

电解质和乙醇对 DNA 与 Gemini 表面活性剂相互作用的影响

赵小芳 何云飞 尚亚卓* 韩霞 刘洪来

(华东理工大学, 结构可控先进功能材料及其制备教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 应用荧光探针和 zeta 电位方法研究了电解质 NaBr、NaCl、KCl 和有机溶剂乙醇对 DNA 与 Gemini 表面活性剂相互作用的影响. DNA 诱导的表面活性剂类胶束在较低浓度即可生成, 这一浓度称为临界聚集浓度 (CAC). Gemini 表面活性剂比具有相同烷烃链长的单体表面活性剂更易聚集, 对应的 CAC 较低. 实验结果表明, 盐(NaBr)浓度对 DNA/表面活性剂体系的 CAC 影响不大, 阴、阳离子的种类则对该体系有不同程度的影响. 阴离子(Br⁻、Cl⁻)对体系的 CAC 有显著的影响, 但阳离子(Na⁺、K⁺)的差异对 CAC 影响不大. 极性溶剂乙醇对 DNA 与表面活性剂相互作用的影响比较复杂. 乙醇浓度较低时有利于表面活性剂的聚集, 使得 CAC 减小; 而浓度较高时, 则不利于表面活性剂聚集, 从而使 CAC 变大. 乙醇可显著改变 DNA/表面活性剂复合物的 zeta 电位.

关键词: DNA; Gemini 表面活性剂; 相互作用; 盐; 乙醇

中图分类号: O648

Effect of Electrolytes and Ethanol on the Interaction between DNA and the Gemini Surfactant

ZHAO Xiao-Fang HE Yun-Fei SHANG Ya-Zhuo* HAN Xia LIU Hong-Lai

(Key Laboratory for Advanced Materials, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, P. R. China)

Abstract: The effect of electrolytes NaBr, NaCl, KCl and ethanol on the interaction between DNA and the Gemini surfactant has been investigated with a fluorescence probe and the zeta potential. The micelle-like structure of the surfactant induced by DNA appears at a much lower surfactant concentration, which is defined as the critical aggregation concentration (CAC). The Gemini surfactant is much more likely to aggregate than the monomer surfactant that contains the same alkyl chain, and so the corresponding CAC value is much smaller. Experimental results show that the CAC is almost independent of NaBr concentration and that the effect of ion species on the interaction between DNA and surfactant is different. The type of anion (Br⁻, Cl⁻) has an obvious effect on CAC, but the type of cation (Na⁺, K⁺) does not. The polar solvent ethanol can affect the interaction between DNA and the surfactant. A lower ethanol concentration facilitates surfactant aggregation, which leads to a decrease in CAC. The CAC value increases as the ethanol concentration is increased. The zeta potential of the DNA/surfactant complexes can also be changed by ethanol.

Key Words: DNA; Gemini surfactant; Interaction; Salt; Ethanol

DNA 是生物体中一类重要的生物大分子, 有关 DNA 与其它分子相互作用的研究是生命科学、临床检验及化学等领域中的重要课题. 表面活性剂与 DNA 的相互作用的研究对于基因转染以及 DNA 的分离、纯化均有重要指导意义. 1967 年 Trewavas^[1]第

一次报道了季铵盐阳离子表面活性剂用于 DNA 沉淀从而提取纯化 DNA. 此后, 大量文献报道了 DNA 与阳离子表面活性剂在不同浓度形成复合物^[2-4]、沉淀^[5]及微观结构^[6]等方面的研究结果. 表面活性剂引起的 DNA 构型转变^[3,4]的研究也有报道. 研究表明,

Received: September 27, 2008; Revised: January 21, 2009; Published on Web: March 10, 2009.

*Corresponding author. Email: shangyazhuo@ecust.edu.cn; Tel: +8621-64252922.

国家自然科学基金(20706013, 20736002), 长江学者创新团队项目(IRT0721)和 111 引智计划(B08021)资助

DNA 分子在水溶液中呈伸展构象, 移动相对缓慢, 处于非压缩的线状构型. 当阳离子表面活性剂如十四烷基三甲基溴化铵(TTAB)加入到 DNA 溶液中, 浓度达到一定值时, 部分 DNA 分子受到压缩, 它们与线状 DNA 分子共存. 动态光散射(DLS)研究表明, DNA 在阳离子表面活性剂存在下会经历从线状到球状的不连续构象变化. 表面活性剂的烷烃链长对 DNA 的压缩效率有较大影响, 在相同的 DNA 浓度下, 长链表面活性剂的用量比短链用量少, 即前者较后者更有效. 阴离子表面活性剂与 DNA 相互作用的研究也有报道. 将 DNA 溶液加入含有带负电的囊泡样品中时, DNA 分子构象没有变化; 而向被阳离子表面活性剂压缩的 DNA 球状分子溶液中加入阴离子表面活性剂时, 发现随着阴离子表面活性剂浓度的增加, DNA 分子从开始没有明显变化, 到球状与线状分子共存, 最后所有的 DNA 分子解压缩变为线状分子, 这是由于阴离子表面活性剂与阳离子表面活性剂存在强烈的头基间静电吸引和尾链间疏水作用, 其浓度达到一定值时与阳离子表面活性剂缔合形成混合自组装体, 促使 DNA 分子从 DNA/阳离子表面活性剂复合物中释放到溶液中成为线状分子. 阴离子表面活性剂的烷烃链越长对 DNA 分子的解压缩效果越好. 一些作者则用 Monte Carlo 模拟^[7]、分子动力学模拟^[8]等方法对 DNA/表面活性剂相互作用机理进行了理论研究.

尽管表面活性剂与DNA的相互作用是当前研究的热点, 但对于Gemini等特殊表面活性剂与DNA相互作用的研究则涉及甚少^[8]. Gemini表面活性剂是一类新型表面活性剂, 是由联接基团将两个相同或相近的双亲组分在极性基团处或距极性基团很近的烷烃链上相连接而成的双头基双尾链的表面活性剂^[9,10]. 与传统的表面活性剂相比, Gemini表面活性剂不但具有低得多的临界胶束浓度(CMC)和较高的表面活性, 而且具有较好的润湿性、可溶性、发泡性和钙-皂分散性; 与相应的单头基单尾链表面活性剂相比, 它具有更低的 C_{20} (表面张力比纯水降低20 mN·m⁻¹时的浓度)值和临界胶束浓度处的表面张力 γ_{CMC} . 此外, 由于Gemini表面活性剂的特殊分子结构造成溶液中聚集体的独特性^[11,12], 从而导致在一定条件下溶液特殊的流变性. Gemini表面活性剂的特殊性质使其在诸多领域, 如医药、涂料、化妆品、洗涤剂, 选矿及三次采油等得到广泛的应用. 与传统表面活性剂相比, Gemini表面活性剂分子不但具有两个

烷烃链而且每个分子带两个电荷, 对 DNA 的压缩及去折叠会更有效, 这在 DNA 传递过程中有重要意义. 作者在前期的工作中^[13,14], 发现 Gemini 表面活性剂在较低浓度时即可与DNA作用形成类似胶束的结构; 二者的相互作用依赖于DNA与Gemini 表面活性剂的电荷比. 本文通过荧光探针法和zeta电位法研究NaBr、NaCl、KCl及乙醇对DNA与Gemini表面活性剂相互作用的影响.

1 实验部分

1.1 试剂

Gemini 表面活性剂 $C_{12}H_{25}N(CH_3)_2-(CH_2)_3-N(CH_3)_2C_{12}H_{25} \cdot 2Br$ (12-3-12), 本实验室合成^[15]. 十二烷基三甲基溴化胺(DTAB)由南京旋光科技有限公司生产. 鲑鱼精 DNA 由 Sigma 公司购得; DNA 的磷酸基团浓度由 260 nm 处的紫外吸收值确定, 相应的摩尔吸光系数为 $6600 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. 苾从 Aldrich 公司购得. 无水乙醇和氯化钠, AR, 国药集团化学试剂有限公司提供. 溴化钠和氯化钾, AR, 购于上海凌峰化学试剂有限公司. 实验用水均为二次蒸馏水.

1.2 实验方法

首先配制 DNA 和 12-3-12 的浓溶液, 然后以不同的混合比混合, 得到不同浓度不同混合比的 DNA/12-3-12 样品, 并保持 DNA 的浓度为 $5 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 不变, 样品平衡时间为 15–20 h. 研究乙醇对表面活性剂与 DNA 相互作用的影响时, 为保证 DNA 以双链结构存在, 需使体系保持一定的离子强度. 本文采用 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaBr 水溶液作为溶剂来配制所有溶液. 以苾为探针测量荧光光谱时, 需首先将苾溶于二次蒸馏水中并达到饱和, 过滤后再进行样品的制备. 苾的典型发射光谱($\lambda_{EX}=335 \text{ nm}$)有五重发射峰, 分别位于 373、379、384、390 和 397 nm 处, 第一和第三重发射峰强度比 I_1/I_3 可用于检测苾所处的微环境, 从而检测溶液中胶束或聚集体的形成^[16,17]. 荧光光谱由日立公司生产的型号为 Hitach F4500 的荧光分光光度计测量. 使用 Malvern Nano-ZS 通过 LDV(laser doppler velocimetry)和 PAL(phase analysis light scattering)的方法测量溶液的 zeta 电位. 样品池的温度控制在 25 °C. 实验数据由仪器自带的软件处理.

2 结果与讨论

2.1 盐对 DNA/12-3-12 相互作用的影响

表面活性剂与 DNA 的相互作用受很多因素的制约,其中盐是一重要的影响因素.无机盐不但对离子型表面活性剂水溶液的临界胶束浓度有重要的影响,而且表面活性剂胶束的形态、大小等因素均与溶液中盐浓度、离子价数和性质有关.溶液中表面活性剂胶束大小及其形态的变化必然会导致其与 DNA 相互作用的改变.

2.1.1 NaBr 浓度对 DNA/表面活性剂聚集状态的影响

图 1 给出了不同表面活性剂溶液微环境的变化情况,根据苾探针的发光原理,曲线中的转折点意味着溶液中开始形成胶束,对应的表面活性剂浓度也就是该实验条件下表面活性剂的临界胶束浓度 CMC.图 1A 为 Gemini 表面活性剂 12-3-12 与相应的传统单链表面活性剂 DTAB 的微极性变化曲线,由曲线可知 12-3-12 的 CMC 比 DTAB 小两个数量级.这是由于 Gemini 表面活性剂连接基团拉近了两个单体的距离,且在一定程度上增加了尾链间的疏水作用,使其更易形成胶束,因而 Gemini 表面活性剂的 CMC 比相应单体的 CMC 要小得多.

在离子型表面活性剂中加入与表面活性剂有相同离子的无机盐,不仅可降低同浓度溶液的表面张力、表面活性剂的 CMC,还可以使溶液的最低表面张力(γ_{CMC})降得更低,起到全面增效作用.无机盐对离子型表面活性剂表面活性的影响主要是由于反离子压缩了表面活性剂离子头基的离子氛厚度,减少了表面活性剂头基间的静电排斥作用,从而使表面活性剂更容易聚集形成胶束,导致溶液的表面张力和 CMC 降低.图 1B 给出了 NaBr 浓度不同时 12-3-

12 溶液微极性随表面活性剂浓度的变化情况.如图所示,随着 NaBr 浓度的增大,CMC 值逐渐减小.这主要是由于随着 NaBr 浓度的增大,静电吸引作用使得阴离子 Br^- 优先被吸附并且参与胶束的反离子层的形成,使反离子密度增大,扩散双电层受到压缩,结构更加紧密,从而更易于形成胶束,导致 CMC 减小.

当体系中引入 DNA 时,溶液的微极性变化情况明显改变,如图 2A 为 DNA 与不同表面活性剂混合溶液的微极性随表面活性剂浓度的变化情况.当表面活性剂浓度较低时, I_1/I_3 没有明显变化且与不含表面活性剂时相等,说明此时溶液中没有疏水微区形成.然而,当溶液中表面活性剂达到一定浓度时, I_1/I_3 急剧减小,意味着体系的微环境有了显著的变化,溶液中出现类似胶束的疏水微区,这一浓度被定义为临界聚集浓度(CAC).由图 1A 与图 2A 比较可知, CAC 比纯表面活性剂的 CMC 小很多.这是因为带相反电荷的表面活性剂与 DNA 之间强烈的静电吸引作用,表面活性剂分子通过离子头基结合在 DNA 链上,使表面活性剂优先分布于 DNA 周围而不是体相溶液,因此在体相中的表面活性剂浓度低于 CMC 时, DNA 周围的表面活性剂局部浓度就可达到 CMC 值,从而在 CAC 时通过尾链的疏水作用在 DNA 链周围形成类胶束,结构类似于串珠.由图 2A 还可看出, Gemini 表面活性剂 12-3-12 的 CAC 值比其单体 DTAB 的 CAC 要小三个数量级,这是因为混合溶液中类胶束的形成不仅与疏水作用有关,而且也取决于 DNA 与表面活性剂间静电作用的强弱.当 Gemini 的两个正电荷连接在一起时,与负电荷的吸引力增强,因此与体相比, DNA 周围的 Gemini 表面活性剂的量增加幅度

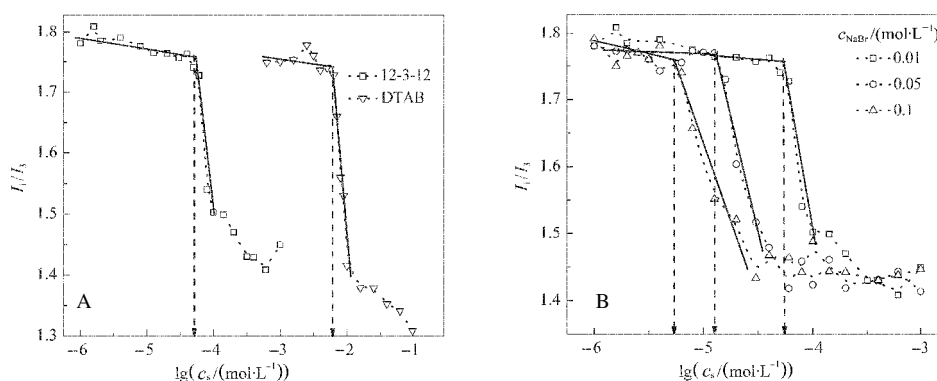


图 1 (A) Gemini 表面活性剂 12-3-12 与传统表面活性剂 DTAB 在 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaBr 溶液中的微极性的变化;
(B) NaBr 浓度对 Gemini 表面活性剂溶液微极性的影响

Fig.1 (A) Micropolarity of Gemini surfactant 12-3-12 and traditional surfactant DTAB in $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaBr solution; (B) effect of NaBr concentrations on micropolarity of Gemini surfactant solution

12-3-12: $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{N}(\text{CH}_3)_2-(\text{CH}_2)_3-\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{C}_{12}\text{H}_{25}\cdot 2\text{Br}$, DTAB: dodecyltrimethylammonium bromide

更大,从而更易形成类胶束.

很多文献报道,盐的加入会减弱带相反电荷表面活性剂与聚电解质之间的相互作用,即表面活性剂在聚电解质上形成聚集体的临界浓度(CAC)随盐浓度的增加而增大^[18-21].然而 Lindman 和 Thalberg^[22]研究认为,盐效应实际应该包括两个方面:(1)聚电解质与表面活性剂静电作用的减弱;(2)稳定表面活性剂聚集体.因此,在一定条件下,表面活性剂在聚合物上的临界聚集浓度也会像在体相中的临界胶束浓度一样,随着盐浓度的增加而降低,也就是说盐在二者相互作用过程中也可以起到增效作用.

图 2B 为盐(NaBr)浓度不同时 DNA/12-3-12 混合溶液的微极性变化曲线.由图可知,NaBr 的浓度对曲线的转折点没有明显影响,即在所研究浓度范围内 CAC 与 NaBr 浓度无关,只是在表面活性剂浓度大于 CAC 时, I_1/I_3 会随着 NaBr 含量的增加略有降低.如上所述,NaBr 对 DNA 与偶联表面活性剂体系的相互作用有两方面的影响.一方面,与对

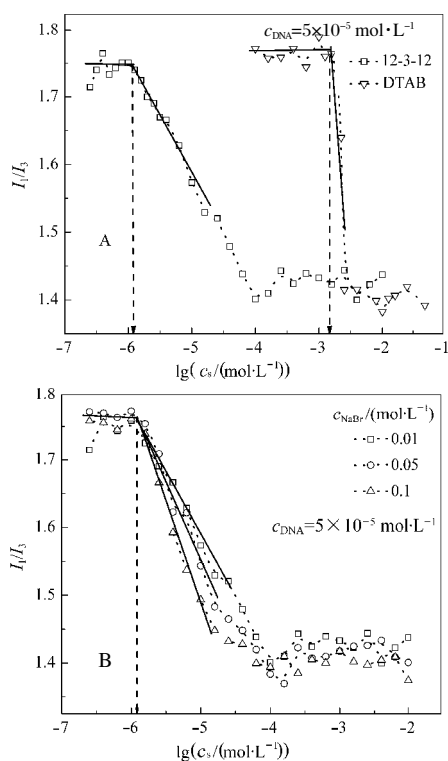


图 2 (A) DNA 与不同表面活性剂混合溶液在 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaBr 溶液中的微极性变化; (B) 不同 NaBr 浓度时 DNA/Gemini 表面活性剂溶液微极性随表面活性剂浓度的变化
Fig.2 (A) Micropolarity of the mixed system of DNA with different surfactants in $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaBr solution; (B) surfactant concentration dependence of the micropolarity of DNA/Gemini surfactant solution at different NaBr concentrations

CMC 的影响相似, NaBr 可以压缩带电粒子的扩散双电层,使形成的类胶束更稳定^[23],从而有利于聚集体的形成;另一方面,盐也会屏蔽表面活性剂离子头基与 DNA 磷酸基团间的电荷,减弱 DNA 与表面活性剂的静电引力.以上两个相反影响因素作用的结果使得 CAC 随着盐的浓度没有明显变化.

2.1.2 NaBr 浓度对 DNA/12-3-12 体系 zeta 电位的影响

图 3 给出了不同 NaBr 浓度下 DNA/12-3-12 体系的 zeta 电位随表面活性剂浓度的变化情况.由图可知,随着表面活性剂 12-3-12 浓度的增加, zeta 电位最初略有下降,经过最低点后迅速增大,最终又趋于恒定.体系 zeta 电位的变化是表面活性剂与 DNA 相互作用改变的具体体现.当表面活性剂含量较低时,少量的 12-3-12 分子与 DNA 结合后,原本处于卷曲状态的 DNA 变得较为伸展,更多的负电荷暴露在表面.进一步增加表面活性剂浓度, DNA 上的电荷逐渐被 12-3-12 的阳离子中和并形成复合物.当阳离子与阴离子的电荷比达到 2-4 时,溶液的 zeta 电位变为正值,此时溶液中形成了较大的聚集体.事实上,电位由负到正的转变发生在一个很窄的表面活性剂浓度范围内,经历了 zeta 电位为零的过程,同时伴随着沉淀的产生.当 zeta 电位达到一个确定的正值后,就不再随 12-3-12 浓度改变,这主要是因为过量的 12-3-12 不再与带大量正电荷的 DNA/12-3-12 聚集体结合,而是在体相形成胶束.由图可知, zeta 电位不仅与表面活性剂 12-3-12 的浓度有关,同时也与 NaBr 的浓度相关.在 zeta 电位为负时, NaBr 浓度较低的溶液相应的 zeta 电位绝对值比较小,这主要是因为当 NaBr 浓度较低时, 12-3-12

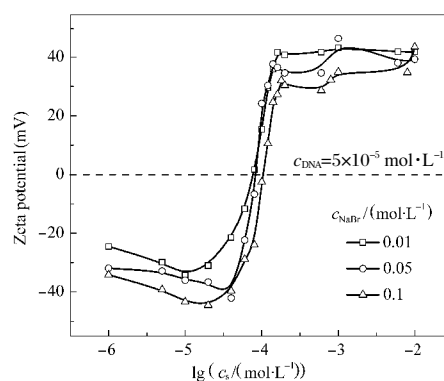


图 3 不同 NaBr 浓度时 DNA/12-3-12 体系 zeta 电位随表面活性剂浓度的变化

Fig.3 Surfactant concentration dependence of zeta potential of DNA/12-3-12 system at different NaBr concentrations

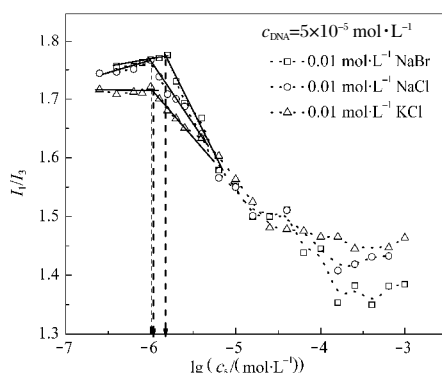


图4 DNA/12-3-12/盐混合溶液体系微极性随表面活性剂浓度的变化曲线

Fig.4 Surfactant concentration dependence of the micropolarity of DNA/12-3-12/salt solutions

分子与DNA的结合更容易,从而形成带负电荷较少的复合物.相反,zeta电位为正时,NaBr浓度越低,zeta电位绝对值越大.如前所述,当zeta电位达到最大的正值后,DNA/12-3-12复合物不再继续结合表面活性剂分子,但是在NaBr浓度较高时,复合物上的电荷会被屏蔽,因此,zeta电位值相对较小.

2.1.3 NaBr、NaCl和KCl对DNA/12-3-12聚集状态的影响

图4为含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaBr、NaCl和KCl的DNA/12-3-12溶液微极性随表面活性剂浓度的变化曲线.由曲线变化情况可知,阴阳离子的种类对DNA与Gemini表面活性剂的相互作用有不同程度的影响.对于相同的阴离子(Cl^-)盐,阳离子的不同(Na^+ 和 K^+)对DNA/12-3-12体系的CAC无明显的影响.而当阳离子相同时(Na^+),不同的阴离子(Br^- 和 Cl^-)却引起DNA/12-3-12体系的CAC发生显著变化.对于DNA与表面活性剂混合溶液来说,在类胶束形成的区域是表面活性剂局部过量的区域,其反离子是阴离子,因此阳离子本身的影响很小,从而对含KCl和NaCl的体系而言,表面活性剂的聚集无明显差异, $\text{CAC}_{\text{KCl}} \approx \text{CAC}_{\text{NaCl}}$.而当含有不同阴离子(Br^- 和 Cl^-)的盐分别加入该体系后,情况发生较大变化,与文献报道的CMC受反离子种类的影响不同,如图所示NaCl的加入更有利于类胶束的生成,即 $\text{CAC}_{\text{NaCl}} < \text{CAC}_{\text{NaBr}}$.尽管由于 Cl^- 的溶剂化能力要强于 Br^- ,其水化层较 Br^- 的水化层厚,会导致表面活性剂头基斥力增加,不利于胶束的形成,但同时也会导致DNA与表面活性剂之间相互作用的屏蔽能力减弱^[24],有利于表面活性剂在DNA上的结合,由于后者的作用占优势,因而使得CAC减小.由此可见,盐的阴离子对体系中DNA与表面活性剂相互作用的影响起着决定性作用.

2.2 乙醇对DNA/12-3-12相互作用的影响

醇的加入直接影响溶剂的介电性质,从而影响溶质的溶解及电离,最终导致溶液中带电粒子相互作用的改变.同时,醇还能介入表面活性剂的分子有序组合体,参与胶束的形成,改变胶束的结构,从而对DNA与表面活性剂复合物的形成过程产生影响.

2.2.1 乙醇浓度对DNA/12-3-12体系聚集状态的影响

图5为乙醇浓度(体积分数)不同时DNA/12-3-12溶液微极性随表面活性剂浓度的变化情况.结果显示,乙醇的存在使溶液的极性明显降低,因而导致初始时 I/I_3 减小.溶液中醇的含量对DNA与表面活性剂之间的相互作用影响比较复杂.与无醇体系相比,当醇的含量较低(5%)时,体系的CAC减小;而当醇的含量较高(20%)时,体系的CAC反而增大.一般认为碳原子数少的醇易通过氢键与水分子结合,能够破坏水结构,对于表面活性剂碳氢链周围的“冰山”结构起破坏作用,使得形成胶束的趋势减小.但在醇浓度较低时,醇分子本身的碳链周围就有“冰山”结构,所以醇分子参与表面活性剂胶束形成的过程是容易自发进行的自由能降低的过程,即有利于胶束的形成,使得CAC降低^[25].但随着醇浓度的增加,虽然溶剂的介电常数减小使得DNA与表面活性剂之间的静电作用增强,但更重要的是此条件下胶束栅栏中的水分子会被乙醇分子取代,导致表面活性剂头基间的斥力增加,因而使类胶束难以形成^[26],这是大量醇的存在导致体系CAC增大的主要原因.

2.2.2 乙醇浓度对DNA/12-3-12体系zeta电位的影响

图6为乙醇浓度不同时DNA/12-3-12溶液的zeta电位随表面活性剂浓度的变化情况.由图可知,

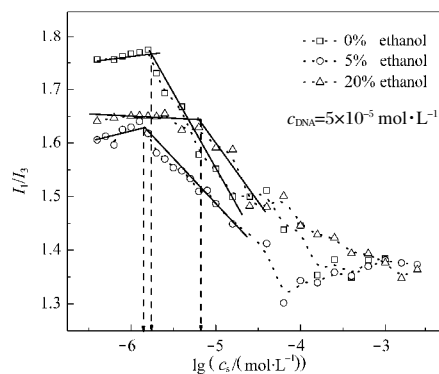


图5 不同乙醇体积分数时DNA/12-3-12溶液微极性随表面活性剂浓度的变化

Fig.5 Surfactant concentration dependence of the micropolarity of DNA/12-3-12 solutions at different ethanol volume fractions

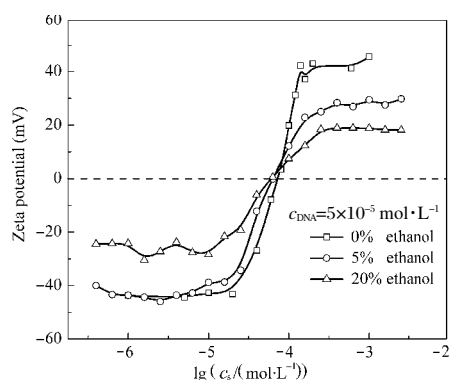


图6 不同乙醇体积分数时 DNA/12-3-12 体系 zeta 电位随表面活性剂浓度的变化

Fig.6 Surfactant concentration dependence of zeta potential of DNA/12-3-12 system at different ethanol volume fractions

当乙醇含量较低时, zeta 电位从负值变为电中性的过程与无醇体系区别不大; 加入大量的乙醇则使得 zeta 电位从负值变为电中性的过程中绝对值减小, 这可能是乙醇引起 DNA 本身构型发生变化的结果. 而在电中性以后, 随着乙醇含量的增加, zeta 电位值逐渐减小. 这主要是因为乙醇的加入使溶剂的介电常数减小, 带正电的复合物表面的表面活性剂极性头基间的静电斥力增加, 从而使外层较为疏松, 电荷密度降低, 因此 zeta 电位绝对值变小. 乙醇的加入使溶液的电中性点稍微有所提前, 但影响并不明显, 主要是因为介电常数的减小一方面有利于 DNA 与 12-3-12 间的静电吸引, 另一方面则对表面活性剂在 DNA 链周围的进一步聚集有阻碍作用, 两方面的作用前者略占优势, 故而出现上述结果.

3 结论

通过荧光探针和 zeta 电位方法研究了电解质 NaBr、NaCl、KCl 和有机溶剂乙醇对 DNA 与 Gemini 表面活性剂相互作用的影响. 结果显示, 盐(NaBr)一方面压缩了带电粒子的扩散双电层有助于类胶束的形成, 另一方面则屏蔽了 DNA 与表面活性剂间的静电作用, 阻碍聚集体的形成, 二者作用相当, 因而 NaBr 浓度对体系的 CAC 无明显影响. 盐的浓度对体系 zeta 电位的影响在不同阶段也不尽相同, 电中性点之前主要是对二者相互作用的影响, 而电中性点之后则主要是对整个聚集体的屏蔽效应. 离子的种类对体系中 DNA 与表面活性剂相互作用的影响程度不同. 阴离子(Br⁻、Cl⁻)的改变对体系的 CAC 有显著的影响, 但阳离子(Na⁺、K⁺)的差异对体系的 CAC 则无明显影响. 乙醇的存在会影响 DNA 与表

面活性剂之间的相互作用, 乙醇浓度较低时有利于表面活性剂的聚集, 使得 CAC 减小; 而浓度较高时, 则不利于表面活性剂聚集过程的进行, 从而导致 CAC 变大. 同时, 乙醇的加入也在很大程度上影响着 DNA/表面活性剂复合物的 zeta 电位.

References

- 1 Trewavas, A. *Anal. Biochem.*, **1967**, **21**: 324
- 2 Izumrudov, V. A.; Zhirykova, M. V.; Goulko, A. A. *Langmuir*, **2002**, **18**: 10348
- 3 Dias, R. S.; Innerlohinger, J.; Glatter, O.; Miguel, M. G.; Lindman, B. *J. Phys. Chem. B*, **2005**, **109**: 10458
- 4 Cardenas, M.; Schillen, K.; Nylander, T. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2004**, **6**: 1603
- 5 Dias, R.; Mel'nikov, S. M.; Lindman, B.; Miguel, M. *Langmuir*, **2000**, **16**: 9577
- 6 Smith, P.; Lynden-Bell, R. M.; Smith, W. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2000**, **2**: 1305
- 7 Dias, R. S.; Pais, A. A. C. C.; Miguel, M. G.; Lindman, B. *J. Chem. Phys.*, **2003**, **119**: 8150
- 8 Wettig, S. D.; Wang, C. Z.; Verrall, R. E.; Foldvari, M. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2007**, **9**: 871
- 9 Rosen, M. J. *Chemtech.*, **1993**, **23**: 30
- 10 Zana, R.; Lévy, H.; Kwetkat, K. *J. Colloid Interf. Sci.*, **1998**, **197**: 370
- 11 Li, X. F.; Wettig, S. D.; Wang, C. Z.; Foldvari, M.; Verrall, R. E. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2005**, **7**: 3172
- 12 Pinazo, A.; Perez, L.; Infante, M. R.; Pons, R. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2004**, **6**: 1475
- 13 Zhao, X. F.; Shang, Y. Z.; Liu, H. L.; Hu, Y. *J. Colloid Interf. Sci.*, **2007**, **314**: 478
- 14 Zhao, X. F.; Shang, Y. Z.; Hu, J.; Liu, H. L.; Hu, Y. *Biophys. Chem.*, **2008**, **138**: 144
- 15 Zana, R.; Benraou, M.; Rueff, R. *Langmuir*, **1991**, **7**: 1072
- 16 Hansson, P. *Langmuir*, **2001**, **17**: 4161
- 17 Hashidzume, A.; Mizusaki, M.; Yoda, K.; Morishima, Y. *Langmuir*, **1999**, **15**: 4276
- 18 Hayakawa, K.; Kwak, J. C. T. *J. Phys. Chem.*, **1982**, **86**: 3866
- 19 Hayakawa, K.; Kwak, J. C. T. *J. Phys. Chem.*, **1983**, **87**: 506
- 20 Malovikova, A.; Hayakawa, K.; Kwak, J. C. T. *J. Phys. Chem.*, **1984**, **88**: 1930
- 21 Wang, C.; Tam, K. C.; Jenkins, R. D.; Tan, C. B. *J. Phys. Chem. B*, **2003**, **107**: 4667
- 22 Lindman, B.; Thalberg, K. *Interactions of surfactants with polymers and proteins*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993: 1319
- 23 Wang, X.; Li, Y.; Wang, J.; Wang, Y.; Guo, Z.; Yan, H. *J. Phys. Chem. B*, **2005**, **109**: 10807
- 24 Prieto, G.; Sabín, J.; Ruso, J. M.; González-Pérez, A.; Sarmiento, F. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **2004**, **249**: 51
- 25 Zhao, G. X. *Physical chemistry of surfactants*. Beijing: Peking University Press, 1991: 249-262 [赵国玺. 表面活性剂物理化学. 北京: 北京大学出版社, 1991: 249-262]
- 26 Lianos, P.; Zana, R. *Chem. Phys. Lett.*, **1980**, **72**: 171