

## 贵州高原退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物数量的变化特征

魏媛<sup>1,2</sup>, 张金池<sup>3</sup>, 俞元春<sup>3</sup>, 喻理飞<sup>2</sup>

(1. 贵州财经学院 资源与环境管理学院, 贵州 贵阳 550004; 2. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 为了研究退化喀斯特植被恢复过程中土壤的生物学特性, 采集贵州花江喀斯特高原生态综合治理示范区内不同恢复阶段(裸地阶段、草本群落阶段、灌木群落阶段和乔木群落阶段)的土壤样品, 采用微生物培养法分析了退化喀斯特植被恢复过程中不同层次、不同季节及根际和非根际土壤微生物数量的分布特征。结果表明: 退化喀斯特植被恢复过程中土壤中的微生物数量分布存在较大差异。随着退化喀斯特植被的恢复, 土壤细菌、真菌、放线菌的数量及其总数明显上升, 表现为乔木群落阶段>灌木群落阶段>草本群落阶段>裸地阶段; 土壤剖面上土壤微生物数量均呈明显的垂直分布特征, 即随土层深度的增加, 呈递减趋势, 具体表现为 A 层>B 层( $P<0.05$ ); 从季节变化上来看, 土壤细菌、真菌、放线菌的数量及其总数季节变化明显, 夏季达最大 ( $6.16 \times 10^6$ ,  $1.11 \times 10^5$ ,  $3.16 \times 10^5$  及  $6.59 \times 10^6$  个·g<sup>-1</sup>), 冬季最小 ( $3.42 \times 10^6$ ,  $0.45 \times 10^5$ ,  $1.75 \times 10^5$  及  $3.64 \times 10^6$  个·g<sup>-1</sup>), 总体上表现为夏季>秋季>春季>冬季的特点( $P<0.05$ )。根际和根外变化明显, 表现为根际>非根际( $P<0.05$ )。退化喀斯特植被恢复增加了土壤微生物数量, 使土壤质量得以提高。图 2 表 2 参 21

**关键词:** 土壤学; 退化喀斯特; 植被恢复; 土壤微生物; 贵州花江

**中图分类号:** S718      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2009)06-0842-07

## Ecological characteristics of soil microbial amount during succession of degraded karst vegetation on the Guizhou Plateau

WEI Yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-chi<sup>3</sup>, YU Yuan-chun<sup>3</sup>, YU Li-fei<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Management, Guizhou College of Finance and Economics, Guiyang 550004, Guizhou, China; 2. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to study the biological characteristics of soil quality during degraded karst vegetation restoration, soil samples were collected from different restoration stages (bare land stage, herbaceous community stage, shrubby community stage and the arboreal community stage) in the Karst Plateau Ecological Synthesis Control Area in Huajiang of Guizhou. By using microbial incubation methods (with methods of dilution plate smearing and statistical analysis), the distributions of soil microbial amount in different soil layers as well as the rhizosphere and non-rhizosphere areas, and for different seasons, were studied. The results showed that with restoration of degraded karst vegetation, there was a highly significant increase

收稿日期: 2008-12-03; 修回日期: 2009-03-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01A09; 2006BAD03A1006); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB403206); 国家自然科学基金资助项目(30872076; 10961008); 贵州省科学技术基金资助项目[黔科合 J 字(2009)2280 号]

作者简介: 魏媛, 博士, 从事恢复生态学及土壤微生物生态研究。E-mail: weiyuan09876@163.com。通信作者: 喻理飞, 教授, 博士生导师, 从事喀斯特退化生态系统恢复研究。E-mail: gdyulifei@163.com

( $P < 0.01$ ) in microbial amount (bacteria, fungi, actinomyces, and total microbes) with the arboreal community stage > shrubby community stage > herbaceous community stage > bare land stage. Soil microbial amount significantly decreased ( $P < 0.05$ ) in the soil profile with an increase of soil depth with layer A > layer B. Also, for seasonal change, soil microbial amount (in  $\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ) was highest in summer ( $6.16 \times 10^6$  for bacteria,  $1.11 \times 10^5$  for fungi,  $3.16 \times 10^5$  for actinomyces, and  $6.59 \times 10^6$  for total microbial amount) and lowest in winter ( $3.42 \times 10^6$  for bacteria,  $0.45 \times 10^5$  for fungi,  $1.75 \times 10^5$  for actinomyces, and  $3.64 \times 10^6$  for total microbial amount). Overall, the seasons were summer > autumn > spring > winter, and statistical analysis showed significant differences ( $P < 0.05$ ). Additionally, microbial amount in the rhizosphere was significantly greater ( $P < 0.05$ ) than the non-rhizosphere. Thus, soil microbial amount increased during vegetation restoration of degraded karst lands, which indicated soil quality gradually improved. [Ch, 2 fig. 2 tab. 21 ref.]

**Key words:** soil science; degraded karst; vegetation restoration; soil-microorganisms; Guizhou Huajiang

贵州地处中国西南喀斯特地区的中心, 境内多为碳酸岩山地。因生态环境脆弱, 植被破坏后很难恢复, 形成石漠化。退化喀斯特森林生态系统的恢复与重建已成为农业生产环境改善, 区域经济发展及人民脱贫致富的迫切要求。土壤微生物几乎参与土壤中一切生物和生物化学反应, 是维持土壤品质的重要组成部分, 对土壤中的动植物残体和土壤有机质及其有害物质的分解、生物化学循环和土壤结构的形成过程起着重要的调节作用<sup>[1]</sup>。随着人们对土壤微生物重要生态学意义认识的不断加深, 对土壤微生物多样性的研究日益增多<sup>[2-3]</sup>。土壤微生物的数量分布, 不仅可以敏感地反映土壤环境质量的变化<sup>[4]</sup>, 而且亦是土壤中生物活性的具体体现<sup>[5]</sup>。土壤细菌、放线菌、真菌是土壤生态系统中微生物区系的主要组成成分, 在植被恢复过程中土壤微生物区系的演变是反映土壤环境质量变化的重要生物学指标之一。过去人们在研究生态系统恢复时, 较多地考虑植被指标以及土壤理化性质变化, 而对于土壤微生物数量的研究较少, 尤其对贵州退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物的数量变化缺乏系统研究<sup>[6-8]</sup>。因此, 以贵州喀斯特高原生态综合治理示范区不同恢复阶段的植物群落为研究对象, 研究土壤微生物数量的变化特征, 对于揭示退化群落恢复机制, 构建恢复技术体系具有重要的理论和实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处贵州省西南部贞丰县北盘江镇板围村,  $25^{\circ}38'982'' \text{ N}$ ,  $105^{\circ}38'487'' \text{ E}$ , 是国家“十五”科技攻关计划项目“喀斯特高原生态综合治理技术与示范”的试验示范区(始于 2001 年)。出露岩石主要以纯质石灰岩和白云岩为主, 裸露型喀斯特峡谷地貌, 海拔为 800 ~ 1 150 m; 河谷日照充足, 平均气温为  $15.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 极端最高气温为  $32.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  积温  $6\ 542 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 平均年降水量为 1 100 mm, 10 月至翌年 4 月为干旱季节, 5 - 10 月为雨季, 降水占全年的 90% 以上; 土层浅薄且不连续, pH 6.5 ~ 8.0, 土体持水能力很弱, 土壤经常处于干旱状态, 特别是冬季干旱非常明显。与常态地貌相比, 生境复杂多样, 有石面、石沟、石洞、土面等多种小生境类型。该区内退化植被自然恢复过程分为裸地阶段(I)、草本群落阶段(II)、灌木阶段(III)和乔木阶段(IV)4 个阶段。各阶段主要组成物种如下:

裸地阶段: 有极少量阳性先锋树种幼苗, 如野桐 *Mallotus tenuifolius*, 盐肤木 *Rhus chinensis*, 近无草本植物。

草本群落阶段: 草本植物主要有荩草 *Arthraxon hispidus*, 芒萁 *Dicranopteris dichotoma*, 猪毛蒿 *Artemisia scoparia*, 灰苞蒿 *A. roxburghiana* 等; 木本植物主要有野桐, 青檀 *Pteroceltis tatarinowii*, 火棘 *Pyracantha fortuneana* 和构树 *Broussonetia papyrifera* 等。

灌木群落阶段: 主要有川钓樟 *Lindera pulcherima* var. *hemsleyana*, 清香木 *Pistacia weinmannifolia*, 云南鼠刺 *Itea yunnanensis*, 圆叶乌桕 *Sapium rotundifolium*, 山麻杆 *Alchornea davidii*, 石岩枫 *Mallotus*

*repandus*, 烟管荚蒾 *Viburnum utile*, 重阳木 *Bischofia polycarpa*, 暖木 *Meliosma veitchiorum*, 薄叶鼠李 *Rhamnus leptophylla* 和悬钩子蔷薇 *Rosa rubus* 等。

乔木群落阶段: 乔木层主要有青檀, 朴树 *Celtis sinensis*, 南酸枣 *Choerospondias axillaris*, 香椿 *Toona sinensis*, 小叶榕 *Ficus concinna* 和川钓樟等; 灌木层主要有竹叶椒 *Zanthoxylum planispinum*, 喜玛拉雅旌节花 *Stachyurus himalaicus*, 灰毛浆果楝 *Cipadessa cinerascens*, 山麻杆, 野桐和石岩枫等。

## 1.2 土样采集

以空间代替时间的方法<sup>[9]</sup>, 在有代表性的地段, 选择裸地、草本群落、灌木群落和乔木群落4种类型的样地(面积分别为800 m<sup>2</sup>)。在春(2007年3月)、夏(2007年8月)、秋(2007年11月)、冬(2008年1月)用锄头、铁铲和土壤刀以S型或梅花型5点混合取样法。对每一类型样地分不同生境(土面、石沟和石槽), 不同层次(在土壤剖面上根据颜色不同划分A层和B层, 先取10~20 cm的B层土, 再取0~10 cm的A层土), 根际和非根际(Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ3个恢复阶段分别选出优势物种各5~6株作为采样点, 分别在距树干5~50 cm的范围内, 先用铁铲除去枯枝落叶层, 然后用土壤刀从树干基部开始逐段逐层地小心挖去上层覆土, 追踪根系的伸展方向, 然后沿侧根找到须根部分, 剪下分枝, 小心将须根带土取出, 取距根表1~4 mm范围内的土壤作为根际土, 4 mm范围外的土壤作为非根际土, 每个样品重复5次)进行土壤取样。同一样地按相同生境、相同层次的5个重复土样等比例混匀为一个混合样, 每一类型样地共取7个混合样(裸地阶段6个), 编号, 除去杂物和石块, 迅速将混合样放入无菌袋内并装入带冰块的取样箱中运回。在实验室的无菌台上将混合样除去可见的土壤动植物残体, 过2 mm筛, 将它们分为2份, 1份鲜样保存于4℃冰箱中, 立即进行土壤微生物学指标分析; 另1份土样经风干, 磨细, 过100目筛, 备用。供试土壤的基本情况见表1。

表1 供试土壤的基本情况

恢复阶段	植被类型	土壤含水量/%	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	pH	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )
I	裸荒地	16.84 a	1.39 a	7.17 a	27.95 a
II	草地	22.52 b	1.31 a	7.23 a	34.39 b
III	灌木林	26.19 c	1.23 b	7.32 a	49.05 c
IV	森林	30.79 d	1.08 c	7.40 b	57.54 d

说明: 数据为混合样品测定的平均值, 同列不同小写字母间表示LSD检验差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

## 1.3 试验设计

土壤容重和含水量用常规方法测定<sup>[10]</sup>, 有机碳的测定采用重铬酸钾-硫酸外加热法<sup>[10]</sup>; 土壤pH采用蒸馏水(土水质量比1.0:2.5)浸提30 min, 用pH S-3C精密pH计测定。

土壤微生物记数采用稀释平板表面涂布法<sup>[11]</sup>; 细菌、真菌、放线菌分别采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、马丁氏(Martin)培养基和改良高氏一号培养基。具体操作参照《土壤微生物分析手册》<sup>[11]</sup>及《土壤微生物生态学及其实验技术》<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤3类微生物数量的垂直分布

土壤微生物由于受到植物根系、土壤肥力以及土壤水分、温度等因素的影响, 不同的土壤深度, 土壤微生物在种类和数量上存在很大差异, 在土壤剖面的不同深度表现一定的规律性, 因此分别对植被演替过程中不同土层的3类土壤微生物类群进行测定。分布情况如图1所示。

从图1中可以看出, 3类微生物数量及微生物总数在土壤剖面上都呈现出垂直分布特征, 其数量随着土层深度的增加而减少, 土壤中细菌、真菌、放线菌数量及微生物总数都主要集中在A层, B层微生物数量明显减少, 表现为A层大于B层的分布特点。统计分析表明差异显著( $P < 0.05$ ), 在4个恢复阶段的微生物总数A层分别是B层的1.199, 1.345, 1.376和1.209倍。表层土壤微生物数量多于表下层的主要原因是有机质以及根系作用, 土壤表层积累了较多的有机物质(表层有机质是表下层的1.404倍), 土壤有机质是微生物营养和能量的主要来源, 土壤微生物主要栖息在有机质颗粒上; 土壤表层有丰富密集的植物根系, 许多根系分泌物及脱落物都利于微生物的生长繁殖。所以, 土壤微生物在土壤剖面上表现出明显的垂直分布特征。而且, 从图1中还可看出, 不管是上层土壤还是下层

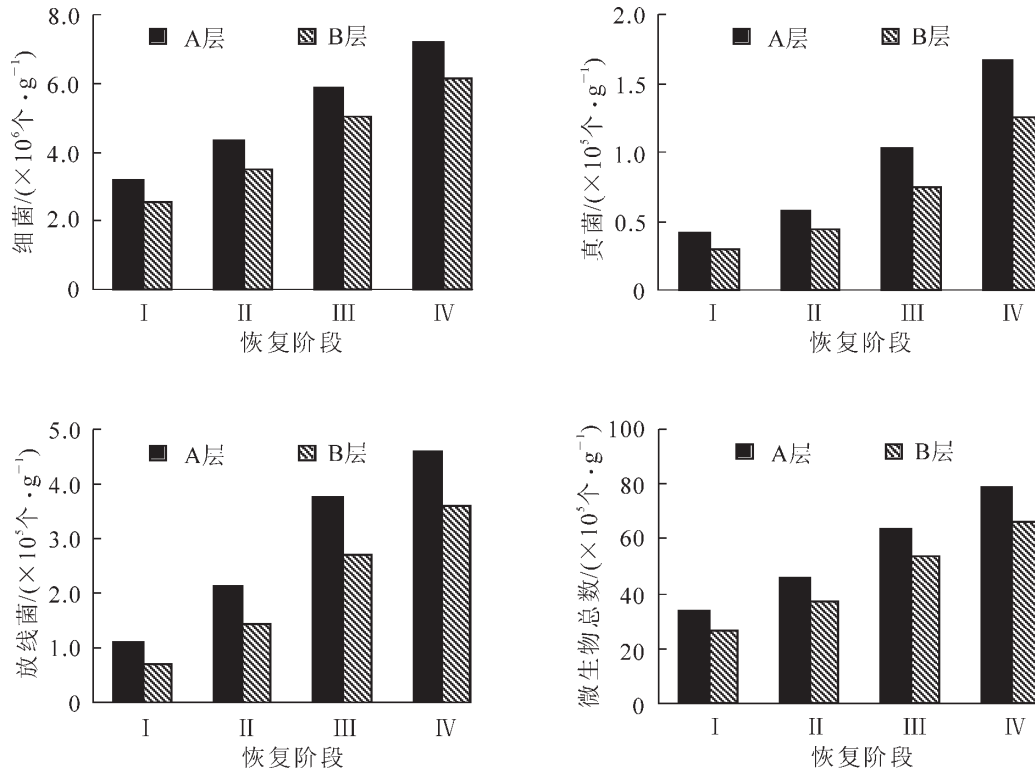


图 1 植被恢复过程中土壤细菌、真菌、放线菌数量及微生物总数的垂直变化

Figure 1 Vertical change of soil bacteria, fungi, actinomycetes and total microbes amount during the vegetation restoration

土壤，3类微生物数量及微生物总数均随着植被的恢复而不断增加，且细菌数量在微生物总数中占的比例最大，放线菌次之，真菌最少。

### 2.2 根际和非根际土壤 3 类微生物数量分布

植物根周围土壤中的微生物数量和种类与非根际土壤不同，通常把土壤与根接触的区域称为根际。根际土壤微生物数量( $R$ )和非根际土壤微生物数量( $S$ )的比值称为根际效应，即  $R/S$ 。在树木生长过程中，根系一方面从土壤中摄取水分、养分，同时也向土壤溢泌质子、离子，并释放大量的有机物质。根据报道，植物有高达 30% 的光合产物以有机碳形式释放进入根际土壤<sup>[13]</sup>。这些有机物质不仅为根际微生物提供丰富的碳源，而且极大地改变根际微区的物理和化学环境，进而对根际土壤养分产生重大影响<sup>[13]</sup>，产生根际效应<sup>[14-15]</sup>。

林木根系在生命活动过程中能不断地产生各种分泌物和脱落物，这些物质对生存在根际区的土壤微生物数量、活性及其生态分布具有十分重要的影响。退化喀斯特植被恢复过程中 3 类微生物数量根际和非根际分布统计结果见表 2。从表 2 可见，根际、非根际土壤 3 类微生物数量分布均随植被恢复而增加，且表现出  $R > S$  的特点，具有明显的根际效应。说明退化喀斯特植被恢复中根际微生物总的活

表 2 植被恢复过程中根际、非根际土壤细菌、真菌和放线菌数量变化

Table 2 Change of soil bacteria, fungi, actinomycetes amount of rhizosphere and non-rhizosphere during the vegetation restoration

恢复阶段	细菌数量/ $(\times 10^6 \text{个} \cdot \text{g}^{-1})$			真菌数量/ $(\times 10^5 \text{个} \cdot \text{g}^{-1})$			放线菌数量/ $(\times 10^5 \text{个} \cdot \text{g}^{-1})$		
	$R$	$S$	$R/S$	$R$	$S$	$R/S$	$R$	$S$	$R/S$
II	5.257 a	3.907 a	1.346 a	0.824 a	0.511 a	1.612 a	3.047 a	1.881 a	1.620 a
III	6.723 b	5.463 b	1.231 a	1.353 b	0.888 a	1.524 a	4.518 b	3.220 b	1.403 b
IV	8.002 c	6.693 b	1.196 b	2.120 c	1.461 b	1.451 b	5.446 c	4.164 c	1.308 b

说明：数据为混合样品测定的平均值，同列不同小写字母间表示 LSD 检验差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。R 表示根际，S 表示非根际，表中数据为 4 个季节的平均值。

性大于非根际。但根际效应( $R/S$ )随着植被的恢复而呈现下降的趋势。草本群落阶段土壤微生物的根际效应比其他几个阶段的明显,其土壤细菌、真菌、放线菌细菌  $R/S$  值分别是 1.346, 1.612 和 1.620, 而乔木群落阶段相应的  $R/S$  值则仅为 1.196, 1.451 和 1.308, 说明在土壤条件较差时, 根际微生物效应更为明显, 这与杨玉盛等<sup>[13]</sup>研究报道的结果相一致。

### 2.3 土壤 3 类微生物数量的季节动态

季节是影响土壤微生物生命活动的主要因素, 加之环境中的微生物大多数是属于中温型( $25 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 其生活繁殖速度及其数量随温度的升高而加快增多。夏季雨水多, 土壤含水量比秋季高, 更适宜土壤微生物的生长繁殖。因此, 其土壤微生物会随着季节的变化而变化, 土壤微生物的总数均随着气温的升高而增加。在正常情况下, 夏季的微生物数量比秋季多。

图 2 结果显示, 退化喀斯特植被恢复过程中土壤 3 类微生物数量及其总数的分布在各季节均表现为乔木群落阶段 > 灌木群落阶段 > 草本群落阶段 > 裸地阶段的分布。在不同季节, 土壤微生物的数量变化具有明显的季节性, 不同植被恢复阶段细菌、放线菌数量及微生物总数分布表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季的分布特点; 真菌数量分布表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季的分布特点。因为夏、秋两季的气温和降水等气候条件相对春、冬季而言, 更适宜林木的生长, 使其根系活动处于生长旺盛期, 分泌的物质增多, 为微生物的生长繁殖提供了有利条件; 同时这种温暖湿润的条件也较适宜微生物的生长繁殖。而在春、冬两季, 尤其是在冬季, 由于气温较低和降水量减少, 微生物的生长繁殖和林木根系的生长活动均受到抑制, 加之微生物又难以利用林地中的枯枝落叶等难分解物质, 所以在冬季其数量最低。统计分析表明, 土壤细菌、真菌及微生物总数在不同季节间变化差异极显著( $P < 0.01$ ), 放线菌在不同季节间变化差异显著( $P < 0.05$ )。这说明了各季节土壤细菌在微生物总数中占绝对优势, 主要原因是细菌的竞争能力强。

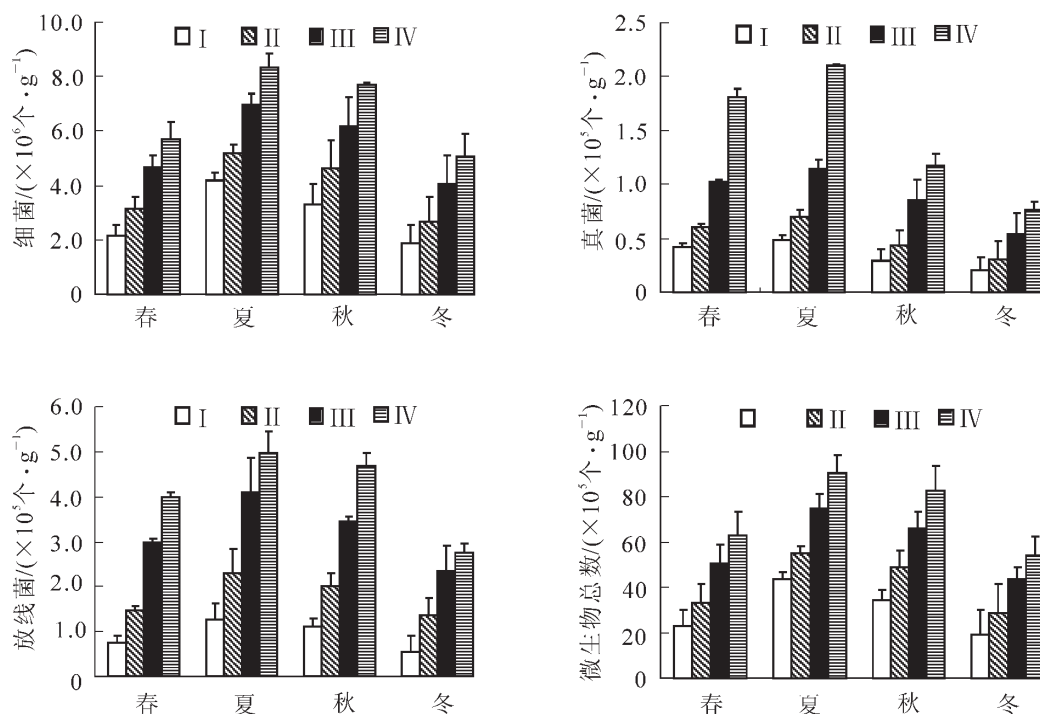


图 2 植被恢复过程中土壤细菌、真菌和放线菌数量和微生物总数的季节动态

Figure 2 Seasonal dynamics of soil bacteria, fungi, actinomycetes and total microbes amount during the vegetation restoration

## 3 结论

退化喀斯特植被恢复过程中, 土壤微生物数量具有垂直分布特征, 即随着土层深度的增加而减少, A 层 > B 层, 方差分析表明差异性显著( $P < 0.05$ )。土壤微生物数量分布根际和非根际变化明显,

表现为根际>非根际, 统计分析表明差异性显著( $P<0.05$ )。这是因为林木根系的分泌物和根表脱落物为微生物的生长、繁衍提供了丰富的养分和能源物质<sup>[16]</sup>, 改变了根际的理化环境, 促进了根际微生物的发育<sup>[17]</sup>。根际土壤比非根际土壤更能反映退化喀斯特植被不同恢复阶段的土壤微生物数量的变化规律, 从而说明研究根际微生物更能确切地反映微生物对土壤生物活性及林木生长的影响。

土壤微生物数量受土壤有机质、温度、水分、植物残体及植物生长的综合影响<sup>[18]</sup>。植被恢复阶段不同, 其林内生物物种不同, 土壤环境存在差异, 形成了不同的林内小气候环境, 就导致了不同植被恢复阶段土壤微生物在组成与数量上的不同, 并表现出显著的季节差异性。夏季, 由于气温较高及土壤含水量高, 致使微生物数量在一年中出现高峰。

喀斯特森林演替(森林—灌木林—灌丛—草地—裸荒地)过程中, 土壤 3 类微生物数量及微生物总数下降<sup>[19]</sup>。本试验也得到与之相一致的结果。土壤微生物数量与土壤微生物生物量碳成正相关关系<sup>[20]</sup>, 土壤微生物生物量碳可以作为林地土壤肥力指标<sup>[21]</sup>。土壤微生物数量的这种分布差异表明, 除了与土壤的水分、温度和土壤肥力等条件有关, 微生物数量还与植被的恢复有关。这说明退化喀斯特植被恢复过程中土壤的生态改善(如水土保持、水源涵养和土壤生态肥力的增加等)逐渐提高。

本实验采用的为表面接种法进行微生物培养、计数, 这样以来, 严格厌氧菌及需要特殊生长因子的微生物则无法生长, 也就得不到其数量, 由于研究微生物的传统方法不能真实反映微生物在自然界的原貌, 许多微生物不能在人工培养基中生长, 微生物的研究面临着挑战。随着分子生物学的发展, 从提取核酸入手, 对环境微生物进行研究是一个新的研究方向, 这些将有待于作进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] JORDAN D. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields [J]. *Biol Fert Soil*, 1995, **19**: 54 - 60.
- [2] 蔡燕飞, 廖宗文, 章家恩, 等. 生态有机肥对番茄青枯病及土壤微生物多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, **14** (3): 349 - 353.  
CAI Yanfei, LIAO Zongwen, ZHANG Jiaen, *et al.* Effect of ecological organic fertilizer on tomato bacterial wilt and soil microbial diversities [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, **14** (3): 349 - 353.
- [3] 陈素华, 孙铁珩, 周启星, 等. 微生物与重金属间的相互作用及其应用研究[J]. *应用生态学报*, 2002, **13** (2): 239 - 242.  
CHEN Suhua, SUN Tiehang, ZHOU Qixing, *et al.* Interaction between microorganisms and heavy metals and its application [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13** (2): 239 - 242.
- [4] BROOKES P C, MCGRATH S P. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass [J]. *J Soil Sci*, 1984, **35**: 341 - 346.
- [5] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, **19**: 703 - 707.
- [6] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ)[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2003.
- [7] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中. 喀斯特森林不同种组的耐旱适应性[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2002, **26** (1), 19 - 22.  
YU Lifei, ZHU Shouqian, YE Jingzhong. Preliminary study on the adaptability of tolerate-drought for different species group in Karst forest [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2002, **26** (1): 19 - 22.
- [8] 朱海燕, 刘忠德, 钟章成. 喀斯特退化生态系统不同恢复阶段土壤质量研究[J]. *林业科学研究*, 2006, **19** (2): 248 - 252.  
ZHU Haiyan, LIU Zhongde, ZHONG Zhangcheng. Effect of different succession stages on soil quality in karst degraded mountain [J]. *For Res*, 2006, **19** (2): 248 - 252.
- [9] 梁士楚. 贵州喀斯特山地云贵鹅耳枥种群动态研究[J]. *生态学报*, 1992, **12** (1): 53 - 60.  
LIANG Shichu. Dynamics of pubescent hornbeam population in karst mountain of Guiyang [J]. *Acta Ecol Sin*, 1992, **12** (1): 53 - 60.
- [10] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [11] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

- [12] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] 杨玉盛, 何宗明, 邹双全, 等. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性的研究[J]. 生态学报, 1998, **18** (2): 198 - 202.  
YANG Yusheng, HE Zongming, ZOU Shuangquan, *et al.* A study on soil microbes and biochemistry of rhizosphere and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis kauakamii* [J]. *Acta Ecol Sin*, 1998, **18** (2): 198 - 202.
- [14] LYNCH J M. *The Rhizosphere*[M]. Ottawa: John Wiley Chichester, 1990.
- [15] 陆雅海, 张福锁. 根际微生物研究进展[J]. 土壤, 2006, **38** (2): 113 - 121.  
LU Yahai, ZHANG Fusuo. The advances in rhizosphere microbiology [J]. *Soils*, 2006, **38** (2): 113 - 121.
- [16] 徐秋芳, 姜培坤. 毛竹竹根区土壤微生物数量与酶活性研究[J]. 林业科学研究, 2001, **14** (6): 648 - 652.  
XU Qiufang, JIANG Peikun. Study on soil microorganism and enzyme activity of *Phyllostachys pubescens* rhizosphere [J]. *For Res*, 2001, **14** (6): 648 - 652.
- [17] 罗明, 单娜娜, 文启凯, 等. 几种固沙植物根际土壤微生物特性研究[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8** (6): 618 - 622.  
LUO Ming, SHAN Nana, WEN Qikai, *et al.* Study on the microbial characteristics of rhizosphere about several fixed sand plants [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, **8** (6): 618 - 622.
- [18] 刘苑秋, 杨家林, 杜天真, 等. 重建森林对退化红壤微生物特性的影响[J]. 福建林学院学报, 2003, **23** (1): 65 - 69.  
LIU Yuanqiu, YANG Jialin, DU Tianzhen, *et al.* Effect of rehabilitated forest on soil microbial characteristics of severely degraded red soil region [J]. *J Fujian Coll For*, 2003, **23** (1): 65 - 69.
- [19] 龙健, 李娟, 江新荣, 等. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究[J]. 土壤学报, 2004, **41** (4): 597 - 602.  
LONG Jian, LI Juan, JIANG Xinrong, *et al.* Soil microbial activities in Maolan karst forest, Guizhou Province [J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, **41** (4): 597 - 602.
- [20] 魏媛, 喻理飞, 张金池. 退化喀斯特植被恢复过程中微生物学特征[J]. 林业科学, 2008, **44** (7): 6 - 10.  
WEI Yuan, YU Lifei, ZHANG Jinchi. Soil microbial characteristics during succession of degraded karst vegetation [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (7): 6 - 10.
- [21] 姜培坤, 徐秋芳, 俞益武. 土壤微生物量碳作为林地土壤肥力指标[J]. 浙江林学院学报, 2002, **19** (1): 17 - 19.  
JIANG Peikun, XU Qiufang, YU Yiwu. Microbial biomass carbon as an indicator for evaluation of soil fertility [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2002, **19** (1): 17 - 19.