

• 研究论文 •

尼罗红在离子表面活性剂水溶液中的荧光特性

林翠英 赵剑曦* 宋利

(福州大学化学化工学院 应用化学系 福州 350002)

摘要 尼罗红(NR)分子具有大的芳香环和基态时可与水分子形成氢键的吸电子基,它对增溶在表面活性剂胶束栅栏层的环境尤其敏感,在十二烷基三甲基溴化铵($C_{12}TABr$)胶束水溶液中表现为双重荧光,最大发射波长分别位于 578 和 630 nm. 十二烷基硫酸钠(SDS)胶束的反离子解离度大于 $C_{12}TABr$ 胶束,这不仅增大了 NR 周边环境的极性,也增多了溶剂化水,导致与 NR 氢键作用增强,荧光强度低于 $C_{12}TABr$,但有效促进了分子内扭转电荷转移(TICT)激发态形成,其布居甚至可达到 98%以上,表观上仅出现了在 634 nm 的单重荧光峰. NR 对环境的敏感特性很好地反映了 Gemini 表面活性剂初始形成胶束的残缺结构信息,是检测这类具有强烈相互作用两亲分子聚集行为的良好探针.

关键词 TICT 探针; 尼罗红; 环境敏感; 胶束栅栏层信息

Fluorescence Properties of Nile Red in Ionic Surfactant Aqueous Micellar Solutions

Lin, Cuiying Zhao, Jianxi* Song, Li

(Department of Applied Chemistry, College of Chemistry and Chemical Engineering,
Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract The molecule of nile red (NR) contains a big aromatic ring and a carbonyl oxygen (electron acceptor) that can hydrogen-bond with a water molecule, resulting in high sensitivity to the microenvironments of the micellar palisade layer in which NR is solubilized. In the aqueous micellar solution of dodecyltrimethylammonium bromide ($C_{12}TABr$), the dual fluorescence of NR appeared and the maximum emission wave lengths were at 578 and 630 nm, respectively. The dissociation degree of the counterion from sodium dodecyl sulfate (SDS) micelle was found to be larger than that of $C_{12}TABr$. This increased both the microenvironment polarity around NR and the hydrated water for the heads resulting in the enhancement of the hydrogen bonds with water. As a result, the fluorescent intensity of SDS solution was reduced compared with that of $C_{12}TABr$ but the TICT state was effectively promoted to form, which produced the high population of the TICT state over 98% and thus apparent single fluorescent peak at 634 nm. By the high sensitivity of NR to microenvironment, the information about uncompleted structure of the micelles formed initially was also obtained, which indicates that NR can be used as the probe to determine the aggregates formed by the amphiphilics with strong intermolecular synergism.

Keywords TICT probe; nile red; environment-sensitivity; the information about the micellar palisade layer

荧光探针由于对环境变化的高灵敏度响应,已成为探测溶液中表面活性剂分子有序聚集体形成的有力手

段^[1],例如常用的芘(Py)探针利用了其精细谱结构中的第一峰和第三峰强度比值(I_1/I_3)对环境极性敏感的特性

* E-mail: jxzhao.colloid@fzu.edu.cn; Tel.: 0591-22866338.

Received March 28, 2008; revised September 25, 2008; accepted November 17, 2008.

国家自然科学基金(No. 20673021)资助项目.

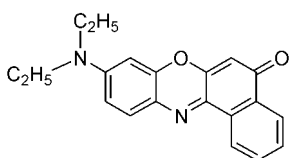
检测了表面活性剂在水溶液中的临界胶束浓度 $\text{cmc}^{[2]}$. 与 Py 不同, 分子内扭转电荷转移(TICT)探针具有自身分子结构的特点, 它通常由芳香环上连接了吸电子基团和推电子基团构成, 例如对二甲氨基苯甲腈(DMABN). 这样的分子在光激发下发生了电荷向吸电子基团的转移, 促使芳香环沿着 σ -键扭转, 产生的 TICT 激发态其偶极矩远高于相应的基态, 呈现出显著的环境效应^[3]. 我们的前期工作发现利用 DMABN 可以很好地测定离子型和非离子型表面活性剂在纯水溶液以及含 NaBr 或丁醇的水溶液中的临界胶束浓度 $\text{cmc}^{[4,5]}$. 然而, 表面活性剂在水溶液中的自组织现象丰富, 例如在 KBr 的诱导下, 十六烷基溴化铵(C_{16}TABr)胶束发生了由球状向棒状的转变^[6], 而 2-乙基己基琥珀酸酯磺酸钠(AOT)随着浓度增加, 很快由胶束转变为囊泡^[7]. 这样的分子有序聚集体结构转变已由光散射或电镜技术所证实, 如果能利用 TICT 探针的环境敏感特性检测分子有序聚集体结构转变的临界点显然具有重要意义, 但是我们的研究表明 DMABN 并不能获得这样的信息, 需要开发更为敏感的探针.

尼罗红(NR)也是典型的 TICT 探针, 其分子含有远比 DMABN 大的芳香环(见实验部分), 荧光发射强^[8,9], 而且它不象 DMABN 那样在基态的推电子基而是在吸电子基(芳香环的羰基氧)上可与水形成氢键^[10], 这利于分子内的电子转移, 促进 TICT 态的形成^[11-13], 因而对环境更加敏感, 在许多受限环境(例如沸石^[14], 环糊精^[15], 胶束^[16-18]和混合胶束^[19], 反胶束^[20], LB 膜^[21])中性质独特, 有望开发成更为敏感的探针. 本文考察离子型表面活性剂胶束微环境(包括头基解离带来的电场影响和少量渗透水的氢键作用等)对 NR 光谱行为的影响, 为进一步研究复杂聚集体奠定基础.

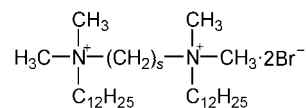
1 实验部分

1.1 试剂

尼罗红(NR)购自 Acros 公司, 分子结构式如下:



十二烷基三甲基溴化铵(C_{12}TABr , Sigma), 用乙醇和乙酸乙酯的混合溶剂重结晶 3 次. 十二烷基硫酸钠(SDS, Farco), 用乙醚抽提 8 h, 再用乙醇重结晶 3 次. 季铵盐 Gemini 表面活性剂 $\text{C}_{12}\text{-S-C}_{12}\cdot 2\text{Br}$ 由本实验室合成^[22], 其分子结构式如下:



实验用水为 Milli-Q 超纯水.

1.2 荧光光谱测定

荧光光谱用日立 F4500 荧光光谱仪测定, Xe 灯光源, 光电倍增管检测器. 激发和发射的狭缝宽度均为 5.0 nm. 激发波长为 480 nm. 用 DDS-307 直读式数字电导率仪, DJS-1C 型铂黑电极测定表面活性剂水溶液的电导率.

所有实验均在 $(25 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 下完成.

2 结果与讨论

2.1 NR 在 C_{12}TABr 胶束水溶液中的荧光光谱

图 1 (I) 为 NR 在 C_{12}TABr 胶束水溶液中荧光光谱, 可以清楚地看到在 560~600 nm 之间出现了肩峰. 利用解卷积技术, 图 1 (II) 的二阶导数谱(上部的点状虚线)显示存在两个子峰, 用 Gaussian-Lorentzian 程序拟合得到 2 个子峰(下部的虚线), 其最大波长分别对应 578 和 630 nm. NR 在己烷中的荧光光谱也呈现两个峰, 分别在 525 和 570 nm^[8]; 在甲醇(80%)和水(20%)混合溶剂中荧光光谱的两个峰分别位于 585 和 645 nm^[21]. 已知具有芳香结构的化合物通常增溶在胶束的栅栏层^[23,24], 胶束栅栏层的极性介于上两种溶剂极性之间, 图 1(II) 2 个子峰恰好出现在这两种溶剂特征吸收峰之间, 说明 NR 对环境极性相当敏感.

图 2 固定发射波长为 578 和 630 nm, 得到了两个不同位置的荧光激发谱, 这清楚地表明图 1(I) 获得的两个子峰分别来自两种不同构型分子的荧光发射^[8,21]. 由于分子内电荷转移导致了芳香环扭转, TICT 激发态的偶极矩远高于正常激发态(LE 态, locally excited state), 因而在极性环境中处于能量较低的能级^[3], 于是 630 nm 的发射对应 TICT 激发态, 而 578 nm 则对应 LE 态发射.

2.2 NR 在 SDS 胶束水溶液中的荧光光谱

图 3(I) 为 NR 在 SDS 胶束水溶液中的荧光光谱, 利用解卷积技术分解得 2 个子峰[图 3(II)], 分别位于 577 和 634 nm. 与 C_{12}TABr 相比, SDS 中 LE 态的峰位置(577 nm)不变, 而 TICT 态的峰位置(634 nm)却红移了, 这一方面是因为 SDS 头基的水化强于季铵头基, 造成其栅栏层处的极性略强于 C_{12}TABr , 另一方面也说明了 TICT 态受环境极性影响要大于 LE 态. 除此之外, SDS 胶束中 577 nm 的子峰只占整个发射强度的很小比例, 主要为 634 nm 处的发射.

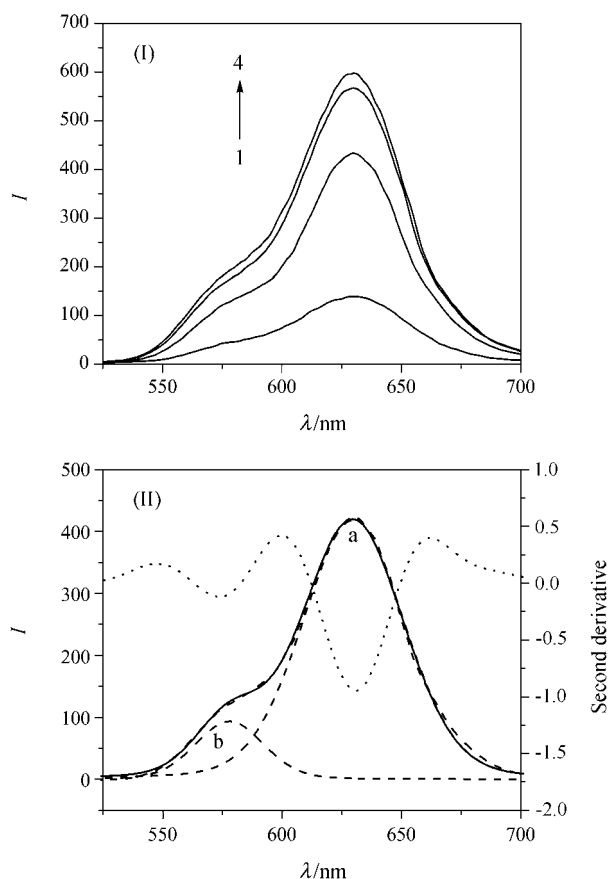


图1 25 °C时 NR 在 $C_{12}TABr$ 胶束水溶液中的荧光光谱(I)以及相应的解峰例子(II) ($18 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} C_{12}TABr$)

Figure 1 (I) Fluorescence spectra of NR ($2 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) in $C_{12}TABr$ aqueous micellar solutions at 25 °C. (II) Curve-fitting for the fluorescence spectrum of NR in $C_{12}TABr$ ($18 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) solution by Gaussian-Lorentzian program (Peakfit Version 4.12, Seasolve)

From 1 to 4, the surfactant concentration is successively 16, 18, 24, 30 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ and the dotted line corresponds to the second derivative curve for the fluorescence spectrum, which characters the sub-band position, while the dashed line shows the curve-fitting result of the two sub-bands

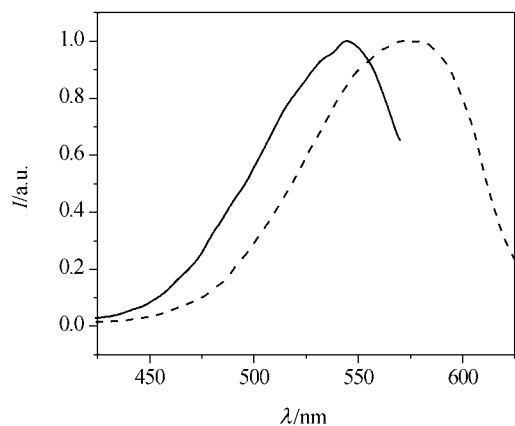


图2 NR 在 $C_{12}TABr$ ($18 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 水溶液中的荧光激发谱
Figure 2 Normalized excited spectra of NR in $C_{12}TABr$ ($18 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) solution with an emission maximum at 578 nm (full line) and at 630 nm (dashed line), respectively

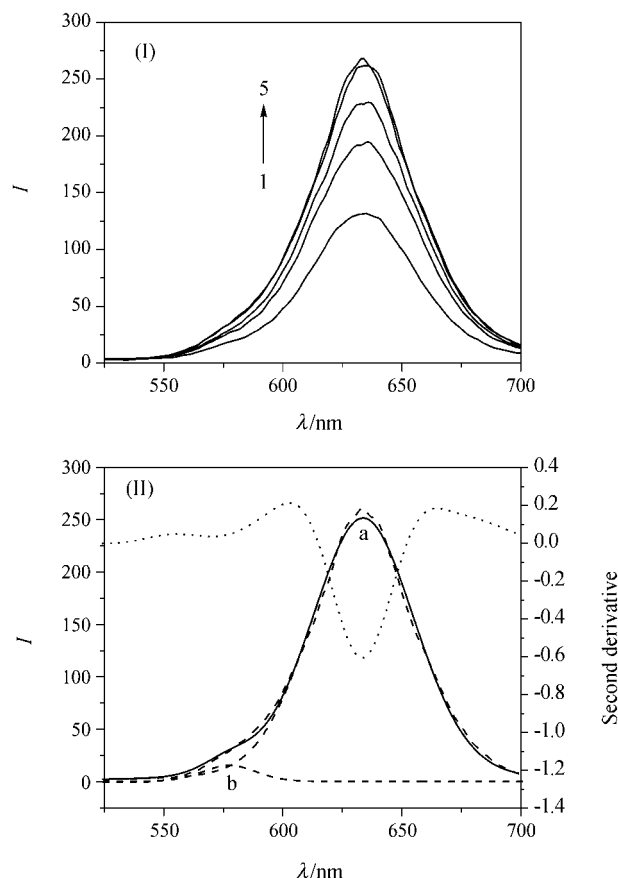


图3 25 °C时 NR 在 SDS 胶束水溶液中的荧光光谱(I)以及相应的解峰例子(II) ($16 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} SDS$)

Figure 3 (I) Fluorescence spectra of NR ($2 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) in SDS aqueous micellar solutions at 25 °C. (II) Curve-fitting for the fluorescence spectrum of NR in SDS ($16 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) solution by Gaussian-Lorentzian program (Peakfit Version 4.12, Seasolve)

From 1 to 5, the surfactant concentration is successively 8, 9, 10, 16, 18 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ and the dotted line corresponds to the second derivative curve for the fluorescence spectrum, while the dashed line shows the curve-fitting result of the two sub-bands

利用 $C_{12}TABr$ 和 SDS 水溶液的电导曲线, 由在 cmc 以上和以下的两条直线斜率 S_2 和 S_1 的比值 S_2/S_1 可以表征胶束反离子解离度 α ^[25], 得到 $C_{12}TABr$ 和 SDS 胶束的 α 值分别为 0.27 和 0.35, SDS 较大的 α 值带来胶束表面较大的电场强度. Baumann 等^[26]给出电场强度 E 下的荧光强度 I^E 表达式:

$$I^E = I^0(1 + KE^2) \quad (1)$$

式中 I^0 为外电场为零时的荧光强度, K 为与激发态和基态偶极矩差有关的常数, 偶极矩差越大, K 值越高. NR 在基态时处于平面构型, LE 激发态并没有改变平面的分子构型, 只有 TICT 态产生了分子的扭转, 因而后者与基态间存在很大的偶极矩差, 致使 K 值增大, 可见电

场对 TICT 态的荧光强度影响程度明显大于 LE 态, 这解释了 SDS 溶液中 TICT 峰明显的原因. 一个证据来自添加 NaBr 的影响[图 4(I)], NaBr 屏蔽了 SDS 胶束的电荷, 因而随着 NaBr 浓度增加, 550~600 nm 处出现了明显的肩峰, 表明 TICT 激发态的相对布居减小. 类似的盐效应也出现在 C_{12} TABr 的例子中[图 4(II)], 这支持了上述的解释.

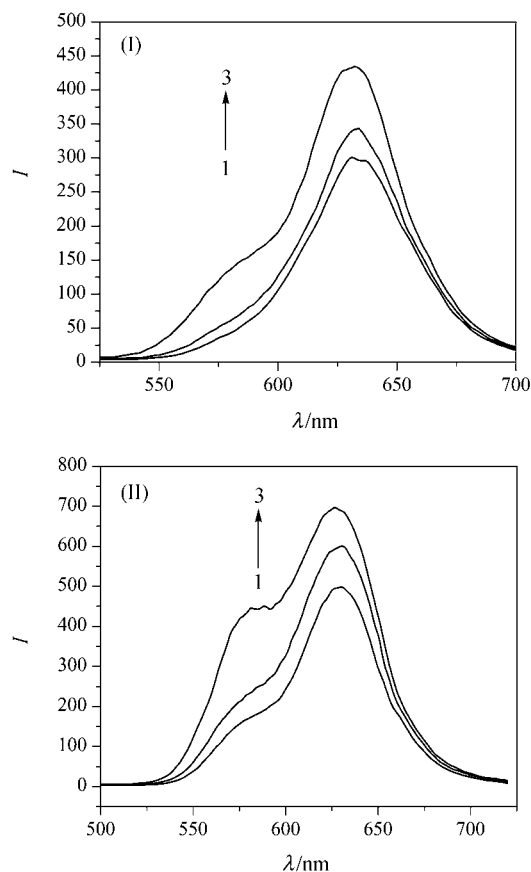


图 4 NR 在 SDS [$16 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, (I)]和 C_{12} TABr [$32 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, (II)]纯水溶液和含盐溶液中的荧光光谱

Figure 4 Fluorescence spectra of NR in SDS [$16 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, (I)] and C_{12} TABr [$32 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, (II)] aqueous solutions at 25°C

From 1 to 3, the salt concentration is successively 0, 10, $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

尽管从式(1)看电场强度是增强探针分子荧光发射强度的因素之一^[26], 但水分子与 NR 之间氢键作用的影响可能同样重要. 氢键的形成会带来系间窜跃几率增大^[27]、诱导增强 $S_1 \rightarrow S_0$ 分子内转化效率^[28]以及自身的振动失活^[10]等影响, 导致荧光强度降低. SDS 头基的水化强于季铵头基(C_{12} TABr), 这不可避免地造成部分水分子与 NR 发生氢键相互作用, 在一定程度上减弱了荧光强度, 这解释了虽然 SDS 胶束栅栏层的电场强度大于 C_{12} TABr, 但 I 反不如后者高的现象[比较图 1(I)和图 2(I)]. 添加 NaBr 屏蔽了 SDS 胶束的表面电荷, 应该使 I 下降, 但图 4 表现出反而升高. 已知 NaBr 是一种盐析盐^[25], 它逐出了与表面活性剂基团结合的水, 导致增溶

在栅栏层中的 NR 分子减少与水接触的机会, I 明显上升, 这给出了支持上述解释的一个辅证.

2.3 NR 在 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2\text{Br}$ 胶束水溶液中的荧光光谱

图 5(I)为 NR 在 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2\text{Br}$ 胶束水溶液中的荧光光谱, 该图有几个特征: (1)这些光谱都出现了肩峰, 均可分解为分别对应低能级的 TICT 激发态和相对高能级 LE 激发态的两个子峰; (2)随着联接链长度 s 增加, 光谱曲线形状发生了明显改变, TICT 激发态的光强逐渐增大, 而 LE 激发态的光强则减小(归一化的图 5(II)给出更为清晰的比较); (3) $s=2$ 时的荧光强度特别大, 从 $s=2$ 到 $s=3$, I 明显下降.

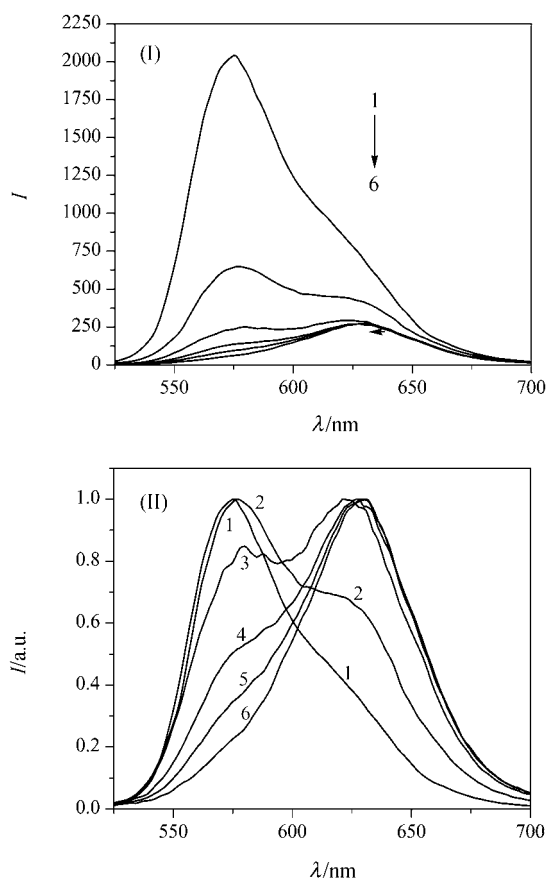


图 5 NR 在 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2\text{Br}$ 胶束水溶液中的荧光光谱(I)和归一化荧光光谱(II)

Figure 5 (I) Fluorescence spectra of NR ($2 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) in $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2\text{Br}$ aqueous micellar solutions, where the surfactant concentration is 2cmc, at 25°C and (II) normalized fluorescence spectra of NR

From 1 to 6, the number (s) of the methylene group in the spacer of $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2\text{Br}$ is successively 2, 3, 4, 5, 6 and 8

尽管 Gemini 表面活性剂 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2\text{Br}$ 可视为 C_{12} TABr 的二聚体(见实验部分分子式), 但头基间联接链的引入改变了 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2\text{Br}$ 头基区(包含 2 个季铵头和联接链)的电荷密度, 这使得胶束的反离子解离度 α 直接受制于 s , 且随着 s 增加而增大^[29]. α 增大意味着栅

栏层区极性增大, 如上所述有利于 TICT 激发态的形成, 因而增加了 TICT 激发态的布居, 这很好地吻合图 6 给出 NR 的 I_a/I_b (反映了 TICT 激发态与 LE 态的相对布居, 其中 I_a 和 I_b 分别为 TICT 和 LE 谱带的荧光强度) 随 s 增加而增大的现象. 由于 TICT 态是由 LE 态转化而来, 这相当于减少了 LE 态的非辐射跃迁, 会使 LE 态荧光强度减弱. 在 $s=2$ 时 I_a/I_b 最小, 约 87% 的分子处于能级较高的 LE 激发态, 只有少量的分子向 TICT 态转化, 因而发射光强大大增强.

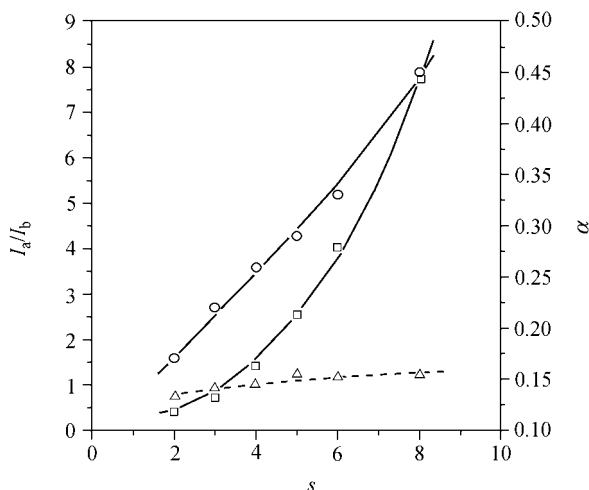


图 6 NR 在 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ 胶束水溶液中的 $I_a/I_b \sim s$ (\square) 和 $\alpha \sim s$ (\circ) 曲线

Figure 6 I_a/I_b (\square) of NR in $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ aqueous micellar solutions and the ionization degree (\circ) of $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ micelle as a function of the spacer lengths. The $I_a/I_b \sim s$ plot of DMABN is shown for comparison (dashed line)

尽管 I_a/I_b 随着 s 增加而增大, 但是 I_a 和 I_b 本身却都不同程度地下降(图 7), 这从另一层面反映了 Gemini 的特殊分子结构带来的效应. 首先, 较长的连接链由于较大的 α 造成了胶束表面溶剂化水增加, 增大了与 NR 发生氢键作用的几率. 其次, 连接链的引进导致 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ 聚集能力明显提高, 临界胶束浓度 cmc (约 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ [29]) 比相应的单体 $C_{12}TABr$ 降低了一个数量级, 很低的 cmc 致使初始生成的胶束仅有很小的聚集数 N , 随着 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ 浓度继续增大, N 逐渐增加^[30,31], 这意味着初始胶束在结构上是残缺的. 相比较而言, 很短连接链的 $C_{12}-2-C_{12}\cdot 2Br$ 分子具有类似柱形的几何形状, 有利于形成分子排列相对紧密的聚集体, 但随着连接链增长, 聚集体结构逐渐变得疏松, 这已由 Danino 等^[30]给出的胶束聚集数 N 随 s 的变化所证实. 疏松的结构必然夹杂更多的水, 带来了更多的氢键作用. 这两种有利于氢键形成的因素均降低了荧光强度(包括 I_a 和 I_b)^[10,27,28], 应是 s 增大而 I_a 和 I_b 下降的原因.

对比 DMABN 在 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ 胶束水溶液中的荧光

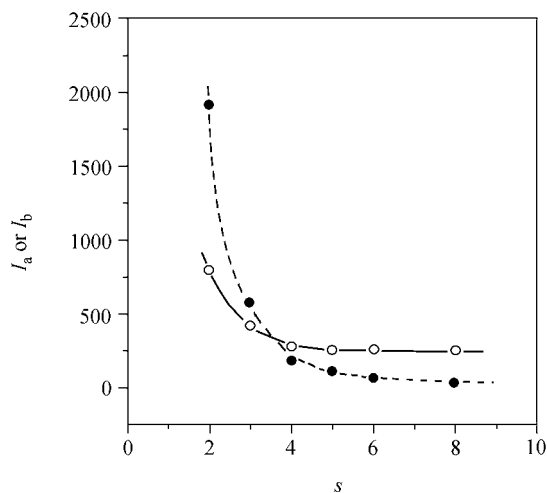


图 7 NR 在 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ 胶束水溶液中的 $I_a \sim s$ (\circ) 和 $I_b \sim s$ (\bullet) 曲线

Figure 7 Plots of I_a (\circ) or I_b (\bullet) of NR in $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ aqueous micellar solutions as a function of s

光谱(图 8), 在不同 s 时形状基本不变, 其结果 I_a/I_b 值随着 s 仅很小变化(图 6 虚线), 这很好地说明分子结构独特的 NR 对环境极性的敏感度大于 DMABN, 能够给出更多由于表面活性剂分子结构微小差异带来的聚集体结构变化的信息, 可望开发成为敏感的聚集体结构检测探针, 我们已经利用 NR 很好地测定了 AOT 由胶束转变为囊泡以及 KCl 诱导下十六烷基三甲基溴化铵($C_{16}TABr$) 由球状胶束向棒状胶束转变的临界点, 相关研究将另行报道.

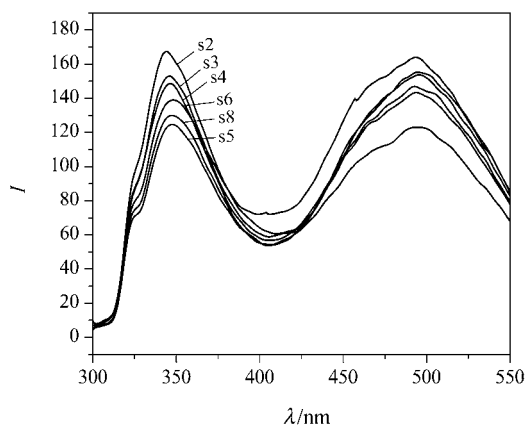


图 8 DMABN 在 $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ ($C=2 \text{ cmc}$) 胶束水溶液中的荧光光谱

Figure 8 Fluorescence spectra of DMABN in $C_{12-s}-C_{12}\cdot 2Br$ ($C=2 \text{ cmc}$) aqueous micellar solutions at $25 \text{ }^\circ\text{C}$ for comparison

3 结论

NR 分子具有大的芳香环和基态时可与水分子形成氢键的吸电子基, 它对增溶在表面活性剂胶束栅栏层的环境尤其敏感, 例如对反离子解离度较大的 SDS 胶束,

头基增多的溶剂化水促进了与 NR 的氢键作用, 这虽然降低了荧光强度, 但有效促进了 TICT 激发态形成, 其布居甚至可达到 98% 以上, 以至表观上仅出现在 634 nm 的单重荧光峰. NR 对环境的敏感特性很好地反映了 Gemini 表面活性剂初始形成胶束的残缺结构信息, 是检测这类具有强烈相互作用两亲分子聚集行为的良好探针.

References

- Zana, R. *Surfactant Solutions, New Methods of Investigation*, Petrochemical Industry Press, Beijing, **1992**, p. 221 (in Chinese).
(Zana R., 表面活性剂溶液研究新方法(中译本), 石油工业出版社, 北京, **1992**, p. 221.)
- Ananthapadmanabhan, K. P.; Goddard, E. D.; Turro, N. J.; Kuo, P. L. *Langmuir* **1985**, *1*, 352.
- Rettig, W. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1986**, *25*, 971.
- Lin, C.-Y.; Song, L.; Zhao, J.-X. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2007**, *23*, 1846 (in Chinese).
(林翠英, 宋利, 赵剑曦, 物理化学学报, **2007**, *23*, 1846.)
- Lin, C.-Y.; Zhao, J.-X.; Song, L. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2008**, *24*, 709 (in Chinese).
(林翠英, 赵剑曦, 宋利, 物理化学学报, **2008**, *24*, 709.)
- Zhang, W. C.; Li, G. Z.; Mu, J. H.; Shen, Q.; Zheng, L. Q.; Liang, H. J.; Wu, C. *Chin. Sci. Bull.* **2000**, *45*, 1854.
- Zhai, L. M.; Zhang, J. Y.; Shi, Q. X.; Chen, W. J.; Zhao, M. *J. Colloid Interface Sci.* **2005**, *284*, 698.
- Dutta, A. K.; Kamada, K.; Ohta, K. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **1996**, *93*, 57.
- Ghoneim, N. *Spectrochim. Acta A* **2000**, *56*, 1003.
- Cser, A.; Nagy, K.; Biczók, L. *Chem. Phys. Lett.* **2002**, *360*, 473.
- Herbich, J.; Karpiuk, J.; Grabowski, Z. R.; Tamai, N.; Yoshihara, K. *J. Lumin.* **1992**, *54*, 165.
- Kim, Y. H.; Cho, D. W.; Yoon, M.; Kim, D. *J. Phys. Chem.* **1996**, *100*, 15670.
- Herbich, J.; Grabowski, Z. R.; Wójtowicz, H.; Gólkiewicz, K. *J. Phys. Chem.* **1989**, *93*, 3439.
- Sarkar, N.; Das, K.; Nath, N. D.; Bhattacharyya, K. *Langmuir* **1994**, *10*, 326.
- Hazra, P.; Chakrabarty, D.; Chakraborty, A.; Sarkar, N. *Chem. Phys. Lett.* **2004**, *388*, 150.
- Maiti, N. C.; Krishna, M. M. G.; Britto, P. J.; Periasamy, N. *J. Phys. Chem. B* **1997**, *101*, 11051.
- Krishna, M. M. G. *J. Phys. Chem. A* **1999**, *103*, 3589.
- Nagy, K.; Göktürk, S.; Biczók, L. *J. Phys. Chem. A* **2003**, *107*, 8784.
- Goutinho, P. J. G.; Castanheira, E. M. S.; Rei, M. C.; Real Oliveira, M. E. C. D. *J. Phys. Chem. B* **2002**, *106*, 12841.
- Datta, A.; Mandal, D.; Pal S. K.; Bhattacharyya, K. *J. Phys. Chem. B* **1997**, *101*, 10221.
- Dutta, A. K.; Kamada, K.; Ohta, K. *Chem. Phys. Lett.* **1996**, *258*, 369.
- You, Y.; Zheng, O.; Qiu, Y.; Zheng, Y.-H.; Zhao, J.-X.; Han, G.-B. *Acta Phys. Chim. Sin.* **2001**, *17*, 74 (in Chinese).
(游毅, 郑欧, 邱羽, 郑叶鸿, 赵剑曦, 韩国彬, 物理化学学报, **2001**, *17*, 74.)
- Mukerjee, P.; Cardlnal, J. R. *J. Phys. Chem.* **1978**, *82*, 1620.
- Ganesh, K. N.; Milta, P.; Balasubramanin, D. *J. Phys. Chem.* **1982**, *86*, 4291.
- Hirata, H.; Hattori, N.; Ishida, M.; Okabayashi, H.; Frusaka, M.; Zana, R. *J. Phys. Chem.* **1995**, *99*, 17778.
- Baumanm, W.; Bischof, H. *J. Mol. Struct.* **1985**, *129*, 125.
- Valeur, B. *Molecular Fluorescence: Principles and Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH, New York, **2001**, p. 219.
- Kwok, W. M.; George, M. W.; Grills, D. C.; Ma, C. S.; Matousek, P.; Parker, A. W.; Phillips, D.; Toner, W. T.; Towrie, M. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **2003**, *42*, 1826.
- Zana, R.; Benrraou, M.; Rueff, R. *Langmuir* **1991**, *7*, 1072.
- Danino, D.; Talmon, Y.; Zana, R. *Langmuir* **1995**, *11*, 1448.
- Hattori, N.; Hirata, H.; Okabayashi, H.; Furusaka, M.; O'Connor, C. J.; Zana, R. *Colloid Polym. Sci.* **1999**, *277*, 95.

(A0803282 Sun, H.; Dong, H.)