

姚舜译, 袁雪梅, 杨新瑶, 等. 粒径和流速对大肠杆菌在饱和多孔介质中迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):353-357.

YAO Shun-yi, YUAN Xue-mei, YANG Xin-yao, et al. Effects of particle size and pore water velocity on transport of *Escherichia coli* in saturated porous media[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):353-357.

# 粒径和流速对大肠杆菌在饱和多孔介质中迁移的影响

姚舜译<sup>1,2</sup>, 袁雪梅<sup>1,2</sup>, 杨新瑶<sup>2\*</sup>, 邓仕槐<sup>1\*</sup>

(1.四川农业大学环境学院, 成都 611300; 2.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:**采用室内柱迁移实验,研究了在不同离子强度下多孔介质粒径和孔隙水流速对大肠杆菌在饱和石英砂柱中沉积与释放行为的影响。结果表明,介质粒径和孔隙水流速均能影响大肠杆菌在石英砂中的迁移过程。介质粒径的减小可增强大肠杆菌在多孔介质中的筛滤效应,增加其沉积率和滞留率,减小水化学扰动引起的释放效应;流速的降低有利于提高大肠杆菌的沉积率和滞留率。离子强度的高低可改变粒径和流速对大肠杆菌迁移影响的大小,在较高离子强度条件下,减小介质粒径和孔隙水流速对提高大肠杆菌的沉积率和滞留率的作用增强。由于自然环境的复杂性,今后的研究应注重真实地下水环境中多因素对大肠杆菌迁移行为的复合影响,以便更加准确地掌握大肠杆菌在多孔介质中迁移的规律。

**关键词:**大肠杆菌;流速;粒径;饱和多孔介质;迁移

中图分类号:X523 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)02-0353-05 doi:10.11654/jaes.2016.02.020

## Effects of particle size and pore water velocity on transport of *Escherichia coli* in saturated porous media

YAO Shun-yi<sup>1,2</sup>, YUAN Xue-mei<sup>1,2</sup>, YANG Xin-yao<sup>2\*</sup>, DENG Shi-huai<sup>1\*</sup>

(1.College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.MoE Key Lab for Eco-restoration of Regional Contaminated Environment, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

**Abstract:** The transport of pathogenic microbes in porous media is critical to groundwater quality. This study investigated the combined effects of particle size and pore water velocity on the deposition and release behavior of *Escherichia coli* (*E. coli*) in saturated quartz sands at different ionic strengths. Results showed that both particle size and pore water velocity affected the transport of *E. coli* in porous media. Decreasing particle size increased straining effect, deposition and thus retention rates of *E. coli*. Moreover, the enhanced straining effect resulted in lower releases of *E. coli* from the smaller particles. Reducing pore water velocity tended to increase deposition and retention rates of *E. coli*. At greater ionic strength, decreases in both particle size and pore water velocity further enhanced deposition and retention rates of *E. coli*. These results would improve our understanding of releases and transport of biocolloids under transient ionic strength.

**Keywords:** *Escherichia coli*; pore water velocity; particle size; saturated porous media; transport

地下水是我国主要的饮用水源,全国约有三分之二的城市以地下水为饮用水源<sup>[1]</sup>,而当前地下水的微生物污染形势严峻<sup>[2]</sup>。病原微生物大量存在于畜禽养殖粪便、生活废水、垃圾填埋场、化粪池、医院污水中,可随水流进入地下环境,对饮水安全构成严重威胁<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2015-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41101475);沈阳市科技计划项目(F14-133-9-00、F15-113-9-00)沈阳市科学事业费竞争性选择项目(城市生态环境风险管理及其修复技术研究)

作者简介:姚舜译(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:地下水中胶体的迁移。E-mail:yao1992\_cool@qq.com

\*通信作者:杨新瑶 E-mail:yangxinyao@hotmail.com  
邓仕槐 E-mail:shdeng8888@163.com

大肠杆菌是哺乳动物肠道中的栖居菌,常随粪便散布在环境中,由于其检测快速、方便,是重要的粪便污染指示菌<sup>[4]</sup>。特殊血清型菌株如O157:H7,具有强致病性,可引起流行疾病爆发<sup>[5]</sup>。因此,了解大肠杆菌在地下多孔介质中迁移的机理对于保障饮水安全十分必要。

研究人员通常采用玻璃珠、石英砂等作为填充材料并借助柱实验来简化模拟大肠杆菌在多孔介质中的迁移行为,并通过大量实验发现大肠杆菌在多孔介质中的迁移过程受到了诸多因素的影响,如溶液化学条件(pH<sup>[6]</sup>、离子强度<sup>[7]</sup>、有机质<sup>[8-9]</sup>、溶质种类<sup>[10-12]</sup>)、物理因素(介质形状及尺寸<sup>[13]</sup>、孔隙水流速<sup>[14]</sup>、饱和

度<sup>[15]</sup>、生物因素(营养条件<sup>[16]</sup>、温度<sup>[17]</sup>、胞外聚合物<sup>[18]</sup>、脂多糖<sup>[19]</sup>、饥饿状况<sup>[20]</sup>)。根据经典胶体过滤理论<sup>[21]</sup>,介质粒径和孔隙水流速对胶体迁移的影响主要是通过改变阻碍胶体沉降的阴影区大小来实现<sup>[22]</sup>。Bradford等<sup>[23]</sup>发现筛滤效应是胶体滞留在多孔介质中的重要机制,介质粒径和孔隙水流速均能影响筛滤效应,同时筛滤效应也与离子强度的大小密切相关。以往的研究大多使用纳米或微米乳胶球来代表胶体研究它们的多孔介质中的滞留机制。大肠杆菌等生物型胶体在形状大小、表面性质等方面与乳胶球差异较大,不同离子强度下介质粒径和孔隙水流速对大肠杆菌的沉积释放机制的影响是否相同,目前相关的研究还很不足。

本文选用45~60目粗粒石英砂和100~140目细粒石英砂作为饱和柱实验的填充介质,以离子强度为 $32\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钠溶液来模拟地下水,研究大肠杆菌在 $2.33\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.35\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 孔隙水流速下的沉积和释放过程,旨在对防治地下水水源的病原体污染,提高地下水污染生物修复效率提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 大肠杆菌培养与菌液准备

采用*E.coli* K12 C600(中国普通微生物菌种保藏管理中心)作为研究对象。大肠杆菌首先使用液体Luria Broth(LB)培养基进行活化,然后按1%的比例进行转接,以 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 振荡培养1.5 h至对数生长的中期<sup>[17]</sup>。

停止培养后将菌液在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下以 $5860\times g$ 的速度离心15 min(Allegra 64R, Beckman, CA, USA),倒掉上清液,把菌体沉淀重新悬浮在一定体积的背景溶液中,如此重复离心、重悬浮的过程三次,使菌体与培养基完全分离。大肠杆菌的计数采用涂布平板法与光密度法结合的方式<sup>[14]</sup>,建立吸光度与细菌浓度标准曲线<sup>[24]</sup>,稀释使大肠杆菌悬液的浓度为 $1.0\times 10^7(1\pm 25\%)\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

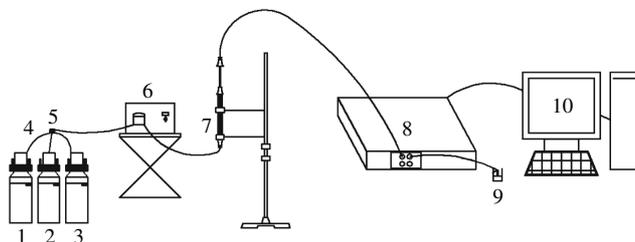
#### 1.1.2 多孔介质

地下水岩层最主要的成分为二氧化硅,本研究选用石英砂(纯度99.9%,密度 $2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,明盛石英砂厂,江苏)模拟含水层介质。使用分样筛筛选出细粒(100~140目)和粗粒(45~60目)石英砂。将石英砂用浓度为 $12\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸浸泡24 h,再用高纯水洗净至 $\text{pH}=7$ ,以去除石英砂表面的金属氧化物<sup>[25]</sup>,然后

$105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干,备用。使用激光粒度仪(Mastersizer 2000, Malvern, Worcestershire, UK)测量石英砂的粒度。

### 1.2 柱实验

实验装置如图1所示,由进样装置、填充柱、检测装置三部分构成。采用玻璃填充柱(同兴玻璃仪器厂,上海),长10 cm,内径11.3 mm,柱的入流端和出流端安装有300目的筛网,以均匀分散水流和防止石英砂外漏。采用超声湿法填充3 cm石英砂,使石英砂在柱内分布均匀压实且达到饱和状态。用重力法测得粗、细石英砂填充柱的孔隙度分别为0.42和0.37。所有液体经过蠕动泵(BF-100,雷弗,保定)以恒定的设计流速自下而上在柱内通过,以消除重力对水流速的影响。



1.背景溶液;2.大肠杆菌悬浮液;3.去离子水;4.聚四氟乙烯中空管;5.转换阀;6.蠕动泵;7.填充柱;8.紫外分光光度计;9.废液缸;10.电脑  
1. Flushing solution reservoir, 2. *E.coli* reservoir, 3. Deionized water reservoir, 4. PTFE tube, 5. Switch valve, 6. Peristaltic pump, 7. Sand column, 8. UV-Vis Spectrophotometer, 9. Effluent collector, 10. Computer

图1 实验装置示意图<sup>[26]</sup>

Figure 1 Schematic illustration of experimental setup

实验 $\text{pH}$ 设为7.0,离子强度分别为 $32$ 、 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钠溶液,反映不同地区地下水环境溶液的离子强度范围,流速分别设定为 $2.33$ 、 $0.35\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,模拟地下水含水层的不同水流流速。首先向柱内通入60个孔隙体积(Pore volume, PV)的背景盐溶液,以便稳定实验条件;然后通入5PV相应离子强度的大肠杆菌悬液,监测大肠杆菌的沉积过程;最后按表1中的顺序分别注入离子强度逐渐降低的液体,观察大肠杆菌的释放过程。

## 2 结果与分析

### 2.1 石英砂粒径分布

平均粒径的大小是衡量多孔介质属性的重要指标之一。在研究多孔介质粒径对细菌迁移的影响时,往往需要将粒径分布考虑在内<sup>[14,24,27]</sup>。本实验分别对粗粒石英砂和细粒石英砂的粒径分布进行了测量,结果如图2所示。测得粗粒石英砂的平均粒径为 $607\text{ }\mu\text{m}$ ,非均匀系数为0.292;细粒石英砂的平均粒径约

表1 迁移实验的条件

Table 1 Column experimental conditions

编号	离子强度 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	粒径	流速/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	注入顺序
1,2,3,4	10	粗粒/细粒	2.33/0.35	5 PV <i>E.coli</i> →5 PV $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl→5 PV 去离子水
5,6,7,8	32	粗粒/细粒	2.33/0.35	5 PV <i>E.coli</i> →5 PV $32\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl→5 PV $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl→5 PV 去离子水

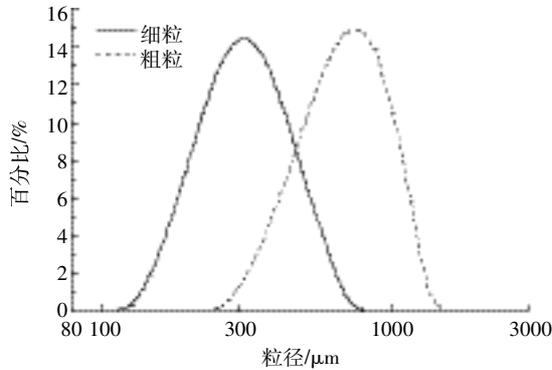


图2 石英砂粒径分布曲线

Figure 2 Size distributions of quartz sand particles

310  $\mu\text{m}$ ,非均匀性系数为0.271。粗粒及细粒石英砂的非均匀系数非常小,说明其粒径分布十分均匀,达到实验要求。

## 2.2 介质粒径对大肠杆菌沉积与释放的影响

自然环境中多孔介质颗粒的大小和分布是非常重要的介质特征。本实验结果显示(图3),在所有的

实验条件下,随着石英砂粒径的减小,大肠杆菌穿透曲线的平台期下降,沉积在石英砂柱中的大肠杆菌数量增加,释放阶段的出峰高度也随之增大。由此推测介质粒径减小时,砂粒比表面积增大,能为菌体提供更多的吸附点位,提高介质对大肠杆菌的去除效率,因而穿透曲线平台期降低。

在离子强度为  $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时(图3 a、图3 b),大肠杆菌在介质表面的沉降量很低,故流速变化对其沉降并未造成明显差异。而当离子强度为  $32\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时(图3 c、图3 d),大肠杆菌在细粒石英砂中的平台期明显低于粗粒石英砂,释放阶段的出峰高度也是如此,且在低孔隙水流速的实验组中穿透曲线的差异最为显著(图3 c)。这说明介质粒径对大肠杆菌沉积与释放行为的影响不仅与离子强度有关,还受到孔隙水流速的影响。

## 2.3 孔隙水流速对大肠杆菌沉积与释放的影响

孔隙水流速是影响大肠杆菌迁移的重要物理因

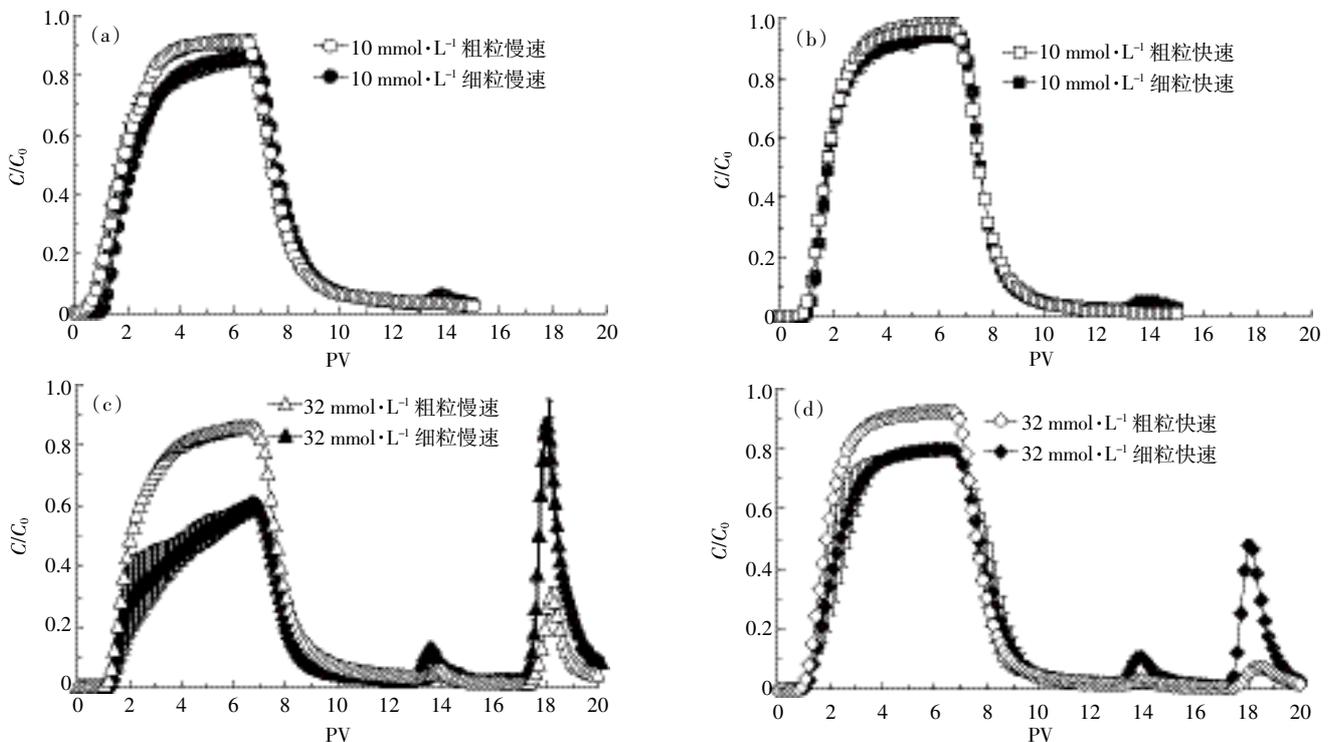


图3 大肠杆菌在两种粒径石英砂中的穿透曲线

Figure 3 Breakthrough curves of *E. coli* in two different particle sizes of quartz sands

素之一,流速的变化会改变菌体与多孔介质颗粒之间力的平衡,多孔介质的粒径和表面特性不同,其影响程度也有所区别。大肠杆菌迁移实验结果显示,孔隙水流速对大肠杆菌沉积与释放影响趋势明显(图3)。在离子强度为  $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,无论是在粗粒石英砂还是在细粒石英砂中,高孔隙水流速实验组的大肠杆菌出流量明显大于低流速组,穿透曲线的平台期随着流速的增加而升高(图3 a、图3 b),释放阶段的穿透曲线差异不明显,说明低孔隙水流速下有利于大肠杆菌的沉积。当离子强度为  $32 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,由于孔隙水流速变化引起的大肠杆菌穿透曲线的差异,细粒石英砂实验组的远大于粗粒石英砂(图3 c、图3 d)。尽管沉积阶段穿透曲线的高度相差较大,但释放阶段穿透曲线的高度差并不大,说明在释放阶段大肠杆菌的行为还受到其他因素的影响。

### 3 讨论

介质粒径和流速对大肠杆菌迁移影响的实验结果符合文献报道,但两者在不同离子强度下所起的作用在释放阶段的影响需要进一步分析,根据穿透曲线计算出的参数如表2所示。

表2 穿透曲线参数

Table 2 Parameters for breakthrough curves

编号	离子强度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	介质 粒径	孔隙水 流度	穿透 面积	释放 面积	沉积 率/%	释放 率/%	滞留 率/%
1	10	粗粒	快速	5.65	0.07	2.76	1.20	1.56
2	10	粗粒	慢速	5.45	0.09	6.20	1.54	4.66
3	10	细粒	快速	5.49	0.10	5.40	1.79	3.61
4	10	细粒	慢速	5.03	0.11	13.38	1.84	11.54
5	32	粗粒	快速	5.48	0.18	5.60	3.09	2.50
6	32	粗粒	慢速	5.02	0.51	13.50	8.75	4.75
7	32	细粒	快速	4.69	0.73	19.33	12.62	6.71
8	32	细粒	慢速	3.10	1.33	46.63	22.94	23.68

注:穿透面积与释放面积分别由两峰积分得到,基准面积根据 Br 离子示踪曲线计算而得,为 5.82。沉积率=(基准面积-穿透面积)/基准面积%;释放率=(基准面积-释放面积)/基准面积%;滞留率=沉积率-释放率。

对比 1、3 和 5、7 号以及 2、4 和 6、8 号,细粒实验组的沉积率、释放率、滞留率均高于粗粒实验组。这是因为多孔介质粒径变小时,一方面由于颗粒比表面积增大吸附点位数增加,另一方面由于孔径变小筛滤效应(Straining)变得显著,使得更多的细菌卡在介质孔隙之间。这两种机理都会增强大肠杆菌的滞留。本实验中胶体与介质粒径比分别为 0.002 4、0.001 2。

Bradford 等<sup>[23]</sup>指出即使粒径比低至 0.002 时,筛滤效应也是胶体去除的一个重要作用。因此,粗粒石英砂组中滞留率要低得多。对比 3、5 号及 4、6 号,在孔隙水流速相同时,低离子强度、细粒石英砂组的沉积率与高离子强度、粗粒石英砂组的沉积率接近,而前者的释放率低于后者。出现这种现象的原因在于离子强度与介质粒径的相互作用。增加离子强度,使得双电层被压缩,减小能量势垒的高度,有利于细菌吸附到多孔介质颗粒表面<sup>[17]</sup>,促进大肠杆菌在石英砂中的沉积。当介质粒径增大时,筛滤效应(Straining)减弱<sup>[23]</sup>,沉积率降低。在释放阶段,离子强度逐步降低,这种静电吸附的优势不复存在,粗粒石英砂组的大肠杆菌便会大量释放出来。而降低离子强度不会使阻塞在孔隙处的大肠杆菌释放出来<sup>[23]</sup>,细粒石英砂组的筛滤效应比粗粒石英砂组显著得多,因此最终的滞留率要高于粗粒石英砂组。对比 1、2 和 3、4 号及 5、6 和 7、8 号,高孔隙水流速实验组的沉积率、释放率、滞留率均低于低孔隙水流速组。因为流速增加时,产生了更大的剪切力<sup>[27]</sup>,会使得阻碍胶体沉积的阴影区增大<sup>[22]</sup>,不利于大肠杆菌沉积。高孔隙水流速相对于低孔隙水流速更容易将沉积在多孔介质中的大肠杆菌带出来,造成更低的滞留率。对比 2、5 号及 4、7 号,在介质粒径相同时,低离子强度、低孔隙水流速组沉积率与高离子强度、高孔隙水流速组的相差不大,而前者的滞留率高于后者。这是孔隙水流速与离子强度相互作用的结果。在沉积阶段,离子强度增加会促进大肠杆菌与石英砂表面的吸附,同时孔隙水流速增加也会使得流体曳力增大,不利于细菌沉积。在释放阶段,孔隙水流速因素占据主导,低孔隙水流速组反而有更高的滞留率。

本实验设置了  $10、32 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  两种离子强度,对比 1、5 和 2、6 和 3、7 和 4、8 号,发现随着离子强度的增加,大肠杆菌在石英砂柱中的沉积率、滞留率显著增加。增加离子强度不仅会减弱石英砂对大肠杆菌的静电排斥作用,促进沉积,同时临近颗粒孔隙位置的大肠杆菌也会因为引力增大而滞留在其中<sup>[23]</sup>,从而增强了筛滤效应。在释放阶段,滞留在孔隙之间的大肠杆菌并不会因为离子强度的降低而释放出来,从而筛滤效应明显时对应会有更高的滞留率。因此,在离子强度相对较高的情况下,适当调节介质粒径及孔隙水流速的大小就会对大肠杆菌的沉积与释放产生很大影响,而在低离子强度下引起的变化则小得多。

## 4 结论

介质粒径和孔隙水流速能共同影响大肠杆菌在饱和石英砂介质中的沉积和释放过程。减小多孔介质粒径有助于增强筛滤效应,促进大肠杆菌在多孔介质体系中的衰减。减小孔隙水流速,则会减小流体曳力,增加大肠杆菌的沉积量,减少释放量,并且它们的影响效果在高离子强度的情况下得以增强。

研究大肠杆菌在饱和多孔介质中迁移的规律,对于保障饮水安全、指导土壤和地下水修复有着重要意义。今后可以结合场地实验展开研究,以期更加接近自然条件,提高预测大肠杆菌迁移的准确性。

## 参考文献:

- [1] 环境保护部. 全国地下水污染防治规划(2011—2020)[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2011:4-5.
- [2] 郑西来. 地下水污染控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009:29-32.  
ZHENG Xi-lai. Groundwater pollution control[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009:29-32.
- [3] Bradford S A, Morales V L, Zhang W, et al. Transport and fate of microbial pathogens in agricultural settings[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43(8): 775-893.
- [4] 陈亚楠, 王亚伟, 魏源送, 等. 不同功能地表水体中病原微生物指示物的标准比较[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 337-351.  
CHEN Ya-nan, WANG Ya-wei, WEI Yuan-song, et al. Evolution and standard comparison of indicator microorganisms for different surface waters[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 337-351
- [5] Cai P, Huang Q, Walker S L. Deposition and survival of *Escherichia coli* O157: H7 on clay minerals in a parallel plate flow system[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(4): 1896-1903.
- [6] Harvey R W, Metge D W, Barber L B, et al. Effects of altered groundwater chemistry upon the pH-dependency and magnitude of bacterial attachment during transport within an organically contaminated sandy aquifer[J]. *Water Research*, 2010, 44(4): 1062-1071.
- [7] Haznedaroglu B Z, Kim H N, Bradford S A, et al. Relative transport behavior of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar pullorum in packed bed column systems: Influence of solution chemistry and cell concentration[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(6): 1838-1844.
- [8] Yang H Y, Kim H, Tong M P. Influence of humic acid on the transport behavior of bacteria in quartz sand[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2012, 91: 122-129.
- [9] Foppen J W, Liem Y, Schijven J. Effect of humic acid on the attachment of *Escherichia coli* in columns of goethite-coated sand[J]. *Water Research*, 2008, 42(1/2): 211-219.
- [10] Wang L, Xu S, Li J. Effects of phosphate on the transport of *Escherichia coli* O157: H7 in saturated quartz sand[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(22): 9566-9573.
- [11] Yang H, Tong M, Kim H. Influence of bentonite particles on representative gram negative and gram positive bacterial deposition in porous media[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(21): 11627-11634.
- [12] Shen X, Han P, Yang H, et al. Influence of sulfate on the transport of bacteria in quartz sand[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 110: 443-449.
- [13] Foppen J W, van Herwerden M, Schijven J. Measuring and modelling straining of *Escherichia coli* in saturated porous media[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, 93(1-4): 236-254.
- [14] Syngouna V I, Chrysikopoulos C V. Transport of biocolloids in water saturated columns packed with sand: Effect of grain size and pore water velocity[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, 129/130: 11-24.
- [15] Chen G, Walker S L. Fecal indicator bacteria transport and deposition in saturated and unsaturated porous media[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(16): 8782-8790.
- [16] Han P, Shen X, Yang H, et al. Influence of nutrient conditions on the transport of bacteria in saturated porous media[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 102: 752-758.
- [17] Kim H N, Walker S L. *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.
- [18] Kim H N, Walker S L, Bradford S A. Macromolecule mediated transport and retention of *Escherichia coli* O157:H7 in saturated porous media[J]. *Water Research*, 2010, 44(4): 1082-1093.
- [19] Walker S L, Redman J A, Elimelech M. Role of cell surface lipopolysaccharides in *Escherichia coli* K12 adhesion and transport[J]. *Langmuir*, 2004, 20(18): 7736-7746.
- [20] Walczak J J, Wang L, Bardy S L, et al. The effects 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: 129-136.
- [21] Yao K, Habibian M T, O'Melia C R. Water and waste water filtration: Concepts and applications[J]. *Environmental Science and Technology*, 1971, 5(11): 1105-1112.
- [22] Ko C, Elimelech M. The "Shadow Effect" in colloid transport and deposition dynamics in granular porous media: Measurements and mechanisms[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(17): 3681-3689.
- [23] Bradford S A, Torkzaban S, Walker S L. Coupling of physical and chemical mechanisms of colloid straining in saturated porous media[J]. *Water Research*, 2007, 41(13): 3012-3024.
- [24] Foppen J W A, Mporokoso A, Schijven J F. Determining straining of *Escherichia coli* from breakthrough curves[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 76(3/4): 191-210.
- [25] Jiang X, Tong M, Lu R, et al. Transport and deposition of ZnO nanoparticles in saturated porous media[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2012, 401: 29-37.
- [26] 银子毅, 杨新瑶, 陈芳敏, 等. EDTA对饱和多孔介质中纳米银迁移机制的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1569-1574.  
YIN Zi-yi, YANG Xin-yao, CHEN Fang-min, et al. Influence of EDTA on transport of silver nanoparticles in saturated porous media[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1569-1574.
- [27] Knappett P S, Emelko M B, Zhuang J, et al. Transport and retention of a bacteriophage and microspheres in saturated, angular porous media: Effects of ionic strength and grain size[J]. *Water Research*, 2008, 42(16): 4368-4378.
- [28] 殷宪强, 孙慧敏, 易磊, 等. 孔隙水流速对胶体在饱和多孔介质中迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2010(5): 101-104.  
YIN Xian-qiang, SUN Hui-min, YI Lei, et al. Effect of flowrate of pore water on the transport of colloid in saturated porous media[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010(5): 101-104.