



## 酸适应降低鼠伤寒沙门氏菌在天然土壤中迁移能力

浦喆, 杨新瑶, 于丹, 张琦

引用本文:

浦喆, 杨新瑶, 于丹, 张琦. 酸适应降低鼠伤寒沙门氏菌在天然土壤中迁移能力[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(12): 2705–2710.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1185>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 食源性致病细菌在土壤中的生存策略及其治理方式

杨埔, 鞠峰, 张丽珍

农业环境科学学报. 2022, 41(12): 2694–2704 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1002>

#### 鸡粪堆肥过程中四环素类抗生素及抗性细菌的消减研究

仇天雷, 高敏, 韩梅琳, 王旭明

农业环境科学学报. 2015(4): 795–800 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.027>

#### 不同主导晶面赤铁矿对Cr(VI)吸附与迁移行为的影响

周艺艺, 刘存, 王玉军

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1667–1674 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0386>

#### 腐殖酸配施壳聚糖调控设施番茄土壤细菌群落

鲍莹, 严梦圆, 吴萌, 李桂龙, 刘凯, 李忠佩

农业环境科学学报. 2022, 41(12): 2772–2778 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1063>

#### 土壤nirS、nosZ型反硝化菌群落结构及多样性对牛场肥水灌溉水平的响应

高文萱, 闫建华, 杜会英, 张克强

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1089–1100 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0901>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

浦喆, 杨新瑶, 于丹, 等. 酸适应降低鼠伤寒沙门氏菌在天然土壤中迁移能力[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(12): 2705–2710.  
 PU Z, YANG X Y, YU D, et al. Acid adaptation reduces the transport ability of *Salmonella typhimurium* in natural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(12): 2705–2710.



开放科学 OSID

# 酸适应降低鼠伤寒沙门氏菌在天然土壤中迁移能力

浦喆, 杨新瑶\*, 于丹, 张琦

(沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044)

**摘要:** 基于土柱迁移实验, 本研究在酸性环境( $\text{pH}=5$ )下研究了发生适应性变化的鼠伤寒沙门氏菌的迁移规律。实验结果表明, 酸性环境会导致鼠伤寒沙门氏菌的粒径和胞外膜脂多糖(LPS)浓度增加, 胞外聚合物(EPS)浓度降低。这些胞外膜结构的生理变化会引起细菌Zeta电位负电性降低, 疏水性增加, 进而改变沙门氏菌的迁移规律。柱实验的结果显示沙门氏菌在发生酸适应性改变后迁移能力下降, 其原因在于酸适应降低了沙门氏菌与沙介质表面的静电排斥, 增强了疏水吸附, 两种机制均促进沙门氏菌在沙表面的沉积。XDLVO(extented Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek)曲线中能量势垒和第二最小值深度表明沙门氏菌在土壤沙表面的沉降为可逆过程。本研究结果表明, 酸性环境胁迫下沙门氏菌表面生理特征的改变会抑制其在土壤中的迁移, 从而降低酸性环境中沙门氏菌的传播风险。

**关键词:** 沙门氏菌; 酸适应性改变; 表面性质; 迁移; XDLVO模型

中图分类号:Q935 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)12-2705-06 doi:10.11654/jaes.2022-1185

## Acid adaptation reduces the transport ability of *Salmonella typhimurium* in natural soil

PU Zhe, YANG Xinyao\*, YU Dan, ZHANG Qi

(Key Lab of Eco-restoration of Regional Contaminated Environmental (Shenyang University), Ministry of Education, Shenyang 110044, China)

**Abstract:** Based on a soil column transport experiment, this study investigated the transport mechanism of *Salmonella typhimurium*, which underwent adaptive changes in an acidic environment ( $\text{pH}=5$ ). The results showed that acidic environment increased the particle size and concentration of lipopolysaccharide (LPS) in the extracellular membrane of *Salmonella typhimurium* and decreased the concentration of extracellular polymer (EPS). These physiological changes in the extracellular membrane structure decreased the electronegativity of bacterial Zeta potential and increase its hydrophobicity, thereby changing the transport mechanism of *Salmonella*. Column experiment results showed that the transport ability of *Salmonella* decreased after their adaptation to acid stress. The reason was that the acid adaptability reduced the electrostatic repulsion between *Salmonella* and the surface of the sand medium and enhanced their hydrophobic adsorption. Both mechanisms promoted the deposition of *Salmonella* on the sand surface. The energy barrier and the second minimum depth in the XDLVO (extended Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) curve indicated that the settlement of *Salmonella* on the sand surface was a reversible process. The results of this study show that the changes in the surface physiological characteristics of *Salmonella* under acid stress would inhibit their transport in soil, thereby reducing the risk of *Salmonella* transmission in an acidic environment.

**Keywords:** *Salmonella*; acid adaptability change; surface property; transport; XDLVO model

收稿日期:2022-11-19 录用日期:2022-12-01

作者简介:浦喆(1998—),男,辽宁大连人,硕士研究生,从事土壤病原菌迁移行为研究。E-mail:912203140@qq.com

\*通信作者:杨新瑶 E-mail:xinyao\_yang@qq.com

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42177406);辽宁省“百千万人才工程”人选资助项目

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42177406); Baiqianwan Talent Program of Liaoning Province, China

环境中的病原性微生物包括病毒、原生动物、细菌等,共超过100种,它们可通过动物的粪便进入环境中<sup>[1]</sup>。近年来,粪便有机肥的施用及雨水的淋洗作用,使得病原性肠道菌进入土壤和水环境,造成环境污染<sup>[2]</sup>。人摄入受病菌污染的食品和水,将会产生不同类型的食源性疾病。沙门氏菌是一种主要的肠道致病菌,每年在全美引起约120万人患病。世界卫生组织基于致死率、耐药性风险、传播性、可防治性等指标,将沙门氏菌列为高优先级病菌。

肠道病菌在土壤和地下水中的迁移传播是引起水致疾病暴发的重要过程。迁移过程受胞外聚合物(EPS)、脂多糖结构(LPS)和胞外膜蛋白等结构与多孔介质颗粒表面的交互作用控制。这些胞外膜结构携带氨基、羧基、羟基等官能团,使得细菌表面带有电荷,通常情况下细菌带有负电。地下水和土壤介质,如石英砂、土壤等,也带有负电荷。因此,细菌和土壤颗粒之间通常存在静电斥力,这是影响细菌迁移的主要因素<sup>[3]</sup>。细菌表面的疏水性也可通过影响细菌与多孔介质之间的吸附作用来影响细菌的迁移行为。疏水性强的细菌,迁移能力通常较弱<sup>[3-4]</sup>;细菌的形状和大小也影响细菌在介质中的吸附和筛滤行为<sup>[5]</sup>,通常情况下,大颗粒细菌相比小颗粒细菌更容易发生沉降<sup>[3,6]</sup>。

最新研究表明,细菌为了适应贫营养条件会改变其胞外膜结构<sup>[3-6]</sup>。鉴于胞外膜结构对细菌迁移的影响,这一研究结果意味着同一细菌在不同的环境条件下可能获得不同的迁移能力。而另一方面,pH等其他环境因子的影响尚不清楚。pH作为一个重要的环境因子,在天然水体和被污染水体中往往不同,酸雨渗透、矿山废水污染和有机酸含量高的土壤往往具有较低的pH,酸性条件对沙门氏菌表面的生理结构会产生什么影响,细菌的酸适应如何影响其在土壤中的迁移,这些问题的探索,对于更精准地预测细菌在这些环境中的迁移归趋十分重要。

针对上述问题,本研究将在pH=5的酸性条件培养酸适应的鼠伤寒沙门氏菌,并以此为研究对象,通过柱实验和XDLVO模型,定量比较发生酸适应性改变前后鼠伤寒沙门氏菌在地下饱和多孔介质中的迁移行为,理解酸性条件对沙门氏菌胞外膜结构以及迁移能力的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 鼠伤寒沙门氏菌培养与表征

将活化后的鼠伤寒沙门氏菌(中国医学菌种保藏

中心,编号50115)配制成 $6.1 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的菌液。将1 mL菌液分别加入100 mL pH=7和pH=5的LB培养基中混合后于37 °C 150 r·min<sup>-1</sup>下恒温振荡12 h至菌液浊度发生明显变化(离子强度为85.47 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl),得到原始状态的沙门氏菌和发生酸适应性改变的沙门氏菌,与50%甘油混合后于-80 °C冷冻保存。得到的菌悬液于8 000 r·min<sup>-1</sup>离心10 min分离细菌与甘油。用超纯水清洗2~3次后将离心后的细菌用超纯水悬浮并调节菌液OD<sub>600</sub>值至0.2,分别使用Zetasizer和接触角测量仪测量沙门氏菌的Zeta电位、粒径和疏水性。

将两种沙门氏菌悬浮液在经离心处理后配制相同浓度的悬浮液,与乙二胺四乙酸二钠溶液2:3混合后于4 °C静置30 min<sup>[7-8]</sup>。静置后在4 °C、10 400×g的转速下冷冻离心50 min<sup>[7]</sup>,沉淀物过0.45 μm无菌滤膜,保存上清液,使用考马斯亮蓝法测定上清液中细胞粘附蛋白的浓度(标准曲线: $y=0.00528x+0.00337$ , $R^2=0.99902$ )。将相同浓度的细胞悬液在50 W、20 s下进行破碎<sup>[7,9-10]</sup>,将破碎后的细胞悬液于4 °C、10 000×g的转速下冷冻离心40 min<sup>[7]</sup>,上清液过0.22 μm滤膜后使用苯酚-硫酸法测定上清液中LPS的浓度(标准曲线: $y=0.00576x+0.000315295$ , $R^2=0.99992$ )<sup>[11]</sup>。

### 1.2 土壤沙预处理与表征

土壤样品采集于沈阳大学校园的树林内,采集深度为30~50 cm<sup>[12]</sup>。干燥后去除植物残余的根系和树叶并过10目筛。将干燥的土壤样品与超纯水(Milli-Q water, Merck, 法国)1:10混合,振荡24 h,过0.45 μm PES亲水滤膜得到土壤溶解性有机物溶液。通过IC、ICP-MS测定土壤中无机物组成。称取10 g风干的土壤样品,加入25 mL 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>磁力搅拌30 min后使用pH计测定土壤悬液的pH,经测定土壤悬液的pH为8.5。

清洗过筛的土壤样品至洗液清澈,以去除其表面的有机物和其他杂质,于60 °C下烘干得到土壤沙。使用Mastersizer(Mastersizer2000 Malvern, 英国)测定沙子的粒径分布并计算多孔介质的曲率系数与不均匀系数。分别使用土壤有机物溶液和模拟背景溶液作用流动液,使用ZetaCAD(CAD Instruments, 法国)测定土壤沙的Zeta电位,以作为XDLVO参数使用。

### 1.3 柱实验

将内径为1 cm的玻璃层析柱(C10/10, GE Healthcare, Piscataway, 美国)在超声下湿法填充3 cm厚土壤沙,确保填充过程及实验过程中无气泡进入系统。通

过蠕动泵(BF-100,Lead Fluid,保定)以 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 流速向系统中输入60 PVs含 $85\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl的模拟背景溶液(不含有机物)稳定系统。模拟背景液由 $0.26\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.03\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.01\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.04\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 和 $0.10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 组成,并用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl和 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH调模拟背景液的pH至8.5。然后分别输入6 PVs OD<sub>600</sub>值为0.2的沙门氏菌悬浮液或酸适应性沙门氏菌悬浮液,最后输入10 PVs模拟背景液淋洗至UV-vis信号接近基线。采用紫外可见光分光光度计在600 nm波长动态量测沙门氏菌的光吸收值,用于定量细菌流出浓度。基于沙柱流出的沙门氏菌浓度,通过公式(1)<sup>[13]</sup>计算鼠伤寒沙门氏菌的沉积系数( $K_d$ )。

$$K_d = -\frac{v}{\varepsilon \times L} \ln \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

式中: $v$ 为液体流速, $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ; $L$ 为土壤沙的填充高度,cm; $\varepsilon$ 为孔隙度; $C/C_0$ 为初始穿透点的细菌浓度比值,穿透点位于1.8~2 PVs之间。

#### 1.4 XDLVO理论模型

根据XDLVO理论,细菌在多孔介质中的迁移主要受到范德华力、双电层静电力和路易斯酸相互作用共同影响<sup>[13]</sup>。

$$\Phi_{tot} = \Phi_{LW} + \Phi_{EDL} + \Phi_{AB} \quad (2)$$

式中: $\Phi_{tot}$ 表示总相互作用能,KJ; $\Phi_{LW}$ 表示范德华力,KJ; $\Phi_{EDL}$ 表示双电层静电力,KJ; $\Phi_{AB}$ 表示路易斯酸相互作用,KJ。

范德华力和双电层静电力通过公式(3)和公式(4)<sup>[14]</sup>计算:

$$\Phi_{LW} = -\frac{A \times a_p}{6h \left(1 + \frac{14h}{\lambda}\right)} \quad (3)$$

式中: $A$ 为Hamaker常数,在细菌-水-多孔介质体系中取 $6.5 \times 10^{-21}\text{ J}$ ; $a_p$ 为细菌粒径,nm; $h$ 为分离距离,nm; $\lambda$ 为特征波长,取 $100\text{ nm}$ <sup>[15]</sup>。

$$\Phi_{EDL} = \pi \times \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times a_p \left\{ 2\varphi_c \times \varphi_p \times \ln \left[ \frac{1 + \exp(-\kappa \times h)}{1 - \exp(-\kappa \times h)} \right] + (\varphi_c^2 + \varphi_p^2) \ln [1 - \exp(-2\kappa \times h)] \right\} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_0$ 为真空介电常数; $\varepsilon_r$ 为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 水的相对双电层介电常数; $\varphi_c$ 为多孔介质的Zeta电位,mV; $\varphi_p$ 为细菌的Zeta电位,mV; $\kappa$ 为德拜长度,计算方法见公式(5)<sup>[16]</sup>:

$$\kappa = \sqrt{\frac{2N_A \times 1000 \times e^2 \times I}{\varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times k_B \times T}} \quad (5)$$

式中: $N_A$ 为阿伏伽德罗常数, $\text{mol}^{-1}$ ; $e$ 为元电荷,C; $k_B$ 为玻尔兹曼常数, $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ; $T$ 为绝对温度,K; $I$ 为溶液的离子强度, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,计算方法见公式(6)<sup>[17]</sup>:

$$I = \frac{1}{2} \sum (C \times Z^2) \quad (6)$$

式中: $C$ 为离子浓度, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , $Z$ 为离子价态。

路易斯酸碱相互作用的计算过程见公式(7)<sup>[16]</sup>:

$$\Phi_{AB}(h) = 2\pi \times r_p \times \lambda_{AB} \times \Phi_{AB}(h = h_0) \exp\left(\frac{h_0 - h}{\lambda_{AB}}\right) \quad (7)$$

式中: $\Phi_{AB}(h=h_0)$ 为由路易斯酸相互作用产生的自由能, $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ,其计算方法见公式(8); $\lambda_{AB}$ 为背景液的德拜长度的倒数,该值通过公式(5)计算,公式(5)的 $\kappa$ 为该值的倒数,计算得该值为 $8.35\text{ nm}$ ; $h_0$ 为细菌与土壤沙表面接触时的最小间距,通常情况下该值取 $0.25\text{ nm}$ <sup>[16]</sup>。

$$\Phi_{AB}(h = h_0) = -\frac{K_{123}}{2\pi \times h_0 \times \lambda_{AB}} \quad (8)$$

式中: $K_{123}$ 表示疏水力常数,对于非对称的相互作用过程,该值可通过公式(9)<sup>[18]</sup>计算:

$$K_{123} = a \left( \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right) + b \quad (9)$$

式中: $\theta_1$ 为水-气界面的接触角,通常取 $180^\circ$ ; $\theta_2$ 为水-颗粒界面的接触角,通过接触角测量仪测得, $a$ 和 $b$ 表示细菌-空气-水界面相互作用参数,对于石英界面, $a=-5$ , $b=-18$ <sup>[19]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤沙粒径分布

土壤沙中位粒径分布如图1所示,中位粒径值 $d_{50}$ 为 $143\text{ }\mu\text{m}$ ,不均匀系数为3.26,曲率系数为0.69,表明

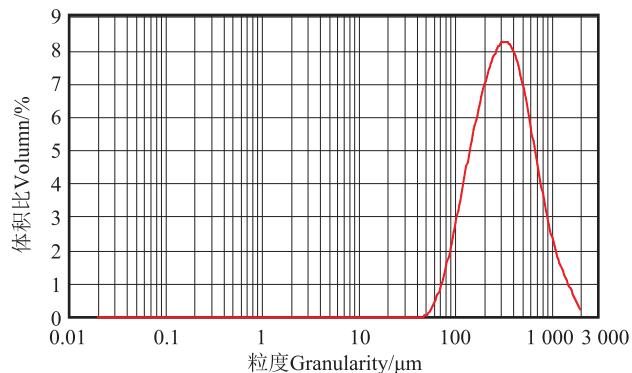


图1 土壤沙的粒径分布

Figure 1 Size distribution of soil sand

土壤沙粒径分布均匀。

## 2.2 酸适应性变化对沙门氏菌表面性质的影响

表1比较了发生酸适应性改变前后沙门氏菌的表面性质。酸适应性改变使沙门氏菌表面Zeta电位的绝对值下降了40%，表面疏水性增加了2.6%，粒径增大了12%；胞外膜结构中EPS浓度降低了64.9%，LPS浓度增加了63%。EPS表面有羧基等官能团，在水环境中可通过对质子而显负电性。此外，有机聚合物LPS可通过静电屏蔽效应降低细菌细胞表面的Zeta电位。因此，EPS浓度下降以及LPS浓度的上升都导致了细菌Zeta电位的降低。LPS浓度增加能够降低细菌的扩散速度，导致细胞水力直径增加。

表1 沙门氏菌表面性质表征

Table 1 Surface properties of *Salmonella*

参数名称 Parameter	单位 Unit	细菌类型 Straining	
		原始菌 S.	酸适应菌 S.A-Acid
Zeta电位 Zeta potential	-mV	28.6±0.87	17.2±1.19
接触角 Contact angle	度 Degree	72.2±0.04	74.1±0.18
粒径 Diameter	μm	2.5±0.19	2.8±0.12
EPS浓度 EPS concentration	mg·L <sup>-1</sup>	15.1±8.30	5.3±7.45
LPS浓度 LPS concentration	mg·L <sup>-1</sup>	10.0±1.42	16.3±1.61
LPS/EPS	—	0.66	3.09

## 2.3 酸适应性改变对沙门氏菌在土壤沙表面迁移与沉积的影响

图2比较了发生酸适应性改变前后沙门氏菌在土壤中的迁移突破曲线。酸适应性改变前突破曲线接近1.0，表明细菌在土壤沙表面难以发生吸附，沉积率接近0。酸适应性改变造成细菌流出浓度降低至0.6，表明沉降速度显著增加。表2列出了沙门氏菌在土壤沙表面的沉积系数，酸适应性改变使沙门氏菌的

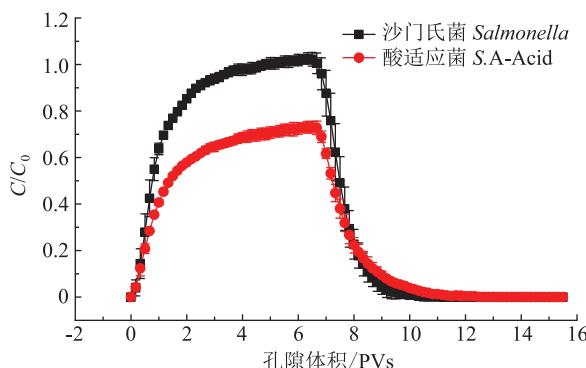


图2 沙门氏菌穿透曲线

Figure 2 Breakthrough curve of *Salmonella*

表2 沙门氏菌沉积系数

Table 2 Deposition coefficient of *Salmonella*

细菌类型 Strain	沉积系数 Deposition coefficient
原始菌 S.	0.18±0.01
酸适应菌 S.A-Acid	0.53±0.01

沉积系数增大了194%。

图3为沙门氏菌的XDLVO曲线。两种沙门氏菌在迁移的过程中均存在能量势垒，都是不利吸附，因此第二能量井的深度是决定沙门氏菌迁移能力的关键因素。图3显示，沙门氏菌在发生酸适应性改变后第二能量井深度增加，这与柱实验观察到的酸适应性改变促进沙门氏菌在土壤沙柱的吸附现象一致。在不利吸附条件下，沉积的沙门氏菌可能从土壤沙表面解吸，在穿透曲线上出现拖尾现象，这与柱实验结果一致。

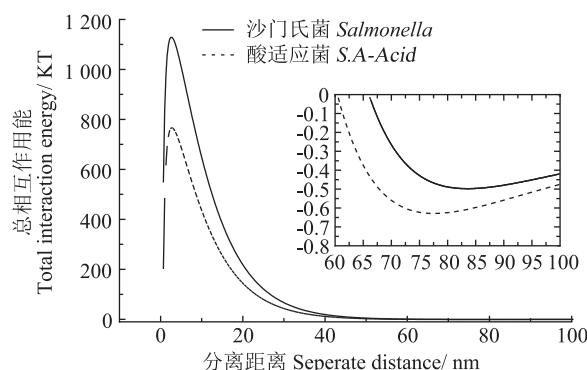


图3 沙门氏菌 XDLVO 曲线

Figure 3 XDLVO curve of *Salmonella*

## 3 讨论

细菌在酸性条件下会发生酸性忍耐反应(Acid tolerance reaction, ATR)以抵抗外界环境的变化，ATR主要表现在酸性条件引起细菌基因型发生改变，进而导致细菌的胞外蛋白发生变化<sup>[20]</sup>。沙门氏菌的迁移能力与其胞外膜结构和物理化学吸附性能有关。KIM等<sup>[21]</sup>和JIANG<sup>[22]</sup>等发现在酸性环境下大肠杆菌和恶臭假单胞菌在沙子表面的吸附能力增强，这与本文的结论一致。沙门氏菌的Zeta电位、疏水性和粒径是影响沙门氏菌吸附能力的重要物理因素。从上文数据可以看出沙门氏菌在发生酸适应性改变后其Zeta电位负电性下降，这导致了沙门氏菌与土壤沙之间的静电斥力减弱，使得沙门氏菌更易于在土壤沙柱中沉积。此外发生酸适应性改变后沙门氏菌的粒径增加，

进一步促进了沙门氏菌的沉降<sup>[23]</sup>。粒径增加还有可能产生筛滤(Straining)作用而降低颗粒物在饱和多孔介质中的迁移能力。但两种沙门氏菌的粒径与土壤沙中位粒径( $d_{50}$ )的比值均大于0.05(原始菌为0.018,酸适应菌为0.019)<sup>[24-25]</sup>,说明两种沙门氏菌在土壤中均不会出现筛滤作用,因此沙门氏菌在土壤沙柱中吸附能力的大小是影响其迁移能力的主要因素。疏水性的变化也会对沙门氏菌的迁移产生影响,疏水性增加会使得胶体的迁移能力减弱<sup>[26-28]</sup>。

由于本研究采用的水-沙实验体系环境条件一致,唯一的区别在于使用了两种不同的细菌(发生酸适应性改变和未发生酸适应性改变)。因此,两种细菌迁移能力的差异主要取决于它们胞外膜结构的差异。实验数据表明酸适应性改变引起EPS浓度降低,LPS浓度增加。EPS可以通过与砂颗粒介质之间产生静电排斥作用或空间位阻排斥效应而促进细菌迁移<sup>[29]</sup>;LPS可以通过静电屏蔽效应降低细菌的Zeta电位来抑制细菌的迁移<sup>[30]</sup>。酸适应性改变既降低了细胞外膜的EPS浓度,又提高了LPS的浓度,从而造成Zeta电位下降而促进沙门氏菌的沉降。此外,细菌的EPS中主要含有磷酸基团、硫酸基团、羟基和羧基<sup>[31]</sup>,它们均带有负电荷,通过表1中的数据可知沙门氏菌在发生酸适应性改变后其Zeta电位负电性下降,说明发生酸适应性改变后沙门氏菌表面粘附的EPS减少。由于上述基团对沙门氏菌的吸附均存在抑制作用,因此发生酸适应性改变后的沙门氏菌的迁移能力受到了一定程度上的抑制。

## 4 结论

(1)沙门氏菌可以通过调控胞外膜结构来适应酸性环境,而细胞外膜结构的改变可以降低细菌的迁移能力。酸性条件除了改变细菌的胞外膜结构,还能降低石英砂表面的负电性,从而导致沙门氏菌与沙之间的排斥力进一步降低。因此,在酸性环境中,酸适应沙门氏菌的迁移能力可能比本实验观测值更低。此外,环境条件复杂多变,酸碱度的变化只是其中之一,建议系统研究其他环境胁迫因子引起的适应性改变对细菌迁移的影响,以更好地理解细菌在不利环境条件中的传播风险。

(2)环境化学条件(pH、离子强度、离子类型、有机物)或细菌细胞生理特征(如胞外聚合物、脂多糖结构、鞭毛、胞外膜蛋白等)对于细菌迁移的影响都有研究,但本研究首次揭示环境化学条件可以改变细菌细

胞的生理特征从而影响其迁移。这些发现首次表明在酸性环境中(如土壤酸化、酸雨、酸矿废水污染)沙门氏菌的酸适应产生的生理变化有可能造成其迁移能力的下降,从而降低病菌的传播风险。

## 参考文献:

- [1] DEERING A J, MAUER L J, PRUITT R E. Internalization of *E. coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in plants: A review[J]. *Food Research International*, 2012, 45:567-575.
- [2] MANTHA S, ANDERSON A, ACHARYA S P, et al. Transport and attenuation of *Salmonella enterica*, fecal indicator bacteria and a poultry litter marker gene are correlated in soil columns[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598:204-212.
- [3] ZHONG H, LIU G, JIANG Y, et al. Transport of bacteria in porous media and its enhancement by surfactants for bioaugmentation: A review [J]. *Biotechnology Advances*, 2017, 53(4):490-504.
- [4] WALCZAK J J, WANG L, BARDY S L, et al. The effect of starvation on the transport of *Escherichia coli* in saturated porous media are dependent on pH and ionic strength[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2012, 90:129-136.
- [5] HAZNEDAROGLU B Z, BOLSTER C H, WALCZAK S L. The role of starvation on *Escherichia coli* adhesion and transport in saturated porous media[J]. *Water Research*, 2008, 42:1547-1554.
- [6] HAN P, SHEN X, YANG H, et al. Influence of nutrient conditions on the transport of bacteria in saturated porous media[J]. *Colloids and Surface B: Biointerfaces*, 2013, 102:752-758.
- [7] WALCZAK J J, BARDY S L, FERICANCIKONVA L, et al. Influence of tetracycline resistance on the transport of mature-derived *Escherichia coli* in saturated porous media[J]. *Water Research*, 2011, 45:5720-5728.
- [8] ZHANG X, BISHOP P L, KINKLE B K. Comparison of extraction methods for quantifying extracellular polymers in biofilms[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39:211-218.
- [9] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72:248-254.
- [10] DUBIOS M, HAMILTON K A, REBERS J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, 28:350-356.
- [11] FAGUY D M, BAYLEY D P, KOSTYUKOVA A S, et al. Isolation and characterization of flagella and flagellin proteins from the thermoacidophilic archaea *Thermoplasma volcanium* and *Sulfolobus shibatae*[J]. *Journal of Bacteriology*, 1996, 178:902-905.
- [12] YAN X, YANG X, TANG Z, et al. Downward transport of naturally-aged light microplastics in natural loamy sand and the implication to the dissemination of antibiotic resistance gene[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114270.
- [13] FERICANCIKONVA L, BARDY S L, WANG L X, et al. Effect of outer membrane protein TolC on the transport of *Escherichia coli* within saturated quartz sands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47

- (11):5720–5728.
- [14] WU D, TONG M, KIM H. Influence of perfluorooctanoic acid on the transport and deposition behaviors of bacteria in quartz sand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5):2381–2388.
- [15] ELIMELECH M, O'MELIA C R. Effect of particle size on collision efficiency in the deposition of brownian particles with electrostatic energy barrier[J]. *Langmuir*, 1990, 6(6):1153–1163.
- [16] CHRYSIKOPPOULOS C V, SYNGOUNA V I. Attachment of bacteriophages MS2 and ΦX174 onto kaolinite and montmorillonite: Extended-DLVO interactions[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2012, 92:74–83.
- [17] GOUY G. Constitution of the electric charge at the surface of an electrolyte[J]. *Journal of Physics*, 1910, 9:457–467.
- [18] SCHAFER A, HARMS H, ZEHENER A J B. Bacterial accumulation at the air–water interface[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32:3704–3712.
- [19] BAI H, COCHET N, PAUSS A, et al. DLVO, hydrodynamic force acting on bacteria at soil–air–water interfaces: Their relative impact on bacteria deposition mechanisms in unsaturated porous media[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2017, 150(1):41–49.
- [20] YE B, HE S, ZHOU X A, et al. Response to acid adaption in *Salmonella enterica* serovar enteritidis[J]. *Journal of Food Sciences*, 2019, doi:10.1111/1750–3841.1446.
- [21] KIM S, PARK S, LEE C, et al. Bacteria transport through goethite-coated sand: Effect of solution pH and coated sand content[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 63:236–242.
- [22] JIANG D, HUANG Q, CAI P, et al. Adsorption of *Pseudomonas putida* on clay minerals and iron oxide[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 54(2):217–221.
- [23] BAI H, COCHET N, PAUSS A, et al. Bacteria cell properties and grain size impact on bacteria transport and deposition in porous media [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2016, 139:148–155.
- [24] HERZIG J P, LECLERC D M, GOFF P L. Flow of suspensions through porous media—application to deep filtration[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1970, 62(5):8–35.
- [25] DING B, LI C, ZHANG M, et al. Effect of pore size distribution and coordination number on the prediction of filtration coefficients for straining from percolation theory[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 127:40–51.
- [26] HUYSMAN F, VERATRAETE W. Effect of cell surface characteristics on the adhesion of bacteria to soil particles[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 16(1):21–26.
- [27] SCHAFER A, USTOHAL P, HARMS H, et al. Transport of bacteria in unsaturated porous media[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 33:149–169.
- [28] WAN J, WILSON J L, KIEFFT T L. Influence of the gas–water interface on the transport of microorganisms through unsaturated porous media[J]. *Applied Environment Microbiology*, 1994, 60(2):509–516.
- [29] CHEN F, YUAN X, SONG Z, et al. Gram-negative *Escherichia coli* promotes deposition of polymer-capped silver nanoparticles in saturated porous media[J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, 5:1495.
- [30] WALKERE S L, REDMAN J A, ELIMELECH M. Role of cell surface lipopolysaccharides in *Escherichia coli* K12 adhesion and transport[J]. *Langmuir*, 2004, 20:7736–7746.
- [31] CHEN Y, ZHANG P, GUO J, et al. Functional group characteristics of EPS in biofilm growing on different carriers[J]. *Chemosphere*, 2013, 92:633–638.

(责任编辑:叶飞)