

# 一种新型 $Al^{3+}$ 荧光探针的合成及与 DNA 的相互作用

孟德素<sup>1</sup>, 庞艳玲<sup>1\*</sup>, 石广革<sup>2</sup>, 段升霞<sup>1</sup>, 刘玉玲<sup>1</sup>

(1. 菏泽学院化学化工学院, 山东 菏泽 274015;

2. 菏泽市食品药品检验检测研究院, 山东 菏泽 274015)

**摘要:**以2-羟基-1-萘甲醛、邻氨基苯甲醛为原料,设计合成了一种新型 Schiff 碱  $Al^{3+}$  荧光探针 S,并通过 <sup>1</sup>HNMR、<sup>13</sup>CNMR、ESI-MS、IR 对探针 S 进行结构表征。光谱实验结果表明,探针 S 在 DMSO:H<sub>2</sub>O=4:1 (V/V) 体系中,对  $Al^{3+}$  有良好的荧光和肉眼识别。 $Al^{3+}$  浓度在 2.0~50  $\mu\text{mol/L}$  范围内,体系荧光强度呈现出良好的线性关系,检出限为 0.033  $\mu\text{mol/L}$ ,探针 S 与  $Al^{3+}$  形成 1:1 的配合物。通过荧光光谱研究了荧光探针 S- $Al^{3+}$  配合物与 DNA 的相互作用,实验结果表明,探针 S- $Al^{3+}$  配合物对 DNA 的猝灭过程为动态猝灭,同时对不同温度下相互作用的结合点常数、结合位点数及热力学参数进行了计算,推断二者作用力的类型为疏水作用,作用方式为嵌插作用。

**关键词:** Schiff 碱; 铝离子; 邻氨基苯甲醛; DNA; 荧光探针

中图分类号: O625.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)06-0227-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.06.044

## Synthesis of a novel $Al^{3+}$ fluorescent probe and its interaction with DNA

MENG De-su<sup>1</sup>, PANG Yan-ling<sup>1\*</sup>, SHI Guang-ge<sup>2</sup>, DUAN Sheng-xia<sup>1</sup>, LIU Yu-ling<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Heze University, Heze 274015, China;

2. Heze Food and Drug Inspection and Testing Research Institute, Heze 274015, China)

**Abstract:** A novel Schiff base fluorescence probe (S) for  $Al^{3+}$  is designed and synthesized from 2-hydroxy-1-naphthaldehyde and o-aminobenzaldehyde, and characterized by means of <sup>1</sup>HNMR spectrum, <sup>13</sup>CNMR spectrum, ESI-MS and IR spectrum. The results from spectral analysis show that probe S exhibits good selectivity and naked eye identification to  $Al^{3+}$  in a DMSO-H<sub>2</sub>O (V/V=4:1) solution. The concentration of  $Al^{3+}$  in the range of 2.0-50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  shows a linear relationship with the fluorescent intensity, while the detection limit is 0.033  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . A complex is formed between the probe S and  $Al^{3+}$  in a 1:1 ratio. The interaction between probe S- $Al^{3+}$  complex and DNA is investigated through fluorescence spectroscopies. Experimental results show that the complex quenches DNA dynamically. In addition, the binding constant, binding-site numbers and thermodynamic parameters of the interaction between probe S- $Al^{3+}$  complex and DNA are calculated at different temperature. It is indicated that the interacting forces belongs to hydrophobic action, showing an intercalation interaction mode.

**Key words:** Schiff base;  $Al^{3+}$ ; o-aminobenzaldehyde; DNA; fluorescent probe

在生活中人们会经常使用铝及铝制品。而铝对人体健康的危害是缓慢并且持久的。铝在人的身体中逐渐积聚就会形成对人体有毒的物质,对人的身体造成损伤,损害中枢神经系统、肾脏、骨骼肌肉及血液心血管等<sup>[1-2]</sup>,所以对于水体、环境中  $Al^{3+}$  含量的检测十分重要。目前检测金属铝离子的方法有电化学法<sup>[3]</sup>、原子吸收法<sup>[4]</sup>、电感耦合等离子体质谱法<sup>[5]</sup>、荧光分光光度法<sup>[6]</sup>等。而荧光分光光度法准确度好,操作简便,同时具有高灵敏性及抗干扰性<sup>[7]</sup>,因此被广泛应用。

Schiff 碱由于合成方法简单,且具有良好的配位

能力,能与金属离子形成金属配合物,因此利用在引入荧光基团的 Schiff 碱与金属离子形成配合物后荧光活性的变化,Schiff 碱可以作为检测金属离子的荧光探针<sup>[8-10]</sup>。近年来,Schiff 碱金属配合物与 DNA 相互作用的研究<sup>[11-13]</sup>越来越受到人们的重视。作为主要的遗传物质,DNA 已被确认是很多抗癌药物的主要靶点,对 Schiff 碱配合物与 DNA 相互作用的方式进行深入的探讨<sup>[14-15]</sup>,能够为一些抗肿瘤和抗病毒药物的设计合成提供理论支持。

实验设计合成了一种新型的邻氨基苯甲醛 Schiff 碱  $Al^{3+}$  荧光探针 (S),并对其进行了光学研究,

收稿日期:2023-09-20;修回日期:2024-03-26

基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QB109)

作者简介:孟德素(1978-),女,硕士,副教授,研究方向为有机合成及光谱分析,desumeng@126.com;庞艳玲(1973-),女,硕士,副教授,研究方向为化学分析及光谱分析,通讯联系人,1611054963@qq.com。

发现探针 S 对  $\text{Al}^{3+}$  有良好的荧光响应和裸眼识别, 抗干扰能力强, 并进一步研究了探针 S- $\text{Al}^{3+}$  配合物与 DNA 的相互作用方式和作用力。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

Avater-370 傅里叶红外光谱仪(美国 NICOLET 公司); TU-1901 双光束紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); F-380 荧光分光光度计(天津港东科技股份有限公司); BRUKER-500 MHz 型核磁共振仪(美国布鲁克·道尔顿公司)。

2-羟基-1-萘甲醛(国药集团化学试剂有限公司); 邻氨基苯甲醛(上海麦克林生化科技有限公司); DNA(国药集团化学试剂有限公司), 其他所用试剂均为分析纯; 实验用水为二次蒸馏水。

### 1.2 荧光探针 S 的合成

探针 S 的合成路线如图 1 所示。

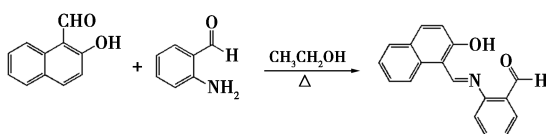


图 1 荧光探针 S 的合成路线

将 0.242 3 g (2 mmol) 邻氨基苯甲醛和 0.344 3 g (2 mmol) 2-羟基-1-萘甲醛溶解于 30 mL 无水乙醇中, 在 80~85℃ 加热回流 8 h, 冷却后, 减压蒸馏除去乙醇, 冷却, 过滤, 干燥, 无水乙醇重结晶, 得荧光探针 S, 黄色晶体, 产率 83.3%, m. p. 197.2~198.5℃。

FT-IR (KBr): 3 421, 1 728, 1 627, 1 604, 1 513, 1 482, 1 458, 1 313, 1 200, 866, 760  $\text{cm}^{-1}$ ;  $^1\text{H}$ NMR (500 MHz,  $\text{DMSO}-d_6$ ),  $\delta$ : 15.04 (d,  $J=8.0$  Hz, 1H), 10.06 (s, 1H), 9.35 (d,  $J=8.0$  Hz, 1H), 8.39 (d,  $J=8.2$  Hz, 1H), 8.03~7.94 (m, 2H), 7.85 (d,  $J=9.4$  Hz, 1H), 7.75~7.67 (m, 2H), 7.50 (ddd,  $J=8.5, 6.9, 1.5$  Hz, 1H), 7.42~7.34 (m, 1H), 7.34~7.27 (m, 1H), 6.83 (d,  $J=9.3$  Hz, 1H);  $^{13}\text{C}$ NMR (126 MHz,  $\text{DMSO}-d_6$ ),  $\delta$ : 200.55, 175.94, 152.06, 142.32, 138.93, 134.23, 134.19, 131.44, 129.52, 128.75, 128.64, 126.96, 125.67, 124.69, 124.12, 120.76, 119.79, 109.36; ESI-MS:  $m/z = 276.3514$   $[\text{M}+\text{H}]^+$ 。

### 1.3 光谱检测

以水为溶剂, 配制浓度为 1 mmol/L 的  $\text{Fe}^{3+}$ 、

$\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  的储备液。以 DMSO 为溶剂, 配制浓度为 1 mmol/L 的荧光探针 S 的储备液。以 50 mmol/L NaCl 溶液为溶剂, 配制浓度为 40 mmol/L 的 DNA 溶液。

测试时, 取 0.1 mL 荧光探针 S 储备液, 加入适量的金属离子溶液, 用  $\text{DMSO}:\text{H}_2\text{O}=4:1$  (V/V) 溶液定容到 10 mL。荧光光谱激发和发射的狭缝宽度为 10/10 nm, 激发波长为 422 nm, 扫描范围为 430~760 nm。紫外-可见光谱扫描范围为 200~600 nm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 荧光探针 S 对金属离子选择性的荧光光谱

向探针 S (10  $\mu\text{mol/L}$ ) 溶液中加入各种阳离子 (50  $\mu\text{mol/L}$ ) ( $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ ), 利用荧光光谱考察了探针 S 对  $\text{Al}^{3+}$  的选择性。由图 2 可看出, 探针 S 在加入  $\text{Al}^{3+}$  溶液后, 在 518 nm 处出现一个强的荧光发射峰, 而探针 S 自身及与其他金属离子的荧光发射峰很低。在自然环境中, 探针 S 溶液中加入铝离子后颜色由黄色变成了黄绿色。结果表明荧光探针 S 对  $\text{Al}^{3+}$  有荧光和裸眼识别。

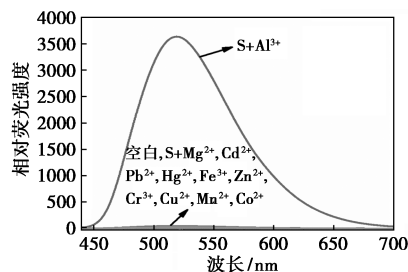


图 2 荧光探针 S 对金属离子的选择

### 2.2 荧光探针 S 对 $\text{Al}^{3+}$ 的荧光滴定及检测限

实验探究了  $\text{Al}^{3+}$  浓度对荧光探针 S 荧光强度影响。固定荧光探针 S 浓度为 10  $\mu\text{mol/L}$ , 加入不同体积 (0~3 equiv) 的  $\text{Al}^{3+}$  溶液, 振荡均匀, 检测其荧光强度 (图 3)。结果表明, 随着  $\text{Al}^{3+}$  浓度 (0~

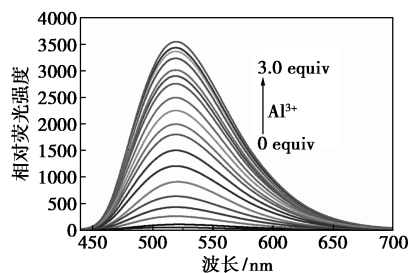


图 3 探针 S 与  $\text{Al}^{3+}$  (0~3.0 equ.) 的荧光发射光谱

3 equiv) 不断增大, 荧光强度逐渐增强, 荧光响应良好, 另外由图 4 可以看出, 在 2.0~50  $\mu\text{mol/L}$  的范围内, Al<sup>3+</sup> 浓度与荧光强度线性良好, 线性方程为  $I=53.89c-29.09$  ( $R^2=0.9972$ ), 得出检出限为 0.033  $\mu\text{mol/L}$ , 表明探针 S 对 Al<sup>3+</sup> 具有较高的灵敏度和较低的检测限。

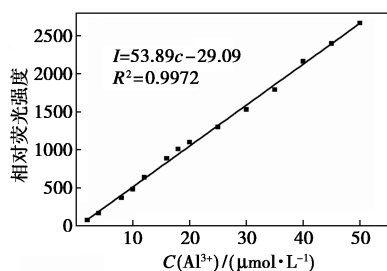


图 4 探针 S 与 Al<sup>3+</sup> 荧光强度的线性拟合

### 2.3 荧光探针 S 对 Al<sup>3+</sup> 的紫外-可见光谱滴定

探究了 Al<sup>3+</sup> 浓度对荧光探针 S 紫外-可见光谱的影响。固定荧光探针 S 浓度为 50  $\mu\text{mol/L}$ , 加入不同体积(0~3 equiv) 的 Al<sup>3+</sup> 溶液, 振荡均匀, 检测其紫外-可见光谱(图 5)。结果表明, 随着 Al<sup>3+</sup> 浓度(0~3 equiv) 的增大, 荧光探针 S 在 305、424 nm 处的吸收峰逐渐升高, 同样表明了 Al<sup>3+</sup> 与荧光探针 S 的络合。

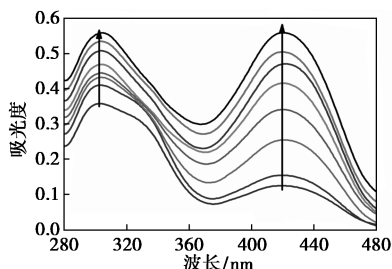


图 5 不同 Al<sup>3+</sup> 浓度探针 S-Al<sup>3+</sup> 体系的紫外光谱图

### 2.4 共存金属离子干扰

为了考察其他金属离子对探针 S-Al<sup>3+</sup> 体系荧光强度的影响, 进行了金属离子共存干扰实验。固定探针 S 溶液浓度为 10  $\mu\text{mol/L}$ , 加入 3.0 等摩尔 Al<sup>3+</sup> 溶液, 再加入 3.0 等摩尔其他金属离子溶液(Hg<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Cu<sup>2+</sup>等), 震荡后检测荧光强度。由表 1 可知, Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 和 Hg<sup>2+</sup> 对探针 S-Al<sup>3+</sup> 体系有一定干扰, 因为 Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 和 Hg<sup>2+</sup> 本身有一定顺磁性, 会造成 S-Al<sup>3+</sup> 体系荧光猝灭, 而其他金属离子对 S-Al<sup>3+</sup> 体系荧光强度影响很小, 由此可知, 探针 S 是一种具有良好抗干扰能力的 Al<sup>3+</sup> 荧光探针。

表 1 探针的 S 金属离子共存性实验(相对荧光强度)

名称	Mn <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
无 Al <sup>3+</sup>	26.2	49.1	27.5	22.1	29.4	23.5
有 Al <sup>3+</sup>	3635.5	3620.2	3650.5	25.3	500.3	68.7
名称	Pb <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	空白	
无 Al <sup>3+</sup>	31.2	25.4	30.5	31.5	25.2	
有 Al <sup>3+</sup>	3598.5	3615.8	3630.9	3635.7	3643.2	

### 2.5 荧光探针 S 与 Al<sup>3+</sup> 的络合比及络合机理

为了探究探针 S 与 Al<sup>3+</sup> 的络合比, 采用等摩尔连续变换法作 Job's plot 曲线(图 6), 结果表明荧光探针 S 与 Al<sup>3+</sup> 的络合比为 1:1, 由此推测荧光探针 S 与 Al<sup>3+</sup> 的络合机理(图 7)。探针 S 中的—C=N 可以发生异构化, 使自身的荧光活性减弱, 而当在探针 S 中加入 Al<sup>3+</sup> 时, Al<sup>3+</sup> 与探针 S 中的—C=N 中的 N、OH 和 C=O 中的 O 络合, 形成配位键, 使得探针 S 中的—C=N 结构异构化受阻, 从而在配合物体系中形成了一个较大的平面刚性结构, 使得探针 S 荧光活性显著增强。

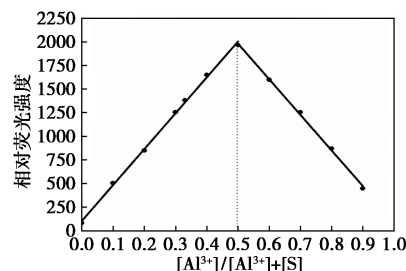


图 6 探针 S 与 Al<sup>3+</sup> 络合比曲线

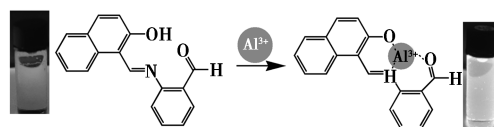


图 7 探针 S-Al<sup>3+</sup> 的络合方式

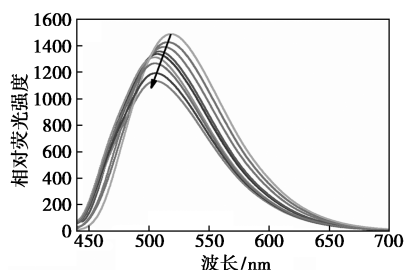
### 2.6 荧光探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物与 DNA 相互作用

金属配合物与 DNA 的作用通常是 2 种方式: 一种是嵌插方式, 另一种是表面结合沟槽结合方式。根据相互作用前后荧光强度的变化, 可以判断两者的相互作用模式<sup>[16]</sup>。探究 DNA 与 Schiff 碱络合之间的相互作用能够推进抗癌药物的研究<sup>[17-18]</sup>。

#### 2.6.1 DNA 对探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物荧光强度的影响

为了探究探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物与 DNA 的相互作用, 进行了 DNA 浓度对探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物荧光强度影响的测定, 在 S-Al<sup>3+</sup> 配合物浓度为 2  $\mu\text{mol/L}$  溶液中, 加入不同体积(0~16.0 等摩尔) 的 DNA 溶液,

检测其荧光强度(图 8)。结果表明,随着 DNA 浓度的增大,探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物荧光吸收峰强度逐渐减弱,同时最大发射波长明显蓝移,由 518 nm 移到 505 nm(Δλ = 13 nm),荧光光谱的变化表明探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物与 DNA 发生了嵌插作用<sup>[19]</sup>。

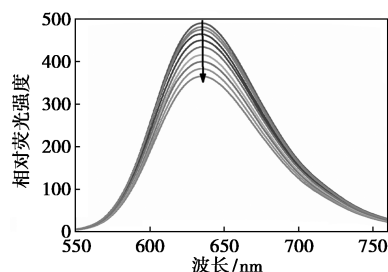


[S-Al<sup>3+</sup>] = 5 μmol/L;  
[DNA] = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 μmol/L

图 8 DNA 对探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物  
荧光光谱的影响

### 2.6.2 荧光探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物对 EB-DNA 体系荧光强度的影响

为了进一步探究荧光探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物与 DNA 的相互作用,进行了荧光探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物对 EB-DNA 体系荧光强度的影响的测定,在 DMSO:H<sub>2</sub>O=4:1(V/V)体系中 EB-DNA 浓度为 20 μmol/L,加入不同体积(0~1.0 等摩尔)的探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物溶液,激发波长为 515 nm,检测荧光强度的变化。由图 9 可知,随着荧光探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物浓度的增大,EB-DNA 在 634 nm 处的荧光强度逐渐下降。表明 EB 与 DNA 分子之间的结合位点被配合物所占据,同样推断出 DNA 与配合物之间发生了嵌插作用。



[EB] = 20 μmol/L; [DNA] = 140 μmol/L;  
[S-Al<sup>3+</sup>] = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 20 μmol/L

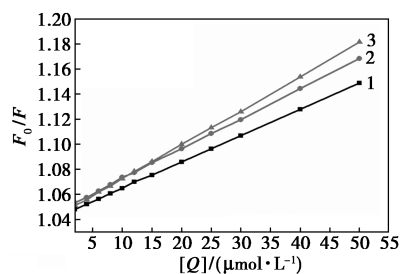
图 9 探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物对 EB-DNA 体系  
荧光强度的影响

### 2.6.3 荧光猝灭类型、结合常数、结合位点和作用力方式

常用 Stern-Vomler 方程<sup>[20]</sup>研究猝灭机理。

$$F_0/F = 1 + K_q\tau_0[Q] = 1 + K_{sv}[Q] \quad (1)$$

实验探究了 298、308、318 K 温度下探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物对 EB-DNA 荧光强度的影响,得到 Stern-Vomler 猝灭曲线(图 10),有关数据见表 2。



1—298 K; 2—308 K; 3—318 K

图 10 不同温度下探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物对  
EB-DNA 体系 Stern-Vomler 猝灭曲线

表 2 不同温度下探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物对 EB-DNA  
体系 Stern-Vomler 猝灭曲线相关参数

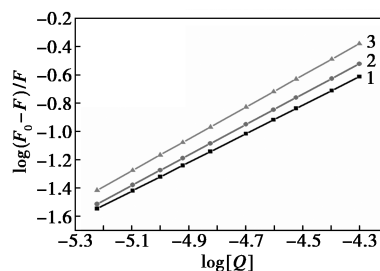
T/K	K <sub>sv</sub> /(10 <sup>3</sup> L·mol <sup>-1</sup> )	K <sub>q</sub> /(10 <sup>11</sup> L·mol <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
298	2.1	2.1	0.9999
308	2.4	2.4	0.9998
318	2.7	2.7	0.9999

由表 2 可知,在 298、308、318 K 条件下,K<sub>q</sub> 分别为 2.1×10<sup>11</sup>、2.4×10<sup>11</sup>、2.7×10<sup>11</sup> L/(mol·s),均大于最大猝灭碰撞常数,一般为 2.0×10<sup>10</sup> L/(mol·s)<sup>[21]</sup>,且随着温度的升高,猝灭常数也随之增大,证实该体系的猝灭类型属于动态猝灭。

猝灭的结合常数 K 与位点数 n 由修正的 Stern-Vomler 方程计算得到:

$$\log(F_0 - F)/F = \log K + n \log[Q] \quad (2)$$

从图 11 可以得到,探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物与 EB-DNA 体系的结合常数 K 与位点数 n,从表 3 显示的数据中可以看到,结合位点都在 1 附近,说明结合位点只有 1 个。



1—298 K; 2—308 K; 3—318 K

图 11 探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物对 EB-DNA 的  
双对数曲线

表3 不同温度下探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物与 DNA 相互作用的参数

T/K	K/ (10 <sup>3</sup> L· mol <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup>	ΔG/ (kJ· mol <sup>-1</sup> )	ΔH/ (kJ· mol <sup>-1</sup> )	ΔS/(J· mol <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
298	5.521	1.013	0.9988	-4.225		
308	12.76	1.076	0.9995	-6.546	64.95	232.1
318	28.77	1.125	0.9991	-8.867		

通过计算热力学常数进一步探究了探针 S-Al<sup>3+</sup> 配合物与 DNA 之间的作用力方式,计算结合的亲和力大小,可以通过公式(2)~(4)得出,以结合常数 K 表示:

$$\ln K = -\Delta H/RT + \Delta S/R \quad (3)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4)$$

由表3数据表明,3种温度下的ΔG均小于零,可知DNA与该探针S-Al<sup>3+</sup>配合物之间是一种自发反应,ΔH及ΔS都大于零,根据Ross<sup>[22]</sup>判断小分子与生物大分子之间作用力类型的规律,可知配合物与DNA主要以疏水作用方式结合。

### 3 结语

实验设计合成了一种新型邻氨基苯甲醛 Schiff 碱 Al<sup>3+</sup> 荧光探针 S,该探针对 Al<sup>3+</sup> 有良好的荧光和裸眼识别,抗干扰能力强,检测限低,灵敏度高。通过荧光光谱研究了 Al<sup>3+</sup> 荧光探针 S 配合物与 DNA 相互作用,研究表明两者以嵌插的方式进行相互作用,猝灭机理为动态猝灭,两者之间的结合作用是自发进行,作用力主要是疏水作用,此研究为进一步探究小分子与 DNA 的作用提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] Naskar B, Modak R, Sikdar Y, et al. Fluorescent sensing of Al<sup>3+</sup> by benzophenone based Schiff base chemosensor and live cell imaging applications: Impact of keto-enol tautomerism [J]. *Sensor Actuat B Chem*, 2017, 239: 1194-1204.
- [2] Mold M, Umar D, King A, et al. Aluminium in brain tissue in autism [J]. *J Trace Elem Med Bio*, 2018, 46: 76-82.
- [3] Maria C A, Lizbeth L L, Andres J B, et al. Electrochemical modified electrode with bismuth film for ultrasensitive determination of aluminum (III) [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2022, 919: 116552-116558.
- [4] Sun M, Wu Q. Determination of ultra-trace aluminum in human albumin by cloud point extraction and graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176 (3): 901-905.
- [5] 张乃斌, 由鹏飞, 姜树银, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定丙氨酸谷氨酰胺注射液中的铝的含量 [J]. *理化检验: 化学分册*, 2022, 58 (4): 429-432.
- [6] 李中燕, 刘可翔, 杨芊之, 等. 一种高选择性 Al<sup>3+</sup> 荧光探针的合成及其性能研究 [J]. *现代化工*, 2023, 43 (1): 254-258.
- [7] Sabyasachi T, Sudipta D, Milan G. A unique benzimidazole-naphthalene hybrid molecule for independent detection of Zn<sup>2+</sup> and N<sub>3</sub><sup>-</sup> ions; Experimental and theoretical investigations [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, 209 (1): 170-185.
- [8] 石治川, 赵志刚. 不对称双缩二氨基硫脲荧光探针的合成及其对金属离子的识别性能研究 [J]. *现代化工*, 2019, 39 (9): 227-231.
- [9] 王宇斌, 侯玲杰, 葛金印, 等. 检测 Al<sup>3+</sup> 的席夫碱荧光探针的合成和性能研究 [J]. *分析化学*, 2018, 46 (12): 1937-1944.
- [10] Wen X Y, Fan Z F. Linear Schiff-base fluorescence probe with aggregation-induced emission characteristics for Al<sup>3+</sup> detection and its application in live cell imaging [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 945: 75-84.
- [11] 辛晓艳, 陈凤姣, 李文钰, 等. 基于席夫碱配体构筑的 Ln<sub>2</sub><sup>III</sup> 配合物的结构、荧光性质及生物活性 [J]. *无机化学学报*, 2023, 39 (1): 1-12.
- [12] Zahra S, Hossein C, Amir A, et al. A novel Schiff base derived from the gabapentin drug and copper (II) complex; Synthesis, characterization, interaction with DNA/protein and cytotoxic activity [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, 2016, 162: 34-44.
- [13] Swathi M, Dasari S S, Sreenu D, et al. Computational studies, cytotoxicity, DNA interactions of bioactive novel 2-methoxy 5-trifluoromethyl benzenamine Schiff base metal complexes [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023, 153: 110826.
- [14] 李小芳, 冯小强, 杨声, 等. 席夫碱稀土配合物与 DNA 的作用方式 [J]. *发光学报*, 2016, 37 (7): 873-880.
- [15] Bandashisha K, Saurav, Abhijit S, et al. Glycine methyl ester based Schiff base bearing long alkoxy arm and its zinc (II) and copper (II) complexes; Synthesis, mesomorphism, photoluminescence, CT-DNA interaction and DFT study [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2023, 1291: 135968-135972.
- [16] Haas K L, Franz K J. Application of metal coordination chemistry to explore and manipulate cell biology [J]. *Chemical Reviews*, 2009, 109 (10): 4921-4960.
- [17] Silva C M, Silva M M, Reis F S, et al. Studies on free radical scavenging, cancer cell antiproliferation, and calf thymus DNA interaction of Schiff bases [J]. *J Photochem Photobiol B Biol*, 2017, 172: 129-138.
- [18] Biswas N, Saha S, Biswas B K, et al. The DNA- and protein-binding properties and cytotoxicity of a new copper (II) hydrazone Schiff base complex [J]. *Journal of Coordination Chemistry*, 2021, 74 (9/10): 1482-1504.
- [19] Zhou Y L, Li Y Z. Studies of interaction between poly (allylamine hydrochloride) and double helix DNA by spectral methods [J]. *Biophysical Chem*, 2004, 107 (3): 273-281.
- [20] Geng S G, Cui Y R, Liu Q F, et al. Spectroscopic and molecular modeling study on the interaction of ctDNA with 3'-deoxy-3'-azido doxorubicin [J]. *Journal of Luminescence*, 2013, 141 (3): 144-149.
- [21] Mayreli O, Alex F, Pedro J, et al. Elucidation of the mechanism of single-stranded DNA interaction with methyleneblue: A spectroscopic approach [J]. *J Photochem Photobiol A*, 2011, 218 (1): 26-32.
- [22] Ross P D, Subramanian S. Thermodynamics of protein association reaction: Forces contribution to stability [J]. *Biochemistry*, 1981, 20: 3096-3102. ■