

DOI: 10.5846/stxb201402070221

宋小艳, 张丹桔, 张健, 李建平, 纪托未, 欧江, 胡相伟. 马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林林窗对土壤不同形态活性有机碳的影响. 生态学报, 2015, 35(16): 5393-5402.

Song X Y, Zhang D J, Zhang J, Li J P, Ji T W, Ou J, Hu X W. Effects of gap size in *Pinus massoniana* plantations on different soil labile organic carbon fractions. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5393-5402.

马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林林窗对土壤不同形态活性有机碳的影响

宋小艳, 张丹桔, 张健*, 李建平, 纪托未, 欧江, 胡相伟

四川农业大学林学院生态林业研究所, 成都 611130

摘要:研究了四川盆地低山丘陵区马尾松人工林不同大小林窗对表层土壤活性有机碳(水溶性有机碳、微生物量碳、易氧化碳)含量、分配比例及碳库管理指数的影响。结果表明:(1)林窗下土壤微生物量碳含量与分配比例较林下土壤有所升高,而水溶性有机碳与易氧化碳含量及水溶性有机碳分配比例有所降低。(2)林窗大小显著影响林窗中心土壤活性有机碳含量与分配比例。随林窗面积增大,水溶性有机碳、微生物量碳与易氧化碳含量呈现较为一致的升高趋势;水溶性有机碳和微生物量碳分配比例也升高,易氧化碳分配比例先下降后升高,稳定态碳先升高后降低;总体表现为较大林窗(900—1225m²)微生物活性强,活性有机碳含量高,且有机碳库稳定性较好。(3)土壤碳库管理指数随林窗面积增大无显著变化,但与各形态活性有机碳含量及总有机碳含量显著相关,说明土壤碳库管理指数能够相对全面地反映林窗大小对土壤碳库的影响。

关键词:林窗大小; 活性有机碳; 碳库管理指数; 马尾松人工林

Effects of gap size in *Pinus massoniana* plantations on different soil labile organic carbon fractions

SONG Xiaoyan, ZHANG Danju, ZHANG Jian*, LI Jianping, JI Tuowei, OU Jiang, HU Xiangwei

Institute of Ecology & Forestry, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Large areas of *P. massoniana* plantations are often assumed to have serious ecological problems such as reduced biodiversity and soil degradation. Logging gaps are an efficient practice used to solve these problems. We investigated how the size of forest gaps in *P. massoniana* plantations influenced the characteristics of different soil labile organic carbon fractions and the carbon management index. Compared with those in *P. massoniana* plantations, the content and proportion of microbial biomass carbon increased, while the content of water-soluble organic carbon and readily oxidizable carbon, and the proportion of water-soluble organic carbon decreased in forest gaps. The size of the forest gap had significant effects on the content and proportion of labile organic carbon fractions. With the increasing size of forest gaps, the content of water-soluble organic carbon, microbial biomass carbon, and readily oxidizable carbon increased. The proportions of water-soluble organic carbon and microbial biomass carbon increased, the proportion of readily oxidizable carbon first decreased and then increased and the non-labile carbon proportion first increased and then decreased. The content and proportion of labile organic carbon and the stability of organic carbon were relatively higher in larger (900—1225 m²) gaps. The carbon management index was not significantly affected by forest gap size, which positively correlated with the content of different soil labile organic carbon fractions and soil total organic carbon. The effects of forest gap size on soil organic carbon were

基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAC09B05); 国家自然科学基金(31370628); 国家自然科学基金(31300528)

收稿日期:2014-02-07; **网络出版日期:**2014-10-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sicauzhangjian@163.com

relatively significant in larger (900—1225 m²) forest gaps in terms of a higher stability of organic carbon and a greater amount of microbial biomass carbon and water-soluble organic carbon. This suggests that 900—1225 m² gaps might provide optimal logging gap size for the conservation of ecological functions and natural regeneration in *P. massoniana* plantations.

Key Words: forest gap size; labile organic carbon; carbon management index; *P. massoniana* plantation

森林土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是陆地碳库的主要组成部分,对保持土壤肥力,维持全球碳库平衡起着重要作用。但土壤有机碳背景值较高,对于干扰的反应表现出一定的滞后性,其数量和质量的最初动态主要表现在活性有机碳部分^[1-2]。土壤活性有机碳是土壤碳库中对植物、微生物来说活性较高的部分,反映土壤有机碳的早期变化^[3],且对干扰反应敏感^[4],能更实际地反映干扰条件下土壤肥力和物理性质的变化,指示土壤的综合活力水平^[5]。土壤水溶性有机碳、微生物量碳及易氧化碳变化是土壤活性碳库动态的有效表征^[3,6]。目前,森林土壤不同形态活性有机碳逐渐受到广泛关注^[2,4,7]。

林窗作为森林自然更新与环境变化的重要动力,对于森林生态系统动态演替与生态功能优化具有重要作用^[8],也是人工林生态恢复的重要途径^[9]。林窗大小作为林窗的重要特征,通过改变林地微环境^[10]和植被更新^[11],影响土壤碳过程^[12-13]。活性有机碳作为土壤有机碳中活性较高的部分^[3],对干扰反应敏感^[4],也将受到林窗大小的影响。目前,关于林窗大小的研究多关注林窗大小对林窗内环境、植被恢复与演替的影响^[10-11],而林窗大小对土壤活性有机碳的影响研究还十分鲜见。四川盆地低山丘陵区人工林面积已超过200万hm²,但大面积的马尾松纯林带来了地力衰退、病虫害集中暴发以及地上/地下生物多样性降低等生态安全问题^[14]。为此,以四川宜宾39年生马尾松人工林人工采伐形成的不同大小林窗为研究对象,研究了不同林窗大小下土壤活性有机碳库的变化,旨在为四川盆地低山丘陵区大面积的马尾松人工林改造及可持续经营提供指导依据。

1 实验方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省宜宾市高县境内(28°35′321″N—28°36′464″N, 104°33′120″E—104°33′373″E);气候为中亚热带湿润季风气候,雨量充沛,雨热同季;海拔410—560m;年均温18.1℃;年降水量1021.8mm;全年日照时数1148h。试验地位于来复镇毛巛坳工区经营小班,土壤为山地黄壤,成土母岩为黄色砂岩,土壤发育完善,剖面层次分明。选择39年生成熟马尾松人工纯林为研究林分,林分密度1100株/hm²,郁闭度0.6—0.8,林下灌草覆盖度约40%,主要灌木有野桐 *Mallotus tenuifolius*,梨叶悬钩子 *Rubus pirifolius*,铁仔 *Myrsine Africana* 等;主要草本有商陆 *Phytolacca americana*,芒萁 *Dicranopteris linearis*,芒 *Miscanthus sinensis*,荩草 *Arthraxon hispidus*,蕨 *Pteridium aquilinum*,皱叶狗尾草 *Setaria plicata* 等。

1.2 样地设置与样品采集

2011年10月,将所选的39年生马尾松人工林采伐形成7种面积不等的近正方形林窗(面积分别为G1:100m²、G2:225m²、G3:400m²、G4:625m²、G5:900m²、G6:1225m²、G7:1600m²),每个林窗面积设置3个重复样地(图1),各样地间距>10m。同时,选择远离林窗且面积大于400m²的马尾松纯林作为对照样地(3个)。林窗采伐过程中,林窗内乔木等残体移出,但未掘根,并保留凋落物层。于各样地中心土壤5cm深处分别埋设1个纽扣温度记录器(iButton DS1921G, Maxim Com. USA),每2h自动监测温度。待林窗采伐2年植被基本恢复后,2013年8月初进行采样。于林窗中心、林窗边缘和对照马尾松林林下,按照“品”字形3点取样,去除凋落物和腐殖质层后采集表层(0—20cm)土,混匀装入无菌塑料袋中,置于冰袋保鲜箱24h内运回实验室,同时用环刀采集0—5cm土壤样品,以测定土壤物理性质。并选择晴朗无云的天气,使用JD-3数字照度计于8:30—11:30之间观测不同林窗中心、林下及旷地的光照强度,算出各观测点的相对光强(%),相对光

强 = 各观测点光照强度 / 旷地光照强度 $\times 100\%$ 。其中,林窗边缘界定为林冠空隙与周围边界木基部所围成的部分。林窗及林下概况见表 1。

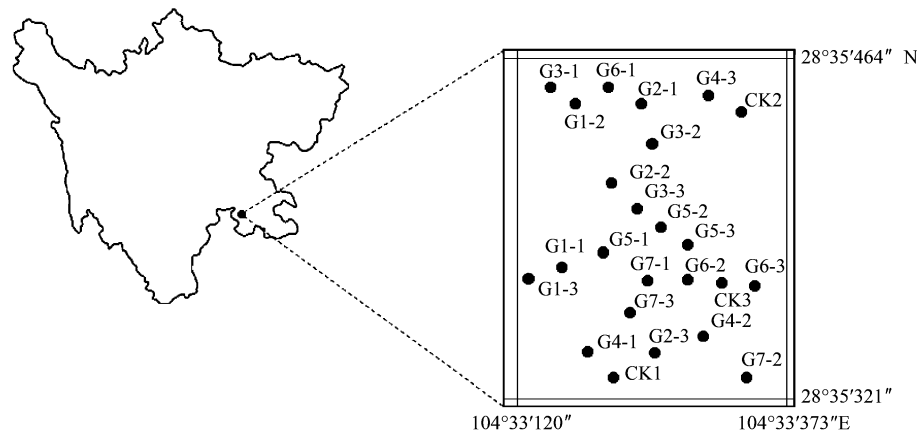


图 1 四川省宜宾市研究区域内样地位置示意图

Fig.1 Map of the sampling plots in study region in Yibin city Sichuan province

G1—G7 代表面积为 100 m^2 、 225 m^2 、 400 m^2 、 625 m^2 、 900 m^2 、 1225 m^2 、 1600 m^2 的林窗, CK 为林下对照; G-1, G-2, G-3 表示各林窗面积的 3 个重复样地,以此类推

表 1 马尾松人工林不同面积林窗样地基本概况

Table 1 General characteristics in the sampling plots in different size forest gaps of *Pinus massoniana* plantations

林窗 Gap	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	相对光强/% Relative light intensity	月均温/℃ Monthly average temperature
G1	423	24.5	SW	87.7	26.03
G2	438	26	SE	93.5	26.40
G3	408	23.5	SE	94.8	28.21
G4	424	24	SE	95.3	28.44
G5	441	21.5	S	95.4	28.67
G6	418	27	SE	96.3	29.04
G7	430	26	SE	98.3	28.73
CK	427	23	SE	16.3	25.94

1.3 样品分析与测定

将土样中较大的树根和石子剔除后分为 2 份:一份过 2 mm 筛装袋, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存,用于测定土壤水溶性有机碳(WSOC)和微生物生物量碳(MBC);另一份自然风干,过 0.15 mm 筛用于测定总有机碳(SOC)、过 0.25 mm 筛用于测定易氧化碳(ROC)。

土壤 WSOC 采用浸提水土比 $2:1$, 25°C 下去离子水恒温震荡 30 min 后,高速离心 20 min (4000 r/min), $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜抽滤,提取液中的有机碳含量采用总有机碳总氮分析仪(Mult N/C 2100)测定^[15-16];MBC 采用改进的氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法,熏蒸和未熏蒸处理土壤提取液中有机碳之差除以转换系数(0.45)为微生物量碳含量^[17];SOC 采用重铬酸钾氧化-外加热法测定(LY/T 1237—1999);ROC 采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化, 565 nm 波长比色测定^[18];稳定态碳(NLC)为 SOC 与 ROC 的差值。土壤理化特征值如表 2。

1.4 数据处理

数据处理采用 Excel, Origin8 和 SPSS17.0 统计软件完成。其中林窗面积对活性有机碳含量、分配比例及碳库管理指数的影响采用回归分析或单因素方差分析(One-way ANOVA)及 Tukey 进行多重比较,显著水平均设置为 $\alpha = 0.05$ 。林窗中心、边缘与林下活性有机碳含量及分配比例的差异采用配对样本 T 检验。用

Pearson 相关系数分析土壤活性有机碳含量与土壤基本理化性质之间的相关性。以马尾松林下土壤为参照土壤,计算出不同大小林窗中心和边缘土壤碳库管理指数。碳库管理指数计算方法如下^[18]:

$$\text{碳库指数(CPI)} = \text{样品 SOC}/\text{参照 SOC}$$

$$\text{碳库活度(L)} = \text{ROC}/\text{NLC}$$

$$\text{碳库活度指数(LI)} = \text{样品土壤 L}/\text{参照土壤 L}$$

$$\text{碳库管理指数(CMI)} = \text{CPI} \times \text{LI} \times 100$$

表 2 马尾松不同面积林窗下土壤理化特征

Table 2 Soil physico-chemical characteristics in the sampling plots in different size forest gaps of <i>Pinus massoniana</i> plantations					
林窗 Gap	含水量/% Water content	容重/(g/cm ³) Bulk density	最大持水量/(g/kg) Maximum moisture capacity	pH	有机碳/(g/kg) Soil organic carbon
G1	22.90 (3.90)	1.46 (0.06)	324.2 (37.2)	3.38 (0.05)	13.60 (5.48)
G2	21.73 (4.00)	1.33 (0.08)	396.1 (91.9)	3.46 (0.08)	13.68 (3.52)
G3	20.11 (4.00)	1.37 (0.11)	367.8 (79.0)	3.38 (0.08)	11.20 (1.21)
G4	21.33 (1.22)	1.31 (0.11)	375.8 (112.7)	3.50 (0.25)	9.74 (1.30)
G5	23.98 (3.50)	1.34 (0.17)	381.6 (62.1)	3.43 (0.07)	12.72 (2.93)
G6	20.06 (4.40)	1.36 (0.26)	364.4 (66.3)	3.47 (0.07)	14.71 (3.72)
G7	21.07 (1.70)	1.45 (0.04)	311.9 (43.9)	3.42 (0.07)	10.26 (3.30)
CK	20.10 (2.00)	1.26 (0.14)	394.7 (56.0)	3.40 (0.07)	13.77 (4.08)

括号内的数字表示平均值的标准差

2 结果

2.1 不同大小林窗下土壤活性有机碳含量及碳库管理指数

在林窗中心,随林窗面积增加,土壤 WSOC 含量升高(图 2);MBC 与 ROC 含量先上升(G1—G2),然后下降(G2—G4),此后升高(G4—G6),但在 G7 又有所降低($P<0.05$);而 NLC 含量和 CMI 无显著变化。在林窗边缘,随林窗面积增加,WSOC 与 MBC 含量先下降(G1—G3),此后 WSOC 含量呈上升趋势,MBC 含量上升后下降($P<0.05$);NLC 含量先下降,最后又缓慢上升,但 ROC 含量与 CMI 无显著变化(图 2)。

2.2 不同大小林窗下土壤活性有机碳分配比例

在林窗中心,随林窗面积增加,水溶性有机碳分配比例(WSOC/SOC)增大(图 3);微生物量碳分配比例(MBC/SOC)在 G2 时显著升高,此后基本稳定($P<0.05$);易氧化碳分配比例(ROC/SOC)先降低(G1—G6)再升高,而稳定态碳分配比例(NLC/SOC)与之相反,先升高后降低。在林窗边缘,随林窗面积增加,土壤 WSOC/SOC 与 MBC/SOC 均无显著变化,ROC/SOC 先下降(G1—G4),G5 时显著上升,此后又有所下降($P<0.05$),总体表现为较大林窗(G5—G7)高于较小林窗(G1—G4),而 NLC/SOC 与 ROC/SOC 相反,总体表现为较小林窗(G1—G4)高于较大林窗(G5—G7)(图 3)。

2.3 林下与林窗及林窗内中心与边缘土壤活性有机碳含量及分配比例差异

林窗中心与马尾松林下比较,各面积林窗(除 G7)土壤 WSOC 含量及分配比例均极显著低于林下($P<0.01$);而各面积林窗土壤 MBC 含量及分配比例则高于林下,但部分林窗与林下差异不显著;各面积林窗(除 G2 和 G6)土壤 ROC 含量显著低于林下($P<0.05$),但 ROC 分配比例与林下差异均不显著。林窗边缘与林下比较,各面积林窗土壤 WSOC 含量均极显著低于林下($P<0.01$),同时,WSOC 分配比例(除 G6 和 G7)显著低于林下($P<0.05$);各面积林窗(除 G3 和 G7)MBC 含量均极显著高于林下($P<0.01$),但其分配比例仅 G4 显著高于林下($P<0.05$),其他林窗与林下差异不显著;而各面积林窗 ROC 及 NLC 含量及分配比例则与林下差异均不显著(表 3)。

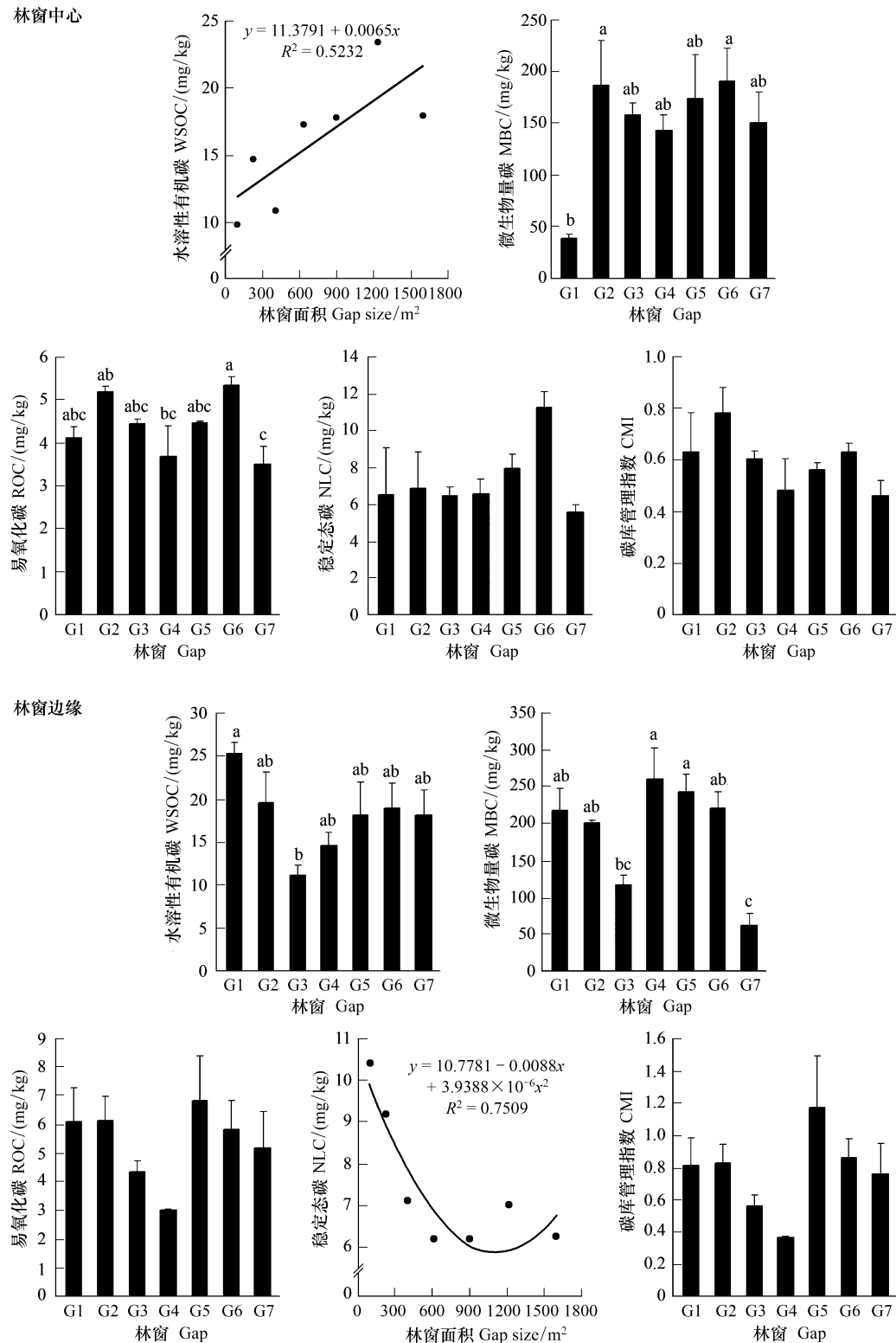


图2 马尾松人工林不同大小林窗下土壤活性有机碳(水溶性有机碳、微生物量碳、易氧化碳、稳定态碳)含量及碳库管理指数

Fig.2 Content of soil labile organic carbon (WSOC; water-soluble organic carbon, MBC; microbial biomass carbon, ROC; readily oxidizable carbon, NLC; non-labile carbon) and carbon management index in different size forest gaps of *Pinus massoniana* plantation

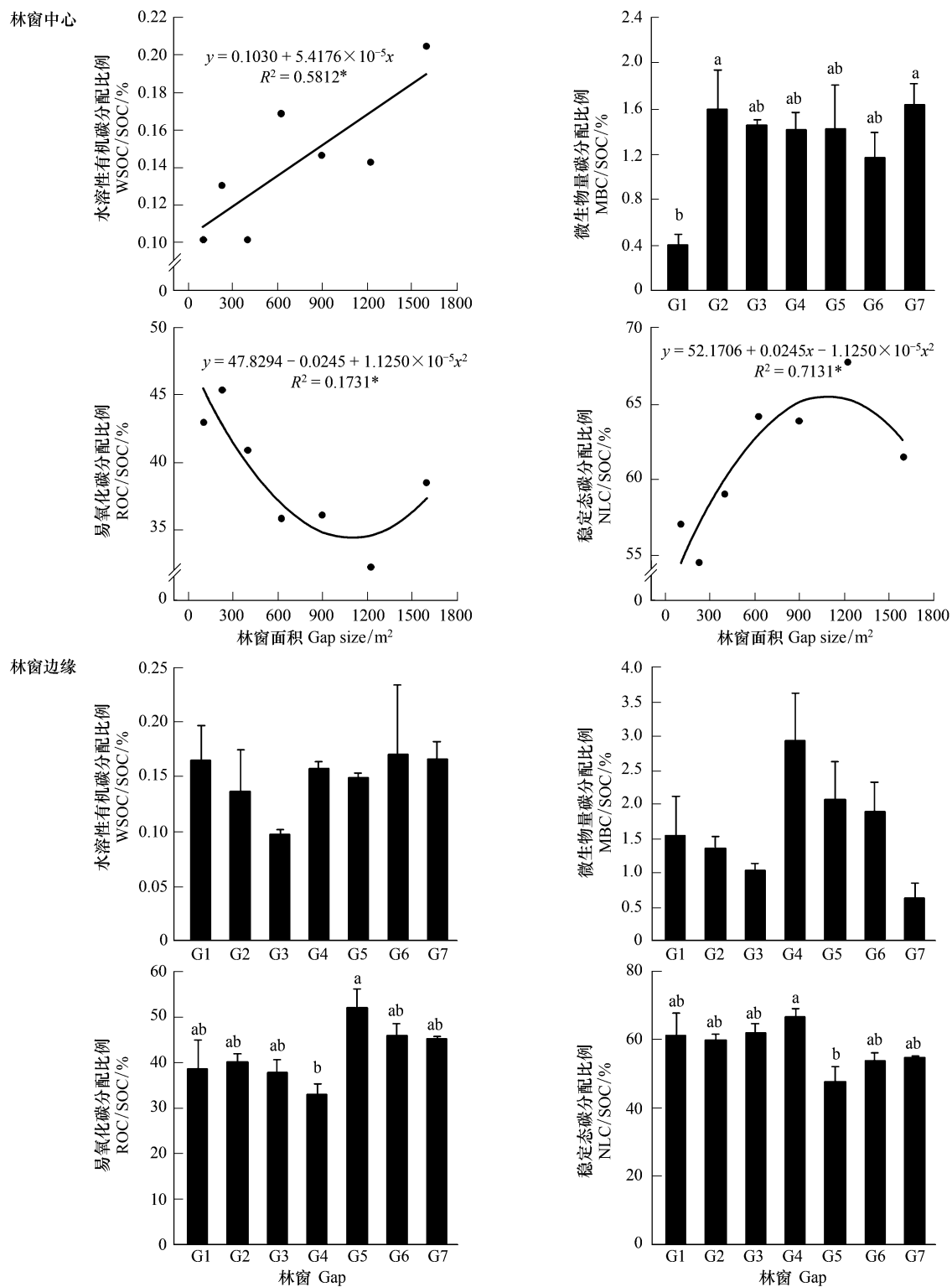


图3 马尾松人工林不同大小林窗下土壤活性有机碳(水溶性有机碳、微生物量碳、易氧化碳、稳定态碳)分配比例

Fig.3 Proportion of soil labile organic carbon (water-soluble organic carbon, microbial biomass carbon, readily oxidizable carbon, non-labile carbon) in different size forest gaps of *Pinus massoniana* plantation

WSOC/SOC: 水溶性有机碳分配比例 Proportion of water-soluble organic carbon in soil organic carbon; MBC/SOC: 微生物量碳分配比例 Proportion of microbial biomass carbon in soil organic carbon; ROC/SOC: 易氧化碳分配比例 Proportion of readily oxidizable carbon in soil organic carbon; NLC/SOC: 稳定态碳分配比例 Proportion of non-labile carbon

表 3 马尾松人工林林下与林窗及林窗内中心与边缘土壤活性有机碳含量及分配比例差异

Table 3 The comparisons of the content and proportion of labile organic carbon between in gap center and in *Pinus massoniana* plantations, in forest gap edge and in *Pinus massoniana* plantations, in forest gap center and edge

项目 Item	林窗中心—林下 Gap center-understory	林窗边缘—林下 Gap edge-understory	林窗中心—林窗边缘 Gap center-gap edge
WSOC	(G1—G7) **	(G1—G7) **	G1 ** (G2—G7) ns
WSOC/SOC	(G1—G6) ** (G7) ns	(G3) ** (G1,G2,G4,G5) * (G6,G7) ns	(G1—G7) ns
MBC	(G6) ** (G2,G3,G5) * (G1,G4,G7) ns	(G1,G2,G4,G5,G6) ** (G3,G7) ns	G1 * (G2—G7) ns
MBC/SOC	(G3—G5) ** (G2,G7) * (G1,G6) ns	(G4) * (G1—G3,G5—G7) ns	(G1—G7) ns
ROC	(G1,G4,G7) ** (G3,G5) * (G2,G6) ns	(G1—G7) ns	(G1—G7) ns
ROC/SOC	(G1—G7) ns	(G1—G7) ns	(G1—G7) ns
NLC	(G1—G7) ns	(G1—G7) ns	(G1—G7) ns
NLC/SOC	(G1—G7) ns	(G1—G7) ns	(G1—G7) ns

WSOC: 水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon; WSOC/SOC: 水溶性有机碳分配比例 Proportion of water-soluble organic carbon in soil organic carbon; MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; MBC/SOC: 微生物量碳分配比例 Proportion of microbial biomass carbon in soil organic carbon; ROC: 易氧化碳 Readily oxidizable carbon; ROC/SOC: 易氧化碳分配比例 Proportion of readily oxidizable carbon in soil organic carbon; NLC: 稳定态碳 Non-labile carbon; NLC/SOC: 稳定态碳分配比例 Proportion of non-labile carbon; * $P<0.05$; ** $P<0.01$, ns, $P\geq 0.05$

2.4 土壤活性有机碳含量及碳库管理指数与土壤理化性质的相关性

马尾松不同大小林窗下各活性有机碳含量及碳库管理指数间的相关性: SOC 与各活性有机碳 (MBC 除外)、稳定态碳含量及 CMI 均显著相关, 显示了土壤有机碳对活性有机碳含量及土壤碳库的决定作用; CMI 与 WSOC、ROC 及 SOC 含量均呈极显著正相关 ($P<0.01$); ROC 与 WSOC 和 SOC 极显著正相关 ($P<0.01$), 与 NLC 和 MBC 含量显著正相关 ($P<0.05$); 而 MBC 仅与 WSOC 显著相关 ($P<0.05$)。各活性有机碳、稳定态碳含量及碳库管理指数与土壤理化性质的相关性: MBC 与温度, CMI 与含水量以及 MBC 与最大持水量显著正相关 ($P<0.05$), 其他均无显著相关关系 (表 4)。

表 4 马尾松人工林林窗土壤活性有机碳含量及碳库管理指数与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlations between the content of soil labile organic carbon, carbon management index and soil physico-chemical characteristics in forest gaps of *Pinus massoniana* plantations

项目 Item	WSOC	MBC	ROC	NLC	SOC	CMI	PH	温度 Temperature	含水量 Water Content	容重 Bulk density	最大 持水量 Maximum water holding capacity
WSOC	1	0.306 *	0.431 **	0.374	0.459 **	0.338 *	0.165	-0.107	0.197	-0.049	-0.071
MBC		1	0.179	0.50	0.113	0.149	-0.021	0.499 *	0.079	-0.001	0.325 *
ROC			1	0.445 *	0.755 **	0.925 **	-0.207	-0.264	0.291	-0.140	0.140
NLC				1	0.923 *	0.111	0.102	0.039	-0.023	-0.092	-0.108
SOC					1	0.478 **	-0.014	-0.052	0.108	-0.128	-0.019
CMI						1	-0.232	-0.206	0.378 *	-0.063	0.162

WSOC: 水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon; MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; ROC: 易氧化碳 Readily oxidizable carbon; NLC: 稳定态碳 Non-labile carbon; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; CMI: 碳库管理指数 Carbon management index; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

3 讨论

本研究中, 马尾松人工林林窗与林下比较, 虽然土壤总有机碳含量无显著变化, 但各形态活性有机碳含量及分配比例发生改变, 且随林窗内位置的不同有所差异。这首先体现了土壤活性有机碳对干扰反应较敏感, 能指示土壤总有机碳的早期变化^[4]。由于马尾松人工林林窗形成后, 高大乔木被砍伐, 林窗内植被盖度降低, 为林窗土壤提供了较充足的光照和较高的温度, 促进微生物活动, 同时, 植被类型由以乔木为主变为以草本为主, 草本植物丰富的根系为微生物提供了较多的能源物质, 也利于土壤微生物的生长与繁殖^[2], 使土壤

微生物量碳(MBC)含量及分配比例显著升高。但林窗内草本生物归还能力不及乔木,这可能是导致林窗内水溶性有机碳(WSOC)和易氧化碳(ROC)含量降低的重要因素^[7,19]。同时,较强的微生物活动,必然增加其对能源物质的消耗。WSOC和ROC是微生物重要的可利用能源物质,微生物活动的加强,使WSOC和ROC被大量分解,应是其含量降低的原因之一。另外,在采样季节(夏季)较丰富的降雨背景下,土壤WSOC流失加剧^[20-21],也使WSOC含量降低。林窗内不同位置(中心与边缘)由于光温水与植被分布的不同^[10-11],会使土壤活性有机碳含量产生差异,但这种差异的程度与林窗面积相关^[22]。本研究中,在林窗面积较小(G1)时,林窗边缘与中心MBC和WSOC含量差异显著,其他面积林窗各活性有机碳差异不显著。这与林窗大小影响植被的边缘效应相类似,显示了较小面积林窗较强的边缘效应^[23]。

本研究表明,马尾松林窗大小显著影响林窗中心土壤各形态活性有机碳含量。林窗大小是林窗的重要特征,通过影响林窗内光照、温度和水分条件^[10],进而使植被更新与分布改变^[11],同时影响土壤碳过程^[12-13]。土壤微生物量碳是理想的生物学指标,反映土壤生物活性高低。普遍研究表明,在低于最适温度(35—45℃)时,土壤微生物活性随温度上升迅速增加^[24]。本研究中,随林窗面积增大,光照强度和光照时间明显增加,土壤温度随之升高,可能是微生物活性增强,MBC含量增加的原因。同时,微生物活性增强将有利于土壤养分释放与土壤肥力改善^[9],为植被生长提供更好的条件,使植被凋落物和根系分泌物增加,而植被凋落物和根系分泌物以及微生物本身都是WSOC和ROC的重要来源^[25-26],因此较大面积林窗(900—1225m²)具有较高的WSOC和ROC含量,与MBC含量呈现相似的规律。但是G3和G4活性有机碳含量比面积更小的林窗G2低,不符合整体规律。G3和G4相对于G2(较小面积林窗)而言,林窗内光照和温度条件都较好,植被得到了较好的改善,植被生长对土壤养分的需求高于G2,使其土壤活性有机碳被大量分解提供植被生长所需养分,这可能是G3和G4活性有机碳含量比G2低的原因。但G3、G4与较大林窗植被条件均较好,植被对土壤的养分的需求相差不大,而G3和G4光照和温度条件不如较大林窗,微生物活动比较大林窗弱,使G3和G4活性有机碳含量低于较大林窗。此外,土壤总有机碳含量也随林窗面积增大而增加,各活性有机碳含量与之呈现一致的变化,证明了土壤有机碳含量在很大程度上决定了活性有机碳含量^[27]。本研究表明,林窗大小在显著影响活性有机碳含量的同时,还使其分配比例发生了改变。本研究中,WSOC/SOC和MBC/SOC均随着林窗面积增大而增大,反映了较大林窗土壤含有更多易于被微生物利用的有机质^[28],且通过更活跃的微生物活动,把土壤有机碳储存在微生物体内,指示了土壤有机碳的积累效应^[28-29]。而土壤有机碳的活性及稳定性则分别是由土壤易氧化碳和稳定态碳占总有机碳的比例反应^[30]。本研究中,随林窗面积增大ROC/SOC先降低后升高,NLC/SOC先升高后降低,表明土壤有机碳活性先降低后升高,而稳定性先升高后降低。这是因为较大林窗(900—1225m²)由于植被归还能力较强,土壤有机质的来源增加,可能使土壤团聚作用加强,部分活性有机碳被包裹在团聚体内部而成为非活性部分^[25],从而使土壤有机碳稳定性增强。但G7林窗虽然林窗面积最大,各活性有机碳含量及分配比例并不是最高,且稳定性不是最佳,这可能与G7相对较低的土壤温度有关。林窗边缘由于独特的微环境,林窗边缘植被具有边缘效应,而林窗大小影响着边缘效应的强度^[22-23]。本研究中,在一定林窗大小范围内(100—400或625m²),林窗边缘土壤WSOC、MBC含量及ROC分配比例随林窗面积增加而降低与林窗中心呈现不同的变化规律;而当林窗面积大于400m²或625m²,林窗边缘效应对土壤有机碳的影响减弱,林窗边缘WSOC与MBC含量及ROC分配比例表现出与林窗中心相似的变化规律。本研究中,较小面积林窗边缘活性有机碳及分配比例对林窗大小的响应不同于林窗中心,这应是由于较小面积林窗边缘效应更强^[23],同时应与此时林窗中心与边缘不同的地上/地下相互作用对土壤有机碳库的影响有关^[19]。

土壤碳库管理指数能够全面和动态地反映不同经营措施下土壤质量下降或更新的程度^[31]。本研究中,林窗中心与边缘碳库管理指数随林窗面积增大均无显著变化,这可能由于林窗形成时间较短(2a),林窗面积对土壤碳库管理指数的影响还不大。其中,900m²(G5)林窗边缘土壤碳库管理指数最高(CMI>1),反映了该林窗在形成2a后其土壤碳库环境得到了一定程度的改善。以往研究表明,碳库管理指数与土壤有机碳、水溶

性有机碳、微生物量碳、活性有机碳之间呈极显著正相关^[25],这在本研究中得到了进一步证实,但在本研究中,微生物量碳与碳库管理指数相关性不显著,这可能与微生物高的环境敏感性而碳库管理指数变化相对较缓有关。各活性有机碳间存在不同程度的相关性,但均与土壤有机碳显著相关,说明各活性有机碳含量虽然反映的是土壤有机碳中相对不同的活性部分,但都很大程度上决定于土壤有机碳含量的高低,都是土壤活性碳库的重要组成部分。其中微生物高的环境敏感性可能是造成微生物量碳与易氧化碳及总有机碳不显著相关的原因。但微生物量碳与水溶性有机碳具有良好的相关性,这是由于水溶性有机碳是有机质的淋溶和分解产物,与微生物活动直接相关^[32]。此外,本研究中,土壤微生物量碳与温度和最大持水量显著相关,温度直接影响微生物活性,而最大持水量可能通过改变土壤通气状况影响微生物生长,与前人研究结果基本一致^[25]。

综上所述,马尾松人工林林窗的形成提高了土壤微生物量碳的含量与分配比例,降低了水溶性有机碳与易氧化碳含量及水溶性有机碳分配比例,使土壤生物活性增强,但土壤有机碳活性部分含量降低。林窗大小显著影响林窗中心各形态活性有机碳含量与分配比例。随林窗面积增大,水溶性有机碳、微生物量碳与易氧化碳含量呈现较为一致的升高趋势;水溶性有机碳和微生物量碳分配比例也升高,易氧化碳分配比例先下降后升高,稳定态碳先升高后降低。而由于边缘效应,林窗边缘各形态活性有机碳含量及分配比例对林窗大小的响应与林窗中心有所不同。同时,可能由于林窗形成时间较短,林窗大小对土壤碳库管理指数的影响并不显著。总体来看,900—1225m²林窗(G5—G6)内微生物活性强,活性有机碳含量高,且有机碳库稳定性较好。为此,建议将900—1225m²作为该地马尾松人工林改造的最适林窗面积;同时应延长林窗存在时间,林窗内植被应以自然恢复为主,且加强林窗内水肥管理,这样可以在一定程度上提高林窗内土壤碳库管理指数。本研究为该地马尾松人工林科学经营和管理提供了科学依据,但林窗面积对土壤有机碳库的影响仍需要较长时间的定位研究。

参考文献(References):

- [1] Böhm C, Landgraf D, Makeschin F. Changes in total and labile carbon and nitrogen contents in a sandy soil after the conversion of a succession fallow to cultivated land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(1): 46-54.
- [2] 荣丽,李守剑,李贤伟,张健,王鹏.不同退耕模式细根(草根)分解过程中C动态及土壤活性有机碳的变化. *生态学报*, 2011, 31(1): 137-144.
- [3] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [4] McLauchlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1616-1625.
- [5] 习丹,李炯,旷远文,许伊敏.鹤山不同植被类型土壤惰性碳含量及其季节变化特征. *热带亚热带植物学报*, 2013, 21(3): 203-210.
- [6] 黄宗胜,符裕红,喻理飞.喀斯特森林自然恢复中土壤微生物生物量碳与水溶性有机碳特征. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2715-2720.
- [7] 廖洪凯,李娟,龙健.喀斯特干热河谷植被类型和小生境对土壤活性有机碳和基础呼吸的影响. *土壤通报*, 2013, 44(3): 580-586.
- [8] Hill S B, Mallik A U, Chen H Y H. Canopy gap disturbance and succession in trembling aspen dominated boreal forests in northeastern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(8): 1942-1951.
- [9] 王成,庞学勇,包维楷.低强度林窗式疏伐对云杉人工纯林地表微气候和土壤养分的短期影响. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 541-548.
- [10] 陈梅,张愈佳.不同大小林窗生长季初期小气候特征比较——以辽东山区次生林生态系统林窗为例. *内蒙古农业科技*, 2011, (3): 78-82.
- [11] 李兵兵,秦琰,刘亚茜,刘相兵,黄选瑞.燕山山地油松人工林林隙大小对更新的影响. *林业科学*, 2012, 48(6): 147-151.
- [12] Muscolo A, Sidari M, Mercurio R. Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine (*Pinus laricio*, Poir.) stands. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3): 412-418.
- [13] Muscolo A, Sidari M, Bagnato S, Mallamaci C, Mercurio R. Gap size effects on above- and below-ground processes in a silver fir stand. *European Journal of Forest Research*, 2010, 129(3): 355-365.
- [14] 谭波,吴福忠,杨万勤,张健,徐振锋,刘洋,苟小林.不同林龄马尾松人工林土壤节肢动物群落结构. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1118-1124.
- [15] 李平,郑阿宝,阮宏华,李莉,沈玉娟,赵琦齐,谢涛.苏南丘陵不同林龄杉木林土壤活性有机碳变化特征. *生态学杂志*, 2011, 30(4):

- 778-783.
- [16] 李忠佩, 焦坤, 吴大付. 不同提取条件下红壤水稻土溶解有机碳的含量变化. *土壤*, 2005, 37(5): 512-516.
- [17] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G P, Jefferies R L. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2843-2851.
- [18] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [19] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [20] Qualls R G, Haines B L. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 578-586.
- [21] Piirainen S, Finér L, Mannerkoski H, Starr M. Effects of forest clear-cutting on the carbon and nitrogen fluxes through podzolic soil horizons. *Plant and Soil*, 2002, 239(2): 301-311.
- [22] 蔡小英, 范海兰, 洪滔, 洪伟, 吴承祯, 王萍兰, 王洪翠, 林琴琴. 福建安曹下丰产杉木人工林林窗边缘效应的研究. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(3): 229-236.
- [23] 奚为民, 钟章成, 毕润成. 四川缙云山森林群落林窗边缘效应的研究. *植物生态学与地理植物学报*, 1993, 17(3): 232-242.
- [24] Podwojewski P, Poulencard J, Nguyet M L, De Rouw A, Nguyen V T, Pham Q H, Tran D T. Climate and vegetation determine soil organic matter status in an alpine inner-tropical soil catena in the Fan Si Pan mountain, Vietnam. *Catena*, 2011, 87(2): 226-239.
- [25] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 宫渊波, 冉华. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化. *生态学报*, 2008, 28(6): 2536-2545.
- [26] 王艮梅, 周立祥. 陆地生态系统中水溶性有机物动态及其环境学意义. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 2019-2025.
- [27] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较. *林业科学研究*, 2006, 19(4): 523-526.
- [28] 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 张子文, 孟庆银, 胡锋, 李辉信. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机碳和微生物量碳的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 138-143.
- [29] Sinha S, Masto R E, Ram L C, Selvi V A, Srivastava N K, Tripathi R C, George J. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(9): 1824-1832.
- [30] Xu X, Zhou Y, Ruan H H, Luo Y Q, Wang J S. Temperature sensitivity increases with soil organic carbon recalcitrance along an elevational gradient in the Wuyi mountains, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1811-1815.
- [31] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4): 669-682.
- [32] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 211-219.