

多孔介质中的微生物迁移行为与影响因素研究进展

石玉¹, 周慧娴¹, 曹凤婷¹, 彭洁茹¹, 黄靖¹, 邱晓营¹, 程磊^{*2}

1 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601

2 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601

石玉, 周慧娴, 曹凤婷, 彭洁茹, 黄靖, 邱晓营, 程磊. 多孔介质中的微生物迁移行为与影响因素研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(4): 1639-1652.

SHI Yu, ZHOU Huixian, CAO Fengting, PENG Jieru, HUANG Jing, QIU Xiaoying, CHENG Lei. Removal of microorganisms and influencing factors in porous media[J]. Microbiology China, 2023, 50(4): 1639-1652.

摘要: 微生物在地下水和土壤环境中的迁移与地下水资源保护、地下水污染修复及土壤污染防治等息息相关。自然界中多孔介质具有结构复杂性和空间异质性。这导致微生物在其中的迁移易受多重环境因素的影响。本文总结了几种典型多孔介质中微生物迁移模型、理论与研究方法, 并对多孔介质中影响微生物迁移行为的 3 种因素——物理、化学和生物因素进行了梳理。其中物理因素的影响主要包括多孔介质的粒径、表面粗糙度、饱和度、环境温度、水体流速等相关; 化学因素主要包含流体 pH、离子种类与强度、可溶性有机物含量、多孔介质自身化学性质等; 生物因素不但涉及微生物种类、细胞大小和细胞表面特性, 还与胞外聚合物的分泌、鞭毛运动及趋化性等相关。本综述旨在总结近年来有关微生物在多孔介质中迁移的相关研究, 深入理解微生物在多孔介质中的迁移行为, 为其在地下水和土壤污染修复中的实际应用提供理论依据。

关键词: 微生物; 迁移行为; 影响因素; 多孔介质

资助项目: 国家自然科学基金(22106002); 安徽省自然科学基金(2108085QE244)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (22106002) and the Natural Science Foundation of Anhui Province (2108085QE244).

*Corresponding author. E-mail: chengts@ahu.edu.cn

Received: 2022-10-08; Accepted: 2022-11-21; Published online: 2022-12-13

Removal of microorganisms and influencing factors in porous media

SHI Yu¹, ZHOU Huixian¹, CAO Fengting¹, PENG Jieru¹, HUANG Jing¹, QIU Xiaoying¹, CHENG Lei^{*2}

1 Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China

2 School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China

Abstract: Removal of microorganisms in soil and groundwater environments is closely related to groundwater resource protection, groundwater pollution treatment, and soil pollution prevention. Due to complex structures and spatial heterogeneity of porous media in nature, the removal of microorganisms is susceptible to multiple environmental factors. This paper summarized several models, theories, and research methods of typical removal of microorganisms in porous media, and sorted out three factors (physical, chemical, and biological factors) affecting the removal of microorganisms in porous media. The physical factors included the particle size, surface roughness, saturation, ambient temperature, and flow rate in porous media. The chemical factors include pH, ionic species and strength, soluble organic matter content, and chemical properties of porous media. The biological factors involve not only the microbial species, cell size, and cell surface properties, but also the secretion of extracellular polymers, flagellar mediated motility, and chemotaxis. The purpose of this paper is to improve the understanding of the removal of microorganisms in porous media by reviewing the related research in recent years, to provide a theoretical basis for its practical application in the remediation of polluted groundwater and soil.

Keywords: microorganisms; removal; influencing factors; porous media

随着工业生产的高速发展, 长期不合理用水及污水处置不当导致了地下水和土壤中重金属离子、有机污染物、放射性物质、病原微生物等含量逐渐升高, 由此造成的土壤-地下水污染已成为全球性环境问题^[1-3]。为解决不同类型污染问题, 多种地下水和土壤修复技术正不断发展完善^[4]。其中, 原位修复技术因投入成本低、修复效率高、对周边环境影响小等优点而从众多修复技术中脱颖而出, 受到越来越多的关注和研究^[5]。原位微生物修复技术是指在不改变污染场地的情况下采取人为措施, 包括添加营养元素、微生物制剂等物质, 刺激原位或外源投加功能微生物的生长, 进而强化污染物

生物降解的技术^[5-6]。然而, 在实际污染场地的原位修复过程中, 活性微生物分布不均会导致修复效果受限^[7]。因此, 探讨微生物在地下环境中的迁移行为及影响因素对土壤污染修复治理、地下水资源防护、地下水生态修复等具有重大意义。

作为一类生物胶体, 病毒、细菌等微生物在地下水系统中不但可以自身迁移, 也可作为载体实现与其他污染物的协同迁移^[8]。随着新型工程纳米材料的投入使用和新兴污染物的出现, 两者会不可避免地渗入并积累在地下水和土壤环境中。与此同时, 这意味着微生物与这两者接触的概率会逐渐增大, 微生物的迁移行

为也会更加复杂^[9]。因此, 了解和掌握微生物迁移过程中的影响因素对预测微生物的迁移分布、污染场地的治理防护至关重要。本文根据国内外相关的研究进展, 综述当前常用迁移模型、理论与研究方法, 并对影响微生物在多孔介质中迁移的重要影响因素进行梳理, 以期为今后研究微生物在多孔介质中的迁移行为提供依据与参考。

1 微生物在多孔介质中迁移的理论模型与研究方法

微生物在多孔介质中的迁移行为本质是生物胶体随水流在孔隙中移动的过程^[10]。在此过程中, 微生物迁移受多种机制共同作用(包括附着、分离、物理应变、位点阻塞、熟化吸附等), 在土壤介质中的迁移过程则是由微生物运动性、菌丝的延伸、微生物生长繁殖、微生物在土壤中的弥散等主导^[10]。此外, 迁移过程还受多孔介质自身物理因素(孔隙度、表面粗糙度、水体流速等)、孔隙水体化学因素(流体 pH、离子强度等)、微生物自身生物因素(微生物种类形态、表面性质等)及其他生物因素的共同影响。

目前, 已报道多个理论模型用于描述、解析和预测多孔介质中的胶体迁移行为^[11], 而微生物作为一种生物胶体也满足胶体的一般特征。因此, 一些经典胶体迁移理论也部分适用于微生物在多孔介质中的迁移。

1.1 对流-弥散偏微分方程(advection-dispersion equation, ADE)

在多孔介质中, 胶体的迁移过程多指弥散和水平对流这 2 种基础运动方式。现有研究常用溶质水平对流-弥散原理来解释胶体在多孔介质中的迁移行为。

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + \rho \frac{\partial (S)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial q C}{\partial x}$$

式中: C 为流体中的胶体浓度(mg/L); t 为迁移时间(min); ρ 为多孔介质密度(g/cm³); S 为多孔介质中沉积胶体的浓度(mg/g); θ 为孔隙度(-); q 为达西流速(cm/min); D 为弥散系数(cm²/min); x 为距进水侧的距离(cm)^[11]。

胶体迁移行为通常包括不可逆沉积、附着/分离、团聚、物理应变、位点阻滞和熟化等^[11]。其中, 附着是指胶体从流动相转移到固定相的过程, 一般情况下属于不可逆吸附; 分离是指在胶体迁移过程中出现胶体不能完全沉积在多孔介质表面时, 会导致已经沉积的胶体脱离吸附位点进行二次迁移的现象; 物理应变是指胶体在迁移过程中除了胶体过滤理论中拦截、重力沉降和布朗运动这 3 种作用力外, 还受到应变力作用; 位点阻塞是指在已有胶体占据多孔介质表面的沉积位点后, 影响其对后续进入体系中的胶体颗粒的沉积; 熟化吸附是指当胶体与胶体之间的相互作用大于胶体与多孔介质之间时, 胶体之间会先发生团聚, 团聚后的大颗粒会沉积在吸附位点导致胶体的迁移能力下降。在胶体迁移过程中, 以 ADE 为基础推导得到的不同迁移行为模型如表 1 所示。

1.2 胶体过滤理论(colloids filtration theory, CFT)

胶体颗粒沉积到固定相表面的过程中重力沉降、拦截和布朗运动被认为是发挥主导作用的 3 种力^[12]。在 CFT 中, 胶体的沉积过程被描述为胶体首先会随流体运动接触到固相表面, 然后二者之间发生吸附, 胶体沉积在固相上^[11]。此外, 已有研究证明胶体在多孔介质中迁移、滞留过程中, 熟化和堵塞效应发挥了重要作用。熟化作用是指多孔介质表面上的吸附位点被微生物占据后, 微生物自身可作为新的沉积位点继续进行吸附沉积^[13]。熟化效应造成的吸附是多层的, 随着时间的推移, 流出液样品胶体的浓

表 1 基于 ADE 推导获得的不同胶体迁移行为模型^[11]Table 1 List of ADE-based models applied for different colloid transfer behaviors^[11]

不同迁移行为	胶体迁移模型方程
Different removal behavior	Colloidal transport model equation
附着	$\rho \frac{\partial(S)}{\partial t} = \theta k_{\text{att}} C$
Attachment	
分离	$\rho \frac{\partial(S)}{\partial t} = \theta k_{\text{att}} C - \rho k_{\text{det}} S$
Detachment	
物理应变	$\rho \frac{\partial(S)}{\partial t} = \theta k_{\text{att}} \psi_x C; \psi_x = \frac{(d_c + x)^{-\beta}}{d_c}$
Physical straining	
位点阻塞	$\psi_b = 1 - \frac{S}{S_m}; \rho \frac{\partial(S)}{\partial t} = \theta k_{\text{att}} \psi_b C - \rho k_{\text{det}} S$
Site-blocking	
熟化吸附	$\psi = 1 + AS^\beta; \rho \frac{\partial(S)}{\partial t} = \theta k_{\text{att}} \psi_x C - \rho k_{\text{det}} S + \rho k_{\text{ri,p}} SC$
Ripening	

C : 流体中胶体浓度(mg/L); t : 迁移时间(min); ρ : 多孔介质密度(g/cm³); S : 多孔介质中沉积胶体的浓度(mg/g); θ : 孔隙度(-); q : 达西流速(cm/min); D : 弥散系数(cm²/min); x : 距进水侧的距离(cm); k_{att} : 附着速率系数(min⁻¹); k_{det} : 分离速率系数(min⁻¹); d_c : 多孔介质粒径(cm); A 、 β : 经验常数(-); S_m : 介质中胶体沉积的最大浓度(mg/g); ψ : 沉积系数(-)

C : Colloid concentration in the fluid (mg/L); t : Migration time (min); ρ : Density of the porous medium (g/cm³); S : Concentration of the deposited colloid in the porous medium (mg/g); θ : Porosity (-); q : Darcy flow rate (cm/min); D : Dispersion coefficient (cm²/min); x : Distance from the inlet side (cm); k_{att} : Adhesion rate coefficient (min⁻¹); k_{det} : Separation rate coefficient (min⁻¹); d_c : Particle size of the porous medium (cm); A , β : Empirical constant (-); S_m : Maximum concentration of colloid deposition in the medium (mg/g); ψ : Deposition coefficient (-).

度逐渐减小; 堵塞作用是指微生物吸附在多孔介质表面上占据吸附位点, 剩余微生物只能占据其他吸附位点, 通常认为堵塞造成在多孔介质上的沉积是单层的。有研究发现胶体过滤理论对多孔介质中微生物迁移行为的预测结果与实验之间存在差异, 其中微生物表面粗糙度、自身死亡与繁殖、多孔介质中存在的堵塞、熟化作用等被认为是造成差异的主要原因^[12]。

1.3 Derjaguin-landau-verwey-overbeek (DLVO)理论

在经典 DLVO 理论中, 范德华力和静电力是用来描述胶体体系稳定性最基础的 2 个相互作用力^[14]。胶体之间的总相互作用能是由排斥势能(Φ_{EDL})和范德华引力势能(Φ_{LW})所决定^[15], 总相互作用能随着胶体颗粒的间距(h)变化而波动^[16]。如图 1 所示, DLVO 理论假设细菌间吸引力发生在 2 个典型的距离上, 即受范德华力

强烈影响的称为一次能量最小值(不超过 1 nm)的短距离, 以及称为二次能量最小值(5–10 nm)的长距离^[17]。细菌在多孔介质中的吸附可大致分为 2 种情况。其中可逆吸附是指细菌由于水流的动量、布朗运动或自身运动而接近介质表面, 并在二次能量最小值的长距离处(5–10 nm)发生吸附; 可逆吸附通常是细菌和介质表面之间的弱相互作用, 其强度取决于水溶液的离子强度和化学成分, 而不可逆吸附则是指涉及大量能量的永久相互作用^[17]。在高离子强度下, 能量壁垒消失, 细菌不可逆地黏附在固体表面上^[18]。另外, 一些非 DLVO 力(水合力、疏水相互作用及空间位阻等)也会影响胶体与胶体、胶体与多孔介质间的相互作用^[19-20]。

1.4 研究方法

目前已有多种研究方法用以表征微生物在多孔介质中的迁移行为。在研究胶体迁移过程

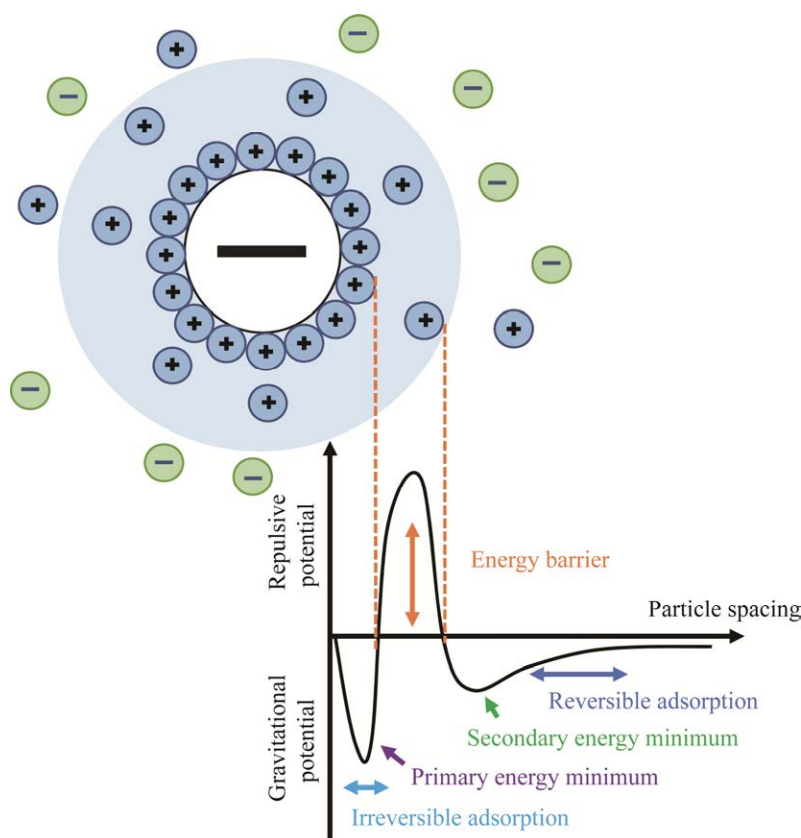


图 1 基于 DLVO 理论的胶体双电层及势能曲线示意图^[17-18]

Figure 1 Schematic diagram of an electrostatic double layered colloid and potential energy curve based on DLVO theory^[17-18].

中, zeta 电位绝对值通常与胶体的稳定性相关联。通过马尔文电位仪检测胶体表面电势的大小、正负能在很大程度上确定胶体在多孔介质中的迁移情况^[14]。研究微生物在多孔介质中的迁移行为时大多数研究者们都会从此角度出发考虑。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)多用来表征微生物在迁移过程中自身形态结构发生的变化, 以及多孔介质颗粒形貌结构等^[17]。随着研究的不断深入, 一些表征手段也在不断地推陈出新。He 等^[21]将耗散型-石英晶体微天平和平行平板流室体系等应用到观察微生物在多孔介质中的沉积过程, 为揭示多孔介质中微生物的迁移行为提供了新思

路。Dong 等^[22]将显微镜与 CDD 相机联用, 开发出孔隙尺度的实时可视化系统用于观察微塑料在多孔介质中的迁移沉积行为。这一研究有望实现对多孔介质中微生物的实时观察, 能进一步从微米尺度揭示多孔介质中微生物的迁移行为。

2 物理因素

环境中多孔介质组分具有结构复杂性和空间异质性(表面形态、粗糙度、非均质性等)^[23], 不同多孔介质间的差别巨大(图 2)。微生物在多孔介质中的迁移过程受多种多孔介质物理性质的影响。

2.1 介质粒径

多孔介质的粒径是决定微生物在多孔介质

中迁移的关键因素。大粒径的多孔介质相较于小粒径有更大的孔隙,使得微生物与多孔介质表面的碰撞概率减小,最终赋予微生物有较强的迁移能力。Bai 等^[24]研究了产酸克雷伯氏菌(*Klebsiella oxytoca*)和大肠杆菌(*Escherichia coli*)在粒径分布为 0.25–0.54 mm 的细砂和 0.58–1.48 mm 的粗砂中的迁移,发现随着砂粒尺寸的增加,细菌的沉积在逐渐减小。

2.2 表面粗糙度

研究表明,随着多孔介质表面粗糙度的增加,微生物和多孔介质之间的排斥能垒下降,微生物自身的迁移能力也随之变化。Lu 等^[25]研究发现石英砂介质尖锐凸起的表面会减小能垒,从而促进胶体颗粒在第一极小值处的滞留;同时附着在介质表面沟谷处的胶体颗粒会因为避开水流剪切力而利于滞留在第二极小值处。

Hoek 等^[26]研究表明,胶体颗粒和粗糙聚合物膜之间的能垒低于光滑聚合物膜的能垒,并且这种能量势垒的降低与表面粗糙度的大小密切相关。

2.3 水流流速

水流流速是影响微生物迁移的重要因素。微生物在随孔隙水运动时会发生对流,受水力梯度、孔隙度和渗透率等影响。通常较高的水流速度产生的剪切力较大,这会导致附着在介质上的微生物发生解离^[17]。同时,高流速也会使微生物在多孔介质中的停留时间变短,减少其与多孔介质接触的机会,从而降低微生物沉积的可能性。Huysman 等^[27]也证实当流速从 0.8 cm/h 增加到 4.7 cm/h 后,不饱和多孔介质中的乳杆菌(*Lactobacillus*)的迁移显著增多;在饱和多孔介质中,*Lactobacillus* 的质量回收率随着水流速的增加而提高。

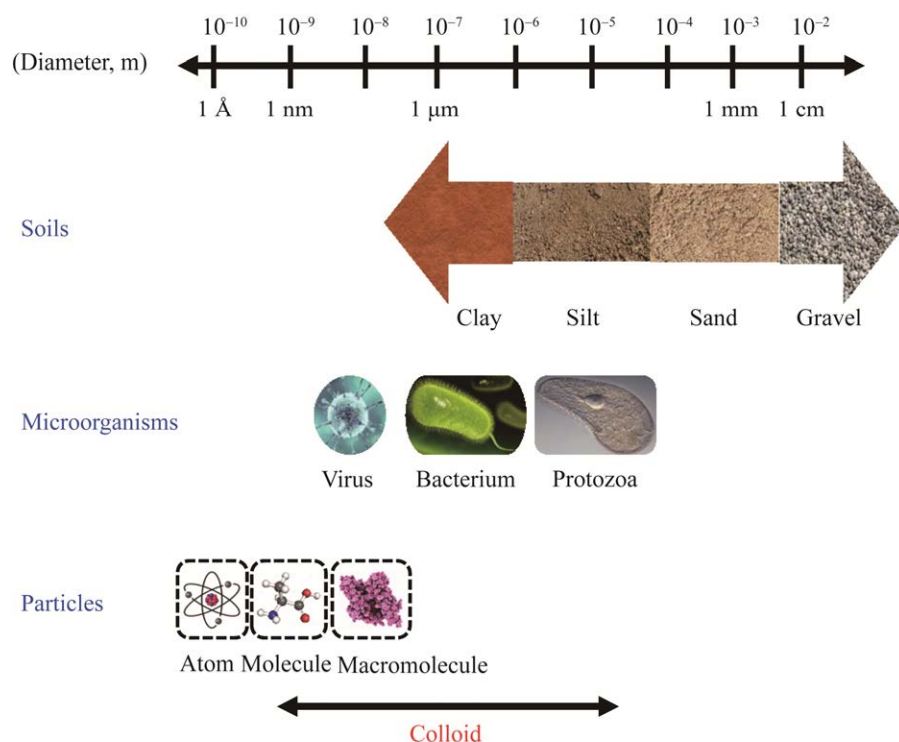


图 2 环境中胶体的分类

Figure 2 Classification of colloids in the environment.

2.4 含水量

多孔介质含水量的改变会导致微生物与多孔介质之间的有效碰撞效率发生变化,进而影响到微生物在多孔介质中的迁移。Jewett 等^[28]研究了不同土壤含水量条件下荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*) P17 在多孔介质中的滞留量,结果表明随着多孔介质中的含水量减少,细菌在多孔介质中的滞留量逐渐增加。Pang 等^[29]研究结果类似,含水量的降低导致多孔介质表面液膜厚度的减小,进而增加微生物与多孔介质颗粒之间的碰撞概率。

2.5 环境温度

温度对多孔介质中微生物迁移影响较大。一方面,温度会影响微生物自身的生长状态、表面的亲疏水性、细菌表面胞外聚合物的构象等;另一方面,温度通过影响流体的黏度、电导率等因素来改变微生物与多孔介质之间的相互作用^[30]。McCaulou 等^[31]研究了 4 °C 和 18 °C 时细菌在饱和多孔介质中的迁移,并观察到细菌在 4 °C 时的滞留量明显大于 18 °C。然而 Kim

等^[32]比较了 *E. coli* D21g 分别在 4、10 和 25 °C 这 3 种温度下的迁移能力,发现在 10 °C 条件下细菌在多孔介质中的滞留量最大。上述研究结果之间的差异可能源自研究体系和微生物自身的不同。

2.6 多孔介质的饱和度

微生物在非饱和多孔介质中的迁移行为本质上是与空气、水和固体颗粒的相互接触^[33],同样受到水动力和水化学因素的影响^[34]。Chen 等^[35]研究发现,在不饱和多孔介质中细菌滞留在介质-空气-水三相界面处,其在空气-水界面处的滞留量随着饱和度的降低而逐渐增多。Mitropoulou 等^[36]对比研究了不同饱和条件下亲水性乳胶粒的迁移和沉积行为,发现随着含水量的降低,胶体沉积速率增加。图 3 展示了在饱和/非饱和多孔介质中微生物迁移过程发生的几种沉积方式,但目前关于微生物在非饱和多孔介质中的研究较少,需要更为系统地研究和理解微生物胶体在非饱和介质中的迁移与沉积。

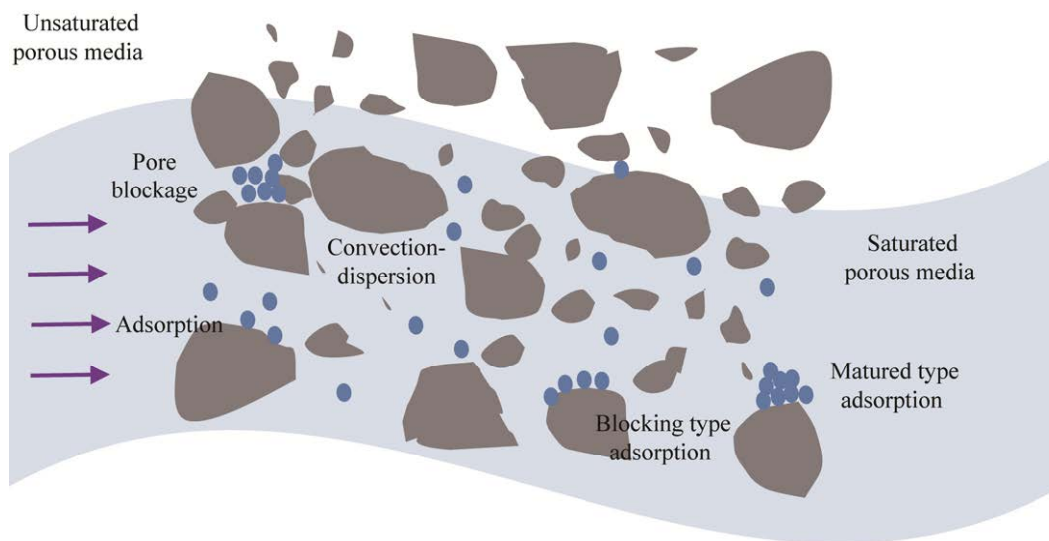


图 3 微生物在多孔介质中的迁移过程^[16]

Figure 3 Transfer process of microorganisms in porous media^[16].

3 化学因素

流体 pH、离子强度、可溶性有机物等化学因素是影响微生物在多孔介质中迁移的主要因素(图 4)。

3.1 流体 pH

自然条件下多孔介质及微生物表面均带负电荷,而且微生物表面电荷与流体 pH 值有关。随着流体 pH 增大,多孔介质与微生物表面负电荷增加,静电斥力逐渐增加,从而导致微生物在多孔介质中的沉积逐渐减少^[37]。Jiang 等^[38]研究了恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)对蒙脱石、高岭石和针铁矿等矿物的吸附,发现随着 pH 值从 3.0 增加到 10.0,细菌的吸附量逐渐减少。Li 等^[39]研究发现在 pH 值为 4.0、5.6 和 7.0 的情况下,砂柱中氯酚草螺菌(*Herbaspirillum chlorophenolicum*) FA1 的洗脱率逐渐增大。这可能是细菌表面一些官能团随着流体 pH 的增加而去质子化,导致自身电负性的逐渐增强,进而使得其在多孔介质中的迁移能力提升。

3.2 离子种类和强度

由经典 DLVO 理论可知,流体中电解质强度增加会压缩胶体表面双电层,降低排斥势能和

流体的稳定性。Zhang 等^[40]研究了 *E. coli* MG1655 及其鞭毛突变菌株 *AfliC* 在不同离子类型和强度条件下(5、25 mmol/L NaCl 和 1、5 mmol/L CaCl₂) 的迁移,实验结果表明,随着离子浓度的增加,细菌的沉积也随之增大;在相同离子浓度下, CaCl₂ 溶液中的细菌沉积率要显著高于 NaCl 溶液。也有研究报道了类似的研究结果,流体中离子价态数增大使得微生物表面双电层被压缩,导致体系斥力势能降低,更多的微生物沉积在多孔介质表面^[20,41-42]。

相较于单价离子,二价离子中和胶体与介质表面电荷的能力更强,更易导致胶体沉积在多孔介质中^[43]。而且多价离子存在架桥效应,会在流体中充当螯合剂作用将胶体与多孔介质表面连接,促进胶体在介质表面发生沉积^[43-44]。

3.3 多孔介质的性质

相较于实验室研究体系中的石英砂介质,自然界中的多孔介质类型丰富、成分复杂且形态各异。Dong 等^[45]研究了大肠杆菌在纯石英砂柱和铁矿物负载石英砂柱中的迁移,结果表明,在相同条件下大肠杆菌几乎完全吸附于铁矿物负载的石英砂柱,大肠杆菌(表面带负电荷)与铁

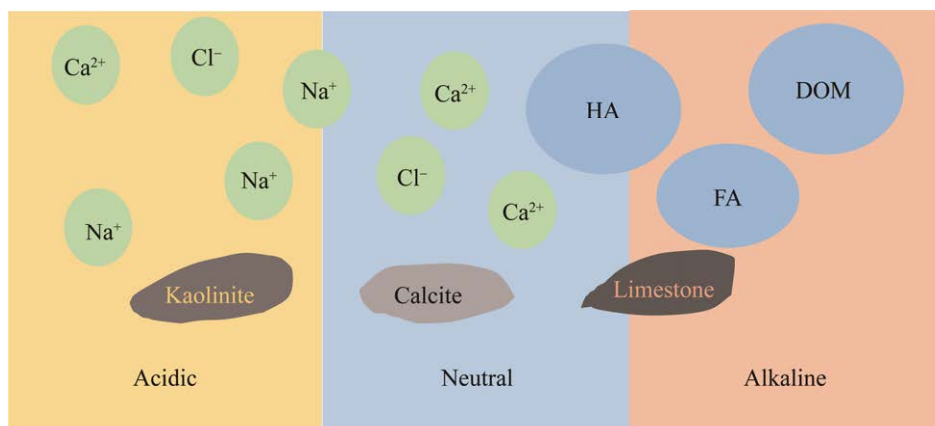


图 4 影响微生物在多孔介质中迁移的不同化学因素 HA: 腐殖酸; FA: 黄腐酸; DOM: 可溶性有机物
Figure 4 Different chemical factors influencing transfer of microorganisms in porous media. HA: Hyaluronic acid; FA: Fulvic acid; DOM: Dissolved organic matter.

矿物(表面带正电荷)之间的静电相互作用导致细菌大量沉积在多孔介质中。然而在低离子浓度体系中, Li 等^[39]对比研究了 *H. chlorophenicum* FA1 在石英砂介质和石灰石介质中的运移行为, 发现其更易滞留在石灰石介质中; 另外, pH 和温度的改变并未对其运移行为产生明显影响, 并且 X-DLVO 计算结果表明石灰石表面粗糙度是造成细菌沉积的主要原因。上述研究表明微生物在多孔介质中的迁移与多孔介质矿物含量、表面形态等密切相关, 需要结合多方面的因素来分析判断。

3.4 可溶性有机物(dissolved organic matter, DOM)

DOM 广泛存在于地下水环境中, Yang 等^[46]研究发现腐殖酸可通过吸附流体中的赤铁矿来增强大肠杆菌的迁移能力; Abudalo 等^[47]认为 DOM 能够改变氢氧化铁负载的石英砂介质表面的 zeta 电位(由正电位转变为负电位), 最终导致小隐孢子虫卵囊(*Cryptosporidium parvum* oocysts)在此多孔介质中迁移增多。总之, DOM 主要通过改变微生物细胞或多孔介质表面电荷、竞争多孔介质表面沉积位点或者产生空间位阻等来影响微生物在多孔介质中的迁移与沉积^[17,48-49]。

4 生物因素

与非生物胶体相比, 微生物细胞自身特性是影响其在多孔介质中迁移的重要因素, 包括细胞类型和大小^[25,50]、生长阶段、表面电荷^[49]和大分子等。

4.1 微生物的种类与形态

已知的微生物种类繁多, 它们的多孔介质中的迁移行为并不相同^[51-53]。Mallén 等^[53]对比了自然流动条件下大肠杆菌、恶臭假单胞菌和噬菌体病毒在砂石含水层中的迁移行为, 结果

表明噬菌体病毒的迁移能力最强, 其次是恶臭假单胞菌, 大肠杆菌迁移能力最弱。

微生物细胞个体形状各异, 包括杆状、球体、丝状、椭圆状、多面体、纺锤体等。Bai 等^[54]研究了大肠杆菌、产酸克雷伯菌和杜鹃红球菌在 2 种不同粒径石英砂介质中的迁移行为; 在粗砂介质中, 细菌迁移主要取决于多孔介质的粒径而非细菌细胞特性; 而在细砂介质中, 细菌表面疏水性是影响细菌沉积的主要原因。

4.2 微生物的表面性质

除表面亲疏水性外, 微生物所带的表面电荷决定了其与多孔介质或其他胶体之间的静电作用, 是影响微生物迁移行为的主导因素^[55-56]。Sharma 等^[57]发现多孔介质中细菌的吸附随着其 zeta 电位的增大而减小, 证实细菌表面电荷与迁移能力大小之间存在高度相关性。Chen 等^[58]发现多孔介质中粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*)表面负电荷比 *E. coli* 更多, 这是导致两者迁移行为存在差异的主要原因之一。

4.3 胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)

EPS 是微生物生长过程中自身分泌的高分子聚合物, 主要由蛋白质、多糖、胞外 DNA、腐殖质等物质组成。EPS 大致分为可溶性 EPS (释放到水中的聚合物)及与细胞结合的 EPS, 后者又包括松散结合的 EPS 和紧密结合的 EPS^[59]。EPS 与细胞理化性质息息相关, 通过改变细胞表面电荷和疏水性等特性, 进而影响微生物细胞与多孔介质之间的相互作用, 最终改变其在多孔介质中的迁移^[60]。

Tong 等^[61]通过直接比较未经处理的细菌(包含 EPS)与经过处理的细菌细胞(去除 EPS)的整体沉积动力学, 发现无 EPS 细菌细胞的迁移率显著高于未经处理的对照组。Jin 等^[62]研究对比了变形虫孢子在去除 EPS 前后孢子表面官能

团的变化情况,证实 EPS 组成成分中疏水蛋白的 β 折叠含量是导致孢子迁移率改变的主要原因。

4.4 鞭毛

鞭毛介导的细菌运动能力大幅度提升了细菌细胞与多孔介质之间的碰撞频率,从而有利于细菌在多孔介质表面的吸附^[17]。Haznedaroglu 等^[63]使用不同运动表型的肠道沙门氏菌(*Salmonella enterica*)研究了细菌鞭毛对迁移的影响,结果表明,鞭毛的运动菌株比鞭毛缺陷菌株更易滞留在多孔介质中。此外,Zhang 等^[40]研究了不同种大肠杆菌(*E. coli* RP437、*E. coli* MG1655 及其鞭毛突变株 *AfliC*)在石英砂介质中的迁移行为,结果表明,在相同条件下有鞭毛菌株的沉积率明显高于鞭毛缺陷株,而且黏性鞭毛菌株的沉积率比正常鞭毛菌株高,表明鞭毛有助于细菌沉积在多孔介质中。

4.5 趋化性

细菌趋化性是一种感应环境中化学物质浓度变化而调控自身运动的基本生理机制,其在细菌趋近有利而规避不利环境过程中发挥关键作用^[64-65]。已有研究报道细菌趋化性直接影响其在多孔介质中的迁移行为。Cheng^[64]等研究发现希瓦氏菌(*Shewanella putrefaciens*) CN-32 对 As(V)存在趋化响应行为,并证明 *S. putrefaciens* CN-32 对 As(V)的趋化行为依赖于功能性砷酸盐还原酶而非金属还原类似的呼吸路径相关蛋白,属于能量趋化机制。Liu 等^[66]发现具有胞外电子传递能力的电活性微生物希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis*) MR-1 在表面改性(铁、锰氧化物)多孔介质中的迁移行为,发现其在厌氧条件下能够将自身代谢产生的电子传递给铁锰氧化物,证实细菌细胞由能量趋化机制介导最终沉积在具有氧化还原活性的多孔介质表面。

4.6 其他生物影响

由于环境中微生物的种类、数量庞大且微

生物种间存在竞争、共生及寄生等关系,会不可避免地出现不同种微生物间的相互影响,甚至发生共迁移现象。Jin 等^[67]首次发现变形虫和细菌之间的宿主-内共生关系会影响变形虫孢子在多孔介质中的迁移,与未感染细菌的变形虫孢子相比,受感染孢子的外孢子表面分泌多种有利于更松散的外孢子结构和细胞黏附功能的蛋白质,更有助于其在多孔介质中的沉积。此外,多环境介质中的植物根系、原生动物等均可能影响微生物在多孔介质中的迁移行为,但目前相关报道较少,需要引入或开发新的研究技术手段进行深入研究。

5 总结与展望

本文首先综述了多孔介质中几种微生物迁移理论模型与研究方法,讨论了几种模型与理论的适用条件与存在的缺陷。其次,对多孔介质中影响微生物迁移行为的物理、化学、生物因素进行了梳理。由于微生物自身结构与表面特性较为复杂,并且环境中污染物、矿物颗粒等与微生物在多孔介质中发生共迁移。要深入理解微生物在地下水及土壤环境中的迁移行为,需要从以下 3 个方面进一步研究:

(1) 随着新型工程纳米材料的广泛使用,以及新兴污染物微塑料的出现,微生物与其他污染物发生共迁移的可能性逐渐增大。为了更好地实现地下水资源防护,保障水体安全,必须重视共存污染物的影响。

(2) 关于多孔介质中微生物的研究多数是停留在实验室水平。一般选用的多孔介质为石英砂、玻璃珠等成分、形状、大小单一的材料,往往忽视了实际环境中多孔介质的非均质性及复杂性。因此,在实验室获取的研究结果与规律能否适用于实际环境亟须进一步证明。

(3) 实验室中的多孔介质体系始终在发挥

着“黑匣子”的作用, 无法直观展示微生物在多孔介质中的迁移过程。亟须开发出孔隙尺度的实时可视化系统, 实现对多孔介质中微生物的实时观察, 进一步从微米尺度来揭示多孔介质中微生物的迁移行为。

REFERENCES

- [1] THOMANN JA, WERNER AD, IRVINE DJ, CURRELL MJ. Adaptive management in groundwater planning and development: a review of theory and applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124871.
- [2] ZHAO WG, ZHAO P, TIAN YM, SHEN CY, LI ZP, JIN C. Transport and retention of *Microcystis aeruginosa* in porous media: impacts of ionic strength, flow rate, media size and pre-oxidization[J]. *Water Research*, 2019, 162: 277-287.
- [3] SULIMAN W, HARSH JB, FORTUNA AM, GARCIA-PÉREZ M, ABU-LAIL NI. Quantitative effects of biochar oxidation and pyrolysis temperature on the transport of pathogenic and nonpathogenic *Escherichia coli* in biochar-amended sand columns[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(9): 5071-5081.
- [4] BAO Q, DONG J, DONG Z, YANG M. A review on ionizing radiation-based technologies for the remediation of contaminated groundwaters and soils[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 136964.
- [5] AZUBUIKE CC, CHIKERE CB, OKPOKWASILI GC. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2016, 32(11): 180.
- [6] DIXIT R, WASIULLAH, MALAVIYA D, PANDIYAN K, SINGH U, SAHU AS, SHUKLA R, SINGH B, RAI J, SHARMA P, LADE H, PAUL D. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes[J]. *Sustainability*, 2015, 7(2): 2189-2212.
- [7] CYCÓN M, MROZIK A, PIOTROWSKA-SEGET Z. Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: a review[J]. *Chemosphere*, 2017, 172: 52-71.
- [8] SYNGOUNA VI, CHRYSIKOPOULOS CV, KOKKINOS P, TSELEPI MA, VANTARAKIS A. Cotransport of human adenoviruses with clay colloids and TiO₂ nanoparticles in saturated porous media: effect of flow velocity[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 598: 160-167.
- [9] TONG MP, LI TF, LI M, HE L, MA ZY. Cotransport and deposition of biochar with different sized-plastic particles in saturated porous media[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 713: 136387.
- [10] 肖波, 赵允格. 病毒在土壤和地下水中迁移研究综述[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1): 177-183.
XIAO B, ZHAO YG. Review of virus transport in soil and groundwater[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 177-183 (in Chinese).
- [11] BABAKHANI P, BRIDGE J, DOONG RA, PHENRAT T. Continuum-based models and concepts for the transport of nanoparticles in saturated porous media: a state-of-the-science review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 246: 75-104.
- [12] 李晗熠. 水铁矿胶粒在饱和多孔介质中的运移行为研究[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2021.
LI HY. Transport behavior of ferrihydrite colloids in saturated porous media[D]. Dalian: Master's Thesis of Dalian University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [13] NASCIMENTO AG, TÓTOLA MR, SOUZA CS, BORGES MT, BORGES AC. Temporal and spatial dynamics of blocking and ripening effects on bacterial transport through a porous system: a possible explanation for CFT deviation[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2006, 53(2): 241-244.
- [14] 张文静, 周晶晶, 刘丹, 李昊洋, 于喜鹏, 桓颖. 胶体在地下水中的环境行为特征及其研究方法探讨[J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 629-638.
ZHANG WJ, ZHOU JJ, LIU D, LI HY, YU XP, HUAN Y. A review: research methods that describe the environmental behavior of colloids in groundwater[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 629-638 (in Chinese).
- [15] KÄMÄRÄINEN T, TARDY BL, NIKKHAH SJ, BATYS P, SAMMALKORPI M, ROJAS OJ. Effect of particle surface corrugation on colloidal interactions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 579: 794-804.
- [16] 李霄慧. 典型功能微生物 FA1 在饱和多孔介质中的运移行为及其影响机制研究[D]. 南京: 南京大学博士学位论文, 2019.
LI XH. Transport and mechanisms of typical functional microorganism FA1 in saturated porous media[D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing University, 2019 (in Chinese).

- [17] ZHONG H, LIU GS, JIANG YB, YANG JZ, LIU Y, YANG X, LIU ZF, ZENG GM. Transport of bacteria in porous media and its enhancement by surfactants for bioaugmentation: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2017, 35(4): 490-504.
- [18] HORI K, MATSUMOTO S. Bacterial adhesion: from mechanism to control[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2010, 48(3): 424-434.
- [19] BAI HJ, COCHET N, PAUSS A, LAMY E. DLVO, hydrophobic, capillary and hydrodynamic forces acting on bacteria at solid-air-water interfaces: their relative impact on bacteria deposition mechanisms in unsaturated porous media[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2017, 150: 41-49.
- [20] RAWAT S, PULLAGURALA VLR, ADISA IO, WANG Y, PERALTA-VIDEA JR, GARDEA-TORRESDEY JL. Factors affecting fate and transport of engineered nanomaterials in terrestrial environments[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 6: 47-53.
- [21] HE L, RONG HF, WU D, LI M, WANG CY, TONG MP. Influence of biofilm on the transport and deposition behaviors of nano- and micro-plastic particles in quartz sand[J]. *Water Research*, 2020, 178: 115808.
- [22] DONG SN, ZHOU MZ, SU XT, XIA JH, WANG L, WU HY, SUAKOLLIE E B, WANG DJ. Transport and retention patterns of fragmental microplastics in saturated and unsaturated porous media: a real-time pore-scale visualization[J]. *Water Research*, 2022, 214: 118195.
- [23] HE L, WU D, TONG MP. The influence of different charged poly (amido amine) dendrimer on the transport and deposition of bacteria in porous media[J]. *Water Research*, 2019, 161: 364-371.
- [24] BAI HJ, COCHET N, DRELICH A, PAUSS A, LAMY E. Comparison of transport between two bacteria in saturated porous media with distinct pore size distribution[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(18): 14602-14614.
- [25] LU DW, FATEHI P. A modeling approach for quantitative assessment of interfacial interaction between two rough particles in colloidal systems[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 587: 24-38.
- [26] HOEK EM, AGARWAL GK. Extended DLVO interactions between spherical particles and rough surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 298(1): 50-58.
- [27] HUYSMAN F, VERSTRAETE W. Water-facilitated transport of bacteria in unsaturated soil columns: influence of inoculation and irrigation methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(1): 91-97.
- [28] JEWETT DG, LOGAN BE, ARNOLD RG, BALES RC. Transport of *Pseudomonas fluorescens* strain P17 through quartz sand columns as a function of water content[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1999, 36(1/2): 73-89.
- [29] PANG LP, FARKAS K, LIN SS, HEWITT J, PREMARATNE A, CLOSE M. Attenuation and transport of human enteric viruses and bacteriophage MS2 in alluvial sand and gravel aquifer media—laboratory studies[J]. *Water Research*, 2021, 196: 117051.
- [30] WANG M, GAO B, TANG DS, SUN HM, YIN XQ, YU CR. Effects of temperature on graphene oxide deposition and transport in saturated porous media[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 331: 28-35.
- [31] MCCAULOU DR, BALES RC, ARNOLD RG. Effect of temperature-controlled motility on transport of bacteria and microspheres through saturated sediment[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(2): 271-280.
- [32] KIM HN, WALKER SL. *Escherichia coli* transport in porous media: influence of cell strain, solution chemistry, and temperature[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2009, 71(1): 160-167.
- [33] 张文静, 秦运琦, 刘丹, 马添翼, 厉晓飞. 微生物在多孔介质中环境行为研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(10): 3975-3984.
- ZHANG WJ, QIN YQ, LIU D, MA TY, LI XF. Transport behavior of microorganism in the porous media[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(10): 3975-3984 (in Chinese).
- [34] HE L, RONG HF, LI M, ZHANG MY, LIU SR, YANG M, TONG MP. Bacteria have different effects on the transport behaviors of positively and negatively charged microplastics in porous media[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415: 125550.
- [35] CHEN G. Bacterial interactions and transport in unsaturated porous media[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 67(2): 265-271.
- [36] MITROPOULOU PN, SYNGOUNA VI, CHRYSIKOPOULOS CV. Transport of colloids in unsaturated packed columns: role of ionic strength and sand grain size[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 232: 237-248.

- [37] LI XH, XU HX, GAO B, SUN YY, SHI XQ, WU JC. Retention and transport of PAH-degrading bacterium *Herbaspirillum chlorophenolicum* FA1 in saturated porous media under various physicochemical conditions[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2017, 228(7): 259.
- [38] JIANG D, HUANG Q, CAI P, RONG X, CHEN W. Adsorption of *Pseudomonas putida* on clay minerals and iron oxide[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2007, 54(2): 217-221.
- [39] LI XH, XU HX, GAO B, YANG ZD, SUN YY, SHI XQ, WU JC. Cotransport of *Herbaspirillum chlorophenolicum* FA1 and heavy metals in saturated porous media: effect of ion type and concentration[J]. Environmental Pollution, 2019, 254: 112940.
- [40] ZHANG MY, HE L, JIN X, BAI F, TONG MP, NI JR. Flagella and their properties affect the transport and deposition behaviors of *Escherichia coli* in quartz sand[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(8): 4964-4973.
- [41] WU D, HE L, SUN RN, TONG MP, KIM H. Influence of Bisphenol A on the transport and deposition behaviors of bacteria in quartz sand[J]. Water Research, 2017, 121: 1-10.
- [42] HE L, WU D, RONG HF, LI M, TONG MP, KIM H. Influence of nano- and microplastic particles on the transport and deposition behaviors of bacteria in quartz sand[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(20): 11555-11563.
- [43] FAN W, JIANG X H, YANG W, GENG Z, HUO MX, LIU ZM, ZHOU H. Transport of graphene oxide in saturated porous media: effect of cation composition in mixed Na-Ca electrolyte systems[J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 509-515.
- [44] HE L, LI M, WU D, GUO J, ZHANG MY, TONG MP. Freeze-thaw cycles induce diverse bacteria release behaviors from quartz sand columns with different water saturations[J]. Water Research, 2022, 221: 118683.
- [45] DONG Z, YANG HY, WU D, NI JR, KIM H, TONG MP. Influence of silicate on the transport of bacteria in quartz sand and iron mineral-coated sand[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 123: 995-1002.
- [46] YANG HY, GE Z, WU D, TONG MP, NI JR. Cotransport of bacteria with hematite in porous media: effects of ion valence and humic acid[J]. Water Research, 2016, 88: 586-594.
- [47] ABUDALO RA, RYAN JN, HARVEY RW, METGE DW, LANDKAMER L. Influence of organic matter on the transport of *Cryptosporidium parvum* oocysts in a ferric oxyhydroxide-coated quartz sand saturated porous medium[J]. Water Research, 2010, 44(4): 1104-1113.
- [48] KIM J, ROCHE K R, BOLSTER D, DOUDRICK K. The impact of biofilms and dissolved organic matter on the transport of nanoparticles in field-scale streams[J]. Water Research, 2022, 226: 119206.
- [49] BALSEIRO-ROMERO M, PRIETO-FERNÁNDEZ Á, SHOR LM, GHOSHAL S, BAVEYE PC, ORTEGA-CALVO JJ. Chemotactic bacteria facilitate the dispersion of nonmotile bacteria through micrometer-sized pores in engineered porous media[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(19): 13975-13984.
- [50] JIMENEZ-SANCHEZ C, WICK LY, ORTEGA-CALVO JJ. Impact of chemoeffectors on bacterial motility, transport, and contaminant degradation in sand-filled percolation columns[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(18): 10673-10679.
- [51] WU D, HE L, GE Z, TONG MP, KIM H. Different electrically charged proteins result in diverse bacterial transport behaviors in porous media[J]. Water Research, 2018, 143: 425-435.
- [52] 韩志捷, 李洁, 王伟荔, 华亚. 微生物在多孔介质中的迁移机制及影响因素[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(2): 127-130, 167.
- HAN ZJ, LI J, WANG WL, HUA Y. Study on transport mechanisms and influencing factors of microorganisms in porous media[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(2): 127-130, 167 (in Chinese).
- [53] MALLÉN G, MALOSZEWSKI P, FLYNN R, ROSSI P, ENGEL M, SEILER KP. Determination of bacterial and viral transport parameters in a gravel aquifer assuming linear kinetic sorption and desorption[J]. Journal of Hydrology, 2005, 306(1/2/3/4): 21-36.
- [54] BAI HJ, COCHET N, PAUSS A, LAMY E. 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.
- [55] ZHAO P, GENG T, GUO YP, MENG YJ, ZHANG HW, ZHAO WG. Transport of *E. coli* colloids and surrogate microspheres in the filtration process: effects of flow rate, media size, and media species[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2022, 220: 112883.
- [56] GAO MQ, PENG HJ, XIAO L. The influence of microplastics for the transportation of *E. coli* using column model[J]. Science of The Total Environment,

- 2021, 786: 147487.
- [57] SHARMA MM, CHANG YI, YEN TF. Reversible and irreversible surface charge modification of bacteria for facilitating transport through porous media[J]. *Colloids and Surfaces*, 1985, 16(2): 193-206.
- [58] CHEN GX, WALKER SL. Fecal indicator bacteria transport and deposition in saturated and unsaturated porous media[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16): 8782-8790.
- [59] SIDDHARTH T, SRIDHAR P, VINILA V, TYAGI RD. Environmental applications of microbial extracellular polymeric substance (EPS): a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287: 112307.
- [60] GOPALAKRISHNAN K, KASHIAN DR. Extracellular polymeric substances in green alga facilitate microplastic deposition[J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131814.
- [61] TONG MP, LONG GY, JIANG XJ, KIM HN. Contribution of extracellular polymeric substances on representative Gram negative and Gram positive bacterial deposition in porous media[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(7): 2393-2399.
- [62] JIN C, ZHAO LG, ZHAO WG, WANG LT, ZHU SS, XIAO ZH, MO YJ, ZHANG MY, SHU LF, QIU RL. Transport and retention of free-living *Amoeba* spores in porous media: effects of operational parameters and extracellular polymeric substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(13): 8709-8720.
- [63] HAZNEDAROGLU BZ, ZORLU O, HILL JE, WALKER SL. Identifying the role of flagella in the transport of motile and nonmotile *Salmonella enterica* serovars[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(11): 4184-4190.
- [64] CHENG L, MIN D, LIU DF, LI WW, YU HQ. Sensing and approaching toxic arsenate by *Shewanella putrefaciens* CN-32[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(24): 14604-14611.
- [65] LI Y, LIU K, MAO RR, LIU B, CHENG L, SHI XY. Unveiling the chemotactic response and mechanism of *Shewanella oneidensis* MR-1 to nitrobenzene[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 431: 128629.
- [66] LIU LC, LIU GF, ZHOU JT, JIN RF. Energy taxis toward redox-active surfaces decreases the transport of electroactive bacteria in saturated porous media[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(8): 5559-5568.
- [67] JIN C, MO YJ, ZHAO LG, XIAO ZH, ZHU SS, HE ZZ, CHEN ZJ, ZHANG MY, SHU LF, QIU RL. Host-endosymbiont relationship impacts the retention of bacteria-containing *Amoeba* spores in porous media[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(17): 12347-12357.