

分类号:
学号: 20222107048

密级:
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



荧光点亮型快速检测神经毒剂模拟物的
钼基 MOFs 传感体系构建

学位申请人	冉梦婷
指导教师	窦新存 研究员
申请学位类别	材料与化工硕士
专业名称	材料与化工
研究领域	材料工程
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

分类号:
学号: 20222107048

密级:
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



荧光点亮型快速检测神经毒剂模拟物的 钼基 MOFs 传感体系构建

学位申请人	冉梦婷
指导教师	窦新存 研究员
申请学位门类级别	专业硕士
学科、专业名称	材料与化工
研究方向	材料工程
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Zr-MOFs Construction for Rapid Fluorescence Turn-On Detection of
Nerve Agent Analogs**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Ran Mengting

Dissertation Supervisor: Professor Dou Xincun

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：



时间：2025年 6 月 3 日

使用授权声明

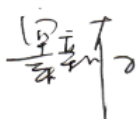
本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：



时间：2025 年 6 月 3 日

导师签名：



时间：2025 年 6 月 3 日

摘要

有机磷神经毒剂（如沙林等）毒性高、危害大，现有检测技术存在局限，亟需开发高灵敏、高选择性的便携式传感技术。金属有机框架（metal-organic frameworks, MOFs）在神经毒剂检测方面潜力大，但受传统水热合成法结晶动力学局限存在不足，限制了其应用。本论文聚焦结晶动力学调控，以羧基化纤维素纳米纤维（Cellulose nanofibrils, CNFs）为模板诱导 MOFs 原位生长，提升 MOFs 对神经毒剂模拟物氰基磷酸二乙酯（diethyl cyanophosphonate, DCNP）的传感性能。基于羧基化 CNFs 诱导 UiO-66 原位生长策略，获得不同尺寸及活性位点的 UiO-66 材料，筛选合成条件并明确 CNFs 对 UiO-66 结构调控的关键因子；通过邻苯二胺（ortho-phenylenediamin, OPD）功能化得到氨基活性位点丰富的 UiO-66 基探针，探究其对 DCNP 的检测性能并阐明基于分子内电荷转移（intramolecular charge transfer, ICT）的检测机制；基于所得探针荧光性能及 CNFs 自组装性能，构筑荧光点亮型薄膜传感体系，评估传感膜结构对 DCNP 传感性能的影响，阐明构效关系，实现复杂环境下对 DCNP 气氛的现场可视化、高灵敏检测，主要开展了以下三个方面的研究。

（1）纳米纤维素诱导锆基 MOFs 可控制备及结构表征

开发了一种通用且可持续的制备策略，通过 CNFs 诱导的原位生长策略，构建纳米尺寸、可自组装成膜的 MOFs 材料，以突破传统结晶动力学的限制。研究中采用溶剂热合成法，通过调控 CNFs 与 MOFs 前驱体的质量比，制备出不同尺寸的 UiO-66-Br@CNF，进一步基于 OPD 后修饰获得氨基功能化 UiO-66-OPD@CNF 探针。经表征分析，明确了 UiO-66 的纳米尺寸随 CNFs 添加量的增加而缩小的调控规律。经条件筛选，确定 CNFs 与金属前驱体质量比 3:7 为最佳生长条件，且氨基功能化的 UiO-66-OPD@CNF 探针基于亲核取代反应对 DCNP 呈现灵敏响应，证实了功能化 MOFs 荧光传感材料构建策略可行。

（2）锆基 MOFs 对 DCNP 检测性能系统评估及传感机制研究

所得 UiO-66 纳米结构传感材料体系具有检测前低荧光背景，检测过程中能实现外表面荧光更快、无阻碍的释放，固呈现出色的检测性能。与传统水热合成法制备的 UiO-66-OPD 相比，经 CNFs 诱导的原位生长法制备的小尺寸 UiO-66-OPD@CNF 具有更理想的检测性能，其检测限（limit of detection, LOD）值低至 4.2 nM (0.685 ppb)，约为 UiO-66-OPD 的 1/8，且选择性和抗干扰能力强，检测性能不受 21 种常见干扰物的影响。经理论计算与实验验证，明确 UiO-66-OPD@CNF 荧光探针是基于分子内电荷转移原理检测 DCNP。

（3）DCNP 气氛现场可视化膜基传感器件构建及性能研究

针对神经性毒剂气氛检测需求，基于 CNFs 良好的自组装性能，可直接构建 UiO-66-OPD@CNF 基柔性荧光传感薄膜，也可通过 3D 打印辅助组装便携式传感器件，实现对 DCNP 气氛的即时灵敏

检测。荧光传感膜及器件均可实现高特异性检测 DCNP 气氛，1 秒内呈现肉眼可识别的荧光信号，并对 19 种干扰物抗干扰能力和选择性强。本研究从敏感基元的结构设计及传感材料体系构建的角度出发，为提升痕量物质传感性能提供实验依据，为开发实战检测装置奠定材料基础，有望推动相关检测技术应用发展。

关键词：金属有机框架（MOFs）；荧光传感；神经毒剂；原位生长；纳米纤维素

Abstract

Organophosphorus nerve agents (e.g. sarin, soman, tabun, VX) are highly toxic and pose great harm. Existing detection technologies have limitations, and there is an urgent need to develop highly sensitive and selective portable sensing technologies. Metal-organic frameworks (MOFs) have great potential in the detection of nerve agents. However, limited by the crystallization kinetics of the traditional hydrothermal synthesis method, they have some deficiencies, which restricts their application. By focusing on the regulation of crystallization kinetics and using carboxylated cellulose nanofibrils (CNFs) as a template to induce the in-situ growth of MOFs, the sensing performance of MOFs towards the nerve agent mimic, diethyl cyanophosphate (DCNP), is improved. Based on the strategy of *in-situ* growth of UiO-66 induced by carboxylated CNFs, UiO-66 materials with different sizes and active sites are obtained. The synthesis conditions are screened, and the key factors of CNFs in regulating the structure of UiO-66 are clarified. Through the functionalization of ortho-phenylenediamine (OPD), a UiO-66-based probe rich in amino active sites is obtained. The detection performance of this probe towards DCNP is investigated, and the detection mechanism based on intramolecular charge transfer (ICT) is elucidated. Furthermore, based on the unique fluorescence properties of the obtained UiO-66-based probe and the excellent self-assembly properties of CNFs, a fluorescence turn-on thin film sensing system is constructed. The influence of the structure of the sensing film on the sensing performance towards DCNP is evaluated, and the structure-activity relationship is clarified. This enables on-site visual and highly sensitive detection of DCNP in the atmosphere under complex environments. The research is mainly carried out in the following three aspects:

(1) Size-controllable preparation and structural characterization of nanocellulose-induced zirconium-based MOFs

A versatile and sustainable preparation strategy was developed to construct nano-sized, self-assembled film-forming MOFs materials by CNFs-induced *in-situ* growth strategy to break through the limitations of conventional crystallization kinetics. In the study, solvothermal synthesis was employed to prepare UiO-66-Br@CNF with different sizes by regulating the mass ratio of CNFs to MOFs precursors, and further amino-functionalized UiO-66-OPD@CNF probes were obtained based on OPD post-modification. Upon characterization and analysis, the regulation law that the nanosize of UiO-66 shrinks with the increase of CNFs addition was clarified. After screening the conditions, it was determined that the mass ratio of CNFs to metal precursors of 3:7 was the optimal growth condition, and the amino-functionalized UiO-66-OPD@CNF probe showed a sensitive response to DCNP based on the nucleophilic substitution reaction, which confirms the feasibility of the strategy of constructing fluorescent sensing materials with

functionalized MOFs.

(2) Systematic evaluation of the detection performance of zirconium-based MOFs for DCNP and study of the sensing mechanism

The resulting UiO-66 nanostructured sensing material system has a low fluorescence background before detection, and enables faster and unimpeded release of fluorescence from the outer surface during detection, inherently presenting excellent detection performance. The detection system of UiO-66 for DCNP was optimized to evaluate the sensing performance of small-sized UiO-66-OPD@CNF induced by CNFs in the *in-situ* growth method and prepared UiO-66-OPD, as compared to UiO-66-OPD prepared by the traditional hydrothermal synthesis method. The results show that the small-sized UiO-66-OPD@CNF has a better detection performance is better, and the limit of detection (LOD) value is as low as 4.2 nM (0.685 ppb), which is about 1/8 of that of the UiO-66-OPD, and the selectivity and anti-interference ability is strong, the detection performance of the UiO-66 system probes is not affected by the face of the 21 common interferences Detection performance is unaffected by the face of the 21 common interferences, the selectivity and anti-interference ability is strong. The UiO-66 system is not affected by the 21 common interferences, and has strong selectivity and anti-interference ability. After theoretical calculation and experimental verification, it is clear that the UiO-66-OPD@CNF fluorescent probe is based on the principle of intramolecular charge transfer to detect DCNP.

(3) Construction and performance study of membrane-based sensor devices for on-site visualization of DCNP atmosphere

For the demand of nerve agent atmosphere detection, based on the good self-assembly performance of CNFs, UiO-66-OPD@CNF-based flexible fluorescence sensing film can be directly constructed, and portable sensing chip can also be assembled with the assistance of 3D printing to realize the immediate and sensitive detection of DCNP atmosphere. Both the fluorescent sensing film and the chip can achieve highly specific detection of DCNP atmosphere, presenting fluorescent signals recognizable by the naked eye within 1 s, and have high anti-interference ability and selectivity against 19 interfering substances. From the perspective of structural design of sensitive primitives and construction of sensing material system, this study provides experimental basis for enhancing the sensing performance of trace substances, lays the material foundation for the development of real-world detection devices, and is expected to promote the development of related detection technology applications.

Key words: MOFs, fluorescent sensing, nerve agent, *in-situ* growth, cellulose

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 神经毒剂概述.....	1
1.2 现有神经毒剂的检测方法.....	1
1.2.1 色谱-质谱联用方法.....	2
1.2.2 基于生物效应的检测技术.....	3
1.2.3 便携式离子迁移谱技术.....	3
1.2.4 SERS 技术.....	3
1.2.5 电化学检测法.....	4
1.2.6 荧光检测法.....	6
1.3 现有检测神经毒剂的荧光探针.....	6
1.3.1 小分子荧光探针.....	7
1.3.2 MOFs 荧光探针的开发与应用.....	10
1.4 纤维素基荧光材料在化学传感中的应用.....	12
1.4.1 纤维素基荧光传感材料.....	12
1.4.2 纤维素-MOFs 复合荧光传感材料的构建及应用.....	14
1.5 本文研究内容及创新点.....	15
1.5.1 研究内容.....	15
1.5.2 创新点.....	16
第 2 章 纳米纤维素诱导铅基 MOFs 的可控制备及结构表征.....	17
2.1 前言.....	17
2.2 实验部分.....	18
2.2.1 主要化学试剂和实验仪器.....	18
2.2.2 UiO-66-Br 和 UiO-66-Br@CNF 的制备.....	20
2.2.3 UiO-66-OPD 和 UiO-66-OPD@CNF 的制备.....	21
2.2.4 材料表征及其性能分析方法.....	21

2.3	结果与讨论	22
2.3.1	UiO-66-Br 和 UiO-66-Br@CNF 材料的设计制备	22
2.3.2	UiO-66-Br 和 UiO-66-Br@CNF 材料的表征	23
2.3.3	UiO-66-OPD 和 UiO-66-OPD@CNF 探针的结构表征	28
2.4	小结	30
第 3 章	铅基 MOFs 对 DCNP 检测性能系统评估及传感机制研究	32
3.1	前言	32
3.2	材料与方法	33
3.2.1	主要化学试剂和实验仪器	33
3.2.2	铅基 MOFs 探针体系检测 DCNP 的实验条件优化	34
3.2.3	铅基 MOFs 材料传感体系的性能测试方法	35
3.2.4	空穴-电子分布、态密度分析和分子轨道能级分析方法	36
3.3	结果与讨论	37
3.3.1	UiO-66-OPD@CNF 对 DCNP 的分析测试条件研究	37
3.3.2	UiO-66-OPD@CNF 对 DCNP 的分析测试性能研究	38
3.3.3	UiO-66-OPD@CNF 对 DCNP 的检测机制研究	42
3.4	小结	46
第 4 章	DCNP 气氛现场可视化膜基传感器件构建及性能研究	48
4.1	前言	48
4.2	现场可视化传感器件构建方法	49
4.3	结果与讨论	49
4.3.1	UiO-66-OPD@CNF/膜基传感器件设计	49
4.3.2	UiO-66-OPD@CNF/膜基传感器件优化	50
4.3.3	UiO-66-OPD@CNF/膜基传感器件对 DCNP 气氛的检测性能研究	52
4.4	小结	55
第 5 章	总结与展望	57
5.1	总结	57
5.2	展望	58
	参考文献	59
	致谢	68
	作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与学术研究成果	70
	石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表	72

第1章 绪论

1.1 神经毒剂概述

有机磷神经毒剂如沙林 (Sarin, GB)、梭曼 (Soman, GD)、塔崩 (Tabun, GA) 和 VX 毒剂等 (图 1-1), 具有高毒性和快速致死性等特点, 严重威胁人类健康^[1,2]。因此, 基于国民安全及未来国际形势变化可能产生的检测需求, 研发针对神经毒剂的快速检测材料与方法, 对保障人类健康、维护国家和社会稳定意义重大且具战略价值。

有机磷神经毒剂自身独特的理化性质, 加上检测所涉及的复杂多样应用场景, 使得当前有机磷神经毒剂的现场检测工作面临诸多挑战, 对检测技术也提出了现场、高灵敏度、即时立显、抗干扰性强以及操作简单等要求。由于有机磷神经毒剂具有极高的毒性和危险性, 直接用于研究存在极大的安全风险, 不仅严重威胁研究人员生命健康, 还会对实验环境造成极大危害。而其模拟物的毒性较低或无毒, 能够在保证研究人员安全的前提下, 模拟神经毒剂的一些化学性质和作用机制, 为科研工作提供了可行的研究对象^[3]。

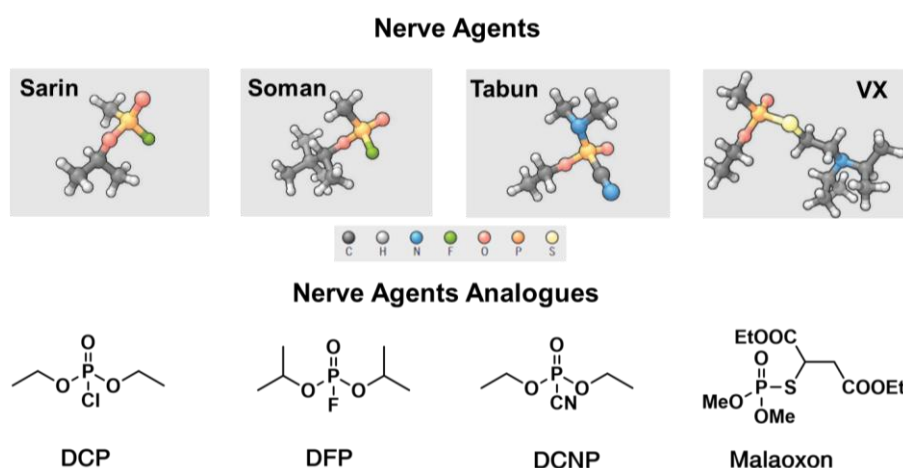


图 1-1 有机磷神经毒剂及其模拟物的化学式

Figure 1-1 Chemical formulas for organophosphorus nerve agents and their analogues

1.2 现有神经毒剂的检测方法

目前已经发展出了多种神经毒剂检测技术, 如基于色谱-质谱联用的方法、电化学传

感器技术、基于生物效应的检测技术、便携式离子迁移谱技术、表面增强拉曼散射（Surface-Enhanced Raman Scattering, SERS）技术和荧光检测法等（图 1-2）^[4-9]。

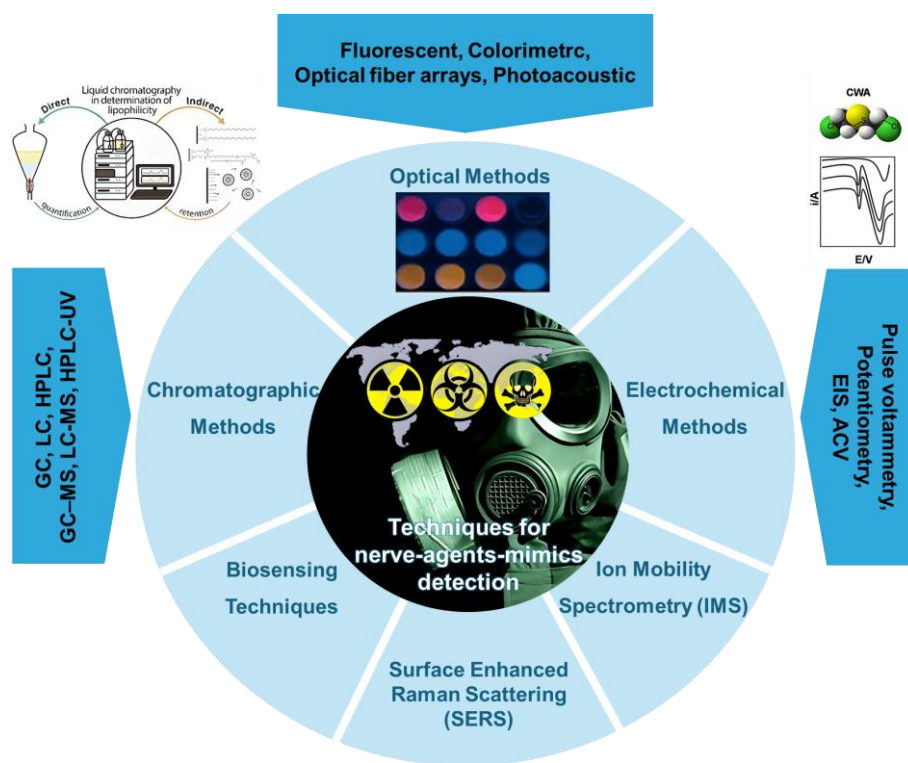


图 1-2 现有神经毒剂检测方法示意图

Figure 1-2 Schematic representation of existing nerve agent detection methods

1.2.1 色谱-质谱联用方法

该方法利用不同物质在固定相和流动相之间分配系数的差异，使混合物中各组分在两相间进行多次分配，从而实现分离。质谱则是通过测定离子的质荷比来确定化合物的分子量和结构。该技术能够精确检测到痕量的神经毒剂，是目前实验室检测神经毒剂的标准方法之一^[10]。日本国家警察科学研究所 Shunsuke Matsuo 课题组^[11]聚焦于氟化物介导的人血清中神经毒剂加合物再生所产生的氟化磷酸酯的测定，采用气相色谱-质谱联用螺旋大体积进样技术，利用其增大进样量、预浓缩分离样品，结合气相色谱和质谱特性，实现了对氟化磷酸酯的分离与定性定量分析。美国佛罗里达大学 Timothy J Garrett 课题组^[12]为验证神经毒剂代谢物与骨骼相互作用的假设，采用液相色谱-质谱联用技术，开发了从骨组织中提取、分离和半定量检测神经毒剂代谢物的方法，并在三重四极杆仪器上进行了验证。

但此方法样本前处理过程极为复杂，需经过多步提取、净化和浓缩等操作，耗费大

量时间和人力；从设备层面来看，仪器体积庞大、价格昂贵，购置和维护成本高。同时，该方法对操作人员的专业知识和技能要求高，需专业技术人员进行操作和维护。此外，仪器对使用环境要求苛刻，难以在现场复杂环境下使用。

1.2.2 基于生物效应的检测技术

该方法利用神经毒剂对生物系统产生的特定影响，如对生物酶活性的抑制、对细胞生理功能的改变等，来间接检测神经毒剂的存在。例如，基于乙酰胆碱酯酶被神经毒剂抑制后，酶促反应发生变化，从而检测神经毒剂。该方法具有一定的生物特异性，能快速检测神经毒剂对生物系统产生的影响，检测过程相对简单，无需复杂的仪器设备，可在一些现场初步筛查中发挥作用。武汉科技大学严红焯课题组^[7]基合成了微量 Bi 掺杂的核壳介孔纳米球，该纳米球具备良好的类过氧化物酶活性与特异性，并以此构建了用于乙酰胆碱酯酶活性检测的比色平台，进一步与 AChE 结合开发了检测有机磷神经毒剂的生物传感器。但是特异性相对较低，易受环境中其他物质干扰，导致误报或漏报。同时，无法准确区分不同种类的神经毒剂，难以确定毒剂的具体化学结构和成分。并且，检测结果易受生物个体差异、环境因素等影响，稳定性欠佳。

1.2.3 便携式离子迁移谱技术

在电场的作用下，气态样品里的离子会朝着迁移管中的固定电极移动。由于不同离子的迁移速度存在差异，利用这一特性，便能实现对它们的分离与检测^[13]。基于这种原理所设计的设备，体积小且便于携带，能满足现场快速检测的需求；检测速度相当快，短时间内就能输出检测结果，非常契合应急响应的场景；操作过程相对简易，即便不是专业技术人员，也能够利用它开展初步检测工作。~~伊朗伊玛目侯赛因大学 Bozorgmehr Maddah 课题组^[14]~~伊朗伊玛目侯赛因大学 Bozorgmehr Maddah 课题组^[14]提出了一种基于中空纤维膜保护固相微萃取结合电晕放电离子迁移谱测定饮料中甲基磷酸二甲酯的新方法，通过实验设计优化了影响因素，成功应用于多种饮料中甲基磷酸二甲酯的测定。然而，该方法的灵敏度有限，对于低浓度的神经毒剂检测效果不佳。同时，该方法的特异性不强，在复杂环境中容易受到其他化学物质的干扰，导致检测结果不准确。此外，检测结果的准确性和可靠性相对较低，常需进一步的实验室分析进行确认。

1.2.4 SERS 技术

当分子吸附在特殊制备的纳米结构表面时，其拉曼散射信号会得到极大增强，通过

检测这种增强的拉曼信号来分析分子的结构和成分,从而检测神经毒剂^[15]。该方法具有较高的灵敏度,能够检测到低浓度的神经毒剂;检测速度较快,可实现快速分析;对样品的损伤较小,无需复杂的样品前处理过程。军事医学科学院谢剑炜课题组^[9]提出一种新拉曼增强策略,将 2-(二甲基氨基甲基)-3-羟基吡啶用于捕获目标有机磷神经毒剂,该策略能有效区分不同有机磷神经毒剂,检测过程中剧毒有机磷神经毒剂可转化为低毒或无毒衍生物。中国科学院固体物理研究所蔡伟平课题组^[16]致力于 SERS 基质的优化研究,通过对 SERS 基质进行表面修饰,采用经 2-氨基乙硫醇改性的镀金 Si 纳米阵列作为 SERS 底物,成功实现了对沙林模拟剂甲磷酸的超灵敏检测。提供了基于 SERS 检测有机磷神经药及其他弱相互作用靶分子的新方法(图 1-3)。但该方法的缺点也显而易见,一方面,检测信号易受基底材料、环境因素等影响,稳定性有待提高;另一方面,对复杂样品的检测存在一定困难,需要进一步优化检测方法和条件。此外,目前相关技术和设备还不够成熟,应用范围相对较窄。

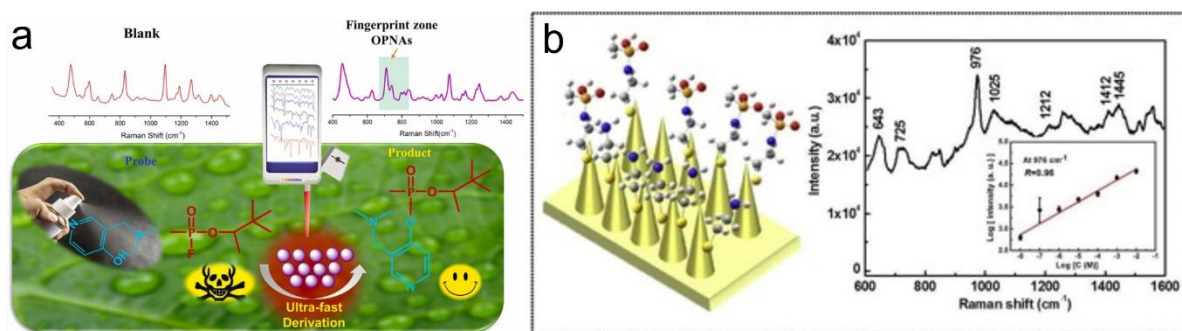


图 1-3 表面增强拉曼散射技术应用于检测神经毒剂^[9,16]

Figure 1-3 Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS) technology for the detection of nerve agents

1.2.5 电化学检测法

基于神经毒剂与电极表面修饰的特异性识别物质发生电化学反应,通过检测电流、电位或电量等电化学信号的变化来实现对神经毒剂的检测。该方法的优点是检测速度快,能在短时间内得出结果,满足应急检测需求;设备相对简单、小型化,便于携带,可用于现场检测;灵敏度较高,可检测低浓度的神经毒剂;成本相对较低,适合大规模应用和日常监测。大连化物所卢宪波研究员和陈吉平研究员课题组^[17]设计合成了一系列二维导电金属有机框架(conductive MOFs, cMOFs),并制备电化学生物传感器。cMOFs 良好的导电性和稳定性以及活性位点的有序排列展现出优异协同效应。实现多种介质中神经毒剂的超灵敏抗干扰快速检测。新加坡制造技术研究所 Sum Huan Ng 课题组^[18]采用安培检测法,利用集成在微流控芯片内的丝网印刷电极开展研究。研究人员将固定于微流

控平台的生物传感器置于含有沙林的水样中,成功实现了对水样中低浓度沙林的痕量检测。意大利罗马第二大学 Fabiana Arduini 课题组^[19]开发了一种可直接使用的纸基电化学生物传感器,应用于神经毒剂检测。该传感器通过创新的集成化设计,将多种功能组件整合在纸基材料上,利用纸基材料的特性与独特的电化学设计,实现了对神经毒剂的高效检测。

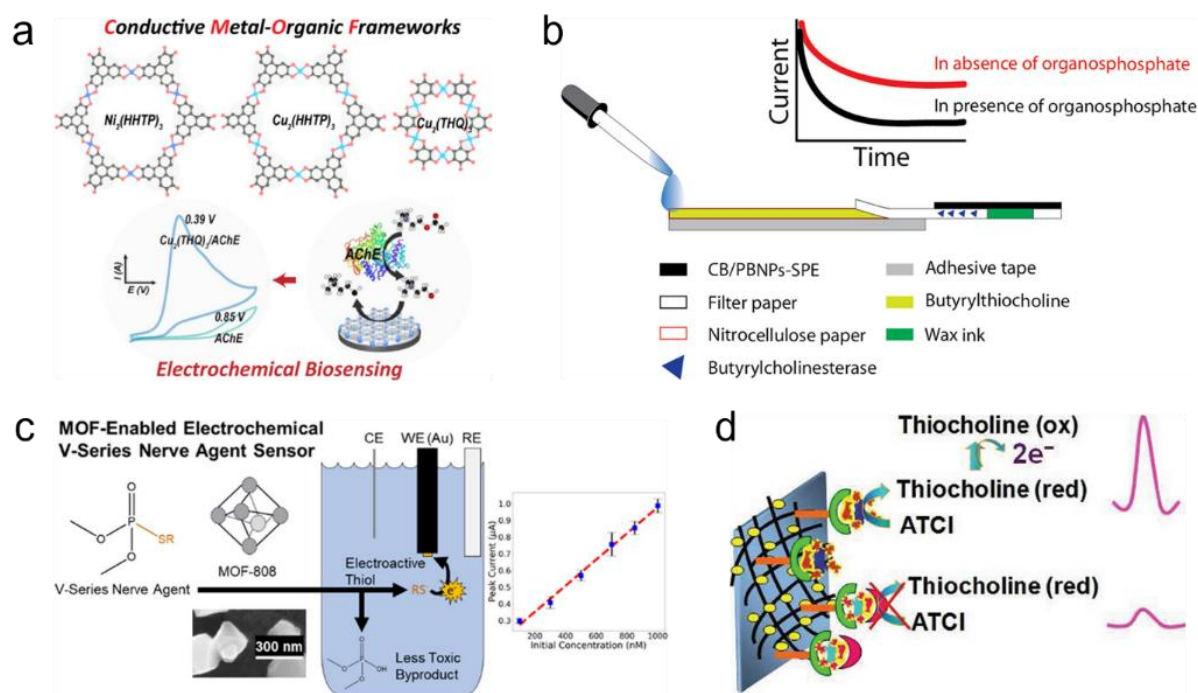


图 1-4 电化学法检测神经毒剂^[17,19-21]

Figure 1-4 Electrochemical detection of nerve agents

华中师范大学牡丹课题组和美国华盛顿州立大学林跃和课题组^[20]合作开发出一种针对红细胞中乙酰胆碱酯酶活性的检测方法。该方法具有高灵敏度与高选择性,整合免疫捕获和电化学检测技术,在优化实验条件后,实现了对 AChE 活性变化的高灵敏探测,同时凭借免疫捕获的特异性,可以有效排除干扰,精准测定 AChE 活性。鉴于 AChE 活性是反映机体暴露于有机磷农药和神经毒剂的关键生物标志物,此检测方法为评估此类暴露风险提供了强有力的工具。美国杨百翰大学 John N. Harb 课题组^[21]成功研制出一种基于 MOFs 材料的电化学传感器,可快速、可靠地检测低浓度 V 型神经毒剂。通过将 MOFs 材料应用于电化学传感体系,利用其独特的结构特性,为神经毒剂提供大量吸附和富集位点,从而显著提高传感器对低浓度 V 型神经毒剂的检测灵敏度(图 1-4)。但该方法仍存在一些缺陷,首先选择性不够理想,在复杂样品中易受共存物质干扰,影响检测准确性;电极的稳定性和重现性有待提升,长期使用或在不同环境下,电极性能可能

发生变化；对检测条件要求较为严格，如溶液的 pH 值、温度等，条件波动可能影响检测结果。

1.2.6 荧光检测法

荧光法检测神经毒剂的核心原理是利用待测物结构中的磷酰基、磷酸酯等亲电基团，与探针分子中富电子的亲核位点（如酚羟基、氨基）发生亲核取代反应，触发荧光信号的特异性转换^[22,23]。探针设计主要基于分子内电荷转移（intramolecular charge transfer, ICT）、光诱导电子转移（photoinduced electron transfer, PET）或荧光共振能量转移（fluorescence resonance energy transfer, FRET）机制，当神经毒剂与探针结合，其亲电中心与亲核位点发生共价键合，破坏探针原有电子共轭路径或能量传递过程，导致荧光强度（如 PET 机制下荧光猝灭或点亮）或比率（如 FRET 机制下双信号强度比变化）发生特征性改变。该方法通过化学识别与光学信号的耦合，兼具高灵敏度（检测限可达纳摩尔级）与快速响应（秒级）特性，为神经毒剂的痕量检测与实时预警提供了高效解决方案。

荧光检测技术是利用荧光物质与神经毒剂发生特异性相互作用后，荧光强度、波长或寿命等荧光特性发生变化，通过检测这些变化来实现对待测物的检测。在神经毒剂检测领域，中国科学院新疆理化技术研究所痕量化学物质感知课题组近年来通过分子工程与材料设计的双维度策略，系统性地解决了高灵敏度检测与复杂环境适应性的关键挑战。前期研究中，该团队通过减少自聚集从而降低背景干扰，并结合聚集诱导发光（Aggregation-Induced Emission, AIE）与分子内电荷转移双重机制协同作用的小分子探针^[24]，实现了高灵敏的快速检测。在此基础上，其课题组最新工作^[25]进一步将传感材料拓展至金属有机框架材料体系，通过精准孔道设计，突破了传统方法在强酸性条件下的性能瓶颈，实现了宽 pH 范围内对真实有机磷毒剂的抗干扰识别。

1.3 现有检测神经毒剂的荧光探针

现有检测神经毒剂的荧光探针主要有有机小分子及 MOFs 等材料体系。小分子探针是通过识别基团（如肟基）与有机磷毒剂的磷酸酯键的特异性化学反应（如亲核取代）触发荧光信号；纳米粒子如量子点和上转换纳米粒子等是通过与金属离子（如 Cu^{2+} ）结合形成荧光猝灭体系，毒剂竞争性结合金属离子后恢复荧光；MOFs 材料则通过金属节点与有机配体的协同作用，结合其多孔结构的高吸附容量，实现了对毒剂分子的选择性捕获与荧光信号放大，在神经毒剂检测领域展现出独特优势。