

冉洋F. Chiavaioli关柏鸥等Light 多功能集成一体式光纤诊疗技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42643.html>

本文仅供学习交流之用，版权归作者所有，请勿用于商业用途！

冉洋F. Chiavaioli关柏鸥等Light 多功能集成一体式光纤诊疗技术。 导读

癌症是全球重大公共卫生挑战，2022年全球新发癌症病例约2000万，死亡近1000万。精准诊疗技术的突破，是提升癌症患者生存率与生活质量的关键。近日，暨南大学联合意大利国家研究理事會应用物理研究所团队，开发出一种基于波分复用技术的一体式多功能光纤诊疗探针，成功实现了肿瘤光热治疗的全流程闭环管理。该探针集成pH传感、温度监测与光热治疗三大核心功能，有效解决了传统光诊疗技术中光穿透深度有限、纳米材料系统毒性及光纤探针功能单一等痛点，为肿瘤精准治疗及相关基础研究提供了极具转化潜力的新方案。相关研究成果以 Multifunctional fiber-optic theranostic probe for closed-loop tumor photothermal therapy 为题发表于《Light: Science Applications》。

研究背景

诊疗一体化（Theranostics）作为个性化精准医疗的核心方向，通过诊断与治疗的时空整合，其可在诊断后立即实施靶向治疗，并实时监测治疗剂量与疗效。光诊疗技术因其特异性强、时空可控性高以及非电离特性等优势，近年来备受关注。然而，其临床转化仍面临两大关键挑战：一是光在组织中的穿透深度有限，二是纳米材料的非特异性富集会​​导致全身毒性。

光纤与光诊疗剂的结合为解决上述问题提供了新思路：光纤可实现低损耗的端到端光传输，便于深部肿瘤的诊疗；光诊疗剂固定于光纤表面可有效降低脱靶毒性。然而，现有光纤探针多为单功能设计或存在功能间串扰，要实现多参数监测或集成诊疗需多光纤配置，而这会增加设备的刚性与尺寸，不仅降低了探针的介入兼容性，还会增加组织损伤风险。

研究亮点

1.基于波分复用技术，实现多功能无串扰集成

团队受光纤通信波分复用技术启发，通过模块化波长分配策略，将具有不同吸收带的pH指示剂（HPTS-IP, 405 nm和450 nm）、温度指示剂（LnMOF, 295 nm）与光热剂（ICG, 808 nm）通过凝胶修饰于锥形光纤表面实现功能化。利用各自功能对于光谱的选择性，通过不同波长激发可实现功能按需切换，从根本上避免了功能间串扰，为单光纤多功能集成提供了全新解决方案。

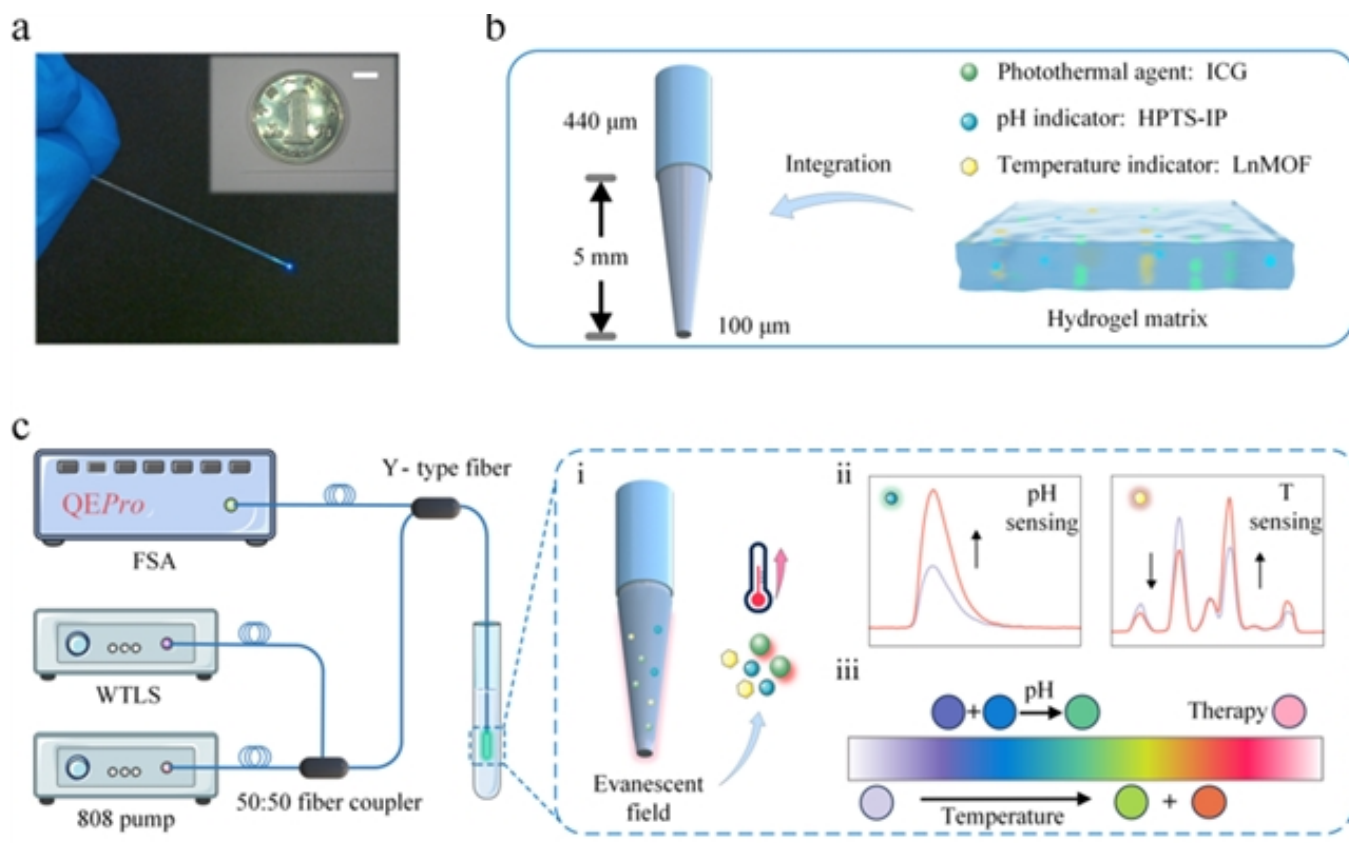


图1：(a) 集成式光纤诊疗探头实物图。(b) 在光纤上通过凝胶涂层装载了pH 指示剂 (HPTS-IP)、温度传感器 (LnMOF)以及光热光敏剂 (ICG)。(c) 实验系统结构图。i: ICG实现高效光热转化; ii: pH和温度荧光传感示意图; iii: 波分复用策略克服功能间串扰与影响。

2. 高性能在体传感与光热治疗：精准与高效兼具

pH传感：采用比率型荧光探针HPTS-IP，检测范围为pH 4.0-9.0，在生理相关区间（pH 6.0-8.0）的分辨率高达0.013 pH单位。响应速度快，环境pH从6.0变化至8.0仅需3.2秒即可检出。稳定性好，72小时浸泡后荧光强度仅下降1.6%。特异性强，无温度串扰影响。

温度传感：基于镧系金属有机框架（LnMOF）的热调控能带间能量转移机制，实现比率型温度传感。生理相关温度区间（34.5-39 °C）内的传感分辨率低至0.3 °C。响应速度快，仅需2.0秒即可检出环境温度变化（26 °C升温至60 °C）。循环稳定性好，10次循环相对标准偏差仅1.7%，且pH干扰可忽略不计。

光热转换：ICG在808 nm激光激发下展现出高效光热转换能力，仅需267 mW的激发功率即可使光纤探针升温至100 °C以上，光热稳定性优异，5次加热/冷却循环温度升高幅度保持稳定。

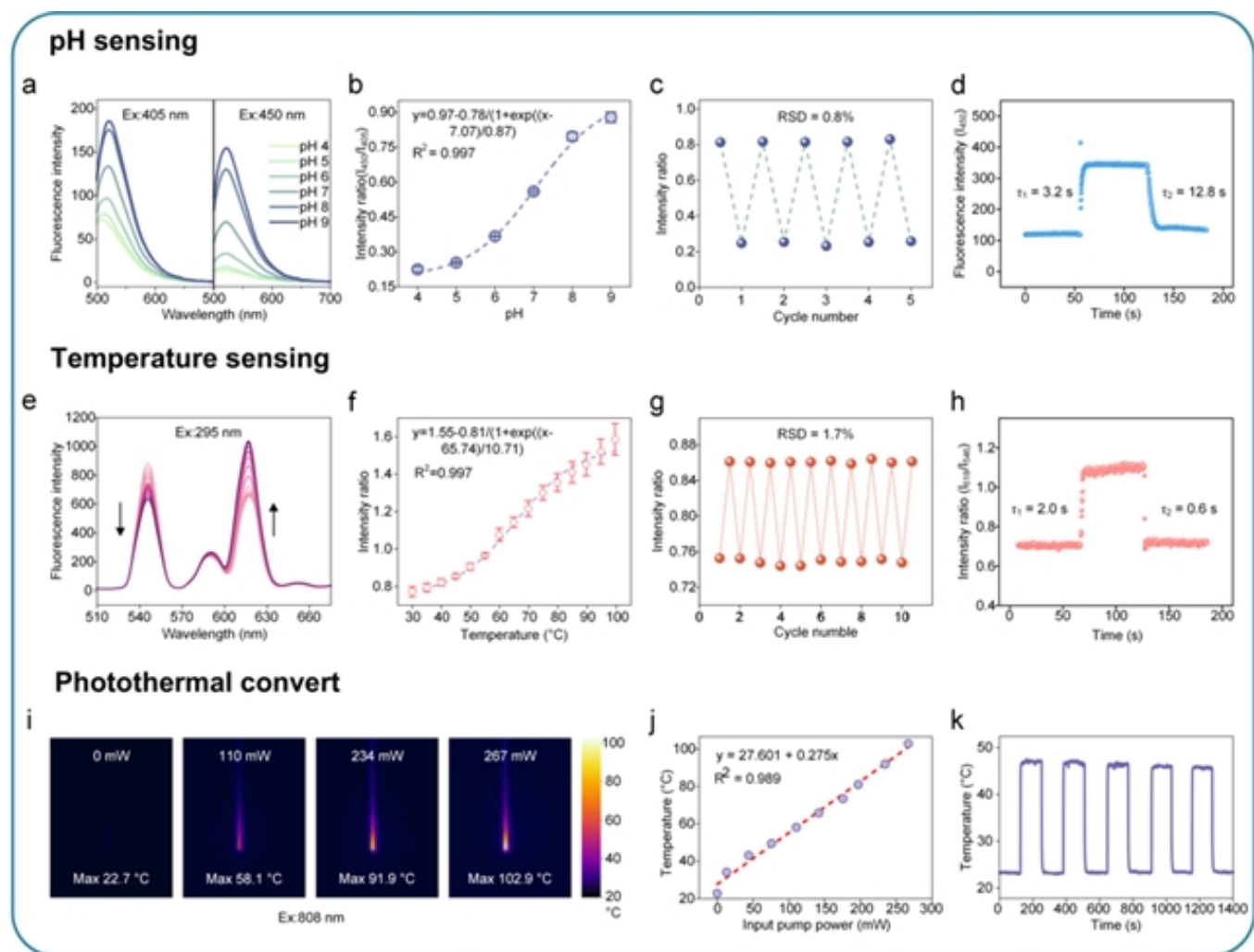


图2：光纤一体化探针传感和光热性能。（a）在450 nm和405 nm激发下，探针在不同pH值下的荧光光谱；（b）pH传感校准曲线；（c）pH传感可逆性；（d）pH传感响应速度；（e）在295 nm激发下，探针在不同温度下的荧光光谱；（f）温度传感校准曲线；（g）温度传感可逆性；（h）温度传感响应速度；（i）不同泵浦功率(808 nm)下探针的热图像；（j）探针最高温度随泵浦功率变化的曲线；（k）5次加热/冷却循环验证光热稳定性。

3. 闭环治疗全流程：从诊断到疗效评估的精准管理

术前肿瘤识别：利用肿瘤微环境的pH梯度，可精准区分肿瘤与正常组织，并实现了肿瘤边缘的精准识别，为治疗边界的准确划定提供了关键依据。测得肿瘤中心与正常组织之间（ $p < 0.0001$ ）以及肿瘤边缘与正常组织之间（ $p < 0.01$ ）的pH值差异显著。

术中治疗与剂量监控：将探针插入肿瘤中心，维持光纤温度在65℃，确保肿瘤边缘达到有效治疗温度（约45℃）。实时温度监测可有效避免治疗不足或过度损伤，为个性化治疗剂量的调整提供实时反馈。

术后疗效评估：光热治疗后肿瘤微环境的pH值显著升高，半小时内pH上升幅度0.12-0.20，24小时后上升幅度约0.3（ $p < 0.01$ ），反映了肿瘤微环境的逆转。动物实验结果显示，4只治疗小鼠中3

只实现肿瘤完全治愈，1只肿瘤生长被显著抑制，且小鼠体重保持稳定，充分证实了治疗的有效性与生物安全性。

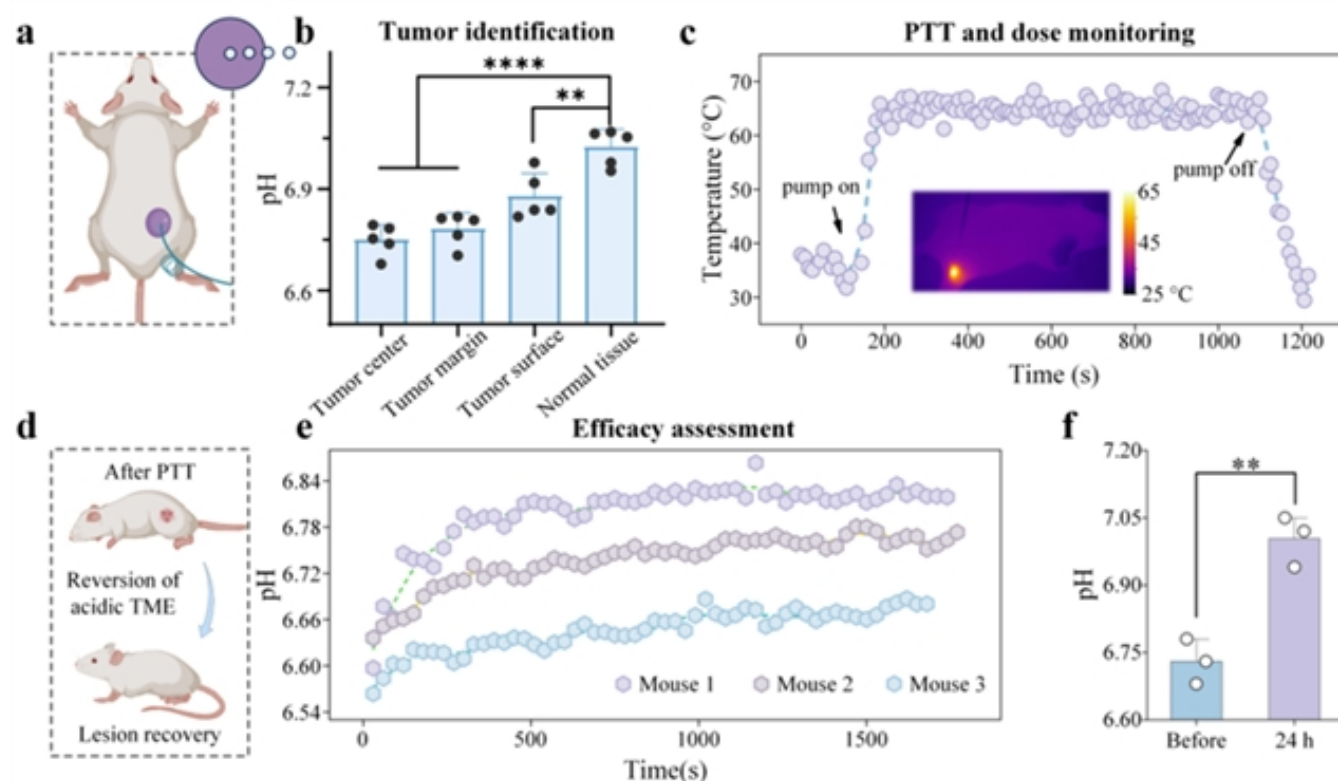


图3：光纤诊疗探针用于荷瘤小鼠（a-b）治疗前肿瘤边缘识别；（c）治疗过程中光热转换以及热剂量监控；（d-f）治疗结束后半小时及次日肿瘤微环境pH值连续监测。

总结与展望

本研究开发的多功能光纤诊疗探针，通过波分复用技术成功实现了pH传感、温度监测与光热治疗的无串扰集成，有效解决了传统光诊疗技术的关键挑战，实现了肿瘤光热治疗的全流程闭环管理。

未来，该集成策略可拓展至柔性聚合物与水凝胶光纤，进一步降低组织损伤，从而实现长期植入式诊疗设备；还可通过充分利用光谱资源与多峰拟合算法，增强单光纤的多参数监测能力，为肿瘤及其他疾病的临床诊疗与机制研究提供更强大的工具。这一高性能、易制备的光纤探针多功能集成策略，有望在肿瘤学及其他领域的临床实践与机制研究中发挥重要作用，推动新型临床设备的发展。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02219-3>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：冉洋等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发