

激发光谱法检测被污染环境水中SDBS与甜菜碱复配体系

石东坡 尹先清 郑延成 陈武 付家新 任朝华

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 十二烷基苯磺酸钠(SDBS)与甜菜碱之间的相互干扰作用致使复配体系中二者的含量难以测定。采用向SDBS/甜菜碱复配体系中添加 β -环糊精(β -CD)的方法来降低SDBS和甜菜碱之间的相互干扰,分别研究了 β -环糊精对SDBS的激发性能、SDBS与甜菜碱之间的相互作用对检测的干扰影响及 β -CD的抗干扰能力等因素。研究表明:添加 β -CD能显著降低SDBS与甜菜碱的相互作用对检测的干扰,复配体系中SDBS及甜菜碱的回收率分别由103.9%~105.9%和103.4%~174.9%降低至101.8%~102.3%和102.3%~102.8%,检测准确性明显提高。将该方法应用于环境水样检测中,仍可准确检测二元复配溶液中的SDBS与甜菜碱含量。傅里叶变换红外光谱(FT-IR)及核磁共振氢谱($^1\text{H-NMR}$)的表征结果表明,在水溶液中SDBS分子能从 β -CD分子的宽、窄口径两端进入 β -CD的内腔,进而形成 β -CD—SDBS包结体,包结体的形成是 β -CD具有抗干扰能力的原因。

关键词 光谱学;十二烷基苯磺酸钠/甜菜碱复配体系; β -环糊精;激发光谱;干扰;检测分析

中图分类号 O625.151 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0330002

Study on Quantitative Analysis of SDBS and Betaine Complex System in Polluted Water by Excited Spectroscopy

Shi Dongpo Yin Xianqing Zheng Yancheng Chen Wu Fu Jiaxin Ren Zhaohua

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

Abstract It is hard to determine the concentration of sodium lauryl benzenesulfate (SDBS) or betaine in their complex system due to the strong interference between SDBS and betaine. A new method is developed for reducing the interactions between SDBS and betaine by adding β -cyclodextrin (β -CD) in their aqueous complex solution. Several factors such as the effect of β -CD on quantitative analysis of SDBS, the anti-interference ability of β -CD as well as the effect of interactions between SDBS and betaine are investigated. The results indicate that the effect of the interactions between SDBS and betaine on determination of SDBS/betaine complex system can be greatly reduced by adding β -CD, thus, the determination precision of SDBS and betaine can be greatly improved. The recovery rates of SDBS and betaine are respectively reduced from 103.9%~105.9% and 103.4%~174.9% to 101.8%~102.3% and 102.3%~102.8% in their aqueous complex solution. Besides, the experimental results further show that the SDBS and betaine complex in environmental water can also be analyzed by the method. The results of nuclear magnetic resonance hydrogen spectrum ($^1\text{H-NMR}$) analysis and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analysis show that the stable β -CD—SDBS inclusion can be formed by entering of SDBS molecules from the narrow or broad mouth of β -CD. The interference between SDBS and betaine can be reduced by β -CD because of the formation of β -CD and SDBS inclusion complex.

Key words spectroscopy; sodium lauryl benzenesulfate and betaine complex system; β -cyclodextrin; excited spectra; interference; detection and analysis

OCIS codes 300.1030; 300.6170; 300.6540

收稿日期: 2014-09-10; 收到修改稿日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(41202111)

作者简介: 石东坡(1981—),男,博士,副教授,主要从事油田环境化学方面的研究。E-mail: shidongpo2006@126.com

1 引 言

由于全球石油开采规模持续增大,致使产生的采油废水逐年增加,2005年以来,全世界每年产生的采油废水总量均已超过 $1.43 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。油田进入常规开采后期时,需要在注入水中添加化学驱油剂以提高石油的采收率,此类化学驱油剂通常由表面活性剂、聚合物等复配组成,其中十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和三甲铵乙内酯(甜菜碱)二元复配体系是常用的驱油剂组分,广泛存在于采油废水中,并随着采油废水外排量的增加而逐渐成为环境水体中的主要残留污染成分,甚至在南极麦克斯韦尔海湾水体中都能检测到^[1]。由于SDBS难以降解,并能显著降低水体溶氧量,导致水体自净能力下降,严重影响水质,SDBS还可在水体和土壤之间循环迁移,扩大水体和土壤的污染范围,并可能对生物遗传和人类健康产生影响^[2-4],世界各国都将SDBS等阴离子表面活性剂列为监测项目,我国地表水环境质量标准(GB 3838-2002)及饮用水水质卫生标准(GB 5749-2006)都将其列为主要监测项目,对相关水域进行定期抽样检测。

目前SDBS的检测方法主要有高效液相色谱法^[5-10]和光谱法^[11-16]等,甜菜碱的检测方法主要包括光谱法、色谱法和质谱法等^[17-19],上述方法适用于检测无干扰溶液中的SDBS和甜菜碱。但是采油废水中的SDBS和甜菜碱可形成表面活性剂的聚集体(复合物),这种相互作用有可能对复配体系中二者的含量检测产生明显干扰^[20-21],导致检测误差显著增大。因此,本文在SDBS和甜菜碱复配体系水溶液中添加 β -环糊精(β -CD), β -CD在水溶液中可包结SDBS分子形成 β -CD—SDBS包结体^[22-24],隔断了甜菜碱与SDBS之间的相互作用。另外,包结体中的SDBS受 β -CD的分子诱导作用,被激发并产生增强的荧光光谱信号^[25-29],显著提高了SDBS的检测精度。与其他方法相比,本方法抗干扰能力强、操作简单,检测误差在2.8%以内,适用于准确检测被采油废水污染环境中的SDBS与甜菜碱的含量。

2 材料与方 法

2.1 仪器与试剂

十二烷基苯磺酸钠(江苏聚成精细化工有限公司),有效活性含量大于95%;氯化钾、氯化钠、氯化钙、丙酮、乙醚,均为分析纯试剂(广州化学试剂厂); β -环糊精,纯度大于99%(上海伯奥生物科技有限公司),重结晶两次,干燥,备用;三甲铵乙内酯(甜菜碱),利英纳克盐,均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司);UV-2450型紫外可见分光光度计(日本岛津公司);NICOLET 6700型红外光谱仪(美国Nicolet公司);LS-55型荧光分光光度计(美国PE公司);Bruker-500核磁共振谱仪(瑞士Bruker公司)。

2.2 溶液配制

1) 饱和雷氏盐溶液:准确称取1.5000 g利英纳克盐(雷氏盐),加入蒸馏水90 mL,用浓盐酸调pH值至1.0,于室温下不断搅拌45 min,抽滤,定容至100 mL(雷氏盐只有在固态时稳定,此溶液需现配)。

2) 乙醚溶液:量取1 mL蒸馏水加入99 mL无水乙醚。

3) 丙酮溶液:量取30 mL蒸馏水加入70 mL丙酮。

2.3 实验方法

2.3.1 荧光光谱法检测SDBS及比色法检测甜菜碱实验

1) 在250~400 nm范围内检测100.0 mg/L SDBS水溶液及加入物质的量比为1:1的 β -CD后该溶液的荧光光谱,荧光激发波长为225 nm,确定 β -CD对SDBS的光谱激发效应。通过检测一系列不同浓度的SDBS水溶液,确定该激发光谱法检测的准确性。

2) 甜菜碱在酸性条件下可与雷氏盐反应生成紫红色沉淀。采用浓盐酸调节甜菜碱水溶液的pH值为1.0,加入适量饱和雷氏盐溶液,于4℃恒温静置60 min,反应完全后离心分离15 min(转速3000 r/min),所得沉淀物用乙醚溶液反复清洗3次后,加入丙酮溶液充分溶解,再通过UV-2450型紫外可见分光光度计测定该溶液在最大吸收波长525 nm处的吸光度,计算甜菜碱的浓度。

2.3.2 β -CD溶液中SDBS/甜菜碱二元复配体系组分含量检测及相互干扰修正实验

1) 在SDBS和甜菜碱复配溶液中,保持SDBS(或甜菜碱)的质量浓度不变,改变甜菜碱(或SDBS)的质量浓度,分别检测溶液中SDBS和甜菜碱的含量。研究二元复配体系中SDBS和甜菜碱含量检测的准确性。

2)在 SDBS 和甜菜碱复配溶液中加入 β -CD,研究 β -CD的添加量对检测的影响并确定其最佳用量,对比添加最佳用量的 β -CD后该复配体系中 SDBS 和甜菜碱的检测结果,确定该方法的准确性。

2.3.3 β -CD 激发光谱法检测 SDBS/甜菜碱二元复配体系验证实验

为了验证 β -CD 激发光谱法检测 SDBS/甜菜碱二元复配体系的实践可行性,以长江水样(荆州段)为样本,称取一定量的 SDBS/甜菜碱复配试样溶解于该水样中(检测 SDBS 含量时,以长江水样样本为参比液),验证该方法检测复配体系中 SDBS 和甜菜碱含量的准确性。

2.3.4 β -CD 与 SDBS 的相互作用分析实验

称取 1.1350 g (1 mmol)的 β -CD,60 °C 下溶解于 50 mL 的蒸馏水中,再加入 0.2884 g (1 mmol) SDBS,完全溶解后于 60 °C 下恒温真空干燥得到白色固体,即 β -CD 与 SDBS 的包结物,对 β -CD 及该包结物进行傅里叶变换红外光谱(FT-IR)及核磁共振氢谱(1 H-NMR)(D_2O 作为溶剂)表征,研究包结物结构中二者的相互作用。

3 结果与讨论

3.1 荧光光谱法检测 SDBS 含量结果分析

100.0 mg/L SDBS 水溶液及加入物质的量比为 1:1 的 β -CD 后该溶液的荧光光谱如图 1 所示。

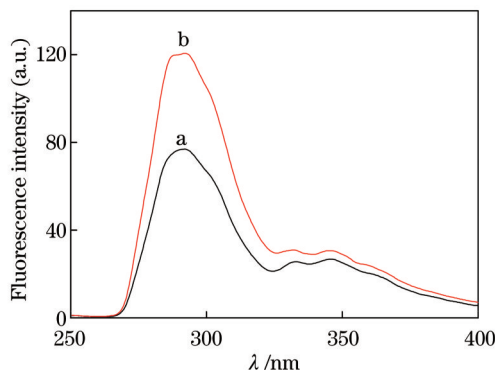


图 1 SDBS(谱线 a)及加入 β -CD 后 SDBS (谱线 b)的荧光光谱图

Fig.1 Fluorescence spectra of SDBS (spectrum a) and its inclusion with β -CD (spectrum b)

从图 1 可以看出,SDBS 水溶液的荧光最大发射波长为 291 nm,加入物质的量比为 1:1 的 β -CD 后 SDBS 溶液的荧光最大发射波长没有变化,但是 SDBS 的最大发射峰强度显著增强,表明在 β -CD 水溶液中 SDBS 能产生激发的光谱信号,这可能是 β -CD 分子与 SDBS 分子形成了 β -CD—SDBS 包结体,被包结的 SDBS 分子受到 β -CD 内腔的诱导作用,量子化产率显著增加所致^[23]。

SDBS 荧光强度的增强可明显提高其检测精度。对比加入物质的量比为 1:1 的 β -CD 后 SDBS 回收率的变化,明确 β -CD 对 SDBS 检测精度的影响,如表 1 所示。

表 1 β -CD 水溶液中 SDBS 的检测结果

Table 1 Quantitative determination of SDBS in β -cyclodextrin aqueous solution

SDBS /(mg/L)	Molar ratio (β -CD/SDBS)	Measured value of SDBS /(mg/L)	Recovery rate of SDBS /%
0.010	0:1	0.013	127.0
1.000	0:1	1.058	105.8
10.000	0:1	10.180	101.8
100.000	0:1	101.522	101.5
0.010	1:1	0.010	102.1
1.000	1:1	1.020	101.9
10.000	1:1	10.097	101.0
100.000	1:1	100.951	101.0

由表 1 可知,当 SDBS 溶液的质量浓度为 10.000 ~ 100.000 mg/L 时,荧光光谱法检测 SDBS 的回收率在 101.5%~101.8%之间,表明检测的准确度较高;但是持续降低 SDBS 溶液的质量浓度至 0.010 mg/L 时,荧光光

谱检测法的回收率达 127.0%，检测的准确性显著降低。加入物质的量比为 1:1 的 β -CD 后，在质量浓度为 0.010~100.000 mg/L 时，SDBS 的回收率在 101.0%~102.1% 之间，更接近 100%，表明检测的准确度进一步提高。当 SDBS 溶液质量浓度为 0.010 mg/L 时，该方法的回收率由 127.0% 降低至 102.1%，可见低浓度 SDBS 溶液的检测准确度增加更明显。

3.2 比色法检测甜菜碱含量结果分析

对于单一的甜菜碱溶液，采用比色法检测的结果如表 2 所示。由表 2 可知，无其他干扰条件时，当甜菜碱溶液的质量浓度为 100.000~750.000 mg/L 时，采用比色法检测甜菜碱的回收率在 97.7%~102.4% 之间，表明采用比色法可以准确检测单一的甜菜碱溶液。

表 2 甜菜碱的检测结果

Table 2 Quantitative determination of betaine in aqueous solution

Betaine /(mg/L)	Measured value of betaine /(mg/L)	Recovery rate of betaine /%
100.000	97.71	97.7
200.000	204.76	102.4
375.000	381.55	101.7
750.000	741.29	98.8

3.3 SDBS/甜菜碱二元复配体系中 SDBS 检测结果分析

保持 SDBS 的质量浓度分别为 50.00 mg/L 和 100.00 mg/L，改变 SDBS/甜菜碱二元复配体系中甜菜碱的质量浓度，50.00 mg/L 及 100.00 mg/L SDBS 溶液的检测结果分别如图 2 中曲线 a 和曲线 b 所示。

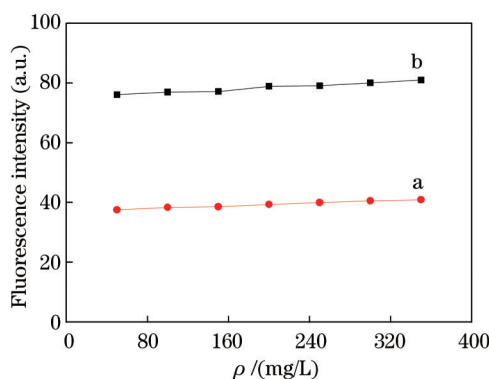


图 2 甜菜碱质量浓度对复配体系中 SDBS 检测的影响

Fig.2 Effect of betaine on quantitative determination of SDBS in SDBS/betaine complex system

从图 2 中曲线 a 和曲线 b 可以看出，在 SDBS/甜菜碱二元复配体系中，当甜菜碱的质量浓度从 50.00 mg/L 增加至 350.00 mg/L 时，SDBS 溶液的最大发射峰荧光强度随甜菜碱质量浓度的增加而增强，可见在 SDBS/甜菜碱二元复配体系的水溶液中，甜菜碱与 SDBS 之间的相互作用对组分 SDBS 的检测产生了一定的干扰。

3.4 SDBS/甜菜碱二元复配体系中甜菜碱检测结果分析

保持甜菜碱的质量浓度分别为 100.00 mg/L 和 375.00 mg/L，改变 SDBS/甜菜碱二元复配体系中 SDBS 的质量浓度，100.00 mg/L 及 375.00 mg/L 甜菜碱溶液的检测结果分别如图 3 中曲线 a 和曲线 b 所示。在 SDBS/甜菜碱二元复配体系中，当 SDBS 的质量浓度从 0 增加至 100.00 mg/L 时，甜菜碱溶液的吸光度值随 SDBS 质量浓度的增加有明显增强，可见在 SDBS/甜菜碱二元复配体系中，SDBS 对甜菜碱组分的检测也产生了干扰。进一步测定甜菜碱与雷氏盐反应后滤液中 SDBS 的含量，发现该滤液中 SDBS 的含量明显低于理论值（平均损失率为 10.39%），表明 SDBS 可部分吸附于甜菜碱与雷氏盐反应后生成的紫红色沉淀，进而对甜菜碱的检测产生了影响。

3.5 β -CD 溶液中 SDBS/甜菜碱二元复配体系组分含量检测结果分析

图 1 和表 1 的分析结果表明 β -CD 可与 SDBS 形成包结物，极有可能阻隔 SDBS 分子与甜菜碱的相互作用。因此为了消除 SDBS/甜菜碱二元复配体系中的干扰作用，向该二元复配体系中加入 β -CD。保持复配体系中 SDBS 与甜菜碱的含量均为 100.00 mg/L，首先研究 β -CD 的添加量对检测结果的影响，结果如表 3 所示。

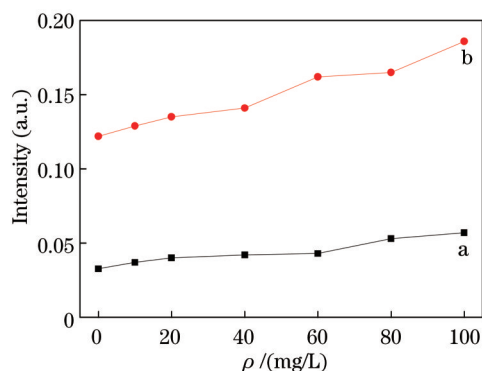


图 3 SDBS 质量浓度对复配体系中甜菜碱检测的影响

Fig.3 Effect of SDBS on quantitative determination of betaine in SDBS/ betaine complex system

表 3 β -CD 的添加量对复配体系中 SDBS 和甜菜碱检测的影响

Table 3 Effect of the ammount of β -CD on determination of SDBS/betaine complex system

β -CD /(mg/L)	Measured value of betaine / (mg/L)	Measured value of SDBS / (mg/L)	Recovery rate of betaine /%	Recovery rate of SDBS /%
0	174.847	104.253	174.9	104.3
100.000	137.252	104.171	137.3	104.2
156.550	117.397	103.663	117.4	103.7
313.100	102.773	101.755	102.7	101.8
500.000	102.838	101.792	102.8	101.8

表 3 的结果表明在 SDBS/甜菜碱二元复配体系中加入 β -CD 能明显降低检测的干扰作用。在质量浓度为 0~313.10 mg/L 范围内,随着 β -CD 质量浓度的增加,复配体系中 SDBS 和甜菜碱的回收率更接近 100%,继续增加 β -CD 的质量浓度至 500.00 mg/L 时,复配体系中 SDBS 和甜菜碱的回收率几乎不变,可见当 β -CD 的质量浓度达到 313.10 mg/L (与 100.00 mg/L SDBS 的物质的量浓度相同)时,继续增加 β -CD 的质量浓度不能进一步降低检测的干扰作用,因此, β -CD 的添加量应与二元复配体系中 SDBS 组分的物质的量相同(即物质的量比为 1:1)。

根据二元复配体系中 SDBS 组分的物质的量,对比加入物质的量比为 1:1 的 β -CD 后,SDBS/甜菜碱二元复配体系组分含量的回收率检测结果如表 4 所示。

表 4 二元复配体系中 SDBS 和甜菜碱质量浓度检测分析

Table 4 Quantitative determination of mass concentration of SDBS and betaine in complex system

Betaine / (mg/L)	SDBS / (mg/L)	Molar ratio (β -CD/SDBS)	Measured value of betaine /(mg/L)	Measured value of SDBS /(mg/L)	Recovery rate of betaine /%	Recovery rate of SDBS /%
100.000	10.000	0:1	103.375	10.392	103.4	103.9
100.000	100.000	0:1	174.847	104.253	174.9	104.3
375.000	10.000	0:1	396.516	10.526	105.7	105.3
375.000	100.000	0:1	571.721	105.866	152.5	105.9
100.000	10.000	1:1	102.305	10.212	102.3	102.1
100.000	100.000	1:1	102.773	101.755	102.7	101.8
375.000	10.000	1:1	384.356	10.233	102.5	102.2
375.000	100.000	1:1	385.621	102.267	102.8	102.3

由表 4 可知,在 SDBS/甜菜碱二元复配体系中,甜菜碱的质量浓度分别为 100.00 mg/L 和 375.00 mg/L, SDBS 的质量浓度分别为 10.00 mg/L 和 100.00 mg/L, SDBS 及甜菜碱的回收率分别为 103.9%~105.9% 和 103.4%~174.9%,而相同含量时单一的 SDBS 溶液和甜菜碱溶液的回收率分别为 101.5%~101.8% (表 1) 和 97.7%~101.7% (表 2),表明复配体系中 SDBS 及甜菜碱的检测准确度均有明显降低。加入物质的量比为 1:1 的 β -CD 后(以 SDBS 的物质的量计),SDBS 及甜菜碱的回收率分别为 101.8%~102.3% 和 102.3%~102.8%,表

明加入 β -CD能明显降低SDBS/甜菜碱二元复配体系中的干扰作用,显著提高了检测的准确度。

3.6 β -CD 激发光谱法检测 SDBS/甜菜碱二元复配体系验证结果

β -CD激发光谱法检测SDBS/甜菜碱二元复配体系验证结果如表5所示(β -CD与SDBS的物质的量比为1:1)。

表5 β -CD激发光谱法检测SDBS/甜菜碱二元复配体系验证结果分析

Table 5 Enhanced spectrum quantitative analysis of SDBS and betaine in complex system induced by β -CD

Betaine /(mg/L)	SDBS /(mg/L)	Measured value of betaine /(mg/L)	Measured value of SDBS /(mg/L)	Recovery rate of betaine /%	Recovery rate of SDBS /%
100.000	10.000	102.335	10.232	102.3	102.3
100.000	100.000	102.327	10.220	102.3	102.2
375.000	100.000	381.791	102.376	101.1	102.4

表5表明添加 β -CD后,在环境水样中(长江荆州段水样),复配体系中的SDBS和甜菜碱均可以被准确检测,二者的回收率分别为102.2%~102.4%和101.1%~102.3%,表明该方法适用于准确检测环境样品中SDBS/甜菜碱复配体系的含量。

3.7 β -CD 与 SDBS 的相互作用结果分析

β -CD分子由7个D-吡喃葡萄糖单元环接而成,内腔为不对称手性结构,如图4所示。

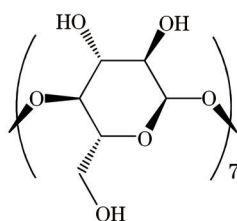


图4 β -CD分子结构图

Fig.4 Structure of β -CD molecule

在水溶液中 β -CD可与SDBS形成包结物, β -CD及其与SDBS包结物的FT-IR分析结果如图5中曲线a和曲线b所示, β -CD及其与SDBS包结物的 $^1\text{H-NMR}$ 分析结果分别如图6和图7所示。

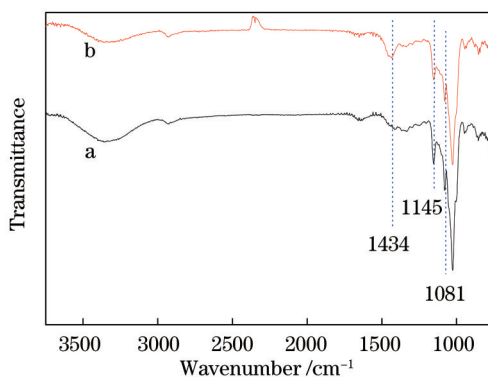


图5 β -CD(谱线a)及其与SDBS包结物(谱线b)的红外光谱分析

Fig.5 IR spectra of β -CD (spectrum a) and the inclusion complex of SDBS and β -CD (spectrum b)

对比图5中曲线a和曲线b,1081 cm^{-1} 处归属为连接D-吡喃葡萄糖单元的C—O—C骨架弯曲振动,峰强度发生了明显变化,表明SDBS分子进入了 β -CD分子的内部空腔并与该内腔发生了相互作用。包结物中1145 cm^{-1} 处— CH_2OH 弯曲振动峰强度发生变化表明 β -CD分子中— CH_2OH 和SDBS分子中磺酸根可能存在氢键等相互作用。包结物中1434 cm^{-1} 处—OH弯曲振动峰强度发生变化表明 β -CD分子宽口径段2、3位羟基基团(—OH)和SDBS分子中磺酸根也可能存在氢键等相互作用,这表明SDBS分子可能从 β -CD分子的两端进入 β -CD的内腔,进而形成 β -CD—SDBS包结体。

从图6和图7可以看出, β -CD与SDBS形成包结物后其分子结构中1H~6H的化学位移值发生了一定改变,如表6所示。

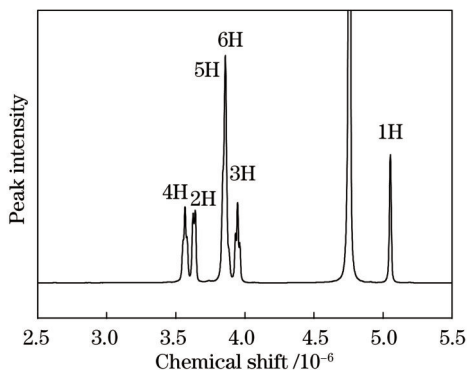


图6 β -CD的¹H-NMR表征分析

Fig.6 ¹H-NMR analysis of β -CD

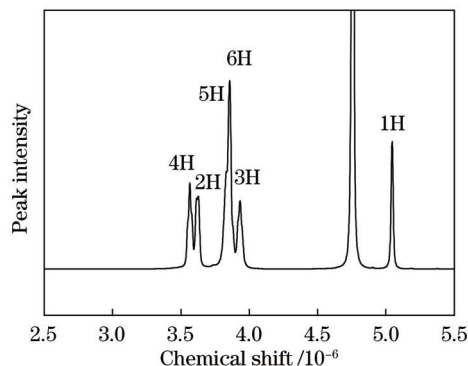


图7 β -CD与SDBS包结物的¹H-NMR表征分析

Fig.7 ¹H-NMR analysis of the inclusion complex of β -CD and SDBS

表6 β -CD及其与SDBS包结物中1H~6H的化学位移值

Table 6 ¹H-NMR chemical shift of β -CD and the inclusion complex of β -CD and SDBS

Sample	1 H	2 H	3 H	4 H	5 H	6 H
β -CD	5.045	3.630	3.950	3.563	3.845	3.859
Inclusion	5.045	3.628	3.928	3.562	3.837	3.858

对比表6可知, β -CD与SDBS形成包结物后,位于其分子结构外部的1H、2H、4H及6H与形成包结物之前的化学位移值变化很小,表明 β -CD与SDBS形成包结物后, β -CD的外部H与SDBS分子没有发生明显的相互作用。但是位于 β -CD分子结构内部的3H和5H在形成包结物后化学位移值相对发生了较大变化,可见 β -CD的内部H与SDBS分子产生了明显的相互作用,进一步表明SDBS分子进入了 β -CD的内部空腔。

4 结 论

1) 荧光光谱法和比色法能分别准确检测单一的SDBS和甜菜碱溶液。但是当含量显著降低至0.010 mg/L时,SDBS检测的准确度明显降低,加入等物质的量的 β -CD可明显提高SDBS检测的准确度,当质量浓度为0.010~100.000 mg/L时,SDBS的回收率达101.0%~102.1%。

2) 荧光光谱法和比色法不能准确检测复配体系中SDBS或甜菜碱的含量。复配体系中SDBS和甜菜碱之间存在相互干扰,导致SDBS和甜菜碱的检测准确性显著降低。

3) β -CD能明显降低SDBS/甜菜碱二元复配体系中的干扰作用。加入物质的量比为1:1的 β -CD后(以SDBS的物质的量计),荧光光谱法和比色法能准确检测复配体系中SDBS和甜菜碱的含量,SDBS及甜菜碱的回收率分别为101.8%~102.3%和102.3%~102.8%。该方法可用于检测被污染环境水样中的SDBS/甜菜碱二元复配体系。

4) SDBS分子可能从 β -CD分子的两端进入 β -CD的内腔并形成包结物。包结物的形成是 β -CD消除SDBS/甜菜碱二元复配体系中的干扰作用及产生激发光谱的根本原因。

参 考 文 献

- 1 Mo Ping, Huang Yuming. A high performance liquid chromatography-UV detection method for determination of sodium dodecylbenzene sulfonate in wastewater [J]. Journal of Southwest University, 2007, 29(1): 65-68.
莫 苹, 黄玉明. HPLC-UV 检测法测定废水中十二烷基苯磺酸钠[J]. 西南大学学报, 2007, 29(1): 65-68.
- 2 X Y Ma, X C Wang. Ecotoxicity comparison of organic contaminants and heavy metals using vibrio-qinghaiensis sp.-Q67 [J]. Water Sci Technol, 2013, 67(10): 2221-2227.
- 3 Yang Lili, Wang Yutian, Lu Xinqiong. Identification and measurement of petroleum pollution by three-dimensional matrix fluorescence with second-order calibration methods [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0615002.
杨丽丽, 王玉田, 鲁信琼. 三维荧光光谱结合二阶校正法用于石油类污染物的识别和检测[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0615002.

- 4 Yin Gaofang, Zhao Nanjing, Hu Li, *et al.*. Classified measurement of phytoplankton based on characteristic fluorescence of photosynthetic pigments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0930005.
殷高方, 赵南京, 胡 丽, 等. 基于色素特征荧光光谱的浮游植物分类测量方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0930005.
- 5 C Bengoechea, C A Samuel. Analysis of linear alkylbenzene sulfonate in waste water and sludge by high performance liquid chromatography: An exercise of validation [J]. *J Surfactants Deterg*, 2009, 12(1): 21-29.
- 6 J Šíma, M Pazderník, J Tříška, *et al.*. Degradation of surface-active compounds in a constructed wetland determined using high performance liquid chromatography and extraction spectrophotometry [J]. *J Environ Sci Heal A*, 2013, 48(5): 559-567.
- 7 K Fischer, E Fries, W Körner, *et al.*. New developments in the trace analysis of organic water pollutants [J]. *Microbiol Biot*, 2012, 94(1):11-28.
- 8 J E Heinze. Comment on “degradation of two persistent surfactants by UV-enhanced ozonation” [J]. *J Surfactants Deterg*, 2012, 15(6): 815-818.
- 9 X B He, O Guvench, A D Jr Mackerell, *et al.*. Atomistic simulation study of linear alkylbenzene sulfonates at the water/air interface [J]. *J Phys Chem B*, 2010, 114(30): 9787-9794.
- 10 T Cheng, Q Chen, F Li, *et al.*. Classic force field for predicting surface tension and interfacial properties of sodium dodecyl sulfate [J]. *J Phys Chem B*, 2010, 114(43): 13736-13744.
- 11 G Lashermes, Y Zhang, S Houot, *et al.*. Simulation of organic matter and pollutant evolution during composting: The cop-compost model [J]. *J Environ Qual*, 2013, 42(2): 361-372.
- 12 S Devi, M C Chattopadhyaya. Determination of sodium dodecyl sulfate in toothpastes by a PVC matrix membrane sensor [J]. *J Surfactants Deterg*, 2013, 16(3): 391-396.
- 13 Z G Chen, Y R Peng, F Xie, *et al.*. Determination of anionic surfactant in surface water by resonance light-scattering technology [J]. *Int J Environ An Ch*, 2010, 90(7): 573-585.
- 14 M Hampel, A Mauffret, K Pazdro, *et al.*. Anionic surfactant linear alkylbenzene sulfonates (LAS) in sediments from the Gulf of Gdańsk (southern Baltic Sea, Poland) and its environmental implications [J]. *Environ Monit Assess*, 2012, 184(10): 6013-6023.
- 15 A K Asok, M S Jisha. Biodegradation of the anionic surfactant linear alkylbenzene sulfonate (LAS) by autochthonous *Pseudomonas* sp. [J]. *Water Air Soil Poll*, 2012, 223(8): 5039-5048.
- 16 M Arvand, E Bozorgzadeh, S Shariati, *et al.*. Trace determination of linear alkylbenzene sulfonates using ionic liquid based ultrasound-assisted dispersive liquid-liquid microextraction and response surface methodology [J]. *Anal Methods*, 2012, 4(8): 2272-2277.
- 17 Yang Dawei, Fan Xiaolei, 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 Tobias, 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.
- 18 Wang Xiaojing, Wu Yan, Wang Liming. 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.
- 19 Zhao Peng, Xu Jilin, Liu Xuemei, *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.
- 20 Z H Ren, Y Luo, Y C Zheng, *et al.*. Interaction behavior between an amino sulfonate surfactant and octylphenol polyoxyethylene ether (10) in aqueous solution [J]. *J Solution Chem*, 2014, 43(5): 853-869.
- 21 Zhao Haina, Cheng Xinhao, Zhao Oudi, *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.
- 22 T L Neoh, C Yamamoto, S Ikefuji, *et al.*. Heat stability of allyl isothiocyanate and phenyl isothiocyanate complexed with randomly methylated β -cyclodextrin [J]. *Food Chem*, 2012, 131(4): 1123-1131.
- 23 Shi Dongpo, Yin Xianqing, Zheng Yancheng, *et al.*. Study on the enhanced spectrum quantitative analysis of SDBS induced by β -cyclodextrin [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2163-2167.
石东坡, 尹先清, 郑延成, 等. β -环糊精诱导 SDBS 激发光谱法定量及机理研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2163-

2167.

- 24 A Chmielewska, T Baczek. Comparative analysis of chiral drugs in view of chemometrics [J]. J AOAC Int, 2012, 95 (3): 624–635.
- 25 Wang Chunmiao, Hou Huaxin, Li Danrong, *et al.*. Observation of emodin- β -CD inclusion complex's transmembrane transport in nasopharyngeal carcinoma cells and its distribution by the laser scanning confocal microscope [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0504001.
王春苗, 侯华新, 黎丹戎, 等. 激光扫描共聚焦显微镜观测大黄素 β -环糊精包合物在鼻咽癌细胞的跨膜转运及分布[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0504001.
- 26 Yu Rong, Jiang Yuesong. Photoacoustic spectroscopy system with amplitude spectrum and phase spectrum measurement functions [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0230001.
余 荣, 江月松. 一种可同时实现振幅谱与相位谱测量的光声光谱系统[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0230001.
- 27 F Belal, M S El-Din, F Aly, *et al.*. Fluorometric determination of bopindolol and celiprolol in pharmaceutical preparations and biological fluids [J]. J Fluoresc, 2012, 22(4): 1141–1150.
- 28 A Méndez-Ardoy, T Steentjes, T Kudernac, *et al.*. Self-assembled monolayers on gold of β -cyclodextrin adsorbates with different anchoring groups [J]. Langmuir, 2014, 30(12): 3467–3476.
- 29 C Jullian, V Brossard, I Gonzalez, *et al.*. Cyclodextrins-kaempferol inclusion complexes: Spectroscopic and reactivity studies [J]. J Solution Chem, 2011, 40(4): 727–739.

栏目编辑: 吴秀娟