

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0187

夏璐, 郑西来, 彭涛, 等. 2014. 含水介质中胞外聚合物的影响因素研究[J]. 环境科学学报, 34(5): 1199-1205

Xia L, Zheng X L, Peng T, et al. 2014. Effects of factors on extracellular polymeric substances in water-bearing medium[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(5): 1199-1205

含水介质中胞外聚合物的影响因素研究

夏璐¹, 郑西来^{1,*}, 彭涛², 于浩方³, 段玉环¹

1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007

3. 青岛市水利勘察设计院, 青岛 266071

收稿日期: 2013-08-23 修回日期: 2013-11-07 录用日期: 2013-11-18

摘要: 明确含水介质中微生物胞外聚合物(EPS)生成量的影响因素, 是解决含水层生物堵塞的关键问题. 本文在现场样品采集和微生物培养的基础上, 通过砂柱试验模拟人工回灌过程, 系统研究了进水碳、氮、磷浓度、盐度和温度对含水介质中 EPS 组成和含量的影响. 结果表明, 砂柱中 EPS 最主要的成分为多糖和蛋白质, 其中多糖占总量的 72%~99%; 砂柱生物堵塞程度与介质上附着的 EPS 含量呈正相关关系, 当回灌水碳、氮、磷浓度、盐度和温度分别为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.5% 和 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 微生物 EPS 生成量最高, 砂柱渗透系数降低最显著, 堵塞程度最严重. 此外, 碳、磷浓度、盐度和温度是影响 EPS 生成量的主要因素, 而氮浓度对其影响不大; 碳浓度和盐度对 EPS 中多糖、蛋白质的组成影响较大, 而氮、磷以及温度则影响不明显.

关键词: 含水介质; 胞外聚合物; 多糖; 蛋白质; 渗透系数

文章编号: 0253-2468(2014)05-1199-07 中图分类号: X523 文献标识码: A

Effects of factors on extracellular polymeric substances in water-bearing medium

XIA Lu¹, ZHENG Xilai^{1,*}, PENG Tao², YU Gaofang³, DUAN Yuhuan¹

1. Ministry of Education Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ocean University of China, Qingdao 266100

2. Construction Survey and Design Institute co., LTD., Beijing 100007

3. Water Survey and Design Institute of Qingdao, Qingdao 266071

Received 23 August 2013; received in revised form 7 November 2013; accepted 18 November 2013

Abstract: It is important to clarify the effects of factors on the production of microbial extracellular polymeric substances (EPS) when solving aquifer bioclogging. On the basis of field sampling and microbial cultivation, the impacts of carbon, nitrogen, phosphorus, salinity and temperature on the production and composition of EPS in water-bearing medium were investigated by simulating artificial recharge process in sand columns. The results indicated that the main components of EPS in the sand were polysaccharide and protein, and polysaccharide accounted for 72%~99% of the total EPS production. A positive correlation was observed between biological congestion degree and EPS production. Moreover, the maximum EPS production was reached when carbon, nitrogen, phosphorus, salinity and temperature were $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.5% and $30 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. In addition, carbon, phosphorus, salinity and temperature were the main factors influencing EPS production, while nitrogen concentration had little impact. Carbon level and salinity were the major factors influencing the composition of polysaccharide and protein in EPS, while the effects of nitrogen, phosphorus as well as temperature were not significant.

Keywords: water-bearing medium; extracellular polymeric substances; polysaccharides; protein; permeability coefficient

1 引言(Introduction)

在地下水资源开发(蘭宗宗和田玉新, 2010)、水源热泵(李卓等, 2010)、中水微灌(薛英文等,

2007) 以及油田开采过程(李阳, 2002) 中, 需要向地层中进行大量注水, 不可避免会带入霉菌、酵母菌、放线菌等微生物(Wingender et al., 1999; Chong et al., 2008; Jarusutthirak et al., 2002). 在适宜的条件

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41172209); “十二五” 国家科技计划课题(No. 2012BAB12B03); 国家公益性行业科技专项(No. 201301090)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41172209), the “Twelfth five-year” National Science and Technology Plan Project (No. 2012 BAB12B03) and the National Public Welfare Industry Science and Technology Projects(No. 201301090)

作者简介: 夏璐(1985—), 女, E-mail: xialu5272@126.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

Biography: XIA Lu(1985—), female, E-mail: xialu5272@126.com; * **Corresponding author**, E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

下,这些微生物迅速繁殖,并分泌大量的胞外聚合物 (Metzger *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2007) (Extracellular Polymeric Substances, EPS). 胞外聚合物是一类高分子粘性聚合物,通常附着在含水介质的颗粒表面,降低其有效孔隙度,从而形成生物堵塞.此外,生物堵塞现象还在膜生物反应器以及生物滤池中普遍存在.马立等(2005)在下向流生物滤池的进水端发现微生物种群丰富,菌胶团结构致密,胞外聚合物的积累加上悬浮物的截留,使得生物滤池水头损失增加较快,发生严重的生物堵塞.工程实践表明,由胞外聚合物积累导致的生物堵塞严重影响着工程的效率、维护成本以及设备的使用寿命(杜新强等,2009).

微生物分泌的胞外聚合物成分复杂,主要由多糖和蛋白质组成,其组成和含量受诸多因素影响(Sheng *et al.*, 2010).Li 和 Yang(2007)研究了不同碳源对活性污泥产生 EPS 的影响,认为以葡萄糖为碳源时,污泥产生的 EPS 含量最高.Durmaz 和 Sanin(2001)研究了不同 C:N 下活性污泥 EPS 组分的变化,发现随着 C:N 升高, EPS 中多糖含量增多,蛋白质含量降低.Jia 等(1996)认为,在细菌对数生长期, EPS 浓度随培养时间逐渐升高;而在细菌处于生长稳定期时, EPS 含量随培养时间反而下降.李久义等(2002)对曝气生物滤池中生物膜 EPS 进行研究,认为多糖是 EPS 最主要的组成部分,并且 EPS 含量随进水有机物浓度降低而逐渐下降.曹相生等(2004)研究了 Mn^{2+} 、 Mo^{6+} 和 Zn^{2+} 对活性污泥中 EPS 组分的影响,认为低浓度 ($0.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) Mn^{2+} 导致 EPS 中蛋白质、多糖和核酸含量下降,而 Zn^{2+} 使 EPS 中多糖含量改变,进而导致蛋白质/多糖比值的改变, Mo^{6+} 则对 EPS 各组分基本没有影响.

在环境工程领域中,有关胞外聚合物的研究多是针对其对活性污泥疏水性、絮凝性、沉降性以及重金属离子吸附性(罗曦等,2005)的影响,而对于胞外聚合物在含水介质中的积累作用报道较少.本文以粗砂为代表性含水介质,通过砂柱试验模拟人工回灌过程,考察回灌条件对粗砂介质上胞外聚合物组成和含量的影响,该研究可为含水层生物堵塞机理和防治等提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验装置与材料

试验装置见图 1,砂柱由有机玻璃制成,高 22

cm,内径 5 cm.柱体一侧距底部进水口 0、2、4、6、12、18 cm 处分别设测压口.试验采用蠕动泵将回灌水以恒定流速由底部进水口泵入,流经砂柱后由出水口排出.

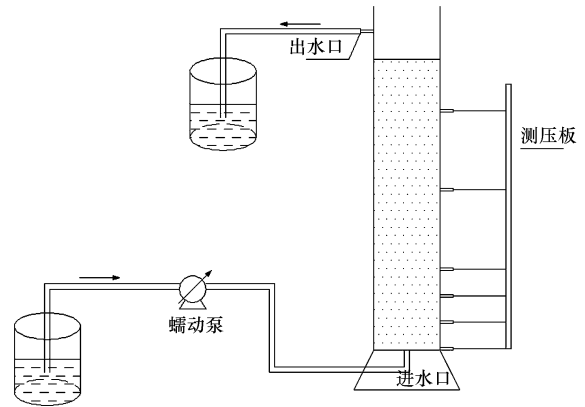


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment equipment

供试砂样取自青岛市大沽河下游潜水含水层,该砂样为粗砂,其粒径分布曲线见图 2,砂样基本物理性质见表 1.本文采用实验室配水的方法,将蒸馏水中分别加入葡萄糖、氯化铵 (NH_4Cl)、磷酸氢二钾 (K_2HPO_4) 作碳、氮和磷源,并加入微生物生长所需微量元素(孔祥平,2007).

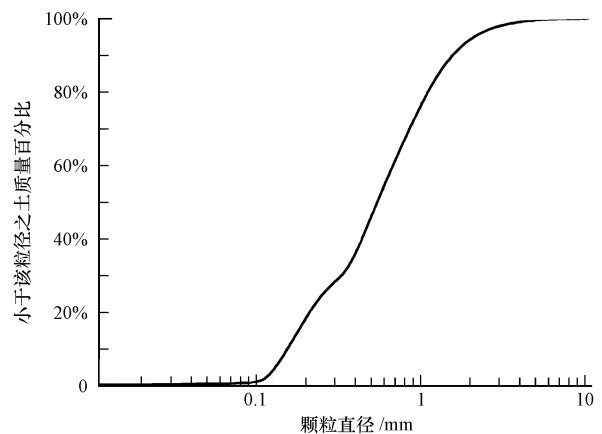


图 2 供试砂样粒径分布曲线

Fig.2 Particle size distribution curve of sand sample

表 1 砂样基本物理性质

Table 1 Physical properties of sand sample

主要性质	有机质含量	天然含水率	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	孔隙率
砂样	0.31%	7.87%	1.63	2.65	38.5%

菌种取自青岛市大沽河下游贾疃坝附近的堵塞含水层.利用异养菌平板计数法(杨海燕和朱万

学,2005)测定供试微生物种群数量,分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、厌氧富集培养基、高氏一号培养基及马丁氏培养基(周群英和王士芬,2008)培养好

氧细菌、厌氧细菌、放线菌及真菌,并进行计数,每组试验做 2 个平行样.微生物数量、形态见表 2 和图 3.

表 2 微生物种群数量

Table 2 Microorganism quantity on porous medium

微生物	好氧细菌/ ($\times 10^6$ CFU \cdot g $^{-1}$)	厌氧细菌/ ($\times 10^4$ CFU \cdot g $^{-1}$)	放线菌/ ($\times 10^6$ CFU \cdot g $^{-1}$)	真菌/ ($\times 10^4$ CFU \cdot g $^{-1}$)
数量	4.11	0.35	2.58	4.71

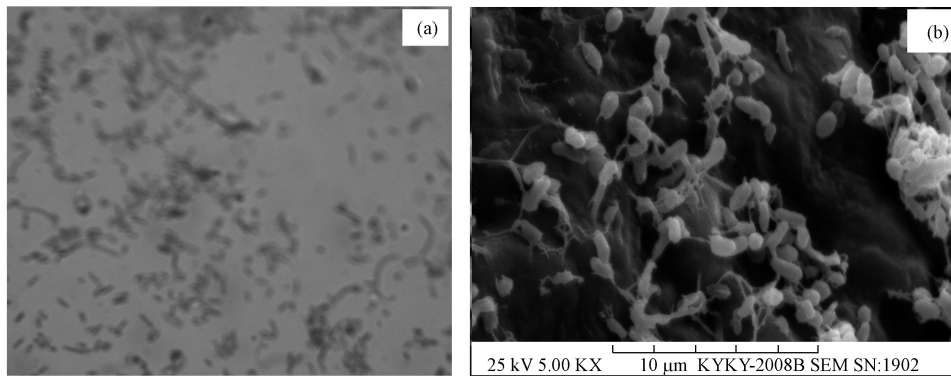


图 3 显微镜下附着微生物微观形态 (a) 和扫描电镜下附着微生物及 EPS 空间形态 (b)

Fig.3 Gram's stain of the attached microorganism on porous medium (a) and SEM image of the attached microorganism and EPS on porous medium (b)

由图 3 可得,介质中的细菌主要以短杆菌为主;砂粒上的附着微生物在胞外聚合物的作用下相互粘结成团,形成黏性菌胶团附着在砂粒表面.菌体分泌的胞外聚合物可以降低介质的有效孔隙度,增加流体粘度,增强菌体细胞之间的粘附性,同时增加流体-介质之间的摩擦力,从而降低含水介质的渗透性.

通过聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳(PCR-DGGE)技术对供试微生物的优势菌种进行鉴定,分别属于甲基杆菌属(*Methylobacterium*)、紫色杆菌属(*Janthinobacterium*)、耶尔森杆菌属(*Yersinia*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)、食酸菌属(*Acidovorax*).查阅文献可知,供试菌种中的甲基杆菌属、紫色杆菌属、葡萄球菌属和食酸菌属均为产粘性胞外聚合物的菌群(Nakamura *et al.*, 1976).

2.2 试验方法

2.2.1 渗透系数 采用砂柱试验模拟人工回灌过程中含水层的生物堵塞,通过介质渗透系数的变化,描述不同砂柱的堵塞过程.试验开始前,用自来水对砂柱进行饱水,计算砂柱的初始渗透系数.待初始渗透系数稳定后进行人工回灌试验.其中,渗透系数由式(1)求得:

$$k = \frac{4Q \cdot \Delta x}{\pi D^2 \cdot \Delta h} \quad (1)$$

式中, Q 为出水流量($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$); D 为砂柱的内径(cm); Δx 为任意两测压管之间的距离(cm); Δh 为任意两测压管间的水头差(cm).

回灌试验结束后,利用公式(1)计算砂柱的渗透系数.其中, Q 为出水流量, $D=5\text{ cm}$, Δx 为砂柱上、下测压管的水头损失, Δh 为两测压管距离(18 cm).以砂柱渗透系数的降低率描述砂柱的堵塞程度,公式如下:

$$\eta = \frac{k_0 - k_s}{k_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, η 为渗透系数的降低率; k_0 为砂柱初始渗透系数($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); k_s 为回灌结束后渗透系数($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$).

2.2.2 接种 菌种采集后,用曝气机充分曝气 2 h.静置 30 min,将上层清液以恒定流速($1\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)泵入饱水后的砂柱,接种 6 h,关闭进、出水阀,保证含水介质上一定的菌种附着量.打开蠕动泵,以恒定流速($5\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)泵入营养液,模拟人工回灌过程.

2.2.3 EPS 提取及多糖、蛋白质的测定 回灌结束后,拆除砂柱,称取定量砂样,超声波振荡仪振荡数次(每次振荡时间不超过 5 min,振荡的次数一般为

1~3次,视振荡效果而定),采用甲醛-氢氧化钠法提取微生物EPS(Frølund *et al.*, 1996).为了保证多糖和蛋白质不变性,最好能在提取的当天测定.然后,采用苯酚-硫酸法(罗毅等, 2005)和考马斯亮蓝法(李如亮, 1998)分别测定EPS中多糖及蛋白质的含量,并将两者之和计为EPS总量,以单位质量砂样上附着含量表示($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).每组试验做2个平行样.

3 结果与讨论(Results and discussion)

以回灌水碳、氮、磷浓度、盐度和温度为主要控制条件,进行砂柱回灌试验,分析各因素对微生物EPS中多糖、蛋白质含量的影响.

3.1 碳浓度

控制回灌水 $\text{COD}_{\text{Cr}}:\text{N}:\text{P}$ 为100:5:1,使NaCl质量浓度为0.5%,选取葡萄糖作为微生物生长的唯一碳源.回灌试验进行216 h,计算不同砂柱渗透系数的降低率,并考察不同碳浓度下,EPS中多糖、蛋白质含量的变化(见图4).

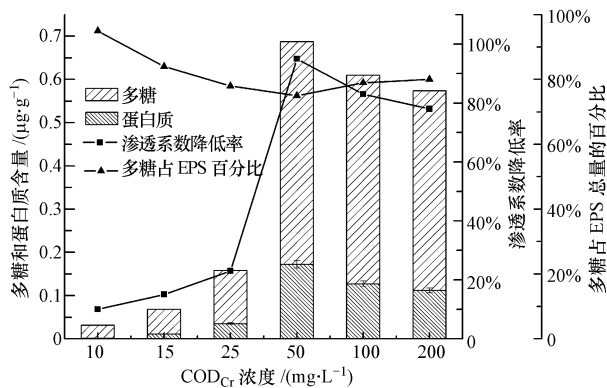


图4 不同 COD_{Cr} 浓度下多糖和蛋白质组成和含量变化

Fig.4 The polysaccharide and protein content under different concentrations of COD_{Cr}

由图4可以看出,连续回灌216 h后,砂柱渗透系数均明显下降.同时,渗透系数的下降率与微生物EPS含量的变化趋势一致,说明砂柱的堵塞程度与EPS含量呈正相关性. COD_{Cr} 为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,EPS含量达到最大值($0.68\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),此时砂柱渗透系数降低率为95%,堵塞程度最严重.随 COD_{Cr} 浓度的继续增加,EPS略有降低,含水介质的渗透系数降低率从95%减小为78%,生物堵塞程度略有减轻.分析原因,当进水 COD_{Cr} 浓度很低时,微生物生长可利用的碳源远远低于正常生长所需的浓度,此时微生物将其用于维持生长,分泌的胞外聚合物含量很低,此时含水介质表面较为光滑,孔隙空间较大.随着

COD_{Cr} 浓度的升高,微生物的生长不受碳源的限制,同时介质孔隙度较大,含氧量丰富,微生物生长速度加快,新陈代谢旺盛,分泌的EPS含量增多,堵塞相邻介质的连接通道.然而,随着EPS的大量积累,同时介质孔隙度降低,含氧量不足严重抑制微生物的正常生长,反而使EPS含量略有下降.

由图4还可看出,微生物分泌的胞外聚合物中多糖明显高于蛋白质,占胞外聚合物的76%~95%,这与Flemming等(Flemming and Wingender, 2001; Vocks *et al.*, 2006; Susant *et al.*, 2008; Yigit *et al.*, 2008)的研究一致.此外,不同碳浓度下,多糖在微生物分泌的胞外聚合物总量中所占比例先降低后升高,说明碳源是影响EPS中多糖、蛋白质组成的主要因素.EPS中含有大量具有强吸附性的负电基团,例如蛋白质的酰胺(II)、羧基以及多糖中的C—O—C、—OH等基团对进水中带正电的胶体具有络合能力.随着人工回灌的进行,EPS不断吸附进水中的胶体,减小了含水介质的有效孔隙度,从而降低其渗透性.

3.2 氮源

本试验中,控制回灌水 COD_{Cr} 、 K_2HPO_4 、NaCl浓度分别为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以P计)、0.5%.选取 NH_4Cl 作为氮源.连续回灌216 h,计算砂柱渗透系数的降低率,考察不同 NH_4Cl 浓度下,EPS中多糖和蛋白质含量的变化,试验结果见图5.

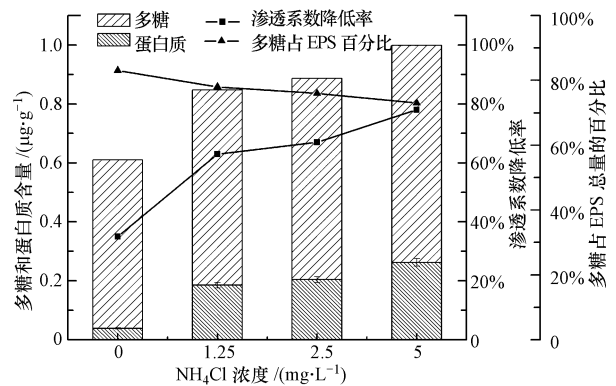


图5 不同氮浓度下多糖和蛋白质组成和含量变化

Fig.5 The polysaccharide and protein content under different concentrations of N

由图5可以看出,连续回灌216 h后,砂柱的渗透系数均明显下降,说明粗砂介质上发生生物堵塞现象.回灌水 NH_4Cl 浓度很低时($0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),胞外聚合物的成分主要为多糖类,此时粗砂介质渗透系数下降率为35%.随进水 NH_4Cl 浓度的升高,粘附于介

质表面的 EPS 含量呈现缓慢上升趋势,变化不大.此时砂柱渗透系数下降率从 63% 升至 78%,介质堵塞程度略有加剧.分析原因,当进水氮浓度很低时,微生物不能进行正常的新陈代谢,只能将碳源转化为多糖类聚合物.随回灌水氮浓度的升高($0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $1.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),氮源不再是限制微生物生长的因素,其生长速率加快,代谢能力增强,分泌胞外聚合物的量逐渐增多.EPS 粘附于含水介质表面,堵塞介质孔隙通道,导致介质间有效孔隙减小,砂柱渗透系数急速下降(下降率为 63%).随进水氮浓度继续升高($1.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),EPS 大量附着于粗砂介质表面,致使孔隙含氧量降低,抑制微生物活动,其分泌的胞外聚合物的量呈现缓慢上升趋势,但基本变化不大.砂柱堵塞程度变化缓慢,渗透系数下降率从 63% 升至 78%.由图 4 还可以看出,不同氮浓度下,多糖在微生物分泌的胞外聚合物总量中所占比例变化不大,说明氮对 EPS 中多糖、蛋白质组成的影响不大.

3.3 磷源

控制进水 COD_{Cr} 、 NH_4Cl 、 NaCl 浓度分别为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计)和 0.5%.选取 K_2HPO_4 作为磷源.进行 216 h 人工回灌试验,计算砂柱渗透系数的降低率,考察不同磷浓度下,含水介质 EPS 中多糖和蛋白质组成和含量的变化(见图 6).

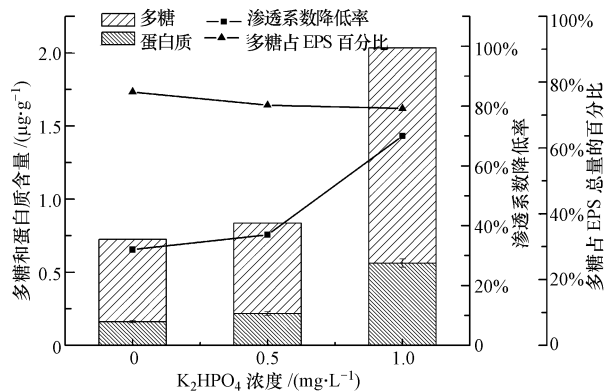


图 6 不同磷浓度下多糖和蛋白质组成和含量变化

Fig.6 The polysaccharide and protein content under different concentrations of P

由图 6 可以看出,当进水磷为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,砂柱上附着的 EPS 含量很低,仅为 $0.72 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,回灌结束时,砂柱渗透系数降低率为 32%;随磷浓度的增大($0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增大到 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),EPS 含量呈现急速上升趋势,由 $0.83 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升至 $2.03 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,砂柱渗透系数降低率从 37% 增大到 70%.面对低磷环

境时,微生物存在自身磷酸盐代谢体系(Zhao *et al.*, 2005; Su *et al.*, 2010; Ciston *et al.*, 2009).当进水磷浓度很低时,微生物仍然会表现出一定的代谢能力.但此时磷源为微生物生长的限制因素,微生物生长繁殖能力较弱,仅产生少量的胞外聚合物,附着于含水介质的表面,对介质孔隙通道的堵塞效应较低,随回灌时间的延长,砂柱渗透系数下降较缓慢;随回灌水磷浓度的升高,微生物活性增强,并且含水介质间存在较大的孔隙空间,为其生长提供了必要的氧气.微生物通过自身代谢作用分泌的胞外聚合物,粘附于砂粒表面,增加了介质与流体之间的摩擦力.同时 EPS 吸附了大量胶体颗粒,导致其分泌量持续增多.EPS 大量附着于粗砂介质表面,严重堵塞孔隙通道,致使渗透系数下降率达 70%.由图 6 还可以看出,在不同磷浓度下,多糖在微生物分泌的胞外聚合物总量中所占比例变化不大,说明磷并不是影响 EPS 中多糖、蛋白质组成的主要因素.

3.4 盐度

使进水 COD_{Cr} 、 NH_4Cl 、 K_2HPO_4 浓度分别为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计)、 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 P 计),砂柱模拟人工回灌试验,计算砂柱渗透系数的降低率,分析盐浓度对微生物 EPS 中多糖和蛋白质组成和含量的影响(见图 7).

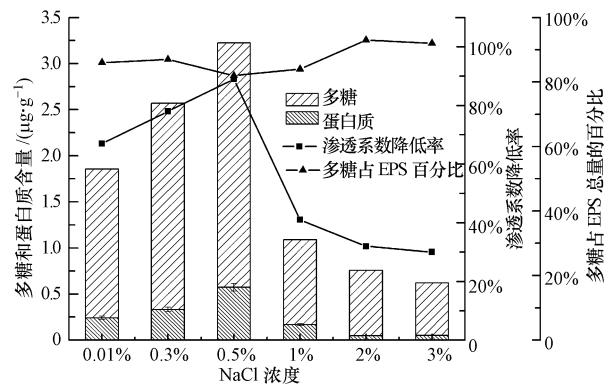


图 7 不同盐度下多糖和蛋白质组成和含量变化

Fig.7 The polysaccharide and protein content under different concentrations of salt

由图 7 可得,随进水 NaCl 浓度的升高,微生物 EPS 含量呈现先升高、后降低的趋势.砂柱渗透系数降低率亦呈现相同趋势.当进水 NaCl 浓度从 0.01% 升高至 0.5% 时,含水介质上的 EPS 附着量从 $1.85 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $3.22 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;渗透系数降低率从 67% 增大到 89%.表明随 EPS 含量的增大,砂柱生物堵塞程度增强.当 NaCl 浓度继续增大时,EPS 含量急

剧下降,最低降至 $0.62 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;砂柱渗透系数降低率逐渐减小.分析原因,当进水盐浓度从 0.01%增至 0.5%时,盐度不再是限制微生物生长的主要因素,其生长迅速,新陈代谢旺盛,分泌了大量的 EPS,粘附于砂粒表面.同时,离子浓度的升高导致含水介质中粘粒双电层的距离减小,降低其排斥力,使胞外聚合物与含水介质的结合力增强,致使砂柱渗透系数显著降低,降低率从 67%增大至 89%.而当 NaCl 浓度超过 1%时,微生物无法适应外部高盐环境,在生长初期,发生细胞失水,进而死亡;只有少部分菌体发生细胞自溶现象,释放胞内聚合物,其中的负电性基团与含水介质中的胶体紧密吸附在一起,形成 EPS,砂柱的堵塞程度有所缓解,降低率从 41%降至 30%.由图 7 还可以看出,在不同盐度下,胞外聚合物中多糖所占比例先降低、后升高,说明盐度是影响 EPS 中多糖、蛋白质组成的因素之一.

3.5 温度

控制回灌水 COD_{Cr} 、 NH_4Cl 、 K_2HPO_4 、NaCl 浓度分别为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计)、 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 P 计)、0.5%.人工回灌 216 h,计算砂柱渗透系数降低率,考察温度对含水介质 EPS 中多糖、蛋白质组成及含量的影响(见图 8).

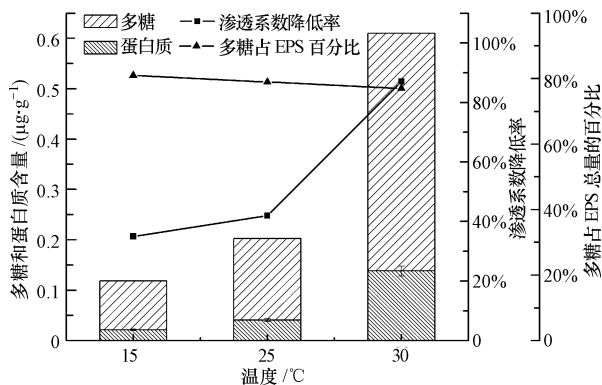


图 8 不同温度下多糖和蛋白质组成和含量变化

Fig.8 The polysaccharide and protein content under different temperature

由图 8 可知,随回灌水温度的升高,微生物分泌的 EPS 含量呈现上升趋势,同时砂柱生物堵塞程度加剧.从 15 °C 升高到 30 °C 时,胞外聚合物从 $0.11 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $0.61 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,介质的渗透系数从 35% 增大至 87%.分析原因,当环境温度很低时,微生物生长速率缓慢,新陈代谢能力较弱.随着温度的升高,微生物生长速率增大,新陈代谢旺盛,向周围环境分泌大量的代谢产物.此外,随回灌水温度的升

高,含水介质粘粒间扩散双电层增大,表面电势随着双电层厚度增大而升高,粘粒之间以及粘粒与孔隙表面间的排斥力逐渐增大,导致粘粒释放.释放的粘粒随着回灌水的迁移被吸附于胞外聚合物的表面,导致含水介质的孔隙通道发生堵塞、中断,从而其渗透性降低.由图 8 还可看出,不同温度下,多糖在微生物分泌的胞外聚合物中所占比例变化不大,说明温度对 EPS 中多糖、蛋白质组成的影响不大.

4 结论 (Conclusions)

1) 在研究的回灌条件下,含水介质中胞外聚合物的主要成分为多糖和蛋白质,其中多糖占总量的 72%~99%.

2) 砂柱生物堵塞程度与介质上附着的 EPS 含量呈正相关性.当回灌水碳、氮、磷浓度、盐度和温度分别为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.5% 和 30 °C 时,最有利于微生物分泌胞外聚合物,产生量最大,砂柱渗透系数降低率最大,堵塞程度最严重.碳、磷浓度、盐度和温度是影响胞外聚合物生成的主要因素,而氮对 EPS 的生成量影响不大.

3) 水中碳浓度和盐度对微生物胞外聚合物中多糖、蛋白质的组成影响较大,而氮、磷浓度和温度是相对次要的因素.

责任作者简介: 郑西来 (1959—),男,教授,博士生导师,长期从事地下水污染与修复技术、水资源利用与保护、海-陆界面水盐循环方面的研究,先后在国内外发表学术论文 130 余篇,其中被 SCI、EI、ISTP 三大检索系统收录 50 余篇.

参考文献 (References):

- 曹相生,龙腾锐,孟雪征,等. 2004. Mn^{2+} 、 Mo^{6+} 和 Zn^{2+} 对活性污泥胞外聚合物组分的影响[J]. 环境科学, 25(4): 70-73
- Chong T H, Wong F S, Fane A G. 2008. The effect of imposed flux on biofouling in reverse osmosis: Role of concentration polarisation and biofilm enhanced osmotic pressure phenomena [J]. Journal of Membrane Science, 325(2): 840-850
- Ciston S, Lueptow R M, Gray K A. 2009. Controlling biofilm growth using reactive ceramic ultrafiltration membranes [J]. Journal of Membrane Science, 342: 263-268
- Durmaz B, Sanin F D. 2001. Effect of carbon to nitrogen ratio on the composition of microbial extracellular polymers in activated sludge [J]. Water Science Technology, 44(10): 221-229
- 杜新强,冶雪艳,路莹,等. 2009. 地下水人工回灌堵塞问题研究进展[J]. 地球科学进展, 24(9): 973-980
- Flemming H C, Wingender J. 2001. Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPS) Part I: Structural and ecological

- aspects[J]. *Water Science and Technology*, 43(6): 1-8
- Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin[J]. *Water Research*, 30(8): 1749-1758
- Jarusuthirak C, Amy G, Croué J. 2002. Fouling characteristics of wastewater effluent organic matter (EfOM) isolates on NF and UF membranes[J]. *Desalination*, 145(1/3): 247-255
- Jia X S, Furumai H, Fang H H P. 1996. Extracellular polymers of hydrogen-utilizing methanogenic and sulfate-reducing sludges [J]. *Water Research*, 30(6): 1439-1444
- 孔祥平. 2007. 一株地芽孢杆菌(*Geobacillus sp.*)在模拟油藏环境下的生长与运移实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. 67-69
- 蘭宗宗, 田玉新. 2010. 地下水人工回灌方法及堵塞问题分析[J]. *中国科技博览*, (24): 25
- 李久义, 左华, 栾兆坤, 等. 2002. 不同基质条件对生物膜细胞外聚合物组成和含量的影响[J]. *环境化学*, 21(6): 546-551
- 李如亮. 1998. 生物化学实验[M]. 武汉: 武汉大学出版社. 32-35
- Li X Y, Yang S F. 2007. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 41(5): 1022-1030
- 李阳. 2002. 微生物与石油工业[J]. *油气地质与采收率*, 9(4): 1-4
- 李卓, 卞大中, 阎淑平. 2010. 对水源热泵回灌堵塞问题的几点认识[J]. *浙江水利科技*, 172(6): 70-72
- 罗曦, 雷中方, 张振亚, 等. 2005. 好氧/厌氧污泥胞外聚合物(EPS)的提取方法研究[J]. *环境科学学报*, 25(12): 1624-1629
- 罗毅, 潘细贵, 刘刚, 等. 2005. 苯酚-硫酸法测定多糖含量显色方式的优选[J]. *制剂与工艺*, 12(1): 45-46
- 马立, 白宇, 张杰, 等. 2005. 下向流生物滤池低温堵塞问题的分析与研究[J]. *给水排水*, 31(1): 37-40
- Metzger U, Le-Clech P, Stuetz R M, *et al.* 2007. Characterisation of polymeric fouling in membrane bioreactors and the effect of different filtration modes[J]. *Journal of Membrane Science*, 301(1/2): 180-189
- Nakamura J, Miyashiro S, Hirose Y. 1976. Screening, isolation, and some properties of microbial cell flocculants[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 40(2): 377-383
- Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. 2010. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review[J]. *Biotechnology Advances*, 28(6): 882-894
- Su X J, Zhao Q, Wang S, *et al.* 2010. Modification of diamond-like carbon coatings with fluorine to reduce biofouling adhesion [J]. *Surface and Coatings Technology*, 204(15): 2454-2458
- Susanto H, Arafat H, Janssen E M L, *et al.* 2008. Ultrafiltration of polysaccharide-protein mixtures: Elucidation of fouling mechanisms and fouling control by membrane surface modification[J]. *Separation and Purification Technology*, 63(3): 558-565
- Vocks M, Bracklow U, Drews A, *et al.* 2006. Comparison of polysaccharide concentration and fouling rates in different membrane activated sludge systems[J]. *Desalination*, 199(1/3): 381-383
- Wingender J, Neu T R, Flemming H C. 1999. *Microbial extracellular polymeric substances*[M]. Berlin: Springer. 1-19
- 薛英文, 杨开, 李白红, 等. 2007. 中水微灌系统生物堵塞特性探讨[J]. *中国农村水利水电*, (7): 36-39
- 杨海燕, 朱万学. 2005. 异养菌静态法评定化学杀生剂杀菌性能[J]. *理化检验(化学分册)*, 41(6): 436-437
- Yigit N O, Harman I, Civelekoglu G, *et al.* 2008. Membrane fouling in a pilot-scale submerged membrane bioreactor operated under various conditions[J]. *Desalination*, 231(1/3): 124-132
- Zhang L L, Feng X X, Zhu N W, *et al.* 2007. Role of extracellular protein in the formation and stability of aerobic granules[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 41(5): 551-557
- Zhao Q, Liu Y, Wang C, *et al.* 2005. Effect of surface free energy on the adhesion of biofouling and crystalline fouling [J]. *Chemical Engineering Science*, 60(17): 4858-4865
- 周群英, 王士芬. 2008. *环境工程微生物学*[M]. 北京: 高等教育出版社. 45-48