

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第3期 Vol.34 No.3 **2014**

中国生态学会
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 34 卷 第 3 期 2014 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 灾后生态恢复评价研究进展 刘孝富,王文杰,李京,等 (527)
- 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析 庞明月,张力小,王长波 (537)

个体与基础生态

- 北部湾北部海域夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力 马璐,曹文清,张文静,等 (546)
- 鲢鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力 樊晓丽,林植华,丁先龙,等 (555)
- 环境温度对白头鹇代谢产热和蒸发失水的影响 林琳,曹梦婷,胡益林,等 (564)
- 灌溉对沙拐枣幼苗生长及氮素利用的影响 黄彩变,曾凡江,雷加强,等 (572)
- PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响 朱凡,洪湘琦,闫文德,等 (581)
- 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价 魏兴萍,蒲俊兵,赵纯勇 (589)
- 排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等 (597)

种群、群落和生态系统

- 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性 高福元,赵成章,卓马兰草 (605)
- 捕食者对空心莲子草叶甲种群的生物胁迫 刘雨芳,李菲,桂芳艳,等 (613)
- 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征 马威,孙军 (621)
- 磨盘山天然次生林凋落物数量及动态 范春楠,郭忠玲,郑金萍,等 (633)
- 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响 刘方春,邢尚军,马海林,等 (642)
- 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例 张雷,王琳琳,张旭东,等 (650)
- 基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究 侯鹏,申文明,王桥,等 (660)
- 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子 黄辉,孟平,张劲松,等 (667)
- 新疆天山高寒草原不同放牧管理下的 CO_2 , CH_4 和 N_2O 通量特征 贺桂香,李凯辉,宋韦,等 (674)

景观、区域和全球生态

- 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析 马明德,马学娟,谢应忠,等 (682)
- 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率 董林林,杨浩,于东升,等 (690)
- 自养微生物同化 CO_2 的分子生态研究及同化碳在土壤中的转化 吴小红,简燕,陈晓娟,等 (701)

资源与产业生态

- 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析 孙玉峰,郭全营 (710)

基于 AD-AS 模型的海岸带生态系统综合承载力评估——以舟山海岸带为例 苏盼盼,叶属峰,过仲阳,等 (718)

城乡与社会生态

基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 李春林,刘 淼,胡远满,等 (727)

研究简报

陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异 梁 婷,同延安,林 文,等 (738)

不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响 刘小勇,李红旭,李建明,等 (746)

长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性..... 王振海,殷秀琴,蒋云峰 (755)

最大可允许填海面积模拟——厦门西海域案例研究 林琛琛,饶欢欢,刘 岩,等 (766)

学术信息与动态

2013 年水文土壤学与自然资源可持续利用国际学术研讨会述评 张 骁,赵文武 (774)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 252 * zh * P * ￥90.00 * 1510 * 29 * 2014-02



封面图说: 云南松树冠——云南松为松科松属裸子植物,多生长在海拔 1000—3500m 的高山,喜光、耐干旱、耐瘠薄,适应酸性的红壤、黄壤,在其他树种不能生长的贫瘠石砾地或冲刷严重的荒山坡分布,易于天然更新。主要分布于四川西南部、云南、西藏东南部、贵州西部、广西西部,常形成大面积纯林,尤以云南分布最广,故有云南松之称。云南松树高可达 30m,胸径达 1m,树皮呈灰褐色,叶通常 3 针一束,鲜有两针,球果圆锥状卵圆形,种子近卵圆形或倒卵形。树干通直,木质轻软细密,是优质造纸、人造板原料,富含松脂是云南松的重要特点之一。

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/stxb201301040020

朱凡, 洪湘琦, 闫文德, 宿少锋, 梁小翠, 王志勇. PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响. 生态学报, 2014, 34(3): 581-588.

Zhu F, Hong X Q, Yan W D, Su S F, Liang X C, Wang Z Y. Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 581-588.

PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响

朱 凡^{1,2,*}, 洪湘琦¹, 闫文德^{1,2}, 宿少锋³, 梁小翠², 王志勇⁴

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004;

3. 海南林业科学研究所, 海口 571100; 4. 湖南省森林植物园, 长沙 410000)

摘要: PAHs 作为一类持久性有机污染物对土壤环境质量产生深刻的影响。选用了中国亚热带城市普遍采用的 4 个树种(樟树、栎树、广玉兰、马褂木), 利用盆栽试验, 研究了 PAHs 污染土壤植物修复对酶活性影响。结果表明, 多酚氧化酶活性定量抑制率为 -94.98%—16.29%, 过氧化氢酶为 -76.71%—13.19%, 磷酸酶为 -49.62%—56.38%。土壤酶活性对 PAHs 污染的响应受到不同树种的影响。方差分析表明, 过氧化氢酶活性在不同污染水平间差异显著, 3 种酶活性在不同时间下差异性显著, 3 种酶活性在不同树种×污染水平、不同时间×污染水平二因素作用下差异都不显著。主成分分析表明, PAHs 污染对土壤酶活性的影响大于树种的影响, 多酚氧化酶和磷酸酶对土壤反映敏感。

关键词: PAHs; 树种; 修复; 土壤酶

Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil

ZHU Fan^{1,2,*}, HONG Xiangqi¹, YAN Wende^{1,2}, SU Shaofeng³, LIANG Xiaocui², WANG Zhiyong⁴

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 State Key Laboratory of Ecological Applied Technology in Forest Area of South China, Changsha 410004, China

3 Hainan Forestry Academy of Sciences, Haikou 571100, China

4 Hunan Forest Botanical Garden, Changsha 410000, China

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are widespread in nature because of several polluting anthropogenic activities. They have been recognized as a potential health risk due to their intrinsic chemical stability, high recalcitrance to different types of degradation and high toxicity to living organisms. Soil enzymes, being in intimate contact with the soil's environment and very sensitive to any ecosystem perturbation, are well suited for assessing the impact of pollution on the soil quality. The aim of this trial was to quantify the responses of soil enzyme activity during the phytoremediation of PAHs impacted soil. Four tree species including *Cinnamomum camphora*, *Magnolia grandiflora*, *Koelreuteria bipinnata*, *Liriodendron chinense*, from subtropical China, were selected and planted separately in the pots in which soils were treated with diesel oil to three concentration levels of PAHs (L1 < L2 < L3). Phosphatase, polyphenol oxidase and hydrogen peroxide activity were evaluated at 0, 3, 6, 9 and 12 months after the PAHs contamination. The resulted showed that the inhibition rates of polyphenol oxidase activity ranged from -94.98% to 16.29%, the inhibition rates of hydrogen peroxide activity ranged from -76.71% to 13.19%, and the inhibition rates of phosphatase activity ranged from -49.62% to 56.38%. Enzymatic activity in PAHs contaminated soils were also affected by different tree species. Analysis of variance

基金项目: 湖南省教育厅科研重点项目 (12A149); 国家林业局推广项目 (2012-64); 国家自然科学基金面上项目 (31070410); 湖南省林业厅科技项目; 湖南省普通高校青年骨干教师培养对象

收稿日期: 2013-01-04; **修订日期:** 2013-12-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forestranger33@hotmail.com

indicated that there was a significant difference of hydrogen peroxide activity between different PAHs levels and there were a significant difference of 3 enzyme activities between different times, but all 3 enzyme activities were not significant between interactions of different trees and PAHs levels and between interactions of different times and PAHs levels. Two principal components were extracted from the principal component analysis and their cumulative contribution of variance accounted for 94.19%. The variance contribution rate of PC1 and PC2 were 87.61% and 6.58%, respectively. The correlation coefficients between main substrates and PC1 or PC2 indicated that enzymatic activity was influenced by PAHs and trees together, but the such influence from PAHs contamination was higher than that from the trees. Meanwhile, the principal component analysis also showed the polyphenol oxidase and phosphatase activities impacted by the PAHs and trees were higher than the hydrogen peroxide activity.

Key Words: PAHs; trees; phytoremediation; enzyme

土壤环境质量不仅与土壤的理化性质有关,而且与土壤生物学性质关系密切。由于土壤微生物与酶活性比土壤理化性质对土壤质量的变化能做出更快速地响应,所以土壤微生物和酶在污染物生态毒理^[1,2]、污染监测评价^[3-6]和修复^[7-8]等方面的研究受到普遍关注。

PAHs 是一类持久性有机污染化合物,已严重威胁到土壤环境质量。近年来,关于土壤酶与有机污染物之间的关系各国学者做了较多研究,如张晶^[9]等研究长期灌溉含多环芳烃污水对稻田土壤酶活性的影响,发现 PAHs 含量与脱氢酶和脲酶活性呈极显著正相关,与多酚氧化酶活性呈显著正相关;Wyszakowska 等^[10]研究了种植燕麦对柴油污染土壤酶活性的影响,结果发现柴油显著抑制了脱氢酶和脲酶的活性,但对酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活只有轻微影响。还有一些研究表明加氧酶^[11]、脱氢酶^[12]、木质素降解酶^[13]也参与了 PAHs 的降解过程。这些结果通过酶的时间变幅来证实酶能够较灵敏地反映出胁迫环境下土壤生态系统的早期预警,但是酶与 PAHs 的相关关系还会受到土壤类型、污染物的种类和含量以及实验条件的影响^[14-16]。

植物修复污染土壤是一种公认的经济、实用绿色技术,植物在修复过程中,除了 PAHs 对土壤酶活性产生影响外,还会受到成活或死亡根系释放的有机物质的影响^[17],使得酶活性变得较为复杂。关于 PAHs 污染土壤植物修复过程中土壤酶活性变化的研究还比较少见^[18,19],而且明确植物与污染物对酶活性影响的研究就更不多见了。为准确表征植物和 PAHs 对酶活性的影响程度,本研究选用中国亚热带城市普遍采用的 4 个树种:樟树 (*Cinnamomum*

camphora)、广玉兰 (*Magnolia grandiflora*)、栎树 (*Koelreuteria bipinnata*) 和马褂木 (*Liriodendron chinense*),人工配制土壤 PAHs 污染的 3 个梯度水平 ($L1 < L2 < L3$),以过氧化氢酶、多酚氧化酶、磷酸酶为研究对象,比较分析污染土壤植物修复过程中土壤酶活性的差异和动态,探讨酶活性与 PAHs 和不同树种之间的关系,为丰富应用土壤酶作为土壤质量综合评价指标提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验依托于城市森林生态湖南省重点实验室。试验地设在湖南省长沙市中南林业科技大学城市生态站内(东经 112°48',北纬 28°03')。当地年平均气温 16.8 °C,最高气温 40.6 °C,最低气温 -12 °C,年平均降雨量 1400 mm。无霜期为 270—300 d,日照时数年均 1677.1 h,属典型的亚热带湿润季风气候。试验在面积为 22 m × 6 m 的不锈钢框架结构的温室内进行。

1.2 试验设计

试验土壤为湖南省株洲市夕阳红苗圃园土壤,土壤没有 PAHs 污染的历史。土壤自然风干,过 5 mm 筛,待用。供试土壤和加入污染物后土壤的基本性质见表 1。

试验采用南方城市常见的绿化树种樟树、栎树、广玉兰和马褂木,为一年生实生苗,来源于长沙黄兴镇苗木基地。

PAHs 用市售 0 号柴油代替。多环芳烃在柴油中比例为 18%—20%,国内外研究中也经常选择柴油模拟 PAHs 污染^[9,20-21]。将 0 号柴油按照比例与风干过筛的土壤混合,土油充分拌匀后,薄层平铺置

于露天环境,使得土壤充分吸附柴油,保证试验期间污染物含量的稳定性。48 h 后分装到圆形塑料盆($\Phi 40\text{cm} \times H25\text{cm}$)中,每盆装 12kg 污染土,装土前,

盆钵底部圆孔铺一层落叶,以防止浇灌时水分渗透造成水溶性 PAHs 流失。

表 1 土壤的基本情况

Table 1 General situation of the studied soil

处理 Treatment	pH	总有机碳/(g/kg) Total organic carbon	全氮/(g/kg) Total nitrogen	土壤含水量/% Water content
原土	5.01	12.65	1.18	33.2
L ₁	5.01	19.06	1.35	18.3
L ₂	4.98	23.36	1.29	16.7
L ₃	4.86	46.26	1.16	17.0

本研究设计 4 个处理:①L0:不加污染物,种植物;②L1:加 2g/kg 柴油,种植物;③L2:加 10g/kg 柴油,种植物;④L3:加 50g/kg 柴油,种植物;⑤CK:加污染物,不种植物,含 CK1(加 2g/kg 柴油),CK2(加 10g/kg 柴油)CK3(加 50g/kg 柴油)。除了对照(CK),每种处理下都分别种植 4 种苗木,每盆只种 1 株,每个处理每种苗木 3 次重复。试验总共 57 盆。

试验期间盆栽放置在温室中培育,随意摆放,每月将盆栽位置随机移动一次,尽量使每盆植物的微环境保持一致,室内温度因开窗对流基本与环境温度保持一致,平时用自来水浇灌,保持所有供试苗木盆内土壤田间持水量在 50%左右。试验于 2006 年 10 月开始进行,配制好的污染土壤装盆前取一次样(2006 年 10 月),随后种上植物,分别于 3 个月(2007 年 1 月)、6 个月(2007 年 4 月)、9 个月(2007 年 7 月)、12 个月(2007 年 10 月)对土壤采样。每次取样时距离树基部 5cm 处从土层表面直达盆底,其间避免根受伤,每次每盆取土样约 1kg。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤样品的制备

将盆中所取土壤充分混匀,风干后过 2mm 筛,用于酶活性的测定。

1.3.2 土壤指标测定

土壤酶活性:过氧化氢酶—高锰酸钾滴定法,过氧化氢酶活性以 20min 后 1g 土壤的 0.1N 高锰酸钾的毫升数表示(0.1N KMnO_4/g)。磷酸酶—磷酸苯二钠比色法,磷酸酶活性以 2h 后 100g 土壤中 P_2O_5 的毫克数表示($\text{mg P}_2\text{O}_5/100\text{g}$)。多酚氧化酶—邻苯三酚比色法,多酚氧化酶活性以 3h 后 100g 土壤中

紫色没食子素的毫克数表示^[22]。

土壤含水量用烘干法;土壤 pH 值用电位法测定(水浸);土壤有机质用重铬酸钾水合加热法;土壤全氮凯氏定氮法^[23]

1.4 数据处理

为定量动态描述 PAHs 的抑制作用,采用酶活性抑制率予以表征^[24],负值表示激活作用,正值表示抑制作用。计算公式如下:

$$\text{酶活性抑制率} = (1 - A/A_0) \times 100\%$$

式中,A 为 PAHs 污染土壤酶活性, A_0 为对照(CK)酶活性。

数据经 Excel 软件基础处理后,用 SPSS14.0 进行方差分析,用 Sigmaplot10.0 作图,用 CANOCO4.5 进行主成分分析。

2 结果

2.1 修复过程中土壤酶的时间动态变化

酶活性在植物修复 PAHs 污染土壤过程中的动态变化结果见图 1。过氧化氢酶、多酚氧化酶活性随着时间推移表现出逐渐升高后又下降的过程,磷酸酶活性随着时间推移表现出逐渐降低过程。与种植植物无污染处理(L0)相比,过氧化氢酶活性 3 个月 after 在 L1、L3 污染水平下均高于 L0,多酚氧化酶活性仅在 9 个月时在 L1、L2、L3 污染水平下高于 L0,磷酸酶活性 6 个月 after 在 L1、L2、L3 污染水平下均高于 L0,且种植植物无污染处理下过氧化氢酶和多酚氧化酶活性随时间推移变化幅度小。这说明污染物 PAHs 对土壤酶有激活作用。

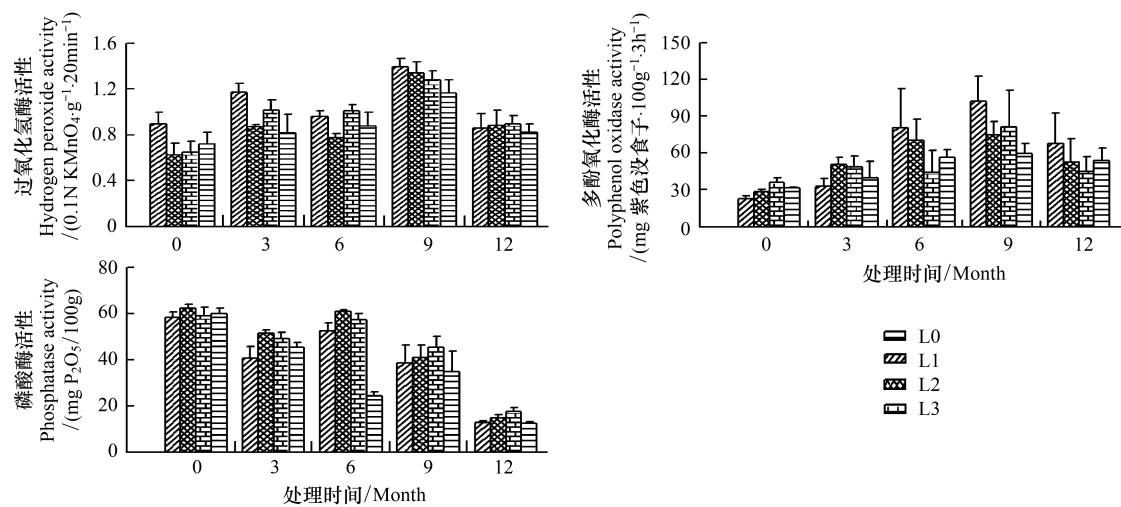


图1 植物修复 PAHs 污染土壤酶活性随时间变化

Fig.1 The change of enzymatic activities during phytoremediation of PAHs impacted soils over time

2.2 修复过程中土壤酶活性抑制率

为定量描述在 PAHs 污染下土壤酶活性的响应变化,我们将 3 个污染水平下的酶活性与无植物加污染物的土壤酶活性(CK)对比,如表 2 所示,过氧化氢酶活性定含量抑制率在-76.71%—13.19%之间,其中 3 个月 L3 水平下,抑制率最小(-76.71%),在污染土壤 3 个月 L2 水平下,抑制率最大(13.19%);多酚氧化酶活性定含量抑制率在-94.98%—16.29%之间,其中 6 个月 L3 水平下,抑

制率最小(-94.98%),在污染土壤 12 个月 L3 水平下,抑制率最大(16.29%);磷酸酶活性定含量抑制率在-49.62%—56.38%之间,其中 6 个月 L1 水平下,抑制率最小(-49.62%),在污染土壤 12 个月 L3 水平下,抑制率最大(56.38%)。过氧化氢酶活性在 L1 水平下始终表现出受到抑制,在 L2 和 L3 水平得到激活;多酚氧化酶在污染初期就开始得到激活,直到 12 个月 after 激活作用才消失;磷酸酶在污染初期活性均受到抑制,然后被激活,但随即又表现出抑制。

表 2 植物修复 PAHs 污染土壤酶活性抑制率比较

Table 2 The comparison of enzymatic activities inhibition rate during phytoremediation of PAHs impacted soils												
处理时间 (月) Treatment time (months)	过氧化氢酶活性抑制率/% Inhibition rate of hydrogen peroxide activity				多酚氧化酶活性抑制率/% Inhibition rate of polyphenol oxidase activity				磷酸酶活性抑制率/% Inhibition rate of phosphatase activity			
	CK	L1	L2	L3	CK	L1	L2	L3	CK	L1	L2	L3
3	0	10.36	13.19	-76.71	0	-70.1	-52.15	-24.07	0	33.67	17.09	22.94
6	0	11.75	-3.73	-50.34	0	-62.82	9.83	-94.98	0	-49.62	-21.34	-8.7
9	0	0.54	-10.03	-28.07	0	-78.71	-0.67	-26.59	0	-31.23	2.16	5.97
12	0	0.97	-53.04	-3.54	0	5.93	-1.96	16.29	0	0.53	29.69	56.38

同样地,为掌握种植不同植物土壤酶活性对 PAHs 污染响应,计算出同一树种不同污染水平的酶活性抑制率见表 3,栽培樟树和广玉兰的污染土壤中,过氧化氢酶和多酚氧化酶活性表现为激活,磷酸酶的活性为受到抑制;栽培栎树的污染土壤中,过氧化氢酶活性被激活,而多酚氧化酶和磷酸酶的活性在 L1 水平下激活,在 L2 和 L3 水平下均受到抑制;

栽培马褂木的污染土壤中,过氧化氢酶、多酚氧化酶和磷酸酶活性被激活受到抑制。可见,土壤酶活性对 PAHs 污染的响应受到不同树种的影响。

反过来看,过氧化氢酶和多酚氧化酶在 4 个树种的土壤中活性多表现为激活,磷酸酶活性多表现为抑制。

表 3 不同树种修复 PAHs 污染酶活性的抑制率

Table 3 The inhibition rate of enzymatic activities in PAHs impacted soils by different trees remediation

	污染水平 Contaminated levels	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	栎树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	马褂木 <i>Liriodendron chinense</i>
过氧化氢酶	L1	9.77	-20.06	0.92	6.30
Hydrogen peroxide	L2	-22.66	-44.59	-25.42	-6.35
	L3	-66.98	-52.05	-49.00	-28.83
多酚氧化酶	L1	-65.20	-34.38	-21.36	-82.21
Polyphenol oxidase	L2	-18.38	21.40	-43.48	-16.52
	L3	-33.03	9.69	-52.56	-23.17
磷酸酶 phosphatase	L1	18.24	-2.69	7.48	-19.67
	L2	5.43	4.35	12.24	-0.13
	L3	20.00	16.23	26.46	13.54

2.3 土壤酶与 PAHs 的关系

方差分析(表 4)表明,在 PAHs 不同污染水平间,过氧化氢酶活性差异性显著($P<0.05$),而多酚氧化酶和磷酸酶活性差异性不显著;在不同树种下,3

种酶活性差异性不显著;在不同时间下,3 种酶活性差异性显著($P<0.05$);3 种酶活性在不同树种×污染水平二因素作用下差异都不显著,同样,3 种酶活性在不同时期×污染水平二因素作用下差异也不显著。

表 4 植物修复 PAHs 污染土壤酶活性的方差分析

Table 4 Analysis of variance of enzymatic activities during phytoremediation of PAHs impacted soils

项目 Items	土壤酶 Enzyme	平方和 Sum of square	自由度 Variance	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
污染水平 Contaminated level	过氧化氢酶	1.627	29	0.048	3.558	0.043 *
	多酚氧化酶	13920.1	29	494.3	0.58	0.567
	磷酸酶	7868.402	29	274.053	0.856	0.436
树种 Different trees	过氧化氢酶	2.843	47	0.056	2.21	0.10
	多酚氧化酶	58473.47	47	1291.378	0.76	0.523
	磷酸酶	14047.47	47	309.933	0.441	0.725
时间 Different times	过氧化氢酶	0.761	14	0.013	12.27	0.001 *
	多酚氧化酶	7245.525	14	169.033	8.216	0.003 *
	磷酸酶	3940.786	14	14.376	66.031	0.00 *
不同树种×污染水平 Different trees× Contaminated level	过氧化氢酶	0.43	8	0.05	0.99	0.458
	多酚氧化酶	3660.4	8	457.5	0.39	0.923
	磷酸酶	401.1	8	50.1	0.14	0.996
不同时间×污染水平 Different time× Contaminated level	过氧化氢酶	0.12	8	0.015	0.29	0.956
	多酚氧化酶	2761.4	8	345.2	1.82	0.151
	磷酸酶	258.8	8	32.4	0.49	0.846

* 表示达到 0.05 显著水平 * $P<0.05$

2.4 主成分分析

为了更好地分析 PAHs 污染和树种与酶活性之间的复杂关系,对 3 种土壤酶活性进行了主成分分析。根据提取的主成分个数一般要求累计方差贡献率达到 85% 的原则^[25],共提取了 2 个主成分,累计贡献率达 94.19%。其中第 1 主成分(PC1)的方差贡献率为 87.61%,第 2 主成分(PC2)为 6.58%(图 2)。

结果表明,L1、L2、L3、L0 和 CK1、CK2 均分布在 PC1 轴上的正方向,但 L3 和 CK3 分布在 PC2 轴上的负方向。可见,PAHs 高浓度污染与低浓度污染对土壤酶活性的影响产生了差异,而且种植植物(L0)和无植物的对照(CK)对酶活性影响差异不大。

从土壤酶活性的点在影响因子箭头及其延长线的投影点可以表示看出,多酚氧化酶(Po)和磷酸酶

(Ph)活性受污染和树种影响较大,过氧化氢酶(Dy)活性受影响较小。

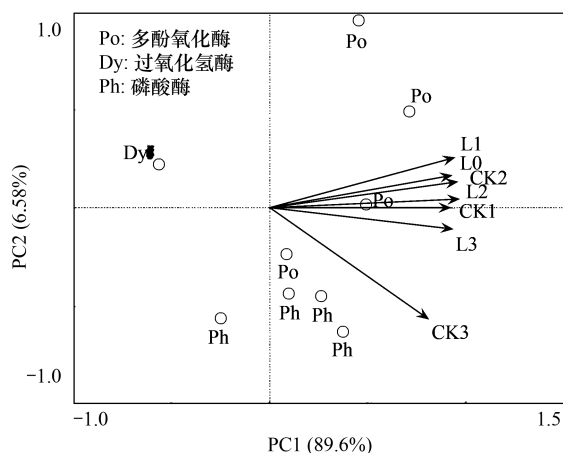


图2 植物修复 PAHs 污染土壤酶活性的主成分分析

Fig.2 Principal component analysis for enzymatic activities during phytoremediation of PAHs impacted soils

3 讨论

(1)土壤酶作为土壤的组成部分,在物质转化和污染土壤修复等过程中发挥着重要作用。过氧化氢酶是在生物呼吸和有机物的生物化学氧化反应过程中形成的,对土壤有机质分解和转化起着重要作用,同时它能促进 H_2O_2 分解,也常被用作 PAHs 引起的氧化胁迫生物标志物^[26];多酚氧化酶是一种诱导酶,催化土壤中酚类物质氧化生成醌,常作为土壤氧化势的表征^[16];磷酸酶属于水解酶,在土壤磷循环中起着催化作用,也常被用来评价土壤管理和土壤污染^[27]。土壤酶主要来源于土壤微生物,然而植物在生长过程中不断分泌无机离子和有机化合物,不仅能为土壤微生物生命活动提供能源使其聚集在根系周围,而且能够极大地改变“根-土壤”界面的物理化学环境^[28-29],导致酶数量和种类的改变;同时污染物进入到土壤中会引起土壤中各微生物种群活细胞数量及组成结构的变化,导致土壤中的微生物在生理代谢方面做出响应^[30],最终影响到土壤酶活性,因此土壤酶活性与微生物、植物和污染物三者都有关系,使得活性变化较为复杂。本研究发现,同为种植植物下 PAHs 污染和无污染 (L_0) 的对比(图1),可以看出 PAHs 对酶有激活作用;从不同污染水平角度分析(表2),发现3种酶活性均有不同程度的响应;方差分析和主成分分析均表明植物对酶活

性的影响小于污染产生的影响。综上所述,在植物修复过程中,土壤酶活性对污染反应更为敏感。

(2)污染土壤的修复过程是一个长期复杂的生态过程^[31],土壤从受损状态逐渐复原,必然伴随着一系列生物学指标的变化。本研究结果显示 PAHs 污染土壤经过植物修复1年结果表明磷酸酶和多酚氧化酶对土壤污染反映敏感,但修复6个月的结果表明过氧化氢酶和多酚氧化酶对土壤污染反映敏感^[21],马恒亮^[18]等研究认为在35天小麦/苜蓿套作期间,过氧化氢酶和多酚氧化酶的活性可以作为监测关键酶。因此多酚氧化酶可以作为修复过程中土壤环境质量的指示者,过氧化氢酶和磷酸酶可以分别在修复过程不同时间段来指示土壤质量^[32]。当然,只采用土壤酶活性作为评价土壤生态毒性的唯一指标还不全面,应结合其他生态毒性评价方法表征污染土壤健康状况^[33]。

4 结论

(1)树种修复 PAHs 污染土壤过程中,过氧化氢酶和多酚氧化酶活性表现出逐渐升高又下降的过程,磷酸酶活性表现逐渐降低过程。与种植植物无污染处理相比,表明污染物 PAHs 对土壤酶有激活作用,方差分析表明,过氧化氢酶活性在不同污染水平间差异显著,3种酶活性在不同时间下差异显著。

(2)土壤酶活性对 PAHs 污染的响应受到不同树种的影响,但受树种影响差异不显著。

(3)主成分分析表明,在植物修复过程中土壤酶活性对污染反应更为敏感。多酚氧化酶可以作为修复过程中土壤环境质量的指示者,过氧化氢酶和磷酸酶可以分别在修复过程不同时间段来指示土壤质量。

References:

- [1] Andreoni V, Cavalca L, Rao M A, Nocerino G, Bernasconi S, Dell'Amico E, Colombo M, Gianfreda L. Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils. *Chemosphere* 2004, 57(5):401-412.
- [2] Jing Y D, He Z L, Yang X E. Microbial and enzymatic effects of Hg stress in soil of rice-vegetable cabbage rotation system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3):144-147, 172.
- [3] Gianfreda L, Bollag J M. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. In: Stotzky G, Bollag J M, editors. *Soil Biochemistry*, vol. 9. New York: Marcel Dekker,

1996. 123- 94.
- [4] Nannipieri P, Kandeler E, Ruggiero P. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Burns RP, Dick RP, editors. *Enzymes in the Environment Activity, ecology and Applications*. New York: Marcel Dekker; 2002.1-33.
- [5] Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, An S S. Features of soil enzyme activity under different land uses in Ningnan Mountain area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3):67-70.
- [6] Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2):364-372.
- [7] Sardar A C, Muhammad I K, Shen C F, Tang X J, Muhammad F, Chen L, Zhang C K, Chen Y X. Degradation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by single and combined plants cultivation. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177 (3): 384-389
- [8] Chen L, Zhang C K, Chen Y X. Degradation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by single and combined plants cultivation. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177:384-389.
- [9] Zhang J, Zhang H W, Cong F, Zhang Q, Li X Y, Su Z C, Zhang C G. Effects of long-term PAHs-containing wastewater irrigation on low land rice soil enzyme activities and microbial populations. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1193-1198.
- [10] Wyszakowska Y, Kucharski J, Waldowska E. The influence of diesel oil contamination on soil enzymes activity. *ROSTLINNÁ VÝROBA*, 2002, 48(2):58-62.
- [11] Gunsalus I C, Pederson T C, S G Sligar. Oxygenase-catalyzed biological hydroxylations. *Annual Review of Biochemistry*, 1975, 44: 377- 407.
- [12] Verriest G J, Clément B, Volat B, Montuelle B, Perrodin Y. Interactions between a polycyclic aromatic hydrocarbon mixture and the microbial communities in a natural freshwater sediment. *Chemosphere*, 2002, 46(2): 187-196
- [13] Esposito E, Manfio G, Villas S, Antunes R E, Paulillo S M, Souza J A.. Microbiological strategies on remediation of contaminated soil with organochlorides. In: Esposito E ed. *Proceedings of the First National Meeting of Environmental Applied Microbiology Campinas, S. P. Brazil: CD-Rom Paper*. 1997, 1:80.
- [14] Kucharski J, Jastrzebska E, Wyszakowska J, Hlasko A. Effect of pollution with diesel oil and leaded petrol on enzymatic activity of the soil. *Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych*, 2000, 472: 457-464.
- [15] Baran S, Bielinska J E, Oleszczuk P. Enzymatic activity in an air field soil polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons. *Geoderma*, 2004, 118: 221-232.
- [16] Gianfreda L, Rao M A, Piotrowska A, Palumbob G, Colombob C. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Science of the Total Environment*, 2005, 341: 265-279.
- [17] Muratova A, Hübner Th, Tischer S, Turkovskaya O, Möderc M, Kuschke P. Plant-rhizosphere-microflora association during phytoremediation of PAH-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 2003, 5(2):137-151.
- [18] Ma H L, Zhan X H, Zhang X B, Zhou L X. Enzymatic activities of Phenanthrene contaminated soil in wheat and clover intercropping system. *Environmental Science*, 2009, 30 (12): 3684-3690.
- [19] Wang H J, Zhu N W, Yang C, Dang Z, Wu P X. Effect of soil enzyme activities during bioremediation of crude oil-contaminated. *Journal of Agro-Environment Science Soil*, 2013, 32 (6): 1178-1184.
- [20] Nielsen T, Jørgensen H E, Larsen J C, Poulsen M. City air pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons and other mutagens: occurrence, sources and health effects. *Science of the Total Environment*, 1996, 189/190:41-49.
- [21] Zhu F, Tian D L, Yan W D, Wang G J, Liang X C, Zheng W. The response of soil enzymatic activity to PAHs contamination for four urban afforestation species. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (9):4195-4202.
- [22] Guan S Y. *Soil enzyme and its study methods*. Beijing: China Agriculture Press, 1986. 309-327.
- [23] Liu G S. *Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles*. Beijing: Standards Press of China, 1996. 24-34.
- [24] He W X, Huang Y F, Zhu M M, Zhang Y P. Effect of Hg and Cd on soil urease activity. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (3): 412-420.
- [25] Hao L R, Fan Y, Hao Z O. *SPSS Practical Statistics Analysis*. Beijing: China Water Power Press, 2003.
- [26] Lionetto M G, Caricato R, Giordano M E. Integrated use of biomarkers (acetylcholinesterase and antioxidant enzymes activities) in *Mytilus galloprovincialis* and *Mullus barbatus* in an Italian coastal marine area. *Mar Pollut Bull*, 2003, 46:324-330.
- [27] Baran S, Bielinska J E, Oleszczuk P. Enzymatic activity in an airfield soil polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons. *Geoderma*, 2004, 118: 221-232.
- [28] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, Srivastava S C. Microbial biomass acts as a source of plan nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, 1989, 338: 499-500.
- [29] Liu Z Y, Li L M, Shi W M. *The research method of rhizosphere*, Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1997, 284.
- [30] Li H, Chen G X, Yang T, Zhang C G. Impacts of petroleum-containing wastewater irrigation on microbial population and enzyme activities in paddy soil of Shenfu irrigation area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (7): 1355-1359.
- [31] Song Y F, Song X Y, Zhang W, Zhou Q X, Sun T H. Issues concerned with the bioremediation of contaminated soils. *Environmental Science*, 2004, 25(2):129-133.

- [32] Margesin R, Walder G, Schinner F. The impact of hydrocarbon remediation (diesel oil and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) on enzyme activities and microbial properties of soil. *Acta Biotechnologica*, 2000, 20(3/4):313-333
- [33] Tang Y S, Wei C F, Yan T M, Yang L Z, Ci E. Biological indicator of soil quality: a review. *Soils*, 2007, 39(2): 157-163.

参考文献:

- [2] 荆延德, 何振立, 杨肖娥. 稻菜轮作制下汞胁迫的土壤微生物学和酶学效应. *水土保持学报*, 2009, 23(3):144-147, 172.
- [9] 张晶, 张惠文, 丛峰, 张勤, 李新宇, 苏振成, 张成刚. 长期灌溉含多环芳烃污水对稻田土壤酶活性与微生物种群数量的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(8): 1193-1198
- [18] 马恒亮, 占新华, 张晓斌, 周立祥. 小麦/苜蓿套作对非污染土壤酶活性的影响. *环境科学*, 2009, 30(12):3684-3690.
- [19] 王华金, 朱能武, 杨崇, 党志, 吴平霄. 石油污染土壤生物修复对土壤酶活性的影响. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6): 1178-1184.
- [21] 朱凡, 田大伦, 闫文德, 王光军, 梁小翠, 郑威. 四种绿化树种土壤酶活性对不同浓度多环芳烃的响应. *生态学报*, 2008, 28(9):4195-4202.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 中国农业出版社, 1986. 309-327.
- [23] 刘光崧. 土壤理化性质与剖面描述. 北京: 中国标准出版社. 1996.24-34.
- [24] 和文祥, 黄英锋, 朱铭莪, 张一平. 汞和镉对土壤脲酶活性的影响. *土壤学报*, 2002, 39(3): 412-420.
- [25] 郝黎仁, 樊元, 郝哲欧. SPSS 实用统计分析. 北京: 中国水利水电出版社, 2003, 284.
- [29] 刘芷宇, 李良谟, 施卫明. 根际研究法. 南京: 江苏科学与技术出版社, 1997, 220.
- [30] 李慧, 陈冠雄, 杨涛, 张成刚. 沈抚灌区含油污水灌溉对稻田土壤微生物种群及土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1355-1359.
- [31] 宋玉芳, 宋雪英, 张薇, 周启星, 孙铁珩. 污染土壤生物修复中存在问题的探讨. *环境科学*, 2004, 25(2):129-133.
- [33] 唐玉妹, 魏朝富, 颜廷梅, 杨林章, 慈恩. 土壤质量生物学指标研究进展. *土壤*, 2007, 39(2): 157-163.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.3 Feb., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research advances and prospects of post-disaster ecological restoration assessment LIU Xiaofu, WANG Wenjie, LI Jing, et al (527)
- The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting PANG Mingyue, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (537)

Autecology & Fundamentals

- An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer MA Lu, CAO Wenqing, ZHANG Wenjing, et al (546)
- Sexual size dimorphism and female individual fecundity of *Silurus asotus* and *Clarias fuscus* FAN Xiaoli, LIN Zhihua, DING Xianlong, et al (555)
- Effect of environmental temperature on thermogenesis and evaporative water loss in Chinese bulbuls (*Pycnonotus sinensis*) LIN Lin, CAO Mengting, HU Yilin, et al (564)
- Effects of irrigation on plant growth and nitrogen use characteristics of *Calligonum caput-medusae* Schrenk seedlings HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (572)
- Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil ZHU Fan, HONG Xiangqi, YAN Wende, et al (581)
- Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model WEI Xingping, PU Junbing, ZHAO Chunyong (589)
- Monitoring salt and water dynamics in farmland and drainage ditch in a saline environment under reduced drainage intensity PAN Yanxin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al (597)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population in the different altitude in degraded alpine grassland GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang, ZHUO MA Lancuo (605)
- Biotic stress of predators on population of alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Col.: Chrysomelidae) LIU Yufang, LI Fei, GUI Fangyan, et al (613)
- Characteristics of phytoplankton community in the northern South China Sea in summer and winter MA Wei, SUN Jun (621)
- The amount and dynamics of litterfall in the natural secondary forest in Mopan Mountain FAN Chunnan, GUO Zhongling, ZHENG Jinping, et al (633)
- Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al (642)
- The basic principle of random forest and its applications in ecology: a case study of *Pinus yunnanensis* ZHANG Lei, Wang Linlin, ZHANG Xudong, et al (650)
- Quantitative analysis of driving factors for wetland degradation based on hydrology balance HOU Peng, SHEN Wenming, WANG Qiao, et al (660)
- Stomatal and environmental control on evapotranspiration in a plantation in the lower mountain areas of North China HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (667)
- The fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in alpine grassland of the Tianshan Mountains, Xinjiang HE Guixiang, LI Kaihui, SONG Wei, et al (674)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: Partial Least-Squares Regression (PLS) MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al (682)
- Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone DONG Linlin, YANG Hao, YU Dongsheng, et al (690)
- Molecular mechanism on carbon dioxide assimilation of autotrophic microorganism and carbon translocation in agricultural soils WU Xiaohong, JIAN Yan, CHEN Xiaojuan, et al (701)

Resource and Industrial Ecology

- Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach SUN Yufeng, GUO Quanying (710)
- Assessing synthetic carrying capacity based on AD-AS model: a case study in Coastal Zone, Zhoushan SU Panpan, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (718)

Urban, Rural and Social Ecology

- Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (727)

Research Notes

- Spatial-temporal variability of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in different ecological regions of Shaanxi LIANG Ting, TONG Yan'an, LIN Wen, et al (738)
- The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area LIU Xiaoyong, LI Hongxun, LI Jianming, et al (746)
- Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China WANG Zhenhai, YIN Xiuqin, JIANG Yunfeng (755)
- Modeling the total allowable area for coastal reclamation: a case study of Xiamen, China LIN Chenchen, RAO Huanhuan, LIU Yan, et al (766)

《生态学报》2014 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,280 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

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 34 卷 第 3 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 3 (February, 2014)

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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元