

文章编号:1000-5641(2011)04-0053-08

# 浙江天童森林退化和受损 对土壤呼吸的影响

郭明<sup>1</sup>, 康蒙<sup>1</sup>, 仲强<sup>1</sup>, 王希华<sup>1,2</sup>, 达良俊<sup>1,2</sup>, 阎恩荣<sup>1,2</sup>

(1. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062;

2. 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江 宁波 315114)

**摘要:** 以常绿阔叶林顶级群落为参照, 选择了常绿阔叶林亚顶极群落、针叶林、灌丛和灌草丛代表不同退化类型; 同时, 以4种人工采伐处理代表常绿阔叶林不同受损程度, 分别研究了不同退化和受损程度影响下, 土壤的呼吸速率及影响因素。结果表明: (1) 土壤呼吸速率具有明显的季节动态; (2) 土壤呼吸速率分别在常绿阔叶林顶极群落与灌草丛最高, 其次分别为针叶林和灌丛, 常绿阔叶林亚顶极群落最低; (3) 不同受损程度常绿阔叶林土壤呼吸速率无显著差异; (4) 影响土壤呼吸速率的决定性因子为土壤 C/N 和 pH, 但在退化初期为土壤 C/N, 在退化后期为土温。可以认为, 常绿阔叶林退化过程中控制土壤呼吸速率变化的主要因素逐步由生物因素向非生物因素转变。

**关键词:** 森林退化; 土壤性质; 碳汇; 碳源; 碳循环

中图分类号: Q948 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.04.006

## Impacts of forest degradation and damage on soil respiration in the Tiantong region, Zhejiang Province

GUO Ming<sup>1</sup>, KANG Meng<sup>1</sup>, ZHONG Qiang<sup>1</sup>, WANG Xi-hua<sup>1,2</sup>,  
DA Liang-jun<sup>1,2</sup>, YAN En-rong<sup>1,2</sup>

(1. Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Tiantong National Station of Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Observation and Research Network, Ningbo Zhejiang 315114, China)

**Abstract:** This paper chose climax evergreen broadleaf forests (EBLF) as a reference, then selected sub-climax forests, secondary coniferous forests, shrubs and grassland to represent different stages of forest degradation, and 4 logging stands to denote forests damage intensity, in the Tiantong region, Zhejiang province. To understand the impacts of EBLF degradation and damage on soil respiration, soil respiration rate and associated influencing factors were measured among above forests. The results showed that: (1) there was a pronounced seasonal pattern of soil res-

收稿日期: 2010-07

基金项目: 国家自然科学基金委中日韩 A3 前瞻计划项目; 国家自然科学基金面上项目(30770365)

第一作者: 郭明, 男, 硕士研究生. E-mail: commongm@163.com.

通讯作者: 阎恩荣, 男, 副教授, 主要从事代谢生态学、植物与土壤营养生态学研究 and 教学工作.

E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn.

piration among forests; (2) soil respiration rate was the highest in climax EBLF and the grassland, intermediate in coniferous forests and shrub lands, and the lowest in sub-climax EBLF; (3) the logging did not affect soil respiration rate along the forest damage intensity; and (4) soil respiration was determined by soil C/N ratio and soil pH through forest degradation series; specifically, the main factor in the early stage was soil C/N ratio, and in the later stage of degradation was soil temperature. It was concluded that the controlling factor of soil respiration was shifted from biological-based to abiotic-based orientations, through forest degradation.

**Key words:** forest degradation; soil properties; carbon sink; carbon source; carbon cycling

## 0 引言

大气  $\text{CO}_2$  通过植物的光合作用进入陆地生态系统, 且又通过多个生态过程部分返还大气. 其中, 土壤呼吸是  $\text{CO}_2$  从陆地生态系统释放到大气的主要途径<sup>[1]</sup>. 土壤呼吸是指未经扰动的土壤产生  $\text{CO}_2$  的所有代谢作用, 主要包括根系呼吸以及土壤微生物和土壤动物的异养呼吸<sup>[2]</sup>. 全球每年由土壤释放的  $\text{CO}_2$  量为 68 Pg/年(以 C 计算), 超过全球陆地生态系统的净初级生产力(50~60 Pg/年, 以 C 计算)<sup>[3]</sup>, 约占生态系统呼吸的 60%~90%<sup>[4]</sup>. 因此土壤呼吸是生态系统碳循环的重要组成部分, 土壤呼吸释放  $\text{CO}_2$  的速率显著影响着全球碳平衡<sup>[5]</sup>.

森林土壤呼吸速率受多种因素影响, 除不同植被类型的影响外, 过度采伐、不适当的利用等人类干扰方式的差异也是主要外在驱动因素之一. 如: 北美云杉—冷杉(*Spruce-fir*)林皆伐后, 其土壤呼吸速率显著增加<sup>[6]</sup>; 随着采伐强度的增加, 土壤的呼吸速率变大<sup>[7]</sup>. 但是, 也有研究表明, 不同林分皆伐后土壤呼吸速率有降低的趋势<sup>[8]</sup>. 另外, 还有研究认为, 皆伐对年土壤呼吸速率没有显著影响, 且微生物呼吸可以弥补因皆伐而导致的根系土壤呼吸速率的降低<sup>[9]</sup>.

中国东部常绿阔叶林由于长期频繁的人类干扰, 面积大幅减少, 替而代之的是处于不同退化程度的常绿阔叶林次生类型<sup>[10]</sup>. 森林退化不仅会导致群落类型, 物种数量减少和土壤退化等一系列问题<sup>[11]</sup>, 还会降低森林的  $\text{CO}_2$  固持能力, 影响陆地碳循环. 但森林退化过程对土壤呼吸产生了怎样的影响, 其影响机制是什么, 一直以来缺乏详细研究.

在人类活动频繁的浙东丘陵, 既分布有处于不同退化程度的次生林、灌丛和旱生草地等, 还有在寺庙周围保存着较完好的地带性常绿阔叶林<sup>[12]</sup>. 本文借助空间代替时间法, 通过对该地区不同退化程度常绿阔叶林, 以及人工模拟不同受损程度常绿阔叶林土壤呼吸速率的研究, 旨在回答以下两个科学问题: (1) 常绿阔叶林退化过程对土壤呼吸速率有何影响? (2) 退化过程中调控土壤呼吸速率的主要因素有哪些?

## 1 研究方法

### 1.1 研究地概况和实验设计

研究地位于浙江省宁波市天童国家森林公园, 其自然条件参见文献<sup>[13]</sup>.

为探索常绿阔叶林退化对土壤呼吸的影响, 实验设计由以下两部分组成. 首先, 以本地区的常绿阔叶林逆行演替系列作为研究对象, 代表其不同退化程度<sup>[12]</sup>. 在开展该退化系列

土壤呼吸速率的季节动态及变化格局研究的同时,进一步通过分析其与土壤理化性质、凋落物和植物细根特征的相互关系,揭示其影响机制。其次,为验证常绿阔叶林退化对土壤呼吸的影响格局是否具有普适性,以本地区已进行的常绿阔叶林不同受损程度模拟实验样地为对象,开展不同受损程度影响下土壤呼吸速率的季节动态和分布格局的研究。

常绿阔叶林退化系列的样地情况如下:以成熟常绿阔叶林顶级群落为参照,选取常绿阔叶亚顶级群落、退化中期针叶林植物群落、灌丛和灌草丛代表4种处于不同退化程度的植被类型。其中,成熟常绿阔叶林选择栲树(*Castanopsis fargesii*)群落,亚顶级选取木荷(*Schima superba*)群落,针叶林选取了马尾松(*Pinus massoniana*)群落,灌丛为石栎(*Lithocarpus glabe*) + 欆木(*Loropetalum chinense*)群落,灌草丛是五节芒(*Miscanthus floridulus*) + 铁芒萁(*Dicranopteris pedata*)群落,各样地详细特征见文献[14]。为降低同一植被类型下不同群落间的时空差异,每群落内各设置3个重复样地(面积10 m×10 m)。

常绿阔叶林不同受损程度模拟实验开始于2003年,处理方式分为以下4种。(1)间伐大树:对树高超过8 m的大树进行择伐,保留下木层;(2)清理下木:仅清除灌木层(8 m以下)和草本层,保留大树;(3)清理所有植被:将地上植物全部清除,保留枯枝落叶层;(4)地上植被与表土全部破坏:清除地上全部植物,并清除枯枝落叶层和表土层(0~10 cm)。本研究选择了以上4种处理方式和1个对照样地作为模拟退化序列,各样地大小为20 m×20 m。模拟样地的详情见文献[15]。本研究在模拟试验开展6年后进行了土壤呼吸的测定。

### 1.2 土壤呼吸速率及土壤温度的测定

采用LI-8100土壤碳通量测量系统(LI-COR)测定土壤呼吸速率。在每个样地中各放置3个用于土壤呼吸速率测定的土壤PVC环(内径20 cm,高15 cm),5种群落类型以及5个模拟样地一共放置60个土壤隔离圈。选择天气晴朗的上午9:00~11:00间测定土壤呼吸速率,每个土壤PVC环重复3次。为减小安放土壤隔离圈对土壤呼吸速率的影响,提前1周将土壤PVC环埋入土壤大约12 cm,以后每个月的测定在固定的土壤PVC环上进行,并且在每次测定前一天,将测定点土壤隔离圈上面的地表植被自土壤表层彻底剪除并保留枯枝落叶,尽量不破坏土壤,以减少土壤扰动及根系损伤对测量结果的影响。测量从2009年夏季开始,至2010年春季结束,测量时间分别为:夏季,2009年7月28日~8月17日;秋季,2009年11月28日~12月5日;冬季,2010年1月28日~2月5日;春季,2010年3月28日~4月5日。

另外,应用与LI-8100配套的土壤温度传感器(美国LI-COR公司)测定每个观测点土壤表层下5 cm处的土壤温度,烘干法测定腐殖质层下5 cm的土壤含水率。

### 1.3 土壤呼吸影响因子数据收集

为揭示土壤呼吸速率的影响因素,本研究同时收集了作者前期对该退化系列土壤理化性质、植物凋落物和植物细根的研究资料。土壤容重、pH、有机碳和总氮的数据来源于文献[12],土壤C/N来源于对文献[12]数据的重新计算;凋落物数据来源于文献[11];细根生物量数据来源于文献[16];土壤微生物量碳的数据来源于文献[17]。各影响因子的数据见表1。

### 1.4 统计分析

统计分析采用单因素方差分析法(ANOVA)判断常绿阔叶林退化对土壤呼吸速率的影响。方差分析前,首先判断各组数值是否满足正态分布以及方差是否具有齐性,如果不满足,

则对相应数值进行对数转换,以满足单因素方差分析的假定条件.采用 Tukey 检验进行各水平间均值的配对比较检验.方差分析过程中,将不同退化类型作为自变量,土壤呼吸速率作为因变量.

表 1 常绿阔叶林各退化阶段的土壤性质及植物凋落物和细根特征

Tab. 1 Soil properties and characteristics of litterfall and fine roots in various degraded stages of evergreen broad-leaved forests

	土壤温度/℃	土壤含水率/%	土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土壤 pH	土壤有机碳含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
常绿阔叶林顶极群落	13.3±0.1 <sup>a</sup>	37.8±0.3 <sup>a</sup>	1.1±0.06 <sup>a</sup>	3.9±0.1 <sup>a</sup>	56.7±3.3 <sup>a</sup>
常绿阔叶林亚顶极群落	13.4±0.2 <sup>a</sup>	30.5±1.1 <sup>b</sup>	1.3±0.04 <sup>b</sup>	4.7±0.4 <sup>b</sup>	35.0±1.3 <sup>b</sup>
针叶林	14.3±0.5 <sup>ab</sup>	24.5±1.6 <sup>c</sup>	1.4±0.1 <sup>b</sup>	4.2±0.1 <sup>ab</sup>	18.5±0.6 <sup>c</sup>
灌丛	14.6±0.3 <sup>b</sup>	30.9±1.6 <sup>b</sup>	1.3±0.03 <sup>b</sup>	4.3±0.1 <sup>ab</sup>	27.4±1.4 <sup>d</sup>
灌草丛	17.2±0.5 <sup>c</sup>	24.8±0.3 <sup>c</sup>	1.5±0.1 <sup>c</sup>	4.4±0.1 <sup>ab</sup>	13.2±0.4 <sup>e</sup>
	土壤总氮 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤 C/N	土壤微生物量碳 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	细根生物量 ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-1}$ )	地表凋落物存贮量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )
常绿阔叶林顶极群落	5.2±0.1 <sup>a</sup>	11.0±0.6 <sup>a</sup>	296.5±20.4 <sup>a</sup>	3.1±0.2 <sup>a</sup>	1.3±0.1 <sup>a</sup>
常绿阔叶林亚顶极群落	2.6±0.1 <sup>b</sup>	13.3±0.2 <sup>b</sup>	271.9±16.8 <sup>a</sup>	2.8±0.04 <sup>a</sup>	1.6±0.2 <sup>ab</sup>
针叶林	2.2±0.2 <sup>cd</sup>	8.4±0.7 <sup>c</sup>	220.5±12.9 <sup>b</sup>	0.8±0.1 <sup>b</sup>	1.6±0.2 <sup>ab</sup>
灌丛	2.4±0.1 <sup>bc</sup>	11.4±0.7 <sup>a</sup>	258.2±22.2 <sup>ab</sup>	5.7±0.2 <sup>c</sup>	2.0±0.4 <sup>b</sup>
灌草丛	2.0±0.1 <sup>d</sup>	6.5±0.3 <sup>d</sup>	155.2±6.9 <sup>c</sup>	3.0±0.1 <sup>a</sup>	0.6±0.04 <sup>c</sup>

注:数据为平均值±标准差;同一行不同字母表示存在显著性差异, $P<0.05$ (Tukey test)

采用逐步回归法判别土壤容重、土壤温度、土壤含水率、土壤 pH、土壤有机质含量、土壤总氮含量、土壤 C/N、土壤细根生物量、凋落物凋落量以及微生物量碳对土壤呼吸速率的贡献大小.如果具有显著性,则纳入回归方程.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同退化阶段的土壤呼吸速率及季节动态

ANOVA 分析显示不同退化阶段土壤呼吸速率存在显著季节动态(常绿阔叶林顶极群落: $df=3$ ,  $F=141.659$ ,  $P<0.001$ ;亚顶极群落: $df=3$ ,  $F=86.474$ ,  $P<0.001$ ;针叶林: $df=3$ ,  $F=68.576$ ,  $P<0.001$ ;灌丛: $df=4$ ,  $F=30.319$ ,  $P<0.001$ ;灌草丛: $df=4$ ,  $F=56.899$ ,  $P<0.001$ ).进一步两两比较检验显示:各退化阶段夏季土壤呼吸速率显著高于其他季节( $P<0.001$ ).常绿阔叶林顶极群落、亚顶极群落、灌丛和灌草丛的土壤呼吸速率在均冬季最低,而针叶林的土壤呼吸速率在春季最低(见表 2).

表 2 常绿阔叶林不同退化阶段土壤呼吸速率及季节动态

Tab. 2 Spatial and seasonal dynamics of soil respiration among five degraded stages of evergreen broad-leaved forests

	broad-leaved forests				$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
	年均	冬季	秋季	夏季	春季
常绿阔叶林顶极群落	2.74±0.35 <sup>a</sup>	1.12±0.10 <sup>a</sup>	1.79±0.39 <sup>a</sup>	6.86±0.72 <sup>a</sup>	1.19±0.22 <sup>a</sup>
常绿阔叶林亚顶极群落	1.95±0.12 <sup>b</sup>	0.82±0.14 <sup>a</sup>	1.40±0.08 <sup>a</sup>	4.53±0.23 <sup>a</sup>	1.06±0.13 <sup>a</sup>
针叶林	2.32±0.25 <sup>ab</sup>	1.67±0.12 <sup>b</sup>	1.50±0.31 <sup>a</sup>	5.13±0.61 <sup>a</sup>	0.98±0.30 <sup>a</sup>
灌丛	2.39±0.34 <sup>ab</sup>	1.20±0.10 <sup>a</sup>	1.45±0.47 <sup>a</sup>	5.65±0.68 <sup>a</sup>	1.26±0.10 <sup>a</sup>
灌草丛	2.84±0.20 <sup>a</sup>	1.13±0.71 <sup>a</sup>	1.61±0.85 <sup>a</sup>	6.67±0.80 <sup>a</sup>	1.96±0.37 <sup>b</sup>

注:数据为平均值±标准差;同一行不同字母表示存在显著性差异, $P<0.05$ (Tukey test)

不同退化阶段年平均土壤呼吸速率的大小表现为:常绿阔叶林顶极群落与灌草丛最高,其次分别为针叶林和灌丛,常绿阔叶林亚顶极群落最低(见表 2)。ANOVA 分析显示,常绿阔叶林退化对年平均土壤呼吸速率具有显著影响( $df=4, F=5.339, P<0.05$ ),两两比较检验结果显示:只有年平均土壤呼吸速率存在显著性差异( $P<0.05$ ),其他各阶段间无显著差异( $P>0.05$ )。

## 2.2 模拟不同受损样地土壤呼吸速率及季节动态

ANOVA 分析结果显示:经过不同干扰程度处理,年平均土壤呼吸速率无显著差异( $df=4, F=1.937, P>0.05$ )。但是,与对照样地相比,砍伐处理样地的土壤呼吸速率存在一定程度的上升(见表 3)。另外,4 个季节的土壤呼吸速率在各处理样地也无显著差异( $P>0.05$ ),但对照样地的土壤呼吸速率明显低于其他样地。对不同季节土壤呼吸速率进行 ANOVA 分析显示,不同季节的土壤呼吸速率存在显著性差异( $df=3, F=58.710, P<0.001$ )。两两比较检验结果显示:夏季的土壤呼吸速率显著高与其他三季( $P<0.001$ ),冬季土壤呼吸速率最低( $P<0.01$ )。

表 3 模拟不同受损程度样地土壤呼吸速率及季节动态  
Tab. 3 Seasonal patterns of soil respiration among five damaged treatments

	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$				
	年均	冬季	秋季	夏季	春季
间伐大树	2.42±0.40 <sup>a</sup>	0.95±0.37 <sup>a</sup>	2.29±1.57 <sup>a</sup>	6.21±1.97 <sup>a</sup>	1.57±0.43 <sup>a</sup>
清理下木	2.47±0.35 <sup>a</sup>	1.15±0.33 <sup>a</sup>	1.96±0.33 <sup>a</sup>	5.86±1.15 <sup>a</sup>	0.92±0.23 <sup>a</sup>
清理地上植被	2.20±0.38 <sup>a</sup>	1.07±0.59 <sup>a</sup>	1.86±0.43 <sup>a</sup>	4.38±0.97 <sup>a</sup>	1.49±0.27 <sup>a</sup>
地上植被和表土全部破坏	2.65±0.13 <sup>a</sup>	1.78±0.32 <sup>a</sup>	1.74±0.57 <sup>a</sup>	5.76±0.96 <sup>a</sup>	1.32±0.32 <sup>a</sup>
对照	2.02±0.15 <sup>a</sup>	0.86±0.19 <sup>a</sup>	1.45±0.74 <sup>a</sup>	4.38±0.47 <sup>a</sup>	1.40±0.62 <sup>a</sup>

注:数据为平均值±标准差

## 2.3 不同退化阶段土壤呼吸速率与土壤理化性质及植物凋落物和细根特征的回归关系

通过对土壤呼吸速率与土壤性质的线性相关分析发现,土壤的温度( $R=0.514, P<0.1$ )、pH( $R=0.539, P<0.05$ )和 C/N( $R=-0.581, P<0.05$ )分别与土壤呼吸速率间显著正相关。进一步的逐步回归分析表明,在退化系列中,影响土壤呼吸速率的决定性因子为土壤 C/N 和土壤 pH,回归方程为(1)式所示,

$$R_s = 5.694 - 0.079 \text{ C/N} - 0.570 \text{ pH} \quad (R^2 = 0.528). \quad (1)$$

式中, $R_s$  为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),C/N 为土壤碳氮比,pH 为土壤 pH 值。

为进一步明确退化程度对土壤呼吸速率的影响,又分别将退化前期的常绿阔叶林顶极和亚顶极群落作为退化初期代表,将针叶林、灌丛和灌草丛作为退化较严重阶段代表,分别进行了土壤呼吸及其影响因素的回归分析。结果显示:在退化初期,决定土壤呼吸速率的主要因素仍然是土壤 C/N,回归方程见式(2);与之不同,在退化较严重阶段,决定土壤呼吸速率的主要因素仍然是土壤温度,回归方程见式(3)。

$$R_{s1} = 0.6656 - 0.355 \text{ C/N} \quad (R^2 = 0.927), \quad (2)$$

$$R_{s2} = -0.297 + 0.183 \text{ T} \quad (R^2 = 0.570). \quad (3)$$

式中  $R_{s1}$  和  $R_{s2}$  分别为退化初期和较严重阶段的土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),C/N 为土壤碳氮比,T 为土壤温度。

## 3 讨 论

土壤呼吸速率大小主要受生物因素和非生物因素两方面影响。生物因素主要包括植被

性质、植物种类特性、土壤动物和微生物的种类、数量等;非生物因素包括土壤温湿度、土壤容重、土壤养分含量和土壤 pH 等<sup>[18]</sup>。受人类干扰后的森林退化过程中,由于以上生物和非生物要素的改变<sup>[19]</sup>,必然也对土壤呼吸速率产生影响。

在本研究中,土壤年呼吸速率在常绿阔叶林退化初期下降,但随着退化加剧而又升高,在退化最严重的灌草丛达到与顶极常绿阔叶林群落相当的水平。虽然在退化初期和退化最严重阶段无显著差异,但其在退化系列上的格局发生了一定变化。这种影响格局在本研究的人工砍伐模拟实验中也得到了一定程度的验证:与对照样地相比,土壤呼吸速率随着砍伐强度的增大而上升。

常绿阔叶林退化过程中土壤呼吸速率的变化格局与此过程中由人类干扰导致的生物和非生物因素改变有关。随人类干扰强度增大,地上生物量大量输出,土壤碳库和氮库显著下降<sup>[12]</sup>,土壤紧实度增加,植物根系的伸展能力下降,植物细根的生物量下降<sup>[16]</sup>,以上变化也会导致土壤微生物主要类群和数量的下降<sup>[20]</sup>。通过土壤呼吸速率与以上因素的回归分析表明,土壤 C/N 和土壤 pH 是影响不同退化阶段土壤呼吸的主要影响因素。王国兵等对天然次生栎林、马尾松人工林、毛竹林、板栗经济林和农田等 5 种土地利用类型的土壤呼吸速率及土壤微生物生物量进行了测定,结果发现,不同土地利用类型的土壤呼吸速率和微生物生物量存在差异性,土壤呼吸速率与土壤微生物生物量、土壤温度、土壤全钙含量、土壤全磷含量以及土壤碳氮比有显著相关关系<sup>[21]</sup>。王旭等测量长白山阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林伐后 13 年的皆伐迹地土壤呼吸作用表明,阔叶红松林皆伐后生物量减少和微环境变化是造成土壤呼吸作用强度和动态特征发生变化的重要原因<sup>[22]</sup>。

由本研究可以看出,常绿阔叶林退化初期阶段土壤 C/N 低是其土壤呼吸速率显著高于退化后期阶段的主要因素。这主要是由于:土壤有机碳的分解受到碳氮比率的影响<sup>[23]</sup>。常绿阔叶林顶极群落土壤氮含量较亚顶极群落和针叶林高,因此,土壤 C/N 较低,微生物的活性就高,土壤微生物在充足的氮素供给下,会加速土壤有机碳的矿化,从而引起土壤呼吸速率增加,净碳释放也高<sup>[24]</sup>。另外,退化初期阶段的土壤 pH 显著低于退化末期也是影响常绿阔叶林顶极群落土壤呼吸速率高的原因之一,这一现象可从整个退化系列上土壤呼吸的回归方程得到验证。在常绿阔叶林顶极群落土壤中,由于低的土壤 pH 有利于抑制对土壤微生物和土壤动物有害的阳离子的溶出,因此,可以提高土壤微生物和土壤动物的活性,也就增加了土壤呼吸速率。

随着退化进行,由于干扰强度的不断加剧,控制土壤呼吸速率的主要因素由生物因素逐渐向非生物因素过渡。通过分别对常绿阔叶林退化初期阶段,以及退化较严重阶段土壤呼吸速率及其影响因素的回归结果可以看出,在退化初期,决定土壤呼吸速率的主要因素仍然是土壤 C/N;相反,在退化较严重阶段,决定土壤呼吸速率的主要因素仍然是土壤温度。由此可以看出,虽然退化后期的土壤呼吸速率显著升高,但是,这种升高过程并不是生物因素影响造成的,而是由非生物因素改变造成的。退化后期土壤呼吸速率与土壤温度显著相关,一定程度上反映了常绿阔叶林退化过程的典型特征。

如前所述,常绿阔叶林退化主要是由于人类干扰,尤其是森林砍伐造成的。在此过程中,由于砍伐导致大量的生物量输出,植物群落结构层次严重简化,植被覆盖度明显下降,地表温度变异显著增大,因此,在相同气温下,退化后期群落的土壤温度显著高于退化初期阶段。由于土壤呼吸速率与温度显著相关,因此,常绿阔叶林退化后期群落土壤的呼吸速率主要由

土壤温度来决定。在亚热带东部丘陵地区,由于丰富的水热资源,即使由于人类砍伐造成了植被退化,但由于砍伐造成的植物残留体仍保持在土壤中,又由于高温的作用,加速了这些有机质物质的分解,从而也提高了土壤的呼吸速率。

结合常绿阔叶林退化初期和后期阶段土壤呼吸的影响因素来看,在常绿阔叶林退化过程中,控制土壤呼吸速率的主要因素是不断变化的,其中存在着一个复杂的转化机制,即在退化初期,土壤呼吸速率主要受生物因素控制,随着退化加剧,非生物因素对土壤呼吸的影响逐渐增强,最后成为土壤呼吸速率变化的主导因素。

### [参 考 文 献]

- [1] SCHIMEL D S, HOUSE J I, HIBBARD K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2001, 414: 169-172.
- [2] 方精云, 王妮. 作为地下过程的土壤呼吸: 我们理解了多少?[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 345-347.  
FANG J Y, WANG W. Soil respiration as a key belowground process: issues and perspectives? [J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2007, 31(3): 345-347.
- [3] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climates[J]. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99.
- [4] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.  
YANG Y S, DONG B, XIE J S, et al. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 583-591.
- [5] LUGO A E, BROWN S. Management of tropical soils as sinks or source of atmospheric carbon[J]. *Plant and Soil*, 1993, 149: 27-41.
- [6] LYTLE D E, CRONAN C S. Comparative soil CO<sub>2</sub>, evolution litter decay, and root dynamics in clear-cut and uncut spruce-fir forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 103: 121-128.
- [7] LONDO A J, MESSINA M G, SCHOENHOLTZ S H. Forest harvesting effects on soil temperature, moisture, and respiration in a bottomland hardwood forests[J]. *Soil Science Society of America*, 1999, 63: 637-644.
- [8] LAPARTE M F, DUCHESNE L C, MOTISON I K. Effect of clear cutting, selection cutting, shelter wood cutting and microsites on soil surface CO<sub>2</sub> efflux in a tolerant hardwood ecosystem of northern Ontario[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174: 565-575.
- [9] TOLAND D E, ZAK D R. Seasonal patterns of soil respiration in intact and clear-cut northern hardwood forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24: 1711-1716.
- [10] 王希华, 阎恩荣, 严晓, 等. 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[J]. *生态学报*, 2005, 25(7): 1796-1803.  
WANG X H, YAN E R, YAN X, et al. Analysis of degraded evergreen broad-leaved forest communities in Eastern China and issues in forest restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1796-1803.
- [11] 宋永昌, 陈小勇. 中国东部常绿阔叶林生态系统退化机制与生态恢复[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
SONG Y C, CHEN X Y, et al. Degradation Mechanism and Ecological Restoration of Evergreen Broad-Leaved Forest Ecosystem in East China[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [12] 阎恩荣, 王希华, 陈小勇. 浙江天童地区常绿阔叶林退化对土壤养分库和碳库的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1646-1655.  
YAN E R, WANG X H, CHEN X Y. Impacts of evergreen broad-leaved forest, degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1646-1655.
- [13] 宋永昌, 王祥荣. 浙江天童国家森林公园的植被和区系[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995.  
SONG Y C, WANG X R. Vegetation and Flora of Tiantong National Forest Park Zhejiang Province[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Document Publishing House, 1995.
- [14] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系[J]. *植物生态学*

- 报, 2008, 32(1): 1-12.
- YAN E R, WANG X H, ZHOU W. Characteristics of litterfall in relation to soil nutrients in mature and degraded Evergreen broad-leaved forests of Tiantong, East China[J]. *Journal of Plant Ecology(Chinese Version)*, 2008, 32(1): 1-12.
- [15] 达良俊, 宋坤. 浙江天童受损常绿阔叶林实验生态学研究( I ): 生态恢复实验与长期定位[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2008(4): 3-11.
- DA L J, SONG K. Experimental ecology research on destroyed evergreen broad-leaved forests in TNFP, Zhejiang ( I ): Ecological restoration experiments and long-term ecological study[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2008(4): 3-11.
- [16] 曾繁荣, 施家月, 阎恩荣, 等. 天童常绿阔叶林次生演替过程中细根的生物量动态[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2008(6): 56-62.
- ZENG F R, SHI J Y, YAN E R, et al. Temporal and spatial patterns of fine root mass along a secondary succession of evergreen broad-leaved forest in Tiantong[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2008(6): 56-62.
- [17] 戴慧. 天童地区不同土地利用类型土壤的碳库特征[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- DAI H. Effects of land use type on soil organic carbon mineralization in Tiantong, Zhejiang Province[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [18] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476.
- LIU S H, FANG J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature s effects on soil respiration in the global scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476.
- [19] 易志刚, 蚁伟民. 森林生态系统中土壤呼吸研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 361-365.
- YI Z G, YI W M. Proceeding of studies on soil respiration of forest ecosystem[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3): 361-365.
- [20] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002(8): 345-360.
- [21] 王国兵, 郝岩松, 王兵, 等. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(2): 74-79.
- WANG G B, HAO Y S, WANG B, et al. Influence of land-use change on soil respiration and soil microbial biomass[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(2): 74-79.
- [22] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 355-362.
- WANG X, ZHOU G S, JIANG Y L, et al. Soil respiration in natural mixed (*Betula platyphylla* and *Populus davidiana*) secondary forest and primary broad-leaved Korean pine forest[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2007, 31(3): 355-362.
- [23] MCGRATH D A, SMITH K C, GHOLZ H L, et al. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia[J]. *Ecosystems*, 2001(4): 625-645.
- [24] YIN X, PERRY J A, DIXON R K. Fine-root dynamics and biomass distribution in a *Quercus* ecosystem following harvesting[J]. *Forest Ecology and Management*, 1989, 27: 159-177.

[责任编辑 张 晶]