

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.007

不同营养条件下水动力扰动对细菌附着行为的影响

陈勇, 刘丽, 王树东, 高敏怡, 黄子谦, 陈国炜

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为探究水体的营养条件和水动力扰动对细菌附着行为的影响,文章以给水管网中常见的铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)野生株及其藻酸盐分泌过量的突变株为研究对象,借助于死活染色生物量测定方法,分析其不同水动力和营养水平下的附着行为。结果表明:在充足营养水平(1:1 LB培养基)下,水动力扰动未对野生株的表面覆盖率(6 h)产生显著影响($P>0.05$);而在低营养水平(1:50 LB培养基)下,培养6 h,转速从0 r/min增至120 r/min时,野生株覆盖率较静置时增加4.60倍($P<0.001$)。不同环境条件下,突变株的覆盖率均高于野生株,证明胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)对细菌附着行为具有重要影响。研究结果可为饮用水系统和其他水环境的微生物污染控制提供理论指导。

关键词:细菌附着;生物膜;铜绿假单胞菌;营养水平;水动力

中图分类号:X172

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)02-0187-07

Effects of hydrodynamic disturbance on bacterial attachment behavior under different nutritional conditions

CHEN Yong, LIU Li, WANG Shudong, GAO Minyi, HUANG Ziqian, CHEN Guowei
(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To investigate the effects of nutritional conditions and hydrodynamic disturbances on bacterial attachment behavior in water bodies, this paper focused on the common *Pseudomonas aeruginosa* (wild-type and alginate secreting mutant strains) in water supply networks. The attachment behavior of *Pseudomonas aeruginosa* under different hydrodynamic and nutritional levels was analyzed via the dead and live staining biomass measurement. The results showed that hydrodynamic disturbance did not have a significant effect on the surface attachment(6 h) of wild-type strains($P>0.05$) at the sufficient nutritional level(1:1 LB medium). In contrast, the attachment amount of wild-type strains increased by 4.60 times($P<0.001$) following decreased nutritional level(1:50 LB medium) and increased hydrodynamic disturbance with the rotation speed rising from 0 r/min to 120 r/min. Under different environmental conditions, the attachment amount of mutant strains was higher than that of wild-type strains, which proved the importance of extracellular polymeric substances(EPS) on bacterial attachment behavior. This study can provide theoretical guidance for the control of microbial contamination in drinking water systems and other aqueous environments.

Key words: bacterial attachment; biofilms; *Pseudomonas aeruginosa*; nutritional level; hydrodynamics

在自然或人工生态系统中,细菌一般倾向于在固体表面附着生长以适应不断变化的栖息环

境^[1]。例如,在饮用水系统中,细菌时刻面对贫营养、水动力或消毒剂等环境胁迫,通常以生物膜形

收稿日期:2023-09-25;修回日期:2023-12-13

基金项目:安徽省自然科学基金联合基金资助项目(2208085US13)

作者简介:陈勇(1996—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

刘丽(1972—),女,安徽寿县人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者;E-mail:lliu@hfut.edu.cn.

式聚集生长于管道内壁表面^[2]。生物膜的广泛存在不仅会加速金属管道的腐蚀,降低消毒剂的消毒效果,还有助于致病菌的扩散传播,严重威胁供水水质安全^[3-4]。

细菌的表面附着是一个复杂的、动态变化的过程,由细菌与细菌之间、细菌与固体表面之间的交互作用及细菌所处的微观环境决定^[5-6]。研究显示,水动力扰动、营养物质、pH 值和离子强度等物理化学条件是调控细菌迁移和附着行为的关键因素^[7-8]。微尺度下水流流速和剪切力分布具有各向异性^[9],决定营养物质的传输和分布,以及细菌的迁移和生理生态行为。文献^[10]借助于种群动力学分析,得出水动力扰动会加快游离细菌的随机运动速度,增大其到达固体表面的概率。文献^[11]认为水流流态决定剪切力分布,进而影响细菌胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)的生成和附着行为。相较于悬浮细菌,细菌附着生长具有明显的优势,不仅降低了对环境条件的易感性,也提高了对营养物质的利用效率^[12]。将葡萄糖质量浓度从 40 mg/L 增大到 400 mg/L,会导致生物膜厚度在 17 h 内由 30 μm 增加到 130 μm ^[13]。除了物理化学过程外, EPS 的生成也是影响细菌附着的重要影响因素。文献^[14]发现,湍流条件下形成的生物膜薄而致密, EPS 分泌量也要高于层流。EPS 的黏附性和絮凝能力对生物膜的形成具有一定的调节作用。细菌会通过其自身 EPS 的生成改变其生存环境,进而调控细菌在载片表面的附着过程^[15]。

目前,对于不同营养条件下水动力扰动如何干预细菌的附着行为,以及 EPS 在其中产生的作用等相关研究报道很少。本文以铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)野生株及其藻酸盐分泌过量突变株为研究对象,分析在不同水动力和营养条件下 2 种细菌的固体表面附着行为,以期控制饮用水系统中生物膜的形成提供理论指导。

1 实验材料和方法

1.1 实验菌种和反应器准备

本实验使用铜绿假单胞菌野生株(*Pseudomonas aeruginosa* strain PAO1, WT)及其藻酸盐分泌过量突变株(*Pseudomonas aeruginosa* mutant strain *mucA22*, ΔmucA)(中国科学院微生物多样性与资源创新利用全国重点实验室提供)为研究对象。2 种菌株在无菌 LB 培养基(20 g/L, 北京奥博星生物技术有限责任公司)中培养,置于

恒温培养箱($(37 \pm 1)^\circ\text{C}$)17~20 h 直到对数生长期^[16]。通过离心收集细菌,并用无菌 CDF (chlorine demand free) 缓冲溶液(0.54 g/L Na_2HPO_4 , 0.88 g/L KH_2PO_4 , pH = 6.98)清洗 3 次。将细菌沉淀重新悬浮并在无菌 CDF 缓冲溶液中稀释,通过 UV-2600 紫外分光光度计(尤尼柯(上海)仪器有限公司)将细菌浓度调整至 600 nm 波长下的光密度(optical density, OD) OD_{600} 为 0.50 ± 0.01 , 再进行后续实验。

实验采用自制容器作为反应器,由亚力克管和盖玻片相粘连。亚力克管的高为 30 mm,内径为 13 mm,外径为 17 mm;盖玻片(长度、宽度、厚度分别为 24、40、0.14 mm)作为细菌附着的载体。实验前所有器材均经过高压蒸汽灭菌锅(121°C)灭菌 20 min 和紫外线照射 15 min。

1.2 实验设置

为研究不同营养条件下水动力扰动对细菌附着行为的影响,实验共设置 2 种营养条件,分别为 1:1 LB 培养基(未稀释,20 g/L 肉汤)和 1:50 LB 培养基(稀释 50 倍,0.04 g/L 肉汤),下文分别简称 1:1 LB、1:50 LB。每种营养条件下设置 4 种转速,分别为 0、40、80、120 r/min (0 r/min 表示静置),共计 8 个反应器。每个反应器中先加入 1.9 mL LB 培养基,然后取 100 μL WT 菌种悬浮液(OD_{600} 为 0.50 ± 0.01)加入反应器中。为了验证 EPS 是否对细菌的附着产生影响,本文采用 ΔmucA 进行同样的操作,所有反应器均置于恒温培养箱($(25 \pm 1)^\circ\text{C}$)。经过 2、6 h 培养后,收集载片以观察附着的细菌数量和表面形貌,并将反应器中的悬浮液倒入 50 mL 无菌离心管中保存,用于后续测量悬浮细菌的 Zeta 电位。为保证实验结果的可靠性,实验重复 3 次。

1.3 分析方法

1.3.1 生物量测定

使用 L-7012 Live/Dead 细菌活性试剂盒(英潍捷基(上海)贸易有限公司)进行染色,染色过程按照生产商的方案进行。首先将试剂盒中的 SY-TO 9(0.33 mmol/L)与碘化丙啶(propidium iodide, PI)(2 mmol/L)染液按体积比 1:1 混合^[17],然后向反应器中加入 PI 染液 100 μL ,避光反应 30 min,最后使用 IX73 荧光倒置显微镜(日本 Olympus 公司)以物镜和目镜选择 20×10 对反应器进行原位观察。对每个反应器随机选取 10 个清晰视野进行拍照,并采用 ImageJ 软件对照片进行量化处理,统计细菌在载片表面的覆

盖率。

1.3.2 原子力显微镜观察

本文使用 BL-AC40TS-C2 原子力显微镜(日本 Olympus 公司)观察载片表面附着细菌的形貌。为去除悬浮细菌的干扰,用 CDF 缓冲溶液缓慢地冲洗盖玻片表面。用 2.5%的戊二醛溶液对样品固定 12 h,并在冷干机中冷干 12 h^[18]。将原子力显微镜成像模式调整为轻敲模式(tapping mode),对样品选取不同的视野进行扫描成像,并用 NanoScope Analysis 2.0 软件对图片进行处理。

1.3.3 Zeta 电位测量

使用 Nano-ZS90 Zeta 电位分析仪(英国马尔文仪器有限公司)在 25 °C 测量反应器悬浮液中细菌的 Zeta 电位。取适量悬浮液放入灭过菌的 5 mL 离心管中,取摇匀的 750 μ L 细菌悬浮液,注入比色皿,设定目标物质为蛋白质,将分散剂设为水,进行测量读数。

1.3.4 统计分析

采用单因素方差分析来评估转速、营养条件对细菌附着量的影响,统计计算的置信度等于或高于 95%($P < 0.05$)具有统计学意义。

2 实验结果与分析

2.1 野生株 WT 附着行为分析

不同水动力扰动和营养水平条件下 WT 在

载片表面的覆盖率如图 1 所示。

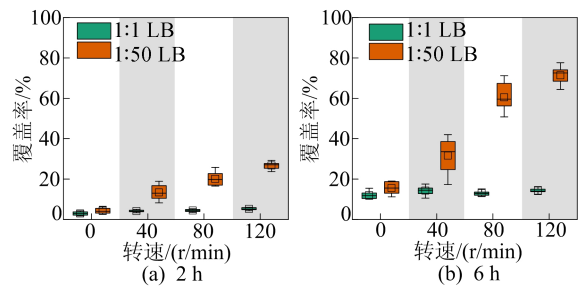


图 1 不同水动力扰动和营养水平下 WT 的覆盖率

从图 1a 可以看出:在充足营养水平(1:1 LB)下培养 2 h 时,静置条件下细菌的覆盖率为 2.98%,随着水动力强度的提高,细菌表面覆盖率略有增加,转速为 120 r/min 时,细菌的覆盖率较静置时增加 1.76 倍;在低营养水平(1:50 LB)下,静置时细菌的表面覆盖率为 4.38%,增大水动力扰动可显著促进细菌的附着行为($P < 0.001$),且在 120 r/min 时其表面覆盖率较静置时增大 6.10 倍。从图 1 b 可以看出,随着培养时间延长(6 h),转速从 0 r/min 增至 120 r/min 时,WT 细菌的覆盖率较静置时增大 4.60 倍,且其随着营养水平和水动力扰动的变化趋势与 2 h 基本一致。

培养 6 h 后,不同转速和营养水平下 WT 的荧光显微图像如图 2 所示。

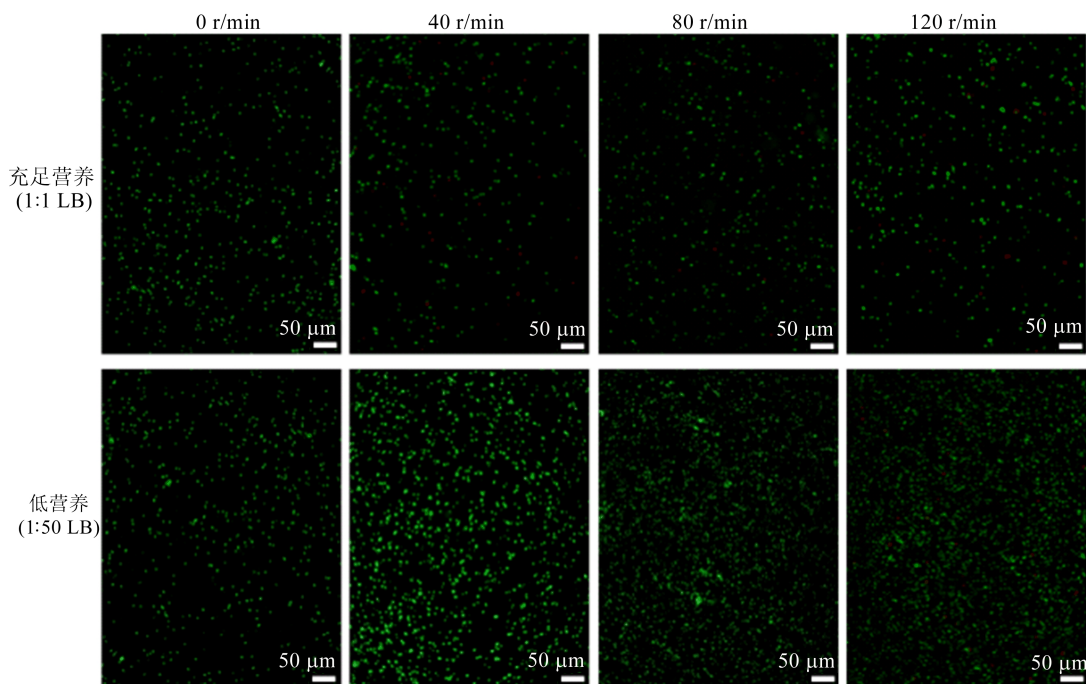


图 2 不同水动力扰动和营养水平下培养 6 h 后 WT 的荧光显微图像

从图 2 可以更直观地了解细菌的表面附着情况:充足营养水平(1:1 LB)下,增大水动力扰动未对细菌附着产生显著影响;低营养水平(1:50 LB)显著促进了细菌的附着行为,且随着水动力的加强,附着细菌量显著增加,在 120 r/min 时附着量最大。

为进一步考察水动力扰动对细菌表面附着的影响,使用原子力显微镜观察培养 6 h 后载片表面附着细菌的形貌,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出:充足营养水平下静置时,细菌的附着量较

少且分布较分散,提高水动力,细菌的附着量和聚集数量略有增加;然而在低营养水平下,提高水动力时细菌附着量和聚集数量显著增大;在相同水动力条件下,相较于充足营养水平,低营养水平可显著促进细菌的附着行为。观察图 3 中的三维图像可知,静置且低营养水平下,生物膜厚度较小,增强水动力后,形成的生物膜厚度逐渐增加。图 3 原子力显微镜的成像结果与图 2 荧光染色结果一致,进一步验证了低营养水平和水动力扰动可极大地促进细菌附着。

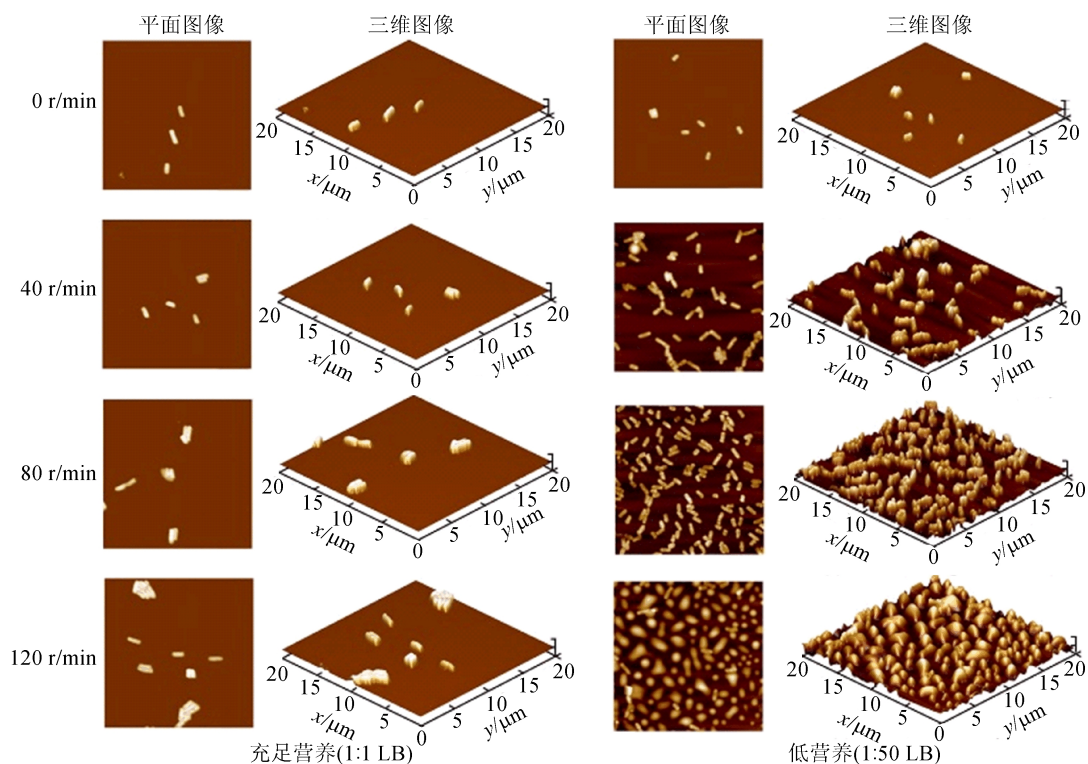
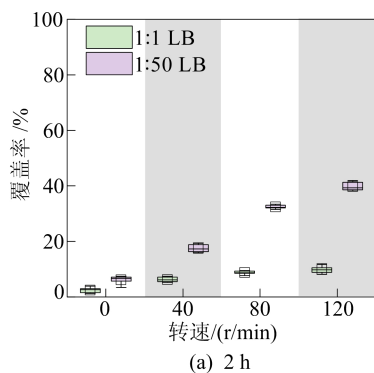


图 3 培养 6 h 后不同水动力扰动下 WT 的原子力显微镜图像

2.2 突变株 $\Delta mucA$ 附着行为分析

不同水动力扰动和营养水平下,具有藻酸盐过量分泌的突变株 $\Delta mucA$ 的覆盖率如图 4 所示。



(a) 2 h

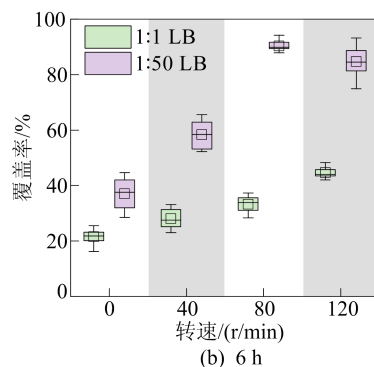


图 4 不同水动力扰动和营养水平下 $\Delta mucA$ 的覆盖率

由图 4a 可知:在充足营养水平(1:1 LB)且静置条件下,细菌的覆盖率为 2.46%;随着水动力强度增加,细菌的表面附着量显著增加($P <$

0.001),转速提升至 120 r/min 时,细菌覆盖率较静置时增加 4.00 倍;在低营养水平(1:50 LB)下,细菌的附着量明显增加,静置条件下细菌的覆盖率为 6.20%,为充足营养水平下的 2.52 倍,而增强水动力后,覆盖率较静置时增加 2.82 倍至 6.42 倍。对比分析图 1a、图 4a 可知:相较于相同条件下的 WT,随着转速增加, $\Delta mucA$ 覆盖率增大更明显;随着转速增加至 40、80、120 r/min, $\Delta mucA$ 覆盖率比 WT 分别增大 2.80 倍、3.70 倍和 4.04 倍。由此可见,水动力扰动强化了低营养水平对细菌附着的影响。从图 4b 可以看出,随着培养时间增加, $\Delta mucA$ 的覆盖率显著增大,当转

速从 0 r/min 提升至 120 r/min 时,其覆盖率较静置时增加 2.07 倍,且其随着营养水平和水动力扰动的变化趋势与 2 h 基本一致。对比分析图 1b、图 4b 可知,随着转速从 0 r/min 提升至 120 r/min,充足营养水平下, $\Delta mucA$ 的覆盖率是 WT 的 1.79 倍到 3.12 倍,而在低营养水平下, $\Delta mucA$ 的覆盖率是 WT 的 1.18 倍到 2.37 倍。

培养 6 h 后,不同水动力扰动和营养水平下 $\Delta mucA$ 的荧光染色图像如图 5 所示。对比图 2、图 5 可以看出, $\Delta mucA$ 无论是在充足营养水平还是在低营养水平下,随着水动力的加强,其覆盖率均显著增加,且高于相同条件下 WT 的覆盖率。

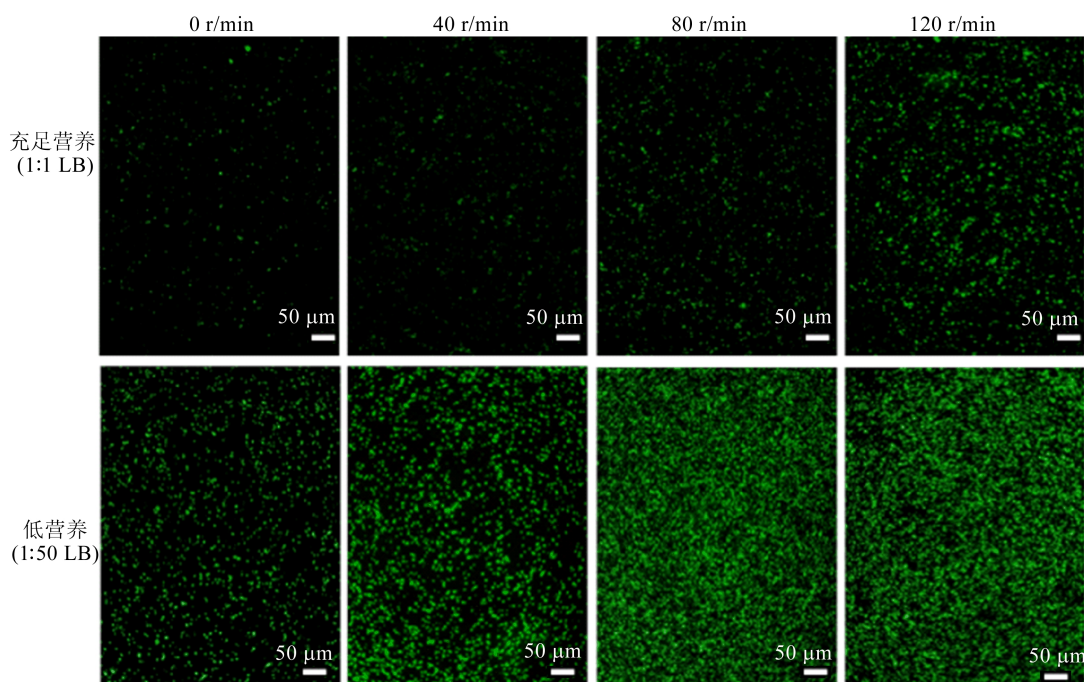


图 5 不同水动力扰动和营养水平下培养 6 h 后 $\Delta mucA$ 的荧光显微图像

3 讨 论

当面对环境压力的胁迫,细菌通常倾向于固体表面聚集生长。本文的研究结果表明,低营养水平下水动力扰动促进了细菌的附着行为,且随着转速增加,此现象更为显著,培养 2 h 后当转速增至 120 r/min 时,WT 的覆盖率较静置时增加 6.10 倍。文献[10]研究表明,荧光假单胞菌不仅能够适应不利的环境刺激,而且在流动条件下形成的生物膜更厚,从而提高了生物膜的稳定性。文献[19]通过实验发现,当流速增加到 60 cm/s,生物膜上细菌的比生长速率较静置状态增加 1 倍。此外,水动力扰动会导致营养物质更快地扩散^[20],使浮游细菌更多地结合到已经形成

的菌落上,导致细菌与菌落之间交互作用增加,形成更加稳定的生物膜^[15]。文献[21]利用微流体装置研究发现,不同的流体动力学条件决定切应力的空间分布,影响细菌不同的附着方式,进而对生物膜的生长产生影响。而在充足营养水平下,随着转速增加,细菌 WT 的覆盖率没有显著变化,推测是由于转速增加时,细菌所处微观环境的营养成分依然充足。

本文的研究表明,不同环境条件下,突变株的附着量均高于野生株,由此可知过量生成的胞外藻酸盐有助于细菌的附着行为。文献[22]通过流式细胞系统分别培养出 3 种铜绿假单胞菌(藻酸盐分泌过量型、野生型及藻酸盐分泌缺乏型)的生物膜,分析发现,藻酸盐分泌过量的突变株生物膜

的厚度和生物量均显著增大,这是由于 EPS 分泌量的增加大大提高了生物膜的活性。文献[23]使用 2 种 EPS 分泌量不同的菌株 *Amphora* sp. 和 *Stauroneis* sp., 分泌量较强的 *Amphora* sp. 菌株更有助于生物膜的形成, 高分泌量的糖醛酸(EPS 中分泌量最丰富的单体)是 *Amphora* sp. 生物膜形成能力的关键。

在面对环境胁迫时,藻酸盐分泌过量突变株的附着优势更为显著。本实验中,培养 6 h 后,增大水动力扰动(转速从 0 r/min 增加至 120 r/min),在充足营养水平下,WT 的覆盖率无显著变化, $\Delta mucA$ 较静置时可增加 2.07 倍,而在低营养水平下,突变株和野生株的覆盖率均显著增加,且 $\Delta mucA$ 的覆盖率为 WT 的 1.18 倍至 2.37 倍。文献[24]比较了在不同水动力扰动条件下金黄色葡萄球菌的 EPS 分泌量,当剪切速率为 0.79 s^{-1} 时, EPS 的分泌量较静置时高出 5.00 倍。

文献[10]研究发现,振荡条件下生长的生物膜中碳水化合物、脂质和 DNA 含量增加,这是由于细菌受到水动力扰动和营养限制胁迫时,具有过量 EPS 分泌能力的菌株可通过调控自身 EPS 分泌,改变自身微观环境,促进细菌与细菌之间、细菌与固体表面之间的黏附,进而促进生物膜的形成[15]。

为了检测溶液体系的稳定性,测量不同营养条件下菌液的 Zeta 电位,结果如图 6 所示。

由图 6a 可知:静置时 WT 菌液在充足营养水平下的 Zeta 电位为 -10.63 mV ,而在低营养水平下,电位下降到 -21.47 mV ; $\Delta mucA$ 也呈现与 WT 相同的趋势,即降低营养水平后, Zeta 电位也随之降低;提高转速后,2 种菌液的 Zeta 电位变化不显著。根据 DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) 理论[25], Zeta 电位绝对值越高,体系越稳定。细菌在低营养水平下的 Zeta 电位绝对值最高,说明低营养水平下悬浮液中有更多的细菌已经附着在固体表面,导致体系更加稳定。

4 结 论

在充足营养水平(1:1 LB 培养基)条件下,培养 6 h 后,随着转速增加(从 0 r/min 增至 120 r/min),野生株在载片表面覆盖率的增加并不显著($P > 0.05$),而突变株的覆盖率显著增加($P < 0.001$);低营养水平(1:50 LB 培养基)显著促进 2 种细菌的附着行为,强化水动力扰动可进一步促进细菌的表面附着,特别是突变株,这说明过量生成的藻酸盐有助于细菌的附着,且水动力扰动促进了 EPS 分泌,从而进一步强化其附着行为;低营养水平下菌液的 Zeta 电位绝对值最高,体系最稳定,悬浮液中有更多的细菌已经附着在固体表面。

[参 考 文 献]

- [1] KARIMI A, KARIG D, KUMAR A, et al. Interplay of physical mechanisms and biofilm processes: review of microfluidic methods[J]. Lab Chip, 2015, 15(1): 23-42.
- [2] NOZHEVNIKOVA A N, BOTCHKOVA E A, PLAKUNOV V K, et al. Multi-species biofilms in ecology, medicine, and biotechnology[J]. Microbiology, 2015, 84: 731-750.
- [3] VREEBURG J H G, BOXALL J B. Discolouration in potable water distribution systems: a review [J]. Water Research, 2007, 41: 519-529.
- [4] CERI H, OLSON M, MORCK D, et al. The MBEC assay system: multiple equivalent biofilms for antibiotic and biocide susceptibility testing [J]. Methods in Enzymology, 2001, 478: 377-385.
- [5] HABIMANA O, SEMIAOÃ J C, CASEY E. The role of cell-surface interactions in bacterial initial adhesion and consequent biofilm formation on nanofiltration/reverse osmosis membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 454: 82-96.
- [6] HAZRIN-CHONG N H, DAS T, MANEFIELD M. Surface physico-chemistry governing microbial cell attachment and biofilm formation on coal[J]. International Journal of Coal

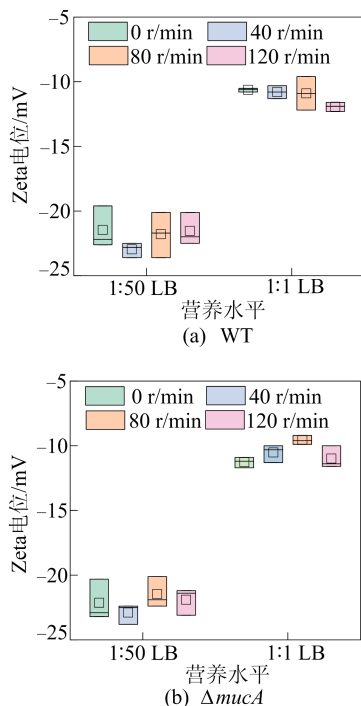


图 6 WT 与 $\Delta mucA$ 在不同营养水平下的 Zeta 电位

- Geology, 2021, 236:103671.
- [7] BERNE C, ELLISON C K, DUCRET A, et al. Bacterial adhesion at the single-cell level[J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16:616-627.
- [8] ROSSI E, PARONI M, LANDINI P. Biofilm and motility in response to environmental and host-related signals in Gram negative opportunistic pathogens[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 125(6):1587-1602.
- [9] ODER M, ARLIĆ M, BOHINC K, et al. *Escherichia coli* biofilm formation and dispersion under hydrodynamic conditions on metal surfaces[J]. International Journal of Environmental Health Research, 2018, 28(1):55-63.
- [10] JARA J, ALARCÓN F, MONNAPPA A K, et al. Self-adaptation of *Pseudomonas fluorescens* biofilms to hydrodynamic stress[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11:588884.
- [11] MANUEL C M, NUNES O C, MELO L F. Unsteady state flow and stagnation in distribution systems affect the biological stability of drinking water[J]. Biofouling, 2010, 26(2):129-139.
- [12] PALMER J, FLINT S, BROOKS J. Bacterial cell attachment, the beginning of a biofilm[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2007, 34(9):577-588.
- [13] STOODLEY P, DODDS I, BOYLE J D, et al. Influence of hydrodynamics and nutrients on biofilm structure[J]. Journal of Applied Microbiology, 1998, 85(Suppl1):19S-28S.
- [14] PAN M, LI H Z, HAN X Y, et al. Effects of hydrodynamic conditions on the composition, spatiotemporal distribution of different extracellular polymeric substances and the architecture of biofilms[J]. Chemosphere, 2022, 307:135965.
- [15] FLEMMING H C, WINGENDER J. The biofilm matrix[J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8:623-633.
- [16] SCOTT M, HWA T. Bacterial growth laws and their applications[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2011, 22:559-565.
- [17] SEZONOV G, JOSELEAU-PETIT D, D'ARI R, et al. *Escherichia coli* physiology in Luria-Bertani broth[J]. Journal of Bacteriology, 2007, 189(23):8746-8749.
- [18] SZTILKOVICS M, GERECSEI T, PETER B, et al. Single-cell adhesion force kinetics of cell populations from combined label-free optical biosensor and robotic fluidic force microscopy[J]. Scientific Reports, 2020, 10:61.
- [19] TSAI Y P. Impact of flow velocity on the dynamic behaviour of biofilm bacteria[J]. Biofouling, 2005, 21(5/6):267-277.
- [20] TEODÓSIO J S, SIMÕES M, MELO L F, et al. Flow cell hydrodynamics and their effects on *E. coli* biofilm formation under different nutrient conditions and turbulent flow[J]. Biofouling, 2011, 27(1):1-11.
- [21] THOMEN P, ROBERT J, MONMEYRAN A, et al. Bacterial biofilm under flow: first a physical struggle to stay, then a matter of breathing[J]. PLoS ONE, 2017, 12(4):e0175197.
- [22] XUE Z, SENDAMANGALAM V R, GRUDEN C L, et al. Multiple roles of extracellular polymeric substances on resistance of biofilm and detached clusters[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(24):13212-13219.
- [23] JIN C L, YU Z W, PENG S Y, et al. The characterization and comparison of exopolysaccharides from two benthic diatoms with different biofilm formation abilities[J]. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 2018, 90(2):1503-1519.
- [24] HOU J P, VEEREGOWDA D H, VAN DE BELT-GRITTER B, et al. Extracellular polymeric matrix production and relaxation under fluid shear and mechanical pressure in *Staphylococcus aureus* biofilms[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84(1):e01516-17.
- [25] HERMANSSON M. The DLVO theory in microbial adhesion[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 1999, 14:105-119.

(责任编辑 张淑艳)

(上接第 172 页)

- [15] KASIM Ö. An ensemble classification-based approach to detect attack level of SQL injections[J]. Journal of Information Security and Applications, 2021, 59:102852.
- [16] MEJIA-CABRERA H I, PAICO-CONTRERAS D, VALDERA-CONTRERAS J H, et al. Automatic detection of injection attacks by machine learning in nosql databases[C]//Mexican Conference on Pattern Recognition. Cham: Springer International Publishing, 2021:23-32.
- [17] KUMAR P, PATERIYA R. A survey on SQL injection attacks, detection and prevention techniques[C]//Third International Conference on Computing Communication & Networking Technologies. [S. l.]: IEEE, 2012:6396096.
- [18] MIKOLOV T, CHEN K, CORRADO G, et al. Efficient estimation of word representations in vector space[EB/OL]. [2023-07-20]. <https://blog.csdn.net/qq-37388085/article/details/102593614>.
- [19] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[EB/OL]. [2023-07-20]. <https://blog.csdn.net/weixin.47133012/article/details/124900178>.
- [20] CHICCO D, JURMAN G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation[J]. BMC Genomics, 2020, 21:1-13.
- [21] BUCKLAND M, GEY F. The relationship between recall and precision[J]. Journal of the American Society for Information Science, 1994, 45(1):12-19.

(责任编辑 张 镗)