

DOI: 10.5846/stxb201710191881

陈毅, 闫文德, 郑威, 廖菊阳, 盘昱良, 梁小翠, 杨坤. 模拟氮沉降下凋落物管理对樟树人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2018, 38(21): - .  
Chen Y, Yan W D, Zheng W, Liao J Y, Pan Y L, Liang X C, Yang K. Effects of litter on soil respiration under simulated nitrogen deposition in a *Cinnamomumcamphora* forest. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

## 模拟氮沉降下凋落物管理对樟树人工林土壤呼吸的影响

陈毅<sup>1</sup>, 闫文德<sup>1,3,7,\*</sup>, 郑威<sup>2</sup>, 廖菊阳<sup>4,5</sup>, 盘昱良<sup>1</sup>, 梁小翠<sup>1,6</sup>, 杨坤<sup>1</sup>

1 中南林业科技大学, 长沙 410004

2 广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530002

3 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

4 湖南省森林植物园, 长沙 410114

5 湖南长株潭城市群森林生态系统国家定位观测研究站, 长沙 410114

6 城市森林生态湖南省重点实验室, 长沙 410004

7 湖南芦头森林生态系统国家定位观测研究站, 平江 414000

**摘要:**以湖南省植物园樟树人工林为对象,研究了模拟氮沉降下,不同凋落物处理对土壤呼吸的影响。设置 4 个施氮水平,分别为 CK(0 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、LN(50 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、NM(150 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)以及 HN(300 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>);凋落物处理分别为去除凋落物、添加凋落物以及凋落物对照组。经过为期 2 年的观测研究,结果表明:(1)模拟氮沉降不同凋落物处理下,土壤温度呈现显著的季节性变化,但不存在显著差异;土壤湿度呈现显著的波动性变化,施氮及凋落物管理对土壤温度无影响。土壤湿度仅受凋落物管理的影响。在不同施氮水平下,去除凋落物的土壤湿度与加倍凋落物的土壤湿度均存在显著差异性。(2)模拟氮沉降不同凋落物处理下,土壤呼吸均呈现显著的季节性变化,最大值出现在 6—8 月;最小值出现在 1 月,且在生长季期间(4—8 月),不同处理下土壤呼吸存在显著差异。(3)施氮对土壤呼吸表现为抑制作用,添加凋落物对土壤呼吸起促进作用,去除凋落物对土壤呼吸起抑制作用。(4)在凋落物对照组中, LN、MN、HN 较 CK 相比,土壤呼吸速率年均值分别降低了 35.4%、30.6%、36.8%,且各施氮水平与 CK 存在显著差异( $P < 0.05$ );添加凋落物处理下, LN、MN、HN 处理较 CK 相比,土壤呼吸速率年均值土壤呼吸分别降低了 23.2%、15.8%、14.7%。去除凋落物处理下, LN、MN、HN 较 CK 相比,土壤呼吸速率年均值分别降低了 3.5%、0.5%、-11.6%。且添加或去除凋落物均能削弱施氮对土壤呼吸的抑制作用,且这种作用随着施氮水平的增加而增大。(5)土壤呼吸与 5 cm 处土壤温度存在显著相关性( $P < 0.05$ ),土壤温度可解释土壤呼吸变异的 47.76%—72.61%;与土壤湿度呈现正相关,但未达到显著相关水平( $P > 0.05$ )。

**关键词:**土壤呼吸;樟树;凋落物;氮沉降

## Effects of litter on soil respiration under simulated nitrogen deposition in a *Cinnamomumcamphora* forest

CHEN Yi<sup>1</sup>, YAN Wende<sup>1,3,7,\*</sup>, ZHENG Wei<sup>2</sup>, LIAO Juyang<sup>4,5</sup>, PAN Yuliang<sup>1</sup>, LIANG Xiaocui<sup>1,6</sup>, YANG Kun<sup>1</sup>

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China

3 South Forestry Ecological Applied Technology National Engineering Laboratory, Changsha 410004, China

4 Hunan Botanical Garden, Changsha 410114, China

**基金项目:**国家林业公益性行业科研专项(201404316);湖南省自然科学基金创新研究群体基金(湘基金委字[2013]7号);国家林业局软科学研究项目(2013.R09);湖南芦头森林生态系统国家定位观测研究站运行补助(2017-LYPT-DW-064, XLKPT201713)

**收稿日期:**2017-10-19; **网络出版日期:**2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfuywd@hotmail.com

5 Hunan Chang-Zhu-Tan City Cluster National Research Station of Forest Ecosystem, Changsha 410114, China

6 City of Hunan Province Key Laboratory of Forest Ecology, Changsha 410004, China

7 National Research Station of Forest Ecosystem in Lutou Hunan, Pingjiang 414000, China

**Abstract:** We evaluated the effects of different litter treatments on soil respiration under the influence of nitrogen deposition in a camphor plantation forest in Hunan Botanical Garden, China. We used four different levels of nitrogen, including CK ( $0 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), LN ( $50 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), NM ( $150 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), and HN ( $300 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), and three litter treatments, including litter removal, doubled litter, and litter control group (no litter treatment). After two years of observation, the following major results were obtained: (1) Soil temperature showed significant seasonal changes, but no significant difference was observed in soil temperature with different litter treatments under simulated nitrogen deposition. However, soil moisture showed significant fluctuations. Soil moisture was affected only by litter management. A significant difference was observed in soil moisture with litter removal and doubled litter under different levels of nitrogen. (2) With different litter treatments under simulated nitrogen deposition, soil respiration showed significant seasonal changes; the maximum respiration rates were obtained from June to August and the minimum in January. During the growing season (April–August), a significant difference was observed in soil respiration with different treatments. (3) Soil respiration was inhibited by nitrogen applications; however, soil respiration was promoted by the addition of litter and inhibited by its removal. (4) Compared with CK, the soil respiration rates of LN-, MN-, and HN-treated soil significantly decreased by 35.4%, 30.6%, and 36.8% in the litter control group ( $P < 0.05$ ); by 23.2, 15.8, and 14.7% in the doubled litter group; and by 3.5, 0.5, -11.6% in the litter removed group. The addition or removal of litter could weaken the inhibitory effect of nitrogen on soil respiration. Moreover, this effect increases with increasing nitrogen levels. (5) A significant correlation was found between soil respiration and soil temperature at a soil depth of 5 cm ( $P < 0.05$ ). Soil temperature could explain a variation of 47.76%–72.61% in soil respiration, and no significant correlation was found between soil respiration and soil moisture ( $P > 0.05$ ).

**Key Words:** soil respiration; camphor plantation forest; litter treatments; nitrogen deposition

人造肥料的使用以及化学燃料的燃烧,使人为氮沉积日益增多<sup>[1]</sup>。在全球范围内,氮(N)沉降通过影响植物的生长以及碳的排放从而影响了整个陆地生态系统的碳(C)平衡<sup>[2-3]</sup>。我国是仅次于欧洲与美国的全球第三大氮沉降区<sup>[4]</sup>,了解氮沉降对森林生态系统碳平衡的影响,以及生态系统C、N循环对氮沉降增加的响应是至关重要的。

森林土壤中所含的碳与植物中所含的碳相比具有多且稳定的特点<sup>[5]</sup>。而土壤呼吸,是植物固定 $\text{CO}_2$ 返回大气中的主要途径,全球每年大约有80—98 Pg的碳通过这种方式进入到大气中,同时这个数字以每年0.1 Pg的速度在增长<sup>[6]</sup>。而土壤中的N含量的改变、林内凋落物的数量,可能会改变土壤呼吸的过程,从而对碳平衡反应的方向和程度产生巨大的影响<sup>[7]</sup>,所以研究在氮沉降下,不同凋落物管理对土壤呼吸的变化规律的影响,对了解森林生态系统对氮沉降的响应,为人工林的管理经营提供科学依据有重要意义。

越来越多的证据证明,氮添加会减少土壤呼吸<sup>[8-9]</sup>。但是,导致土壤呼吸下降的机理尚未清楚。广泛的认为是其降低的土壤微生物的活性导致的<sup>[10]</sup>,并且抑制了细根的生物量和菌根的呼吸作用<sup>[11]</sup>。但植物对与氮元素的需求量,也会影响施氮对土壤呼吸的影响。土壤中N元素超过植物的需求时,土壤呼吸会减少<sup>[12]</sup>。由于土壤呼吸对人为氮沉积的响应存在不确定性关系,氮沉降对不同森林生态系统土壤呼吸以及碳循环的影响需要更加深入的研究。

土壤有机质的含量会对土壤呼吸产生深远的影响,森林凋落物是土壤有机质的重要来源,地上有机质为土壤微生物的生长提供了新鲜的不稳定的有机物C,通常认为土壤微生物数量受有机质的影响<sup>[13]</sup>,因此有机质的去除是通过控制可利用C的含量从而有可能直接影响到了土壤呼吸,并且地上凋落物层还可影响到土

壤微环境<sup>[14]</sup>。凋落物是通过影响土壤中的土壤温度、土壤湿度、pH 等土壤物理化学性质的相互作用来影响到土壤呼吸的<sup>[15]</sup>。如今很多的研究主要说明的是氮添加、凋落物影响的单一影响,但是对于凋落物与氮添加对土壤呼吸的综合影响的组合效应仍不太了解<sup>[11,16-17]</sup>。因此,研究氮添加和凋落物改变对土壤呼吸的综合影响,可以加深了解增加氮沉降对土壤呼吸以及森林 C 循环的影响。樟树(*Cinnamomum camphora*)为长沙市市树,是我国南方城市的优良绿化树种,具有重要的生态价值。所以本研究于选取樟树人工林作为研究对象,在湖南省植物园的樟树林中设置样地,对其进行不同的施氮处理模拟氮沉降,同时对凋落物进行添加以及去除凋落物处理,进行长期的观测实验。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

实验区位于湖南省植物园内,位于 113°01′—113°02′ E, 28°06′—28°07′ N,核心区占地约 4356 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率达 90%以上,海拔 46—114 m,坡度 5°—25°。属于典型的亚热带湿润型季风气候。年平均 17.2℃;无霜期 270—300 d,光线充足,年均日照时长 1677 h;年均降水量 1422 mm,雨量充沛。研究区为典型红壤丘陵地区,其地层主要是第四纪更新世的冲积性网纹红土和砂砾,土壤为典型红壤,pH 为 4.01。

本实验研究对象为湖南省植物园内的樟树人工林,该林分于 1979—1982 年间营造,后经自然更新而成。林下植被有毛山矾(*Symplocos caudata*),柘树(*Cudraniaticuspidata*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、泡桐(*Paulownia tomentosa*)、白栎(*Quercus fabri*)、糙叶树(*Aphananthe aspera*),草本植物以淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)、商陆(*Phytolacca acinosa*)、酢浆草(*Oxalis comiculata*)等为主。林分的基本情况见表 1。

表 1 樟树林的林分特征、土壤理化特性

Table 1 Stand characteristics and soil physical chemical properties in camphor forest

树龄 age/a	密度 Stem density/ (株/hm <sup>2</sup> )	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	郁闭度 Crown density	有机碳 (0—20 cm) Organic carbon/ (g/kg)	全氮 (0—20 cm) Total nitrogen/ (g/kg)	容重 (0—20 cm) Soil bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	pH
20	1600	14.92(1.21)	12.55(1.03)	0.9	13.18(0.51)	1.27(0.003)	1.50(0.11)	4.00(0.03)

括号内为标准误差

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 施氮处理

根据当地森林大气氮沉降背景和其他同类研究,共设立 4 个施氮处理水平:CK:0 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;LN:50 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;MN:150 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;HN:300 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。每个处理水平设置 3 个重复样地,共计 12 块,样地大小为 25 m×25 m,于每年干湿交替季的 5 月、10 月进行施氮,以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>作为氮肥混合 20 L 的自来水,使用喷雾器均匀的撒与样地中<sup>[18]</sup>。

在经过施氮处理的样方中随机选取 3 个点安放 PVC(Φ21 cm×H8 cm)连接环,插入土壤 4 cm,连接环在测量期间不再移动。

#### 1.2.2 凋落物处理

##### (1) 凋落物收集器的设置

在每个施氮水平的重复样方内随机设置 2 个凋落物收集器,共 2×12=24 个,收集器尺寸为 3 m×4 m,收集器采用尼龙网,离地高度约 40 cm,同时在凋落物收集器旁划定 3 m×4 m 添加凋落物小样方。

##### (2) 凋落物处理

去除凋落物处理:试验开始前清除凋落物收集网下的凋落物,其垂直投影范围为去除凋落物处理,并沿对

角线安放 2 个 PVC 连接环。

添加凋落物处理:将每月凋落物收集器所收集的凋落物置于添加凋落物实验组中,沿对角线安置 2 个 PVC 连接环。

### 1.3 测定方法

2010 年 6 月至 2012 年 6 月,半月 1 次测定土壤呼吸(SRT)及土壤 5cm 深度处温度及湿度,测量方法如下:

土壤呼吸:采用 LI-8100(Li-COR Inc, Lincoln, NE, USA)测定;

土壤 5 cm 深度处温度测定:与土壤呼吸速率测定同步进行,采用 Li-COR-8100 通量系统配套的温度探针 Li-8100-201Omega 测定。

土壤 5 cm 深度处湿度测定:与土壤呼吸速率测定同步进行,采用 Li-COR-8100 通量系统配套的湿度探针 Li-8100-202 测定。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 施氮及凋落物处理对土壤温度和土壤湿度的影响

樟树林生态系统 4 种施氮水平下,去除、添加凋落物与对照处理的土壤温度季节动态变化如图 1 所示,图中显示,不同施氮水平下,去除、加倍凋落物及对照处理的土壤呼吸均呈现显著的季节性变化,最高值均出现在 7 月,最低值均出现在 1 月。在凋落物对照组中,CK、LN、MN、HN 组中土壤温度的年均值分别为:(16.12±1.18)、(17.13±1.19)、(16.87±1.21)、(16.79±1.22)°C;在去除凋落物组中,CK、LN、MN、HN 组中土壤温度的年均值分别为:(15.93±1.19)、(16.96±1.20)、(16.73±1.22)、(16.59±1.21)°C;在添加凋落物组中,CK、LN、MN、HN 组中土壤温度的年均值分别为:(16.24±1.18)、(16.89±1.17)、(16.82±1.19)、(16.77±1.17)°C。各施

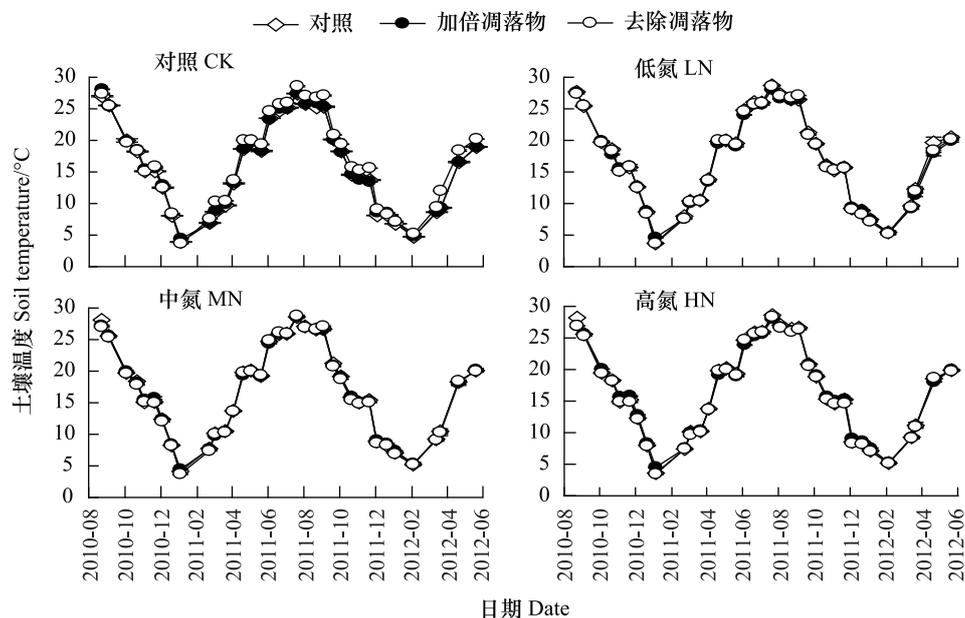


图 1 4 种施氮条件下去除凋落物、加倍凋落物和对照的土壤温度季节动态

Fig.1 Seasonal pattern of soil temperature of different litter fall treatments with 4 nitrogen addition level

CK:对照,Control;LN:低氮,Low Nitrogen; MN:中氮, medium Nitrogen; HN:高氮,high Nitrogen

氮处理及凋落物处理对土壤温度无显著影响( $P>0.05$ )。4 种施氮水平下,去除凋落物、加倍凋落物与凋落物对照处理的 5 cm 处土壤湿度如图 2 所示,均呈现显著波动变化。

在凋落物对照组中,CK、LN、MN、HN 组中土壤湿度的年均值分别为:(0.25±0.01)、(0.24±0.01)、(0.26±

0.01)、 $(0.26 \pm 0.01) \text{ m}^3/\text{m}^3$ ;在去除凋落物组中,CK、LN、MN、HN 组中土壤湿度的年均值分别为: $(0.21 \pm 0.01)$ 、 $(0.22 \pm 0.01)$ 、 $(0.22 \pm 0.01)$ 、 $(0.23 \pm 0.01) \text{ m}^3/\text{m}^3$ ;在添加凋落物组中,CK、LN、MN、HN 组中土壤湿度的年均值分别为: $(0.25 \pm 0.01)$ 、 $(0.25 \pm 0.01)$ 、 $(0.26 \pm 0.01)$ 、 $(0.28 \pm 0.01) \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。且在各施氮水平下,添加凋落物处理的土壤湿度均显著高于去除凋落物处理的土壤湿度( $P < 0.05$ );凋落物对照组与添加凋落物组及去除凋落物组之间的土壤湿度不存在差异显著性( $P > 0.05$ )。

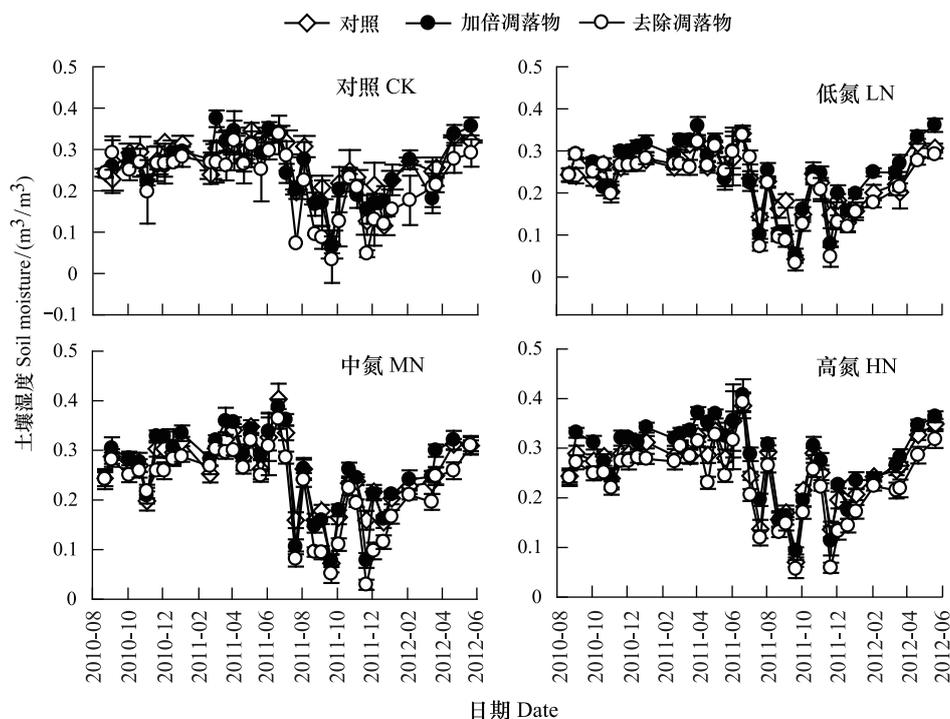


图2 4种施氮条件下去除凋落物、加倍凋落物和对照的土壤湿度季节动态

Fig.2 Seasonal pattern of soil moisture of different litter fall treatments with 4 nitrogen addition level

## 2.2 施氮及凋落物处理对土壤呼吸特征的影响

### 2.2.1 土壤呼吸的动态变化

土壤呼吸的季节性动态变化的原因主要为温度、植被类型、土壤理化性质、降水等。所以施氮处理,加倍凋落物及去除凋落物均不能对樟树林土壤呼吸的季节性变化规律。不同施氮处理以及凋落物处理土壤呼吸速率如图3所示,均呈现季节性变化。最大值出现在6—8月,最小值则出现在1月。不同处理对土壤呼吸的影响主要体现在变动的幅度上。

凋落物对照组的样地中,CK、LN、MN、HN 土壤呼吸的变化范围分别为 0.82—6.20、0.48—4.98、0.63—4.46、0.56—3.62  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;去除凋落物的样地中,CK、LN、MN、HN 土壤呼吸的变化范围分别为 0.24—4.25、0.51—3.68、0.52—4.32、0.69—4.25  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;添加凋落物处理的样地中,CK、LN、MN、HN 土壤呼吸的变化范围分别为 0.45—6.78、0.72—5.26、0.55—6.68、0.80—5.70  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

在4—10月,不同凋落物处理之间土壤呼吸存在显著差异,这是因为期间为植物生长旺盛期,对营养元素需求量大,凋落物为主要的营养库,增加或减少凋落物对其生长其至关重要的作用。

### 2.2.2 土壤呼吸的年均值变化

整个实验期内,4种施氮水平下,不同凋落物处理的土壤呼吸速率平均值如表2所示。除HN外,不同凋落物处理下,土壤呼吸年均值均表现为:添加凋落物>凋落物对照>去除凋落物。说明了添加凋落物促进了土壤呼吸,去除凋落物抑制了土壤呼吸。在凋落物对照组中,土壤呼吸速率平均值表现为:CK>MN>LN>HN,与CK相比,LN、MN、HN水平下,土壤呼吸分别降低了35.4%、30.6%、36.8%。且CK与LN、MN、HN存在显著差

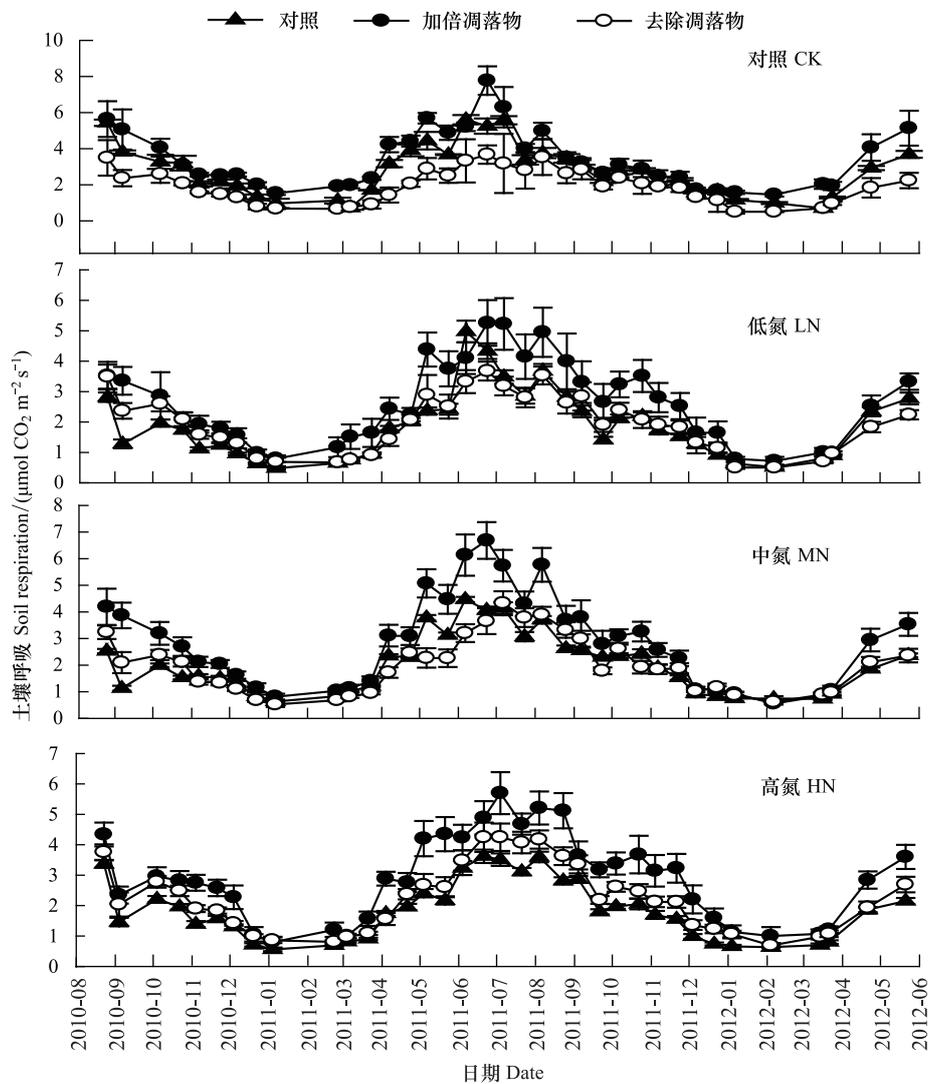


图3 4种施氮水平下去除凋落物、加倍凋落物和对照的土壤呼吸季节动态

Fig.3 Seasonal patterns of soil respiration of different treatments with No litter, Double litter and Control treated with 4 nitrogen addition levels

异( $P < 0.05$ )。表明了施氮对于土壤呼吸存在抑制作用,且这种抑制作用随着施氮浓度的上升先减小后增加。而添加凋落物处理中,土壤呼吸速率变现为:CK>HN>MN>LN,与CK相比,LN、MN、HN水平下,土壤呼吸分别降低了23.2%、15.8%、14.7%,与凋落物对照组相比,添加凋落物后,各施氮水平下,土壤呼吸的降低幅度较小,表明在添加凋落物之后,施氮对土壤呼吸仍存在显著的抑制作用,且这种抑制作用随着施氮水平的上升而下降,但添加凋落物会削弱施氮后产生的抑制作用。在去除凋落物处理中,土壤呼吸速率平均值表现为:HN>CK>MN>LN,与CK相比,LN、MN、HN水平下,土壤呼吸分别降低了3.5%、0.5%、-11.6%,且CK与LN、MN、HN处理间不存在明显差异,与凋落物对照相比,去除凋落物后,各施氮水平下,土壤呼吸的降低幅度下降,说明去除凋落物减弱了施氮对土壤呼吸的抑制作用,且这种削弱能力随着施氮水平的提高而增大。

### 2.2.3 土壤温度、土壤湿度与土壤呼吸的关系的变化

表3为运用线性方程对土壤呼吸和土壤湿度关系进行拟合后所得的方程参数,公式为 $SR = aW + b$ ,公式中的SR为土壤呼吸速率,W为5 cm处土壤湿度,结果表明土壤湿度仅可以解释土壤呼吸变异的0.3%—14.1%。

表 2 4 种施氮水平下凋落物处理的土壤呼吸年均值的比较

Table 2 Annual mean soil respiration of different litter treatments in nitrogen addition levels

处理 Treatments	对照 CK/ (g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	低氮 LN/ (g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	中氮 MN/ (g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	高氮 HN/ (g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )
凋落物对照 Litter control	2.88(0.26) aA	1.86(0.18) aB	2.00(0.18) aB	1.82(0.16) aB
添加凋落物 Litter addition	3.41(0.26) aA	2.62(0.22) aA	2.87(0.28) aA	2.91(0.23) bA
去除凋落物 Litter removal	1.99(0.17) bA	1.92(0.16) aA	1.98(0.18) aA	2.22(0.18) aA

大写字母 A 代表相同凋落物处理下,不同施氮水平下土壤呼吸的差异性,小写字母 a 代表统一施氮水平下,不同凋落物管理下土壤呼吸的差异性( $P < 0.05$ )

表 3 土壤呼吸与 5 cm 土壤湿度的回归方程

Table 3 Regression models of soil temperatures at 5 cm depth against soil respirations

施氮处理 Nitrogen treatment	处理方式 Treatments	方程参数 Equation parameters			
		$a_1$	$b_1$	$R^2$	$P$
CK	对照	4.705	-4.814	0.084	0.203
	添加凋落物	5.501	-6.756	0.129	0.109
	去除凋落物	3.368	-5.081	0.139	0.096
LN	对照	2.549	-1.831	0.017	0.570
	添加凋落物	4.507	-5.482	0.141	0.094
	去除凋落物	2.631	-1.845	0.022	0.524
MN	对照	2.478	-0.759	0.003	0.814
	添加凋落物	4.384	-3.232	0.032	0.436
	去除凋落物	3.458	-4.524	0.105	0.152
HN	对照	2.693	-2.176	0.036	0.411
	添加凋落物	3.817	-2.111	0.023	0.508
	去除凋落物	3.369	-3.339	0.058	0.293

表 4 为运用指数方程对土壤呼吸和土壤温度关系进行拟合后所得的方程,公式中的 SR 为土壤呼吸速率,T 为 5 cm 土壤温度,结果表明土壤温度可解释土壤呼吸呼吸变异的 47.76%—72.61%。

表 4 土壤呼吸与 5 cm 土壤温度回归方程

Table 4 Regression models of soil temperatures at 5 cm depth against soil respirations

施氮水平 N addition level	处理方式 Treatment	拟合方程 Regression model	$R^2$	$P$
CK	去除凋落物	$SR = 0.6286e^{0.0665T}$	0.5264	= 0.006
	添加凋落物	$SR = 0.2347e^{0.0963T}$	0.7261	= 0.002
	对照	$SR = 116.02e^{0.0678T}$	0.4939	= 0.001
LN	去除凋落物	$SR = 0.4612e^{0.0716T}$	0.5378	= 0.003
	添加凋落物	$SR = 0.6122e^{0.0732T}$	0.4984	= 0.008
	对照	$SR = 68.789e^{0.0703T}$	0.4963	= 0.013
MN	去除凋落物	$SR = 0.5067e^{0.0668T}$	0.5509	= 0.006
	添加凋落物	$SR = 0.7346e^{0.0746T}$	0.6047	= 0.001
	对照	$SR = 91.133e^{0.0568T}$	0.4776	= 0.001
HN	去除凋落物	$SR = 0.6326e^{0.0654T}$	0.5854	= 0.001
	添加凋落物	$SR = 0.6788e^{0.0742T}$	0.4939	= 0.001
	对照	$SR = 73.855e^{0.0672T}$	0.5198	= 0.001

### 3 讨论

#### 3.1 土壤呼吸的季节动态

在整个观测期间,氮沉降和凋落物处理并未该表土壤呼吸的季节变化规律,在不同的施氮处理以及不同

的凋落物处理下,樟树人工林土壤呼吸始终呈现明显的季节变化,2年的土壤呼吸速率最大值均出现在夏季(6—8月),最小值出现在冬季(1月)。这与国内外许多研究结果相似<sup>[19-20]</sup>。这是因为影响土壤呼吸的季节性变化的因素主要为温度、降水、土壤性质、植被条件等,土壤温度和土壤湿度主要受研究地的气候条件控制,研究地属于典型的大陆性中亚热带季风湿润气候,夏季温度较高,土壤微生物及土壤酶活性较高,促进了土壤呼吸,而冬季温度较低,限制了土壤微生物及酶活性,导致土壤呼吸速率较低<sup>[21]</sup>。而施氮处理与凋落物处理均并能改变土壤温度的季节性及其土壤湿度的波动性,所以无法对土壤呼吸的季节动态产生影响。

### 3.2 施氮及凋落物处理对土壤水热条件的影响

本研究中,在不同凋落物处理下,施氮均不会对土壤温度及土壤湿度产生影响,这与涂利华等<sup>[22]</sup>的研究一致。Bowden等<sup>[23]</sup>研究表明添加或去除凋落物会影响土壤温度及土壤湿度,但在本研究中,在不同施氮水平下,不同的凋落物处理,土壤温度不存在显著差异性( $P>0.05$ )。在各施氮水平,添加凋落物的土壤湿度要明显大于去除凋落物的土壤湿度( $P<0.05$ ),但凋落物对照组与添加凋落物组及去除凋落物之间的土壤湿度均不存在显著差异( $P>0.05$ )。这可能是由于研究样地的林分郁闭度较高,凋落物层对土壤起着保湿保温的效果,地表收到太阳直射较少,凋落物层对土壤的保湿保温的效果表现不明显,所以各施氮水平下,不同凋落物处理对土壤温度以及土壤湿度的影响不明显。

### 3.3 施氮及凋落物处理对土壤呼吸的影响

施氮处理与凋落物处理对土壤呼吸影响的过程是一个非常复杂的过程,它是通过各种直接(影响有机质的输入等)或者间接(改变土壤理化性质等)的过程影响土壤呼吸。研究表明,在施氮处理或凋落物处理的单一因素影响时,施氮对土壤呼吸速率的影响结果不一<sup>[18,24]</sup>,去除凋落物或添加凋落物会降低或增加土壤呼吸<sup>[23]</sup>。在本实验中,在自然状态下,施氮对土壤呼吸起抑制作用,与Janssens等<sup>[25]</sup>研究一致,且这种作用随着施氮量的上升而先下降后上升,分别为35.4%、30.6%、36.8%。氮添加会提高土壤中的离子浓度,从而降低了土壤渗透势,抑制微生物活性,从而导致土壤呼吸的降低<sup>[26-27]</sup>。自然状况下,去除凋落物使樟树人工林的土壤呼吸速率(即凋落物呼吸占土壤呼吸的比值)降低了30.9%,与邓琦等<sup>[28]</sup>对亚热带常绿阔叶林(27.82%)以及涂利华<sup>[22]</sup>对华西苦竹(31.0%)的研究相近。凋落物呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,去除凋落物会降低土壤表层呼吸从而降低土壤呼吸总量<sup>[29]</sup>,同时,去除凋落物会间接影响土壤的营养输入,抑制了植物的生长及萌发<sup>[30]</sup>,进而抑制土壤呼吸。另一方面,添加凋落物使土壤呼吸速率增加了18.4%,远小于去除凋落物所引起的土壤呼吸的降低,且与凋落物对照组以及去除凋落物具有显著差异性( $P<0.05$ )。添加凋落物直接影响了土壤碳输入的过程<sup>[31]</sup>,改变微生物群落,营养物质的输入促进了植物的生长与萌发<sup>[30]</sup>,从而促进了土壤呼吸造成影响,进而造成土壤呼吸的变化。

土壤呼吸可分为3个部分。第一个部分为凋落物呼吸,包括土壤有机质以及植物残留物所产生的 $\text{CO}_2$ ;第二部分是根系呼吸,包括植物根系呼吸以及根系微生物呼吸;第三部分是矿质土壤呼吸,包括含碳矿物质的化学氧化作用。本研究中,去除凋落物后,各施氮水平对土壤呼吸的抑制作用从凋落物对照组的35.4%、30.6%、36.8%到去除凋落物组的3.5%、0.5%、-11.6%。说明了去除凋落物能缓解施氮对土壤呼吸的抑制作用,主要的原因可能为:(1)施氮对土壤呼吸的抑制作用主要来源于施氮降低了凋落物呼吸<sup>[32]</sup>,去除凋落物使施氮对于凋落物呼吸部分的抑制作用无法实现,从而削弱施氮对土壤呼吸的影响。(2)长期施氮会减少根系生物量<sup>[33]</sup>而根系呼吸强度与植物细根含量成正比<sup>[34]</sup>,同时,根系呼吸产生的能量多用于营养元素的吸收、同化作用<sup>[35]</sup>,施氮使土壤中有效氮的含量增加,吸收氮所需的能量减小,降低了根系的呼吸强度。而去除凋落物后施氮对根系呼吸的抑制作用被凸显。(3)白英辰等<sup>[36]</sup>研究表明,施氮将促进矿质土壤呼吸,本研究中,去除凋落物后,在HN水平下,施氮对土壤呼吸呈现促进作用,说明HN水平下,施氮对矿质土壤呼吸的促进作用大于施氮对根系呼吸的抑制作用。

添加凋落物后,各施氮水平对土壤呼吸的抑制作用从凋落物对照组的35.4%、30.6%、36.8%到添加凋落物组的23.2%、15.8%、14.7%。说明添加凋落物同样可以缓解施氮对土壤呼吸的抑制作用。其主要原因可能

为:(1)施氮会改变 C/N,增加土壤有效氮含量,是土壤从 N 限制类型转变为 C 限制类型,最终的表现同样为降低土壤呼吸<sup>[37]</sup>。添加凋落物增加了土壤碳含量,解除了在同等施氮条件下的碳限制,增加了对 N 源的需求,从而减缓了施氮对土壤呼吸的抑制作用。(2)添加凋落物能够改善土壤中的营养状况,促进微生物的数量及活力,从而产生了正激发效应<sup>[38]</sup>,从而缓解了施氮对土壤呼吸产生的抑制作用。(3)添加凋落物能够增加植物向地下营养元素的输入,促进植物的萌发和生长,从而提高植物根系的生长<sup>[31]</sup>,抵消了植物根系因施氮造成的抑制作用,从而减缓施氮造成的土壤呼吸的抑制作用。本研究表明,添加或去除凋落物后,影响了施氮对土壤呼吸产生的抑制作用,足以说明凋落物管理与施氮存在交互作用,且这种作用为添加或去除凋落物均减缓了施氮对土壤呼吸产生的抑制作用。

#### 4 结论

本研究中,施氮对土壤呼吸起抑制作用,添加凋落物对土壤呼吸起促进作用,去除凋落物对土壤呼吸起抑制作用。但添加或去除凋落物均会削弱施氮对土壤呼吸的抑制作用,且这种作用随着施氮水平的提高而增强。氮添加与凋落物处理后,土壤呼吸与土壤温度存在显著的相关性( $P < 0.05$ ),与土壤湿度存在不显著的正相关( $P > 0.05$ )。本研究说明了在氮沉降增加的影响下,凋落物管理将通过影响樟树人工林土壤呼吸从而影响生态系统碳排放,为樟树人工林经营管理提供理论依据。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Pinder R W, Davidson E A, Goodale C L, Greaver T L, Herrick J D, Liu L L. Climate change impacts of US reactive nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(20): 7671-7675.
- [ 2 ] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [ 3 ] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO<sub>2</sub> stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [ 4 ] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的相应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [ 5 ] Lovett G M, Arthur M A, Weathers K C, Fitzhugh R D, Templer P H. Nitrogen addition increases carbon storage in soils, but not in trees, in an eastern U.S. deciduous forest. *Ecosystems*, 2013, 16(6): 980-1001.
- [ 6 ] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [ 7 ] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2/3): 227-238.
- [ 8 ] Liu L L, Greaver T L. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 819-828.
- [ 9 ] 韩雪, 王春梅, 蔺照兰. 模拟氮沉降对温带森林凋落物分解的影响. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1503-1508.
- [ 10 ] Zhao C Z, Zhu L Y, Liang J, Yin H J, Yin C Y, Li D D, Zhang N N, Liu Q. Effects of experimental warming and nitrogen fertilization on soil microbial communities and processes of two subalpine coniferous species in Eastern Tibetan Plateau, China. *Plant and Soil*, 2014, 382(1/2): 189-201.
- [ 11 ] Sun Z Z, Liu L L, Ma Y C, Yin G D, Zhao C, Zhang Y, Piao S L. The effect of nitrogen addition on soil respiration from a nitrogen-limited forest soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 197: 103-110.
- [ 12 ] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Nitrogen fertilization inhibits soil microbial respiration regardless of the form of nitrogen applied. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2336-2338.
- [ 13 ] Kamble P N, Rousk J, Frey S D, Bååth E. Bacterial growth and growth-limiting nutrients following chronic nitrogen additions to a hardwood forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 59(2): 32-37.
- [ 14 ] Sayer E J, Wright S J, Tanner E V J, Yavitt J B, Harms K E, Powers J S, Kaspari M, Garcia M N, Turner B L. Variable responses of lowland tropical forest nutrient status to fertilization and litter manipulation. *Ecosystems*, 2012, 15(3): 387-400.
- [ 15 ] Xu S, Liu L L, Sayer E J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7423-7433.
- [ 16 ] Bowden R D, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [ 17 ] Wan S Q, Luo Y Q. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: results of a clipping and shading experiment. *Global*

- Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1054.
- [18] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(27): 10316-10321.
- [19] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的相应. 植物生态学报, 2009, 33(4): 728-738.
- [20] Deng Q, Zhou G, Liu J, Liu S, Duan H, Zhang D. Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in subtropical forest ecosystems in China. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6(4): 8359-8391.
- [21] Peng S S, Piao S L, Wang T, Sun J Y, Shen Z H. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 1008-1014.
- [22] 涂利华. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹人工林生态系统碳循环过程和特征的影响. 博士: 四川农业大学, 2011.
- [23] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, Melillo J M, Garrison J B. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(7): 1402-1407.
- [24] Cusack D F, Torn M S, McDowell W H, Silver W L. The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils. *Global Change Biology*, 2010, 16(9): 2555-2572.
- [25] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [26] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1111-1120.
- [27] Phillips R P, Finzi A C, Bernhardt E S. Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO<sub>2</sub> fumigation. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 187-194.
- [28] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 孟泽, 张德强. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素. 地球科学进展, 2007, 22(9): 976-986.
- [29] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, Lajtha K. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO<sub>2</sub> efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 231-256.
- [30] Matsushima M, Chang S X. Vector analysis of understory competition, N fertilization, and litter layer removal effects on white spruce growth and nutrition in a 13-year-old plantation. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236(2/3): 332-341.
- [31] Haeussler S, Kabzems R. Aspen plant community response to organic matter removal and soil compaction. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(8): 2030-2044.
- [32] Micks P, Downs M R, Magill A H, Nadelhoffer K J, Aber J D. Decomposing litter as a sink for <sup>15</sup>N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 71-87.
- [33] Micks P, Aber J D, Boone R D, Davidson E A. Short-term soil respiration and nitrogen immobilization response to nitrogen applications in control and nitrogen-enriched temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 57-70.
- [34] Pregitzer K S, Laskowski M J, Burton A J, Lessard V C, Zak D R. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth. *Tree Physiology*, 1998, 18(10): 665-670.
- [35] Bloom A J, Sukrapanna S S, Warner R L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*, 1992, 99(4): 1294-1301.
- [36] 白英辰, 陈晶, 康峰峰, 程小琴, 韩海荣, 朱江. 模拟氮沉降下不同凋落物处理对太岳山华北落叶松林土壤呼吸的影响. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 92-99.
- [37] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez I. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited. *Bioscience*, 1998, 48(11): 921-934.
- [38] Hamer U, Marschner B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 445-454.