

人工油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 恢复过程中 土壤微生物生物量 C、N 的变化特征

刘占锋^{1 2}, 刘国华¹, 傅伯杰^{1,*}, 胡会峰^{1 2}, 郑晓翀^{1 2}, 吴雅琼^{1 2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 采用时空替代法, 选取 15a (PF15)、25a (PF25)、30a (PF30) 的人工油松林作为样地, 并选取灌丛作为参考植被, 研究了植被恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 以及土壤养分的变化特征, 同时探讨了它们之间的相互关系。研究结果表明随着恢复的进行, 土壤质量得到了改善, 主要表现为有机碳、全氮、粘粒含量、土壤含水量的上升和 pH 值、容重的下降。土壤微生物生物量 C、N 分别在 155.00 ~ 885.64 mg/kg 和 33.73 ~ 237.40 mg/kg 的范围内变化。土壤微生物生物量 C、N 在植被恢复的初期显著低于灌丛, 而后随着恢复的进行逐步增长。土壤微生物生物量 C、N 与植被恢复时间的相关性没有达到统计学上的显著水平, 但是土壤微生物生物量 C 与土壤有机碳、全氮、全磷呈显著正相关, 这表明植被恢复过程中土壤微生物生物量与土壤养分状况关系密切, 植被恢复通过改善土壤养分状况间接地影响土壤微生物生物量的变化。 C_{mic}/TOC 在 1.38% ~ 4.75% 的范围内变化。 C_{mic}/TOC 随着植被恢复不断下降, C_{mic}/TOC 与植被恢复时间和土壤有机碳呈显著负相关, 这表明植被恢复过程中, 惰性有机质积累导致供应土壤微生物的活性有机质减少, C_{mic}/TOC 同时受土壤有机质的数量和质量影响。

关键词 土壤微生物生物量 C; 土壤微生物生物量 N; 土壤理化性质; 恢复年限; 人工油松

文章编号: 1000-0933 (2007) 03-1011-08 中图分类号: S151 文献标识码: A

Dynamics of soil microbial biomass C, N along restoration chronosequences in pine plantations

LIU Zhan-Feng^{1 2}, LIU Guo-Hua¹, FU Bo-Jie^{1,*}, HU Hui-Feng^{1 2}, ZHENG Xiao-Xuan^{1 2}, WU Ya-Qiong^{1 2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 1011 ~ 1018.

Abstract : In this paper, the chronosequence approach was adopted. Three sites were selected with pine (*Pinus tabulaeformis*) plantations along the restoration chronosequences (15a (PF15), 25a (PF25), 30a (PF30)), and native shrub communities (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*, respectively, and *Corylus heterophylla*) were chosen as reference. The objective of this study was to investigate the dynamics of soil microbial biomass C, N, and soil physico-chemical properties along the restoration chronosequences. In addition, the correlation between soil microbial properties and physico-chemical properties were examined. The results showed that the status of soil fertility in shrub community was significantly better than

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目 (40321101); 国家自然科学基金项目 (40571005); 国家重点基础发展规划项目 (2002CB412503)

收稿日期: 2006-02-16; 修订日期: 2006-11-15

作者简介: 刘占锋 (1978 ~) 男, 河北邯郸人, 博士生, 主要从事植被恢复和土壤微生物研究. E-mail: liuzhanfeng_2008@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@cees.ac.cn

Foundation item : This work was financially supported by Innovation research group of National Natural Science Foundation of China (No. 40321101), the National Natural Science Foundation of China (No. 40571005), the National Key Basic Research Development Foundation of China (No. 2002CB412503)

Received date 2006-02-16; **Accepted date** 2006-11-15

Biography LIU Zhan-Feng, Ph. D., mainly engaged in vegetation restoration and soil microbiology. E-mail: liuzhanfeng_2008@126.com

in pine plantation in early restoration stage ;soil physico-chemical properties were gradually improved along the restoration chronosequences including the accumulation of soil organic carbon ,total nitrogen ,soil clay content ,soil moisture content and general declines in pH and bulk density. Soil microbial biomass C ,N ranged from 155 to 885.64 mg/kg ,and 33.73 — 237.40mg/kg , respectively. Soil microbial biomass C ,N declined significantly in early restoration stage compared with shrub communities ,and increased with the extension of plant restoration. Although statistically significant correlations were not found between soil microbial biomass C ,N and restoration chronosequences ,soil microbial biomass C was positively related to soil organic carbon ,total nitrogen ,and total phosphorus ,suggesting that soil microbial biomass was closely correlated with soil fertility and plant restoration could indirectly influence soil microbial biomass by improving soil nutrient. C_{mic}/TOC ranged from 1.38% to 4.75% ,and declined gradually with plant restoration. Correlation analysis indicated that C_{mic}/TOC was negatively related to soil organic carbon and restoration chronosequences. The results suggested that changes in soil microbial biomass were related not only with the quantity ,but also the quality of soil organic matter during plant restoration ,and that plant restoration was critical for the improvement of soil physicochemical properties and microbial properties in pine plantations of Southwest China.

Key Words : soil microbial biomass C ;soil microbial biomass N ;soil physicochemical properties ;restoration chronosequences ;pine plantation

土壤微生物参与了养分循环、有机质分解等诸多生态过程 ,尤其在陆地生态系统 C 循环过程中发挥着重要作用^[1]。由于微生物对外界的胁迫的反应要比植物和动物敏感^[2] ,微生物群落的大小、组成和活性在不同的管理措施之间差异明显 ,即管理措施和恢复方式可以显著地影响土壤微生物群落的结构和功能^[3]。土壤微生物指标已经用来评价退化生态系统中生物群系与恢复功能之间的联系并能为退化土地恢复提供有用的信息^[4]。作为常用的反映微生物群落状态和功能的指标^[5] ,微生物生物量是土壤有机碳具有活性的部分 ,也是土壤速效养分的来源 ,在土壤发育的过程中常随着有机质的积累而增加^[6]。微生物生物量与土壤肥力和土壤健康密切相关^[7] ,可以作为生态学指标来反映人类活动的影响^[8]。此外 ,微生物生物量也用来反映微生物群落的大小。在受干扰或恢复中的生态系统 ,微生物生物量在有机质和氮素周转中发挥着重要作用^[9]。

近年来 ,人工林已被作为恢复方式来重建本地的动植物物种和恢复土壤肥力^[10]。诸多研究表明人工林通过次生演替可以恢复土壤性质和维持土壤肥力^[11]。尽管土壤微生物的变化具有重要的生态学意义 ,与动植物的多样性相比 ,植被演替过程中土壤微生物的变化研究很少。本文的目的就是研究人工油松林恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征以及与土壤理化性质间的相互关系 ,进而为评价人工林的恢复效果提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 样地概况

研究区位于中国科学院成都生物研究所茂县生态站 (103°53'58"E ,31°41'07"N ,海拔 1830 m)附近 ,地处岷江上游左岸一级支流——大沟流域^[12]。该区地处青藏高原东南边缘深切割区 ,是典型的高山峡谷地貌类型 ,属暖温带气候 ,年均温 8.9 ℃ ,年降雨量 900 mm ,年蒸发量 795.8 mm。该地段土壤为淋溶褐土至棕壤性土 ,母岩多变质岩 ,母质为千枚岩残坡积物 ,高阶上为第四纪黄土状物质^[13]。现存植被均为旱生的灌草丛 ,主要以锐齿胡栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、榛子 (*Corylus heterophylla*)和虎榛子 (*Qstryopsis davidianti*)等灌丛为主 ,人工林有油松 (*Pinus tabulaeformis*)、华山松 (*Pinus armandi*)、云杉 (*Picea asperata*)等。本研究采用时空替代法 ,选取 15a (PF15)、25a (PF25)、30a (PF30)的油松林作为样地 ,并选取灌丛 (锐齿胡栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)和榛子 (*Corylus heterophylla*))作为参考植被 ,研究了植被恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 以及土壤养分的变化特征 ,同时探讨了它们之间的相互关系。样地具体描述见表 1。

1.2 研究方法

每个样地设 3 个样方,样方设在同一坡面上,具有相似的坡度和坡位,同一样地样方间不存在微地形上的差异,上述样方可以看作是真重复,因为样方间的距离超过了绝大多数土壤理化性质和土壤微生物性质的空间依赖性^[4]。土壤取样时间是 2005 年 4 月,采用随机取样法,分 0~10cm、10~20cm 两个层次,每个样方取五个剖面,然后分层混匀,一部分风干进行土壤理化性质分析,另一部分放在塑料封口袋中,4℃ 保存,进行土壤微生物生物量 C、N 分析。

表 1 样地概况
Table 1 Characteristics of the sampling sites

样地 Sites	海拔 Altitude (m)	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	坡向 Slope aspect (°)	坡度 Slope degree (°)
PF15	1785	31°41'42"	103°52'41"	NE56	45
PF25	1991	31°42'00"	103°52'24"	WS10	19
PF30	2131	31°42'14"	103°53'49"	WN23	31
Shrub	1774	31°41'42"	103°52'41"	NE56	42

土壤理化性质按照中国土壤学会编写的土壤农业化学分析方法进行^[15],土壤质地采用 Mastersizer 2000 粒度分析仪 (Malvern Instruments Co. UK),土壤含水量用烘干法,容重用环刀法,pH 用酸度计(土:水=1:2.5),电导率用电导率仪(土:水=1:2.5),有机质用重铬酸钾油浴外加热法,全氮用凯氏消煮法,全磷用酸溶-钼锑抗比色法。土壤微生物生物量 C、N 采用氯仿熏蒸浸提法测定。土壤浸提液中的有机碳用 UV-Persuate 总有机碳分析仪 (Phoenix 8000) (Tekmar-Dohrmann Co. USA) $K_C=0.45$ ^[16]。浸提液中的全氮采用凯氏消煮法测定 $K_N=0.54$ ^[17]。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质的变化

表层土壤 (0~10cm)随着植被恢复时间的增加,土壤含水量呈增加趋势,方差分析表明不同恢复年限间土壤含水量差异显著(表 2)。土壤粘粒含量沿恢复年限呈增加趋势,土壤粉粒含量和容重则随着植被恢复不断下降,砂粒含量的变化则不规律。下层土壤 (10~20cm)表现出与表层土壤类似的规律。

表 2 人工油松林恢复过程中土壤物理性质的变化
Table 2 Dynamics of soil physical properties along the restoration chronosequences in pine plantations

样地 Sites	土壤深度 Soil depth (cm)	质地 Texture			容重 (g/cm ³) Bulk density	SMC (%)
		粘粒 (%) Clay	粉粒 (%) Silt	砂粒 (%) Sand		
PF15	0~10	5.56	68.14	26.30	1.17 (0.21)	3.0 (1.79) c
PF25		11.14	63.44	25.42	1.02 (0.02)	19.97 (0.49) b
PF30		11.87	60.85	27.28	0.95 (0.07)	34.58 (2.31) a
Shrub		5.57	70.25	24.18	1.12 (0.26)	3.74 (0.80) c
PF15	10~20	6.11	70.98	22.92	1.28 (0.10)	3.58 (1.76) c
PF25		10.04	64.45	25.50	1.33 (0.21)	17.39 (1.81) b
PF30		12.43	62.93	24.64	1.03 (0.05)	30.76 (1.57) a
Shrub		5.36	69.62	25.01	1.18 (0.06)	3.98 (1.12) c

* 括号内的数值为标准误差 The value within bracket is the standard error,同一列中标有不同小写字母的数值表示存在 5% 差异,下同
Different lower letters in the same column indicate significant difference at $p=0.05$, the same below

2.2 土壤化学性质的变化

植被恢复过程中土壤化学性质也发生了明显的变化(表 3)。在植被恢复的初期,15a 油松林的土壤的养分状况明显要比灌丛的差。随着植被恢复的进行,土壤有机碳和全氮逐渐增加,不同恢复年限之间差异显著,分别在 30a 的油松林中达到最高值 3.53% 和 0.41%。全磷和电导率随着植被恢复表现出先下降后上升的

“U”型的变化规律,PF25 明显比 PF15、PF30 的低。土壤 pH 值在恢复年限间差异不明显,但整体上呈轻微下降的趋势。下层土壤化学性质的变化规律与表层类似。

表 3 人工油松林恢复过程中土壤化学性质的变化

Table 3 Dynamics of soil chemical properties along the restoration chronosequences in pine plantations						
样地 Sites	土壤深度 (cm) Soil depth	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	TOC (%)	TN (%)	TP (g/kg)
PF15	0 ~ 10	7.08 (1.16)ab	154.95 (14.35) b	1.28 (0.07) d	0.18 (0.04) b	0.41 (0.11) b
PF25		5.58 (0.06) b	90.50 (10.18) d	2.29 (0.11) c	0.16 (0.02) b	0.21 (0.01) c
PF30		6.11 (0.33) b	144.95 (12.37) bc	3.53 (0.03) a	0.41 (0.05) a	0.60 (0.01) a
Shrub		8.08 (0.08) a	233.00 (32.25) a	2.74 (0.03) b	0.31 (0.03) a	0.56 (0.02) ab
PF15	10 ~ 20	7.30 (1.32) ab	123.15 (49.00)	1.00 (0.08) c	0.24 (0.15)	0.41 (0.06) b
PF25		5.51 (0.02) b	81.85 (17.61)	1.11 (0.08) c	0.10 (0.03)	0.17 (0.02) c
PF30		6.19 (0.09) b	80.75 (12.80)	2.38 (0.01) a	0.29 (0.01)	0.54 (0.01) a
Shrub		8.31 (0.05) a	199.60 (27.33)	1.34 (0.02) b	0.25 (0.06)	0.55 (0.01) a

* EC 电导率 Electronic conductivity ;TOC 总有机碳 Total organic carbon ;TN 全氮 Total nitrogen ;TP 全磷 Total phosphorus 括号内的数值为标准误差 The value within bracket is the standard error

2.3 土壤微生物生物量 C、N 的变化

土壤微生物生物量 C、N 沿植被恢复年限差异显著 (图 1)。表层土壤的微生物生物量 C、N 明显高于下层土壤。微生物生物量 C、N 分别在 155.00 ~ 885.64mg/kg 和 33.73 ~ 237.40mg/kg 的范围内变化。与灌丛相比,表层土壤的微生物生物量 C、N 在植被恢复的初期显著下降,而后随着恢复的进行呈逐步增长的趋势,下层土壤也表现出类似的规律。方差分析表明,PF30 的微生物生物量 C 与 PF15、PF25 差异显著,但是 PF15 与 PF25 之间差异不明显。微生物 N 的方差分析结果表明在表层,PF15 与 PF25、PF30 差异显著,但 PF25 与 PF30 之间差异不显著;在下层土壤则表现为 PF30 与 PF25、PF15 差异显著,但 PF15 与 PF25 之间差异不显著。 C_{mic}/TOC 和 N_{mic}/TN 沿植被恢复年限的变化趋势见图 2。 C_{mic}/TOC 和 N_{mic}/TN 分别在 1.38% ~ 4.75% 和 1.15% ~ 7.83% 的范围内变化。在表层土壤 C_{mic}/TOC 在植被恢复的初期上升,而后随着恢复的进行下降最后达到一个稳定水平;在下层土壤, C_{mic}/TOC 随着恢复的进行逐步下降。 N_{mic}/TN 的变化趋势则与 $C_{mic}/$

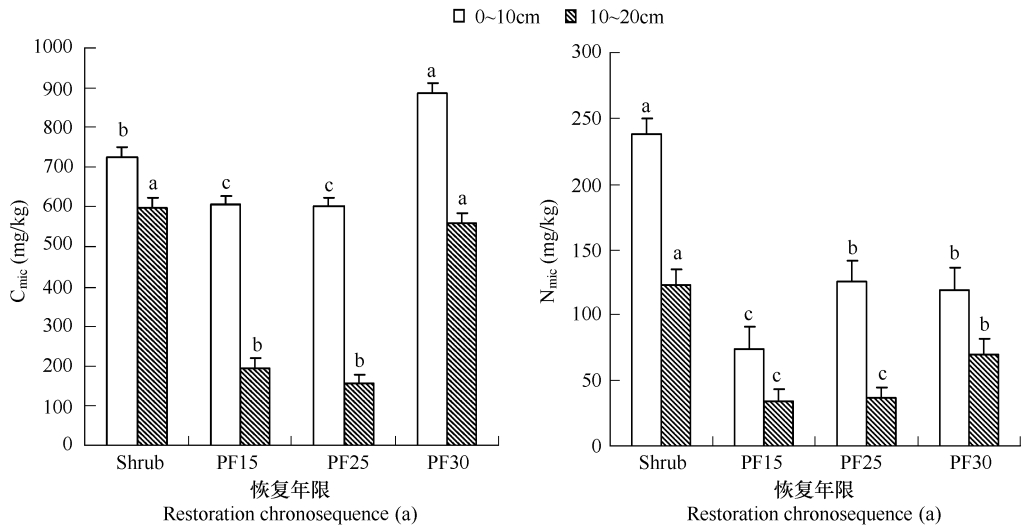


图 1 人工油松林恢复过程中微生物生物量 C、N 的变化

Fig. 1 Dynamics of soil microbial biomass C, N along the restoration chronosequences in pine plantations

* 同一数据系列中,标有不同小写字母的数值表示存在 5% 差异,下同 Within each series, columns marked by the different letter are significantly different at $p = 0.05$, the same below

TOC 有所不同 ,在植被恢复的初期下降 ,而后呈现出先上升后下降的倒 “U” 型变化规律。

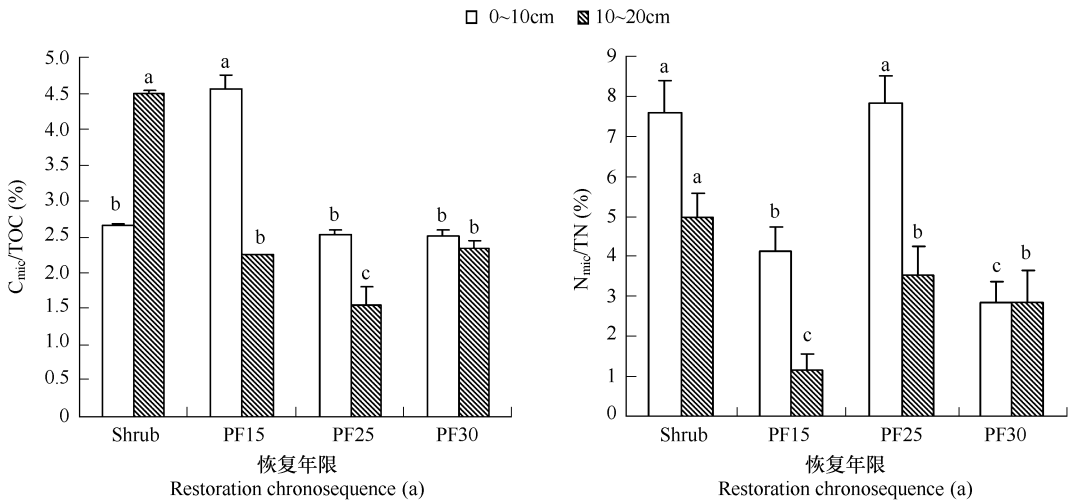


图2 人工油松林恢复过程中 C_{mic}/TOC 和 N_{mic}/TN 的变化
Fig.2 Dynamics of C_{mic}/TOC 和 N_{mic}/TN along the restoration chronosequences in pine plantations

2.4 土壤微生物生物量 C、N 与土壤理化性质之间的关系

表 4 给出了植被恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 与土壤理化性质间的相关性分析结果。在植被恢复过程中 C_{mic}/TOC 、有机碳、土壤含水量、粘粒含量和粉粒含量与植被恢复时间呈极著的相关性。尽管土壤微生物生物量 C 与植被恢复时间之间没有发现显著的相关性 ,但是与有机碳、全氮、全磷之间存在显著正相关。 C_{mic}/TOC 与土壤有机碳和粘粒含量呈负相关 ,与砂粒含量呈正相关。 N_{mic}/TN 仅与电导率呈负相关 ,微生物生物量 N 与其它指标间的相关性不显著。此外 ,土壤有机碳与粘粒含量、土壤含水量呈显著的正相关 ,与土壤粉粒含量则呈负相关。土壤全氮与有机碳和砂粒含量之间存在正相关。

3 讨论

3.1 植被恢复过程中土壤理化性质的变化趋势

植被通过根系分泌物和残体向土壤提供 C、N 影响土壤有机质的输入 ,进而显著影响土壤的性质^[8]。结果表明土壤理化性质随着植被恢复的呈现出一定的变化规律 ,主要表现为土壤有机碳、全氮、粘粒含量、土壤含水量的上升和 pH 值、容重的下降^[19-20]。此外 ,还发现全磷和土壤电导率随着植被恢复表现出先下降后上升的 “U” 型的变化规律 ,这与庞学勇等的研究结果一致^[21]。水分含量低的土壤的有机碳的含量通常较低 ,主要由于有机碳的分解速率超过了积累的速率^[22] ,这也进一步表明水分含量影响有机碳的分解和积累。土壤有机碳与粘粒含量呈显著的正相关 ,这是因为土壤细颗粒的增多也有助于土壤碳的积累^[23]。其它研究也表明人工林可以恢复退化土壤的性状和维持土壤肥力^[11, 24, 25]。但是 ,也有研究指出次生人工林的土壤容易退化和形成干层^[26]。需要指出的是 ,除了植被 ,地形因子 (坡位、坡向、海拔等)和气候因子 (气温、降雨、辐射等)也会影响土壤性质的变化规律 ,需要进一步研究多因子对土壤的综合作用。

3.2 植被恢复过程中的土壤微生物生物量 C、N 的变化趋势

微生物生物量与土壤肥力和土壤健康密切相关 ,可以作为生态学指标来反映人类活动的干扰^[8]和指示微生物群落的大小。此外 ,土壤微生物生物量也可指示土壤中 C、N 的固定程度。土壤养分的矿化可以导致微生物生物量的降低 ,养分固定则导致微生物生物量上升^[27]。土壤微生物生物量一般会在植被演替的最后阶段达到最大值 ,这是因为在植被演替最后阶段 ,森林斑块可以提供较高的生物量同时叶片含氮量也最高。Jia 等研究结果表明 ,土壤微生物生物量随着恢复年增加 ,在 17 年次生林中达到最高值 ,而后下降 ,最后保持在一个比较稳定的水平^[28]。Wardle 等指出土壤微生物生物量在植被演替的中间阶段达到最大值 ,并与树的

接表 4

基面积达到最大值的时间一致^[29]。研究表明人工油松林土壤微生物生物量 C、N 在植被恢复的初期显著低于灌丛,而后随着恢复的进行逐步增长,这与 Insam & Haselwandter 和 Santruckova 的研究结果一致^[30,31]。植被恢复过程中土壤微生物生物量 C 的增长可能反映了地上部分净初级生产力的增长,因为净初级生产力调控土壤活性碳的含量,进而影响土壤微生物生物量 C^[32]。但是,Aikio 等在芬兰冰川前沿的研究发现土壤养分、有机质、土壤微生物生物量和活性在植被初级演替中呈下降趋势,并指出主要原因是砂质土壤养分的淋失和腐殖质层厚度的减少^[33]。虽然土壤微生物生物量 C、N 与植被恢复时间的相关性没有达到统计学上的显著水平,但是土壤微生物生物量 C 与土壤有机碳、全氮、全磷呈显著正相关(表 4),这表明植被恢复过程中土壤微生物生物量与土壤养分状况关系密切^[34],进一步说明植被恢复通过改善土壤养分状况进而间接地影响土壤微生物生物量的变化。

C_{mic}/TOC 是指土壤微生物细胞固定的有机碳所占土壤有机碳的比例,它可以用来监测土壤有机质和灵敏地指示土壤微生物生物量^[35]。研究表明 C_{mic}/TOC 随着植被恢复的进行呈下降趋势,这与前人在初生演替中的研究结果一致^[36,37]。但是,也有人研究发现 C_{mic}/TOC 随着林地年龄增加而增长^[38,39]。此外,研究结果表明 C_{mic}/TOC 与植被恢复时间呈显著负相关,同时与土壤有机碳、粘粒含量、土壤含水量呈显著负相关。在恢复的初期 C_{mic}/TOC 较高可能是由于土壤微生物利用的有机质来自新鲜凋落物的比例较大。因此,在植被恢复早期,土壤微生物生物量 C 占土壤有机碳的比例较高。尽管可利用的有机质的比例在植被恢复初期较高,但是可利用碳的绝对量比较低。随着植被演替的进行,惰性有机质积累导致有机质只有较少部分供应土壤微生物,所以 C_{mic}/TOC 在恢复过程中下降。因此, C_{mic}/TOC 反映了土壤微生物生物量 C 和土壤有机碳之间的相互作用^[36],也就是说 C_{mic}/TOC 受土壤有机质的数量和质量影响^[40]。

References :

- [1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biol.* ,1995 ,1 :77 — 91.
- [2] Panikov N S. Understanding and prediction of soil microbial community dynamics under global change. *Appl. Soil Ecol.* ,1999 ,11 :161 — 176.
- [3] Bossio D A ,Scow K M. Impact of carbon and flooding on the metabolic diversity of microbial communities in soils. *Appl. Environ. Microbiol.* ,1995 ,61 :4043 — 4050.
- [4] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *Eur. J. Soil Sci.* ,2003 ,54 :801 — 808.
- [5] Rogers B F ,Tate III R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils. *Soil Biol. Biochem.* ,2001 ,33 :1389 — 1401.
- [6] Diaz-Ravina M ,Acea M J ,Carballas T. Microbial biomass and its contribution to nutrient concentration in forest soils. *Soil Biol Biochem.* ,1993 ,25 :25 — 31.
- [7] Powlson D S ,Brookes P C ,Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* ,1987 ,19 :159 — 164.
- [8] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Rev.* ,1992 ,67 :321 — 358.
- [9] Arunachalam A ,Maithani K ,Pandey H N ,*et al.* The impact of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a *Pinus kesiya* forest in north-east India. *Forest Ecol. Manag.* ,1996 ,88 :273 — 282.
- [10] Lamb D. Large-scale ecological restoration of degraded tropical forest lands :The potential role of timber plantations. *Restor. Ecol.* ,1998 ,6 :271 — 279.
- [11] Campbell B M ,Frost P ,King J A ,*et al.* The influence of trees on soil fertility on two contrasting semi arid types at Matopos ,Zimbabwe. *Agrofor. Syst.* ,1994 ,28 :159 — 172.
- [12] Bao W K ,Liu Z G. Human induced disturbance regime in the Dagou valley in the upper reaches of the Minjiang River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* ,1999 ,5 :233 — 239.
- [13] Wang C M ,Bao W K ,Chen J Z ,*et al.* Profile characteristics and nutrients of dry cinnamon soils in dry valley of the upper Minjing River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* ,2003 ,9 :230 — 234.
- [14] Mariotte C A ,Hudson G ,Hamilton D ,*et al.* Spatial variability of soil total C and N and their stable isotopes in upland Scottish grassland. *Plant Soil* ,1997 ,196 :151 — 162.
- [15] Lu R K eds. Analytical methods of soil agrochemistry. Beijing :Chinese Agriculture Science and Technology Press ,1999.
- [16] Wu J ,Joergensen R G ,Pommerening B ,*et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure. *Soil Biol. Biochem.* ,1990 ,22 :1167 — 1169.
- [17] Brookes P C ,Landman A ,Pruden G ,Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil organic nitrogen : a rapid direct extraction

- method to measure microbial biomass nitrogen in soils. *Soil Biol. Biochem.* ,1985 ,17 :837 — 842.
- [18] Rutigliano F A , Ascoli R D , De Santo AV. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover. *Soil Biol. Biochem.* ,2004 ,36 :1719 — 1729.
- [19] Walker L R. Patterns and processes in primary succession. In :Walker LR eds. *Ecosystems of disturbed ground*. Elsevier , Amsterdam ,1999 ,585 — 610.
- [20] Zhang Z S , Xue D Z , Zhang G J. The Changes of Soil Environment in Plant Community during Natural Vegetation Restoration. *Journal of Northwest Forestry University* ,2005 ,20 :1 — 5.
- [21] Pang X Y , Liu Q , Liu S Q , *et al.* Changes of soil fertility quality properties under subalpine spruce plantation in Western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24 :261 — 267.
- [22] Bauder J. When is organic matter built up or used up. <http://www.montana.edu/wwwph/ag/baudr178.html>
- [23] Arunachalam K , Arunachalam A. Effect of soil pH on nitrogen mineralization in regrowing humid subtropical forests of Meghalaya. *Journal of the Indian Society of Soil Science* ,2000 ,48 :98 — 101.
- [24] Liu S L , Fu B J , Lü Y H , *et al.* Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope. *Acta Ecologica Sinica* ,2003 ,23 :414 — 420.
- [25] Zheng H , Ouyang Z Y , Wang X K , *et al.* Effects of forest restoration types on soil quality in red soil eroded region , Southern China. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24 ,9 :1994 — 2002.
- [26] Wang L , Shao M A , Hou Q C. The primary research on dried soil layer in the Loess Plateau. *J. Northwest Sci-tech. Univ. Agric. For. (Natural Science Edition)* ,2001 ,29 :34 — 38.
- [27] McGill M B , Gannon K R , Robertson J A , *et al.* Dynamics of soil microbial biomass and water soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations. *Can J. Soil Sci.* ,1986 ,66 :1 — 19.
- [28] Jia G M , Cao J , Wang C Y , *et al.* Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziulin , northwest China. *Forest Ecol. Manag.* ,2005 ,17 :117 — 125.
- [29] Wardle D A , Walker L R , Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science* ,2004 ,305 :509 — 513.
- [30] Insam H , Haselwandter K. Metabolic coefficient of the soil microflora in relation to plant succession. *Oecologia* ,1989 ,79 :174 — 178.
- [31] Santruckova' H. Microbial biomass , activity and soil respiration in relation to secondary succession. *Pedobiologia* ,1992 ,36 :341 — 350.
- [32] Zak D R , Tilman D , Parmenter R R , *et al.* Plant production and soil microorganisms in late-successional ecosystems : a continental-scale study. *Ecology* ,1994 ,75 :2333 — 2347.
- [33] Aikio S , Vare H , Strommer R. Soil microbial activity and biomass in the primary succession of a dry heath forest. *Soil Biol. Biochem.* ,2000 ,32 :1091 — 1100.
- [34] Arunachalam A , Pandey H. Ecosystem restoration of Jhum fallows in Northeast India : microbial C and N along altitudinal and successional gradients. *Restorat. Ecol.* ,2003 ,11 :168 — 173.
- [35] Garcia C , Hernandez T , Roldan A , *et al.* Effect of plant cover decline on chemical and microbiological parameters under Mediterranean climate. *Soil Biol. Biochem.* ,2002 ,34 :635 — 642.
- [36] Insam H , Domsch K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of the reclamation sites. *Microbial Ecol.* ,1988 ,15 :177 — 188.
- [37] Schipper L A , Degens B P , Sparling G P , *et al.* Changes in microbial heterotrophic diversity along five plant successional sequences. *Soil Biol. Biochem.* ,2001 ,33 :2093 — 2103.
- [38] Bauhus J , Pare D , Coôté L. Effects of tree species stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biol. Biochem.* ,1998 ,30 :1077 — 1089.
- [39] Landgraf D. Dynamics of microbial biomass in Cambisols under a 3 year succession fallow in North Eastern Saxony. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* ,2001 ,164 :665 — 671.
- [40] Srivastava S C , Singh S T. Microbial C and P in dry tropical forest soils : effects of alternate land use and nutrient flux. *Soil Biol. Biochem.* ,1991 ,23 :117 — 124.

参考文献 :

- [12] 包维楷 ,刘照光. 岷江上游大沟流域驱动植被退化的人为干扰体研究. *应用与环境生物学报* ,1999 ,5 :233 ~ 239.
- [13] 王春明 ,包维楷 陈建中 ,等. 岷江上游干旱河谷区褐土不同亚类剖面及养分特征. *应用与环境生物学报* ,2003 ,9 :230 ~ 234.
- [15] 鲁如坤主编. *土壤农业化学分析方法*. 北京 :中国农业科技出版社 ,1999.
- [20] 张振师 ,薛智德 张广军. 植被自然恢复过程中群落内土壤环境的变化规律研究. *西北林学院学报* 2005 20 :1 ~ 5.
- [21] 庞学勇 ,刘庆 ,刘世全 ,等. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变. *生态学报* ,2004 ,24 :261 ~ 267.
- [24] 刘世梁 ,傅伯杰 ,吕一河 ,等. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响研究. *生态学报* ,2003 ,23 :414 ~ 420.
- [25] 郑华 ,欧阳志云 ,王效科等. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响. *生态学报* ,2004 24 :1994 ~ 2002.
- [26] 王力 ,邵明安 ,侯庆春. 黄土高原土壤干层初步研究. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)* ,2001 ,29 :34 ~ 38.

表 4 人工油松林恢复过程中土壤微生物性质与理化性质相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil microbial properties and soil physiochemical properties along the restoration chronosequences in pine plantation

	年限 Year	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	容重 Bulk density	SMC	pH	EC	TOC	TN	TP	C _{mic}	C _{mic} /TOC	N _{mic}
粘粒	0.974 **													
粉粒	-1.000 **	-0.968 **												
砂粒	0.356	0.137	-0.379											
容重	-0.571	-0.561	0.571	-0.185										
SMC	0.980 **	0.922 **	-0.984 **	0.486	-0.469									
pH	-0.605	-0.702	0.592	0.250	0.771	-0.490								
电导率	-0.314	-0.509	0.292	0.731	0.386	-0.139	0.725							
TOC	0.977 **	0.903 *	-0.982 **	0.548	-0.539	0.992 **	-0.483	-0.108						
TN	0.693	0.520	-0.709	0.887 *	-0.533	0.754	-0.128	0.358	0.817 *					
TP	0.306	0.093	-0.328	0.960 **	0.044	0.453	0.436	0.780	0.495	0.808				
AP	0.035	-0.179	-0.058	0.893 **	-0.223	0.134	0.376	0.775	0.227	0.745	0.828			
C _{mic}	0.739	0.570	-0.755	0.886 *	-0.437	0.826 *	-0.158	0.377	0.865 *	0.969 **	0.819 *			
C _{mic} /TOC	-0.952 **	-0.994 **	0.944 **	-0.064	0.484	-0.895 *	0.671	0.553	-0.867 *	-0.445	-0.045	-0.501		
N _{mic}	0.630	0.687	-0.622	-0.076	-0.687	0.522	-0.805	-0.655	0.542	0.233	-0.245	0.248	-0.670	
N _{mic} /TN	-0.015	0.168	0.035	-0.763	-0.091	-0.155	-0.495	-0.831 *	-0.188	-0.596	-0.811	-0.568	-0.224	0.629

EC :电导率 Electronic conductivity ;TOC :总有机碳 Total organic carbon ;TN :全氮 Total nitrogen ;TP :全磷 Total phosphorus ;C_{mic} :微生物生物量 C Microbial biomass carbon ;N_{mic} :微生物生物量 N Microbial biomass nitrogen ;SMC 土壤含水量 Soil moisture content

* 和 * * 表示相关系数达到统计显著 (p =0.05)和极显著 (p =0.01)Correlation coefficient labeled by * and * * indicate significant difference at p =0.05 and p =0.01 respectively