

武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化

何 容^{1,3}, 汪家社², 施 政^{1,4}, 方燕鸿², 徐自坤², 权 伟¹, 张增信¹, 阮宏华^{1,*}

(1. 南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏省林业生态工程重点实验室, 南京 210037;

2. 福建省武夷山自然保护区管理局, 武夷山 354315; 3. 宁波市江北区农林水利局林特工作总站, 宁波 315020;

4. 加拿大阿尔伯塔大学, 农业、生命与环境科学学院, 阿尔伯塔, 加拿大 T6G 2E3)

摘要: 土壤微生物量是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 在森林生态系统物质循环和能量转化中占有特别重要的地位。以武夷山常绿阔叶林 (EBF)、针叶林 (CF)、亚高山矮林 (DF) 和高山草甸 (AM) 为试验对象, 研究了土壤微生物量沿海拔梯度的变化特征。结果表明: 在 0~10cm 土壤层, 随着海拔高度的增加, 年平均土壤微生物量增大, AM 的年平均土壤微生物量为 $4.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别为 DF、CF 和 EBF 的 2.06、3.21 倍和 3.91 倍; AM 的年平均土壤微生物量显著大于 DF、CF 和 EBF ($p < 0.01$), DF 的年平均土壤微生物量显著大于 EBF、CF ($p < 0.05$), EBF 和 CF 的年平均土壤微生物量无显著性差异 ($p > 0.05$), 10~25cm 土壤层的年平均土壤微生物量的变化规律与上层基本一致; 在 0~10cm 土壤层, 不同海拔年平均土壤微生物量分别与土壤有机碳、全氮、全硫含量以及土壤湿度呈显著正相关 ($p < 0.05$), 在 10~25cm 土壤层, 不同海拔年平均土壤微生物量分别与土壤有机碳、全氮含量呈显著正相关 ($p < 0.05$)。研究表明, 武夷山亚热带森林年平均土壤微生物量随海拔高度升高而增加, 土壤有机碳、全氮、全硫和土壤湿度可能是调控土壤微生物量沿海拔梯度变化的主要因子。

关键词: 土壤微生物量; 武夷山; 海拔梯度; 变化特征

文章编号: 1000-0933(2009)09-5138-07 中图分类号: Q142, Q938, Q948, X171.1 文献标识码: A

Variations of soil microbial biomass across four different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains, China

HE Rong^{1,3}, WANG Jia-She², SHI Zheng^{1,4}, FANG Yan-Hong², XU Zi-Kun², QUAN Wei¹, ZHANG Zeng-Xin¹, RUAN Hong-Hua¹

1 Faculty of Forest Resources and Environmental Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 The National Natural Preserve of Wuyi Mountains in Fujian Province, Wuyishan 354315, China

3 Forestry Specialty Station of Agroforestry and Water Conservancy Enterprise, Jiangbei District, Ningbo 315020, Zhejiang, China

4 Faculty of Agricultural, Life and Environmental Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2E3, Canada

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5138 ~ 5144.

Abstract: Soil microbial biomass carbon is an important component in carbon cycle of the terrestrial ecosystem. We chose Evergreen Broadleaf Forest (EBF), Coniferous Forest (CF), Dwarf Forest (DF) and Alpine Meadow (AM) as experimental sites along an elevation gradient in the national natural preserve of Wuyi Mountains, and to examine the variations of soil microbial biomass and its influencing factors from June, 2005 to April, 2006. The results showed that: (1) At 0–10cm depth of soil layer, the annual mean value of soil microbial biomass was increasing with increasing elevation. The soil microbial biomass of AM was $4.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and which was 2.06, 3.21 and 3.91 times higher than that of DF, CF and EBF, respectively ($p < 0.01$), and the annual mean value of soil microbial biomass of DF was significantly higher than that of EBF, CF, respectively ($p < 0.05$). However, the annual mean values of soil microbial biomass between DF and CF were not significantly different ($p > 0.05$). Variations of soil microbial biomass at 10–25cm depth of soil layer

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30370256, 30670313); 中国森林生态系统服务功能定位观测与评估技术研究资助项目 (200704005/wb02)

收稿日期: 2007-07-07; 修订日期: 2008-12-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hruan1690@yahoo.com.

was the same as that at 0—10 cm depth of soil layer. (2) At 0—10 cm soil layer, the annual mean values of soil microbial biomass were significantly correlated to soil organic carbon, total nitrogen, total sulphur and soil moisture, respectively. At 10—25 cm depth of soil layer, the annual mean values of soil microbial biomass were significantly correlated to soil organic carbon, total nitrogen, respectively. Our research showed that soil microbial biomass were increasing along the elevation gradient in subtropical forest in Wuyi Mountain, and soil organic carbon, total nitrogen, total sulfur or soil moisture might be the major factors controlling soil microbial biomass.

Key Words: soil microbial biomass; Wuyi Mountains; elevation gradients; variations

土壤微生物量是土壤碳循环中最为活跃的部分,土壤微生物参与土壤碳、氮等元素的循环过程和土壤矿物质的矿化过程,对有机物质的分解转化、养分的转化和供应起着重要的主导作用^[1,2]。土壤微生物量现已成为近年来国内外土壤碳循环研究领域的热点之一^[3~5]。影响土壤微生物量的因素很多,主要有土壤母质、肥力水平、温度、湿度和气候条件^[6,7]。

土壤微生物量随空间和时间发生显著的变化,研究土壤微生物量的空间变化是当今生态学领域的重要研究内容之一。目前,有关我国土壤微生物量的研究很多,但涉及到土壤微生物量与海拔高度的关系方面的研究极少,特别是有关我国中亚热带不同海拔高度土壤微生物量变化特征的研究还未见报道。本文以中亚热带武夷山为研究基地,选择不同海拔高度典型的植被生态系统土壤微生物量为研究对象,采用连续定位方法和相同的研究手段,试图回答如下两个问题:(1)土壤微生物量在不同海拔高度上是怎样变化的?(2)调控土壤微生物量的主要生态因子是什么?旨在为进一步阐明中亚热带不同海拔土壤生态系统碳循环规律及其调控机理提供理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

福建省武夷山国家级自然保护区位于福建省西北部,27°33'~27°54' N, 117°27'~117°51' E;东西宽 22 km,南北长 52 km,总面积 56 527 hm²;年平均气温 12~18 °C,年均相对湿度 82%~85%,年均雾日 100 d 以上,年均降水量 2000 mm 左右。拥有世界同纬度带现存面积最大、保存最完整的中亚热带常绿阔叶林生态系统。境内以黄岗山为主峰,海拔高 2 158 m,植被垂直带谱分布完整,依次为常绿阔叶林(海拔 200~1000 m)、针阔混交林(海拔 1 000~1 350 m)、针叶林(海拔 1 350~1 750 m)、亚高山矮林(海拔 1 750~1 900 m)以及高山草甸(海拔 1 750~2 158 m)等不同植被类型。

1.2 样地设置

选择常绿阔叶林(Evergreen broadleaf forest,简称 EBF)、针叶林(Coniferous forest,简称 CF)、亚高山矮林(Dwarf forest,简称 DF)和高山草甸(Alpine meadow,简称 AM)4 种不同海拔高度的植物群落作为实验样地,样地概况参见施政论文^[8]。实验采取随机区组设计,在每个海拔高度选择典型地段,随机设置 3 个区组。凋落物收集样地的设置:在每块样地上搭设一金属架(2 m 长×2 m 宽×1.7 m 高),架子顶部用尼龙网遮住(网眼 1 mm×1 mm),并形成网兜状,以便于收集凋落物。实验于 2005 年 6 月至 2006 年 4 月进行。

1.3 土壤样品的采集与处理

用取样头长 10 cm、断面直径 2 cm 的土钻在每个样地内分别随机钻取 0~10 cm 和 10~25 cm 深度的土壤约 200 g,分别装入自封袋中并做好标记。土样及时带回实验室进行必要处理,挑除其中的石块、根系、小动物等杂物,用于土壤微生物量分析的土样用自封袋封装,以保持新鲜,取 10 g 新鲜土样测定样地中土壤的土壤湿度,分析前一直贮于冰箱;用于土壤理化性质分析的土样风干后放阴凉处保存。

1.4 土壤微生物量及土壤主要理化性质的测定

采用氯仿熏蒸-培养法^[9]测定土壤微生物生物量,每 2 月测定 1 次;土壤总有机碳、全氮、全硫的测定使用

VARIO EL 元素分析仪;pH 值采用水浸提电位法测定,其中土:水=1:2.5;土壤容重采用环刀法测定。

1.5 林分凋落物及细根生物量的测定

将样地上方网兜状帐篷内收集到的凋落物先于 85℃ 高温下烘 30 min,再于 65℃ 下烘干至恒量,试验期间每月月末收集 1 次;细根生物量用根系分析系统测定,每季度取样 1 次,共测定 4 次。

1.6 土壤呼吸测定

用 Li-6400-09 便携式光合作用测定仪,配置土壤呼吸室测定土壤呼吸。具体测定方法参见施政论文^[8]。

1.7 数据分析

所有统计分析使用 SPSS11.5 for windows 统计软件。用单因素方差分析不同海拔高度年平均土壤微生物量的差异;用多元线性回归分析土壤微生物量与土壤温度、土壤湿度、土壤有机碳、全氮、全硫含量以及土壤呼吸等的关系。文中图表由 Excel 做出。

2 研究结果

2.1 年平均土壤微生物量沿海拔梯度的变化特征

图 1 所示,在表层土壤(0~10cm)中,年平均土壤微生物量随海拔高度的上升而增加。年平均土壤微生物量的大小依次为:AM > DF > CF > EBF。AM 的年平均土壤微生物量为 $4.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别为 DF、CF 和 EBF 的 2.06、3.21 倍和 3.91 倍。方差分析结果表明,在 4 种不同植物群落间,AM 的年平均土壤微生物量显著大于 EBF、CF 和 DF($p < 0.01$);DF 的年平均土壤微生物量显著大于 EBF、CF($p < 0.05$);EBF 和 CF 的年平均土壤微生物量无显著性差异($p > 0.05$)。下层土壤(10~25cm)的年平均微生物量也随海拔高度的上升而增加,与表层的变化规律基本一致。

图 1 所示,EBF、CF、DF 和 AM 表层土壤(0~10cm)的年平均土壤微生物量分别是下层土壤(10~25cm)的 1.32、1.45、1.69 倍和 1.82 倍。方差分析表明,四种不同植物群落的年平均土壤微生物量上下层之间均差异显著($p < 0.05$)。

2.2 不同海拔高度主要土壤生态因子的变化特征

在不同土壤层次,土壤总有机碳、全氮、全硫均表现为:EBF 与 CF 均相差不显著,DF、AM 远大于 EBF、CF,且 AM 大于 DF,即土壤总有机碳、全氮、全硫基本上随着海拔的升高而增大;土壤碳氮比均表现为:AM 远大于 EBF、CF、DF,而 EBF、CF 和 DF 之间相差不显著;pH 值在不同海拔之间均差异不显著。表层土壤细根生物量:AM 远大于其他 3 种样地,CF 大于 EBF 和 DF,EBF 和 DF 相差不大;下层土壤细根生物量:CF 显著大于其他 3 种样地,AM 大于 EBF 和 DF,EBF 和 DF 相差不大(表 1)。随着海拔的升高,年平均土壤温度逐渐降低(图 2A),而年平均土壤湿度却逐渐增大(图 2B),年平均林地凋落物量逐渐减少(图 2C),年平均土壤呼吸速率也逐渐减小(图 2D)。

在不同海拔高度,除 CF 土壤全硫含量在土壤表层和下层间差异不显著外($p > 0.05$),土壤总有机碳、全氮、全硫、土壤碳氮比和细根生物量均表现为表层显著大于下层($p < 0.05$);土壤 pH 值在土壤表层和下层间差异均不显著($p > 0.05$)。

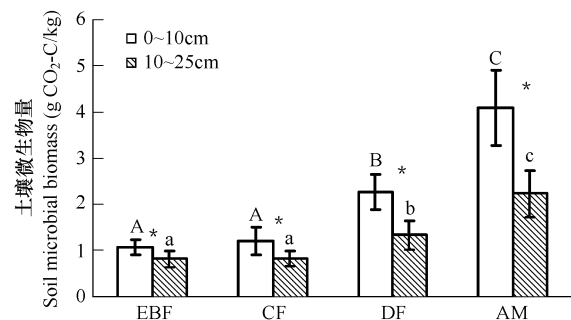


图 1 不同海拔高度年平均土壤微生物量

Fig. 1 Annual mean values of soil microbial biomass along elevation gradients

图中每数值是来自于 1a 中 6 次测定 3 个重复样地的平均值,图中线段指示的是样本标准误;图中大小写字母分别表示 0~10cm 和 10~25cm 土层不同海拔样地间的差异性,字母不相同表明存在显著差异, $p < 0.05$;“*”表示同一海拔高度不同土层间存在显著差异, $p < 0.05$ Values were derived from six collection dates arranged from three replicates through a year, the Bars indicate Standard Errors; uppercase and lowercase letters indicate differences of values along different elevation gradients at the 0~10cm and 10~20cm depths of soil layers, respectively, values followed by different letters are significantly different at $p < 0.05$; “*” indicates significant difference at different soil layers along the same elevation gradients at $p < 0.05$)

表 1 不同海拔与不同层次土壤的主要理化性质(平均值 ± 标准误)

Table 1 Soil physical and chemical properties at different elevation gradients and soil layers (means ± S. E.)

样地名称 Site	土层厚度 Soil depth (cm)	总有机 C TOC (g/kg)	全 N TN (g/kg)	全 S TS (g/kg)	碳氮比 C/N ratio	pH	细根生物量 Fine root biomass (kg/m ³)
常绿阔叶林 (EBF)	0 ~ 10	48.42 ± 11.13 (Aa)	5.46 ± 0.55 (Aa)	0.27 ± 0.12 (Aa)	8.57 ± 1.93 (Aa)	4.39 ± 0.22 (Aa)	3.06 ± 0.26 (Aa)
	10 ~ 25	28.75 ± 4.21 (Ab)	4.72 ± 0.41 (Ab)	0.13 ± 0.03 (Ab)	6.16 ± 0.96 (Aa)	4.73 ± 0.36 (Aa)	0.75 ± 0.08 (Ab)
针叶林 (CF)	0 ~ 10	49.79 ± 8.21 (Aa)	5.27 ± 0.37 (Aa)	0.19 ± 0.07 (Aa)	9.35 ± 0.95 (Aa)	4.57 ± 0.06 (Aa)	7.01 ± 0.96 (Ba)
	10 ~ 25	27.84 ± 5.84 (Ab)	4.16 ± 3.96 (Ab)	0.20 ± 0.06 (Aa)	6.48 ± 0.69 (Aa)	4.89 ± 0.13 (Aa)	1.99 ± 0.34 (Bb)
亚高山矮林 (DF)	0 ~ 10	73.39 ± 17.09 (Ca)	8.05 ± 1.17 (Ca)	0.56 ± 0.16 (Ca)	8.96 ± 0.65 (Aa)	4.50 ± 0.04 (Aa)	3.48 ± 0.50 (Aa)
	10 ~ 25	45.32 ± 3.98 (Cb)	6.05 ± 0.11 (Cb)	0.19 ± 0.04 (Ca)	7.47 ± 0.52 (Aa)	4.69 ± 0.15 (Aa)	0.62 ± 0.09 (Ab)
高山草甸 (AM)	0 ~ 10	129.39 ± 30.28 (Da)	10.06 ± 1.64 (Da)	0.74 ± 0.19 (Da)	11.92 ± 0.68 (Ba)	4.30 ± 0.18 (Aa)	9.73 ± 2.67 (Ca)
	10 ~ 25	107.91 ± 15.25 (Db)	8.96 ± 0.81 (Db)	0.69 ± 0.16 (Db)	12.01 ± 0.93 (Ba)	4.62 ± 0.12 (Aa)	1.21 ± 0.08 (Cb)

表中同一列中,大写字母表示同一层土壤主要理化性质的差异显著性,小写字母表示同一海拔不同土壤层次主要理化性质的差异显著性, $p < 0.05$ Uppercase letters indicate significant differences between different elevation gradients in the same soil depth, lowercase letters indicate significant difference between different soil depths in the same elevation, $p < 0.05$

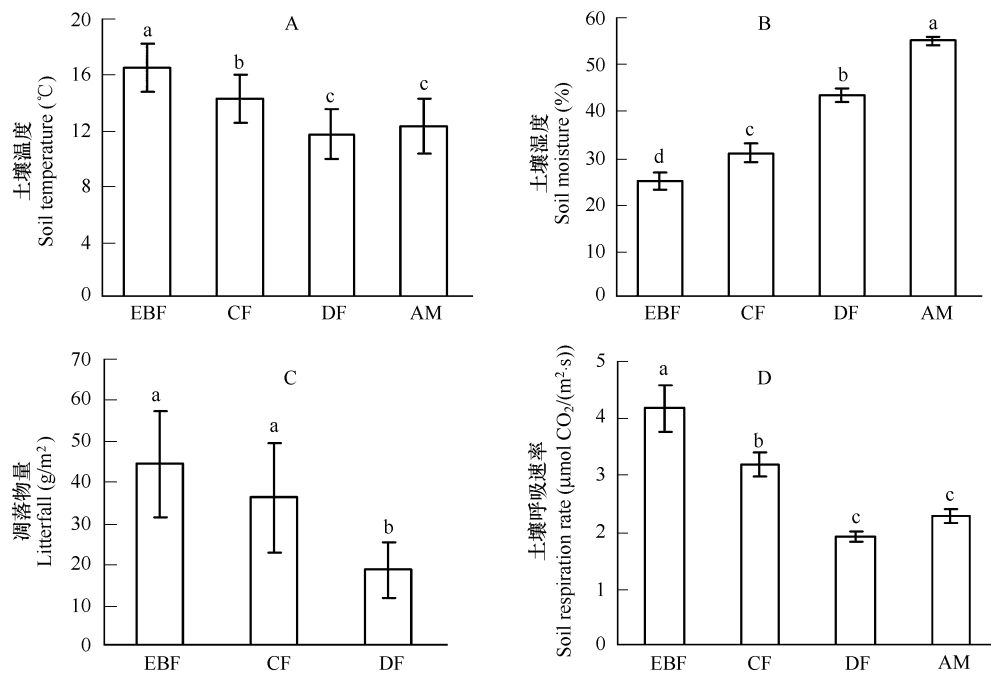


图 2 不同海拔高度 0 ~ 10cm 土壤温度、土壤湿度、凋落物量和土壤呼吸速率年平均值

Fig. 2 Annual mean values of soil temperature、soil moisture、litterfall and soil respiration rate along elevation gradients

图中每一值是来自于 1a 中 12 次测定 3 个重复样地的平均值;图中线段指示的是样本标准误;各图中小写字母不相同表明存在显著差异, $p < 0.05$); AM 的凋落物没有收集 Values were derived from 12 collection dates arranged from three replicates through a year; the bars indicate Standard Errors; values followed by different lowercase letters are significantly different at $p < 0.05$); litterfall was not collected at AM

2.3 土壤微生物量沿海拔梯度的变化与主要生态因子的关系

不同海拔高度,0 ~ 10cm 土壤层,土壤总有机碳、全氮、全硫含量以及土壤湿度与年平均土壤微生物量变化基本一致,均与年平均土壤微生物量呈显著线性正相关关系 ($p < 0.05$,图 3 A-D);10 ~ 25cm 土壤层,土壤总有机碳、土壤全氮与年平均土壤微生物量变化基本一致,均与年平均土壤微生物量呈显著线性正相关关系 ($p < 0.05$,图 3 E-F)。

而两土层的土壤碳氮比、pH 值、土壤温度、凋落物量、土壤呼吸速率和细根生物量与其相对应的年平均土

壤微生物量均无显著线性相关关系($p > 0.05$)。

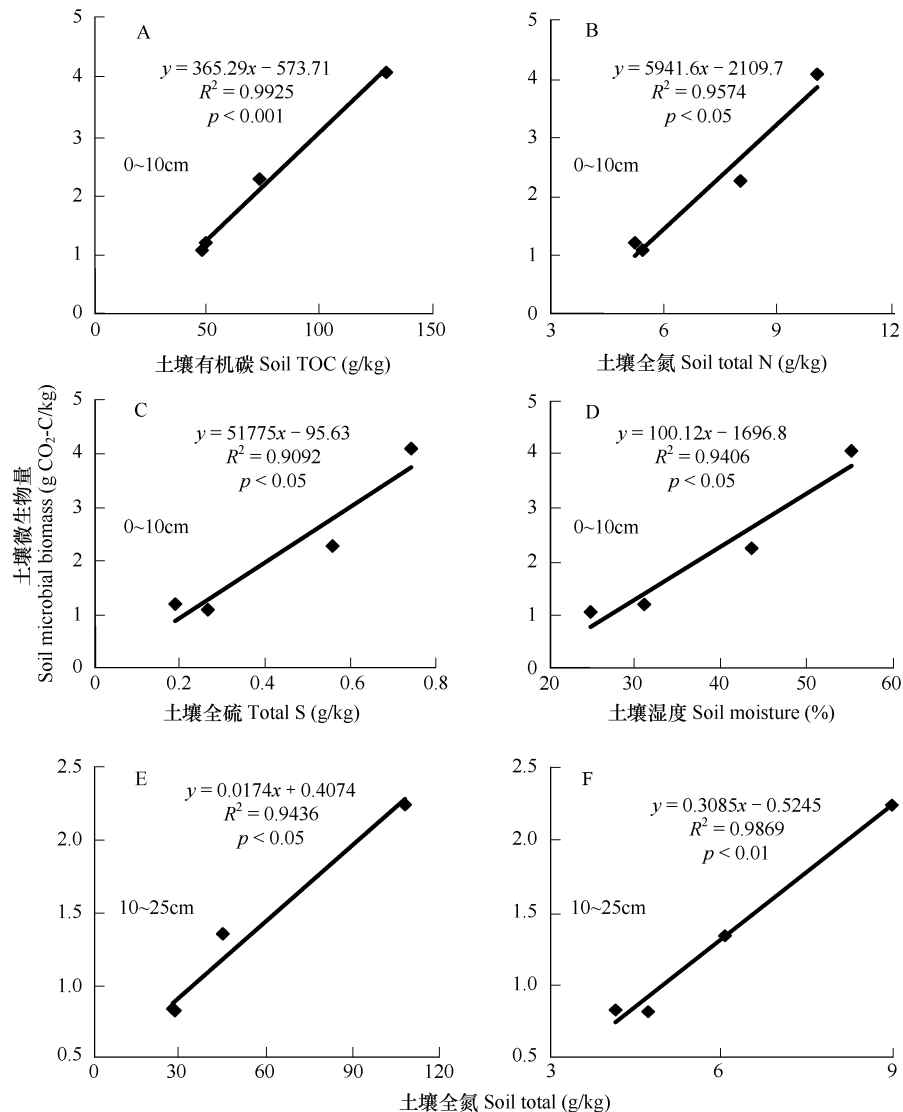


图3 年平均土壤微生物量与土壤生态因子的相关关系($n=4$)

Fig. 3 Relationships between the annual mean values of soil microbial biomass and soil ecological factors ($n=4$)

A~D 分别为表层土年平均土壤微生物量与土壤有机碳、全氮、全硫和土壤湿度的相关关系; E~F 分别为下层土年平均土壤微生物量与土壤有机碳、全氮的相关关系 Relationships between the annual mean values of soil microbial biomass and soil organic carbon, total nitrogen, total sulphur, soil moisture at soil superficial layer from A to D, respectively; relationships between the annual mean values of soil microbial biomass and soil organic carbon, total nitrogen at soil down layer from E to F, respectively

3 讨论

3.1 土壤微生物量沿海拔梯度的变化

本研究结果表明,随着海拔的升高,土壤微生物量逐渐变大,其中 AM 的年平均土壤微生物量显著大于 DF、CF 和 EBF。已有研究指出,草地比耕地和林地更易促使土壤微生物量的增长^[10,11]。草本植物根系发达,密集于表层,根系分泌物和脱落物是微生物丰富的能源物质^[12]。本研究,AM 的细根生物量显著大于其它植物群落,而且 AM 中土壤有机碳和全氮均很高,因此草地每年向微生物提供的能源远大于其它 3 种植物群落,结果可能导致了年平均土壤微生物量 AM 显著大于其它植物群落。

徐秋芳等^[13]研究表明,土壤微生物量和土壤总有机碳量有较好的正相关关系,有机碳越高,土壤微生物量越大。本研究中,DF 的年平均土壤微生物量显著大于 EBF,DF 的土壤总有机碳和全氮也显著高于 EBF。

已有研究表明,在阔叶林和针叶林中,前者的土壤微生物量比后者更高^[11],这主要是由于针叶林的凋落物分解速率更慢,导致土壤可得到的营养物较少,土壤有机碳含量较低^[14],这与本研究结果一致。虽然 CF 的凋落物量比 DF 更多,但 DF 的年平均土壤微生物量大于 CF,说明决定土壤微生物量的是林分凋落物的质量而不是数量^[15]。

3.2 影响土壤微生物量沿海拔梯度变化的主要生态因子

年平均土壤微生物量与土壤有机碳呈显著正相关,这与前人的研究结果一致^[16~18],表明土壤有机碳对土壤微生物量起关键作用,有机碳控制着土壤中能量和营养物的循环,是微生物群落不稳定的能量和营养物的来源,是土壤微生物量形成的重要因素。土壤微生物在进行自身合成与代谢过程中,除了利用碳源以外,还要吸收一定量的氮以完成这一过程^[19],因此土壤微生物量与土壤全氮呈正相关。土壤微生物量与土壤全硫呈显著正相关关系,可能是由于硫对土壤微生物的生长具有促进作用,这有待于作进一步研究。年平均土壤微生物量与土壤湿度呈显著正相关关系,这与 Van 等与 Arnold 等的研究结果一致^[20,21]。Fisher 和 Gosz 发现微生物活性随着土壤湿度的增加而增加,这有利于微生物量的增长^[22]。Acea 和 Carballas 的研究结果表明,由于真菌易于在较高的土壤湿度下快速增长,也有利于微生物量的增长^[23]。本次研究中,年平均土壤微生物量与土壤总有机碳、全氮、全硫含量以及土壤湿度呈显著正相关,而与土壤碳氮比、pH 值、土壤温度、凋落物量、土壤呼吸速率、细根生物量相关不显著,表明土壤有机碳、全氮、全磷和土壤湿度可能是调控土壤微生物量沿海拔梯度变化的主要生态因子。

综上所述,在中亚热带地区土壤微生物量沿海拔梯度具有明显的变化规律,即随着海拔的升高,土壤微生物量逐渐变大。土壤有机碳、全氮、全磷和土壤湿度可能是调控土壤微生物量沿海拔梯度变化的主要因子。

References:

- [1] Jiang P K, Zhou G M. Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under eroded red soil by vegetation recovery. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(1): 112—114.
- [2] Zhao X L, Cheng H T, Lü G H, *et al.* Advances in soil microbial biomass. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(4): 68—72.
- [3] Ruan H H, Zou X M, Scatena F N. Asynchronous fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest. *Plant and Soil*, 2004, 260(1): 147—154.
- [4] Chen G C, He Z L, Yao H Y. Study on Seasonal Change of Red Soil Microbial Biomass. *Journal of Zhejiang University (Agric. and Life Sci.)*, 1999, 25(4): 387—388.
- [5] Vaque D, Guixa-Boixereu N, Gasol J M, *et al.* Distribution of microbial biomass and importance of protests in regulating prokaryotic assemblages in three areas close to the Antarctic Peninsula in spring and summer 1995/96. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49(4): 847—867.
- [6] Kushwaha C P, Trpathi S K, Singh K P. Variations in soil microbial biomass and N availability due to residue and tillage management in dry land rice agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, 2000, 56(3): 153—166.
- [7] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, 1992, 67: 321—358.
- [8] SHI Zheng, WANG Jia-She, HE Rong, *et al.* Soil respiration and its regulating factor along an elevation gradient in Wuyi mountain of southeast China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4): 563—568.
- [9] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8: 189—202.
- [10] Insam H, Domsch K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on consequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*, 1988, 15(2): 177—188.
- [11] Bauhus J, Pare D, Cote L. Effects of tree species stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(8): 1077—1089.
- [12] Smith J L, Paul E A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: *Soil Biochemistry*, Bollag J M and Stotzky, eds. New York: Marcel Dekker, 1991. 359—396.
- [13] Xu Q F, Jiang P K, Shen Q. Comparison of organic carbon pool of soil in bush and broad-leaved forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 18—22.

- [14] Nambu K, Yonebayashi K. Acidic properties of dissolved organic matter leached from organic layers in temperate forests. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 45: 65—77.
- [15] Xu X K, Inubushi K, Sakamoto K. Effect of vegetations and temperature on microbial biomass carbon and metabolic quotients of temperate volcanic forest soils. *Geoderma*, 2006, 136(1): 310—19.
- [16] Roy A, Singh K P. Dynamics of microbial biomass and nitrogen supply during primary succession on blastfurnace slag dumps in dry tropics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 365—372.
- [17] Ghosh A K, Bhattacharyya P, Pal R. Effect of arsenic contamination on microbial biomass and its activities in arsenic contaminated soils of Gangetic West Bengal, India. *Environment International*, 2004, 30(4): 491—499.
- [18] Yuan B C, Li Z Z, Liu H, *et al.* Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(2): 319—328.
- [19] Hofman J, Dusek, Klánová J, *et al.* Monitoring microbial biomass and respiration in different soils from the Czech Republic—a summary of results. *Environment International*, 2004, 30(1): 19—30.
- [20] Van G M, Lad J N, Amato M. Microbial biomass responses to seasonal change and imposed drying regimes at increasing depths of undisturbed topsoil profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(2): 103—111.
- [21] Arnold S S, Fernandez I J, Rustad, *et al.* Microbial response of an acid forest soil to experimental soil warming. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30(3): 239—244.
- [22] Fisher F M, Gosz J R. Effects of trenching on soil processes and properties in a New Mexico mixed-conifer forest. *Biology and Fertility of Soils*, 1986, 2(1): 35—42.
- [23] Acea M J, Carballas T. Principal components analysis of the soil microbial populations of humid zone of Galicia (Spain). *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(6): 749—759.

参考文献:

- [1] 姜培坤, 周国模. 侵蚀型红壤植被恢复后土壤微生物量碳、氮的演变. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 112~114.
- [2] 赵先丽, 程海涛, 吕国红, 等. 土壤微生物生物量研究进展. *气象与环境学报*, 2006, 22(4): 68~72.
- [4] 陈国潮, 何振立, 姚槐应. 红壤微生物量的季节性变化研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 1999, 25(4): 387~388.
- [8] 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子. *生态学杂志*, 2008, 27(4): 563~568.
- [13] 徐秋芳, 姜培坤, 沈泉. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 18~22.