

# 微马达和微生物前沿交叉领域研究进展

王建敏<sup>1</sup>, 林岚<sup>2</sup>, 孔亮盛<sup>2</sup>

1. 重庆医科大学附属永川医院检验科, 重庆 402160

2. 重庆大学附属三峡医院医学检验科, 重庆 404100

**摘要** 微马达是一种可将不同形式的能量转化为动能进而实现自主运动的微型工具。近年来, 该研究逐渐拓宽至微马达与微生物交叉领域。总结了微生物马达的制备、微马达在微生物的检测及体内应用等方面的研究进展。微生物的识别机制及生物相容性与微马达的自主运动能力互为补充, 因此微生物马达的出现既为微马达的在体应用提供了新思路, 也为微生物的检验提供了新方法。目前, 受制于制备方法相对落后、运动并非完全可控、体内降解困难等限制因素, 相较于其他类型的微马达, 微生物马达的研究仍处于相对原始的阶段。提出了对马达新材料的研发和驱动方法的优化将会有效解决问题并赋予微生物马达更加广泛的应用前景。

**关键词** 微生物马达; 微生物检测; 杀菌

微马达是一类在微纳米尺度上, 通过吸收和转化环境中的能量进而实现自主运动的工具。自微马达的概念被提出以来, 有关研究层出不穷, 对微马达的早期探索主要集中在不同类型马达的制备和对其驱动方式的研究。如今, 除了管状<sup>[1]</sup>, 球状<sup>[2]</sup>等常规几何形状外, 还有一些仿生状(如鱼状<sup>[3]</sup>)等其他形状的微马达被先后制备出来。马达的驱动原理也逐步被总结为气泡驱动<sup>[4]</sup>、自电泳<sup>[5]</sup>和自扩散泳<sup>[6]</sup>等形式。得益于优异的自主运动能力, 溶液中的微马达可以有效地实现微搅拌和增强传质等

功能<sup>[7]</sup>, 且微马达的运动往往与驱动力大小有关, 由于其运动可被显微镜成像分析, 部分马达被用作生物传感领域的新型分析工具<sup>[7]</sup>。马达表面还可供进一步修饰、提供反应场所并作为运输装载的平台, 因此微马达也被用作运输<sup>[8]</sup>或检测<sup>[9]</sup>工具。

随着研究的不断深入, 借助新技术研发的新马达逐渐有了新应用, 如基因编码的人造分子马达被应用于细胞膜突起中 GFP 标记蛋白的高精度光控转运<sup>[10]</sup>; 能够有效促进纳米级药物和微米级 T 细胞深度渗透的癌症免疫化疗的微马达<sup>[11]</sup>; 脲酶驱动的

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2022-05-14

基金项目: 重庆市科卫联合医学科研项目(2018MSXM138); 临床检验诊断学教育部重点实验室开放研究课题(KF202006); 重庆大学附属三峡医院科研人才专项(2022YJKYXM-038); 重庆医科大学附属永川医院院级科研项目(YJLC201718)

作者简介: 王建敏, 主管技师, 研究方向为分子诊断及生物分析化学, 电子信箱: wangjianmin099@163.com

引用格式: 王建敏, 林岚, 孔亮盛. 微马达和微生物前沿交叉领域研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(2): 89-95; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.010

生物医学微马达被用作协同光热抗菌治疗的集成平台<sup>[12]</sup>;降落伞状的微马达用于皮肤穿透实现抗真菌协同治疗<sup>[13]</sup>等。

微生物是指一类个体尺寸较小、肉眼不可见、需要借助高倍显微镜才能看到的微小生物体,主要包括细菌、真菌、病毒及其他小型原生生物。虽然尺寸微小,微生物在自然界或生物体中往往扮演不可或缺的重要角色,如仅在人类肠道中就有多种微生物<sup>[14]</sup>,其中既有促进消化吸收的益生菌,也有一些引起腹泻等其他肠道疾病的病原菌。如何利用或仿生有益微生物的化学生物学性质,或是准确检测并杀死有害微生物,一直以来都是微生物领域研究中的重要课题。

近年来,对微马达的研究逐渐拓展到微马达与微生物交叉的前沿领域,研究内容主要集中在微生物马达的制备及其在微生物检测和杀菌等方面的应用。

## 1 微生物在微马达制备中的应用

得益于新材料的研发和应用,多元化的新型微马达被相继开发。其中,可在生物体内实现复杂任务的“微纳米机器人”表现出较强的吸引力,微生物和微纳米马达杂交的微生物马达便是其中一种,它们多以生物相容性好的材料作基底,修饰靶向或识别传感单元,进而实现检测或载药任务。

### 1.1 微生物局部功能化的微马达

生物体中有些细菌可以在体内稳定长期共生,有些则在进入体内后刺激免疫系统作出免疫反应。利用细菌在生物体内易被免疫细胞识别并响应的机制,依托微生物对微马达局部功能化的微生物马达先后制备<sup>[15-16]</sup>。

贺强课题组<sup>[17]</sup>开发了一种对大肠埃希氏菌具有运动趋向性的微生物马达杂交体。他们将装载有药物的介孔硅包裹在细菌膜中,随后经吞噬细胞吞噬后形成微生物马达杂交体(图 1(a))。该杂交体保持了吞噬细胞的原有运动性,对大肠埃希氏菌的分泌环境仍具有很好的化学趋向性。同时,该杂交体的形成避免了纳米材料负载的药物在运输过

程中泄露,提高了微马达的靶向能力,进而有效地实现药物定点输送。Zhang 等<sup>[18]</sup>基于细菌膜包裹的纳米材料进入体内后会刺激免疫系统作出响应产生抗体的原理制备了一种大肠埃希氏菌外膜包裹的金纳米粒子。细菌膜利用强相互作用包裹住内部金纳米粒子,进而构成了微生物马达(图 1(b))。由于细菌膜含有大量的免疫性抗原,微生物马达在进入小鼠体内后诱导小鼠淋巴结中树突状细胞快速激活和成熟,淋巴 B 细胞和淋巴 T 细胞作出响应并产生抗体,进而在刺激先天性免疫和促进适应性免疫中发挥关键作用。实验表明,相比于直接用病原性的大肠埃希氏菌诱导产生的抗体,这种方法产生的抗体更加稳定耐用。

微生物局部功能化的微马达同时具备了两组分的优势,除纳米材料的优异理化性质外,微生物部分赋予了马达更好的生化性质,从而提高了微生物马达的应用可行性。

### 1.2 以微生物为底的微马达

以微生物为底的微马达是指通过生物化学手段,将微生物共价或静电连接至微马达上作为动力单元,随着微生物对环境产生趋向性响应,微纳米马达随之一起运动,因此在微生物纳米马达表面修饰或负载上结构单元即可实现检测或载药功能<sup>[19-20]</sup>。

Singh 等<sup>[21]</sup>设计了一种细菌驱动的球状马达,即在不对称微球一侧利用生物素-链霉亲和素的强共价作用将大肠埃希氏菌连接上去进而制备出微生物马达(图 1(c))。微球自身尺寸易于调节,进而可以调控微球负载细菌的数量及运动阻力以获得最优的运动行为,即并非微球粒径越大马达运动效果越好,尽管大表面积会带来更高的负载率,但因修饰方向性不一致,细菌驱动的合力大小并非与负载数量成正比,且微球越大,运动阻力越大。由于微马达的运动速度往往对溶液 pH 敏感,由此可用作 pH 传感器。Sánchez 等<sup>[22]</sup>将磁螺菌(MSR-1)捕获至多孔硅微管中进而构建出运动可控的微马达。磁螺菌与带有正电基团的马达之间通过范德华力和静电作用力连接(图 1(d)),微管对细菌活性起保护作用。由于磁螺菌有可旋转的双极鞭

毛,进而可在原生的水相环境中对氧浓度作出响应,加之其内部含有趋磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子,由此可进一步实现磁场对运动的控制,在外加磁场和氧气浓度梯度的双重控制下,微马达到达大肠埃希氏菌附近并刺穿细菌膜释放抗生素,与普通药物相比可以起到更好的治疗效果。此外,他们还设计了一种控制细菌微马达运输药物的开关<sup>[23]</sup>,在微管上修饰脲酶,当需要终止杂交体运动时,只需往介质中加入一定浓度的尿素,经脲酶分解后,溶液 pH 升高,细菌活性受到抑制,从而起到控制运动开关的作用。

### 1.3 仿生杂交体马达

仿照微生物结构,设计同样具备运动或靶向能力的仿生杂交体马达也是一种制备微生物马达的常用方法<sup>[24-25]</sup>。仿生学马达除具备微生物马达的生化性质外,还可有效避免某些病原性微生物在进入体内后引发的免疫副反应。

Mhanna 等<sup>[26]</sup>仿照细菌鞭毛,制备了一种由金属 Ni 和 Ti 构成的螺旋状仿生鞭毛,脂质体随后被

吸附在上面(图 1(e)),用于对水溶性药物的运输。仿生鞭毛可在外加磁场作用下旋转进而产生向前的运动,同时,吸附脂质体后该仿生鞭毛的运动能力没有受到显著影响,并可将药物准确递送至细胞内部实现治疗目的。海洋轮虫被用作一种功能化纳米粒子载体用于环境问题修复<sup>[27]</sup>,以海洋轮虫为引擎,功能化纳米粒子吸附在轮虫内唇上,轮虫的触角会加速周围液体流向其口内,进而使液体与功能化粒子充分接触,结合轮虫自身的运动活性,该功能化海洋轮虫在不需额外搅拌和有毒燃料驱动的前提下即可有效实现有毒物质的清洁,进而形成了一种高效的环境修复平台(图 1(f))。若纳米粒子修饰上溶酶菌、有机磷水解酶或相应配体,可对应实现对污水中大肠埃希氏菌、甲基对氧磷和重金属的去除。

在微生物马达的制备过程中,微生物无论以何种方式出现,均是基于其特有的识别或运动机制,这种反向利用微生物“危害”的微马达被证实具有优异的生化表现。

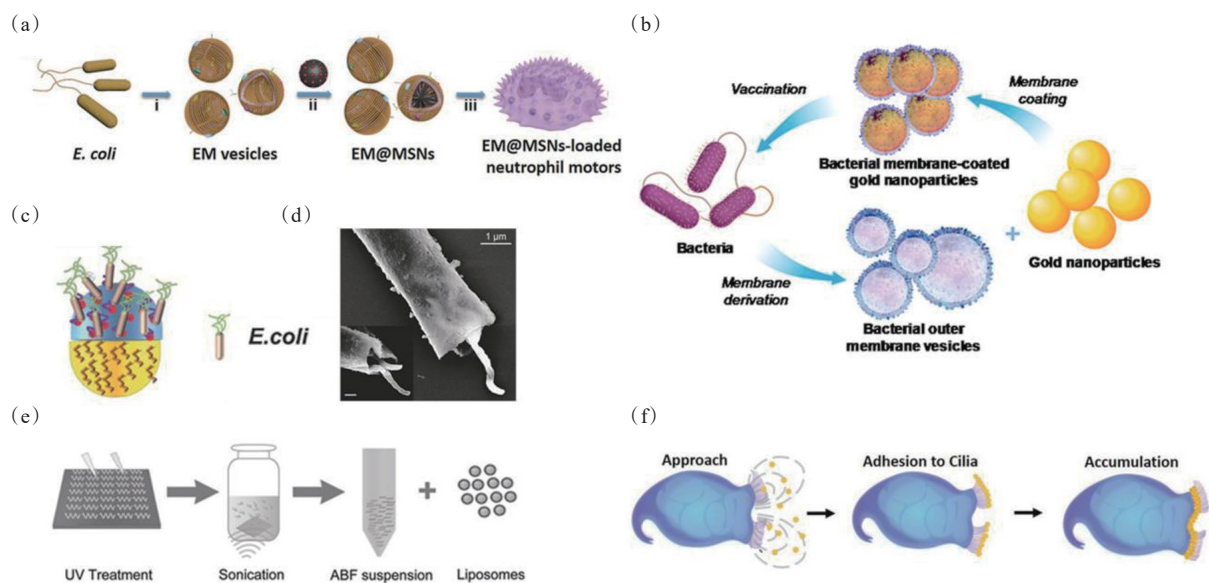


图1 微生物在微马达制备中的应用

## 2 微马达在微生物检测中的应用

微马达因具有可修饰、可负载、可运动等性质,常被用作检测工具,其在检测中的应用主要有2方

面,一是以马达自身的运动情况作为输出,实现对周围环境成分的定性分析;二是以马达为载体,功能化修饰特定信标,结合其他分析方法,实现定量检测。

## 2.1 微马达在微生物定性分析中的应用

生物修饰的微马达常对化学梯度具有趋向性,而多数微生物会在自身周围产生化学梯度,由此进一步提出了基于马达运动实现微生物定性检测的概念性方法<sup>[28]</sup>。

Sahari等<sup>[29]</sup>利用基于扩散的微流平台建立了稳定的化学引物线性浓度梯度,并进一步研究了微生物马达的化学趋向性。微生物马达对化学引物的浓度梯度表现出运动趋向性,且并非引物浓度越高马达运动越快,这主要是因为当引物浓度高于一定值后,大肠埃希氏菌对引物的识别和信号接收单元趋于饱和,进而限制了微生物马达运动速度的提高(图2(a)),实验结果证实了微马达在微生物定性分析中的潜在应用可行性。Ceylan等<sup>[30]</sup>也在实验中发现了类似结论,利用带鞭毛的细菌对pH的响应能力,讨论了粘质沙雷氏菌(*S. marcescens*)微马达对pH的响应。由于当细菌处在非适宜pH中时,鞭毛的摆动频率加快,推动细菌朝远离该环境的方向运动,进而使微生物马达呈现出朝向适宜pH环境的运动趋向性(图2(b))。若利用基因工程使靶标周围的pH梯度统一,该微生物马达即可被应用于传感pH梯度(如肿瘤细胞微环境)进而实现疾病的检测或诊断。

## 2.2 微马达在微生物定量检测中的应用

微马达具有好的运动特性,可在溶液中实现自搅拌功能,若被功能化信标分子,结合其他分析检测方法,可作为一种优异的传感工具,实现对底物

的小体积、高灵敏的快速化学检测。

Pacheco等<sup>[31]</sup>设计了多种微马达实现了对不同细菌分泌物的精准定量检测。他们首先利用量子点荧光淬灭机制实现了对肠沙门氏菌(*Salmonella enterica*)的检测,其中,功能化的量子点被连接至Pt纳米粒子上,当微马达靠近时,细菌分泌的脂质糖会与量子点表面修饰的官能团发生特异性识别,进而实现量子点的荧光淬灭。微马达的运动特性会加速溶液的传质过程,从而使该传感器可实现对细菌分泌脂质糖的快速检测,最低检测浓度低至0.07 ng(图2(c))。实验结果表明,微马达搅拌效果与外加200 rpm磁力搅拌的结果相同,但检测样本体积要少1000倍。同样的机制还被用作对细菌内毒素的检测<sup>[32]</sup>,他们在水包油的液泡中包埋了Pt、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米粒子和量子点,前两者作为驱动单元,可对应实现马达的气泡及磁场驱动,后者作为检测信标,可对细菌分泌的内毒素作出特异性响应。该微生物马达可在5 min内完成检测,最低检测浓度低至0.01 M(图2(d)),而静态的纳米传感器在15 min内没有出现荧光淬灭。在实际样本的检测中,该纳米传感器依然表现优异,仅需4 min即可完成,即使是在人类血清中,粘度大的分散基质也未对该传感器的检测造成大的影响。

相比于以微马达的运动趋向性作为微生物的定性分析依据,以微马达为载体实现对微生物快速精准的定量检测体现出更高的竞争力,技术也更为成熟。

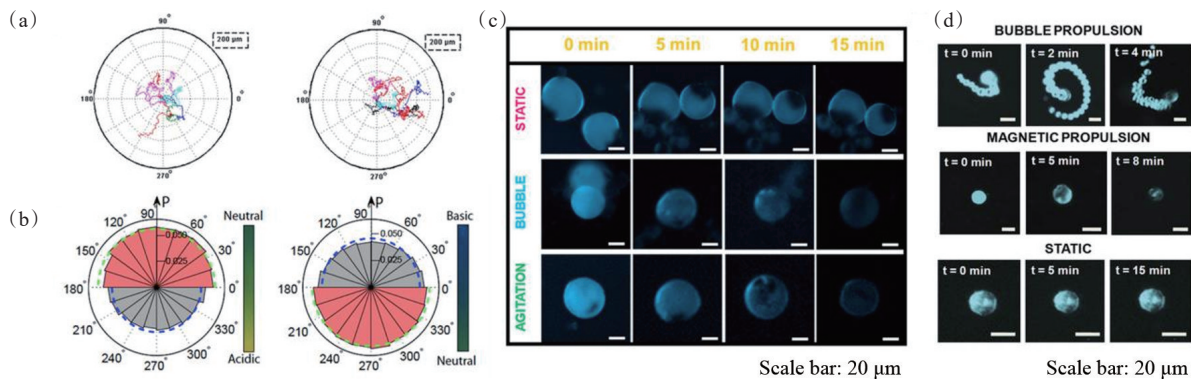


图2 微马达在微生物检测中的应用

### 3 微生物马达在生物体内的应用

目前,微生物马达在生物体内的应用主要是通过负载药物实现精准药物递送<sup>[33]</sup>或杀菌<sup>[34]</sup>。

#### 3.1 微生物马达用于杀菌

微马达被用作杀菌工具已有先例,Vilela等<sup>[35]</sup>制备了一种不对称Mg-Fe-Au微球,外层修饰Ag纳米粒子(AgNPs)用来杀菌。带负电的细菌细胞壁易吸附至带正电的AgNPs表面,后者释放Ag<sup>+</sup>破坏细菌结构,引起细胞凋亡(图3(a)),且相比于静态AgNPs,该微马达具有更好的杀菌表现。Li等<sup>[36]</sup>以微马达为载体制备了一种肠部杀菌药物,相比于其他传统药物,微马达的加入极大提高了杀菌能力,主要是由于在肠部的微环境中药物保护层溶解,微马达释放并暴露出来,马达独有的运动能力导致负载的药物易被吸附至肠内部,降低了被冲走的概率,延长了停留时间,进而提高了杀菌能力(图3(b))。

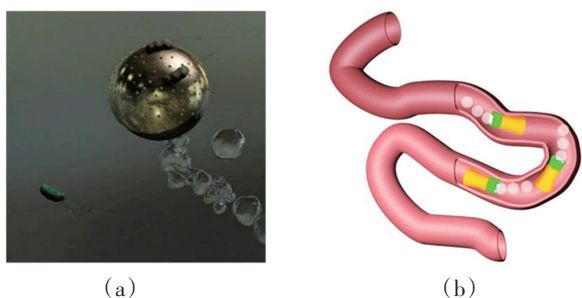


图3 微生物马达在生物体内的应用

#### 3.2 微生物马达用作药物递送

Felfoul等<sup>[37]</sup>利用海洋磁球菌(MC-1)具有沿磁场线朝低氧环境运动的特性制备了一种微生物马达用于实现肿瘤周围药物的递送,该微生物马达可以有效进入肿瘤组织周围低氧环境中并穿透肿瘤细胞实现瘤周注射,装载有抗肿瘤药物的脂质体可以有效杀死肿瘤细胞实现治疗目的。利用肿瘤细胞周围的低氧环境,Mueller等<sup>[38]</sup>提出了一种以微生物为载体运输内皮抑素到肿瘤组织的机制。由于青春型双歧杆菌(*B. adolescentis*)对肿瘤组织周围低氧微环境具有好的靶向性,他们在实验中将内皮抑素负载至细菌中并将该微生物马达静脉注射至小

鼠肝癌组织附近,解剖结果表明,3次注射后,该细菌特异性出现在小鼠肿瘤组织中,且该内皮抑素达到指定位点后可显著抑制肿瘤细胞生长。

### 4 微生物马达的应用局限性

需要注意的是,以微生物为底的马达粒径一般较大,若微生物本身没有自主运动能力,则只能依靠外界提供足够大的驱动力才能使微生物马达运动起来,然而,强驱动力一般只能由气泡驱动提供,像自电泳、自扩散泳等驱动方式只适合应用在粒径较小的微马达上,而当溶液中底物浓度较低时很难有生成气泡的化学反应发生,这极大地压缩了微生物马达的应用空间。另一方面,大的微马达尺寸降低了其自身的生物相容性,从而限制了微生物马达在体内的进一步应用。此外,当微生物马达用在检测上时,由于其运动多靠检测目标分泌物产生的化学梯度作为信号来源,以运动行为的变化作为输出信号,此类检测方式较为粗糙,且马达在体内的运动行为难以控制。

要克服这些问题,需要结合新材料的研发、马达制备方法的改进以开发新型微生物马达,同时,还需加强对微生物马达驱动方式的优化和运动行为的控制,以提升微生物马达作为检测工作的可控性和灵敏性。

### 5 结论

作为一种可实现自主驱动的微纳米材料,微马达自出现后便被广泛应用至各领域,微马达与微生物的交叉拓宽了马达的研究范围,也为微生物的检测治疗提供了新思路。以微生物为底的微马达为微生物在体内的应用找到了良性出口,微马达优异的自主运动能力也为微生物的分析检测提供了新方法,以微马达为载体实现体内药物运输和靶向治疗相较于其他手段同样表现出较强竞争力。目前,尽管微生物马达的开发和应用还有很多问题需要解决,但相信经过不断地改良和提升,或许不久后,微生物机器人在体内勤勉“打工”将成为现实。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu W, Ge H, Chen X, et al. Fish-scale-like intercalated metal oxide-based micromotors as efficient water remediation agents[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11: 16164-16173.
- [2] de Avila B E, Angsantikul P, Li J, et al. Micromotor-enabled active drug delivery for *in vivo* treatment of stomach infection[J]. Nature Communications, 2017, 8: 272.
- [3] Karshalev E, Kumar R, Jeerapan I, et al. Multistimuli-responsive camouflage swimmers[J]. Chemistry of Materials, 2018, 30: 1593-1601.
- [4] Choi H, Yi J, Cho S H, et al. Multifunctional micro/nanomotors as an emerging platform for smart healthcare applications[J]. Biomaterials, 2021, 279: 121201.
- [5] Xiao Z Y, Duan S F, Xu P Z, et al. Synergistic speed enhancement of an electric-photochemical hybrid micromotor by tilt rectification[J]. ACS Nano, 2020, 14(7): 8658-8667.
- [6] Xiang Y Y, Li B, Li B H, et al. Toward a multifunctional light-driven biomimetic mudskipper-like robot for various application scenarios[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(17): 20291-20302.
- [7] 于晓平, 吴洁, 鞠焜先. 微纳米马达在生物传感中的应用[J]. 化学进展, 2014, 26(10): 1712-1719.
- [8] Xuan M, Shao J, Gao C, et al. Self-propelled nanomotors for thermomechanically percolating cell membranes[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2018, 57: 12463-12467.
- [9] 孔磊, 牟方志, 姜玉周, 等. 自驱动微纳米马达的设计原理与结构简化方法[J]. 科学通报, 2017, 30(6): 9-23.
- [10] Zhang Z, Denans N, Liu Y, et al. Optogenetic manipulation of cellular communication using engineered myosin motors[J]. Nature Cell Biology, 2021, 23(2): 198-208.
- [11] Huan C, Tao S, Yue W, et al. Deep penetration of nano-level drugs and micrometer-level *T* cells promoted by nanomotors for cancer immunotherapy[J]. Journal of the American Chemical Society, 2021, 143(31): 12025-12037.
- [12] Xu D, Hu J, Pan X, et al. Enzyme-powered liquid metal nanobots endowed with multiple biomedical functions[J]. ACS Nano, 2021, 15(7): 11543-11554.
- [13] Ji X, Yang H Y, Liu W. Multifunctional parachute-like nanomotors for enhanced skin penetration and synergistic antifungal therapy[J]. ACS Nano, 2021, 15(9): 14218-14228.
- [14] Kingh R K, Chang H W, Yan D, et al. Influence of diet on the gut microbiome and implications for human health[J]. Journal of Translational Medicine, 2017, 15(1): 73.
- [15] Parveen S, Subramanian K. Emerging roles of extracellular vesicles in pneumococcal infections: Immunomodulators to potential novel vaccine candidates[J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2022, 12: 836070.
- [16] Thay B, Wai S N, Oscarsson J. Staphylococcus aureus a-toxin-dependent induction of host cell death by membrane-derived vesicles[J]. PLoS One, 2013, 8(1): e54661.
- [17] Shao J, Xuan M, Zhang H, et al. Chemotaxis-guided hybrid neutrophil micromotors for targeted drug transport[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2017, 56: 12935-12939.
- [18] Krishnan N, Kubiawicz L J, Holay M, et al. Bacterial membrane vesicles for vaccine applications[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2022, 185: 114294.
- [19] Katuri J, Ma X, Stanton M M, et al. Designing micro- and nanoswimmers for specific applications[J]. Accounts of Chemical Research, 2017, 50(1): 2-11.
- [20] Gillibert R, Balakrishnan G, Deshoules Q, et al. Raman tweezers for small microplastics and nanoplastics identification in seawater[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(15): 9003-9013.
- [21] Singh A, Sitti M. Patterned and specific attachment of bacteria on biohybrid bacteria-driven microswimmers[J]. Advanced Healthcare Materials, 2016, 5: 232-233.
- [22] Stanton M M, Park B, Vilela D, et al. Magnetotactic bacteria powered biohybrids target *E. coli* biofilms[J]. ACS Nano, 2017, 11: 9968-9978.
- [23] Stanton M M, Park B, Miguel-Lopez A, et al. Biohybrid microtube swimmers driven by single captured bacteria[J]. Small, 2017, 13: 1603679.
- [24] Abdelmohsen L K E A, Peng F, Tu Y F, et al. Micro- and nano-motors for biomedical applications[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2014, 2(17): 2395-2408.
- [25] Tottori S, Zhang L, Qiu F, et al. Magnetic helical micro-machines: Fabrication, controlled swimming, and cargo transport[J]. Advanced Materials, 2012, 24: 811-816.
- [26] Mhanna R, Qiu F, Zhang L, et al. Artificial bacterial flagella for remote-controlled targeted single-cell drug delivery[J]. Small, 2014, 10: 1953-1957.
- [27] Soto F, Lopez-ramirez M A, Jeerapan I, et al. Rotibot: Use of rotifers as self-propelling biohybrid microcleaners[J]. Advanced Healthcare Materials, 2019, 29: 1900658.
- [28] Park D, Park S J, Cho S, et al. Motility analysis of bacte-

- ria-based microrobot (bacteriobot) using chemical gradient microchamber[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2014, 111: 134–143.
- [29] Sahari A, Traore M A, Scharf B E, et al. Directed transport of bacteria-based drug delivery vehicles: Bacterial chemotaxis dominates particle shape[J]. *Biomedical Microdevices*, 2014, 16: 717–725.
- [30] Ceylan H, Giltinan J, Kozielski K, et al. Mobile microrobots for bioengineering applications[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(10): 1705–1724.
- [31] Pacheco M, Jurado-Sanchez B, Escarpa A. Sensitive monitoring of enterobacterial contamination of food using self-propelled Janus microsensors[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90: 2912–2917.
- [32] Jurado-Sanchez B, Pacheco M, Rojo J, et al. Magnetocatalytic graphene quantum dots Janus micromotors for bacterial endotoxin detection[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2017, 56: 6957–6961.
- [33] Zhang S, Bellinger A M, Gletting D L, et al. A pH-responsive supramolecular polymer gel as an enteric elastomer for use in gastric devices[J]. *Nature Materials*, 2015, 14: 1065–1071.
- [34] Hoop M, Shen Y, Chen X, et al. Magnetically driven silver-coated nanocoils for efficient bacterial contact killing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26: 1063–1069.
- [35] Vilela D, Stanton M M, Parmar J, et al. Microbots decorated with silver nanoparticles kill bacteria in aqueous media[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9: 22093–22100.
- [36] Li J, Thamphiwatana S, Liu W, et al. Enteric micromotor can selectively position and spontaneously propel in the gastrointestinal tract[J]. *ACS Nano*, 2016, 10: 9536–9542.
- [37] Felfoul O, Mohammadi M, Taherkhani S, et al. Magnetoaerotactic bacteria deliver drug-containing nanoliposomes to tumour hypoxic region[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11: 941–947.
- [38] Mueller A L, Brockmueller A, Fahimi N, et al. Bacteria-mediated modulatory strategies for colorectal cancer treatment[J]. *Biomedicines*, 2022, 10(4): 832.

## Developments of the advanced crossing of micromotors and microorganisms

WANG Jianmin<sup>1</sup>, LIN Lan<sup>2</sup>, KONG Liangsheng<sup>2</sup>

1. Department of Clinical Laboratory, Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 402160, China

2. Department of Clinical Laboratory, Chongqing University Three Gorges Hospital, Chongqing 404100, China

**Abstract** As a kind of micro-tools which could convert other kinds of energies into kinetic energy thus propel themselves moving forward, the researches of micromotors have been gradually broadened to the crossing filed with microorganisms, such as the preparation of the microorganic-micromotors (MMs) with their applications in the detections of microorganisms, sterilization and drug delivery in vivo. The sensing mechanism and biocompatibility of microorganisms were complementary to the autonomous movement of micromotors, thus their combination provided new ideas and methods for the applications of micromotors and detections for microorganisms. However, limited by the finite preparation methods, uncontrollable motion and difficult degradation, the researches of MMs were more primitive when comparing with others, while the development of new materials and the optimization of driving methods will effectively solve the problems and develop wider application prospect for MMs.

**Keywords** microorganic-micromotors; detection of microorganisms; sterilization ●



(责任编辑 徐丽娇)