

# 红壤丘陵区人工林恢复措施对土壤酶活性和微生物学性质的影响<sup>①</sup>

赵汝东<sup>1,2</sup>, 樊剑波<sup>1</sup>, 何园球<sup>1\*</sup>, 宋春丽<sup>1,2</sup>, 屠人凤<sup>1,2</sup>, 谭炳昌<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 我国红壤丘陵区水土流失较严重。本文研究人工林对土壤(0~20和20~40 cm)酶活性和微生物学性质的短期(13~14年)影响。土壤转化酶、脲酶、多酚氧化酶活性在次生天然林和湿地松樟树混交林中高于其他林分。次生天然林和湿地松樟树混交林土壤微生物生物量和土壤呼吸值较大、有机碳活性较强、土壤微生物基质利用效率较高。因此, 短期影响下, 湿地松樟树混交林较之针叶纯林和针叶混交林可改善土壤生化强度和微生物活性。

**关键词:** 人工林; 土壤酶活性; 基础呼吸; 微生物生物量

**中图分类号:** S154.1

土壤酶、微生物生物量和土壤呼吸在土壤质量表征中具有重要的作用<sup>[1-3]</sup>。土壤微生物生物量与酶活性关系密切, 对环境响应敏感<sup>[4]</sup>; 土壤呼吸反映了有机质代谢强度和土壤微生物活性<sup>[5]</sup>。因此, 越来越多的学者采用土壤酶活性及微生物学性质研究植被生长或物种演替对土壤的影响<sup>[6-7]</sup>。红壤丘陵区是我国侵蚀较严重地区之一, 前人围绕植被恢复开展了广泛的研究<sup>[8-11]</sup>; 并针对典型针叶树种湿地松(*Pinus elliottii*)和马尾松(*P. massoniana*)做了较多工作<sup>[9, 12]</sup>。不同林分混交可缓解单一林分长期种植对土壤的危害, 但这取决于树种及林分组成<sup>[13]</sup>。樟树(*Cinnamomum camphora*)是我国亚热带代表性常绿阔叶树种; 有报道指出樟树可在一定程度上提高土壤微生物活性<sup>[14]</sup>。红砂岩发育的红壤在我国红壤丘陵区有较广泛的分布, 具有抗蚀性能差、保肥能力弱的特点<sup>[15]</sup>。本文针对该区红砂岩区域, 研究几种典型人工林类型对土壤酶活性及微生物学性质的影响, 以期对该区人工林管理及生态恢复起指导作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江西省鹰潭市刘家站五分场(28°15'N,

116°55'E), 土壤为红砂岩发育的红壤。地形以岗地为主, 海拔为35~60 m, 坡度为5°~8°, 属中亚热带湿润季风气候区, 年均降水量1794 mm, 主要集中在4—6月, 年均温17.6℃, ≥10℃积温为5528℃, 无霜期262天。

### 1.2 研究方法

调查采样时间为2009年3月上旬。调查选取环境特征一致的人工林设置试验处理, 各林型样地环境及林分特征如表1所示。其中, 次生天然林为对照, 主要由木荷(*Schima superba*)、五角槭(*Acer elegantulum*)和马尾松组成。研究样地在人工林栽种前均为荒草地, 无农业措施等人为扰动。人工林样地林下植被稀疏, 主要为芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)和白茅草(*Imperata cylindrica*)。各林分处理分设3个独立林分样地作为重复, 且样地面积>1 hm<sup>2</sup>; 样地远离人口聚居区, 期间疏伐抚育1次, 除此外人为干扰轻微。各重复样地内随机分设3个10 m×10 m的样方且样方间距>10 m, 每个样方内随机采取5点组成混合土样, 分装于保鲜袋。部分样品置于冰箱(4℃)冷藏保存, 其他部分自然风干、过筛后备用。各林分处理土壤基本化学性质如表2所示。

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-438-1)、国家自然科学基金面上项目(30971869)和国家科技支撑计划课题项目(2009BAD6B04)资助。

\* 通讯作者(yqhe@issas.ac.cn)

作者简介: 赵汝东(1982—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 主要从事生态恢复研究。E-mail: zhrd255@gmail.com

表 1 各林分样地及林分特征描述

Table 1 Description of study sites and stand characteristics

| 林分处理             | 坡度       | 坡向               | 林龄 (a) | 林分密度 (株/hm <sup>2</sup> ) |
|------------------|----------|------------------|--------|---------------------------|
| 湿地松纯林 (PE)       | 5° ~ 10° | N20°W ~ N30°W 阳坡 | 14     | 1 500 ~ 1 800             |
| 湿地松马尾松混交林 (PEPM) | 5° ~ 10° | N20°W ~ N30°W 阳坡 | 13     | 1 500 ~ 1 800             |
| 湿地松樟树混交林 (PECC)  | 5° ~ 10° | N20°W ~ N30°W 阳坡 | 13     | 1 500 ~ 1 800             |
| 次生天然林 (NF)       | 5° ~ 10° | N20°W ~ N30°W 阳坡 | >50    | 1 500 ~ 1 800             |
| 马尾松纯林 (PM)       | 5° ~ 10° | N20°W ~ N30°W 阳坡 | 14     | 1 500 ~ 1 800             |

表 2 各林分处理土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties under different stand treatments

| 土层<br>(cm) | 林分处理 | SOC<br>(g/kg) | TN<br>(g/kg) | TP<br>(mg/kg) | TK<br>(g/kg) | AN<br>(mg/kg) | AK<br>(mg/kg) | pH           |
|------------|------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| 0~20       | PE   | 2.84±0.28 b   | 0.22±0.01 c  | 82.77±1.92 d  | 7.39±0.12 a  | 26.50±1.04 c  | 21.18±0.64 c  | 4.59±0.04 b  |
|            | PEPM | 3.98±0.06 b   | 0.25±0.01 bc | 113.06±3.74 c | 4.82±0.58 b  | 24.42±0.81 c  | 13.54±0.17 d  | 4.35±0.01 c  |
|            | PECC | 2.98±0.1 b    | 0.29±0.01 b  | 163.73±4.86 a | 5.64±0.08 b  | 37.96±1.62 b  | 76.38±2.61 a  | 4.85±0.01 a  |
|            | NF   | 6.47±0.89 a   | 0.54±0.04 a  | 126.41±2.87 b | 5.82±0.24 b  | 56.52±2.78 a  | 31.91±1.55 b  | 4.37±0.01 c  |
|            | PM   | 2.79±0.13 b   | 0.23±0.01 bc | 85.98±5.43 d  | 3.17±0.28 c  | 29.12±3.89 c  | 25.21±1.46 c  | 4.51±0.01 b  |
| 20~40      | PE   | 1.3±0.02 d    | 0.16±0.01 b  | 78.48±3.18 cd | 8.14±0.04 b  | 14.90±0.47 cd | 15.99±0.87 bc | 4.62±0.03 c  |
|            | PEPM | 2.72±0.21 ab  | 0.19±0.01 b  | 99.44±1.52 b  | 4.83±0.52 cd | 11.87±0.81 d  | 8.39±0.50 d   | 4.76±0.01 b  |
|            | PECC | 1.44±0.07 cd  | 0.15±0.02 b  | 87.09±2.63 c  | 5.95±0.32 c  | 27.47±1.08 b  | 53.11±2.26 a  | 4.86±0.03 a  |
|            | NF   | 3.15±0.4 a    | 0.43±0.06 a  | 147.44±4.50 a | 9.48±0.29 a  | 41.61±2.95 a  | 21.24±2.59 b  | 4.82±0.01 ab |
|            | PM   | 2.11±0.05 bc  | 0.15±0.01 b  | 72.92±5.26 d  | 3.90±0.35 d  | 20.38±4.08 bc | 12.31±0.87 cd | 4.57±0.01 d  |

注：数据为平均值±标准误。同一土层中，同列数据字母不同表示差异达到  $P<0.05$  显著水平，下同。

土壤有机质 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、速效钾 (AK)、碱解氮 (AN)、pH 值 (水土比 2.5:1) 和土壤基础呼吸 (SBR, 40%WHC) 测试参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[16]</sup>。土壤酶活性分析按照关荫松和周礼恺的方法<sup>[17-18]</sup>：转化酶活性 (INV) 测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法，脲酶活性 (URE) 测定采用靛酚蓝比色法，多酚氧化酶活性 (PPO) 测定采用邻苯三酚比色法。微生物生物量碳 (MBC)、生物量氮 (MBN) 测定采用氯仿熏蒸提取法，提取液用德国耶拿 Multi N/C 3100 自动定碳/氮仪测定。微生物代谢熵 (qCO<sub>2</sub>) 按土壤基础呼吸释放 CO<sub>2</sub> 量 (24 h) 与微生物生物量碳的比值计。

### 1.3 数据分析

处理间土壤化学性质、酶活性及微生物学指标等的差异比较采用方差分析后的 LSD 方法进行；指标间的简单相关分析用 Pearson 法进行，操作基于 SPSS (16.0) 统计软件。制表在 Excel 2003 中完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤酶活性

不同林分处理土壤酶活性如表 3 所示。总体而言，人工林中混交林的酶活性高于纯林，但均低于次生天然林。两土层中，转化酶活性在天然林表现较高，但相对于湿地松樟树混交林差异不显著，且在湿地松林表现最低。0~20 cm 土层，天然林土壤脲酶活性显著高于其他林分处理，湿地松林地脲酶活性表现最低；20~40 cm 土层，脲酶活性在湿地松和湿地松马尾松混交林土壤中较低，二者差异不显著。多酚氧化酶活性在两土层土壤均为天然林显著高于其他处理，且在湿地松林地表现最低。

土壤转化酶在蔗糖分解中有重要作用，土壤脲酶可加速土壤酰胺态氮向植物有效态转化<sup>[2,17]</sup>。因此，脲酶与碱解氮间呈显著的正相关关系 (表 4)。土壤酶活性源于土壤微生物、植物根系分泌及动植物残体分解等<sup>[4]</sup>，受有机质及地上植被类型影响显著；本研究亦有证实，各林分处理土壤转化酶和脲酶活性与有机碳

表 3 各林分处理土壤酶活性

Table 3 Soil enzyme activities under different stand treatments

| 林分处理 | 0 ~ 20 cm      |                  |                  | 20 ~ 40 cm     |                 |                  |
|------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|
|      | INV            | URE              | PPO              | INV            | URE             | PPO              |
| PE   | 2.22 ± 0.14 c  | 0.152 ± 0.008 d  | 141.65 ± 3.56 c  | 1.36 ± 0.04 c  | 0.107 ± 0.007 b | 91.34 ± 6.94 c   |
| PEPM | 2.88 ± 0.08 b  | 0.156 ± 0.008 cd | 220.82 ± 10.91 b | 1.41 ± 0.06 bc | 0.119 ± 0.007 b | 143.44 ± 12.70 b |
| PECC | 3.03 ± 0.10 ab | 0.229 ± 0.009 b  | 208.00 ± 11.18 b | 1.62 ± 0.02 ab | 0.164 ± 0.011 a | 153.35 ± 9.99 b  |
| NF   | 3.25 ± 0.04 a  | 0.297 ± 0.013 a  | 313.18 ± 14.36 a | 1.72 ± 0.06 a  | 0.163 ± 0.012 a | 254.40 ± 4.00 a  |
| PM   | 2.84 ± 0.11 b  | 0.187 ± 0.015 c  | 242.12 ± 14.00 b | 1.37 ± 0.14 c  | 0.155 ± 0.015 a | 154.36 ± 12.78 b |

注：转化酶活性（INV）单位：glucose mg/(g soil·24 h)；脲酶活性（URE）单位：NH<sub>3</sub>-N mg/(g soil·24 h)；多酚氧化酶活性（PPO）单位：gallnut mg/(g soil·3 h)。

表 4 土壤酶活性与其他性质间相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil enzyme activities and other properties

| 土层 (cm) | 项目  | URE     | PPO     | SOC     | TN      | TP      | AN      | pH      | SBR     | MBC     | MBN     |
|---------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 ~ 20  | INV | 0.725** | 0.753** | 0.563*  | 0.610*  | 0.589*  | 0.615*  | -0.183  | 0.684** | 0.665** | 0.694** |
|         | URE |         | 0.729** | 0.659** | 0.870** | 0.554*  | 0.926** | -0.027  | 0.866** | 0.883** | 0.885** |
|         | PPO |         |         | 0.732** | 0.750** | 0.304   | 0.696** | -0.436  | 0.752** | 0.730** | 0.788** |
| 20 ~ 40 | INV | 0.574*  | 0.548*  | 0.365   | 0.577*  | 0.576*  | 0.815** | 0.680** | 0.640*  | 0.723** | 0.705** |
|         | URE |         | 0.577*  | 0.296   | 0.332   | 0.282   | 0.656** | 0.291   | 0.304   | 0.425   | 0.524*  |
|         | PPO |         |         | 0.687** | 0.805** | 0.854** | 0.806** | 0.479   | 0.723** | 0.857** | 0.892** |

注：\*\* 表示双尾相关性达到  $P < 0.01$  显著水平，\* 表示双尾相关性达到  $P < 0.05$  显著水平， $n = 15$ ，下同。

分布一致，并与土壤呼吸、微生物生物量存在显著或极显著性正相关关系（表 4）。多酚氧化酶可促进土壤中酚类物质转化<sup>[17]</sup>，并因此影响土壤有机质累积。较之其他两种酶，多酚氧化酶更易受植被种类影响，因凋落物及根系分泌的多酚物质对多酚氧化酶有刺激作用<sup>[19]</sup>。所以，相对于湿地松纯林，混交林可加快土壤有机质循环；而湿地松马尾松混交林较之马尾松纯林无明显优势。这表明，湿地松与适宜的树种（针叶或阔叶）混交有利于林下土壤有机质循环，而马尾松与湿地松可能并非理想选择。综合 3 种酶活性来看，湿地松樟树混交林土壤生化活性高于其他林分处理，但均低于次生天然林。

## 2.2 土壤微生物学性质

不同林分处理土壤微生物学性质如表 5 所示。两土层中，土壤呼吸、微生物生物量碳氮均在天然林地最高，在人工林纯林较低。两土层中微生物生物量与有机碳比值（MBC/C）均在马尾松和湿地松马尾松混交土壤中较低。然而， $qCO_2$  在天然林和湿地松樟树混交林土壤中较低，在其他林分处理中相对较高。两土层中，微生物生物量碳氮比值（MBC/MBN）均在天然林显著高于其他林分处理，在湿地松、马尾松和湿地松马尾松混交林中较低。0 ~ 20 cm 土层，土壤 C/N

比在湿地松马尾松混交林中显著高于其他林分处理，其他林分处理间差异不显著；20 ~ 40 cm 土层，C/N 的最小值出现在天然林地，而在马尾松和湿地松马尾松混交林较高。

微生物生物量碳、生物量氮及土壤呼吸反映微生物群落容量及活性，受植被凋落物、植物残体及根系分泌物影响较大<sup>[13]</sup>，也即对地上植被碳输入较敏感<sup>[20]</sup>，表 6 的相关系数亦有所表现。因此，相对于纯林，天然林和湿地松樟树混交林在某种程度上益于土壤微生物群落生长。MBC/C 表征土壤有机碳活性趋势，该值较高意味着土壤有机碳活度更高，与有机碳含量相比，其与有机碳质量关系更密切<sup>[21]</sup>。结果显示土壤有机碳活化趋势在马尾松纯林和湿地松马尾松混交林较弱，而在湿地松樟树混交林较高且在 0 ~ 20 cm 土层表现尤为明显。 $qCO_2$  反映土壤微生物对基质利用效率，该值较低表示利用效率较高<sup>[22]</sup>；因此，次生天然林和湿地松樟树混交林中土壤微生物对基质利用效率较高，而马尾松和湿地松纯林土壤微生物效率较低。这与土壤 C/N 结论一致。上述分析表明，次生天然林和湿地松樟树混交林较之其他林分处理土壤微生物活性高，而针叶林纯林和湿地松马尾松混交林土壤微生物活性较低。

表 5 不同林分土壤微生物学性质

Table 5 Soil microbial properties under different treatments

| 土层<br>(cm) | 林分处理 | SBR<br>(mg/kg) | MBC<br>(mg/kg)  | MBN<br>(mg/kg) | MBC/C<br>(%)   | qCO <sub>2</sub> | MBC/MBN        | C/N            |
|------------|------|----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| 0 ~ 20     | PE   | 26.73 ± 0.87 d | 27.1 ± 0.51 d   | 3.81 ± 0.23 c  | 0.98 ± 0.11 b  | 0.99 ± 0.05 a    | 7.16 ± 0.36 c  | 12.84 ± 1.48 b |
|            | PEPM | 32.66 ± 0.65 c | 34.58 ± 1.34 c  | 4.84 ± 0.16 b  | 0.88 ± 0.02 c  | 0.95 ± 0.05 ab   | 7.17 ± 0.50 c  | 15.80 ± 0.73 a |
|            | PECC | 38.01 ± 1.32 b | 45.96 ± 0.58 b  | 5.37 ± 0.18 b  | 1.54 ± 0.04 a  | 0.83 ± 0.02 bc   | 8.57 ± 0.21 b  | 10.26 ± 0.37 b |
|            | NF   | 63.03 ± 1.31 a | 78.85 ± 1.18 a  | 7.41 ± 0.31 a  | 1.26 ± 0.16 ab | 0.80 ± 0.01 c    | 10.66 ± 0.28 a | 12.01 ± 1.05 b |
|            | PM   | 25.18 ± 0.48 d | 24.21 ± 1.40 d  | 4.12 ± 0.21 c  | 0.87 ± 0.02 c  | 1.05 ± 0.05 a    | 5.92 ± 0.56 c  | 12.36 ± 0.54 b |
| 20 ~ 40    | PE   | 19.72 ± 0.31 b | 15.23 ± 0.40 cd | 1.88 ± 0.03 d  | 1.18 ± 0.04 a  | 1.30 ± 0.05 a    | 8.10 ± 0.08 b  | 8.33 ± 0.30 bc |
|            | PEPM | 15.05 ± 0.92 c | 16.46 ± 0.69 c  | 2.44 ± 0.20 c  | 0.63 ± 0.07 b  | 0.91 ± 0.03 cd   | 6.81 ± 0.41 c  | 14.22 ± 0.71 a |
|            | PECC | 19.24 ± 0.59 b | 20.10 ± 0.95 b  | 2.99 ± 0.08 b  | 1.40 ± 0.08 a  | 0.96 ± 0.02 bc   | 6.73 ± 0.32 c  | 9.88 ± 0.78 b  |
|            | NF   | 33.04 ± 1.21 a | 39.51 ± 0.61 a  | 4.00 ± 0.02 a  | 1.30 ± 0.18 a  | 0.84 ± 0.04 d    | 9.88 ± 0.11 a  | 7.30 ± 0.62 c  |
|            | PM   | 13.93 ± 1.00 c | 13.14 ± 0.68 d  | 2.08 ± 0.14 cd | 0.62 ± 0.02 b  | 1.06 ± 0.03 b    | 6.34 ± 0.36 c  | 14.59 ± 1.12 a |

表 6 土壤微生物学性质与基本化学性质间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between microbial and chemical properties

| 土层 (cm) | 项目  | MBC     | MBN     | SOC     | TN      | TP      | AN      | pH      |
|---------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 ~ 20  | SBR | 0.991** | 0.958** | 0.875** | 0.961** | 0.495   | 0.901** | -0.275  |
|         | MBC |         | 0.960** | 0.849** | 0.960** | 0.544*  | 0.930** | -0.207  |
|         | MBN |         |         | 0.845** | 0.949** | 0.575*  | 0.881** | -0.228  |
| 20 ~ 40 | SBR | 0.952** | 0.828** | 0.384   | 0.814** | 0.839** | 0.783** | 0.466   |
|         | MBC |         | 0.932** | 0.588*  | 0.899** | 0.933** | 0.852** | 0.583*  |
|         | MBN |         |         | 0.540*  | 0.795** | 0.884** | 0.826** | 0.743** |

### 3 结论

湿地松樟树混交林土壤酶活性高于其他林分处理，但均低于次生天然林，虽然，土壤多酚氧化酶活性在湿地松马尾松混交林相对于两种纯林有一定优势。相对于针叶林纯林和针叶混交林，湿地松樟树混交林土壤有机碳活度较强；其林下土壤微生物基质利用效率较高。较之湿地松和马尾松纯林，湿地松樟树混交林短期（13 ~ 14 年）对土壤酶活性和微生物学性质有一定改善作用；因此，湿地松樟树混交林可作为红壤丘陵区红砂岩分布区植被恢复的备择林型，针叶混交林型不宜推荐。

#### 参考文献：

- [1] Weigand S, Auerswald K, Beck T. Microbial biomass in agricultural topsoils after 6 years of bare fallow. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19(2): 129-134
- [2] Zhang Y, Wu N, Zhou G, Bao W. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, 2005, 30(3): 215-225
- [3] Makoi JHJR, Ndakidemi PA. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem African. *Journal of Biotechnology*, 2008, 7(3): 181-191
- [4] Gu Y, Wang P, Kong CH. Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soil influenced by allelopathic rice variety. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45(5/6): 436-441
- [5] 黄懿梅, 安韶山, 刘连杰, 薛虹. 黄土丘陵区土壤基础呼吸对草地植被恢复的响应及其影响因素. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 862-869
- [6] Merilä P, Malmivaara-Lämsä M, Spetz P, Stark S, Vierikko K, Derome J, Fritze H. Soil organic matter quality as a link between microbial community structure and vegetation composition along a successional gradient in a boreal forest. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(2): 259-267
- [7] Jin K, Sleutel S, Buchan D, De Neve S, Cai DX, Gabriels D, Jin JY. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*,

- 2009, 104(1): 115–120
- [8] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2 176–2 183
- [9] Huang M, Ji J, Li K, Liu Y, Yang F, Tao B. The ecosystem carbon accumulation after conversion of grasslands to pine plantations in subtropical red soil of south China. *Tellus B*, 2007, 59(3): 439–448
- [10] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 陈永瑞, 梁涛. 亚热带红壤丘陵区四种人工林凋落物分解动态及养分释放. 生态学报, 2007, 27(3): 898–908
- [11] 蔡玉林, 李飞, 李家永, 陈永瑞, 李海涛, 张宏志. 红壤丘陵区人工林降水化学研究. 自然资源学报, 2003, 18(1): 99–104
- [12] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 李树战. 亚热带杉木和马尾松群落土壤系统呼吸及其影响因子. 植物生态学报, 2009, 33(1): 53–62
- [13] Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 2002, 59(3): 233–253
- [14] 王会利, 乔洁, 曹继钊, 毕利东, 邓欢, 张斌. 红壤侵蚀裸地不同植被恢复后林地土壤微生物特性的研究. 土壤, 2009, 41(6): 952–956
- [15] 陈绍荣. 江西红砂岩发育和土壤特性及其分类. 土壤学报, 1990, 27(3): 343–344
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12–13, 106–108, 146–195, 266
- [17] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987: 267–268
- [18] 关荫松. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986: 275–276, 296–297, 324–325
- [19] Zibilske LM, Bradford JM. Oxygen effects on carbon, polyphenols, and nitrogen mineralization potential in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 133–139
- [20] Jia G, Cao J, Wang C, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziulin, northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1): 117–125
- [21] Srivastava SC, Singh JS. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: Effects of alternate land-uses and nutrient flux. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(2): 117–124
- [22] Agnelli A, Ascher J, Corti G, Ceccherini MT, Nannipieri P, Pietramellara G. Distribution of microbial communities in a forest soil profile investigated by microbial biomass, soil respiration and DGGE of total and extracellular DNA. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(5): 859–868

## Effects of Plantation Restoration Approaches on Soil Enzyme Activities and Microbial Properties in Hilly Red Soil Region

ZHAO Ru-dong<sup>1,2</sup>, FAN Jian-bo<sup>1</sup>, HE Yuan-qiu<sup>1</sup>, SONG Chun-li<sup>1,2</sup>, TU Ren-feng<sup>1,2</sup>, TAN Bing-chang<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil and water loss is serious in hilly red soil region in southern of China. Typical plantations were investigated and native soil samples (0–20 and 20–40 cm) were collected to study the effect of short-term (13–14 years) restoration plantations on soil enzyme activities and microbial properties. Soil invertase, urease and polyphenoloxidase activities were at higher levels in natural secondary forest (NF) and *Pinus elliottii*-*Cinnamomum camphora* plantation (PECC) than in other stands. At the same time, soil microbial biomass (carbon and nitrogen), basal respiration, ratio of soil microbial carbon to organic carbon and microbial efficiency exhibited higher in NF and PECC compared to others. Therefore, PECC can improve soil biochemical function and microbial properties compared to pure and mixed coniferous plantations.

**Key words:** Plantation, Soil enzyme activity, Basal respiration, Microbial biomass