位观测[J]. 自然科学进展, 1994, (4): 410- 416
- [12] 张恒建, 陈志坚, 毕只初, 等. DMPC 与蛋白质在气/液界面上复合组装过程研究[J]. 化学学报, 2000(9): 1125- 1130
- [13] 陈启斌, 董亚明, 刘洪来, 等. 偶联表面活性剂在气/液界面上的区域形貌[J]. 物理化学学报, 2003, (10): 1069- 107215
- [14] 何新安, 蒋丽金, 江龙, 等. 藻胆蛋白的 LB 膜 R- 藻红蛋白单分子膜及蛋白构象变化的研究[J]. 中国科学(B 辑), 1996, (4): 111- 117
- [15] 袁锋, 沈涛, 许慧君. 荧光素二长碳链衍生物的 LB 膜研究[J]. 中国科学(B 辑), 1995, (1): 37- 41
- [16] 曾鑫华, 欧阳健明, 郑文杰, 等. 二棕榈酰磷脂酰胆碱 LB 膜诱导下草酸钙晶体生长的 SEM 研究[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2001, (1): 70- 73
- [17] 袁春波, 丁德胜, 陆祖宏, 等. 磷脂 DMPC LB 膜晶格结构的原子力显微镜研究[J]. 生物物理学报, 1996, (3): 67- 70
- [18] 袁春波, 付德刚, 丁德胜, 等. 磷脂酸 LB 膜分子结构的原子力显微术研究[J]. 中国科学(B 辑), 1997, (2): 152- 157
- [19] 李新民, 袁春波, 李斌, 等. 钨对磷脂酰胆碱 LB 单分子膜结构影响的原子力显微镜观察[J]. 化学学报, 1998, (56): 688- 691
- [20] 史立新, 张晶, 卢迎习, 等. 原子力显微镜对电场诱导组装的酶/聚电解质多层膜表面酶分子聚集拓扑形貌的表征[J]. 吉林大学学报(理学版), 2003, (4): 531- 533