人工回灌条件下滨海砂质含水层 渗透性的时空演变特征

朱恒华^{1,2)},孙静^{3,4)},林奇云⁵⁾,刘治政¹⁾,林国庆^{3,4)},周思凡^{3,4)},初慧^{3,4)}

1)山东省地质调查院,济南,250013;2)中国地质大学环境学院,武汉,430074;
 3)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;4)山东省海洋环境地质

工程重点试验室,山东青岛,266100;5)烟台市规划设计研究院有限公司,山东烟台,264000

内容提要:人工回灌补给滨海含水层是海水入侵修复经常采用的工程措施,然而人工回灌条件下滨海砂质含水层经常出现渗透性显著降低的现象,其含水介质渗透性的时空演变规律仍不清楚。本文以青岛市大沽河下游咸水入侵区含水层砂样为研究对象,通过利用不同尺度的室内砂柱淡咸水驱替试验,对定水头和定流速条件下人工回灌咸淡水驱替过程中砂质含水层渗透性的时空演变特征进行了研究。结果表明:当淡水驱替咸水时含水介质的渗透性会发生显著变化,整个砂柱的渗透性先降低后回升,原因是回灌过程中砂柱中的黏土矿物发生释放、迁移、沉积;定水头条件下,在砂柱的前半段存在一个淘空区,渗透系数是初始渗透系数的1.6~2.0倍,砂柱其它部分渗透性是先降低再轻微回弹;定流速条件下,砂柱的渗透系数随时间的变化均呈现先降低后升高趋势,且砂柱各段离入水口的距离越远其渗透系数的值越小;砂柱黏粒含量的变化规律与渗透性的演化特征相吻合。研究成果可为人工回灌治理滨海含水层海水入侵提供一定的科学依据。

关键词:人工回灌;咸淡水驱替;渗透系数;黏粒释放

人工回灌补给滨海含水层可有效提高地下淡水的水位,以淡压咸、以淡驱咸,迫使海水后退,是防治海水入侵的有效方法之一(Gao Maosheng et al., 2016),早在1905年美国密歇根、佐治亚等地已开展了人工回灌试验,加州"21世纪水厂"通过回灌成功控制了海水入侵(Han Zhonghua et al.,2016)。人工回灌具有许多优点,例如可以防治、改善许多地区水资源不足等问题,但回灌过程中往往会伴随堵塞现象的出现,降低回灌工程的效率,增大维护和使用成本,缩短使用寿命(Ye Xueyan et al.,2017;Zhang Xiaowan et al.,2016;Du Xinqiang et al.,2018)。堵塞通常表现为含水层渗透系数降低,孔隙度逐渐减小(Shan Beibei,2013)。

含水层介质的渗透系数是渗流场中一个重要的 水文地质参数,渗透性的变化对咸淡水界面的形状、 运移起着重要作用(Huang Cui et al., 2013; Le Fengbin et al., 2008)。淡水驱替咸水过程中含水 介质渗透系数明显降低,再用咸水驱替淡水时渗透 性无法恢复到原来水平(Goldenberg et al., 1983); 试验进一步发现,含水介质通入含有膨润土或蒙脱 石的溶液比通入含有伊利石或高岭土的溶液渗透性 降低程度更加明显(Goldenberg et al., 1984; Goldenberg, 1985);土柱试验发现在驱替过程中,渗 透性的变化既受盐度的影响,也受盐度递减速率影 响(Zhang Xiaohui et al., 2007);盐浓度的突然降低 会导致含水介质渗透性急剧降低,当黏土重量比达 到 3% ~ 4% 时,渗透系数即可降低到零(Jiang Weinan et al., 2018);雨水驱替咸水试验发现渗透 系数由 6.49×10⁻⁴ cm/s 降至 2.28×10⁻⁴ cm/s,随 后维持稳定不变(Xing Liting et al., 2015);室内土

引用本文:朱恒华,孙静,林奇云,刘治政,林国庆,周思凡,初慧. 2019. 人工回灌条件下滨海砂质含水层渗透性的时空演变特征. 地质学报,93(s1):79~86,doi:10.19762/j.cnki. dizhixuebao. 2019213. Zhu Henghua,Sun Jing,Lin Qiyun,Liu Zhizheng,Lin Guoqing,Zhou Sifan,Chu Hui. 2019. Temporal and spatial evolution characteristic of permeability of coastal sandy aquifer under artificial recharge conditions. Acta Geologica Sinica, 93(s1):79~ 86.

注:本文为国家基金委-山东省联合基金项目(编号 U1806210)、国家自然科学基金项目(编号 40902066)和山东省地勘项目(鲁勘字(2013) 45 号)资助成果。

收稿日期:2019-07-31;改回日期:2019-09-15;责任编辑:黄敏。

作者简介:朱恒华,男,1981年生。中国地质大学(武汉)博士生,长期从事水工环地质研究。Email:67146398@qq.com。通讯作者:林国 庆,男,1977年生。副教授,中国海洋大学环境科学与工程学院,主要从事地下水污染调查与修复方面的研究。Email:lingq@ouc.edu.cn。

柱驱替实验发现不同类型淡水驱替咸水时介质渗透 性均发生突变,渗透性有不同程度降低(Ren Jiaguo et al.,2015);地下咸水层储能过程中回灌溶液盐度 发生变化会使含水介质黏土颗粒(简称黏粒)产生释 放、迁移与聚沉现象,最终导致渗透系数在相对短时 间内发生变化,回灌去离子水时流出液黏粒浓度最 高达 8.6g/L,相对渗透系数下降 53.8%(Ma Jiuchen et al.,2014)。目前,已有的研究表明人工 回灌条件下淡水驱替咸水过程中会发生明显的地层 损害,即渗透性降低的现象,然而含水介质的渗透性 是局部降低还是整体都降低,其渗透性的时空演变 规律仍不清楚。

本文选取大沽河下游海水入侵区砂样,通过砂

2

3

1

柱渗流试验研究了不同尺度(25cm 和 100cm)、不同 水动力(定水头、定流速)条件下人工回灌淡咸水驱 替过程中含水介质渗透性的时空非均质变化规律, 探讨了咸淡水驱替过程中渗透性变化的内在机理, 研究成果对滨海地区海水入侵的修复与防治可提供 一定的科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验分别采用定水头装置和定流速装置。试验 装置主要由供水系统、渗流砂柱、测压系统、排水系 统4部分组成,如图1、2所示。

8

11

在定水头装置中,分别采用长 25cm、直径 2.8cm



9 图 1 定水头试验装置图

Fig. 1 Experimental setup sketch of Constant Head

1一供水桶;2—三通阀门;3—定水头管;4—玻璃管;5—橡胶管;6—塞子;7—渗流柱;8—量筒;9—水槽;10—测压板;11—工作台
1—Water supply tank;2—three-way valve; 3—fixed water head tube; 4—glass tube; 5—rubber tube;6—plug;
7—seepage column;8—cylinder;9—sink;10—pressure measuring plate;11—workbench



图 2 定流速试验装置图

Fig. 2 Experimental setup sketch of Constant Flux
1一供水桶;2一三通阀门;3-橡胶管;4-蠕动泵;5-玻璃管;6-塞子;7-渗流柱;8-量筒;9-测压板;10-工作台
1-Water supply tank;2-three-way valve;3-rubber tube;4-peristaltic pump;5-glass tube;6-plug;
7-seepage column;8-cylinder;9-pressure measuring plate;10-workbench

81

的小型有机玻璃柱和长 100cm、直径 4.4cm 的大型 有机玻璃柱作为渗流砂柱,将小型有机玻璃柱均分 为 5 个部分,大型有机玻璃柱均分为 10 个部分,并 在每处各安装一个测压管并连接测压板,用以测定 渗透系数。

1.2 试验材料

1.2.1 研究区域

大沽河流域位于胶东半岛西部,下游地理坐标为120.10°E~120.20°E、36.27°N~36.38°N,区域内的地下水主要赋存于第四系冲积一冲洪积层下部的砂和砂砾石层中。含水层沿河呈条带状分布,靠近大沽河附近厚度大、两侧薄,富水性与导水性呈现出从中间向两侧逐渐变差的趋势(Liu Guanqun et al., 2019;Sun Jiawei et al., 2016),地理位置如图 3 所示。

1.2.2 试验砂样

试验选用来自于青岛市大沽河下游受海水入侵 危害的潜水含水层中的砂样作为含水层介质,将采 集的砂样自然风干、除杂、研碎,储存备用,利用比重 法和筛分法进行粒度分析,具体颗粒级配见表 1。 将砂样过 2mm 的筛子,采用 X-ray 衍射仪对砂样进 行矿物成分分析,根据 X 射线衍射结果得:砂样主 要由石英和钾长石组成,其中石英占 27%,钾长石 占 67%,而黏土矿物仅占总量的 1.7%。

1.2.3 试验水样

河水取自大沽河下游王新村附近的大沽河,经 0.22μm 滤膜过滤,消除微生物堵塞的影响,海水取 自胶州湾口的小青岛,水样的化学成分见表 2。

表1 砂样颗粒级配(mm)

Table 1 Particle size distribution of sand samples (mm)

颗粒组成(%)											
砾		砂粒	粉粒	黏粒							
$5 \sim 2$	2.0~0.5	0.5 \sim 0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005						
9.6	32.8	18.7	33.3	0.7	4.9						

表 2 水样化学成分

Table 2 Chemical composition of water samples

主要离子	Na ⁺	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl-	$\mathrm{SO}_4{}^{2-}$	HCO ₃ ⁻	EC
河水	5.9	1.3	1.0	1.4	4.1	0.8	1.6	780
海水	371.1	10.7	7.2	45.6	513.3	2.7	28.9	48500

1.3 试验方法

1.3.1 渗透系数的测定

为保证试验结果更真实,本试验设三个平行样 求平均值。将含水层砂样等容重装入砂柱中,在密 封条件下用 Autoscience 型真空抽滤机抽真空 20min,将饱和后的砂柱与定水头、定流速装置相 连,在给定水力坡降下通入海水,直到砂柱流出液的 体积达到稳定值为止。将三通阀门导向河水,瞬时 降低砂柱渗入液的盐浓度,用雷磁 DDS-307A 型电 导率仪测定电导率值。根据达西定律计算砂柱的渗 透系数,即:

$$k = \frac{QL}{A\,\Delta h}$$

式中:*k* 为渗流系数(cm/min);Q 为渗流量(cm³/min);L 为渗透途径长度(cm);A 为过水断面面积(cm²);Δ*h* 为水头损失(cm)。

试验过程中采用相对渗透系数来表征含水介质





渗透性能的变化(这里相对渗透系数是指不同时段含 水层介质的渗透系数与初始渗透系数的比值),即:

$$k_r = \frac{k_t}{k_0} \times 100\%$$

式中: k_r 为相对渗透系数(%); k_t 为不同时段含水 层介质的渗透系数(cm/min); k_0 为含水层介质初始 渗透系数(cm/min)。

1.3.2 黏粒含量测定

流出液的颗粒浓度:用 721 分光光度计在 600nm 波长下测量流出液的吸光度,再通过标准曲 线(图 4)计算出流出液中的黏粒浓度。

砂柱中的黏粒含量:烘干砂样,于不同位置取相 同质量的砂样,放入 25mL 的量筒内。加入 20mL 的蒸馏水,在振荡器上振荡 20min,用移液管量取 5mL 的悬浊液,使用 721 分光光度计测量 600nm 波 长下所对应的吸光度,再转化成黏粒浓度。



concentration and adsorption

2 试验过程与结果

2.1 定水头条件下渗透系数的时空演变

2.1.1 渗透系数的时间变化

为研究定水头条件下人工回灌淡水置换咸水前 后砂柱渗透性随时间的变化规律,分别选用 25cm、 100cm 有机玻璃柱进行淡水驱替咸水试验,结果如 图 5 所示。从砂柱各段的渗透性变化来看,第二段、 三段相对渗透系数均呈现出先快速升高再逐渐降低 的趋势,25、100cm 砂柱第二段相对渗透系数最高可 达到 210%和 160%左右。砂柱除第二、三段外,其 余各段相对渗透系数都呈现出逐渐降低再轻微升高 最终稳定的变化趋势。不同段砂柱渗透系数变化规 律不同,但砂柱整体渗透系数的变化是由砂柱各段 渗透系数叠加后的结果。从整体来看:25cm、100cm 砂柱相对渗透系数变化规律相似,均表现为先逐渐 降低再轻微升高最终稳定的趋势。从图 5a、5b 可知 25cm、100cm 砂柱在实验结束时相对渗透系数变为 67%和 56%,渗透系数分别损失了 33%和 44%。

2.1.2 渗透系数的空间变化

为研究定水头条件下淡水置换咸水前后砂柱渗透性的空间变化规律,分别选用 25、100cm 有机玻璃柱模拟淡水驱替咸水过程,试验结果如图 6 所示。 25cm 和 100cm 砂柱相对渗透系数的空间分布具有一定相似性:第一段降低、第二段升高、其余各段逐渐降低。从图 6a、6b 可以看出 25cm 和 100cm 砂柱 第一段到第二段相对渗透系数分别由初始渗透系数 的 52%、61%增加到 159%、129%,砂柱最后一段渗透系数损失最为明显。两者不同的是 100cm 砂柱 在后半段相对渗透系数保持基本稳定。

2.2 定流速条件下渗透系数的时空演变

2.2.1 渗透系数的时间变化

为研究流速对淡水置换咸水前后砂柱渗透性随时间变化规律的影响,控制渗流速度分别为 0.8 cm/ min 和 1.5 cm/min,选用 25 cm 有机玻璃柱模拟淡 水驱替咸水试验,结果如图 7 所示。试验结果表明: 渗流速度对渗透性有明显影响,通过比较图 7a、7b 可以发现渗流速度为 0.8 cm/min 的砂柱每一段相 对渗透系数最低值都要比 1.50 cm/min 的砂柱所对 应的相对渗透系数最低值大。渗流速度分别为 0.8 和 1.5 cm/min 时,砂柱 5~10 cm、10~15 cm、15~ 20 cm 段的渗透系数最低值分别为 0.58、0.41、0.40 和 1.11、0.80、0.62 cm/min。渗透系数随时间的变 化均呈现先降低后升高趋势。渗流速度为 0.8 和 1.5 cm/min 时,砂柱渗透系数增加明显的部分分别 出现在 5~10 和 10~15 cm 段,最高值达到初始渗 透系数的 150%和 125%。

2.2.2 渗透系数的空间变化

为研究流速对淡水置换咸水前后砂柱渗透性空间变化规律的影响,控制渗流速度分别为 0.8 cm/ min 和 1.5cm/min,选用 25cm 有机玻璃柱模拟淡 水驱替咸水试验,结果如图 8 所示。试验结果表明: 渗流速度对渗透系数的空间分布影响明显。远离砂 柱入口,砂柱的渗透性会降低;靠近砂柱入口,砂柱 的渗透性会明显增高。但是,不同的渗透流速条件 下,砂柱渗透系数增长的区段有所不同,例如:渗流 速度为 0.8cm/min 和 1.5cm/min 时渗透系数增长 区域分别出现在 10~15cm 和 5~10cm 段,渗透系 数增长分别为初始渗透系数的 120%和 115%。

2.2.3 砂柱中颗粒含量的空间变化

为研究砂柱中黏粒含量的空间分布与含水介质







图 6 25cm(a)、100cm(b)砂柱相对渗透系数的空间分布 Fig. 6 Spatial distribution of relative permeability of sand columns with different lengths





渗透性的内在联系,采用 25cm 有机玻璃柱进行淡 咸水驱替试验,在距离砂柱入口 3cm、6cm、12cm、 20cm 处取砂样测其黏粒含量,试验结果如图 9 所 示。结果表明:定流速条件下,砂柱中的黏粒含量与 距砂柱入水口的距离近似呈正相关,即距离砂柱入 水口越近,黏粒含量越少。当砂样距入水口的距离





Fig. 8 Spacial distribution of permeability of each segment of 25cm sand column at different velocities

从 3cm 增加到 20cm 时,砂样中黏粒浓度从原来的 0.90g/L 增加到 1.62g/L。





Fig. 9 Spatial distribution of clay content in sand columns

3 讨论

定水头条件下砂柱各段的渗透系数随时间的变 化明显,砂柱第二段、三段渗透系数呈现出先快速升 高再逐渐降低的趋势,而砂柱其余各段均呈现出逐 渐降低再轻微升高最终达到稳定的变化规律。砂柱 渗透性出现上述变化的主要原因是砂柱内部的黏土 颗粒在纵向和横向上重新分布所致。试验开始时, 整个砂柱黏土颗粒分布均匀。当人工回灌淡水驱替 咸水时,存在一个临界盐浓度(Zhou Jun et al., 2009),溶液浓度低于上述浓度时黏土颗粒就会从多 孔介质表面脱离,释放后的黏土颗粒会随水流发生 迁移(Zhou Jun et al.,2019; Witteveen et al., 2013; Dikinya et al.,2008)。天然条件下,黏土颗粒 的大小迥异,临界盐浓度并不是一个固定值,而是一 个浓度范围,浓度低于上述浓度范围时黏土颗粒都 有可能从多孔介质表面脱离。黏土颗粒的释放会导 致溶液中的黏粒含量显著增多,受孔喉大小所限,释 放后的黏粒被孔喉捕获,引起砂柱的渗透性降低 (Huang Cui et al.,2009)。例如,长度为25cm、内 径为2.8cm 的砂柱定水头驱替试验中,在0~5cm 的范围内整个驱替过程导致渗透性损失了50%,相 反在5~10cm 区段,砂柱的渗透系数达到了初始值 的210%,都是由于砂柱内部黏土颗粒的释放和再 次被截留两个过程共同作用的结果。

另外,溶液中黏粒含量的增多和钙离子浓度的 增高,增加了黏粒发生碰撞、絮凝形成较大体积絮团 的几率,促使黏粒在含水介质的孔喉处更容易发生 堵塞、截留,导致多孔介质的渗透性降低(Mesticou et al.,2014; Ma Jiuchen et al.,2013)。因而,离入 水口处越远,黏粒沉积量越多,聚沉或被捕获的机率 越大,越容易堵塞孔喉,渗透性降低的幅度也越大 (如图 6、8 所示)。

黏粒在含水介质中受水流剪切应力、重力、范德 华引力以及双电层斥力的共同影响(Huang Cui et al.,2009)。当渗流速度增大时,作用于颗粒表面的 剪切力大于黏粒与多孔介质间的吸引力时,黏粒就 会从多孔介质表面脱落(Yin Xianqiang et al., 2010),所以渗流速度增大,有利于黏粒在多孔介质 中的释放和迁移,对黏土颗粒在纵向上的重新分布 有显著影响。如图 8 所示,与渗流速度为 0.8cm/ min 时相比,渗流速度为 1.5cm/min 时,距离砂柱 入口愈远,砂柱的渗透性愈低;砂柱黏粒含量的空间 分布与渗透性的变化相一致(图 9)。

4 结论

本文利用不同尺度的室内砂柱淡咸水驱替试

验,研究了在定水头和定流速条件下人工回灌淡咸 水驱替过程中砂质含水层渗透性的时空演变规律, 得到以下结论:

(1)人工回灌淡水驱替咸水时,含水介质的渗透 性会发生突变,25cm 和 100cm 砂柱的整体渗透性 均出现大幅降低的现象。但从空间分布来看,砂柱 的前半段均存在一个淘空区,渗透系数明显升高,是 初始渗透系数的 1.6~2.0 倍;砂柱其它部分的渗透 性则呈现先降低再轻微回弹的趋势。

(2)人工回灌淡咸水驱替过程中,渗流速度对砂 质含水层的渗透性具有显著影响。定流速条件下, 25cm 和 100cm 砂柱的整体渗透性均呈现先降低后 升高的趋势,且砂柱各段离入水口的距离越远其渗 透系数的值越小;从空间分布来看,渗流速度为 0.8cm/min 与 1.5cm/min 时,砂柱的前半段均出现 渗透性大幅升高的现象。

(3)砂柱黏粒含量的时空分布与渗透性的时空 演化相吻合,这说明回灌过程中砂柱中黏土矿物的 释放、迁移和重新截获是含水介质渗透性时空演变的内在原因。

References

- Dikinya O, Hinz C, Aylmore G. 2008. Decrease in hydraulic conductivity and particle release associated with self-filtration in saturated soil columns. Geoderma, 146(1-2):192-200.
- Du Xinqiang, Lu Ying, Ye Xueyan, Song Yalin, Wan Yuyu. 2018. Advances in research on media blockage and water quality changes during artificial recharge of groundwater. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 9 (02): 1 ~ 6 (in Chinese with English abstract).
- Gao Maosheng, Luo Yongming. 2016. Groundwater resources issues and seawater intrusion prevention and control in key Coastal zones of China. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 31 (10): 1197 ~ 1203 (in Chinese with English abstract).
- Goldenberg L C, Magaritz M. 1983. Experimental investigation on irreversible changes of hydraulic conductivity on the seawaterfreshwater interface in coastal aquifers. Water Resources Research, 1(19): 77~85.
- Goldenberg L C. 1985. Decrease of hydraulic conductivity in sand at the interface between seawater and dilute clay suspensions. Journal of Hydrology, 78: 183~199.
- Goldenberg L C, Magaritz M, Amiel A J, Mandel S. 1984. Changes in hydraulic conductivity of laboratory sand-clay mixtures caused by a seawater-freshwater interface. Journal of Hydrology, 70 (1): 329~336.
- Han Zhonghua. 2006. Enlightenment from the implementation of reclaimed water recharge in foreign countries. Beijing Water Affairs, 10(05). $4 \sim 7$ (in Chinese with English abstract).
- Huang Cui, Zheng Xilai, Qi Ximing, Li Yongxia. 2009. Experimental study on permeability change of aqueous medium during brackish water displacement. Hydrogeology and Engineering Geology, 36(06): 21~25 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Weinan, Wang Fugang, Dong Weihong. 2018. Study on salinity effect of permeability coefficient of typical sandmedia aquifer. People's Yellow River, 40(08): 145~148 (in Chinese

with English abstract).

- Lei Fengbin, Li Guoxia, Han Zhiyong. 2009. Mechanism study of permeability mutations in aqueous media. Engineering Investigation, 37 (05): $31 \sim 39$ (in Chinese with English abstract).
- Liu Guanqun, Zhu Liwen, Sun Yunxiao. 2019. Water chemistry characteristics and genesis of underground salt water in the lower reaches of the Dagu River. Periodical of Ocean University of China, 49(5): 84~92 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jiuchen, Guo Chunmei, Zhang Zhigang. 2013. Effect of salinity change of water storage and recharge solution on permeability of aqueous medium. Renewable Energy, 31(04): $94 \sim 99$ (in Chinese with English abstract).
- Mesticou Z, Kacem M, Dubujet P. 2014. Influence of ionic strength and flow rate on silt particle deposition and release in saturated porous medium: Experiment and modeling. Transport in Porous Media, 103(1): 1~24.
- Ren Jiaguo, Wei Weiwei, Wu Qianqian, Meng Fanao, Li Wei. 2014. Experimental study on permeability change during different freshwater flooding. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 33(02): 29 ~33 (in Chinese with English abstract).
- Shan Beibei. 2013. Recharge test and numerical simulation of physical blockage of aquifer. MS dissertation of Ocean University of China (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiawei, Zheng Xilai, Zhang Bo. 2016. Construction and application of information management system for groundwater source of Dagu River. Ground Water, 38(5): $57 \sim 60$ (in Chinese with English abstract).
- Witteveen P, Ferrari A, Laloui L G. 2013 An experimental and constitutive investigation on the chemo-mechanical behaviour of a clay. Geotechnique, 63(3): 244~255.
- Xing Liting, Wang Liyan, Huang Linxian, He Donglin. 2015. Variation characteristics of aquifer medium permeability of shallow salt groundwater in inland region. Chinese Science Bulletin, 60 (11): 1048 \sim 1055 (in Chinese with English abstract).
- Ye Xueyan, Du Xinqiang, Zhang Hexuan, Cui Rui. 2017. The effect of ionic strength and water flow rate on the clogging of colloidal particles in porous media during recharge. Journal of Chemical Industry and Engineering, 68(12): 4793~4801.
- Yin Xianqiang, Sun Huimin, Yi Lei, Lu Yiqing, Wang Guodong, Zhang Xingchang. 2010. Effect of pore water velocity on migration of colloid in saturated porous media. Journal of Soil and Water Conservation, $24(5):101 \sim 104$ (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaowan. 2016. Experimental study on factors affecting the clogging of suspended soil in artificial recharge. MS dissertation of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaohui, Zhou Jun, Zheng Xilai, Lin Guoqing, Wu Junwen. 2007. Water sensitivity study of aqueous medium on brackish water interface. Marine Environmental, 26(4): 302~312 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaowan. 2016. Experimental study on factors affecting the clogging of sttp suspened soil in of artifical recharge, MS dissertation of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jun, Zheng Xilai, Flury M, Lin Guoqing. 2009. Permeability changes during remediation of an aquifer affected by sea-water intrusion: A laboratory column study. Journal of Hydrology, 376(3~4): 557~566.
- Zhou Jun, You Xiaogang, Niu Baowei, Gong Lei. 2019. The flocculation process of released clay particles and its effect on the permeability of porous media. Hydrogeology Journal, 27(5): 1827~1835.

参考文献

高茂生, 骆永明. 2016. 我国重点海岸带地下水资源问题与海水入 侵防控. 中国科学院院刊, 31(10): 1197~1203.

- 韩中华. 2006. 国外实施再生水回灌的启示. 北京水务, 10(05): 4 ~7.
- 冶雪艳,杜新强,张赫轩,崔瑞娟.2017.回灌过程中离子强度和水 流流速对胶体粒子在多孔介质中堵塞的影响.化工学报,68 (12):4793~4801.
- 张晓婉. 2016. 人工回灌过程中粘性土悬浮物堵塞影响因素的实验 研究(硕士学位论文). 吉林大学学报.
- 杜新强, 路莹, 冶雪艳, 宋亚霖, 万玉玉. 2018. 地下水人工回灌过 程中介质堵塞与水质变化研究进展. 黑龙江大学工程学报.
- 单蓓蓓. 2013. 含水层物理堵塞的回灌试验与数值模拟(硕士学位 论文). 中国海洋大学学报.
- 黄翠,郑西来,栾熙明,李永霞.2009. 咸淡水驱替过程中含水介质 渗透性变化的试验研究,水文地质工程地质,36(06):21 ~25.
- 雷锋斌,李国霞,韩志勇. 2009. 含水介质中渗透性突变的机理研 究. 工程勘察, 37(05): 31~39.
- 张晓辉,周俊,郑西来,林国庆,吴俊文. 2007. 咸淡水界面上含水

- 介质的水敏感性研究.海洋环境科学,26(4):302~312.
- 姜伟男,王福刚,董维红. 2018. 典型砂介质含水层渗透系数盐度 效应研究. 人民黄河,40(08):145~148.
- 邢立亭,王立艳,黄林显,何东林. 2015.内陆浅层咸水区渗透性变 异过程.科学通报,60(11):1048~1055.
- 任加国, 胥韦韦, 武倩倩, 孟凡傲, 李伟. 2014. 不同淡水驱替海水 过程中渗透性变化试验研究. 山东科技大学学报(自然科学 版), 33(02): 29~33.
- 马玖辰,郭春梅,张志刚.2013. 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.可再生能源,31(04):94~99.
- 刘贯群,朱利文,孙运晓. 2019. 大沽河下游地区地下咸水的水化 学特征及成因.中国海洋大学学报,49(5):84~92.
- 孙佳玮,郑西来,张博. 2016.大沽河地下水源地信息管理系统的构 建和应用. 地下水,38(5):57~60.
- 股宪强, 孙慧敏, 易磊, 路怡青, 王国栋, 张兴昌. 2010. 孔隙水流 速对胶体在饱和多孔介质中运移的影响. 水土保持学报, 24 (5): 101~104.

Temporal and spatial evolution characteristic of permeability of coastal sandy aquifer under artificial recharge conditions

ZHU Henghua^{1,2)}, SUN Jing^{3,4)}, LIN Qiyun⁵⁾, LIU Zhizheng¹⁾, LIN Guoqing^{* 3,4)},

ZHOU Sifan^{3,4)}, CHU Hui^{3,4)}

1) Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, 250013;

2) School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;

3) Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education,

Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266100;

4) Key Laboratory of Marine Environmental Geology Engineering of Shandong Province,

School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266100;

5) Yantai Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Yantai, Shandong, 264000

* Correspondingauthor: lingq@ouc.edu.cn

Abstract

Artificial recharge of coastal aquifer is an engineering measure often used in seawater intrusion remediation. However, the coastal sand aquifer often exhibits a significant decrease in permeability under artificial recharge conditions. Temporal and spatial evolution of permeability of aqueous medium remains unclear. This study collected aquifer sand samples in the lower reaches of the Dagu River in Qingdao. Using the indoor sand column, brackish water was flooded by fresh water under different scales, the fixed head and constant flow rate conditions during the process of the artificial recharge irrigation. The temporal and spatial evolution of permeability of sandy medium were studied. The results show that permeability of the aqueous medium changes significantly when fresh water drives salt water. The permeability of the entire sand column decreases first and then rises. The reason is mainly that clay minerals in sand columns released, migrated and deposited during the process of recharging. Under the condition of fixed head, there is a panning area in the first half of sand columns. The permeability of sand columnswas $1.6 \sim 2.0$ times of the initial permeability. The permeability of other parts of the sand column was first reduced and then slightly rebounded. Under the constant flow rate, permeability of sand columns decreases with time and then increases. The farther the distance between the sand column and the water inlet, the smaller the value of the permeability coefficient. The variation of clay contents of sand columnsis consistent with the permeability of sand columns. The research results can provide a scientific basis for artificial recharge and treatment of coastal aquifer seawater intrusion.

Key words: artificial recharge; saltwater displacement; permeability coefficient; clay release