

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响

吴威¹, 姜林², 陈家军^{1*}, 彭胜¹

(1. 北京师范大学环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要: 液固比是影响土壤洗涤污染物去除率的重要因素。以 Triton X-100 和 Tween-80 为洗涤剂, 采用洗涤去除率(R)、吸附损失率(V_s)和新定义的指标增溶百分比(SP)分析液固比对土壤洗涤去除目标多环芳烃效果的影响。结果表明, 液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果影响显著。 R 随液固比增加呈非线性形式增大, 液固比 10:1 后 R 增长变缓。同一液固比时, 洗涤去除率 Triton X-100 > Tween-80。 V_s 随液固比增加显著减少, 液固比 10:1 后逐渐变缓。同一液固比时, 吸附损失率 Triton X-100 < Tween-80。SP 在液固比 10:1 时呈最大峰值后随液固比增加又减小。结合 R 、 V_s 和 SP, 液固比 10:1 应为洗涤有效点, Triton X-100 应是理想洗涤剂, SP 是一个有效的指标用于土壤洗涤中液固比的选择。Triton X-100 为洗涤剂、液固比 10:1 时, R 、 V_s 和 SP 分别为: 74.7%、23.47% 和 48.99%。

关键词: 土壤洗涤; 液固比; 多环芳烃; 增溶百分比; 表面活性剂; 吸附损失率

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0965-06

Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil

WU Wei¹, JIANG Lin², CHEN Jia-jun¹, PENG Sheng¹

(1. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Liquid/solid ratio (L/S) is an important influencing factor on contaminant removal in soil washing. The impact of different liquid/solid ratio on washing performance with Triton X-100 and Tween-80 was studied respectively and evaluated through removal ratio (R), surfactant adsorption loss ratio (V_s) and solubilization percent (SP). The results presented that the performance of washing to remove PAHs in soil was significantly affected by liquid/solid ratio. PAH removal ratio was gradually increased with liquid/solid ratio increasing in the non-linear form, R presented nonlinear increasing until L/S = 10:1. Surfactant adsorption loss ratio was insignificantly decreased. At the same liquid/solid ratio, removal ratio of Triton X-100 is more than that of Tween-80. V_s presented drastic decreasing until L/S = 10:1, adsorption loss ratio of Triton X-100 is less than that of Tween-80. SP was decreased after maximum value is occurred at L/S = 10:1. Combining with R , V_s and SP, L/S = 10:1 should be an effective washing point, Triton X-100 should be a reasonable washing solution and SP is a more effective index to chose liquid/solid ratio. When Triton X-100 is as washing solution and L/S = 10:1, R , V_s and SP is 74.7%, 23.47% and 48.99%, respectively.

Key words: soil washing; liquid/solid ratio; PAHs; solubilization percent; surfactant; adsorption loss ratio

目前, 由于多环芳烃 (PAHs) 的三致危害, PAHs 污染场地的修复受到了环境学界的普遍关注^[1~3]。

土壤洗涤 (soil washing) 技术具有修复效果显著、环境污染小和减容量大等优点, 得到了广泛的认可和应用^[4~6]。土壤洗涤效果取决于表面活性剂的性质和液固比等因素。非离子表面活性剂在土壤上的吸附量相对较少、洗涤效果较好且生物毒性小, 经常用做土壤洗涤剂。液固比对洗涤效果的影响较为显著。因为它一方面影响着去除率, 主导着洗涤机制的不同, 另一方面决定着洗涤用水量以及洗涤废水处理量^[7~10]。许多学者已经研究了液固比对土壤洗涤去除土中多环芳烃效果的影响, 同时摩尔增溶比 (MSR) 等参数经常被用于定量分析表面活性剂洗涤效果影响^[11~13]。但是未从表面活性剂吸附角度深

入分析具体影响, 同时在研究液固比对洗涤效果影响中也缺少有效参数来分析和选择最佳液固比。

本研究选择 Li 等^[14]已筛选出的 2 种非离子表面活性剂 Triton X-100 和 Tween-80 为洗涤剂, 以 > 50 μm 粒径的实际焦化厂 PAHs 污染土壤为洗涤对象, 采用洗涤去除率 (R)、表面活性剂吸附损失率 (V_s) 和新指标增溶百分比 (SP) 综合分析了液固比对土壤洗涤去除土中目标 PAHs 的影响, 得出最佳的液固比和表面活性剂, 确定新指标 SP 用于优选最佳液固比的可行性, 以期为土壤洗涤中试和实际

收稿日期: 2011-05-15; 修订日期: 2011-06-25

基金项目: 北京市科技计划重大项目 (SF2008-02); 中央高校基本科研业务费专项 (2009SD-19)

作者简介: 吴威 (1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境模拟与污染治理, E-mail: wuwei19850119@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jeffchen@bnu.edu.cn

工程的液固比和表面活性剂的选择起到指导作用.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 土壤样品采集及理化性质

污染土壤采自原北京焦化厂. 除去杂物,经自然风干后进行破碎、混匀,用标准筛筛分出 >50 μm 粒径的土壤样品备用. 土壤的理化性质见表 1.

1.1.2 PAHs 提取、分析及质量控制

PAHs 提取:土中 PAHs 提取采用 ASE300 快速溶剂萃取仪. 将土样和一定量硅藻土以及活化的铜粉混合加入萃取池中并加入回收率指示物控制回收率,二氯甲烷-丙酮混合溶液(体积比, 1:1)为溶剂萃取. 溶液中 PAHs 提取采用正己烷(加标控制回收率)萃取,加入乙醇破乳,重复萃取 3 次,然后净化.

PAHs 净化:层析柱净化. 正己烷湿法填柱(12 cm 硅胶, 6 cm 中性氧化铝, 1 cm 无水硫酸钠).

PAHs 分析:采用 GC-MS 进行测定 PAHs. 色谱柱:DB-5MS 毛细管色谱柱(30 mm × 0.25 mm × 25 μm). 升温程序:初温 80℃,保持 3 min,以 10℃·min⁻¹升温至 250℃,保持 3 min,以 5℃·min⁻¹升温至 290℃,保持 7 min. 进样口温度 280℃,载气为高纯氦气,流速 1.0 mL·min⁻¹. 无分流进样 1 μL. 质谱条件:EI 电离源 70 eV,选择性离子扫描.

质量控制:采用方法空白、基质加标、样品平行样等进行质量控制,用回收率指示物蔡-d₈、菲-d₁₀、蒽-d₁₂和茚-d₁₂监控回收率. 土中蔡-d₈、菲-d₁₀、蒽-d₁₂和茚-d₁₂回收率分别为 55% ± 8%、74% ± 6%、69% ± 7% 和 90% ± 12%. 正己烷对表面活性剂溶液中 PAHs 的萃取回收率为 75% ~ 92%.

表 1 土壤基本理化性质及 PAHs 含量

Table 1 Physiochemical properties of soil samples and PAHs

含水量/%	pH	TOC/%	CEC /cmol·kg ⁻¹	PAHs/mg·kg ⁻¹				
				BaA	BbF	BkF	BaP	InP
3	8	0.5	9.7	2.25	3.48	1.32	1.5	0.4

1.1.3 仪器与试剂

ThermoQuest Trace 2000 GC-MS; Dionex ASE300 快速溶剂萃取仪; RE-52AA 旋转蒸发仪; HSC-12A 氮吹仪; KQ5200DE 超声波清洗器; JYW-200A 自动界面张力仪. JJ-4A 六联自动升降电动搅拌器; HZQ-X100 恒温振荡培养箱; Sigma 3K30 高速冷冻离心机.

16 种 PAHs (包括 Nap、Any、Ace、Flu、Phe、

Ant、Fla、Pyr、BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DBA、InP 和 BgP) 混合标样及标准替代物(蔡-d₈、菲-d₁₀、蒽-d₁₂和茚-d₁₂)购自 AccuStandard 公司; Triton-X-100 和 Tween-80(美国 Amresco 公司,化学纯),二者理化性质见表 2; 二氯甲烷、丙酮和正己烷(色谱纯); 无水乙醇(分析纯); 无水硫酸钠、层析硅胶和中性氧化铝(200 ~ 300 目,分析纯); 蒸馏水.

表 2 Triton X-100 和 Tween-80 的理化性质

Table 2 Physiochemical characteristics of Triton X-100 and Tween-80

种类	分子式	CMC/mg·L ⁻¹	相对分子质量	HLB
Triton X-100	C ₈ H ₁₇ C ₆ H ₄ O(OCH ₂ CH ₂) _{9.5} H	155.83	625	13.5
Tween-80	C ₆₄ H ₁₂₄ O ₂₆	58.93	1228	15.0

1.2 实验方法

1.2.1 不同液固比时土壤洗涤实验

根据 Peng 等^[15]实验结果,室温时,采用六联电动搅拌器在搅拌强度为 250 r·min⁻¹、洗涤时间分别为 30 和 60 min(对应 Triton X-100 和 Tween-80)、表面活性剂浓度为 5 000 mg·L⁻¹条件下进行洗涤实验. 洗涤完成后,将土-水混合液用高速冷冻离心机在 10 000 r·min⁻¹条件下离心 30 min,用 GC-MS 测定上清液中 PAHs. 上清液中的 PAHs 量与土壤 PAHs 初始量的百分比即为洗涤去除率(R). PAHs

量为 5 种目标控制 PAHs(如表 1)的总和,以下实验均如此. 每个样品取 2 个平行样,最后结果取平均值.

1.2.2 不同液固比时表面活性剂吸附实验

表面活性剂溶液的临界胶束浓度(CMC)测定采用铂环法. 用自动界面张力仪测定不同浓度表面活性剂的界面张力,绘制表面活性剂浓度-界面张力关系图,线段拐点处的浓度值即为 CMC 值. 每个样品测试 3 次,最后结果取平均值.

土-水-表面活性剂系统中有效临界胶束浓度

(CMC_{soil})的测定也采用铂环法.向盛有不同浓度的表面活性剂溶液的 50 mL 聚四氟乙烯管中按一定的液固比加入一定量土样($>50 \mu m$),在转速为 $150 r \cdot min^{-1}$ 、温度为 $30^\circ C$ 的恒温振荡培养箱中振荡 48 h,高速冷冻离心机在 $10\,000 r \cdot min^{-1}$ 条件下离心 30 min,采用自动界面张力仪测定上清液的界面张力.绘制表面活性剂浓度-界面张力关系图,由拐点计算 CMC_{soil} 值.每个样品测试 3 次,结果取平均值.

根据纯水中表面活性剂浓度小于 CMC 时的界面张力下降曲线和土-水-表面活性剂系统中上清液的界面张力反推出对应的上清液中表面活性剂的浓度,根据其于初始浓度的差值及水土比计算出最大吸附损失量^[16,17]:

$$Q_{max} = (CMC_{soil} - CMC) \left(\frac{V_a}{W_{soil}} \right) \quad (1)$$

式中, Q_{max} 为表面活性剂在土壤表面的最大吸附量 ($mg \cdot kg^{-1}$); CMC 和 CMC_{soil} 分别为表面活性剂溶液的临界胶束浓度和在土-水系统中的表观临界胶束浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); V_a 为水溶液的体积 (L); W_{soil} 为土壤质量 (kg).

根据公式 (1) 计算得到各液固比时 Triton X-100 和 Tween-80 的最大吸附损失量,最大吸附损失量与初始量的百分比即为吸附损失率 (V_s).

1.2.3 增溶实验

将污染土中的多环芳烃用二氯甲烷和正己烷 (体积比, 1:1) 的混合液超声萃取出来.萃取液等量放入 250 mL 烧杯中,放在通风橱内风干.每个烧杯中加入 250 mL 不同浓度的表面活性剂溶液,在 1.2.1 节的条件下进行增溶实验.洗涤完成后,取出一定量液体用高速冷冻离心机在 $10\,000 r \cdot min^{-1}$ 条件下离心 30 min,用 GC-MS 测定上清液中 PAHs.每个样品取 2 个平行样,最后结果取平均值.所得到的各表面活性剂浓度下的 PAHs 溶解量可认为是该浓度下 PAHs 的最大溶解量 (S_{max}).

为了比较土壤洗涤系统中 PAHs 的溶解能力和表面活性剂溶液的增溶能力,这里定义一个增溶百分比 (SP) 指标来定量衡量液固比对表面活性剂洗涤效果的影响.

$$SP = \frac{S_c}{S_{max[c - (CMC_{soil} - CMC)]}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $(CMC_{soil} - CMC)$ 为被吸附的表面活性剂浓度,则 $c - (CMC_{soil} - CMC)$ 为土-表面活性剂-水系统中有效的表面活性剂浓度.公式 (2) 中分子表示土-水-表面活性剂系统中,表面活性剂浓度为 c 时从土

中洗涤出的 PAHs 量.分母为土-表面活性剂-水系统中被吸附后的有效表面活性剂浓度的最大增溶能力.

2 结果与讨论

2.1 不同液固比时土壤洗涤实验

选择液固比分别为 1:1、2:1、4:1、8:1、10:1、15:1 和 20:1,实验结果如图 1 所示.液固比为 1:1 时, R 值几乎为 0. R 值随液固比增加基本上是以非线性形式增大,液固比 10:1 后呈平缓上升状态,液固比 20:1 时达到接近 90% 的 PAHs 洗涤去除率.

研究表明,液固比小不利于搅拌,表面活性剂与土壤难以充分接触,从而 PAHs 难以分配进入表面活性剂胶束内部,故 R 值较低.液固比越大,单位土壤中表面活性剂的浓度越大,增溶效果越好, R 值越大.但是,液固比越大洗涤所产生的废液量越多,增加了后续处理费用,也增加了表面活性剂花费^[18,19].综合来看,液固比 10:1 时 PAHs 洗涤去除率已达 70% 以上,可作为最佳液固比.

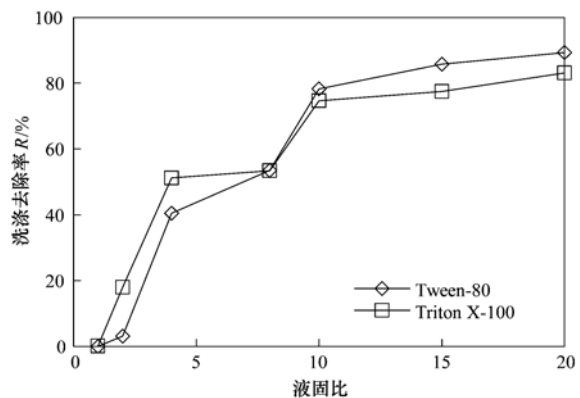


图 1 不同液固比时 Triton X-100 和 Tween-80 对目标 PAHs 洗涤去除率

Fig. 1 Removal ratios of total PAHs with Triton X-100 and Tween-80 at different liquid/solid ratios

2.2 不同液固比时表面活性剂吸附实验

液固比不同,导致表面活性剂在土壤表面的吸附差异,影响土-水-表面活性剂系统中表面活性剂的实际有效洗涤浓度,进而影响 PAHs 洗涤去除率^[20~22].图 2 为 Triton X-100 和 Tween-80 的表面张力随浓度的变化关系,图中线段拐点处的浓度值即为二者的 CMC 值^[23],分别为 58.93 和 $155.83 mg \cdot L^{-1}$.

图 3 和图 4 分别给出了不同液固比时 Tween-80 和 Triton X-100 在土壤上吸附后表面张力随表面活

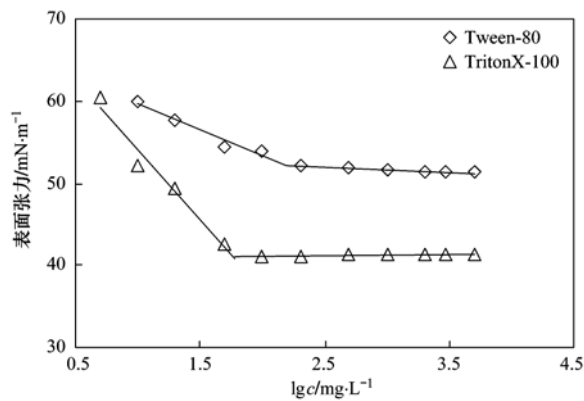


图2 表面活性剂 Triton X-100 和 Tween-80 的表面张力随浓度的变化

Fig. 2 Surface tension change with different surfactant concentration of Triton X-100 and Tween-80

性剂浓度变化. 图3和图4中线段拐点处(图3为第2个点值)的浓度值即为二者的 CMC_{soil} 值^[24], 结果见表3.

由表3可知,土-水-表面活性剂系统中 CMC_{soil} 比表面活性剂溶液的 CMC 大十几到几十倍. 液固比越大, CMC_{soil} 越小. 这说明表面活性剂在土壤上吸附能力较强, 有一定的吸附损失, 这势必会影响到洗涤效果和经济效益^[25,26]. 根据公式(1)计算出各液固比时表面活性剂的最大吸附损失量. 最大吸附损失量与初始量的百分比即为表面活性剂吸附损失率 (V_s). 由表3可知, 表面活性剂的吸附损失率随液固比增大逐渐减小. 液固比 > 10:1 后, 吸附损失率缓慢减小. 同一液固比时, Triton X-100 比 Tween-80 的吸附损失率小得多. 液固比为 10:1 时, Triton X-100

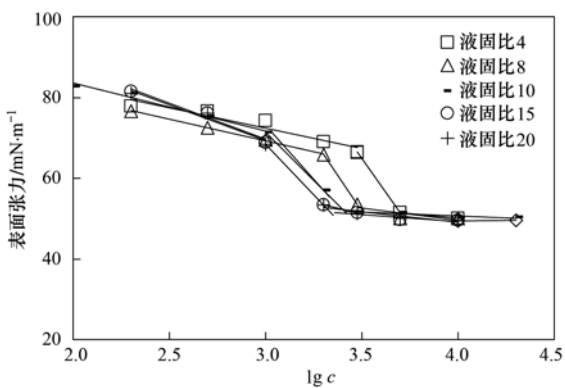


图3 不同液固比时 Tween-80 被土壤吸附后表面张力随浓度的变化

Fig. 3 Surface tension change with different Tween-80 concentrations after adsorbed by soil at different liquid/solid ratios

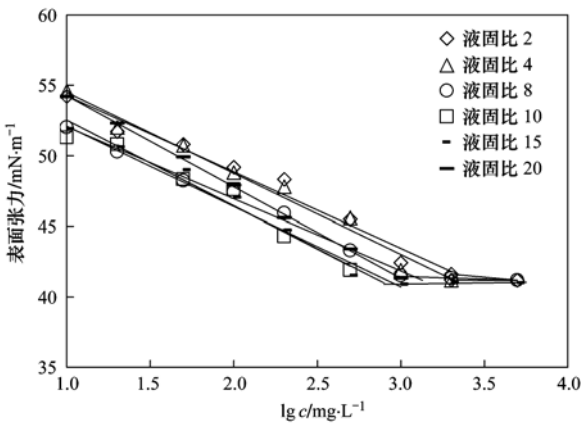


图4 不同液固比时 Triton X-100 被土壤吸附后表面张力随浓度的变化

Fig. 4 Surface tension change with different Triton X-100 concentrations after adsorbed by soil at different liquid/solid ratios

表3 不同液固比时 Triton X-100 和 Tween-80 在土壤上的吸附

Table 3 Adsorption of Triton X-100 and Tween-80 on soil at different liquid/solid ratio

液固比	Triton X-100			Tween-80		
	$CMC_{soil}/mg \cdot L^{-1}$	$Q_{吸}/mg \cdot kg^{-1}$	$V_s/\%$	$CMC_{soil}/mg \cdot L^{-1}$	$Q_{吸}/mg \cdot kg^{-1}$	$V_s/\%$
2	3 846.45	7 575.04	75.75	—	—	—
4	2 021.16	7 848.92	39.24	5 045.30	19 557.88	97.79
8	1 415.47	10 852.32	27.13	3 082.94	23 416.88	58.54
10	1 232.54	11 736.10	23.47	2 580.40	24 245.70	48.49
15	1 102.30	15 650.55	20.87	2 175.12	30 289.35	40.39
20	1 029.77	19 416.80	19.42	2 065.34	38 190.20	38.19

和 Tween-80 的吸附损失率分别为 23.47% 和 48.49%. 可见,同一液固比条件下, Triton X-100 的吸附损失率比 Tween-80 要小 1/2 还多, Triton X-100 较适合用作土壤洗涤剂.

2.3 增溶实验

图5为 Triton X-100 和 Tween-80 对目标 PAHs

增溶量的实验结果. PAHs 的增溶量随表面活性剂浓度的增加以非线性形式增加. 同一浓度时, Triton X-100 的增溶能力比 Tween-80 大. 对表面活性剂浓度与增溶量关系进行非线性模拟, 得到模拟公式. 各浓度时对目标 PAHs 的溶解量看作该浓度时最大溶解量用于计算公式(2)分母值.

图 6 为液固比 4:1 ~ 20:1 时的增溶百分比 SP, 可以看出 2 种表面活性剂的最高 SP 值均发生在液固比为 10:1 时. 进一步增加液固比则 SP 值降低.

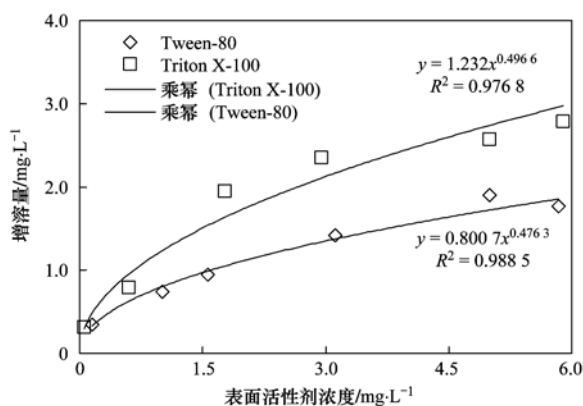


图 5 不同浓度的 Triton X-100 和 Tween-80 对目标 PAHs 的最大增溶量

Fig. 5 Total solubility of target PAHs with different concentrations Triton X-100 and Tween-80 in surfactant-water system

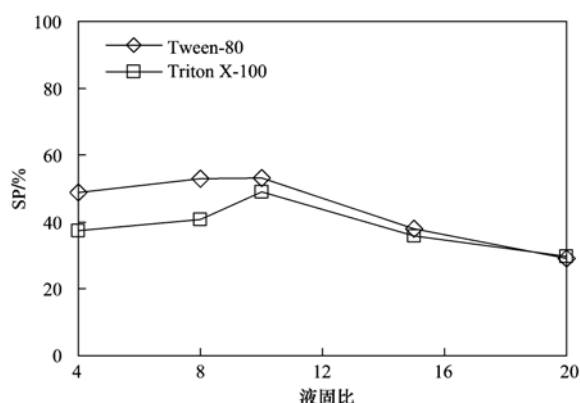


图 6 不同液固比时 Triton X-100 和 Tween-80 对目标 PAHs 增溶百分比

Fig. 6 Solubilization percentages of total PAHs with Triton X-100 and Tween-80 at different liquid/solid ratios

在中试乃至实际工程中,液固比越大则需要处理的洗涤废水量越大,对设备和能源的需求量也越高.因此,综合 R 和 SP 来看,10:1 应该是最佳的液固比. SP 是一个有效的指标用于液固比的选择.

3 结论

(1) 运用洗涤去除率(R)、吸附损失率(V_s)、及增溶百分比(SP)综合分析液固比对土壤洗涤去除目标 PAHs 效果的影响,为土壤洗涤工程中液固比和洗涤剂的选择起一定指导作用.

(2) 2 种表面活性剂的 R 、 V_s 和 SP 随液固比变

化趋势类似. R 随液固比增加呈非线性形式增大,液固比 10:1 后增长变缓. V_s 随液固比增加显著减少,液固比 10:1 后减少变缓. SP 在液固比 10:1 时呈最大值后又减小.

(3) 结合 R 和 SP ,液固比 10:1 为洗涤有效点.

(4) 同一浓度时,Triton X-100 的洗涤效果好于 Tween-80,吸附损失率小于 Tween-80,Triton X-100 应是理想洗涤剂.

参考文献:

- [1] 姜永海, 韦尚正, 席北斗, 等. PAHs 在我国土壤中的污染现状及其研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1176-1182.
- [2] 贾鸿宁, 戴红. 多环芳烃的致癌性及其机制研究进展[J]. 大连医科大学学报, 2009, 31(5): 604-620.
- [3] 卜庆伟, 张枝焕, 夏星辉. 分子标志物参数在识别土壤多环芳烃(PAHs)来源中的应用[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1204-1209.
- [4] Griffiths R A. Soil-washing technology and practice[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, 40(2): 175-189.
- [5] Mann M J. Full-scale and pilot-scale soil washing[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 66(1-2): 119-136.
- [6] Moutsatsou A, Gregou M, Matsas D, et al. Washing as a remediation technology applicable in soils heavily polluted by mining-metallurgical activities [J]. Chemosphere, 2006, 63(10): 1632-1640.
- [7] Anderson J R. Problem solving and learning [J]. American Psychologist, 1993, 48(1): 35-44.
- [8] Chu W, Kwan C Y. Remediation of contaminated soil by a solvent/surfactant system[J]. Chemosphere, 2003, 53(1): 9-15.
- [9] Feng D, Lorenzen L, Aldrich C, et al. Ex situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods[J]. Minerals Engineering, 2001, 14(9): 1093-1100.
- [10] Chang M C, Huang C R, Shu H Y. Effects of surfactants on extraction of phenanthrene in spiked sand [J]. Chemosphere, 2000, 41(8): 1295-1300.
- [11] Grasso D, Butkus M A, O'sullivan D, et al. Soil-washing design methodology for a lead-contaminated sandy-soil [J]. Water Research, 1997, 31(12): 3045-3056.
- [12] Li J L, Chen B H. Solubilization of model polycyclic aromatic hydrocarbons by nonionic surfactants[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(14): 2825-2835.
- [13] Luning P D J, Waddle A N. Solubilization of nitroaromatic compounds from multi-component mixtures into nonionic surfactant micellar solutions [J]. Separation Science and Technology, 2010, 45(6): 732-739.
- [14] Li H L, Chen J, Wu W, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in different size fractions of soil from a coke oven plant and its relationship to organic carbon content [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1-3): 729-734.

- [15] Peng S, Wu W, Chen J J. Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: influencing factors and removal effectiveness[J]. *Chemosphere*, 2010, **82**(8): 1173-1177.
- [16] Rao P H, He M. Adsorption of anionic and nonionic surfactant mixtures from synthetic detergents on soils[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(7): 1214-1221.
- [17] Muherei M A, Junin R, Bin Merdiah A B. Adsorption of sodium dodecyl sulfate, Triton X-100 and their mixtures to shale and sandstone: a comparative study[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, **67**(3-4): 149-154.
- [18] Yang K, Zhu L Z, Xing B S. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solutions of TX100 and SDBS [J]. *Environment Science & Technology*, 2006, **40**(13): 4274-4280.
- [19] Han M, Ji G D, Ni J R. Washing of field weathered crude oil contaminated soil with an environmentally compatible surfactant, alkyl polyglucoside[J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(5): 579-586.
- [20] 马婵媛, 赵保卫, 吴咏琪, 等. 表面活性剂对土壤中多环芳烃菲洗脱作用的比较研究[J]. *安全与环境学报*, 2008, **8**(4): 19-22.
- [21] Nakamiya K, Furuichi T, Ishii K. Evaluation of the optimal washing conditions for dioxin-contaminated soils from the circumference of an incinerator[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2003, **5**(1): 63-68.
- [22] Cheng K Y, Wong J. Combined effect of nonionic surfactant Tween 80 and DOM on the behaviors of PAHs in soil-water system[J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(11): 1907-1916.
- [23] Zheng Z M, Obbard J P. Evaluation of an elevated non-ionic surfactant critical micelle concentration in a soil/aqueous system [J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2667-2672.
- [24] Chu W, Chan K H. The mechanism of the surfactant-aided soil washing system for hydrophobic and partial hydrophobic organics [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **307**(1-3): 83-92.
- [25] Chu W, Choy W K, Hunt J R. Effects of nonaqueous phase liquids on the washing of soil in the presence of nonionic surfactants[J]. *Water Research*, 2005, **39**(2-3): 340-348.
- [26] Chu W, Chan K H, Choy W K. The partitioning and modelling of pesticide parathion in a surfactant-assisted soil-washing system [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(5): 711-716.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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