

文章编号:1674-2869(2017)02-0120-07

Bola表面活性剂与牛血清蛋白相互作用的光谱研究

王璇,张旗*,方成,周泽坤,刘治田

1. 武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205;

2. 等离子体化学与新材料湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘要:采用荧光光谱法、紫外吸收光谱法和圆二色谱法研究了在 $\text{Na}_2\text{HPO}_3\text{-NaH}_2\text{PO}_3$ 缓冲溶液($\text{pH}=7.4$, 298 K)中三种不同头基的Bola表面活性剂Bola(Me)、Bola(Et)、Bola(Pr)与牛血清蛋白(BSA)的相互作用,考察了表面活性剂浓度、结构对相互作用的影响,初步阐明了Bola表面活性剂与BSA的结合机理.结果表明:三种Bola表面活性剂均对BSA的荧光强度有静态猝灭作用,并导致其最大发射波长蓝移;表面活性剂的加入主要影响BSA的色氨酸(Trp)残基;表面活性剂头基的烷基链越长,Stern-Volmer猝灭常数越大,表明具有较长头基烷基链的表面活性剂与BSA具有更强的相互作用.

关键词: Bola表面活性剂;牛血清蛋白;荧光光谱;圆二色谱

中图分类号:O657 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.02.004

Spectroscopic Studies on Interaction of Bovine Serum Albumin with Bola Surfactant

WANG Xuan, ZHANG Qi*, FANG Cheng, ZHOU Zekun, LIU Zhitian

1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Hubei Key Laboratory of Plasma Chemical and Advanced Materials (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China

Abstract: Interaction between a Bola series of surfactants Bola(Me), Bola(Et) and Bola(Pr) with different headgroups and bovine serum albumin (BSA) in $\text{Na}_2\text{HPO}_3\text{-NaH}_2\text{PO}_3$ buffer solution ($\text{pH}=7.4$, 298 K) were studied by using fluorescence spectroscopy, UV absorption spectroscopy and circular dichroism spectroscopy in this paper. Effects of the surfactants structure and concentration on the interaction were examined, and the binding mechanism of Bola surfactants and BSA were elucidated. The experimental results showed that all the Bola surfactants had a static quenching effect on the fluorescence intensity of bovine serum albumin (BSA) and resulted in a blue shift of the maximum emission wavelength. The addition of surfactants mainly affected the tryptophan residues of BSA. The longer alkyl chain the surfactant has, the larger the Stern-Volmer quenching constant is, indicating that the surfactant with longer head alkyl chain has stronger interaction with BSA.

Keywords: Bola surfactant; BSA; fluorescence spectrum; circular dichroism spectrum

收稿日期:2017-01-22

基金项目:武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2015010);湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20161511);中石油创新基金(2015D-5006-0211);湖北省优秀青年骨干人才(2016)

作者简介:王璇,硕士研究生. E-mail: 691125026@qq.com

*通讯作者:张旗,博士,讲师. E-mail: 48780905@qq.com

引文格式:王璇,张旗,方成,等. Bola表面活性剂与牛血清蛋白相互作用的光谱研究[J]. 武汉工程大学学报,2017,39(2):120-126.

WANG X, ZHANG Q, FANG C, et al. Spectroscopic studies on interaction of bovine serum albumin with bola surfactant[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017,39(2):120-126.

蛋白质-表面活性剂复配体系的研究一直是人们十分感兴趣的课题,因为它们在食品、生物、医药、化妆品领域有着重要而广泛的应用^[1-5]. 已有文献报道的关于表面活性剂与蛋白质相互作用的研究,大多集中于常见的如十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)或者十六烷基三甲基溴化铵(hexadecyltrimethyl ammonium bromide, CTAB)等单链表面活性剂,而与 Bola 表面活性剂相关的还很少^[6-9]. 20 世纪 80 年代,德国的 Fuhrhop^[10]教授首先使用了 Bola 两亲化合物(Bola-amphiphile)这一名词. 与只含有一个亲水基和一个亲油基的传统表面活性剂不同, Bola 型表面活性剂是由两个极性头基用一根或多根疏水链连接键合起来的化合物^[11]. 因此相对于同类型的传统表面活性剂, Bola 型表面活性剂的临界胶束浓度(critical micelle concentration, CMC)较高, K_f点较低, 常温下在水中具有较好的溶解性等特点^[12]. 由于具有特殊结构和强的亲水性, Bola 表面活性剂有望表现出更有效的与蛋白质相互作用的行为.

本文利用荧光光谱^[13]、紫外吸收光谱^[14]以及圆二色光谱^[15]研究了 Bola(Me)、Bola(Et)、Bola(Pr)三种不同疏水头基的 Bola 表面活性剂与 BSA 在 pH=7.4 的 Na₂HPO₃-NaH₂PO₃缓冲溶液中的相互作用,并结合实验数据得到的猝灭常数等参数,初步阐明了 Bola 表面活性剂与 BSA 的结合机理及作用规律,特别是 Bola 表面活性剂的不同头基烷基链对二者相互作用的影响.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂: BSA, BR 级, 纯度>99.0%, 上海如吉生物科技发展有限公司; 3 种不同疏水头基的 Bola 表面活性剂(Bola(Me)、Bola(Et)、Bola(Pr))按文献^[16]方法自制, 结构式如图 1; pH=7.4 的 Na₂HPO₃-NaH₂PO₃缓冲溶液(PBS), 由磷酸氢二钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)和磷酸二氢钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)配制而成. 本文中若无特别说明, 均以此缓冲溶液作为溶剂配制实验所用溶液.

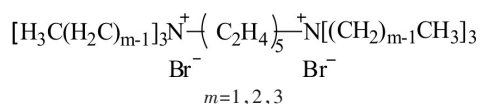


图 1 Bola 表面活性剂的结构式[Bola(Me)、Bola(Et)、Bola(Pr)]

Fig. 1 Structure of Bola surfactants [Bola(Me), Bola(Et), Bola(Pr)]

仪器: FP-6500 型荧光分光光度计(日本), Perkin Elmer Lambda 35 紫外可见分光光度计(美国), J-1500 型圆二色光谱仪(日本), 5 μL 微量进样器(上海安亭微量进样器厂), 200 μL 移液器(上海携科生物科技有限公司), BSA 124S 电子天平.

1.2 实验方法

1.2.1 内源荧光光谱 BSA 的原溶液(1.0×10⁻⁵ mol/L)用 PBS 溶液配制, 冷藏保存, 使用前稀释到所需浓度. 移取 3 mL BSA 原溶液于 5 mL 石英比色皿中, 使用微量进样器逐次加入 5 μL 表面活性剂浓溶液, 采用荧光光谱仪在室温(298 K)下记录 BSA 在 290 nm~450 nm 的荧光激发光谱, 固定激发波长为 280 nm, 狭缝宽度为 10/2.5 nm.

1.2.2 同步荧光光谱 在室温(298 K)下分别记录 BSA 在 3 种 Bola 表面活性剂存在下在激发和发射波长差 Δλ 分别为 20 nm 和 60 nm 时的同步荧光光谱, 狭缝宽度为 10/2.5 nm, 扫描范围为 200 nm~450 nm.

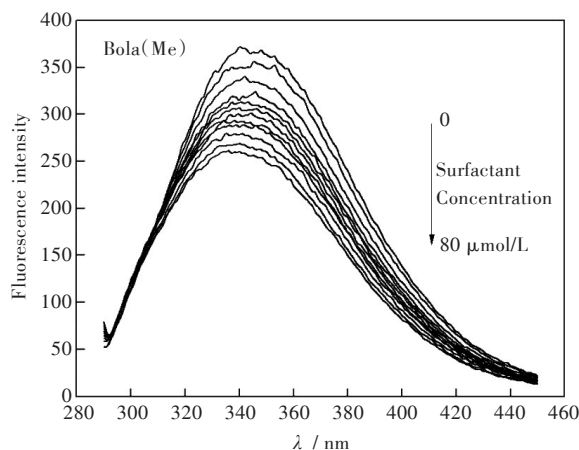
1.2.3 紫外吸收光谱 配制一定浓度的 BSA 与 Bola 表面活性剂的混合溶液, 室温(298 K)下扫描其紫外吸收光谱, 扫描范围为 200 nm~350 nm.

1.2.4 圆二色光谱 配制一定浓度的 BSA 以及 BSA 与 Bola 表面活性剂的混合溶液, 注入 1 mm 路径的圆形石英比色皿中, 室温(298 K)下在圆二色光谱仪上扫描其圆二色谱, 扫描范围为 190 nm~260 nm, 扫描间隔为 0.5 s.

2 结果与讨论

2.1 Bola 表面活性剂对 BSA 的荧光猝灭作用

BSA 的内源荧光主要来自于分子中酪氨酸(Tyr)和色氨酸(Trp)残基, 它们在某些物质的作用下会发生荧光猝灭^[17]. 实验表明: 固定 BSA 的量, 分别向其中加入一定浓度的表面活性剂溶液, 3 种 Bola 表面活性剂[Bola(Me)、Bola(Et)、Bola(Pr)]均能在与 BSA 的相互作用中猝灭 BSA 的荧光强度, BSA 的内源荧光光谱图出现相似的变化规律. 图 2 为 25 °C 下, Bola(Me)猝灭 BSA 的荧光光谱图, BSA 分子中色氨酸残基的最大荧光强度的波长位于约 345 nm 左右. 随着 Bola(Me)的加入, 表面活性剂的浓度增加, BSA 的内源荧光强度呈现有规律的下降, 但其荧光光谱图峰形是不变的, 表明 Bola(Me)对 BSA 的荧光有猝灭作用. 同时, BSA 的最大发射波长有明显的蓝移现象, 当 Bola(Me)的浓度从 0 μmol/L 增大到 80 μmol/L 时, BSA 的最大发射波长从 343 nm 蓝移到 327 nm, 这可能是由于 Bola 表面活性剂的加入使 BSA 所处的微环境发生了变化.



注:从上至下,Bola(Me)的浓度分别为($\mu\text{mol/L}$):0; 1.7; 3.3; 5.0; 6.7; 8.3; 10; 13; 20; 30; 47; 80.

图2 Bola(Me)浓度对BSA($10\mu\text{mol/L}$)荧光强度的影响
Fig. 2 Effect of surfactant Bola(Me) concentration on the fluorescence intensity of BSA($10\mu\text{mol/L}$)

3种Bola表面活性剂的浓度对BSA的荧光最大发射波长的影响如图3,随着Bola表面活性剂浓度的增大,BSA的荧光最大发射波长均出现不同程度的蓝移现象.原因可能是,随着表面活性剂浓度的增加,BSA与Bola表面活性剂阳离子头基之间的静电吸引和烷基链间的疏水作用增强,从而使得BSA的构象发生改变^[18],造成Bola/BSA体系荧光发射最大波长蓝移.对于含有不同链长疏水头基的Bola表面活性剂,可以观察到Bola/BSA体系最大荧光波长蓝移程度大小变化顺序为:Bola(Me)<Bola(Et)<Bola(Pr).表明在同一温度下,头基的烷基链越长,Bola/BSA体系荧光发射最大波长蓝移程度越大,Bola表面活性剂与BSA的相互作用越强,该结果与文献报道类似^[19-20].

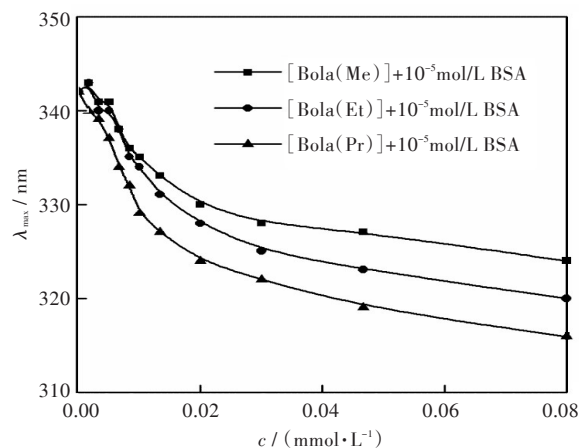


图3 Bola表面活性剂浓度对BSA($10\mu\text{mol/L}$)最大发射波长的影响

Fig. 3 Effect of Bola surfactants concentration on the maximum emission wavelength of BSA($10\mu\text{mol/L}$)

荧光物质的荧光猝灭机理通常可以分为动态猝灭和静态猝灭两种,动态猝灭是猝灭剂和荧光物质之间的激发态的能量转移或电子转移过程,静态猝灭则是由于荧光物质与猝灭剂发生配合作用,产生了不发荧光的配合物^[21].若将Bola表面活性剂溶液对BSA荧光的猝灭归因于分子碰撞引起的动态猝灭,按照Stern-Volmer方程^[22]

$$\frac{F_0}{F} = 1 + K_{SV}[Q] \quad (1)$$

$$k_q = \frac{K_{SV}}{\tau_0} \quad (2)$$

式中, F_0 和 F 分别为加入Bola表面活性剂前后BSA的荧光强度; K_{SV} 为Stern-Volmer动态猝灭常数; $[Q]$ 为猝灭剂浓度,这里指Bola表面活性剂的浓度 c ; k_q 为双分子猝灭常数; τ_0 一般约为 10^{-8} s^{-1} ,是荧光物质在不存在猝灭剂情况下的荧光寿命^[23].以 F_0/F 对 c 作图,得到Bola/BSA体系发生荧光猝灭的Stern-Volmer图,如图4所示,图中直线的斜率即为动态猝灭常数 K_{SV} .

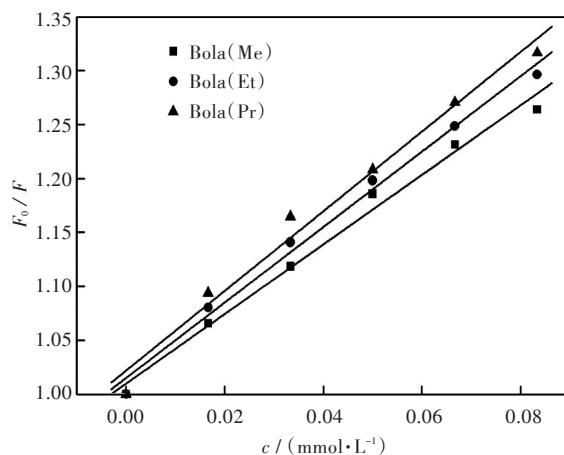


图4 Bola/BSA体系的Stern-Volmer图

Fig. 4 Stern-Volmer curves of the systems of Bola/BSA

由图4可以求得,Bola(Me),Bola(Et)及Bola(Pr)3种Bola表面活性剂对BSA的荧光猝灭的猝灭常数 K_{SV} 分别为 $2.91 \times 10^4\text{ mol/L}$, $3.17 \times 10^4\text{ mol/L}$, $3.46 \times 10^4\text{ mol/L}$.根据公式(2)可以得到 k_q 分别为 $2.91 \times 10^{12}\text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$, $3.17 \times 10^{12}\text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$, $3.46 \times 10^{12}\text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$,如表1所示.而生物大分子被各类猝灭剂猝灭最大碰撞猝灭常数约为 $2.0 \times 10^{10}\text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$ ^[24].显然,BSA被Bola表面活性剂猝灭的猝灭速率远大于碰撞控制的 k_q ,由此可推测,该猝灭过程可能包含静态猝灭^[25].

表1 Bola/BSA体系的 K_{SV} 和 k_q 值
Tab. 1 K_{SV} and k_q of Bola/BSA systems

Bola 表面活性剂 Bola surfactants	猝灭常数 K_{SV} quenching constant $K_{SV} /$ ($10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$)	猝灭常数 k_q quenching constant $k_q /$ ($10^{12} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
Bola(Me)	2.91	2.91
Bola(Et)	3.17	3.17
Bola(Pr)	3.46	3.46

2.2 紫外吸收光谱 (ultraviolet, UV)

图5给出了Bola(Et)加入前后BSA的紫外吸收光谱,从图中可以看出,BSA在208 nm左右有最大吸收峰,对应BSA分子中肽键和芳香残基的紫外吸收,随着Bola(Et)的浓度的增加,两种基团的紫外吸收显著减少.这就表明BSA和Bola(Et)可能形成了复合物,致使肽键和芳香残基的环境发生改变,从而导致其紫外吸收特性发生改变.由此结合Stern-Volmer方程可以推断,Bola表面活性剂对BSA的荧光猝灭机理中包含静态猝灭过程.

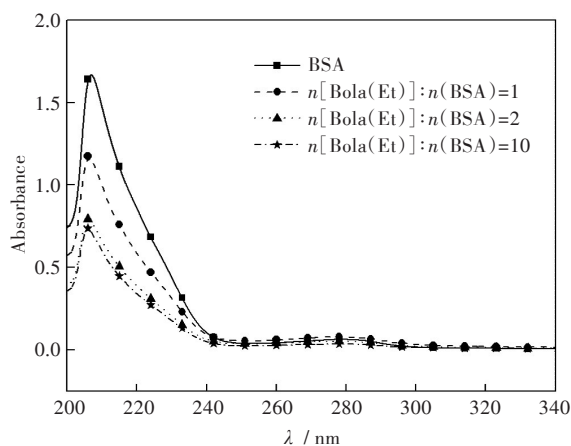


图5 Bola(Et)/BSA的紫外吸收光谱

Fig. 5 UV spectra of Bola(Et)/BSA

2.3 同步荧光光谱 (synchronous fluorescence, SF)

当小分子化合物与BSA结合时通常会引起BSA构象的变化,BSA的荧光主要来自色氨酸(Trp)残基和酪氨酸(Tyr)残基,而Trp和Tyr具有相似的荧光光谱.据报道^[26],色氨酸的荧光最大发射波长跟其所处的微环境的极性有关,同步荧光光谱能有效的区分BSA中色氨酸残基($\Delta\lambda=60 \text{ nm}$)和酪氨酸残基($\Delta\lambda=20 \text{ nm}$).所以进行了同步荧光实验,3种Bola表面活性剂的规律相似,下面以不同浓度Bola(Me)存在时BSA的同步荧光光谱为例讨论,如图6(a,b).

从图中可见,随着Bola(Me)浓度的增加,BSA

的荧光峰强度显著降低.同时,Trp的荧光强度比Tyr的荧光强度要大,说明Trp对BSA的荧光强度贡献大.图6(a)中 $\Delta\lambda=20 \text{ nm}$ 时,随着Bola(Me)浓度的增加,BSA的最大发射波长基本没有变化.而图6(b)中 $\Delta\lambda=60 \text{ nm}$ 时,BSA的最大发射波长随着Bola(Me)浓度的增加从283 nm蓝移到275 nm,即色氨酸残基随着Bola表面活性剂的加入发生了轻微的构象变化,可以推断出Bola表面活性剂主要是与BSA分子中的色氨酸(Trp)残基发生相互作用.

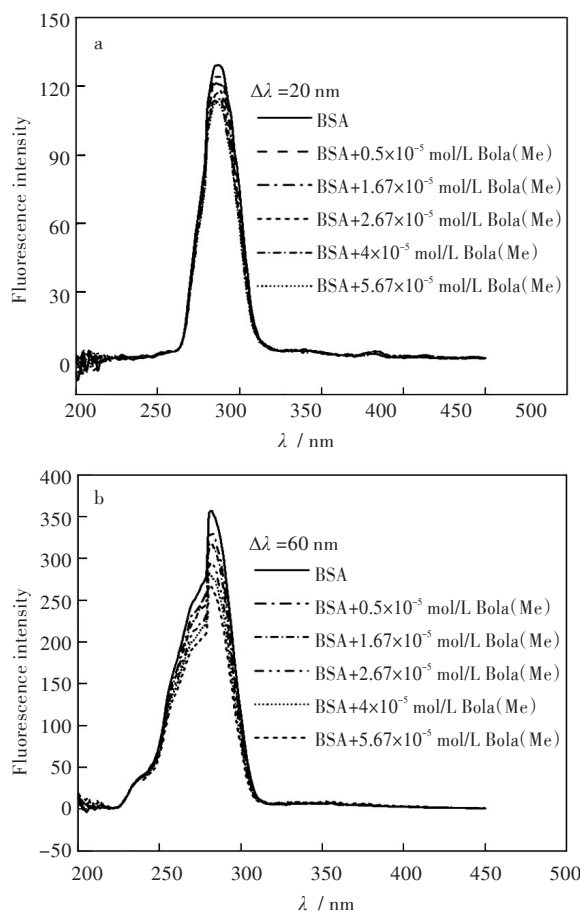


图6 Bola(Me)浓度对BSA(10 μmol/L)同步荧光的影响

Fig. 6 Effect of surfactants Bola(Me) concentration on SF spectra of BSA(10 μmol/L)

2.4 圆二色谱 (circular dichroism, CD)

蛋白质分子中存在着多种二级结构,其中包括4种主要结构, α -螺旋, β -折叠, β -转角和无规卷曲,并且各种二级结构的谱图的形状也不同,蛋白质分子二级结构中 α -螺旋的量的减少可以反映蛋白质分子的展开程度^[27].为了研究Bola表面活性剂对BSA分子结构的影响,测量了波长在190 nm~260 nm范围内的圆二色谱,如图7所示为3种Bola表面活性剂[Bola(Me)、Bola(Et)、Bola(Pr)]与BSA相互作用的圆二色谱图.

如图 7, 在波长约为 208 nm 和 222 nm 时, BSA 具有两个负带在紫外区的 CD 光谱, 这两个凹槽表征的是 BSA 的 α -螺旋结构^[28]. 同时可以观察到, 随着 Bola/BSA 的摩尔比的增大, BSA 的摩尔椭圆率逐渐增大, 表明 BSA 的二级结构发生了变化, 即 α -螺旋结构的含量逐渐减少. 由于蛋白质的圆二

色谱图是多种二级结构共同作用的结果, 为了深入研究 Bola 表面活性剂对 BSA 分子结构的影响, 通过测得的 BSA 圆二色谱数据, 计算得到 BSA 分子中各种二级结构的含量, 如表 2 所列即为加入 3 种 Bola 表面活性剂前后 BSA 中二级结构含量的变化.

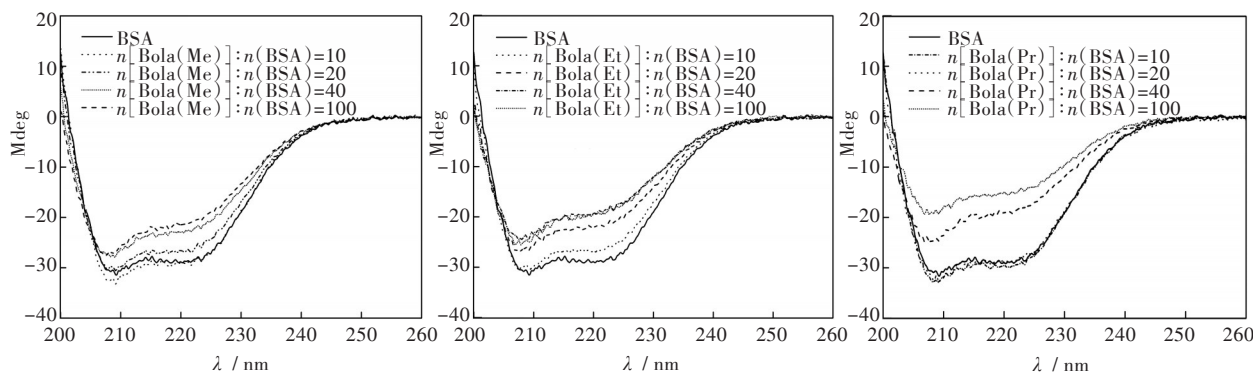


图 7 不同 Bola/BSA 体系摩尔比下的圆二色谱

Fig. 7 CD spectra of BSA at different molar ratios in Bola/BSA systems

表 2 BSA 二级结构含量随不同 Bola/BSA 摩尔比的变化

Tab. 2 The secondary structure of BSA with different Bola/BSA molar ratio

Bola 表面活性剂 / BSA Bola surfactant / BSA	摩尔比 molar ratio	α -螺旋含量 content of α -helicity / %	β -折叠含量 content of β -sheet / %	β -转角含量 content of β -turn / %	无规卷曲含量 content of random coil / %
BSA		55.4	7.5	12.5	24.6
Bola(Me) / BSA	10	56.6	8.9	13.7	20.8
	20	51.1	13.6	10.9	24.4
	40	46.3	22.3	9.6	21.8
	100	42.0	23.1	12.1	22.8
Bola(Et) / BSA	10	52.8	10.7	15.5	21.0
	20	44.0	23.6	14.6	17.8
	40	41.7	28.6	13.4	16.3
	100	40.5	30.3	14.3	14.9
Bola(Pr) / BSA	10	57.2	10.7	10.9	21.2
	20	54.7	21.1	13.5	10.7
	40	40.4	23.7	14.1	21.8
	100	38.9	28.1	15.3	17.7

由表 2 可以看出, 对于这 3 种 Bola 表面活性剂, 随着表面活性剂含量的增加, BSA 分子中 α -螺旋的含量降低, 而 β -折叠的含量显著增加, 说明 BSA 分子的肽链发生了解螺旋现象. 在 Bola/BSA 摩尔比为 10 时, BSA 的二级结构变化不大, Bola(Et) 只使 BSA 的二级结构发生了微小的变化, α -螺旋从 55.4% 减小到了 52.8%, β -折叠从 7.5% 增大到了 10.7%; 而 Bola(Me) 和 Bola(Pr) 的 α -螺旋含量出现轻微的增加, 这可能是由于低浓度的表

面活性剂的加入使 BSA 的结构不稳定所致. 随着 $n(\text{Bola})/n(\text{BSA})$ 摩尔比的增大, 在 Bola/BSA 的摩尔比为 100 时, Bola(Me) 使 BSA 的 α -螺旋从 55.4% 减小到 42.0%, β -折叠从 7.5% 增大到 23.1%, 变化比较明显; Bola(Pr) 使 BSA 的 α -螺旋从 55.4% 减小到 38.9%, β -折叠从 7.5% 增大到 28.1%, 即变化非常明显; Bola(Et) 的二级结构变化则介于二者之间. 通过分析圆二色谱图计算得到的 BSA 二级结构的含量可以推断, Bola 表面活性剂加入后引起

了BSA二级结构的的变化,且Bola表面活性剂的头基的烷基链越长,疏水性越强,对BSA二级结构的影响越大,该结果与上文中荧光光谱结果吻合。

3 结 语

本文利用荧光光谱、紫外吸收光谱以及圆二色光谱研究了系列3种不同疏水头基的Bola表面活性剂(Bola(Me)、Bola(Et)、Bola(Pr))与牛血清蛋白(BSA)在pH=7.4的 Na_2HPO_3 - NaH_2PO_3 缓冲溶液中的相互作用,结果表明Bola表面活性剂对BSA的荧光强度有猝灭作用,且荧光猝灭现象中包含静态猝灭过程。表面活性剂主要和BSA的Trp残基相互作用导致BSA的构象发生改变。3种Bola表面活性剂对两者相互作用的影响主要体现在:随着表面活性剂头基的烷基链增长,荧光猝灭作用增强,BSA的二级结构变化增大,说明在Bola表面活性剂与BSA的相互作用中,头基烷基链的长度是一个重要因素。这项研究对于理解Bola表面活性剂和BSA之间的相互作用,拓展其在生物、医药领域中的潜在应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吴丹,徐桂英. 光谱法研究蛋白质与表面活性剂的相互作用[J]. 物理化学学报, 2006, 22 (2): 254-260.
WU D, XU G Y. Study on protein-surfactant interaction by spectroscopic methods [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2006, 22 (2): 254-260.
- [2] LEE H J, MCAULEY A, SCHILKE K F, et al. Molecular origins of surfactant-mediated stabilization of protein drugs [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2011, 63 (13): 1160-1171.
- [3] KELLEY D, MCCLEMENTS D J. Interactions of bovine serum albumin with ionic surfactants in aqueous solutions [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17 (1): 73-85.
- [4] 刘静,徐桂英. 表面活性剂与蛋白质相互作用的研究进展[J]. 日用化学工业, 2003, 33 (1): 29-32.
LIU J, XU G Y S, UNIVERSITY S, et al. Progress of study of interaction between protein and surfactant [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2003, 33 (1): 29-32.
- [5] 梁彦秋,孙鹏,刘婷婷,等. 荧光光谱法研究十六烷基三甲基溴化铵与牛血清白蛋白的相互作用[J]. 应用化学, 2007, 24 (8): 965-967.
LIANG Y Q, SUN P, LIU T T, et al. Fluorescence spectra of binding reaction between cetyltrimethylammonium bromide and bovine serum albumin [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2007, 24 (8): 965-967.
- [6] TURRO N J, LEI X G, ANANTHAPADMANABHAN K P, et al. Spectroscopic probe analysis of protein-surfactant interactions: the BSA/SDS System [J]. Langmuir, 1995, 11 (7): 2525-2533.
- [7] GHOSH S, BANERJEE A. A multitechnique approach in protein/surfactant interaction study: physicochemical aspects of sodium dodecyl sulfate in the presence of trypsin in aqueous medium [J]. Biomacromolecules, 2002, 3 (1): 9-16.
- [8] DE S, GIRIGOSWAMI A, DAS S. Fluorescence probing of albumin-surfactant interaction [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2005, 285 (2): 562-573.
- [9] RUSO J M, DEO N, SOMASUNDARAN P. Complexation between dodecyl sulfate surfactant and zein protein in solution [J]. Langmuir, 2004, 20 (21): 8988-8991.
- [10] FUHRHOP J H, FRITSCH D. Monolayer lipid membranes from synthetic and natural bolaamphiphiles [J]. Systematic & Applied Microbiology, 1986, 7 (2/3): 272-277.
- [11] FUHRHOP J H, BACH R. Monolayer lipid membranes (MLM) from bolaamphiphiles [J]. Advanced Supramolecular Chemistry, 1992(2): 25-63.
- [12] 李双阳,王佳颖,郭高强,等. BOLA型表面活性剂的研究进展[J]. 广州化工, 2015 (5): 18-20.
LI S Y, WANG J Y, GUO G Q, et al. Progress in research work with respect to bolaform surfactants [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015 (5): 18-20.
- [13] SAMANTA A, PAUL B K, GUCHHAIT N. Spectroscopic probe analysis for exploring probe-protein interaction: a mapping of native, unfolding and refolding of protein bovine serum albumin by extrinsic fluorescence probe [J]. Biophysical Chemistry, 2011, 156 (2/3): 128-139.
- [14] 郭琼,李连之,董建方,等. 氧钒配合物 $[\text{VO}(\text{o-Van-Asn})(\text{Phen})]\cdot 1.5\text{CH}_3\text{OH}$ 的合成、晶体结构及与DNA和BSA的相互作用[J]. 化学学报, 2012, 70 (15): 1617-1624.
GUO Q, LI L Z, DONG J F, et al. Synthesis, crystal structure and interactions with DNA and BSA of a oxovanadium (IV) complex $[\text{VO}(\text{o-Van-Asn})(\text{Phen})]\cdot 1.5\text{CH}_3\text{OH}$ [J]. Acta Chimica Sinica, 2012, 70 (15): 1617-1624.
- [15] CHENG Z. Interaction of tetramethylpyrazine with two serum albumins by a hybrid spectroscopic method [J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2012, 93 (10): 321-330.
- [16] YANG K, TYAGI M, MOORE J S, et al. Odd-even glass transition temperatures in network-forming ionic

- glass homologue [J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136 (4) : 1268-1271.
- [17] 代小刚, 徐同宽, 崔励, 等. 卡络磺钠与牛血清蛋白荧光光谱的研究[J]. 分析实验室, 2007, 26 (2) : 10-13.
- DAI X G, XU T K, CUI L, et al. Fluorescence study on interaction of carbazochrome sodium sulfonate and bovine serum albumin [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2007, 26 (2) : 10-13.
- [18] PI Y, SHANG Y, PENG C, et al. Interactions between bovine serum albumin and gemini surfactant alkanediyl-alpha, omega-bis (dimethyldodecylammonium bromide) [J]. Biopolymers, 2006, 83 (3) : 243-249.
- [19] MADAENI S S, ROSTAMI E. Spectroscopic investigation of the interaction of BSA with cationic surfactants [J]. Chemical Engineering & Technology, 2008, 31 (9) : 1265-1271.
- [20] LU R C, CAO A N, LAI L H, et al. Effect of anionic surfactant molecular structure on bovine serum albumin (BSA) fluorescence [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2006, 278 (1/2/3) : 67-73.
- [21] 杨朝霞, 张友玉, 杨琴, 等. 光谱法研究呋苄西林钠与牛血清白蛋白的作用[J]. 应用化学, 2007, 24 (8) : 858-862.
- YANG Z X, ZHANG Y Y, YANG Q, et al. Spectroscopic study on the interaction of furbenicillin sodium with bovine serum albumin [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2007, 24 (8) : 858-862.
- [22] WU Q, JIANG F, LI C, et al. Interaction of caffeine with bovine serum albumin: determination of binding constants and the binding site by spectroscopic methods [J]. Chinese Journal of Chemistry, 2011, 29 (3) : 433-440.
- [23] ALBRECHT C, JOSEPH R. Lakowicz: principles of fluorescence spectroscopy, 3rd Edition [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2008, 390 (5): 1223-1224.
- [24] LU J X, ZHANG G Z, ZHAO P, et al. Studies on interaction between adriamycin and serum albumin as well as effect of ions on the reaction [J]. Acta Chimica Sinica, 1997, 55 (9) : 915-920.
- [25] 甘晓娟, 刘绍璞, 刘忠芳, 等. 某些芳香族氨基酸作探针荧光猝灭法测定安乃近及其代谢产物 [J]. 化学学报, 2012, 70(1): 58-64.
- GAN X J, LIU S P, LIU Z F, et al. Fluorescence quenching method for the determination of analgin and metabolin with some aromatic amino acids as probes [J]. Acta Chimica Sinica, 2012, 70(1): 58-64.
- [26] WANG Y X, LI L, SHENG L J, et al. Spectroscopic study on the inherent binding information of cationic perfluorinated surfactant with bovine serum albumin [J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2011, 132 (7) : 489-494.
- [27] SREERAMA N, WOODY R W. Estimation of protein secondary structure from circular dichroism spectra: comparison of CONTIN, SELCON, and CDSSTR methods with an expanded reference set [J]. Analytical Biochemistry, 2000, 287 (2) : 252-260.
- [28] TAI S X, LIU X G, CHEN W Y, et al. Spectroscopic studies on the interactions of bovine serum albumin with alkyl sulfate gemini surfactants [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2014, 441 : 532-538.

本文编辑: 张 瑞



(上接第119页)

- graphite to protect heavy oil pollution [J]. Carbon, 2000, 38(2): 199-210.
- [14] CHEN G H, WU D J, WENG W G, et al. Preparation of polymer/graphite conducting nanocomposite by intercalation polymerization [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 82(10): 2506-2511.
- [15] CHEN J J, WU R B, YANG G Y, et al. Synthesis and photoluminescence of needle-shaped 3C-SiC nanowires on the substrate of PAN carbon fiber [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 456(1/2): 320-323.
- [16] WANG Q H, LI Y W, SANG S B, et al. Effect of reactivity and porous structure of expanded graphite (EG) on microstructure and properties of Al₂O₃-C refractories [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 645(5): 388-397.
- [17] WANG Q H, LI Y W, JIN S L, et al. Catalyst-free hybridization of silicon carbide whiskers and expanded graphite by vapor deposition method [J]. Ceramics International, 2015, 41: 14359-14366.
- [18] URETA-ZANARTU M S, BUSTOS P, BERRIOS C, et al. Electrooxidation of 2, 4-dichlorophenol and other polychlorinated phenols at a glassy carbon electrode [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47(15): 2399-2406.
- [19] 邵元华, 朱果逸, 董献堆, 等. 电化学方法原理和应用. 第二版 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 407-410.
- [20] ADEKUNLE A S, OZOEMENA K I. Electron transport and electrocatalytic properties of MWCNT/nickel nanocomposites: hydrazine and diethylaminoethanethiol as analytical probes [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2010, 645(1): 41-49.

本文编辑: 张 瑞