

万忠梅, 宋长春, 刘德燕. 2009 氮输入对沼泽湿地小叶章枯落物分解过程中酶活性的影响 [J]. 环境科学学报, 29(9): 1830–1835  
Wan ZM, Song C C, Liu D Y. 2009. The enzyme activity of *Calamagrostis angustifolia* litter decomposition affected by exogenous nitrogen input in a freshwater marsh [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(9): 1830–1835

# 氮输入对沼泽湿地小叶章枯落物分解过程中酶活性的影响

万忠梅<sup>1, 2</sup>, 宋长春<sup>1\*</sup>, 刘德燕<sup>1, 2</sup>

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012  
2 中国科学院研究生院, 北京 100049

收稿日期: 2008-12-01      修回日期: 2009-03-10      录用日期: 2009-06-27

**摘要:** 以三江平原沼泽湿地典型湿地植物小叶章枯落物 (*Calamagrostis angustifolia*) 为研究对象, 采用分解袋法研究了不同外源氮输入 (N1、N2 分别为 6、12 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) 对小叶章枯落物分解过程酶活性的影响, 并设置对照区 (N0 0 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) 进行比较. 研究表明, 在枯落物最初分解的 2 个月里, 氮输入会抑制蔗糖酶活性, 尤其是低氮输入 (N1) 抑制作用显著 ( $p < 0.05$ ), 2 个月, 氮输入显著促进了该酶活性 ( $p < 0.05$ ); 氮输入除在 160d 时抑制了淀粉酶活性, 其它时期均促进了该酶活性, 且高氮输入 (N2) 促进作用显著; 氮输入提高了枯落物分解前 2 个月的脲酶活性, 而在分解后期, 低氮输入抑制脲酶活性, 高氮输入则主要表现为促进脲酶活性; 低氮输入提高了小叶章枯落物分解前 2 个月的酸性磷酸酶活性, 随后表现为抑制, 高氮输入则只在分解后期 (160d) 抑制酸性磷酸酶活性, 其它时期均表现为促进. 总体而言, 氮输入促进了蔗糖酶、淀粉酶活性, 而对于脲酶及酸性磷酸酶活性来说, 低氮输入抑制了酶活性, 而高氮输入则表现为促进酶活性.

**关键词:** 沼泽湿地; 小叶章; 氮输入; 枯落物; 分解; 酶活性

文章编号: 0253-2468 (2009) 09-1830-06      中图分类号: X171      文献标识码: A

## The enzyme activity of *Calamagrostis angustifolia* litter decomposition affected by exogenous nitrogen input in a freshwater marsh

WAN Zhongmei<sup>1, 2</sup>, SONG Changchun<sup>1\*</sup>, LIU Deyan<sup>1, 2</sup>

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012  
2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

Received 1 December 2008      received in revised form 10 March 2009;      accepted 27 June 2009

**Abstract** To explore the effects of exogenous nitrogen input on the enzyme activity of *Calamagrostis angustifolia* during litter decomposition in a freshwater marsh, we supplied dissolved NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (N0: 0, N1: 6 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; N2: 12 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) to field plots on the Sanjiang Plain and determined the enzyme activities of litter decomposition with 160 d using litter bags. The results showed that nitrogen addition suppressed the invertase activity in the first two months of the decomposition period and low-nitrogen addition (N1) had significant suppression ( $p < 0.05$ ), but the enzyme activity was obviously increased by nitrogen input ( $p < 0.05$ ) after 60 d. Nitrogen input promoted amylase activity, except at a decomposition time of 160 d. Nitrogen addition increased the activities of urease and acid phosphatase in the first two months of litter decomposition, but after that different nitrogen treatments had different effects. Nitrogen input at all concentrations increased the activities of invertase and amylase. Although low-nitrogen addition inhibited acid phosphatase and urease activity, high-nitrogen addition promoted their activity.

**Keywords** freshwater marsh; *Calamagrostis angustifolia*; nitrogen input; litter decomposition; enzyme activity

### 1 引言 (Introduction)

枯落物分解是生态系统物质循环过程的重要

环节, 它连接着生物有机体的合成 (光合作用) 和分解 (有机物的分解和营养元素的释放) (彭少麟等, 2002). 湿地是最富有生产力的生态系统之一, 已被

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (No. 2009CB421103); 国家自然科学基金 (No. 40771189)  
Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2009CB421103) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40771189)  
作者简介: 万忠梅 (1979—), 女, 博士研究生, E-mail: zmw518@yahoo.com.cn \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: songc@neigae.ac.cn  
Biography: WAN Zhongmei (1979—), female Ph.D. candidate, E-mail: zmw518@yahoo.com.cn \* Corresponding author, E-mail: songc@neigae.ac.cn  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

证明是陆地生态系统巨大的碳“汇”(Waddington *et al.*, 2000). 湿地生态系统中枯落物分解对于湿地的形成与演化有着重要意义, 作为重要碳库的湿地, 其枯落物分解过程和分解速率的变化将直接影响全球碳变化的进程, 同时也是碳“源”与碳“汇”研究和国际湿地科学研究的重要内容和组成部分(刘德燕等, 2008; 武海涛等, 2007).

枯落物的分解包括淋洗作用、机械破碎、土壤腐食动物的消化、腐生营养微生物对有机物的酶解以及有机物和矿质化合物向土壤的转化等过程(Facelli *et al.*, 1974; Wood, 1991). 凋落物的彻底降解是在凋落物和土壤中酶系统的综合作用下完成的(张东来等, 2006). 土壤酶的分解作用参与并控制着湿地土壤中包括生物化学过程在内的自然界物质循环过程, 酶活性的高低直接影响物质转化循环的速率(万忠梅等, 2008). 蔗糖酶、淀粉酶、脲酶和酸性磷酸酶是参与土壤碳、氮、磷转化的重要的水解酶类, 参与进入土壤的植物残体和微生物残体的有机物降解. 由于人类活动的影响, 大多数湿地都接受邻近水域或城市区域污染物和营养物质的输入, 导致湿地生态系统中的氮含量增加. 氮素是湿地最重要的限制性养分(陆健健等, 2006), 而土壤酶活性对外界环境因子的变化非常敏感, 氮输入必然导致湿地生态系统土壤酶活性的变化, 进而影响湿地枯落物分解. 以往有关湿地枯落物分解的研究主要集中在枯落物分解动态及其影响因素等方面(Gessner, 2000; Kamarkov *et al.*, 2000; Atkinson *et al.*, 2001; 高俊琴等, 2004; 杨继松等, 2006; 武海涛等, 2007), 而有关外源营养物质输入后, 枯落物分解过程中酶活性变化的研究多见于森林生态系统(O'Connell, 1994; Carreiro *et al.*, 2000; Hobbie *et al.*, 2000; Sinsabaugh *et al.*, 2002; Magill *et al.*, 1998), 而有关湿地生态系统的研究鲜见报道. 三江平原是我国典型的淡水沼泽分布区, 其植被类型以小叶章群系最为普遍(何琰, 2000). 近 50a 来, 三江平原也是湿地开垦面积最大的地区(张金波等, 2006), 农业活动中化学肥料的普遍使用使大量营养元素随地表径流或大气沉降等进入自然湿地, 进而影响着湿地植物的生长状况和枯落物的分解(Aerts *et al.*, 2001; Bragazza *et al.*, 2004)及枯落物分解酶的活性, 其活性改变对凋落物的分解有重要影响(王晖等, 2006).

因此, 本文选取三江平原沼泽湿地典型小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)草甸并设置不同氮输入小区, 通过野外枯落物分解袋法, 研究氮输入对湿地枯落物分解过程中蔗糖酶、淀粉酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的影响, 这对于了解湿地生态系统的有机物转化过程及研究湿地生态系统碳“源”与碳“汇”具有重要的意义, 并对湿地生态系统养分循环研究起到积极的推动作用.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 样点描述与试验布置

研究区选在三江平原典型沼泽湿地分布区浓江河与别拉洪河河间地带(133°31'E, 47°35'N)的中国科学院三江平原沼泽湿地试验站内. 本区海拔 55~65m, 属温带湿润半湿润季风气候, 年平均气温 1.9℃, 年平均降雨量 550~600 mm, 无霜期 125d 左右, 主要湿地类型为常年积水型的毛苔草沼泽和季节积水型小叶章草甸. 在季节性积水型小叶章湿地布置不同氮输入小区, 并在样区附近搭好栈桥, 防止采样时对生态环境的扰动. 试验设置为氮输入 N1(6 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、N2(12 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)和空白对照(N0)试验小区, 其中, N1设置的氮输入量与当地农田排水中的氮含量相当. 每个水平各设 3 个重复, 为了防止氮的流失和对周围环境的影响, 各小区周围用 PVC 板(100cm × 100cm × 50cm)进行防护.

2007 年 4 月下旬, 在试验场内选取有代表性的小叶章群落, 按 50cm × 50cm 样方随机采集小叶章地上部分立枯物( $n = 10$ )带回实验室, 剔除其中多年尚未完全倒伏的立枯体以及底部生长的苔藓后, 于阴凉处自然风干. 称量每个样方的生物量后将所有立枯物充分混合, 随机取出一部分磨碎, 测定其基本性质(表 1). 将其它部分立枯物剪成 10cm 左右的小段, 装入分解袋(15cm × 10cm 的尼龙网袋, 网眼大小为 100 目)中, 每袋装入 8g 剪好的立枯物, 共 45 个. 5 月上旬, 将准备好的分解袋随机投放到野外施氮试验小区内, 于 2007 年 6~9 月, 在生长季内每隔 2 周以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 水溶液的形式模拟外源氮素输入, N1 和 N2 施氮处理整个生长季累积净氮输入量为 6 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 和 12 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. 在投放后的第 33、62、92、124 和 160d 分别取回 3 袋, 用于测定酶活性.

表 1 供试小叶章枯落物的基本性质

Table 1 Basic properties of *Calamagrostis angustifolia* litter

| 全碳            | 全氮 / (g kg <sup>-1</sup> ) | 全磷 / (g kg <sup>-1</sup> ) | 纤维素含量         | C/N    | C/P    | N/P  |
|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------|--------|--------|------|
| 50.29% ±0.07% | 3.22 ±0.17                 | 0.51 ±0.07                 | 31.16% ±1.14% | 156.14 | 990.35 | 6.34 |

2.2 土壤酶活性的测定方法

脲酶活性采用靛酚蓝比色法, 酶活性以 1g 枯落物在 37℃下培养 24h后释放出的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量表示 (mg); 蔗糖酶、淀粉酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法 (关松荫, 1986), 蔗糖酶活性以 1g 枯落物在 37℃下培养 24h后生成的葡萄糖质量表示 (mg), 淀粉酶活性以 1g 枯落物在 37℃下培养 24h后生成的麦芽糖质量表示 (mg); 酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定, 酶活性以 1g 枯落物在 37℃培养 12h后生成酚的量表示 (mg) (赵兰坡, 1986)。

3 结果 (Results)

投放到野外施氮小区的小叶章枯落物经过 160d的分解, 不同氮处理水平下小叶章枯落物分解过程中蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、磷酸酶活性的变化如图 1所示。从图 1a可以看出, 随着腐解的进行, N1和 N2处理与对照的蔗糖酶活性具有类似的动态规律。3种处理均在分解前 62d的酶活性较高, 且 62d时酶活性达到最大值; 在 92d时形成低谷, 在 124d时酶活性有小幅上升, 而后下降, 并在 160d时酶活性最低。分解前 62d该酶活性表现为 N0>N2>N1, 对照的酶活性显著高于 N1处理 ( $p<0.05$ ), 表明在枯落物分解前 2个月, 氮输入量为  $6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  时对蔗糖酶活性抑制作用明显。而 62~160d的蔗糖酶活性则表现为对照处理显著低于两种施氮处理 ( $p<0.05$ ), 而两种施氮处理间的规律也有差异。分解 92d时的酶活性表现为 N1>N2, 分解 124d和 160d时的蔗糖酶活性表现为 N2>N1。这表明枯落物在最初分解的 2个月里, 对照处理的小叶章枯落物中的蔗糖类碳水化合物分解较快, 施氮处理在一定程度上抑制了蔗糖类碳水化合物的分解, 而后继续分解的过程中氮输入开始表现为促进蔗糖酶活性, 并且促进作用显著。总体而言, 氮输入促进了蔗糖酶活性。

不同施氮处理的淀粉酶活性随着枯落物分解 160d的总体动态规律如图 1b所示。由图 1b可知, N1处理和对照区在整个分解期间具有类似的动态规律, 而 N2处理在分解前 124d的规律与对照相似。分解到 160d时, 对照处理的淀粉酶活性增加,

N2处理的淀粉酶活性降低。各处理均表现为分解的前 62d淀粉酶活性较高, 并在 62d时酶活性达到了最大值, 且施氮处理的淀粉酶活性显著高于对照 ( $p<0.05$ )。总体而言, 施氮处理的淀粉酶活性只在 160d时低于对照, 其他时期均高于对照。在整个分解期内, N2处理的淀粉酶活性均高于 N1处理, 并在 33d、62d和 124d时两种施氮处理间的酶活性达到显著差异水平 ( $p<0.05$ )。这表明枯落物分解的前 4个月里, 氮输入能够激活淀粉酶活性, 随着施氮量由  $6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  增加到  $12\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 施氮处理对淀粉酶的激活作用增强, 而后氮输入抑制了淀粉酶活性。说明在小叶章枯落物早期分解的过程中, 氮输入促进了淀粉酶活性。

不同施氮处理的脲酶活性随枯落物分解的总体动态规律如图 1c所示。从图 1c可以看出, 随着枯落物的分解, 施氮处理的脲酶活性与对照具有相似的动态变化, 均在分解 62d时形成第 1个峰值, 且脲酶活性最高; 在分解 92d时形成低谷, 此时的酶活性最低, 然后在 124d时形成第 2个峰值。3种处理的脲酶活性均是在枯落物分解前 62d较高, 表现为 N1>N2>N0, 且 62d时施氮处理脲酶活性显著高于对照 ( $p<0.05$ )。这可能是由于在分解前 62d时, 氮的施入促进了分泌脲酶的土壤微生物的增殖。随着枯落物分解的进行 (92~160d), 不同量的氮输入对脲酶活性的影响出现较大差异, N1处理在这段分解时期始终抑制脲酶活性, N2处理则表现为抑制-促进-抑制, 并且 N2处理的脲酶活性高于 N1处理。因此, 氮输入在枯落物分解前 2个月提高了脲酶活性, 且低氮输入促进作用显著, 但在 160d时均表现为抑制脲酶活性。

磷酸酶能促进土壤中有机磷化合物水解, 生成能被植物吸收利用的无机态磷。由图 1d可见, 随着枯落物分解的进行, N2处理的酸性磷酸酶活性动态规律与对照一致, N1处理与对照略有不同。3种处理的酶活性最大值均出现在 62d, 且分解前 2个月里施氮处理的酶活性高于对照, 表现为 N2>N1>N0, 但各处理间差异不显著。N1处理在分解前 62d时的酶活性略高于对照, 其它时期均低于对照, 其中, 124d和 160d时显著低于对照 ( $p<0.05$ )。在分

解的前 4 个月, N2 处理的酶活性均高于对照, 只在分解 160d 时显著低于对照 ( $p < 0.05$ ), 此时对酸性磷酸酶活性的抑制作用高于 N1 处理. 说明 N2 在枯落物分解的前 4 个月明显促进了酸性磷酸酶活性,

当分解到 160d 时则表现出抑制作用. 氮输入对整个分解时期内酸性磷酸酶活性的累积效果而言, 低氮输入 ( $6 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 主要起抑制作用, 而高氮输入 ( $12 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 主要表现为促进作用.

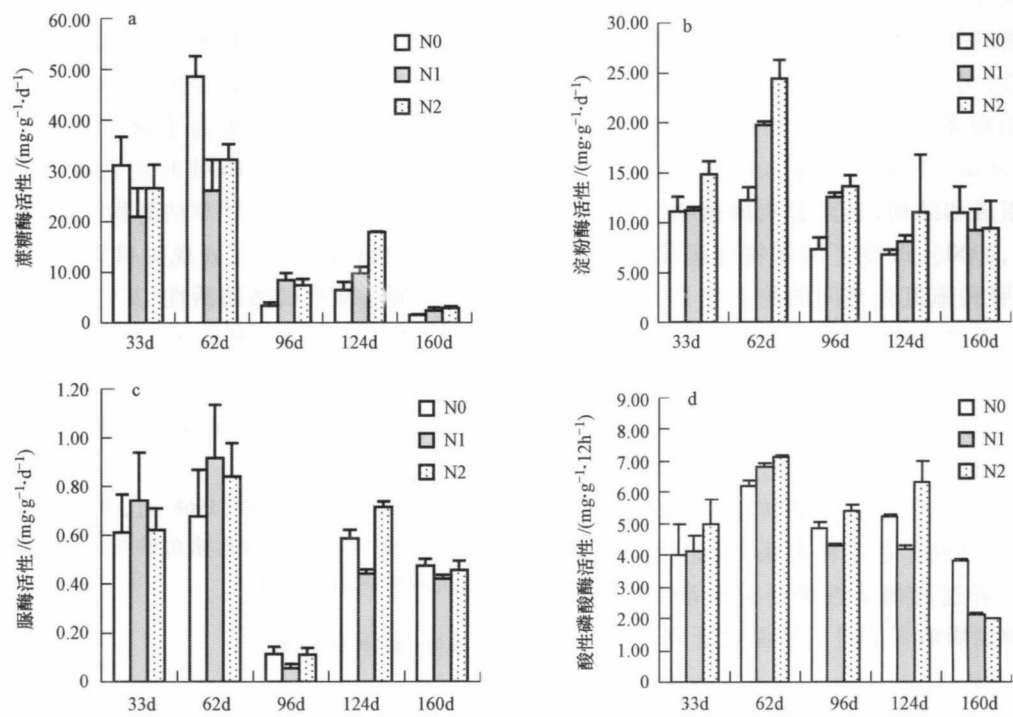


图 1 氮输入对枯落物分解过程酶活性的影响 (a 蔗糖酶; b 淀粉酶; c 脲酶; d 酸性磷酸酶)

Fig 1 Effect of nitrogen input on enzyme activities in *Calamagrostis angustifolia* litter decomposition (a invertase, b amylase, c urease, d acid phosphatase)

4 讨论 (Discussion)

湿地枯落物分解受到多种因素的影响, 使得分解速率和分解过程中物质的流失一方面具有某种规律性, 另一方面又表现出不规则的变化, 显示了相当的复杂性 (Guo *et al.*, 2001). 在森林生态系统中, 有关氮沉降对凋落物分解酶活性的研究结论不一: 有表现为促进的 (Fog 1988, Carreiro *et al.*, 2000), 也有表现为抑制的 (Deforest *et al.*, 2004), 还有没有影响的 (Andersson, 2004). 本研究表明, 对照处理小叶章枯落物经过 160d 的分解, 4 种酶活性的动态变化是对气温、土温及降水等主要环境因子的综合响应. 由表 2 可知, 三江平原的降水量主要集中在 7、8 月份, 8 月份的累积降水量为 219.3mm, 是降水量最大的时期, 此时的地表积水较高. 尽管这一时期的气温和土温相对较高, 但湿地积水可改变微生物群落结构, 进而影响土壤酶的释放 (Kang *et al.*, 1999). 因此, 分解 92d 时的土壤酶活性出现

下降. 在环境因子动态变化相同的条件下, 不同的酶活性对氮素输入的响应不同, 且不同分解时期同一种酶活性对于氮输入的响应也不同 (图 1). 蔗糖酶和淀粉酶均参与枯落物中碳水化合物的降解, 总体而言, 氮输入促进了蔗糖酶和淀粉酶活性, 但这两种酶活性对氮输入的动态响应不同. 最初分解的 2 个月里, 氮输入抑制了蔗糖酶活性, 而随着枯落物的继续分解, 氮素处理的蔗糖酶活性显著增加; 而在分解的前 4 个月, 氮输入对淀粉酶活性均产生促进作用, 尤其是高氮输入的 ( $12 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 激活作用较强, 到了分解后期 (160d), 氮输入抑制了该酶活性. Carreiro 等 (2000) 在对凋落物分解过程中微生物酶活性变化的研究表明, 氮沉降增加可提高凋落物分解过程中土壤磷酸酶的活性. 而本研究中, 低氮输入主要表现为抑制土壤酸性磷酸酶活性, 高氮输入表现为促进. 脲酶活性的变化规律与酸性磷酸酶活性类似, 在分解前期, 氮输入促进了脲酶活性, 而在分解后期, 低氮输入抑制了脲酶活性, 高氮输

入表现为促进作用. 总体而言, 不同施氮处理的 4 种酶活性均是在分解的前 2 个月较高, 这说明早期枯落物分解较快. 本实验测得枯落物的失重率也表明, 前 62d 分解较快, 随后逐渐减慢. 造成酶活性对氮输入响应差异的原因可能是: 一方面, 氮输入改变了枯落物的外部营养环境, 影响了湿地枯落物的分解酶活性; 另一方面, 土壤酶主要来源于土壤微生物和植物根系的分泌物及动植物残体分解释放过程 (Kiss *et al.*, 1998), 氮输入改变了土壤中微生物的群落组成和结构, 进而影响凋落物分解酶活性 (Hobbie, 2000), 改变了凋落物分解的速率. 由表 3 可见, 对照和施氮处理间的酶活性具有一定的相关性, 其中, 低氮处理的 4 种酶活性之间显著正相关 ( $p < 0.05$ ;  $p < 0.01$ ), 对照和高氮处理的蔗糖酶、淀粉酶和脲酶之间呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ ). 由此可见, 参与枯落物分解的各种酶并不是单独作用的, 土壤酶在促进土壤有机物转化中不仅显示出专有性特点, 同时也存在共性关系. 因此, 有关氮输入对枯落物分解过程酶活性的研究及酶活性变化对枯落物分解的影响需要进一步深化研究.

表 2 枯落物分解期间各月降水、平均气温和土温的变化  
Table 2 Precipitation, Mean atmospheric temperature and soil temperature from June to October in the litter decomposition period

| 月份  | 气温 / $^{\circ}\text{C}$ | 10 cm 土温 / $^{\circ}\text{C}$ | 降水量 / mm |
|-----|-------------------------|-------------------------------|----------|
| 6月  | 19.8                    | 16.8                          | 62.3     |
| 7月  | 21.8                    | 18.8                          | 100.1    |
| 8月  | 20.9                    | 19.4                          | 219.3    |
| 9月  | 14.6                    | 15.4                          | 61.4     |
| 10月 | 4.9                     | 7.0                           | 42.1     |

表 3 施氮处理间酶活性的相关系数  
Table 3 Correlations among litter soil enzyme activities under different nitrogen treatments

| 氮输入类型 | 型酶类型  | 酸性磷酸酶   | 脲酶                 | 淀粉酶                | 蔗糖酶   |
|-------|-------|---------|--------------------|--------------------|-------|
| N0    | 蔗糖酶   | 0.456   | 0.544 <sup>†</sup> | 0.578 <sup>†</sup> | 1.000 |
|       | 淀粉酶   | 0.082   | 0.588 <sup>†</sup> | 1.000              |       |
|       | 脲酶    | 0.268   | 1.000              |                    |       |
|       | 酸性磷酸酶 | 1.000   |                    |                    |       |
| N1    | 蔗糖酶   | 0.809** | 0.795**            | 0.672*             | 1.000 |
|       | 淀粉酶   | 0.700** | 0.606*             | 1.000              |       |
|       | 脲酶    | 0.519*  | 1.000              |                    |       |
|       | 酸性磷酸酶 | 1.000   |                    |                    |       |
| N2    | 蔗糖酶   | 0.628** | 0.725**            | 0.698*             | 1.000 |
|       | 淀粉酶   | 0.402   | 0.423              | 1.000              |       |
|       | 脲酶    | 0.321   | 1.000              |                    |       |
|       | 酸性磷酸酶 | 1.000   |                    |                    |       |

注: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ .

5 结论 (Conclusions)

- 1)氮输入在小叶章枯落物分解的前 2 个月抑制了蔗糖酶活性, 而后表现为促进该酶活性, 且高氮输入可使酶活性进一步增加; 氮输入在枯落物分前 4 个月促进了淀粉酶活性, 且高氮输入时酶活性增加明显, 160d 时酶活性受到抑制; 氮输入在枯落物分解的前 2 个月提高了脲酶活性, 且低氮输入促进作用显著, 但在 160d 时均表现为抑制该酶活性; 低氮输入提高了小叶章枯落物在分解前 2 个月的酸性磷酸酶活性, 随后表现为抑制, 高氮则只在 160d 时抑制了酸性磷酸酶活性, 其它时期均表现为促进.
- 2)总体而言, 氮输入主要促进了蔗糖酶、淀粉酶活性, 对于脲酶和酸性磷酸酶活性, 低氮输入主要表现为抑制, 而高氮输入则表现为促进作用.

责任作者简介: 宋长春 (1968—), 男, 研究员, 博士生导师. 研究方向为湿地生物地球化学与生态系统管理, E-mail songc@neigae.ac.cn

参考文献 (References):

Aerts R, Wahn B, Mahner N, *et al.* 2001 Nutritional constraints on Sphagnum-growth and potential decay in northern peatlands [ J ]. *Journal of Ecology*, 89: 292—299

Andersson M, Oiler A, Stenroos S. 2004 Microbial enzyme activities in leaf litter, humus and mineral soil layers of European forests [ J ]. *Soil Biol Biochem*, 36: 1527—1537

Atkinson R B, John Cairns J R. 2001 Plant decomposition and litter accumulation in depressional wetlands: Functional performance of two wetland age classes that were created via excavation [ J ]. *Wetlands*, 21(3): 354—362

Bragazza L, Tahvanainen T, Kutnar L, *et al.* 2004 Nutritional constraints in ombrotrophic sphagnum plants under increasing atmospheric nitrogen deposition in Europe [ J ]. *New Phytologist*, 163: 609—616

Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, *et al.* 2000 Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition [ J ]. *Ecology*, 81: 2359—2365

DeForest J L, Zak D R, Egitzer K S, *et al.* 2004 Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest [ J ]. *Soil Biol Biochem*, 36: 965—971

Facelli J M, Picet S T A. 1974 Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure [ J ]. *Botanical Reviews*, 57: 1—32

Fog K. 1988 The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter [ J ]. *Biol Rev*, 63: 433—462

高俊琴, 欧阳华, 吕宪国, 等. 2004 三江平原小叶章湿地枯落物分解及其影响因子研究 [ J ]. *水土保持学报*, 18 (4): 121—124

Gao J Q, Ouyang H L, X G, *et al.* 2004 Study on litter decomposition

- and influence factors in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 18 (4): 121—124 (in Chinese)
- Gessner M O. 2000 Breakdown and nutrient dynamics of submerged *Phragmites* shoots in the littoral zone of a temperate hardwater lake [J]. Aquatic Botany, 66(1): 9—20
- 关松荫. 1986 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 274—323
- Guan S Y. 1986 Soil Enzymology and Research Method [M]. Beijing Agricultural Press, 274—323 (in Chinese)
- Guo L B, Sims R E H. 2001 Effects of light, temperature, water and methanotrophic effluent irrigation on eucalypt leaf litter decomposition under controlled environmental conditions [J]. Applied Soil Ecology, 17: 229—237
- 何琏. 2000 中国三江平原 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 12—110
- He L. 2000 Sanjiang Plain in China [M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 12—110 (in Chinese)
- Hobbie S E, Vitousek P M. 2000 Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests [J]. Ecology, 81: 1867—1877
- Hobbie S E. 2000 Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian montane forest [J]. Ecosystems, 3: 484—494
- Kang H, Freeman C. 1999. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: Annual variation and controlling factors [J]. Soil Biol Biochem, 31: 449—454
- Kamarkov D, Kuehn K A, Basing N, et al. 2000. Microbial biomass growth and respiration associated with submerged litter of *Phragmites australis* decomposing in a littoral reed stand of a large lake [J]. Aquatic Microbial Ecology, 22(3): 271—282
- 刘德燕, 宋长春. 2008. 外源氮输入对沼泽湿地小叶章枯落物性质及其早期分解的影响 [J]. 湿地科学, 6(2): 235—241
- Liu D Y, Song C C. 2008 The litter characteristics of *Calamagrostis angustifolia* and its early-stage decomposition affected by exogenous nitrogen input in freshwater marsh [J]. Wetland Science, 6(2): 235—241 (in Chinese)
- 陆健键, 何文珊, 童春富, 等. 2006 湿地生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 78—94
- Lu J J, He W S, Tong C F, et al. 2006 Wetland Ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 78—94 (in Chinese)
- Magill A H, Aber J D. 1998. Long term effects of experimental nitrogen addition on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems [J]. Plant Soil, 203: 301—311
- O'Connell A M. 1994. Decomposition and nutrient content of litter in a fertilized eucalypt forest [J]. Biol Fert Soil, 17: 159—166
- 彭少麟, 刘强. 2002. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应 [J]. 生态学报, 22(9): 1534—1544
- Peng S L, Liu Q. 2002 The dynamics of forest litter and its responses to global warming [J]. Acta Ecologica Sinica, 22(9): 1534—1544 (in Chinese)
- Sinsabaugh R L, Carreiro M M, Repert D A. 2002 Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter decomposition, N deposition and mass loss [J]. Biogeochemistry, 60: 1—24
- Waddington J M, Roulet N T. 2000. Carbon balance of a boreal patterned peatland [J]. Global Change Biology, 6: 87—97
- 万忠梅, 宋长春. 2008. 三江平原不同类型湿地土壤酶活性及其与营养环境的关系 [J]. 水土保持学报, 22(5): 158—161
- Wan Z M, Song C C. 2008. Soil enzyme activity and its relationship with the soil nutrient environment of different types wetland in Sanjiang Plain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 22(5): 158—161 (in Chinese)
- 王晖, 莫江明, 薛璟花, 等. 2006. 氮沉降增加对森林凋落物分解酶活性的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 14(6): 539—546
- Wang H, Mo J M, Xue J H, et al. 2006 Effects of elevated nitrogen deposition on the activities of enzymes in forest litter decomposition: A review [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 14(6): 539—546 (in Chinese)
- Wood T G. 1991. Field investigation on the decomposition of leaves of *Eucalyptus delegatensis* in relation to environmental factors [J]. Pedobiologia, 14: 343—371
- 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 2007. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素 [J]. 生态学报, 27(10): 4027—4035
- Wu H T, Lu X G, Yang Q, et al. 2007 The early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 27(10): 4027—4035 (in Chinese)
- 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 2006. 三江平原沼泽湿地枯落物分解及其营养动态 [J]. 生态学报, 26(5): 1297—1302
- Yang J S, Liu J S, Yu J B, et al. 2006 Decomposition and nutrient dynamics of marsh litter in the Sanjiang Plain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 26(5): 1297—1302 (in Chinese)
- 张东来, 毛子军, 张玲, 等. 2006. 森林凋落物分解过程中酶活性研究进展 [J]. 林业科学, 42(1): 105—109
- Zhang D L, Mao Z J, Zhang L, et al. 2006 Advances of enzyme activities in the process of litter decomposition [J]. Scientia Silvae Sinicae, 42(1): 105—109 (in Chinese)
- 张金波, 宋长春, 杨文燕. 2006. 沼泽湿地垦殖对土壤碳动态的影响 [J]. 地理科学, 26(3): 340—344
- Zhang J B, Song C C, Yang W Y. 2006. Cultivation effects on soil organic carbon dynamics in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 26(3): 340—344 (in Chinese)
- 赵兰坡, 姜岩. 1986. 土壤磷酸酶测定方法的探讨 [J]. 土壤通报, 17(3): 138—141
- Zhao L P, Jiang Y. 1986. Measure method of soil phosphatase [J]. Chinese Journal of Soil Science, 17(3): 138—141 (in Chinese)