

磷输入对沼泽湿地小叶章枯落物分解过程酶活性的影响

万忠梅^{1,2}, 宋长春^{1*}, 刘德燕^{1,2}

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

摘要: 在三江平原沼泽湿地布置外源磷输入小区, 选取典型湿地植物小叶章 *Calamagrostis angustifolia* 枯落物为研究对象, 采用分解袋法, 研究了不同梯度外源磷输入(CK: 0; P1: 1.2 g·m⁻²·a⁻¹; P2: 4.8 g·m⁻²·a⁻¹; P3: 9.6 g·m⁻²·a⁻¹) 对小叶章枯落物分解过程中酶活性的影响。结果表明, 在小叶章枯落物分解前期, 低磷输入(P1)抑制了蔗糖酶和脲酶活性, 继续分解的过程中则极显著促进了二者的酶活性 ($P<0.01$), 而低磷输入对淀粉酶活性的影响则与之相反; 中磷输入(P2)在小叶章枯落物分解的整个过程都促进了蔗糖酶和淀粉酶的活性, 对脲酶活性除在分解65 d时有抑制, 其他时期均提高了其酶活性; 高磷输入(P3)均提高了枯落物分解后期的蔗糖酶和脲酶活性, 其对淀粉酶活性的影响无明显规律; 3种磷输入均显著抑制了酸性磷酸酶活性 ($P<0.01$)。

关键词: 沼泽湿地; 磷输入; 小叶章枯落物; 分解; 酶活性

中图分类号: S154.2; X172

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0595-05

枯落物是湿地生态系统的重要组成部分, 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, 其分解过程和分解速率的变化, 将直接影响全球变化的进程, 是碳“源”与碳“汇”研究的重要组成部分, 也是国际湿地科学研究的重要内容^[1-2]。目前, 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温度、水分等环境因子对枯落物分解的影响^[2-6]。而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^[7], 酶是枯落物分解的重要驱动因子, 催化枯落物中复杂化合物的降解, 酶活性影响枯落物的分解速率^[8], 进而影响湿地生态系统的物质循环转化过程。氮、磷是枯落物分解的限制性因素^[9], 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, 并且集中在氮沉降对枯落物分解酶活性的影响^[10-14], 对于磷输入的研究较少。而有关湿地生态系统外源磷输入对枯落物分解过程酶活性的研究更是鲜见报道。

三江平原是我国典型的淡水沼泽分布区, 近50年来, 三江平原也是湿地开垦面积最大的地区^[15], 农业活动中化学肥料的普遍使用, 使大量氮、磷等营养元素随地表径流流入湿地, 而湿地生态系统枯落物分解酶活性对磷输入的响应尚不明确。因此, 本文选取三江平原沼泽湿地典型小叶章 *Calamagrostis angustifolia* 草甸设置磷输入小区, 通过野外枯落物分解袋法, 研究了不同梯度磷输入对

湿地枯落物分解过程中酶活性的影响, 明确磷输入对湿地生态系统枯落物分解的影响, 旨在对湿地生态系统碳循环的研究起到积极的推动作用。

1 材料与方法

1.1 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别拉洪河与浓江河河间地带(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55~65 m, 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125 d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。2007年, 在季节性积水型小叶章湿地布置磷输入小区, 并在样区附近搭好栈桥, 防止采样时对生态环境的扰动。施磷水平分别为对照CK, P1(1.2 g·m⁻²·a⁻¹, 低磷处理), P2(4.8 g·m⁻²·a⁻¹, 中磷处理), P3(9.6 g·m⁻²·a⁻¹, 高磷处理), 每个水平各设3个重复, 并且为了防止磷的流失和对周围环境的影响, 各小区周围用PVC板(100 cm×100 cm×50 cm)进行防护。

2008年5月初, 在试验场内选取有代表性的小叶章群落, 按50 cm×50 cm样方随机采集小叶章地上部分立枯物($n=10$)带回实验室, 挑去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10 cm左右

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421103); 国家自然科学基金项目(40771189); 中国科学院知识创新重要方向性项目(kzcx2-yw-309)

作者简介: 万忠梅(1979年生), 女, 博士研究生, 主要从事环境变化与物质循环研究。E-mail: zmw518@yahoo.com.cn

***通讯作者:** 宋长春, 研究员。E-mail: songcc@neigae.ac.cn

收稿日期: 2008-12-25

表 1 供试枯落物的基本性质
Table 1 Basic properties of *Calamagrostis angustifolia* litter

项目	w(全碳) /%	w(全氮) /(g·kg ⁻¹)	w(全磷) /(g·kg ⁻¹)	C/N	C/P	N/P
小叶章 落物	40.48 ± 0.69	3.09 ± 0.09	0.55 ± 0.07	131.00	736.00	5.51

的小段, 装入做好的分解袋 (15 cm×10 cm 的尼龙网袋, 网眼大小为 100 目) 中, 每袋装入 8 g 剪好的立枯物, 共 48 个。5 月中旬, 将准备好的分解袋随机投放到野外施磷试验小区内, 于 2008 年 5 月底开始施磷, 在生长季内每隔 2 周以 NaH₂PO₄·12H₂O 水溶液的形式模拟外源磷输入, 总计整个生长季各处理分别施入外源磷 0 g·m⁻²·a⁻¹, 1.2 g·m⁻²·a⁻¹, 4.8 g·m⁻²·a⁻¹, 9.6 g·m⁻²·a⁻¹。在枯落物投放后的第 32 天 (6 月 14 日)、第 65 天 (7 月 17 日)、第 96 天 (8 月 17 日)、第 121 天 (9 月 11 日) 分别取回 3 袋, 用于测定酶活性。枯落物的基本性质如下:

1.2 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 1 g 枯落物在 37 °C 下培养 24 h 释放出 NH₄⁺-N 的 mg 数表示; 蔗糖酶、淀粉酶活性采用 3, 5 二硝基水杨酸比色法, 蔗糖酶活性以 1 g 枯落物在 37 °C 下培养 24 h 后生成的葡萄糖 mg 数表示; 淀粉酶活性以 1 g 枯落物在 37 °C 下培养 24 h 后生成的麦芽糖 mg 数表示^[16]; 酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定, 酶活性以 1 g 枯落物在 37 °C 培养 12 h 后生成酚的量表示^[17]。

1.3 数据统计分析

所有数据采用 SPSS 11.5 和 Origin 7.5 进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 磷输入对枯落物分解蔗糖酶活性的影响

蔗糖酶参与枯落物中碳水化合物的转化, 为植物和微生物提供可利用的营养物质。图 1a 反映了小叶章枯落物分解过程中蔗糖酶活性对外源磷输入的响应。从图 1a 可以看出, 随着枯落物分解的进行, P1 和 P2 处理的蔗糖酶活性与对照具有相似的动态规律, 说明低磷和中磷输入没有改变枯落物蔗糖酶对其他环境因子的动态响应。P3 处理酶活性动态规律则表现不同, 在分解第 121 天时, 该处理的蔗糖酶活性显著高于第 96 天的酶活性 ($P<0.05$), 其他处理的酶活性则是降低。与对照相比, 在分解第 32 天和第 65 天, P1 处理分别降低了 16.9% 和 26.3%, 差异达显著水平 ($P<0.05$), 而在第 96 天和第 121 天时酶活性分别增加了 92.4%, 67.4%, 差异达到极显著水平 ($P<0.01$)。P2 处理的蔗糖酶活

性在各个时期均高于对照, 分解前期 (前 65 d) 对酶活性促进作用明显, 分别比对照高出 16.2% 和 27.2%, 随后酶活性增加不明显。P3 处理的蔗糖酶活性在分解前 65 d 酶活性低于对照, 差异达显著水平 ($P<0.05$), 随后酶活性高于对照, 且分解到第 121 天时极显著高于对照 ($P<0.01$), 但低于 P1 处理的蔗糖酶活性。

2.2 磷输入对枯落物分解淀粉酶活性的影响

由图 1b 可见, 随着枯落物分解的进行, 磷处理的淀粉酶活性在不同分解时期的总体动态规律与对照不同。在分解初期 (32 d), 3 种磷输入均极显著的提高了淀粉酶活性 ($P<0.01$), 表现为 P2>P1>P3>CK。分解到 65 d 时, P1 处理对淀粉酶活性的促进作用减弱, 酶活性仅比对照增加 7.4%, P2 处理的酶活性比对照高出 21.4%, 差异达到显著性水平 ($P<0.05$), 而 P3 处理的酶活性比对照降低了 60.6%, 达到极显著差异水平 ($P<0.01$)。枯落物继续分解, 在 96 d 和 121 d 时, 低磷输入 (P1) 对酶活性的影响表现出抑制作用, 且在后期抑制作用明显 ($P<0.01$), 中磷输入 (P2) 则始终保持对酶活性的强烈促进作用 ($P<0.01$)。而高磷输入 (P3) 则在 96 d 时增加了酶活性, 随后表现为抑制作用。总体而言, 中磷输入始终促进了淀粉酶活性, 并且酶活性始终高于其他 2 个施磷处理; 低磷输入在枯落物分解前期促进了酶活性, 随后表现为抑制作用; 高磷输入对淀粉酶活性的影响则没有统一规律。

2.3 磷输入对枯落物分解酸性磷酸酶活性的影响

磷输入对小叶章枯落物分解过程酸性磷酸酶活性的影响见图 1c。在整个分解时期, 施磷处理的酸性磷酸酶活性的动态规律与对照不同, P2 和 P3 处理的该酶活性具有相似的动态变化, 并且 3 种施磷处理的酶活性均低于对照。在分解初期 (32 d), 低磷到高磷输入, 导致枯落物中酸性磷酸酶活性分别下降 45.6%, 28.9%, 42.8%, 且酶活性表现为 P2>P3>P1。在分解 65 d 时, 磷输入对酸性磷酸酶活性的抑制作用最强 ($P<0.01$), P1、P2、P3 处理的酶活性分别降低 54.4%, 54.6%, 57.2%。在分解后期, 磷输入的抑制作用减弱。而随着磷输入量的增加, 各个分解时期的酸性磷酸酶活性变化没有统一规律。

2.4 磷输入对枯落物分解脲酶活性的影响

图 1d 反映了磷输入对小叶章枯落物分解过程中脲酶活性的影响, 可以看出施磷处理与对照动态规律不同。在分解初期, P1 处理抑制了脲酶活性, P2、P3 处理促进了酶活性, 但不同梯度磷输入对脲酶活性影响甚微。分解到 65 d 时, 施磷处理的脲酶活性均低于对照, 随着磷输入量的增加酶活性逐渐

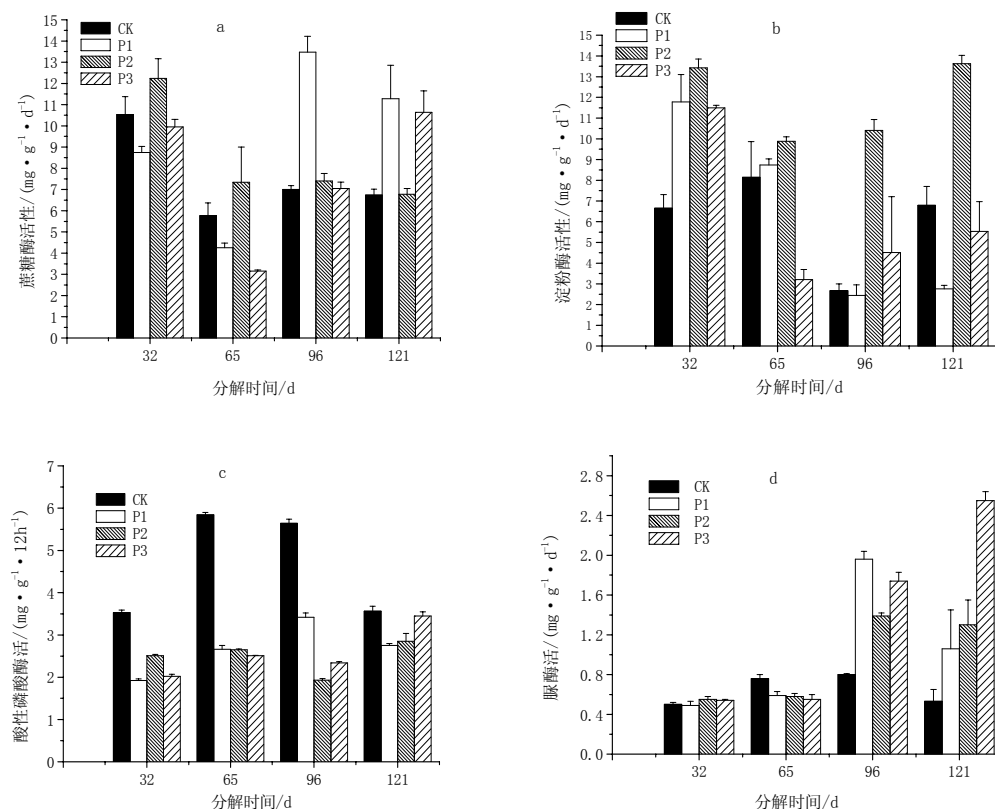


图1 磷输入小叶章枯落物分解过程中酶活性变化

Fig. 1 Effect of phosphorous input on enzyme activities in *Calamagrostis angustifolia* litter decomposition

降低。在分解后2个月,3种氮输入处理均提高了脲酶活性,分解96 d时,P1、P2、P3处理分别比对照处理增加了146.4%,73.9%,119.2%,差异达到极显著水平($P<0.01$)。分解到121 d时,P1、P2、P3处理的脲酶活性仍极显著高于对照($P<0.01$),但此时的P1、P2处理的酶活性低于96 d的酶活性,而P3处理的酶活性则升高,并且分别是对照、P1、P2处理酶活性的4.8倍,2.4倍,2.0倍。

3 讨论

Guo等^[18]指出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。凋落物的分解与凋落物中的分解酶的活性直接相关^[19],并且酶活性因枯落物种类不同而显著变化^[8]。人类活动造成的外源磷素营养大量输入沼泽湿地,对湿地生态系统产生了显著影响^[20-21],磷素输入能够直接影响到湿地植物、微生物和土壤动物的新陈代谢活动,影响到土壤酶分泌的数量,因而影响枯落物分解酶的活性。本研究表明,不同梯度的磷输入显著影响了小叶章湿地枯落物分解过程的蔗糖酶、淀粉酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性(图1)。中磷输入在小叶章枯落物分解的整个过程都促进了蔗糖酶和淀粉酶的活性,而低

磷和高磷输入对这两种酶活性的影响表现不同,因此,尽管这两种酶都是参与枯落物可溶性碳水化合物的分解,但对磷输入的响应不同,这说明枯落物中有机碳分解是几种主要参与分解酶的综合作用,在今后的研究中,还要加强营养物质输入对枯落物分解过程中纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶活性的研究。本研究发现,磷输入抑制了枯落物分解过程中酸性磷酸酶的活性,可能是因为外源磷是以无机磷酸盐的形式输入的,而磷酸酶分解有机磷化合物的产物是无机磷酸盐,因此无机磷的输入导致磷酸酶活性降低。其他学者研究也表明,高浓度的溶解速效磷通常会抑制磷酸酶活性^[22]。而磷输入对枯落物中脲酶活性的影响则表现为在枯落物分解后期促进作用明显,可能是因为随着磷素的输入,当季小叶章植被和微生物群落对磷的可利用性增强,相应的要吸收一定量的氮素以保证营养元素的平衡,会造成土壤中的氮营养缺乏,因此脲酶活性增加,促进有机氮化合物的水解,为微生物和小叶章植被提供氮营养。枯落物分解过程中酶活性的变化,与枯落物自身的质量(成分、结构)、环境因素(温度、相对湿度等)、生物因素密切相关,由于目前对这方面的研究很少,因此关于外源磷输入对枯落物分解酶活性的影响研究还要结合室内培养实验,在纯

化条件下观察酶活性的动态特征,进一步解释磷输入对湿地枯落物分解的影响机理,更深入的理解磷输入对湿地生态系统碳循环的影响。

4 结论

小叶章枯落物分解过程中,蔗糖酶、淀粉酶、脲酶和酸性磷酸酶活性对不同梯度磷输入的响应不同。在小叶章枯落物分解前期,低磷输入抑制了蔗糖酶和脲酶活性,继续分解的过程中则极显著促进了二者的酶活性。而低磷输入对淀粉酶活性的影响则与之相反。中磷输入在小叶章整个分解时期都促进了蔗糖酶和淀粉酶活性,而对脲酶活性的影响也主要起到促进的作用。高磷输入均提高了枯落物分解后期的蔗糖酶和脲酶活性,其对淀粉酶活性的影响则无明显规律。3种梯度的磷输入均抑制了整个分解过程中的酸性磷酸酶活性,但不同梯度的磷输入处理间的酶活性变化没有统一规律。

参考文献:

- [1] 刘德燕, 宋长春. 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, 2008, 6(2): 235-241.
LIU Deyan, SONG Changchun. The litter characteristics of *Calamagrostis angustifolia* and its early-stage decomposition affected by exogenous nitrogen input in freshwater marsh[J]. Wetland Science, 2008, 6(2): 235-241.
- [2] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 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, 2007, 27(10): 4027-4035.
WU Haitao, LU Xianguo, YANG Qing, et al. The early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4027-4035.
- [3] GESSNER M O. Breakdown and nutrient dynamics of submerged *Phragmites* shoots in the littoral zone of a temperate hardwater lake[J]. Aquatic Botany, 2000, 66(1): 9-20.
- [4] KOMÍNKOVÁ D, KUEHN K A, BÜSING N et al. 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, 2000, 22(3): 271-282.
- [5] AERTS R, WALTÉN B, MALMER N, et al. Nutritional constraints on Sphagnum-growth and potential decay in northern peatlands[J]. Journal of Ecology, 2001, 89: 292-299.
- [6] 高俊琴, 欧阳华, 吕宪国, 等. 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, 2004, 18(4): 121-124.
GAO Junqin, OUYANG Hua, LU Xianguo, et al. Study on litter decomposition and influence factors in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 121-124.
- [7] 张东来, 毛子军, 张玲, 等. 森林凋落物分解过程中酶活性研究进展[J]. 林业科学, 2006, 42(1): 105-109.
ZHANG Donglai, MAO Zijun, ZHU Ling, et al. Advances of enzyme activities in the process of litter decomposition[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(1): 105-109.
- [8] ALLISON S D, Vitousek P M. Extracellular enzyme activities and carbon chemistry as drivers of tropical plant litter decomposition[J]. Biotropica, 2006, 36(3): 285-296.
- [9] GÜSEWELL S, FREEMAN C. Nutrient limitation and enzyme activities during litter decomposition of nine wetland species in relation to litter N: P ratio[J]. Functional Ecology, 2005, 19(4): 582-593.
- [10] O'CONNELL A M. Decomposition and nutrient content of litter in a fertilized eucalypt forest[J]. Biology and Fertility of Soils, 1994, 17: 159-166.
- [11] CARREIRO M M, SINSABAUGH R L, REPERT D A, et al. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition[J]. Ecology, 2000, 81: 2359-2365.
- [12] HOBBIIE S E. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian montane forest[J]. Ecosystems, 2000, 3: 484-494.
- [13] SINSABAUGH R L, CARREIRO M M, REPERT D A. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter decomposition, N deposition, and mass loss[J]. Biogeochemistry, 2002, 60: 1-24.
- [14] MAGILL A H, ABER J D. Long term effects of experimental nitrogen addition on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems[J]. Plant Soil, 1998, 203: 301-311.
- [15] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 沼泽湿地垦殖对土壤碳动态的影响[J]. 地理科学, 2006, 26(3): 340-344.
ZHANG Jingbo, SONG Changchun, YANG Wenyan. Cultivation effects on soil organic carbon dynamics in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(3): 340-344.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-323.
GUAN Songyin. Soil Enzymology and Research Method[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 274-323.
- [17] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶测定方法的探讨[J]. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-141.
ZHAO Lanpo, JIANG Yan. Measure method of soil phosphatase[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1986, 17(3): 138-141.
- [18] GUO L B, SIMS R E H. Effects of light, temperature, water and meat-works effluent irrigation on eucalypt leaf litter decomposition under controlled environmental conditions[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 17: 229-237.
- [19] 张鹏, 田兴军, 何兴兵, 等. 亚热带森林凋落物层土壤酶活性的季节动态[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 1024-1029.
ZHANG Peng, TIAN Xingjun, HE Xingbing, et al. Enzyme activities in litter, fragmentation and humus layers of subtropical forests[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(3): 1024-1029.
- [20] SCHORPE M. Save our swamp[J]. Nature, 2001, 409: 128-130.
- [21] GAISER E E, TREXLER J C, RICHARDS J H, et al. Cascading ecological effects of low-level phosphorus enrichment in the Florida Everglades[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(2): 717-723.
- [22] CHROST R J. Environmental control of the synthesis and activity of aquatic microbial ectoenzymes[C]// CHROST R J. Microbial Enzymes in Aquatic Environments. New York: Springer-Verlag, 1991: 25-59.

Enzyme activity of *Calamagrostis angustifolia* litter decomposition affected by exogenous phosphorous input in a freshwater marsh, northeast China

Wan Zhongmei^{1,2}, Song Changchun^{1*}, Liu Deyan^{1,2}

1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: To explore the effects of exogenous phosphorous input on the enzyme activity of *Calamagrostis angustifolia* litter decomposition process in a freshwater marsh of Sanjiang Plain, we supplied dissolved $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (CK: 0; P1: $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; P2: $4.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; P3: $9.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) to filed situ plots and the enzyme activities of litter decomposition within 121d were determined using litter bag technique. The results showed that low-phosphorous addition (P1) suppressed the activity of invertase and urease in the first two months and then significantly promoted their activities in the latter decomposing period ($P < 0.01$), while low-phosphorous addition had inverse effect on amylase activity. During the whole decay period, medium-phosphorous addition (P2) promoted invertase and amylase activity. Medium-phosphorous addition also increased activity of urease, excepting at decomposing day of 65. High-phosphorous input increased the activity of invertase and urease at the latter decomposing period and had no obvious influence on amylase activity. All the three treatments of phosphorous input significantly inhibited acid phosphatase activity during the experiment ($P < 0.01$).

Key words: freshwater marsh; *Calamagrostis angustifolia* litter; decomposition; enzyme activity