

pH对地下水源热泵回灌井生物堵塞的影响

亢 涵,王谋薇,潘 俊,藏春月

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究不同 pH 值对地下水源热泵回灌造成的生物堵塞影响,探究地下水源热泵回灌生物堵塞的发展规律。方法 以滑翔医院地下水源热泵工程为研究对象,通过室内渗流砂箱模拟实际回灌井回灌,分析水通量、孔隙率、微生物生长数量的变化。结果 pH 为 6.5 时水通量、孔隙率变化较大,微生物数量较多,发生生物堵塞最严重;在不同深度时,pH 分别为 6、6.5、7、7.5、8 时距离渗流砂箱出水口 9 cm 处微生物生长情况较好。结论 在地下水源热泵工程中,适当提高回灌水的 pH 值,可以有效防止地下水回灌过程中出现的生物堵塞。

关键词 地下水源热泵;回灌堵塞;生物堵塞;pH 值

中图分类号 TU991.11;X172

文献标志码 A

Effect of pH on Bio-clogging of Groundwater Source Heat Pump Recharge Well

KANG Han, WANG Mouwei, PAN Jun, ZANG Chunyue

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The effect of different pH values on biological bio-clogging in groundwater source heat pump recharge was studied to provide theoretical basis for future biological bio-clogging prevention methods. The groundwater source heat pump project of gliding hospital was used as the main research object. This project's actual recharge process was simulated by indoor seepage sand box, and the variation law of water flux, porosity and microbial growth was analyzed in this process. When pH is 6.5, the change of water flux and porosity is great, the number of microorganisms is large, and the biological bio-clogging is the most serious; when pH is 6, 6.5, 7, 7.5 and 8, the growth of microorganisms is better at 9 cm from the outlet of the sand box. So in the groundwater source heat pump project, properly increasing the pH value of the recharge water can effectively prevent the biological bio-clogging during the recharge process of the groundwater.

Key words: groundwater source heat pump; recharge clogging; bio-clogging; pH value

收稿日期:2019-04-23

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51908377);辽宁省科技厅项目(20170520224);沈阳建筑大学博士后基金项目(SJZUBSH201718)

作者简介:亢涵(1982—),女,博士,主要从事微生物生理生态、水资源规划与污染防治等方面研究。

地下水源热泵作为一种高效、节能、环保、稳定的先进技术在国内外迅速发展,目前国内大部分建筑已应用该技术,但在实际应用中,地下水源热泵的回灌效率会随着使用时间的增加而逐渐降低,甚至出现堵塞,致使抽出的水无法全部回灌到含水层中,从而造成资金和资源的浪费^[1-2]。所以回灌堵塞已经成为制约地下水源热泵技术发展和应用的一大难题。在地下水人工补给系统中,微生物的生长和代谢作用造成的堵塞仅次于悬浮物堵塞,比例高达15%^[3-5]。有效控制微生物在回灌井中的生长和代谢成为解决生物堵塞的关键因素。迄今为止,国内外部分学者一直在研究多孔介质中生物堵塞的过程及原因。K. Seki 和 M. Thullner 等^[6-7]认为,微生物自身和它的代谢产物(EPS)的累积会使多孔介质发生生物堵塞。S. W. Taylor 等^[8]发现微生物产生的气体会使介质中的空隙被填充,从而引发生物堵塞现象。张晓婉等^[9]在进行室内砂柱渗流模拟试验中发现,微生物堵塞对含水介质渗透性有明显影响,试验初始阶段出现峰值后,砂柱上层微生物的数量迅速降低并保持稳定,而下层微生物数量始终维持在较低水平。微生物膜的生长导致含水介质渗透性降低^[10-12]。潘俊等^[13]认为在生物堵塞中,导致多孔介质渗透性降低的主

要因素是细菌的化学衍生物。李璐等^[14]认为在 pH 值发生变化时,铁离子在形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀的同时凝聚成胶体,影响多孔介质的渗透性能。研究倾向对物理和化学回灌堵塞机理的较多,但对生物堵塞的研究机理尚不深入,微观层面的更少^[15]。微生物生长的 pH 一般在 2~8,但大多数微生物生长的 pH 为 5~9。与微生物生长温度相同,pH 同样也有最高、最低和最适 pH。最适 pH 值范围内,微生物生长繁殖最快,不同的微生物最适 pH 范围不同。最高和最低 pH 范围内,微生物生长速度缓慢,甚至可能造成微生物死亡。笔者根据不同时期地下水 pH 的特点以及滑翔医院地区实际地下水源热泵回灌水可能的 pH 值范围,进行不同 pH 对地下水源热泵回灌生物堵塞的影响规律的研究。

1 试 验

1.1 试验用水

根据不同时期地下水 pH 的特点以及滑翔医院地区实际地下水源热泵回灌水可能的 pH 值范围,确定离子种类和离子质量浓度。试验人工回灌进水 pH 值分两部分:一部分为酸性,即 pH=6、6.5 配水体积为 35 L;另一部分为中性和碱性,即 pH 分别为 7、7.5、8,试验用水成分如表 1 所示,配水体积为 35 L。

表 1 试验用水
Table 1 Test water

pH 为 6、6.5				pH 为 7、7.5、8			
离子种类	质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	药品名称	药品用量/ mg	离子种类	质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	药品名称	药品用量/ mg
NO_3^-	3.5	KNO_3	45.7	NO_3^-	3.5	KNO_3	45.7
Mn^{2+}	1	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	28.8	Mn^{2+}	1	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	28.8
Fe^{3+}	3	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	110.0	Fe^{2+}	3	$(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	168.5
SO_4^{2-}	120	Na_2SO_4	1144.3	NH_4^+	1.984	—	—
NH_4^+	1.984	NH_4Cl	46.2	SO_4^{2-}	120	NH_4Cl	1297.6
NO_2^-	0.06	NaNO_2	0.7	NO_2^-	0.06	NaNO_2	7
CH_3COO^-	2	CH_3COONa	22.23	CH_3COO^-	2	CH_3COONa	22.23

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置

试验装置采用塑料材质砂箱,长宽高为67 cm×45 cm×34 cm。砂箱右侧每隔12 cm打孔,外接水箱水头,且填充根据盛京医院地下勘探地质情况分层灌装的25 cm 多孔介质。砂箱中间倾斜放置一块铁板模拟回灌井井壁,厚度8 mm,高32 cm,外面缠有直径1.5 mmPVC 材质线圈,以防止介质渗透到左侧模拟回灌井内。砂箱左侧底部设有出水口,装标准1/4 球阀,同时设有蠕动泵循环进水。试验装置如图1 所示。

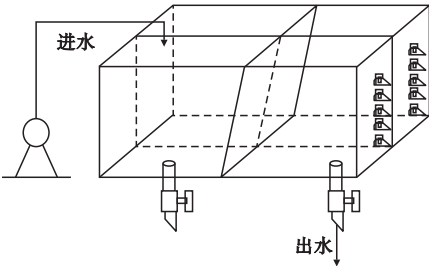


图1 试验装置图

Fig.1 Experimental setup

1.2.2 装砂

(1)为了消除边壁效应,在砂箱内壁涂抹凡士林,然后在塑料砂箱内填入筛分得到的砂砾,压实,装填高度为25 cm。

(2)在试验开始前,从砂箱顶部缓慢倒入蒸馏水,直至水面没过多孔介质表面并高于其5 cm,静置12 h后观察是否出现漏水现象,即水面降低;若低于5 cm 则继续倒入蒸馏水,使其保持在高于多孔介质表面5 cm,继续静置12 h;如无明显变化,则打开出水口,排空蒸馏水。

1.2.3 装置启动

关闭阀门,将配置好的试验用水沿着砂箱边缘缓慢倒入,直到砂箱内水面高于多孔介质5 cm,将其静置12 h,使回灌水样与空气充分接触,观察是否出漏水现象;若漏水,用试验用水将水面填补至原位,如无漏水现象,则打开右侧各阀门,分别测定其水通量。

1.2.4 计算方法

(1)水通量计算方法

通过砂箱截面水通量的变化判定试验发生的堵塞程度。

$$Q = \frac{V}{t} \tag{1}$$

式中: Q 为通过砂箱截面的水通量, mL/s ; V 为砂箱放空时流出的水的体积, mL ; t 为砂箱放空所需的时间, s 。

(2)孔隙率计算方法

已知砂箱总体积为 V ,从砂箱顶端向柱内注入自来水,至液面与砂箱液面齐平,打开砂箱下端出水阀,记录出水体积为 V_1 ,即孔隙率为

$$n = \frac{V_1}{V} \tag{2}$$

式中: n 为孔隙率; V_1 为排水总体积; V 为土柱总体积。

(3)微生物总数计算方法

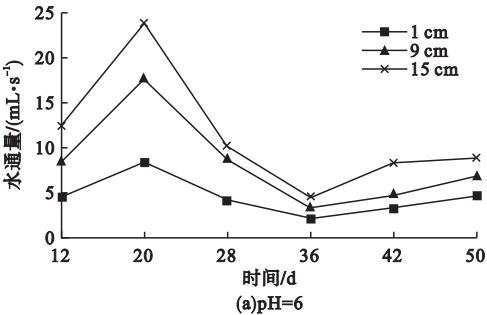
试验测定的是细菌菌落总数,对采集的回灌水样中的细菌菌落总数进行培养计数。将作为样本的回灌水样分别进行稀释后,从稀释后的水样中取1mL 均匀地涂抹在琼脂培养基上。在一定温度下,培养一段时间后,记录培养皿中的菌落数量。根据稀释的倍数,计算每毫升原始样品中所含的细菌菌落总数。

2 结果与分析

2.1 pH 对回灌堵塞试验的影响结果

2.1.1 同一 pH 不同深度水通量变化

图2 为同一 pH 不同深度水通量变化情况。



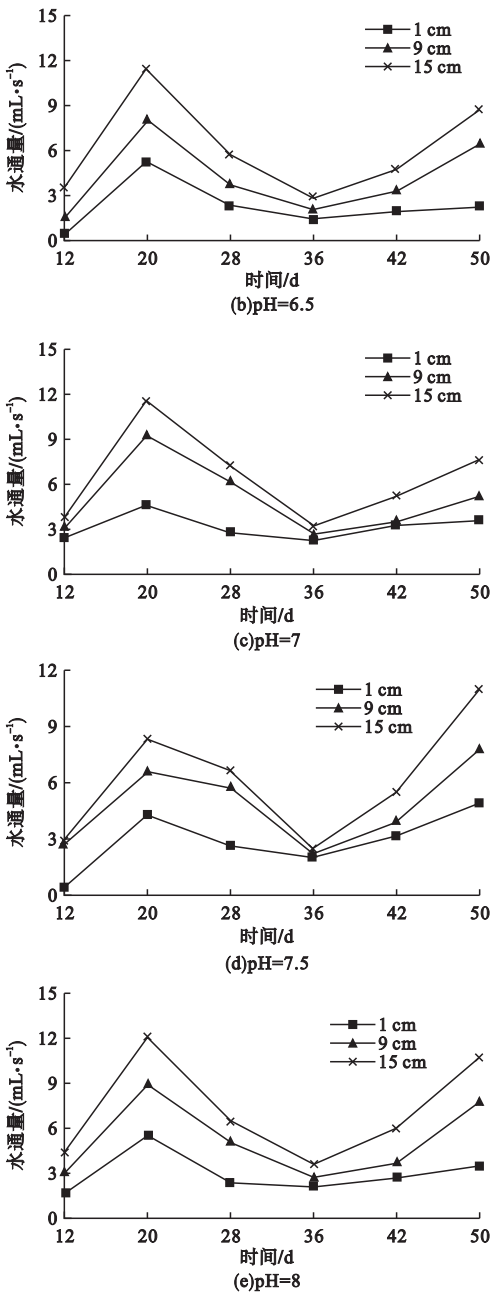


图2 同一 pH 不同深度水通量变化

Fig. 2 The variation of water flux with different layer in the same pH

pH=6.5 时砂箱在 22 d 发生堵塞,是各 pH 值里堵塞发生最快的,堵塞发生时水通量为 1.06 mL/s,占初始水通量的 50%;pH=6、pH=7 时砂箱发生堵塞的时间为 24 d,堵塞发生时水通量分别是 1.02 mL/s、0.89 mL/s,各占初始水通量的 50.24%、51.89%;pH=8 时砂箱发生堵塞时间为 25 d,堵塞发生时水通量是

0.98 mL/s,占初始水通量的 50.51%;pH=7.5 时砂箱在 31 d 发生堵塞,是堵塞发生最晚的,堵塞发生时水通量为 0.96 mL/s,占初始水通量的 52.71%。试验结束时,pH 分别为 6、6.5、7、7.5、8 水通量分别下降了 64.39%、69.34%、61.62%、60.59%、63.13%。pH 为 6.5、7.5、8、7.6 的水通量下降程度由大到小。从图 2(a)和图 2(e)可看出,pH=6 和 pH=8 时不同层深 20 d 水通量相比 12 d 水通量均有所上升,但上升幅度不是很大;图 2(b)和图 2(d)可知 pH=6.5 和 pH=7.5 时 1 cm 处 20 d 水通量相比 12 d 水通量出现大幅度上升,分别上升了 1156.52% 和 941.30%;pH=7 时 9 cm 处 20 d 水通量相比 12 d 水通量上升了 712.5%。这是因为 15 d 反应器出现了漏水的现象,导致上部砂箱沙子暴露在空气中,微生物失水死亡,多孔介质间的生物膜消失,再次灌水之后,因为多孔介质之间没有了生物膜阻塞,所以导致水通量增加。

2.1.2 pH 变化对孔隙率的影响情况

表 2 为不同进水 pH 下,试验时间为 50d,各砂箱孔隙率随时间变化。

表 2 不同 pH 值的孔隙率			
Table 2 The variation of porosity in different pH			
pH	初始砂箱孔隙率/%	堵塞时砂箱孔隙率/%	结束后砂箱孔隙率/%
6	58.6	29.1	20.9
6.5	60.6	30.3	18.6
7	52.9	25.4	20.3
7.5	58.0	27.4	22.9
8	56.6	28.0	20.9

根据回灌水发生堵塞的时间、试验结束时水通量下降的比例及砂箱孔隙率变化情况可知,pH=6.5 时发生堵塞的情况最为严重,相比初始水通量、初始孔隙率分别下降了 69.34%、30.69%;pH=6 和 pH=8 堵塞情况相近,相比初始水通量分别下降了 64.39%、63.13%,相比初始孔隙率分别下降

了 35.67%、36.93% ; pH = 7 和 pH = 7.5 堵塞情况相近,相比初始水通量分别下降了 61.62%、60.59%,相比初始孔隙率分别下降了 38.37%、39.48% . pH 为 6.5、7.5、8、7、6 的堵塞程度由重到轻。

2.1.3 同一深度不同 pH 微生物生长变化

图 3 为相同深度不同 pH 微生物生长变化。从图 3 中可以看出,在距离出水口 1 cm、9 cm、15 cm 处, pH = 6.5 时微生物量最多,接着是 pH = 7.5, 然后是 pH = 8、PH = 7、PH = 6。

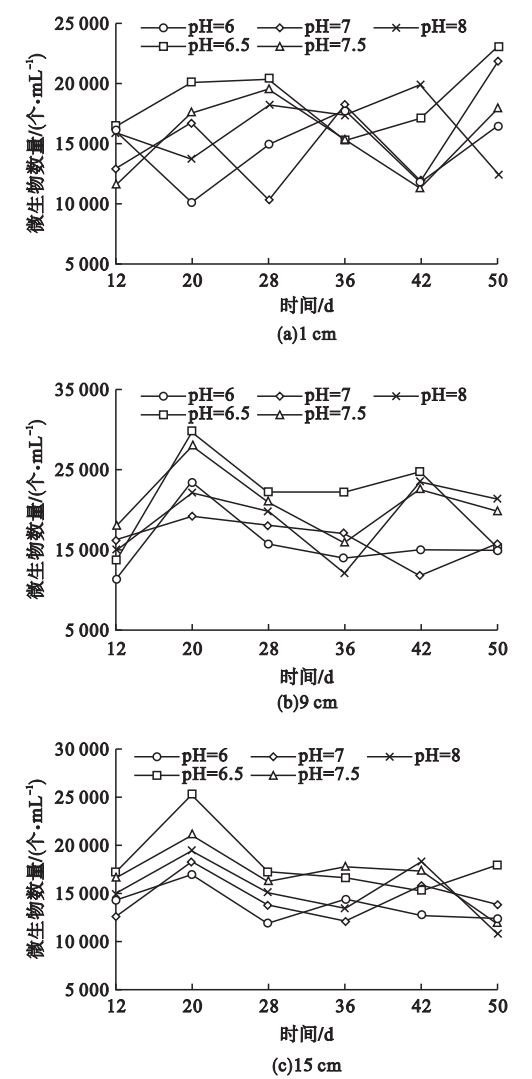
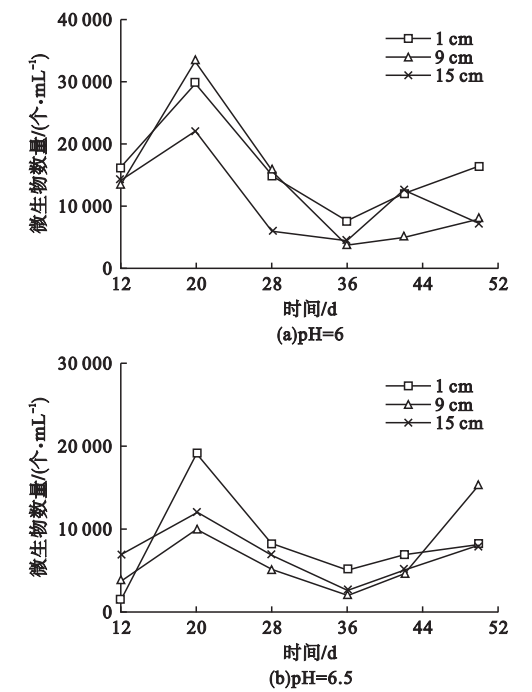


图 3 同一深度不同 pH 微生物生长变化情况
Fig. 3 Growth of microorganisms with different pH in the same layer

2.1.4 同一 pH 不同深度微生物生长变化

图 4 为同一 pH 不同深度微生物生长变化情况。从图 4 可以看出, pH 分别为 6、6.5、7、7.5 时,微生物数量的增长速度较快, pH = 6.5 时微生物数量增长速度相对较快。36 d 后微生物生长速度降低并趋于平缓。从图 4 可看出,各 pH 值在距离出水口 9 cm 处微生物生长情况比其他深度微生物生长情况好,然后是 15 cm 处,最后是 1 cm 处。在不同深度时, pH = 6.5 微生物量相对较多,然后是 pH = 7.5, 接着是 pH = 8、pH = 7 和 pH = 6。从扫描电镜的结果可知,多孔介质表面薄膜厚度增加,团状物较多,这是因为渗滤液中的离子含量会随着入渗深度的增加而降低,从而造成了随着入渗深度的增加微生物生长量少的情况,夏璐等^[16]认为生物堵塞程度随着渗流距离的增加而减缓,王宏宇^[17]认为砂柱各处悬浮态和附着微生物量距离入水口越远,减小趋势越显著,与笔者研究结果相似。砂箱最上端微生物量少则是因为在回灌水排出后,上部砂箱的多孔介质中水量减少,甚至出现干燥现象,在干燥的条件下微生物出现大量死亡,导致微生物数量下降。



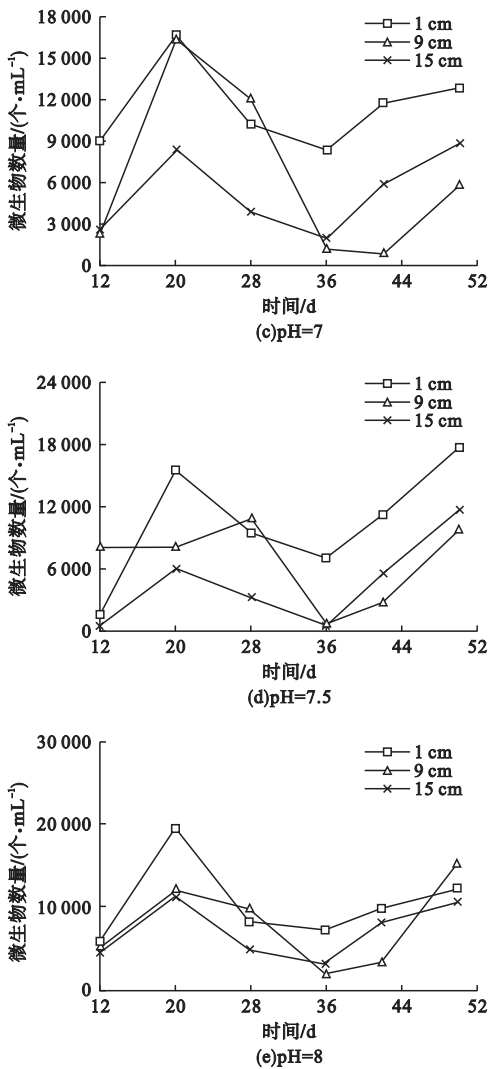


图4 同一 pH 不同深度微生物生长变化情况
Fig. 4 Growth of microorganisms with different layer in the same pH

2.1.5 多孔介质表面扫描电镜分析

图5 为多孔介质表面的对比。

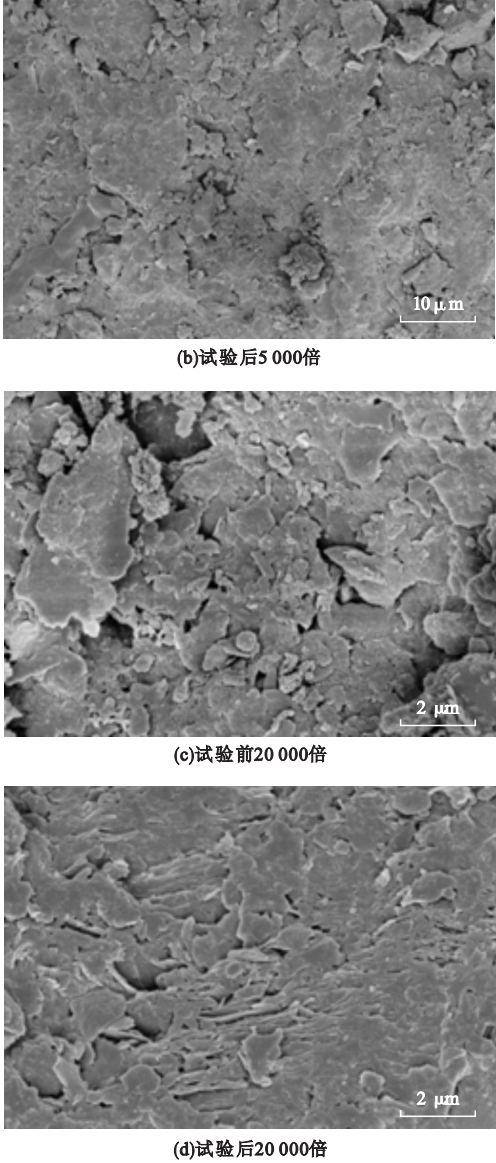
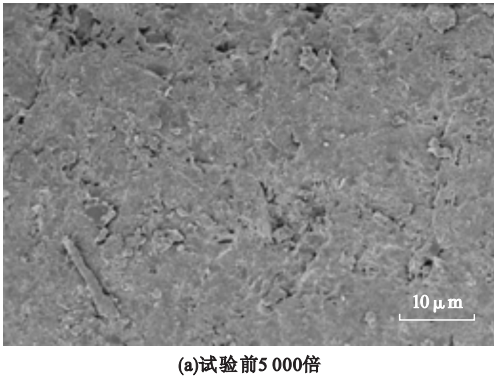


图5 多孔介质表面扫描电镜
Fig. 5 SEM of porous media surface

从图5 可以看出,试验前多孔介质表面较为平坦,团状物较少,试验结束后多孔介质表面覆盖一层薄膜,厚度大约在 20 ~ 50 μm ,团状物较多,试验后多孔介质表面相对于试验前明显有了堵塞物。

3 结 论

(1)在相同深度下,pH 分别为 6.5、7.5、8、7、6 时的水通量下降程度由大到小。随着层深的增加,pH 分别为 6.5、7.5、8、7、6 时的

微生物数量由多到少。

(2)微生物的生长数量受营养物浓度的影响,微生物主要生长在砂箱中间区域。因此,在地下水回灌时,应对回灌水源中的营养物质进行检测并处理。

参考文献

- [1] SINGH J B, GUSTAV F J, HUNT A W. Representative operating problems of commercial groundsource heat pumps [J]. Ashrae transactions, 2000, 107(2): 561-568.
- [2] 杜新强, 冶雪艳, 路莹, 等. 地下水人工回灌堵塞问题研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(9): 973-980.
(DU Xinqiang, YE Xueyan, LU Ying, et al. Advances in clogging research of artificial recharge[J]. Advances in earth science, 2009, 24(9): 973-980.)
- [3] 亢涵, 李玲, 潘俊, 等. 悬浮颗粒物导致的地下水热源热泵回灌堵塞研究现状及展望[J]. 建筑与预算, 2018, 265(5): 61-63.
(KANG Han, LI Ling, PAN Jun, et al. Research status and prospects of groundwater source heat pump recharge blockage caused by suspended particles [J]. Construction and budget, 2018, 265(5): 61-63.)
- [4] 路莹, 杜新强, 范伟, 等. 地下水人工回灌过程中微生物堵塞的预测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 77-80.
(LU Ying, DU Xinqiang, FAN Wei, et al. Prediction of microbial clogging in groundwater artificial recharge [J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2012, 39(1): 77-80.)
- [5] 潘俊, 王天慧, 杜晓宇, 等. 铁细菌对地下水热源热泵回灌堵塞的生物化学行为研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 360-367.
(PAN Jun, WANG Tianhui, DU Xiaoyu, et al. Biochemical behavior of iron bacteria on plugging of groundwater source heat pump [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(2): 360-367.)
- [6] SEKI K, MIYAZAKI T, NAKANO M. Reduction of hydraulic conductivity due to microbial effects [J]. Transactions of the Japanese society of irrigation drainage & rural engineering, 1996, 181: 137-144.
- [7] THULLNER M, SCHROTH H M, ZEYER J, et al. Modeling of a microbial growth experiment with bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow[J]. Journal of contaminant hydrology, 2004, 70(1/2): 37-62.
- [8] TAYLOR S W, JAFFE P R. Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium; 3. Dispersion

- and mode verification [J]. Water resources research, 1990, 26(9): 2171-2180.
- [9] 张晓婉, 冶雪艳, 杜新强, 等. 人工回灌地下水过程中微生物堵塞对介质渗透性影响的试验[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 146-150.
(ZHANG Xiaowan, YE Xueyan, DU Xinqiang, et al. Experimental study of the effect of the microbial clogging on the porous media permeability during the artificial recharge [J]. Journal of safety and environment, 2014, 14(3): 146-150.)
- [10] SOARES I M, BRAESTER C, BELKIN S, et al. Denitrification in laboratory sand columns: carbon regime, gas accumulation and hydraulic properties [J]. Water research, 1991, 25(3): 325-332.
- [11] REYNOLDS W D, BROWN D A, MATHUR S P, et al. Effect of insitu gas accumulation on the hydraulic conductivity of peat [J]. Soil science, 1992, 153(5): 397-408.
- [12] ALBRECHTSEN H J, WINDING A. Microbial biomass and activity in subsurface sediment from Vejen, Denmark [J]. Microbial ecology, 23(3): 303-317.
- [13] 潘俊, 宋佳蓉, 王昭怡, 等. 硫酸盐还原菌和铁细菌对回灌堵塞影响的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 31-36.
(PAN Jun, SONG Jiarong, WANG Zhaoyi, et al. Test on the influence of sulfate reducing bacteria and iron bacteria on the clogging of recirculation [J]. Hydrogeology and engineering geology, 2018, 45(4): 31-36.)
- [14] 李璐, 卢文喜, 杜新强. 人工回灌过程中含水层堵塞试验研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(6): 77-78.
(LI Lu, LU Wenxi, DU Xinqiang. Experimental study on clogging of aquifer during artificial recharge [J]. Yellow river, 2010, 32(6): 77-78.)
- [15] 亢涵, 王谋薇, 藏春月, 等. 地下水热源热泵回灌堵塞的研究与展望[J]. 地球环境学报, 2017, 8(4): 320-326.
(KANG Han, WANG Mouwei, ZANG Chunyue, et al. Research status and prospect of recharge clogging of groundwater heat pump [J]. Journal of earth environment, 2017, 8(4): 320-326.)
- [16] 夏璐, 郑西来, 段玉环, 等. 砂柱微生物堵塞过程及机理分析[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 749-7545.
(XIA Lu, ZHENG Xilai, DUAN Yuhuan, et al. Analysis of process and mechanism of bioclogging in aqueous media [J]. Journal of hydraulic engineering, 2014, 45(6): 749-755.)
- [17] 王宏宇. 含水介质生物堵塞的回灌试验和数值分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
(WANG Hongyu. Experiment and numerical analysis for bioclogging in aquifer media [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.)
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)