

# 二维纳米材料在生物医学领域的应用\*

张鹏飞<sup>1</sup> 成正东<sup>2,†</sup>

(1 国科温州研究院 温州 325001)

(2 浙江大学化学工程与生物工程学院 杭州 310058)

2023-11-27 收到

† email: zcheng01@zju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20231204

## Applications of two-dimensional nanomaterials in biomedicine

ZHANG Peng-Fei<sup>1</sup> CHENG Zheng-Dong<sup>2,†</sup>

(1 Wenzhou Institute, University of Chinese Academy of Sciences, Wenzhou 325001, China)

(2 College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**摘要** 二维纳米材料具有高的电导率、良好的生物相容性、独特的纳米片结构、大表面积,以及优异的热性能、光性能和机械性能,在药物递送、生物传感、多模式成像、抗菌剂和组织工程方面具有较大的用途,在生物医学领域具有极大的潜力。文章总结了两种二维纳米材料包括磷酸锆、层状双金属氢氧化物、黑磷、硼纳米片和碲化锡的特性以及在药物递送、肾透析、癌症治疗和多模式成像中的应用进展,最后展望二维纳米材料的发展前景和挑战。

**关键词** 二维纳米材料, 磷酸锆, 双金属氢氧化物, 黑磷, 硼纳米片, 碲化锡, 生物医学

**Abstract** Two-dimensional nanomaterials have high electrical conductivity, good biocompatibility, unique nanosheet structure, large surface area, and excellent thermal, optical and mechanical properties. They are widely used in drug delivery, biosensing, multi-modal imaging, antibacterial agents, and tissue engineering, with great potential in the biomedical field. This review summarizes the characteristics of several two-dimensional nanomaterials, including zirconium phosphate, layered double hydroxide, black phosphorus, boron nanosheets, and tin telluride, as well as their applications in drug delivery, renal dialysis, cancer therapy, and multimodal imaging. Finally, the challenges and future development of two-dimensional nanomaterials are appraised.

**Keywords** two-dimensional nanomaterials, zirconium phosphate, layered double hydroxide, black phosphorus, boron nanosheets, tin telluride, biomedicine

\* 科技部高端外国专家引进计划(批准号: G2023016012L)资助项目, 国科温州研究院(温州生物材料与工程研究所)启动项目(WIUCASQD2023002), 浙江大学启动项目(188020\*1942223R1/031)

# 1 引言

二维纳米材料代表一类新型纳米材料，具有大的横向尺寸与厚度比。因为其独特的物理化学性质而在各个领域受到了广泛的关注，比如电子材料、光电材料、能源材料以及生物医学领域<sup>[1, 2]</sup>。石墨烯的出现以及在各个领域的广泛应用也促使研究人员对其他二维纳米材料进行探索研究，如磷酸锆<sup>[3-8]</sup>、层状双金属氢氧化物<sup>[9-12]</sup>、黑磷<sup>[13-18]</sup>、硼纳米片<sup>[19, 20]</sup>和碲化锡<sup>[21]</sup>。这些二维纳米材料具有平面结构以及非凡的物理化学性质，如大的表面积、良好的生物相容性、独特的纳米结构以及优异的表面化学功能，使其广泛应用于生物医学领域<sup>[22-28]</sup>。图1是常见的一些二维纳米材料在生物医学领域中的应用实例<sup>[29]</sup>。

二维纳米材料具有大的比表面积及良好的生物相容性，通过插层或者剥离成片作为生物大分子或者某些药物的载体，且具有良好的控释功能，可实现疾病的定点靶向治疗，在提高药物生物利用度的同时降低药物的毒副作用<sup>[3, 12, 18, 20]</sup>。此外，一些功能性纳米颗粒，如金纳米颗粒<sup>[30]</sup>、四氧化三铁纳米颗粒<sup>[31]</sup>和一些无机量子点<sup>[32]</sup>，可以吸附在二维纳米材料表面，具有电化学性质和放射性特性，可用于多模式成像及诊断应用。许多类型的二维纳米材料表现出对近红外光的强吸收，使其成为重要的光敏剂及光声造影剂，结合光声成像与光热治疗可用于肿瘤的监测与治疗<sup>[20]</sup>。有些二维纳米材料具有良好的质子交换能力，能够较好地吸附 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 等阳离子，可以作用于肾透析的血液吸附环节，是便携式“人工肾”装置的优良吸附剂<sup>[8]</sup>。

我们将系统总结二维纳米材料在生物医学领域的应用，尤其是在药物递送、癌症治疗、肾透析、多模式成像等方面的应用进展。首先，我们分别介绍磷酸锆、层状双金属氢氧化物、黑磷、硼纳米片和碲化锡几种二维纳米材料的特性，然后分别根据它们具有的特性介绍其在生物医学领域应用的研究进展，最后在总结二

维纳米材料研究成果的基础上，讨论二维纳米材料在生物医学领域未来的发展前景及面临的挑战。

## 2 二维纳米材料

尽管所有二维纳米材料的组成和晶体结构都有显著差异，但它们仍然可以分为层状二维纳米材料和非层状二维纳米材料。在层状纳米材料中，平面上的原子通过层中的强化学键连接，而层与层之间通过弱范德瓦耳斯相互作用堆叠在一起形成大块晶体<sup>[33]</sup>。层状材料包括磷酸锆、层状双金属氢氧化物、黑磷、硼纳米片和碲化锡等。相比之下，非层状纳米材料中原子通过范德瓦耳斯力或化学键在三维结晶，形成大块晶体，如聚合物和金属氧化物/硫族化物等<sup>[34]</sup>。本文中我们主要介绍部分层状材料的特性及其在生物医学领域的应用进展。

### 2.1 磷酸锆

#### 2.1.1 材料特性

磷酸锆，又称磷酸氢锆( $\text{Zr}(\text{HPO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )，通常简记为ZrP)，是酸性无机阳离子交换材料，属于一类二维层状化合物。图2(a)是ZrP的扫描电镜

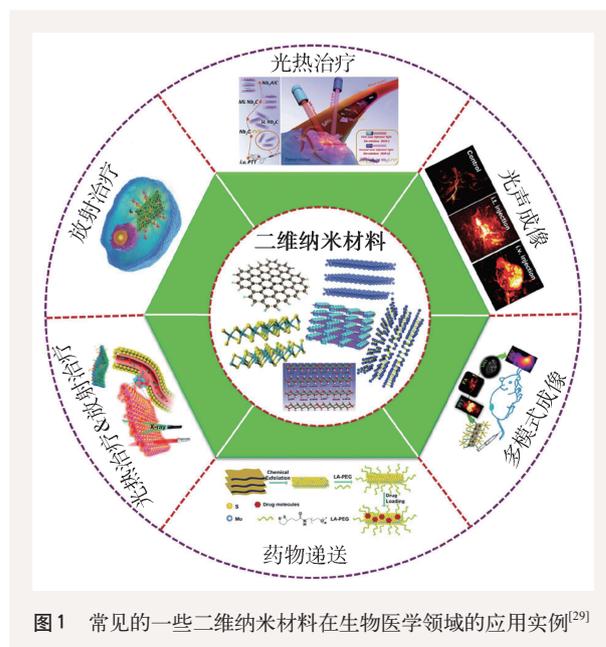


图1 常见的一些二维纳米材料在生物医学领域的应用实例<sup>[29]</sup>

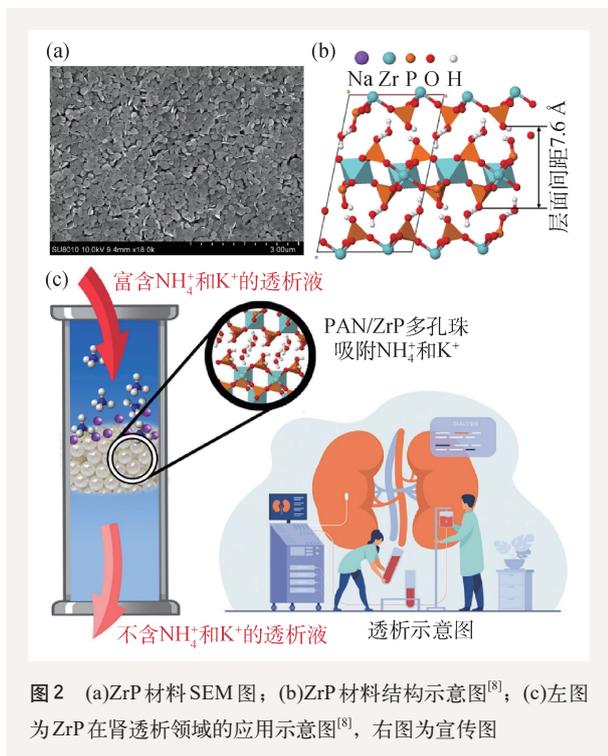


图2 (a)ZrP材料SEM图；(b)ZrP材料结构示意图<sup>[8]</sup>；(c)左图为ZrP在肾透析领域的应用示意图<sup>[8]</sup>，右图为宣传图

(SEM)图，可以看出ZrP呈片状结构，具有清晰的六边形轮廓，粒径分布均匀。图2(b)是ZrP的结构示意图，共面的锆原子被夹在两层单氢磷酸基团之间，每个 $\text{-HPO}_4^{2-}$ 中的三个氧原子与锆原子共价，而第四个氧原子指向夹层空间并与自由的氢相关联。它既具有像离子交换树脂一样的离子交换性能(源于 $\text{-HPO}_4^{2-}$ 中的 $\text{H}^+$ )，同时又具有像沸石一样的吸附能力(源于与二维层的相互吸引)，还具有较高的热稳定性和较好的耐酸碱性能。 $\alpha\text{-ZrP}$ 的层间距为0.76 nm，具有单斜晶系的结构<sup>[8]</sup>，以 $\alpha\text{-ZrP}$ 及其衍生物作主体，客体分子克服层与层之间的相互作用力插入层间空隙，通过离子键、氢键、范德瓦耳斯力等作用可形成特殊的插层结构<sup>[3]</sup>。ZrP的二维层状结构使其成为高质量的血液透析吸附剂，主要用于吸附尿素分解后的 $\text{NH}_4^+$ ，同时也会吸附 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 或者 $\text{Mg}^{2+}$ 并释放 $\text{Na}^+$ 或者 $\text{H}^+$ (当使用磷酸氢锆钠，即ZrP与适量的氢氧化钠反应，使得一些 $\text{Na}^+$ 取代ZrP中 $\text{H}^+$ 的位置， $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 或者 $\text{Mg}^{2+}$ 等可与磷酸氢锆钠中的 $\text{Na}^+$ 或者 $\text{H}^+$ 进行离子交换反应)。

### 2.1.1.2 在肾透析领域的研究进展

Samsudin等人<sup>[8]</sup>采用机械化学辅助方法合

成了 $\alpha$ -磷酸锆钠( $\alpha\text{-Zr}(\text{NaPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，简称为 $\alpha\text{-Na}_2\text{ZrP}$ )和 $\gamma$ -磷酸氢锆( $\gamma\text{-Zr}(\text{PO}_4)(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，简称为 $\gamma\text{-H}_2\text{ZrP}$ )。这两种化合物是肾吸附透析系统中的两个关键阳离子 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{K}^+$ 的优秀离子交换剂。如图2(c)所示，将合成的 $\alpha\text{-Na}_2\text{ZrP}$ 和 $\gamma\text{-H}_2\text{ZrP}$ 用聚丙烯腈(PAN)进行包裹，形成可控制尺寸的PAN封装ZrP(PAN/ZrP)球形多孔珠。富含 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{K}^+$ 的肾透析液被PAN/ZrP多孔珠进行吸附，同时释放出 $\text{Na}^+$ 或者 $\text{H}^+$ ，从而去除透析液中的 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{K}^+$ ，达到净化血液的目的。实验表明， $\alpha\text{-Na}_2\text{ZrP}$ 对 $\text{NH}_4^+$ 的最大吸收量为5.5 mmol/g，接近可交换位点的理论极限，在多离子溶液中， $\gamma\text{-H}_2\text{ZrP}$ 是 $\text{K}^+$ 的选择性交换剂，总吸收能力为2.9 mmol/g。由于多孔性，封装在PAN内部的ZrP能与透析液进行充分的接触，从而实现 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{K}^+$ 吸收的快速动力学。在这种形式下，PAN/ZrP珠粒可以很容易地在吸附剂筒中被处理，用适当的电解质进行简单再生，即可完全恢复PAN/ZrP珠的活性，进而能够进行多次循环使用。

## 2.2 层状双金属氢氧化物

### 2.2.1 材料特性

层状双金属氢氧化物(LDH)，也被称为类水滑石化合物，是一类二维纳米材料，化学成分为 $[\text{M}_{1-x}^{2+}\text{M}_x^{3+}(\text{OH})_2]^{x+}[\text{A}_{x/n}]^{n-} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ，其中 $\text{M}^{2+}$ 和 $\text{M}^{3+}$ 分别为二价和三价金属阳离子， $\text{A}^{n-}$ 为层间阴离子<sup>[35]</sup>。LDH的化学组成和晶体结构的多样性使它们在不同领域具有广泛的应用，LDH的另一个特征是它们的高电荷密度，这使它们能够与阴离子部分强烈结合。LDH纳米材料虽然具有低毒性，但因为其与阴离子药物分子、遗传物质和抗体的非共价结合，LDH药物递送系统也引起了科研人员极大的兴趣<sup>[36]</sup>。

### 2.2.2 载药性能应用

Zhang等人<sup>[12]</sup>开发了一种简单的聚合物辅助合成方法，构建了一种超薄LDH纳米片，以最大限度地提高LDH的载药潜力。图3(a)采用混合金属离子与氢氧化钠共沉淀形成LDH核，然后加入带负电荷的(低聚(乙二醇)甲基醚丙烯酸酯)嵌段聚

(单丙烯酰氧基乙基磷酸酯)(POEGA-b-PMAEP)作为层生长抑制剂和胶体稳定剂以终止成核并促进颗粒沿 $ab$ 平面生长,在老化后获得表面偶联的聚合物修饰的LDH(P-LDH)纳米片,最后通过静电相互作用将抗肿瘤药物阿霉素(DOX)装载到P-LDH纳米片(P-LDH-DOX)上。如图3(b)所示,P-LDH纳米片表现出超高的药物负载能力,在DOX与P-LDH的进料质量比为1:0.04的情况下,P-LDH纳米片的载药能力可高达734%(DOX/纳米颗粒质量比),并保持35%的相对较高的载药效率。使用4T1乳腺癌异种移植白变种实验室老鼠进一步探索了P-LDH-DOX的体内治疗效果,如图3(c)所示,在没有药物负载的情况下,LDH和P-LDH组在治疗期间不影响肿瘤生长,而LDH-DOX和P-LDH-DOX实现了显著的肿瘤抑制。更具体地说,P-LDH-DOX治疗在第12天使肿瘤体积减少了 $76.8\pm 4.5\%$ ,显著大于LDH-DOX( $56.4\pm 12.2\%$ )和DOX( $42.9\pm 15.1\%$ )。由于P-LDH具有超高负载药物DOX的能力,并且药物分子DOX在肿瘤微环境和内体酸度触发的持续方式从P-LDH纳米载体中释放,延长血液循环和提高生物利用度,P-LDH-DOX表现出优异的抗肿瘤效果。因此,基于P-LDH纳米片是一种很有前途的递送媒介,在药物递送领域具有很大的前景。

BP纳米片的药物递送系统,并研究了负载氟西汀(Flu)的BP纳米片的抗抑郁作用。如图4(a)所示,采用液体剥离法制备BP纳米片,并通过静电相互作用将Flu负载到BP纳米片(BP-Flu)上,BP-Flu在808 nm的近红外光辐射下,Flu从BP纳米片中释放。从图4(b)中Flu、BP纳米片和BP-Flu的 $\zeta$ 电位图可以看出,BP纳米片吸附Flu后的 $\zeta$ 电位从 $-35\text{ mV}$ 变为 $+15\text{ mV}$ ,表明Flu通过静电相互作用成功吸附在BP纳米片表面。人类和小鼠模型研究表明,抑郁症与海马中脑源性神经营养因子(BDNF)的表达减少高度相关,可以通过抗抑郁治疗来缓解。测量BDNF在小鼠海马中的表达,如图4(c)所示,与非应激对照组相比,慢性不可预知温和应激(CUMS)显著下调了BDNF的mRNA表达,通过近红外辐射下BP-Flu(BP-Flu-NIR)治疗两周后,能够使海马中BDNF表达增加,达到没有受到CUMS影响小鼠正常BDNF水平。仅采用生理盐水治疗的没有效果,而且BP-Flu-NIR好于只采用游离Flu的治疗效果。BP纳米片提高了抗抑郁药物Flu的生物相容性,协同近红外光热治疗改善血脑屏障的通透性,大大缩短了抑郁症的治疗时间。这表明BP-Flu-NIR是一种快速有效的抗抑郁药物策略,在未来的临床应用中具有较大的潜力。

## 2.3 黑磷纳米片

### 2.3.1 材料特性

黑磷(BP)纳米片,一种不含金属的层状二维纳米材料,由于其优异的生物相容性、良好的生物降解性、近红外(NIR)诱导的光热效应和载药性能,近年来引起了广泛关注<sup>[18, 37]</sup>。BP纳米片作为有效的光动力治疗(PDT)和光热治疗(PTT)剂,可用于治疗多种疾病,尤其是癌症治疗<sup>[38]</sup>。

### 2.3.2 载药性能应用

Jin 等人<sup>[18]</sup>设计了一种基于

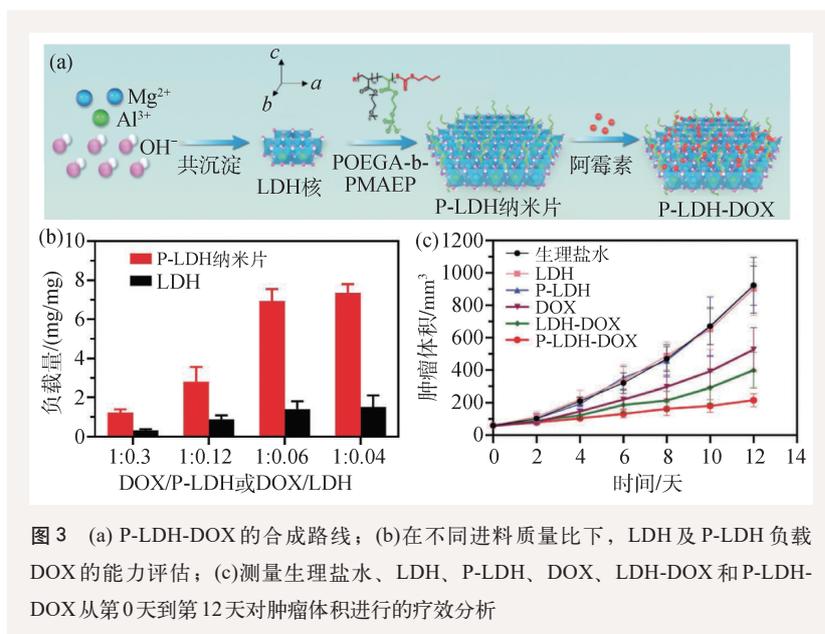


图3 (a) P-LDH-DOX的合成路线;(b)在不同进料质量比下,LDH及P-LDH负载DOX的能力评估;(c)测量生理盐水、LDH、P-LDH、DOX、LDH-DOX和P-LDH-DOX从第0天到第12天对肿瘤体积进行的治疗分析

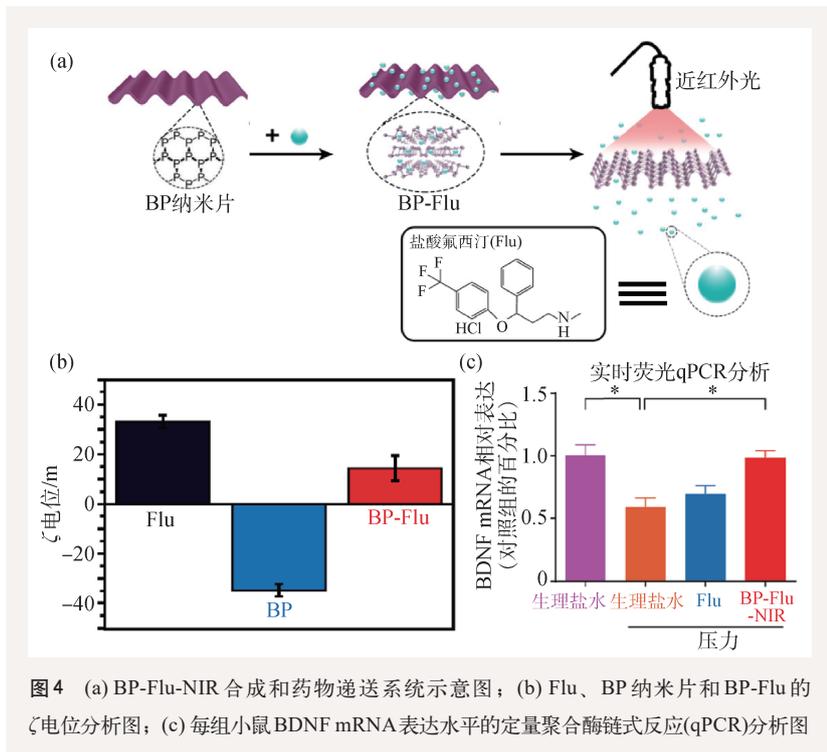


图4 (a) BP-Flu-NIR 合成和药物递送系统示意图; (b) Flu、BP 纳米片和 BP-Flu 的  $\zeta$  电位分析图; (c) 每组小鼠 BDNF mRNA 表达水平的定量聚合酶链式反应(qPCR)分析图

## 2.4 硼纳米片

### 2.4.1 材料特性

硼(B)纳米片因为具有优异的物理和化学性质,如超导性、异常的结构复杂性和高效的光热转换效率,从而受到研究人员广泛关注。硼基材料已被发现具有优异的生物相容性和高化学稳定性,表明其在生物医学领域具有广泛的应用潜力<sup>[19]</sup>,尤其在光热治疗和药物递送方面潜力巨大<sup>[40]</sup>。

### 2.4.2 多模式成像癌症治疗中的应用

Ji 等人<sup>[20]</sup>开发了一种集多模式成像与多手段治疗于一体的新型肿瘤诊断体系。如图 5(a)所示,首先采用液相剥离和高温氧化刻蚀技术制备 B 纳米片(B NSs),然后用带正电的胺官能化聚乙二醇(PEG-NH<sub>2</sub>)通过静电吸附对 B NSs 进行改性,制备出 PEG 修饰的 B NSs(B-PEG-NSs),最后对 B-PEG-NSs 进行药物和显像剂的负载。光声成像(PA)由于具有优异的深度检测、3D 分辨成像、灵敏度、空间分辨率和图像对比度,已成为促进成像引导的癌症治疗的最有前途的生物光子诊断模式之一。B-PEG-NSs 表现出优异的光热性能,因此可以在生物体内评估 B-PEG-NSs 作为

PA 剂的潜力,如图 5(b)所示,将携带 MCF7 肿瘤的小鼠静脉注射 B-PEG-NSs 后在 PA 仪器上记录 0 小时、12 小时和 24 小时的信号。通过体内超声和 780 nm 波长的 PA 图像,在肿瘤部位观察到非常强的 PA 信号,证明了它作为癌症成像 PA 剂的潜力。图 5(c)验证了负载抗肿瘤药物阿霉素的 B-PEG-NSs (B-PEG/DOX NSs) 对于体内癌症治疗的潜力。第 5 组使用 B-PEG/DOX NSs 对肿瘤生长表现出极高的抑制作用(化学—光热联合治疗),在该组的所有 5 只小鼠中,肿瘤减小甚至消失且没有复发。B NSs 具有较高药物(DOX)负载的能力,且可被近

红外光和弱酸性环境触发药物释放, B-PEG/DOX NSs 表现出较高近红外光热转换效率和生物相容性,提高 DOX 生物利用度,表现出优异的抗肿瘤效果。因此, B NSs 作为多模式成像引导药物递送平台的应用具有较高的临床价值。

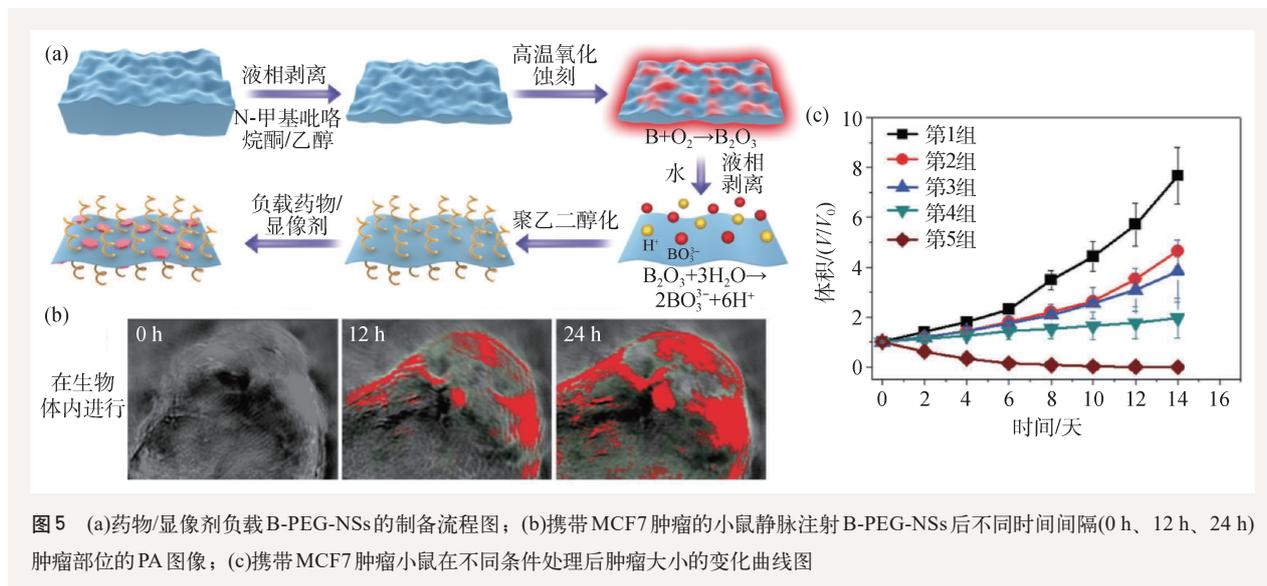
## 2.5 碲化锡

### 2.5.1 材料特性

碲化锡(SnTe)由两种人体必需元素组成,是一种具有直接带隙(在 300 K 下为 0.18 eV)的立方晶体结构二维纳米材料<sup>[38]</sup>。SnTe 纳米结构具有良好的生物相容性、强的量子尺寸效应和近红外光学活性。因此,最适合作为第二近红外生物窗口中潜在的光介导诊断成像和治疗剂,在生物医学领域具有很大的应用潜力。

### 2.5.2 在癌症治疗中的应用

Zhang 等人<sup>[21]</sup>报道了一种在近红外生物窗口 II 响应的肿瘤荧光、光声成像介导的光热剂 SnTe 纳米片(SnTe NSs)。如图 6(a)所示,首先采用研磨和液体剥离技术制备 SnTe NSs,然后通过液体沉淀法合成 MnO<sub>2</sub> 包覆 SnTe NSs,最后通过旋转蒸发



技术使用大豆磷脂(SP)对其表面进一步改性获得 SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs。如图 6(b)所示, 将 MCF7 荷瘤的小鼠通过尾静脉注射 SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs 后, 在 PA 仪器上记录 0、12 小时和 24 小时的信号, 通过体内超声和 1064 nm 波长的 PA 图像, 在肿瘤部位观察到非常强的 PA 信号, 证明 SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs 是一种优秀的临床 PA 候选药物。图 6(c)中第 6 组使用 SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs 和 1064 nm 激光 (NIR II) 治疗后肿瘤全部消融, 没有复发, 表明 NIR II 光热治疗效果更加显著, 从所有不同治疗条件小鼠身上切除的肿瘤的照片能够提供最直观的证据。SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs 具有良好的生物相容性, 在肿瘤微环境响应性降解, 且降解产物 TeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>具有良好的抗肿瘤活性, 基于近红外窗口 II 介导的肿瘤光声、光热成像特性, 有效增强了光学诊断的组织穿透力与精确度, 协同增加了化疗效果, SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs 表现出优异的抗肿瘤能力。因此, 基于 SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs 的癌症多模式诊断和治疗纳米剂具有生物相容性和生物降解性, 为制备其他二维碲化物以及在 NIR II 生物视窗中应用于癌症治疗开辟新的研究方向。

### 3 总结、展望与挑战

二维纳米材料具有大的表面积, 可以用作有效的药物递送载体, 许多具有强光学或 X 射线衰

减特性的二维纳米材料可用于生物医学成像、癌症光热疗法和增强放射治疗。通过与其他功能纳米颗粒集成, 二维纳米材料多功能纳米复合材料有望用于多模式成像的协同癌症治疗。尽管二维纳米材料在生物医学领域取得了许多优秀的成果, 但是也存在一些缺点。一方面, 制备难度大, 标准不统一: 二维纳米材料尺寸分布和形态是决定治疗效率和诊断性能的关键因素, 目前缺乏标准的合成方法来获得具有所需结构、组成参数(如尺寸、分散度和电荷)的二维纳米片; 另一方面作用机理不明确: 二维纳米材料与结构蛋白或者遗传物质之间的相互作用, 以及它们如何影响或者控制生物体各种信号通路, 目前缺乏对纳米材料的尺寸、形状、化学成分和表面特性如何控制特定生物过程的深入理解。二维纳米材料在生物应用领域的研究仍处于不成熟的阶段, 需要解决一些挑战和问题, 以促进其进一步临床应用。

对于二维纳米材料的临床应用, 除了治疗效果外, 二维纳米材料的生物分布、降解和代谢仍然需要做进一步仔细评估。二维纳米材料临床使用的主要障碍是潜在的长期安全问题, 尤其是那些给药后会在体内长期保留的不可生物降解的物质。尽管许多研究已经验证了二维纳米材料的短期安全性, 但其长期慢性毒性作用仍有待更系统地研究<sup>[41]</sup>。此外, 尚不清楚它们如何与免疫系统相互作用, 是否干扰生殖系统, 以及是否影响下

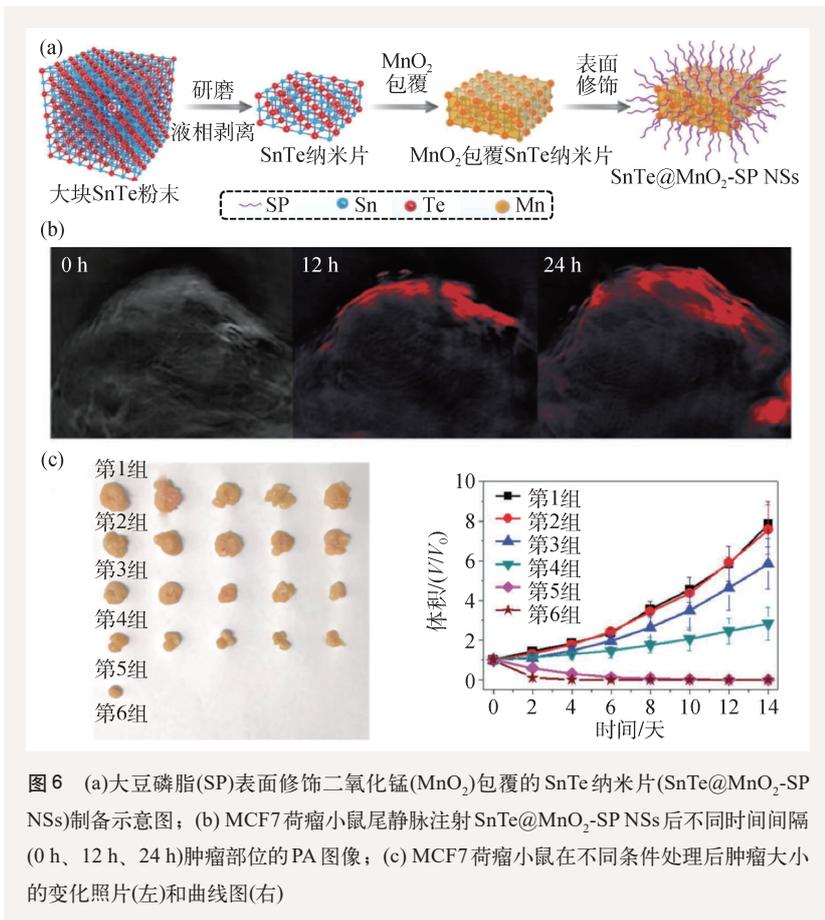


图6 (a)大豆磷脂(SP)表面修饰二氧化锰(MnO<sub>2</sub>)包覆的SnTe纳米片(SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs)制备示意图; (b) MCF7荷瘤小鼠尾静脉注射SnTe@MnO<sub>2</sub>-SP NSs后不同时间间隔(0 h、12 h、24 h)肿瘤部位的PA图像; (c) MCF7荷瘤小鼠在不同条件处理后肿瘤大小的变化照片(左)和曲线图(右)

一代。因此，科研人员仍需要更系统的研究来确定这些二维纳米材料的临床安全性。

关于长期安全问题，这些二维纳米材料的生物降解和排泄行为被认为是需要解决的关键问题。许多二维纳米材料具有良好的结晶度，几乎没有缺陷，因此通常难以在生理环境中降解。然而，某些类型的合理设计的二维纳米材料也被认为是可生物降解的<sup>[36, 42]</sup>。例如，据报道二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)在生理环境中的动力学和热力学上不稳定，可被氧化为水溶性Mo<sup>6+</sup>氧化物(如MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)，这些物质已经被证明很容易通过肾脏和粪便途径从小鼠体内排出<sup>[43]</sup>。BP纳米点可以在水和氧气中降解形成无毒的磷酸盐和磷酸盐，而且在没有明显毒性的情况下从体内清除<sup>[37]</sup>。因此，开发可生物降解的二维纳米材料是一个重要的研究方向。

通过调整二维纳米材料结构的化学成分、尺寸和表面修饰，可以减少二维纳米材料在组织中

的滞留，使其快速排泄，提高肿瘤的积聚，从而优化二维纳米材料的体内行为。科研人员通过在二维纳米材料表面修饰微小纳米结构(小于8 nm)，避免纳米材料的长期滞留，这些结构可以通过肾脏过滤排出体外。微小型二维纳米材料，如谷胱甘肽修饰的MoS<sub>2</sub>纳米点和BP纳米点，已证明可以通过尿液有效清除出身体<sup>[44, 45]</sup>。此外，在肾脏清除率和肿瘤归巢之间建立平衡是另一个重要的研究方向。因此，可以试用广泛设计的靶向方法增强肿瘤摄取。

总之，二维纳米材料是一种独特类型的纳米结构材料，为医学诊断、癌症治疗、药物递送及细胞生物学等领域的发展提供了前所未有的机遇和挑战。值得相信的是，二维纳米材料将拓展生

物医学领域的应用范围，我们期待在不久的将来，二维纳米材料能够进入临床研究和应用阶段。

致谢 感谢国科温州研究院(温州生物材料与工程研究所)孟卓君博士和孙健博士的讨论。

### 参考文献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* Science, 2004, 306:666
- [2] Chhowalla M, Liu Z, Zhang H. Chem. Soc. Rev., 2015, 44:2584
- [3] Bastianini M, Sisani M, Petracchi A *et al.* Mater. Adv., 2021, 2: 1313
- [4] Yu S, Gao X, Baigude H *et al.* ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, 7:5089
- [5] Einkauf J D, Ortega L H, McDeavitt S M *et al.* Solvent Extr. Ion Exc., 2020, 38:612
- [6] Hosseinzadeh R, Khorsandi K. Sci. Rep-Uk., 2019, 9:14899
- [7] Villegas J G, Kan Y, Bakhmutov V I *et al.* Inorg. Chim. Acta, 2017, 468:270
- [8] Samsudin I B, Goh L Z W, Jaenicke S *et al.* J. Water Process Eng., 2022, 49:102971

- [9] Wang Q, O'Hare D. *Chem. Rev.*, 2012, 112: 4124
- [10] Song F, Hu X. *Nat. Commun.*, 2014, 5: 4477
- [11] Fan K, Chen H, Ji Y *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7: 11981
- [12] Zhang H, Zhang L, Cao Z *et al.* *Small*, 2022, 18: 2200299
- [13] Deng L, Xu Y, Sun C *et al.* *Sci. Bull.*, 2018, 63: 917
- [14] Liu H, Du Y, Deng Y *et al.* *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44: 2732
- [15] Wang X, Jones A M, Seyler K L *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2015, 10: 517
- [16] Qiu M, Ren W X, Jeong T *et al.* *Chem. Soc. Rev.*, 2018, 47: 5588
- [17] Qiu M, Singh A, Wang D *et al.* *Nano Today*, 2019, 02: 012
- [18] Jin L, Hu P, Wang Y *et al.* *Adv. Mater.*, 2020, 32: 1906050
- [19] Fu Z, Williams G R, Niu S *et al.* *Nanoscale*, 2020, 12: 14739
- [20] Ji X, Kong N, Wang J *et al.* *Adv. Mater.*, 2018, 30: 1803031
- [21] Zhang H, Zeng W, Pan C *et al.* *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29: 1903791
- [22] Gu Z, Zhu S, Yan L *et al.* *Adv. Mater.*, 2019, 31: 1800662
- [23] Lin H, Gao S, Dai C *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, 139: 16235
- [24] Chao Y, Wang G, Liang C *et al.* *Small*, 2016, 12: 3967
- [25] Chen Y, Wu Y, Sun B *et al.* *Small*, 2017, 13: 1603446
- [26] Kurapati R, Kostarelos K, Prato M *et al.* *Adv. Mater.*, 2016, 28: 6052
- [27] Huang K, Li Z, Lin J *et al.* *Chem. Soc. Rev.*, 2018, 47: 5109
- [28] Qian X, Gu Z, Chen Y. *Mater. Horiz.*, 2017, 4: 800
- [29] Cheng L, Wang X, Gong F *et al.* *Adv. Mater.*, 2020, 32: 1902333
- [30] Chen Y W, Su Y L, Hu S H *et al.* *Adv. Drug Delivery Rev.*, 2016, 105: 190
- [31] Yang K, Hu L, Ma X *et al.* *Adv. Mater.*, 2012, 24: 1868
- [32] Wang C, Li J, Amatore C *et al.* *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2011, 50: 11644
- [33] Nicolosi V, Chhowalla M, Kanatzidis M G *et al.* *Science*, 2013, 340: 1226419
- [34] Tan C, Zhang H. *Nat. Commun.*, 2015, 6: 7873
- [35] Mei X, Ma J, Bai X *et al.* *Chem. Sci.*, 2018, 9: 5630
- [36] Xu M, Wei M. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28: 1802943
- [37] Shao J, Xie H, Huang H *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7: 12967
- [38] Sun C, Wen L, Zeng J *et al.* *Biomaterials*, 2016, 91: 81
- [39] Mannix A J, Zhou X F, Kiraly B *et al.* *Science*, 2015, 350: 1513
- [40] Zhou Z, Yang J, Jiang Q *et al.* *Nano Energy*, 2018, 47: 81
- [41] Cheng L, Liu J, Gu X *et al.* *Adv. Mater.*, 2014, 26: 1886
- [42] Lin H, Wang X, Yu L *et al.* *Nano Lett.*, 2017, 17: 384
- [43] Hao J, Song G, Liu T *et al.* *Adv. Sci.*, 2017, 4: 1600160
- [44] Sun Z, Xie H, Tang S *et al.* *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, 54: 11526
- [45] Liu T, Chao Y, Gao M *et al.* *Nano Res.*, 2016, 9: 3003

## 读者和编者

## 订阅《物理》得好礼

— 超值回馈《岁月留痕》  
— <物理> 四十年集萃

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所  
帐号：11 250 1010 4000 5699  
(请注明《物理》编辑部)  
咨询电话：010-82649029；82649277  
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠物理类科普图书或《岁月留痕—<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》！

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

### (1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

### (2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行

