

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮	(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健	(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋	(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红	(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军	(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅	(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲	(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵	(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静	(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰	(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅	(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰	(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林	(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷	(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠	(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军	(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻	(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌	(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永	(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴	(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋	(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成	(1564)
酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青	(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏	(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国	(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红	(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋	(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰	(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅	(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙	(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣	(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪	(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松	(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌	(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州	(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军	(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静	(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟	(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强	(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才	(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红	(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红	(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛	(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩	(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英	(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵	(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰	(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军	(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野	(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰	(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙	(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷	(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥	(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁	(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)	信息(1490,1496,1586,1743)

土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响

刘少卿¹, 姜林², 姚珏君², 李艳霞¹, 刘希涛¹, 林春野¹

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要: 土壤蒸汽抽提技术(soil vapor extraction, SVE)是一种安全、经济、高效的土壤治理技术, 广泛应用于包气带土壤中挥发性有机污染物的去除. 本研究选取有机污染物苯为对象, 通过一维土柱通风模拟, 分析了土壤质地(壤砂土、粉壤土和黏土)和湿度(0%、10%和20%)对SVE技术修复苯污染土壤的影响. 结果表明, 由于受到粉壤土有机质和黏土的通透性影响, 这两组实验的SVE修复效率(68.3%和43.4%)小于壤砂土实验组(98.5%); 此外, 20%和10%湿度条件下的壤砂土土柱模拟实验会出现拖尾现象, 而且湿度越大, SVE的修复效率越低.

关键词: 土壤蒸汽抽提技术; 苯; 土柱通风模拟; 土壤质地; 湿度

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1731-05

Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene

LIU Shao-qing¹, JIANG Lin², YAO Yu-jun², LI Yan-xia¹, LIU Xi-tao¹, LIN Chun-ye¹

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Municipal Research Institute of Environment Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Soil vapor extraction (SVE) has been widely used for removal of volatile organic compounds (VOCs) from vadose zone as a safe, economical and efficient technology. Column-venting experiment was used to investigate removal of benzene in the soil by the SVE process. The effects of the soil texture (loamy sand, silt loam and clay) and water content on remediation efficiency were studied. The results showed that the removal efficiency of benzene from the loamy sand soil (98.5%) was higher than that for the silt loam and clay soils (68.3% and 43.4%). In addition, the tail effects were observed in the loamy sand with 20% and 10% water content and the remediation efficiency was lower at higher water content.

Key words: soil vapor extraction (SVE); benzene; column-venting simulation; soil texture; water content

土壤蒸汽抽提(soil vapor extraction, SVE)是始于20世纪80年代中后期的一种土壤原位修复技术,最早于1984年由美国Terravac公司研究成功并获得专利权,是去除土壤中挥发性有机污染物(VOCs)和半挥发性有机物(SVOCs)的经济、有效方法,被美国环保署列为“革命性技术”大力倡导应用^[1].

SVE技术基于多孔介质孔隙气体与大气的交换,采用空气注射和/或抽提人为驱动力,加速孔隙气体与大气的交换速率,进而促进多孔介质中挥发性/半挥发性有机物从固相和液相到气相转变、从微孔向大孔隙扩散.为增加压力梯度和空气流速,很多情况下同时向污染土壤/沉积物中注入空气和从该区域抽出孔隙气体^[2].SVE对VOCs的去除主要受以下物理化学过程控制:污染物气体在大孔隙或中孔隙的水平层流运移,VOCs/SVOCs从微孔隙向中孔隙/大孔隙的扩散、挥发过程,吸附解吸和生物降解以及扩散作用过程^[1,2].因此,SVE的去除过程受

到诸多因素影响:如有机污染物的饱和蒸气压、土壤通透性、土壤有机质含量、环境温度及通风速率等.

土壤类型是SVE工程设计中的一个重要参数,不同土壤有不同的物理化学性质,一般表现为土壤通透性,有机质含量,土壤粒径等方面,而这些因素对污染物的去除时间和工程的运行费用有直接影响.以土壤通透性为例,土壤通透性可以用本征渗透率(K , cm^2)衡量,它通常受到孔隙度、孔隙大小的分布、饱和度、土壤质地异质性等条件影响.Fen等^[3]研究表明,土壤颗粒粒径、土壤孔隙度、土壤渗透性的空间变异对SVE系统地修复效率有很大影响.Bolick等^[4]研究了土壤本征渗透率与SVE净化时间的关系,结果表明土壤本征渗透率对于VOCs的去除时间有重要影响,本征渗透率越高,VOCs的

收稿日期: 2011-05-09; 修订日期: 2011-11-10

基金项目: 北京市科委重大项目(D08040000360000); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 刘少卿(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: liushaoqing@mail.bnu.edu.cn

去除时间越短。

此外,土壤含水量也是影响 SVE 应用的重要因素,水分会同空气以及 NAPL 态的 VOCs 竞争土壤孔隙,最终导致空气流动通道的减少,降低 SVE 修复效果^[5,6]. Fisher 等^[7]的实验结果表明,在 25 h 后,SVE 在干燥土壤中对甲苯的修复效率为 97%,而在潮湿的土壤中,70 h 后,修复效果只有 72%. Yoon 等^[8]研究了在一维条件下,湿度对 SVE 过程中 NAPL 态向气态的转化过程的影响,结果表明在土壤湿度 61% 的条件下,液气转化过程受到限制,并且去除过程很快出现拖尾. 另一方面,土壤湿度对土壤中污染物的气相分布有很大影响,土壤湿度的增加会降低土壤微粒对有机分子的吸附,加快污染物治理进程. Poulsen 等^[6]研究表明,在干燥的土壤中,污染物被土壤颗粒吸附后会降低自身的逸度值,影响污染物在土壤孔隙空气中的挥发速率,如果注入一定量的水来增加土壤含水量,则吸附的 VOCs 会释放出来,加快 SVE 修复速率. 因此,土壤水分含量过高和过低都会降低 SVE 技术的修复效率. 本实验选取苯为研究对象,通过室内土柱模拟实验分析了土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响,以期在现场的土壤修复中试项目提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 土壤样品与试剂

实验壤砂土与粉壤土取自北京师范大学校园内,黏土购自于北京建工集团公司,其物理性质见表 1. 实验所用分析纯苯为北京化工厂生产,25℃亨利常数(H)为 0.22,分配系数 K_p 为 1.28 $L \cdot kg^{-1}$.

表 1 实验用土的物理性质

土壤	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%	孔隙度 /%	有机质 /%	容重 / $g \cdot cm^{-3}$	吸湿水 /%
壤砂土	7.1	14	78.9	46	0.1	1.82	0.2
粉壤土	3.2	56.8	40	40	1.7	1.58	0.5
黏土	64.2	35.8	0	41	0.05	1.44	1.1

1.1.2 主要仪器

气相色谱仪(上海天美公司,GC-7890 II),转子流量计(苏州化工仪表厂),粒度分析仪(美国,Microtrac S3500).

1.2 实验装置

实验装置如图 1,由真空泵,转子流量计,实验土柱,活性炭柱和气体管道组成. 土柱采用 $\Phi 30$ mm

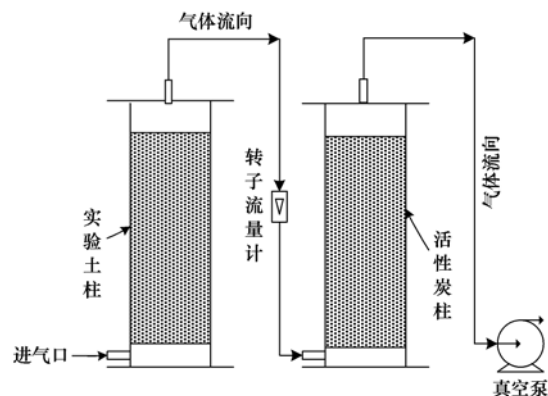


图 1 土柱 SVE 实验模拟流程示意

Fig. 1 Experimental equipment for soil column simulation

$\times 400$ mm 的有机玻璃柱,在距柱体底端 50 mm 处有侧端空气进气口和布气板(起支持土样、活性炭和均匀分布气体的作用). 活性炭(实验用粒状,北京化工厂)填充高度为 250 mm.

1.3 实验方法

将土样均匀分为 4 部分加入(填充高度为 280 mm),每加入一部分土样并且稍稍压实后,加入约 1/4 量的分析纯的苯,加盖密闭 2 d,开始进行 SVE 室内模拟实验. 实验采用间歇通风,每天通风时间约为 11 h,间歇时间为 12 h(此时认为苯蒸气沿柱轴向的浓度分布基本均匀). 实验过程中分别在实验土柱顶端取样,按照 30 min、1 h、2 h、3 h 和 4 h 的时间梯度来采集气体样品. 通风实验完成后,分别在距土柱顶端 2、10、18 和 26 cm 处取土样,进行残余苯含量的分析.

1.3.1 不同土壤的 SVE 室内模拟

选取 3 个实验土柱,分别装有 3.5 kg 壤砂土、3.1 kg 粉壤土和 2.34 kg 黏土,各加入 3.5、3.1 和 2.34 g 的苯,其各个土柱中苯的初始浓度都为 1000 $mg \cdot kg^{-1}$,控制通风速率为 240 $mL \cdot min^{-1}$.

1.3.2 不同湿度下的砂土 SVE 室内实验模拟

选取 2 个实验土柱,各装有 3.5 kg 的壤砂土和 3.5 g 的苯. 分别加入 700 g (20% 湿度)和 350 g (10% 湿度)的水,控制通风速率为 240 $L \cdot min^{-1}$.

1.4 检测方法

土壤残余苯的测量:取土样 1 g 迅速加入 1 mL 二硫化碳,在水平振荡机上,20℃,150 $r \cdot min^{-1}$,恒温振荡 15 min 后,静置取上清液 1 μL 上气相色谱分析土壤中汽油含量和组分.

土壤气体样品测量:用气密性注射器在取样口吸取气体 1 mL,进行气相色谱分析.

气相色谱分析条件:色谱柱 OV-17,柱温 75℃,

进样口 130℃, FID 检测器温度 180℃, 载气流速 3.5 mL·min⁻¹.

2 结果与分析

2.1 土壤质地对 SVE 修复效果的影响

图 2 为 240 mL·min⁻¹ 通风速率下苯的浓度随抽取壤砂土、粉壤土和黏土孔隙体积数的变化曲线. 图 2 分为 4 个区间, 分别代表 4 个通风阶段, 每个时间段中是 11 h 左右的连续通风实验. 从中可以看出, 随着抽取土壤孔隙体积数的增加, 气体中苯的浓度变小. 此外, 对于壤砂土的实验组而言, 整个通风阶段没有出现明显的拖尾现象, 这是由于在每个连续通风阶段以后的间歇时间内, 土壤各种形态

的苯会重新达到分配平衡, 易于被 SVE 去除的苯 (主要为存在土壤孔隙中的自由态苯) 含量增大, 这也是下一个通风阶段初始期, 气体中苯的浓度会上升一个高度值的原因. 为了方便分析土壤质地对 SVE 修复效果的影响, 分别取各组实验曲线的第 1 个和第 4 个通风阶段进行分析, 如图 3. 从第 1 个通风阶段实验结果来看, 粉壤土在最后浓度已经下降到 400 mg·L⁻¹ 左右, 而壤砂土和黏土实验组中浓度在 1 000 mg·L⁻¹ 左右; 在第 4 个通风阶段, 3 组实验中苯的浓度都已经下降到 100 mg·L⁻¹ 以下, 但是通过分析通风实验结束后土壤中残留苯的含量, 壤砂土实验中苯平均去除效率均达到 98.5%, 而粉壤土和黏土苯的平均去除率仅为 68.3% 和 43.4%, 修复效果远不如同条件下的壤砂土 SVE 修复. Kirtland 等^[9] 研究了 AS/SVE 技术修复储油罐泄漏污染场地的效果, 该场地土壤为低渗透黏土, 修复效果明显劣于 AS/SVE 修复的其他砂质土壤, 与本

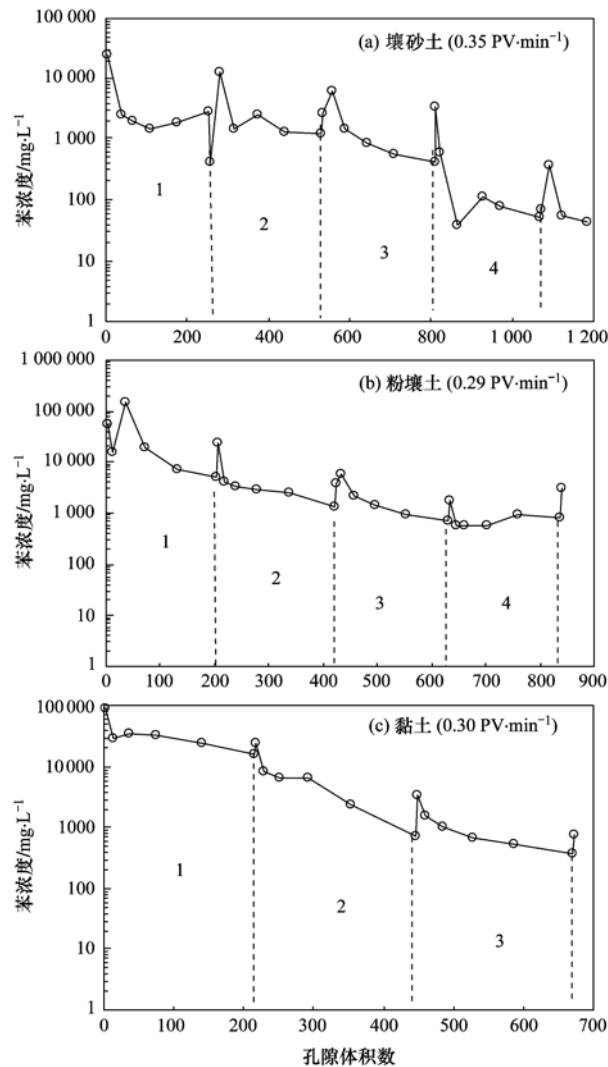


图 2 240 mL·min⁻¹ 通风速率下苯浓度随抽取壤砂土、粉壤土和黏土孔隙体积数的变化曲线

Fig. 2 Curves of gas concentration of benzene at 240 mL·min⁻¹ airflow rate varying with pore volume numbers extracted in loamy sand, loamy soil and clay

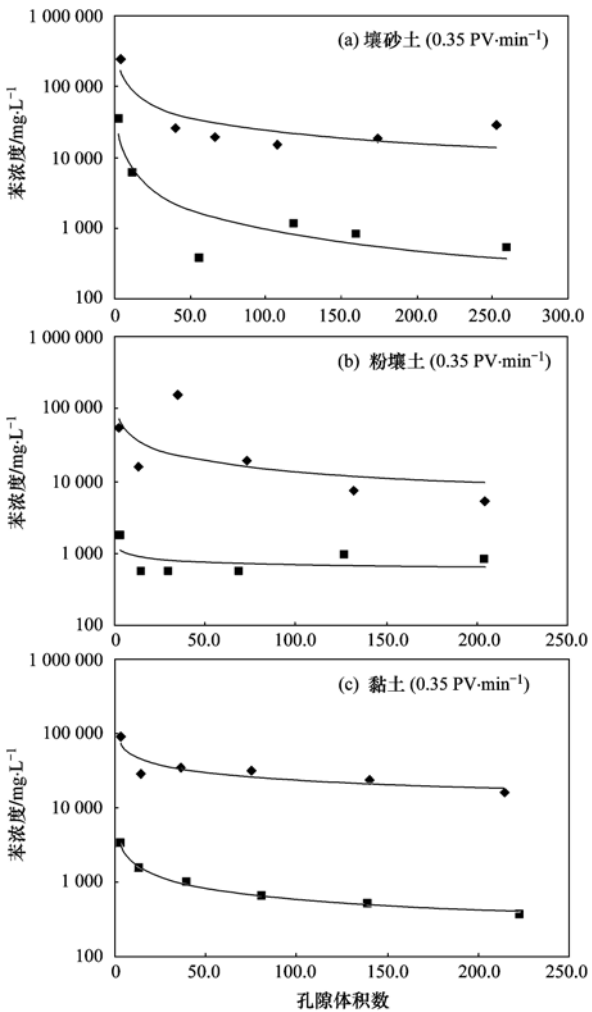


图 3 土壤质地 (壤砂土、粉壤土和黏土) 对 SVE 修复效果的影响

Fig. 3 Influence of soil texture (loamy sand, silt loam and clay) on the remediation effect of SVE

研究结论一致. 粉壤土和黏土修复效率低主要有 2 个方面的原因, 首先是吸附的作用, 对于粉壤土而言, 土壤有机质是土壤中重要的吸附剂, 粉壤土存在的有机质增加了土壤颗粒对苯的吸附能力, 从而降低了土柱中自由态的苯含量, 使得苯的土壤蒸汽修复效率降低. Sun 等^[10]实验结果表明, 有机质的含量会影响 SVE 的修复效率, 当土壤中有有机质含量从 6.8% 升高到 28.5% 时, SVE 修复苯污染土壤的效率从 75% 下降到 5%, 而对于黏土而言, 由于其巨大的比表面积, 使得苯的解吸也更加困难. 第 2 个原因是因为 3 种土壤的粒径组成不同, 由于粉粒和黏粒比重较大, 使得粉壤土和黏土的通透性相对于壤砂土而言更小, 使得苯在体系的传质过程受到一定程度的限制. Heron 等^[11]以 TCE 污染物为研究对象, 在二维土箱中作了 SVE 的通风实验研究, 实验结果表明, 在 23℃ 下, 黏土中 TCE 的去除效率很低, 预计去除时间达到 1 a 多.

2.2 土壤湿度对 SVE 修复效果的影响

图 4 为土壤湿度对壤砂土 SVE 修复的影响结果. 从第一个通风阶段实验结果来看, 0%、10% 和 20% 的湿度实验组在抽取孔隙体积数 200 左右时, 气体中苯浓度为 800、250 和 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可见壤砂土初始湿度越大, 苯的浓度在初始阶段下降越快. 此外, 20% 和 10% 湿度条件下的壤砂土土柱在第二个通风阶段开始后的每个阶段第一个浓度会上升比较高, 随后进入拖尾, 浓度一般在 30 ~ 70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右且 20% 湿度条件下的拖尾更加明显. 这是由于通风初期, 自由态的苯与土壤气相间的传质速度较快, 气体中苯的浓度迅速下降. 而随着时间的推移, 自由态的苯已基本消失, 这时主要发生的是苯在土壤固相中的扩散过程. 在 20% 和 10% 湿度条件下的壤砂土土柱中, 土壤固相表面均有水膜覆盖, 气、固相几乎没有相界面存在, 被吸附在壤砂土颗粒表面的苯在土壤中不与通入的气体直接接触, 而是通过水膜缓慢扩散进入土壤孔道中, 进而随气流排出系统, 因此会有后期的拖尾阶段. 与 0% 的初始湿度实验组对比, 20% 和 10% 湿度条件下的砂土 SVE 修复时间较长, 在抽取 2 000 个土壤孔隙体积时, 气体中苯的最高浓度仍然有 600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 整个通风阶段完成后, 20% 和 10% 湿度条件下的壤砂土土柱中苯的平均去除率为 88.3% 和 93.0%. Albergaria 等^[12]运用一维土柱模拟了不同湿度 (1.5% ~ 8.2%) 条件下 SVE 技术对环己胺去除的影响, 实验表明湿度越高, 去除土壤中环己胺所

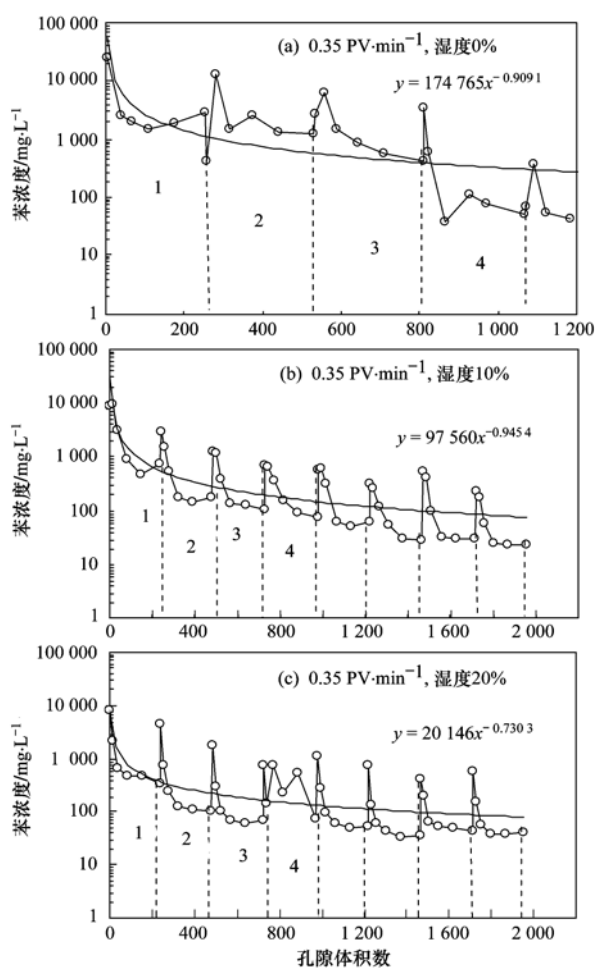


图 4 土壤湿度对壤砂土 SVE 修复效果的影响

Fig. 4 Influence of water content on the remediation effect of SVE

需时间越长、效率越低. 本实验结果同样证实, 湿度会影响壤砂土中苯的去除效果, 在 0% ~ 20% 湿度范围内, 湿度越大, SVE 的修复效果越不理想. 而周友亚等^[13]和 Stephanatos 等^[14]的实验表明, 含水率是影响 SVE 效果的一个因素, 但是含水率存在一个最佳值, 过高过低不利于有机物的去除.

3 结论

(1) 相近通风速率 ($240 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) 下, 由于粉壤土存在有机质的影响和黏土的通透性较差, 粉壤土和黏土的苯平均去除率仅为 68.3% 和 43.4%, 修复效果远不如同条件下的壤砂土 SVE 修复.

(2) 20% 和 10% 湿度条件下的壤砂土土柱在第 2 个通风阶段开始后的每个阶段都会存在拖尾现象. 水分会同空气以及 NAPLs 态的苯竞争土壤孔隙, 使得 NAPLs 态的苯的去除受到影响, 在 0% ~ 20% 湿度范围内, 湿度越大, SVE 的修复效果越不理想.

参考文献:

- [1] USEPA. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (12th) 2007[R]. EPA-542-R-07-012.
- [2] US Army Corps of Engineers Soil Vapor Extraction and Bioventing [R]. Washington, DC, 2002. 6.
- [3] Fen C S, Chang C K. Influence of spatial variability of soil properties on mass removal for a soil vapor extraction system[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2007, **30**(6): 997-1007.
- [4] Bolick J J Jr, Wilson D J. Soil clean up by *in-situ* aeration. XIV. Effects of random permeability variations on soil vapor extraction clean-up times [J]. Separation Science and Technology, 1994, **29**(6): 701-725.
- [5] Harper B M, Stiver W H, Zytner R G. Influence of water content on SVE in a silt loam soil [J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, **124**(11): 1047-1053.
- [6] Poulsen T G, Moldrup P, Yamaguchi T, *et al.* Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil-vapor extraction efficiency [J]. Ground Water Monitoring and Remediation, 1999, **19**(3): 61-70.
- [7] Fischer U, Schulin R, Keller M, *et al.* Experimental and numerical investigation of soil vapor extraction [J]. Water Resources Research, 1996, **32**(12): 3413-3427.
- [8] Yoon H K, Kim J H, Liljestrand H M, *et al.* Effect of water content on transient nonequilibrium NAPL- gas mass transfer during soil vapor extraction [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, **54**(1-2): 1-18.
- [9] Kirtland B C, Aelion C M. Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/soil vapor extraction: impact of continuous or pulsed operation [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, **41**(3-4): 367-383.
- [10] Sun H W, Tatedaa M, Ikea M, *et al.* Short-and long-term sorption/desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons onto artificial solids: effects of particle and pore sizes and organic matters[J]. Water Research, 2003, **37**(12): 2960-2968.
- [11] Heron G, Van Zutphen M, Christensen T H, *et al.* Soil heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: a laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a silty, low-permeable soil contaminated with trichloroethylene[J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(10): 1474-1481.
- [12] Albergaria J T, Alvim-Ferraz M C M, Delerue-Matosa C. Remediation efficiency of vapour extraction of sandy soils contaminated with cyclohexane: Influence of air flow rate, water and natural organic matter content[J]. Environmental Pollution, 2006, **143**(1): 146-152.
- [13] 周友亚, 贺晓珍, 侯红, 等. 气相抽提法去除土壤中的苯和乙苯[J]. 化工学报, 2009, **60**(10): 2590-2595.
- [14] Stephanatos B N. Modeling the transport of gasoline vapors by an advective diffusive unsaturated zone model[A]. In: Proceeding of the Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration[C]. 1989. 591-611.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbiantan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人