

# 茜素黄 R- $\gamma$ -环糊精包合物与鲱鱼精 DNA 的作用机制\*

欧亮龙, 王兴明

(西南科技大学材料科学与工程学院化学系, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 在生理 pH=7.4 环境下, 用摩尔比法测定  $\gamma$ -环糊精 ( $\gamma$ -CD) 与茜素黄 R (AYR) 的包合比 (摩尔比)  $n_{\gamma\text{-CD}}:n_{\text{AYR}}=1:1$ , 确定包合常数  $K_f^{\ominus},_{288.15\text{K}}=1.69 \times 10^5 \text{ L/mol}$ 。以吡啶橙 (AO) 作为分子探针, 用紫外光谱法、荧光光谱法、化学热力学法和黏度法等研究包合物  $\gamma$ -CD-AYR 与鲱鱼精 DNA (hsDNA) 的作用, 得到  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 hsDNA 作用的结合比  $n_{\text{DNA}}:n_{\gamma\text{-CD-AYR}}=1:2$ , 结合常数为  $K_{288.15\text{K}}=3.10 \times 10^4 \text{ L/mol}$ ,  $K_{310.15\text{K}}=4.02 \times 10^4 \text{ L/mol}$ 。热力学函数  $\Delta_r H_m^{\ominus}=8.78 \times 10^3 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r G_m^{\ominus}=-2.59 \times 10^4 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r S_m^{\ominus}=116.45 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ , 说明  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 DNA 作用为熵驱动。确定  $\gamma$ -CD-AYR 与 hsDNA 的作用方式为静电和部分嵌插的作用方式。

**关键词:** 茜素黄 R;  $\gamma$ -环糊精; 包合物; 鲱鱼精 DNA; 作用方式

中图分类号: O629.74 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2013) 01-0089-05

## Investigation of Interaction Between $\gamma$ -Cyclodextrin-Alizarin Yellow R Clathrate Compound and DNA

OU Lianglong, WANG Xingming

(Department of Chemistry, School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Under the condition of physiological environment at pH 7.4, the binding ratio  $n_{\gamma\text{-CD}}:n_{\text{AYR}}=1:1$  and binding constant  $K_f^{\ominus},_{288.15\text{K}}=1.69 \times 10^5 \text{ L/mol}$  were confirmed by mole ratio method and linear method. AO was used as molecule probe, and the interaction between  $\gamma$ -CD-AYR and herring-sperm DNA was studied by UV spectra, fluorescence spectra, thermodynamic method and viscosity method, etc. A series of thermodynamic data such as  $\Delta_r H_m^{\ominus}=8.78 \times 10^3 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r G_m^{\ominus}=-2.59 \times 10^4 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r S_m^{\ominus}=116.45 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$  were obtained, and  $\Delta_r S_m^{\ominus}$  was the primary driven power of this interaction, the binding ratio was  $n_{\text{DNA}}:n_{\gamma\text{-CD-AYR}}=1:2$ , the binding constants were  $K_{288.15\text{K}}=3.10 \times 10^4 \text{ L/mol}$ ,  $K_{310.15\text{K}}=4.02 \times 10^4 \text{ L/mol}$ . The interaction mode between  $\gamma$ -CD-AYR and herring-sperm DNA was an electrostatic interaction and part embedded intercalation.

**Key words:** alizarin yellow R;  $\gamma$ -cyclodextrin; inclusion complex; herring-sperm DNA; interaction mode

小分子化合物与 DNA 之间相互作用的研究, 将有助于人们从分子水平上了解生命现象的本质, 了解生命过程中这种相互作用对生命活动的影响以

及对生命体内的调节和控制作用, 认识某些分子对 DNA 生理、物理化学性质的影响以及对 DNA 转移、复制的改变, 基因调控和表达功能的影响

\* 收稿日期: 2012-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30973634)

作者简介: 欧亮龙 (1988 年生), 男, 硕士研究生; 通讯作者: 王兴明; E-mail: xmwang\_xkd@yahoo.cn

等<sup>[1-3]</sup>。

茜素黄 R (英文名为 Alizarin Yellow R, 简称 AYR) 作为一种小分子染料可用作生物探针来了解和揭示蛋白质的结构和功能, 以及阐明小分子与蛋白质分子之间的作用过程, 具有重要的理论价值和潜在的实用价值<sup>[4]</sup>。

本文在生理 pH = 7.4 环境下, 用紫外光谱法、荧光光谱法等研究了包合物  $\gamma$ -CD-AYR 与鲑鱼精 DNA (hsDNA) 的作用, 分析了两者的作用机制。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

$\gamma$ -环糊精 ( $\gamma$ -CD, A. R, 成都科龙化工试剂厂); 茜素黄 R (Alizarin Yellow R), 成都科龙化工试剂厂); 吡啶橙 (AO) (A. R, 中国医药 (集团) 上海化学试剂公司); 鲑鱼精 DNA (hsDNA) (上海海洋生物技术有限公司); Tris (0.25 mol/L) -HCl 缓冲液 (pH = 7.4) 临时配制; 水为二次重蒸水, 其它试剂均为分析纯。

UNICO UV-2102 PCS 型紫外可见分光光度计 (尤尼科上海仪器有限公司); F96 - 荧光分光光度计 (上海分析仪器公司); Nicolet 380 智能傅里叶变换红外光谱仪 (美国热电尼高力公司); D/max-RB X 射线衍射仪 (日本理学公司); pHs-3B 型酸度计 (成都方舟科技开发公司), AL204 型电子分析天平 (上海梅特勒 - 托利多仪器), HH-601 超级恒温水浴 (金坛金南仪器厂), PHG - 9075A 电热恒温鼓风干燥箱 (上海齐欣科学仪器有限公司); 乌贝路德黏度计。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 紫外光谱法

以 Tris-HCl 缓冲溶液 (pH 7.4) 为研究介质, 配制好待测溶液, 静置 5 min。在 1 cm 比色皿中加入 3.00 mL AYR 溶液, 以 Tris-HCl 缓冲溶液为参比扣除空白, 采用滴定法, 滴定时每次加入体积为 10  $\mu$ L 的  $\gamma$ -CD 溶液, 共 150  $\mu$ L, 扫描吸收光谱, 计算出  $\gamma$ -CD 与 AYR 反应摩尔比。

以 Tris-HCl 缓冲溶液 (pH 7.4) 为研究介质, 配制好待测溶液, 静置 5 min。在 1 cm 比色皿中加入 3.00 mL  $\gamma$ -CD-AYR 溶液, 以 Tris-HCl 缓冲溶液为参比扣除空白, 采用滴定法, 滴定时每次加入体积为 10  $\mu$ L 的 DNA 溶液, 共 200  $\mu$ L, 扫描吸收光谱, 计算出  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 DNA 反应摩尔比。

以 Tris-HCl 缓冲溶液 (pH 7.4) 为研究介质, 配制好待测溶液, 静置 5 min。在 1 cm 比色皿中加入 3.00 mL  $\gamma$ -CD-AYR 溶液, 以 Tris-HCl 缓冲溶液为参比扣除空白, 采用滴定法, 滴定时每次加入体积为 10  $\mu$ L 的  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  溶液, 共 150  $\mu$ L, 扫描吸收光谱, 以观察磷酸盐对  $\gamma$ -CD-AYR 包合物的影响。

按照  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 DNA 反应摩尔比方法中的步骤配制溶液, 在 1 cm 比色皿中加入 3.00 mL  $\gamma$ -CD-AYR 溶液, 分别在 15  $^{\circ}\text{C}$  和 37  $^{\circ}\text{C}$  条件下扫描紫外吸收光谱, 用双倒数法进行计算。

#### 1.2.2 荧光光谱法

1) 荧光探针。各种溶液均用 pH = 7.40 的 Tris-HCl 缓冲溶液配制, 摇匀, 放置 5 min。在 1 cm 比色皿中加入 3.00 mL AO-DNA 溶液, 以 Tris-HCl 缓冲溶液空白为参比, 用  $\gamma$ -CD-AYR 溶液进行滴定, 滴定时每次加入体积为 10  $\mu$ L 溶液, 共 150  $\mu$ L, 充分搅拌, 使  $\gamma$ -CD-AYR 和 AO-DNA 的浓度比值不断增加, 扫描发射光谱。

2) Scatchard 方法。分别用 Tris-HCl 缓冲溶液配制浓度比  $c_{\gamma\text{-CD-AYR}} : c_{\text{DNA}} = 0 : 1, 0.4 : 1, 0.8 : 1, 1.2 : 1$  的四组溶液, 再按照以上比例用含有 0.5 gNaCl - 100 mL 的缓存溶液配制四组。在 1 cm 比色皿中加入 3.00 mL 每组溶液, 采用滴定法, 滴定时每次加入体积为 10  $\mu$ L 的 AO 溶液, 共 200  $\mu$ L, 扫描吸收光谱。激发和发射光谱扫描狭缝宽度均为 5 nm, 荧光激发波长  $\lambda_{\text{ex}} = 411.7 \text{ nm}$ 。

1.2.3 黏度法 用 Tris-HCl 缓冲溶液配制 DNA 和  $\gamma$ -CD-AYR 包合物溶液, 在 298.15 K 恒温水浴槽中用乌贝路德黏度计测其黏度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 紫外 - 可见光谱法

2.1.1  $\gamma$ -CD 与 AYR 反应紫外吸收光谱及其包合摩尔比 环糊精具有中空环状的特殊构造, 可以通过范德华力等将填充进环中的客体分子络合成单分子包合物。因此环糊精与其他分子的包合属于典型的主 - 客体分子识别过程 (即指主体对客体选择性结合并产生某种特定功效的过程)<sup>[5]</sup>。

由图 1 可知, 固定 AYR 的浓度, 逐渐加入  $\gamma$ -CD, AYR 的吸收峰逐渐降低, 表明 AYR 客体所在的化学微环境随着主体  $\gamma$ -CD 的加入而发生了变化, 即由极性环境进入到  $\gamma$ -CD 疏水空腔的非极性环境而形成了包合物, 在包合过程中存在着能量的转移。

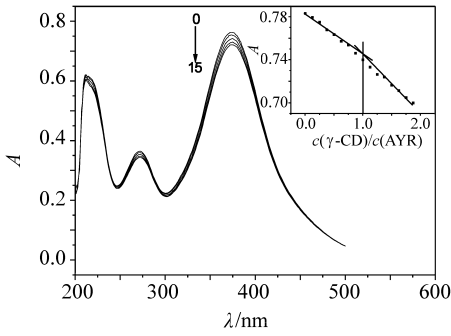


图 1  $\gamma$ -CD 对 AYR 紫外吸收光谱的影响 (376nm)  
 Fig. 1 Influence of  $\gamma$ -CD on UV-vis absorption spectra of Alizarin yellow R (pH7.40)  $c_{\text{AYR}} = 4.00 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ ;  
 $c_{\gamma\text{-CD}} = 1.50 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$

固定 AYR 的浓度, 改变  $\gamma$ -CD 的浓度, 在 376 nm 处测定吸光度, 结果如图 1 所示。即实验测得  $\gamma$ -CD 与 AYR 的包合摩尔比<sup>[6]</sup>  $n_{\gamma\text{-CD}}:n_{\text{AYR}} = 1:1$ 。根据 Beer 定律<sup>[7]</sup>:  $A = \varepsilon bc$  ( $A$  为  $\gamma$ -CD-AYR 的吸光度;  $\varepsilon$  为  $\gamma$ -CD-AYR 的摩尔吸光系数;  $c$  为  $\gamma$ -CD-AYR 浓度;  $b$  为比色皿厚度)。计算得到  $\gamma$ -CD-AYR 的表观摩尔吸光系数  $\varepsilon = 1.85 \times 10^4 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ 。

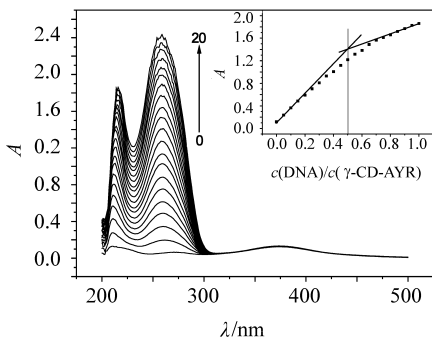


图 2 DNA 对  $\gamma$ -CD-AYR 影响的紫外吸收光谱  
 Fig. 2 Influence of DNA to UV-vis absorption spectra of  $\gamma$ -CD-AYR (pH7.40)  
 $c_{\gamma\text{-CD-AYR}} = 8.00 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ ;  $c_{\text{DNA}} = 1.20 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$   
 (10 $\mu\text{L}$  per scan, 0 ~ 20:0 ~ 200 $\mu\text{L}$ )

2.1.2  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 DNA 作用紫外吸收光谱及其反应摩尔比 由图 2 可知, 固定  $\gamma$ -CD-AYR 的浓度, 随着 DNA 浓度增加, 体系的吸光度呈有规律增强, 表明  $\gamma$ -CD-AYR 与 DNA 分子之间发生了明显地相互作用。在 216 nm 处测定其吸光度, 用摩尔比法得到 DNA 与  $\gamma$ -CD-AYR 的结合比<sup>[8]</sup>  $n_{\text{DNA}}:n_{\gamma\text{-CD-AYR}} = 1:2$ 。

2.1.3 双倒数法测定  $\gamma$ -CD-AYR 与 DNA 的结合常数 Cramer 最早发现环糊精能影响有机分子的 UV-vis 光谱, 并提出这种光谱变化是环糊精空腔内的高电子密度诱导客体分子电子发生移动的结果。根据图 2 中 216 nm 处的数据以  $1/\Delta A$  为纵坐标,  $1/c_{\text{DNA}}$  为横坐标作图, 如图 3 所示, 根据双倒数公式

$$1/(A - A_0) = 1/A_0 + 1/(K \times A_0 \times c_{\text{DNA}}) \quad (1)$$

计算得到结合常数  $K_{288.15\text{K}} = 3.10 \times 10^4 \text{ L/mol}$ ,  $K_{310.15\text{K}} = 4.02 \times 10^4 \text{ L/mol}$ 。

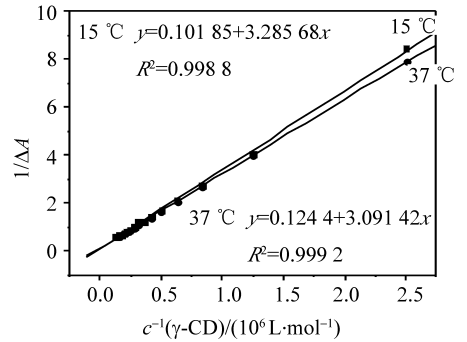


图 3 双倒数法  
 Fig. 3 Double reciprocal method  
 (pH = 7.40, 15 °C、37 °C)

$c_{\gamma\text{-CD-AYR}} = 8.00 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ ;  $c_{\text{DNA}} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$

再联用公式 (2)、(3)、(4)

$$\ln K_2^\ominus / K_1^\ominus = -\Delta_r H_m^\ominus (1/T_2 - 1/T_1) / R \quad (2)$$

$$\Delta_r G_m^\ominus = -RT \ln K^\ominus \quad (3)$$

$$\Delta_r G_m^\ominus = \Delta_r H_m^\ominus - T \Delta_r S_m^\ominus \quad (4)$$

计算得到  $\Delta_r H_m^\ominus = 8.78 \times 10^3 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r H_m^\ominus$  为正值, 说明反应作用是吸热过程, 温度适当升高有利于其相互作用的进行;  $\Delta_r G_{m288.15\text{K}}^\ominus = -2.48 \times 10^4 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r G_{m310.15\text{K}}^\ominus = -2.73 \times 10^4 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r G_m^\ominus = -2.59 \times 10^4 \text{ J/mol}$ , 推测  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 DNA 的作用有自发进行的可能;  $\Delta_r S_{m288.15\text{K}}^\ominus = 116.54 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ,  $\Delta_r S_{m310.15\text{K}}^\ominus = 116.33 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ,  $\Delta_r S_m^\ominus = 116.45 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , 由此可知,  $\gamma$ -CD-AYR 与 DNA 的相互作用为熵驱动。

2.1.4 磷酸盐对  $\gamma$ -CD-AYR 包合物紫外吸收光谱的影响 在生理环境下会存在大量磷酸盐, 加入磷酸盐可以了解  $\text{PO}_4^{3-}$  对  $\gamma$ -CD-AYR 包合物体系的影响。随着  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  逐步加入到  $\gamma$ -CD-AYR 溶液中, 吸收光谱呈现出减色效应和很微小的蓝移现象, 如图 4 所示。这说明  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  与  $\gamma$ -CD-AYR 可能存在静电作用。

## 2.2 荧光光谱

### 2.2.1 $\gamma$ -CD-AYR 对 AO-DNA 荧光光谱的影响

吖啶橙 (AO) 是一种碱性染料, 具有低毒等优点, 广泛用于光谱学研究。AO 能嵌插于 DNA 的碱基对之间, 使荧光强度增加<sup>[9]</sup>, 因此 AO 可以作为荧光探针研究  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 DNA 的作用方式。

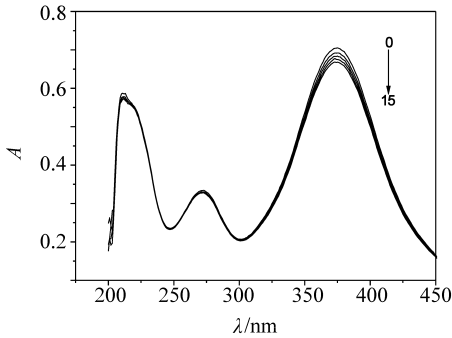


图 4 磷酸盐对  $\gamma$ -CD-AYR 影响的紫外吸收光谱

Fig. 4 Influence of phosphate to UV-vis absorption spectra of  $\gamma$ -CD-AYR (pH 7.40)  $c_{\gamma\text{-CD-AYR}} = 4.00 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ ;  
 $c_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = 1.00 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$

向一定浓度的 AO-DNA 配合物溶液中逐步加  $\gamma$ -CD-AYR 包合物, 溶液的荧光强度逐渐减少, 但相对减少程度逐渐降低, 当  $\gamma$ -CD-AYR 加入浓度一定时, 溶液的荧光强度下降趋于稳定, 如图 5 所示。说明  $\gamma$ -CD-AYR 包合物与 AO 形成了竞争,  $\gamma$ -CD-AYR 将嵌插在 DNA 碱基对中的 AO 置换了出来。说明在本实验条件下, DNA 与  $\gamma$ -CD-AYR 包合物之间存在嵌插作用。这可能是因为  $\gamma$ -CD-AYR 包合物中 AYR 的共轭, 能够插入到 DNA 双螺旋碱基对中经  $\pi$ - $\pi$  堆积作用而稳定<sup>[10]</sup>。

2.2.2 Scatchard 法 以 AO 为研究  $\gamma$ -CD-AYR 与 DNA 作用方式的荧光探针, 由于 AO 能够嵌入到

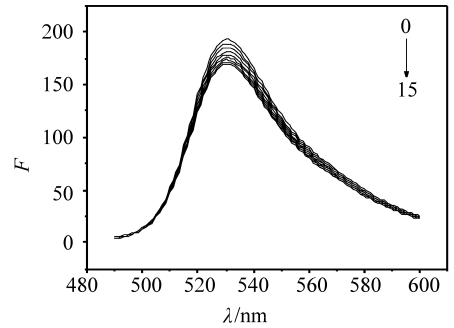


图 5  $\gamma$ -CD-AYR 对 AO-DNA 荧光光谱的影响  
Fig. 5 Fluorescence spectra curve of  $\gamma$ -CD-AYR to AO-DNA (pH7.40)  $C_{\text{AO-DNA}} = 2.00 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ ;  
 $c_{\gamma\text{-CD-AYR}} = 4.00 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$

DNA 双螺旋链的碱基对之间, 使荧光强度增加。在  $\gamma$ -CD-AYR-DNA 体系中滴加 AO, 引起荧光强度的变化, 因此利用 AO 存在下  $\gamma$ -CD-AYR 与 DNA 作用的 Scatchard 图可判别包合物与 DNA 的作用方式。通过对溶液中有和无 NaCl 两组实验进行对照研究, AO 与 DNA 作用的特点可用 Scatchard 方程阐述<sup>[11]</sup>

$$r/c = K(n - r) \quad (5)$$

式中,  $r$  为每个核苷酸结合 AO 的分子个数,  $c$  为 AO 游离浓度,  $n$  为  $r$  最大值,  $K$  为单个位点固有的结合常数。以  $r/c$  对  $r$  作图, 得到一条直线。在存在与不存在包合物  $\gamma$ -CD-AYR 的条件下, Scatchard 图有相同的  $n$  值, 则该物质与 DNA 为嵌插作用方式; 若 Scatchard 图有相同的  $K$  值, 则该物质与 DNA 的作用为非嵌插方式; 若 Scatchard 图的  $K$  和  $n$  均不同, 则该物质与 DNA 的作用为混合方式。

两组对照实验  $K$  值和  $n$  值的变化 (见表 1), 结合图表明: 有 NaCl 时的  $n$  值基本比没有 NaCl 时的小, 说明有静电作用<sup>[9]</sup>。

表 1  $\gamma$ -CD-AYR 与鲑鱼精 DNA 相互作用的 Scatchard 方程

Table 1 Scatchard equation of the interaction between  $\gamma$ -CD-AYR and hsDNA

Curve	$c$ ( $\gamma$ -CD-AYR/ $c_{\text{DNA}}$ )	$w$ (NaCl) /%	Scatchard 方程	$K/(\text{L} \cdot \text{mol}^{-1})$	$n$
a	0.00	0	$2\ 153.247 - 47\ 235.895r$	47 235.895	0.045 6
		0.5	$1\ 894.584 - 32\ 505.160r$	32 505.160	0.058 3
b	0.40	0	$2\ 081.696 - 37\ 019.493r$	37 019.493	0.056 2
		0.5	$2\ 141.113 - 38\ 311.337r$	38 311.337	0.055 9
c	0.80	0	$2\ 195.088 - 34\ 859.029r$	34 859.029	0.063 0
		0.5	$2\ 227.683 - 36\ 429.062r$	36 429.062	0.061 2
d	1.20	0	$2\ 241.724 - 31\ 404.219r$	31 404.219	0.071 4
		0.5	$2\ 441.809 - 39\ 413.352r$	39 413.352	0.062 0

### 2.3 黏度法

黏度法是一种对 DNA 长度变化敏感的流体力学方法。一般来讲, 当小分子包合物以插入模式与 DNA 作用时, DNA 的相邻碱基对的距离会变大以容纳插入配体, 因而导致 DNA 双螺旋伸长, DNA 溶液的黏度增加; 当包合物以静电或沟面结合等非插入模式与 DNA 作用时, DNA 溶液的黏度无明显变化; 而以部分插入方式与 DNA 作用时, 则可能使 DNA 的双螺旋扭结, 使其黏度减小<sup>[12]</sup>。相对黏度公式  $\eta = (t - t_0) / t_0$  中,  $t_0$  为单独 DNA 溶液流经毛细管所需时间,  $t$  为含浓度不等的包合物的 DNA 溶液流经毛细管所需的时间计算。 $\eta_0$  和  $\eta$  为加入包合物前后 DNA 溶液的相对黏度, 以  $(\eta/\eta_0)^{1/3}$  对  $c_{\gamma\text{-CD-AYR}}$  作图, 可得包合物对 DNA 黏度的影响图。 $\gamma\text{-CD-AYR}$  对 DNA 黏度的影响如图 6 所示, 可见, 由于  $\gamma\text{-CD}$  的包合作用阻碍了 AYR 的插入, 使  $\gamma\text{-CD-AYR}$  与 DNA 只有部分插入作用, 因此, 表现出黏度减小的现象。

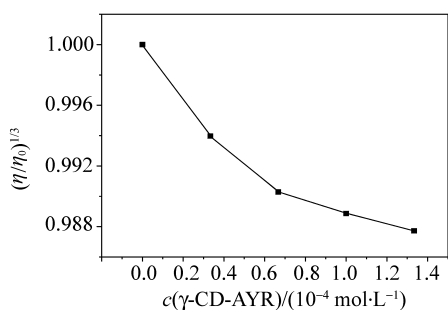


图 6  $\gamma\text{-CD-AYR}$  包合物对 DNA 黏度的影响

Fig. 6 Effect of viscosity on  $\gamma\text{-CD-AYR}$  on DNA

$c_{\text{DNA}} = 1.00 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$  (分别在 10 mL

比色管中加入 1 mL);  $c_{\gamma\text{-CD-AYR}} = 5 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$

(分别在 10 mL 比色管中加入 0、1、2、3、4 mL)

### 3 结 论

1) 通过摩尔比法得到茜素黄 R 与  $\gamma$ -环糊精以摩尔比为 1:1 形成包合物。

2) 由热力学测算得到函数  $K_{288.15\text{K}} = 3.10 \times 10^4 \text{ L/mol}$ ,  $K_{310.15\text{K}} = 4.02 \times 10^4 \text{ L/mol}$ ,  $\Delta_r H_m^\ominus = 8.78 \times 10^3 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r G_m^\ominus = -2.59 \times 10^4 \text{ J/mol}$ ,  $\Delta_r S_m^\ominus = 116.45 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , 说明  $\gamma\text{-CD-AYR}$  包合物与鲑鱼精 DNA 的相互作用为吸热反应, 可自发进行, 并为熵驱动。

3) 通过使用荧光光谱、紫外光谱等多种方法的研究结果表明, 该包合物  $\gamma\text{-CD-AYR}$  与鲑鱼精 DNA 之间的作用方式是静电作用和嵌插作用。由于  $\gamma\text{-CD}$  通过疏水作用对茜素黄 R 的包合, 使得  $\gamma\text{-CD-AYR}$  包合物中只有处于  $\gamma\text{-CD}$  圆筒外的 AYR 分子的端基部分与 DNA 才有插入作用, 故为部分嵌插。

### 参考文献:

- [1] STROHSAHL C M, KRAUSS T D, MILLER BL. Identification of high-stringency DNA hairpin probes by partial gene folding [J]. Biosens Bioelectron, 2007, 23:233 - 240.
- [2] MOHAMMAD H B, SAIED S H, ALI M. Study of interactions between DNA and aflatoxin B1 using electrochemical and fluorescence methods [J]. Analytical Biochemistry, 2011, 411: 218 - 222.
- [3] NEBRO A J, LUQUE G, LULLA F, et al. DNA fragment assembly using agrid-based Genetic algorithm [J]. Comput Operat Res, 2008, 35:2776 - 2790.
- [4] 胡亚敏, 蒋琪英, 张欢, 等. 碱性介质中茜素黄 R 与牛血清蛋白相互作用研究[J]. 西南科技大学学报, 2007, 22(3): 14 - 19.
- [5] 鞠焜先. 电分析化学与生物传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 344 - 347.
- [6] 杨昌英, 刘义, 曾芳, 等. 两种荧光探针法研究三种非甾体抗炎药与 DNA 的相互作用[J]. 化学学报, 2007, 65(18): 2076 - 2080.
- [7] 席小莉, 杨曼曼, 杨频. 表柔比星-铜体系与 DNA 作用的光谱和电化学法研究[J]. 化学学报, 2008, 66(10): 1181 - 1186.
- [8] 叶宝芬, 朱永林, 鞠焜先. DNA 与苯胺红 T 的相互作用与荧光定量检测[J]. 高等学校化学学报, 2002, 23(12): 2253 - 2255.
- [9] 王兴明, 黎泓波, 胡亚敏, 等. 苏木素与 DNA 相互作用的光谱研究[J]. 化学学报, 2007, 65(2): 140 - 146.
- [10] XU D L, WANG X M, DING L S. Spectroscopic studies on the interaction of  $\gamma$ -cyclodextrin- daunorubicin inclusion complex with herring sperm DNA[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83:1257 - 1262.
- [11] LEPECQ J B, PAOLETTI C J. A fluorescent complex between ethidium bromide and nucleic acids[J]. J Mol Biol, 1967, 27:87 - 106.
- [12] 张黔玲, 刘剑洪, 任祥忠, 等. 新型双核配合物的形成及荧光性质研究[J]. 高等学校化学学报, 2006, 27(10): 1805 - 1810.