内陆浅层咸水区渗透性变异过程

邢立亭^{①*}, 王立艳^②, 黄林显^①, 何东林^②

① 济南大学资源与环境学院, 济南 250022;

② 山东正元建设工程有限责任公司地质环境研究院, 济南 250100

* 联系人, E-mail: Stu_jnedu@126.com

2014-07-07 收稿, 2014-09-17 接受, 2015-02-13 网络版发表

国家自然科学基金(41172222, 41472216)和济南市科技发展计划(201303082)资助

摘要 选取鲁北平原区浅层粉土、浅层咸水和大气降水为供试材料, 进行室内雨水-咸水驱替试验, 研究驱替过程中的含水介质渗透性变化特征, 探讨内陆浅层咸水区水动力、水文地球化学过程对含水层渗透性变异影响. 试验结果表明: 雨水驱替咸水饱和土柱过程中, 随雨水注入, 盐分突变, 渗透系数由开始的 6.49×10^{-4} cm/s 最终降至 2.28×10^{-4} cm/s, 并维持相对稳定; 第188天后咸水再次驱替土柱, 且完全穿透土柱后, 含水介质孔隙度由开始的43.02%降至39.73%; 在雨水驱替过程中, 驱替液黏滞性变化是影响渗透系数变化的因素之一. 研究认为, 内陆咸水区含水介质黏土矿物含量高, 水化学与水动力学条件发生变化, Ca/Mg-Na的离子交换作用、黏粒大量膨胀和释放、扩散引起孔隙度降低是造成含水介质的渗透性下降的主因, 咸雨水驱替过程中渗透性的变化具有不可逆性. 含水介质水文地质参数的变异对于内陆浅层咸水形成和演化有重要影响.

关键词

浅层咸水
渗透系数
驱替试验
水文地球化学作用
内陆地区

含水介质渗透性是重要水文地质参数之一, 含水介质的渗透性不仅与介质的性质有关, 还与水的某些物理性质有关. 对于高矿化度的地下水, 流体的性质对渗透性的影响不容忽视^[1]. 前人在研究含水介质渗透性能方面做了大量工作, 如富含蒙脱石或伊利石的含水层中, 膨胀性黏土矿物导致渗透性显著降低, 最多降低1~4个数量级^[2,3], 认为黏土矿物是导致含水介质渗透性变化的主要原因^[3]. 此外离子强度也是影响细颗粒释放的另一因素, 这主要与 Ca^{2+} 的摩尔百分数有关^[4~6], 认为 Ca^{2+} 浓度对颗粒释放的抑制作用显著^[5,7,8]. 渗流速度大于临界渗流速度时, 水流的剪切应力使颗粒释放, 在水动力作用、扩散及弥散效应下, 细颗粒的运移和重新沉积导致含水介质渗透性降低^[9]. 有学者认为pH对水敏性的影响与黏粒的双电层有关^[10]. 在孔隙度和渗透性较大的多孔介质中, 黏附在孔隙表面的颗粒极易受到水动力的

影响而释放出来. 因此, 以往研究表明, 临界盐浓度及其变化率、渗流速度和pH等因素是影响含水介质细颗粒释放的控制因素.

虽然以往研究对含水介质渗透性影响因素已有初步认识, 但对于含水介质渗透性变化过程缺少深入探讨, 且以往研究主要集中在滨海海水入侵区. 与海水入侵区相比, 内陆微咸水区水化学类型、介质岩性有其独特性, 内陆咸水区含水介质水文地质参数变异过程尚未得到充分认识.

鲁北地区平原大陆盐渍化成因类型咸水遍布整个区域^[11]. 20 m以上地层主要由黄河多次泛滥淤积而形成, 深度20~100 m岩性为河、湖相的黏土、亚黏土、粉土夹薄层粉砂, 垂向上具多层结构, 单层厚度较小, 并夹有数层薄层黏土, 局部地段具微承压性, 在水平和垂直方向均呈现咸淡水相间分布的格局. 如济阳县西盐村浅层咸水水化学类型为

引用格式: 邢立亭, 王立艳, 黄林显, 等. 内陆浅层咸水区渗透性变异过程. 科学通报, 2015, 60: 1048–1055

Xing L T, Wang L Y, Huang L X, et al. Variation characteristics of aquifer medium permeability of shallow salt groundwater in inland region (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1048–1055, doi: 10.1360/N972014-00703

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-00703>

Na·Mg-Cl·SO₄型,而非Na-Cl型水,其矿化度高于滨海海水入侵区。因此,选取西盐咸水区的水样和土样为供试材料,通过室内咸雨水驱替试验,分析驱替过程中的水化学动力学作用对介质渗透性变异性的影响,研究大陆盐化咸水的形成和演化机制。

1 研究区域概况

研究区济阳县西盐村在勘探深度300 m以上均为咸水,以总溶解固体(TDS)等于2 g/L作为咸淡水分界线^[12],60 m以上浅层咸水分布面积仅1.4 km²(图1),咸水区分布形态大致呈现西南至东北向的条带状,

咸水体延伸方向与地下水流向一致,且TDS由中心向外围逐渐降低,TDS最大值13.35 g/L,水化学类型为Mg·Na-Cl·SO₄型。数百年来村民生活用水困难。

通过钻探施工,在咸水区西盐地段采集5~6 m深度的原状土,土样经过风干,密封存储。根据样品的X射线衍射分析的结果,粉土的组成为:石英55%、长石15%、高岭石10%、伊利石8%、蒙脱石12%及其他。测试结果表明(表1),本区黏土矿物含量约为海水入侵区的2.4~7.8倍^[7,13,14]。

采用西盐浅层地下咸水和当地大气降水为供试水样,其化学成分监测结果如表2所示。供试水样就

图1 研究区位置及矿化度等值线图

Figure 1 Diagrams of the studied location and TDS contour

表 1 典型矿物组分统计表^{a)}
Table 1 The statistical graph of typical minera^{a)}

地点及含水层组		K(%)	I(%)	S(%)	Ch(%)	I/S(%)	黏土(%)	
							黏土	均值
大沽河下游 ^[13,15,16]	高家庄	/	/	/	/	/	1.7	3.37
	魏家屯	/	/	/	/	/	5.42	
	毛家庄	0.534	1.69	0.171	0.598	—	2.99	
济阳	西盐村	10	8	12	—	—	30	23
德州	陵县	/	/	/	/	/	16	
鄂尔多斯 ^[17]	罗汉洞组	2	4	—	3	—	9	8.4
	环河组	1	9	—	2	4	12	

a) “/”代表未知, “—”代表不存在

表 2 供试水样水化学成分检测表
Table 2 The test table of chemical composition of sample water

项目	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	电导率 (μs/cm)
咸水	1642.86	1.67	980.77	1028.47	2830.87	835.14	4425.84	6.9	15810
雨水	46.67	0.11	10.22	0.62	109.82	9.85	3.10	7.7	456

地密封保存, 试验前用0.45 μm微孔滤膜过滤.

2 材料与方法

(i) 装置设计. 试验装置主要由渗流柱、供水装置、定水头装置, 渗出液测量装置4部分组成(图2). 渗流柱内直径12.58 cm、高120 cm. 土柱两端以粒径0.613~0.315 mm、厚3 cm的石英砂垫层, 粉土高度108 cm, 设有2个测压管, 定水头连续供水.

(ii) 土样、水样预处理. 土样经风干、研磨、过筛(0.315~0.08 mm), 将其均匀、密实地装入土柱中, 真空泵抽15 min. 水样用0.45 μm微孔滤膜过滤除杂质.

(iii) 简易流程. 渗流柱缓慢注入咸水, 咸水通过渗流柱稳定后, 进行雨水驱替咸水过程, 实时监测流量、水头、水温 and 电导率变化, 待雨水完全穿透土柱后, 且电导率稳定后, 注入咸水完全驱替雨水. 实验结束后, 对土柱进水段、中间段、出水段土样进行颗粒分析.

(iv) 测定指标、测试方法及使用仪器. WGZ-200型散射式浊度仪(测量范围为0~200 NTU, 分辨率为0.01 NTU, 准确度为±5% F.S)测定浊度; DDSJ-308A 型电导率仪(误差±0.5%(F.S)±1)测定电导率; PHB-5型便携式pH计(分辨率: 0.01 pH)测定pH; 3H-2000PS2型静态容量法比表面及孔隙度测试仪(重复性误差小于±2%)测定孔隙度; PXSJ-216F型

图 2 试验装置示意图
Figure 2 Schematic of the test equipment

离子计(分辨率0.0001, 误差为±0.3%)测定Na⁺/K⁺含量; Ca²⁺/Mg²⁺含量用EDTA滴定; 用双指示剂滴定法测定HCO₃⁻; Cl⁻含量以铬酸钾为指示剂, 用硝酸银法滴定; SO₄²⁻含量以EDTA-Mg滴定法测定.

3 结果与讨论

3.1 起始水力坡度揭示野外地下水运动特征

含水介质颗粒间结合水膜的作用, 导致颗粒之

间存在阻力^[18],西盐地段浅层含水介质黏粒含量较高,从而决定了西盐地段含水介质存在一个临界水力坡度 J_0 。土柱渗流试验得出 V - J 曲线可分为2个阶段(图3),非线性段的临界水力坡度 $J_0 \approx 0.005$,当 $J=0.029$, $V=9.543 \times 10^{-5}$ cm/s时, V - J 呈线性关系。

野外监测表明,西盐地段咸水区野外地下水的水力坡度也较小,咸水区地下水运动方向为北东方向。根据2013年6月22日及8月30日地下水位计算,丰水期水力梯度约为枯水期的4倍。与室内临界水力坡度相比: $J_0 \approx J_{枯} < J_{丰}$,可见,丰水期野外水力坡度大于临界水力坡度 J_0 ,枯水期水力坡度接近 J_0 ,野外咸水区地下水径流滞缓。

3.2 含水介质的渗透性变异机制

咸水饱和土柱后,至电导率、水温、渗透系数基本稳定(电导率约15.99 ms/cm,渗透系数约 6.49×10^{-4} cm/s),进行雨水驱替咸水试验,历时188天。渗透系数、电导率及水温历时变化如图4所示,随着雨水注入渗透系数整体呈现下降趋势,电导率的变化滞后于渗透系数的变化。但不同时段,渗透系数变化幅度随水温、电导率变化存在差异(表3)。

驱替过程中渗透性变化的原因探讨以浊度变化来衡量渗出液黏粒的释放状况(图5),以电导率的变化来衡量驱替液的盐分含量变化,以水温变化来衡量渗出液黏滞性作用变化,以离子组分变化来衡量渗出液的水化学作用(图6),以此分析雨水驱替

图3 V - J 关系曲线
Figure 3 The V - J curve

咸水过程中各项指标对含水介质渗透性变异的贡献。

(i) 第I时段(第1.75~9.19天)。电导率0.46 ms/cm的雨水进入土柱的含水介质中,盐分突降,黏土矿物的扩散层斥力大于吸附微粒间的范德华力,使得孔壁表面黏土颗粒形成扩散层,在驱替液剪切应力作用下,细颗粒释放,大量黏粒从骨架上脱落下来,堵塞孔隙通道^[16],所以,第1.75~3.7天,渗出液浊度由起始2→4.31 NTU,流速由起始 1.18×10^{-5} → 9.22×10^{-6} cm/s。渗流速度降低,对细小颗粒的搬运能力下降,黏土矿物的膨胀及细小颗粒的截留或捕获,引起含水介质有效过水断面面积缩小,有效孔隙

图4 电导率、渗透系数及温度历时变化曲线
Figure 4 The curves of specific conductivity, permeability coefficient, and water temperature

表 3 典型时段电导率、水温、渗透系数变化情况一览表(时间顺序)
Table 3 Typical time specific conductivity, water temperature, and permeability coefficient

时段	时间(d)	电导率(ms/cm)	水温(℃)	渗透系数($\times 10^{-4}$ cm/s)
起始	0	15.99	25.14	6.49
I	1.75~4.02	15.78	23.07	5.09
	9.15~9.19	15.52	22.50	3.27
	16.84~22.85	15.37	20.25	2.88
II	34.84~43.86	9.32	15.38	2.65
	43.86~56.84	4.52	16.39	3.15
	93.84~116.86	0.85	13.96	2.86
	116.86~124.40	0.82	14.15	2.28
III	127.14~134	0.80	4.40	0.53
	134~136.91	0.80	5.40	0.0892
	139.88~151.88	0.78	14.14	2.13
IV	151.88~188.21	0.66	18.51	2.28

图 5 浊度、电导率及流速对比曲线
Figure 5 The contrast curve of turbidity, specific conductivity and velocity

度降低, 雨水驱替咸水饱和柱的第 1.75~4.02 天, 渗透系数由 6.49×10^{-4} cm/s 开始下降至 5.09×10^{-4} cm/s, 降幅为 21.57%, 第 9.15~9.19 天渗透系数继续下降至 3.27×10^{-4} cm/s.

与文献[7,13,14]相比, 本区试验用黏土矿物含量相对较高, 蒙脱石具有膨胀格架, 且比表面积约为伊利石及高岭石的 10~40 倍, 其水化作用后体积增大 8~10 倍^[12](<http://wenku.baidu.com/view/6438bc22aae->

a998fcc220ee1.html). 推断在此阶段黏粒释放、蒙脱石的膨胀性对介质的渗透性影响为主要因素.

(ii) 第 II 时段(第 16.84~116.86 天). 雨水驱替咸水饱和柱过程, 渗出液阳离子浓度及离子强度变化趋势类同, 但是离子变幅存在差异(图 6).

第 19.85~38.85 天, 渗出液中阳离子的浓度下降先后顺序为: Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^{+} . 因含水介质中交换性 Na^{+} 含量高, 同时溶液中的 Mg^{2+} 含量高, Mg^{2+} 的吸附亲和力大于 Ca^{2+} 和 Na^{+} 的吸附亲和力, 使 Mg^{2+} 具有竞争吸附优势^[15], 雨水咸水混合后, Ca^{2+}/Mg^{2+} 取代黏土表面交换性 Na^{+} , 进而 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 被吸附, Na^{+} 解吸. 故阳离子交换以 Mg - Na 交换为主, Ca - Na 次之.

虽然 1 个 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 的半径小于 2 个 Na^{+} 的半径, 但离子半径大小为 2~3 nm, 孔隙大小约 1 μm , 因此, 离子吸附与交换不足以改变孔隙度的大小^[19]. 但由于离子交换吸附作用, 扩散双电层中的阳离子由 Na^{+} 转为 Ca^{2+}/Mg^{2+} , Ca^{2+}/Mg^{2+} 的水化能力弱于 Na^{+} , 扩散层变薄, 黏土颗粒聚结, 二价离子含量的降低, 可能在一定程度上对细小颗粒的释放起到促进作用^[4~8]. 释放出的细小颗粒具有带电性, 流速滞缓时, 颗粒间相互碰撞、胶结形成黏粒集合体, 重新塑造含水介质孔隙结构, 形成更大的结构孔隙, 介质的孔隙度增大. 此外, 细小颗粒随水流迁移并沉淀下来, 或相互碰撞形成较大粒径的颗粒, 在一定程度加强了颗粒间孔隙的连通性, 增大了孔隙通道, 使含水介质孔

图6 雨水驱替咸水过程中阳离子浓度变化历时曲线

Figure 6 Cation concentration and ions strength in the process of rainwater displacing saltwater

隙度略增。在43.86~116.84天渗透系数较第16.84~43.86天略微回升,渗透系数平均值由 2.84×10^{-4} cm/s增长至 2.93×10^{-4} cm/s,说明了含水介质孔隙的重新塑造需要一定时间,且介质渗透性的变化具有滞后性。

(iii) 第Ⅲ时段(第116.86~151.88天)。第113.07~117.2天渗出液电导率接近雨水,第116.86~151.88天,电导率的变幅微小。一方面驱替液的离子强度降低促进了细小颗粒释放。渗透系数随水温变化呈现波动性,由图5可以看出水温的变化对含水介质的渗透性变化有很大的影响,第124.4~127.14天水温由 15.58°C 下降至第127.14~136.91天的 $5.4\sim 4.40^\circ\text{C}$ 时,渗透系数由 1×10^{-4} cm/s降至 $5.30 \times 10^{-5} \sim 8.92 \times 10^{-6}$ cm/s。由于水温降低,水的黏滞性作用增强,渗流液对细小颗粒的搬运能力降低,驱替液的黏滞性作用是引起含水介质渗透性降低的主因。

(iv) 第Ⅳ时段(第151.88~188.21天)。第151.88~188.21天,水温平均约为 18°C ,虽然流速增大,平均速度升至 1.34×10^{-5} cm/s,浊度略微增大,渗透系数降低并趋于稳定,维持在 2.28×10^{-4} cm/s左右。说明雨水完全驱替咸水以后含水介质的渗透性能依然维持在较低水平。

3.3 驱替过程中含水介质孔隙度变化

雨水驱替咸水饱和柱实验结束后,再次将土柱

用咸水驱替饱和土柱72 h后,测定进水端、中间段和出水端的孔隙度,其测试结果分别为39.71%, 37.74%和41.74%。

含水介质孔隙度呈现降低趋势,由初始的43.02%平均降至39.73%,土柱进水段至中间段的孔隙度降低程度较大。说明细小颗粒的迁移和排列对含水介质孔隙结构的重新塑造在空间分布规律上存在差异。在介质的进水段、中间段、出水段,细颗粒释放后随渗流液运移、絮凝、沉淀、重新排列,改变着介质的孔隙结构。由于膜效应进水段孔隙度降低,细颗粒随水流运移,并重新分布是导致孔隙降低的根本原因。虽然出水段的孔隙度略大于进水段,但依然小于实验前的孔隙度,咸水再次驱替土柱后,介质的孔隙度并未恢复,说明含水介质渗透性变化的具有不可逆性。由此可推断,在内陆平原区,地下水径流滞缓,水力坡度小,枯水期、丰水期交替变化对于内陆浅层咸淡水过渡带有一定影响,含水介质中黏土矿物含量高,但咸淡水交替过程中的水文地球化学作用影响含水层的渗透性,因此宏观上内陆地区浅层咸水区的范围相对稳定,降水因素对内陆咸水水质的影响微弱。

4 结论

(1) 雨水驱替咸水饱和柱过程,含水介质渗透性整体呈现下降趋势。渗透系数由初始的 6.49×10^{-4}

cm/s, 下降至 2.28×10^{-4} cm/s, 并维持相对稳定. 咸水再次驱替饱和雨水土柱后, 含水介质孔隙度由初始的43.02%最终平均降至39.73%. 含水介质渗透性变化具有不可逆性.

(2) 雨水驱替咸水过程中, 黏粒释放及膨胀、水化学作用、驱替液的黏滞性是影响含水介质渗透性变

异的主要贡献因子, 但不同阶段其影响因素存在差异.

(3) 在内陆平原区, 地下水径流滞缓, 水力坡度小, 含水介质中黏土矿物含量高, 渗流柱试验证实枯水期、丰水期交替变化对于内陆浅层咸淡水过渡带有一定影响, 但咸水区范围变化不明显.

参考文献

- 1 Wang D C, Zhang R Q, Shi Y H, et al. Hydrogeology Basis (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1995 [王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 1995]
- 2 Hewitt C H. Analytical techniques for recognizing water sensitive reservoir rocks. *Petroleum Tech*, 1963, 15: 813–818
- 3 Goldenberg L C, Magaritz Z. Changes in hydraulic conductivity of lab sand-clay mixtures caused by a seawater-freshwater interface. *Hydrology*, 1984, 70: 283–297
- 4 Quirk J P, Schofield R K. The effects of electrolyte concentration on soil permeability. *Soil Sci*, 1966, 20: 163–178
- 5 Kia S F, Fogler H S, Reed M G. Effects of salt composition on clay release in Berea sandstone. *SPE Product Eng*, 1987, 1: 277–283
- 6 Khilar K C, Fogler H S. Migration of Fines in Porous Media. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998
- 7 Zhang X H, Zhou J, Zheng X L, et al. Study on water sensitivity of the porous media at saline-freshwater interface (in Chinese). *Marine Environ Sci*, 2007, 26: 301–312 [张晓辉, 周俊, 郑西来, 等. 咸淡水界面上含水介质的水敏感性研究. 海洋环境科学, 2007, 26: 301–312]
- 8 Jones J R. Influence of chemical composition of water on clay blocking of permeability. *Pet Technol*, 1964, 16, 441–446
- 9 Mukul M S, Habib C, Sita Rama Sarma D S H, et al. Factors controlling the hydrodynamic detachment of particles from surfaces. *J Colloid Interf Sci*, 1992, 149: 121–134
- 10 César M C. Mobilization of kaolinite fines in porous media. *Colloids Surf*, 1987, 27: 219–241
- 11 Zhou X N, Liu S Y, Wang Z. The chemical characteristics and available analysis of shallow groundwater in the typical area of plain of North China—Take Hengshui in example (in Chinese). *Water Sci Eng*, 2008, 2: 56–59 [周晓妮, 刘少玉, 王哲. 华北平原典型区浅层地下水化学特征及可利用性分析—以衡水为例. 水科学与工程, 2008, 2: 56–59]
- 12 Ren J G. Study on hydrogeochemical action in the salt-freshwater transition zone (in Chinese). Doctoral Dissertation. Qingdao: China Ocean University, 2007 [任加国. 咸淡水过渡带水文地球化学作用研究. 博士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2007]
- 13 Lin G Q. Mechanism and application of abrupt change of hydraulic conductivity on the seawater-freshwater interface (in Chinese). Doctoral Dissertation. Qingdao: China Ocean University, 2006 [林国庆. 咸淡水过渡带渗透性突变的机理与效应研究. 博士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2006]
- 14 Mou C R, Zhang J P. The down status and invasion mechanism analysis of fresh-salt water interface in Hebei province typical area (in Chinese). *Hebei Province Water Conserv Hydropower Technol*, 2002, 1: 37–39 [牟纯儒, 张建平. 河北省典型区咸淡水界面下移现状及其入侵机制分析. 河北水利水电技术, 2002, 1: 37–39]
- 15 Liu Q. Study on water-rock interaction in saltwater and freshwater transitional zone (in Chinese). Thesis of Master's Degree. Qingdao: China Ocean University, 2007 [刘茜. 咸淡水过渡带水岩相互作用研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2007]
- 16 Huang C, Zheng X L, Luan X M, et al. Experimental study of changes in hydraulic conductivity of aquifer medium in salt-freshwater displacement process (in Chinese). *Hydrogeol Eng Geol*, 2009, 36: 23–24 [黄翠, 郑西来, 栾熙明, 等. 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, 2009, 36: 23–24]
- 17 Xie Y, Wang J, Li L X, et al. Distribution of the Cretaceous clay minerals in Ordos basin, China and its implication to sedimentary and diagenetic environment. *Geol Bull China*, 2010, 29: 93–104 [解渊, 王剑, 李令喜, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系粘土矿物的分布特征及其沉积-成岩环境意义. 地质通报, 2010, 29: 94–103]
- 18 Xiao H Y, Huang Y, Sun H B, et al. Determination of cohesive soil's permeability coefficient after thinking of initial hydraulic gradient (in Chinese). *J Railway Sci Eng*, 2006, 1: 31–35 [肖红宇, 黄英, 孙宏波, 等. 考虑起始水力坡降时黏性土渗透系数的确定. 铁道科学与工程学报, 2006, 1: 31–35]
- 19 Shen Z L, Zhu W H, Zhong Z S. Hydrogeochemical Basis (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1999 [沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础. 北京: 地质出版社, 1999]

Variation characteristics of aquifer medium permeability of shallow salt groundwater in inland region

XING LiTing¹, WANG LiYan², HUANG LinXian¹ & HE DongLin²

¹ School of Resource and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China;

² Zhandong Zhengyuan Construction Engineering Co. Ltd, Geological Environmental Research Institute, Jinan 250100, China

Shallow silt, shallow salt water and atmospheric precipitation, all present in the North Shandong Plain, were selected as materials for this study. Variations in the permeability characteristics of an aquifer medium caused by shallow salt groundwater were studied in laboratory rain-saltwater displacement experiments. We also explored variations in the permeability coefficient of an inland shallow saltwater region attributable to hydrodynamic and hydrogeochemical processes. The experimental results showed that the initial value of the permeability coefficient was 6.49×10^{-4} cm/s. When salt water was displaced by rain in the saturated soil column, by injecting water and altering the salinity, the final value dropped to, and stabilized at around, 2.28×10^{-4} cm/s. After 188 days, salt water in the soil column was displaced again and, after adequately penetrating the soil column, the initial aquifer medium porosity fell from 43.02% to 39.73%. It is important to note that the liquid viscosity caused a decrease in aquifer medium permeability during the process of rainwater displacement. Previous studies have suggested that the clay mineral content of the aquifer medium is high in inland salt water zones. As the hydrochemistry and hydrodynamics in the aquifer medium changed in this study, the porosity decreased because of Ca/Mg-Na ion exchange processes, and massive clay expansion occurred because of release and diffusion. Meanwhile, the decreased permeability in the aquifer medium was the result of weakened porosity. The process of salt-rainwater displacement was irreversible because of the change in permeability. This study shows that variations in the hydrogeological parameters of the aquifer medium can have an important influence on the formation and evolution of shallow salt water in inland regions.

shallow salt water, permeability coefficient, displacement experiment, hydrogeochemical action, inland area

doi: 10.1360/N972014-00703