

铁细菌对地下水源热泵回灌堵塞的生物化学行为研究

潘俊,王天慧,杜晓宇,赵磊

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 探究在地下水源热泵回灌过程中铁细菌的存在对铁锰引起的生物化学行为的影响,进一步发现铁细菌与不同质量浓度的铁锰离子的反应情况,提供解决生化复合堵塞问题的方案. 方法 以有无铁细菌的含相同质量浓度铁锰回灌水试样进行试验对比,分析铁细菌存在对生化复合堵塞是否有加剧效果,另进一步设置不同质量浓度的铁锰回灌水进行对比试验,观察铁细菌对铁锰离子各自的氧化程度. 结果 铁细菌的存在明显加剧了纯化学堵塞,随着二价铁离子质量浓度增加,氧化现象更为剧烈,堵塞时间明显提前,而锰离子质量浓度并未过多影响整个生化复合堵塞. 结论 在地下水源热泵工程中,降低回灌水中铁离子的质量浓度,可以有效防治地下水中铁锰离子质量浓度较高的地区水源热泵回灌堵塞问题.

关键词 铁细菌;生物化学行为;水源热泵;回灌堵塞

中图分类号 TK529

文献标志码 A

Biochemical Behavior of Iron Bacteria on Plugging of Groundwater Source Heat Pump

PAN Jun, WANG Tianhui, DU Xiaoyu, ZHAO Lei

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

Abstract: The iron-manganese-induced biochemical behavior of iron bacteria in the process of recharge of groundwater source heat pump was explored to find out the reaction of iron bacteria and iron-manganese ions with different mass concentration and provide a solution to the biochemical complex plugging problem. The effect of iron bacteria on biochemical complex plug was analyzed to set contrast test with different concentrations of iron manganese backwash water to observe the oxidation degree of iron and manganese ion by iron bacteria. The results showed that the presence of iron bacteria significantly aggravated the pure chemical blockage. With the increase of ferrous ion concentration, the oxidation phenomenon was more severe and the blocking time was earlier. However, the mass concentration of manganese ion did not affect the whole biochemical complex

收稿日期:2017-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41072190)

作者简介:潘俊(1962—),男,教授,主要从事地下水水源热泵方面研究.

blockage too much. In underground water source heat pump project, reducing the mass concentration of iron ions in the recharge water can effectively prevent and control the rechargeable clogging of water source heat pump where the concentration of iron and manganese ions is high in the groundwater.

Key words: iron bacteria; biochemical behavior; water source heat pump; rechargeable clogging

热泵回灌效率低是困扰我国地下水源热泵发展的瓶颈. 从回灌机理分析, 地下水源热泵回灌率低的原因主要有井的过滤器及井周围的堵塞和抽水后水位下降带来的含水层骨架的压密两个问题^[1]. 而实际发生更多的是过滤器及井周围堵塞. 堵塞的因素很多, 其中化学堵塞是回灌过程中一个普遍现象^[2], 主要由铁锰离子的吸附沉淀反应、氧化还原反应等形成的沉淀物而引起的孔隙堵塞^[3]. 迄今为止, 国内外学者对于铁锰的化学堵塞机理开展了许多研究, 有学者通过试验发现, 在一定时间后通过模拟回灌沙箱的水样中, 水的铁离子质量浓度较回灌前明显降低, 说明回灌过程中存在因铁离子的吸附沉淀或者形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀而导致含水介质的堵塞^[4]. 在研究沈阳黄家水源地地下水位波动对地下水产生影响时发现地下水的取水口处常发生地下水中的铁锰被氧化产生沉淀, 引起井管过滤器及管壁上积累铁锰沉淀物, 而降低输水能力、减少生产井的出水量、造成生产井堵塞甚至报废^[5]. 上海地区某织布厂冬灌夏抽回灌井水样中发现大量铁细菌的存在, 该厂区三口井都先后因铁细菌堵塞而经检修、套补新井或报废. 研究者推测回灌效率降低的原因可能是铁细菌能接触性地加速 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 沉淀, 加剧化学堵塞^[6]. 而关于铁细菌对化学堵塞具体作用目前仅见于文献^[7], 该文献认为“西安与咸阳孔隙型热储尾水回灌井堵塞原因主要是人工热井在开放回灌环境下, 铁细菌的大量繁殖会产生 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 聚集在细菌周围, 产生大量的棕色黏泥, 粘附在井壁周围和孔隙中, 从而加剧回灌井过滤器及周围纯化学堵塞”. 近几年随

着地下水源热泵的推广应用, 对水源热泵回灌堵塞的机理也开展一些研究, 如因悬浮物的吸附、解吸或运动受阻造成渗透介质孔隙度减小而形成的物理堵塞^[8-9]. 由于氧化作用而产生的沉积物堆积在土壤介质孔隙内, 造成多孔介质的渗透性能下降引起的化学堵塞^[10], 以及在回灌试验过程中发现含水介质中存在好氧微生物的繁衍代谢等生命活动, 其引发的生物堵塞会在一定程度上促使砂槽含水介质渗透性的降低^[3]. 研究成果过多集中在单一方面的堵塞^[6], 对于复合型堵塞方面, 因受反应过程复杂、井内监测和堵塞物取样困难等多种因素影响而还不够深入, 尤其是铁细菌引起的生化复合作用对回灌堵塞还鲜见报道, 因此研究铁细菌在水源热泵回灌过程中对生化复合堵塞的影响对开展地下水源热泵回灌堵塞机理研究以及回灌堵塞的防治具有理论和实际意义. 沈阳市以地下水源热泵系统为主开发利用浅层地温, 在多年运行过程中也普遍存在堵塞引起回灌效率下降等问题. 笔者以沈阳盛京医院滑翔分院地下水源热泵工程回灌井为例, 通过采样室内试验分析铁细菌在水源热泵回灌堵塞的生化复合行为. 因沈阳城区大部分地区地下水铁锰质量浓度超标, 笔者另设置一组试验, 通过控制铁锰离子的不同质量浓度, 分析铁细菌对铁锰离子的影响, 从生化复合堵塞角度揭示铁细菌在水源热泵回灌堵塞的生化复合行为, 为回灌堵塞机理研究提供佐证.

1 铁细菌对生化复合堵塞的影响试验

沈阳盛京医院滑翔分院地下水源热泵工

程回灌井井回灌效率低下,影响其使用效率,每年维修和洗井成本增加.通过采取水样检测分析,发现回灌井壁周围和地下水中存在大量铁细菌.由于井内观察和分析铁细菌对铁锰化学堵塞比较困难,笔者通过室内模拟回灌试验,通过在土柱中回灌有铁细菌的含铁锰水观测其堵塞情况与无铁细菌的统一质量浓度铁锰水的堵塞情况对比,分析铁细菌

对回灌堵塞的影响.沈阳城区地下水铁锰离子质量浓度较高(见图1),通过控制铁锰离子的不同质量浓度,分析铁细菌对铁锰离子的影响,从生化复合堵塞角度揭示了铁细菌在水源热泵回灌堵塞的生化复合行为,为回灌堵塞机理研究提供佐证,解决水源热泵堵塞问题.

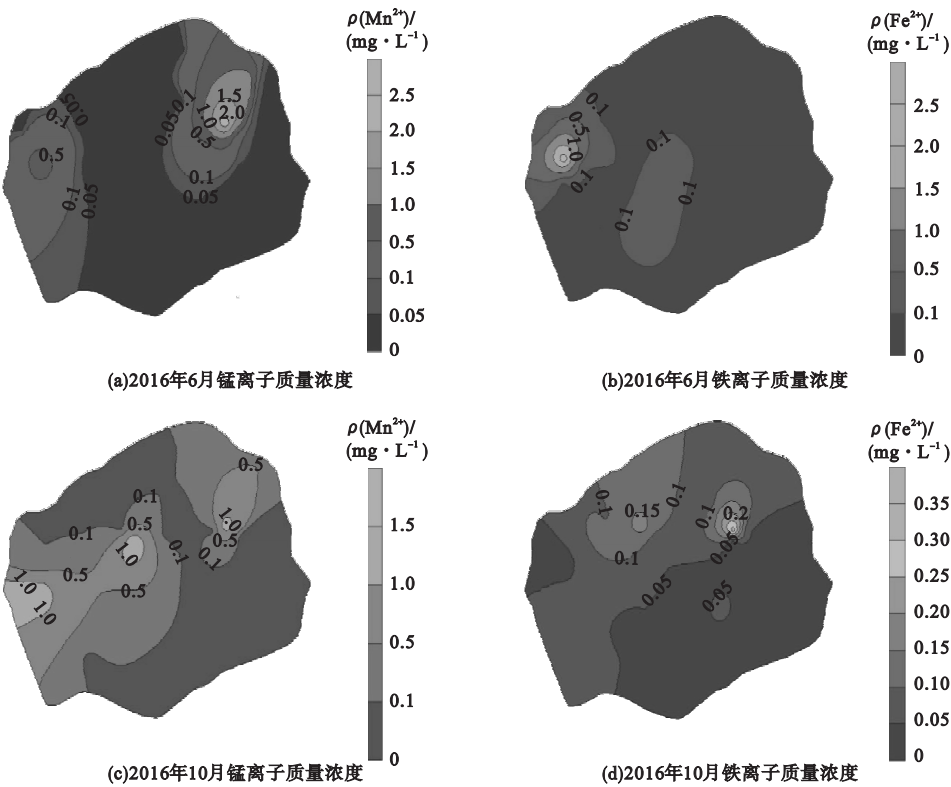


图1 2016年沈阳城区地下水铁、锰离子质量浓度分区图

Fig. 1 Zoning map of iron and manganese ion mass concentration in groundwater of Shenyang city in 2016

1.1 试验

1.1.1 试验 I

笔者通过对沈阳盛京医院滑翔分院地下水采样进行化验,确定了铁离子、锰离子以及铁细菌的质量浓度分别为:9mg/L、1mg/L以及 7.57×10^7 个/L.取含有铁细菌采样回灌水,编号 A;另人工配制相同铁、锰离子质量浓度不含铁细菌的基准溶液进行比对,编号 B.回灌水样配置如下表 1 所示.

表 1 试验 I 回灌水样水质

Table 1 Water quality of rechargeable water samples in experiment I

组别	$\rho(\text{Fe}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mn}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{铁细菌})/(10^7(\text{个} \cdot \text{L}^{-1}))$
A	9	1	7.57
B	9	1	—

1.1.2 试验 II

另采用定量的铁细菌 7.57×10^7 个/L 分别控制以铁离子和锰离子质量浓度为变量进行对比试验,设置 4 组 Mn^{2+} 质量浓度一

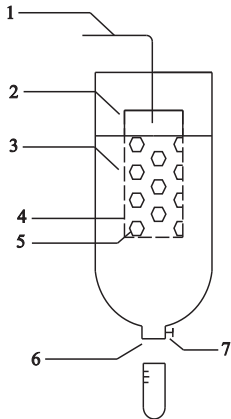
定,不同质量浓度 Fe^{2+} 的水样,编号 C、D、E、F;另设置 4 组 Fe^{2+} 质量浓度一定,不同质量浓度 Mn^{2+} 的水样,编号 X、Y、Z、R. 室内配置回灌水样如表 2 所示.

表 2 试验Ⅱ回灌水样铁、锰离子质量浓度
Table 2 Iron, manganese ion concentration of recharge water sample in experiment II

类型	组别	$\rho(\text{Fe}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mn}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{铁细菌})/10^7(\text{个} \cdot \text{L}^{-1})$
不同质量浓度 Fe^{2+}	C	3	1	7.57
	D	6	1	7.57
	E	9	1	7.57
	F	12	1	7.57
不同质量浓度 Mn^{2+}	X	3	1	7.57
	Y	3	2	7.57
	Z	3	3	7.57
	R	3	4	7.57

1.2 试验装置

室内回灌试验 I、Ⅱ均采用塑料材质土柱,内径为 10 cm,高为 20 cm. 土柱底部设置有出水口,安装标准 1/4 球阀,阀门内粘有防止多孔介质随回灌水流出 的 纱网. 土柱内部填充 15 cm 高根据盛京医院地下勘探地质情况分层灌装而成的多孔介质,并在其中设置铁质模拟回灌井,内径为 5 cm,高为 10 cm,外面包有尼龙网,防止介质回流到模拟回灌井内. 试验装置上部设置为敞口,以便与空气接触. 装置如图 2 所示.



1.进水口;2.模拟回灌井;3.多孔介质填料;4.尼龙包网;
5.回灌井出水孔;6.出水口;7.出水阀门。

图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Test device schematic

1.3 试验方法

步骤 1:将试验装置内壁上涂抹凡士林油,以消除其边壁效应给试验带来的误差. 用多孔介质填料对土柱进行填充,在填充时应同时进行捣实,防止其结构松散影响试验结果. 填料填充高度为 15cm,并将回灌井安置其中,埋深为 8cm.

步骤 2:首先用蒸馏水缓慢使 PVC 土柱内部填料饱和,驱逐出多孔介质内的空气,当填料表面出现一层水膜后,将底部的球阀打开,让蒸馏水流出. 以此方法来使得两个土柱具有相同的回灌初始条件.

步骤 3:进行试验 I. 关闭阀门,使具铁细菌和无铁细菌的回灌水样沿进水口流入回灌井内,直到回灌井内液面逐渐上升至填料表面以下(控制不从表面溢出). 与空气接触 16h 后,打开底部放水球阀,测定平均每秒流出的回灌水试验体积,即水通量.

步骤 4:每日下午 5 时重复步骤 1 至步骤 3,直至出水水通量趋于平稳. 保证每次回灌水温为 13℃,以模拟实际回灌情况.

步骤 5:进行试验Ⅱ. 关闭阀门,分别使各组回灌水样沿进水口流入回灌井内,直到回灌井内液面逐渐上升至填料表面以下(控制不从表面溢出). 与空气接触 16h 后,打开底部放水球阀,测定平均每秒流出的回灌水试验体积,即水通量.

步骤 6:每日下午 5 时重复步骤 1 至步骤 5,直至出水水通量趋于平稳. 次日上午 9 时测得出水水通量. 保证每次回灌水温为 13℃,以模拟实际回灌情况.

2 试验结果分析

2.1 试验 I 结果分析

将试验 I 每日上午 9 时测得出水水通量与时间绘制成折线图,以表征两个模拟回灌井的堵塞情况. 则对比组的试验结果如图 3 所示.

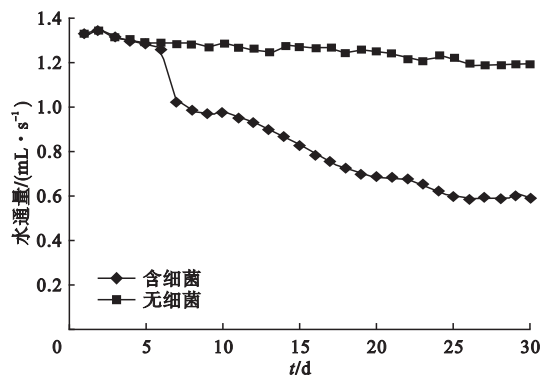
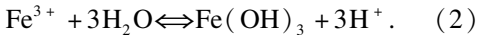


图3 对比组水通量随时间变化规律

Fig.3 The variation of water flux with time

从图3可以看出,在回灌结束时,A、B两组对比试验水通量随时间变化曲线差异显著,A组的回灌水样水通量有明显的下降,而B组的回灌则没有发生明显的堵塞.二者的初始水通量相同,均为1.33 mL/s.但在第30天的回灌周期试验结束时,A组水通量仅为初始时的44%,而B组则为初始时的89%.在第7天时,含铁细菌组的水通量有一次急剧的下降,约降至1.0 mL/s,分析此时可能为多孔介质中截留的铁细菌大量繁殖,并将铁、锰离子大量氧化并粘附在其周围,导致孔隙度减小,水通量急剧下降,发生明显的堵塞.之后水通量稳定下降,于第25天左右趋于平稳,稳定在0.59 mL/s左右.对比两组试验回灌效果,含铁细菌组回灌效果要显著落后于无铁细菌组的回灌效果,这是因为铁细菌是接触性地加速 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,从而引起 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀,催化了化学堵塞^[11].比如说铁细菌中的氧化亚铁硫杆菌为革兰氏阴性化能自养菌,其存在于富含铁元素的环境介质中,可利用低价铁源为自身生长所需能量,形成铁的氢氧化合物沉淀,反应式为



铁细菌是在环境中广泛存在的微生物,其种类也有很多,这类细菌有促进铁离子氧化的作用.而这种作用主要体现在两个方面:一是加快各种元素在细胞内的富集,生成活性较强的化合物;二则为其自身可以产生并

释放一种可以催化铁氧化反应的酶,从而促进了铁氧化的过程.因此,铁细菌可以在很大的程度上加快铁氧化的反应,可使铁氧化的速率提升数倍^[12].铁离子被铁细菌氧化,并生成沉淀后从铁细菌体中排出,并且这些沉淀会聚集粘在菌体周围的菌丝上,形成棕色的黏泥^[13-15].因此,含铁细菌的回灌水试验组堵塞发生的时间早,堵塞程度更加剧烈.铁细菌的存在大大加快了氧化速率,其氧化铁能力要比单纯的化学氧化高出数倍,从而加剧了堵塞程度,降低回灌效果.

试验中回灌水样沿进水口流入回灌井内,并与空气接触16h后进行排空,主要是模拟了实际工程中水源热泵回灌过程,回灌水在于空气接触后靠重力下落,产生扰动回带入大量的氧气,而作为化能自养需氧型微生物的铁细菌,可以利用回灌水之中的二价铁离子和氧气生成沉淀物,降低土壤多孔介质孔隙度,从而影响回灌效率^[16-20].从试验数据中可以发现,基于相同的化学堵塞条件下,铁细菌的加入对堵塞的影响十分明显.

2.2 试验Ⅱ结果分析

将试验Ⅱ每日上午9时测得出水水通量与时间绘制成折线图,以表征每个模拟回灌井的堵塞情况.不同铁离子质量浓度的回灌水通量随时间变化规律如图4所示.

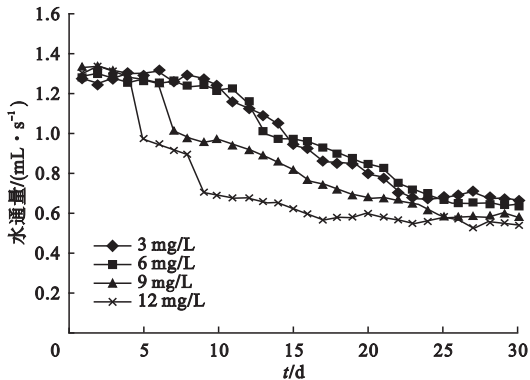


图4 不同铁离子质量浓度的回灌水通量与时间变化规律

Fig.4 The variation of water flux with time in recharge water with different iron concentration

由试验数据可知,在控制 Mn^{2+} 定量的条件下,得到图 4 中的 4 组试验的曲线变化规律. 4 组试验初始水通量分别是 1.28 mL/s, 1.29 mL/s, 1.33 mL/s 和 1.30 mL/s. 由图 4 可知,4d 所有试验组别的水通量都处于稳定,波动较为缓慢. 随后 F 组水通量于第 5 天发生骤降,由前一天的 1.24 mL/s 减少至 0.95 mL/s,后逐步减少并于试验进行的第 8 天再次大幅到降低,达到 0.71 mL/s,之后水通量变化呈现规律化状态,稳步降低,约第 18 天左右进入稳态,试验结束时水通量为 0.54 mL/s. 另一组水通量变化明显的是 E 组,该组别水通量于第 7 天发生骤降,由前一天的 1.22 mL/s 降至 1.01 mL/s,随后水通量稳态减少,直到试验结束达到 0.58 mL/s. D 组别发生的水通量骤降的时间是第 13 天,骤降发生后水通量由前一天的

1.22 mL/s 降到 1.02 mL/s,随后水通量变化较为平稳,直到试验结束达到 0.65 mL/s. C 组别发生水通量突变的时间是第 15 天,水通量由前一天的 1.08 mL/s 降低至 0.98 mL/s,后进入稳态. 4 组试验的水通量随时间变化均呈下降趋势,结束时水通量分别为初始水通量的 52%, 50%, 44% 和 42%. 由此可以看出,随着二价铁质量浓度的增加,堵塞程度也随之加剧. 4 组的堵塞时间分别为第 15 天,第 13 天,第 7 天和第 5 天,由此可推出回灌水中随着铁离子质量浓度的增加,发生明显堵塞的时间提前. 尤其铁质量浓度为 12 mg/L 时,于第 9 天发生二次明显堵塞. 发生明显堵塞时的水通量比最大水通量,分别下降了 28%, 23%, 24% 和 27%. 平均为最大水通量的 1/4. 不同铁离子质量浓度回灌水各时间点水通量数值如表 3 所示.

表 3 不同铁离子质量浓度回灌水各时间点水通量的值

回灌水样	初始时水通量/ ($mL \cdot s^{-1}$)	堵塞发生的 时间/d	结束时水通量/ ($mL \cdot s^{-1}$)	堵塞发生时的 水通量/($mL \cdot s^{-1}$)	堵塞发生时水通 量下降比例/%	结束时水通量 下降比例/%
C	1.28	15	0.67	0.95	28	45
D	1.29	13	0.65	1.01	23	46
E	1.33	7	0.58	1.02	24	51
F	1.3	5	0.54	0.98	27	58

不同锰离子质量浓度的回灌水通量随时间变化规律如图 5 所示.

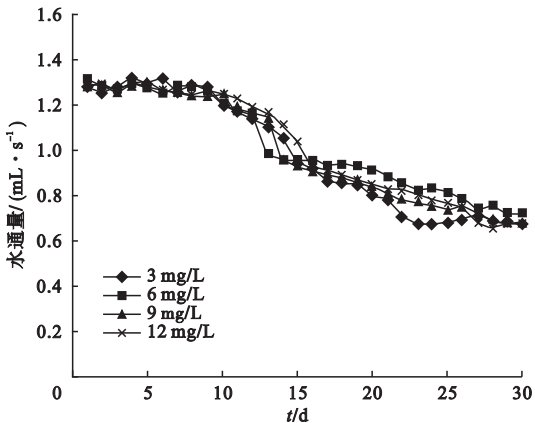


图 5 不同锰离子质量浓度的回灌水通量与时间变化规律

Fig. 5 The variation of water flux with time in recharge water with different manganese ion concentration

观察不同锰离子质量浓度的回灌水通量,曲线变化情况远不如不同铁离子回灌水通量变化剧烈,4 组对比试验的数据差异性不是很大,具备良好的相似性. 在控制 Fe^{2+} 质量浓度的前提下,将 Mn^{2+} 质量浓度作为控制变量分别设置 X、Y、Z、R 组进行对比. 从数据分析得知,4 组对比试验发生明显堵塞现象的时间非常相近,分别为第 15 天,第 13 天,第 14 天和第 16 天,并且结束时水通量分别是初始水通量的 52%, 55%, 52%, 52%. 无论是从发生明显堵塞时间还是水通量整体降低比率,都具有高度相似性(见表 4).

表4 不同锰离子质量浓度回灌水各时间点水通量的值

Table 4 The values of water flux at different time points in recharge water with different manganese ions concentration						
回灌水样	初始时水通量/ (mL·s ⁻¹)	堵塞发生的 时间/d	结束时水通量/ (mL·s ⁻¹)	堵塞发生时的水 通量/(mL·s ⁻¹)	堵塞发生时水通 量下降比例/%	结束时水通量 下降比例/%
X	1.28	15	0.67	0.95	28	52
Y	1.32	13	0.72	0.98	26	55
Z	1.3	14	0.68	0.95	27	52
R	1.28	16	0.67	0.93	28	52

由表4可以推断出,在铁离子定量的条件下,锰离子质量浓度的增加并不会加剧回灌堵塞.锰氧化物在生物膜上的积累速度要小于铁氧化物的积累速度,也正因为锰离子氧化速度慢从而降低了对堵塞的影响.

3 结 论

(1)回灌水中铁细菌的存在会对铁锰离子的氧化产生影响,不仅会使氧化反应提前,还会加剧氧化程度,使得回灌效率明显降低.沈阳盛京医院地下水源热泵回灌堵塞严重,是因为回灌水中铁细菌的存在加剧了铁锰离子氧化,铁细菌对铁锰离子的生物化学行为产生的氧化物和菌类附着在过滤器及其周围的空隙中,降低孔隙度,引发严重堵塞.

(2)铁细菌对二价铁离子影响显著,其堵塞程度会随着Fe²⁺浓度的增加而更加剧烈,但对Mn²⁺的影响微小,堵塞程度也不会随着Mn²⁺质量浓度的变化而明显变化.针对铁锰离子质量浓度较高的地下水源热泵工程,铁细菌主要作用于铁离子,且会随着铁离子的浓度改变其氧化速率和程度,从而影响热泵工程回灌效率.

(3)在地下水源热泵工程中,降低回灌水中铁离子的质量浓度,可以有效防治地下水中铁锰离子质量浓度较高的地区(沈阳城区)的水源热泵回灌堵塞问题.

参考文献

[1] 贾惠艳,孙雨,贺斌.地下水源热泵回灌技术研究[J].建筑节能,2012,40(6):50-53.

[2] 徐国芳,马致远,周鑫,等.地压型热储流体尾水回灌化学堵塞机理研究[J].工程勘察,2013,41(7):41-49.

[3] 李璐,卢文喜,杜新强,等.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.

[4] 常明.地热回灌井回灌效果降低原因分析及解决办法[J].石化技术,2016,23(9):263.

[5] 孟祥菲.地下水位波动带铁锰质量浓度变化规律研究:以沈阳黄家水源地为例[D].长春:吉林大学,2015.

[6] 阎葆瑞,董桂兰.人工回灌地下水微生物生态与水质[J].地质论,1985,31(1):70-76.

[7] 郑磊,马致远,郑会菊,等.西安与咸阳孔隙型热储尾水回灌塞机理对比[J].水资源保护,

(JIA Huiyan,SUN Yu,HE Bin. Recharge technology of groundwater source heat pump[J]. Journal of building energy saving, 2012, 40(6):50-53.)

(XU Guofang,MA Zhiyuan,ZHOU Xin,et al. Study on the mechanis for the recharging of geopressed thermal water[J]. Journal of engineering investigation,2013,41(7):41-49.)

(LI Lu,LU Wenxi,DU Xinqiang,et al. Experimental study on aquifer plugging during artificial recharge[J]. Yellow river, 2010, 32(6):77-78.)

(CHANG Ming. Geothermal recharge wells recharge effect of reducing causes and solutions[J]. Petrochemical technology, 2016, 23(9):263.)

(MENG Xiangfei. Study on the regularity of mass flux concentration of iron in variations of groundwater table:a case study of huangjia river in Shenyang[D]. Changchun:Jilin University,2015.)

(YAN Baorui,DONG Guilan. Ecological and water quality of artificial rechargeable groundwater microorganism[J]. Geological theory, 1985,31(1):70-76.)

(YAN Baorui,DONG Guilan. Ecological and water quality of artificial rechargeable groundwater microorganism[J]. Geological theory, 1985,31(1):70-76.)

- 2015,31(3):40-45.
(ZHENG Lei, MA Zhiyuan, ZHENG Huiju, et al. Comparison of clogging mechanisms of pore-type heat storage tail water recharge in Xi'an and Xianyang[J]. Water resources protection,2015,15(3):40-45.)
- [8] SRINCK-PFEIFFER, SRAGUSA, PSZTAJNBOK, et al. Inter relationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) well[J]. Water research,2000,34(7):2110-2118.
- [9] PAVELIC P, DILLON P J, BARRY K E, et al. Water quality effects on clogging rates during reclaimed water ASR in a carbonate aquifer[J]. Journal of hydrology,2007,334(1/2):1-16.
- [10] 潘俊,姜明岑,冯许阳. 地下水中铁锰离子对地下水地源热泵回灌影响的试验研究[J]. 暖通空调,2014,44(8):21-23.
(PAN Jun, JIANG Mingcen, FENG Xuyang. Experiment on influence of ferrous and manganese ions in groundwater on recharge of groundwater source heat pump system[J]. HV & AC,2014,44(8):21-23.)
- [11] 马玖辰,郭春梅,张志刚. 咸水层储能回灌溶液盐度变化对含水介质渗透性能的影响[J]. 可再生能源,2013,31(4):12-18.
(MA Jiuchen, GUO Chunmei, ZHANG Zhigang. The effect of salinity variation of saline aquifer energy storage reinjection on water-bearing medium permeability[J]. Renewable energy resources,2013,31(4):12-18.)
- [12] 徐轶群,顾园园,姚婷,等. 铁细菌胞外多聚物对铁矿物的调控形成及其环境意义[J]. 岩石矿物学,2013,32(6):782-788.
(XU Yiqun, GU Yuanyuan, YAO Ting, et al. Regulation formation of iron minerals by iron bacteria/EPS and its environmental significance[J]. Rock and mineralogy,2013,32(6):782-788.)
- [13] 齐巍,王向东,蒋文举,等. 铁锰氧化细菌在环境污染治理中的应用[J]. 环境污染治理技术与设备,2004,5(6):76-79.
(QI Wei, WANG Xiangdong, JIANG Wenju, et al. The application of ferromanganese-oxidizing bacteria in environmental pollution control[J]. Techniques and equipment for environmental pollution control,2004,5(6):76-79.)
- [14] 王洋,张晓健,陈雨乔,等. 给水管网管壁铁细菌生长特性模拟及控制对策研究[J]. 环境科学,2009,30(11):3293-3299.
(WANG Yang, ZHANG Xiaojian, CHEN Yuchao, et al. Growth characteristics and control of iron bacteria on cast iron in drinking water distribution systems[J]. Environmental science,2009,30(11):3293-3299.)
- [15] 陈建生,王婷,陈茜茜,等. 鄂尔多斯自流盆地地下水来源争议问题讨论[J]. 地质论评,2013,59:900-908.
(CHEN Jiansheng, WANG Ting, CHEN Qianqian, et al. Discussion on controversial issues of groundwater source in ordos basin[J]. Geological review,2013,59:900-908.)
- [16] XU S, RYBACH L. Utilization of shallow resources performance of direct system in Beijing[J]. Geotherm. resour. council trans,2003,27(1):115-118.
- [17] PAKSOY H O, ANDERSSON O, ABACI S, et al. Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in an aquifer[J]. Renewable energy,2000,19(1):117-122.
- [18] MEDIHALA P G, LAWRENCE J R, SWERHONE G D, et al. Effect of pumping on the spatio-temporal distribution of microbial communities in a water well field[J]. Water research,2012,46(4):1286-1300.
- [19] MEDIHALA P G, LAWRENCE J R, SWERHONE G D, et al. Spatial variation in microbial community structure, richness, and diversity in an alluvial aquifer[J]. Canadian journal of microbiology,2012(58):1135-1151.
- [20] PAVELIC P, DILLON P J, BARRY K E, et al. Hydraulic evaluation of aquifer storage and recovery (ASR) with urban storm-water in a brackish limestone aquifer[J]. Hydrogeology journal,2006,14(8):1544-1555.