

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 12 期 Vol.33 No.12 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 12 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 森林低温霜冻灾害干扰研究综述 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等 (3563)
- 碱蓬属植物耐盐机理研究进展 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

- 中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 徐琳, 陈效速, 杜星 (3584)
- 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等 (3594)
- 油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 李明, 王树香, 高宝嘉 (3602)
- 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响 张蕊, 王艺, 金国庆, 等 (3611)
- 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 等 (3622)
- 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应 段爱国, 张建国, 何彩云, 等 (3630)
- 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响 黄杰勋, 莫建民, 李非里, 等 (3639)
- 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等 (3648)
- 冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 张永平, 张英华, 黄琴, 等 (3657)
- 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 彭斌, 李潘林, 周楠, 等 (3668)
- 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响 陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 等 (3676)
- 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响 王文林, 王国祥, 万寅婧, 等 (3688)
- 植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 徐亚军, 赵龙飞, 陈普, 等 (3697)
- 不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 肖云丽, 印象初, 刘同先 (3706)
- 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响 曾宾宾, 邵明勤, 赖宏清, 等 (3712)

种群、群落和生态系统

- 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 袁菲, 张星耀, 梁军 (3722)
- 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价 李建军, 刘帅, 张会儒, 等 (3732)

景观、区域和全球生态

- 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应 徐宁, 王晓春, 张远东, 等 (3742)
- 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等 (3752)
- 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等 (3765)
- 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 等 (3774)
- 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应..... 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)

秦岭南北近地面水汽时空变化特征..... 蒋 冲,王 飞,喻小勇,等 (3805)

露天矿区景观生态风险空间分异..... 吴健生,乔 娜,彭 建,等 (3816)

基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 孔 艳,江 洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 潘 丹,应瑞瑶 (3837)

舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估..... 宋 科,赵 晟,蔡慧文,等 (3846)

不同基因型玉米间混作优势带型配置..... 赵亚丽,康 杰,刘天学,等 (3855)

气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响..... 陈 伟,熊 晶,陈 懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201211011516

黄杰勋, 莫建民, 李非里, 盛光遥. 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响. 生态学报, 2013, 33(12): 3639-3647.

Huang J X, Mo J M, Li F L, Sheng G D. Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3639-3647.

生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响

黄杰勋¹, 莫建民¹, 李非里¹, 盛光遥^{2,*}

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032;

2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 环境科学与工程学院, 上海 200029)

摘要: 农业土壤和黑碳(BC)两种不同的吸附剂吸附苯酚平衡后分离, 每组一部分不做处理, 另一部分通过加入无酚灭菌溶液脱附平衡后分离, 制备得到在不同吸附位点上吸附有苯酚的两类不同类型的 4 种吸附苯酚的吸附剂, 研究了在不同 *Pseudomonas putida* ATCC 11172 菌密度条件下吸附在这 4 种吸附剂上的苯酚的脱附行为。结果表明, 土壤及 BC 对苯酚的吸附均呈现明显的非线性, 可用 Freundlich 模型描述。吸附态的苯酚能否被微生物利用取决于微生物及吸附剂的性质, BC 具有发达的微孔结构, 微孔小于假单胞菌细胞尺寸, 导致假单胞菌无法直接利用吸附在 BC 上的苯酚; 土壤基本无微孔结构, 微生物较易与吸附的苯酚发生表面接触, 直接利用吸附态苯酚。BC 和土壤上的吸附态苯酚的脱附行为能用三元位点模型很好地描述, 模型计算结果表明 BC 上的苯酚脱附主要受慢速脱附和极慢速脱附控制, 微生物降解速率受脱附控制, 降解可加速 BC 上的慢速脱附和极慢速脱附; 土壤上的苯酚脱附主要受快速脱附控制, 微生物降解不受脱附速率限制, 对土壤上的脱附行为基本无影响。

关键词: 土壤; 黑碳; 苯酚; 脱附; 降解

Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil

HUANG Jiexun¹, MO Jianmin¹, LI Feili¹, SHENG G. Daniel^{2,*}

1 College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China

2 State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200029, China

Abstract: Desorption from natural adsorbents is an underlying process affecting the transport, chemical activity, and biodegradation of organic compounds in the environment. It is commonly understood that biodegradation of sorbed organic compounds involves at least two rate processes of desorption and biodegradation. These two rate processes, desorption and biodegradation, are both controlled by the concentration of organic compounds in liquid phase, thus the liquid-phase concentration of substrate is both the result of, and the driving force for, the two rate processes. In most natural environments, however, this situation may be further complicated by the interactions of the two processes. Previous studies mainly focused on the effects of desorption on biodegradation and bioavailability of organic contaminants, little is known about how the biodegradation process affects the desorption process. In the present study, twelve desorption systems derived from four adsorbents of two different types, prepared by treatments after adsorption equilibrium of phenol on agricultural soil and black carbon (BC), were used to investigate the desorption behavior of the phenol on the four adsorbents under the different bacterial densities of *Pseudomonas putida* ATCC 11172. The majority of phenol were adsorbed within the micropores of BC which was characterized to possess more micropore structures compared to the soil. All the sorption isotherms of phenol by the adsorbents were nonlinear, which were well fitted by Freundlich adsorption model. The results

收稿日期: 2012-11-01; 修订日期: 2013-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dansheng@tongji.edu.cn

demonstrated that the biodegradation of phenol was rate-limited, depending on desorption rate of phenol from BC, while desorption was controlled by the biodegradation rate for the phenol sorbed on soil. The desorption data were fitted to a three-compartment model which divided the desorption into rapidly, slowly and very slowly desorbing compartments, and the respective parameters were calculated. As expected, desorption rate constants for three-compartment model followed the progression of rate constant of rapid desorption (r_q) > rate constant of slow desorption (r_s) > rate constant of very slow desorption (r_{ss}). Accompanied with cell density increasing in BC desorption systems, the rapidly desorbing fractions and slowly desorbing fractions increased by approximately 2—10 times, the very slowly desorbing fractions decreased by 40%—60%, and the rate constant of desorption for each fractions approximately maintain stable for the phenol adsorbed by BC. In contrast, for the phenol sorbed by soil, the three desorbing fractions did not change notably while the respective rate constant of desorption increased. These results indicated that the three desorbing fractions of phenol were related to surface structure of the adsorbents. For phenol sorbed on BC, the overall desorption was dominated by slowly and very slowly desorbing compartments and biodegradation rates were limited by desorption rates. Biodegradation could accelerate desorption rates of slowly and very slowly desorbing compartment of phenol on BC. For phenol sorbed on soil, however, the overall desorption was dominated by rapidly desorbing compartments, biodegradation rates were not limited by desorption rates and in turn could not affect each of the three desorbing compartments. In addition, the bioavailability of phenol in this study was related to the properties of microorganisms and adsorbents. Microorganisms could not access the phenol sorbed in the micropores on BC due to the size of cell which was physically excluded from the micropores.

Key Words: soil; black carbon; phenol; desorption; biodegradation

苯酚是有机化工合成的基本原料,被广泛用于塑料、皮革、涂料、医药、农药等行业^[1-2]。苯酚极易溶于水,是水体环境中常见的典型有机污染物,因而在环境研究特别是废水处理方面,经常被选为模式污染物来进行研究,我国、欧盟、美国等已将其列为优先污染物^[3]。苯酚进入水体后会发一系列复杂的理化反应,在土壤或其他颗粒物上的吸附作用是影响其在环境中迁移转化及最终归宿的主要因素。

黑碳(BC)作为一种天然的吸附剂,广泛存在于土壤及沉积物中^[4],且质量百分比占到土壤有机质的10%到70%^[5]。大量研究表明无论小麦还是水稻秸秆燃烧产生的BC对有机物的吸附作用均是一般土壤的400—2500倍^[6-7]。有机污染物进入土壤后极易被BC吸附固定,使得他们的急性毒性得到有效降低,但其污染的持久性却被加强。Luthy等^[8]认为吸附和脱附作用是影响吸附态有机污染物生物降解的主要因素,在有机物的脱附过程中,通常可以观察到初期的快速脱附和随后出现的慢速脱附现象,而污染物的快速脱附量可用来衡量其生物可降解量^[9-10]。一般认为,吸附的有机物要先发生脱附才能被微生物降解,脱附动力学行为控制着有机污染物的生物可获得性^[11]。在脱附有机物的生物降解过程中,液相中的有机物浓度既是脱附行为和生物降解两种过程的结果,又可以是这两种过程的驱动力。实际情况可能更加复杂,因为脱附与生物降解过程会互相影响,例如微生物的存在可以加速或是减缓有机物的脱附速率^[12-14]。

BC与土壤是自然界中最主要的两种吸附剂,土壤是由矿物质和土壤有机质(SOM)组成,BC是一种多孔的物质。土壤吸附有机化合物主要方式有:矿物质和SOM的表面吸附,向SOM内部的分配,孔隙填充等^[15];而BC吸附方式主要有微孔填充和表面吸附。巨大的结构性差异,造成吸附在其上的有机污染物有不同的脱附行为及生物降解行为,研究这两种吸附剂上有机污染物的脱附行为及生物降解行为,能为有机污染物实际的环境行为提供一定的理论依据。

前人的研究主要集中在评价脱附行为对生物降解的影响,然而关于生物降解过程对污染物的脱附行为的影响却少见报道。本文以苯酚为研究对象,使用BC及农业土壤作为吸附介质,以脱附动力学为出发点,使用三元位点模型定量研究了吸附态苯酚的脱附和微生物降解过程之间的相互作用。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

仪器与试剂 比表面积和微孔分析仪 (ASAP 2020 M, Micromeritics, USA); 高效液相色谱 (HPLC) (Agilent 1200, 紫外检测器, 安捷伦); 气相色谱 (GC) (Agilent 7890A, 安捷伦); 元素分析仪 (FlashEA 1112, Thermo Finnigan); 高速离心机 (Sorvall Rc-6 Plus, Thermo Fisher Scientific); 混合纤维素滤膜 (Millipore, USA)。苯酚为纯度为 99.7% (extra pure, ACROS, USA)。

供试 BC 碳前体为松木 (*Pinus massoniana* Lamb.)。取自然燃烧得到的松木碳化物, 洗净表面白灰, 将样品置于研钵中研磨均匀, 过 100 目标准筛。并用超纯水浸润, 静置后除去上层漂浮物, 过滤, 取滤饼于 85 °C 恒温干燥箱中干燥 48 h。储存在广口瓶中并放于干燥器中备用。

供试土壤 土壤采自浙江杭州的农业土壤, 为棕色石灰土。取耕作层表面 10 cm 的土壤, 去除碎石、枝败叶等杂物, 风干、研磨, 过 2 mm 孔径标准土壤筛。高压灭菌, 并于无菌操作台阴干, 重复 3 次。使用该土壤浸出液涂平板, 确认无菌后储存在广口瓶中备用。

微生物菌种 苯酚降解菌为 *Pseudomonas putida* ATCC 11172, 由日本微生物菌种保藏中心提供。

1.2 实验方法

吸附实验 在 40 mL 聚四氟乙烯管中加入 15 mL 不同浓度的苯酚溶液 (各组溶液均保持离子强度 0.2 mol/L, pH=7, 磷酸盐缓冲液 (PB), 本文中所使用 PB 均与此相同) 以及 1.5 g 的土壤或 15 mg 的 BC, 旋紧管盖, 以 40 r/min 的转速在转盘上转动, 控制温度为 30 °C。土壤旋转 24 h 至吸附平衡, BC 旋转 48 h 至吸附平衡。土壤/水混合液 15000 g 高速离心 10 min, 取上清液测苯酚浓度, 结合初始浓度计算得到土壤中苯酚吸附量; BC/水混合液使用 0.22 μm 滤膜过滤分离 BC 和水溶液, 取滤液测苯酚浓度, 结合初始浓度计算得到 BC 上苯酚吸附量。

固相吸附态的苯酚的微生物降解和非生物解吸试验 对两类固相吸附态苯酚进行微生物降解和非生物解吸试验: i) 经吸附实验吸附平衡后, 固液相分离得到的吸附了一定量苯酚的吸附剂, 命名为 BC_n (BC) 及 S_n (土壤); ii) 将 BC_n 和 S_n 分别加入至 15 mL 无苯酚 PB, 旋转平衡 24 h (土壤) 或 48 h (BC), 分别经 15000 g 离心 10 min 和使用 0.22 μm 滤膜过滤分离得到吸附有一定量苯酚的吸附剂, 并命名为 BC_d (BC) 及 S_d (土壤)。相比较未 BC_n、S_n, BC_d、S_d 上较容易脱附的苯酚已经发生了脱附。

分别将 BC_n 和 S_n 加入至 3.38×10⁷ CFU/mL 以及 4.54×10⁷ CFU/mL 的处于对数生长末期的恶臭假单胞菌的悬浊液中, 在转盘上转动脱附降解 (30 °C, 40 r/min), 每隔一定时间取样离心或过滤, 测液相及固相中苯酚的含量。固相中苯酚经 15 mL 丙酮在 50 °C 超声萃取 20 min 两次, 使用 GC 检测得到固相中苯酚含量, 通过总量平衡来计算得到苯酚的降解量。绘制吸附态苯酚的脱附微生物降解曲线。采用相同的方法可以得到 BC_d 和 S_d 在恶臭假单胞菌存在时的脱附微生物降解曲线。

将 BC_n 或 S_n 加入至经灭菌处理的 15 mL 无苯酚 PB 中, 旋转脱附, 每隔一段时间取样, 离心或过滤取上清液测液相中苯酚含量, 得到苯酚在 BC 或土壤上的直接脱附动力学曲线。采用同样的方法可以得到 BC_d 或 S_d 的二次脱附动力学曲线。

1.3 脱附曲线分析

本研究中苯酚的脱附曲线采用常用的一级动力学方程并通过 SigmaPlot 进行非线性拟合^[9, 16-17]:

$$S_t/S = F_q \cdot \exp(-r_q \cdot t) + F_s \cdot \exp(-r_s \cdot t) + F_{vs} \cdot \exp(-r_{vs} \cdot t) \quad (1)$$

式中, S_t 为在 t (h) 时刻吸附剂上吸附的苯酚量, S 为在 0 时刻吸附的苯酚量; F_q 、 F_s 、 F_{vs} (%) 为快速脱附、慢速脱附、极慢速脱附的百分含量; r_q 、 r_s 、 r_{vs} (h⁻¹) 为快速脱附、慢速脱附、极慢速脱附的速率常数。

1.4 分析方法

液相中的苯酚直接用高效液相色谱仪分析, 色谱条件: 色谱柱为 Xbridge 5 μm, 4.6 mm×150 mm C18 柱 (Waters, Ireland), 流动相为体积分数 4.5:5.5 的水/甲醇, 流速为 1 mL/min, 检测波长为 272 nm。

固相中的苯酚经 15 mL 丙酮超声萃取 20 min 两次,合并萃取液,使用气相色谱(带 FID 检测器)分析。色谱条件:色谱柱为毛细管柱 HP-6,30 m×0.32 mm×0.25 μm;进样口温度 250 ℃;进样模式:分流比为 1:2;进样量 1 μL;升温程序:起始温度 60 ℃,以每分钟 25 ℃的速度升温至 220 ℃,总运行时间 9 min。FID 检测器检测温度:250 ℃。

2 结果与讨论

2.1 吸附剂表征结果

本研究采用了 BC 与土壤两种性质不同的吸附剂来进行苯酚的吸附。使用 N₂-BET 法^[18]对其比表面积(SA_{BET},m²/g)进行了测定,并使用 t-plot 模型^[19]对其微孔比表面积(SA_{μP},m²/g)和外比表面积(SA_{EXT},m²/g)进行了计算,结果如表 1 所示。从表中可见,BC 的比表面积(S_{BET} = 198.74 m²/g)远大于土壤的比表面积(S = 14.44 m²/g);由 t-plot 模型计算得到的微孔比表面积(SA_{μP})显示 BC 的微孔结构比较发达(SA_{μP} = 130.01 m²/g),而土壤则未测到微孔结构。土壤样品的基本性质为:有机质 2.35%,粘粒 18.9%,沙粒 66.2%,粉沙 14.9%,pH=6.73(水:土=5:2),阳离子交换量 26.7 cmol(+)/kg。使用元素分析仪分析测定 BC 的元素组成,结果为:C 含量 81.62%,H 含量 2.57%,N 含量 0.39%,O 含量 15.42%,可溶出有机碳 0 mg/g。

表 1 两种吸附剂的表面特征
Table 1 Surface properties of two adsorbents

吸附剂 Adsorbent	SA _{BET} /(m ² /g)	SA _{EXT} /(m ² /g)	SA _{μP} /(m ² /g)
黑碳 BC	198.74	68.73	130.01
土壤 Soil	14.44	17.54	0

2.2 苯酚的吸附

对 BC 及土壤对苯酚吸附实验的实验数据使用 Freundlich 方程进行拟合,结果见表 2,其拟合后 R² 分别为 0.999(BC),0.984(土壤)。BC 的 K_F 值达到了 8065.6 mg/kg,而土壤的 K_F 值仅为 2.08 mg/kg,这主要是由于两种吸附剂的比表面积差异造成的,较大的比表面积赋予了 BC 更大的吸附能力。BC 吸附曲线 n 值为 0.374,而土壤吸附曲线 n 值为 0.753,说明 BC 对苯酚的吸附非线性度更强,主要是一种表面吸附作用和填充吸附;而土壤对苯酚的吸附相对于 BC 对苯酚的吸附表现为线性吸附,是多种吸附作用共同的结果。然而,对土壤吸附数据使用如下线性方程 2 进行拟合:

$$Q_e = K \cdot c_e + A \tag{2}$$

式中,Q_e 为平衡后固相中苯酚吸附量(mg/kg),c_e 为平衡后液相中苯酚浓度(mg/L)。发现其相关系数 R² 仅为 0.962,小于 Freundlich 方程进行拟合的相关性系数 0.984,说明土壤对苯酚的吸附曲线更符合非线性的 Freundlich 吸附,这也再次证明苯酚在土壤上的吸附可能是表面吸附和分配作用等共同的结果。

表 2 苯酚的吸附等温线 Freundlich 方程拟合数据
Table 2 Freundlich parameters for sorption isotherms of phenol

吸附剂 Adsorbent	Freundlich 方程拟合 Freundlich equation fitting			线性拟合 Linear fitting		
	K _F /(mg/kg)	n	R ²	K/(L/mg)	A/(mg/kg)	R ²
黑碳 BC	8065.6	0.37	0.999	—	—	—
土壤 Soil	2.08	0.75	0.984	0.39	19.85	0.962

2.3 苯酚的脱附

如图 1 所示,土壤和 BC 上的苯酚的脱附均可大致分为快速脱附、慢速脱附、极慢速脱附 3 个阶段,因此可以认为,两种吸附剂上吸附的苯酚可分为 3 个部分:快速脱附部分(吸附在快速脱附位点上)、慢速脱附部分(吸附在慢速脱附位点上)和极慢速脱附部分(吸附在极慢速脱附位点上)。因此,苯酚在土壤和 BC 上的

脱附可由三元位点理论来进行阐述,使用方程(1)进行数据分析得结果见表3。图1中横坐标为脱附时间,纵坐标为脱附的苯酚量(S_t)与初始吸附态苯酚量(S)的比值($S_t/S \times 100$),图中曲线为对各组数据使用三元位点脱附方程拟合后得到的曲线。方程对实验数据拟合比较好,其 R^2 为0.984至1.000。

从拟合数据可以看到,3种位点上的脱附均有发生,BC体系中,液相中的苯酚一直处于较低且稳定的水平(接近0或为低于检测限),图1中可以看出脱附速率随时间变长而减小,这种现象可能由以下原因造成:快速脱附位点上的苯酚脱附速率比较快,导致随着时间的延长,快速脱附位点上的苯酚所占位脱附苯酚总量的比例越来越小,而慢速和极慢速脱附的比例越来越高,在某种角度上可以视为快速脱附位点上的苯酚优先发生脱附,从而导致反应前2h脱附速率比较快,之后脱附速率随着实验的进行而减慢。

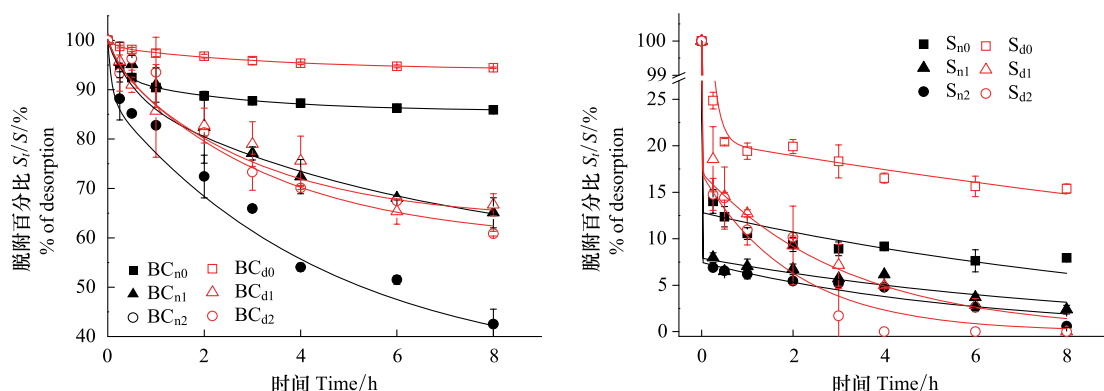


图1 不同脱附环境下苯酚的脱附曲线

Fig.1 Desorption isotherms of phenol in different systems

图中 BC_n0 为无菌体系下 BC_n 上吸附态苯酚的脱附动力学数据,图中 BC_{n1} 和 BC_{n2} 为 BC_n 在菌密度分别为 3.38×10^7 CFU/mL、 4.54×10^7 CFU/mL时吸附态苯酚的脱附动力学数据; BC_{d0} 、 BC_{d1} 、 BC_{d2} 则是各自条件下 BC_d 上吸附态苯酚的脱附数据; S_{n0} 、 S_{n1} 、 S_{n2} 、 S_{d0} 、 S_{d1} 、 S_{d2} 则是各自条件下吸附质为土壤的脱附数据。

表3 三元位点模型拟合脱附参数

Table 3 Desorption parameters evaluated by a three-compartment model

脱附体系 Desorption treatment	$F_q/\%$	r_q/h^{-1}	$F_s/\%$	r_s/h^{-1}	$F_{ss}/\%$	r_{ss}/h^{-1}	R^2
BC_{n0}	6.47	4.65	5.84	0.67	87.69	2.60×10^{-3}	1.000
BC_{n1}	10.62	2.03	34.58	0.16	55.07	1.32×10^{-10}	0.998
BC_{n2}	11.39	3.10	54.95	0.33	34.08	5.63×10^{-10}	0.993
BC_{d0}	3.19	0.69	42.09	0.01	54.12	4.03×10^{-14}	0.996
BC_{d1}	27.50	0.50	34.37	0.03	37.13	1.92×10^{-11}	0.984
BC_{d2}	38.29	0.35	28.20	1.01×10^{-10}	32.35	8.85×10^{-19}	0.990
S_{n0}	41.70	434.65	45.50	230.58	12.80	0.09	0.999
S_{n1}	44.85	3094.54	47.23	1392.05	7.91	0.11	1.000
S_{n2}	45.04	75477.40	47.50	2451.88	7.46	0.17	1.000
S_{d0}	37.86	218.96	41.58	6.35	20.56	0.04	0.999
S_{d1}	39.06	986.75	43.85	173.44	17.10	0.31	1.000
S_{d2}	39.33	27403.94	43.71	222.16	16.96	0.50	0.997

F_q 、 F_s 、 F_{ss} 为快速脱附、慢速脱附、极慢速脱附的百分含量; r_q 、 r_s 、 r_{ss} 为快速脱附、慢速脱附、极慢速脱附的速率常数

对于同样吸附有苯酚的BC来说,随着假单胞菌细胞密度的增加,其快速脱附位点及慢速脱附位点上吸附态苯酚的比例逐渐增加; BC_n 的 F_q 从无菌的6.47增加到菌密度为 4.54×10^7 CFU/mL的11.39, F_s 也从无菌的5.84增加到菌密度为 4.54×10^7 CFU/mL的54.95,而 F_{ss} 则从87.69减小到34.08; BC_d 的 F_q 也是呈上

升趋势,而 F_s 、 F_{rs} 则呈下降趋势,分别从 42.09 下降到 28.20、54.12 下降到 32.35,且降幅明显。从表 3 中可以看出 BC 体系上的各部分脱附速率基本不受降解菌含量的变化而变化。

比较脱附速率常数,可见 r_{s-BC_n} 与 r_{q-BC_d} 处于同一数量级,且相差不大, r_{rs-BC_n} 与 r_{s-BC_d} 也可认为是相同数量级。从而可以认为:BC_n 的慢速脱附部分相当于 BC_d 的快速脱附部分,BC_n 的极慢速脱附部分可认为是 BC_d 的慢速脱附和极慢速脱附部分之和。表 4 中列出了各脱附部分实际苯酚的含量也证明了这一点:BC_n 体系的 S_s 与相对应 BC_d 体系 S_q 数值上相差不大,BC_n 体系的 S_{rs} 与相对应 BC_d 体系 S_s 与 S_{rs} 之和也基本一致。说明 BC_n 的脱附处理主要使吸附在快速脱附位点上的苯酚发生了脱附,而吸附在慢速脱附位点和极慢速脱附位点上的苯酚发生了少量脱附。这也表明吸附在快速脱附位点上的苯酚比吸附在慢速脱附位点上的苯酚容易发生脱附;而吸附在慢速脱附位点上的苯酚又比吸附在极慢速脱附位点上的苯酚容易发生脱附。在快速脱附阶段,可能主要是吸附在外表面上的苯酚发生了脱附;慢速脱附阶段可能受中孔中的受阻扩散控制^[20],而且主要由苯酚控制;而极慢速脱附主要是微孔中的苯酚发生脱附,传质过程主要由微孔空间中的扩散限制^[21]。慢速脱附及极慢速脱附对有机化合物在环境中的持久性和毒性十分重要。

表 4 BC_n 及 BC_d 各吸附部分实际苯酚吸附量

Table 4 Adsorption amount of phenol onto different sites of BC_n and BC_d

脱附体系 Desorption treatment	S_q / (g/kg)	S_s / (g/kg)	S_{rs} / (g/kg)	脱附体系 Desorption treatment	S_q / (g/kg)	S_s / (g/kg)	S_{rs} / (g/kg)
BC _{n0}	0.83	0.75	11.30	BC _{d0}	0.34	4.54	5.83
BC _{n1}	1.65	5.38	8.56	BC _{d1}	3.79	4.74	5.12
BC _{n2}	1.86	9.00	5.58	BC _{d2}	5.60	4.12	4.73

S_q 、 S_s 、 S_{rs} 分别为快速脱附、慢速脱附、极慢速脱附部分苯酚实际吸附量

土壤/水生物降解体系,苯酚的快速脱附部分及慢速脱附部分随着细菌增加而增加,而极慢速脱附部分则随着细菌增加而减少。相比较 BC/水体系,土壤/水体系各部分苯酚的脱附速率 r 则随着菌密度的增加而增加。

比较 BC 及土壤上的苯酚脱附拟合数据,可以发现:1) 菌密度的增加促进了 BC 上吸附的苯酚从难脱附位点向易脱附位点转移;2) 而对于吸附在土壤上的苯酚,各位点上吸附态的苯酚的比例没有发生明显的变化(快速脱附及慢速脱附部分比例稍微增加),而各部分脱附速率则显著的增大。

2.4 吸附态苯酚的生物有效性

使用假单胞菌的静息细胞来进行苯酚的生物降解,该菌利用苯酚作为唯一碳源,将苯酚矿化成 CO₂。在取样的 8 h 内,溶液中苯酚的菌密度没有发生明显的变化。利用初始时间苯酚的含量减去测得的取样点液相及固相上苯酚含量计算得到苯酚的微生物降解量。

本研究使用了上文所述的 4 种吸附有苯酚的吸附剂,菌密度 3.38×10^7 CFU/mL 和 4.54×10^7 CFU/mL 的恶臭假单胞菌静息细胞来进行脱附降解实验,图 2 为苯酚降解量 (mg/L) 随时间 (h) 变化作图得到。由图可见,由于使用了静息细胞,在所有的实验中均未观察到生物降解过程有明显的滞后现象。在取样时间的后期,由于苯酚量在整个体系的总量减少,苯酚量不能满足恶臭假单胞菌的降解能力,造成了在取样后期,微生物的表观降解速率下降。在微生物的线性降解时间范围内将降解量对时间作线性回归可得到微生物的各体系降解速率,结果见表 5。可观察到:1) BC/水体系中苯酚的降解速率均小于 PB 体系,且 BC/水体系中液相苯酚浓度一直维持在一个基本为零的水平,说明苯酚的降解受脱附控制,且恶臭假单胞菌无法降解吸附在 BC 上的苯酚^[22];2) 土壤/水体系中则是 S_n 降解速率大于 PB 体系, S_d 体系则降解速率基本与 PB 体系持平,这说明吸附在土壤上的苯酚容易发生脱附,即脱附速率大于降解速率。 S_d 体系降解速率基本与 PB 体系持平,土壤上苯酚的脱附规律表现为瞬时脱附。

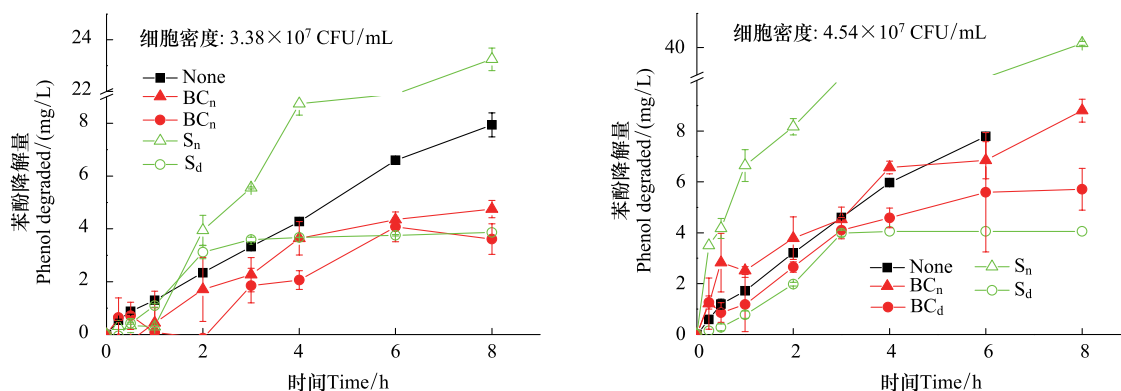


图2 苯酚在各体系中生物降解量

Fig. 2 Biodegradation of phenol by *Pseudomonas putida* ATCC 11172

表5 微生物在各体系中线性降解时间范围内降解速率

Table 5 Degradation rates within the time range of linear degradation by *Pseudomonas putida* ATCC 11172 in various systems

脱附降解体系 Degradation treatment	PB ₁	BC _{n1}	BC _{d1}	S _{n1}	S _{d1}	PB ₂	BC _{n2}	BC _{d2}	S _{n2}	S _{d2}
$k/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	1.10	0.77	0.61	2.77	1.14	1.50	1.24	1.25	4.87	1.18
R^2	0.993	0.957	0.818	0.950	0.939	0.994	0.795	0.929	0.982	0.947

PB₁、PB₂ 分别为在 PB 中无吸附剂,菌密度为 3.38×10^7 CFU/mL、 4.54×10^7 CFU/mL 时苯酚的降解速率

表3中可以看出BC与土壤两种体系对于菌密度的变化表现出了完全不同的规律:BC体系中各部分的脱附速率 r 均没有发生明显变化,快速脱附及慢速脱附的苯酚的比例却增加了。而土壤体系中各部分的比例基本不变, r 却随着菌密度的增加而增加。这是由于BC的比表面积主要由微孔比表面积构成($SA_{\text{EXT}} = 130.01 \text{ m}^2/\text{g}$, $S_{\text{BET}} = 198.74 \text{ m}^2/\text{g}$),土壤则检测不到微孔比表面积($SA_{\text{EXT}} = 0$),微孔结构的差异造成BC上苯酚主要吸附在微孔内,而土壤上苯酚则吸附在外表面上;早在1980年Kilbertus^[23]就指出,0.2 μm 的孔直径就可以限制微生物进入空隙中,恶臭假单胞菌的大小为 $(0.5-1) \times (1.5-4) \mu\text{m}$,而微孔的孔径范围则在2 nm以下,可见游离态的恶臭假单胞菌无法接近吸附在微孔中的苯酚,而只能接近吸附在外表面上的苯酚。而土壤上吸附苯酚的位点都是位于外表面上,可以被恶臭假单胞菌轻易接近。一般认为,只有当底物与微生物发生物理接触后,底物才能被降解,吸附态的苯酚需要先脱附到水相中,再由水中扩散转移到细胞中后才能被利用^[11]。由于土壤上吸附位点位于外表面,造成恶臭假单胞菌可接近所有吸附态苯酚,从而导致土壤上吸附的苯酚能快速直接被微生物所利用,而不需要上述一系列扩散过程,导致了土壤脱附拟合曲线参数中各部分百分比基本不变,脱附速率却以数量级增大。相对于PB体系,苯酚的土壤/水体系中苯酚的降解速率没有发生降低,由于降解菌能够直接利用吸附态的苯酚,使降解菌的降解能力一直保持在最优状态。对于BC,恶臭假单胞菌的尺寸比微孔大,液相中的恶臭假单胞菌无法进入微孔,也就是无法与微孔中吸附态的苯酚发生物理接触,导致微孔内吸附位点上苯酚脱附速率没有发生明显变化,随着液相中苯酚的降解,吸附态苯酚的化学势逐渐增大,使其能有效地从慢速脱附点位快速向快速脱附点位转移,造成较易脱附苯酚的比例增加。可见BC大量进入环境后,会使进入环境的部分有机污染物大量积聚在其上,而不是直接通过各种途径被降解;随着时间的推移,环境中自由态有机物的降解,吸附在BC上的有机物会持续地不断地脱附下来,增强了有机物污染的持久性。

对于 S_n 体系表现出的降解速率增大现象,增加了 S_n 体系下菌密度为 5.71×10^7 CFU/mL和 6.48×10^7 CFU/mL的脱附降解实验,其降解速率使用最小二乘法线性拟合后结果如表6所示(k_0 为相应菌密度在PB中的降解速率)。 S_n 体系相比较PB体系假单胞菌的降解速率平均增加了2.86倍。并可见其降解能力相对于PB溶液中各自菌密度下的降解速率成比例增加,而 S_d 体系则没有这种降解速率异常增加的情况出现。 S_n

与 S_d 体系唯一的不同就是 S_d 体系的溶液中溶解性有机质比 S_n 体系小很多,因此,可以认为土壤溶解性有机质提高了恶臭假单胞菌的苯酚的生物降解能力。这与 Laor 等^[14]研究结果一致。

表 6 不同菌密度情况下 S_n 体系降解速率

Table 6 Biodegradation rate of S_n system with different bacterial density

菌密度 Cell density/($\times 10^7$ CFU/mL)	3.38	4.54	5.71	6.48
$k/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	2.77	4.87	5.42	5.83
k/k_0	2.51	3.26	2.92	2.77

2 结论

(1) BC 具有发达的微孔结构,苯酚主要吸附在孔结构内,而土壤则基本没有微孔体系,苯酚在土壤上的吸附是表面吸附和分配共同作用的结果;

(2) 三元位点模型能很好地描述 BC 和土壤上的吸附态苯酚的脱附行为;BC 上的苯酚脱附主要受慢速脱附和极慢速脱附控制;微生物降解速率大于脱附速率,生物降解可以加速 BC 上的慢速脱附和极慢速脱附;土壤吸附的苯酚脱附主要受快速脱附控制,微生物降解不受脱附速率限制,对土壤上的脱附行为基本无影响;

(3) 吸附态的苯酚能否被微生物利用取决于微生物及吸附剂的性质。由于土壤基本没有微孔结构,微生物能比较容易地与其吸附的苯酚发生表面接触,因而能直接利用吸附态苯酚;而 BC 具有发达的微孔结构,微孔小于假单胞菌细胞尺寸,导致假单胞菌无法直接利用吸附在 BC 微孔内的苯酚。

References:

- [1] Kujawski W, Warszawski A, Ratajczak W, Porebski T, Capala W, Ostrowska I. Application of pervaporation and adsorption to the phenol removal from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 2004, 40(2): 123-132.
- [2] Li H T, Xu M C, Shi Z Q, He B L. Isotherm analysis of phenol adsorption on polymeric adsorbents from nonaqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 271(1): 47-54.
- [3] Zhou W, Fu D, Sun Z. Blacklist of priority pollutants in water. *Environmental Monitoring in China*, 1990, 6(4): 1-3.
- [4] Yang J, Ying G, Zhao J, Peng P. Advance in research on the influence of black carbon on the environmental geochemistry processes of environmental contaminants. *Ecology and Environmnet*, 2008, 17(4): 1685-1689.
- [5] Zhou Z, Wu W, Li Y, Sun H. Sorption and Desorption Behaviors of Three PAHs by Charcoals. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 813-819.
- [6] Yang Y, Sheng G Y. Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(16): 3635-3639.
- [7] Chun Y, Sheng G Y, Chiou C T, Xing B S. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(17): 4649-4655.
- [8] Luthy R G, Aiken G R, Brusseau M L, Cunningham S D, Gschwend P M, Pignatello J J, Reinhard M, Traina S J, Weber W J, Westall J C. Sequestration of hydrophobic organic contaminants by geosorbents. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(12): 3341-3347.
- [9] Cornelissen G, Rigterink H, Ferdinandy M M A, Van Noort P C M. Rapidly desorbing fractions of PAHs in contaminated sediments as a predictor of the extent of bioremediation. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32(7): 966-970.
- [10] Cornelissen G, vanNoort P C M, Govers H A J. Desorption kinetics of chlorobenzenes, polycyclic aromatic hydrocarbons, and polychlorinated biphenyls: Sediment extraction with Tenax(R) and effects of contact time and solute hydrophobicity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, 16(7): 1351-1357.
- [11] Smith S C, Ainsworth C C, Traina S J, Hicks R J. Effect of sorption on the biodegradation of quinoline. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 737-746.
- [12] Guerin W F, Boyd S A. Differential bioavailability of soil-sorbed naphthalene to two bacterial species. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, 58(4): 1142-1152.
- [13] Tang W C, White J C, Alexander M. Utilization of sorbed compounds by microorganisms specifically isolated for that purpose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, 49(1): 117-121.
- [14] Laor Y, Strom P F, Farmer W J. Bioavailability of phenanthrene sorbed to mineral-associated humic acid. *Water Research*, 1999, 33(7): 1411-1418.

1719-1729.

- [15] Wang Z Y, Yu X D, Xu Y, Gao D M, Li F M, Xing B S. Characterization of soil/sediment micropores and their impacts on the sorption-desorption behavior of organic pollutants. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2087-2096.
- [16] Cornelissen G, Van Noort P C M, Govers H A J. Mechanism of slow desorption of organic compounds from sediments: A study using model sorbents. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32(20): 3124-3131.
- [17] Rhodes A H, McAllister L E, Semple K T. Linking desorption kinetics to phenanthrene biodegradation in soil. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1348-1353.
- [18] Leglize P, Alain S, Jacques B, Corinne L. Adsorption of phenanthrene on activated carbon increases mineralization rate by specific bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(2/3): 339-347.
- [19] de Boer J H, Lippens B C, Linsen B G, Broekhoff, J C P, van den Heuvel A, Osinga Th J. The *t*-curve of multimolecular N₂-adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1966, 21(4): 405-414.
- [20] Werth C J, Reinhard M. Effects of temperature on trichloroethylene desorption from silica gel and natural sediments. 2. Kinetics. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(3): 697-703.
- [21] Weber W J, Huang W L. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 4. Intraparticle heterogeneity and phase-distribution relationships under nonequilibrium conditions. *Environmental Science and Technology*, 1996, 30(3): 881-888.
- [22] Ogram A V, Jessup R E, Ou L T, Rao P S C. Effects of sorption on biological degradation rates of (2,4-dichlorophenoxy)acetic acid in soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 1985, 49: 582-587.
- [23] Kilbertus G. Etudes des microhabitats contenus dans les agregats du sol. Leur relation avec la biomasse bacterienne presente et la taille des procaryotes. *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol*, 1980, 17: 543 -557.

参考文献:

- [3] 周文敏, 傅德黔, 孙宗光. 水中优先控制污染物黑名单. *中国环境监测*, 1990, 6(4): 1-3.
- [4] 杨基峰, 应光国, 赵建亮, 杨小兵, 彭平安. 黑碳对污染物环境地球化学过程的影响. *生态环境*, 2008, 17(4): 1685-1689.
- [5] 周尊隆, 吴文玲, 李阳, 孙红文. 3种多环芳烃在木炭上的吸附/解吸行为. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 813-819.
- [15] 王震宇, 于晓冬, 许颖, 高冬梅, 李锋民, Baoshan Xing. 土壤微孔对有机物吸附/解吸的影响及其表征. *生态学报*, 2009, 29(4): 2087-2096.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
- Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
- Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
- Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
- Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
- Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
- Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
- Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
- Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
- The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
- Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
- Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
- The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
- Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
- Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
- The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
- Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng
..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land
..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.
..... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city
..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis
..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan
..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes
..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves
..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of
Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吴文良

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 12 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元