

浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响*

戴 慧 王希华 阎恩荣**

(华东师范大学环境科学系, 上海 200062)

摘 要 以浙江天童地区的栲树群落为参照, 选择了木荷林、灌丛、马尾松林、杉木林、金钱松林、竹林、茶园和裸地等土地利用类型, 测定了土壤有机碳含量, 以及在 25 °C 和 60% 饱和含水量条件下培养 33 d 的有机碳矿化速率。结果表明: 土壤有机碳含量与矿化速率均以常绿阔叶林最高, 针叶林、竹林和茶园次之, 裸地最低; 相反, 土壤有机碳矿化释放的 CO₂-C 比例以栲树林最低。可见, 常绿阔叶林土壤的固碳能力高于其它类型, 常绿阔叶林被改为其它类型后, 土壤有机碳含量和矿化速率显著下降。

关键词 土地利用类型; 土壤有机碳; 矿化; 林地

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2007)07-1021-06

Effects of land use type on soil organic carbon mineralization in Tiantong, Zhejiang Province. DAI Hui, WANG Xi-hua, YAN En-rong (*Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(7): 1021 - 1026.

Abstract: Taking *Castanopsis fargesii* forest as reference, different land use types including *Schima superba* forest, shrubs, *Pinus massoniana* forest, plantations of *Cunninghamia lanceolata*, *Pseudolarix kaempferi* and *Phyllostachys pubescens*, *Phyllostachys pubescens* forest, tea garden, and bare land in Tiantong, Zhejiang Province were selected to investigate their soil organic carbon (SOC) contents, and the SOC mineralization rate after incubated at 25 °C and 60% field water capacity over 33 days. The results showed that evergreen broad-leaved forest (*Castanopsis fargesii*) had the highest SOC content and mineralization rate, followed by coniferous forest, tea garden and bamboo forest, and bare land, while the CO₂-C released from the mineralization of SOC was the lowest in *C. fargesii* forest, suggesting that evergreen broad-leaved forest had the highest carbon-fixing ability, and the SOC content and mineralization rate would have a significant decrease when the land use type shifted from evergreen broad-leaved forest to others.

Key words: land use type; soil organic carbon; mineralization; forestland.

1 引 言

土壤是陆地生态系统的重要组成部分, 它与大气和陆生生物群落共同组成系统中碳与其它营养元素的主要贮存库和交换库, 由于土壤有机碳贮存量巨大, 其较小幅度的变化就可影响到碳向大气的排放量, 进而影响全球气候变化, 使得土壤有机碳动态的研究成为了热点。在全球范围内, 由人类干扰而导致的土地利用变化是影响土壤有机碳动态的关键因素之一, 是仅次于化石燃烧而使大气 CO₂ 浓度急

剧增加的最主要人为活动。研究表明, 土地利用变化对土壤有机碳矿化的影响与土壤有机质的稳定性有关, 即土壤有机质含量和土壤微生物活性碳含量与土壤有机碳矿化速率呈正相关, 且土壤碳矿化速率随有机质稳定性的增加而减少 (Hassink, 1995)。另外, 土壤有机碳矿化与土壤团聚体有关, Hernández-Hernández 和 López-Hernández (2002) 发现, 热带草原在传统耕作方式下的土壤大团聚体中土壤碳矿化速率高, 而且传统耕作方式下土壤碳矿化速率比没有耕作的土壤高, 没有耕作的土壤大团聚体碳矿化速率高于微团聚体。在国外, 还有大量与此相关的研究报道, 如土地利用对森林有机碳动态的影响 (Chen *et al.*, 2006), 耕作对土壤碳矿化的影响

* 国家自然科学基金重点资助项目 (30130060)。

** 通讯作者 E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2006-11-09 接受日期: 2007-03-05

(Ortega et al., 2005; Raiesi, 2006), 土壤团聚体对土壤碳矿化的影响 (Mutuo et al., 2006), 温度、湿度对土壤碳矿化的影响 (Rey & Jarvis, 2006) 等。国内研究主要集中在土壤有机碳贮存量方面 (吴建国等, 2004a), 但土壤有机碳矿化方面的研究还不多见。

在土壤有机碳组分中, 易变成 CO_2 的部分被认为是土壤微生物的有效碳或易被生物活化的部分, 也是土壤微生物有效能源和有机碳组分中不稳定的部分。土壤有机碳分解释放 CO_2 的过程被称为碳矿化, 其矿化速率控制着土壤养分的通量。测定土壤有机碳矿化的主要方法是室内土壤需氧培养法 (吴建国等, 2004b)。由于土壤碳矿化与土壤碳分解过程密切相关, 将不同土地利用方式下的土壤在相同条件下培养, 根据有机碳矿化释放 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的数量可以了解土地利用方式的改变对土壤有机碳动态的影响。

浙江天童地区保存了中国东部地区典型的亚热带常绿阔叶林, 但由于土地利用变化, 该地区现存常绿阔叶林数量不多, 取而代之的是大面积的次生林以及灌丛、人工林等 (王希华等, 2005)。但是, 在该地区, 土地利用变化对土壤有机碳矿化有怎样的影响? 对常绿阔叶林土壤有机碳库的影响如何? 常绿阔叶林顶级群落在维持土壤碳库方面有怎样的地位? 对这些问题目前仍然缺乏研究。基于此, 本文对天童地区不同土地利用方式影响下土壤的有机碳矿化特征进行研究, 旨在为该地区的土壤碳循环研究提供参考。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区概况

本研究在浙江天童国家森林公园进行, 其自然环境条件已有报道 (宋永昌和王祥荣, 1995)。在长期的人类干扰下, 本地区的天然常绿阔叶林已所剩不多, 仅在公园内有所分布, 在其外围, 则被大面积的次生林、人工林、茶园、退化灌丛和灌草丛所代替, 这些植被类型的分布, 为开展土地利用变化的相关研究提供了良好的素材。

根据本地区常绿阔叶林及其它的不同土地利用现状, 在样地选择时, 以成熟常绿阔叶林栲树 (*Castanopsis fargesii*) 群落为参照, 另外选择了受人类干扰而处于演替中前期的木荷 (*Schima superba*) 群落、马尾松 (*Pinus massoniana*) 群落和石栎 (*Lithocarpus glaber*) + 櫟木 (*Loropetalum chinenser*) 灌丛 3 种次生林类型, 与公园外围的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林、毛竹 (*Phyllostachys pubescens*) 林、金钱松 (*Pseudolarix kaempferi*) 林 3 个人工林类型, 以及受人类强度干扰而开发的茶园和裸地 2 个类型, 以代表不同的土地利用形式。每种土地利用形式各设置样地 3 个作为重复 (面积 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$), 重复样地间距离 20 m 以上, 共有样地 27 个。样地选择时, 为了避免环境因素造成的影响, 所选样地环境条件大体相似, 即基本位于同一坡向, 同一海拔范围, 土壤母质、土壤类型基本相同。各土地利用类型的详细特征见表 1。

表 1 浙江天童地区不同土地利用类型及其样地特征

Tab. 1 Land use types and characteristics of selected plots in Tiantong, Zhejiang Province

土地利用类型	植被概况	年龄 (a)	海拔 (m)	坡度 (°)	坡向 (°)	植被盖度 (%)	主要优势种类	林地干扰和管理历史
栲树林	成熟常绿阔叶林	150	196	26	南偏东 45	90	栲树木荷	受保护, 林隙干扰存在
木荷林	次生常绿阔叶林	90	163	20	南偏东 50	95	木荷石栎	废弃前有皆伐历史, 废弃后自然更新, 偶有择伐干扰
马尾松林	针叶林	40	121	15	南偏东 45	85	马尾松木荷	废弃前有皆伐历史, 废弃后自然更新, 偶有择伐干扰
灌丛	石栎 + 櫟木灌丛	15	125	25	南偏东 40	95	石栎木荷	15 年前有皆伐历史, 废弃后自然更新, 同时伴有不间断砍伐干扰
杉木林	人工针叶林	25	114	15	南偏东 40	90	杉木	原为常绿阔叶林, 后改为茶园, 25 年前又改种杉木, 定期清理下木
毛竹林	人工林	25	125	15	南偏东 10	90	毛竹	原为常绿阔叶林, 在周边毛竹自然侵入后人工开始管理, 有施肥
金钱松林	人工针叶林	27	254	25	南偏东 30	90	金钱松	原为常绿阔叶林, 27 年前改种金钱松, 管理强度较大, 定期清理下木
茶园	人工种植	10	255	15	南偏东 40	75	茶 <i>Camellia sinensis</i>	原为次生灌丛, 10 年前经炼山处理后种植茶叶, 管理强度大, 有施肥
裸地	废弃地	1	194	15	南偏东 45	30	芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	原为茶园, 后被改为果园, 1 年前清理果树后废弃荒芜, 有施肥历史

2.2 野外取样

按照5点法,于2006年6月在选定的27个样地内取样,共获得样品135个。采样时,先除去地面凋落物,然后将内径7.5 cm,长20 cm的PVC管砸入土壤,获取0~20 cm的土壤样品,在现场编号后装入塑料保鲜袋,在运回天童生态实验站后,一部分样品在室内风干,按常规方法研磨粉碎、过筛,然后测定土壤有机碳;另一部分新鲜样品在采集后,在最短时间(24~48 h),用冷藏器皿运回华东师范大学实验室,立即进行有机碳矿化培养实验。

2.3 样品分析及培养实验

土壤有机碳测定采用传统的外加热法(中国科学院南京土壤研究所,1978)。土壤有机碳矿化用实验室土壤培养法测定(Nunez *et al.*, 2001),将供试土样置于250 ml的具橡皮塞的广口瓶中,内置装有10 ml NaOH溶液(浓度 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)的小玻璃瓶,用以吸收有机碳分解释放出的 CO_2 ,通过HCl滴定法测定NaOH溶液浓度的变化,计算 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的释放量。在培养实验中,供试土壤用量为20 g新鲜土,土壤湿度用蒸馏水调至其最大持水量的60%,在25℃的恒温下培养33 d,每隔3 d取出NaOH溶液,用浓度为 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的HCl滴定,测出 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的释放量($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.4 数据处理

利用单因子方差分析(ANOVA)判断不同土地利用类型对土壤有机碳矿化的影响,采用Tukey检验进行不同土地类型下土壤有机碳矿化速率、土壤有机碳库含量和矿化碳占总有机碳百分比的配对比较检验,以上分析利用SPSS 13.0处理。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型的土壤有机碳库

由表2可见,在不同的土地利用类型中,土壤有机碳含量大小依次为:栲树林>木荷林>灌丛>茶园>金钱松林>毛竹林>杉木林>马尾松林>裸地。ANOVA分析显示,由人类活动造成土地利用类型的变化导致了土壤碳库含量的显著下降($df=8, F=100.55, P<0.001$)。成对比较检验结果显示,栲树林的土壤碳库含量显著高于其它所有土地利用类型,表明常绿阔叶林顶级群落土壤具有最高的土壤碳库含量,而将常绿阔叶改造为其它土地利用类型后,大大削减了土壤碳库大小,这种现象也可从处于常绿阔叶林演替中后期的木荷林,以及演替中前期

的灌丛的土壤碳库含量得到体现(表2),即:木荷林的土壤碳库含量显著高于其它土地利用类型(除栲树林),灌丛的土壤碳库含量除低于前两者外,也显著高于其它土地利用类型。究其原因,以上3种森林类型的共同特点是它们分别处于常绿阔叶林次生演替的不同阶段,均以常绿阔叶植物为优势种,其它土地利用类型的植物群落要么是以针叶树种,要么是以竹类为优势种(表1),而这些植物凋落物的分解速率通常低于常绿阔叶植物(王希华等,2004)。另外一个显著特征是,茶园的土壤碳库含量虽然与针叶林(马尾松林、杉木林和金钱松林),以及竹林相差不大,但是成对比较检验表明,其与灌丛间也没有显著差异,这可能与茶园具有特殊的人工管理措施有关,比如每年的施肥等。由此可见,在本研究地区,土壤碳库含量大小与地上植被的性质,例如植物的生活型具有密切联系,这些特征往往与凋落物性质有关,并最终对土壤的碳库输入产生影响。

裸地的土壤有机碳含量远远低于其它土地利用类型(表2),其土壤有机碳含量分别比栲树林、木荷林、马尾松林和灌丛低68%、54%、19%和43%,这在一定程度上表明,这种最强烈的人类干扰方式极大的破坏了土壤碳库,使土壤固持有机碳库的能力大大降低。

3.2 不同土地利用类型土壤有机碳矿化过程中 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的释放量

土壤有机碳矿化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 量是指在一定时间内,土壤有机碳矿化为无机碳后所释放的 CO_2 数量(以释放 $\text{g CO}_2\text{-C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土计),它是土壤有机碳矿化速率的表征之一。由于土地利用方式的改变,造成土壤理化性质,尤其是土壤有机碳含量的改

表2 不同土地利用方式的土壤有机碳含量

Tab.2 Concentration of soil organic carbon among different land use types

土地利用类型	有机碳 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	标准差	变异系数 (%)
栲树林	129.16 ^a	6.87	5.32
木荷林	89.54 ^b	5.71	6.38
马尾松林	50.43 ^{cc}	2.97	5.89
灌丛	71.74 ^d	5.66	7.89
金钱松林	58.23 ^c	8.21	14.10
毛竹林	55.73 ^c	4.27	7.66
杉木林	53.36 ^{cc}	3.73	6.99
茶园	59.11 ^{dc}	3.11	5.26
裸地	40.51 ^e	2.23	5.50

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

变,加之其它生物要素和非生物要素,以及人类干扰方式的差异,从而对土壤有机碳的矿化过程和矿化速率产生不同影响。

从表3可见,不同土地利用方式下,土壤培养33 d后,矿化累计释放的CO₂-C含量大小依次为:栲树林>木荷林>灌丛>茶园>毛竹林>马尾松林>金钱松林>杉木林>裸地。这种变化趋势与土壤有机碳含量的变化趋势大体相似(表2),ANOVA显示,土地利用方式的变化导致了土壤有机碳矿化释放的CO₂-C含量的显著下降($df=8, F=30.46, P<0.05$),即随着常绿阔叶林被改造为其它土地利用类型后,土壤有机碳的矿化速率也显著降低。

成对比较检验结果显示,在不同的土地利用类型中,土壤所释放的CO₂-C含量(有机碳矿化速率)大体可以分为3个等级,释放量最高的等级包括栲树林、木荷林和灌丛,其次为针叶林(马尾松林、杉木林和金钱松林)、竹林和茶园,最低的等级为裸地(表3)。第一等级的3个土地利用类型土壤所释放的CO₂-C含量(有机碳矿化速率)显著高于其它土地利用类型($P<0.05$),在相同等级内,栲树林和木荷林间,木荷林与灌丛间无显著差异。如上所述,这3种森林类型均属处于不同次生演替阶段的常绿阔叶林,其土壤有机碳的矿化速率也基本相同。

不同针叶林间,以及竹林和茶园间土壤有机碳的矿化速率没有显著差异,表明这些土地利用类型对土壤有机碳矿化过程的影响大体相似,主要表现在以下2方面:1)植被均以针叶植物为主,即使竹林和茶园不以针叶植物为优势种,但这2类植物的凋落物也具有难分解的特征,因此,凋落物分解缓慢,凋落物基质差是影响土壤有机碳的矿化的直接因素;2)这些森林大多为人工林或人工管理强度极大的类型,在种植人工林前,均具有较强的干扰活动,比如皆伐森林、炼山开垦等,在种植后,也存在较大强度的管理措施,如定期抚育过程中对下木层植物的清理、对凋落物的收获和割草等,这些活动不但削弱了土壤有机碳库的输入来源,也对土壤的物理结构,以及土壤动物、土壤微生物群落造成破坏,从而影响到土壤有机碳的矿化过程。

与土壤有机碳库含量类似,由于人类干扰极大,不仅使碳源输入极大减少,也对土壤结构和土壤生物群落造成严重破坏,从而使裸地土壤有机碳矿化释放的CO₂-C含量比栲树林、木荷林、马尾松林和灌丛分别低61%、58%、36%和53%,比人工林平均低37%。

表3 不同土地利用类型土壤有机碳矿化33 d累积释放的CO₂-C含量

Tab.3 Concentration of cumulative CO₂-C released (33 days) by soil organic carbon mineralization among different land use types

土地利用类型	CO ₂ -C (g C · kg ⁻¹)	标准差	变异系数 (%)
栲树林	1.98 ^a	0.53	26.77
木荷林	1.87 ^{ac}	0.41	21.93
马尾松林	1.21 ^b	0.47	38.84
灌丛	1.66 ^c	0.33	19.88
毛竹林	1.32 ^b	0.43	32.58
杉木林	1.13 ^b	0.35	30.97
茶园	1.34 ^b	0.33	21.43
裸地	0.77 ^d	0.27	35.06

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.3 不同土地利用类型土壤有机碳矿化释放的CO₂-C分配比例

土壤有机碳矿化释放的CO₂-C分配比例是指,在一定时间内,土壤有机碳矿化释放的CO₂-C含量占土壤有机碳含量的比例,也是土壤有机碳矿化速率的表征之一。土壤有机碳矿化释放的CO₂-C分配比例从某种程度上反映了土壤的固碳能力,如果该比例越低,表明土壤的固碳能力越强,反之,则固碳能力越弱。

从图1可见,在不同土地利用方式下,土壤有机碳矿化释放CO₂-C分配比例大小依次为:灌丛>茶园>马尾松林>毛竹林>木荷林>杉木林>裸地>金钱松林>栲树林,这种变化完全不同于土壤有机碳库和土壤有机碳矿化速率的变化趋势。虽然ANOVA分析表明,土地利用类型也对土壤有机碳矿化释放的CO₂-C分配比例产生了显著影响($df=8, F=60.11, P<0.001$),然而没有表现出明显的变化规律,例如植被类型上的差异或干扰梯度等。

但从成对比较检验结果的总体来看,在不同的土地利用类型中,土壤有机碳矿化释放的CO₂-C分配比例大体也可以分为3个等级,即:释放量最高的等级包括马尾松林、灌丛、毛竹林和茶园;其次为木荷林、杉木林和金钱松林和裸地;最低的为栲树林。栲树林土壤有机碳矿化释放CO₂-C分配比例比木荷林、马尾松林、灌丛、裸地分别低37%、46%、48%和33%,比人工林平均低40%,这表明,栲树林土壤的固碳能力显著高于其它类型,随着土地利用方式的改变,成熟常绿阔叶林被改变为其它土地利用类型后,其土壤固碳能力大大削弱。从土壤有机碳矿

化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 分配比例最高的几个土地利用类型来看,马尾松林、灌丛、毛竹林和茶园土壤的固碳能力较弱,这几种土地利用类型虽在植被性质上没有共同特征,但均有受强烈人类干扰的特征,例如对灌丛不间断的砍伐,对马尾松林长期的林下清理,毛竹林每年的挖笋和茶园的采茶活动等。对于处于土壤有机碳矿化释放 $\text{CO}_2\text{-C}$ 分配比例中间层次的这几种土地利用类型来讲,则难以判断其共同特征,既没有植被类型上的共性,也无人类干扰方面的共同特点。可见,影响土壤有机碳矿化过程的因素是复杂的,多因素影响着土壤的固碳能力。总体来看,人类干扰而导致的土地利用类型的改变对土壤的固碳能力产生了消极影响。

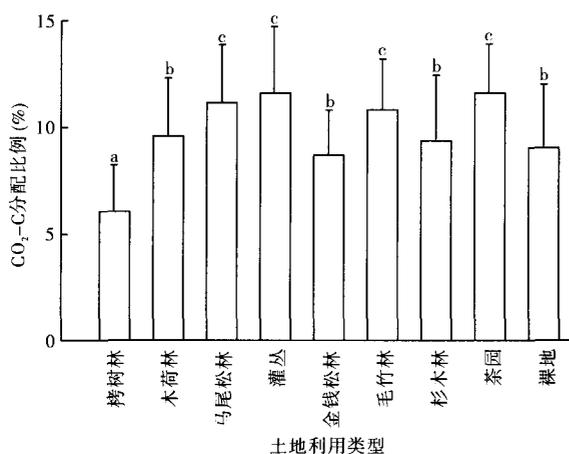


图1 不同土地利用类型土壤有机碳矿化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 占土壤总有机碳的分配比例

Fig. 1 Friction ($\text{CO}_2\text{-C}/\text{SOC}$) of cumulative $\text{CO}_2\text{-C}$ released by soil organic carbon mineralization among different land use types

同一组中标有不同字母表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

4 讨论

4.1 土地利用变化对土壤有机碳矿化的影响

从本研究来看,在常绿阔叶林被改变为其它用途的土地利用形式后,对土壤有机碳的矿化过程产生了消极影响,土壤有机碳的矿化速率显著下降。在控制温度、湿度的实验室培养条件下,土壤有机碳培养 33 d 后,矿化累计释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 含量大小依次为:栲树林 > 木荷林 > 灌丛 > 茶园 > 毛竹林 > 马尾松林 > 金钱松林 > 杉木林 > 裸地(表3)。统计检验结果表明,处于不同次生演替阶段的常绿阔叶林土壤的有机碳矿化速率显著高于人工林、茶园和裸地。这种变化趋势与类似的研究结果基本一致, Motaval-

li 等(2000)发现,热带森林砍伐变成农田 5 年后,土壤活跃性碳最先流失,土壤有机碳矿化速率显著下降。吴建国等(2004b)的研究表明,六盘山林区农田土壤碳矿化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 含量比灌木林、山杨林和辽东栎林分别低 69%、62% 和 63%,比天然次生林平均低 65%。

由此可见,在地带性森林或次生林被砍伐而改为其它土地利用形式后,土壤的有机碳矿化速率均会发生显著下降,其影响因素是复杂的。这些因素既包括生物因素的改变,如参与有机碳矿化过程的土壤动物和土壤微生物区系和种类组成的改变(Alvarez & Alvarez, 2000),土地利用用途和植被类型改变后凋落物性质的改变(苏永中等,2004),也包括非生物因素的间接影响,如土壤温湿度、土壤组分等物理和化学性质的改变等。因此,在未来的研究中,应深入探讨不同要素对土壤碳矿化速率的影响机制,以能深入了解土地利用改变对土壤有机碳矿化的影响机制。

4.2 常绿阔叶林顶极群落的土壤固碳能力

土壤有机碳矿化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 分配比例从某种程度上反映了土壤的固碳能力,本研究表明(图1),在不同土地利用方式下,土壤有机碳矿化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 分配比例依次为:灌丛 > 茶园 > 马尾松林 > 毛竹林 > 木荷林 > 杉木林 > 裸地 > 金钱松林 > 栲树林,这反映了栲树林土壤的固碳能力显著高于其它类型,随着土地利用方式的改变,成熟常绿阔叶林被改变为其它土地利用类型后,其土壤固碳能力大大削弱。

Lugo 等(1986)发现,森林砍伐开垦为农田 10 年后,土壤有机碳含量下降 46%,80 年后下降 70%。Zhou 等(2006)近期的研究发现,南亚热带成熟常绿阔叶林的土壤碳库在发生积累,并未像以前的研究所认为的那样,成熟森林的碳循环处于收支平衡状态。本研究表明在亚热带东部的成熟常绿阔叶林,土壤固持有机碳的能力也远远高于其它森林类型和土地利用类型。当随着人类干扰强度的增大,在常绿阔叶林被改为次生林、灌丛和人工林的过程中,土壤有机碳库的固持能力逐步递减,相对而言,成熟常绿阔叶林土壤的有机碳固持能力显著高于其它土地利用形式。因此,可以认为常绿阔叶林顶级群落土壤是亚热带丘陵地区最大的碳库之一,对维持区域碳平衡有重要贡献。

参考文献

- 宋永昌, 王祥荣. 1995. 浙江天童国家森林公园的植被和区系. 上海: 上海科学技术文献出版社: 11 - 12.
- 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 2004. 不同退化沙地土壤碳的矿化潜力. 生态学报, **24**(2): 372 - 377.
- 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 2004. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究. 植物生态学报, **28**(4): 457 - 467.
- 王希华, 闫恩荣, 严晓, 等. 2005. 中国东部常绿阔叶林退化群落分析及恢复重建研究的一些问题. 生态学报, **25**(7): 1796 - 1803.
- 吴建国, 张小全, 徐德应. 2004a. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. 应用生态学报, **15**(4): 593 - 599.
- 吴建国, 张小全, 徐德应. 2004b. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较. 植物生态学报, **28**(4): 530 - 538.
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社: 7 - 59.
- Alvarez R, Alvarez CR. 2000. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Science Society of America Journal*, **64**: 184 - 189.
- Chen H, Tian H, Liu M, et al. 2006. Effect of land-cover change on terrestrial carbon dynamics in the southern United States. *Journal of Environmental Quality*, **35**: 1533 - 1547.
- Hassink J. 1995. Density fractions of soil macro-organic matter and microbial biomass as predictors of C and N mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, **27**: 1099 - 1108.
- Hernández-Hernández RM, López-Hernández D. 2002. Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in savanna soil aggregates under conventional and no-tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, **34**: 1563 - 1570.
- Lugo AE, Sanchez AJ, Brown S. 1986. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil*, **96**: 185 - 196.
- Motavalli P, Discekici PH, Kuhn J. 2000. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fractions and CO₂ efflux in the Northern Guam aquifer. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **79**: 17 - 27.
- Mutuo PK, Shepherd KD, Albrecht A, et al. 2006. Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 1658 - 1664.
- Nunez S, Martínez-Yrizar A, Búrquez A, et al. 2001. Carbon mineralization in the southern Sonoran desert. *Acta Oecologica*, **22**: 269 - 276.
- Ortega RA, Westfall DG, Peterson GA. 2005. Climatic gradient, cropping system, and crop residue impacts on carbon and nitrogen mineralization in no-till soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **36**: 2875 - 2887.
- Raiesi F. 2006. Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **112**: 13 - 20.
- Rey A, Jarvis P. 2006. Modelling the effect of temperature on carbon mineralization rates across a network of European forest sites. *Global Change Biology*, **12**: 1894 - 1908.
- Zhou GY, Liu SG, Li Z, et al. 2006. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, **314**: 1417.

作者简介 戴慧, 男, 1981年生, 硕士研究生。主要从事植被生态学研究。E-mail: dht4948@126.com
责任编辑 刘丽娟
