

## 分析测试

# 基于双香豆素开-闭环转化的 高选择性比率型肼荧光探针研究

曾碧涛<sup>1</sup>, 何爱江<sup>1</sup>, 万志翔<sup>2</sup>, 赵志刚<sup>2</sup>, 石治川<sup>2\*</sup>

(1. 宜宾职业技术学院, 四川 宜宾 644100; 2. 西南民族大学化学与环境学院, 四川 成都 610225)

**摘要:** 基于双香豆素查尔酮骨架设计并开发了一种新型比率型荧光探针(DCO), 可实现对肼( $N_2H_4$ )的高选择性检测。DCO与 $N_2H_4$ 反应后, 紫外-可见吸收光谱和荧光发射光谱均呈现显著特征峰衰减/新峰形成的双通道动态响应。该探针对于 $N_2H_4$ 表现出优异的选择性, 检测限低至 $10^{-6}$  mol/L, 并在较宽pH范围内保持稳定。核磁共振氢谱表征证实, 探针对于 $N_2H_4$ 的识别机制涉及 $\alpha, \beta$ -不饱和羰基查尔酮环化反应, 进而触发基于分子内电荷转移(ICT)过程导致比率型荧光信号变化。实际应用表明, 荧光探针DCO能应用于真实水样中 $N_2H_4$ 的定量测定。

**关键词:** 肼; 比率型探针; 双香豆素; 查尔酮环化; 分子内电荷转移

中图分类号: O62

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)10-0276-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.10.044

## Highly selective and sensitive detection of hydrazine via dicoumarin ring-opening/closing ratiometric fluorescent probe

ZENG Bi-tao<sup>1</sup>, HE Ai-jiang<sup>1</sup>, WAN Zhi-xiang<sup>2</sup>, ZHAO Zhi-gang<sup>2</sup>, SHI Zhi-chuan<sup>2\*</sup>

(1. Yibin Vocational &amp; Technical College, Yibin 644100, China;

2. College of Chemistry &amp; Environment, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Based on a coumarin-chalcone skeleton, a novel ratiometric fluorescent probe, DCO, is designed and developed for highly selective detection of hydrazine ( $N_2H_4$ ). Upon reaction with  $N_2H_4$ , DCO exhibits a dual-channel dynamic response characterized by the significant attenuation of characteristic peaks in UV-Vis absorption spectra and the formation of new emission peaks in fluorescence spectra. This probe demonstrates excellent selectivity toward  $N_2H_4$ , with a detection limit as low as  $10^{-6}$  mol/L, and remains stable over a wide pH range. It is confirmed through <sup>1</sup>HNMR characterization that the recognition mechanism of hydrazine by this probe involves a cyclization reaction of  $\alpha, \beta$ -unsaturated carbonyl chalcone moiety with  $N_2H_4$ , subsequently triggering ratiometric fluorescence signal changes through an intramolecular charge transfer (ICT) process. Practical applications verify that DCO can be effectively applied to the quantitative detection of  $N_2H_4$  in real water samples.

**Key words:** hydrazine; ratiometric probe; dicoumarin; chalcone cyclization; intramolecular charge transfer

肼( $N_2H_4$ )是一种具有氨样气味的挥发性无机二胺化合物<sup>[1]</sup>, 因强碱性、显著的亲核性与高还原性, 在工业领域有着广泛的应用<sup>[2]</sup>。肼既可作为高能燃料推进剂, 被广泛用于导弹、卫星和火箭推进系统普遍采用<sup>[3-4]</sup>, 同时在医药、农药、催化剂、纺织染料等的合成中也扮演着重要角色<sup>[5]</sup>。然而, 肼的毒性不容忽视, 它对生物体的发育和细胞生化过程具有显著的负面影响<sup>[6]</sup>。长期或过量暴露可刺激皮肤, 导致肝脏、肾脏及中枢神经系统损伤<sup>[7-9]</sup>。在环境方面, 肼的大规模工业化生产、运输和含肼废水处理过程也带来了潜在的环境风险, 这些污染物可能

对生态系统构成严重威胁。鉴于此, 美国环境保护署(EPA)将肼列为潜在致癌物, 规定饮用水中肼的最大允许浓度为 $10 \times 10^{-9}$  mol/L<sup>[10]</sup>。因此, 开发新型的高灵敏度肼检测探针对于保障公共安全和环境保护具有重要意义。

目前, 肼的定性和定量分析主要依赖于一系列传统检测技术, 包括高效液相色谱法<sup>[11]</sup>、比色法<sup>[12]</sup>、分光光度法<sup>[13]</sup>、滴定法<sup>[14]</sup>、电化学法<sup>[15]</sup>及荧光分析法<sup>[16-17]</sup>等。在这些方法中, 荧光分析法因操作简便、响应时间短、选择性好和灵敏度高显著特点, 已经在生物医学诊断和环境痕量污染物的筛查

收稿日期: 2025-06-30; 修回日期: 2025-08-16

基金项目: 宜宾职业技术学院院级重点科研项目(22ZRZD-07)

作者简介: 曾碧涛(1982-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为有机合成, zbt917@163.com; 石治川(1985-), 男, 硕士, 高级实验师, 研究方向为有机小分子合成, 通讯联系人, szc169@swun.edu.cn。

领域占据了重要的地位<sup>[18-19]</sup>。这种方法的优势使得荧光分析法成为了一个不可或缺的分析工具,特别是在需要快速、准确地检测低浓度胍的情况下。

鉴于香豆素衍生物具有大斯托克斯位移、良好的溶解性以及高量子产率,使其成为理想的荧光团,并在生物传感、环境监测和分子探针设计等多个领域得到广泛应用<sup>[20-21]</sup>。本研究采用 7-二乙氨基香豆素作为起始材料,通过两步反应合成了一种新型基于双香豆素查尔酮骨架的比率型荧光探针(DCO),用于特异性检测胍的检测。当 DCO 与  $N_2H_4$  发生反应时,其紫外-可见吸收光谱和荧光发射光谱均出现了显著变化,具体表现为特征吸收/发射峰的减少和新峰的形成,这种变化呈现出双通道的动态响应模式。DCO 对  $N_2H_4$  表现出高选择性(共存干扰物质无显著干扰)、低检测限( $LOD = 5.18 \mu mol/L$ )及宽 pH(5~9)适应性。通过核磁共振氢谱( $^1H NMR$ )的分析结果,确认了 DCO 对胍的识别机制涉及胍诱导的  $\alpha, \beta$ -不饱和羰基查尔酮环化反应。这一反应引发了基于分子内电荷转移(ICT)机制的比率型荧光响应。核磁共振氢谱( $^1H NMR$ )表征证实,DCO 对  $N_2H_4$  的识别机制为  $N_2H_4$  诱导的  $\alpha, \beta$ -不饱和羰基查尔酮环化反应,触发基于分子内电荷转移(ICT)的比率型荧光响应。这一新型探针的开发为环境和水生生物体系中痕量胍的检测提供了一种高效、可靠的分析手段,具有重要的应用价值。

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器

AVANCE NEO 600 MHz 核磁共振波谱仪( $Me_4Si$  作内标),德国布鲁克公司生产;FINNIGAN-LCQ DECA 型质谱仪,美国赛默飞公司生产;UV-6100 型双光束紫外-可见光分光光度计,上海美普达公司生产;Dual-FL 型荧光光谱仪,日本 HORIBA 公司生产;IR200 型傅里叶变换红外光谱仪(KBr 压片),美国赛默飞公司生产;WRS-1B 型数字熔点仪,温度计未经校正,上海精密仪器仪表有限公司生产;WP-UPT-10 型超纯水机,四川沃特尔水处理设备有限公司生产;PE28 型 pH 计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司生产。

### 1.2 实验试剂

7-二乙氨基香豆素、2-乙酰氨基吡啶、三氯氧磷、吡咯烷、 $N, N$ -二甲基甲酰胺、氯仿、二氯甲烷、甲醇、石油醚、水合肼、羟胺、三乙胺、苯胺、尿素、半胱

氨酸、丙氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、谷氨酸、硫化钠、硫氢化钠、亚硫酸钠、四丁基氰化铵,所有试剂均为市售分析纯级。实验用水为去离子水。

## 2 试验方法

### 2.1 探针 DCO 的合成

探针 DCO 的合成路线如图 1 所示。7-二乙氨基香豆素-3-醛(中间体 2)根据已报道文献<sup>[22]</sup>制备所得。

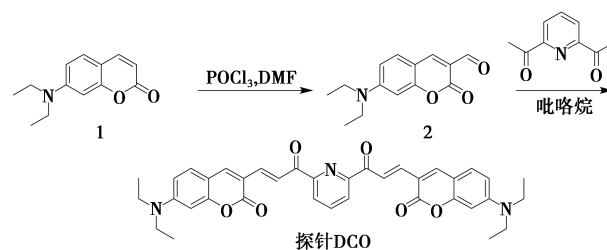


图 1 探针 DCO 的合成路线

探针 DCO 的合成:向圆底烧瓶中依次加入 7-二乙氨基香豆素-3-醛(736 mg, 3 mmol)和 2-乙酰氨基吡啶(163 mg, 1 mmol),将这些原料溶解在二氯甲烷/甲醇混合溶剂中(体积比 1:1, 6 mL),然后吡咯烷(2 滴)作为催化剂。在氮气( $N_2$ )氛围下,将反应混合物在室温下搅拌 24 h。反应完成后,通过减压蒸馏的方法除去溶剂。所得粗产品经柱纯化(洗脱剂:二氯甲烷/石油醚=1:1, v/v),得到红色固体探针 DCO(318 mg, 收率为 51.5%)。m. p. 267.2~268.8°C。IR(KBr),  $\nu, cm^{-1}$ : 3 458, 2 986, 2 377, 1 721, 1 629, 1 570, 1 518, 1 418, 1 338, 1 289, 1 200, 1 136, 1 000, 830。 $^1H NMR$ (600 MHz,  $CDCl_3$ ),  $\delta$ : 8.98(d,  $J = 15.9$  Hz, 2H), 8.30(d,  $J = 7.5$  Hz, 2H), 8.25(s, 2H), 7.99(t,  $J = 7.5$  Hz, 1H), 7.90(d,  $J = 15.9$  Hz, 2H), 7.65(d,  $J = 8.7$  Hz, 2H), 6.54(d,  $J = 8.7$  Hz, 2H), 6.38(s, 2H), 3.42(q,  $J = 7.3$  Hz, 8H), 1.23(t,  $J = 7.3$  Hz, 12H)。 $^{13}C NMR$ (151 MHz,  $CDCl_3$ ),  $\delta$ : 188.53, 160.85, 156.95, 153.12, 151.82, 144.18, 139.30, 138.10, 130.91, 125.27, 120.95, 115.50, 109.52, 109.30, 96.92, 91.92, 45.01, 29.68, 12.60, 12.51。ESI-MS,  $m/z$ : 618.57[ $M+1$ ] $^+$ 。

### 2.2 溶液的配制

水合肼、胺、氨基酸及阴离子溶液分别采用相应的市售试剂和钠盐或铵盐,配制成浓度为  $1 \times 10^{-2}$  mol/L 的去离子水溶液。探针 DCO 用氯仿溶解,定容得浓度为  $1 \times 10^{-3}$  mol/L 的储备液。光谱测试条件如下:激发波长 320 nm,狭缝宽 2 nm,荧光发射光

谱扫描范围 250~830 nm。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 探针 DCO 识别胍的响应

在探究探针 DCO 对  $N_2H_4$  的光学响应特性方面,本研究采用紫外-可见吸收光谱和荧光发射光谱(激发波长  $\lambda_{ex} = 320\text{ nm}$ )对 DCO 的动态响应过程进行了详细表征(图 2、图 3)。在室温条件下,将  $N_2H_4$ (1 mmol/L)加入到探针 DCO(10  $\mu\text{mol/L}$ )的 DMF/ $H_2O$ (体积比 9:1)溶液体系后,每隔 3 min 实时监测并记录光谱数据,持续观察 30 min。紫外-可见吸收光谱显示,476 nm 处的特征吸收峰随反应时间的推移呈梯度衰减直至完全消失。与此同时,在 378 nm 处新生吸收带随着反应的进行而持续增强,并伴随着溶液颜色从黄色逐渐转变为无色。这一变化趋势与荧光光谱的结果相一致,其中 DCO 在 593 nm 处基于分子内电荷转移( ICT)的黄色荧光发射被完全抑制,而 453 nm 处蓝色荧光发射则显著增强。值得注意的是,紫外-可见吸收光谱中 312 nm 与 410 nm 处呈现明确的等吸收点,荧光光谱中 546 nm 处出现等发射点。这些等吸收/发射点的出现进一步证实了反应体系中存在 2 种组分的动态平衡,从而支持了新荧光物质生成的结论。这些发现为深入理解探针 DCO 与  $N_2H_4$  之间相互作用的光学响应机制提供了重要的实验依据。

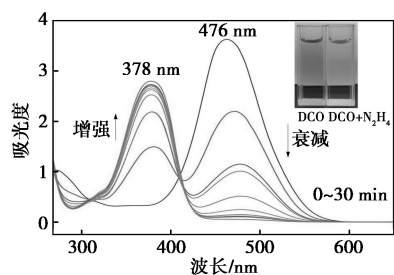


图 2 探针 DCO 对  $N_2H_4$  识别的紫外-可见吸收光谱

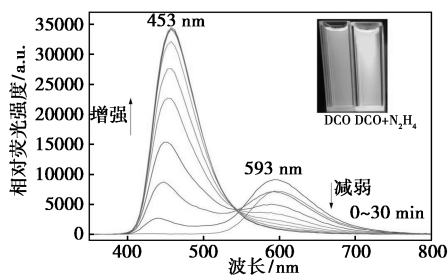


图 3 探针 DCO 对  $N_2H_4$  识别的荧光发射光谱( $\lambda_{ex} = 320\text{ nm}$ )

#### 3.2 探针 DCO 对胍识别的选择性和抗干扰能力

为评估探针 DCO 对  $N_2H_4$  的选择性识别能力,考察了 DCO 与生物体系常见物质(包括胺类、氨基酸及阴离子)的荧光响应特性。在 DCO(10  $\mu\text{mol/L}$ )的 DMF/ $H_2O$ (体积比 9:1)溶液体系中,分别加入  $N_2H_4$ (1 mmol/L)或等浓度的干扰物质(胺类:羟胺、三乙胺、苯胺、尿素;氨基酸:半胱氨酸、丙氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、谷氨酸;阴离子:  $S^{2-}$ 、 $HS^-$ 、 $SO_3^{2-}$ 、 $CN^-$ ),室温反应 30 min 后测定其荧光发射光谱( $\lambda_{ex} = 320\text{ nm}$ )。如图 4 所示,当仅加入  $N_2H_4$  时,DCO 在 593 nm 处的荧光强度显著猝灭,同时伴随着 453 nm 处出现新的荧光发射峰。其他干扰物质加入后,DCO 的荧光信号没有显著变化,这证实了 DCO 对  $N_2H_4$  具有高度的选择性。

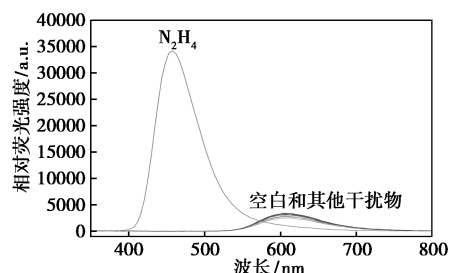


图 4 探针 DCO 加入不同干扰物质的荧光发射光谱( $\lambda_{ex} = 320\text{ nm}$ )

竞争性实验(表 1)进一步表明,当上述干扰物质(1 mmol/L)与  $N_2H_4$ (1 mmol/L)共存时,探针 DCO(10  $\mu\text{mol/L}$ )仍能维持对  $N_2H_4$  的特异性荧光

表 1 竞争性实验

干扰物	相对荧光强度(453 nm)/a. u.	
	DCO+ $N_2H_4$	DCO+ $N_2H_4$ +干扰物
羟胺	33624.58	29202.37
三乙胺	33706.10	31402.24
苯胺	32518.86	32689.10
尿素	33600.07	31309.39
半胱氨酸	32375.87	32151.01
丙氨酸	33541.81	31399.53
赖氨酸	32579.52	33739.82
苯丙氨酸	32647.65	31389.76
谷氨酸	33418.25	31776.29
$S^{2-}$	32748.64	30284.85
$HS^-$	33262.73	30624.99
$SO_3^{2-}$	33305.18	31199.17
$CN^-$	34004.35	32106.51

响应,即 593/453 nm 双通道变化趋势与单独加入  $N_2H_4$  时一致,且荧光强度变化幅度未受明显干扰。这一结果进一步证实了 DCO 在复杂生物基质中对  $N_2H_4$  检测的抗干扰性能显著,表明该探针在生物分析中的应用潜力。

### 3.3 浓度梯度实验及检测限

为评估探针 DCO 对  $N_2H_4$  的检测灵敏度,通过浓度梯度实验(从 0~120 摩尔当量)来考察探针的识别性能,结果如图 5 所示。当  $N_2H_4$  处于低浓度区间(0~60 摩尔当量)时,DCO (10  $\mu\text{mol/L}$ ) 在 593 nm 处的荧光发射强度呈现浓度依赖性增强,同时 453 nm 处新生发射带显著形成,推测该现象源于  $N_2H_4$  对探针分子中  $\alpha,\beta$ -不饱和羰基的特异性亲核加成,导致分子共轭体系重构及 ICT 效应增强。当  $N_2H_4$  浓度进一步增加到 70~110 当量时,593 nm 发射带逐步消减而 453 nm 处荧光强度持续上升。当  $N_2H_4$  浓度达到 110 当量时,双通道荧光强度比 ( $I_{453\text{ nm}}/I_{593\text{ nm}}$ ) 趋于稳定,这表明探针与  $N_2H_4$  之间的环化反应已经达到平衡。

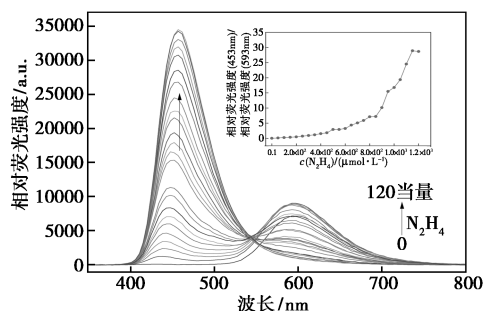


图 5 探针 DCO 在不同  $N_2H_4$  浓度下的荧光发射光谱 ( $\lambda_{\text{ex}} = 320\text{ nm}$ )

定量分析结果如图 6 所示,在 15~110 当量的  $N_2H_4$  浓度范围内,DCO 于 453 nm 处的荧光强度与  $N_2H_4$  浓度呈良好线性关系 ( $R^2 = 0.99675$ )。依据 IUPAC 推荐方法,采用  $\text{LOD} = 3\sigma/k$  公式计算得检测

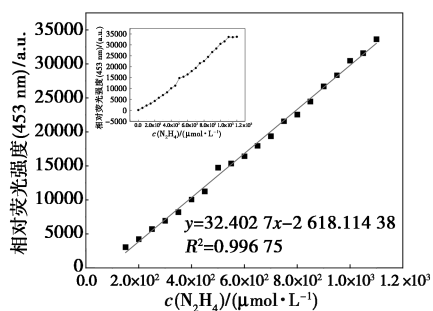


图 6 探针 DCO 在 453 nm 处荧光强度与  $N_2H_4$  浓度的线性关系

限(LOD)为 5.18  $\mu\text{mol/L}$  ( $\sigma$  为空白溶液 3 次测量的标准偏差; $k$  为标准曲线斜率),这个 LOD 值表明 DCO 对  $N_2H_4$  具有低至  $10^{-6}\text{ mol/L}$  级的检出能力,证实了该探针在检测  $N_2H_4$  方面的优异灵敏度。

### 3.4 pH 对探针 DCO 识别脲的影响

为评估探针 DCO 的生物环境适用性,考察了其在不同 pH 条件下的稳定性(图 7)。实验结果表明,探针 DCO (10  $\mu\text{mol/L}$ ) 在宽 pH 范围内(2~10)具有稳定的荧光性质。这一稳定性对于探针在生物体系中的应用至关重要,因为生物体内的 pH 通常在这个范围内波动。进一步的研究发现,当在含有  $N_2H_4$  (1 mmol/L) 体系中 DCO 的荧光发射行为,DCO 与  $N_2H_4$  反应生成的环化产物(DCO-Hy)在生理相关的 pH 范围(5~9)内也能保持稳定。这一特性意味着探针 DCO 及其反应产物在生理条件下具有良好的稳定性,使其能够在没有缓冲剂的条件下直接适应生理环境。这种在生理 pH 范围内保持稳定的能力对于探针在复杂生物体系中的实际应用具有重要意义。它确保了探针在生物样本中的有效性和可靠性,尤其是在那些不包含外部缓冲系统的生物化学实验中。因此,探针 DCO 的这种生物环境适用性为其在生物分析、细胞成像和生物医学研究等领域的应用提供了坚实的基础。

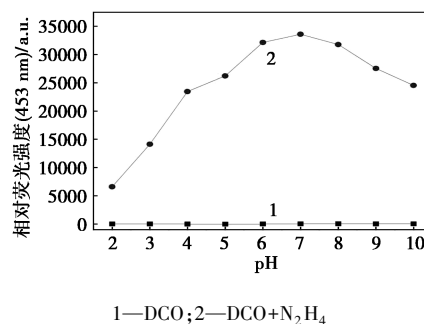


图 7 pH 对探针 DCO 识别  $N_2H_4$  的影响

### 3.5 探针 DCO 识别脲的机理探究

基于上述实验结果,可推断探针 DCO 与  $N_2H_4$  相互作用时, $N_2H_4$  诱导探针分子中  $\alpha,\beta$ -不饱和羰基发生查尔酮环化反应(图 8)。这一反应通过阻断分子内电荷转移( ICT) 导致荧光性质的显著变化,从而触发比率型荧光响应。为确证环化反应机制,通过柱层析分离获得反应产物 DCO-Hy,并采用  $^1\text{H NMR}$  (600 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ) 进行结构表征。对比 DCO 与 DCO-Hy 的核磁氢谱(图 9)发现,原探针结构中  $\alpha,\beta$ -不饱和羰基对应的烯基氢信号( $\delta 6.38$  和  $8.25 \times 10^{-6}$ ) 完全消失,同时在  $\delta 3.16 \times 10^{-6}$ 、 $3.68 \times$



- [5] Ragnarsson U. Synthetic methodology for alkyl substituted hydrazines[J]. *Chemical Society Reviews*, 2001, 30(4): 205-213.
- [6] Troyan J E. Properties, production, and uses of hydrazine[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1953, 45(12): 2608-2612.
- [7] Toth B. Synthetic and naturally occurring hydrazines as possible cancer causative agents[J]. *Cancer Research*, 1975, 35(12): 3693-3697.
- [8] Garrod S, Bollard M E, Nicholls A W, et al. Integrated metabonomic analysis of the multiorgan effects of hydrazine toxicity in the rat[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2005, 18(2): 115-122.
- [9] Reilly C A, Aust S D. Peroxidase substrates stimulate the oxidation of hydralazine to metabolites which cause single-strand breaks in DNA[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 1997, 10(3): 328-334.
- [10] Umar A, Rahman M M, Kim S H, et al. Zinc oxide nanonail based chemical sensor for hydrazine detection[J]. *Chemical Communications*, 2008, 44(1): 166-168.
- [11] Elias G, Bauer W F. Hydrazine determination in sludge samples by high-performance liquid chromatography[J]. *Journal of Separation Science*, 2006, 29(3): 460-464.
- [12] Song W T, Zhi J G, Wang T Y, et al. Tetrathienylethene-based positional isomers with aggregation-induced emission enabling super red-shifted reversible mechanochromism and naked-eye sensing of hydrazine vapor[J]. *Chemistry-An Asian Journal*, 2019, 14(21): 3875-3882.
- [13] Ensafi A A, Naderi B. Flow-injection spectrophotometric determination of hydrazine[J]. *Microchemical Journal*, 1997, 56(3): 269-275.
- [14] He Z K, Fuhrmann B, Spohn U. Coulometric microflow titrations with chemiluminescent and amperometric equivalence point detection; Bromimetric titration of low concentrations of hydrazine and ammonium[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, 409(1): 83-91.
- [15] Liu J P, Li Y Y, Jiang J, et al. C@ZnO nanorod array-based hydrazine electrochemical sensor with improved sensitivity and stability[J]. *Dalton Transactions*, 2010, 39(1): 8693-8697.
- [16] Meher N, Panda S, Kumar S, et al. Aldehyde group driven aggregation-induced enhanced emission in naphthalimides and its application for ultra-detection of hydrazine on multiple platforms[J]. *Chemical Science*, 2018, 9(16): 3978-3985.
- [17] Wu J J, Pan J, Ye Z, et al. A smart fluorescent probe for discriminative detection of hydrazine and bisulfite from different emission channels[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 274(1): 274-284.
- [18] Nguyen K H, Hao Y Q, Chen W S, et al. Recent progress in the development of fluorescent probes for hydrazine[J]. *Luminescence*, 2018, 33(5): 816-836.
- [19] Yang M W, Fan J L, Du J J, et al. Small-molecule fluorescent probes for imaging gaseous signaling molecules: Current progress and future implications[J]. *Chemical Science*, 2020, 11(20): 5127-5141.
- [20] Jung H S, Han J H, Habata Y, et al. An iminocoumarin-Cu(II) ensemble-based chemodosimeter toward thiols[J]. *Chemical Communications*, 2011, 47(18): 5142-5144.
- [21] Yuan L, Lin W Y, Song J Z, et al. Development of an ICT-based ratiometric fluorescent hypochlorite probe suitable for living cell imaging[J]. *Chemical Communications*, 2011, 47(47): 12691-12693.
- [22] Long L L, Wang L, Wu Y J, et al. Reaction-based fluorescent probe for detection of endogenous cyanide in real biological samples[J]. *Chemistry-An Asian Journal*, 2014, 9(11): 3291-3298. ■

## 沈化测评参与修订六项染料国家标准

日前,由沈化测评参与修订的《反应染料 色光和强度的测定》《染料及纺织染整助剂产品中喹啉及异喹啉的测定》等六项染料国家标准,经国家市场监督管理总局(国家标准委)批准正式发布。新标准将为染料产品生产、贸易、仲裁、质量监督检查等环节提供权威依据,推动行业规范与高质量发展。

其中,《反应染料 色光和强度的测定》整合了三项反应染料的色光强度测定相关标准,解决了以往标准存在的

交叉问题,体系更加精简,更便于行业使用;《染料及纺织染整助剂产品中喹啉及异喹啉的测定》增加了异喹啉的测定,为行业提供了规范统一的检测方法标准,有助于进一步规范行业秩序。

作为国家染料质量检验检测中心挂靠单位,沈化测评自2025年以来已完成16项国家标准、行业标准的制修订工作,有力推动行业高端化、绿色化、智能化发展,助力提升我国染料产品在国际市场的竞争力。(沈化测评)