

土地利用变化对川西米亚罗林土壤活性碳库的影响

周程爱¹, 张于光², 肖 烨², 张小全², 李迪强²

(1. 湖南农业大学生物安全科技学院, 长沙 410128;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: 为了揭示土地利用变化对土壤活性有机碳库的影响, 在四川省亚高山米亚罗林区, 以原始冷杉林(M-Y)和由原始林转化成的 45 年龄云杉人工林(M-60)、25 年龄云杉人工林(M-80)和菜地(M-C)等 4 种土地利用类型为研究对象, 进行了土壤的微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(WDOC)和易氧化有机碳(LOC)的含量和季节变化研究。结果表明, 土地利用变化明显影响土壤活性有机碳组分的含量, 其中微生物量碳和水溶性有机碳的变化趋势为 M-Y > M-60 > M-80 > M-C, 易氧化有机碳的变化趋势则为 M-60 > M-Y。土地利用变化没有改变活性有机碳各组分的垂直分布, 各组分均随着土层深度的增加而降低, 季节变化幅度较小, 但枯落物层和表层土壤的变化幅度明显高于深层土壤, 而各组分的分配比例变化幅度明显小于活性有机碳含量的变化。

关键词: 土地利用变化; 微生物量碳; 水溶性有机碳; 易氧化有机碳

文章编号: 1000-0933(2009)08-4542-06 中图分类号: Q143 文献标识码: A

The effect of land use changes on soil active organic carbon pool in Miyaluo forest zone of the western Sichuan

ZHOU Cheng-Ai¹, ZHANG Yu-Guang², XIAO Ye², ZHANG Xiao-Quan², LI Di-Qiang²

1 College of Biosafety Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128 China

2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091 China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4542 ~ 4547.

Abstract: To increase the understanding of the impact of land use change on soil active organic carbon pool and provide the scientific data for understanding the mechanism of the impact of land use change on soil organic carbon, soil samples were collected from four land use types at Miyaluo in subalpine area of Western Sichuan, including primitive *Abies faxoniana* forest (M-Y), 45-year-old planted spruce forest (*Picea likiangensis* var *balfourianan*) (M-60), 25-year-old planted spruce forest (M-80) and cropland (M-C). In the last century, extensive areas of native vegetation in the Miyaluo forest zone in western Sichuan have been converted to agricultural land, secondary forestry and manual planting forestry in different ages. All the soil sections were divided into five layers according to the soil depth, including the surface layer, 1–10cm, 10–20cm, 20–35cm and 35–50cm, except the cropland site. The soil samples were collected in June, August and October in 2006, respectively. The analysis was conducted by the SPSS software. The section distribution and seasonal changes of microbial biomass carbon, water dissolved organic carbon and labile organic carbon was detected in all these four soil samples. The result showed that land use changes significant impact the component of soil labile organic carbon, The distribution of microbial biomass carbon and water dissolved organic carbon are M-Y > M-60 > M-80 > M-C, while the labile organic carbon is higher in M-60 than in M-Y. The seasonal change range is less in all active organic

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30700018); 中央公益型科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFRIF200713); 国家“948”资助项目(2006-4-17)

收稿日期: 2008-11-03; 修订日期: 2009-02-26

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

carbon components. The content in the surface layer is much higher than in depth soil, and the change of allot ratio is lower than the change of active organic carbon. The correlation analysis found that the significant relationship was observed among soil organic carbon and microbial biomass carbon, water dissolved organic carbon and labile organic carbon. Therefore, the components of active organic carbon are the sensitive index to response the change of the soil organic carbon.

Key Words: land use change; microbial biomass carbon; water dissolved organic carbon; labile organic carbon

土壤有机碳的动态是当前气候变化研究中的热点问题,其中土地利用变化对土壤有机碳动态的影响是一个关键^[1]。土壤活性有机碳是指土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解利用、对植物养分供应有直接作用的那部分有机碳^[1]。虽然土壤活性有机碳占土壤有机碳含量的比例很小,但它能够在土壤全碳变化之前反映人类活动所引起的土壤的微小变化,是土壤碳循环的关键和动力^[2],同时在营养元素的地球生物化学过程^[3]、成土过程^[4]、微生物的生长代谢过程^[5]、土壤有机质分解过程^[6]以及土壤中污染物的迁移^[7]等过程有着重要的作用。因此,活性有机碳对土壤碳收支以及全球变化具有重要意义。

我国是土地利用变化较大的国家,几千年的人类活动使土地利用方式发生了很大的变化,近些年来又开展了大规模的退耕还林工作,无疑这些活动对土壤有机碳都将产生一定的影响,但这些影响目前还不清楚。因此,研究同一地区不同土地利用类型土壤活性有机碳库含量对揭示土地利用方式变化对土壤碳库的影响具有十分重要的意义。川西亚高山森林生态系统主要分布在长江上游,是长江上游森林的主体和长江流域的重要生态屏障,对维持区域小气候、涵养水源和水土保持等具有重要意义。本研究试图以川西米亚罗林 4 种不同土地利用类型为对象,探讨土地利用变化对土壤水溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳的影响及其季节动态变化,为揭示土地利用变化对土壤有机碳库的影响机理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况和样品采集

研究区位于四川省理县米亚罗林区(31°24'~31°55'N,102°35'~103°40'E),属于青藏高原东缘褶皱带最外缘部分。地形以石质山地为主,坡度多在 35°以上,海拔高差悬殊,处于 2200~5500m 之间。气候受高原地形的决定性影响,属高山气候,年均温度 6~12℃,极端高温 32℃,极端低温 -16℃,夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥,最冷月为 1 月份,均温为 -8℃,最热月为 7 月份,均温为 12.6℃,≥10℃的年积温为 1200~1400℃,年蒸发量为 1000~1900mm,常年无霜期 200d,年降水量为 600~1100mm,具有降水次数多,强度小的特点^[7]。米亚罗森林土壤为棕壤,20 世纪 50 年代以来,该地区进行了大量的采伐和人工更新,形成了原始林、次生林、人工林和由原始林开垦而来的农地等多样的土地利用类型。

本研究选择原始冷杉林(*Abies faxoniana*)(M-Y)、20 世纪 60 年代种植的云杉(*Picea likiangensis* var. *balfouriana*)人工林(M-60)、20 世纪 80 年代种植的云杉人工林(M-80)和菜地(M-C)等 4 种土地利用方式作为研究对象。其中人工林是由原始林砍伐后形成的,农地是 20 世纪 60 年代初由原始林采伐开垦而成,过去种植洋芋、莴笋为主,从 1999 年开始改种大白菜。为减少样地间地形及气候差异,尽量选择地形要素(坡度、坡向和坡形)、树林郁闭度、海拔高度等基本一致的地段设立取样区,在每个利用方式分别设立 3 个 10 m×10 m 的取样区。土壤取样共分 5 层,第一层为枯落物层(0 cm)(M-Y 样地除外),其它分别为 1~10cm、10~20cm、20~35cm 和 35~50 cm。采取多点取样混合,每样地内共挖掘 5~10 个土壤剖面,取土样后逐层回填。分别于 2006 年 6 月、8 月和 10 月分 3 次采集土壤样品。样地的基本情况见表 1。

1.2 活性有机碳的测定方法

(1)土壤微生物量碳(MBC) 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法^[8,9],土壤微生物碳系数为 2.64^[10]。

(2)土壤水溶性有机碳(WDOC) 称鲜土 30.00g,水:土为 2:1,在 25℃下恒温振荡器中振荡 30min(250 次/min)后,离心 10 min(7 000 r/min),再用 0.45 μm 滤膜抽滤,滤液直接在 TOC 有机碳分析仪上测定^[11]。

(3) 土壤易氧化有机碳(LOC) 采用高锰酸钾氧化——比色法^[12]。

表 1 样地基本情况

Table 1 Characteristics of different sites

土地利用类型 Land use types	样品编号 No. sample	海拔 Altitude (m)	经纬度 Latitude, longitude	平均树高 Mean height (m)	树木密度 Tree density (trees/hm ²)	郁闭度 Canopy cover
原始冷杉林 Fir forest	M-Y	3162	31°47'46"N 102°41'53"E	38.15	587	0.7
45 年龄云杉人工林 45-year-old spruce plantation	M-60	3233	31°47'46"N 102°42'03"E	14.3	1860	0.6
25 年龄年代云杉人工林 25-year-old spruce plantation	M-80	3300	31°47'32"N 102°42'04"E	5.17	3760	0.7
农地 Cropland	M-C	3168	31°47'48"N 102°41'56"E	—	—	—

1.3 数据统计和分析

利用 Excel 和 SPSS 等统计软件对分析结果进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化对土壤活性碳库的影响

不同土地利用方式下的土壤总有机碳、微生物量碳、水溶性有机碳和易氧化有机碳的含量见表 2。从表 2 可以看出,4 种不同土地利用方式土壤活性碳的含量均较高,这可能是 4 种不同土地利用类型在历史都是原始林,仅在 20 世纪中后期才开始发生变化,因为利用方式和改变的时间间隔相对较短,而土壤活性碳含量仍然较高。

表 2 不同土地利用方式各种活性碳的含量和分配比例

Table 2 Comparison on soil labile carbon content and various fractions under different land use

土地利用 Land use	土壤深度(cm) Soil depth	TOC (g/kg)	MBC (mg/kg)	MBC (%)	WDOC (mg/kg)	WDOC (%)	LOC (mg/g)	LOC (%)
M-Y	0	276.40	1246.82	0.45	466.16	0.17	3.73	1.35
	1~10	175.70	785.50	0.45	318.34	0.18	2.97	1.69
	10~20	107.77	456.10	0.42	188.04	0.17	1.27	1.17
	20~35	68.62	198.42	0.29	135.00	0.19	0.56	0.82
	35~50	61.37	145.32	0.24	105.91	0.17	0.44	0.71
	平均 Mean	137.97	566.43	0.41	242.69	0.18	1.79	1.30
M-60	0	252.91	862.19	0.34	299.60	0.12	3.74	1.48
	1~10	81.07	593.85	0.73	222.93	0.27	3.42	4.22
	10~20	35.03	436.46	1.25	171.24	0.49	1.37	3.92
	20~35	15.43	248.85	1.61	144.97	0.94	0.77	4.97
	35~50	13.10	153.77	1.17	129.87	1.00	0.54	4.10
	平均 Mean	79.51	459.02	0.58	193.72	0.56	1.97	3.74
M-80	0	104.10	808.73	0.78	302.76	0.29	3.38	3.25
	1~10	69.95	603.64	0.86	198.01	0.28	1.79	2.56
	10~20	32.12	396.88	1.24	163.38	0.50	0.64	2.00
	20~35	23.78	230.59	0.97	142.62	0.60	0.40	1.69
	35~50	19.03	129.09	0.68	132.76	0.70	0.29	1.51
	平均 Mean	49.80	433.78	0.87	187.91	0.38	1.30	2.61
M-C	1~10	35.11	234.74	0.67	137.35	0.39	1.09	3.11
	10~20	20.53	209.96	1.02	116.43	0.57	0.93	4.54
	20~35	9.84	85.38	0.87	93.32	0.95	0.55	5.56
	35~50	4.73	52.50	1.11	76.18	1.61	0.45	9.58
	平均 Mean	17.55	145.64	0.83	105.82	0.60	0.76	4.31

从表 2 中可以看出,不同土地利用方式的土壤活性碳含量差异明显,其中 M-C 土壤有机碳的含量分别比 M-Y、M-60 和 M-80 低 87.3%、77.9% 和 64.8%,微生物量碳分别低 74.3%、68.3% 和 66.4%,水溶性有机碳分别低 56.4%、45.4%、43.7%,而易氧化有机碳则分别低 57.5%、61.4% 和 41.5%。而随着人类活动的干扰程度和土地利用方式的不同,土壤活性碳的含量存在一定的变化规律,其中土壤总有机碳、微生物碳、水溶性有机碳的含量为 $M-Y > M-60 > M-80 > M-C$,而易氧化有机碳的含量为 $M-Y > M-80 > M-60 > M-C$ 。

2.2 土地利用变化对活性有机碳分配比例的影响

活性有机碳的分配比例是各活性有机碳组分含量与土壤有机碳含量的比值,分配比例的变化能更直接活性有机碳的变化。从表 2 可以看出,微生物量碳的分配比例 0.24% ~ 1.61% 之间,变化趋势为: $M-80 > M-C > M-60 > M-Y$ 。水溶性有机碳的分配比例在 0.12% ~ 1.61% 之间,变化趋势为: $M-C > M-60 > M-80 > M-Y$,其中 M-Y 样地的分布趋于平缓,处于 0.17% ~ 0.19% 之间,而 M-C 的分布变化则最为明显,处于 0.39% ~ 1.16% 之间。易氧化有机碳的分配比例为 0.71 ~ 9.58 之间,变化幅度在 3 种活性有机碳中最大,变化趋势为 $M-C > M-60 > M-80 > M-Y$,与水溶性有机碳的变化趋势相同。不同土地利用方式中各活性有机碳的分配比例规律与活性有机碳含量的变化规律不一致,这可能是由于样地中的土壤总有机碳含量过高引起的,特别是 M-Y 样地。

2.3 土地利用变化对土壤剖面活性碳的影响

从表 2 可以看出,不同土地利用方式下,土壤有机碳、微生物量碳、水溶性有机碳和易氧化有机碳的含量在剖面上的变化趋势均随着土壤深度的增加而降低,均在 10 ~ 20cm 土层和 20 ~ 35cm 土层之间发生较大的变化,例如 M-Y 样地的 20 ~ 35cm 土层微生物量碳含量较 10 ~ 20cm 土层低 56.5%,M-C 则低 59.2%;M-Y 样地的 20 ~ 35cm 土层易氧化有机碳较 10 ~ 20cm 土层低 55.9%,而 M-80 则低 64.2%。因此,土地利用方式的变化没有改变土壤剖面活性有机碳的含量变化趋势。

2.4 不同土地利用方式活性有机碳的季节变化

图 1 是不同土地利用类型土壤微生物量碳、水溶性有机碳和易氧化有机碳的季节变化情况。4 种不同土地利用方式下,土壤微生物量碳和水溶性有机碳含量均为 8 月份的含量最高,10 月份和 6 月份相对较低;在所有分析季节中,土壤微生物量碳和水溶性有机碳含量均为 $M-Y > M-60 > M-80 > M-C$ 。除了 M-80 外,易氧化有机碳的含量为 8 月份最高,10 月份和 6 月份相对较低,季节间的样地之间变化趋势均为 $M-60 > M-Y > M-80 > M-C$ 。

3 讨论

土壤碳库的变化与碳的存在形式及其生物有效性有密切的关系。土地利用方式的改变,一方面导致进入土壤种植物残体的数量和性质发生改变,另一方面引起土壤水管理、耕作方式等管理措施的差异,由此影响和改变了土壤微生物量碳、水溶性有机碳和易氧化有机碳的含量^[13]。有研究表明,土壤微生物量碳、水溶性有机碳和易氧化有机碳含量的季节性波动主要受不同季节有机物质投入量的影响;温度和湿度的季节变化影响了新鲜输入的有机物质、土壤有机碳的分解速率,从而影响了土壤活性有机碳的含量。Kalbitz 等人通过动力学研究指出,土壤有机质的短暂波动主要发生在活性较高且易分解部分^[6],因此,研究不同土地利用方式下土壤活性有机碳的动态变化将有助于更好地了解土壤有机碳的变化机理。

土壤活性有机碳是对土地利用变化较为敏感的部分^[14],而土壤有机碳含量在活性和非活性组分间的分配比例受许多因素的影响,天然植被变成农田进行耕作是影响土壤活性有机碳的最主要的因素之一^[15],本研究结果显示,菜地土壤活性有机碳不同组分均明显的低于森林土壤,例如菜地微生物量碳含量比原始冷杉林、45 年轮云杉人工林和 25 年轮云杉人工林分别低了 60% 以上,而水溶性有机碳的含量则分别低了 40% 以上,这些表明原始林变成人工林和菜地后土壤活性有机碳含量下降明显。这种趋势与国内外许多研究的结果基本一致,如 Blair 等发现新南威尔士地区的天然植被土壤进行耕作后,土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳含量都有不同程度的下降,而这些农田再进行连续两年种植紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 后,碳含量又增

加^[16]。这些研究结果都表明土壤活性有机碳含量比土壤总有机碳含量更易于改变,土壤活性有机碳是对土地利用变化反应较为敏感的指示部分。不过,也有研究发现土地利用变化对土壤活性有机碳并没有显著影响,如Mendham等发现澳大利亚西部天然林、草地和桉树人工林中土壤活性有机碳含量没有显著差异^[14]。这些差异的原因,目前还并不十分清楚,但差异却表明土地利用变化对土壤活性有机碳的影响可能是复杂的过程,在不同土地利用变化及不同的区域可能会有不同的趋势^[17]。

土壤活性有机碳是土壤有机碳中较活跃的部分,在土地利用变化过程中,土壤有机碳含量和活性有机碳含量都将受到不同程度的影响,由于受到影响的程度不同,这些差异表现在不同土地利用方式下土壤活性有机碳的分配比例方面^[16]。本研究结果显示,林地和菜地土壤活性有机碳组分的分配比例并没有随土地利用变化发生明显的影响,这些变化趋势显然与活性有机碳含量在受到土地利用变化后的改变程度要小的多。这可能是因为土地利用变化后,一方面使土壤有机质数量发生变化而影响土壤活性有机碳和有机碳含量,另一方面也使土壤有机质的稳定性和质量发生变化而使土壤活性有机碳与非活性有机碳发生转变^[17]。天然次生林变成农田或草地后,虽然土壤活性有机碳含量下降,但由于土壤有机质稳定性和质量下降,使一部分非活性有机碳变成活性有机碳。此外,造林后土壤有机质的质量和微生物的功能多样性也可能发生变化^[18]。同时,由于土壤活性有机碳含量的变化并不与有机碳含量成比例,土壤活性有机碳分配比例和含量的变化趋势并不一致,而且菜地的耕作将使土壤有机碳分解加速。这些结果说明土壤活性有机碳和非活性有机碳都受到土地利用

变化的影响,而且在土地利用变化过程中部分非活性有机碳可能变成活性有机碳或者部分的活性有机碳可能变成非活性有机碳,这些变化使土壤活性有机碳的比例并没有对土地利用变化有较大的敏感性^[17]。

不同土层土壤有机碳中活性有机碳含量及其占有机碳含量的比例并不相同,在受到土地利用变化的影响后,变化的幅度将不同。本研究结果显示,尽管土地利用变化明显的影响了土壤活性有机碳各组分的含量,但是,并没有影响土壤活性有机碳各组分的垂直分布变化趋势,所有的活性有机碳的组分均是随着土壤深度的增加而降低。同时,大多数的枯落物层和表层土壤活性有机碳组分的含量变化幅度较大,但随着土层的加深,含量差异逐渐减少。这可能主要与植物根系分布、产生凋落物数量和质量及其与土壤活性有机碳的相关程度有关^[19],树木根系分布比农作物深,土壤表层形成的残体或分泌物多,土壤活性有机碳形成量就比农田多^[20]。当森林变成菜地后,以前土地利用方式下土壤中的活性有机碳很快被分解完,而在菜地中只有土壤表层补充了部分的土壤活性有机碳。另外,凋落物的质量与活性有机碳的形成有直接关系,树木形成的凋落物中木质素含量一般比菜地作物的高,所森林中土壤表层较多的凋落物残体,也将影响土壤有机碳含量。而且

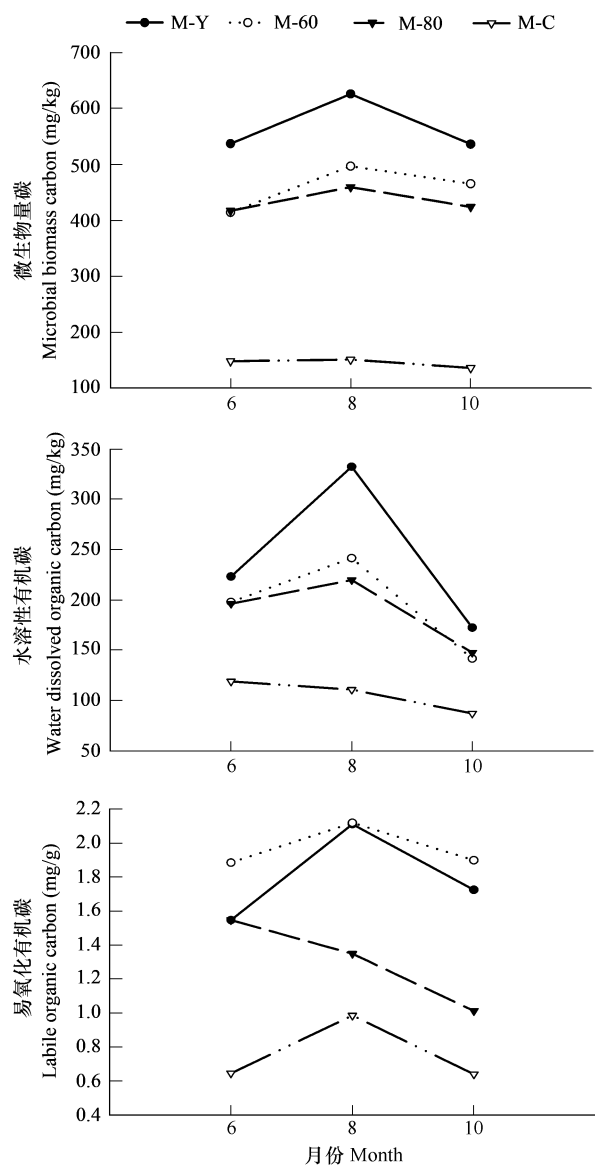


图1 不同土壤活性有机碳组分的季节变化

Fig. 1 The seasonal change of different soil labile carbon

枯落物层和表层土壤容易受温度、湿度等环境因素的直接影响有关,而深层土壤则相反。但是菜地土壤的活性有机碳季节含量变化的变化规律则与林地的不一致,这可能是因为菜地受到人为干扰较多有关,更多的与人类活性具有明显的相关性。

虽然土壤活性有机碳含量可能随季节变化,但是仍有许多研究者以在同一采样时期内探讨了不同土地利用方式对土壤活性有机碳的影响^[21]。本研究采用不同时期内探讨不同土地利用方式对土壤活性有机碳的影响,结果表明,季节变化对不同活性有机碳组分具有一定的影响,但影响趋势不完全一致。但是,相同土地利用方式的相同土层深度的季节变化差异并不明显,而且季节变化并没有改变土地利用类型之间的变化趋势,所有的活性有机碳组分含量的变化趋势仍然是相同的,因此,在同一时期探讨不同土地利用方式对土壤活性有机碳组分的影响,在一定意义上仍然是可行的。

References:

- [1] Shen H, Cao Z, Hu Z. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18 (3): 32—38.
- [2] Liu M, Yu W, Jiang Z, *et al.* A research review on soil active organic carbon. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (11): 1412—1417.
- [3] Qualls R G, Haines B L. Geochemistry of dissolved organic Nutrients in water percolating through a forest ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1112—1123.
- [4] Dawson H J, Ugolini F C, Hrutford B F, *et al.* Role of soluble organics in the soil processes of a podzol, Central Cascades. *Soil Sci.*, 1978, 126: 290—296.
- [5] Meyer J L, Edwards R T, Risley R. Bacterial growth on dissolved organic carbon from blackwater river. *Microb Ecol.*, 1987, 13: 13—29.
- [6] Kalbit K, Soling er S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Sci.*, 2000, 165: 277—304.
- [7] Liu Q, Yun H J, Wu Y. A study on the structure of *Picea Asperata* community of Miyaluo subalpine in western Sichuan, China. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21 (6): 695—701.
- [8] Li G, Zhang B, Li B. Effect of straw pretreatment on soil microbial biomass and respiration activity. *Chin. J. Appl. Ecol*, 2003, 14 (12): 2225—2228.
- [9] Qiang X, Yuan H, Gao W. Effect of crop residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, 15 (3): 469—472.
- [10] Ocio JA, Brookes PC. An evaluation of methods for measuring the microbial biomass in soils following recent additions of wheat straw, and the characterization of the biomass that develops. *Soil Biol. Biochem.*, 1990, 22 (5): 685—694.
- [11] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biol. and Biochem.*, 2003, 35: 1231—1243.
- [12] Loginow W, Wisniewski W, Goner S S, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47—52.
- [13] Sharma P, Rai S C, Sharma R, *et al.* Effect of land use changes on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed. *Pedobiologia*, 2004, 48: 83—92.
- [14] Mendham D S, Connell A M, Grove T S. Organic matter characteristics under native forest, long term pasture, and recent conversion to eucalyptus plantations in western Australia: microbial, soil respiration and permanganate oxidation. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40: 859—872.
- [15] Camberdella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1994, 58: 123—130.
- [16] Blair G J, Crocker G J. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38: 71—84.
- [17] Wu J, Zhang X, Xu D. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain forest zone. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28 (5): 657—664.
- [18] Zhang Y, Zhang X, Liu X, *et al.* Microarray-based analysis on changes of microbial decomposition genes involved in organic carbon following land use/cover changes. *FEMS Microbiology Letters*, 2007, 266 (2): 144—151.
- [19] Jobbery E G, Jackson R B. The vertical distribution soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10: 423—436.
- [20] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomass. *Oecologia*, 1996, 108: 389—411.
- [21] Hannamaria P, Tytti S. Seasonal fluctuation in microbial biomass and activity along a natural nitrogen gradient in a drained peatland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 1047—1055.

参考文献:

- [1] 沈宏, 曹志宏, 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.
- [2] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳. *生态学杂志*, 2006, 25 (11): 1412~1417.
- [7] 刘庆, 尹华军, 吴彦. 川西米亚罗高山地区云杉林群落结构分析. *山地学报*, 2003, 21 (6): 695~701.
- [17] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较. *植物生态学报*, 2004, 28 (5): 657~664.