

文章编号:1672-6561(2012)04-0068-06

## 咸水体修复过程中含水层物理堵塞试验研究

张淑慧<sup>1</sup>, 郑西来<sup>1,2</sup>, 单蓓蓓<sup>1</sup>, 刘玉红<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学  
海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:**针对山东半岛大沽河下游咸水体修复过程中含水介质物理堵塞的问题,采用室内模拟试验,系统研究了悬浮物质量浓度和粒径对咸水体含水介质物理堵塞的影响,并通过测定人工回灌过程中渗透系数的时空变化,定量分析和评价含水介质物理堵塞的机理和程度。结果表明:悬浮物质量浓度和粒径是影响含水介质渗透性的关键因素;在悬浮物质量浓度分别为 50、100、200 mg · L<sup>-1</sup> 的条件下,含水介质的等效渗透系数分别为其初始值的 38%、20% 和 10%;随着注入悬浮物质量浓度、注入时间的增加和入渗深度的减小,相对渗透系数不断减小;悬浮物的粒径越小,迁移距离越大,造成渗透系数下降区的厚度越大;随着悬浮物粒径的不断增大,粒径大的颗粒容易被截留在表层,造成表层渗透系数下降幅度增大,其余各层渗透系数下降幅度随深度增加而减小。

**关键词:**含水层;咸水体;修复;物理堵塞;悬浮物;渗透系数;粒径;山东半岛

**中图分类号:**P641.2;P342<sup>+</sup>.4 **文献标志码:**A

## Test Study on Physical Clogging of Aquifer During the Restoration of Saline Water Mass

ZHANG Shu-hui<sup>1</sup>, ZHENG Xi-lai<sup>1,2</sup>, SHAN Bei-bei<sup>1</sup>, LIU Yu-hong<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

**Abstract:** In order to solve the physical clogging problem of aquifer in Dagou River downstream during the restoration of saline water mass, effect of mass concentration and particle size of suspended matter on the physical clogging of aquifer in saline water mass was systematically studied with field simulated test; the temporal and spatial variations of permeability coefficient during the artificial recharge were measured to evaluate the degree and mechanism of physical clogging quantificationally. The results showed that mass concentration and particle size of suspended matter were the key factors for penetrability of aquifer; when the mass concentrations of suspended matter were 50, 100, 200 mg · L<sup>-1</sup>, the equivalent permeability coefficients of aquifer were 10%, 20% and 38% of the initial value, respectively; the relative permeability coefficient decreased gradually with the increase of recharge time and mass concentration of suspended matter and the decrease of infiltration depth; the smaller the particle size of suspended matter was, the longer the migration distance was, the larger the thickness of area with permeability coefficient descending was; with the increase of particle size of suspended matter, the suspended matter was easily intercepted by the surface layer of sand column, so that the

收稿日期:2012-03-15

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201001075);国家自然科学基金项目(41172209)

作者简介:张淑慧(1986-),女,山东济宁人,理学硕士研究生,E-mail:zhanghui2533658@126.com。

decrease amplitude of permeability coefficient of surface layer increased, and the decrease amplitude of other layers decreased with the increase of depth.

**Key words:** aquifer; saline water mass; restoration; physical clogging; suspended matter; permeability coefficient; particle size; Shandong Peninsula

## 0 引言

含水层存储和再利用(ASR)是一种地下水人工补给与再利用的技术,在世界上许多国家都有井和池塘的人工回灌工程。在沿海地区,人类尝试把“抽咸注淡”的方法用于海水入侵控制和地下咸水体的治理。但是,实践证明,在人工回灌工程实施中,注入水和目的含水层不匹配容易导致回灌系统严重堵塞。这种堵塞会出现在人工回灌工程开始后的几天(甚至几分钟),从而使注水压力增加、注水速率(效率)明显降低,甚至造成人工回灌工程的彻底失败。

含水介质堵塞问题是阻碍人工回灌技术向实践层面推广的关键因素。回灌堵塞一般分为3种:物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞<sup>[1-5]</sup>。其中,物理堵塞是最常见的堵塞类型。很多学者基于不同的试验方法在堵塞的形成机理、影响因素与发展过程等方面取得了一定的研究成果。陈思宁等研究了人工回灌过程中的悬浮物堵塞问题,利用3组不同悬浮物质量浓度的回灌水进行室内砂柱回灌试验<sup>[6]</sup>。黄修东等采用砂柱,在室内模拟井灌过程中注水井周围砂层的堵塞过程,认为悬浮物填充砂层空隙引起了物理堵塞<sup>[7]</sup>。黄大英通过室内模拟试验探讨了不同条件下淤层厚度的形成及其对人工回灌效果的影响<sup>[8]</sup>。Siriwardene等基于物理堵塞的室内柱试验,分别在定水头和变水头的情况下通入不同质量浓度的悬浮物,发现物理堵塞主要由小于6  $\mu\text{m}$ 的颗粒迁移造成的<sup>[9]</sup>。Katarzyna通过室内砂柱淋滤的方式进行物理堵塞微观结构和堵塞速率的影响因素室内试验<sup>[10]</sup>。Baghdikian等研究在不同质量浓度的悬浮物等条件下注入单一的黏土矿物后含水介质的堵塞情况,通过渗透系数的减小和出水悬浮物质量浓度的变化来反映堵塞的程度<sup>[11]</sup>。McDowell-Boyer等通过试验表明黏颗粒物的释放和截留能明显改变介质的渗透性,颗粒物和含水介质之间的物理化学力影响着小颗粒物的迁移,静电吸引力和范德华力决定了小颗粒物的吸附作用<sup>[12]</sup>。

国内外学者还没有专门就咸水含水层修复过程中发生的物理堵塞问题进行过研究。笔者拟针对山东半岛大沽河下游咸水体修复过程中含水介质物理

堵塞问题,现场采集样品,通过模拟试验,系统研究悬浮物质量浓度和粒径对咸水体含水介质物理堵塞的影响,并通过测定人工回灌过程中渗透系数的时空变化,定量分析和评价含水介质物理堵塞的机理和程度,为地下咸水体修复工程提供依据。

## 1 试验装置和方法

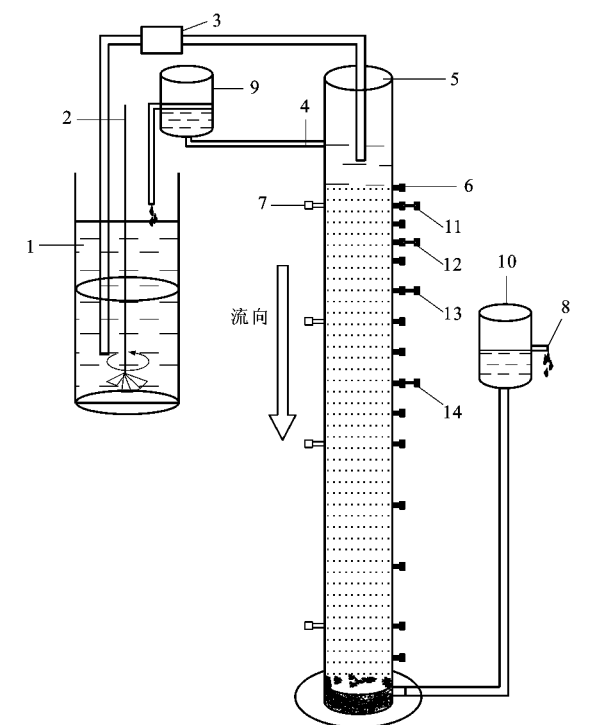
### 1.1 装置与材料

试验装置由有机玻璃柱、蠕动泵、供水箱(有搅拌器)、上游和下游控水头装置等组成。有机玻璃柱高100 cm,内径11 cm。柱体左侧分布有16个测压孔,1~4号测压孔间距均为3 cm,4~10号测压孔间距均为5 cm,10~15号测压孔间距均为3 cm。左侧分布有4个取样口,1号与2号取样口之间的距离为19 cm,2号与3号取样口之间的距离为20 cm,3号与4号取样口之间的距离为30 cm。试验装置见图1。

辅助器具包括秒表、Lead-2蠕动泵、量筒、烧杯、天平、分光光度计、MS2000激光粒度仪、X-衍射仪、离子色谱分析仪和电导率仪。

试验材料包括供试含水介质、悬浮物和水样。含水介质是采集于大沽河下游地区咸水含水层上层的砂样,砂样的 $D_{50}$ 为0.267 mm, $D_{10}$ 为0.133 mm,属于细砂,砂样的粒径分布曲线见图2。其中, $D_{50}$ 为样品累计粒度分布百分数达到50%时所对应的粒径; $D_{10}$ 为样品累计粒度分布百分数达到10%时所对应的粒径。根据X射线衍射分析,含水介质中石英含量(质量分数,后文同)为85.7%,长石为6.4%,白云石为2.1%,角闪石为0.1%,黏土矿物为3.0%。其中,黏土矿物主要有伊利石、高岭石、绿泥石和蒙脱石,含量分别为56.4%、17.9%、20%和5.7%。

采集当地的雨洪水,分别通过静置和过滤,得到悬浮物;经过烘干后,过0.038 mm孔径的筛,取得粒径小于0.038 mm的悬浮物;分别配置成质量浓度为50、100、200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的悬浮物,用于研究悬浮物质量浓度对物理堵塞的影响。然后,将粒径小于0.038 mm的悬浮物进行不同粒径的分级提取,可以得到3种不同粒径的悬浮颗粒;利用MS2000激光粒度仪对分级提取的样品进行粒度测定,测得其



1—回灌液;2—搅拌棒;3—蠕动泵;4—溢流口;5—进水口;6—测压孔;7—取样孔;8—出水口;9—上游控水头装置;10—下游控水头装置;11—渗透系数  $K_1$  观测孔;12—渗透系数  $K_2$  观测孔;13—渗透系数  $K_3$  观测孔;14—渗透系数  $K_4$  观测孔

图1 试验装置

Fig. 1 Experiment Equipment

$D_{50}$  分别为 1、2、2.6、9.9  $\mu\text{m}$ , 从而研究不同颗粒粒径对物理堵塞的影响。饱水采用的咸水和注入采用的淡水主要离子质量浓度见表 1。

## 1.2 试验方法

本试验主要研究不同悬浮物质量浓度和粒径对

表 1 供试水样中主要离子质量浓度及盐度

Tab. 1 Mass Concentrations of Main Ions and Salinization of Water Samples

水样类型	主要离子质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )								盐度/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{HCO}_3^-$	
咸水	755.4	49.3	41.02	220.8	1 364.0	148.5	35.8	394.7	3 010
淡水	13.2	2.1	3.60	42.3	15.9	28.2	23.6	97.6	230
出水样	14.2	2.3	4.10	41.3	16.3	27.2	22.6	98.6	230

保持渗流柱上、下游的水头差不变,待砂柱体的初始渗透系数稳定后,用 Lead-2 蠕动泵将悬浮物以一定的流量从渗流柱上端通入,并保证有少量的悬浮物从溢流口流出(定水头);连续测定所有测压管水头值,由达西定律可以分段计算渗透系数  $K$ ,其计算公式为

$$K = \frac{4Q\Delta x}{\pi d^2 \Delta h} \quad (1)$$

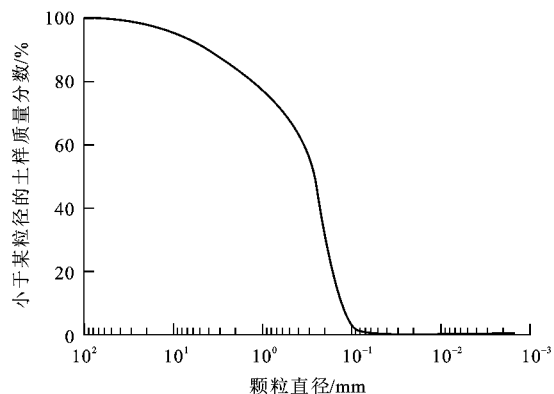


图 2 供试砂样的粒径分布曲线

Fig. 2 Particle Size Distribution Curve of Sand Sample

含水介质堵塞产生的影响。2 组试验的方法和步骤完全相同,只是注入悬浮物质量浓度不同。

将风干松散、均匀的砂样分层装入玻璃柱;每次装入一定质量的砂样,等重度将其压实,逐步完成整个装柱过程;从底部向砂柱内缓慢注入咸水;完全饱水后,继续以缓慢的速度从下向上渗流;持续渗流 1~2 d,以保证砂柱内没有气泡,测得砂体的孔隙度为 28%~30%,土粒质量比为 2.67。

打开供水装置的搅拌器,使水箱中悬浮物质量浓度保持均匀;在回灌液中加入少量苯酚溶液,消除生物堵塞的影响。利用蠕动泵供水,同时打开溢流管,每隔一段时间(开始间隔为 0.5 h,之后为 2 h)读取各测压管的水头值;连续测定淡水驱替咸水过程中出水电导率、盐度变化,直到盐度变化趋于稳定为止。盐度稳定后测得出水样中阴、阳离子的质量浓度见表 1。

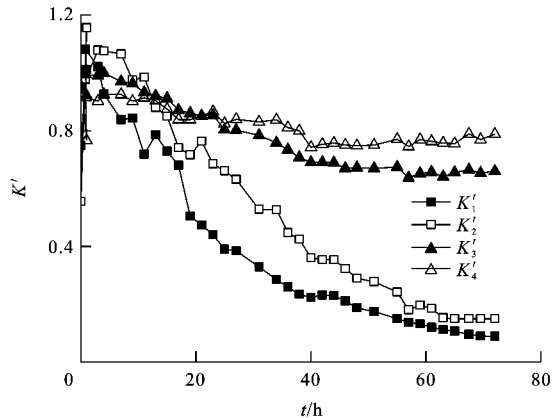
式中: $Q$  为出水口的流量; $\Delta x$  为任意两测压管间的距离; $\Delta h$  为相应两测压管间水头差; $d$  为砂柱内径。

笔者采用不同时段相对渗透系数  $K'$  (渗透系数  $K$  与该层位初始渗透系数  $K_0$  之比)来刻画渗透性的变化,由此来反映含水介质的堵塞程度。另外,由于物理堵塞主要发生在入渗的前段,所以重点讨论 0~3、3~9、9~17、17~32 cm 段渗透性变化,各段的相对渗透系数分别记作  $K'_1 \sim K'_4$ 。

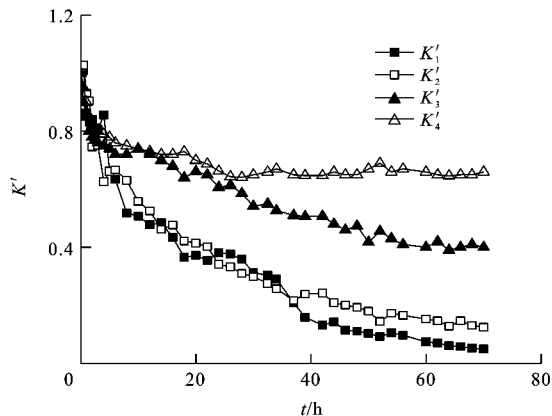
## 2 结果与讨论

### 2.1 悬浮物质量浓度对含水介质渗透性的影响

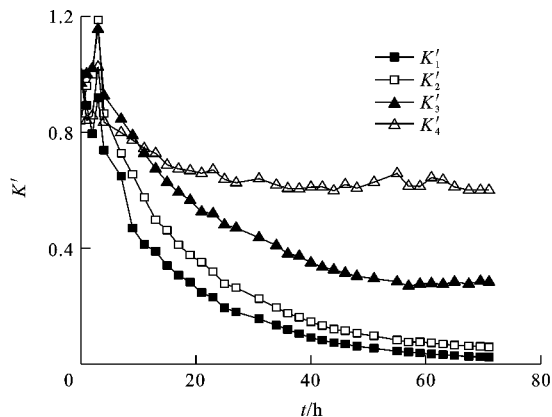
(1) 渗透系数变化。根据现场堵塞情况,注入质量浓度分别为 50、100、200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的悬浮物,测定的含水介质各层渗透系数变化见图 3。从图 3 可以



(a) 悬浮物质量浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$



(b) 悬浮物质量浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$



(c) 悬浮物质量浓度为  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

图3 不同悬浮物质量浓度下相对渗透系数随注入时间的变化

Fig. 3 Changes of Relative Permeability Coefficient with Recharge Time for Different Mass Concentrations of Suspended Matters

看出,在不同质量浓度悬浮物注入过程中,各段的相对渗透系数  $K'_1 \sim K'_4$  都是逐渐降低;在注入初期,各层渗透性下降幅度较大,但随着注入时间  $t$  的延长,渗透性下降幅度减小,并逐渐趋于稳定,  $K'_1 \sim K'_4$  的下降低幅度依次减小。当注入悬浮物质量浓度相同时,越接近表层,渗透系数下降幅度也越大;当注入悬浮物质量浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $K'_1 \sim K'_4$  最后分别下降到初始值的 10%、15%、62%、78%,即  $K'_1 < K'_2 < K'_3 < K'_4$  [图 3(a)]。另外,随着注入悬浮物质量浓度由  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加到  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,各段的渗透系数降低幅度明显增大。总之,随着悬浮物注入时间的增加以及入渗深度的减小,相对渗透系数明显减小。

(2) 等效渗透性的变化。由于悬浮物对含水介质的堵塞作用,所以砂柱的渗透性从上到下逐渐增大。假设其渗透性呈阶梯状变化,整个渗透柱体等效渗透系数与各层渗透系数的关系可以表示为

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n M_i / K_i} \quad (2)$$

式中:  $\bar{K}$  为渗透柱体的等效渗透系数;  $M_i$  为第  $i$  层砂层厚度;  $K_i$  为第  $i$  层渗透系数;  $n$  为砂层层数。

根据实测的各段渗透系数和相应砂层厚度,由式(2)可以计算出砂柱整体的等效渗透系数。采用不同时段相对等效渗透系数  $\bar{K}'$  (等效渗透系数  $\bar{K}$  与初始等效渗透系数  $\bar{K}_0$  之比)来刻画砂柱整体渗透性的变化,变化曲线见图 4。

由图 4 可以得出,在悬浮物注入初期,砂柱的等效渗透系数下降幅度较大;当注入 60 h 后,其下降幅

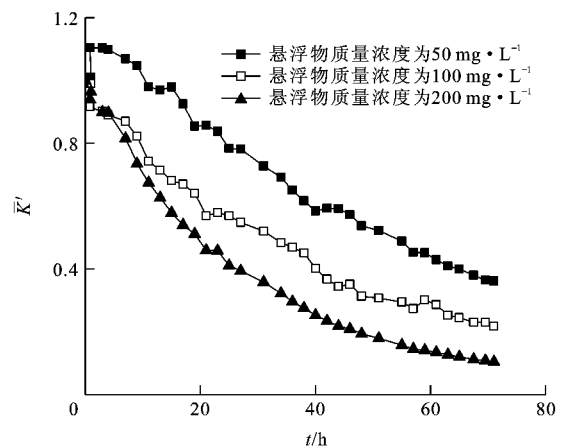


图4 不同悬浮物质量浓度下相对等效渗透系数随注入时间的变化

Fig. 4 Changes of Relative Equivalent Permeability Coefficient with Recharge Time for Different Mass Concentrations of Suspended Matters

度减小,并趋于平稳。在悬浮物质量浓度分别为 50、100、200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下,当试验持续 70 h 后,含水介质的等效渗透系数分别为其初始值的 38%、20%、10%。回灌悬浮物质量浓度越大,砂柱等效渗透系数降低的幅度越大,造成的堵塞也越严重。

## 2.2 悬浮物粒径对含水介质渗透性的影响

(1) 渗透性的变化。当悬浮物质量浓度为 100  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,选择  $D_{50}$  分别为 1.2、2.6、9.9  $\mu\text{m}$  的悬浮物进行回灌试验,分别测定土柱的 0~3、3~9、9~17、17~32 cm 段的相对渗透系数,从而可以得到各段的渗透性变化(图 5)。

从图 5 可以看出,在注入试验初期,各层的相对渗透系数下降幅度较大;随着回灌时间的延长,相对渗透系数下降幅度减小,并趋于稳定。在悬浮物粒径为 1.2  $\mu\text{m}$  的条件下,试验结束时, $K'_1 \sim K'_4$  分别约为初始值的 5%、12%、30%、60%, $K'_1 \sim K'_3$  下降幅度较大。在悬浮物粒径为 2.6  $\mu\text{m}$  的条件下, $K'_1$ 、 $K'_2$  明显下降,最后分别约为初始值的 5%、30%;当试验持续 20 h 后, $K'_3$  和  $K'_4$  基本趋于稳定,最后分别为初始值的 60%、65%。在悬浮物粒径为 9.9  $\mu\text{m}$  的条件下, $K'_1 \sim K'_4$  的下降幅度有很大差别;在 20 h 之前, $K'_1$  有一个急剧的下降区,随后趋于平稳,最终约为初始值的 5%; $K'_2$  最后为初始值的 50%左右,而  $K'_3$  和  $K'_4$  变化不大,最终约为初始值的 80%、85%。

在这组试验中,表层相对渗透系数  $K'_1$  最终的下降值基本相同, $K'_2 \sim K'_4$  的下降幅度随着悬浮物粒径的增大而增大。这说明悬浮物粒径越小,回灌过程中颗粒物迁移的距离越远,渗透系数明显下降的深度越大,即砂柱深层渗透系数的下降幅度越大。反之,当悬浮物粒径较大时,容易被截留在表层,仅造成表层渗透系数有大幅度的下降,对深层区域的渗透系数影响较小,故其下降幅度也较小。

(2) 等效渗透性的变化。假设其渗透性呈阶梯状变化,整个渗透柱体的等效渗透系数可由式(2)计算得出,相对等效渗透系数的变化曲线见图 6。

从图 6 可以看出,当悬浮物  $D_{50}$  为 1.2  $\mu\text{m}$  时,砂柱整体渗透系数降低的幅度最大,最终约为其初始值的 10%。悬浮物的粒径越小,砂柱等效渗透系数下降越明显。当悬浮物粒径较大时,其颗粒物被截留在表层,造成砂柱等效渗透系数的下降幅度较小,因此对整个砂柱内部的渗透性影响较小。

## 3 结 语

(1) 在回灌试验初期,砂柱各层渗透性下降幅度

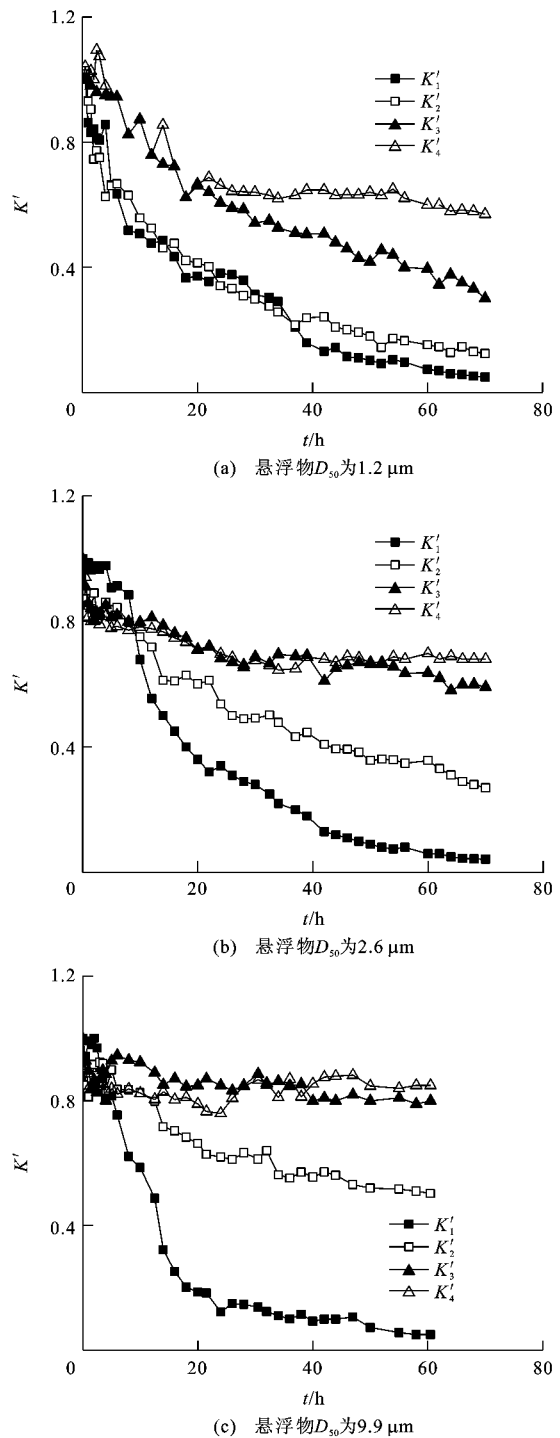


图 5 不同悬浮物粒径下相对渗透系数随注入时间的变化

Fig. 5 Changes of Relative Permeability Coefficient with Recharge Time for Different Particle Sizes of Suspended Matters

较大,随着悬浮物注入时间的延长,渗透性下降幅度减小,并趋于稳定。具体来说,当注入悬浮物质量浓度为 50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,各段的相对渗透系数  $K'_1 \sim K'_4$  分别下降到初始值的 10%、15%、62%、78%。随着注入

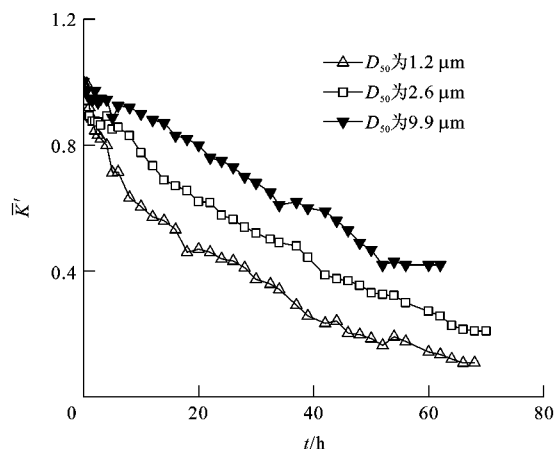


图6 不同悬浮物粒径条件下相对等效渗透系数随注入时间的变化

Fig. 6 Changes of Relative Equivalent Permeability Coefficient with Recharge Time for Different Particle Sizes of Suspended Matters

悬浮物质量浓度由  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加到  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 以及注入时间的增加和入渗深度的减小, 相对渗透系数不断减小。

(2)在悬浮物质量浓度分别为  $50$ 、 $100$ 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下, 含水介质的等效渗透系数分别为其初始值的  $38\%$ 、 $20\%$  和  $10\%$ 。回灌悬浮物质量浓度越大, 砂柱等效渗透系数降低的幅度越大, 造成的堵塞越严重。

(3)悬浮物粒径影响试验中, 表层相对渗透系数  $K'_1$  最终的下降值基本相同,  $K'_2 \sim K'_4$  的下降幅度随着悬浮物粒径的增大而减小。悬浮物粒径越小, 迁移距离越大, 造成渗透系数下降区的厚度越大; 随着悬浮物粒径的不断增大, 粒径大的颗粒容易被截留在表层, 造成表层渗透系数下降幅度增大, 而其余各层的渗透系数下降幅度随深度增加而减小。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] VIGNESWARAN S, RONILLO B, SUAZO R B. A Detailed Investigation of Physical and Biological Clogging During Artificial Recharge[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1987, 35(1/2): 119-140.
- [2] DE VRIES J. Soil Filtration of Wastewater Effluent and the Mechanism of Pore Clogging[J]. Journal of Water Pollute Control Federation, 1972, 44(4): 565-573.
- [3] 王子佳, 杜新强, 冶雪艳, 等. 城市雨水地下回灌过程中悬浮物表面堵塞规律[J]. 吉林大学学报: 地球科学

版, 2012, 42(2): 492-498.

WANG Zi-jia, DU Xin-qiang, YE Xue-yan, et al. Suspended Solid Surface Clogging During Urban Stormwater Groundwater Recharge[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(2): 492-498.

- [4] 路莹, 杜新强, 迟宝明, 等. 地下水人工回灌过程中多孔介质悬浮物堵塞实验[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 448-454.

LU Ying, DU Xin-qiang, CHI Bao-ming, et al. The Porous Media Clogging Due to Suspended Solid During the Artificial Recharge of Groundwater[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 448-454.

- [5] 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 Xin-qiang, YE Xue-yan, LU Ying, et al. Advances in Clogging Research of Artificial Recharge[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(9): 973-980.

- [6] 陈思宁, 石军, 徐洁, 等. 室内人工回灌试验中几个问题的探讨[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 41-43.

CHEN Si-ning, SHI Jun, XU Jie, et al. Discussion on Several Problems in Artificial Recharge Experiment[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 41-43.

- [7] 黄修东, 束龙仓, 刘佩贵, 等. 注水井回灌过程中堵塞问题的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 430-434.

HUANG Xiu-dong, SHU Long-cang, LIU Pei-gui, et al. Experimental Study on Clogging of Recharge Well[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 430-434.

- [8] 黄大英. 淤堵对人工回灌效果影响的试验研究[J]. 北京水利科技, 1993(1): 24-31.

HUANG Da-ying. Research on Clogging Effect on Artificial Recharge of Groundwater[J]. Beijing Hydraulic Science and Technology, 1993(1): 24-31.

- [9] SIRIWARDENE N R, DELETIC A, FLETCHER T D. Clogging of Stormwater Gravel Infiltration Systems and Filters: Insights from a Laboratory Study[J]. Water Research, 2007, 41(7): 1433-1440.

- [10] KATARZYNA S. Clogging Microstructures in the Vadose Zone: Laboratory and Field Studies[J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(6): 1005-1017.

- [11] BAGHDIKIAN S Y, SHARMA M M, HANDY L L. Flow of Clay Suspensions Through Porous Media[J]. SPE Reservoir Engineering, 1989, 4(2): 213-220.

- [12] MCDOWELL-BOYER L M, HUNT J R, SITAR N. Particle Transport Through Porous Media[J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1901-1921.