

不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响

郑 华¹, 欧阳志云^{1*}, 王效科¹, 苗 鸿¹, 赵同谦¹, 彭廷柏²

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要:为了探讨主要森林类型对土壤质量的影响,对南方红壤侵蚀区 4 种主要森林恢复类型下土壤物理、化学、生物学性状进行了比较研究,结果表明:不同的森林恢复类型导致了土壤物理、化学和生物学性质的显著差异。4 种森林类型的土壤质量均比长期干扰下对照的土壤质量高。人工林土壤质量又相对比天然次生林土壤质量低。其土壤质量综合指数分别为:天然次生林(0.95)、油茶林(0.68)、杉木林(0.55)、湿地松林(0.36)、对照(0.04)。自然恢复在恢复初期是提高土壤质量的有效途径。导致人工林和对照土壤质量相对较低的主要因素是:周期性的森林抚育打破土壤物理结构、凋落物质量较低、凋落物量较低、微生物生物量较低、微生物功能较差和土壤养分流失严重。在土壤质量指标选择方面,土壤微生物生物量结合微生物功能多样性是反映土壤生物学活性和土壤质量的较好指标。

关键词:土壤质量;人工林;自然恢复;土壤质量指数

Effects of forest restoration types on soil quality in red soil eroded region, Southern China

ZHENG Hua¹, OUYANG Zhi-Yun^{1*}, WANG Xiao-Ke¹, MIAO Hong¹, ZHAO Tong-Qian¹, PENG Ting-Bai² (1. *Key Lab. of Systems Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*; 2. *Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1994 ~ 2002.

Abstract: Land degradation and restoration is one of the greatest challenges in subtropical hilly regions. In Southern China, the area of hilly red soil region accounts for $2.0 \times 10^6 \text{ km}^2$. During recent decades, as a result of increasing demand for firewood, timber and food—human disturbance has destroyed vegetation in the region. Due to the vegetation destruction, the region was given the name, “red desert”. As a result, restoring vegetation and improving soil quality became urgent affairs of the region. It is very important to explore the effects of forest restoration types on soil quality for the restoration and management of such degraded ecosystems.

In this study, four typical forest restoration types in the hilly red soil region were selected at the Ecological Benefit Monitoring Station of the Yangtze River Protection Forest—the hilly red soil region of Southern Hunan Province, which is located in the small valley of Changchong Village, Langlong Country, Hengyang County of Hunan Province. The four types are natural secondary forest, tea-oil camellia plantation, Chinese fir plantation, slash pine plantation, and the control which was frequently disturbed. The paper reports on the responses of the soil’s physical, chemical and biological properties to the four forest restoration types. From the results of this study, a soil quality index that integrated 13 soil quality indicators was calculated. In addition, the relationships between the soil’s physico-chemical and biological indicators were analyzed. Results

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(973)(G2000046807);国家自然科学基金资助项目(30230090);国家基金委创新群体计划资助项目(40321101)

收稿日期:2004-03-12; **修订日期:**2004-06-30

作者简介:郑华(1974~),男,湖南岳阳人,博士生,主要从事人类活动对生态系统的胁迫效应和恢复生态学研究。E-mail: zhenghua27@sohu.com

*** 通讯作者** Author for correspondence. E-mail: zyouyang@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: National Key Basic Research Program (No. G2000046807); the National Natural Science Foundation of China (No. 30230090) and Innovation Group Project of National Natural Science Foundation of China (No. 40321101)

Received date: 2004-03-12; **Accepted date:** 2004-06-30

Biography: ZHENG Hua Ph. D. candidate, mainly engaged in threatening effect of human activities on ecosystem and restoration ecology.

showed that: different forest restoration types lead to significant differences in the soil's physico-chemical and biological properties. The soil quality of selected plots was ranked as follows: 1) natural secondary forest> 2) tea-oil camellia plantation > 3) Chinese fir plantation> 4) slash pine plantation> 5) control. The indices of soil quality for the natural secondary forest, tea-oil camellia plantation, Chinese fir plantation, slash pine plantation, and control were 0.95, 0.68, 0.55, 0.36 and 0.04, respectively. The control possessed the lowest soil quality. The soil quality under the natural secondary forest was the highest among four forest restoration approaches. Natural restoration was an effective approach to improving soil quality at the early stage of restoring. The factors influencing the soil quality of plantations and the control were inappropriate artificial tending, lower litter fall production and quality, lower microbial structure and function, and nutrients loss. The findings indicate that among the 13 soil quality indicators, microbial biomass carbon, substrate richness index and Shannon's diversity index significantly correlated with other 9, 10, 9 indicators respectively. For selecting the soil quality indicator, the microbial biomass carbon combined with microbial function diversity was the better indicator for reflecting soil biological activity and soil quality.

Key words:soil properties; plantation; natural restoration; quality index
文章编号:1000-0933(2004)09-1994-09 中图分类号:S158.3,S718 文献标识码:A

土地退化和恢复是热带和亚热带山区最为严峻的挑战^[1]。我国南方红壤地区总面积 203.53 万 km²,占全国土地总面积的 21%,是南方面积最大、垦殖指数最高、水土流失最为严重的区域,曾一度成为南方的“红色沙漠”。为此,许多研究者围绕不同植被恢复措施对土壤结构特性、化学性状、微生物生物量和酶活性的影响作了深入探讨^[2~11],为指导红壤地区的恢复实践起到了积极作用。本文选择南方 4 种具有代表性的森林恢复类型为研究对象,研究了不同森林恢复类型对土壤物理、化学和生物学特性的影响,评价了不同森林恢复类型对土壤理化和生物学特性的综合影响,同时探讨了利用微生物生物量结合其功能多样性来反映土壤生物学特性的可行性,以期为退化生态系统恢复与管理、土壤质量评价指标和方法的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究场地选在湘南红壤丘陵区国家长江防护林生态效益检测站,位于湖南省衡阳县栏栳乡长冲村小流域,地处 27°05'N, 112°18'E,属亚热带季风湿润性气候,海拔 86~147m,属典型的红壤低丘冈地,母岩为砂页岩,土壤为红壤,pH 值 4~5,该流域年平均气温 17.9℃,平均年降雨量为 1237 mm。

长期以来,附近村民的强度割茅、挖垦,森林已不复存在。试验前供试样地状况基本一致,试验地为稀疏的次生灌草丛所覆盖,且分布不均,以画眉草(*Eragrostis pilosa*)、狗尾草(*Setaria viridis*)为主,水土流失严重。1989 年以消灭荒山、重建植被、恢复退化生态系统为目标,在立地条件基本一致的坡地上设置以下 4 个处理重建森林,分别为湿地松人工林、杉木人工林、油茶人工林、封山育林让其自然恢复。同时以不采取任何措施,且继续进行放牧、割茅干扰的样地为对照(CK)。人工林在造林前先进行水平条带状整地,抚育方式为采用锄抚方法对其进行全面抚育,造林后前 3 年每年抚育 1 次,然后约每 3 年抚育一次,最后一次抚育时间为 1998 年,但油茶林最后一次抚育时间为 1995 年。试验区基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 General situation of experimental plots								
森林类型 Forest types	初植乔木 密度 Planting density of trees (plant/hm ²)	坡度 Slope	乔木平均 胸径 Average diameter of trees (cm)	乔木平均 高度 Average height of tree layer (m)	覆盖度 Coverage (%)	优势物种 Dominant species	林下植被生物量 Biomass of under- growth plant layer (g/m ²)	根系生物量 Root biomass (g/m ²)
对照 CK	—	25°	—	—	5	画眉草、狗尾草、盐肤木等 ^⑤	353.52	338.260
湿地松林 ^①	2100	25°	10.72	7.71	75	湿地松、盐肤木、三月泡、芒等 ^⑥	1188.88	689.959
杉木林 ^②	2966.7	25°	7.74	6.05	83	杉木、盐肤木、樟树、铁芒萁等 ^⑦	1089.22	1034.357
油茶林 ^③	2433.3	18°	—	2.74	95	油茶、木、铁芒萁等 ^⑧	1952.42	1377.726
天然次生林 ^④	—	25°	10.28	7.36	95	马尾松、青冈栎、合欢、槲栎、白栎等 ^⑨	3179.13	1390.469

① Slash pine (*Pinus elliottii*) plantation (SPP); ② Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation (CFP); ③ Tea-oil camellia (*Camellia oleifera*) artificial reforestation (TCP); ④ Natural secondary forest (NSR); ⑤ *Eragrostis pilosa*, *Rhus chinensis*, *Setaria viridis* et al.; ⑥ *Pinus elliottii*, *Rhus chinensis*, *Rubus parviflorus*, *Miscanthus sacchariflorus* etc.; ⑦ *Cunninghamia lanceolata*, *Rhus chinensis*, *Sassafras taumu*, *Dicranopteris linearis* etc.; ⑧ *Camellia oleifera*, *Loropetalum chinense*, *Dicranopteris linearis* etc.; ⑨ *Pinus massoniana*, *Cyclobalanopsis glauca*, *Albizia julibrissin*, *Quercus aliena*, *Quercus fabri* etc.

在每一处理的种植地上设置临时标准地,标准地面积 10m×20m,每一处理重复 3 次。

1.2 样品采集与分析

在各标准地中以“S”形布点采取 0~20cm 混合土样,将取好的土壤样品迅速装入塑料袋并置于冰块上运至实验室。土壤样品均在实验室 4℃ 的冰箱内保存,BIOLOG 实验在取样后 48h 内进行^[12]。余下的土壤在自然条件下风干用于测定土壤的化学性质、机械组成和比重,分析方法见参考文献^[13]。土壤物理性质测定方法见参考文献^[13],每一标准地设重复 3 次。

林下植被(包括根系)生物量的测定方法见参考文献^[14],在每一标准地内设置(2×2)m² 样方 5 个,将全部植株挖出,并称重。每一样地共调查样方 15 个。

凋落物量测定是在每块标准地地内随机设置 10 个 0.8×0.8 m² 方框收集器,每月收集 1 次。

凋落物分解速率的测定见参考文献^[14]。采用尼龙网袋法(10×15 cm²),孔径小于 2 mm。每次从各标准地内取出凋落物 3 袋,每样地一次共取 9 袋测定凋落物分解速率,每 2 个月测定 1 次。凋落物养分分析参照标准方法进行^[14]。

土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸法^[15]。微生物功能多样性应用 BIOLOG 方法:称取相当于 10g 干土的鲜土外加 95ml 无菌的 0.145mol/L NaCl 溶液在摇床上振荡 15min^[16],然后将土壤样品稀释至 10⁻³,再从中取 125 μl 该悬浮液接种到革兰氏阴性板的每一个孔中,最后将接种好的板放至 25℃ 的恒温培养箱中培养,每隔 4h 在波长为 595nm 的 BIOLOG 读数器上读数,培养时间共为 240h。

1.3 计算方法

孔的平均颜色变化率(AWCD):

$$AWCD = \sum (C_i - R_i) / n$$

式中, C_i 每个有培养基孔的光密度值, R_i 为对照孔的光密度值, n 为培养基数目, GN 板 n 值为 95^[17]。

培养基的丰富度(Richness)和多样性(Diversity)与植物生态学中的计算公式相同。丰富度指数指被利用的碳源的总数目。多样性指数采用 Shannon-Weinner 指数:

$$(H'); H' = \sum (P_i \times \log P_i)$$

式中, P_i 为有培养基的孔与对照孔的光密度值的差异与整板总差异的比值,即: $P_i = (C_i - R_i) / \sum (C_i - R_i)$ 。

本研究运用 AWCD 值接近 0.6 时的数据来比较 BIOLOG 板中的微生物代谢多样性类型,这样可以比较颜色变化率相同的情况下 BIOLOG 板的碳源利用情况而不考虑接种密度带来的差异^[18,19]。因对照土壤微生物的 AWCD 值太低,比较时采用 240h 的数据。

不同森林类型下土壤质量指数按照参考文献^[20]的方法计算,各指标权重通过 PCA 方法确定。

统计分析采用 SPSS10.0 版在计算机上进行。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

天然次生林土壤容重最小,对照最大,3 种人工林差异不显著。田间持水量、渗透速率的变化趋势一致,天然次生林土壤最高,对照最低,3 种人工林中的这两个指标差异较小。总孔隙度与土壤容重趋势相反,天然次生林土壤的总孔隙度最大并显著区别与其他样地中的土壤,其它样地的差异不显著。人工林和对照土壤中粘粒和粉粒含量比天然次生林土壤低,而砂粒含量相对较高(表 2)。

表 2 不同森林恢复类型对 0~20 cm 土壤物理性质的影响
Table 2 Effects of different forest restoration types on selected physical properties (0~20 cm depth)

指标 Factors	对照 CK	湿地松林 Slash pine plantation	杉木林 Chinese fir plantation	油茶林 Tea-oil camellia plantation	天然次生林 Natural secondary forest
容重 ^① (g/cm ³)	1.38 (0.03) a	1.28 (0.03) ab	1.21 (0.07) b	1.18 (0.03) bc	1.07 (0.03) c
田间持水量 ^② (%)	23.67 (0.64) d	25.20 (0.32) cd	27.85 (0.23) b	26.95 (0.52) bc	33.40 (0.91) a
砂粒 Sand (%)	66.16 (0.36) a	67.94 (0.33) a	58.61 (0.77) b	58.93 (4.27) b	48.36 (0.24) c
粉粒 Silt (%)	16.56 (0.41) bc	13.90 (0.84) c	22.96 (1.08) ab	21.48 (5.04) abc	27.73 (1.61) a
粘粒 Clay (%)	17.28 (0.12) b	18.16 (0.69) b	18.42 (0.43) b	19.59 (0.78) b	23.91 (1.70) a
总孔隙度 Porosity (%)	40.25 (1.28) c	42.55 (1.21) bc	45.54 (1.69) b	46.11 (1.39) b	50.85 (0.88) a
渗透速率 ^③ (mm/min)	2.20 (0.32) d	3.30 (0.55) c	5.10 (0.61) b	4.20 (0.49) bc	9.20 (0.67) a

* 括号中的数字为平均数的标准误;同一行中,具有相同字母平均数表示差异不显著($p>0.05$)Numbers in the parentheses are standard errors; Means followed by the same letter in the same low are not significantly different at $p<0.05$; ① Bulk density; ② Water holding capacity; ③ Final constant infiltration rate

2.2 土壤化学性质

研究区土壤均呈酸性,对照土壤的 pH 值最高,湿地松林土壤 pH 值最低,并与其它样地的差异分别达到显著水平(表 3)。

天然次生林土壤有机碳含量(指包括粗存有机物料在内的碳总量)最高,分别比油茶林、杉木林和湿地松林土壤有机碳含量高 33.27%、32.15% 和 76.03%,对照土壤有机碳含量显著低于各森林类型土壤有机碳含量。总氮、总磷和速效氮、速效钾的变化趋势与土壤有机碳基本相同(表 3)。油茶林和对照土壤中总钾含量较高,并显著区别于天然次生林和杉木林土壤总钾含量,杉木林土壤的总钾含量最低(表 3)。

交换性阳离子中 Ca^{2+} 占主导地位,湿地松和油茶林土壤 Ca^{2+} 含量较低,并且其含量与天然次生林、杉木林和对照土壤中的差异达到显著水平。不同森林类型下土壤 Mg^{2+} 含量的差异不显著,但对照土壤中 Mg^{2+} 含量显著高于各森林土壤。 K^+ 含量依次为:天然次生林>油茶林>湿地松林>对照>杉木林。 Na^+ 含量与 K^+ 稍有不同,依次为:天然次生林>杉木林>油茶林>对照>湿地松林(表 3)。土壤有效阳离子交换量以天然次生林土壤最高,其次依次为:杉木林、对照、湿地松林和油茶林(表 3)。

表 3 不同森林恢复类型对 0~20 cm 土壤化学性质的影响					
Table 3 Effects of different forest restoration approaches on selected chemical properties (0~20 cm depth)					
指标 Factors	对照 CK	湿地松林 Slash pine plantation	杉木林 Chinese fir plantation	油茶林 Tea-oil camellia plantation	天然次生林 Natural secondary forest
pH (H_2O)	4.66 (0.03) a	4.22 (0.03) c	4.37 (0.07) b	4.54 (0.03) a	4.42 (0.05) b
有机碳 ^① (g/kg)	3.21 (0.50) d	8.01 (0.23) c	10.67 (0.52) b	10.58 (0.42) b	14.10 (1.28) a
总氮 ^② (g/kg)	0.34 (0.05) d	0.54 (0.003) c	0.73 (0.04) b	0.74 (0.01) b	1.00 (0.09) a
总磷 ^③ (g/kg)	0.14 (0.01) b	0.15 (0.01) ab	0.17 (0.01) ab	0.21 (0.01) ab	0.23 (0.05) a
总钾 ^④ (g/kg)	21.30 (0.26) a	20.10 (0.29) ab	15.97 (0.45) c	22.17 (1.28) a	18.73 (0.78) b
速效氮 ^⑤ (mg/kg)	29.33 (2.67) c	41.00 (0.58) c	62.33 (2.91) b	64.00 (3.06) b	84.67 (8.82) a
速效磷 ^⑥ (mg/kg)	0.26 (0.06) c	0.53 (0.10) bc	0.95 (0.02) ab	1.22 (0.13) a	0.83 (0.02) b
速效钾 ^⑦ (mg/kg)	57.67 (3.08) b	70.45 (2.68) b	77.03 (10.50) b	91.47 (0.47) b	178.67 (21.85) a
Ca^{2+} (cmol/kg)	1.20 (0.06) b	0.75 (0.13) c	1.63 (0.02) a	0.24 (0.01) d	1.72 (0.22) a
Mg^{2+} (cmol/kg)	0.53 (0.07) a	0.17 (0.004) b	0.29 (0.04) b	0.22 (0.04) b	0.27 (0.07) b
K^+ (cmol/kg)	0.18 (0.02) bc	0.19 (0.02) bc	0.16 (0.01) c	0.24 (0.01) b	0.34 (0.04) a
Na^+ (cmol/kg)	0.16 (0.02) bc	0.09 (0.002) c	0.29 (0.01) ab	0.22 (0.03) b	0.32 (0.04) a
有效阳离子交换量 ^⑧ (cmol/kg)	2.07 (0.37) a	1.20 (0.16) b	2.38 (0.07) a	0.92 (0.06) b	2.65 (0.24) a

* 括号中的数字为平均数的标准误;同一行中,具有相同字母平均数表示差异不显著($p>0.05$) Numbers in the parentheses are standard errors; Means followed by the same letter in the same low are not significantly different at $p<0.05$; ① Soil organic carbon (SOC); ② Total nitrogen (TN); ③ Total phosphorus (TP); ④ Total potassium (TK); ⑤ Available nitrogen (AN); ⑥ Available phosphorus (AP); ⑦ Available potassium (AK); ⑧ Effective cation changeable capacity (ECEC)

2.3 土壤生物学性质

本研究选取反应土壤生物学特性的指标为:平均颜色变化率(AWCD)、微生物生物量碳、培养基丰富度和 Shannon's 多样性指数。

反映微生物活性和碳源利用能力的 AWCD 随时间的延长而增加。其大小顺序为:天然次生林>油茶林>杉木林>湿地松林>对照(图 1)。

天然次生林土壤微生物生物量碳含量最高并显著区别于其它样地,而人工林土壤中微生物生物量碳含量差异不显著。天然次生林土壤微生物利用培养基的丰富度和 Shannon's 多样性指数最高,油茶林其次。天然次生林的这两个指数与杉木林、湿地松林的指数差异显著。3 个指数均以对照最低(表 4)。

2.5 土壤质量指数

整合上述 13 个指标的土壤质量指数^[20]能反映不同森林恢复类型下土壤质量变化的相对程度。对照、湿地松林、杉木林、油茶林和天然次生林土壤质量指数分别为:0.04,0.36,0.55,0.68 和 0.95(图 2)。天然次生林土壤质量指数最高,对照最低。与长期受干扰的对照相比,森林恢复明显提高了土壤质量,而在不同

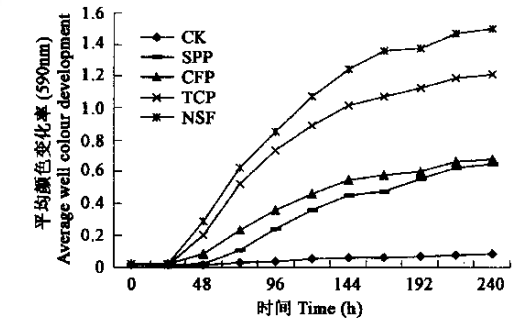


图 1 0~20 cm 土壤微生物平均颜色变化率

Fig. 1 Average well color development (AWCD) of microbial community in 0~20 cm soil

CK 对照 Control; SPP 湿地松林 Slash pine plantation; CFP 杉木林 Chinese fir plantation; TCP 油茶林 Tea-oil camellia plantation; NSF 天然次生林 Natural secondary forest

的森林恢复类型中天然次生林土壤质量又要优于人工林土壤。13a 内,自然恢复更有利于提高土壤质量。

2.6 土壤质量指标间的相关关系

土壤容重与 9 个指标呈显著或极显著负相关,表明土壤紧实是影响土壤质量的一个重要因素。土壤有机碳与 8 个指标呈显著或极显著正相关,这可能与土壤有机质影响土壤养分的持留与提供有关^[21](表 5)。

表 4 不同森林恢复类型对 0~20 cm 土壤生物学性质的影响

Table 4 Effects of different forest restoration approaches on selected biological properties (0~20 cm depth)					
指标 Factors	对照 CK	湿地松林 Slash pine plantation	杉木林 Chinese fir plantation	油茶林 Tea-oil camellia plantation	天然次生林 Natural secondary forest
微生物生物量碳 ^① (mg/kg)	66.03 (6.21) c	119.70 (9.79) b	128.21 (15.20) b	141.95 (8.21) b	176.43 (11.03) a
培养基丰富度 ^②	8.00 (1.00) d	49.00 (3.61) c	55.00 (6.03) bc	65.67 (2.60) ab	72.33 (2.33) a
Shannon's 多样性指数 ^③	1.86 (0.14) c	3.73 (0.08) b	3.79 (0.14) b	4.02 (0.03) ab	4.10 (0.03) a

* 括号中的数字为平均数的标准误;同一行中,具有相同字母平均数表示差异不显著($p>0.05$) Numbers in the parentheses are standard errors; Means followed by the same letter in the same low are not significantly different at $p<0.05$; ① Microbial biomass carbon (MBC); ② Substrate richness index (SRI); ③ Shannon's diversity index (SDI)

微生物生物量碳、培养基丰富度指数和 Shannon's 多样性指数与速效氮、速效磷和速效钾均呈显著或极显著正相关(速效钾与 Shannon's 多样性指数的关系例外)(表 5),并且这 3 个生物学指标与有机碳、总氮均呈极显著正相关。表明所选取的生物学指标不仅能很好的反映土壤养分的有效性,还能基本反映出土壤肥力的基本状况。

3 讨论

3.1 影响土壤物理性质的因素

水土流失是破坏土壤结构的重要因素。5 种植被类型中以对照的水土流失最为严重,天然次生林控制水土流失的效果最为明显^[22]。据 Hassan & Majumder^[23]的报道径流流失将带走土壤中的许多粘粒和粉粒,天然次生林最小的径流量可能就是其土壤粘粒和粉粒含量较人工林和对照土壤高的主要原因(表 2)。

人工林不恰当的抚育方式也是导致土壤结构变差和土壤有机质下降的主要因素之一。本研究的人工林采用抚抚的方式进行全面抚育,抚育过程将加速地表有机残余物与土壤的混合,据 Blair 等^[24]的报道:由于有机残余物与土壤的混合,土壤微生物活性得到加强,加速了部分有机质的分解,导致了土壤结构性

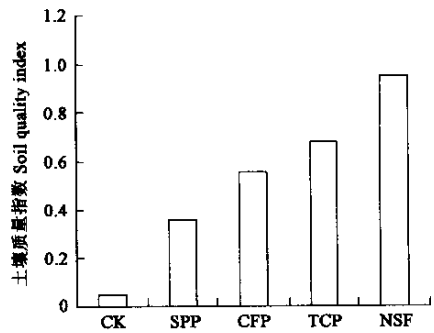


图 2 不同森林恢复类型下土壤质量指数比较

Fig. 2 Comparison of soil quality index for different forest restoration types

CK 对照 Control; SPP 湿地松林 Slash pine plantation; CFP 杉木林 Chinese fir plantation; TCP 油茶林 Tea-oil camellia plantation; NSF 天然次生林 Natural secondary forest

表 5 土壤质量指标相关关系

Table 5 Correlation relationships between soil quality indicators												
	BD	pH	SOC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	Mg ²⁺	MBC	SRI
pH	0.224											
SOC	-0.774**	-0.329										
TN	-0.752**	-0.294	0.988**									
TP	-0.520*	-0.045	0.597*	0.567*								
TK	0.189	0.488	-0.308	-0.289	0.187							
AN	-0.775**	-0.163	0.975**	0.977**	0.630*	-0.239						
AP	-0.523*	-0.263	0.624*	0.595*	0.443	0.105	0.535*					
AK	-0.587*	-0.180	0.779**	0.839**	0.484	-0.134	0.806**	0.270				
Mg ²⁺	0.419	0.656**	-0.526*	-0.487	-0.205	0.261	-0.375	-0.728**	-0.188			
MBC	-0.912**	-0.365	0.883**	0.868**	0.486	-0.218	0.868**	0.585*	0.721**	-0.516*		
SRI	-0.850**	-0.459	0.892**	0.857**	0.578*	-0.253	0.826**	0.765**	0.567*	-0.710**	0.901**	
SDI	-0.768**	-0.566*	0.850**	0.802**	0.501	-0.291	0.749**	0.796**	0.503	-0.750**	0.856**	0.972**

BD 容重 Bulk density; SOC 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN 总氮 Total nitrogen; TP 总磷 Total phosphorus; TK 总钾 Total potassium; AN 速效氮 Available nitrogen; AP 速效磷 Available phosphorus; AK 速效钾 Available potassium; MBC 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; SRI 培养基丰富度 Substrate richness index; SDI Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index

状的下降和土壤容重的增加。很多研究者也有过类似报道^[24~26]。因此,在该地区人工林抚育过程中,宜适当减少抚育次数或改进抚育措施。

根据 Seubert^[27]和 Allen^[28],土壤紧实通常导致孔隙度的下降,土壤侵蚀的敏感性提高以及导水率的下降。因此,水土流失和不适当的人工抚育导致的土壤容重增加也将影响土壤其它物理性状的下降(表 2)。

3.2 影响土壤化学性质的因素

水土流失是土壤养分流失的主要途径。在本研究中天然次生林水土保持效果最明显,人工林次之,对照最差^[22]。这也可能是天然次生林土壤养分较高的重要原因之一。

凋落物是土壤养分归还的重要途径。本研究中土壤质量指数与年凋落物年生产量趋势完全一致(表 6;图 3)。油茶林和天然次生林不仅凋落物年生产量较高,且凋落物中 70%以上的叶凋落物为阔叶凋落物(表 6),表现出较高的凋落物质量。杉木林和湿地松林凋落物针叶比例则远大于阔叶比例。养分氮、磷、钙的年归还量也是以天然次生林占优势(图 3)。

杉木林土壤中钾素含量较低可能与杉木对钾元素的吸收以及杉木养分归还率较低有关,杉木凋落物中钾元素含量高达 2.42 mg/kg,且其分解速率较慢,养分循环受阻使得土壤大部分钾素被积累到杉木植株中。

表 6 不同森林类型年凋落物量及其组成
Table 6 The annual litter fall amount and their composition under different forest types

森林类型 Forest types	湿地松林 Slash pine plantation	杉木林 Chinese fir plantation	油茶林 Tea-oil camellia plantation	天然次生林 Natural secondary forest
年凋落物量 Litter fall amount (t/(hm ² ·a))	3.74	3.88	5.75	6.03
凋落物年腐解率 Decomposition rate per year	14.55	15.26	27.94	34.25
针叶比例 (%)Proportion of needle leaf	82.90	69.95	—	28.93
阔叶比例 (%)Proportion of broad leaf	17.10	30.05	100	71.07

土壤微生物影响生态系统养分循环。速效氮、速效钾的趋势与微生物生物量和微生物功能多样性指数变化趋势完全一致(表 3,表 4)。微生物生物量碳、培养基丰富度指数和 Shannon's 多样性指数与速效氮、速效磷和速效钾均呈显著和极显著正相关(速效钾与 Shannon's 多样性指数的关系例外)(表 5)。可见,微生物显著提高土壤养分地有效性。

其它因素,如:土壤母质、养分本身特性等也影响土壤化学性质。研究区土壤较低的 pH 值可能与高温高湿条件下红壤的演化有关^[29]。Mg²⁺在各森林类型土壤中差异较小也可能与土壤母质构成有关。总磷的含量差异较小可能与磷在土壤中不活跃的本质有关^[30],特别是在酸性条件下^[31]。Ca²⁺和 Mg²⁺而在对照土壤含量较高,可能与其 pH 值较高有关^[31, 32]。此外,土壤化学性质与树木种类、覆盖度、林下植物种类也密切相关。

3.3 影响土壤生物学性质的因素

3.3.1 关于反映土壤生物学性质指标的选择 以前研究中微生物生物量和细菌数量的测定尽管是在过程水平上测定微生物群落,但土壤微生物群落内的功能冗余使得这两项指标对微生物种群变化不太敏感。俞慎等^[11]的研究也表明:土壤微生物生物量完全可以作为红壤地区土壤质量的生物指标,但是土壤微生物生物量只反映土壤微生物在总量上的差异,而无法表现土壤微生物在组成和区系上的变化,要反应土壤质量的生物活性还要结合土壤微生物多样性的研究。而 BIOLOG 代谢多样性类型与微生物群落组成相关^[33]使得其对功能微生物群落变化较为敏感^[12]。本研究试图用微生物生物量结合功能多样性反映土壤生物活性,在选取的 4 个生物学指标中:平均颜色变化率(AWCD)反映了土壤微生物利用碳源的整体能力及微生物活性^[34];微生物生物量碳与土壤健康密切相关,是反映微生物群落的相对大小和人类活动压力的一个重要指标^[35],能快速的响应不同土地管理策略的变化^[36~38];培养基丰富度和 Shannon's 多样性指数反映的是微生物利用碳源的数量及其功能多样性(代谢多样性),在反映土地管理策略影响土壤生物学特性和土壤质量方面,它对土地管理影响的反映比土壤有机质更敏感^[39]。

相关分析表明:微生物生物量碳、培养基丰富度指数和 Shannon's 多样性指数分别与 13 个土壤质量指标中的 9、10、9 个指标具有显著或极显著相关关系(表 5),可见,这 3 个参数的大小能基本反映大部分土壤质量指标的信息,采用微生物生物量及

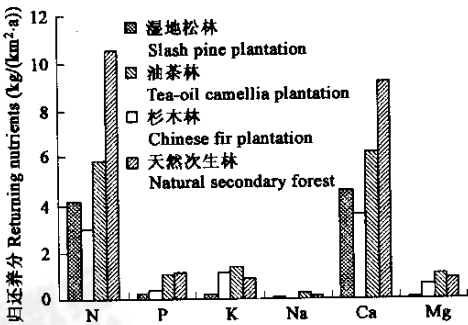


图 3 凋落物养分年归还量

Fig. 3 The returning amount of annual nutrients through litter-fall

其功能多样性指数作为预测和评价土壤质量早期变化的敏感参数不仅能反映土壤质量的生物活性,而且对于反映土壤质量的相对高低也具有重要的参考价值。

3.3.2 影响土壤生物学性质的因素 土壤有机碳是土壤微生物群落的重要碳源之一,碳源的种类和丰富程度直接影响能够利用碳源的土壤微生物的种类和数量。相关分析表明:土壤有机碳与微生物生物量碳、培养基丰富度和 Shannon's 多样性指数均呈极显著正相关,相关系数分别为:0.883、0.892、0.850(表 5)。凋落物除了作为土壤有机碳的来源外,它还能作为土壤微生物的繁衍生态创造条件,天然次生林和油茶林中较高的凋落物产量和质量更有利于土壤微生物结构和功能的加强(表 4)。

植物根系本身和分泌物均是土壤微生物的主要碳源。5 个样地中植物根系生物量与微生物 Shannon's 多样性指数显著相关,相关系数为:0.933(表 1,表 4)。因此,油茶林和天然次生林中较大的根系生物量也是其土壤微生物功能较强的重要原因。

除此之外,土壤 pH 值及土壤物理性质如:土壤容重、土壤孔隙度等均通过影响微生物生存条件而影响其结构与功能。

3.4 关于南方红壤丘陵区森林恢复途径

在大面积实行退耕还林(草)的情况下,一些人提出进行大封禁,小治理;还有人提出小治理,大封禁,大保护,以小促大;卢宗凡认为应该实行,先封育,再改造提高的措施。即把应该封育的大量地块,首先封起来,让它自我恢复,在自我恢复的基础上,再根据各地块的实际情况,进行补播有关草或灌或乔。故称之为,先封育,再改造提高。以达到目前水土保持的四大要求:保持水土、提高收入、改善生态环境、增加当地政府的财政收入^[40]。本研究结合田育新等人^[22]的定位观测:自然恢复 13a 的天然次生林在控制水土流失方面要优于单一的油茶林、杉木林、湿地松林;本研究进一步表明 4 种林型中自然恢复的天然次生林更有利于提高土壤质量。可见,在具有一定恢复潜力的退化生态系统中,采取先封育的植被恢复措施是切实可行的。

但是前人的研究表明:天然次生林具有无性繁殖起源的林分多,实生繁殖起源的林分少;生长迅速、衰退早,林分动态演替稳定性低等特点^[41]。目前,政府已把森林经营方向由过去以木材利用为主转向以发挥森林的生态服务功能为主^[42],经营好次生林对天然林保护等林业重点工程实施及国家生态安全建设具有重大意义。但是目前水土保持科研工作滞后水土保持治理工作,对水土保持治理工作中出现的新情况注意研究不够^[40]。因此,在全面封禁的情况下,如何建造植被?如何实现保育健康的次生林系统等又是该领域急需解决的关键问题^[41]。

References:

- [1] Paniagua A, Kammerbauer J, Avedillo M, *et al.* Relationship of soil characteristic to vegetation successions on a sequence of degraded and rehabilitated soils in Honduras. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, **72**: 215~225.
- [2] Yu Z Y, Peng S L. *The study on restoration ecology of degraded ecosystems in tropical and sub-tropical region*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1996. 185~191.
- [3] Guo X M, Niu D K, Liu W Q, *et al.* The vegetation restoration and reconstruction of different types of degraded barren ecosystems in Jiangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(6): 878~884.
- [4] Liu W Q, Yang J L, Du T Z, *et al.* Effect of rehabilitated forest on soil microbial characteristics of severely degraded red soil region. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2003a, **23**(1): 65~69.
- [5] Liu W Q, Xue J H, Du T Z, *et al.* Effects of rehabilitated forest on soil structure characteristic of degraded red soil. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2003b, **27**(1): 15~20.
- [6] Yang Y S, He Z M, Lin G Y, *et al.* Effect of different improving patterns on fertility of severely degraded granitic red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, **35**(2): 276~282.
- [7] Yang Y S, He Z M, Qiu R H, *et al.* Effects of different recover and restoration measures on plant diversity and soil fertility for serious degradation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(4): 490~494.
- [8] Hu B, Duan C Q, Wang Z H, *et al.* Effect of vegetation rehabilitation measures on soil fertility and soil enzymatic activity in degraded ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(4): 604~608.
- [9] Lu S H, Xiang W S, Li X K, *et al.* A review of vegetation restoration in eroded area of red soil. *Guihaia*, 2003, **23**(1): 83~89.
- [10] Wang X, Gong Z. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*, 1998, **81**: 339~355.
- [11] Yu S, Li Y, Wang J H, *et al.* Study on the soil microbial biomass as a bioindicator of soil quality in the red earth ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(3): 413~422.
- [12] Rogers B F, Tate III R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 1389~1401.
- [13] Liu 万方数据 *Methods for observation and analysis in Chinese ecosystem research network: Soil physical and chemical analysis & discription of soil profiles*. Beijing: Standards press of China, 1996. 166~167.

- [14] Dong M. *Standard methods for observation and analysis in Chinese ecosystem research network: Survey, observation and analysis of terrestrial biocommunities*. Beijing: Standards Press of China. 1996. 70~71, 129~135.
- [15] Li F D, Yu Z N, He S J. *Agricultural microbiology experimental technique*. Beijing: China Agriculture Press, 1996. 82~83.
- [16] Schutter M, Dick R. Shift in substrate utilization potential and structure of soil microbial communities in response to carbon substrates. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 1481~1491.
- [17] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, **57**: 2351~2359.
- [18] Garland J L. Analytical approaches to the characterisation of sample microbial communities using patterns of potential C source utilisation. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, **28**: 213~221.
- [19] Insam H, Hitzl W. Data evaluation of community-level physiological profiles: a reply to letter of P. J. A. Howard. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**: 1198~1200.
- [20] Fu B J, Liu S L, Chen L D, *et al.* Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape. *Ecological Research*, 2004, **19**: 111~118.
- [21] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, *et al.* *Soil properties associated with slope positions*. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, **57**: 235~239.
- [22] Tian Y X, Li X Q, Yuan Z K, *et al.* Studies on benefit of soil and water conservation of different forest types in red soil regions of South Hunan. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, **9**(4): 80~82.
- [23] Hassan M M, Majumder A H. Distribution of organic matter in some representative forest soils of Bangladesh. *Indian Journal of Forestry*, 1990, **13**: 281~287.
- [24] Blair G J, Lefrey D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**: 1459~1466.
- [25] Nardi S, Cocheri G, Dell'Agnola G. Biological activity of humus. In: Piccolo A ed, *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, 1996. 361~406.
- [26] Powlson D S, Brooks P C, Christensen B T. Measurement of microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**: 159~164.
- [27] Seubert C E, Sanchez P A, Valverde C. Effects of land clearing methods on soil properties of an Ultisol and crop performance in the Amazon jungle of Peru. *Tropical Agriculture*, 1977, **54**: 307~321.
- [28] Allen J. Soil response to forest clearing in the United States and in the tropics: Geological and biological factors. *Biotropica*, 1985, **11**: 15~21.
- [29] Li Z A, Zou B, Cao Y S, *et al.* Nutrient properties of soils in typical degraded hilly land in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8): 1648~1656.
- [30] Cheng H, Zhang S. Nitrogen and phosphorus movement from loess tillage under modeling the rain fall-runoff erosion processes. *Scientia Geographica Sinica*, 1991, **11**: 142~148.
- [31] Li Z A, Fang W, Lü D M. Physical and chemical properties of soils in Heshan hilly land. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**supp(A): 93~102.
- [32] Sposito G. Ion exchange phenomena. In: Sumner ME ed. *Handbook of Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000. 241~253.
- [33] Haack S K, Garchow H M, Klug J, *et al.* Analysis of factors affecting the accuracy, reproducibility, and interpretation of microbial community carbon source utilization patterns. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**: 1458~1468.
- [34] Zabinski C A, Gannon J E. Effects of recreational impacts on soil microbial communities. *Environmental Management*, 1997, **21**(2): 233~238.
- [35] Haynes R J, Tregurtha R. Effects of increasing periods under intensive arable vegetable production on biological, chemical and physical indices of soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **28**: 259~266.
- [36] Duxbury J M, Nkambule S V. Assessment and significance of biologically active soil organic nitrogen. In: Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, Stewart BA eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA special publication no. 35. Soil Science Society of America, Madison, Wis., 1994. 125~146.
- [37] Roberson E B, Sarig S, Shennan C, *et al.* Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**: 1587~1594.
- [38] Rice C A, Parton T B, Beare M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: Doran JW, Jones AJ eds. *Methods for assessing soil quality*. SSSA special publication no. 49, Soil Science Society of America, Madison, Wis., 1996. 203~215.

- [39] Bending G D, Putland C, Rayns F. Changes in microbial community metabolism and labile organic matter fractions as early indicators of the impact of management on soil biological quality. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **31**: 78~84.
- [40] Lu Z F. Thinking on soil and water conservation research. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(1): 10~14.
- [41] Zhu J J. A review on fundamental studies of secondary forest management. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1689~1694.
- [42] Zhao H X, Zhou X F, Wang Y H, *et al.* Quality of forest evaluation standard and evaluation target. *Journal of Northeast Forestry University*, 2000, **28**(5): 58~61.

参考文献:

- [2] 余作岳, 彭少麟. 热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究. 广州: 广东科技出版社, 1996. 185~191.
- [3] 郭晓敏, 牛德奎, 刘菟秋, 等. 江西省不同类型退化荒山生态系统植被恢复重建措施. 生态学报, 2002, **22**(6): 878~884.
- [4] 刘菟秋, 杨家林, 杜天真, 等. 重建森林对退化红壤微生物特性的影响. 福建林学院学报, 2003a, **23**(1): 65~69.
- [5] 刘菟秋, 薛建辉, 杜天真, 等. 森林重建对红壤结构特性的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003b, **27**(1): 15~20.
- [6] 杨玉盛, 何宗明, 林光耀, 等. 退化红壤不同治理模式对土壤肥力的影响. 土壤学报, 1998, **35**(2): 276~282.
- [7] 杨玉盛, 何宗明, 邱仁辉, 等. 严重退化生态系统不同恢复与重建措施的植物多样性与地力差异研究. 生态学报, 1999, **19**(4): 490~494.
- [8] 胡斌, 段昌群, 王震洪, 等. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响. 土壤学报, 2002, **39**(4): 604~608.
- [9] 吕仕洪, 向悟生, 李先琨, 等. 红壤侵蚀区植被恢复研究综述. 广西植物, 2003, **23**(1): 83~89.
- [11] 俞慎, 李勇, 王俊华, 等. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨. 土壤学报, 1999, **36**(3): 413~422.
- [13] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. 166~167.
- [14] 董鸣. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法: 陆地生物群落调查观测与分析, 北京: 中国标准出版社, 1996. 129~135.
- [15] 李阜棣, 喻子牛, 何绍江. 农业微生物学实验技术. 北京: 中国农业出版社, 1996. 82~83.
- [22] 田育新, 李锡泉, 袁正科, 等. 湘南红壤区不同林分类型涵水保土效益研究. 水土保持研究, 2002, **9**(4): 80~82.
- [29] 李志安, 邹碧, 曹裕松, 等. 南方典型丘陵退化荒坡地土壤养分特征分析. 生态学报, 2003, **23**(8): 1648~1656.
- [30] 陈皓, 章申. 黄土地区氮磷流失的模拟研究. 地理科学, 1991, **11**: 142~148.
- [31] 李志安, 方炜, 吕冬梅. 鹤山丘陵 4 中土地利用类型土壤之理化性状. 生态学报, 1995, **15**(增刊): 93~102.
- [40] 卢宗凡. 关于水土保持工作的总结与思考. 水土保持学报, 2003, **17**(1): 10~14.
- [41] 朱教君. 次生林经营基础研究进展. 应用生态学报, 2002, **13**(12): 1689~1694.
- [42] 赵惠勋, 周晓峰, 王义弘, 等. 森林质量评价标准和评价指标. 东北林业大学学报, 2000, **28**(5): 58~61.