

地下水曝气修复过程离心模型试验研究

胡黎明¹, 刘燕¹, 杜建廷¹, 武晓峰¹, 刘培斌²

(1. 清华大学水利水电工程系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100044)

摘要: 为了研究地下水曝气修复机理及其影响因素, 采用离心模型试验模拟地下水曝气修复过程, 其中土体用透明玻璃珠代替以便于图像观察和分析处理, 同时由于模型能够提高土体的应力水平, 从而可以在较大范围内研究曝气压力的影响。离心模型试验得到了气体运动规律和曝气影响区域的特征。研究表明: 土体中的气体流速随曝气压力增加而逐渐增大; 曝气影响范围在曝气压力较小时随曝气压力增加而增大, 当曝气压力持续增大超过临界压力时, 影响范围将保持稳定; 曝气影响范围随土体粒径的增大而减小, 随离心加速度增大而减小; 曝气影响范围为锥形, 可以采用虚拟曝气点和稳定渗气夹角定量描述。试验成果可以为曝气修复系统的设计和运行提供参考依据。

关键词: 环境岩土工程; 地下水修复; 地下水曝气法; 离心模型试验; 影响范围

中图分类号: X505 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)02-0297-05

作者简介: 胡黎明(1974-), 博士, 副教授, 博士生导师, 从事土力学和环境岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: gehu@tsinghua.edu.cn。

Centrifuge modeling of air-sparging technique for groundwater remediation

HU Li-ming¹, LIU Yan¹, DU Jian-ting¹, WU Xiao-feng¹, LIU Pei-bin²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084,

China; 2. Beijing Water Resources Management Bureau, Beijing 100044, China)

Abstract: Air sparging is one of the groundwater remediation techniques to clean up volatile organic compounds. Based on the centrifuge tests employing glass beads as model soil, the process of air sparging is simulated under a wide range of sparging pressure and centrifuge g levels. The test results show that the increase of the sparging pressure improves the air flow velocity. There exists a critical sparging pressure, while the zone of influence (ZOI) expands with the increase of sparging pressure when it is lower than the critical value, and the ZOI decreases a little and then keeps constant when it is higher than the critical value. The ZOI decreases with the increase of soil particle size and g -level. The ZOI is cone-shaped and can be described by use of the virtual sparging point and cone angle. The test results provide valuable information for the design of air sparging system for groundwater remediation.

Key words: geo-environmental engineering; groundwater remediation; air sparging; centrifuge modeling; zone of influence

0 引言

环境与发展, 是当今国际社会普遍关注的重大问题。为了实现可持续发展, 环境保护和治理工作应是发展过程的一个整体组成部分。近年来有机污染土壤和地下水的原位修复技术逐步引起社会的关注。

目前土壤/地下水原位修复技术得到了迅速的发展。地下水曝气法 (Air Sparging, 简称 AS) 是 20 世纪 80 年代末发展起来的土壤原位修复技术, 在操作上将压缩空气通过曝气井注入饱和土壤及地下水中, 空气向上的流动使饱和土体中的有机组分产生解吸和挥发等作用, 同时曝气过程为好氧生物降解有机物创造了条件, 修复时间短、效率高、成本较低, 目前正在取代传统的地下水泵出处理等常规修复手段, 是土壤

和地下水污染修复的热点技术^[1]。

在地下水曝气修复过程中, 存在气-水两相渗流和污染物挥发、解吸、溶解、生物降解以及污染物在孔隙流体中的对流弥散等复杂过程。尽管地下水曝气修复技术已经成功应用于受污染含水层的修复, 但迄今为止, 对于土层中水气多相渗流运动和修复机理还没有共识。目前, 对曝气井的有效影响区域大多通过常规室内试验做出定性预测, 修复系统的设计主要依靠经验, 经常出现超量设计或设计不足的情况, 导致

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50879038); 教育部新世纪优秀人才计划项目 (NCET-07-0480); 北京市科技计划项目 (D07050601510000)

收稿日期: 2009-10-26

资源浪费或修复效率不高的问题^[2]。深入认识曝气修复机理对于修复系统的设计非常重要。

物理模型试验是进行曝气修复研究的基础。Brusseau^[3], Ji等^[4]采用常规模型试验研究了曝气修复过程中粒径对气体流动方式的影响。Reddy等^[5], Peterson等^[6], Rogers等^[7]和郑艳梅等^[8]通过模型试验研究了多孔介质粒径、空气流量和曝气井间距对有效修复区域和污染物去除效率的影响。常规模型试验研究表明单井影响区域为圆锥形^[9]或抛物线形^[5, 10], 其圆锥角为 $15^{\circ} \sim 56^{\circ}$, 细粒的砂土较粗粒的砾石影响范围大^[11]。然而, 常规模型试验不能模拟实际土体的应力水平, 为了防止土体发生气压劈裂, 曝气压力的试验范围非常小^[12], 不能充分反映曝气压力变化对修复过程的影响。离心模型试验可以在小比尺模型中模拟现场土体的应力场, 准确控制边界条件, 缩短试验时间, 再现原型特性, 成为环境岩土工程研究的有效手段^[13]。胡黎明等^[14-15]采用离心模型试验模拟非水相流体在土体中的迁移过程和之后的抽气修复过程。Marulanda等^[12]进行饱和透明多孔介质中空气流动的离心试验模拟, 采用恒定的曝气压力, 通过摄像法观测了曝气过程中空气-水两相渗流特征。

本文采用不同粒径级配玻璃珠模拟土体, 应用离心模型试验模拟地下水曝气修复过程, 分析气体流速、曝气压力、影响范围等系统重要设计参数的相互关系, 为地下水曝气技术应用提供参考依据。

1 离心模型试验

1.1 试验设备

本试验在清华大学 50 gt 中型离心机上进行, 该机的最大半径为 2.5 m, 最高离心加速度 250 g。离心机装配有光纤/液压滑环系统, 实现信号交换和数据采集以及精确的液/气压控制。

本文研制的地下水曝气试验模型箱如图 1 所示, 采用 3 cm 厚的有机玻璃板制作。模型箱净空尺寸为 60 cm×4.02 cm×80 cm, 制作好的试样高度为 46 cm,

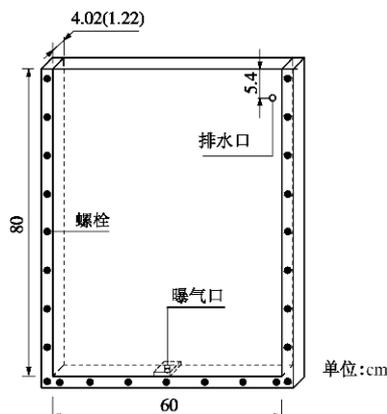


图 1 地下水曝气试验模型箱示意图

Fig. 1 Design scheme of strongbox for air sparging

曝气口距离模型箱底部 1 cm。试验控制系统如图 2 所示, 空气压力由空压机提供并由调压阀控制, 同时采用精密压力表监测, 空气流量由转子流量计测量。通过安装在离心机上的数字摄像系统; 同时通过图像采集与分析系统, 可以实时监测和分析试验过程中模型变化情况和气体运动特征。

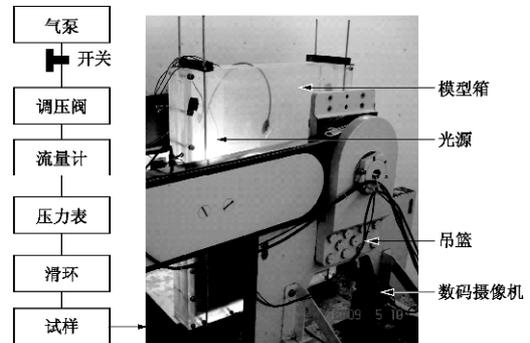


图 2 离心模型试验系统

Fig. 2 Centrifuge modeling system for air sparging

1.2 试验材料

为了直接观察气体在土体中的运动过程, 本文选取粒径范围分别为 0.8~1.0 mm、1.5~2.0 mm、4.0~5.0 mm 的 3 种高强度喷丸玻璃珠 (如图 3 所示) 模拟自然砂土, 玻璃珠主要成分为二氧化硅, 比重为 2.6, 力学性质与砂土接近。孔隙流体采用蒸馏水。玻璃珠的物理性质和颗粒级配曲线如表 1 和图 4 所示, 其中试样 4 由上述 3 种玻璃珠按 1:1:1 的比例混合配制。

表 1 试验用玻璃珠的物理性质

Table 1 Physical properties of soils in model tests

试样编号	有效粒径 d_{10}/mm	平均粒径 d_{50}/mm	试样干密度 $/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	试样孔隙率/%
1	0.82	0.90	1.66	34
2	1.55	1.75	1.68	33
3	4.10	4.50	1.68	33
4	0.86	1.75	1.95	22

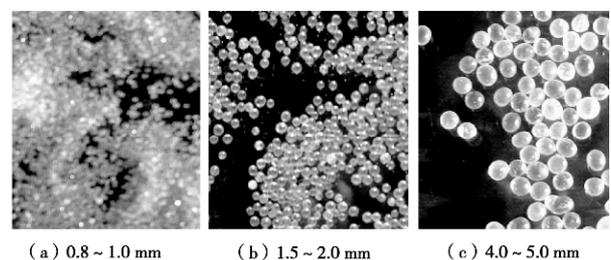


图 3 不同粒径级配高强度喷丸玻璃珠

Fig. 3 Glass beads with different particle sizes for air sparging

1.3 试验程序

通过地下水曝气离心模型试验, 观察气体运动方式和影响区域特征, 分析土体粒径级配和离心加速度对修复过程的影响, 研究曝气修复机理。本研究采用不同的离心加速度模拟地下水曝气修复过程, 离心模型试验条件如表 2 所示。

表 2 离心模型试验条件

试验离心加速度/g	试样类型
15	试样 1, 2, 3, 4
30	试样 1, 2, 3, 4
40	试样 2, 3, 4
50	试样 2, 3, 4

由于离心试验可以提高模型的应力水平, 相对于常规物理模型试验^[3-5, 12], 试验中曝气压力可以在很大的范围内变化而不必担心曝气过程中试样的气压劈裂破坏。

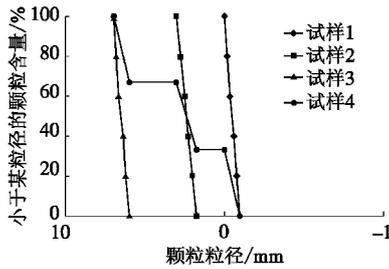


图 4 试验用玻璃珠的粒径级配曲线

Fig. 4 Particle size distribution curves of glass beads

试验前采用静水头差法将土样充分饱和; 标定孔隙水压力传感器用于监测试验过程中曝气口附近的孔压变化; 调整光源和数字摄像系统, 保证试验图像的清晰度; 将离心机加速到预定加速度稳定 15 min 后开始曝气试验。逐级增大曝气管路中的空气压力, 压力达到最小曝气压力后, 气体开始进入试样; 继续增大曝气压力, 监测压力与空气流量的关系, 记录气体流动方式和影响区域的变化, 并采用数字摄像技术记录试验过程。

2 气体运动规律

模型试验发现, 当曝气压力由 0 开始增大到一定值 (称为最小曝气压力) 时, 气体开始进入试样, 气体流量快速增长。在 0.8~1.0 mm 试样中, 气体以网状的微通道形式运动, 随着曝气压力的增大, 微通道密度不断增大; 在粒径为 1.5~2.0 mm 和 4.0~5.0 mm 的试样中, 空气以独立分散的自由气泡运动, 随着曝气压力增大, 气泡运动速度逐渐加大, 影响区域也不断增大; 在 0.8~5.0 mm 试样中, 气体主要以独立气泡方式运动, 同时伴随有气体微通道的发展过程, 这可能是由于试样孔隙分布不均匀造成的。试验结果与报道文献^[4-5]一致, 说明粒径级配或者孔隙大小对气体运动方式起决定作用。

图 5 给出了试样 2 在不同离心加速度条件下的曝气压力 - 气体质量流量关系曲线。可以看出, 气体流量随曝气压力的增大而线性增长, 曲线斜率表示试样的渗气性能。离心加速度越大, 试样的渗气性能越好,

主要原因是气泡所受浮力随加速度增大而增大。

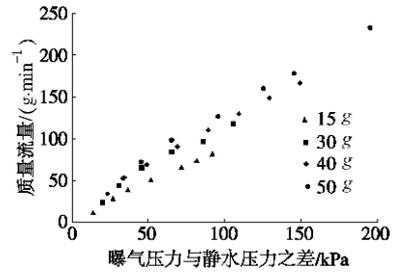


图 5 曝气过程中曝气压力和气体质量流量的关系

Fig. 5 Relationship between sparging pressure and air flux rate

3 临界曝气压力

图 6, 7 分别给出了曝气压力增加时影响区域的变化过程。可以看出, 在试验初始时期, 随着曝气压力增加, 影响区域明显增大; 但曝气压力增大到一定值时, 影响区域范围基本稳定, 不再随曝气压力的继续增大有显著的变化。此时的曝气压力称为临界曝气压力, 对应的影响区域为稳定影响区域。稳定影响区域可以看作气体运动通道已经发展完全的状态。

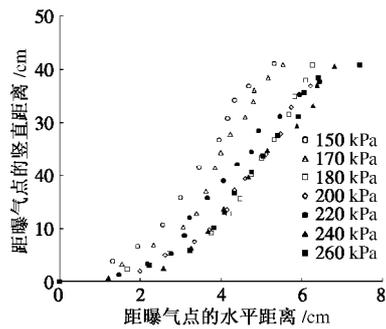


图 6 曝气过程中曝气压力和影响区域的关系(试样 4, 30 g, 静水压力 $P=132$ kPa)

Fig. 6 Relationship between sparging pressure and ZOI during air sparging (Sample 4, 30 g test, static water pressure $P=132$ kPa)

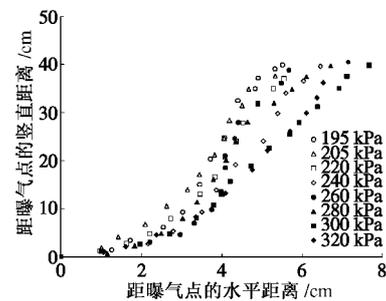


图 7 曝气过程中曝气压力和影响区域的关系(试样 4, 离心机加速度 40 g, 静水压力 $P=176$ kPa)

Fig. 7 Relationship between sparging pressure and ZOI during air sparging (Sample 4, 40 g test, static water pressure $P=176$ kPa)

表 3 给出了不同试样在不同离心加速度试验得到的临界曝气压力。可以看出, 不同粒径级配试样的临界曝气压力数值相近; 而同一试样在不同离心加速度

条件下其临界曝气压力相差较大, 随离心加速度的增大而显著增加。考虑到静水压力对曝气压力的影响, 表 3 还给出了净临界压力值, 即临界曝气压力与静水压力差值, 该值也随离心加速度的增加而显著增大。

表 3 离心模型试验临界曝气压力

Table 3 Critical sparging pressures		/kPa			
离心加速度	15 g	30 g	40 g	50 g	
试样 1	100	170	—	—	
试样 2	105	180	240	300	
试样 3	110	180	230	290	
试样 4	100	180	240	300	
曝气口静水压力	66	132	176	220	
平均临界曝气压力 与静水压力之差	38	46	61	77	

4 曝气影响范围

4.1 影响范围的定量描述

从图 6, 7 可以看出, 曝气影响区域为锥形, 在曝气点附近有一定程度的横向扩展。本文建议采用渗气夹角和虚拟曝气点定量描述影响区域。渗气夹角是指稳定影响区域边界切线与垂直方向的夹角, 虚拟曝气点指边界切线与纵轴的截距。

图 8, 9 给出了离心加速度为 30 g 时试样 2 和试样 3 在不同曝气压力时的影响区域边界, 可以看出, 通过虚拟曝气点和渗气夹角可以较准确描述曝气影响区域的特征。随着曝气压力的增大, 虚拟曝气点逐渐向下移动, 渗气夹角逐渐增大, 并趋于一稳定值。通过对试验过程的分析, 认为曝气点附近气体的水平向运动是由于孔隙分布不均匀导致的气体优势渗流造成的, 影响区域为以虚拟曝气点为顶点的锥形。

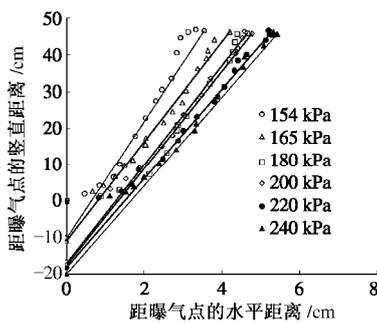


图 8 试样 2 不同曝气压力时的影响区域(离心加速度 30 g)

Fig. 8 ZOI of Sample 2 under different sparging pressures for 30 g-level test

4.2 离心加速度的影响

图 10 给出了试样 2 在不同离心加速度情况下的稳定曝气区域。从图 10 中可以看出当离心加速度较小时 (15 g), 曝气影响区域较大, 当离心加速度超过 30 g 时, 曝气影响区域基本一致, 也即渗气夹角相同。可能的解释是土层厚度存在一个临界值, 土层厚度较小时, 渗气夹角随厚度增加 (相当于模型试验中离心

加速度增大) 而逐渐减小, 厚度超过临界值时, 其渗气夹角不再变化。有关曝气修复过程的离心模型相似规律有待于进一步深入研究, 如采用模型的模拟技术等手段。

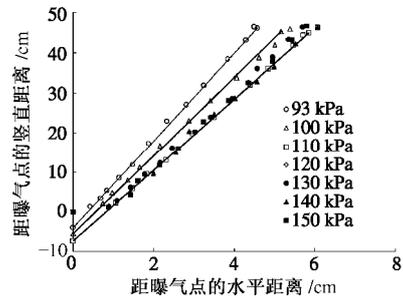


图 9 试样 3 不同曝气压力时的影响区域(离心加速度 30 g)

Fig. 9 ZOI of Sample 3 under different sparging pressures for 30 g-level test

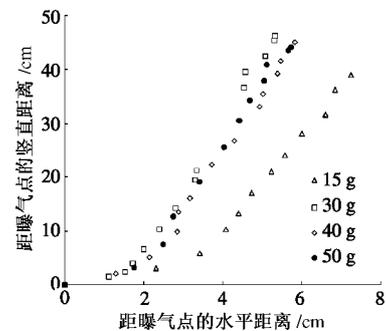


图 10 试样 2 不同离心加速度试验的稳定影响区域

Fig. 10 ZOI of Sample 2 for different g-level tests

4.3 粒径级配的影响

图 11 给出了离心加速度为 15 g 时不同粒径级配试样对应的稳定曝气影响区域, 可以看出影响区域圆锥角度为 6.5° ~ 15°, 粒径级配对于影响区域的大小有显著影响, 粒径越小、孔隙尺寸越小, 影响区域越大。试样 4 由于其粒径范围较大, 级配不连续, 孔隙尺寸不均匀, 气体容易发生优势渗流, 横向运动范围较大, 其曝气影响区域最大。同时可以看出, 与独立气泡的运动方式相比, 离散的微通道形式更有利于气体的水平向运动 (如试样 1 和 4), 导致影响区域增大。

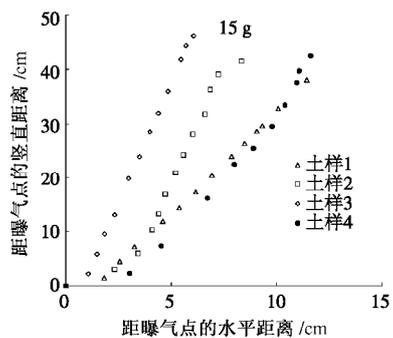


图 11 15 g 时不同粒径级配试样的稳定影响区域

Fig. 11 ZOI of different samples for 15 g centrifuge tests

5 结 语

多孔介质粒径级配是气体运动方式的主要影响因素, 当土颗粒粒径较粗、孔隙通道尺寸较大时气体以独立气泡的方式运动; 当土体粒径较小、孔隙通道尺寸较小时气体以离散的微通道方式运动。

曝气影响区域形状与粒径、曝气压力等因素无关, 为锥形; 可以采用渗气夹角和虚拟曝气点描述曝气影响区域的大小。曝气区域大小受粒径、曝气压力等因素的影响明显, 粒径越大, 曝气影响区域越小。存在曝气压力临界值, 曝气压力较小时, 影响区域随曝气压力增大而增大; 曝气压力达到该值后, 影响区域大小趋于稳定。

离心模型试验中不同离心加速度对曝气过程的影响显著, 离心加速度越大, 均匀试样中气体流量越大, 曝气影响区域越小。曝气过程中的离心模型相似比有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] USEPA. How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites. EPA 510-B-95-007[R]. Washington:VSEPA, 1995.
- [2] MARULANDA C, CULLIGAN P J, GERMAINE J T. Centrifuge modeling of air sparging - a study of air flow through saturated porous media[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, **72**(2): 179 - 215.
- [3] BRUSSEAU M L. Transport of organic chemicals by gas advection in structured or heterogeneous porous media: Development of a model and application to column experiments[J]. *Water Resources Research*, 1991, **7**(12): 3189 - 3199.
- [4] JI W, DAHMANI A, AHLFIELD D P, et al. Laboratory study of air sparging: air flow visualization[J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 1993, **13**: 115 - 126.
- [5] REDDY K R, ADAMS J A. System effects on benzene removal from saturated soils and groundwater using air sparging[J]. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 1998, **124**(3): 288 - 299.
- [6] PETERSON J W, LEPCZYK P A, LAKE K L. Effect of sediment size on area of influence during ground water remediation by air sparging: a laboratory approach[J]. *Environmental Geology*, 1999, **38**(1): 1 - 6.
- [7] ROGERS S W, ONG S K. Influence of porous media, airflow rate and air channel spacing on benzene NAPL removal during air sparging[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(5): 764 - 770.
- [8] 郑艳梅, 王战强, 黄国强, 等. 地下水曝气法处理土壤及地下水中甲基叔丁基醚(MTBE)[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(6): 1200 - 1202. (ZHENG Yan-mei, WANG Zhan-qiang, HUANG Guo-qiang, et al. Removal of Methyl Tert- Butyl Ether (MTBE) in saturated soil and groundwater using air sparging technique[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(6): 1200 - 1202. (in Chinese))
- [9] LUNDEGARD P D, ANDERSEN G. Multiphase numerical simulation of air sparging performance[J]. *Ground Water*, 1996, **34**(3): 451 - 460.
- [10] MCCRAY J E, FALTA R W. Numerical simulation of air sparging for remediation of NAPL contamination[J]. *Ground Water*, 1997, **35**(1): 99 - 100.
- [11] REDDY K R, ADAMS J A. Conceptual modeling of air sparging for groundwater remediation[C]// *Proceedings of the 9th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development*. Hong Kong, 2008.
- [12] 胡黎明, 刘毅. 地下水曝气修复技术的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(6): 835 - 839. (HU Li-ming, LIU Yi. Physical modeling of Air-Sparging technique for groundwater remediation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(6): 835 - 839. (in Chinese))
- [13] TAYLOR R N. *Geotechnical centrifuge technology*[J]. Blackie Academic & Professional. 1995.
- [14] 胡黎明, 濮家骧, 劳敏慈, 等. LNAPLs 在非饱和土中迁移的离心试验模拟[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(6): 690 - 694. (HU Li-ming, PU Jian-liu. LAO Min-ci, et al. Centrifuge modeling of LNAPLs migration in unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(6): 690 - 694. (in Chinese))
- [15] 郝荣福, 胡黎明, 邢巍巍. 土壤中可挥发性污染物清除的离心试验研究[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(7): 1037 - 1040. (HAO Rong-fu, HU Li-ming, XING Wei-wei. Centrifuge modelling of removing volatile contaminants in soils[J]. *Rock and soil Mechanics*, 2004, **25**(7): 1037 - 1040. (in Chinese))