生 态 学 报 2010,30(4):1025—1034
Acta Ecologica Sinica

川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布

向成华[1,2,*],栾军伟[2,3],骆宗诗[1],宫渊波[2]
(1. 四川省林业科学研究院,成都 610081;2 四川农业大学林学园艺学院,雅安 625014;
3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,北京 100091)

摘要:研究土壤活性有机碳含量及分配比例是揭示土壤碳库周转及调控机理的重要途径,通过利用高锰酸钾氧化法获得易氧化有机碳、湿筛法获得颗粒有机碳和密度分离法获得轻组有机碳3项指标探讨沿海拔梯度不同植被类型间(山地常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林)土壤活性有机碳含量差异及调控因子,结果表明:随土层加深,土壤颗粒和轻组有机碳含量及分配比例均降低,土壤易氧化有机碳含量降低而分配比例保持较稳定水平。高海拔植被类型具有较高的土壤活性有机碳含量和分配比例。不同活性有机碳含量之间均呈显著线性相关($P<0.05$)表明活性有机碳起源的类似。活性有机碳与土壤粘粒+粉粒含量百分比呈显著负相关($P<0.05$)表明活性有机碳趋向分布于土壤大团聚体当中。年均温与不同植被类型间表层土壤活性有机碳含量和分配比例成负相关趋势,但可能由于取样点较少的缘故而在统计上不显著。年均温与土壤非保护性有机碳向保护性有机碳的转化速率常数(K)接近于显著负相关($P=0.062$)。

关键词:活性有机碳;易氧化有机碳;轻组有机碳;颗粒有机碳

Labile soil organic carbon distribution on influenced by vegetation types along an elevation gradient in west Sichuan, China

XIANG Chenghua[1,2,*], LUAN Junwei[2,3], LUO Zongshi[1], GONG Yuanbo[2]
1 *Sichuan Academy of Forestry Chengdu* 610081, *China*
2 *College of Forestry and Horticulture, Sichuan Agricultural University Ya'an* 625014, *China*
3 *The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF Beijing* 100091, *China*

Abstract: Labile soil organic carbon (LOC) is an indicator in terms of evaluating soil organic matter quality and dynamics. Fractionation of soil organic matter (SOM) implies the separation of the total SOM into different soil physical fractions that are thought to be functionally homogeneous with respect to physicochemical properties and turnover rate, and the organic matter dynamics based on turnover time will be further understood. In this paper, Labile soil organic carbon, evaluated by three indicators obtained from oxidation and physical fractionation methods, was found varies with vegetation types (Mountainous evergreen broad-leaved forest, mixed evergreen and deciduous broadleaved forest, deciduous broad-leaved forest, mixed coniferous and broadleaved forest, sub-alpine dark coniferous forest) distributed along an elevation gradient. A 333mM $KMnO_4$-chemical oxidation method was used to determine the easily oxidized carbon (EOC), and another two physical methods including wet sieving through a 0.053 mm sieve and flotation in aqueous NaI ($1.8 g \cdot cm^{-3}$) were used to determine the particulate organic matter carbon (POC) and light fraction organic carbon (LFOC) respectively.

POC and LFOC contents as well as their proportions decrease with the increasing soil depth, similar result was found in EOC content, while there is no decrease in the proportion of EOC. Compared with lower-elevation vegetation types, higher ones were found significantly higher in their LOC content and proportion. EOC and POC show positive correlations with LFOC ($P<0.05$), indicates the similar origin of EOC, POC and LFOC. In contrast, negative correlation between LOC and silt + clay(%) content indicates that more LOC are contained in the macroaggregate. EOC, POC and LFOC contents of

基金项目:国家"十一五"科技支撑资助项目(2006BAD03A0524);四川林业科技先导计划重点创新工程资助项目(研究04-13)
收稿日期:2008-12-23; **修订日期**:2009-06-10
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: XCH_2003@yahoo.com.cn

surface soil layer as well as their proportions decrease with mean annual temperature (MAT), however, no significant was found for the fewer samplings. And a marginal positive correlation was found between MAT and the rate constant for C transfer from the unprotected to the protected soil pool (K) ($P=0.062$).

Key Words: labile organic carbon; easily oxidized carbon determined by 333mmol/L $KMnO_4$; light fraction organic carbon; particulate organic matter carbon

森林生态系统占据了全球碳收支的重要部分,据估计,森林土壤占全球土壤有机碳库的70%—73%[1]。森林碳库尤其是森林土壤碳库的微小变化,都可以引起大气CO_2浓度的显著变化[2],土壤活性碳是指受植物、微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动快、稳定性差、易氧化、矿化,并具有较高植物和土壤微生物活性的那部分有机碳[3],研究发现,土壤碳库的变化主要发生在活性碳库里[4-7],活性有机质较非活性有机质敏感得多,又直接参与土壤生物化学转化过程,同时也是土壤微生物活动的能源和土壤养分的驱动力[8-9],对于土壤活性有机碳的研究是森林土壤碳库动态及调控机理研究的重要方面。

目前,测定土壤活性有机碳有多种方法,如物理分离、化学氧化和生物活性测定法等[10-11]。其中,化学方法中的$KMnO_4$氧化法(易氧化有机碳),物理分离方法中的密度分离法(轻组有机碳)和湿筛法(颗粒有机碳)被认为是简单易行而被广泛用来研究土地利用变化、人工造林等对土壤有机碳库的影响[7],颗粒有机质和轻组有机质代表了土壤有机质中的非保护性组分(Unprotected SOC)[12]。近年来,国内外学者进行了大量的研究,这些研究主要集中在不同土地利用类型间土壤活性有机碳差异及影响因素[13-15],人工造林对土壤活性有机碳含量的影响[16-18],不同植被类型间[19]以及不同人为干扰强度下[20-22]土壤活性有机碳组分差异及其影响因素。不同森林植被类型下土壤由于承接其凋落物和根系分泌物类型不同以及气候因子等的差异,因而形成的土壤碳库特别是活性有机碳状况会存在差别[23]。因此,研究同一地区沿海拔梯度不同森林植被下土壤活性碳含量与分配比例对于揭示森林植被及相应气候因子对土壤碳库的调控及影响具有重要意义。

宽坝林区位于四川盆地西北缘,是四川盆地向青藏高原东南缘过渡的地带,沿海拔自下而上分布着山地常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林,为研究植被类型对土壤活性碳库及组成的影响提供了理想实验室,本文拟通过测定易氧化、颗粒、轻组有机碳3个指标探讨沿海拔梯度不同植被类型间土壤活性有机碳含量及分配比例的差异及其调控因子,为揭示森林植被类型对土壤碳吸存能力的影响提供基础数据。

1 研究区概况

宽坝林区地处长江上游主要支流——涪江流域平通河源头,位于四川省平武县,东临龙门山北段西侧,南与北川县接壤,西与松潘相邻。地理坐标E 104°19′、N 32°12′,在纬度上属亚热带的北缘,海拔1150—3260m,地形西北高,东南低。属亚热带湿润季风气候,年均气温11℃,1月份均温为1℃,7月份均温为20℃,≥10℃年积温为4793℃,年降雨量为1187 mm,相对湿度为88%,日照时数达691h[24]。各样地基本情况见表1。

2 研究方法

2.1 采样与分析方法

2005年8月,每种森林类型取9个(MF, EF)或6个(DF, CF, SF)共计36个10m×10m重复样地,在每个样地内采用“S”形布点挖土壤剖面5个,0—15cm,15—30cm,30—50cm,50—75cm,75—100cm分层取样,相同层次混合。土壤样品带回实验室后风干、去杂,一部分过0.25mm筛供土壤总有机碳、全氮分析,一部分过2mm筛供土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳和轻组有机碳分析。土壤总有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮采用半微量凯氏定氮法,粘粒、粉粒含量百分比采用液体比重计法(采用美国标准<0.05mm),常绿阔叶林样地年均气温由四川省林科院宽坝林区气象观测站获得,其它样地年均气温根据海拔每升高100m,气温降低0.6℃获得。

表 1　样地基本情况表

Table 1　General situation of research sites

林型 Forest type	土壤类型 Soil type	海拔高度 Altitude/m	年均温 MAT/℃	主要乔木树种 Tree species	郁闭度 Canopy density
山地常绿阔叶林(MF)	山地黄壤	1354	11.1	润楠、曼稠	0.8—0.9
常绿落叶阔叶混交林(EF)	山地黄壤	1405	10.7	野核桃、灯台树、曼稠	0.6—0.7
落叶阔叶林(DF)	山地黄棕壤	1710	9.2	亮叶桦、野核桃等	0.6—0.8
针阔混交林(CF)	山地棕壤	2308	5.6	岷江冷杉、亮叶桦	0.4—0.6
亚高山暗针叶林(SF)	山地暗棕壤	2605	3.8	岷江冷杉	0.5—0.7

润楠 *Machilus pingii*;曼稠 *Quercus oxyodon*;野核桃 *Juglans cathayensis*;灯台树 *Cornus controversa*;亮叶桦 *Betula luminifera*;岷江冷杉 *Abies faxoniana*

2.2　土壤易氧化有机碳的测定

取(过 2mm 筛的风干土 2.00g)称量处理过约含 15mg 有机碳的土样,放在塑料瓶(100ml)内,用 333 mmol·L^{-1} $KMnO_4$溶液 25ml 震荡处理 1h,空白试验同时进行,震荡后离心 5min (4000 r·min^{-1}),取上清夜,用去离子水按 1:250 比例稀释,然后用分光光度计在 565nm 下比色测定,根据 $KMnO_4$浓度的变化(重复 3 次)计算活性有机碳含量(1mol $KMnO_4$氧化 0.75molC)[19,25-27]。

2.3　土壤轻组有机碳测定

称取经过 2mm 筛的风干土样 10.00g,放入 25mL 的 NaI(1.80g·cm^{-3})重液中,震荡 18h(60r/min),然后用真空管吸取悬浮部分,用 3 号砂芯漏斗过滤,并用重液反复(3 次)冲洗瓶底的样品,用同样方法吸取悬液部分和过滤。把漏斗上的部分在 65 ℃下烘干 24h,称取烘干后质量,再取出部分样品用于分析有机碳含量。根据计算的比例和有机碳含量计算轻组中有机碳在整个样品中的含量[12,14,16,28-30]。

2.4　土壤颗粒有机碳的测定

取过 2mm 风干土 20.00g,放入 250ml 塑料瓶,加入 100ml 5% 的 6 偏磷酸钠溶液,先手摇 3min,震荡 18h (90r/min),把土壤悬液过 53μm 筛,并反复用蒸馏水冲洗。把所有留在筛子上方的物质,在 65℃下烘 48h 后称重,取其中部分样品分析有机碳含量。根据颗粒所占比例和有机碳含量,推算颗粒有机碳含量[12,14,16,28-30]。

2.5　数据分析

土壤非保护性有机碳向保护性有机碳转化的速率常数 k 用以下公式计算[12]:

$$k = P/(TT_p \times U)$$

式中,U 为非保护性有机碳碳库(颗粒、轻组有机碳的均值),P 为保护性有机碳库(总有机碳与非保护性有机碳的差值),TT_p 为保护性有机碳周转时间,设为 100a[12]。

数据分析采用 SPSS 13.0 软件包完成,方差分析采用 LSD 法。

3　结果与分析

3.1　不同植被类型土壤活性有机碳含量

图 1 表明,各植被类型土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳及轻组有机碳含量均随土层加深而降低。不同植被类型间,土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳呈现高海拔植被类型高于低海拔植被类型。其中,各土层土壤易氧化有机碳含量落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林均显著高于常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林($P<0.05$),常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林间差异不显著($P>0.05$);0—75cm 各土层土壤颗粒有机碳含量针阔混交林、暗针叶林均显著高于落叶阔叶林、常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林($P<0.05$),落叶阔叶林、常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林之间差异不显著($P>0.05$);土壤轻组有机碳随海拔升高而增加的趋势不明显,在 0—50cm 土层只有针阔混交林显著高于其它 4 种森林类型($P<0.05$)。

3.2　不同植被类型土壤活性有机碳分配比例

土壤活性碳占总有机碳的比例比活性有机碳总量更能反映森林植被对土壤碳行为的影响结果[23]。由

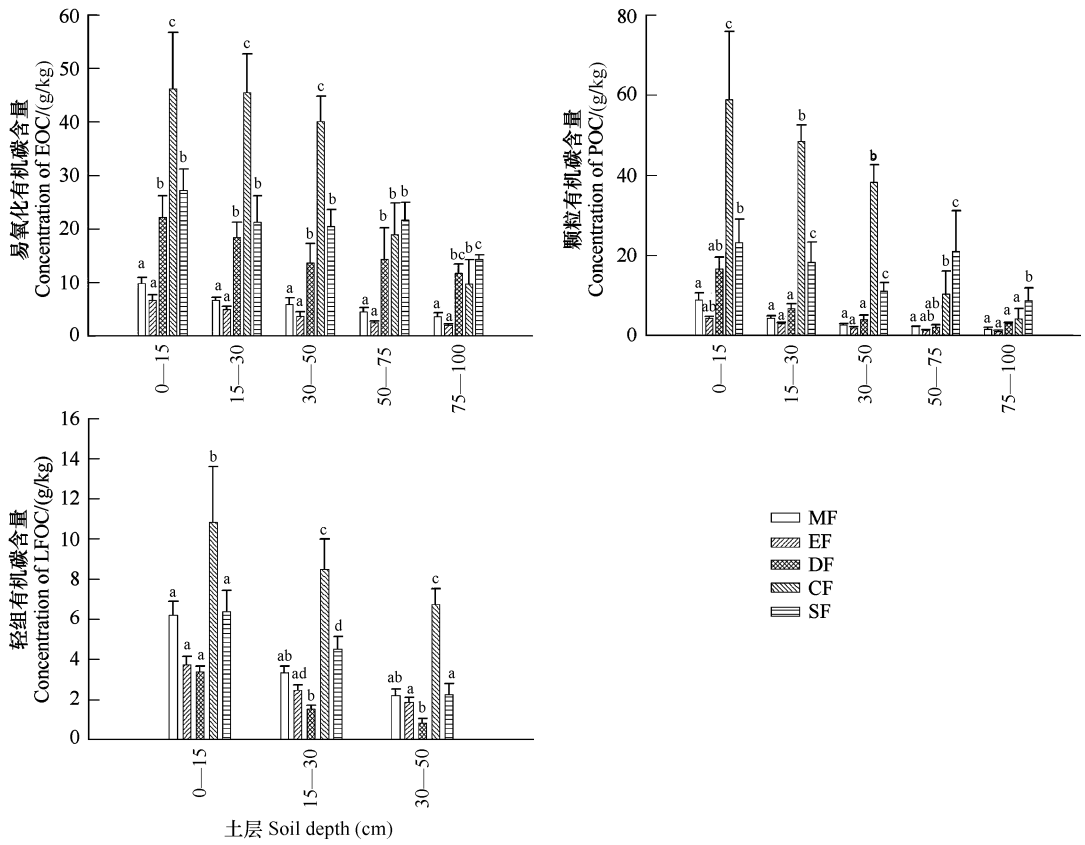

图1 不同植被类型土壤易氧化、颗粒、轻组有机碳含量的土壤剖面分布,同一土层不同森林类型间不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Fig.1 Vertical distribution of concentration of soil EOC, POC, LFOC in different forests, the different letters within each soil depth indicate significantly difference under different forests at 5% level

图2可以看出,土壤颗粒和轻组有机碳的分配比例均随土壤深度的增加而降低,而土壤易氧化有机碳分配比例则随土壤深度增加保持在较稳定水平。

不同植被类型间,土壤各土层易氧化有机碳占总有机碳的比例落叶阔叶林,针阔混交林,暗针叶林均显著高于常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林($P<0.05$),常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林间,落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林间各土壤层均未表现出显著差异($P>0.05$)。土壤各土层颗粒有机碳占总有机碳的比例落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林均显著高于常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林($P<0.05$),常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林间差异不显著($P>0.05$),3 种高海拔类型间,均是针阔混交林 > 暗针叶林 > 落叶阔叶林,且两两间差异显著($P<0.05$)。土壤各土层轻组有机碳占总有机碳的比例除落叶阔叶林显著低于其它几种植被类型外($P<0.05$),其它各植被类型间没有表现出明显的差异($P>0.05$)。

3.3 土壤活性有机碳之间的关系

表2表明,土壤易氧化、颗粒、轻组有机碳含量均很大程度上决定于土壤总有机碳的含量(76.3%—84.9%),呈显著线性相关,与土壤全氮也呈显著线性相关,与土壤碳氮比呈显著指数相关,土壤易氧化、颗粒、轻组有机碳含量两两之间显著线性相关。土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳含量均与土壤粘粒+粉粒百分比呈显著线性负相关,轻组有机碳与土壤粘粒+粉粒百分比在去掉落叶阔叶林数据后也呈显著负相关(图3)。

3.4 土壤活性有机碳的气候响应

土壤0—15cm 活性有机碳含量与年均温之间呈线性负相关趋势(图4),解释了植被类型间活性有机碳含量差异的35%—61%。土壤0—15cm 易氧化有机碳、颗粒有机碳占总有机碳的分配比例与年均温也呈负相关趋势(图5),较少的取样点可能是造成相关性不显著的原因。土壤非保护性有机碳向保护性有机碳的转化

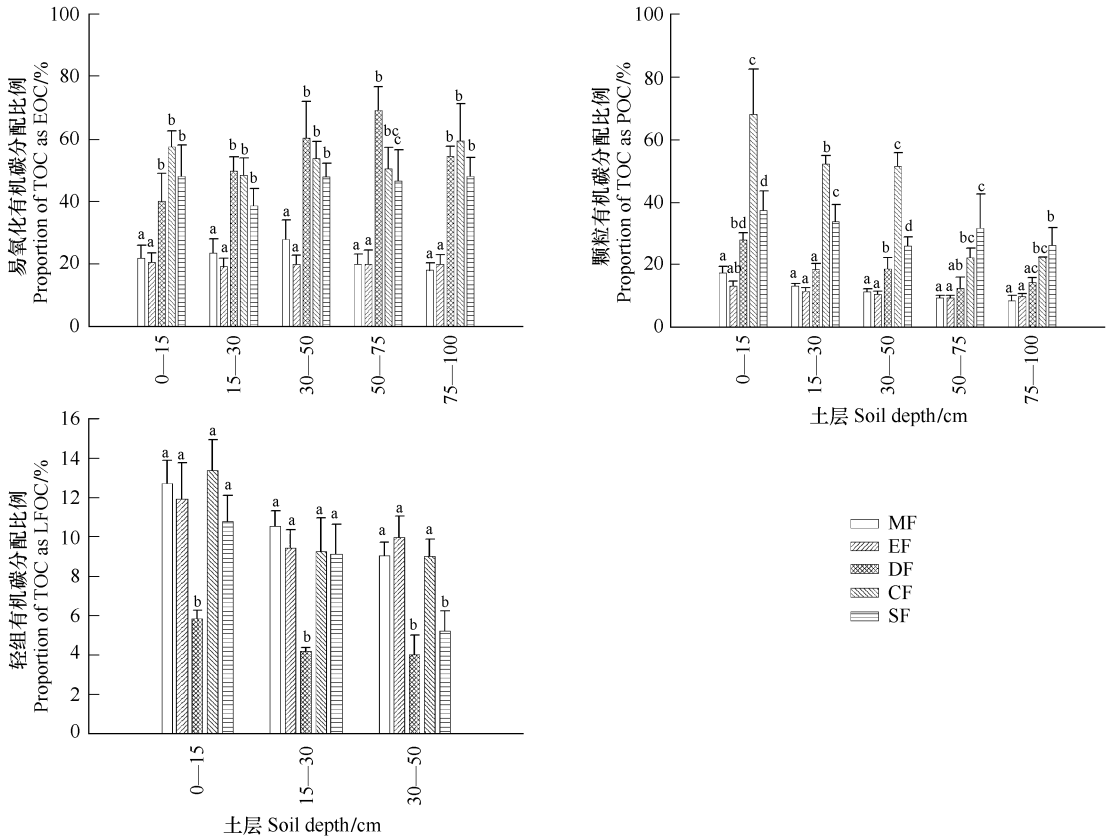

图 2　易氧化、颗粒、轻组有机碳含量的分配比例土壤剖面分布,同一土层不同森林类型间不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Fig. 2　Vertical distribution of proportion of soil EOC, POC, LFOC in different forests, the different letters within each soil depth indicate significantly difference under different forests at 5% level

表 2　活性有机碳与总有机碳、碳氮比或相互之间的相关关系

Table 2　Correlation between labile organic carbon and TOC, C:N

$x-y$	易氧化有机碳 EOC (g/kg Soil)	颗粒有机碳 POC (g/kg Soil)	轻组有机碳 LFOC (g/kg Soil)
总有机碳 TOC (g/kg Soil)	$y = 0.5475x - 5.2452$ $R^2 = 0.8494$　$P = 0.000$	$y = 0.6561x - 12.992$ $R^2 = 0.8474$　$P = 0.000$	$y = 0.1131x - 0.9983$ $R^2 = 0.7626$　$P = 0.000$
全氮 (g/kg Soil) TN	$y = 18.321x - 19.1$ $R^2 = 0.793$　$P = 0.000$	$y = 21.981x - 29.575$ $R^2 = 0.7471$　$P = 0.000$	$y = 3.1707x - 2.3585$ $R^2 = 0.622$　$P = 0.000$
碳氮比 C:N	$y = 1.0312e^{0.1229x}$ $R^2 = 0.3985$　$P = 0.012$	$y = 0.1377e^{0.1979x}$ $R^2 = 0.593$　$P = 0.001$	$y = 0.2099e^{0.1307x}$ $R^2 = 0.6347$　$P = 0.000$
易氧化有机碳 EOC (g/kg Soil)		$y = 1.1402x - 5.7823$ $R^2 = 0.9031$　$P = 0.000$	$y = 0.1552x + 1.2967$ $R^2 = 0.6306$　$P = 0.000$
颗粒有机碳 POC (g/kg Soil)			$y = 0.1431x + 1.9267$ $R^2 = 0.8195$　$P = 0.000$

速率常数随年均温增加而增加($P=0.06$)(图 6)。

4　讨论

4.1　土壤活性有机碳含量及分配比例

本研究中,各植被类型土壤易氧化有机碳含量范围 2.01—46.18g/kg,其中山地常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林土壤易氧化有机碳含量范围(2.01—9.87 g/kg)与其它相关研究结果较为接近(六盘山林区 0.46—4.24g/kg[13],中亚热带地区灌木林(9.5g/kg)和阔叶林(8.26g/kg)[19]),而落叶阔叶林、针阔混交

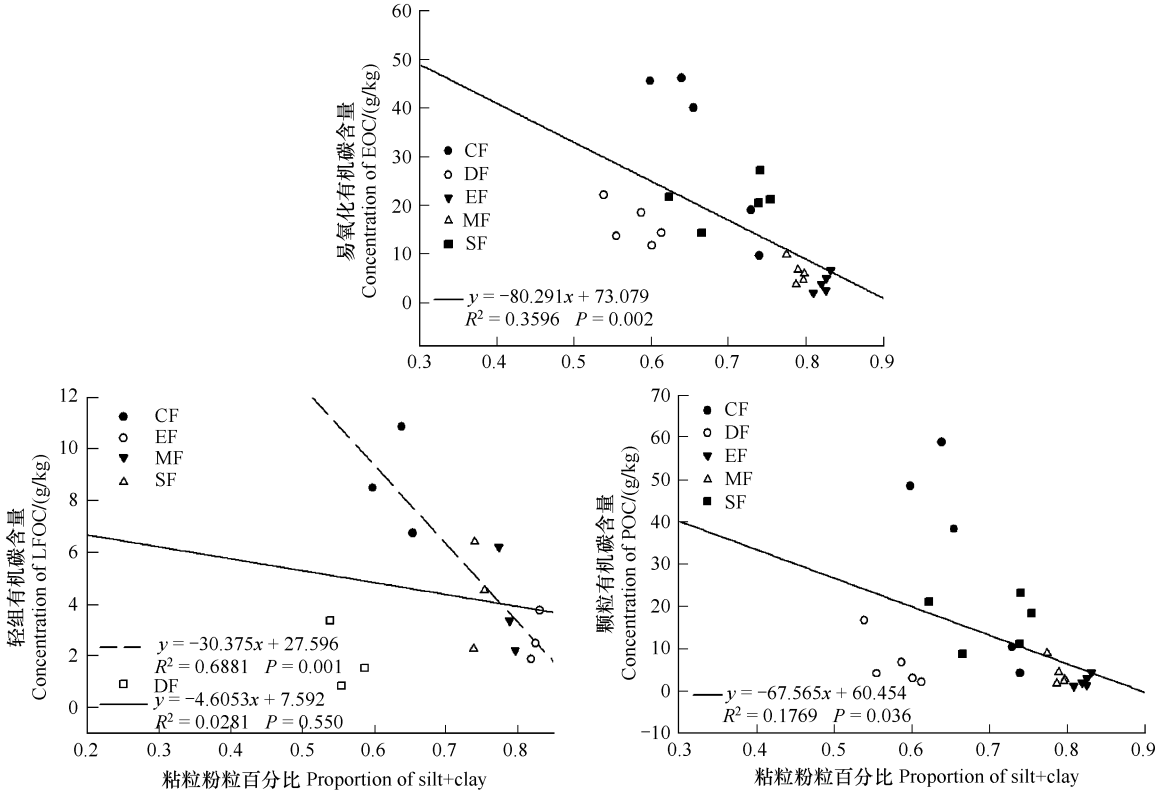

图3 土壤易氧化、颗粒、轻组有机碳与粘粒+粉粒百分含量的相关关系

Fig.3 Correlation between EOC, POC, LFOC and proportion of silt+clay(%)

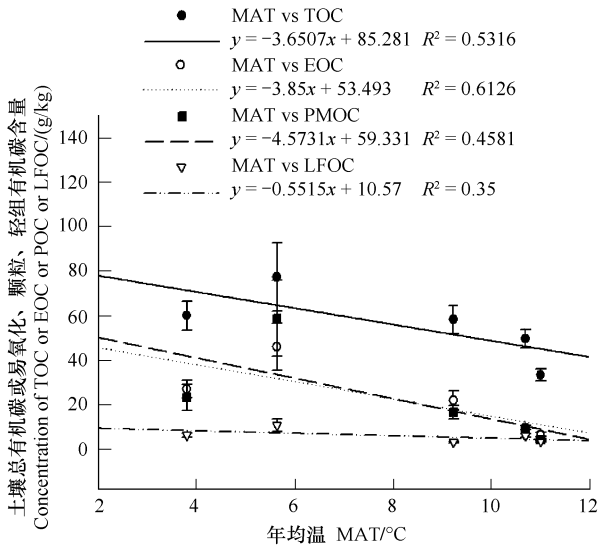

图4 土壤0—15cm总有机碳、易氧化、颗粒和轻组有机碳含量与年均温相关关系

Fig.4 Correlation between EOC, POC, LFOC of 0—15cm and MAT

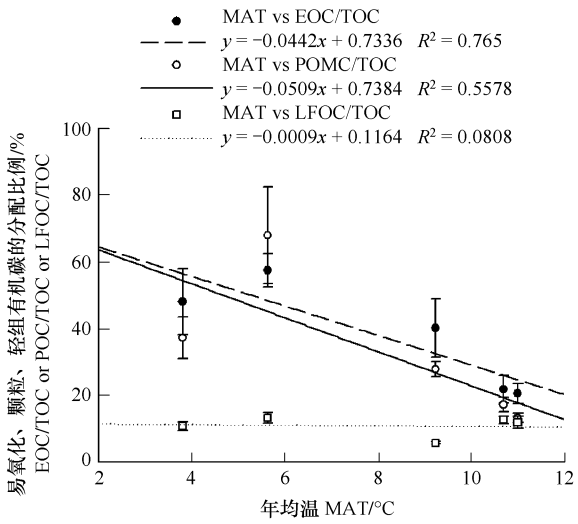

图5 土壤0—15cm易氧化、颗粒、轻组有机碳分配比例与年均温关系

Fig.5 Correlation between proportion of EOC, POC, LFOC of 0—15cm and MAT

林、暗针叶林3种植被类型土壤易氧化有机碳含量(9.69—46.18g/kg)则高于相关研究结果。易氧化有机碳占总有机碳的比例,山地常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林(18.01%—27.87%)高于吴建国等[13]对六盘山

林区的研究结果(8.7%—10.3%),低于中亚热带地区灌木林和阔叶林 0—20cm 土层土壤活性有机碳含量占总有机碳的比例(53.41% 和 53.26%[19])。落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林 3 种植被类型易氧化有机碳占总有机碳的比例(38.6%—69.05%)与中亚热带地区研究结果接近。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,六盘山林区几千年人类活动的影响[13]可能是造成其活性有机碳比例明显低于本文研究结果的原因之一。

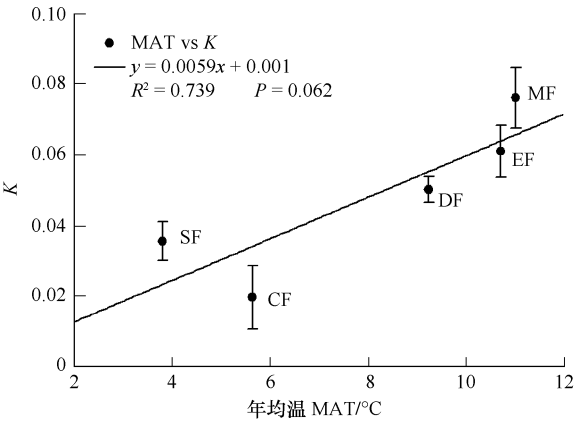

图 6　土壤 0—15cm 非保护性有机碳向保护性有机碳转化速率常数与年均温关系

Fig. 6　Correlation between rate constant for C transfer from the unprotected to the protected soil pool (*K*) of 0—15cm and MAT

轻组有机碳含量 0.84—10.85g/kg,与以往研究结果接近(暖温带次生林 0.86—15.21 g/kg,落叶松人工林 0.54—14.17 g/kg[14],亚热带格氏栲天然林 <9 g/kg[16])。轻组有机碳占总有机碳的比例 4.03%—13.37%,低于暖温带次生林(19%—23.1%)和落叶松人工林(29.3%—32.8%)[14],也低于亚热带格氏栲天然林(<30%)[16]。这可能与气候、立地条件、林分类型不同等有关[16]。本研究 0—50cm 颗粒有机碳含量和分配比例均显著高于轻组有机碳含量和分配比例,与杨玉盛等[16]研究结果相同,但由于本文所用重液密度达 1.8 g/cm^3,所以其原因可能并非单独是由于重液密度低造成[16],也可能是由于颗粒和轻组有机质本身起源差异造成。

山地常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林土壤颗粒有机碳含量(1.11—8.96 g/kg)与暖温带次生林(0.76—8.8 g/kg)、落叶松人工林(0.89—10.64 g/kg)[14]和亚热带格氏栲天然林(12 g/kg)[16]相接近,而占总有机碳的比例(8.6%—17.3%)则略低于暖温带次生林(22.4%—27.3%)、落叶松人工林(30.5%—31.8%)[14]和亚热带格氏栲天然林(40%)[16],与 Marquez 等 (18%—24%)[31]、Degryze (17%—38%)[32]、Garten (9%—27%)[30]以及 conant 等(13%—31%)[22]的研究结果均较接近。而落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林土壤颗粒有机碳含量(2.15—58.89 g/kg)和占总有机碳的比例(12.5%—68.01%)均较高。

森林土壤轻组和颗粒有机碳在土壤剖面分布的差异主要与不同土层植被根系分布、生物活动、人为扰动等有关[16]。各植被类型土壤轻组和颗粒有机碳含量和分配比例均明显随土层深度的增加而降低,与前人的研究结果一致[14,16,33-34],这主要是因为一方面土壤活性有机碳在很大程度上取决于土壤总有机碳含量(表 2),而下层土壤受生物影响小,土壤总有机碳随土层的加深而减少;另一方面,森林的枯枝落叶层不但为土壤层提供大量有机碳,而且使表层土壤具有较高的养分浓度和较好的水分条件,从而为植物细根向表土层聚集提供了良好的条件[35],而凋落物和根系分泌物经微生物的分解,成为土壤活性有机碳的重要来源[36]。

图 1 表明,土壤易氧化有机碳含量随土层深度增加而降低,原因可能与颗粒有机碳、轻组有机碳含量随土层深度增加而降低的原因类似,图 2 表明,土壤易氧化有机碳分配比例随土壤深度增加保持稳定,不同于土壤颗粒和轻组有机碳分配比例表现出随土层增加而降低的趋势,这可能存在两方面的原因:一是由于易氧化有机碳与颗粒有机碳和轻组有机碳本身起源的差异造成,土壤非保护性有机 C 主要是由新近凋落的、部分分解的、与土壤矿质结合不紧的植物残体组成[34];二是可能由于易氧化有机碳测定方法造成的,因为一方面化学氧化法也会攻击一些不能被微生物利用的矿质组分颗粒有机质表面,同时,由于化学氧化主要是靠攻击颗粒表面,因而一些大颗粒有机质内部的活性成分不能被氧化[37]。

Zou 等[38]的研究表明,景观异质性可以显著地改变地下生物群落的结构,进而改变凋落物分解和土壤碳循环等生态过程。本研究表明,不同森林类型土壤活性有机碳含量随海拔升高而呈现增加趋势,可能是由于不同的植被类型的凋落物和根系分泌物、化学组成(C /N)及根系分布都会影响到土壤活性有机碳含量[34,36]。

另外,林分不同导致的凋落物种类不同,会进一步影响微生物群体的数量,从而影响微生物量和碳利用效率[39],并导致沿海拔梯度活性有机碳的变化,这与徐侠等的研究结果一致[34,36]。

4.2 土壤活性有机碳之间的关系及其气候响应

土壤易氧化、颗粒、轻组有机碳含量均很大程度上决定于土壤总有机碳的含量($P<0.05$),这与前人的研究结果一致[16,40-43]。土壤活性有机碳和土壤全氮之间呈极显著相关,与徐侠等研究结果一致[34,36],这可能是因为土壤有机质中氮的含量会影响到微生物对其分解和利用速度[34,36],含氮量高的有机质易被微生物分解,迁移、转化速度快,从而对土壤有效碳的含量产生一定影响。土壤各活性有机碳含量与土壤碳氮比呈显著指数相关支持了颗粒和轻组组分碳氮比高于矿质和重组组分碳氮比的结论[28],另外,土壤易氧化、颗粒、轻组有机碳尽管是由不同测定方法获得,但两两之间显著的线性相关关系(表2)表明它们在一定程度上同时表征了土壤有机碳中活性较高的部分[16, 19, 23,44]。土壤活性有机碳与土壤粘粒+粉粒百分比呈显著线性负相关表明活性有机碳多分布在土壤大团聚体中,支持了杨玉盛[16]和 Six 等[34]的研究结果。

利用海拔梯度研究森林土壤碳库动态对环境变量的响应既有优点又有其缺点,优点在于森林土壤碳库是生物和非生物因子长期共同作用的结果,沿海拔梯度森林生态系统相对于短期控制实验系统来说已经适应了这种气候条件,它反映了多因子长期综合影响的结果,但这同时也是沿海拔梯度的缺点,即难以区分是哪个因子作用的结果,因为随海拔梯度变化,气候因子(温度、湿度),植被类型,土壤理化特征及养分状况都将随之改变[12]。尽管如此,通过建立气候因子与研究目标之间的某种关系总能为了解系统的功能与动态提供参考。

本研究表明,土壤0—15cm 活性有机碳含量与年均温之间呈线性负相关(图4),表明温度是土壤有机质分解的重要影响因素,温度越高,微生物分解活动越剧烈,因而积累的活性有机碳含量越低,温度解释了植被类型间活性有机碳含量差异的35%—61%,徐侠等[36]也得出了相似的结论。另外,高的土壤氮含量为微生物提供了足够的养分因而促进分解,这意味着土壤碳氮比越高分解则越缓慢,因而将促进有机碳的积累,本文得出土壤碳氮比与年均温呈显著线性负相关($R^2=0.78$,$P<0.05$),这表明,较低温度有利于土壤有机质积累的同时,高的碳氮比也抑制了有机质分解,从而进一步促进了有机质的积累。另外,土壤0—15cm 易氧化有机碳、颗粒有机碳占总有机碳的分配比例与年均温呈负相关关系(图5),意味着未来气候变暖情景下,高海拔地区的土壤碳库的丢失将主要是由于活性碳库的快速丢失造成的,这恰好与土壤非保护性有机碳向保护性有机碳的转化速率常数随年均温增加而增加(图6)的结论相一致,因为非保护性有机碳向保护性有机碳转化的同时也正是活性有机碳损失的过程,这也与 Garten[12]的研究结果相一致。

5 结论

土壤易氧化、颗粒和轻组有机碳含量均随土壤深度增加而降低,不同植被类型间,海拔较高地区植被类型具有较高的土壤活性有机碳含量和分配比例,土壤活性有机碳趋向分布于土壤大团聚体当中,各土壤活性有机碳含量之间显著相关,但非保护性有机碳与易氧化有机碳在表征土壤活性有机碳库时存在差异,原因有待进一步研究。温度是土壤活性有机碳积累的重要控制因素,也是非保护性有机碳向保护性有机碳转化的重要控制因素。

致谢:感谢中国科学院孙鹏森副研究员对本文写作给予的帮助。

References:

[1] Birdsey R A, Platinga A J, Heath LS. Past and prospective carbon storage in United States forests. Forest Ecology and Management, 1993, 58(1-2): 33-40.

[2] Sundquist E T. The global carbon dioxide budget. Science, 1993, 259(5097): 935-941.

[3] Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and Ecological Effects of the Active Organic Carbon in Soil. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(3):32-38.

[4] Janzen, H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 1799-1806.

[5] Biederbeck B O, Zentner R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. Soil Biology & Biochemistry, 1994, 26 (12): 1647-1656.

[6] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in northwestern New South Wales. Australian Journal of Agricultural Research, 1998, 36(4): 669-681.

[7] 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. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.

[8] Wander M M, Traina S J, Stinner B R. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1130-1139.

[9] Coleman D C, Rcid C P P, Cole C. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. Advances in Ecological Research, 1983, 13: 1-55.

[10] Khanna P K, Ludwig B, Bauhus J, O' Hara C. Assessment and significance of labile organic C pools in forest soils//Lal R, Kimble J M, Follett R F, Stewart B A. Assessment methods for soil carbon. Boca Raton, Florida : Lewis Publishers, 2001: 167-182.

[11] Blair, G J, Lefroy R, Whitbread A, Blair N & Conteh A. The Development of the $KMnO_4$ oxidation technique to determine labile carbon in soil and its use in a carbon management index//Lal R, Kimble J M, Follett R F & Stewart B A eds. Assessment methods for soil carbon. Boca Raton, Florida, Lewis Publishers, 2001: 323-337.

[12] Garten jr C T, Post W M, Hanson P J & Cooper L W. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern appallation mountains. Biogeochemistry, 1999, 45(2): 115-145.

[13] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain forest zone. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28 (5): 657-664.

[14] Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, Xu D Y. The effects of land changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(4): 19-29.

[15] Guggenberger G, Zech W, Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Regio'n Huetar Norte, Costa Rica. Forest Ecology and Management, 1999, 124(1): 93-104.

[16] Yang Y S, Liu Y L, Chen G S, Li L, Xie J S, Lin P. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 1-8.

[17] Lehmann J, Cravo M S, Zech W, Organic matter stabilization in a Xanthic Ferralsol of the central Amazon as affected by single trees: chemical characterization of density, aggregate, and particle size fractions. Geoderma, 2001, 99(1-2): 147-168.

[18] Six J, Callewaert P, Lenders S. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.

[19] 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.

[20] Cambardella C A, Elliot E T, Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation chronosequence. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 777-783.

[21] Cambardella C A, Elliot E T, Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 123-130.

[22] Conant R T, Six J, Paustian K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing. Biology and Fertility of Soil, 2003, 38(6): 386-392.

[23] Jiang P K. Soil Active Carbon Pool under Different Types of Vegetation. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(1): 10-13.

[24] Xiang C H, Mu K H. Investigation on the resources of rare and endangered plants in Kuanba forest region. Biodiversity Science, 1997, 5(3): 202-205.

[25] Xu Z H, Cao Z H, Shen H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soil. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(2): 166-173.

[26] Conteh A, Lefroy R D B, Blair G J. Dynamics of organic matter in soils as determined by variations in $^{13}C/^{12}C$ isotopic ratios and fractionation by ease of oxidation. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35(4): 881-890.

[27] Conteh A, Blair G J, Macleod D A & Lefroy R D B. Soil organic carbon change in cracking clay soil under cotton production as studied by carbon fractionation. Australian Journal of Agricultural Research, 1997, 48(7): 1049-1058.

[28] Christensen B T. Physical fraction of soil and organic matter in primary particle size and density separates. Advances in Soil Science, 1992, 20: 1-90.

[29] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond, G P, Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 1799-1806.

[30] Garten Jr C T. Soil carbon storage beneath recently established tree plantation in Tennessee and South Carolina, USA. Biomass and Bioenergy, 2002, 23(2): 93-102.

[31] Marquez C O, Cambardella C A, Isenhart T M and and Schultz R C. Assessing soil quality in a riparian buffer by testing organic matter fractions in central Iowa, USA. Agroforestry Systems, 1999, 44(2-3): 130-140.

[32] Degryze S, Six J, Paustian K, Morris S J, Paul E A, Merckx R. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. Global Change Biology, 2004, 10(7):1120-1132.

[33] Six J, Conant R T, Paul E A & Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.

[34] Xu X, Chen Y Q, Wang J S, Fang Y H, Quan W, Ruan H H, Xu Z K. Variations of soil labile organic carbon a long an altitude gradient in Wuyi Mountain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (3) : 539-544.

[35] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forest. Journal of Ecology, 1996, 84 (2): 167-176

[36] Xu X, Wang F, Luan Y L, Wang J S, Fang Y H, Ruan H H. Soil readily oxidizable carbon along an elevation gradient of Wuyi Mountains in southeastern China. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27 (7) : 1115-1121.

[37] Vieira F C, Bayer B C, Zanatta J A, Dieckow J, Mielniczuk J, He Z L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. Soil & Tillage Research, 2007, 96(6):195-204.

[38] Zou X M, Ruan H H, Fu Y. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation incubation procedure. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(10): 1923-1928.

[39] Bauhus J, Pare D C, 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.

[40] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. Soil Science Society of America Journal, 2001, 64 (1): 184-189.

[41] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? Geoderma, 2005, 124(4): 143-155.

[42] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. Environmental Pollution, 2002, 116(1): S53-S62.

[43] Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, Huang Y. Active soil organic matter and its relationship with soil quality. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(3): 513-519.

[44] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. Soil biology & Biochemistry, 2001, 32(2): 211-219.

参考文献:

[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.

[13] 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.

[14] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 徐德应. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响. 林业科学, 2002.38(4): 19-29.

[15] 杨玉盛,刘艳丽,陈光水,李灵,谢锦升,林鹏. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配. 生态学报, 2004, 24(1): 1-8.

[16] 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.

[23] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究. 林业科学, 2005, 41(1): 10-13.

[24] 向成华, 牟克华. 宽坝林区珍稀濒危植物资源的初步研究. 生物多样性, 1997, 5 (3): 202-205.

[25] 徐志红,曹志洪,沈宏. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. 土壤学报, 2000, 37(2): 166-173.

[34] 徐侠,陈月琴,汪家社,方燕鸿,权伟,阮宏华,徐自坤. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化. 应用生态学报,2008,19(3):539-544.

[36] 徐侠,王丰,栾以玲,汪家社,方燕鸿,阮宏华. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志, 2008, 27 (7) : 1115-1121.

[43] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,黄宇. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报,2005,25(3): 513-519.