

弱透水层中地下水化学渗透效应的研究现状与展望

陈江, 陈宗宇, 王莹

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要:弱透水层对地下水的运移过程具有不同于一般含水层的水力影响,开展弱透水层中的渗透试验是模拟该影响的直接手段。本文跟踪了国内外化学渗透的研究进展,当前室内模拟试验仍然是该领域的主要研究方法,对不同溶液的渗透试验发现弱透水层有半透膜的作用,可以过滤部分盐分。已经开展的原位试验主要针对泥岩、页岩的渗透特性,对黏性土的原位渗透研究较少。国外已经开展了化学渗透的数值模拟工作,建立了联合水力驱动和化学驱动模型,进行了部分参数的模拟分析。未来,高精度原位化学渗透和反渗透试验研究将成为该领域的一个主要研究方向。

关键词:化学渗透;反渗透;弱含水层;黏性土;水资源

中图分类号:P641.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)06-0045-04

化学渗透是指溶剂从浓度较低的溶液通过半透膜进入浓度较高的溶液中的运动^[1],该运动会致水中溶质分布的变化,通常半透膜会允许溶剂通过而阻挡溶质运移^[2],半透膜的这种特性对地下水中盐分的变化规律研究和地下水污染防治都具有重要价值。

已有研究表明,弱透水层具有一定半透膜效应^[3],认为黏性土可以截留渗透地下水中的盐分,除了溶质弥散传输机制外,黏性土层还起到半透膜的作用,在地下水渗透过程中允许水分子通过而限制了盐离子的迁移,半透膜效应可以允许由于化学梯度导致的水流运动,即化学渗透,而水从溶质浓度高的层位流向浓度低的层位则称为反渗透(图1)。国内外已经开展了较多的室内弱透水层渗透模拟试验,溶质的选择种类多样,但是,黏性土半透膜效应的研究仍缺乏实际可信的原位证据。为此,国外已经开展了原位条件的黏性

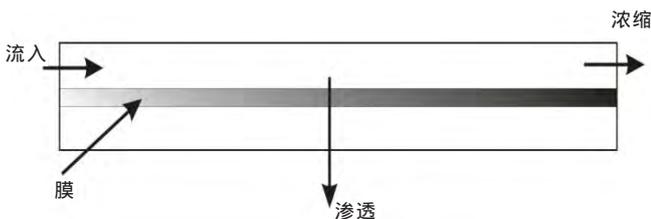


图1 黏性土膜效应示意图

Fig.1 The membrane influence in clay soil

土中膜效应试验,取得了连续的监测数据,并开展了模拟研究,分析弱透水层中膜效应是否存在、存在的条件,取得了一定的成果。总体上,该领域的研究仍处于探索阶段。

由于组成弱透水层的黏性土条件各异,一般研究中都选择不同含水层组间的黏性土作为野外试验的对象,以便更贴近水力联系下的水土条件。当前在野外原位条件下,研究方法主要是分层监测,即在不同深度分别安装压力、TDS(总溶解固体)、pH、温度监测传感器,通常的监测系统如图2所示,监测系统有多个相同的封闭单元,分别独立进行监测,而获得不同压力、时间、深度、温度条件下黏性土释出水中的盐分含量,通过建

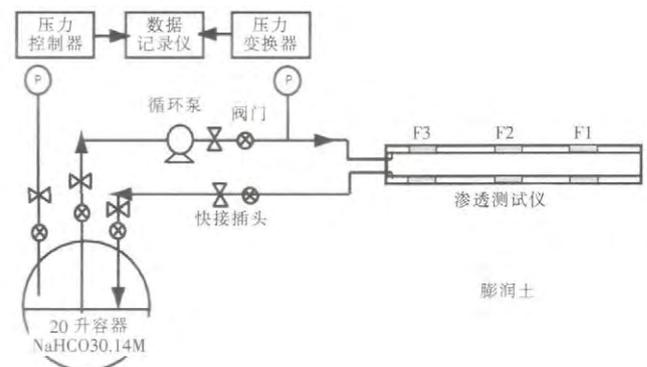


图2 化学渗透监测系统(引自: Ana Maria Garavito)

Fig.2 The monitoring system of chemical osmosis (source: Ana Maria Garavito)

收稿日期:2013-11-15

基金项目:国家973计划项目(2010CB428800)华北平原地下水演变机制与调控

作者简介:陈江(1976-),男,河北邢台人,博士,主要从事水文地质环境地质研究工作。E-mail:shuihuansuo@126.com

立水力驱动和化学驱动条件下的数值模型, 模拟研究弱透水层的地下水渗透特性。

1 原位试验的方法

原位试验需要水文孔孔壁保持开放状态或者由竖管插入井孔内进行监测, 以便于与试验装置进行水力联系(图3)。

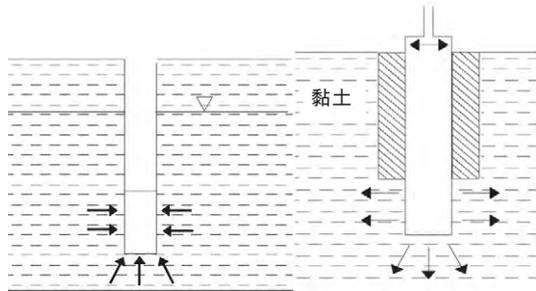


图3 原位化学渗透试验条件

Fig.3 The test conditions of in-situ chemical osmosis

原位试验研究黏土层特性的方法可分为四类: 渗透计、浓度计、孔内测试、push-in 测试。国外已经开展前期研究的原位渗透及超滤试验方法主要有孔内测试和 push-in 方法。孔内测试是研究含水层水力特征的主要手段, 但是由于低渗透黏性土的特性, 难以快速监测孔内水位变化 (Neuzil, 1986)^[4]。孔内测试主要有三种方法: slug test、定水头渗透测试和 shut-in test。slug test 即微水试验, 容易安装和操作, 但是观测周期漫长; 定水头测试操作复杂, 渗透引起的压力变化值很小, 监测精度要求高, 并且初始水力平衡条件难以保证 (Garavito, 2007)^[5]; shut-in test 反应时间短, 但存在泄露的可能 (van der Kamp, 2001)^[6]。为了改善观测周期长的问题, 传统的改进方式是缩小观测管的孔径, 加快孔内水位的变化速度。shut-in test 属于一种 slug test 的改进方法, 摒弃了以观测管水头变化为主的测量方法, 采用封闭加压的形式在研究层位施加外部压力, 安装压力传感器监测压力变化, 由于外力的参与, 观测周期大大缩短。但是该方法也存在密闭空间容易被气体堵塞引起压力失准的问题。Push-in 测试广泛应用于饱和且未压密的粘土孔隙压力上, 将压力传感器直接压入粘土层中, 动态监测孔内压力变化, 一种应用于中等固结粘性土中的测试设备 BAT 就是 push-in 方法的代表, 可以兼顾外施压力测试和抽出采样。

国内外已有的原位试验主要针对页岩、泥岩等介质开展渗透研究, 目的是用于核废料处置和污染物的净化, 国内则尚未见到此类专门的原位试验成果。

2 化学渗透过程的影响因素

2.1 弱透水层对不同类型溶液渗透运移的影响

已有的室内试验显示黏性土由于渗透性差, 内部水位对外部水位变化的响应要迟缓得多, 有明显的滞后现象 (曹文炳, 2005)^[7], 因此对黏性土中地下水渗透的高精度实时监测存在困难。李绪谦等 (2011)^[8]利用土柱渗压试验装置, 在同一粘性土厚度下, 对有机磷、氨氮、硝酸盐渗透通过弱透水层的规律进行了研究。结果显示 pH 较低的污水通过酸性的黏性土层时, 迁移能力较 pH 为碱性时强, 有机磷迁移率可达到 5% 以上, 而弱透水层对氨氮表现出很强的吸附能力。由于黏土颗粒巨大的表面能, 加上处于还原环境, 生物作用微弱, 氨氮主要被吸附作用去除, 以氨离子的形式迁移, 如果存在交换能力更强的阳离子, 与氨氮产生吸附竞争, 可能会使氨氮再次进入地下水, 形成二次污染; 不同 pH 条件下硝酸盐在弱透水层中的衰减趋势基本相同, 表现为初期大部分被弱透水层吸附截留, 后期发生微生物作用, 产生反硝化作用。

2.2 弱透水层对地下水中盐分的运移影响

在滤盐作用方面, 通过分析天津数十年开采条件下多个时段的物探测井曲线和可溶盐分布^[9], 未发现咸水底界大量向深层淡水位移, 间接说明弱透水层存在滤盐效应。胡伏生等 (2010)^[10]利用咸水渗透试验土柱和原状土渗透仪对华北平原咸水在黏性土层中的弥散作用研究发现散土装填的土柱由于尺度大, 试验周期长, 难以充分体现原状土的特性及滤盐作用; 而利用原状土渗透仪的目的是加快试验过程, 试验样品高度减小到 4cm, 通过 NaCl 溶液的渗透测试, 结果显示出渗透系数对土样截留盐分的能力有一定影响。费宇红 (2009)^[11]通过调查分析华北平原近 40 年来地下咸水垂向变化特征, 得出咸水下移的原因是地下水头下降形成水头差, 水头高的咸水向水头低的淡水层越流补给, 造成深层淡水咸化。

2.3 影响化学渗透发生的条件

在化学渗透影响因素方面, 已经开展了影响半透膜效率的条件研究^[12]。试验中, 注入和抽取膜两端溶液的速率并不影响膜内的溶液通过速率, 说明外部溶液质量运移不是控制该过程的一个参数, 而随着注入和抽取溶液温度的提高, 溶液和溶质通过率都在增大。Saindon (2005)^[13]用细小的球体混合蒙脱土做了 5 个水力梯度下的渗透测试, 小球体分别含有 100%、50%、

25%、12%、0%的黏土,测试结果显示每种混合样品都具有半透膜的特征,随着黏土比例的增大,滤盐率也越大,而不含黏土的玻璃球体则不具有半透膜的特性。Heister(2006)^[14]采用室内试验方法,用 Boom Clay 和 Calais Clay 作为膜试验样品,测试土膜在水流和离子扩散条件下的膜电位,其中 Boom Clay 包含 60%的粘土和 20%的石英,Calais Clay 则是伊利石、高岭石、蒙脱石的混合物。化学渗透试验结果发现,渗透流、膜效应、扩散同时存在,Boom Clay 呈现了明显的半透膜效应,膜效应程度与盐分浓度梯度高度相关,随着盐分浓度增大,由膜效应引发的电势渗透逆流越显著。在利用半透膜处理污水的应用中,盐分在半透膜一端会发生浓度极化现象,即在高浓度一侧盐析出,污染膜的表面,导致半透膜性质改变(Madaeni,2010)^[15],黏土层是否具有此类性质尚需验证。

3 地下水渗透的机理研究

在弱透水层中反渗透效应下耦合流动模型方面,席永慧^[1]对国外相关研究做了总结,认为迁移公式一般从不平衡热动力学导出,但对通过半渗透黏土屏障的溶质流量的能力缺乏评判。马建良等^[16]总结了溶质运移和水流弥散过程的影响因素,一般认为有以下两种:①土壤特性,如孔隙度、含水率和弥散度等;②水力特征,如渗透系数和水头差。

在渗透理论框架方面,只有有限的研究关注于弱透水层引起的盐分分布变化和渗透压的变化,还没有一套完整的体系来描述试验的现象。Cey^[17]根据实验室的测试结果,在超滤和渗透平衡条件下,利用粘性土两端压力和浓度构成的非连续表达式来计算膜效应的效率;Oduor(2004)^[17]结合水质、溶液守恒方程和连续流动方程,构建了一套耦合微分方程,用来模拟存在膜效应条件下的瞬时流动和溶液运移条件。Bader and Kooi(2005)^[18]推导了由水化学和水力驱动的耦合流方程,引入了扩散系数,适合于孔隙介质的模拟(包括存在膜效应的介质),方程中没有膜效应的参数,为此依据膜效应施加于自由水影响,对扩散系数做了部分修正,但并没有反映出膜对溶质的筛选特性。从参数的计算看,该方程是传统的地下水流溶质扩散方程的修改。Malusis(2012)^[19]对弱透水层耦合流方程做了检验性综述,从理论和实践的观点解释了不同表达式的意义,认为流量表达的差别是,盐分扩散方程中对流量的系数在反扩散方程中并不存在,其结果是扩散方程计算的

对流量对溶质总运移量的贡献比反扩散方程小。氯的同位素证据显示,在化学浓度梯度条件下,氯离子会由黏土运移至石灰岩中,转移过程中氯离子会与周围发生相互作用,而使之前的同位素证据受到影响^[20]。

4 化学渗透模拟

渗透模拟需要利用原位试验开展长期的化学渗透监测试验,并建立水力、化学驱动联合条件下的耦合模型,包括溶液方程 J_v (m^3/m^2s)和溶质方程 J_s^m (kg/m^2s),模型的理论基础是渗透压梯度函数^[21-22]:

$$J_v = -\frac{k}{\mu}(\rho_0 g \nabla h - \sigma \nabla \pi)$$

$$J_s^m = -D^* \nabla(\rho w) + (1 - \sigma) \rho w J_v$$

$$\nabla \pi = \left(\frac{RTf\rho}{m_i} \right) \nabla w$$

式中: R 为通用气体常数($J/mol K$); T 为温度; f 为1mol电解质离解的离子摩尔数; m_i 为摩尔重量(kg/mol); ρ 为流体密度(kg/m^3); w 为溶质质量分数; k 为弱透水层内在渗透率(m^2); μ 为流体黏滞系数($Pa s$); ρ_0 为溶质密度(kg/m^3); g 为重力加速度($9.81 m/s^2$); h 为井孔中水头(m); σ 为弱透水层渗透效率; $\nabla \pi$ 为渗透压; D^* 为扩散系数(m^2/s)。有效扩散系数为水膜厚度的函数。

通过上述渗透模拟方程,配置模型的边界条件如图4所示,虚线范围为模拟的边界,包括低渗透性区、高渗透性区和中间的多孔介质过滤区,模拟区宽度为1m,这个数据通常来自敏感性分析(Baechler,2012)^[23],可以有效避免右侧边界条件的影响。模型可模拟不同参数条件下的渗透压力变化、孔隙度对渗透系数和渗透

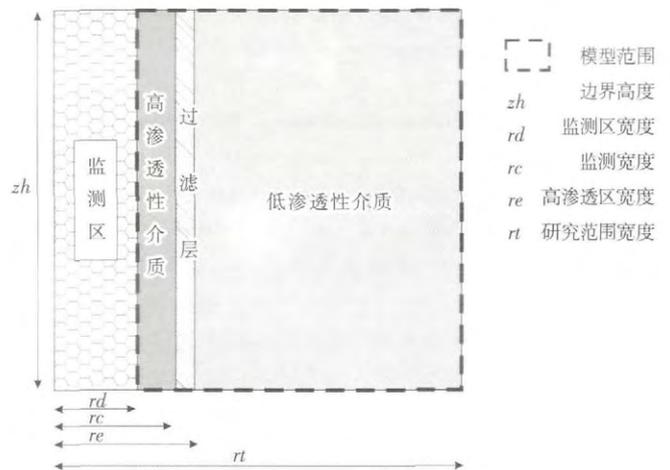


图4 渗透模拟区域边界示意图(改自:A.M. Garavito)

Fig.4 The osmosis simulation boundary (revised from: A.M. Garavito)

压的影响、盐分浓度对渗透率的影响,根据不同的试验参数,设置不同的试验周期。由于影响地下水渗透的因素很多,因此必须尽可能多的考虑不同条件下的渗透规律,因此模拟的条件设置分类较多。

5 结论与展望

从目前的研究成果看,室内模拟实验一直是研究弱透水层中地下水运移的常用方法,国内外利用原状样品在室内的模拟试验结果足以说明黏性土具有一定的膜渗透效应,表现出了化学渗透和反渗透的特性。试验结果显示不同的溶质在弱透水层中的渗透规律存在差别,因此不同的地下水类型有不同的弱透水层渗透规律,而粘土层对盐分的截留也与溶液浓度有关。由于室内试验有边壁效应和尺度效应存在,原位的渗透试验是较为有效的解决方法。

对弱透水层中地下水渗透的模拟已经可以完成特定岩性的弱透水层中渗透压随时间和溶液浓度变化的分析,建立的渗透耦合流模型考虑了温度、渗透率、流体性质等参数,比较全面的考虑了可能影响渗透的因素。

已有的化学渗透模型参数多来自室内试验,而大面积弱透水层中溶质运移的研究需要有高精度原位数据的支持,因此,未来需要建立多种影响因素控制下的弱透水层中化学渗透流动模型。针对特定研究区存在的地下水类型分布状况,开展化学渗透和反渗透试验,模拟不同层位和水力梯度下的地下水渗透规律,对控制化学渗透的因素进行更为深入的研究。

参考文献:

- [1] 席永慧,冯世进. 黏质土壤的膜性能研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009,37(2):187-191.(XI Yonghui, FENG Shijin. Development of study on semi-permeable membrane of clayey soil [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009,37(2):187-191. (in Chinese))
- [2] M. Cruchaudet, J. Croisé, J.M. Lavanchy. In situ osmotic experiment in the Callovo-Oxfordian argillaceous formation at the Meuse/Haute-Marne URL (France): Data and analysis [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008,(33):S114-S124.
- [3] S.T. Horseman, et al. Swelling and osmotic flow in a potential host rock [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007,(32):408-420.
- [4] Neuzil, C.. Groundwater flow in low permeability environments [J]. Water Resources Research, 1986,(22):1163-1195.
- [5] A.M. Garavito, P. De Cannière, H. Kooi. In situ chemical osmosis experiment in the Boom Clay at the Mol underground research laboratory[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007,(32):421-433.
- [6] Van der Kamp, G.. Methods for determining the in situ hydraulic conductivity of shallow aquitards an overview[J]. Hydrogeology Journal, 2001,(9):5-16.
- [7] 曹文炳, 万力, 龚斌, 等. 水位变化条件下黏性土渗流特征试验研究 [J]. 地学前缘, 2005,(12):101-106. (CAO Wenbing, WAN Li, GONG Bin, et al. Experimental research on saturation characteristics of clay under variation in water levels [J]. Earth Science Frontiers, 2005,(12):101-106. (in Chinese))
- [8] 李绪谦, 朱雅宁, 于光, 等. 氨氮在弱透水层中的渗透迁移规律研究[J]. 水文, 2011,31(3):71-75.(LI Xuqian, ZHU Yaning, YU Guang, et al. Study on permeation and migration law of ammonia nitrogen in aquitard [J]. Journal of China Hydrology, 2011,31 (3):71-75. (in Chinese))
- [9] 王家兵. 华北平原深层淡水在开采条件下接受上覆咸水越流补给-以天津平原为例[J]. 水文地质工程地质, 2002,6:35-37. (WANG Jiabing. Leakage recharge from pores saline groundwater to deep fresh groundwater on the condition of pumping in Huabei plain—a case of Tianjing plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002,6: 35-37. (in Chinese))
- [10] 王平. 咸水通过黏性土层的弥散作用实验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2010. (WANG Ping. Experimental study on dispersion during saline water flow through clay-bearing soil [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010. (in Chinese))
- [11] 费宇红, 张兆吉, 宋海波, 等. 华北平原地下咸水垂向变化及机理探讨 [J]. 水资源保护, 2009,25 (6):21-23. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, SONG Haibo, et al. Discussion of vertical variations of saline groundwater and mechanism in north China plain [J]. Water Resources Protection, 2009,25(6):21-23. (in Chinese))
- [12] Mavis C.Y. Wong, et al. Impacts of operating conditions and solution chemistry on osmotic membrane structure and performance [J]. Desalination, 2012,287:340-349.
- [13] Rosanna Saindon. Hyperfiltration of NaCl solutions using a simulated clay/sand mixture at low compaction pressures [J]. Aquatic Geochemistry, 2005,11:433-444.
- [14] Katja Heister. Induced membrane potentials in chemical osmosis across clay membranes [J]. Geoderma, 2006,136: 1-10.
- [15] S.S. Madaeni, S. Samieirad. Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by wastewater [J]. Desalination, 2010,257:80-86.
- [16] 马建良,陈喜,程勤波,等. 一维变密度溶质运移实验及参数推求[J]. 水资源保护, 2008,(3):9-11.(MA Jianliang, CHEN Xi, CHENG Qinbo, et al. Identification of hydrodynamic parameters based on one-dimensional variable density and solute transport numerical model [J]. Water Resources Protection, 2008, (3):9-11. (in Chinese))
- [17] Oduor, P.. Transient Modeling and Experimental Verification of Hyperfiltration Effects [D]. Department of Geological and Petroleum Engineering, University of Missouri-Rolla, 2004.
- [18] Bader, S., Kooi, H.. Modeling of solute and water transport in semi-permeable clay membranes: Comparison with experiments [J]. Advances in Water Resources, 2005,(28):203-214.
- [19] Michael A. Malusis, et al. Critical review of coupled flux formulations for clay membranes based on nonequilibrium thermodynamics[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2012,138-139:40-59.

(下转第8页)

- 场为例[J]. 水文, 2010,30(6):19-23.(CHANG Yong, JIANG Guanghui, KANG Caixia, et al. Runoff process of overland flow in peak cluster depression: the case from a karst experiment site [J]. Journal of China Hydrology, 2010,30(6):19-23. (in Chinese))
- [46] Suski B, Revil A, Titov K, et al. 2006. Monitoring of an infiltration experiment using the self-potential method [J]. Water Resources Research, 2006,42(8):1-11.
- [47] Kuroda S, Jang H, Kim H J. Time-lapse borehole radar monitoring of an infiltration experiment in the vadose zone [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009,67(4):361-366.

Progress in Study on Precipitation Infiltration Recharge of Karstic Groundwater System

WANG Shufang

(Beijing Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100195, China)

Abstract: Abundant of high quality groundwater is stored in karstic groundwater system, and precipitation is a major recharge source of shallow karstic groundwater system that has an important significance of water supply. Calculation of precipitation recharge is quite a complex process due to its anisotropy, heterogeneity and difficulty in monitoring directly. Identifying water catchment area of a karstic groundwater system is the primary work before calculation of precipitation recharge, which could be effectively calculated by tracer method and empirical formula method. The major methods for precipitation recharge calculating are hydrograph analysis method, oxygen isotope method, chloride mass balance method, multi-variables comprehensive analysis method based on geographic information system (GIS) and modeling method. Critical points and applicable conditions on different methods were compared. In order to calculate recharge of Karstic groundwater system accurately, spatial-temporal features of physical and chemical properties of precipitation and water-rock interaction could be determined as one of future research directions.

Key words: karst aquifer system; catchment area; precipitation recharge; infiltration experiment

=====

(上接第 48 页)

- [20] Veronique Lavastre. Chlorine transfer out of a very low permeability clay sequence (Paris basin, France): 35Cl and 37Cl evidence [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005,69(21):4949-4961.
- [21] Kooi, H., Garavito, A.M., Bader, S.. Numerical modelling of chemical osmosis and ultrafiltration across clay formations [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003,78-79:333-336.
- [22] Bader, S., Kooi, H.. Modeling of solute and water transport in semi-permeable clay membranes: comparison with experiments[J]. Advances in Water Resources, 2005,(28):203-214.
- [23] S. Baechler, et al. Modeling coupled chemico-osmotic and advective-diffusive transport of nitrate salts in the Callovo-Oxfordian Clay [J]. Advances in Water Resources, 2012,(49):76-85.

Research Progress and Perspectives of Chemical Osmosis Influence of Groundwater in Aquitard

CHEN Jiang, CHEN Zongyu, WANG Ying

(Institute of Hydrogeology and Environmental Research, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Hydraulic impact for migration process of groundwater imposed by aquitard is different from the general aquifer. In this paper, the research advances in chemical osmosis of aquitard was tracked. It was found that indoor test is still the main method for researching in this field, the permeability test of different solution confirmed that aquitard with semi permeable membrane function, and it can filter out some salt. In-situ tests have been carried out mainly in mudstone, shale's permeability, less on the permeability of clay. Foreign scholars have carried out numerical simulations study for chemical penetration, using of a joint hydraulic driver and chemically driver model, to analyze some indicators characteristics. In future, in-situ chemical osmosis and reverse osmosis test in high precision will become a main research direction in this field.

Key words: chemical osmosis; reverse osmosis; aquitard; clay; water resources