

doi: 10.3788/gzxb20164507.0730002

HP- β -CD 降低胶束化作用对十二烷基苯磺酸钠与甜菜碱复配体系检测光谱的干扰

石东坡, 尹先清, 郑延成, 陈武, 付家新

(长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 荆州 434023)

摘 要:为克服十二烷基苯磺酸钠与甜菜碱之间的胶束化作用及相互协同作用对二者定量分析产生的干扰,按十二烷基苯磺酸钠的摩尔计量比加入 1:1 的羟丙基- β -环糊精,分别采用同步荧光光谱法及“化学-光谱”分析法检测复配体系中二者含量.结果表明:十二烷基苯磺酸钠的临界胶束浓度值随甜菜碱浓度的增加而降低,当甜菜碱的浓度增加到 1.0、2.0 及 3.0 mmol/L 时,十二烷基苯磺酸钠的临界胶束浓度由 1.256 mmol/L 分别降低至 1.121、0.989 及 0.684 mmol/L;甜菜碱还能对低浓度十二烷基苯磺酸钠溶液(浓度低于临界胶束浓度)的同步荧光强度产生明显影响.另一方面,十二烷基苯磺酸钠对“化学-光谱”分析法检测甜菜碱也能产生明显干扰.加入羟丙基- β -环糊精后,能显著降低十二烷基苯磺酸钠和甜菜碱之间的相互干扰,复配体系中十二烷基苯磺酸钠和甜菜碱的回收率分别由 79.7%~107.5% 及 119.7%~159.6% 改变至 101.5%~102.5% 和 101.5%~103.0%.

关键词:SDBS/甜菜碱复配体系;羟丙基- β -环糊精;光谱分析;胶束;干扰

中图分类号:O625.151

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)07-0730002-7

HP- β -CD Reduced the Interference of the Micellization on Spectrum Quantitative Analysis of SDBS and Betaine Complex Systems in Water

SHI Dong-po, YIN Xian-qing, ZHENG Yan-cheng, CHEN Wu, FU Jia-xin

(Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract: In order to decrease the influence caused by the micellization and the interaction between Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate (SDBS) and betaine on determination of SDBS or betaine in aqueous solution. Synchronous fluorescence spectra and spectrochemical method were utilized to analyze the concentrations of SDBS and betaine by adding 1:1 (molar ratio) hydroxypropyl- β -cyclodextrin (HP- β -CD) according to the amount of SDBS in their complex aqueous solution. The results indicate that the Critical Micelle Concentration (CMC) values of SDBS could be greatly increased with increasing betaine concentration in SDBS and betaine complex aqueous solution. The CMC values of SDBS reduced from 1.256 mmol/L to 1.121, 0.989 and 0.684 mmol/L when the concentrations of betaine respectively increased from 0 to 1.0, 2.0 and 3.0 mmol/L in their complex aqueous solution. The synchronous fluorescence intensities of SDBS could also be easily affected by betaine even in low concentration SDBS solution (the concentration is lower than CMC). Meanwhile, effect of the interferences on the quantitative determination of betaine by spectrochemical method could be obviously increased in the presence of SDBS. Both the interferences of betaine on synchronous fluorescence spectrum of SDBS and the interferences of SDBS on the spectrochemical determination of betaine, could be greatly reduced by adding 1:1 HP- β -CD. The recovery rates of SDBS and betaine respectively changed from 104.2%~109.2% and 119.7%~159.6% to 101.5%~102.5% and 101.5%~103.0% in their binary complex

基金项目:国家自然科学基金(No. 41202111)、湖北省自然科学基金(No. 2015CFB189)和长江青年人才基金(No. 7010902101)资助

第一作者:石东坡(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为油田环境化学. Email:shidongpo2006@126.com

收稿日期:2016-01-18;录用日期:2016-03-03

<http://www.photon.ac.cn>

aqueous solution.

Key words: SDBS and betaine complex systems; HP- β -cyclodextrin; Spectrum quantitative analysis; Micelle; Interference

OCIS Codes: 300.6280; 300.6390; 300.6550

0 引言

在油田开采中,表面活性剂驱油技术被广泛使用^[1-2].相比于单一的表面活性剂体系,复配表面活性剂因具有更低的临界胶束浓度(Critical Micelle Concentration, CMC)及超低的界面张力等性质^[1-3],在驱油领域具有更实际的应用价值.然而,复配表面活性剂的广泛使用对其监测技术提出了更高要求,监测驱油过程中(主要是指采出水)的表面活性剂含量,可以得到驱油剂流向、油藏吸附滞留情况及渗流规律等重要指标^[4-5],是表面活性剂驱油领域的必备技术.

十二烷基苯磺酸钠(Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, SDBS)和甜菜碱二元复配体系是当前应用最广的驱油用表面活性剂复配体系之一^[6].常用的SDBS检测方法有光谱法^[7-9]、色谱法等^[10-12],甜菜碱的检测方法有光谱法、化学分析法和质谱法等^[6,13-14],这些方法适用于检测单一的SDBS和甜菜碱的含量.但已有研究表明,甜菜碱、阴离子型及非离子型表面活性剂组分都可以与SDBS产生相互协同作用甚至形成混合胶束结构^[16-18],从而对SDBS和甜菜碱的检测方法提出挑战.鉴于此,本文在SDBS和甜菜碱二元复配体系中加入适量的羟丙基- β -环糊精(Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin, HP- β -CD),HP- β -CD在水溶液中可以选择性地“包结”SDBS组分^[19-21],阻断了原复配体系中SDBS和甜菜碱之间的协同效应,还可以破坏水溶液中SDBS的胶束结构,将SDBS单体从胶束结构中释放出来^[17-18],显著提高了复配体系的检测准确性.与其他方法相比,本文方法抗干扰能力强,检测可靠性高,适用于准确检测复配体系中SDBS和甜菜碱的含量.

1 实验

1.1 试剂与仪器

实验所用试剂分别为三甲铵乙内酯(甜菜碱),AR,国药集团化学试剂有限公司;十二烷基苯磺酸钠(SDBS),有效活性含量>95%,江苏聚成精细化工有限公司;羟丙基- β -环糊精,>98%,萨恩化学技术(上海)有限公司,经蒸馏水重结晶两次;丙酮、乙醚,均为AR(广州化学试剂厂);所用仪器为LS-55型荧光分光光度计(美国PE公司),UV-2450型紫外可见分光光度计(日本岛津公司),Bruker-500核磁共振谱仪(瑞士Bruker公司).

1.2 溶液配制

1)雷氏盐溶液:称取7.5000g雷氏盐于450mL

蒸馏水中,调节pH值至1.0(采用浓盐酸),搅拌45min后抽滤,再定容至500mL(该溶液不稳定,应现配).

2)乙醚溶液:加少量蒸馏水配制含量为99%的无水乙醚(体积比).

3)丙酮溶液:加适量蒸馏水配制含量为70%的丙酮溶液(体积比).

1.3 试验方法

分别采用同步荧光光谱法及“化学-光谱”分析法测定复配体系中SDBS与甜菜碱的含量.

1.3.1 同步荧光光谱法检测复配体系中SDBS的含量及修正方法

1)甜菜碱对SDBS形成胶束能力的影响:采用同步荧光光谱法(扫描波长差 $\Delta\lambda$ 为25nm)测定不同浓度及配比的SDBS/甜菜碱二元复配体系,研究甜菜碱对SDBS形成胶束能力的影响.

2)甜菜碱对同步荧光光谱法检测SDBS的影响:甜菜碱不仅能对SDBS形成胶束的能力产生干扰,还能对SDBS的回收率产生影响.在SDBS和甜菜碱复配溶液中,保持SDBS的质量浓度不变,改变甜菜碱的质量浓度,采用同步荧光光谱法(扫描的波长差 $\Delta\lambda$ 为25nm)分析溶液中SDBS的荧光强度,研究甜菜碱对同步荧光光谱法检测SDBS的影响.

3)HP- β -CD与SDBS包结物包结比分析:按文献[18]报道的方法制备HP- β -CD与SDBS的包结物,对该包结物进行等摩尔连续变化法(the method of equivalent molarity, Job's法)分析,确定包结物的包结比.

4)干扰作用修正方法:扫描的波长差 $\Delta\lambda$ 取25nm,在200~400nm范围内检测复配体系中SDBS的同步荧光光谱(该光谱易受甜菜碱的干扰).同时加入摩尔比为1:1的HP- β -CD来修正复配体系中甜菜碱对SDBS检测光谱的干扰.

1.3.2 “化学-光谱”分析法测定复配体系中甜菜碱的含量及修正方法

1)“化学-光谱”分析法测定甜菜碱原理:在甜菜碱水溶液中加入适量雷氏盐溶液,调节pH至1.0,于4℃反应1h,离心分离后得到紫红色沉淀物,再用乙醚溶液充分清洗后加入丙酮溶液溶解,通过比色法测定该溶液在525nm处(最大吸收波长)的吸光度,计算出甜菜碱的含量.

2)SDBS对“化学-光谱”分析法测定甜菜碱的影响:保持甜菜碱的质量浓度不变,改变SDBS的质量浓度,采用“化学-光谱”分析法检测甜菜碱的含量,研究

SDBS对检测甜菜碱的影响。

3) 干扰作用修正方法:加入摩尔比为1:1的HP- β -CD来修正复配体系中SDBS对甜菜碱检测的干扰。

1.3.3 HP- β -CD与SDBS的键合作用分析

对HP- β -CD及其与SDBS的包结物进行核磁共振氢谱(proton NMR spectra, $^1\text{H-NMR}$, D_2O 作为溶剂)分析,研究HP- β -CD与SDBS的键合作用。

2 结果与讨论

2.1 甜菜碱对SDBS形成胶束能力的影响

不同浓度的甜菜碱对SDBS的CMC的影响结果如图1。

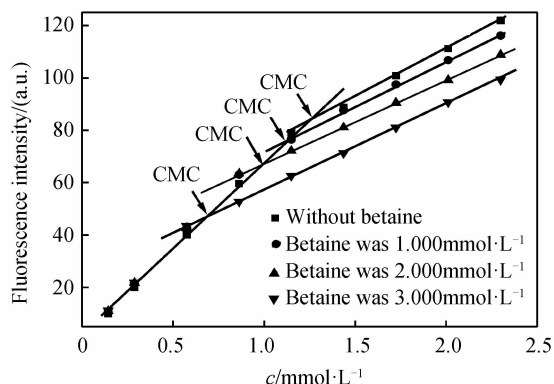


图1 甜菜碱的浓度对SDBS的CMC的影响

Fig. 1 Effect of different concentrations of betaine on the CMC values of SDBS in water

从图1中可以看出,在SDBS水溶液中添加甜菜碱时,SDBS的CMC值会发生明显变化.纯水中SDBS的CMC为1.256 mmol/L,当甜菜碱的浓度分别增加到1.0、2.0及3.0 mmol/L时,SDBS的CMC值分别为1.121、0.989及0.684 mmol/L,可见甜菜碱的浓度越大,SDBS的CMC值越低,这可能是由于甜菜碱也部分参与了胶束结构的形成,从而降低了SDBS形成胶束所需要的浓度,此结论与文献报道的“表面活性剂经复配后具有更低的临界胶束浓度”这一结论相吻合^[16-17].光谱法是通过分别建立SDBS在CMC前后的定量标准曲线来计算SDBS的含量^[6,18],但是由于甜菜碱可对SDBS的CMC值产生明显变化,会影响SDBS的定量标准曲线.因此,SDBS与甜菜碱之间的胶束化作用可对光谱法检测SDBS的结果产生显著干扰,需要进一步修正。

2.2 甜菜碱对同步荧光光谱法检测SDBS的影响

以100.00 mg/L SDBS的水溶液为样本,分别添加不同质量浓度的甜菜碱,甜菜碱对SDBS的同步荧光光谱强度的影响结果如图2。

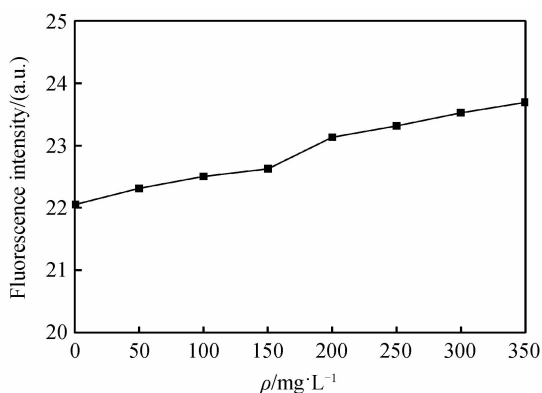


图2 甜菜碱的浓度对SDBS同步荧光光谱强度的影响
Fig. 2 Effect of different concentrations of betaine on the fluorescence intensities of SDBS in water

从图1的分析结果可以看出,当甜菜碱的质量浓度在0~350 mg/L范围内(相当于0~3.0 mmol/L),100.00 mg/L SDBS(相当于0.287 mmol/L)在水溶液中并不会形成胶束,因此在该浓度范围内,SDBS与甜菜碱之间的胶束化作用不会对光谱法检测SDBS的结果产生干扰。

但是,从图2中的曲线变化趋势可以看出,甜菜碱可对100.00 mg/L SDBS的同步荧光光谱强度产生明显影响,甜菜碱的质量浓度越大,SDBS的同步荧光光谱强度也越大.当甜菜碱的质量浓度从0增加至350 mg/L时,SDBS的同步荧光光谱强度由22.05增加至23.69,增加幅度达7.44%,可见甜菜碱对浓度较低的SDBS水溶液(浓度低于CMC)的同步荧光光谱强度也会产生明显影响.这一结果表明,即使在低浓度溶液中(浓度低于CMC),甜菜碱与SDBS之间的相互协同作用也会对光谱法检测SDBS的结果产生显著干扰^[6,16-18]。

2.3 HP- β -CD与SDBS包结物包结比分析

采用Job's法验证HP- β -CD与SDBS是否形成了包结物及包结物的包结比(摩尔计量比).保持水溶液中HP- β -CD与SDBS的总摩尔浓度为 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,连续改变HP- β -CD与SDBS的组成比,混合溶液在261 nm处的Job's曲线(同步荧光强度变化曲线)如图3。

图3中曲线b为HP- β -CD与SDBS混合水溶液的Job's曲线,扣除SDBS自身的背景信号后,HP- β -CD与SDBS混合水溶液的Job's曲线如图3中曲线a,由于曲线a所对应的荧光强度值均大于0,且随SDBS组成比(摩尔分数)的变化呈现先增加再减小的变化规律,表明在水溶液中HP- β -CD与SDBS可以形成包结物.曲线a的极大值所对应的SDBS组分的摩尔分数为0.5,表明HP- β -CD与SDBS按摩尔计量比1:1进行包结^[16]。

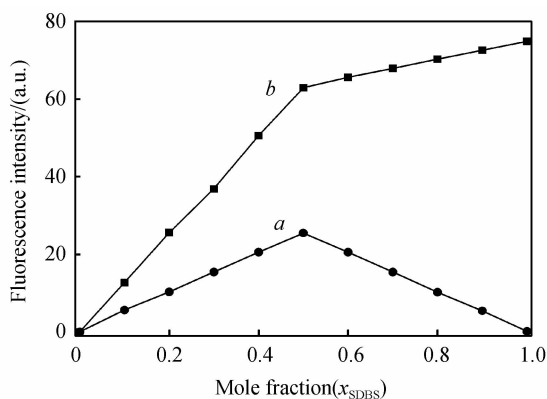
图3 HP- β -CD与SDBS在水溶液中的Job's曲线

Fig. 3 Job's plot for inclusion of HP- β -CD and SDBS in aqueous solution

2.4 同步荧光光谱法检测SDBS/甜菜碱二元复配体系中SDBS含量的修正方法

在SDBS/甜菜碱二元复配体系中,加入摩尔比为1:1的HP- β -CD(以SDBS的物质的量计)后,100.00 mg/L SDBS的同步荧光光谱如图4(扫描波长差 $\Delta\lambda$ 为25 nm). HP- β -CD不会对SDBS的最大荧光发射波长产生影响^[22].

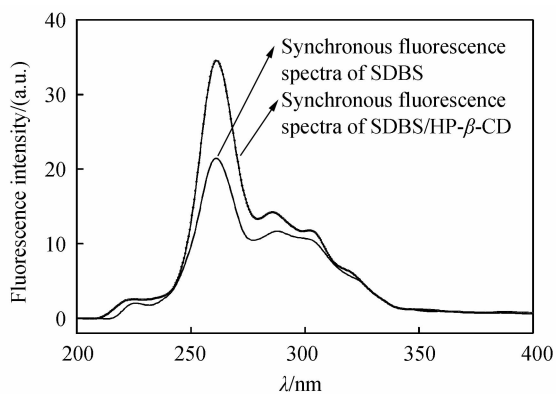
图4 SDBS及加入HP- β -CD后SDBS的同步荧光光谱

Fig. 4 Synchronous fluorescence spectra of SDBS and inclusion of SDBS/HP- β -CD

由图4可以看出,加入摩尔比为1:1的HP- β -CD后,100.00 mg/L SDBS的同步荧光光谱的曲线结构和最大发射波长均没有明显变化,但是SDBS的荧光光谱强度显著增强,最大发射波长261 nm处的荧光光谱强度从21.44增加至34.56. HP- β -CD具有增强SDBS荧光光谱强度的原因在于HP- β -CD与SDBS相互作用,即SDBS分子进入了HP- β -CD分子内腔并形成了1:1的包结物,HP- β -CD分子内腔的不对称诱导作用导致SDBS具有更高的量子化产率^[18-21]. 一般而言,增强的荧光光谱强度必然会提高检测的灵敏度,因此加入HP- β -CD后,SDBS的检测准确度可望进一步提高.

更重要的是,HP- β -CD在水溶液中可以选择性地“包结”SDBS组分^[16-18],这不仅阻断了SDBS和甜菜碱之间的相互作用,还可以将参与形成胶束的SDBS分

子“包结”到HP- β -CD分子的内部空腔中,从而消除了胶束化作用对检测SDBS产生的干扰(即HP- β -CD兼具抗干扰破坏胶束能力的本质). 加入摩尔比为1:1的HP- β -CD后复配体系中SDBS的检测结果见表1.

表1 SDBS/甜菜碱复配体系中SDBS组分检测结果(mg/L)

Table 1 Quantitative determination of SDBS in SDBS and betaine complex systems (unit: mg/L)

SDBS	Betaine	Molar ratio (HP- β -CD/SDBS)	Measured value of SDBS	Recovery rate/%
50.000	50.000	0:1	52.116	104.2
50.000	350.000	0:1	53.753	107.5
500.000	50.000	0:1	475.502	95.1
500.000	350.000	0:1	398.530	79.7
50.000	50.000	1:1	50.752	101.5
50.000	350.000	1:1	51.155	102.3
500.000	50.000	1:1	507.762	101.6
500.000	350.000	1:1	512.257	102.5

从表1可以看出,不添加HP- β -CD时,50.00 mg/L SDBS的回收率为104.2%~107.5%,表明在浓度低于SDBS的CMC时,甜菜碱与SDBS之间的相互作用也能对SDBS的检测产生干扰;加入摩尔比为1:1的HP- β -CD后,50.00 mg/L SDBS的回收率降低至101.5%~102.3%,表明HP- β -CD可以明显降低甜菜碱与SDBS之间的相互作用(回收率更接近100%,也表明检测准确度明显提高). 另一方面,当SDBS的浓度高于其CMC后,不添加HP- β -CD时500.000 mg/L SDBS的回收率仅为79.7%~95.1%,可见胶束化作用能够显著增加检测的干扰;加入HP- β -CD后500.000 mg/L SDBS的回收率变化至101.6%~102.5%,表明HP- β -CD同时还具有降低胶束结构干扰的作用.

2.5 SDBS对“化学-光谱”分析法测定甜菜碱的影响

SDBS对“化学-光谱”分析法测定甜菜碱的影响结果见表2. 由表2可以看出,当溶液中无SDBS存在时,采用“化学-光谱”分析法可以准确检测甜菜碱的含量,

表2 SDBS对复配体系中甜菜碱检测结果的影响(mg/L)

Table 2 Effect of SDBS on determination of betaine in SDBS/betaine complex systems (unit: mg/L)

Betaine	SDBS	Measured value of betaine	Recovery rate/%
100.000	0	102.235	102.2
350.000	0	357.452	102.1
500.000	0	508.218	101.6
100.000	100.000	153.319	153.3
350.000	100.000	457.343	130.7
500.000	100.000	598.717	119.7
100.000	500.000	159.621	159.6
350.000	500.000	530.328	151.5
500.000	500.000	631.126	126.2

方法的回收率在 101.6% ~ 102.2% 之间,但是当 SDBS 的添加量增加至 500.000 mg/L 时,甜菜碱的回收率为 126.2% ~ 159.6%,可见组分 SDBS 可以对“化学-光谱”分析法检测甜菜碱产生明显干扰.进一步对与雷氏盐溶液反应后的滤液进行同步荧光光谱法检测,发现滤液中 SDBS 的含量明显低于初始含量,平均损失率达 10.17%,可见 SDBS 可能部分吸附于甜菜碱反应后所形成的紫红色沉淀物中,进而对“化学-光谱”法检测甜菜碱产生干扰.

2.6 “化学-光谱”分析法检测复配体系中甜菜碱含量的修正方法

按 SDBS 的计量加入摩尔比为 1 : 1 的 HP- β -CD 后复配体系中甜菜碱的检测结果见表 3.

表 3 SDBS/甜菜碱复配体系中甜菜碱组分检测结果(mg/L)

Table 3 Quantitative determination of betaine in SDBS and betaine complex systems (unit: mg/L)

Betaine	SDBS	Molar ratio (HP- β - CD/SDBS)	Measured value of betaine	Recovery rate/%
100.000	100.000	1:1	102.127	102.1
350.000	100.000	1:1	355.201	101.5
500.000	100.000	1:1	507.976	101.6
100.000	500.000	1:1	103.007	103.0
350.000	500.000	1:1	356.665	101.9
500.000	500.000	1:1	509.131	101.9

对比表 2 与表 3 中的数据,可以看出按 SDBS 的计量加入摩尔比为 1 : 1 的 HP- β -CD 后,SDBS 对检测甜菜碱产生的干扰作用明显降低,当 SDBS 的含量为 100.000 mg/L 及 500.000 mg/L 时,甜菜碱的回收率分别为 101.5% ~ 102.1% 和 101.9% ~ 103.0%,表明加入 HP- β -CD 后,“化学-光谱”法可以准确检测 SDBS/甜菜碱二元复配体系中甜菜碱的含量.进一步对与雷氏盐溶液反应后的滤液进行检测,发现滤液中 SDBS 的含量没有明显降低,这可能是由于 HP- β -CD 与 SDBS 在水溶液中形成了稳定的包结物,该包结物难以吸附于甜菜碱反应后所形成的紫红色沉淀物中,从而降低了 SDBS 对甜菜碱检测的干扰作用.

2.7 HP- β -CD 与 SDBS 的键合作用分析

采用 $^1\text{H-NMR}$ 进一步研究包结物中 HP- β -CD 与 SDBS 的键合模式,分别如图 5 和图 6.

HP- β -CD 分子空腔包含 1~6 H,其中 3 H 和 5 H 位于 HP- β -CD 分子空腔的内侧.由图 5 和图 6 可以看出,在形成包结物后 HP- β -CD 分子 1~6 H 的化学位移值的变化规律,如表 4.

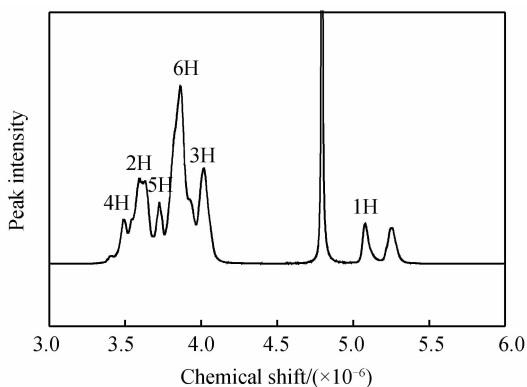


图 5 HP- β -CD 的 $^1\text{H-NMR}$ 图

Fig. 5 $^1\text{H-NMR}$ analysis of HP- β -CD

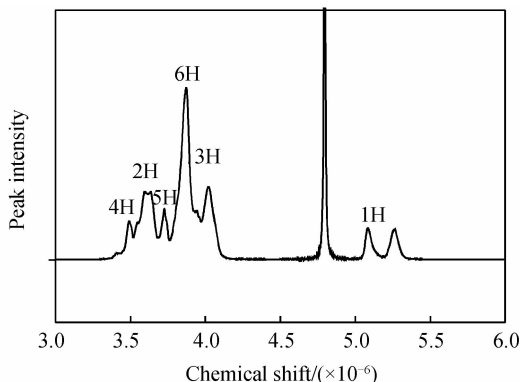


图 6 HP- β -CD/SDBS 包结物的 $^1\text{H-NMR}$ 图

Fig. 6 $^1\text{H-NMR}$ analysis of HP- β -CD/SDBS

表 4 HP- β -CD 及其包结物中 1~6 H 的化学位移值
Table 4 $^1\text{H-NMR}$ chemical shift of HP- β -CD and the inclusion of HP- β -CD and SDBS

Sample	1 H	2 H	3 H	4 H	5 H	6 H
HP- β -CD	5.077	3.590	3.947	3.490	3.728	3.871
Inclusion	5.077	3.590	3.922	3.491	3.722	3.871

由表 4 可以看出,在形成包结物后 HP- β -CD 分子 3 H 和 5 H 的化学位移值发生了一定程度的变化,而 3 H 和 5 H 均位于 HP- β -CD 分子空腔的内侧,表明 SDBS 分子已经进入了 HP- β -CD 分子的内部空腔,即形成了包结物.

综合以上分析,可以推测 SDBS 与 HP- β -CD 形成 1 : 1 型包结物及破坏 SDBS 胶束结构的过程,如图 7.

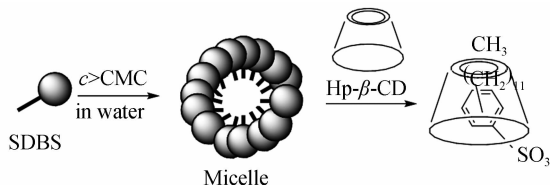


图 7 水溶液中 HP- β -CD 与 SDBS 包结物的可能形成过程
Fig. 7 Possible formation process of inclusion complex of SDBS with HP- β -CD in water

3 结论

在 SDBS 与甜菜碱二元复配体系中,甜菜碱对 SDBS 的 CMC 及同步荧光光谱产生明显影响,进而对同步荧光光谱法检测复配体系中的 SDBS 产生显著干扰,加入摩尔比为 1:1 的 HP- β -CD 后,可以显著降低甜菜碱对 SDBS 检测光谱的干扰,方法的回收率为 101.5% ~ 102.5%。SDBS 也可对“化学-光谱”分析法检测甜菜碱产生明显干扰,加入摩尔比为 1:1 的 HP- β -CD 能明显降低 SDBS 对甜菜碱的干扰作用,方法的回收率为 101.5% ~ 103.0%。在水溶液中,HP- β -CD 可以选择性地包结 SDBS 形成 1:1 型包结物,从而破坏溶液中原有的胶束结构。包结物的形成不仅能降低甜菜碱对 SDBS 检测光谱的干扰,同时还能明显降低 SDBS 对甜菜碱的干扰作用。

参考文献

[1] ZHAO Hai-na, CHENG Xin-hao, ZHAO Ou-di, *et al.* Mixed cationic and anionic surfactant systems achieve ultra-low interfacial tension in the karamay oil field[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2014, **30**(4): 693-698.
赵海娜,程新皓,赵欧狄,等. 阴阳离子表面活性剂混合体系在克拉玛依油田中获得超低界面张力[J]. 物理化学学报, 2014, **30**(4): 693-698.

[2] HUANG Hai-long, LI Hong-yu, ZHANG Lei, *et al.* Surface and interfacial properties of polyoxyethylene ether-type surfactants[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2014, **35**(6): 1330-1335.
黄海龙,李红玉,张摇雷,等. 聚氧乙烯醚型表面活性剂的合成及表面性质[J]. 高等学校化学学报, 2014, **35**(6): 1330-1335.

[3] JIANG Feng, PU Wan-fen, DU Dai-jun, *et al.* Synthesis and characterization of hydrophobic associating acrylamide-based copolymer with double-tailed hydrophobic monomer [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2015, **66**(3): 1215-1220.
姜峰,蒲万芬,杜代军,等. 双尾型丙烯酸酯类疏水缔合共聚物的合成与表征[J]. 化工学报, 2015, **66**(3): 1215-1220.

[4] CAO Xu-long, HU Yue, SONG Xin-wang, *et al.* Interaction of anionic polyacrylamide with cationic surfactants [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2015, **36**(2): 395-398.
曹绪龙,胡岳,宋新旺,等. 阴离子型聚丙烯酰胺与阳离子表面活性剂的相互作用[J]. 高等学校化学学报, 2015, **36**(2): 395-398.

[5] ZHANG Gui-cai, ZHANG Xuan, MA Li-hua, *et al.* Study on relationship between form properties and surface properties of alkyl quaternary ammonium salts system [J]. *Journal of China University of Petroleum-Edition of Natural Science*, 2015, **39**(1): 157-162.
张贵才,张旋,马立华,等. 烷基季铵盐体系泡沫性能与表面性质研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015, **39**(1): 157-162.

[6] SHI Dong-po, YIN Xian-qing, ZHENG Yan-cheng, *et al.* Study on quantitative analysis of sdbcs and betaine complex system in polluted water by excited spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0330002.
石东坡,尹先清,郑延成,等. 激发光谱法检测被污染环境水

中 SDBS 与甜菜碱复配体系[J]. 光学学报, 2015, **35**(3): 0330002.

[7] ARVAND M, BOZORGZADEH E, SHARIATI S, *et al.* Trace determination of linear alkylbenzene sulfonates using ionic liquid based ultrasound-assisted dispersive liquid-liquid microextraction and response surface methodology [J]. *Analytical Methods*, 2012, **4**(8): 2272-2277.

[8] ASOK A K, JISHA M S. Biodegradation of the anionic surfactant linear alkylbenzene sulfonate (LAS) by autochthonous pseudomonas sp. [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2012, **223**(8): 5039-5048.

[9] DEVI S, CHATTOPADHYAYA M C. Determination of sodium dodecyl sulfate in toothpastes by a pvc matrix membrane sensor [J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2013, **16**(3): 391-396.

[10] OKADA D Y, DELFORNO T P, ESTEVES A S, *et al.* Optimization of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) degradation in UASB reactors by varying bioavailability of LAS, hydraulic retention time and specific organic load rate [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **128**(1): 125-133.

[11] FISCHER K, FRIES E, KÖRNER W, *et al.* New developments in the trace analysis of organic water pollutants [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, **94**(1): 11-28.

[12] CANTARERO S, CAMINO-SÓNCHEZ F J, ZAFRA-GÓMEZ A, *et al.* Evaluation of the presence of major anionic surfactants in marine sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(3): 587-594.

[13] YANG Da-wei, FAN Xiao-lei, KIND Tobias, *et al.* Analysis of polar lipids in chlamydomonas reinhardtii using nano-electrospray direct infusion method and gas chromatography and mass spectrometric detection [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2013, **71**(4): 663-669.
杨大伟,范晓蕾,Kind T,等. 基于芯片的直接进样质谱法和气相色谱-质谱测定莱茵衣藻中的极性脂类[J]. 化学学报, 2013, **71**(4): 663-669.

[14] WANG Xiao-jing, WU Yan, WANG Li-ming. Determination of betaine in fruits of lycium barbarum l. by solid phase extraction and high-performance liquid chromatography [J]. *Food Science*, 2010, **31**(8): 199-201.
王晓菁,吴燕,王黎明. 固相萃取-高效液相色谱法测定枸杞中甜菜碱[J]. 食品科学, 2010, **31**(8): 199-201.

[15] ZHAO Peng, XU Ji-lin, LIU Xue-mei, *et al.* Determination of betaines in four marine algae by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 2011, **46**(24): 1886-1889.
赵鹏,徐继林,刘雪梅,等. 海带等 4 种大型海藻中甜菜碱液质分析研究[J]. 中国药学杂志, 2011, **46**(24): 1886-1889.

[16] WANG Jian-ji, YANG Zhen-yue, YUE Yong-kui, *et al.* Micellization behavior of cetyltrimethylammonium chloride in aqueous β -cyclodextrin solutions [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2003, **61**(8): 1261-1265.
王键吉,杨震宇,岳永魁,等. 十六烷基三甲基氯化铵在 β -环糊精水溶液中的胶束化行为[J]. 化学学报, 2003, **61**(8): 1261-1265.

[17] REN Z H, LUO Y, SHI D P, *et al.* Mechanism on the interaction between amimo sulfonate amphoteric surfactant and sodium dodecyl benzene sulfonate in aqueous solution [J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, **428**(13): 18-24.

[18] SHI Dong-po, YIN Xian-qing, ZHENG Yan-cheng, *et al.* Study on quantitative mechanism and the interference of the

- UV spectrum of HABS reduced by β -cyclodextrin [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(9): 2460-2465.
- 石东坡,尹先清,郑延成,等. β -CD降低强干扰体系中HABS的紫外光谱干扰及检测机理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(9): 2460-2465.
- [19] MÉNDEZ-ARDOY A, STEENTJES T, KUDERNAC T, *et al.* Self-assembled monolayers on gold of β -cyclodextrin adsorbates with different anchoring groups[J]. *Langmuir*, 2014, **30**(12): 3467-3476.
- [20] GAO Y S, WU L P, ZHANG K X, *et al.* Electroanalytical method for determination of shikonin based on the enhancement effect of cyclodextrin functionalized carbon nanotubes[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2015, **26**(5): 613-618.
- [21] MENDES C, BUTTCHEVITZ A, BARISON A, *et al.* Investigation of β -cyclodextrin-norfloxacin inclusion complexes. Part 2. Inclusion mode and stability studies[J]. *Expert Review of Anti-Infective Therapy*, 2015, **13**(1): 131-40.
- [22] SUN Huan-quan, LIU Min, ZHANG Ying-ming, *et al.* Binding behaviours of different charge groups modified cyclodextrins with ionic surfactants[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2011, **31**(5): 762-767.
- 孙焕泉,刘敏,张瀛溟,等. 不同电荷基团修饰环糊精与离子型表面活性剂的键合行为研究[J]. *有机化学*, 2011, **31**(5): 762-767.