

毛竹原状和粉状叶片分解特征对施氮和温度的响应

郭春兰^{1,2}, 方向民^{1*}, 李佩擎¹, 张 扬¹, 杨光耀¹,
陈伏生¹, LI Jian-wei²

(1. 江西农业大学林学院 江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 江西 南昌 330045;

2. Department of Agricultural and Environmental Sciences, Tennessee State University, Nashville TN 37209, U. S. A)

摘要: [目的] 毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 叶片分解与竹林碳循环和养分周转关系密切, 通过室内模拟氮沉降和温度升高试验, 为预测未来气候变暖和氮沉降条件对凋落竹叶分解的调控提供参考, 为科学管理毛竹林提供科学依据。 [方法] 以毛竹原状叶片及粉状叶片 (粉碎过 2 mm) 为研究对象, 布设 3 因素 2 水平试验, 即施氮 (添加氮 5 mg · g⁻¹) 和不加氮对照, 12 °C 和 28 °C 培养温度, 原状和粉状叶片, 恒温箱中培养 78 d, 采用密闭碱液吸收法定期测定 CO₂ 释放量, 并计算分解速率。 [结果] 表明: 施氮处理、培养温度和叶片形态及其交互作用对凋落竹叶分解速率的影响因培养阶段不同而存在差异, 总体上表现为培养前期 (0—23 d) 和培养中期 (24—48 d) 的分解速率高于培养后期 (49—78 d)。从均值来看, 施氮处理抑制原状叶片在 12 °C 培养下的分解速率, 而对两种形态叶片在 28 °C 培养条件的分解速率影响不显著; 施氮处理可增加原状凋落竹叶分解速率的温度敏感性 (Q_{10}), 但对粉状凋落竹叶分解速率的 Q_{10} 值影响不显著, 且原状凋落竹叶分解速率的 Q_{10} 值高于粉状凋落叶。凋落竹叶 C/N 在培养后期显著升高, 且氮添加显著促进粉状竹叶 C/N 增加。 [结论] 氮沉降对毛竹凋落叶分解的影响效应与培养温度和叶片形态有关。凋落物分解的影响因素众多, 凋落物分解对全球环境变化的响应不仅应该深入研究其化学和生物学机制, 还要关注物理过程及其调控潜能。

关键词: 大气氮沉降; 全球变暖; 凋落物分解; 物理机制; 毛竹林

中图分类号: S795.7

文献标识码: A

Response of Decomposition Feature of the Original and Powdered Moso Bamboo (*Phyllostachys edulis*) Leaves to Nitrogen and Temperature

GUO Chun-lan^{1,2}, FANG Xiang-min¹, LI Pei-qing¹, ZHANG Yang¹, YANG Guang-yao¹,
CHEN Fu-sheng¹, LI JIAN-wei²

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Forestry College, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiayi, China; 2. Department of Agricultural and Environmental Sciences, Tennessee State University, Nashville TN 37209, U. S. A)

Abstract: [Objective] Decomposition of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie) leaves and carbon and nutrient cycling of Moso bamboo forest are closely related. The research on atmospheric nitrogen deposition and global warming environmental changes on Moso bamboo leaves decomposition aims at providing a theoretical

收稿日期: 2015-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(31360179)、国家留学基金(留金发[2015]3069号)、江西特色林木资源培育与利用 2011 协同创新中心项目((2016—2017)、江西省科技厅项目(20153BCB22008)、江西省高等学校科技落地计划项目(KJLD14028)和江西省科技支撑计划项目(20142BBG70003)

作者简介: 郭春兰(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事森林生态学的研究, E-mail: lan151@126.com

* 通讯作者: 方向民, 博士, 主要从事森林碳循环研究, E-mail: xmfang2013@126.com

basis for the current countermeasures of bamboo forest management. [Method] The original leaves and powdery leaves of Moso bamboo (through the 2 mm sieve) was tested at three factors and two levels of completely randomized trial, i. e. added nitrogen ($5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) and controls without nitrogen, cultivated temperature at 12°C and 28°C , original leaves and powdery leaves, cultured in incubator for 78 days, the CO_2 emissions were measured periodically by the sealed alkali absorption method, and the rate of decomposition were calculated. [Result] The effects of nitrogen fertilizer treatment, temperature and leaf shape and their interactions on the decomposition rate of Moso bamboo litter leaves were different at different periods. On the whole, the decomposition rate of Moso bamboo litter leaves were faster in pre-cultured (0–23 d) and mid-cultured (24–48 d) than that in post-cultured (49–78 d). The added nitrogen treatment inhibited the decomposition rate of original leaves at 12°C in mean, while it had no significant effects on those of the two morphological leaves at 28°C . The temperature sensitivity (Q_{10}) of original leaves decomposition rate increased by the treatment of added nitrogen, but the effect of added nitrogen on the Q_{10} of powdered litter leaves was not significant. Meanwhile, the Q_{10} of original bamboo litter decomposition rate was higher than that of powdery litter leaves. In addition, the C/N of bamboo leaf litter increased significantly after culture, and the increase in the powdery bamboo leaves with the nitrogen addition was more dominant. [Conclusion] The effects of nitrogen deposition on litter decomposition of Moso bamboo are related to cultivation temperature and leaf morphology. In summary, the impact of litter decomposition is numerous, so the study on the response of litter decomposition to global climate change should not only focus on its chemical and biological mechanism, but also on the physical process and its regulatory potentials.

Keywords: atmospheric N deposition; global warming; litter decomposition; physical mechanism; Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*)

凋落物分解是森林生态系统生物地球化学循环中的重要环节,在维持森林生产力、土壤有机质、养分供应、群落演替等方面具有不可替代的作用。一般来说,凋落物的分解主要受气候、凋落物质量和土壤生物等因素控制^[1-2]。通常认为气候是决定凋落物失重速率的重要因素,其中温度和湿度是最为重要的因子^[3]。已有研究表明,温度升高可加快凋落物养分释放速度^[4],增加营养元素的有效性^[5],进而提高微生物的活性,从而加快凋落物的分解和养分元素的循环^[6-7]。目前,氮(N)沉降已成为全球最重要的环境问题之一^[8-9],我国是N沉降的核心分布区,N沉降不仅会引发一系列环境问题,如生物多样性丧失、大气污染等^[10],同样会对凋落物的分解产生影响^[11-12]。凋落物内源氮的释放可减缓微生物的氮限制而加快凋落物中碳(C)分解^[13-14],因此低C/N的凋落物更容易分解,而外加N源对森林凋落物分解速率的影响尚无统一结论,其作用包括促进^[15-16]、抑制^[17-18]或无影响^[19]等3种情况,相关机制有待进一步研究。

毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)是我国栽培悠久、面积最广的散生竹种,广泛分布于我国南方地区,是我国最重要的森林资源之

一^[20-22],由于具有笋用、材用和生物质能源等多种用途,也成为我国南方山区农民经济收入的重要来源^[23-24]。由于毛竹林的资源优势和产业地位及叶片分解在竹林C和N等物质循环中的重要性,已有很多学者开展了毛竹凋落竹叶分解方面的研究,但其对N沉降和温度升高等的响应规律及其机制尚有争议。与此同时,部分学者^[25-26]为简化试验条件和缩短试验时间,将凋落竹叶粉碎开展室内模拟试验以探讨影响凋落竹叶分解的化学和生物学机制,但这种样品处理方式是否影响试验结果鲜有报道。基于此,本研究通过室内模拟N沉降和温度升高试验,选择原状和粉状(物理粉碎)凋落竹叶为研究对象,拟检验以下科学假设:(1)N添加促进凋落竹叶的分解,且粉状凋落竹叶与外源N接触更充分,其促进效果比原状凋落竹叶更明显;(2)原状凋落竹叶分解速率对温度的响应即温度敏感性弱于粉状凋落竹叶;(3)N添加和温度升高对凋落竹叶分解具有耦合效应,N添加引发凋落竹叶内在质量改变,而温度升高提供更有利于微生物活动的环境,两者共同加剧凋落竹叶的分解。研究结果可为预测未来气候变暖和N沉降条件对凋落竹叶分解的调控提供参考,为科学管理毛竹林提

供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省南昌市江西农业大学毛竹定向培育示范基地。该区地处亚热带,为典型亚热带季风气候,四季分明,气候温和,雨量充沛,年均气温 17.5 °C,年均降水量 1 611.2 mm,年均日照时数 1 808.5 h,无霜期约 265 d。土壤为典型棕红壤,适宜竹林生长。

1.2 试验设计

于 2014 年 9 月和 2015 年 3 月,采用凋落物收集框收集足量的毛竹凋落叶,带回实验室,60 °C 下烘干后装袋保存。2015 年 7 月,将收集到的毛竹凋落叶分成 2 份,一份保持竹叶原状,一份磨碎后过 2 mm 筛。2 类竹叶样品分别进行加氮(N)和不加 N 处理后,放入 12 °C 和 28 °C 恒温培养箱培养,每个试验处理 5 次重复。具体试验处理为 4 种:原状凋落叶未加 N(W-N);原状凋落叶加 N(W+N);粉状凋落叶未加 N(F-N)和粉状凋落叶加 N(F+N)。整体试验为 3 因素 2 水平 5 重复,共培养样品 40 个。

1.3 竹叶分解培养

分别称取原状和粉状凋落叶 15 g,装入 500 mL PVC 罐,共计 40 罐,其中一半进行加 N 处理,添加 75 mg N(5 mg · g⁻¹ 竹叶, NH₄NO₃),之后每罐分别添加 1 mL 竹林土壤溶液^[27](土壤:蒸馏水 = 1:99,100 r · min⁻¹ 震荡 30 min 后,离心取上清液)以补充微生物,并添加蒸馏水使其含水量保持在 18%,之后分别放入 12 °C 和 28 °C 培养箱中培养,以模拟植物生长的临界温度和南昌的平均气温,每天补充水分,保持恒质量。

采用密闭碱液吸收法于第 3、13、23、33、48、63 和 78 d 测定 CO₂ 释放量,计算其分解速率^[28]。依据分解阶段的不同,本研究定义 0—23 d 为培养前期,24—48 d 为培养中期,49—78 d 为培养后期。

同时,根据不同温度下凋落叶的分解速率,采用指数关系模拟计算温度敏感系数 Q_{10} ^[29]:

$$R = ae^{bt}, Q_{10} = e^{10b}$$

式中, R 为凋落叶分解速率; t 为培养温度; a , b 为待定系数。

1.4 竹叶养分测定^[30]

培养前,将烘干的竹叶样品磨碎后测定 C、N 和

P 含量;培养结束后,将培养罐中剩余的凋落叶 65 °C 烘干,磨碎后测定 C、N、P 含量。其中有机 C 含量采用硫酸-重铬酸钾氧化外加热法测定;浓 H₂SO₄ 消煮后,采用全自动凯氏定氮法和碱熔-钼锑抗比色法测定全 N 和全 P 含量。

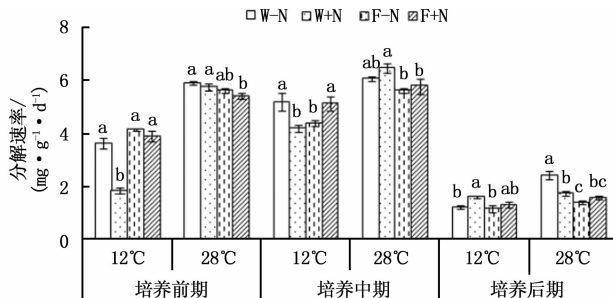
1.5 数据处理

采用单因素多重比较分析 4 种处理对凋落竹叶分解速率和温度敏感性的影响。采用 3 因素方差分析法比较施氮、培养温度和凋落竹叶形态及其交互作用对不同培养阶段分解速率的影响。所有数据分析均使用 SPSS 17.0 软件。

2 结果与分析

2.1 凋落竹叶的分解速率

毛竹凋落叶分解速率在不同培养时期差异显著,其中培养前期和中期分解速率高,培养后期分解速率低(图 1)。施 N 处理对凋落竹叶分解速率的影响因培养阶段不同存在差异,12 °C 培养下,施 N 处理显著降低前期和中期原状凋落叶的分解速率,而提高培养后期凋落竹叶的分解速率。28 °C 培养下,施 N 仅显著降低培养后期原状凋落竹叶的分解速率。对于粉状凋落竹叶,施 N 处理提高 2 个温度下培养中期和后期竹叶的分解速率。均值显示施 N 处理抑制了 12 °C 培养条件下原状竹叶的分解速率,但对 28 °C 条件下两种形状竹叶无显著影响。温度升高会加快凋落叶的分解,在不同培养阶段 28 °C 条件下凋落叶的分解速率都高于 12 °C,且 12 °C 培养条件下,竹叶分解速率对加 N 的响应更敏感。从均值来看,施 N 处理后,12 °C 培养条件下粉状凋落竹叶的分解速率大于原状凋落竹叶,而 28 °C 培养下粉状凋落竹叶分解速率小于原状凋落竹叶。



注:W-N:原状凋落叶未加氮处理。W+N:原状凋落叶加氮处理。F-N:粉状凋落叶未加氮处理。F+N:粉状凋落叶加氮处理,下同。

图 1 不同温度下施氮处理和叶片形态对凋落竹叶分解速率的影响

方差分析表明,施 N 处理、叶片形态和培养温度对凋落竹叶分解速率都有显著影响(表 1)。N 添加处理显著影响培养前期凋落竹叶分解速率($p < 0.001$),而培养中期、后期凋落竹叶分解速率对施 N 的响应不显著;培养前期、培养后期凋落竹叶分解速率对凋落竹叶形态的响应极显著($p < 0.001$),培养中期的分解速率对凋落竹叶形态响应不显著;温度显著影响整个培养期凋落竹叶的分解速率;除培养中期 N 添加和温度对凋落竹叶分解速率影响无交互作用外,叶形与 N 添加、叶形与温度、N 添加与温度对凋落竹叶分解速度的影响均有交互作用,且施 N 处理、叶片形态和温度三因素交互作用对 3 个分解时期凋落竹叶分解速率的影响显著($p < 0.01$)。

表 1 施氮处理、叶片形态和温度对凋落竹叶分解速率影响的方差分析(F 值)

项目	培养前期	培养中期	培养后期
施氮	40.18 ^{***}	0.30 ^{ns}	0.05 ^{ns}
温度	589.62 ^{***}	73.19 ^{***}	40.55 ^{***}
叶形	25.35 ^{***}	3.07 ^{ns}	28.70 ^{***}
施氮 × 温度	19.86 ^{***}	1.89 ^{ns}	11.97 ^{**}
施氮 × 叶形	15.70 ^{***}	6.69 [*]	4.51 [*]
温度 × 叶形	71.78 ^{***}	4.73 [*]	8.73 ^{**}
施氮 × 温度 × 叶形	17.68 ^{***}	11.12 ^{**}	14.14 ^{***}

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ^{ns} 无显著差异。下同。

2.2 凋落竹叶分解的温度敏感性

凋落竹叶分解速率的温度敏感性 Q_{10} 值在不同培养时期差异不显著,其平均值维持在 1.28 左右(图 2)。凋落竹叶的形态显著影响其分解速率 Q_{10} 值。对粉状凋落竹叶来说,其分解速率 Q_{10} 值在 3 个培养阶段差异不显著,且不受 N 添加的影响,而原状凋落竹叶 Q_{10} 均值高于粉状竹叶,且易受 N 添加的影响,在培养前期和中期,原状竹叶 N 添加后显著提高了 Q_{10} 值,而分解后期 Q_{10} 在 N 添加后显著降低。从整个培养期来看,施 N 增加了原状凋落叶分解速率的温度敏感性,但对粉状凋落叶无显著影响(图 2)。

表 2 为施 N 处理和叶形态对凋落竹叶分解过程 Q_{10} 值影响的方差分析结果。施 N 处理显著影响凋落竹叶分解培养前期、后期的 Q_{10} 值($p < 0.01$),但施 N 处理对培养中期的 Q_{10} 值无显著影响;凋落竹叶形态对其分解的 Q_{10} 值影响主要表现在培养前期和中期;且凋落竹叶形态和施氮处理对凋落竹叶分

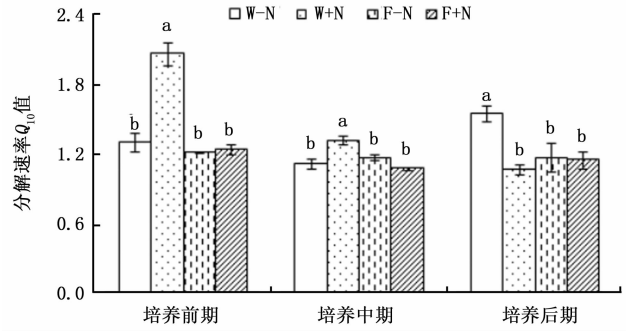


图 2 施氮处理和叶片形态对凋落竹叶温度敏感性 Q_{10} 值的影响

解 Q_{10} 值的影响具有交互作用($p < 0.05$)。

表 2 施氮和叶片形态对凋落竹叶分解 Q_{10} 值方差分析(F 值)

项目	培养前期	培养中期	培养后期
施氮	32.73 ^{***}	3.31 ^{ns}	10.10 ^{**}
叶形	44.06 ^{***}	8.71 ^{**}	3.41 ^{ns}
叶形 × 施氮	28.51 ^{***}	22.85 ^{***}	8.23 [*]

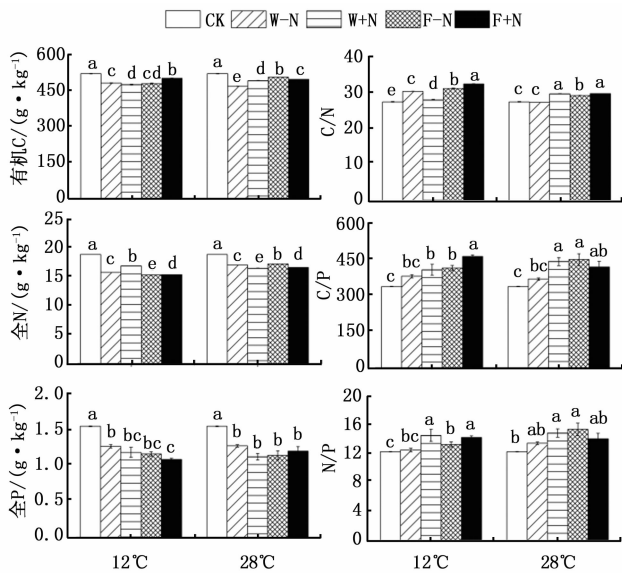
2.3 凋落竹叶的营养含量及其化学计量比

凋落竹叶未分解前有机 C 含量为 $517.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 N 含量 $18.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 P 含量为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 经 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养 78 d 后,有机 C、全 N 和全 P 含量都显著降低,其最低值分别为 $465.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($28 \text{ }^{\circ}\text{C}$, W-N 处理), $15.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($12 \text{ }^{\circ}\text{C}$, F-N 处理)和 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($12 \text{ }^{\circ}\text{C}$, F+N 处理)。凋落竹叶的 C/N、C/P 和 N/P 经 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养后都显著升高。

$12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养条件下,原状竹叶施 N 处理后凋落叶有机 C 含量显著降低,粉状凋落叶有机 C 含量显著提高,而在 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养条件下,原状和粉状凋落叶有机 C 含量变化呈相反趋势(图 3)。施 N 处理后凋落竹叶全 N 含量在 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养下显著升高,而 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养下显著降低。培养后凋落叶全 P 含量对施氮处理响应不显著。除 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养下的原状凋落竹叶 C/N 外,施 N 处理显著提高了凋落竹叶的 C/N、C/P 和 N/P(图 3)。

2.4 凋落竹叶养分含量与分解速率的相关性

相关分析显示凋落竹叶培养前期、中期和后期的分解速率与凋落竹叶全 N 含量显著正相关($p < 0.05$),即凋落竹叶全 N 含量越高,分解越快。且在分解阶段后期,分解速率与有机 C 含量和 C/N 呈负相关,即有机碳含量和 C/N 比越高,分解越慢。全 P、C/P 和 N/P 与凋落竹叶分解速率均不显著。



注:CK:凋落竹叶未培养;W-N:原状凋落竹叶未加氮处理;W+N:原状凋落竹叶加氮处理;F-N:粉状凋落竹叶未加氮处理;F+N:粉状凋落竹叶加氮处理

图3 不同温度下施氮处理和竹叶形态对凋落竹叶的化学计量比的影响

表3 不同培养阶段凋落竹叶养分含量与分解速率的相关分析

项目	有机C	全N	全P	C/N	C/P	N/P
培养前期	0.30	0.32*	0.00	-0.12	0.07	0.12
培养中期	0.24	0.35*	-0.04	-0.18	0.09	0.18
培养后期	-0.40*	0.55***	0.20	-0.67***	-0.26	0.05

3 讨论

竹林凋落物分解是竹林养分循环和归还的重要环节,其分解过程受环境因子、分解者的组成和结构,以及凋落物本身性质所决定;且在不同的气候区以及不同的分解阶段,凋落物分解的影响因子可能发生变化^[31]。N沉降是全球变化的重要现象之一,通过施N试验可以模拟N沉降对生态系统的影响,施N可以增加凋落物分解过程中外源N的含量,影响凋落物分解过程,进而改变凋落物的分解速率^[32]。本研究发现施N后竹林凋落竹叶的分解速率受到培养温度和凋落竹叶形态的交互影响。12℃培养下,原状凋落竹叶分解速率在前期和中期受N添加的抑制,而培养后期促进;但在28℃培养下,前、中期对N添加响应缓慢,但培养后期N添加抑制原状竹叶分解。相对于原状竹叶,N添加对粉状凋落竹叶分解都表现为促进作用。微生物是凋落物的主要分解者,微生物的活性和组成将影响凋落

物的分解速率。

一般认为,N的加入可以缓解N对微生物活动的限制,为微生物对底物的分解创造更有利的条件,从而促进凋落物分解。然而,微生物的活性同样受到基质中C源的限制^[33]。在低温培养前期和中期,微生物活性相对较低,由于外源N的添加,导致微生物在分解过程中C供应受到限制;另一方面,外加N也可能与凋落物分解中的C结合,减少微生物活动C的有效性,最终导致原状凋落叶的分解速率降低,而在培养后期,随着凋落叶的逐渐分解,微生物的C的限制性得到缓解,N的供应改善了微生物的养分条件,反而促进凋落物分解。28℃培养条件下,N添加在前期和中期对分解速率无显著影响,后期有抑制作用,这可能与分解过程中,早期纤维素分解快,C源损失过快,而后期木质素降解的阻碍,加剧了凋落物分解后期的能量缺乏,分解速率下降。粉状凋落叶分解速率在2个温度培养的中期和后期都表现为N添加的促进作用,可能是由于前期的物理粉碎增加了微生物对凋落物分解的容易程度,另一方面增加了微生物和底物的接触面积,因此N添加后降低了N对微生物的限制,导致微生物活性增强分解加快,粉状凋落竹叶分解速率增加。可见,不同形态凋落物分解速率及其对N添加的响应不同,因此在室内模拟培养时要关注凋落物形态对分解结果的影响。

温度作为影响生命活动的主导因子,对微生物的数量和酶的活性有着重要影响,进而对凋落物的分解起着主导作用^[34]。在生态系统尺度,森林凋落物分解速率随温度的变化研究可通过纬度变化形成的气温梯度来实现。Berg等^[19]对寒温带至亚热带及地中海区域松类凋落物的分解状况的研究发现,气候在大尺度上决定着凋落物的分解速率,且凋落物的分解速率随着平均气温的升高逐渐增加。本研究也发现凋落竹叶的分解速率在3个培养时期都受到温度的显著影响,并且温度和N添加及叶形之间对凋落竹叶分解速率影响有交互作用(表1)。4种处理下 Q_{10} 值的均值都是1.28左右,说明温度升高对凋落物的分解具有显著的促进作用,但不同处理间 Q_{10} 值存在显著差异,表明不同形态凋落竹叶在N添加条件下会影响其分解速率对温度变化的敏感程度(图2)。由于凋落物的形态不同,微生物的C源供应不同,在培养前期,原状凋落竹叶C供应不足,温度升高提高微生物活性,因此N添加可显著提高

竹叶分解的 Q_{10} 值;在培养后期,凋落竹叶分解速率可能主要受到木质素/N 比的制约,N 添加后凋落物分解的温度敏感性 Q_{10} 值降低。对于粉状凋落竹叶来说,尽管温度升高增加了其分解速率,但由于物理粉碎增加了基质的可分解性,C 源供应相对充足,微生物没有因为 N 的添加,表现出更强的分解作用。

凋落物的质量会随着分解过程发生改变^[35],本研究发现凋落竹叶 C、N 的含量经过培养分解后显著降低,但与我们科学假设不同的是,培养 78 d 后凋落竹叶的 C/N 随着凋落物的分解表现出增加的趋势,说明 C 的释放速率要慢于 N,且凋落竹叶内源 C/N 的变化与 N 添加有关,研究发现 N 添加加剧了 C/N 的升高。N 的净释放主要由凋落物中 N 的初始含量和凋落物 C/N 来驱动,其机理在于凋落物中 N 的初始含量能否满足微生物等分解者对 N 的需求,因为微生物分解者只有当其 N 需求被满足之后才可能释放 N^[36-37],本研究中外源 N 添加满足了凋落物分解对 N 的需求,导致凋落物中 N 的大量释放,最终引起 C/N 升高。

4 结 论

施 N 和温度对毛竹凋落叶分解的影响有交互作用,且与叶片形态有关。施 N 处理抑制了 12℃ 培养条件下原状竹叶的分解速率,但对 28℃ 条件下两种形态竹叶无显著影响。温度升高会加快凋落叶的分解,施 N 处理后,12℃ 培养条件下粉状凋落竹叶的分解速率大于原状凋落竹叶,而 28℃ 培养下粉状凋落竹叶分解速率小于原状凋落竹叶。凋落竹叶的形态显著影响其分解速率 Q_{10} 值。粉状凋落竹叶分解速率 Q_{10} 值不受 N 添加的影响,而原状凋落竹叶 Q_{10} 均值高于粉状竹叶,且易受 N 添加的影响,施 N 增加了原状凋落叶分解速率的温度敏感性,但对粉状凋落叶无显著影响。相关分析显示凋落竹叶分解速率与其全 N 含量显著正相关。可见,氮沉降对毛竹凋落叶分解的影响效应与培养温度和叶片形态有关。凋落物分解的影响因素众多,其对全球环境变化的响应研究不仅应关注分解的化学和生物学机制,还要关注物理过程及其调控潜能。

参 考 文 献:

[1] 杨万勤,邓仁菊,张 健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
 [2] Chen, F S, Feng X, Liang C. Endogenous versus exogenous nutrient affects C, N, and P dynamics in decomposing litters in mid-sub-

tropical forests of China [J]. Ecological Research, 2012, 27: 923-932.
 [3] Peng S L, Liu Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(9): 1534-1544.
 [4] Peter john W T, Melillo J M, Steudler P A, et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimental elevated soil temperature [J]. Ecological Applications, 1994, 4: 617-625.
 [5] Van Cleve K, Oechel W C, Horn J L. Response of black spruce (*Picea mariana*) ecosystem to soil temperature modification in interior Alaska [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20: 1530-1535.
 [6] 刘瑞鹏,毛子军,李兴欢,等. 模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5661-5667.
 [7] 邵土奎,何宗明,黄志群,等. 不同年龄序列杉木人工林凋落物数量、组成及动态变化[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(4): 638-644.
 [8] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change [J]. Ambio, 2002, 31(2): 64-71.
 [9] 涂利华,胡庭兴,张 健,等. 模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1547-1557.
 [10] 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[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1503-1508.
 [11] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems [J]. Environmental Reviews, 1997, 5: 1-25.
 [12] 魏 强,凌 雷,王多锋,等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及其影响因子[J]. 林业科学研究, 2015, 28(6): 818-825.
 [13] 汪金松,赵秀海,张春雨,等. 改变 C 源输入对油松人工林土壤分解的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2768-2777.
 [14] 陈伏生. 城乡梯度森林生态过程研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
 [15] Hobbie S E, Gough L. Litter decomposition in moist acidic and non-acidic tundra with different glacial histories [J]. Oecologia, 2004, 140: 113-124.
 [16] Limpens J, Berendse F. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing Sphagnum [J]. Oikos, 2003, 103: 537-547.
 [17] Prescott C E. Dose nitrogen availability control rates of litter decomposition in forest [J]. Plant and Soil, 1995, 168: 83-88.
 [18] Prescott C E, Bleuins L L. Litter decomposition in British Columbia forests influences of forestry activities [J]. Journal of Ecosystems and Management, 2004, 5(2): 30-43.
 [19] Berg B, Ekbohm G. Litter mass loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types Long-term decomposition in a Scots pine forest [J]. VII. Can J Bot, 1991, 69: 1449-1456.
 [20] 董敦义,李子川,桂仁意,等. 夏季与秋季钩梢对 5 年生毛竹竹材物理力学性质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(2): 225-230.

- [21] 李迎春, 杨清平, 郭子武, 等. 毛竹林持续高温干旱灾害特征及影响因素分析[J]. 林业科学研究, 2015, 28(5): 646–653.
- [22] 杨清培, 杨光耀, 宋庆妮, 等. 竹子扩张生态学研究: 过程、后效与机制[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 110–124.
- [23] 孙棣棣, 徐秋芳, 田甜, 等. 不同栽培历史毛竹林土壤微生物生物量及群落组成变化[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 181–186.
- [24] Li Z J, Jiang Z H, Cai Z Y, *et al.* Dynamic mechanical thermal analysis of moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) at different moisture content[J]. BioResources, 2012, 7(2): 1548–1557.
- [25] 唐轶琳, 周本智, 邓宗付, 等. 不同海拔高度毛竹林凋落量动态分析[J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 214–219.
- [26] 刘广路, 范少辉, 官凤英, 等. 毛竹凋落叶组成对叶凋落物分解的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1598–1603.
- [27] Fang X M, Chen F S, Wan S Z, *et al.* Topsoil and deep soil organic carbon concentration and stability vary with aggregate size and vegetation type in subtropical China [J]. PLoS ONE, 2015, 10(9): e0139380. doi:10.1371/journal.pone.0139380.
- [28] Zou L Q, Chen F S, Duncan D S, *et al.* Reforestation and slope-position effects on nitrogen, phosphorus pools, and carbon stability of various soil aggregates in a red soil hilly land of subtropical China [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2015, 45: 26–35.
- [29] 代景忠, 卫智军, 何念鹏, 等. 封育对羊草草地土壤碳矿化激发效应和温度敏感性的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1226–1236.
- [30] 国家林业局. LY/T 1228 /1241–1999 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [31] 翁俊, 顾鸿昊, 王志坤, 等. 氮沉降对毛竹叶片生态化学计量特征的影响[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 63–70.
- [32] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3127–3136.
- [33] Chen F S, Duncan D S, Hu X F, *et al.* Exogenous nutrient manipulations alter endogenous extractability of carbohydrates in decomposing foliar litters under a typical mixed forest of subtropics [J]. Geoderma, 2014, 214–215.
- [34] 宋新章, 江洪, 张慧玲. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4414–4423.
- [35] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 等. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 779–787.
- [36] 郭宝华, 刘广路, 范少辉, 等. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷的分布格局和计量特征[J]. 林业科学, 2014, 50(6): 1–8.
- [37] Parton W, Silver W L, Burke I C, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition [J]. Science, 2007, 315: 361–364.

(责任编辑: 彭南轩)