• 研究论文 •

乌苏酸/DPPC 混合单层膜相互作用的研究

王夫雨 孙润广* 陈莹莹 王小梅 柴 政

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院生物物理与生物医学工程研究室 西安 710062)

摘要 乌苏酸(UA)为五环三萜羧酸类化合物,是一种中药有效成分.它进入细胞的过程与膜脂分子有密切关系.选用生物膜系统中的膜脂分子二棕榈酰基磷脂酰胆碱(DPPC)为代表,通过 LB(Langmuir-Blodgett)膜技术获得乌苏酸与 DPPC 混合单层膜的表面压力/平均分子面积(π - A)曲线.分析了混合单层膜的平均和过量分子面积、弹性系数等热力学参量,并用原子力显微镜进行了研究.比较了乌苏酸/DPPC 与胆固醇/DPPC 混合单层膜的异同.实验结果表明:乌苏酸能促使 DPPC 的凝聚;乌苏酸/DPPC 两组分的物质的量比与混合单层膜的膜压对单层膜的压缩性、稳定性和热力学特性有影响,对单层膜中不同组分间的混合性以及分子间的相互作用具有重要的影响.

关键词 乌苏酸;单层膜;弹性模量;过量吉布斯自由能;原子力显微镜

Monolayer Study on the Interaction between Ursolic Acid and DPPC

Wang, Fuyu Sun, Runguang* Chen, Yingying Wang, Xiaomei Chai, Zheng

(Laboratory of Biophysics and Biomedical Engineering, College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract In this work, the interaction of ursolic acid (UA, a natural pentacyclic triterpene) and 1,2-dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine (DPPC, an important phospholipid in cell membrane) was investigated. The mean and excess surface area per molecule, elastic modulus, excess Gibbs energy, and interaction parameter of mixed monolayer were studied based on the surface pressure-area isotherms. The authors found that, as well as cholesterol, UA can induce the DPPC molecules on the monolayer condensation. The stability, compressibility and thermodynamic characteristics of binary system of UA and DPPC are connected with the surface pressure and the mole fraction of UA. The AFM experiment supported the conclusion effectively.

Keywords ursolic acid; monolayer; elastic modulus; excess Gibbs energy; atomic force microscopy

生物膜的研究涉及到化学生物学、分子生物学、细胞生物学、生物物理学及软物质物理等各个领域.它构成了细胞、细胞器与外界进行能量转换、物质运输和信息传递的屏障,使细胞、细胞器具有相对独立稳定的环境.在细胞与环境间的物质运输、信号传导和能量转换过程中起重要的作用^[1,2].临床试验表明,药物的吸收过程与生物膜有着密切联系.因此,研究药物与生物膜之间的相互作用机理有着重要的医学价值和生物学意义.

乌苏酸(ursolic acid, UA)又名熊果酸,为五环三萜羧酸类化合物,广泛的分布于自然界中.近年来人们对乌苏酸的抗肿瘤机制研究方面颇有进展,有研究发现乌苏酸能阻止细胞的增殖,将肿瘤细胞的细胞周期阻滞于 G0/G1 期,并诱导肿瘤细胞的凋亡等^[3~9].还有研究发现乌苏酸能影响肿瘤细胞的黏附、运动和侵袭^[10].这都为临床应用奠定了理论基础.但乌苏酸难溶,口服吸收差,体外释放度小,这限制了它在制剂方面的应用.

* E-mail: sunrunguang@snnu.edu.cn

Received June 23, 2011; revised October 17, 2011; accepted November 22, 2011.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20772077) and Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No. 200807180001).

国家自然科学基金(No. 20772077)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(No. 200807180001)资助项目.

目前研究者将乌苏酸制成纳米级脂质体或醇质体,来增强药物的靶向性,减少毒副作用^[11,12]。这都表明乌苏酸与脂质分子有相互作用。目前对于乌苏酸与生物膜及膜脂分子间的作用机制尚不清楚。

众所周知,胆固醇是生物膜中重要的组成成分,而乌苏酸分子结构与胆固醇分子结构相似,Su等^[13]研究发现胆固醇能够与DPPC发生相互作用并促进其凝聚。结构的相似性是否会有相同的生物效应。这为我们的研究提供了重要的依据和参考。Langmuir-Blodgett(LB)膜技术是一种能精确控制薄膜厚度和分子结构及分子排列顺序的制膜技术,是目前制备有序单分子膜和双层膜的比较理想的方法和手段^[14]。孙润广、郝长春、常怡光等^[15~18]利用LB技术研究了生物膜脂分子之间、生物膜组成成分之间、胆固醇与真菌抗生素之间的相互作用等。本文利用LB技术模拟组装DPPC/乌苏酸混合单层膜,对其理化特性、相互作用机制进行研究,测得了膜的表面压力与平均分子面积(π -A)曲线数据,通过计算乌苏酸与DPPC混合单层膜在一定膜压下的平均分子面积、过量平均分子面积、弹性模量、过量吉布斯自由能和相互作用参数等,研究分子间的作用力和热力学行为,在分子水平上研究了乌苏酸与DPPC的相互作用和胆固醇与DPPC相互作用的区别与联系。这不仅对乌苏酸与生物膜上的脂质分子的作用机理和生物膜的稳定性的研究提供重要的参考,也为研究乌苏酸的吸收过程与生物膜的关系提供实验的参考,还进一步为乌苏酸脂质体/醇质体的制备与临床应用提供参考价值 and 实验依据。

1 实验材料与方法

1.1 材料与试剂

乌苏酸(ursolic acid, UA)和二棕榈酰基磷脂酰胆碱(1,2-dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine, DPPC)均购于Sigma化学试剂公司;乙醇、氯仿等其他有机和无机试剂均为分析纯;所用水为离子交换二次蒸馏水。

图1 乌苏酸(a)和DPPC(b)的分子结构式
Figure 1 Molecular structure of ursolic acid (a) and DPPC (b)

1.2 混合单层膜的表面压力-平均分子面积(π -A)曲线

分别将不同比例的乌苏酸和DPPC溶解于氯仿中,均形成浓度为0.5 $\mu\text{mol/mL}$ 的溶液。用芬兰KSV公司生产的KSV-Minitrough型分析仪器(膜天平测量范围0~150 mN/m,测量精确度为0.01 mN/m,水槽尺寸为323 mm $\times$ 75 mm $\times$ 5 mm)制备LB膜。亚相温度控制在(20.0 $\pm$ 0.1) $^{\circ}\text{C}$,清理亚相表面后,用微量进样器将溶液均匀地滴加在纯水亚相表面上,让其自动铺展开,静置15 min,待亚相表面的有机溶剂完全挥发后,两挡板以10 mm/min的速度压膜,膜压力由Wilhelmy吊片式膜天平监测, π -A曲线由计算机自动控制记录数据并计算获得,每组数据重复3次。在膜压为20 mN/m时,用垂直提拉法将混合单分子层转移到云母基片表面,并用AFM进行观测。转移速度为1 mm/min,温度控制在(20.0 $\pm$ 0.1) $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 原子力显微镜检测

用原子力显微镜(日本岛津公司:WET-SPM-9500-J3型)检测混合单层膜。检测采用接触模式,扫描头为55 $\mu\text{m}\times$ 55 μm ,扫描频率为0.5~1 Hz。采用 Si_3N_4 材料,悬臂弹性常数为0.06 N/m的探针。整个检测过程在室温下进行。

2 结果与讨论

2.1 表面压力-平均分子面积(π -A)曲线分析

图2给出了不同比例乌苏酸/DPPC二元系统的单分子膜在纯水表面上的表面压力-平均分子面积(π -A)曲线,图中x表示在混合单层膜中乌苏酸的物质的量的比例,分别为0.2, 0.4, 0.6和0.8。DPPC为理想的模型膜脂分子,在本实验中,其 π -A曲线的相变点出现在表面压力约为10 mN/m,平均分子面积大约0.75 nm^2 位置处,崩溃压达到54.3 mN/m,这与参考文献相一致^[19]。从 π -A曲线可以看出,随着混合单层膜中乌苏酸的比例降低, π -A曲线呈有规律地分布。当乌苏酸为单一组分时,

其 π - A 曲线并不按照混合组分时的规律排布, 乌苏酸 π - A 曲线的气态相过程较短, 液态扩张相向液态聚集相的转变比混合单层膜中 $x=0.8$ 时缓慢而比其它值时迅速, 单层膜没有出现明显的相变点, 相变是缓慢连续发生的. 从图 2 可以看到, 混合单层膜的 π - A 曲线并不介于两种单一组分之间, 在混合单层膜 π - A 曲线中, 随着 x 值的增大, 气态相过程增长; 液态扩张相向液态聚集相的转变过程缩短; 拐点的位置向平均分子面积较小、表面压力较小的方向偏移; 混合单层膜的崩溃压减小. 这些现象与胆固醇/DPPC 二元系统的 π - A 曲线相近^[13]. 这表明乌苏酸/DPPC 间发生相互作用与胆固醇/DPPC 相互作用相似.

图2 乌苏酸/DPPC 单层膜的表面压力-分子面积(π - A)等温线
Figure 2 Surface pressure-molecular area (π - A) isotherms of mixed ursolic acid/DPPC monolayers

2.2 乌苏酸/DPPC 二元系统单层膜的平均分子面积和过量分子面积

在 π - A 曲线的基础上, 可以用单层膜的混合方程来研究两组分的相互作用. 对于理想混合情况, 在给定表面压力下其方程为^[20]:

$$A_{12,\text{ideal}} = (A_1)_\pi x_1 + (A_2)_\pi x_2 \quad (1)$$

式中 $A_{12,\text{ideal}}$ 表示两种组分理想混合下, 一定表面压力下的平均分子面积, A_1 和 A_2 分别表示在一定表面压力下单一组分的分子面积, 而 x_1 和 x_2 分别为两组分的摩尔分数.

图 3 给出了乌苏酸/DPPC 二元混合系统单层膜在表面压力分别为 $\pi=5, 10, 15$ 和 20 mN/m 时的平均分子面积. 曲线表示两种组分实际混合状态下的有效平均分子面积, 直线表示两种组分理想混合状态下的平均分子面积. 从图中可以看出混合单层膜的平均分子面积均小于理想混合时的平均分子面积. 这表明两组分之间发生了相互作用^[21]. 从图 3 可以看到, 随着表面压力的增加,

混合单层膜的平均分子面积与理想混合时的平均分子面积的偏离程度减小. 这表明表面压越大, 分子间的排列越紧密, 越接近理想混合状态.

图3 乌苏酸/DPPC 混合单层膜在给定表面压力下的平均分子面积(曲线为实际面积, 直线为理想面积)

Figure 3 The mean molecular area of the mixed ursolic acid/DPPC monolayers at a given surface pressure (curve: real mean molecular area; straight line: ideal mean molecular area)

在混合单层膜中, 过量分子面积 A_{ex} 是两种不同分子混合程度的量度, 是表征不同分子之间相互作用的一个重要物理参量. 不同组分之间的相互作用也可以通过分析过量分子面积来研究. A_{ex} 计算公式^[13,22~25]为:

$$A_{\text{ex}} = A_{12,\text{exp}} - A_{12,\text{ideal}} = A_{12,\text{exp}} - (A_1)_\pi x_1 - (A_2)_\pi x_2 \quad (2)$$

其中 A_{ex} 表示混合单层膜的过量分子面积, $A_{12,\text{exp}}$ 表示混合单层膜的实际分子面积. 当两组分为理想混合或者两组分不混溶时, A_{ex} 的值为零^[13]. 若实际值与理想值的偏差为正, 则分子间相互作用为斥力, 说明两种分子不易混合; 若偏差为负, 则分子间相互作用表现为引力, 说明两种分子容易混合^[13,25].

图 4 中给出了乌苏酸/DPPC 混合单层膜在一定表面压力下的过量分子面积. 由图可知: 在表面压力 $\pi=5, 10, 15$ 和 20 mN/m 时, 各组分含量不同的混合单层膜的过量分子面积均为负值, 分子间相互作用为引力, 两组分易混合, 而且随着表面压力的增大, 过量分子面积的值减小, 表示分子间的引力减小; 在 $x_{\text{UA}}=0.8$ 时过量分子面积的值最大, 这表明随着乌苏酸含量的增加, 两组分间的相互作用增强, 引力增大. 分子间作用力为引力时, 会促进膜上出现凝聚现象. 该数值分析结果与 AFM 观测的图片相一致, 并与胆固醇/DPPC 作用的结果一致^[13]. 综合以上两种现象可以说明乌苏酸与 DPPC 分子间的相互作用与各组分的含量和表面压力及分子间的距离都有重要的关系.

图 4 乌苏酸/DPPC 混合单层膜在给定表面压力下的过量分子面积

Figure 4 The excess molecular area of the mixed ursolic acid/DPPC monolayers at a given surface pressure

2.3 乌苏酸/DPPC 二元系统单层膜弹性模量分析

弹性模量 C_s^{-1} 或者压缩性 C_s 是表征单层膜相变的重要参量, 是分析单层膜的另一个重要物理参量^[20,24]. 为研究乌苏酸/DPPC 混合单层膜的特性, 本实验进一步分析了两组分含量不同时混合单层膜的弹性模量. 弹性模量 C_s^{-1} 可由 π - A 曲线数据来计算. 计算公式为^[26,27]:

$$C_s^{-1} = -A \left(\frac{\partial \pi}{\partial A} \right)_T \quad (3)$$

式中 π 表示单层膜表面压力, A 表示分子面积, T 为温度, 下标 S 为单层膜的横截面积. 该式表示在温度恒定的情况下表面压力 π 关于分子面积 A 的偏导.

图 5 中, 纯的乌苏酸和 DPPC 单层膜的弹性模量均较混合成分低. 在 0~20 mN/m 范围内混合成分单层膜的弹性模量随着乌苏酸的含量的增加而增加; 全范围内随着表面压力的增加呈现先增大后减小的趋势; 纯 DPPC 单层膜和混合成分单层膜在表面压力为 40~50 mN/m 时出现最大值. 在 30 mN/m 时的数值较以前报道的胆固醇/DPPC 混合单层膜的数值更大^[13,28-31]. 这是由于乌苏酸与 DPPC 分子之间相互作用的结果. 如图 6 (图中红色原子为氧原子) 所示, 可能出现的情况为: 与胆固醇分子的区别在于乌苏酸分子在两端都存在亲水基团, 在表面压较低时, 乌苏酸分子水平分布在水面上, 羧基浸入水中 (如图 6a), 随着表面膜压的增加, 混合单层膜中乌苏酸分子与水面形成夹角, 增加了混合单层膜的弹性模量, 此时乌苏酸所起的作用与胆固醇相似; 当膜压继续增大时, 由于取代烷基的疏水作用使乌苏酸分子翻转, 使得羟基浸入水中, 乌苏酸分子几乎与水面垂直 (如图 6b). 而胆固醇只有一端含有亲水基团, 不会出现分子翻转的现象. 乌苏酸分子的翻转使混合单层膜中两种

分子的排布更加有序, 随着表面膜压的增加单层膜的弹性模量增加到最大值后迅速降低.

图 5 乌苏酸/DPPC 混合单层膜的弹性模量随表面压的变化

Figure 5 The elastic modulus (C_s^{-1}) vs. surface pressure (π) of the mixed ursolic acid/DPPC monolayers

图 6 乌苏酸分子在空气-水界面可能的排布方式 (a: 倾斜的乌苏酸分子; b: 几乎垂直的乌苏酸分子)

Figure 6 Possible arrangements of a ursolic acid molecule at the air-water interface (a: tilted; b: nearly perpendicular orientations)

2.4 乌苏酸/DPPC 二元系统单层膜热力学特性研究

可以通过研究二元系统单层膜的热力学特性参数过量吉布斯自由能来研究乌苏酸和 DPPC 分子之间的相互作用 (排斥或者吸引) 和单层膜的稳定性^[27]. 混合单层膜的吉布斯自由能的变化量 ΔG_{mix} 的计算方程为:

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta G_{\text{ideal}} + \Delta G_{\text{ex}} \quad (4)$$

式中 ΔG_{ideal} 和 ΔG_{ex} 分别为理想混合状态下的混合单层膜的吉布斯自由能的变化和过量吉布斯自由能.

对于二元组理想混合, 吉布斯自由能的变化仅与熵有关^[17,32], 其公式为:

$$\Delta G_{\text{ideal}} = RT(x_1 \ln x_1 - x_2 \ln x_2) \quad (5)$$

式中 R 是气体常数, T 是绝对温度, x_i ($i=1, 2$) 表示每种组分的摩尔分数. 因此可以根据 π - A 曲线计算出在一定温度 T 和表面压 π 下的过量吉布斯自由能值:

$$\Delta G_{\text{ex}} = \int_0^\pi [A_2 - (x_1 A_1 + x_2 A_2)] d\pi \quad (6)$$

式中 A_{12} , A_1 和 A_2 分别为混合物、组分 1 和组分 2 在同一表面压力下的分子面积, π 表示单层膜的表面压力. 在理想混合状态下 ΔG_{ex} 应为零. 与单一组分的单层膜相比, 当 ΔG_{ex} 为正时, 分子间表现为排斥力, 此时单层膜不稳定; 当 ΔG_{ex} 为负时, 分子间表现为吸引力, 此时单层膜更加稳定^[15,19].

图 7 给出了表面压力 $\pi=5, 10, 15$ 和 20 mN/m 时, 随乌苏酸含量逐渐增加单层膜 ΔG_{ex} 的实验数据. 从图中可以看出, 所有混合单层膜的过量吉布斯自由能都为负值, 这表示乌苏酸与 DPPC 分子间的作用力为引力. 这是由于乌苏酸分子两端的极性基团与 DPPC 的极性端紧密结合, 增加了两种分子间的引力. 乌苏酸分子吸引 DPPC 分子. 不同比例的乌苏酸/DPPC 混合单层膜的过量吉布斯自由能 ΔG_{ex} 随着表面压力 π 的变化呈规律性变化, 这与前面的分析结果一致.

图 7 不同摩尔比的乌苏酸/DPPC 混合单层膜在给定表面压力下的过量吉布斯自由能

Figure 7 The excess Gibbs energy of the mixed ursolic acid/DPPC monolayers of different mole fraction at a given surface pressure

2.5 乌苏酸/DPPC 二元系统单层膜的原子力显微镜观测

用 AFM 观测混合单层膜的聚集相行为可以帮助我们进一步理解单层膜上分子间的相互作用. 图 8 是表面压力为 20 mN/m , 扫描范围为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 时, 各组分按照不同比例的混合单层膜的形貌图. 结合 π - A 曲线图, 我们发现在表面压力为 20 mN/m 时, 混合单层膜出现由液态扩张态向液态压缩态的相变. 图中 a 和 b 分别为纯

图 8 不同摩尔比时乌苏酸/DPPC 混合单层膜的 AFM 图

Figure 8 The AFM images of mixed ursolic acid/DPPC monolayers of different mole fraction

(a) pure ursolic acid, (b) pure DPPC, (c) $x_{\text{UA}}=0.2$, (d) $x_{\text{UA}}=0.4$, (e) $x_{\text{UA}}=0.6$, (f) $x_{\text{UA}}=0.8$. Scanning range: $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$, transferred on mica at 20 mN/m

的乌苏酸和 DPPC 形成的单层膜. 随着乌苏酸的加入, c 中混合单层膜出现了缺陷, d 中混合单层膜出现分离, 形成岛状结构. 这是由于乌苏酸分子与 DPPC 分子相互吸引、聚集而形成的. 这种聚集使得 DPPC 膜不再是均匀的而是出现了缺陷, 但这种聚集却增加了混合单层膜的弹性, 增加混合单层膜的稳定性. 这与过量分子面积和过量吉布斯自由能的分析结果一致. 随着乌苏酸含量进一步增加, 使得混合单层膜的面貌接近于纯的乌苏酸所形成的单层膜, 但比纯的乌苏酸单层膜更加致密, 这与弹性模量的分析结果一致.

3 结论

本文通过 Langmuir-Blodgett (LB)膜技术和原子力显微镜(AFM)研究了乌苏酸/DPPC 二元混合单层膜中分子间的可混合性、压缩性和热力学稳定性. 实验数据的分析表明, 混合单层膜中分子的排布与表面压力和分子的数量有关, 分子间的作用力与分子间的距离有关. 实验中混合单层膜的平均分子面积与理想混合面积差距较大, 但随着膜压的增大差距减小. 乌苏酸分子与 DPPC 分子间存在吸引力, 这种引力的大小随着表面膜压的增大而先增大后减小. 这是由于在不同膜压下乌苏酸分子的排布方式不同, 表面压力的变化改变了两种分子的排布; 乌苏酸分子与 DPPC 分子间引力的大小还受到分子间物质的量之比的影响; 乌苏酸分子与胆固醇分子一样能使膜脂分子聚集, 从而使单层膜出现缺陷. AFM 图片进一步验证了热力学分析结果.

本文中对于乌苏酸/DPPC 二元系统的研究提供了关于分子间相互作用、分子排布及混合单层膜的相行为等信息, 在分子水平上模拟并分析乌苏酸与生物膜脂分子间的作用机制, 并比较了乌苏酸分子与胆固醇分子在与脂质分子作用时的区别与联系. 这为研究药物与生物膜脂分子间的相互作用提供了理论和实验依据, 也为进一步研究乌苏酸与真实膜系统的作用提供了有价值的参考资料. 乌苏酸分子能使脂质分子发生聚集, 这一现象对于乌苏酸脂质体/醇质体药物的制备与临床应用有重要的指导意义.

References

- Chen, L. H.; Gan, L. H.; Liu, M. X.; Fan, R.; Xu, Z. J.; Hao, Z. X.; Chen, L. W. *Appl. Surf. Sci.* **2011**, 257, 5070.
- Katarzyna, H. W.; Paweł, W. *Chem. Phys. Lipids* **2007**, 150, 22.
- Kim, D. K.; Baek, J. H.; Kang, C. M.; Yoo, M. A.; Sung, J. W.; Chung, H. Y.; Kim, N. D.; Choi, Y. H.; Lee, S. H.; Kim, K. W. *Int. J. Cancer* **2000**, 87(5), 629.
- Li, Y.; Xing, D.; Chen, Q.; Chen, W. R. *Int. J. Cancer* **2010**, 127, 462.
- Zhang, Y. X.; Kong, C. Z.; Wang, L. H.; Li, J. Y.; Liu, X. K.; Xu, B.; Xu, C. L.; Sun, Y. H. *J. Cell Biochem.* **2010**, 109, 764.
- Yang, L.; Liu, X.; Lu, Z.; Yuet-Wa C.J.; Zhou, L.; Fung, K. P.; Wu, P.; Wu, S. *Cancer Lett.* **2010**, 298, 128.
- Yu, Y. X.; Gu, Z. L.; Yin, J. L.; Chou, W. H.; Kwok, C. Y.; Qin, Z. H.; Liang, Z. Q. *Chin. Med. J.* **2010**, 14(123), 1915.
- Wilson, J. M. *Nature* **1993**, 365(6448), 691.
- Limami, Y.; Pinon, A.; Leger, D. Y.; Mousseau, Y.; Cook-Moreau, J.; Beneytout, J. L.; Delage, C.; Liagre, B.; Alain, S. *Biochimie* **2011**, 93, 749.
- Yu, L. B.; Wang, J.; Ma, B. Z.; Sun, W. Z. *J. Sichuan Univ. (Med. Sci. Ed.)* **2010**, 41(6), 986 (in Chinese). (于丽波, 王晶, 马宝璋, 孙文洲, 四川大学学报(医学版), **2010**, 41(6), 986.)
- Zhao, C. C.; Qian, Z. Z.; Wang, H. Q.; Song, C.; Meng, X. R.; Zhao, J.; Yan, Z.; Hao, X. S. *Chin. J. New Drugs* **2011**, 20(2), 147 (in Chinese). (赵翠翠, 钱正子, 王华庆, 宋拯, 孟祥睿, 赵静, 阎昭, 郝希山, 中国新药杂志, **2011**, 20(2), 147.)
- Chen, Y.; Wu, Q. Q.; Zhang, Z. H.; Zhou, L.; Liu, X.; Du, M.; Jia, X. B. *China J. Chin. Mater. Med.* **2011**, 36(8), 988 (in Chinese). (陈彦, 吴青青, 张振海, 周蕾, 刘璇, 杜萌, 贾晓斌, 中国中药杂志, **2011**, 36(8), 988.)
- Su, Y. L.; Li, Q. Z.; Chen, L.; Yu, Z. W. *Colloids Surf. A* **2007**, 293, 123.
- Blodget, K. B. *Phys. Rev.* **1937**, 51, 964.
- Hao, C. C.; Sun, R. G. *Acta Chim. Sinica* **2007**, 65, 2325 (in Chinese). (郝长春, 孙润广, 化学学报, **2007**, 65, 2325.)
- Chang, Y. G.; Sun, R. G.; Hao, C. C.; Xue, H. J.; Han, T.; Wang, X. M. *Acta Chim. Sinica* **2010**, 68, 2181 (in Chinese). (常怡光, 孙润广, 郝长春, 薛慧君, 韩涛, 王小梅, 化学学报, **2010**, 68, 2181.)
- Sun, R. G.; Hao, C. C.; Chang, Y. G.; Zhang, J.; Niu, C. L. *Acta Chim. Sinica* **2009**, 67, 1808 (in Chinese). (孙润广, 郝长春, 常怡光, 张静, 牛春玲, 化学学报, **2009**, 67, 1808.)
- Hao, C. C.; Sun, R. G.; Zhang, J. *Chem. J. Chin. Univ.* **2009**, 30, 913 (in Chinese). (郝长春, 孙润广, 张静, 高等学校化学学报, **2009**, 30, 913.)
- Yang, Y. P.; Tsay, R. Y. *J. Lumin.* **2007**, 127, 186.
- Katarzyna, H. W.; Paweł, W. *Chem. Phys. Lipids* **2007**, 150, 66.
- Hao, C. C.; Sun, R. G.; Zhang, J.; Chang, Y. G.; Niu, C. L. *Colloids Surf., B* **2009**, 69, 201.
- Lee, Y. L.; Lin, J. Y.; Chang, C. H. T. *J. Colloid Interface Sci.* **2006**, 296, 647.
- Hac-Wydro, K.; Dynarowicz-Latka, P.; Grzybowska, J.;

- Borowski, E. *Thin Solid Films* **2008**, 516, 1197.
- 24 Katarzyna, H. W.; Patrycja, D. *Biophys. Chem.* **2006**, 123, 154.
- 25 Hao, C. C.; Sun, R. G.; Zhang, J.; Chang, Y. G.; Niu, C. L. *Sci. China, Ser. B* **2008**, 38, 1018 (in Chinese).
(郝长春, 孙润广, 张静, 常怡光, 牛春玲, 中国科学(B辑), **2008**, 38, 1018.)
- 26 Hac-Wydro, K.; Dynarowicz-Latka, P.; Grzybowska, J.; Borowski, E. *Colloids Surf., B* **2005**, 46, 7.
- 27 Barbara, G. M.; Maria, P. *Thin Solid Films* **2008**, 516, 8865.
- 28 Ronzon, F.; Desbat, B.; Chauvet, J. P.; Roux, B. *Biochim. Biophys. Acta* **2002**, 1560, 1.
- 29 Li, X. M.; Momsen, M. M.; Smaby, J. M.; Brockman, H. L.; Brown, R. E. *Biochemistry* **2001**, 40, 5954.
- 30 Kodama, M.; Shibata, O.; Nakamura, S.; Lee, S.; Sugihara, G. *Colloids Surf., B* **2004**, 33, 211.
- 31 Gong, K.; Feng, S. S.; Go, M. L.; Soew, P. H. *Colloids Surf. A* **2002**, 207, 113.
- 32 Bordi, F.; Cametti, C.; Venanzio, C. D.; Sennato, S.; Zuzzi, S. *Colloids Surf., B* **2008**, 61, 304.
- 33 Davies, J. T.; Rideal, E. K. *Interfacial Phenomena*, Academic Press, New York, **1963**, p. 265.

(A1106233 Cheng, F.)