

盐酸溶液对粉土抗剪和压缩指标影响的试验

王述红¹, 白龙飞², 韩 莉³, 王存根¹
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 内蒙古科技大学 建筑与土木工程学院, 内蒙古 包头 014010;
3. 稀土冶金及功能材料国家工程研究中心, 内蒙古 包头 014030)

摘 要: 土体受到酸性溶液污染, 会引起成分、微观结构、力学指标的变化. 本文通过质量分数为 0 (清水), 1%, 4%, 8%, 12% 盐酸的浸泡试验, 模拟粉土受酸溶液污染. 由室内固结快剪和快速固结试验, 得到受侵蚀粉土抗剪及压缩指标的变化规律. 结果表明: 黏聚力增加, 内摩擦角减小, 压缩模量减小, 压缩系数、压缩指数变大. 通过矿物分析、电镜扫描, 从土的组成成分、微观结构两方面对变化进行解释. 土体抗剪和抗压缩能力的改变, 势必引起承载力和边坡稳定等相关指标的变化. 因此在勘察设计和某些事故的成因分析时, 对有酸污染隐患的粉土地区应考虑上述变化的情况.

关 键 词: 污染土; 抗剪及压缩指标; 微观结构; 矿物成分; 作用机理

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)03-0405-05

Experiment of Resisting Shear and Compression Index of Silt Corroded by Hydrochloric Acid Solution

WANG Shu-hong¹, BAI Long-fei², HAN Li³, WANG Cun-gen¹
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. National Engineering Center of Rare Earth Metallurgy and Functional Materials, Baotou 014030, China.
Corresponding author: BAI Long-fei, E-mail: wwzgyt@foxmail.com)

Abstract: The composition, microstructure and mechanical indexes of the soil can be changed by acid solution. Through the 0 (water), 1%, 4%, 8%, 12% concentration of hydrochloric acid solution soak tests, the silt polluted by acid solution was simulated. The variability of resisting shear and compression index about the corroded silt was gained by indoor consolidated quick shear test and quick consolidation test. The results show that the cohesive force is increased, the internal friction angle and the compression modulus are decreased, and the compression coefficient and the compression index are increased. The reason for the corroded silt property variation about material composition and microstructure was explained by the results of the chemical composition analysis and scanning electron microscope. The relevant indexes of bearing capacity and slop stability will be changed consequentially because of the variations about resisting shear and compression ability. Therefore, the above variable conditions should be considered in the survey design and analysis of the accident causes for the silt region with acid pollution hazard.

Key words: contaminated soil; resisting shear and compression index; microstructure; mineral composition; mechanism of action

污染土是环境岩土工程领域的一个新热点. 其在实际工程中主要体现在: 城市工业厂区的腐蚀性废水废料通过多种途径进入地基引发土体成分、结构、性质变化; 一些存有特定矿物成分 (如高硫化物、黄铁矿物) 的矿区, 经化学作用产生的高腐蚀性产物 (硫酸等) 对土体的侵蚀, 引发土体

强度和边坡稳定性降低的情况.

相关学者针对环境问题日益严峻的现状,结合人类在一些重大问题上达成广泛共识的时代背景^[1-2],根据科学理论和工程的需要,在污染土及关联领域进行了许多卓有成效的研究.如: Raicevic 等^[3]经过理论分析和试验,研究了磷酸盐对土壤中铅镉的固化作用. Durmusoglu 等^[4]对城市固体废物填埋场的多场相互作用,结合固相、液相、气相的关系,建立一维沉降模型. Ramamurthy 等^[5]经过内室试验,研究了表面活性剂对于铜、锌污染土的修复作用. Uchimiya 等^[6]发现添加生物炭可以引起土壤的 pH 升高,提高镉、镍的固化效果. 朱春鹏等^[7]采用人工制备方法,研究了酸碱污染土强度特性,且得到酸污染土总应力强度与浓度的数值关系. Annamalai 等^[8]研究了电动法对纺织厂周边的受污染土壤的修复作用. Saadawi 等^[9]经试验研究,比较了蓖麻、小花锦葵、偃麦草三种植物对于石油污染土的修复效果. Deok 等^[10]通过试验,比较了盐酸、硝酸、硫酸、酒石酸、氢氧化钠 5 种化学试剂对氟污染土的清洗效果. 郭凡娣等^[11]证实草酸联合东南景天,对镉污染土壤有一定的修复作用.

本文采用原状土盐酸浸泡模拟污染的方法,进行室内快速固结试验和固结快剪试验,得到受侵蚀后粉土抗剪压缩指标的变化规律. 同时借助矿物成分分析、扫描电镜试验,在组成成分和微观结构方面对酸污粉土性质变化状况进行分析解释.

1 试验方案

1.1 土样的选取

本试验的土样是选取包头市井坪三村地表下 3~7 m 粉土, pH = 8 为弱碱性. 根据取样时的实地勘察报告:土密度为 1.43 g/cm³,最优含水率为 18%,土体的液、塑限和塑性指数分别为 27%, 18% 和 9%.

1.2 酸环境的模拟

取质量分数为 36% 的盐酸试剂,分别配制出质量分数 1%,4%,8%,12% 的溶液各 1 000 mL. 8% 和 12% 的值是在工业冶金、电镀、造纸等实际生产中产生的酸废液常见质量分数. 1% 是考虑到工业厂区污水受降雨及地下水位上升稀释等情况;4% 是过渡质量分数,这是考虑到 1% 和 8% 之间的连贯性,便于后期成图、观察曲线和数据分析.

1.3 试验方法

本文参考环刀浸泡试验的方法^[7],将土样用环刀取出,同时在环刀外壁涂一层凡士林作为防腐措施. 将涂有凡士林的环刀外壁用保鲜膜向上包裹,随后在环刀上下面分别加滤纸、透水石覆盖. 先用弹性塑料绳将包裹好的粉土土样及环刀绑紧,再进行浸泡试验. 把制作出的样品分别放于质量分数为 0(清水),1%,4%,8%,12% 盐酸溶液中浸泡 10 d. 在规定时间内及时取出土样,进行室内固结快剪试验、快速固结试验、成分分析和电镜扫描试验.

2 试验结果

2.1 固结快剪试验

试验在浸泡的土样刚取出的半小时内进行. 采用理正土工试验 3.5 软件计算数据,得到内摩擦角和黏聚力变化结果,如图 1 所示.

由图 1 可知,清水浸泡的粉土的黏聚力只有 2.1 kPa. 随盐酸溶液质量分数增加,黏聚力值上升. 其最小值和最大值 3.8 kPa 分别出现在 0 和 12% 处,两者相差 81.0%. 清水浸泡的粉土内摩擦角只有 2.5°. 随盐酸质量分数增加,数值缓慢减少,最大峰值和最小值 2.3° 分别出现在 0(清水)和 12% 处. 曲线中部平直,表明内摩擦角没有变化,均为 2.4°. 内摩擦角数值前后变化程度很小,幅度仅为 -8%.

从以上结果得到粉土受盐酸侵蚀的剪切指标变化规律:受盐酸侵蚀,粉土黏聚力变大,随盐酸质量分数升高而增加;粉土内摩擦角稍有减小.

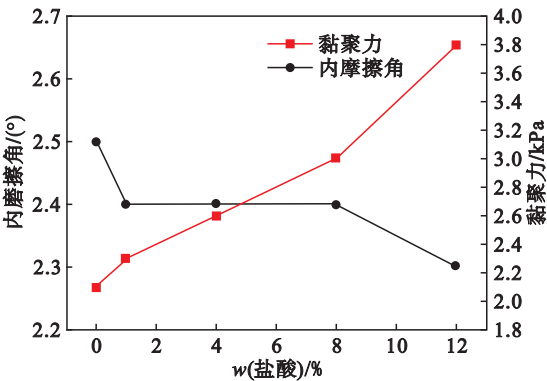


图 1 污染土的黏聚力和内摩擦角
Fig. 1 Cohesive force and internal friction angle of contaminated soil

2.2 快速固结试验

试验在浸泡的土样刚取出的半小时内即放入仪器中进行. 采用理正土工试验 3.5 软件计算数

据,得到压缩指数、压缩模量、压缩系数的变化曲线,如图 2,图 3 所示.

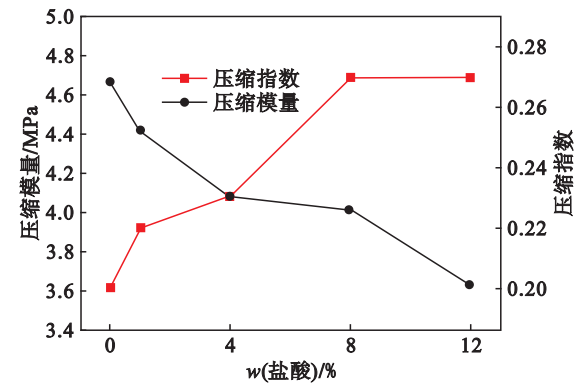


图 2 污染土的压缩指数和压缩模量

Fig. 2 Compression index and compression modulus of contaminated soil

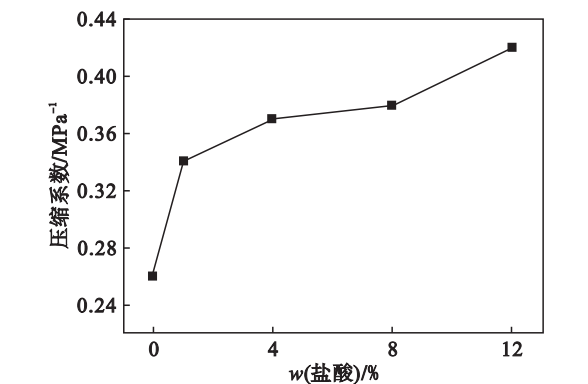


图 3 污染土的压缩系数

Fig. 3 Compression coefficient of contaminated soil

观察图 2,图 3 可知,清水浸泡粉土的压缩指数为 0.20. 随着盐酸溶液质量分数增加,在 0 至 8% 间指数值稳步上升,从 0 处最小值上升到 8% 处的最大值 0.27,增幅 35%. 12% 与 8% 质量分数间的曲线为平直,说明压缩指数没有变化. 粉土的压缩指数曲线呈整体上升趋势. 清水浸泡粉土压缩模量为 4.67 MPa. 随着盐酸溶液质量分数增加,数值稳定减小. 其中最大值出现在 0 处,最小值 3.63 MPa 出现在 12% 处,前后变化 -22.3%. 清水浸泡粉土的压缩系数为 0.26 MPa⁻¹. 随着盐酸溶液质量分数增加,曲线呈明显的上升趋势. 仅 0 和 1% (0.34 MPa⁻¹) 两处所对应的系数值就变化 30.8%. 压缩系数的最小值为 0 (清水) 处,最大值 0.42 MPa⁻¹ 出现在 12% 处,两者相差 61.5%.

从以上结果中得到粉土受盐酸侵蚀的典型压缩指标变化规律:受盐酸侵蚀,粉土的压缩指数、压缩系数均有明显变化,均随盐酸质量分数加大而上升;粉土的压缩模量随盐酸质量分数增加而减少.

2.3 矿物成分分析试验

土体的成分主要划分为原生矿物、次生矿物、水溶盐和有机质四个大类. 其中次生矿物和水溶盐液分别划分为“黏土矿物、倍半氧化物、次生二氧化硅”和“易溶盐、中溶盐、难溶盐”几个小类. 土中原生矿物具有抗风化、抗酸能力,其在酸环境中含量基本不变. 所以在本文的试验中,只研究粉土中次生矿物、水溶盐、有机质的变化. 以氧化镁和碳酸钙分别为次生矿物、水溶盐的代表,进行土体中氧化镁、碳酸钙和有机质占土重的质量分数的测定. 本次试验委托内蒙古包头稀土研究院检测中心,采用等离子发射光谱仪 (ICP) 和灼烧法测算,得到的碳酸钙、氧化镁和有机质质量分数变化曲线如图 4 所示.

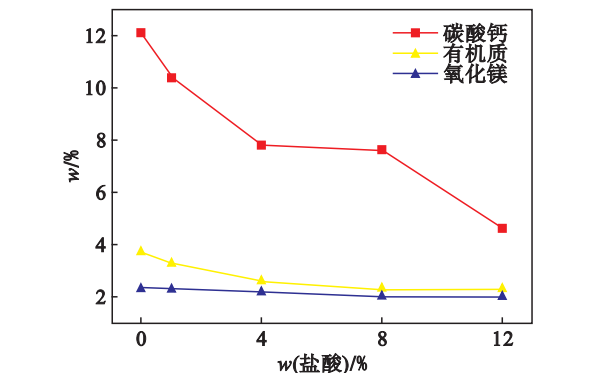


图 4 污染土中碳酸钙、氧化镁、有机质的质量分数

Fig. 4 Percentage composition of magnesium oxide, calcium carbonate and organic matter of contaminated soil

从图 4 可知,清水浸泡粉土的氧化镁的质量分数为 2.34%. 在 0 到 4% 质量分数间,其数值逐步降低,最大值出现在 0 处,最小值出现在 8% 处 (2.01%), 两者相差 -14.1%. 12% 处对应的 2.02% 与 8% 质量分数处对应值相差程度仅为 0.5%, 与最大值差别为 -13.7%. 清水浸泡粉土的碳酸钙的质量分数为 12.1%, 较氧化镁含量高. 随着盐酸溶液质量分数增加,曲线呈现快速下降趋势. 含量的最大值出现在 0 处,最小值 4.6% 出现在 12% 处,前后相差 -62.0%. 清水浸泡的粉土有机质的质量分数为 3.7%, 这是内蒙古中部地区的正常水平. 曲线在整体上呈下降趋势,最终数值稳定在 2.3%. 在 0 至 8% 的区间段,曲线连续下降,对应的有机质的质量分数也从最高峰值 0 处的 3.7%, 降低到最小值 8% 处的 2.3%, 两者相差 -37.8%. 12% 与 8% 浓度值间的曲线为平直,说明反应已经充分.

由上述结果可得粉土受盐酸侵蚀的代表性次生矿物、水溶盐、有机质的变化规律:受盐酸侵蚀,

粉土水溶盐、有机质含量均有变化,都随盐酸浓度加大而减小;粉土倍半氧化物随盐酸浓度增加而减少.

2.4 扫描电镜试验

土体的微观结构是指宏观尺度下土粒的形状特征,以及受不同土粒间相互作用所形成的空间排布方式. 其与宏观性质有一定的关联. 本文对受盐酸侵蚀粉土在“颗粒表面粗糙度、土颗粒粒径大小、细小土颗粒数目、孔隙大小、土颗粒间接触方式”等方面进行研究. 采用内蒙古包头稀土研究院检测中心 HITACHI 公司 E-1010 型号离子电镀仪、S-3400N 型号扫描电子显微镜进行试验. 经过喷金、扫描电镜照相,得到土样照片. 这里选用盐酸质量分数为 0,4%,8%,12% 时的照片进行分析,如图 5 所示.

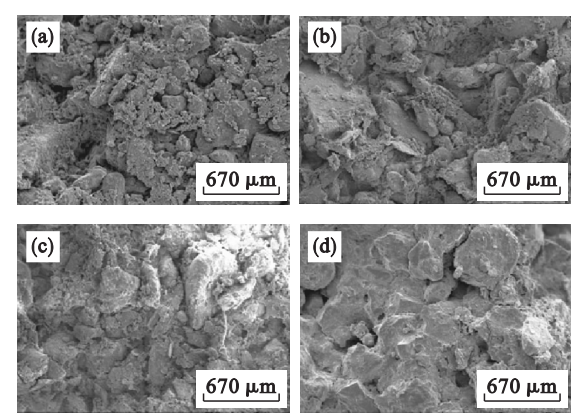


图 5 不同质量分数盐酸所浸泡粉土的照片
Fig. 5 Photograms of the silt soaked in different concentration of hydrochloric acid
(a)—0; (b)—4%; (c)—8%; (d)—12%.

清水浸泡粉土表面存有大量不规则齿状边缘结构. 随盐酸溶液质量分数提高,粉土的表面趋于平整,不规则凹凸边逐步消失. 当盐酸质量分数为 12% 时,这种特征已非常明显,土颗粒表面变得非常光滑,大颗粒粒径有变小趋势. 像清水浸泡土样照片右侧一些粒径较大的单独颗粒,在盐酸质量分数为 8%,12% 的照片中就非常少见. 大颗粒数目减少、粒径减小,中等粒径颗粒增多,都表明大颗粒受盐酸侵蚀而粒径减小. 在大粒径土粒间最初相互连接在一起的小颗粒,也随盐酸溶液浓度的上升而数目减少(对比 0 和 12% 的粉土照片,可清晰观察到). 当盐酸浓度很高时,原本依附在大粒径土颗粒的边缘处的细小颗粒会趋近消失. 在大颗粒粒径减小、小颗粒数目减少的同时,颗粒之间的孔隙也在变大和加深. 试比较盐酸质量分数为 0(清水),4%,12% 的土体照片. 在清水浸泡粉土的大颗粒、小颗粒结合处,存在大量的梯形、

菱形、多边形孔隙,孔隙深度较浅,边缘较为粗糙. 在盐酸质量分数为 4% 照片中,土体大颗粒结合处的孔隙就呈现变大且加深的特征. 在盐酸质量分数为 12% 的土样照片中,颗粒间则呈现几处明显的大孔隙,孔隙也较深,孔隙的边缘很平整. 观察照片还可以发现,土颗粒间的接触方式也发生了变化. 在清水浸泡的粉土照片中,土片具有层次感,土颗粒间接触较为紧密,主要呈现面-面的接触. 当盐酸浓度升高,引起小颗粒减少、土间孔隙变大且加深、大颗粒变得光滑、颗粒间的连接不再紧密,导致土粒接触方式也发生变化,演化为边-面接触,边-边接触,点-面接触,甚至点-边和点-点接触.

从以上结果中可以得到受盐酸侵蚀粉土的微观结构变化规律:受盐酸侵蚀,粉土的微观结构发生改变;颗粒表面变得平滑化、大颗粒的粒径变小、小颗粒数量减少、颗粒间孔隙变大且加深、土颗粒间连接紧密程度降低、接触方式发生变化.

3 综合分析

从上述试验结果中可以发现受盐酸侵蚀的粉土在抗剪指标、压缩指标、矿物成分(如表 1 所示)、土的微观结构都发生变化. 为解释土体的这种性质变化的现象,本文采用综合分析的方式指出引起抗剪、压缩指标变化的主要因素,并从矿物成分、微观结构角度对抗剪、压缩指标的变化进行说明.

表 1 抗剪指标、压缩指标、矿物成分的变化情况
Table 1 Variation conditions of resisting shear index, compression index and mineral content

变量	清水	1% 盐酸	4% 盐酸	8% 盐酸	12% 盐酸	最大变 化率/%
黏聚力 /kPa	2.1	2.3	2.6	3.0	3.8	81.0
内摩擦角 /(°)	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	-8
压缩指数	0.20	0.22	0.23	0.27	0.27	35
压缩模量 /MPa	4.67	4.42	4.08	4.01	3.63	-22.3
压缩系数 /MPa ⁻¹	0.26	0.34	0.37	0.38	0.42	61.5
w(碳酸钙)/%	12.1	10.4	7.8	7.6	4.6	-62.0
w(氧化镁)/%	2.34	2.30	2.17	2.01	2.02	-14.1
w(有机质)/%	3.7	3.3	2.6	2.3	2.3	-37.8

3.1 抗剪指标分析

土的内摩擦角略有减小,这主要是因土体微

观结构发生了变化. 盐酸溶液中的氯离子和氢离子进入土体, 侵蚀了土中的黏土矿物、盐分、有机质和有机胶体, 溶蚀了大粒径土颗粒间的细小土粒, 腐蚀了大颗粒表面的凹凸面和不规则凸起. 土粒间孔隙变大, 致使土体在微观结构上阻碍相对滑动的能力有所减弱, 宏观上则表现为土体的摩擦性能降低. 黏聚力上升, 是受可溶盐的成分变化所致. 这是由于受盐酸中氯离子和氢离子的作用, 土中矿质成分分解, 土粒表面发生离子交换反应, 使得结合水膜变薄. 同时由于土颗粒间的有机胶体、盐类减少, 土颗粒变得光滑、土颗粒结合水膜间接触面积变大, 使得土的吸附能力增加, 引起土体的黏聚力上升.

3.2 抗压缩指标分析

土体的压缩指数、压缩模量、压缩系数是表示土体抗压缩性能的指标, 其数值大小与孔隙比对外界压力变化的敏感程度有关. 抗压缩指标的变化是土体微观结构中土颗粒间连接强度减小所致. 盐酸进入土体内, 与黏土矿物、盐等成分反应, 侵蚀有机质, 使大颗粒粒径减小. 因为盐酸的腐蚀, 土中细小颗粒数量减少, 孔隙变大且变深, 引起孔隙比增大. 一些原本起连接作用的有机胶体被腐蚀氧化掉, 颗粒间的连接方式由面-面接触变为不再紧密的边-面接触、边-边接触、点-面接触、点-边和点-点接触. 这些情况使得土颗粒间连接强度变小、颗粒间抵抗外力变形能力下降, 引发土体抗压缩性能降低. 起侵蚀作用的盐酸质量分数越高, 粉土成分和微观结构的变化就越显著, 土体间孔隙比就越大, 颗粒抵抗外力变形的能力就越低, 压缩指数、压缩系数越大, 压缩模量越少.

4 结 论

- 1) 受盐酸侵蚀, 粉土抗剪强度指标中的黏聚力变大, 内摩擦角稍有减小. 压缩指标中的压缩指数、压缩系数变大, 压缩模量减少. 这使得包含上述参数的地基最终沉降量、承载力和边坡稳定性等指标都发生改变. 因此在勘察设计以及对某些事故进行成因分析时, 对有酸污染隐患(如化工厂, 含高硫化物、黄铁矿物的矿区)的粉土地区应考虑上述性质变化的情况.
- 2) 受盐酸侵蚀, 粉土的倍半氧化物、水溶盐、有机质含量均有变化, 代表矿物氧化镁、碳酸钙、有机质含量均明显降低.
- 3) 盐酸污染粉土的抗剪压缩指标和矿物成

分、微观结构之间有一定关系. 其抗剪指标中的内摩擦角受土体微观结构孔隙变化、土颗粒表面光滑化的影响, 黏聚力受颗粒表面离子成分交换、结合水膜变化的影响. 压缩指标主要受土体微观结构孔隙变大和颗粒间连接强度降低的影响.

参考文献:

[1] United Nations Environment Programme. Declaration of the United Nations conference on the human environment [M/OL]. Stockholm: United Nations Publication, 1972. [2015-11-01]. <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?documentid=97&articleid=1503>.

[2] United Nations Environment Programme. Rio declaration on environment and development [M/OL]. Rio de Janeiro: United Nations Publication, 1992. [2015-11-01]. <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=78&ArticleID=1163&l=en>.

[3] Raicevic S, Kaludjrovic-Radoicic T, Zouboulis A I. In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: theoretical prediction and experimental verification [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 117 (1): 41-53.

[4] Durmusoglu E, Corapcioglu M Y, Tuncay K. Modeling of settlement in saturated and unsaturated municipal landfills [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2006, 6 (4): 269-278.

[5] Ramamurthy A S, Vo D, Li X J, et al. Surfactant-enhanced removal of Cu (II) and Zn (II) from a contaminated sandy soil [J]. *Water Air Soil Pollution*, 2008, 190 (1): 197-207.

[6] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Immobilization of heavy metal ions (Cu^{II}, Cd^{II}, Ni^{II}, and Pb^{II}) by broiler litter-derived biochars in water and soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58 (9): 5538-5544.

[7] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33 (7): 1146-1152.
(Zhu Chun-peng, Liu Han-long, Shen yang. Laboratory tests on shear strength properties of soil polluted by acid and alkali [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33 (7): 1146-1152.)

[8] Annamalai S, Santhanam M, Sundaram M, et al. Electrokinetic remediation of inorganic and organic pollutants in textile effluent contaminated agricultural soil [J]. *Chemosphere*, 2014, 117c: 8673-8678.

[9] Saadawi S, Algadi M, Ammar A, et al. Phytoremediation effect of *Ricinus communis*, *malva parviflora* and *Triticum repens* on crude oil contaminated soil [J]. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2015, 7 (9): 782-786.

[10] Deok H M, Raenyun J, Agamemnon K, et al. Soil washing of fluorine contaminated soil using various washing solutions [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 94 (3): 334-339.

[11] 郭凡娣, 潘俊, 孙丽娜, 等. 草酸联合东南景天修复镉污染土壤实验研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36 (7): 1029-1032.
(Guo Fan-di, Pan Jun, Sun Li-na, et al. Experimental research on restoring cadmium-contaminated soil by using oxalic acid combined with *sedum alfredii* hance [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36 (7): 1029-1032.)