

典型血吸虫病疫区河滩地五氯酚污染土壤微生物特征 ——以松滋老陈镇庙河为例

姚 斌¹, 周玲莉^{1,2}, 韦秀文^{1,2}, 刘 方², 尚 鹤¹, 谷雪景³

(1.中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2.贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550003; 3.中国环境科学研究院环境标准研究所, 北京 100012)

摘 要:采用现场采样及室内分析方法,对长期施用五氯酚(PCP)作为钉螺杀灭剂的典型血吸虫病流行疫区河滩地的土壤微生物特征进行了初步调查研究。结果表明,长期大量施用 PCP 对河滩裸地土壤微生物种群造成了一定程度的伤害,降低了微生物的总体活性;而种植杨树有利于恢复土壤微生物生物量碳,对修复 PCP 污染土壤有一定的促进作用。Biolog 结果显示土壤微生物利用单一碳源能力的大小顺序为杨树林地>对照>河滩裸地,表明有机污染在一定程度上抑制了土壤微生物的生长。主成分分析显示对照、杨树林与河滩裸地的碳源利用能力差异显著,表明 PCP 污染对微生物的碳源利用造成了显著影响。土壤微生物对不同种类碳源利用计算结果表明,种植杨树导致林地土壤环境条件发生变化,杨树林地土壤微生物对碳源的利用也发生了明显变化。

关键词:五氯酚;杨树;微生物;血吸虫病;Biolog

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1509-06

Investigation on Microbes Characteristics of Soil Contaminated by PCP in Flood Land of Typical Snail Fever Region——A Case Study on Miao-He

YAO Bin¹, ZHOU Ling-li^{1,2}, WEI Xiu-wen^{1,2}, LIU Fang², SHANG He², GU Xue-jing³

(1.Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2.College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 3.Environmental Standards Institute of State Environmental Protection Administration, CRAES, Beijing 100012, China)

Abstract: Microbial biological character of soils contaminated by Pentachlorophenol (PCP) were investigated on Miao-He in Songzi City of Hubei Province, where PCP was wildly used to control the snail for a long time. Results showed that PCP contamination led to the microbial biomass carbon reducing in Open ground, while poplar could be benefit to recover the microbial biomass carbon of soil microbe. Values of average well color development (AWCD) of soil micro-organisms in different tested samples were Poplar forest land > Control land > Open ground. These results indicated that organic pollution depressed the growth of soil microbe. The principal component analysis indicated that the utilizing ability of carbon source of CK and poplar land existed marked variation with open ground. These results also showed that PCP pollution have significant influence for the utilizing ability of carbon source of tested soils. Meanwhile, the calculation results of different carbon course showed that planting poplar could change the soil environment and the utilizing ability of carbon source.

Keywords: pentachlorophenol; poplar; microbe; snail fever; Biolog

我国是世界上血吸虫病流行最为严重的国家,目前严重流行区主要位于长江中下游江滩及其湖泊(洞庭湖、鄱阳湖等)周围。为了杀灭传播血吸虫病的最主

要的中间寄主钉螺,切断其传播途径,广大的血吸虫病流行疫区曾长期大量使用五氯酚及其钠盐作为钉螺杀灭剂。此举造成了疫区水体和土壤五氯酚的严重污染,破坏了该地区的自然生态平衡^[1-2]。我国政府和相关部门对血吸虫病的防治和疫区生态环境建设高度重视,随着“兴林抑螺”防治体系的建立及“林业血防工程”在疫区的顺利实施,血吸虫病流行疫区的生态环境得到极大的改善,血吸虫病的流行和扩散

收稿日期:2010-02-05

基金项目:中央公益型科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFRIF200706);国家自然科学基金(30700637)

作者简介:姚 斌(1973—),男,贵州贵阳人,博士,副研究员,主要从事污染生态修复及生态监测研究。

E-mail:acmn21@yahoo.com.cn

得到了很好的控制^[1-2]。上述以黑杨派南方型无性系杨树为主栽品种的控制措施的研究工作主要涉及疫区血吸虫病的生物学^[1]、抑螺防病林的指导思想和设计原则^[1]、造林技术^[3]、造林树种^[4]、抑螺防病林的灭螺机理^[5-6]、造林树种病虫害防治^[1]及光合生理^[7-8]等,对疫区五氯酚污染土壤微生物的研究则涉及甚少。土壤中的微生物以其丰富的生物多样性使它们成为生态系统中最活跃和具有决定性影响的组分之一,土壤微生物多样性指标与生态系统抵御外界干扰的能力密切相关。从有机污染物-植物-土壤微生物之间的关系,研究污染区土壤微生物功能多样性,将为土壤微生物在退化生态系统恢复中提高植物促生抗逆作用机制提供依据,充分发挥土壤微生物在“兴林抑螺”生态工程中植被恢复中的作用。

湖北省松滋市老陈镇庙河沿岸是国家级血吸虫病监测点。根据当地卫生防疫部门提供的资料,庙河多年来都是血吸虫病的高发区,沿河两岸长期大量施用五氯酚杀灭钉螺来控制疫情发展,目前血吸虫病发病率已经逐年降低。但是由于五氯酚的高残留性,其已对庙河沿岸土壤和水体造成了严重污染。鉴于此,我们对典型血吸虫病疫区湖北省松滋市老陈镇庙河下游木马口村受五氯酚污染的河滩地进行土壤调查取样,开展五氯酚污染土壤的微生物特征调查研究,以期从微生物的角度为更好地进行五氯酚污染土壤的杨树树木修复提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 研究地区自然概况

五氯酚污染河滩地位于湖北省松滋市境内老陈镇庙河下游木马口村,北纬 29°53',东经 111°14',属于平原湖泊区,海拔在 50 m 以下,平展宽广,河渠纵横,间有湖泊。松滋地处亚热带过渡性季风气候区内,四季气候分明:春季冷暖多变,雨量递增;夏季炎热潮湿,雨量不均;冬季较长。市域多年平均气温 14~16.9℃,最高气温为 39.5℃,最低气温为-10.9℃。多年平均日照时数为 1 600~1 900 h,年太阳总辐射量为 418~444.8 kJ·cm⁻²。全年无霜期为 260 d,年降水量为 1 050~1 300 mm。相对湿度在 74%~83%之间,年均湿度为 78%。主导风向为北风和东北风,冬春多寒潮和西北风,夏季盛行偏南风(即梅雨季节南洋风),时有东南风。历年平均风速为 2.4 m·s⁻¹。

1.2 土壤样品的采集

据当地卫生防疫部门资料,为杀灭钉螺,该处河

滩于 20 世纪 90 年代以前曾长期施用五氯酚及其钠盐,近年来响应“兴林抑螺”的号召,部分河滩地开始种植杨树。2009 年 4 月我们根据河滩地植被的生长情况在该河滩进行了调查取样,选 3 个取样点,分别为河滩裸地、河滩杨树林林地(杨树树龄 5 a)及距离河岸 70 m 的荒地(对照)。每个取样点按 S 型路线采集混合土样带回室内,采样深度为 0~20 cm,调查点的土壤取回用于土壤微生物特征分析。土样装入无菌封口塑料袋内,带回实验室。将一部分新鲜土样研磨过 1 mm 尼龙网筛,调节土壤水分至适宜含水量,装入无菌塑料袋,置于 4℃冰箱内保存以供土壤微生物分析。另一部分土样于室内自然风干,研磨、过筛,供土壤基本理化性质及土壤 PCP 残留测定。采样点混合土壤样品的基本理化性质:pH 值 8.01(土:H₂O=2.5),全氮 1.13 g·kg⁻¹,全磷 0.63 g·kg⁻¹,全钾 25.02 g·kg⁻¹,碱解氮 71.0 mg·kg⁻¹,有效磷 1.7 mg·kg⁻¹,速效钾 72.0 mg·kg⁻¹,CEC 12.06 cmol·kg⁻¹,物理性粘粒(<0.01 mm)45.14%。3 个取样点土壤 PCP 残留(高效液相色谱法测定)见表 1。检测结果表明,长期施用造成了土壤环境五氯酚污染。

表 1 河滩地不同取样点土壤 PCP 残留测定结果

Table 1 Results of PCP residues of different tested samples

取样点	对照	杨树林	河滩裸地
残留量/mg·kg ⁻¹	未检出	0.20±0.008	0.23±0.009

1.3 样品分析

1.3.1 土壤微生物生物量碳氮的测定

采用氯仿熏蒸-仪器分析法测定土壤微生物生物量碳^[10]。新鲜土样(相当于干重 10 g)氯仿熏蒸,以 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 提取,每个处理重复 3 次。利用德国 Elementar 公司 Liquic TOC 总有机碳总氮分析仪测定提取液中的有机碳含量。

$$\text{计算公式: } B_c(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = E_c / 0.45 \quad (1)$$

式中 E_c 为熏蒸和未熏蒸土壤的差值。

微生物量氮采用氯仿熏蒸,0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 浸提-紫外分光光度计比色法测定,每个处理重复 3 次。

$$\text{计算公式: } B_N(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = E_N / 0.54 \quad (2)$$

式中 E_N 为熏蒸和未熏蒸土壤的差值^[10]。

1.3.2 Biolog 分析

土壤微生物碳源利用测试采用常规的 Biolog 方法,每个样品测试 31 种碳源(Biolog ECO 盘,不包括空白)。准确称取相当于 10.0 g 干质量(按含水量换算)的新鲜土样,加入装有 90 mL 无菌水的三角瓶中,

封口后在摇床上振荡($200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)30 min,按照 10 倍稀释法稀释到 10^{-3} 后,接种悬浮液于 ECO 微孔板中,每孔 $150\text{ }\mu\text{L}$,每样 1 板即每样重复 3 次,置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 暗箱连续培养 168 h,培养期间每隔 24 h 在 BIOLOG ELX808 (Hayward, CA, USA) 自动读盘机上利用 Microlog3.4.2 软件在 590 nm 波长下读取吸光值^[11-12],计算每 24 h 的平均每孔颜色变化率(average well color development, $AWCD$)。

$$\text{计算公式: } AWCD \text{ 值} = [\sum (C-R)]/31 \quad (3)$$

式中: C 为测得 31 个反应孔的吸光值; R 为对照孔的吸光值。

选取 96 h 的吸光值进行主成分分析和碳源分类。数据结果利用 SPSS(V13.0)及 DPS 统计软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 河滩地不同取样点土壤微生物量

在土壤生态系统中,微生物生物量作为有机质降解和转化的动力,是重要的植物养分储备库,对植物养分转化、有机碳代谢和污染物的降解具有十分重要的作用^[13]。土壤微生物量碳是土壤有机碳的灵敏指示因子,它是反映土壤质量和土壤微生物整体活性的理想指标^[14-15]。微生物生物量氮可以反映微生物的活性及微生物利用氮源的能力。河滩地不同取样点土壤微生物生物量的测定结果见表 2。结果显示,五氯酚污染对不同取样点的土壤微生物量产生显著影响,与对照相比,河滩裸地土壤微生物生物量碳、氮显著降低,降幅分别为 21.03% 和 21.68%;种植杨树后的河滩地土壤微生物量有所恢复,土壤微生物量碳为对照的 100.2%,微生物量氮为对照的 83.75%。由此可见,种植杨树对土壤微生物生物量碳的恢复有一定的促进作用。

表 2 河滩地不同取样点土壤微生物生物量测定结果

Table 2 Results of soil microbial biomass of different tested samples in flood land

取样点	土壤微生物量碳/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤微生物量氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤微生物量 C/N 比
对照	$207.8\pm 19.89\text{a}$	$19.14\pm 2.58\text{a}$	10.86a
杨树林	$208.2\pm 3.02\text{a}$	$16.03\pm 2.16\text{a}$	12.99a
河滩裸地	$164.1\pm 15.24\text{b}$	$14.99\pm 2.02\text{a}$	10.95a

已有研究表明,土壤微生物生物量随除草剂施用量的增加而降低,尤其是高浓度的除草剂会显著降低微生物的活性^[16-17]。本文的分析测试结果也与以

前室内培养试验的研究结果相似^[18]。据此推断,可能因为长时间施用的五氯酚及五氯酚钠等钉螺杀灭剂进入土壤后对土壤微生物数量和种群造成一定程度的影响,降低了微生物的总体活性,从而导致微生物生物量碳的测定结果出现明显差异,具体作用机理有待以后深入研究。不同取样点土壤微生物量的 C/N 比排序为杨树林>河滩地及对照。可能的原因为河滩地种植杨树后,杨树根系分泌物等的共同作用使土壤微生物的群落结构发生了变化,从而导致其微生物生物量 C/N 比增加。Khan 和 Huang 认为重金属污染土壤中微生物生物量 C/N 比的增加是由于土壤微生物群落结构发生了改变^[19]。

2.2 Biolog 结果分析

2.2.1 碳源平均颜色变化率

Biolog 法能快速简便分析微生物对碳源的利用能力^[18,20],平均每孔颜色变化率值($AWCD$)的变化反映了土壤微生物群落的反应速度和最终到达的程度,可以用来评判土壤微生物群落的碳源利用能力,反映土壤微生物活性,是描述土壤微生物群落利用碳源功能多样性的一个重要指标^[21]。

河滩地不同取样点土壤微生物的 $AWCD$ 变化见图 1。如图 1 所示,微生物活性均随培养时间的延长而提高,不同采样地点土壤微生物利用单一碳源能力的大小顺序为杨树林>对照>河滩地。方差分析显示河滩裸地与对照和杨树林的 $AWCD$ 值差异显著($P<0.05$)。受 PCP 污染的河滩裸地在整个培养期间土壤的 $AWCD$ 值始终小于对照,这与能够表征微生物整体活性的微生物生物量碳的测定结果具有类似的规律。测定结果表明,有机污染在一定程度上抑制了土壤微生物的生长。

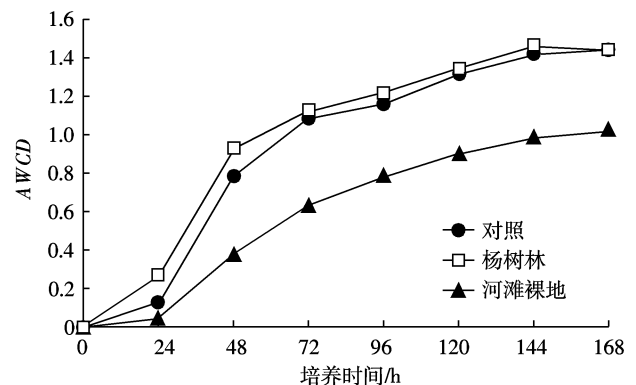


图 1 河滩地不同取样点土壤微生物的 $AWCD$ 值变化

Figure 1 Soil Microbial $AWCD$ variety of different tested samples in flood land

整个培养期间内, 杨树林地土壤的 $AWCD$ 值始终大于对照处理, 表明种植杨树在一定程度上缓解了 PCP 污染, 增强了土壤微生物的整体活性, 进而导致其对碳源利用程度的增加。导致此现象发生的可能因为杨树根系分泌物及其根系环境的改善在一定程度上恢复了土壤微生物种群及数量, 具体的作用机理留待以后深入研究。有研究表明, 根系分泌物是植物根系影响土壤微生物种群的主要因素^[22], 植物能够通过根系向周围环境释放有机分泌物, 如糖类、磷酸和蛋白质等^[23], 这些分泌物是土壤微生物的重要碳源和能源, 因此从理论上讲植物根系的一些变化会引起土壤微生物尤其是根际微生物发生变化。已有研究表明, 具有发达根系的植物能够促进根系微生物菌群对除草剂、杀虫剂等有机污染物的吸附和降解^[24-25]。杨树具有生物量大、生长迅速、根系发达等优势, 是较为理想的有机污染树木修复材料^[26-28]。研究表明, 杨树对多种有机污染物具有修复作用, 可以通过降解、吸收、蒸腾等方式迁移、转化多种有机污染物, 降低环境中污染物的残留, 进而在一定程度上修复受有机物污染的环境^[26-29], 减轻其对土壤微生物的毒害。

2.2.2 土壤微生物碳源利用的主成分分析

利用主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 研究土壤微生物对不同碳源利用能力的差异, 有助于更全面地了解微生物群落代谢功能特性^[12]。

本研究采用 3 个取样点培养 96 h 的 31 种碳源吸光值降维后进行主成分分析, 为方便解析, 在此仅重点讨论 PCA1 和 PCA2 信息反映的结果, 如图 2 所示。对照、杨树林和河滩裸地 3 处不同五氯酚污染程

度取样点的土壤微生物群落有明显的分异, PCA1 和 PCA2 分别占有所有变量方差的 33.54% 和 27.92%, 第一主成分是变异的主要来源。PCA1 轴上, 河滩裸地与杨树林和对照的得分值都可以完全区分, 对不同取样点的 PCA1 得分系数进行方差分析可知, 对照、杨树林与河滩裸地的差异显著 ($P < 0.05$), 这表明在 PCP 污染胁迫下土壤微生物的碳源利用有明显差异。可能的因为杨树根际产生的根际分泌物, 为微生物代谢提供了碳源氮源等营养物质, 增强了根际土壤微域内特定微生物群落的生理代谢活性, 从而使杨树林与河滩裸地土壤微生物的碳源利用形成了鲜明对比。

2.2.3 土壤微生物对不同种类碳源的利用

Biolog-ECO 盘含有 31 种碳源, 根据碳源官能团可分为 6 大类: 糖类 (carbohydrates) 7 种、羧酸类 (carboxylic acids) 9 种、氨基酸类 (amino acids) 6 种、胺类 (amines) 2 种、聚合物类 (polymers) 4 种、双亲化合物 (miscellaneous) 3 种, 以研究不同取样点土壤微生物群落的差异, 根据光密度值来判断微生物对碳源的利用程度^[20, 30]。为更好地探明不同取样点土壤微生物对 Biolog 微平板上不同碳源的利用程度, 对不同取样点土壤 Biolog 微平板 96 h 的反应数据进行了碳源分类计算, 结果见图 3。

由图 3 可见, 不同取样点土壤微生物对不同类型碳源的利用程度差异非常显著。读数结果显示, 除聚合物利用程度差异不大以外, 不同取样点土壤微生物对糖类、羧酸类、氨基酸类、胺类及双亲化合物 5 类培养基的利用强度差异较大。在这 5 类碳源中杨树林和河滩裸地土壤对羧酸类、氨基酸类及双亲化合物 3 类碳源的利用强度差异达到显著水平。由此可以初步推断种植杨树后随着土壤微环境的改变, 杨树林地土壤微生物对碳源的利用也发生明显变化。

3 结论

(1) 长期施用五氯酚及其钠盐后土壤微生物活性受到一定程度的抑制。

(2) 土壤微生物量碳、氮及 Biolog 分析测定结果表明种植杨树有利于恢复土壤微生物的种群及微生物数量, 而河滩裸地的土壤微生物活性受到一定程度的抑制。

(3) 土壤微生物对不同种类碳源利用计算结果表明, 种植杨树导致林地土壤环境条件发生变化, 杨树

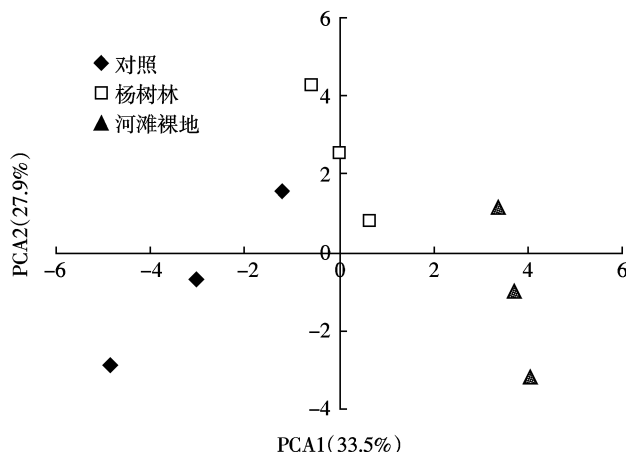


图 2 河滩地土壤微生物碳源利用的主成分分析

Figure 2 Principal components analysis of soil microbial carbon utilization profiles in flood land

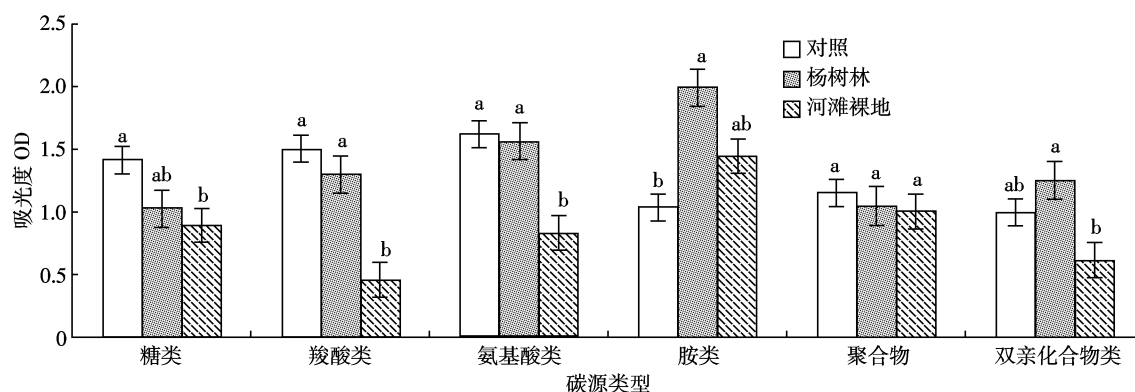


图3 河滩地不同取样点土壤微生物利用六大碳源的AWCD值

Figure 3 AWCOD for different carbon sources utilized by microbe of different tested samples in flood land

林地土壤微生物对碳源的利用也发生明显变化。

参考文献:

- [1] 彭镇华, 江泽慧. 中国新林种: 抑螺防病林研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997: 11-28.
PENG Zhen-hua, JIANG Ze-hui. China's new type of forest studies on the snails control and schistosomiasis prevention forest[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1997: 11-28.
- [2] 彭镇华. 中国林业血防生态工程建设[J]. 湿地科学与管理, 2006, 2(4): 4-7.
PENG Zhen-hua. Schistosomiasis prevention through forestry ecological programs in China[J]. *Wetland Science & Management*, 2006, 2(4): 4-7.
- [3] 彭镇华. 滩地抑螺防病林的营造技术[J]. 湿地科学与管理, 2006, 2(1): 20-23.
PENG Zhen-hua. Techniques in afforestation in the beaches of Yangtze River for snail (*Oncomelania hupensis*) control and schistosomiasis prevention[J]. *Wetland Science & Management*, 2006, 2(1): 20-23.
- [4] 孙启祥, 彭镇华, 康忠铭, 等. 滩地立地条件造林树种选择研究[J]. 安徽农业大学学报, 1998, 25(1): 18-22.
SUN Qi-xiang, PENG Zhen-hua, KANG Zhong-ming, et al. Study on selection of afforestation species on beach lands[J]. *Journal Anhui Agricultural University*, 1998, 25(1): 18-22.
- [5] 彭旦明, 马 珠, 姚 喻. 枫杨、乌桕灭螺研究[J]. 安徽农业大学学报, 1992(S1): 55-63.
- [6] 刘国华, 蒋俊明, 黄纯兰. 滩地人工林营林措施对钉螺种群的影响[J]. 湿地科学与管理, 2008, 4(2): 8-11.
LIU Guo-hua, JIANG Jun-ming, HUANG Chun-lan. Influences of afforestation on population of *oncomelania hupensis* in the beach [J]. *Wetland Science & Management*, 2008, 4(2): 8-11.
- [7] 高 健, 吴泽民, 彭镇华. 滩地杨树光合作用生理生态研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(2): 147-152.
GAO Jian, WU Ze-min, PENG Zhen-hua. A study on the ecophysiological characteristic of photosynthesis for Poplar tree on beach land along the Yangtze River[J]. *Forest Research*, 2000, 13(2): 147-152.
- [8] 刘广路, 范少辉, 张 群, 等. 长江滩地 I-72 杨人工林生长特性研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 243-247.
LIU Guang-lu, FAN Shao-hui, ZHANG Qun, et al. Research on the growth characteristics for *Populus×euramiricana* cv. 'San Martino' (I-72/58) on beach land of Yangtze River[J]. *Forest Research*, 2008, 21(2): 243-247.
- [9] <http://www.hbsz.gov.cn>
- [10] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure[J]. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [11] 杨永华, 姚 健, 华晓梅. 农药污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 微生物学杂志, 2000, 20(3): 23-27.
YANG Yong-hua, YAO Jian, HUA Xiao-mei. Effect of pesticide pollution against functional microbial diversity in soil[J]. *Journal of Microbiology*, 2000, 20(3): 23-27.
- [12] Garland J L. Patterns of potential C source utilization by rhizosphere communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 223-230.
- [13] Henrot J. Vegetation removal in two soils of the humid tropics: Effect in microbial biomass[J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, 26: 111-116.
- [14] Bradley L, Fyles J W. A kinetic parameter describing soil available carbon and its relationship to rate increase in C mineralization [J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, 22(2): 167-172.
- [15] 徐秋芳, 姜培坤, 邬奇峰, 等. 集约经营板栗林土壤微生物生物量碳与微生物多样性研究[J]. 林业科学, 2007, 43(3): 15-19.
XU Qiu-fang, JIANG Pei-kun, WU Qi-feng, et al. Effects of intensive management on soil microbial biomass and functional diversity in *Castanea mollissima* Stands[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(3): 15-19.
- [16] Fredrickson D R, Shea P J. Effect of soil pH on degradation, movement, and plant uptake of chlorsulfuron[J]. *Weed Science*, 1986, 34: 328-332.
- [17] Wardle D A, Parkinson D. Influence of the herbicides 2, 4-D and glyphosate on soil microbial biomass and activity: A field experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(2): 185-186.
- [18] 姚 斌, 汪海珍, 徐建明, 等. 除草剂对水稻土壤微生物的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2): 349-354.
YAO Bin, WANG Hai-zhen, XU Jian-ming, et al. Effects of herbicides on soil microorganisms in a paddy soil [J]. *Acta Scientiae Circum-*

- statae*, 2004, 24(2):349–354.
- [19] Khan K S, Huang C Y. Effect of lead–zinc interaction size of microbial biomass in red soil[J]. *Pedosphere*, 1998, 8: 143–148.
- [20] Preston–Mafham J, Boddy L, Randerson P F. Analysis of microbial community functional diversity using sole–carbon–source utilization profile—a critique[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, 42: 1–14.
- [21] 申卫收, 林先贵, 张华勇. 不同施肥处理下蔬菜塑料大棚土壤微生物活性及功能多样性[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2682–2689.
- SHEN Wei–shou, LIN Xian–gui, ZHANG Hua–yong. Microbial activity and function diversity in soils used for the commercial production of cucumbers and tomatoes in polytunnel greenhouse, under different fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2682–2689.
- [22] 罗 虹, 刘 鹏, 李丽仙. 铝胁迫对大豆根际土壤微生物区系的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(5): 735–738.
- LUO Hong, LIU Peng, LI Li–xian. Effects of aluminium stress on the microflora in soybean rhizosphere soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(5): 735–738.
- [23] Shanks V, Morgan J. Plant ‘hairyroot’ culture[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1999, 10: 151–155.
- [24] Anderson T A. Bioremediation in the rhizosphere[J]. *Environ Sci Technol*, 1993, 27(2): 2630–2635.
- [25] Scheffer F, Schachtschabel P. *Lehrbuch der Bodenkunde* (13 Aufl.) [J]. *Ferdinand Enke Verlag Stuttgart Germany*, 1992, 10: 151–155.
- [26] Schnoor J L, Licht L A, McCutcheon S C, et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(7): 318–323.
- [27] Soon–Woong Chang, Si–Jin Lee, Chung–Hwan Je. Phytoremediation of atrazine by poplar trees: Toxicity, uptake, and transformation[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2005, 40(6): 801–811.
- [28] Strycharz S, Newman L. Use of native plants for remediation of trichloroethylene: I. Deciduous trees[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11(2): 150–170.
- [29] Tamas Komives, Gabor Gullner, Heinz Rennenberg, et al. Ability of poplar (*Populus* spp.) to detoxify chloroacetanilide herbicide[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2005, 3(3): 277–283.
- [30] 金 剑, 王光华, 陈雪丽, 等. Biolog–ECO 解析不同大豆基因型 R1 期根际微生物群落功能多样性特征[J]. *大豆科学*, 2007, 26(4): 555–561.
- JIN Jian, WANG Guang–hua, CHEN Xue–li, et al. Analysis of microbial community functional diversity in rhizosphere of different soybean genotypes at R1 stage using Biolog–ECO method[J]. *Soybean Science*, 2007, 26(4): 555–562.