

贵阳喀斯特地区植被类型与季节变化对土壤微生物生物量和微生物呼吸的影响

彭艳^{1,2}, 李心清^{1*}, 程建中^{1,2}, 邢英^{1,2}, 闫慧^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 土壤微生物特性是土壤修复的指示因子, 近年来西南喀斯特地区退化土壤的相关研究较多, 但不同植被类型的土壤微生物特性的变化研究相对较少。对贵阳郊区耕作土壤、灌丛、女贞人工纯林和马尾松人工纯林表层土壤(0~10 cm)微生物生物量碳(SMBC)、微生物呼吸(MR)和微生物代谢熵($q\text{CO}_2$)的研究结果表明, 土壤 SMBC 和 MR 均表现为次生林高于耕作土壤, 灌丛最高; 与 $q\text{CO}_2$ 相反, 马尾松林土壤微生物活动显著弱于其他样地, 不同植被类型土壤微生物活动均表现为在秋季相对较强。与植被类型的显著影响相比, 季节变化、植被与季节的交互作用对 SMBC 和 MR 的影响不明显。SMBC 与土壤温度不相关, 与土壤含水量呈极显著相关而土壤含水量季节变化不明显, MR 与土壤温度和含水量均无显著相关性可能是季节变化对两者影响不明显的主要原因, 但需要大量区域样本进一步证实。认为演替初期的灌丛比人工阔叶或针叶纯林更有利于土壤微生物群落的生长, 土壤有机质积累较快, 植被自然恢复是喀斯特退化土壤恢复初期更适合的途径。

关键词: 植被类型; 季节变化; 土壤微生物生物量; 微生物呼吸; 自发演替

中图分类号: P595; S154.2; S158.5

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2010)03-0266-08

Influence of vegetation types and seasonal variation on soil microbial biomass and microbial respiration in Karst region of Guiyang, southwest China

PENG Yan^{1,2}, LEE Xin-qing^{1*}, CHENG Jian-zhong^{1,2}, XING Ying^{1,2} and YAN Hui^{1,2}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

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

Abstract: Soil microbial properties are direct indicators to soil remediation. Great efforts have been made to combat the soil degradation in the Karst regions in southwest China recent years, fewer researches, however, have been performed to examine changes of microbial characteristics of soils in different vegetation types. We measured soil microbial biomass C (SMBC), microbial respiration (MR) and microbial metabolic quotient ($q\text{CO}_2$) on surface soil (0-10 cm) in tilled field, shrub, *Ligustrum lucidum* forest and *Pinus massoniana* forest in Guiyang, Guizhou Province. The data revealed that SMBC and MR were higher in secondary forests than in tilled field and the shrub plot had the highest values. Contrary to the $q\text{CO}_2$, soil microbes activities were significantly weaker in the *Pinus massoniana* forest than other sampling plots and autumn had strong soil microbes activities among all vegetation types. Compared to the significant effect of vegetation types, seasonal variation and the interaction of vegetation and season had no impact on the SMBC and the MR. The SMBC was not correlated with soil temperature but significantly related to soil water content which had no obvious seasonal variation. Furthermore, MR was not significantly related to either soil temperature or water content, which might be main reasons for no significant seasonal effect. A large number of regional samples are needed to further confirm this speculation. The results suggested that shrub

收稿日期(Received): 2009-06-24; 改回日期(Revised): 2009-11-26; 接受日期(Accepted): 2010-01-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-306-3); 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403205); 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目

作者简介: 彭艳(1983-), 女, 博士研究生, 环境地球化学专业。E-mail: pengyan0502@hotmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): LEE Xin-qing, E-mail: xinqinglee@hotmail.com, Tel: +86-851-5891611

plant is preferable to the pure broad-leaf or needle plant for soil microbial communities and has more rapid accumulation rate of soil organic matter. Natural plant community development is the most appropriate way to the remediation of degraded Karst soils in the early stage of the soil remediation.

Key words: vegetation types; seasonal variation; soil microbial biomass; microbial respiration; microbial metabolic quotient

0 引言

喀斯特地区生态环境脆弱, 人口压力和土地利用方式的不合理使喀斯特地区土壤严重退化。土壤退化使植被实际和潜在覆盖度降低, 是土壤生态系统的主要威胁^[1]。目前贵阳市区原生性植被已全部被破坏, 现有植被均为次生植被。植被恢复可修复退化土壤的特性^[1], 是解决喀斯特环境问题的重要前提和关键^[2]。土壤微生物的一个基本功能是岩屑输入和土壤有机质积累中关键养分的处理和恢复^[3], 它是土壤养分的存储库和植物生长可利用养分的重要源, 能够反映土壤肥力和养分循环状态, 在碳循环中发挥着最大的作用。光自养微生物将 CO₂ 固定为有机物, 有机物可被异养微生物消耗或呼吸, 而呼吸作用最终产物是 CO₂ 和新的细胞质^[4], 土壤呼吸作用引起的 CO₂ 流失量超过 70% 来源于土壤微生物呼吸^[5]。微生物降解、呼吸等作用使光合作用形成的有机物尽快分解、矿化和释放, 使生物圈处于良好的碳平衡中^[6]。土壤微生物生物量在土壤功能中有着重要作用, 被广泛地应用于指示土壤质量的变化。Jenkinson^[7] 提出氯仿熏蒸 - 培养法奠定了简便快速测定土壤微生物生物量的基础, Brookes *et al.*^[8] 提出了一种更直接的估计微生物生物量的方法, 即氯仿熏蒸 - 直接提取法, 但传统的氯仿熏蒸提取法需要大量土壤样本, 微生物生物量 -C、-N 的校正因子 K_c 和 K_n 值变化较大, 分别在 0.23 ~ 0.84、0.17 ~ 0.81 之间, 且对所有土壤使用同一个校正因子可能会产生误差, 使用不同的校正因子又不利于结果的比较^[9]。氯仿熏蒸 - 提取法测得微生物生物量碳与 280 nm 紫外分光光度法测的微生物有机质呈极显著相关, 且紫外分光光度法测得微生物生物量与总生物量氮、水合茚三酮氮都有极显著相关, 因此 Nunan *et al.*^[10] 于 1998 年提出与熏蒸提取法测定微生物量碳显著相关的氯仿熏蒸提取 -UV_{280nm} 法, 认为该法快速、简单、可信, 可用于土壤微生物量的分析。Turner *et al.*^[11] 对英国 29 个土壤的研究同样表明 UV_{280nm} 吸光度的增量与微生物生物量 -C、-N 均

呈较强正相关, 相关系数分别达 0.92 和 0.90, Nunan *et al.* 测得的两者相关系数分别为 0.94 和 0.91。应用该法对草地和耕作土地的研究已见报道, 之前的研究主要集中于低含量的土壤有机质, 而未将有机质作为一个变量考虑^[9]。对热带和温带森林土壤的研究显示, 熏蒸前后 UV_{280nm} 值的增量与熏蒸提取法测得的微生物生物量 -C、-N 成比例, 由此形成了基于 UV 的回归方程以分析微生物生物量。

植被类型与季节变化对土壤微生物生物量及微生物呼吸的影响研究较多, 即使同种气候类型下两者的影响也不尽相同。刘满强等^[12]对喀斯特红壤的研究表明植被和季节存在极显著交互作用, 但季节的影响低于植被。Piao *et al.*^[13] 认为喀斯特植物残体返还土壤的部分相当小, 仅需考虑季节变化对土壤微生物的影响, 并认为季节变化对喀斯特黄壤的土壤微生物影响明显。He *et al.*^[14] 对广西喀斯特土壤的研究发现植被类型和季节变化及其交互作用对微生物(细菌和真菌)种类均有显著影响, 但季节变化对微生物代谢无显著影响。对西双版纳季沟谷雨林和石灰山季雨林的研究表明, 土壤微生物量碳的波动周期比凋落量滞后, 其季节变化受森林凋落量节律的影响^[15]。王国兵等^[16]将森林土壤微生物生物量的季节波动划为夏高冬低型、夏低冬高型和干 - 湿季节交替循环型 3 种主要模式, 并将其归结为主要受土壤温度、湿度、季节干 - 湿交替循环或与植物的生长节律等的影响, 认为应加强对森林土壤微生物生物量季节动态变化调控机理的研究和其动态变化的研究。季节变化主要通过温度和水分条件对土壤微生物过程产生影响^[13-17], 植被对土壤微生物过程的影响则主要归因于枯落物和根系分泌物的质和量的差异^[18-19], 这种差异直接影响生态系统养分输入通量, 因此, 很大程度上植被对土壤微生物群落的影响是与土壤有机质的质量相联系的^[20]。本工作拟研究中亚热带季风湿润气候的植被类型、季节变化及两者交互作用对喀斯特石灰土土壤微生物群落及群落呼吸的影响, 揭示退化土壤不同植被类型土壤微生物活动机理, 从微观生态学

方面优化恢复技术体系。

1 研究区域

贵阳地处 106°27'20" ~ 107°03'00"E, 26°11'00" ~ 26°54'20"N, 位于云贵高原东斜坡地带, 地形、地貌走势大致呈东西向延展, 地势起伏较大, 南北高, 中部低, 海拔 506 ~ 1762 m, 喀斯特地貌大量分布, 属于中亚热带季风湿润区, 年平均气温 15.3 °C, 年均降雨量 1200 mm, 主要集中在夏季, 降雨日数较多, 相对湿度较大, 光照条件较差。贵阳市辖六区一市三县, 城区面积约 495 km², 现有林地面积 18.3 万 hm², 森林覆盖率为 31.7%。研究样地位于贵阳城区东部, 土壤以石灰土和黄壤为主, 主要分布薄层灰岩及白云岩, 植被主要有马尾松 (*Pinus massoniana*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*)、小果蔷薇 (*Rosa cymosa*)、野桐 (*Mallotus tenuifolius*)、蒿类 (*Artemisia* sp.)、五节芒 (*Miscanthus floridulus*)、黄茅 (*Heteropogon contortus*)、百合 (*Lilium brownii*)、菝葜 (*Arthraxon hispidus*)、蕨类 (*Pteridium Scop.*) 等。

2 样品采集

近年来西南喀斯特地区退化土壤的相关研究较多, 但不同植被类型的土壤微生物特性的变化研究相对较少。贵阳市区原生植被已全部被破坏, 现有植被均为次生植被。为反映植被类型与季节变化对喀斯特退化土壤微生物生物量和微生物呼吸的影响, 以植被、土壤类型、土地利用方式和人为干扰等因素为指标在贵阳市郊设置了耕作土壤、灌丛、女贞人工纯林和马尾松人工纯林等 4 个样点, 耕作土壤约 10 m × 3 m, 次生林样地约 10 m × 10 m, 均为同一母质地势相对平坦的石灰土样地, 详见表 1。耕作土壤在每年 1 月、2 月和 4 月分别受火烧、翻耕和施

(尿)肥扰动, 2008 年 9 月玉米收获后秸秆不完全焚烧后留田, 10 月撂荒。灌丛位于坡度约为 20° 的山腰平地, 2008 年 1 月曾受火烧扰动。女贞林在 2009 年 3 月受到翻耕扰动。2008 年 6 月至 2009 年 5 月每月 1 次按 S 形法在每个样地内随机布设 4 个点, 采集 0 ~ 10 cm 的表层土壤, 并混合成 1 个土壤样品。土壤装入自封袋保存带回实验室后拣出树根、石头等, 立即过筛, 充分混匀后于 4 °C 保存。我们将 2008 年 6 ~ 8 月划为夏季, 其后依次是 2008 年 9 ~ 11 月为秋季, 2008 年 12 月至 2009 年 2 月为冬季, 2009 年 3 ~ 5 月为春季。采样期间土壤 0 ~ 10 cm 含水量为: 春季 28.16%、夏季 25.88%、秋季 25.01%、冬季 27.45%, LSD 多重比较结果显示土壤含水量的季节差异不显著。土壤 0 ~ 10 cm 平均温度为: 春季 15.4 °C、夏季 23.1 °C、秋季 19.2 °C、冬季 9.1 °C, LSD 多重比较结果表明土壤温度的季节差异显著; 2008 年 8 月观测到 0 ~ 10 cm 土壤最高温度 24.3 °C, 2009 年 1 月观测到最低温度 3.8 °C。

3 分析方法与数据处理

3.1 微生物生物量的测定

氯仿熏蒸提取-UV_{280nm}法^[10]测定土壤微生物量(SMB)。各样点土样用 Jenkinson 和 Powlson 法熏蒸 24 h 后取出, 在通气良好的地方放置 2 ~ 3 h, 使残留土壤中的氯仿尽可能挥发。未熏蒸的土样置于冰箱中 4 °C 保存至分析。称取相当于烘干土重 10 g 的新鲜土样, 转入 100 mL 三角瓶中, 加 50 mL 0.5 mol/L K₂SO₄, 振荡 30 min 后过滤, 立即在 280 nm 紫外光下测定吸光度。熏蒸和未熏蒸作相同处理。SMB 用单位土中的吸光度增量 $a (\Delta \times 10^{-3}/g)$ 表示, $a = (abs_{熏} / G_{熏}) - (abs_{未熏} / G_{未熏})$, 其中 abs 代表 UV_{280nm} 的吸光度, G 代表烘干土重。

表 1 实验样地概况

Table 1 Status of experimental plots

样地	地理位置	主要植被
耕作土壤	26°32'43.4"N, 106°46'43.5"E	玉米 (corn)、豆类 (beans)
0 ~ 1 a 灌丛 (简称灌丛)	26°32'32.2"N, 106°46'22.6"E	蒿类 (<i>Artemisia</i> sp.)、蕨类 (<i>Pteridium Scop.</i>)、女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)、五节芒 (<i>Miscanthus floridulus</i>)、黄茅 (<i>Heteropogon contortus</i>) 等
10 a 女贞人工纯林 (简称女贞林)	26°32'35.7"N, 106°46'42.0"E	女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)、小果蔷薇 (<i>Rosa cymosa</i>)、蒿类 (<i>Artemisia</i> sp.)、菝葜 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、五节芒 (<i>Miscanthus floridulus</i>)、黄茅 (<i>Heteropogon contortus</i>)、百合 (<i>Lilium brownii</i>) 等
30 a 马尾松人工纯林 (简称马尾松林)	26°32'41.3"N, 106°46'46.9"E	马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>)、野桐 (<i>Mallotus tenuifolius</i>)、小果蔷薇 (<i>Rosa cymosa</i>)、云南鼠刺 (<i>Itea yunnanensis</i>)、蒿类 (<i>Artemisia</i> sp.) 等

土壤微生物在土壤有机质分解和养分循环中有着重要作用,有机质含量可能会影响 UV_{280nm} 吸光度的增量, ΔUV_{280nm} 和有机质的校准模型能解释用氯仿熏蒸-提取法测定的森林表层土壤微生物生物量 -C、-N 的 86% ~ 93% 的浓度变化^[9]。为方便文献间微生物生物量的比较及微生物代谢熵的计算,基于 UV 的回归方程将 UV_{280nm} 的吸光度换算成微生物生物量碳(SMBC),如下式^[9]:

$$SMBC = (6569.7 \pm 695.1) \times \Delta UV_{280nm} + (10.8 \pm 0.9) \times TC$$

$$n = 172, R^2 = 0.94, p < 0.001$$

SMBC 的单位为 mg/kg, ΔUV_{280nm} 的单位为 $\Delta \times 10^{-3}/g$, 总碳(TC)的单位为 g/kg。

3.2 土壤微生物呼吸的测定

土壤微生物呼吸(MR)采用改进的密闭室法。称取 100 g 鲜土均匀平铺于 1.5 L 密闭箱底部,于 30 °C 恒温培养 48 h,分别抽取 35 mL 气体至已抽真空的密闭瓶中。MR 以 48 h 累积产生的 CO_2 计算。HP 5890 GC 分析 CO_2 , 检测器为 FID, 分析柱为 Porapak Q, 载气为 N_2 , 柱温 50 °C, 检测器温度为 320 °C。

3.3 数据处理

数据用均值 \pm 标准偏差表示,在进行方差分析时进行方差齐次性和正态分布检验,不符合条件者用对数 $\lg(x+1)$ 转换,利用 SPSS 13.0 数理统计软件(Chicago, IL, USA)进行 LSD 最小显著差法的多重比较、Two-Way ANOVA 方差分析和 Pearson 相关分析, SigmaPlot 10.0 绘图软件绘图。

4 结果与分析

4.1 土壤微生物生物量与季节变化

图 1 和图 2 分别给出了模型校准前后不同植被类型土壤微生物生物量的箱图及季节变化。由图 1 (A)可知,灌丛 SMB 年均值最高,为 $(34.58 \pm 10.21) \Delta \times 10^{-3}/g$, LSD 最小显著差法结果表明灌丛与其他样地差异显著;其后依次为女贞林 ($(20.94 \pm 6.14) \Delta \times 10^{-3}/g$) 和马尾松林 ($(20.45 \pm 9.71) \Delta \times 10^{-3}/g$), 耕作土壤最低,为 $(15.79 \pm 6.37) \Delta \times 10^{-3}/g$ 。各样地 SMB 的年变幅依次为: 耕作土壤 ($(6.30 \sim 28.10) \Delta \times 10^{-3}/g$)、灌丛 ($(22.5 \sim 51.8) \Delta \times 10^{-3}/g$), 女贞林 ($(12.7 \sim 32.8) \Delta \times 10^{-3}/g$) 和

马尾松林 ($(8.1 \sim 39.2) \Delta \times 10^{-3}/g$), 马尾松林 SMB 的年变幅明显高于女贞林。

由图 1(B)可知, SMBC 与图 1(A) 的趋势一致,灌丛高于女贞林和马尾松林,耕作土壤最低,其年均值依次为 $(756.40 \pm 67.08) mg/kg$ 、 $(663.52 \pm 40.34) mg/kg$ 、 $(540.43 \pm 63.81) mg/kg$ 和 $(439.63 \pm 41.86) mg/kg$, 模型校准后 SMBC 在各样地间差异显著,而校准前仅仅是灌丛与其他样地差异显著,表明有机质含量的变化显著影响了 UV_{280nm} 吸光度的增量。

由图 2(A)可知,灌丛土壤微生物生物量季均值较高,在 $29.60 \sim 40.08 \Delta \times 10^{-3}/g$ 之间,冬春两季高于夏秋两季。女贞林和马尾松林季均值变幅分别为 $18.50 \sim 22.93 \Delta \times 10^{-3}/g$ 和 $12.67 \sim 31.03 \Delta \times 10^{-3}/g$, 夏秋两季均高于冬春两季。与次生林相比,耕作土壤较低,均值在 $11.93 \sim 17.57 \Delta \times 10^{-3}/g$ 之间,冬季最低。由图 2(B)可知,模型校准后,四样地

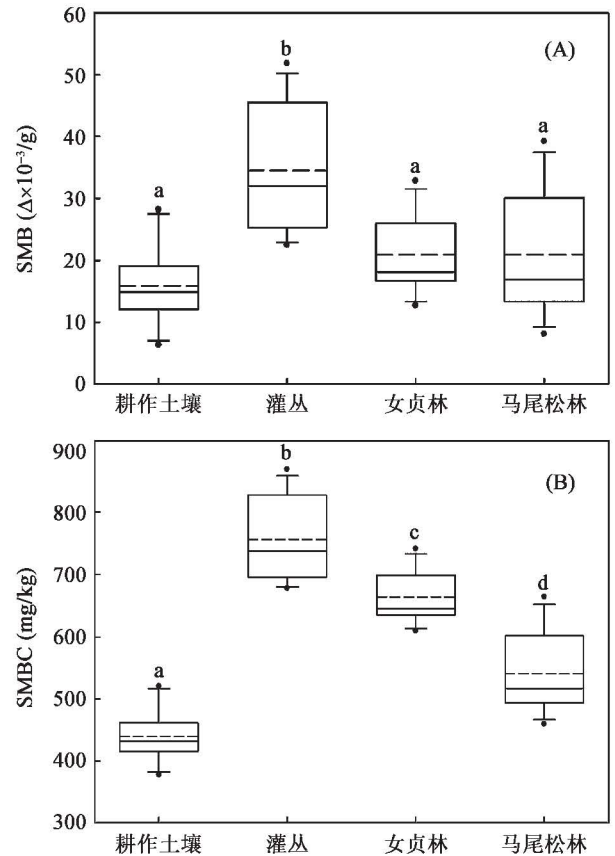


图 1 不同植被类型土壤微生物生物量的箱图

Fig. 1 Box-plot of soil microbial biomass among different vegetation types

A 图和 B 图分别为模型校准前后不同植被类型土壤微生物生物量的箱图。箱体中的实线为中位数,虚线为平均数,箱体为四分位(箱体下端为第二十五百分数,上端为第七十五百分数),两头伸出的线条表现极端值(以下同)。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

的季节波动小于校准前, LSD 最小差法结果表明校准前后除马尾松林夏季与春冬两季、冬季与夏秋两季有显著性差异外, 其他三个样地季节变化均不显著。

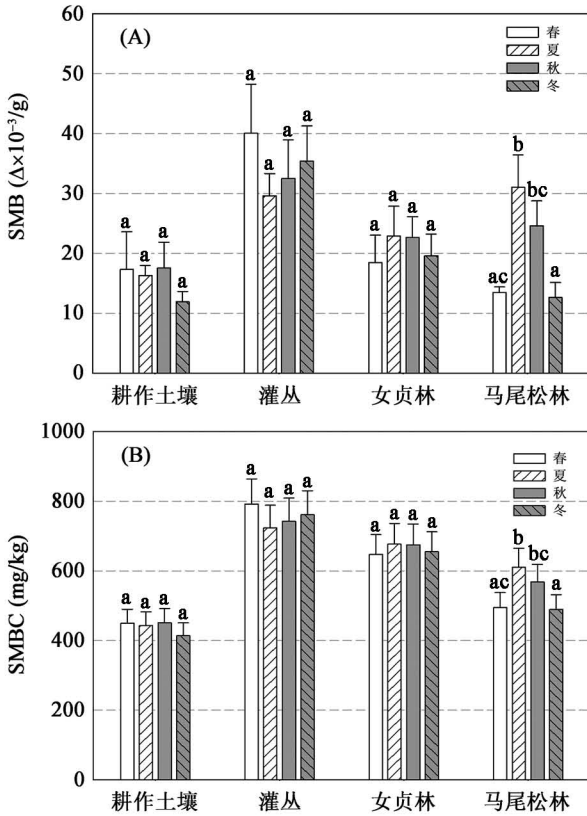


图2 不同植被类型土壤微生物生物量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of soil microbial biomass among different vegetation types

A 图和 B 图分别为模型校准前后不同植被类型土壤微生物量的季节变化。同一样地不同小写字母表示在 0.05 水平上季节差异显著。

4.2 土壤微生物呼吸与季节变化

图 3 和图 4 分别给出了不同植被类型 MR 箱图和季节变化情况。由图 3 可知耕作土壤与次生林地间差异显著, 其年均值为 $(0.54 \pm 0.22) \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h})$; 灌丛 $((0.98 \pm 0.35) \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h}))$ 和马尾松林 $((0.96 \pm 0.32) \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h}))$ 稍高于女贞林 $((0.83 \pm 0.41) \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h}))$, 次生林地间无显著差异。由图 4 可知, 灌丛的季节变幅在 $0.65 \sim 1.20 \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 之间, 春夏高于秋冬, 秋季最低, 春秋两季差异显著。女贞林在 $0.78 \sim 0.95 \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 之间变动, 冬季最高, 夏季最低; 马尾松林变幅在 $0.75 \sim 1.12 \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 之间, 春夏两季高于秋冬两季, 冬季最低, LSD 最小

差法分析结果表明女贞林和马尾松林 MR 季节变化不明显。与次生林相比, 耕作土壤各季 MR 均值较低, 在 $0.39 \sim 0.78 \mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 之间变动, 夏季显著高于秋冬两季, 秋季最低。

4.3 土壤微生物代谢熵与年变化

土壤微生物代谢熵即 MR 与 SMBC 的比率, 即每克微生物量碳每小时释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的毫克数, 是常被用于指示土壤过程的参数, 用 $q\text{CO}_2$ 表示, 能反映微生物活动的强弱。由图 5 可知, 马尾松林土壤 $q\text{CO}_2$ 与其他三个样地差异显著, 其年均值最高 $(1.78 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h}))$, 其后依次为灌丛 $(1.29 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h}))$ 和女贞林 $(1.27 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h}))$, 耕作土壤 $(1.22 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h}))$ 最低。

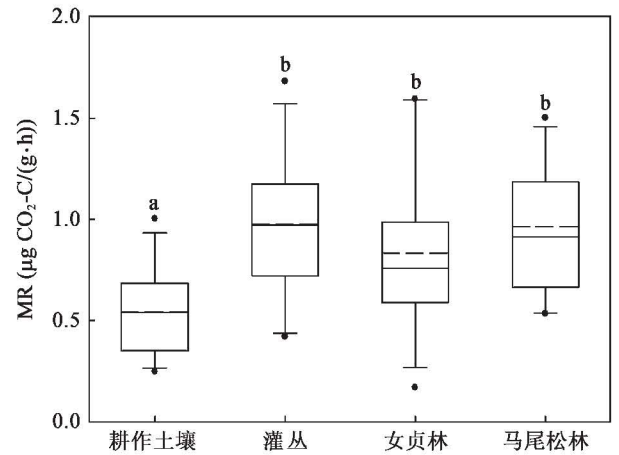


图3 不同植被类型土壤微生物呼吸速率箱图

Fig. 3 Box-plot of soil microbial respiration rate among different vegetation types

不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

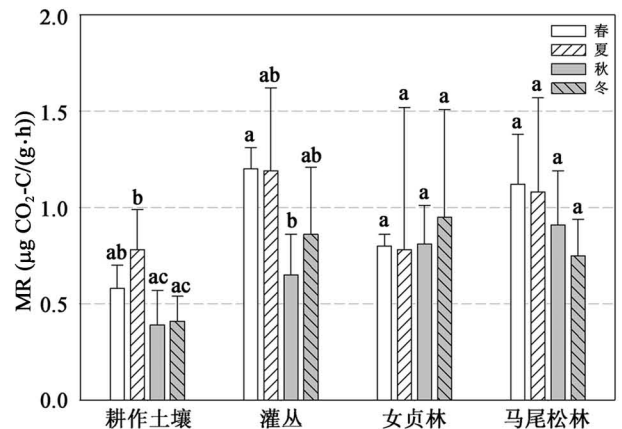


图4 不同植被类型土壤微生物呼吸速率的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of soil microbial respiration among different vegetation types

同一植被类型不同的小写字母表示在 0.05 水平上季节差异显著。

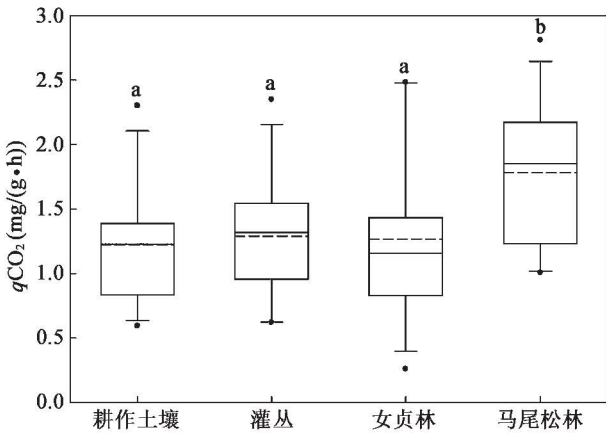


图 5 不同植被类型土壤微生物代谢熵的箱图

Fig. 5 Box-plot of soil microbial metabolic quotient among different vegetation types

不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 6 是不同植被类型 qCO_2 的季节变化图。各样地 qCO_2 在秋季均相对较低, 耕作土壤、灌丛和马尾松林均是春夏两季高于秋冬两季, 耕作土壤夏季与秋冬两季差异显著, 灌丛夏秋两季差异显著, 女贞林和马尾松林季节变化不显著。

4.4 双因素方差分析和 Pearson 相关分析

双因素方差分析采用 F 检验, 包含两个控制变量, 目的是分析控制变量、控制变量的交互作用及随机变量是否对观测变量产生了显著影响。为了分析

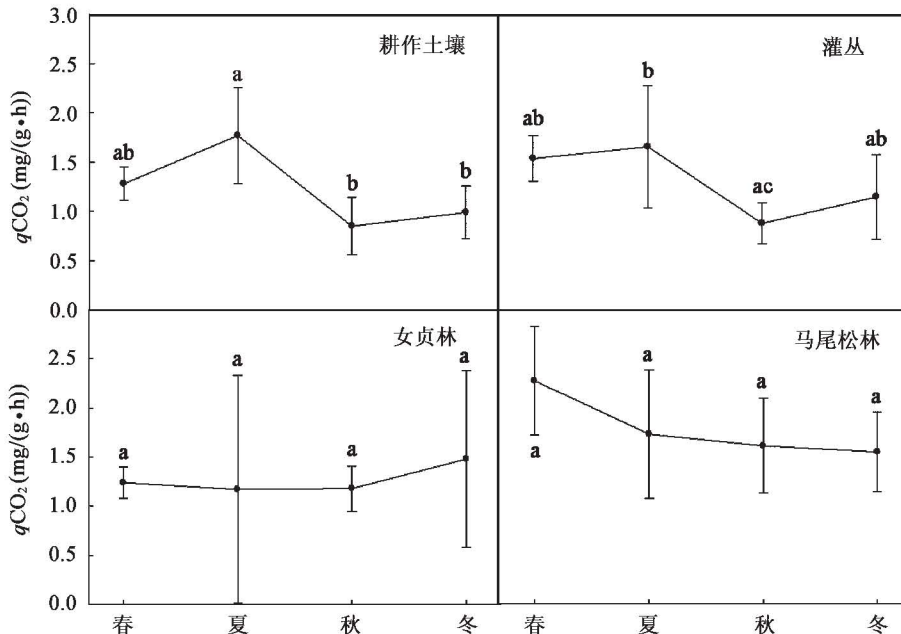


图 6 不同植被类型土壤微生物代谢熵的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of soil microbial metabolic quotient among different vegetation types

不同小写字母表示在 0.05 水平上季节差异显著。

植被类型 (Vegetation)、季节变化 (Season) 及两者的交互作用 (Vegetation * Season) 是否对 SMB 和 MR 产生了显著的影响, 以植被类型和季节变化为控制变量进行 Two-way ANOVA 双因素方差分析。结果表明, 植被类型对 SMB 和 MR 有极显著影响, 与植被类型相比, 季节变化、植被与季节的交互作用对两者影响均不显著 (表 2)。

Pearson 相关分析表明, SMBC、MR 均与土壤含水量存在极显著相关性 (r 分别为 0.461 和 0.637, $p < 0.01$), MR 与含水量相关性不显著。SMBC、MR 与 0~10 cm 土壤均温无相关性, 但均与土壤有机碳含量显著相关 (相关系数分别为 $r=0.813$, $p < 0.01$ 和 $r=0.321$, $p < 0.05$) (未发表数据)。

5 讨论

5.1 植被类型与季节变化对 SMBC 的影响

图 1 可知, 灌丛 SMBC 与其他三种植被差异显著, 植被类型、养分条件和人为干扰都是可能的影响因素。杨喜田等 [21] 对太行山石灰岩山地的研究表明, 灌丛土壤微生物数量和微生物量大大超过其他植被类型, 落叶阔叶林和针阔混交林微生物量也高于针叶纯林和针叶混交林。灌丛处于退化土壤恢复初期, 浅表层有较多的根系及其分泌物, 死亡的根和

根系分泌物是土壤微生物丰富的能源物质, 光合产物主要集中在该区域, 使得自发演替初期灌丛土壤有机质积累较快。SMBC 与有机碳的强相关关系 ($r=0.813$, $p < 0.01$) 也表明土壤微生物群落越大, 有机质积累越快。灌丛样点分布有 0~1 a 生女贞, 但 SMBC 显著高于 10 a 女贞人工纯林, 表明植被的自然恢复较种植人工纯林更适合喀斯特退化土壤的初期修复。林地土壤养分不断向地上部分输出则限制了土壤质量的迅速发展, 凋落物的质量和数量

表 2 土壤微生物生物量与土壤微生物呼吸的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA analysis of soil microbial biomass and microbial respiration

Source	df	SMB		MR	
		Mean Square	F	Mean Square	F
Vegetation	3	0.128	12.498**	0.029	4.895**
Season	3	0.002	0.983	0.011	1.855
Vegetation * Season	9	0.002	1.488	0.004	0.733
Error	32	0.001	-	0.006	-

注: ** 表示在 0.01 水平上影响显著。

是林地微生物生物量的决定因子^[12]。马尾松林枯落物分解缓慢,土壤有机质积累过程长,植物生长对土壤养分的吸收与微生物群落生长间存在竞争作用,林木生长对养分的需求大于土壤微生物群落的转化能力,矿化作用高于固定化作用等可能是导致马尾松林 SMBC 较低的原因。耕作土壤 SMBC 低于次生林表明农业活动对土壤微生物群落有一定的影响。

耕作土壤在冬季撂荒,微生物活性最低。灌丛地表覆盖度低于女贞林和马尾松林,雨季集中的降水使得土壤养分易随斜坡流失,春温回升则有利于微生物群落生长,SMBC 冬春两季高于夏秋两季。女贞林和马尾松林 SMBC 夏秋两季均高于冬春两季,雨热同季使得植物和微生物生长旺盛,枯落物的增加也有利于土壤有机质的积累,土壤微生物可利用基质增加。尽管 SMBC 存在一些季节差异,但 LSD 最小显著差法结果(图 2)表明除马尾松林外,各样地季节变化均不显著。Two-way ANOVA 双因素方差分析结果(表 2)显示植被类型的均方差为 0.128,占总均方差的 96.2%,对 SMBC 具有极显著影响,季节变化、植被与季节交互作用对 SMBC 的影响与植被类型的影响相比较小,方差贡献仅分别占 1.5%,可能与采样期间土壤含水量的季节变化不显著有关,但需要大量区域样本进一步证实。

5.2 植被类型与季节变化对 MR 的影响

土壤呼吸作用常用于判断土壤有机残体的分解速度和强度,SMBC 与 MR 的极显著相关性($r = 0.389$, $p < 0.01$)表明土壤微生物群落越大,土壤有机残体的分解速度越快,强度越大。耕作土壤 SMBC 和 MR 均显著低于次生林地表明受农业活动影响,耕作土壤有机残体分解慢,微生物群落相对较小。植被类型通过凋落物的质量和数量对 MR 产生影响,Two-way ANOVA 双因素方差分析(表 2)表

明其均方差为 0.029,占总均方差的 58.0%,影响极显著。灌丛土壤有机残体分解的速度和强度最快,马尾松林最慢,农田低于次生林地,即土壤熟化程度越高,有机残体的分解速度及强度越低。不同植被类型 MR 有一定季节差异,灌丛春秋两季差异显著,女贞林冬高夏低,马尾松林春夏高于秋冬,耕作土壤夏季显著高于秋冬两季,Högberg *et al.*^[122]认为植物地下部分 C 分配差异造成了土壤呼吸的季节滞后性。与植被类型的显著影响相比,季节变化的方差贡献为 22.0%,对 MR 影响不显著;植被与季节交互作用的影响更小,方差贡献仅达到 8.0%。MR 与土壤温度、土壤含水量均无显著相关性,可能是其季节变化及植被和季节的交互作用不显著的主要原因。

5.3 不同植被类型土壤微生物代谢熵的差异

马尾松林土壤微生物代谢熵显著高于其他三个样地(图 5),土壤微生物维持本身生命所需的能量需求较大,马尾松林枯落物分解缓慢,植物摄取与微生物需求间产生了竞争,土壤微生物活性较弱。不同植被类型土壤微生物代谢熵在秋季均相对较低,即喀斯特地区秋季土壤微生物活动相对强烈,枯落物的增加导致土壤有机质的增加,为微生物生长提供了充足的能源。耕作土壤、灌丛和马尾松林微生物代谢熵均是春夏两季高于秋冬两季,即秋冬两季土壤微生物活动高于春夏两季,春夏两季植物生长摄取了土壤中大量的碳,微生物可利用的基质相应减少,植物摄取与微生物间产生了竞争。耕作土壤夏季与秋冬两季差异显著,也进一步表明作物摄取和微生物需求的矛盾,秋季收割冬季撂荒则减弱了这种矛盾,微生物在秋冬两季较为活跃。灌丛夏秋两季差异显著,女贞林和马尾松林季节变化不显著,表明植被覆盖对土壤微生物有较大影响,退化土壤植被的恢复有利于土壤微生物群落的生长。

参考文献(References)

- [1] Jia Guo-mei, Cao Jing, Wang Chunyan, Wang Gang. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziulin, northwest China[J]. Forest Ecol Manag, 2005, 217(1): 117-125.
- [2] 侯满福, 蒋忠诚. 茂兰喀斯特原生林不同地球化学环境的植物物种多样性[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 572-576.
Hou Man-fu, Jiang Zhong-cheng. Species diversity of karst original forest in different geochemical environments in Maolan[J]. Ecol Environ, 2006, 15(3): 572-576 (in Chinese with English

- abstract).
- [3] Caldwell B A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review[J]. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 637–644.
- [4] Maier R M, Pepper L L, Gerba C P. 环境微生物学(下册)[M]. 张甲耀, 宋碧玉, 郑连爽, 安志东, 章晓联, 译. 北京: 科学出版社, 2004: 443–455, 475–477.
Maier R M, Pepper L L, Gerba C P. *Environment Microbiology (the Second Volume)* [M]. Zhang Jia-yao, Song Bi-yu, Zheng Lian-shuang, An Zhi-dong, Zhang Xiao-lian, tr. Beijing: Science Press, 2004: 443–455, 475–477 (in Chinese).
- [5] Buchmann N. Biotic abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(11/12): 1625–1635.
- [6] 周德庆. 微生物学教程(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 264–267.
Zhou De-qing. *Microbiology (2nd ed)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 264–267 (in Chinese).
- [7] Jenkinson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil — IV. The decomposition of fumigated organisms in soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1976, 8(3): 203–208.
- [8] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17(6): 837–842.
- [9] Xu X, Zhang T, Liu Z. Calibration model of microbial biomass carbon and nitrogen concentrations in soils using ultraviolet absorbance and soil organic matter[J]. *Eur J Soil Sci*, 2008, 59(4): 630–639.
- [10] Nunan N, Morgan M A, Herlihy M. Ultraviolet absorbance (280 nm) of compounds released from soil during chloroform fumigation as an estimate of the microbial biomass[J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(12): 1599–1603.
- [11] Turner B L, Bristow A W, Haygarth P M. Rapid estimation of microbial biomass in grassland soils by ultra-violet absorbance[J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33(7/8): 913–919.
- [12] 刘满强, 胡锋, 何园球, 李辉信. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 937–944.
Liu Man-qiang, Hu Feng, He Yuan-qiu, Li Hui-xin. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soils[J]. *Acta Pedol Sinica*, 2003, 40(6): 937–944 (in Chinese with English abstract).
- [13] Piao H C, Hong Y T, Yuan Z Y. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soils from karst areas of southwest China[J]. *Biol Fertil Soils*, 2000, 30(4): 294–297.
- [14] He X Y, Wang K L, Zhang W, Chen Z H, Zhu Y G, Chen H S. Positive correlation between soil bacterial metabolic and plant species diversity and bacterial and fungal diversity in a vegetation succession on Karst[J]. *Plant Soil*, 2008, 307(1): 123–134.
- [15] 吴艺雪, 杨效东, 余广彬. 两种热带雨林土壤微生物生物量碳季节动态及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 658–663.
Wu Yi-xue, Yang Xiao-dong, Yu Guang-bin. Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon and its influence factors in two types of tropical rainforests[J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, 18(2): 658–663 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 何容. 森林土壤微生物生物量动态变化研究进展[J]. *安徽农业大学学报*, 2009, 36(1): 100–104.
Wang Guo-bing, Ruan Hong-hua, Tang Yan-fei, He Rong. A review on the dynamics of soil microbial biomass in forest ecosystems[J]. *J Anhui Agr Univ*, 2009, 36(1): 100–104 (in Chinese with English abstract).
- [17] Widén B. Seasonal variation in forest-floor CO₂ exchange in a Swedish coniferous forest[J]. *Agr Forest Meteorol*, 2002, 111(4): 283–297.
- [18] Grayston S J, Vaughan D, Jones D. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: The importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability[J]. *Appl Soil Ecol*, 1997, 5(1): 29–56.
- [19] Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility[J]. *Ann Forest Sci*, 2002, 59: 233–253.
- [20] Saetre P, Bååth E. Spatial variation and patterns of soil microbial community structure in a mixed spruce-birch stand[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(7): 909–917.
- [21] 杨喜田, 宁国华, 董惠英, 李有. 太行山区不同植被群落土壤微生物学特征变化[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1761–1764.
Yang Xi-tian, Ning Guo-hua, Dong Hui-ying, Li You. Soil microbial characters under different vegetation communities in Taihang Mountain Area[J]. *Chinese J Appl Ecol*, 2006, 17(9): 1761–1764 (in Chinese with English abstract).
- [22] Högborg P, Bhupinderpal-Singh, Löfvenius M O, Nordgren A. Partitioning of soil respiration into its autotrophic and heterotrophic components by means of tree-girdling in old boreal spruce forest[J]. *Forest Ecol Manag*, 2009, 257(8): 1764–1767.