

贵州高原退化喀斯特森林恢复过程中土壤微生物生物量碳、微生物熵的变化

魏媛^{1,3}, 张金池², 俞元春², 喻理飞³

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

摘要:采用微生物培养法及氯仿熏蒸法分析了退化喀斯特森林恢复过程中不同层次、不同生境、根际和非根际土壤中土壤微生物生物量碳(soil microbial biomass C, SMBC)及微生物熵(qSMBC)的变化特征。结果表明:①退化喀斯特森林恢复过程中 SMBC 及 qSMBC 存在较大差异。随着退化喀斯特森林的恢复, SMBC 及 qSMBC 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, 反映出土壤质量在逐渐恢复;②SMBC 在土壤剖面上均表现明显的垂直变化特征, 即随土层深度的增加呈递减趋势, 具体表现为 A 层>B 层, 但 qSMBC 随土层深度的增加呈递增趋势;③SMBC 的变化特征在不同生境间表现为:除裸地恢复阶段外, 其它三个阶段总体上表现为石沟比石槽和土面两个小生境偏大的特点, 这是因为石沟生境有利于微生物类群和土壤动植物群体的繁殖, 但 qSMBC 的变化刚好与之相反;④SMBC 及 qSMBC 根际和根外变化明显, 前者表现为根际>非根际, 后者表现为根际<非根际。

关键词:退化喀斯特森林; 恢复序列; 土壤微生物生物量碳; 微生物熵; 贵州高原

中图分类号: S154.37

文献标识码: B

文章编号: 1000-0275(2009)04-0487-04

Changes of Soil Microbial Biomass C and qSMBC during Degraded Karst Forest Restoration in Guizhou Plateau

WEI Yuan^{1,3}, ZHANG Jin-chi², YU Yuan-chun², YU Li-fei³

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

Abstract: The changes of SMBC and qSMBC of different soil layer, different microhabitats and rhizosphere, non-rhizosphere were studied during the process of degraded karst forest restoration by using the methods of microbial incubation and the chloroform fumigation-direct extraction. The results showed that SMBC and qSMBC had obvious difference. With degraded karst forest restoration, SMBC and qSMBC were ascending obviously, taking on arboreal community stage>shrubby community stage>herbaceous community stage>bare land stage, which indicated that the soil quality has been restored gradually. The SMBC and qSMBC took on the characteristic of vertical change in the soil profile, which decreased with the increase of the soil depth, presenting A>B. But change of qSMBC was opposite, it decreased with the forest restoration. The changes of SMBC in different habitats overall performed the characteristics which stone gully was higher than soil surface and stone-groove, It was because stone gully habitat were advantageous to breed soil microorganisms and animal and plant groups. But change of qSMBC was just opposite. The SMBC and qSMBC were different between the rhizosphere and non-rhizosphere. The former performed obviously rhizosphere>non-rhizosphere, the later performed rhizosphere<non-rhizosphere.

Key words: degraded karst forest; restoration sequence; soil microbial biomass C; qSMBC; Guizhou plateau

贵州地处我国西南喀斯特地区的中心,境内多为碳酸盐岩山地。因该区生态环境脆弱,加上巨大的人口压力,强烈且不合理的人为干扰,造成森林破坏,土地石漠化现象严重。目前,已退化的喀斯特森林生态系统的恢复与重建已成为改善该区生境、发展区域经济及治理石漠化土地的迫切需求。土壤生态系统中存在着大量的微生物群落,它们在土壤的物质转化和能量流动中起着重要的作用,参与土壤中有机物质的分解和土壤腐殖质的形成和分解过程,以及土壤养分的转化和循环等^[1]。喀斯特地区因岩石溶蚀作用,与常态地貌相比,形成差异很大的小地形,其土壤、小气候等有较大差异,

有石面、土面、石沟、石槽、石缝、石洞等6种小生境^[2],因各小生境的枯枝落叶和土壤聚积的差异,导致土壤质量不同,另一方面,随退化森林的恢复,土壤垂直剖面及根际、非根际的土壤可能具有一定的差异。土壤微生物生物量碳(SMBC)是土壤营养库的一个重要组成部分,其与土壤有机碳的比值是衡量土壤有机碳积累或缺失的一个重要指标^[3-4]。因此,研究退化喀斯特森林恢复过程中 SMBC 及微生物熵(qSMBC)的变化,可以直接或间接地反映不同森林群落对土壤的改良作用,为不同程度的退化喀斯特生态系统森林恢复模式的选择提供参考依据。

基金项目:国家自然科学基金项目(30872076);国家973重点基础研究发展规划项目(2006CB403206);国家“十一·五”科技支撑计划项目(2006BAC01A09);国家“十一·五”科技支撑计划项目(2006BAD03A1006)。

作者简介:魏媛(1976-),女,贵州毕节人,博士,从事恢复生态及土壤生物生态研究;通讯作者:喻理飞。

收稿日期:2009-03-06;**修回日期:**2009-05-08

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 105° 38' 48" E, 25° 38' 982" N, 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。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 800~1150m; 河谷气候日照充足, 平均气温 15.8℃, 年均极端最高气温为 32.4℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 6542℃; 平均年降水量 1100mm, 10 月至次年 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 为 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。该区内不同年限裸露喀斯特地貌经过天然恢复形成 4 个阶段, 分别为裸地阶段(I)、草本群落阶段(II)、灌木阶段(III)和乔木阶段(IV)四个阶段^[2]。各阶段样地森林盖度和主要组成物种如表 1。

表 1 退化喀斯特森林不同恢复阶段主要组成物种

恢复阶段	森林类型	森林盖度 (%)	主要组成物种(优势种)
I	裸荒地	-	有极少量阳性先锋树种幼苗如野桐 (<i>Mallotus tenuifolius</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>), 近无草本植物。
II	草地	50	草本植物主要有荩草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i>)、灰苞蒿 (<i>A. roxburghiana</i>) 等; 木本植物主要有野桐 (<i>Mallotus tenuifolius</i>)、青檀 (<i>Pteroceltis tatarinowii</i>)、火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)、构树 (<i>Broussonetia papyrifera</i>) 等。
III	灌木林	70	灌木层主要有川钓樟 (<i>Lindera pulcherima</i> var. <i>hemsleyana</i>)、清香木 (<i>Pistacia weinmannifolia</i>)、云南鼠刺 (<i>Itea yunnanensis</i>)、圆叶乌桕 (<i>Sapium rotundifolium</i>)、山麻杆 (<i>Alchornea davidii</i>)、石岩枫 (<i>Mallotus repandus</i>)、烟管荚蒾 (<i>Viburnum utile</i>)、重阳木 (<i>Bischofia polycarpa</i>)、暖木 (<i>Meliosma</i>)
IV	森林	80	乔木层主要有青檀、朴树 (<i>Celtis sinensis</i>)、南酸枣 (<i>Choerospondias axillaris</i>)、香椿 (<i>Toona sinensis</i>)、小叶榕 (<i>Ficus concinna</i>)、川钓樟等; 灌木层主要有竹叶椒 (<i>Zanthoxylum planispinum</i>)、喜玛拉雅旌节花 (<i>Stachyurus himalaicus</i>)、灰毛浆果楝 (<i>Cipadessa cinerascens</i>)、山麻杆、野桐、石岩枫等。

1.2 供试土壤采集

以空间代替时间的方法^[9], 在有代表性的地段, 选择坡度、坡向、坡位和裸岩率等基本一致的裸地、草本群落、灌木群落、乔木群落四种类型的样地 (面积分别为 800 m²)。在春 (2007 年 3 月)、夏 (2007 年 8 月)、秋 (2007 年 11 月)、冬 (2008 年 1 月) 四个季节用锄头、铁铲及土壤刀以 S 型或梅花型五点混合取样法。对每一类型样地分不同生境 (土面、石沟、石槽), 不同层次 (在土壤剖面上根据颜色不同划分 A、B 层, 先取 B 层土, 再取 A 层土), 根际和非根际 (II、III、IV 三个

恢复阶段分别随机选出的优势物种各 5 株作为采样点) 采集土壤样品。同一样地分别按相同生境、相同层次、相同的取样区域 (根际和非根际) 的 5 个点的土样等比例混匀为一个混合样, 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, 将其分为 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 2。

表 2 供试土壤的基本情况

恢复阶段	森林类型	土壤含水量 (%)	容重 (g/cm ³)	pH	有机质含量 (g/kg)
I	裸荒地	16.84a	1.43a	7.17a	27.95a
II	草地	22.52b	1.35a	7.23a	34.39b
III	灌木林	26.19c	1.26b	7.32b	49.05c
IV	森林	30.79d	1.05c	7.40b	57.54d

注: 数据为每一恢复阶段供试样品的平均值, 同列不同小写字母间表示 LSD 检验差异达显著水平 ($n=(3\times 2+2)\times 4\times 3=96$ (裸地为 72, $P<0.05$)。下表同。

1.3 测定方法

土壤密度和含水量用常规方法测定^[6], 有机碳的测定采用重铬酸钾-硫酸外加热法^[6]; 土壤 pH 采用蒸馏水 (土水质量比 1:2.5) 浸提 30min, 用 pH S-3C 精密 pH 计测定。

SMBC 的测定采用熏蒸-浸提法^[7], 按下式计算:

$$\text{Cmic} = \text{FC} / \text{KC}$$

式中 FC 为熏蒸土壤所提取的有机碳与未熏蒸土壤所提取的有机碳的差值, KC 为 SMBC 的转换系数, 取 0.38^[8]。

$$\text{qSMBC} = \text{Cmic} / \text{Corg}$$

式中 qSMBC 为微生物熵, Cmic 为微生物生物量碳, Corg 为土壤有机碳。

1.4 数据处理

一般的数据处理应用 Excel 计算, 应用 SPSS 及 DPS 统计软件进行 ANOVA 分析、LSD 多重比较及 T 检验。

2 结果与分析

土壤微生物生物量碳 (SMBC) 是指土壤中体积小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}$ 活的微生物生物量碳, SMBC 是所有进入土壤的有机物必须通过的“针眼”^[9], 是促使土壤中有机物和植物养分转化、循环的动力因素, 是植物矿质养分的源和汇, 是稳定态养分转变为有效态养分的催化剂^[10-11]。SMBC 在土壤中的含量较大程度上代表着土壤生物活性有机碳的储量, 虽然只占土壤总有机碳的 1%~3%, 但这一部分的有机碳却影响着所有土壤有机质的转化, 是整个森林生态系统中养分和能源循环的“动力”^[12]。SMBC 也已作为土壤质量变化的敏感指标^[13]。土壤微生物熵 (qSMBC) 是 SMBC 与有机碳的比值。qSMBC 可以作为有机碳生物有效性指标^[14], 可以指示土壤质量的变化和土壤健康状况或土壤肥力的指标。在同一地区 qSMBC 可以作为反映因土壤管理措施变化而造成有机质变化的一个指标, 能预测土壤有机质长期变化或监测土地退化及恢复状况^[15]。

2.1 SMBC 及 qSMBC 的垂直变化

SMBC 不仅是土壤肥力的一项重要参数, 而且也是保持

土壤质量可持续性演变的重要指标之一^[8]。qSMBC 是衡量一个生态系统土壤有机碳积累或损失的一个重要指标,该比值越高表示土壤碳的积累越多^[16]。SMBC 及 qSMBC 总体平均值的垂直变化规律如图 1 所示。

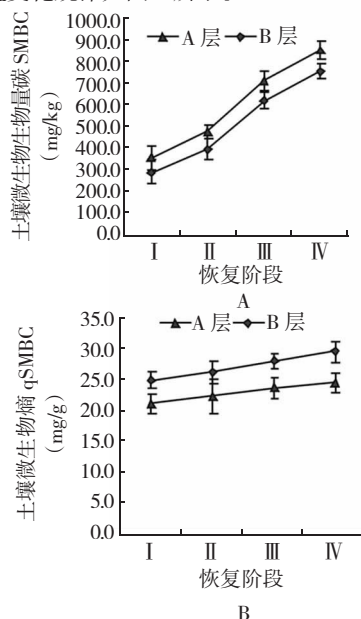


图 1 森林恢复过程中 SMBC 及 qSMBC 的垂直变化(n=36)

从图 1(A)可以看出,SMBC 在土壤剖面上表现出垂直分布特征,表现为 A>B 层。四个恢复阶段的 A 层 SMBC 分别是 B 层的 1.224、1.209、1.146 和 1.126 倍,t- 检验表明,同一森林恢复阶段不同土层 SMBC 差异显著($p<0.05$),其垂直分布与已有其它地区研究结果基本一致^[17-18],主要原因是 A 层土壤通常比 B 层土壤具有更适合微生物生长的小生境,表层土壤质地好,有机质含量高且具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^[19,20]。A 和 B 层土壤中,SMBC 均呈现出随森林的恢复而增加的变化特点,指示土壤质量逐渐恢复。从图 1(B)我们还可以看出,qSMBC 的垂直变化规律与 SMBC 的刚好相反,即 qSMBC 随土层深度的增加而增加,表现为 B>A 层的特点,T 检验表明差异显著 ($p<0.05$)。四个恢复阶段的 A 层土壤的 qSMBC 分别是 B 层的 0.841、0.853、0.837 和 0.822 倍,而且土壤剖面上 qSMBC 均呈现出随森林的恢复而增加的变化特点,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,这说明森林恢复过程中土壤碳处于积累过程中。

2.2 不同生境 SMBC 及 qSMBC 的变化

喀斯特地区的生境具有小生境类型多样,生境的异质性高,土被不连续,土壤浅薄,根系生存空间狭小。破碎化程度较高,生境类型的异质性、小生境分布的无序性及条件的严酷性,使得 SMBC 及 qSMBC 在不同生境间存在一定差异。

森林恢复过程中不同生境中土壤生物量碳及 qSMBC 的测定结果如图 2 所示。从图中可以看出,SMBC 的生境分布在四个恢复阶段有一定的差异,大小顺序裸地阶段为石槽、石沟、土面;草本群落阶段均为石沟、石槽、土面;灌木及乔木群落阶段为石沟、土面、石槽的特点;而 qSMBC 在森林恢复中的生境变化特点与 SMBC 的相反。相同生境土壤生物量碳与 qSMBC 在森林恢复过程中均表现出相同的变化规律,即随森林的恢复而逐渐增加,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,但 qSMBC 在森林恢复过程中的增加幅度较小,统计分析表明前者差异显著($P<0.05$),后者差异不显著($P>0.05$)。

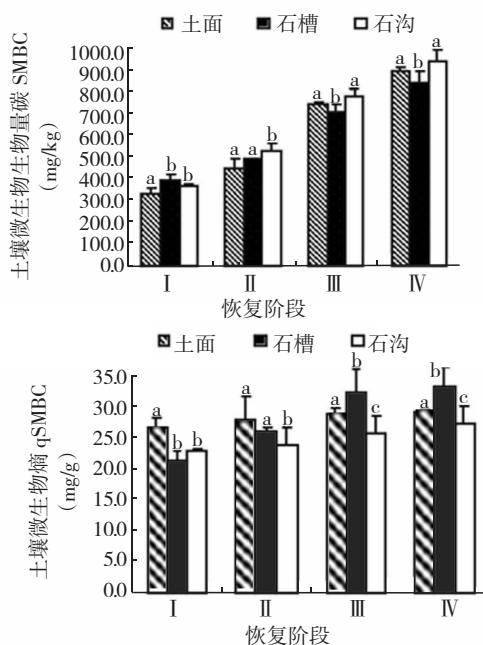


图 2 森林恢复过程中不同生境 SMBC 及 qSMBC 的变化

注:n=24,不同小写字母间表示 LSD 检验差异达显著水平($P<0.05$)

2.3 SMBC 及 qSMBC 的根际和非根际变化

根际区土壤微生物数量明显高于非根际区,这显然与植物根系代谢能够提供较多的能源物质有关。森林恢复过程中根际、非根际 SMBC 及 qSMBC 的变化分析结果见表 3。

表 3 森林恢复过程中根际、非根际 SMBC 及 qSMBC 的变化

恢复阶段	土壤有机碳(g/kg)			SMBC(mg/kg)			qSMBC(mg/g)		
	R	S	R/S	R	S	R/S	R	S	R/S
II	29.573a	20.028a	1.477a	578.98a	434.91a	1.331a	19.578a	21.716a	0.902a
III	37.780b	28.193b	1.340b	804.45b	663.84b	1.212a	21.293a	23.547b	0.904a
IV	44.400c	33.743b	1.316b	957.82c	799.97c	1.197b	21.572a	23.708b	0.910a

注:R 表示根际,S 表示非根际,表中数据为四个季节所有生境的平均值(n=12)。

根际是微生物发育的一个特殊生境,通常把土壤与根接触的区域称为根际,根际效应的大小常用根际土和根外散土中微生物的数量(生物量)的比值(R/S)来表示,R/S 比值越大,根际效应越明显^[21]。表 3 结果表明,根际、非根际 SMBC 的

变化随森林恢复而增加,三个恢复阶段均表现出 R>S 的特点,统计分析表明其差异显著($P<0.05$),但根际效应(R/S)随着森林的恢复而呈现下降的趋势,草本群落阶段、灌木群落阶段及乔木群落阶段 SMBC 的 R/S 值分别是 1.331、1.212 和

1.197。其中草本群落阶段的根际效应比其它几个阶段的明显,这与土壤微生物数量分布的根际效应一致^[22]。根际、非根际 qSMBC 变化表现出随森林恢复而上升的趋势,但三个恢复阶段均表现出 $R < S$ 的变化特点,根际效应(R/S)随着森林的恢复而上升,这与土壤微生物数量分布的根际效应相反^[22],草本群落阶段、灌木群落阶段及乔木群落阶段 qSMBC 的 R/S 值分别是 0.902、0.904 和 0.910。

3 结论与讨论

3.1 退化喀斯特森林恢复(裸地阶段→草本群落阶段→灌木群落阶段→乔木群落阶段)过程中,不同层次、不同生境及根际、非根际的 SMBC 及 qSMBC 随森林恢复而上升,土壤微生物生物量高的土壤中微生物碳的周转量较大,碳素的周转还带动了其他营养元素的周转^[23],这揭示退化喀斯特森林不同恢复阶段的土壤处于碳积累过程中,表明土壤质量在逐渐的恢复,生态环境逐渐得以改善,有利于生态系统的生存和持续发展。

3.2 四个恢复阶段 SMBC 的含量均随土层的加深而递减,表现为 A 层 > B 层的变化特点,这与易志刚等报道的结果相一致^[24]。森林恢复过程中不同森林类型间 SMBC 含量的垂直变化差异较大,主要受植物根生物量的垂直分布的影响^[21]。土壤微生物主要包括根际微生物和自由生活的微生物两部分,表层根分布较多且均匀,根际微生物数量多,SMBC 含量也大。但土壤剖面上 qSMBC 的变化特点与 SMBC 的相反。

3.3 不同生境间 SMBC 和 qSMBC 测定结果表明:退化喀斯特森林恢复过程中,SMBC 在不同生境间的变化除裸地阶段上表现为石槽生境偏高外,其它几个阶段总体表现为石沟小生境偏大的特点,这是因为石沟生境具有排水、土壤物质交换较通畅,抗涝抗旱能力强的特点,有利于微生物类群及土壤动物群体的繁殖,但 qSMBC 的生境变化特点与 SMBC 的相反。退化喀斯特森林演替过程中 SMBC 和 qSMBC 变化既受恢复阶段森林组成的影响,又受不同阶段小生境所导致的温度、湿度变化的影响,远较常态地貌复杂,因此有待于对其进行深入的研究。

3.4 根际是植物、土壤和微生物相互作用的重要界面,也是物质和能量交换的结点,是生物能不断积累和扩张的一个重要区域,是土壤中活性最强的小生境^[25]。退化喀斯特森林恢复过程中,SMBC 及 qSMBC 根际和根外变化明显,前者表现为 $R > S$,后者表现为 $R < S$ 的变化特点。目前我国对植物根际养分研究较多,国外注重对植物的根系分泌物和根际微生物进行研究。结合国内外研究现状,在研究方法、微生态系统整体研究、根分泌物与微生物相互作用、根际环境与逆境胁迫等方面均需做更深入的研究。

参考文献:

- [1] Powlson D S, Brookes P C, Christensen D S. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation [J]. Soil Biol. Biochem, 1987 (19):159-164.
- [2] 朱守谦.喀斯特森林生态研究(III)[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 2003.
- [3] DING M, Yi W, Liao L, et al. Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992(24): 865-872.
- [4] Insam H, Domsch K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites[J]. Microbial Ecology, 1988(15): 177-188.
- [5] 梁士楚.贵阳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.
- [6] 鲁如坤.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1998.
- [7] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987(19):703-707.
- [8] Bath E. Effects of heavy metal in soil on microbial processes and populations (a review)[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1989(47): 335-379.
- [9] Martens R. Current methods for measuring microbial biomass C in soil: potentials and limitations [J]. Biology Fertility Soil, 1995, 19: 87-99.
- [10] Carter M R, Rennie D A. Dynamics of soil microbial biomass N under zero and shallow tillage for spring wheat, using ¹⁵N urea [J]. Plant Soil, 1984(76):157-164.
- [11] Coleman D C, Reid C P P, Cole C V. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems [J]. Advances in Ecological Research, 1983(13):1-55.
- [12] Laurie A T, Mary A A, Ruth D Y. Forest floor microbial biomass across a northern hard wood successional sequence [J]. Soil Biol Biochem, 1998(31):431-439.
- [13] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. Australian Journal of Soil Research. 1992(30): 195-207.
- [14] Wolters V, Joergensen R G. Microbial carbon turnover in beech forest soils at different stages of acidification [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991(23):897-902.
- [15] Hart P B S, August J A, West A W. Long-term consequences of topsoil mining on select biological and physical characteristics of two New Zealand loessial soils under grazed pasture [J]. Land Degrad Rehab, 1989(1):77-88.
- [16] Singh J S, Reghbanshi A S, Singh R S, et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna[J]. Nature, 1989(338):499-500.
- [17] 赵吉,郭婷,邵玉琴.内蒙古典型草原土壤微生物生物量及其周转与流通量的初步研究[J].内蒙古大学学报:自然科学版, 2004, 35(6): 673-676.
- [18] Michelsen A, Andersson M, Jensen M, et al. Carbon stocks, soil respiration and microbial biomass in fire-prone tropical grassland, woodland and forest ecosystems [J]. Soil Biol Biochem, 2004 (36): 1707-1717.
- [19] 黄辉,陈光水,谢锦升.等.土壤微生物生物量碳及其影响因素研究进展[J].湖北林业科技, 2008, 152(4):34-41.
- [20] 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[J]. Soil Biol. Biochem, 1998(30): 1077-1089.
- [21] 孙磊,宋末.非培养方法在植物内生和根际细菌研究中的应用[J].自然科学进展, 2006, 16(2):140-145.
- [22] 魏媛.退化喀斯特植被恢复过程中土壤生物学特性研究[D].博士学位论文,南京林业大学,2008.
- [23] 易志刚,蚁伟民,周丽霞,等.鼎湖山主要植被类型土壤微生物生物量研究[J].生态环境, 2005, 14(5): 727-729.
- [24] 易志刚,蚁伟民,丁明懋,等.鼎湖山自然保护区土壤有机碳、微生物生物量碳和土壤 CO₂ 浓度垂直分布 [J].生态环境, 2006, 15(3):611-615.
- [25] 栾丽英,房玉林,宋士任,等.不同树龄酿酒葡萄不同土壤深度根际和根区微生物数量的研究 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24 (2): 37-41.