
辛洪宝等Light双模态光控活细胞免疫微机器人

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33441.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

辛洪宝等Light双模态光控活细胞免疫微机器人。导读

精准免疫调控能够在病灶处最大限度激活免疫反应、减少系统性损伤，成为攻克感染、肿瘤等重大疾病的关键突破口。巨噬细胞等免疫细胞作为机体内天然的免疫战士，可吞噬病原体、清除衰老细胞，甚至精确锁定并攻击癌细胞等生物威胁物。然而，尽管这些细胞本身具备强大的作战能力，如何让它们在体内听从指令、精准出击，始终是一大挑战。近年来，随着生物微纳机器人技术的兴起，研究人员开始尝试借助物理场控制与仿生设计，将这些天然士兵转化为可控的精准作战单元。但多数方法仅能让细胞动起来，难以同步调控细胞的生物功能。并且，为提升功能性，需通过外源性材料修饰或基因工程改造赋予细胞驱动或识别能力，这不仅增加了生物安全性和伦理风险，还可能在体内引发免疫排斥、毒性反应等问题。

近日，暨南大学辛洪宝教授团队直接利用光来激活并控制巨噬细胞，在无需外源性材料修饰或基因编辑的条件下，通过光热-光力的双模态光控技术将天然巨噬细胞改造成具有精准导航和靶向清除功能的活细胞免疫微机器人——吞噬机器人（Phagobot），可在活体内外精准作战，实现了对病原体、癌细胞碎片等多种生物威胁的精准靶向吞噬清除。这种双模态光学调控技术通过将光学微操控技术与生物细胞功能调控结合起来，为智能生物微纳机器人的设计和构建提供了全新思路，并为免疫调控和精准医学提供了非遗传依赖的新型光学途径。相关研究成果以"Light-powered phagocytic macrophage microrobot (phagobot): both in vitro and in vivo"为题发表在国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》。暨南大学纳米光子学研究院博士生李醒为本文第一作者，辛洪宝教授和潘婷副教授为论文共同通讯作者。

研究内容

在微观世界中，一束光不仅能照亮细胞，还能驱动它作战。研究团队创新性地提出了一种基于光热与光力双模态协同的细胞调控和驱动策略，无需任何材料修饰或基因编辑，仅用一束聚焦的近红外光便可实现巨噬细胞在活体内的功能激活与精准导航（图1）。与传统驱动方法相比，细胞不仅能动起来，还能战斗起来，使细胞真正具备了自主响应与执行免疫任务的能力。

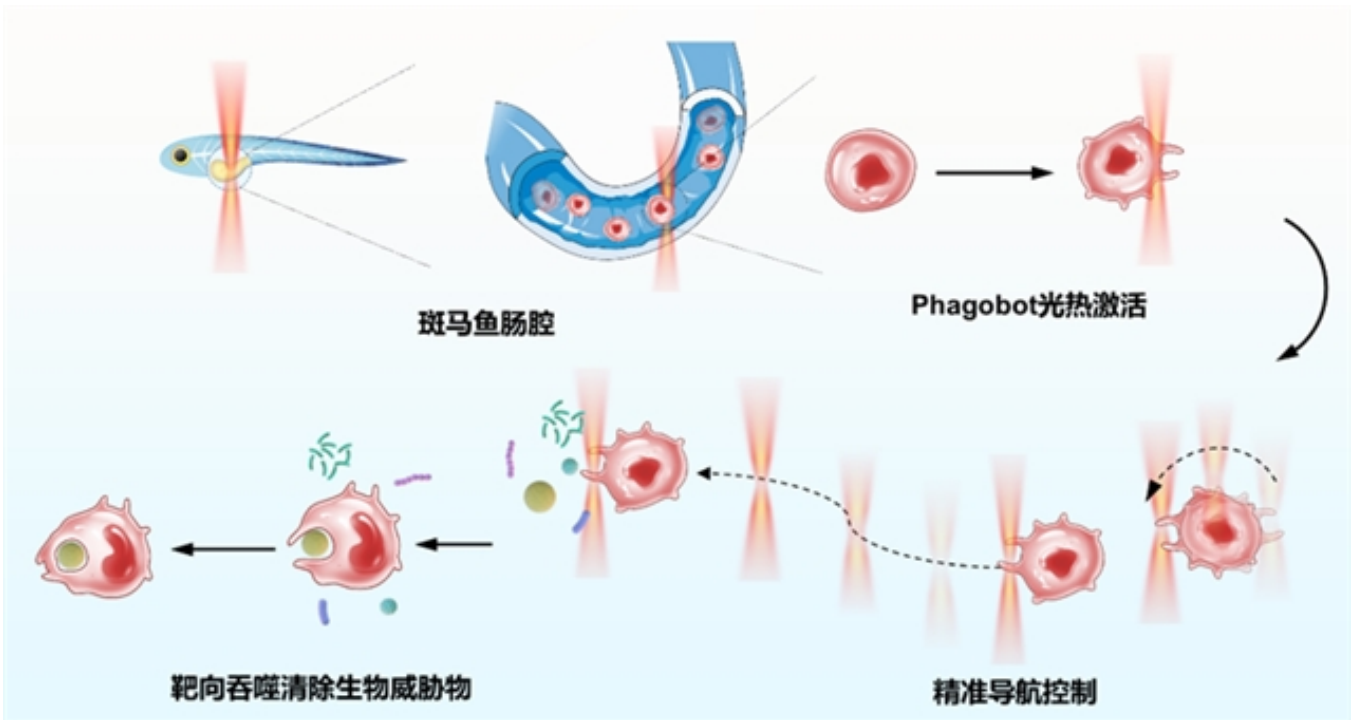


图1. Phagobot功能激活与精准导航的示意图。

1. Phagobot的光唤醒过程

Phagobot的激活通过聚焦的近红外光束（激光波长为1064 nm）精准照射静息态巨噬细胞的细胞膜实现（图2a）。聚焦光束照射于巨噬细胞膜表面后，可在3分钟内快速产生局部光热效应（图2b），从而激活巨噬细胞膜表面的温度敏感离子通道（TRPM2），引发钙离子内流（图2c），进而增强细胞内线粒体能量代谢并驱动活性氧（ROS）大量产生，最终实现巨噬细胞的激活，使其发生形变并生长出延伸的伪足（图2d）。该过程可视为Phagobot的光热激活唤醒过程。

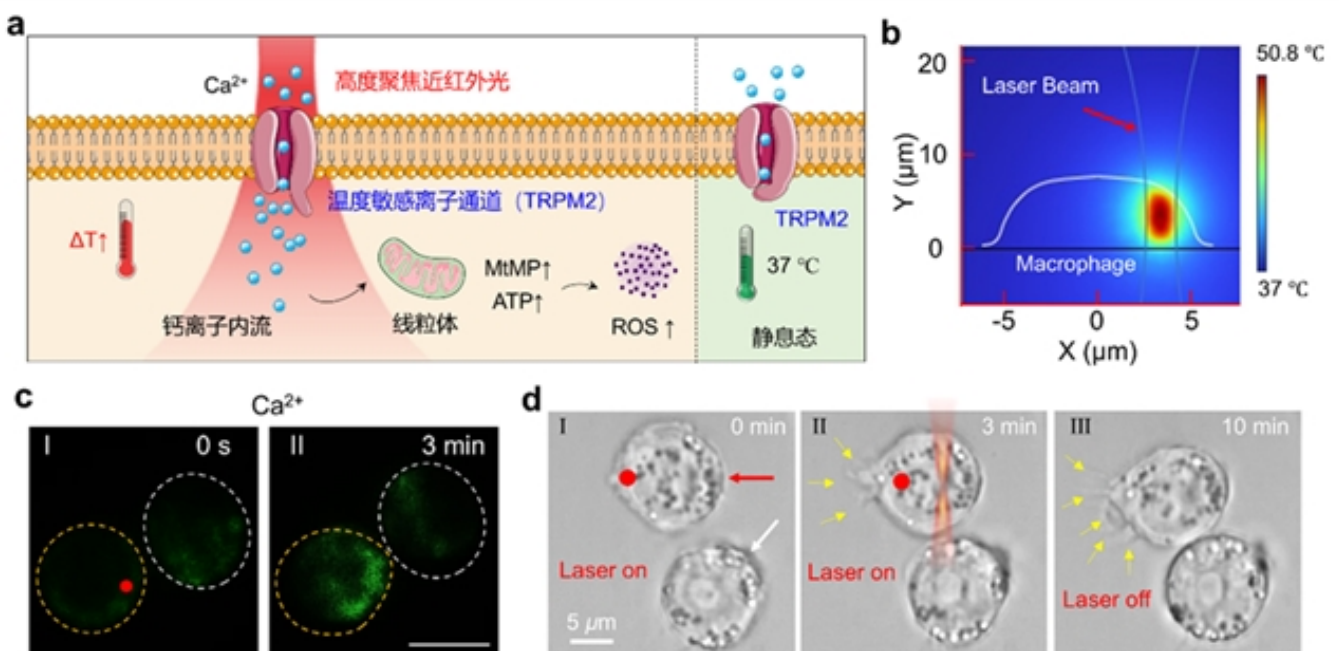


图2. (a) Phagobot的光热激活机理示意图。(b) 巨噬细胞在聚焦近红外光束(功率为60 mW)辐照下的模拟温度分布。(c) 激活后靶细胞钙离子荧光信号变化图片。(d) 激活后巨噬细胞形态变化和伪足延伸的实验图片。

2. 光控吞噬机器人的精准导航控制

在聚焦近红外光的激发下，巨噬细胞生长出关键的作战结构——细胞伪足。这一结构不仅赋予Phagobot吞噬与运动能力，也可作为信号接收器感知外界环境，借助光力的遥控实现定向导航与精准出击。因此，在Phagobot光热激活的基础上，研究人员进一步通过光力操控激活态巨噬细胞伪足的运动，实现机器人的精确转向、定向迁移以及复合运动的多维度导航控制。值得强调的是，传统的生物机器人常依赖磁场等外力直接推动整个细胞前行，细胞在运动过程中几乎完全处于被动状态，不仅控制精度有限，还可能因强外力干扰而影响其生理活性和功能表达。而在本研究中，Phagobot采用亚细胞精度调控策略，通过光力仅作用于细胞伪足结构，引导其自主运动。这种引导方式高度仿生，更贴近免疫细胞在自然状态下的迁移方式，既实现了对运动方向的精准控制，又在最大程度上保留了细胞本身的活性、可塑性和功能性。

3. 靶向吞噬生物威胁物

在光热激活与光力导航的协同机制下，Phagobot展现出对多种生物威胁物的精准识别与高效清除能力。体外实验表明，该光控机器人可高效清除不同尺寸的目标，包括金黄色葡萄球菌、酵母细胞、塑料纳米颗粒和癌细胞碎片等(图3)。更令人振奋的是，这一系统也在斑马鱼活体模型中得以验证(图4a)。研究人员在活体肠道组织这种持续蠕动变化的复杂微环境中，实现了对目标吞噬机器人的精准光热激活和不同密度组织中的可控光力导航(图4b)。在此基础上成功引导其靶向清除肠道中的细胞碎片，可在活体内执行定点清理的任务(图4c)。并且在长达数小时的连续观测中，斑马鱼保持良好的活性，证明该体系良好的体内兼容性和生物安全性。

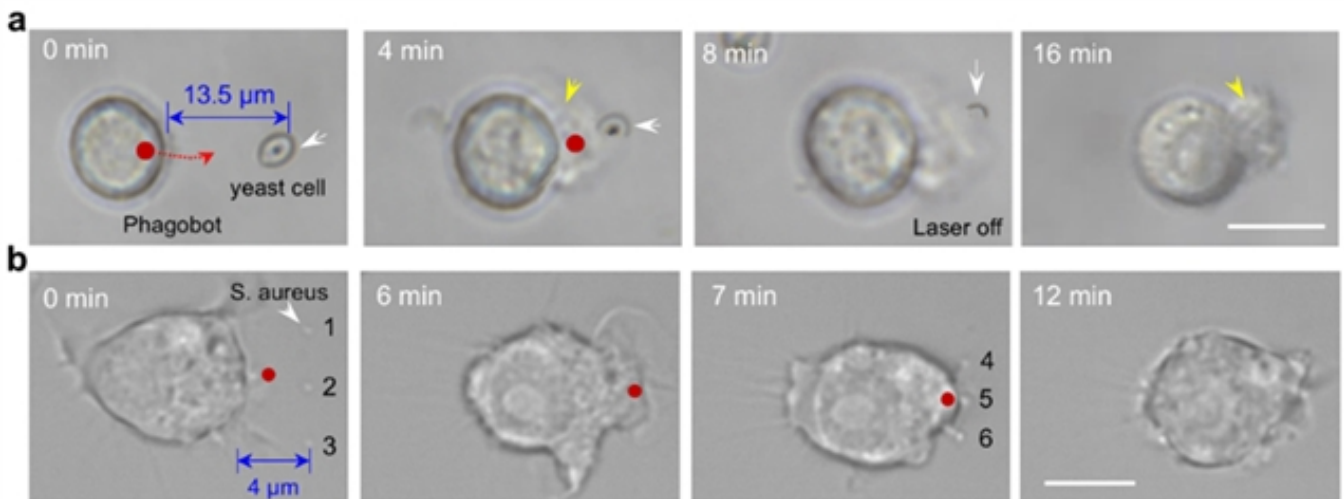


图3. 生物威胁物的精准靶向清除。光力引导Phagobot靶向迁移至靶标位置并对(a) 单个酵母菌和(b) 多个金黄色葡萄球菌执行精准吞噬任务。

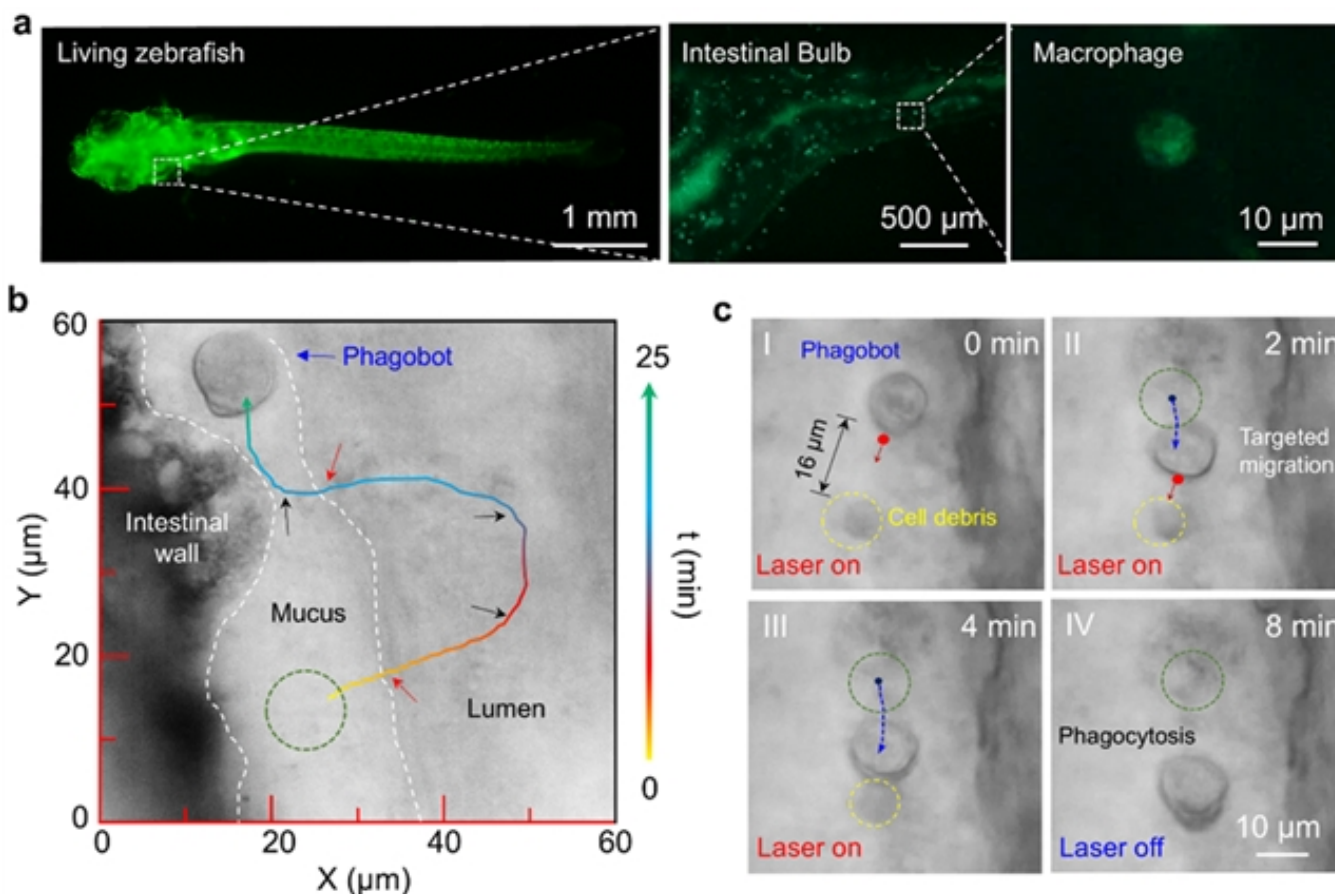


图4. Phagobot在活体内的原位构建与功能执行。(a)巨噬细胞在斑马鱼体内的荧光标记图片。(b) Phagobot在斑马鱼蠕动肠道中的可控导航。(c) Phagobot在肠道中靶向清除细胞碎片。

总结与展望

本研究提出一种双模态光学驱动活细胞机器人的策略，成功将巨噬细胞构建成具有精准导航和靶向清除功能的驱动-导航-作战一体化吞噬机器人。与传统方法相比，这种同时具备功能激活与运动引导的双模态光学控制技术实现了活细胞生物机器人从单一物理移动平台向智能细胞作战单元的转变。不仅代表了光学微操控技术在生物细胞驱动和微机器人构建的应用新突破，与传统生物机器人单一驱动模式的限制，还以极简的干预手段保障了系统的生物相容性、稳定性与伦理可接受性，为活细胞生物机器人在免疫调控、病灶清除等方面的活体应用提供了新的借鉴。

论文信息

Li, X., Zhong, S., Pan, T. et al. Light-powered phagocytic macrophage microrobot (phagobot): both in vitro and in vivo. *Light Sci Appl* 14, 202 (2025).

<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01881-3>

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等事宜，请与我们联系。
来源：Light: Science & Applications

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](http://www.iikx.com)转发