

氮化碳及其复合材料在样品前处理领域的应用

念琪循, 赵腾雯, 张子扬, 王学生, 王曼曼*

(华北理工大学 公共卫生学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 氮化碳($g-C_3N_4$)是一种新型二维碳纳米材料, 目前已在催化降解、生物传感、能源存储和生物医药等领域得到了广泛应用。 $g-C_3N_4$ 材料结构中丰富的含氮官能团和电子离域特性, 赋予其独特的理化性质, 使之能够与一些离子或分子产生络合、疏水、 $\pi-\pi$ 键、氢键和静电力等相互作用。此外, $g-C_3N_4$ 材料比表面积大、性质稳定且制备简单, 价格低廉, 在样品前处理领域展现出良好的应用潜力。近几年, 基于 $g-C_3N_4$ 材料的样品前处理新方法不断涌现, 该文总结了 $g-C_3N_4$ 及其复合材料在固相萃取、磁性固相萃取和固相微萃取等领域的应用并进行了展望。

关键词: 氮化碳; 样品前处理; 固相萃取; 磁性固相萃取; 固相微萃取; 综述

中图分类号: O657.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2020)07-0929-06

Applications of Graphitic Carbon Nitride and Its Composites in Sample Pretreatment

NIAN Qi-xun, ZHAO Teng-wen, ZHANG Zi-yang, WANG Xue-sheng, WANG Man-man*

(School of Public Health, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Graphitic carbon nitride($g-C_3N_4$), a novel two-dimensional carbon-based nanomaterial, has been widely applied in catalysis degradation, biosensor, energy storage and biomedicine. The in-built N-rich functional groups and electronic delocalization properties endow $g-C_3N_4$ with complex adsorption capabilities, including complexation, hydrophobic effect, $\pi-\pi$ conjugation, hydrogen bond and electrostatic interaction. Particularly, the large specific surface area, satisfactory pH tolerance, facile and inexpensive preparation of $g-C_3N_4$ make itself qualified as an extraordinarily wonderful adsorbent. In recent years, $g-C_3N_4$ and its composites have been applied to the sample pretreatment in solid-phase extraction, magnetic solid-phase extraction and solid-phase microextraction. In this review, the applications of $g-C_3N_4$ materials in sample pretreatment are summarized, and the future trends and prospects of $g-C_3N_4$ and its composites in sample pretreatment are also presented.

Key words: graphitic carbon nitride; sample pretreatment; solid-phase extraction; magnetic solid-phase extraction; solid-phase microextraction; review

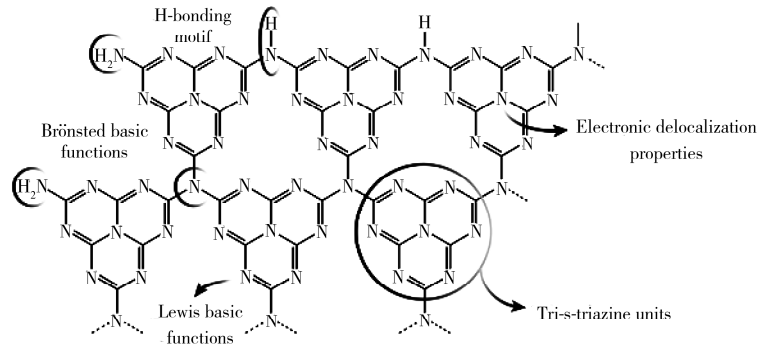
一个完整的样品分析过程通常包括样品采集、前处理、仪器分析和数据分析。其中, 样品前处理是整个分析过程最为繁琐和费时费力的环节, 决定着方法的时间、成本和灵敏度。随着生物医药、环境和食品等领域研究的深入, 传统的样品前处理方法不足以满足日益增长的样品种类以及极低的待测物含量检出要求。因此, 基于新材料发展新型样品前处理吸附剂用于复杂样品体系中风险化合物的分析, 成为当前的研究重点和热点。

氮化碳(Graphitic carbon nitride, $g-C_3N_4$, 图1)是一种仅由C和N两种元素组成的二维纳米材料, 其C原子和N原子以 sp^2 方式进行杂化形成二维蜂窝状晶格结构, 每两个环之间通过N原子连接在一起, 通过 p_z 轨道上的孤对电子形成类似苯环结构的 π 共轭体系^[1-2]。 $g-C_3N_4$ 的紧密堆积方式和杂化成键连接特点赋予其独特的物理化学性质, 使之具有良好的化学稳定性、热稳定性, 卓越的光催化活性和耐光性, 是继石墨烯材料之后, 备受瞩目的二维纳米材料, 在催化降解、生物传感、能源存储和生物医药等领域具有巨大的应用前景^[3-10]。

收稿日期: 2020-02-21; 修回日期: 2020-03-20

基金项目: 河北省自然科学基金(H2017209232); 河北省教育厅重点项目(ZD2018014); 华北理工大学培育基金项目(JQ201717)

*通讯作者: 王曼曼, 博士, 教授, 研究方向: 卫生化学, E-mail: mmwangheuu@126.com

图 1 $g-C_3N_4$ 的化学结构式Fig. 1 Chemical structure of $g-C_3N_4$

与石墨烯材料相比, $g-C_3N_4$ 结构中的富 N 功能基团及电子离域特性使之能够和一些离子或分子产生络合、疏水、 $\pi-\pi$ 键、氢键和静电力等相互作用; 其层间距约 0.326 nm, 略小于石墨的层间距, 剥离相对容易, 且在剥离过程中产生的 N 缺陷便于 $g-C_3N_4$ 的进一步修饰改性; 同时, $g-C_3N_4$ 可由尿素、硫脲等前驱体获得, 合成方法简单绿色。基于以上性质, $g-C_3N_4$ 在样品前处理领域中显示出良好的应用潜力^[11]。目前基于 $g-C_3N_4$ 及其复合材料所开发的前处理技术主要包括固相萃取^[12-20]、磁性固相萃取^[21-34]和固相微萃取^[35-43]。为了系统了解该领域的研究进展, 在前人研究(2016年)^[11]的基础上, 本文对 2014~2019 年 $g-C_3N_4$ 及其复合材料在样品前处理中的应用进行全面地评述和展望(表 1)。

表 1 $g-C_3N_4$ 及其复合材料在样品前处理中的应用Table 1 Applications of $g-C_3N_4$ and its composites in sample pretreatment

Sorbent	Extraction method	Sample	Analyte	Analytical method	Limit of quantitation	Recovery (%)	Reference
$g-C_3N_4$	d-SPE	Soil, wheat, wheat straw	Herbicides	LC-MS ^a	$2.4 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ mg/kg	80.0~110	[12]
$g-C_3N_4$	d-SPE	Tap water, lake water	Phenoxy carboxylic acids	DART-MS ^b	1.7~6.7 ng/L	79.9~119	[13]
$g-C_3N_4$	d-SPE	Fruits	Flavonoids	HPLC-UVD ^c	2~12.5 ng/mL	92.5~99.0	[14]
$g-C_3N_4$	MSPD ^d	Soil	Nitrotoluenes	HPLC-UVD	0.40~1.10 μ g/g	78.0~96.0	[15]
$g-C_3N_4$	d-SPE	Juice	Benzoylurea pesticides	HPLC-UVD	20 μ g/L	70.4~96.4	[16]
$g-C_3N_4@SiO_2$	SPE	Environmental water	Fluoroquinolone drugs	HPLC-FLD ^e	10~20 ng/L	70.0~114	[17]
$g-C_3N_4@SiO_2$	SPE	Coconut water	Aromatic acids	HPLC-UVD	6.2~16.0 ng/mL	81.1~122	[18]
$g-C_3N_4$	SPE	Well water, tap water, soil, vegetable, barbequed meat	PAHs ^f	HPLC-UVD	1.2~95 ng/L	71.0~115	[19]
$g-C_3N_4$	Column-assisted d-SPE	Environmental water, milk	Sulfonamides	HPLC-DAD ^g	0.09~0.2 ng/mL	82.3~110	20
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	<i>Salicornia herbacea L</i>	Phenolic acids	HPLC-UVD	58.3~142 ng/mL	92.4~99.5	[21]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Black tea, red tea	Flavonoids	HPLC-UVD	0.25~0.33 μ g/mL	88.2~107	[22]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Saliva, blood, waste water	PAHs	GC-FID ^h	1.0~2.0 ng/mL	94.9~98.6	[23]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Tap water, lake water	Brominated flame retardants	HPLC-UVD	0.3~0.7 μ g/L	92.4~99.8	[24]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Tap water, lake water	Phthalate esters	HPLC-UVD	0.17~0.33 μ g/L	79.4~99.4	[25]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Tap water, lake water	PAHs	HPLC-UVD	0.17~0.33 μ g/L	80.1~99.8	[26]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Environmental water	Polychlorinated biphenyls	HPLC-UVD	$3 \times 10^{-5} \sim 1.9 \times 10^{-4}$ μ g/mL	80.1~118	[27]
$g-C_3N_4/SnFe_2O_4$	MSPE	Water, fish meat, onion, lettuce	Pb ²⁺ , Cd ²⁺	FAAS ⁱ	2.0, 0.4 μ g/L	-	[28]
3D MWNTs@ $g-C_3N_4@Fe_3O_4$	MSPE	Rain water, river water, industrial waste water	PAHs	GC-FID	0.005~0.8 μ g/L	82.4~117	[29]

(续表1)

Sorbent	Extraction method	Sample	Analyte	Analytical method	Limit of quantitation	Recovery (%)	Reference
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Urine	Hydroxylated PAHs	HPLC - FLD	0.25 ng/mL	90.1 ~ 102	[30 - 31]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Natural water	Hg^{2+}	AFS ^k	1.4 ng/L	85.0 ~ 117	[32]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Edible oil	PAHs	GC - MS ^l	0.4 ~ 0.9 ng/g	91.0 ~ 124	[33]
$g-C_3N_4/Fe_3O_4$	MSPE	Water, vegetable	Organophosphorus pesticides	GC - IMS ^m	2 μ g/L	82.0 ~ 117	[34]
$g-C_3N_4$ fiber	SPME	Potato chips	Acrylamide	GC - ECD ⁿ	0.06 μ g/g	80.2 ~ 110	[35]
$g-CN_s - HF^o$	SPME	Urine, serum	Urine acid	GC - MS	0.1 μ g/mL	80.7 ~ 122	[36]
$g-C_3N_4$ fiber	SPME	Sea water, tap water	PAHs	GC - MS	2 ~ 30 ng/L	90.4 ~ 106	[37]
$g-C_3N_4 - GPL^p$	SPME	Honey, smoked rice	PAHs	HPLC - UVD	0.003 ~ 0.3 μ g/L	78.0 ~ 108	[38]
Oxygenated $g-C_3N_4$ fiber	SPME	Seafood, samshu, instant noodles	Phthalic acid esters	GC - MS	0.3 ~ 33 pg/mL	80.0 ~ 118	[39]
$g-C_3N_4/CuO$	SPME	Water, soil	PAHs	GC - FID	0.025 ~ 0.4 ng/mL	84.4 ~ 108	[40]
$g-C_3N_4@C^q$	SPME	Cosmetics	PAHs	GC - MS	3.3 ~ 6.7 ng/L	70.0 ~ 120	[41]
$g-C_3N_4@NiCo_2O_4$	SPME	Human serum	Polychlorinated biphenyls, PAHs	GC - FID	4 ~ 11 pg/mL, 3 ~ 4 pg/mL	72.5 ~ 121	[42]
$g-C_3N_4/PES^r$	SPME	Waste water	Phenolic compounds	HPLC - UVD	2 ~ 5 μ g/L	72.0 ~ 108	[43]
$Fe_3O_4@rGO - \mu - SPE^t$	$\mu - SPE^t$	Cosmetics	Chlorophenols	HPLC - UVD	0.40 ~ 0.60 μ g/kg	80.5 ~ 104	[44]
$g-C_3N_4^s$							

a: liquid chromatography tandem mass spectrometry; b: direct analysis in real time mass spectrometry; c: high performance liquid chromatography - ultraviolet detector; d: matrix solid phase dispersion; e: high performance liquid chromatography - fluorescence detector; f: polycyclic aromatic hydrocarbons; g: high performance liquid chromatography - diode array detector; h: gas chromatography - flame ion detector; i: flame atomic adsorption spectrometry; j: three-dimensional multi-walled carbon nanotubes@graphitic carbon nitride@iron oxide; k: atomic fluorescence spectrometer; l: gas chromatography tandem mass spectrometry; m: gas chromatography - ion mobility spectrometry; n: gas chromatography - electron capture detector; o: graphitic carbon nitrides modified hollow fiber; p: graphitic carbon nitride - graphenized pencil lead; q: graphitic carbon nitride-modified graphene composite; r: graphitic carbon nitride/polyethersulfone; s: reduced graphene oxide functionalized with magnetic nanoparticles and graphitic carbon nitride; t: micro-solid phase extraction

1 固相萃取

固相萃取(SPE)是一种基于色谱分离原理所开发的前处理技术,具有回收率高、有机溶剂用量少和重现性好等优势,被广泛应用于环境、食品和生物分析领域^[45-46]。由于 $g-C_3N_4$ 是二维纳米材料,直接用作SPE吸附剂,存在装填困难和萃取效率有限等问题。因此目前所报道的 $g-C_3N_4$ SPE法主要包括 $g-C_3N_4$ 分散固相萃取法和柱式固相萃取法。

1.1 分散固相萃取

分散固相萃取(d-SPE)是将固体吸附剂直接与分析样品混合,待目标物与吸附剂充分作用后,利用高速离心将吸附剂与样品基质分离以浓缩和净化目标分析物的方法^[47],具有无需装填、操作简单和吸附效率高等优势。Pang等^[12]将 $g-C_3N_4$ 纳米片用作d-SPE吸附剂,结合液相色谱-串联质谱法现场评估了小麦生态系统中的农药含量及其耗散动力学,方法的回收率达80.0%~110%。Wang等^[13]将 $g-C_3N_4$ 用于自来水和湖水中苯氧基羧酸类物质的前处理,基于 $g-C_3N_4$ 分散性好和比表面积大的优势,20s即可完成目标物的吸附,与实时质谱分析联用,整个分析过程可在几分钟内完成。将该材料用于水果中黄酮类药物的分析^[14],检出限达0.6~3.75 ng/mL,精密度为3.6%~4.7%。Nedaei等^[15]利用 $g-C_3N_4$ 作为d-SPE吸附剂,分析了土壤中的痕量硝基甲苯污染物,检出限为0.12~0.33 μ g/g,回收率为78.0%~96.0%。Guan等^[16]通过尿素简易制备了 $g-C_3N_4$ 纳米片,将其用于果汁中苯甲酰胺类农药的残留分析,检出限为6 μ g/L,回收率为70.4%~96.4%,吸附剂可重复使用至少10次。

1.2 柱式固相萃取

d-SPE虽然可以增加吸附剂与目标物间的接触机会,提升萃取效率,但纳米级的 $g-C_3N_4$ 在应用中存在回收困难和目标物定量损失等问题。柱式固相萃取,即将吸附剂装填至SPE模具,可有效解决以上问题^[45]。Speltini等^[17]首次利用热缩合反应一步制备了 $g-C_3N_4@SiO_2$,用于萃取环境水中氟喹诺酮类药物,方法的回收率为70.0%~114%,且富集倍数可达500。Qiangba等^[18]利用相同的方法制备

$g-C_3N_4@SiO_2$, 结合高效液相色谱/紫外检测, 分析了椰子水中的4种芳香酸, 制备的材料对4种代表性芳香酸(苯甲酸、水杨酸、3-吡啶丁酸和萘乙酸)展现出良好的吸附效果, 吸附容量为500~558.8 $\mu\text{g/g}$ 。Khosrowshahi等^[19]利用向日葵的花茎为筛板, $g-C_3N_4$ 为SPE吸附剂, 结合高效液相色谱法分析了多种介质中的多环芳烃, 方法的检出限为0.4~32 ng/L , 回收率为71.0%~115%, 相对标准偏差不大于10%。Zhang等^[20]使用柱辅助d-SPE的思路解决吸附剂回收困难的问题, 以介孔 $g-C_3N_4$ 为d-SPE吸附剂, 充分分散至样品溶液后, 将样品溶液和吸附剂装填入SPE模具中, 利用筛板拦截吸附剂, 达到回收吸附剂的目的, 检出限为5~20 pg/mL 。该方法对环境水和牛奶样品的回收率分别为90.1%~110%和82.3%~103%。

2 磁性固相萃取

磁性固相萃取(MSPE)是以磁性或可磁化的材料(如 Fe_3O_4)作为吸附剂, 仅依靠外部磁场即可实现吸附剂与样品基质分离的一种快速、简便的前处理方法^[48-52]。目前文献所报道的 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 的合成方法主要包括: 化学共沉淀法^[21-29]、溶剂热法^[30-32]、物理研磨法^[33]和溶胶凝胶法^[34]。Yang等^[21]利用化学共沉淀法制备 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 用于萃取紫草中的酚酸类化合物, 方法在0.1~100 ng/mL 范围内线性关系良好, 回收率为92.4%~99.5%, 精密密度为2.8%~3.8%。Fan等^[22]将 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 用于磁性固相萃取茶叶中的类黄酮物质, 在氢键、疏水以及 $\pi-\pi$ 共轭的作用下, 1 min即可完成对目标化合物的吸附, 方法的回收率为88.2%~107%。Rajabi等^[23]利用 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 磁性固相萃取结合气相色谱火焰离子检测分析了唾液、血液和废水样品中的多环芳烃, 方法检出限为0.3~0.6 ng/mL , 精密密度为3.5%~5.9%。Wang等^[24-26]将 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 用于磁性固相萃取自来水和湖水中的溴化阻燃剂、邻苯二甲酸酯和多环芳烃, 方法的灵敏度(0.1~0.2 $\mu\text{g/L}$, 0.05~0.1 $\mu\text{g/L}$, 0.05~0.10 $\mu\text{g/L}$)和精密密度(2.7%~5.2%, 1.1%~2.6%, 1.8%~5.3%)良好。Li等^[27]以 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 磁性固相萃取环境水中的痕量多氯联苯, 方法的检出限为 9.0×10^{-6} ~ 5.8×10^{-5} $\mu\text{g/mL}$, 回收率为80.1%~118%, 展现了 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 富集净化碳基芳香族化合物或其他疏水性污染物的潜力。Fahimirad等^[28]使用 $g-C_3N_4/SnFe_3O_4$ 富集食品基质中的 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} , 结合火焰原子吸收光谱法分析了这两种离子的含量, 检出限分别为0.6 $\mu\text{g/L}$ 和0.1 $\mu\text{g/L}$, 吸附剂重复使用5次后, 对两种离子的回收率仍大于99.0%。Zhang等^[29]将三维多壁碳纳米管与 $g-C_3N_4@Fe_3O_4$ 结合后用于水中多环芳烃含量分析, 方法对多环芳烃的检出限和定量限分别为0.001~0.5 $\mu\text{g/L}$ 和0.005~0.8 $\mu\text{g/L}$ 。本课题组^[30-31]以溶剂热法构筑了 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$, 结合高效液相色谱/荧光检测, 建立了一种简单、快速、高效的人尿液中3种羟基多环芳烃的分析方法, 方法在0.25~250 ng/mL 范围内线性关系良好(相关系数 $r=0.999$), 3种羟基多环芳烃的检出限和定量限分别为0.08 ng/mL 和0.25 ng/mL , 回收率为90.1%~102%, 日内和日间精密密度分别为1.5%~7.7%和2.2%~8.7%。Shi等^[32]以 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$ 作为吸附剂, 结合原子荧光光谱法对天然水中的无机汞离子进行分析, 方法的检出限为1.4 ng/L 。Zheng等^[33]通过物理研磨法制备了 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$, 结合气相色谱-质谱法, 开发了一种经济实用的食用油中多环芳烃分析的新方法, 方法在10 min内即可完成萃取, 定量限为0.4~0.9 ng/g , 回收率91.0%~124%。Kermani等^[34]通过溶胶凝胶法制备了 $g-C_3N_4/Fe_3O_4$, 结合气相色谱法, 分析了水和蔬菜中的有机磷农药, 定量限为2 $\mu\text{g/L}$, 回收率为82.0%~117%, 对3种有机磷农药的富集因子均大于142。

3 固相微萃取

固相微萃取(SPME)是一种有机溶剂消耗极少, 萃取时间短和可处理气体、液体和固体等多种物理状态样品的绿色前处理方法。由于SPME吸附剂通常被固定在纤维表面, 可与气相色谱直接联用, 通过进样口的高温使目标物热解吸直接进入分析系统而无需使用有机溶剂洗脱, 因此得到了广泛应用^[53]。Xu等^[35]将 $g-C_3N_4$ 固定在纤维表面制成SPME吸附剂, 与气相色谱联用, 对马铃薯片中的丙烯酰胺进行分析, 检出限为0.018 $\mu\text{g/g}$ 。Sun等^[36]使用 $g-C_3N_4$ 修饰的中空纤维提取了血液和尿液中的尿酸, 回收率分别为80.7%~122%和84.7%~101%。Ghaemmaghani等^[37]通过电泳沉积法制备了 $g-C_3N_4$ 纤维, 将其用于海水和自来水中多环芳烃的分析, 方法对多环芳烃的富集倍数达2 874~

11 375。Khosrowshahi 等^[38]以同样的方法在石墨化铅笔芯上包覆 $g-C_3N_4$, 用于蜂蜜和烟熏大米中多环芳烃的分析, 结合高效液相色谱法进行检测, 检出限为 $0.001 \sim 0.1 \mu\text{g/L}$ 。Feng 等^[39]使用氧化的 $g-C_3N_4$ 为 SPME 吸附剂, 与气相色谱-质谱联用, 分析食品中的邻苯二甲酸酯, 吸附剂在有机溶剂中具有良好的稳定性, 可以重复使用 150 次以上。Yang 等^[40]将 $g-C_3N_4$ 与氧化铜复合后用作 SPME 吸附剂, 有效增加了 $g-C_3N_4$ 或氧化铜对多环芳烃的吸附, 对水样和土壤样品中多环芳烃具有优异的萃取效果。Wu 等^[41]制备了石墨烯修饰的 $g-C_3N_4$ SPME 吸附剂, 由于 π 堆积与疏水作用, 吸附剂能够对化妆品中的多环芳烃进行有效萃取。Zhang 等^[42]将 $g-C_3N_4$ 与钴酸镍复合后用于固相微萃取人血液中的环境污染物, 提高了 $g-C_3N_4$ 对多氯联苯和多环芳烃的吸附效果, 同时提高了吸附剂的稳定性, 使用寿命达 150 次以上, 对多氯联苯和多环芳烃的检出限分别为 $1.2 \sim 3.3 \text{ pg/mL}$ 和 $0.9 \sim 1.2 \text{ pg/mL}$ 。Khosrowshahi 等^[43]将 $g-C_3N_4$ 包覆在聚醚砜膜上, 用于废水中酚类化合物的分析, 方法的回收率在 $72.0\% \sim 108\%$ 之间。

4 总结及展望

$g-C_3N_4$ 在前处理领域, 从直接用作 d-SPE 吸附剂, 逐渐发展为与多种功能性材料复合后用于 SPE、MSPE 和 SPME 等多种样品前处理模式。然而, 一方面, 目前 $g-C_3N_4$ 及其复合物种类仍过于单一, 更多的学者仍致力于开发材料在不同基质和目标化合物前处理领域的应用。另一方面, 由于 $g-C_3N_4$ 表面具有丰富的含氮官能团, 有利于进一步改性和修饰以改善其性质, 拓宽其功能, 通过发展多种 $g-C_3N_4$ 新材料, 可增加样品前处理领域的适用范围, 也可基于目标化合物的性质, 选择性地设计复合材料, 增加其对特定目标化合物的选择性。因此, 继续探索更多形式的 $g-C_3N_4$ 吸附材料, 挖掘其在样品前处理领域的潜力将成为分析科学、材料化学以及生物医药分析领域的研究热点。

参考文献:

- [1] Chen Y, Tan C L, Zhang H, Wang L Z. *Chem. Soc. Rev.*, **2015**, 44(9): 2681–2701.
- [2] Inagaki M, Tsumura T, Kinumoto T, Toyoda M. *Carbon*, **2019**, 141: 580–607.
- [3] Miller T S, Jorge A B, Suter T M, Sella A, Corà F, McMillan P F. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2017**, 19: 15613–15638.
- [4] Dong G P, Zhang Y H, Pan Q W, Qiu J R. *J. Photochem. Photobiol. C*, **2014**, 20(1): 33–50.
- [5] Kurapati R, Kostarelos K, Prato M, Bianco A. *Adv. Mater.*, **2016**, 28(29): 6052–6074.
- [6] Kannan P K, Late D J, Morgan H, Rout C S. *Nanoscale*, **2015**, 7(32): 13293–13312.
- [7] Mamba G, Mishra A K. *Appl. Catal. B*, **2016**, 198: 347–377.
- [8] Vannuccini S, Tosti C, Carmona F, Huang S J, Chapron C, Guo S W, Petraglia F. *Reprod. Biomed. Online*, **2017**, 35(5): 592–601.
- [9] Yu X B, Tang Z W, Sun D L, Ouyang L Z, Zhu M. *Prog. Mater. Sci.*, **2017**, 88: 1–48.
- [10] Zhu J J, Xiao P, Li H L, Carabineiro S A C. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2014**, 6(19): 16449–16465.
- [11] Sun Y P, Ha W, Chen J, Qi H Y, Shi Y P. *TrAC – Trends Anal. Chem.*, **2016**, 84: 12–21.
- [12] Pang N N, Wang T L, Cui Y, Hu J Y. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, **2016**, 96(12): 1156–1169.
- [13] Wang J Q, Zhu J, Si L, Du Q, Li H L, Bi W T, Chen D D Y. *Anal. Chim. Acta*, **2017**, 996: 20–28.
- [14] Ding X R, Zhu J, Zhang Y, Xia Q, Bi W T, Yang X D, Yang J F. *Talanta*, **2016**, 154: 119–126.
- [15] Nedaei M, Zarei A R, Ghorbanian S A. *J. Chromatogr. A*, **2019**, 1601: 35–44.
- [16] Guan W B, Long Z, Liu J Y, Hua Y F, Ma Y Q, Zhang H Y. *Food Anal. Method*, **2015**, 8: 2202–2210.
- [17] Speltini A, Maraschi F, Govoni R, Milanese C, Profumo A, Malavasi L, Sturinia M. *J. Chromatogr. A*, **2017**, 1489: 9–17.
- [18] Qiangba G Z, Zhu G T, Yu Q W, Feng Y Q. *Chem. Res. Chin. Univ.*, **2018**, 34(4): 528–535.
- [19] Khosrowshahi E M, Razmi H. *J. Sep. Sci.*, **2018**, 41(9): 2020–2028.
- [20] Zhang J, Li W Q, Zhu W L, Yang Y X, Qin P G, Zhou Q, Lu M H, Cai Z W. *Microchim. Acta*, **2019**, 186: 279.
- [21] Yang J, Si L, Cui S H, Bi W T. *Microchim. Acta*, **2015**, 182: 737–744.
- [22] Fan S S, Zhu J, Ren L X, Wang M, Bi W T, Li H H, Huang X H, Chen D D Y. *Anal. Chim. Acta*, **2017**, 960: 63–71.
- [23] Rajabi M, Moghadam A G, Barfi B, Asghari A. *Microchim. Acta*, **2016**, 183: 1449–1458.
- [24] Wang M, Yuan H, Deng W J, Bi W T, Yang X D. *J. Chromatogr. A*, **2015**, 1412: 12–21.
- [25] Wang M, Yang X D, Bi W T. *J. Sep. Sci.*, **2015**, 38: 445–452.
- [26] Wang M, Cui S H, Yang X D, Bi W T. *Talanta*, **2015**, 132: 922–928.

- [27] Li D D, Zhu J, Wang M, Bi W T, Huang X H, Chen D D Y. *J. Chromatogr. A*, **2017**, 1491: 27–35.
- [28] Fahimirad B, Asghari A, Rajabi M. *Microchim. Acta*, **2017**, 184: 3027–3035.
- [29] Zhang M S, Huang G B, Huang J R, Chen W L. *Microchem. J.*, **2018**, 142: 385–393.
- [30] Nian Q X, Liu Y M, Sun B, Wang M M. *Chin. J. Chromatogr.* (念琪循, 刘园满, 孙冰, 王曼曼. 色谱), **2019**, 37(3): 252–258.
- [31] Nian Q X, Wang X S, Wang M M, Zuo G F. *Microchim. Acta*, **2019**, 186: 497.
- [32] Shi M T, Yang X A, Zhang W B. *Anal. Chim. Acta*, **2019**, 1074: 33–42.
- [33] Zheng H B, Ding J, Zheng S J, Zhu G T, Yuan B F, Feng Y Q. *Talanta*, **2016**, 148: 46–53.
- [34] Kermani M, Jafari M T, Saraji M. *Microchim. Acta*, **2019**, 186: 88.
- [35] Xu N, Wang Y R, Rong M C, Ye Z F, Deng Z, Chen X. *J. Chromatogr. A*, **2014**, 1364: 53–58.
- [36] Sun Y P, Chen J, Qi H Y, Shi Y P. *J. Chromatogr. B*, **2015**, 1004: 53–59.
- [37] Ghaemmaghami M, Yamini Y, Amanzadeh H, Hosseini M B. *Chem. Commun.*, **2018**, 54: 507–510.
- [38] Khosrowshahi E M, Razmi H. *New J. Chem.*, **2018**, 42: 15930.
- [39] Feng Z M, Huang C H, Guo Y H, Tong P, Zhang L. *Anal. Chim. Acta*, **2019**, 1084: 43–52.
- [40] Yang Y X, Qin P G, Zhang J, Li W Q, Zhu J H, Lu M H, Cai Z W. *J. Chromatogr. A*, **2018**, 1570: 47–55.
- [41] Wu T, Wang J T, Liang W Q, Zang X H, Wang C, Wu Q H, Wang Z. *Microchim. Acta*, **2017**, 184: 2171–2180.
- [42] Zhang J, Li W Q, Zhu W L, Qin P G, Lu M H, Zhang X B, Miao Y C, Cai Z W. *Chem. Commun.*, **2019**, 55: 10019.
- [43] Khosrowshahi E M, Matin A A. *Microchim. Acta*, **2019**, 186: 679.
- [44] Zang X H, Chang Q Y, Liang W Q, Wu T, Wang C, Wang Z. *Microchim. Acta*, **2018**, 185: 18.
- [45] Płotka – Wasylka J, Szczepańska N, Guardia M D L, Namieśnik J. *TrAC – Trends Anal. Chem.*, **2016**, 77: 23–43.
- [46] Azzouz A, Kailasa S K, Lee S S, Rascón A J, Ballesteros E, Zhang M, Kim K. *TrAC – Trends Anal. Chem.*, **2018**, 108: 347–369.
- [47] Chisvert A, Cárdenas S, Lucena R. *TrAC – Trends Anal. Chem.*, **2019**, 112: 226–233.
- [48] Aguilar – Arteaga K, Rodriguez J A, Barrado E. *Anal. Chim. Acta*, **2010**, 674: 157–165.
- [49] Giakisikli G, Anthemidis A N. *Anal. Chim. Acta*, **2013**, 789: 1–16.
- [50] Wierucka M, Biziuk M. *TrAC – Trends Anal. Chem.*, **2014**, 59: 50–58.
- [51] He J C, Huang M Y, Wang D M, Zhang Z M, Li G K. *J. Pharm. Biomed.*, **2014**, 101: 84–101.
- [52] Yu M, Wang L M, Hu L Q, Li Y P, Luo D, Mei S R. *TrAC – Trends Anal. Chem.*, **2019**, 119: 115611.
- [53] Płotka – Wasylka J, Szczepańska N, Guardia M D L, Namieśnik J. *TrAC – Trends Anal. Chem.*, **2015**, 73: 19–38.

(责任编辑: 盛文彦)