

doi:10.3799/dqkx.2012.027

# 不同 SAR 条件下滨海含水层胶体释放与渗透性变异

李海明<sup>1,2</sup>, 李子琛<sup>1,2</sup>, 赵雪<sup>1,2</sup>, 吴锦兰<sup>1,2</sup>, 马斌<sup>1,2</sup>

1. 天津科技大学滨海地下水利用与保护研究室, 天津 300457

2. 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津 300457

**摘要:** 在野外调查的基础上, 研究不同钠吸附比(SAR)条件下滨海含水层胶体释放规律, 采集天津平原区代表性含水层土样, 采用室内批实验和土柱实验, 研究胶体释放浓度和释放量的动态特征, 识别不同含水介质胶体释放的差异性, 同时分析胶体颗粒释放过程中含水介质渗透性变异特征。结果表明, 在 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 混合溶液系统中, 含水层含水介质胶体颗粒的释放与地下水溶液所含阳离子价态有关, Ca<sup>2+</sup> 含量越高, SAR 越小, 胶体越不容易释放出来, Ca<sup>2+</sup> 对胶体释放的抑制作用越强烈。土柱实验表明不同吸附比情况下粉砂和中砂胶体释放浓度均很小; 当地下水中 SAR 为 0 和 8 时粉土胶体释放很少, 当溶液的 SAR 为∞时胶体有明显的释放, 释放浓度随孔隙体积数的增加而增加, 在 52 个孔隙体积数瞬时达到峰值 73.76 mg/L, 然后缓慢减少, 最后累积释放量达 0.13 mg/g。胶体释放过程中, 粉土、粉砂和中砂渗透性损失分别为 98.2%、86.7% 和 95.9%; 含水介质渗透性的降低主要是由于释放的胶体颗粒在空间上重新分布造成的。

**关键词:** 胶体释放; 钠吸附比; 含水层; 渗透性; 水文地质; 污染控制; 滨海地区。

**中图分类号:** X52

**文章编号:** 1000-2383(2012)02-0263-06

**收稿日期:** 2010-08-12

## Colloid Release Process and Permeability Losses of Coastal Aquifer in Different SAR Conditions

LI Hai-ming<sup>1,2</sup>, LI Zi-chen<sup>1,2</sup>, ZHAO Xue<sup>1,2</sup>, WU Jin-lan<sup>1,2</sup>, MA Bin<sup>1,2</sup>

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

2. Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin 300457, China

**Abstract:** On the basis of field investigation, batch experiments and column experiments have been conducted to elucidate dynamics of colloid release concentration and amount from the coastal aquifer under different sodium adsorption ratios (SAR). The differences of colloids release in different aqueous mediums are identified, and the permeability changes of aqueous mediums are investigated in the process of colloid release. The results show that the release capacity of colloidal particles from the aqueous mediums decrease with the increasing of sodium adsorption ratio (SAR) in the mixed solution system of NaCl and CaCl<sub>2</sub>, and Ca<sup>2+</sup> inhibits the release of the colloid. From the column experiment, it is found that a little colloid particles of silty soil are released at the SAR of influent is 0 and 8, and begin to release obviously when the SAR of influent is ∞, and the release amount of colloidal particles from the aqueous mediums increases gradually with the increasing of pore volumes, and reaches the maximum at pore volumes of 52, then the concentration reduces gradually. The total cumulative release amount of colloidal particles from silty soil is 0.13 mg/g. Very little colloid particles of the fine silty and medium sand are released. The permeability loss of silty soil, fine silty and medium sand are 98.2%, 86.7% and 95.9% respectively in the process of colloid release. The permeability losses of aqueous mediums are mainly due to the spatial redistribution of released colloidal particles in the media.

**Key words:** colloid release; sodium adsorption ratio; aquifer; permeability; hydrogeology; pollution control; coastal regions.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos. 40872156, 40602029); 天津市自然科学基金重点项目 (No. 11JCZDJC24700); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2009ZX07212-003).

**作者简介:** 李海明 (1971-), 男, 教授, 博士, 主要从事地下水资源利用与污染控制研究. E-mail: lhm99044@163.com

## 0 引言

20 世纪 80 年代以来,人们在野外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  $1\ \mu\text{m}$  的可移动胶体,胶体由于其巨大的比表面积和较多的表面电荷,能优先吸附可溶态污染物,使得移动性很弱的病毒、重金属及农药等污染物在可移动胶体作用下加速运移.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(李海明等,2008).胶体的释放存在于天然的多孔含水介质中(表面土壤、含水层和岩层).地下水流速、pH 值的增加,能在一定程度上使含水层中胶体物质释放(Ryan and Gschwend, 1994; Roy and Dzombak, 1996; 吴锦兰等,2009).在一定流速条件下,改变溶液化学条件如离子强度、pH 值和钠吸附比(SAR)可以促使饱和和多孔介质中胶体颗粒的释放(McDowell-Boyer, 1992).含水介质胶体释放动力学过程为对数曲线,水溶液在强酸强碱时抑制含水介质胶体的释放,胶体的释放量随溶液中  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的增加而减少(Li *et al.*, 2007).盐溶液中只有一种阳离子时,对应胶体颗粒释放的盐浓度称为临界盐浓度或极限盐浓度,低于该值时,胶体颗粒会从孔隙壁上释放出来;而在  $\text{NaCl}$  和  $\text{CaCl}_2$  混合溶液体系中,对应颗粒释放时的盐浓度则称为临界离子强度或极限离子强度(Vaidya and Fogler, 1990; Blume *et al.*, 2005).胶体释放与多孔介质中二价离子的相对饱和度密切相关,当多孔介质完全由单价离子饱和时,胶体释放速率快;但饱和离子是二价时,胶体释放很少,可以忽略不计(Grolimund and Borkovec, 2006).随着水溶液中离子强度的增大,胶体释放效率降低(Bunn *et al.*, 2002);低的离子强度下胶体更容易释放(Ryan and Gschwend, 1994).

国内外学者对于含水介质胶体释放及其离子强度影响因素进行了较多的研究,但对于滨海地区含水层含水介质发生的胶体释放研究还很少.本文针对滨海地区含水层含水介质颗粒细、胶体含量高的

特点以及普遍存在的胶体释放现象,采集天津平原地区含水层土样,通过室内批实验和土柱实验,主要研究在  $\text{NaCl}$  和  $\text{CaCl}_2$  混合盐溶液体系下滨海含水层含水介质中胶体释放动态变化规律,讨论不同的 SAR 对胶体释放的影响及其效应,同时分析了胶体颗粒释放过程中含水介质渗透性变化特征,从而为精确地描述胶体促使下污染物在地下环境中迁移的预测和防治提供科学依据. SAR 是土壤溶液中钠含量的重要参数,其计算公式如下:

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}])/2}}, \quad (1)$$

式中:  $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{Ca}^{2+}]$  都是以  $\text{mmol/L}$  表示的离子浓度,本文中  $\text{Mg}^{2+}$  浓度值取 0.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验用土取自天津市滨海地区具有代表性的含水层粉土、粉砂和中砂.土样经风干、压碎、过 60 目筛后备用.采用吸管法分析了土样的机械组成,同时用常规方法分析土样的重度、孔隙度、相对密度和阳离子交换容量(CEC)等,各土样机械组成和主要特征见表 1.

### 1.2 胶体浓度的测定

根据浊度和胶体溶液浓度之间的相关关系,绘制胶体浓度—浊度标准曲线,然后根据标准曲线,通过测定溶液的浊度来计算该溶液的胶体浓度.

(1)标准曲线的绘制:吸取 2, 4, 5, 6, 8 和 10 mL 已知浓度的胶体溶液放置 25 mL 比色管中,加水至 10 mL 标线,混匀,测定其浊度.由测得的浊度绘制胶体浓度( $\text{mg/L}$ )对浊度的标准曲线(图 1).胶体溶液的浓度通过重量法测定.

(2)测定实际样品溶液的浊度,根据标准曲线计算胶体浓度.

### 1.3 实验装置

实验装置采用自己装配的实验仪器,主要由供

表 1 含水层含水介质机械组成和主要特征

Table 1 Mechanical composition and major characteristics of water-bearing media of aquifer

含水介质	机械组成(%)					容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	相对密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙度	CEC ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
	>2 mm	2.0~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm				
粉土	0.00	0.00	0.00	10.32	89.68	1.77	2.61	0.32	1.352 8
粉砂	0.00	0.00	2.43	58.01	39.57	1.71	2.76	0.38	0.201 2
中砂	3.40	42.70	16.30	15.10	22.50	1.84	2.90	0.37	0.189 8

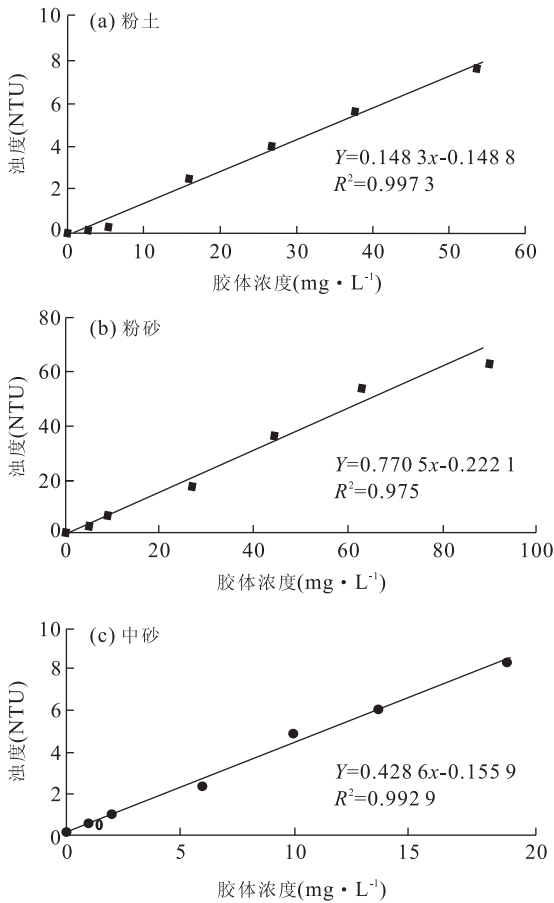


图 1 胶体标准曲线

Fig. 1 Standard curve of colloids

水箱、定水头装置、渗流柱和流出液测量系统组成(图 2)。实验主体为内径 3 cm、长 5 cm 的水平渗流柱,实验土样为天然粉土、粉砂和中砂。定水头装置是带有进水口、出水口和泄水口的有机玻璃柱,其中在柱上端侧面打孔作为泄水口,起到定水头的作用,使柱内水位一定;定水头装置由铁架台固定,铁架台可以调整水头高度;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,使实验不至于失败。供水瓶是一个带进、出水口的玻璃瓶,容积为 15 L 左右。流出液测量系统主要由量筒、电导率仪、浊度仪和 pH 计组成。

### 1.4 实验方法

(1)批实验:量取 50 mL 蒸馏水于 11 个锥形瓶中,分别加入不同质量的 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub>(总浓度为 100 mg/L)形成 Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> 质量比分别为 0 : 100, 1 : 99, 5 : 95, 10 : 90, 40 : 60, 50 : 50, 60 : 40, 90 : 10, 95 : 5, 99 : 1, 100 : 0 的溶液,对应的 SAR 为 0, 0.08, 0.41, 0.85, 4.16, 5.70, 7.64, 22.92, 34.22, 79.74, ∞; 随后加入 5 g 风干土样于锥形瓶

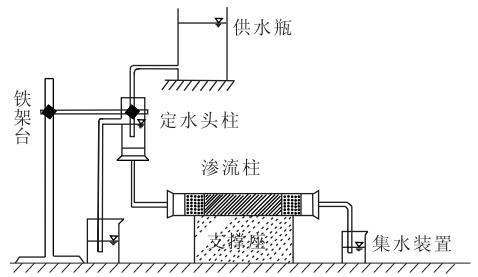


图 2 实验装置示意

Fig. 2 Sketch of experimental apparatus

中,然后放入恒温振荡器上振荡;24 h 后取出各自的锥形瓶,立即取出上层清液,在离心机上进行固液分离;随后对离心液用抽滤装置(0.8 μm 微孔滤膜)进行抽滤,并测定溶液的浊度,换算出胶体释放量和不同钠钙比间的关系曲线。

(2)土柱实验:①根据土样的天然容重,采用“湿装法”将粉土、粉砂和中砂分别装入 3 个长度为 5 cm、内径为 3 cm 的有机玻璃柱中,分段装填,边装填边用玻璃棒扎实,使土体均匀;土体两端用粗粒石英砂做垫层,石英砂试验前用蒸馏水和超声波清洗干净,以便去除石英砂中的胶体颗粒。②土柱装好后,用 SAR 为 0 的溶液缓慢地饱和土柱,以驱赶土柱中的气体。将饱和后的土柱用胶皮管与定水头缓冲柱连接,土柱水平放置,以去除重力作用对胶体迁移的影响。③在定水头条件下,继续用 SAR 为 0 的溶液淋滤土柱,直到流出液的电导率和浊度达到稳定值为止。④随后依次将流入液换成 SAR 为 8 和 ∞ 的蒸馏水,按照③的操作步骤。实验过程中连续测定流出液的体积、电导率、浊度(胶体)。最后在进水溶液 SAR 为 ∞ 的条件下,当胶体释放浓度稳定在一个范围,含水介质渗透性变化幅度很小时,实验停止。

## 2 结果与讨论

### 2.1 批实验

混合溶液中不同 SAR 与含水介质中胶体释放量的关系曲线见图 3。由图 3 可见,溶液 SAR 越大,胶体释放量越大。当 SAR 为 0,即溶液中只含有 Ca<sup>2+</sup>时,粉土、粉砂和中砂胶体释放量均很少,分别为 0.898 mg/g、2.050 mg/g 和 0.192 mg/g;当 SAR 为 7.64 时,粉土、粉砂和中砂对应的胶体释放量分别为 2.750 mg/g、9.003 mg/g 和 1.490 mg/g;以 SAR=7.64 为界,当混合溶液 SAR 大于 7.64,即 Na<sup>+</sup> : Ca<sup>2+</sup> 质量比大于 60 : 40 时,胶体释放量增加

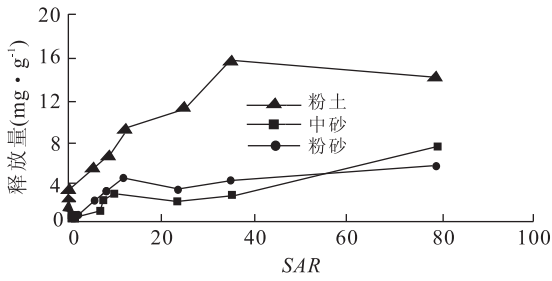


图 3 含水介质胶体释放量与 SAR 关系曲线

Fig. 3 Correlation curves of colloid release capacity of water-bearing media and sodium adsorption ratio (SAR)

幅度变小;随着溶液中  $Ca^{2+}$  含量的减少, SAR 变大, 胶体的释放量随之增加;当溶液中没有  $Ca^{2+}$ , 即 SAR 无穷大时, 胶体释放量达到最大, 粉土、粉砂和中砂胶体释放量分别为 4.139 mg/g、21.848 mg/g 和 5.599 mg/g. 同时也看出, 在相同 SAR 下, 粉砂胶体释放量大于粉土和中砂.

随着混合溶液中  $Ca^{2+}$  含量的减小, SAR 逐渐变大, 胶体的释放量也随之增大, 反映出  $Ca^{2+}$  对胶体颗粒释放有抑制作用, 并且这种抑制作用随着  $Ca^{2+}$  含量的增高而增强. 这是由于胶体颗粒上吸附了大量的  $Ca^{2+}$  离子, 极大地降低了胶体颗粒表面的  $\zeta$  电位. 而  $\zeta$  电位的降低必然导致双电层斥力的减小, 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不容易释放出来. 因此, 随着混合溶液中  $Ca^{2+}$  含量的增加, 胶体更不容易释放出来.

### 2.2 土柱实验

批实验中发现, 在 NaCl 和  $CaCl_2$  混合溶液系统中, 含水介质胶体颗粒的释放不仅与溶液所含阳离子价态有关, 而且还与高价态阳离子的含量有关系,  $Ca^{2+}$  含量越高, 胶体越不容易释放出来, 反映出  $Ca^{2+}$  对胶体释放的抑制作用. 为了全面地研究 NaCl 和  $CaCl_2$  混合溶液体系中胶体的动态释放规律, 分别用 SAR=0, 8 和  $\infty$  的混合溶液依次淋滤土柱. 以土柱出水胶体浓度(图 4)和胶体累积释放量为纵坐标(图 5), 流过土柱水的孔隙体积数为横坐标, 绘制胶体释放特征曲线. 1 个孔隙体积是指土柱内含水介质孔隙度与体积的乘积; 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. 值得注意的是, 一般不应以时间  $t$  为横坐标, 因为不同实验含水介质的孔隙体积及流速不同, 如以时间  $t$  为横坐标, 不同含水介质实验的穿透曲线可比性差些.

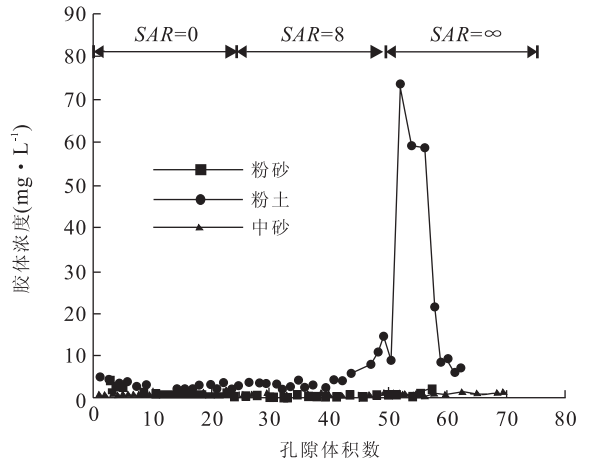


图 4 不同 SAR 条件下含水介质胶体释放曲线

Fig. 4 Curves of colloid release water-bearing media in different SAR conditions

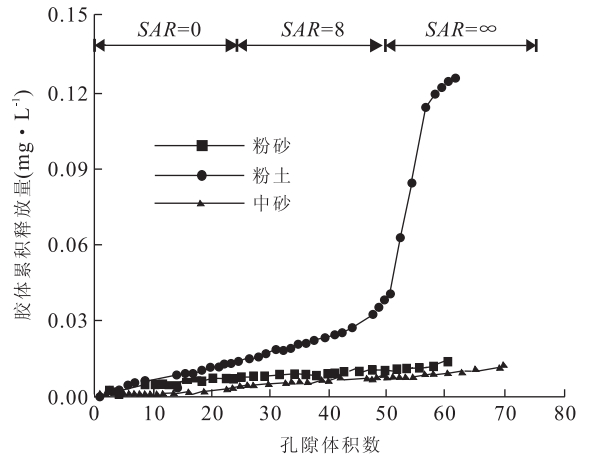


图 5 不同 SAR 条件下含水介质胶体累积释放量曲线

Fig. 5 Accumulation release capacity of colloid water-bearing media in different SAR conditions

从图 4 和图 5 中可以看出, 不管进水溶液的 SAR 如何变化, 粉砂和中砂 2 种含水介质释放胶体浓度或胶体释放量很小. 粉砂经历 60 个孔隙体积数, 胶体累积释放量仅为 0.013 mg/g; 而中砂经历 70 个孔隙体积数, 胶体累积释放量仅为 0.012 mg/g. 而对粉土而言, 当用 SAR 为 0 和 8 的混合溶液依次淋滤土柱时, 流出液中胶体释放浓度很小, 胶体累积释放量仅为 0.023 mg/g; 而当 SAR 为  $\infty$  的混合溶液淋滤土柱时, 开始有明显的胶体颗粒释放出来, 胶体释放浓度随孔隙体积数的增加而增加; 当孔隙体积数为 52 时释放浓度瞬时增加, 达到峰值 73.76 mg/L, 然后随着孔隙体积数的增加而减少, 最后胶体最大累积释放量达 0.13 mg/g.

土柱实验也说明当盐溶液中  $Ca^{2+}$  含量达到一

定值时,对胶体颗粒的释放有很大的抑制作用.这是因为当含水介质矿物中有 2 种以上的阳离子时,含水介质胶体的释放取决于阳离子交换状况,当含水介质处于以高价阳离子为主的交换状况时,土壤胶体不易释放.当溶液中仅含有  $\text{Na}^+$ ,进水溶液中含盐量降低到一定程度时,胶体发生释放并迁移.然而,当  $\text{NaCl}$  溶液中含有  $\text{Ca}^{2+}$  等高价阳离子,且其含量足以使含水介质表面以吸附  $\text{Ca}^{2+}$  为主时,胶体颗粒的释放受到抑制(郑西来等,2007).

### 2.3 不同 SAR 胶体释放对含水介质渗透性的影响

为了研究胶体的释放对含水层含水介质渗透性的影响,采用达西定律对含水介质的渗透系数  $k$  进行了计算.计算公式如下:

$$k = \frac{QL}{A\Delta h}, \quad (2)$$

其中: $Q$  为渗透流量,  $\text{mL}/\text{min}$ ;  $L$  为渗透途径长度,  $\text{cm}$ ;  $A$  为过水断面(在试验中相当于土柱的横断面),  $\text{cm}^2$ ;  $\Delta h$  为水头损失,  $\text{cm}$ .

图 6 表示不同 SAR 条件下,含水介质胶体释放过程中渗透系数的动态变化特征.当进水溶液 SAR 为 0 时,在 20 个孔隙体积数内,粉土渗透系数在  $3.25 \times 10^{-3} \sim 3.28 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  范围内波动变化,渗透性损失 0.07%;粉砂渗透系数由  $8.25 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  降低到  $4.71 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$ ,渗透性损失 42.8%;在 16 个孔隙体积数内中砂渗透系数下降很快,由最初的  $6.28 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{min}$  降到  $3.15 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$ ,下降了一个数量级,渗透性损失达 94.9%.当 SAR 为 8 的水溶液淋滤土柱时,含水介质渗透系数开始降低,粉土 10 个孔隙体积内渗透系数由  $3.28 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  降到  $1.77 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$ ,渗透性损失 42%;粉砂在 20 个孔隙体积内渗透系数由  $4.71 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  降到  $2.32 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$ ,渗透性损失 33.2%;中砂在 14 个孔隙体积内渗透系数由  $3.15 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  降到  $2.85 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$ ,渗透性损失 7.8%.当 SAR 为  $\infty$  的水溶液淋滤土柱时,含水介质渗透系数继续降低,粉土在 20 个孔隙体积内渗透系数由  $1.77 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  降到  $5.87 \times 10^{-5} \text{ cm}/\text{min}$ ,降低了 2 个数量级,渗透性损失 52.8%;粉砂在 20 个孔隙体积内渗透系数由  $2.32 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  降到  $1.10 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$ ,渗透性损失 14.9%;中砂在 22 个孔隙体积内渗透系数由  $2.85 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$  降到  $0.18 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$ ,渗透性损失 4.3%.整个实验过程粉土含水介质相对渗透系数  $k/k_0$  经历了 62.44 个孔隙体积数,由初始

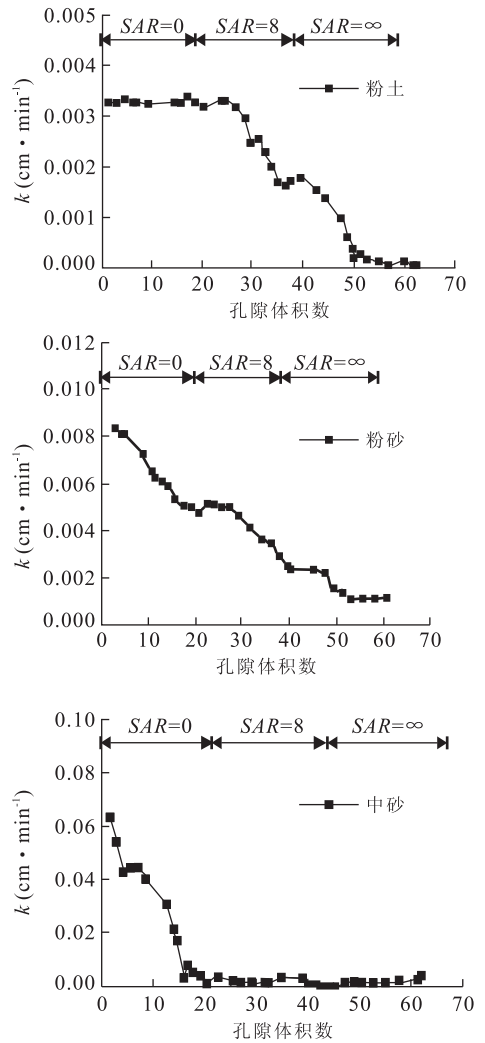


图 6 不同 SAR 条件下含水介质渗透系数变化曲线  
Fig. 6 Permeability change of the water-bearing media in different SAR conditions

的 1.0 逐渐下降到 0.018,渗透性降幅达 98.2%;粉砂含水介质相对渗透系数  $k/k_0$  经历了 60.2 个孔隙体积数,由初始的 1.0 逐渐下降到 0.13,渗透性降幅达 86.7%;而中砂含水介质相对渗透系数  $k/k_0$  经历了 62.36 个孔隙体积数,由初始的 1.0 逐渐下降到 0.041,渗透性降幅达 95.9%.同时也可以看出,在同一 SAR 淋滤土柱时,含水介质渗透性出现先降低后稳定的趋势.

比较粉土、粉砂和中砂 3 种含水介质在不同 SAR 环境下渗透性变化特征可以看出,当 SAR 为 0 的溶液淋滤土柱时,含水介质颗粒越粗,渗透性损失越大;当 SAR 为 8 和  $\infty$  的溶液淋滤土柱时,含水介质颗粒越粗,渗透性损失越小,情况正好相反.含水介质渗透性的降低主要是由于含水介质中的胶体进行了释放、迁移和沉积过程,导致胶体在含水介质中



重新分布;离土柱入水口含水介质胶体首先发生释放,释放的胶体颗粒在水流的作用下在土柱中发生迁移,在新的位置上沉积下来被阻塞在孔隙的孔喉内,导致含水层的渗透性发生变化。

### 3 结论

(1)在 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 混合溶液系统中,含水介质胶体颗粒的释放不仅与溶液所含阳离子价态有关,而且还与高价态阳离子的含量有关系。(2)地下水溶液中 Ca<sup>2+</sup> 含量越高,SAR 越小,含水层胶体越不容易释放出来,反映 Ca<sup>2+</sup> 对胶体释放有抑制作用。(3)土柱实验表明溶液 SAR 为∞时,粉土胶体开始释放,而当溶液 SAR 为 0 时,胶体不释放;在整个试验过程中,随着进水溶液中 Ca<sup>2+</sup> 含量的减少,粉砂和中砂 2 种含水介质胶体释放浓度均很小。(4)当 SAR 为 0 的溶液淋滤土柱时,含水介质颗粒越粗,渗透性损失越大;当 SAR 为 8 和∞的溶液淋滤土柱时,含水介质颗粒越粗,渗透性损失越小。含水介质渗透性的降低主要是由于释放的胶体颗粒在空间上重新分布造成的。

### References

Blume, T., Weisbrod, N., Selker, J. S., 2005. On the critical salt concentrations for particle detachment in homogeneous sand and heterogeneous Hanford sediments. *Geoderma*, 124 (1-2): 121-132. doi: 10. 1016/j. geoderma. 2004. 04. 007

Bunn, R. A., Magelky, R. D., Ryan, J. N., et al., 2002. Mobilization of natural colloids from an iron oxide coated sand aquifer: effect of pH and ionic strength. *Environmental Science and Technology*, 36(3): 314-322. doi: 10. 1021/es0109141

Grolimund, D., Borkovec, M., 2006. Release of colloidal particles in natural porous media by monovalent and divalent cations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 87 (3-4): 155-175. doi: 10. 1016/j. jconhyd. 2006. 05. 002

Li, H. M., Wu, J. L., Jia, X. Y., et al., 2008. Adsorption of ammonia-nitrogen in landfill leachate on the colloids of beach water-bearing media. *Advances in Water Science*,

19(3): 339-344 (in Chinese with English abstract).

Li, H. M., Zheng, X. L., Jia, X. Y., et al., 2007. Release of colloidal particles in natural beach water-bearing media. *Journal of China University of Geosciences*, 18 (Special): 174-176.

McDowell-Boyer, L. M., 1992. Chemical mobilization of micron-sized particles in saturated porous media under steady flow conditions. *Environmental Science and Technology*, 26 (3): 586-593. doi: 10. 1021/es00027a023

Roy, S. B., Dzombak, D. A., 1996. Colloid release and transport processes in natural and model media. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 107: 245-262. doi: 10. 1016/0927-7757(95)03367-X

Ryan, J. N., Gschwend, P. M., 1994. Effects of ionic strength and flow rate on colloid release: relating kinetics to intersurface potential energy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 164 (1): 21-34. doi: 10. 1006/jcis. 1994. 1139

Vaidya, R. N., Fogler, H. S., 1990. Formation damage due to colloidally induced fined migration. *Colloids and Surfaces*, 50: 215-229. doi: 10. 1016/0166-6622(90)80265-6

Wu, J. L., Li, H. M., Wang, B., et al., 2009. Characteristics of particle size and electrokinetic properties of colloid release in coastal water-bearing media. *Water Resources Protection*, 25(3): 18-21 (in Chinese with English abstract).

Zheng, X. L., Wang, D. S., Hu, Z. F., et al., 2007. Water sensitivity of porous media at seawater-freshwater interface. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27 (5): 133-137 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

李海明, 吴锦兰, 贾晓玉, 等, 2008. 滨海含水介质胶体对垃圾渗滤液氨氮的吸附特征. *水科学进展*, 19 (3): 339-344.

吴锦兰, 李海明, 王博, 等, 2009. 滨海含水介质胶体释放的粒度和动电性质表征. *水资源保护*, 25(3): 18-21.

郑西来, 王东升, 胡志峰, 等, 2007. 滨海地区咸淡水界面上含水介质水敏感性的实验. *海洋地质与第四纪地质*, 27 (5): 133-137.