

地下咸水储能回灌含水层胶体释放动力学 与渗透性变异

李海明¹, 翟 菁¹, 顾晓明¹, 刘月辉², 李 云¹

(1. 天津科技大学 滨海地下水利用与保护研究室, 天津 300457; 2. 天津市勘察院, 天津 300191)

摘 要: 为了揭示天津滨海地区咸水储能回灌过程中含水层渗透性变化的机制, 采用室内土柱试验的方法研究不同温度下咸水储能回灌过程中含水层胶体的释放量、释放速率以及胶体释放对含水层渗透性的影响, 同时探讨了胶体释放过程中 Ca^{2+} 的变化特征。研究结果表明, 咸水储能回灌过程中含水层胶体释放是脉冲式的, 表现为突然增加, 然后缓慢降低, 大约 20 个孔隙体积为一个周期; 胶体累积释放量随着孔隙体积数的增加而增加; 胶体释放量与孔隙体积数为分段函数, 不同阶段胶体累积释放量增长幅度和释放速率发生变化。胶体释放过程中含水层的渗透系数随着孔隙体积数的增加呈“S”型曲线; 0°C 、 10°C 和 20°C 情况下咸水含水层渗透系数分别增加了 4.02 倍、12.21 倍和 6.63 倍; 不同温度下虽然含水层渗透系数开始有差异, 但 60 个孔隙体积数后渗透系数均接近 15 cm/d 左右。胶体释放过程中也存在着 Ca^{2+} - K^{+} 、 Na^{+} 阳离子交换作用, 不同的温度下这种交换作用动态特征不同。

关 键 词: 滨海地区; 地下咸水; 储能回灌; 胶体释放; 渗透性变异

中图分类号: TD 324

文献标识码: A

Dynamics of colloid release and variation of permeability of saline aquifer during aquifer thermal energy storage with recharging

LI Hai-ming¹, ZHAI Jing¹, GU Xiao-ming¹, LIU Yue-hui², LI Yun¹

(1. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization and Protection, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Investigation Institute, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of permeability variation of the aquifer in the process of the saline water energy storage with recharging in Tianjin coastal area, laboratory column experiments were conducted to investigate the capability and rate of colloid release at different temperatures, the effect of colloid release on the permeability of the aquifer, and the change characteristics of Ca^{2+} during colloid release. The research results show that the colloid release from saline aquifer water-bearing media is pulse type, and presents to increase suddenly and decrease slowly with the period of 20 pore volumes in the saline water energy storage recharging process. The cumulative release capacity of colloids from saline aquifer increases with increasing pore volumes; and the release dynamic curve of colloid is segmental straight-line, and release rate and growth range of colloid is decreased. The permeability of the aquifer varies in the process of colloid release. The permeability coefficient of the saline aquifer shows a curve of “S” type with increasing pore volumes. In the condition of 0°C , 10°C and 20°C , the permeability coefficient increase by 4.02, 12.21 and 6.63 times respectively. Although the initial permeability coefficients of the saline aquifer vary at different temperatures, and increases gradually to reach about 15 cm/d after 60 pore volumes. Ion exchange reactions of Ca^{2+} with K^{+} , Na^{+} exist in the process of colloid release; but the dynamic features of the reactions change with temperatures.

Key words: coastal area; saline groundwater; recharge of energy storage; colloid release; permeability variation

1 引 言

天津市地下咸水分布区面积近 9 000 km², 咸水

层厚度数米至上百米, 其中浅层地下咸水分布区面积达 6 922 km², 占全市总面积 2/3 以上^[1]。地下咸水温度基本恒定在 13~15℃, 具有储量大、分布广、

埋藏浅、封闭条件好的特点,有很好的储能作用。地下咸水含水层储能就是一项有效利用咸水含水层作为介质的储能系统,是环保、节能、新型的能源利用技术。咸水回灌是一种避免咸水直接排放引起土壤盐污染的措施,并对含水层维持热储压力、保证咸水的可持续储能具有重要的作用。

探究含水层储能技术,最早始于 20 世纪 60 年代。上海市首次发明了“冬灌夏用”和“夏灌冬用”的地下含水层储能技术^[2-3]。在山东、河南、湖北、辽宁、黑龙江、北京和河北等地已有 100 多个地下水源热泵工程项目,供热、空调面积达 100 余万 m^2 。就地下水回路而言,地下含水层储能和地下水源热泵没有本质的区别。为了节约地下水资源,采用地下水源热泵时,必须采取可靠的回灌手段,回灌是地下水源热泵应用的关键技术。回灌效果是使用地下水源地热泵普遍关注的问题,也是制约地下水源地热泵应用的一个瓶颈^[3-5]。目前大多数国家的地下水回灌技术尚不成熟,特别在含水层砂粒较细的情况下,井极容易被堵,回灌的速度大大低于抽水的速度^[2]。荷兰地下水回灌技术领先于西方其他国家,这是由于荷兰的地质条件比较适合地下水储能,但地下水的回灌难度也较大^[6-7]。武晓峰^[8]总结回灌井堵塞的原因大致可以归纳为 6 种:悬浮物堵塞、微生物的生长、化学沉淀、气泡阻塞、黏粒膨胀和扩散、含水层细颗粒重组。倪龙等^[9]推导了地下水源地热泵异井回灌和同井回灌的理论降深解,分析了无堵塞和考虑堵塞时地下水源地热泵的回灌状况。

已有研究成果虽对地下水回灌过程中含水层渗透性变化的原因和机制进行了分析,但对于水动力和水化学条件发生改变时含水层中胶体释放动力学过程及其对含水层渗透性影响的研究很少。事实上,20 世纪 80 年代以来,人们在地下水现场监测中发现土壤和含水层中普遍存在着粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 可移动的胶体。胶体的释放和随之发生的迁移都可以解释含水介质的结构变化、堵塞、胶体促使下污染物的迁移等现象。因此,很多学科如土壤科学、岩石学、水文学和环境工程学都研究了胶体的释放和迁移过程^[10]。胶体的释放已经存在于天然的多孔含水介质中(表面土壤,含水层和岩层),为了揭示天津滨海地区咸水储能回灌过程中含水层渗透性变化的机制,本文采用室内柱试验的方法研究不同温度下咸水储能回灌过程中含水层中胶体的释放量、释放速率以及胶体的释放对含水层渗透性的影响,同时探讨了胶体释放过程中 Ca^{2+} 的变化特征,研究结果可以对咸水储能回灌技术提供基础数据和理论

依据。

2 试验装置和方法

2.1 试验材料

试验所用的土样和水样取自天津市平原区埋深 40 m 以下的实际含水层岩土和咸水,咸水含水层颗粒总的偏细,以粉砂、粉细砂和细砂为主。岩土重度为 $1.781\ \text{g}/\text{cm}^3$ 、相对密度为 $2.67\ \text{g}/\text{cm}^3$ 、孔隙度为 0.345。咸水中各组份含量分别是: Ca^{2+} 为 $1.324\ \text{g/L}$ 、总 Fe 为 $0.136\ \text{mg/L}$ 、Mn 为 $0.355\ \text{mg/L}$ 、 SO_4^{2-} 为 $0.104\ \text{g/L}$ 、 HCO_3^- 为 $3.194\ \text{g/L}$ 、pH 为 9.73、电导率为 $1\ 057\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

2.2 试验装置

试验装置为采用自行装配的试验仪器,主要由供水瓶、渗流柱、定水头装置、温控器和流出液测量系统组成(如图1所示)。土柱为内径 3 cm、长 10 cm 的有机玻璃柱。试验土样为含水层实际土样。定水头装置是带有进水口、出水口和泄水口的有机玻璃柱,其中上端边上为泄水口,起到定水头的作用,使柱内水位一定,且由于定水柱具有一定容积,在供水瓶供水不足时起到缓冲作用,使试验不至失败;定水头装置由铁架台固定,铁架台可以调整水头高度;供水瓶是一个带进、出水口的玻璃瓶,容积一般为 5~10 L 左右。流出液测量系统主要有量筒、笔式 pH 计、电导率仪、浊度仪等;温控器用来控制土柱的温度。

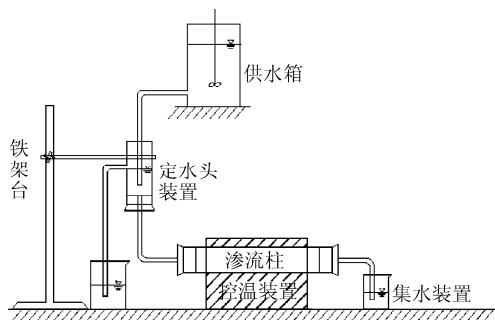


图1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch of experimental apparatus

2.3 试验方法和步骤

用制备好的天然含水层土样采用“湿装法”装填土柱,根据测试土体长度和重度算出装填土柱重量,分段装填,边装填边用玻璃棒扎实。土柱两端为石英砂垫层,中间为测试土体,测试土体与垫层之间用尼龙网隔开,以保证测试土体断面平整,使进出水分布均匀。石英砂在试验前用 1:10 的稀 HNO_3 浸泡、清洗,以去除杂质,再用蒸馏水清洗数次。土

柱装好后,采用铂纸将渗流柱避光,用胶皮管和若干个三通将土柱与定水头缓冲柱连接。

首先用咸水饱和土柱后,在水头差为 2.5 cm,水力坡度为 0.025 的条件下,用天然咸水淋滤土柱,测定出水 Ca^{2+} 和胶体含量(浊度),同时记录取样时间和流出液体积,进而计算对应时间的流速、渗透系数和胶体的释放量;当出水胶体含量或流量达到稳定时试验停止。采用温控器对进入土柱咸水的温度(0℃、10℃、20℃)进行控制;由于溶液浊度和胶体浓度之间存在的一定关系,因此,通过测定溶液的浊度可以计算该溶液的胶体浓度。

3 结果与讨论

3.1 含水层中胶体释放动力学过程

图2为不同温度下水液胶体含量变化曲线。以胶体浓度为纵坐标,渗过土柱水的孔隙体积数为横坐标绘制胶体释放曲线。1个孔隙体积数是指流过土柱的水量与含水介质孔隙体积之比。一般不应以时间 t 为横坐标,因为不同试验含水介质的孔隙体积及流速不同,如以时间 t 为横坐标,不同试验的胶体释放曲线可比性差。可以看出,胶体释放呈周期性变化,先增加,后减少,再增加,但总体呈逐步降低趋势。温度的影响表现为:8个孔隙体积

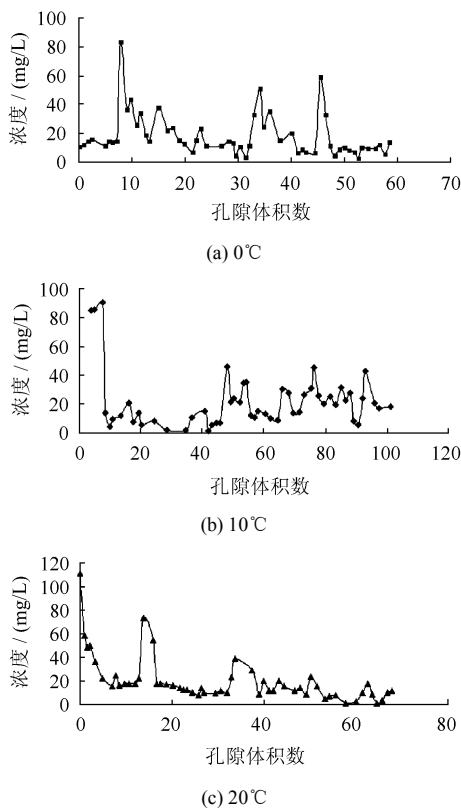


图2 含水层释放胶体浓度变化曲线

Fig.2 Curves of colloid release with pore volumes at different temperatures

内随着进水温度的增加,胶体释放浓度增加;15~30孔隙体积数内,胶体释放浓度很低,温度影响不明显;30孔隙体积数之后胶体又开始释放,最后稳定在一定范围内。值得注意的是含水层含水介质胶体释放是脉冲式的,表现为突然增加,然后缓慢降低,大约20个孔隙体积为一个周期(如图2所示)。

3.2 不同温度下含水层胶体累积释放量动态曲线

图3为不同温度下含水层含水介质胶体累积释放量变化曲线。由图可以看出,胶体累积释放量随着孔隙体积数的增加而增加,胶体释放量与孔隙体积数为分段函数,可以分为3个阶段;不同温度、不同阶段含水介质胶体累积释放量增长幅度和释放速率不同。在0℃和20℃情况下,不同孔隙体积数胶体释放量和释放速率接近;而在10℃情况下,16个孔隙体积内胶体释放量和释放速率均大于0℃和20℃;16~45个孔隙体积数内胶体释放量和释放速率有个变化平缓的“台阶”阶段,小于0℃和20℃;45孔隙体积后,释放量依然小于0℃和20℃,而胶体释放速率接近0℃。

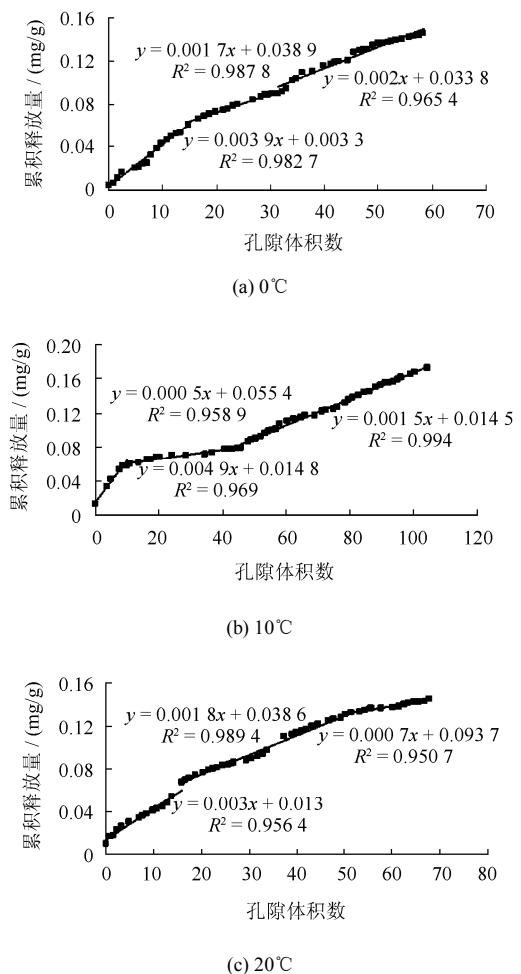


图3 含水层胶体累积释放量变化曲线

Fig.3 Curves of accumulative amount of colloid particles with pore volumes at different temperatures

不同温度下第 1 阶段胶体释放速率均比其他 2 个阶段要大, 但胶体累计释放量在试验后期均接近于 0.16 mg/g, 可见, 温度对胶体的释放速率有一定影响, 但对胶体的总释放量影响较小。

3.3 胶体释放过程中 Ca^{2+} 的变化特征

以相对浓度 C/C_0 为纵坐标, 流过土柱水的孔隙体积数为横坐标, 绘制出水 Ca^{2+} 变化曲线 (如图 4 所示), 其中 C 为土柱出水 Ca^{2+} 浓度, C_0 为进水 Ca^{2+} 浓度。由于含水介质中的 Ca^{2+} 与咸水中的 K^+ 、 Na^+ 发生阳离子交换, 含水层含水介质吸附了咸水中 K^+ 、 Na^+ , 而本身含有的 Ca^{2+} 被解吸到咸水中, 但这种交换作用在不同的温度下变化特征不同: 当进水温度为 0°C , 出水 Ca^{2+} 浓度降至最低点后又逐渐升高, 最后又下降; 当进水温度为 10°C 时, 10 个孔隙体积内出水 Ca^{2+} 浓度降至最低点, 随后又逐渐上升, 达到最高点后又略微下降, 最后又趋于平稳; 而当进水温度为 20°C , 出水 Ca^{2+} 浓度波动式降至最低点, 30 个孔隙体积后又逐渐平稳在某一范围内。试验结果证实了胶体释放过程中也存在着阳离子交换作用。

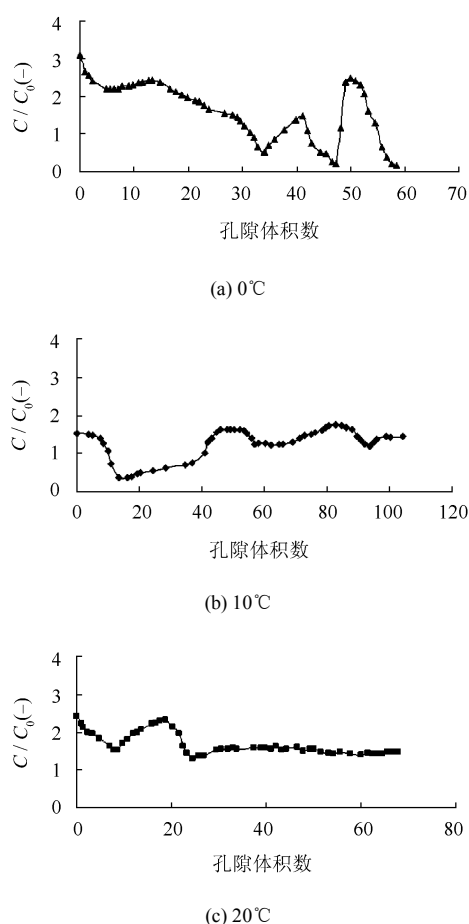


图 4 钙离子相对浓度变化曲线

Fig.4 Curves of release of calcium ions at different temperatures

3.4 咸水储能回灌过程中含水层渗透性变化识别

为了研究不同温度下含水层中胶体的释放对含水层渗透性的影响, 采用达西定律对试验过程中含水层的渗透系数进行了计算。计算公式如下:

$$K = \frac{QL}{A\Delta h} \quad (1)$$

式中: Q 为渗透流量 (ml/d); L 为渗透途径长度 (cm); A 为过水断面 (cm^2); Δh 为水头损失 (cm)。

图 5 为不同温度条件下, 胶体释放过程中含水层渗透系数的动态变化特征。在试验过程中咸水含水层的渗透系数随着孔隙体积数的增加呈“S”型曲线。在前 20 个孔隙体积数内, 含水层渗透系数变幅很小, 0°C 、 10°C 和 20°C 时渗透系数分别为 3.67、1.23 和 2.31 cm/d , 之后随着孔隙体积数的增加渗透系数缓慢增加, 分别在 50、49 和 60 个孔隙体积数后平稳到 14.78、15.02 和 15.32 cm/d 。因此, 在整个试验过程中, 0°C 、 10°C 和 20°C 时咸水含水层分别经历了 58、70 和 67 个孔隙体积数后其渗透系数增加了 4.02 倍、12.21 倍和 6.63 倍。值得注意的是: 虽然不同温度下含水介质初始渗透系数有差异, 但是到了试验后期 60 个孔隙体积数后渗透系数均接近 15 cm/d 左右。

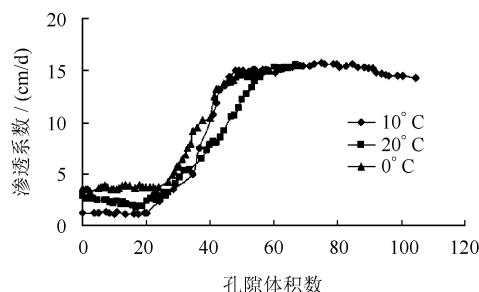


图 5 含水层渗透系数变化曲线

Fig.5 Curves of permeability coefficient of the aquifer with pore volumes at different temperatures

3.5 咸水储能回灌过程含水层胶体释放与渗透性变化机理探讨

试验情况可以根据胶体双电层理论进行解释。胶体的双电层是由一层表面电荷和一层作为平衡的反离子电荷组成的。反离子因静电引力而被带有相反电荷的表面所吸引, 然而这些离子又同时有脱离颗粒表面向浓度较低的溶液主体扩散的趋势。在试验过程中, 扩散层中的反离子进入到溶液主体, 使胶体颗粒的扩散层变厚, ζ 电位增高, 双电层斥力增大, 导致原先的平衡状态被打破, 因此, 胶体被释放出来。由于咸水中含有大量的钠离子, 试验中含水层含水介质中的 Ca^{2+} 与咸水中的 K^+ 、 Na^+ 发生

阳离子交换, 含水介质吸附了咸水中 K^+ 、 Na^+ , 而本身含有的 Ca^{2+} 被解吸到咸水中, 而这一种交换是动态可逆的, 受温度的影响, 因此, 出水 Ca^{2+} 的含量发生波动变化。由于胶体颗粒上吸附了大量的钠离子, 固体颗粒表面上的 Na^+ 能极大地增加表面 ζ 电位, 而 ζ 电位的增加必然导致双电层斥力的增加, 这就使得原先处于范德华引力和双电层斥力平衡状态下的胶体颗粒更容易释放出来^[10]。因此, 溶液中一定数量 Na^+ 的存在有利于胶体颗粒释放。含水层含水介质渗透性的增加主要是由于含水介质中胶体颗粒发生了释放, 释放的胶体颗粒在水流的作用下迁移出土柱, 含水层孔隙增大, 导致含水介质渗透性的增加。

4 结 论

(1) 咸水储能回灌过程中含水层胶体释放呈周期性变化, 但总体呈逐步降低趋势。胶体释放是脉冲式的, 表现为突然增加, 然后缓慢降低。胶体累积释放量与孔隙体积数为分段函数。

(2) 胶体释放过程中也存在着 Ca^{2+} - K^+ 、 Na^+ 阳离子交换作用, 但这种交换作用在不同的温度下变化特征不同。

(3) 胶体释放过程中含水层渗透性发生变化, 咸水含水层的渗透系数随着孔隙体积数的增加呈“S”型曲线。整个试验过程中, 0°C 、 10°C 和 20°C 情况下咸水含水层渗透系数分别增加了 4.02 倍、12.21 倍和 6.63 倍。虽然不同温度下含水层初始渗透系数有差异, 但到试验后期渗透系数均接近 15 cm/d 左右。

参 考 文 献

- [1] 王恩军, 张兰英. 天津市地下咸水资源开发利用现状与前景[J]. 地下水, 2002, 24(2): 82—84.
WANG En-jun, ZHANG Lan-ying. Status and prospects of saline groundwater resources development in Tianjin[J]. *Groundwater*, 2002, 24(2): 82—84.
- [2] 郭小波. 地下含水层储能和地下水源热泵系统中地下水回路与回灌技术现状[J]. 暖通空调, 2004, 34(1): 19—22.
WU Xiao-bo. Development of groundwater loop for ATEs and ground water source heat pump systems[J]. *Journal of Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2004, 34(1): 19—22.
- [3] 倪龙, 荣莉, 马最良. 含水层储能的研究历史及未来[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(1): 18—23.
NI Long, RONG Li, MA Zui-liang. The history and future of aquifer thermal energy storage[J]. *Building Energy & Environment*, 2007, 26(1): 18—23.
- [4] SULATISKY M T, VAN DER KAMP G. Ground-source heat pump in the Canadian Prairies[J]. *ASHRAE Transactions*, 1991, 97(1): 374—385.
- [5] SINGH J B, FOSTER G JR, HUNT A W. Representative operating problems of commercial ground-source and groundwater-source heat pumps[J]. *ASHRAE Transactions*, 2000, 106(2): 561—568.
- [6] BAKEMA G, SNIJDERS A L. Field heating and space cooling at “Gelredome” multifunctional stadium in Arnhem—An example of heat pump application in the Netherlands[C]// Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference. Newjersey: [s. n.], 1998.
- [7] SNIJDERS A L. Lessons from 100 ATEs project the developments of aquifer storage in the Netherlands[C]// Proceedings of 8th International Conference on Thermal Energy Storage. Stuttgart: [s. n.], 2000.
- [8] 武晓峰, 唐杰. 地下水人工回灌与再利用[J]. 工程勘察, 1998(4): 37—39.
WU Xiao-feng, TANG Jie. Artificial recharge and reusing of groundwater[J]. *Engineering Investigation*, 1998(4): 37—39.
- [9] 倪龙, 马最良. 含水层参数对同井回灌地下水源热泵的影响[J]. 天津大学学报, 2006, 39(2): 229—234.
NI Long, MA Zui-liang. Effect of aquifer parameters on groundwater heat pump with pumping and recharging in the same well[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(2): 229—234.
- [10] GROLMUND D, MICHAL B. Release of colloidal particles in natural porous media by monovalent and divalent cations[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 87: 155—175.