

土壤气抽提多井方案的数值模拟研究

栾 旭,武晓峰*,胡黎明 (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)

摘要: 以存在石油烃污染的北京市某加油站场地为研究对象,设计了土壤气抽提(SVE)原位修复系统,应用 AIR3D 软件对 SVE 作用下土壤包气带的气压场进行数值模拟.划定以土壤气压强低于或等于 101.122kPa 的区域为抽气影响区域.模拟结果显示,单井的抽气影响区域不能满足要求;多井抽气时,井间区域土壤气体真空度受多井共同作用,扩大了抽气的影响区域.抽气井不同布置情况下井间距大小对相互作用效果存在影响.研究发现,井间相互作用随着井间距的增大而减小,井间距存在临界值.井间距临界值与抽气井的布置形式相关.对于本研究中的 2 眼井、3 眼井、4 眼井情景,此临界值分别在 3~5m、5~8m、8~10m 区间.超过此临界值时井间相互作用将显著减弱,并导致抽气影响区域不能覆盖整个井间范围.

关键词: 土壤气抽提; 数值模拟; AIR3D; 多井方案

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)03-0535-06

Simulation of multiple wells system in soil vapor extraction. LUAN Xu, WU Xiao-feng*, HU Li-ming (State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2012,32(3): 535~540

Abstract: A numerical simulation of the air pressure distribution in the contaminated vadose zone was conducted using the AIR3D model, based on the designed in-situ SVE remediation system for the contaminated gas-station site. An affected area was defined as the domain which has an air pressure lower than 101.122kPa. At first, a single well was used in the simulation, but the result turned out that the affected area was not sufficient to cover the contaminated zone. Then a multiple wells system was proposed, and the combined and enhanced effect was observed. Further, the influence of well interval and well distribution on the affected area was discussed in the multiple wells system. The numerical results showed that interaction between wells decreases along with the increase of the well interval. There existed a critical value representing the maximum well interval of the combined effect. The critical well interval varied with the change of the well distribution pattern. The critical well intervals in the 2-well, 3-well, 4-well systems discussed in this study are in intervals of 3-5m, 5-8m, 8-10m respectively. In well systems with larger well intervals than the critical values, interaction between wells would decrease significantly, and the affected area would not cover the entire inter-well area.

Key words: soil vapor extraction; numerical simulation; AIR3D; multiple wells system

土壤气抽提(SVE)是治理包气带内土壤石油烃污染的一种有效的原位物理修复方法^[1-2].它通过抽气井保持一定的真空度抽取非饱和土壤中的空气,土壤中的有机污染物挥发转化为气态形式随抽气气流离开土体,将抽出的气体处理后再予排放,从而达到清除非饱和区的挥发性污染物,修复土壤包气带的目的.

在实施 SVE 前,首先需要针对场地设计现场抽气方案.井数及井布置方案是影响工程的成本与治理效果的 2 个关键因素.数值模拟,尤其是三维数值模拟是研究这 2 项影响因素的重要手段.

20 世纪 80 年代起,发达国家在土壤修复技术方面进行了大量研究.总体上,对于 SVE 的作用机理已经有一定的认识^[3],数学模型由二维向三维发展^[4-6],并注重对地表覆盖情况以及抽气影响半径等实际工程因素的讨论^[7-11].近几年,随着土壤多相流研究以及生物降解研究的不断深入,SVE 与曝气、与生物降解相结合的治理手段正越来越受到重视^[12-13].

收稿日期: 2011-06-12

基金项目: 北京市科技计划项目(D07050601510000)

* 责任作者,副教授, wuxiaofeng@tsinghua.edu.cn

我国对 SVE 的研究起步较晚,除在国外研究基础上进行了数值模型研究外^[14-15],近年来也开展了一些室内实验^[16]及现场试验研究^[17].目前国内针对 SVE 的研究鲜见针对多井情况的专门讨论,而单井往往不能满足污染现场的治理要求,与工程实际应用仍有较远距离.

本研究以北京市某加油站的石油烃污染场地作为研究对象,针对 SVE 系统在井群抽气情况下的井布置方案及其抽气效果进行数值模拟,以讨论井群间各井的相互影响以及井布置方案、井间距等因素对抽气效果的影响,并为现场治理提供指导.

1 材料与方法

1.1 SVE 基本原理

挥发性有机污染物在土壤包气带中主要有 4 种存在形式:气相、溶解相、吸附相和非水相流体(NAPL)相.其中气相指污染物挥发成气态的存在形式;溶解相指污染物溶于水的部分;吸附相指污染物吸附在土壤颗粒上的部分;NAPL 相是指未溶于水的液态有机污染物.当 NAPL 进入土壤包气带后,将有部分挥发成气态并同时有部分溶解于土壤水中.一般来说,在溶解相和气相中的污染物均可与土壤颗粒发生吸附/解吸关系.对于 SVE 中的气相—土壤吸附,通常情况下,由于土壤固相表面均有水膜覆盖,气、固相几乎没有接触面存在,因而可忽略该过程.

SVE 通过布置在污染土壤中的抽气井抽出土壤孔隙中的空气,形成负压,使土壤气中的挥发性有机污染物(VOCs)同时被抽出.气相污染物浓度降低之后,溶解相、吸附相以及 NAPL 相的污染物将进一步向气相转化,从而以土壤气为载体,通过不断抽取气相污染物的方式实现对土壤中

污染物的去除.
土壤气抽提的流场控制方程为:

$$\frac{\mu\theta}{P}\frac{\partial P^2}{\partial t}=\nabla\cdot(\tilde{k}\nabla P^2)$$
 (1)

式中: μ 为气体黏性系数; θ 为土壤孔隙度; P 为气体压强; t 为时间; $\tilde{k}$ 为土壤气相渗透率张量.

1.2 AIR3D 数值模型

运用 AIR3D 模型进行 SVE 的模拟.AIR3D 为三维有限差分法计算软件,可以模拟多孔介质中气体渗透过程和气压场分布,由美国地质调查局(USGS)开发.稳态时其控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{xx}\frac{\partial \phi}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(k_{yy}\frac{\partial \phi}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(k_{zz}\frac{\partial \phi}{\partial z})=0$$
 (2)

式中: k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} 分别为沿 x,y,z 方向的土壤气相渗透率; $\phi=P^2$, P 为压强.

模型初始条件各差分网格气压均为大气压;边界条件:侧边界处气压为大气压,底边界(地下水水位处)为不透气边界,上边界(地表)可与大气连通或封闭,抽气井花管处网格保持抽气气压不变.

1.3 污染场地状况

本研究对象为北京市某加油站场地,该加油站采用地下储油罐储油,在地表布有加油机.储油罐下修筑了混凝土防渗槽以防止汽油泄漏污染储油罐下部的土壤.储油罐与加油机间通过输油管相连.清华大学王博^[18]对现场的土壤污染状况进行了检测.检测阶段在加油站范围内 9 个位置布置取样点,抽取加油站混凝土层下 1m 深处气样,用气相色谱联用仪对样本中总挥发性有机物(TVOC)浓度及苯、二甲苯、正己烷等 11 种污染物浓度进行测定,TVOC 浓度结果如表 1 所列.并依据这 9 个采样点的数据绘制了土层 1m 深处水平面上土壤气体中 TVOC 浓度的等值线图,如图 1 所示.

表 1 各检测点位 TVOC 浓度^[18]
Table 1 TVOC concentration at each detection point^[18]

点位编号	G1	G2	G3	G4	G6	G7	G8	G11	G12
X 坐标(m)	7.85	-8	-0.75	8	13.7	-7.5	13.8	-14.7	18.5
Y 坐标(m)	30.3	26.6	23.5	22.8	20	0	2.5	-24	-22.5
TVOC 浓度(mg/m ³)	2.65	8.22	78.84	1.93	3.57	6.86	2.47	0.89	0.49

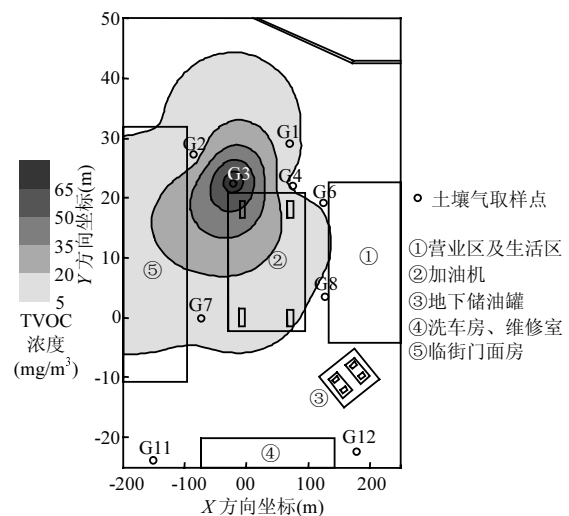


图1 土壤气体中TVOC浓度等值线^[18]
Fig.1 TVOC concentration contour in soil gas^[18]

2 数值模拟

2.1 多井联合抽气的叠加效应

根据研究区TVOC浓度的分布,确定将高浓度区10m×10m的正方形区域作为目标治理区域,如图1所示.用AIR3D建立30m×30m×3m的三维模型,模拟SVE稳态时的抽气效果,场地地质参数及抽气井设计参数如表2所列.

表2 模型相关参数
Table 2 Parameters in the AIR3D model

参数	数值
地下水埋深(m)	3
地表混凝土层厚度(cm)	20
混凝土层渗透率(cm²)	7×10^{-13}
土壤渗透率(cm²)	3×10^{-7}
各抽气井花管长度(cm)	10
各抽气井花管垂向位置(m)	1.0~1.1
各抽气井花管横截面尺寸(cm×cm)	10×10
各抽气井内真空度(Pa)	2026.5
模型网格尺寸(cm)	10×10×10

为判断抽气效果的优劣,在模拟得到的土壤气压等值线图中,划定压强低于或等于101.122kPa(0.998倍标准大气压)的区域为SVE的有效影响区域.

首先模拟单井抽气的情况,井布置在目标治

理区域中心,模拟结果如图2所示.在单井情况下,SVE有效影响区域为圆形,影响半径为2m左右,未能覆盖整个目标治理区域.为了能够覆盖整个治理区域,需要设计多井抽气的方案.

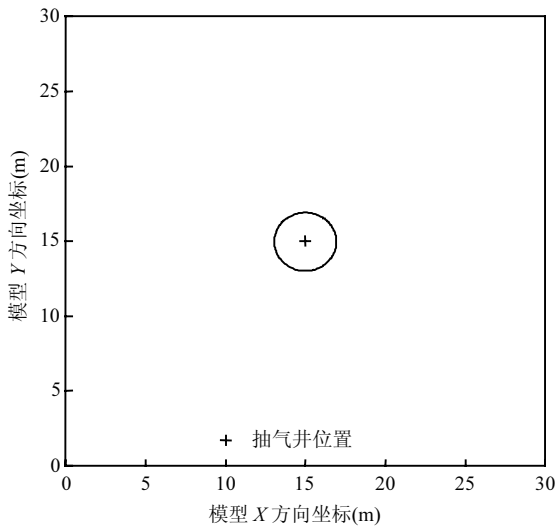


图2 单井抽气时SVE有效覆盖范围
Fig.2 SVE effective area when single well is in use

对于多井抽气的情况,井群中各井对土壤气压分布存在相互影响.图3显示了间隔5m布置2个相同抽气井同时作用,2井花管位置连线上的土壤气体真空度分布,井的设计参数如表2所示.真空度在抽气井附近达到最大值,随着距抽气井距离的增加真空度降低.在2井中间的区域,真空度比单井作用时高,表明多井的抽气效果叠加,使该范围内的土壤气压进一步降低.

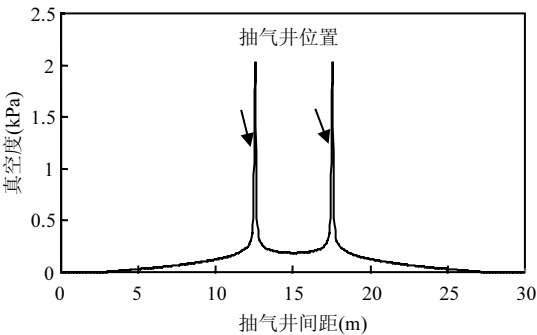


图3 两井同时抽气情况下土壤中气体真空度分布
Fig.3 Soil vacuum distribution when two wells are extracting at the same time

多井联合作用下抽气效果的叠加同时体现在 SVE 影响范围的变化上,多井联合作用下影响区域的大小会大于多个抽气井单独作用时影响区域之和.以本研究北京市某加油站场地的模拟结果为例,当在同一 SVE 系统中布置相互间隔 5m 的 4 个井联合抽气时,影响区域为一个近似的圆角四边形,如图 4 所示;而将 4 个单井 SVE 系统的影响区域叠加,则得到 4 个互不相连的圆形,如图 5 所示.可以看出 4 个抽气井联合作用提高了井间土壤区域的真空值,增大了 SVE 的影响区域.

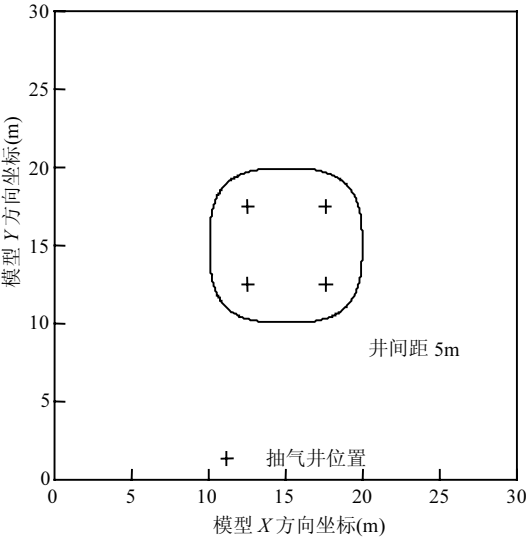


图 4 四井联合抽气时的 SVE 有效覆盖范围
Fig.4 SVE effective area for 4-well system

2.2 多井抽气井间距对相互作用效果的影响

对于含有多个抽气井的井群,在设计时应考虑各抽气井的间距以及井的排列方式对压强场的影响,这 2 项因素都会影响 SVE 的设计方案.本研究针对直线式、三角形式、矩形形式 3 种不同的井群排布方式分别进行了 3 组模拟.3 组模拟中,抽气井间的区域分别受 2 眼井、3 眼井、4 眼井的共同影响.在每组模拟中再变化抽气井的间距以讨论井间距与抽气影响区域的关系,模拟结果如图 6~图 8 所示.

3 组模拟结果表明,随着井间距增大,多井的相互作用减弱,且抽气井间距存在一临界值,当井间距小于此值时,抽气井间区域土壤气体真空度达到治理目标,此区域中的气体污染物可被有

效去除.当井间距大于此值时,井间区域不能完全达到治理所要求的真空度,有效治理范围不能覆盖全部井间区域.

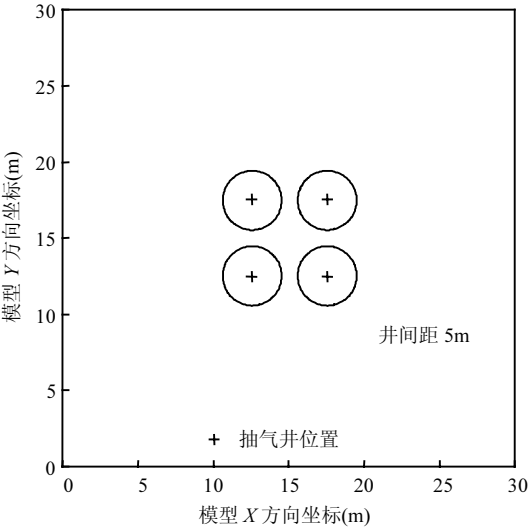


图 5 四个单独作用的抽气井有效范围的叠加
Fig.5 Superimposition of the SVE effective area of 4 single functional well

对比 3 组模拟结果,对于不同的井布置方案,这一临界值的大小不同:双井抽气时这一值在 3~5m 间;3 井抽气时,这一值在 5~8m 间;4 井抽气时,这一值在 8~10m 间.

3 结论

3.1 数值模拟的结果表明,SVE 过程中多井联合抽气时井间区域土壤气的压强受到多个抽气井的共同影响.多井联合作用下影响区域的大小会大于多个抽气井单独作用时影响区域之和.

3.2 划定 101.122kPa 土壤气压强等值线为抽气的影响范围边界,改变抽气井的井间距,抽气井的井间相互影响随着抽气井井间距增大而减小.

3.3 对于 2 眼井、3 眼井、4 眼井的 3 种不同井布置,井间距分别存在一个临界值,使多井的抽气效果与影响范围最佳.且这一值与井的不同布置有关,随着井数增多而增大.在该案例中,2 眼井时,这一值在 3~5m 间;3 眼井时,这一值在 5~8m 间;4 眼井时,这一值在 8~10m 间.

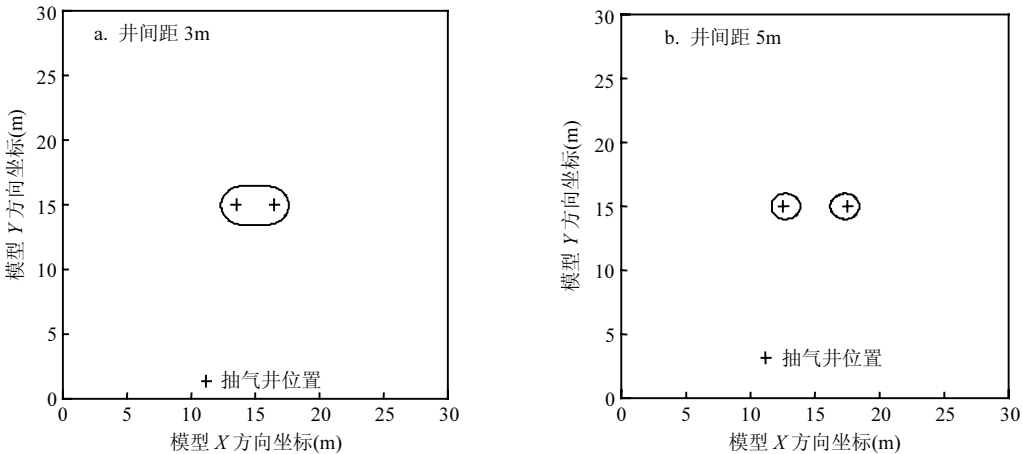


图 6 双井联合抽气时抽气井有效范围
Fig.6 SVE effective area for 2-well system

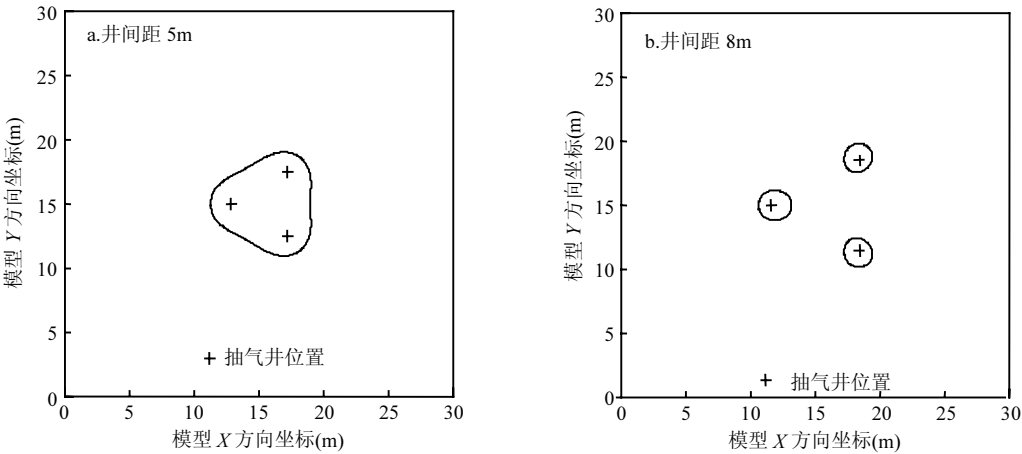


图 7 三井联合抽气时抽气井的有效范围
Fig.7 SVE effective area for 3-well system

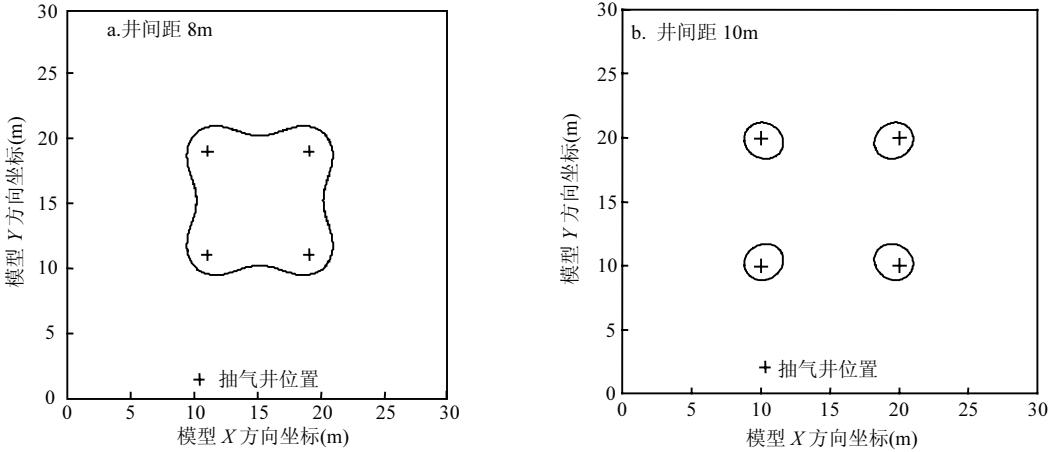


图 8 四井联合抽气时抽气井的有效范围
Fig.8 SVE effective area for 4-well system

参考文献:

- [1] 杨乐巍,黄国强,李鑫钢.土壤气相抽提(SVE)技术研究进展 [J]. 环境保护科学, 2006,32(6):62-65.
- [2] 黄国强,李鑫钢,徐世民.土壤气相抽提作用机制探讨和基本数学模型建立 [J]. 土壤学报, 2004,41(3):394-399.
- [3] Pedersen T A, Curtis J T. Soil Vapor Extraction Technology[M]. New Jersey: Noyes Data Corporation, 1991.
- [4] Massmann J W. Applying groundwater flow models in vapor extraction system design [J]. Journal of Environmental Engineering, 1989,115(1):129-149.
- [5] Baehr A L, Hult M F. Evaluation of unsaturated zone air permeability through pneumatic tests [J]. Water Resour. Res., 1991, 27(10):2605-2617.
- [6] Baehr A L, Joss C J. An updated model of induced airflow in the unsaturated zone [J]. Water Resour. Res., 1995,31(2):417-421.
- [7] Kaleris V, Croise J. Estimation of cleanup time for continuous and pulsed soil vapor extraction [J]. Journal of Hydrology, 1997, 194(1-4):330-356.
- [8] Wilson D J, Rodríguez-Maroto J M, Goamez-Lahoz C. Soil cleanup by in-situ aeration. XIX. Effects of spill age on soil vapor extraction remediation rates [J]. Separation Science and Technology, 1994, 29(13):1645-1671.
- [9] Wilson D J, Gómez-Lahoz C, Rodríguez-Maroto J M. Soil Cleanup by in-situ Aeration. XVI. Solution and diffusion in mass-transport-limited operation and calculation of darcy's Constants [J]. Separation Science and Technology, 1994,29(9): 1133-1163.
- [10] Shan C, Falta R W, Javandel I. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well [J]. Water Resour. Res., 1992,28(4):1105-1120.
- [11] Mohr D H, Merz P H. Application of a 2D air flow model to soil vapor extraction and bioventing case studies [J]. Ground Water, 1995,33(3):433-444.
- [12] Rahbeh M E, Mohtar R H. Application of multiphase transport models to field remediation by air sparging and soil vapor extraction [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,143(1/2): 156-170.
- [13] Rathfelder K M, Lang J R, Abriola L M. A numerical model (MISER) for the simulation of coupled physical, chemical and biological processes in soil vapor extraction and bioventing systems [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000,43(3/4): 239-270.
- [14] 薛 强,梁 冰,王惠芸.挥发性有机污染物去污过程的数值模型及应用 [J]. 化工学报, 2005,56(10):1962-1966.
- [15] 黄国强,李鑫钢,姜 斌,等.竖井 SVE 修复有机污染土壤的数值模拟分析 [J]. 化工学报, 2003,54(8):1134-1140.
- [16] 李金惠,聂永丰,马海斌,等.油污染土壤气体抽排去污模型及影响因素 [J]. 环境科学, 2002,23(1):92-96
- [17] 杨乐巍.土壤气抽提(SVE)现场试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [18] 王 博.加油站石油污染修复技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2010.

作者简介: 栾 旭(1987-),男,北京人,清华大学硕士研究生,研究方向为地下水水环境.

《中国环境科学》荣获第六届中国科协期刊优秀学术论文奖

《中国环境科学》2007 年第 5 期发表的程书波等人的文章“上海市地表灰尘中 PAHs 的来源辨析”荣获 2008 年中国科协颁发的“第六届中国科协期刊优秀学术论文二等奖”;2007 年第 1 期发表的邵立明等人的文章“生物反应器填埋场初期的重金属释放行为”及 2007 年第 2 期发表的罗专溪等人的文章“三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响”荣获“第六届中国科协期刊优秀学术论文三等奖”。

《中国环境科学》编辑部