

改变碳输入对太岳山油松林土壤酶活性的影响*

刘星 王娜 赵博 张青** 赵秀海**

北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室 北京 100083

摘要 土壤酶是土壤微生物作用于土壤环境的媒介,其活性对土壤环境的变化十分敏感,因此测定土壤酶活性对了解土壤微生物群落功能与环境因子的关系具有重要意义.为了解碳输入变化对土壤酶活性的影响,本文以山西太岳山油松 (*Pinus tabulaeformis*) 天然林和人工林为研究对象,自2009年7月开始进行对照(无人干扰,CK)、去凋(去除凋落物,LR)、切根去凋(切断根系并去除凋落物,LRNR)3种处理,于2012年7、9月和2013年5月采集表层0-20 cm的土样,测定了多酚氧化酶(Polyphenol oxidase)、过氧化物酶(Peroxidase)、纤维素酶(Cellulase)、蔗糖酶(Invertase)、脲酶(Urease)和中性磷酸酶(Neutral phosphatase)的活性,另于2012年10月采集表层0-20 cm的土样测定土壤化学性质.结果显示:碳输入的改变对土壤酶活性影响显著,去凋处理和切根去凋处理均显著降低了土壤碳、氮含量($P < 0.05$),并且显著抑制了土壤纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、中性磷酸酶等水解酶的活性($P < 0.05$),但对多酚氧化酶和过氧化物酶等氧化酶的影响不显著($P > 0.05$).切根去凋处理对水解酶的抑制作用大于去凋处理,并略微提高了土壤过氧化物酶活性.另外在天然林中蔗糖酶活性的下降比人工林更为显著,而人工林中纤维素酶活性的下降比天然林更显著.研究表明:油松天然林中的土壤微生物群落功能倾向于分泌蔗糖酶,而油松人工林中的土壤微生物群落功能倾向于分泌纤维素酶.土壤酶活性的变化说明,在山西油松林,碳输入的减少会降低参与有机质降解的土壤酶活性,而对参与腐殖质合成的土壤酶活性没有显著影响.图3 表3 参31

关键词 碳输入;土壤酶活性;土壤微生物群落;油松天然林;油松人工林;太岳山

CLC S154.2 : S718.51⁺6

Effects of carbon input changes on soil enzyme activities in a *Pinus tabulaeformis* forest at the Taiyue Mountain*

LIU Xing, WANG Na, ZHAO Bo, ZHANG Qing** & ZHAO Xiuhai**

Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Activities of soil enzymes are very sensitive to changes in the soil environment. Therefore, determination of soil enzyme activity had great significance in understanding the relationships between soil microbial community function and environmental factors. This paper aimed to study the effects of carbon input variation on the soil enzyme activities. Three treatments involving a) both litter and root exclusion (LRNR), b) only litter exclusion (LR), and c) a control (CK) were installed in the plantation and natural forest of *Pinus tabulaeformis* at the Taiyue Mountain of Shanxi Province China since July 2009. Each treatment comprised three replicate plots of 2 m × 2 m. Soil samples were collected from 0-20 cm in July, September 2012 and May 2013. The activities of invertase, cellulase, peroxidase, polyphenol oxidase, urease and neutral phosphatase were determined. Soil chemical properties were determined with the 0-20 cm soil samples collected in October 2012. The results showed that changes of carbon input significantly influenced soil enzyme activities, with both LRNR and LR significantly reducing soil carbon and nitrogen content ($P < 0.05$) and significantly inhibiting the hydrolase activities such as invertase, cellulase, urease and neutral phosphatase ($P < 0.05$). But these treatments did not affect oxidase such as polyphenol oxidase and peroxidase ($P > 0.05$). LRNR slightly increased soil peroxidase activity, with greater inhibition on hydrolytic enzymes than LR. The invertase activity was decreased more significantly in the natural forest than in the plantation. Yet the decrease in cellulase activity was the contrary. The results suggested that the soil microbial community tend to secrete invertase in natural forests but to secrete cellulase in plantations. Changes of soil enzyme activities showed that, in the Shanxi *Pinus tabulaeformis* forest, decrease of carbon input slows the soil microbial degradation of organic matter, but has no effect on the soil microbial

收稿日期 Received: 2013-12-15 接受日期 Accepted: 2014-03-02

*国家林业公益性行业科研专项(201104009)和国家自然科学基金项目(31340022)共同资助 Supported by the Special Research Program for Forestry Welfare of China (201104009), and the National Natural Science Foundation of China (31340022)

**通讯作者 Corresponding authors (E-mail: zhangq@bjfu.edu.cn; zhaoxh@bjfu.edu.cn)

synthesis capacity of humus.

Keywords carbon input; soil enzyme activity; soil microbial community; natural forest of *Pinus tabulaeformis*; plantation of *Pinus tabulaeformis*; Taiyue Mountain

土壤酶 (Soil enzyme) 多指土壤中的聚积酶, 分为胞外酶、胞内酶和游离酶3类, 其来源以土壤微生物的活动为主, 另有部分来自植物根系分泌物^[1]. 土壤酶在土壤的一切生物化学过程中均发挥关键作用, 如有机质降解、腐殖质合成和养分循环^[2], 是土壤生态系统能量流动和物质循环等过程中最为活跃的生物活性物质^[3]. 土壤酶活性对土壤理化性质等环境因素的变化敏感, 且是土壤微生物作用于土壤生物化学过程的直接媒介, 可作为表征土壤微生物群落活性的指标之一^[4-5], 因此测定土壤酶活性对了解土壤微生物群落功能与环境因子的关系具有重要意义^[6].

森林土壤中的碳输入主要来自于凋落物与根系分泌物. 其中凋落物是森林土壤有机质的重要来源, 是森林生态系统能量流动和物质循环的重要载体^[7], 是森林生态系统营养周转的基础^[8]. 凋落物量的改变会导致土壤微生物量、群落组成乃至代谢方式改变^[9], 进而影响土壤酶活性, 而且凋落物分解过程中破裂的植物细胞会释放酶至土壤中, 提高土壤酶活性^[10]. 而根系分泌物不仅是土壤有机质的重要来源, 且具有很高的生物活性, 因此根际微生物代谢特别旺盛^[11], 因此改变根系分泌物输入会通过影响土壤微生物活性来对土壤酶活性产生间接影响.

目前国内关于凋落物对土壤酶活性的影响研究多以改变凋落物种类或凋落物组成^[12-13]为主, 针对根系分泌物的相关研究则以分析根际微生物量为主且多以作物根系为研究对象^[14-15], 而从改变碳输入的角度研究森林土壤酶活性变化的实验甚少, 且多在亚热带森林进行^[16], 关于温带森林土壤酶活性对改变碳输入的影响的研究尚未见报道. 我们以山西太岳山油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林为研究对象, 通过凋落物去除以及挖壕法人为改变油松林林下土壤碳输入量, 对多酚氧化酶 (Polyphenol oxidase)、过氧化物酶 (Peroxidase)、纤维素酶 (Cellulase)、蔗糖酶 (Invertase)、脲酶 (Urease) 和中性磷酸酶 (Neutral phosphatase) 的活性以及土壤化学性质进行了测定, 以探讨土壤碳输入与土壤酶活性的关系, 为揭示森林土壤养分流转以及碳循环机理提供理论支持.

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于山西省太岳山国有林管理局灵空山自然保

护区 (36°18'-37°05'N, 111°45'-112°33'E), 平均海拔1 500 m. 该地区属暖温带大陆性季风气候, 年均降水量为662 mm, 降雨多集中在7-9月. 年均气温8.6 °C, 1月平均气温-10.4 °C, 7月平均气温17.4 °C. 年均相对湿度60%, 年均日照2 600 h, 年均无霜期175 d左右. 基岩主要为花岗岩和石灰岩, 林地土壤类型为山地褐土和棕色森林土.

林区的代表性树种主要有: 油松、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)、山杨 (*Populus davidiana*) 和白桦 (*Betula platyphylla*); 灌木主要有胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、黄刺梅 (*Rosa xanthina*)、山桃 (*Amygdalus davidiana*) 等; 草类有苔草 (*Carex*)、蒿类 (*Artemisia*)、莎草 (*Cyperaceae*) 等.

1.2 试验设计

于2009年7月在油松天然林和油松人工林中各选取未被破坏且具有代表性的林地分别建立9个2 m × 2 m的固定样方, 各样方坡度一致, 间距3 m以上. 在建立样方的同时对样方进行以下3种处理, 每处理重复3次: 1) 切断根系并去除凋落物处理, 简称切根去凋处理 (LRNR), 采用挖壕法在样方周围垂直挖深0.8-1.0 m直至看不到根系, 切断根系但不移走, 然后插入厚塑料板以阻止外围根系进入样方内, 移走样方内的地表凋落物 (腐殖质层以上) 并去除样方内所有活体植物; 2) 去除凋落物处理, 简称去凋处理 (LR): 去除样方内的地表凋落物 (腐殖质层以上) 与所有活体植物; 3) 对照 (CK): 保持自然状态, 不做人为干扰. 对所有去除凋落物的处理每两周清理一次新落下的凋落物. 样方所在的油松天然林与油松人工林的本底值见表1.

1.3 土壤样品采集与测定

于2012年7、9月中旬和2013年5月中旬采集土样. 在每个样方中随机选取3个点采样, 去除表面凋落物, 使用内径2.5 cm的土钻采集0-20 cm的表层土样并混合. 使用保温箱当天带回实验室, 去除可见根系, 过1 mm筛, 4 °C下保存待测, 1周内测定.

参照关松荫^[17]和赵兰坡等^[18]的方法: 使用3,5-二硝基水杨酸比色法测定纤维素酶与蔗糖酶; 邻苯三酚比色法测定多酚氧化酶与过氧化物酶; 苯酚-次氯酸钠比色法测定脲酶; 磷酸苯二钠比色法测定中性磷酸酶. 酶的活性以单位干土质量在单位时间内所生成的特定产物的质量表示, 单位为

表1 油松天然林与油松人工林主要林分和立地特征

Table 1 Stand and site characteristics of the plantation and natural forest of *Pinus tabulaeformis*

林型 Forest type	林分特征 Stand characteristics					土壤特征 Soil characteristics		
	林龄 Age (t/a)	密度 Density (n/tree hm ⁻²)	平均胸径 Mean DHB (D/cm)	平均树高 Mean height (h/m)	平均坡度 Mean slope (α/°)	容重 Bulk density (ρ/g cm ⁻³)	全氮 Total N (w/g kg ⁻¹)	有机质 Organic C (w/g kg ⁻¹)
人工林 Plantation	60	733	19.9	12.7	18	1.26	4.1	39.9
天然林 Natural forest	75	1317	12.9	8.0	23	1.01	6.0	46.1

表2 土壤酶活性测定的所用基质、培养条件和测定产物

Table 2 Substrates, incubation conditions and determination products of soil enzyme activity assays

酶 Enzyme	基质 Substrate	培养温度 Incubation temperature ($\theta/^\circ\text{C}$)	培养时间 Incubation time (t/h)	测定产物 Determination product
蔗糖酶 Invertase	蔗糖 Sucrose	37	24	葡萄糖 Glucose
纤维素酶 Cellulase	CM-纤维素 CM-cellulose	50	48	葡萄糖 Glucose
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	邻苯三酚 Pyrogallol	30	3	红紫精 Purpurogallin
过氧化物酶 Peroxidase	邻苯三酚+过氧化氢 Pyrogallol + H_2O_2	30	1	焦性没食子酸 Pyrogallol Acid
脲酶 Urease	尿素 Urea	38	3	NH_4^+
中性磷酸酶 Neutral phosphatase	磷酸苯二钠 Di-sodium phenyl phosphate	36	12	苯酚 Phenol

表3 油松天然林与油松人工林2012年土壤化学性质

Table 3 Chemical properties of soil in the plantation and natural forest of *Pinus tabulaeformis* in 2012

林型 Forest type	处理 Treatment	pH (2.5:1)	速效磷 Available P (w/mg kg^{-1})	碱解氮 Alkalytic N (w/mg kg^{-1})	全氮 Total N (w/g kg^{-1})	有机质 Organic C (w/g kg^{-1})
天然林 Natural forest	对照 CK	5.56 \pm 0.30a	5.53 \pm 0.44a	31.81 \pm 2.54a	7.4 \pm 0.5a	60.7 \pm 5.0a
	去凋 LR	5.91 \pm 0.26a	6.10 \pm 0.47a	25.07 \pm 2.81a	6.3 \pm 0.4ab	46.9 \pm 4.5b
	切根去凋 LRNR	6.20 \pm 0.19a	5.52 \pm 0.33a	28.87 \pm 2.65a	5.1 \pm 0.7b	45.0 \pm 3.3b
人工林 Plantation forest	对照 CK	6.47 \pm 0.28a	5.55 \pm 0.36a	31.50 \pm 2.63a	7.2 \pm 0.5a	63.6 \pm 5.5a
	去凋 LR	6.17 \pm 0.18a	5.97 \pm 0.44a	26.83 \pm 1.61a	6.2 \pm 0.5ab	48.5 \pm 5.8b
	切根去凋 LRNR	6.08 \pm 0.34a	6.06 \pm 0.46a	27.33 \pm 2.96a	5.5 \pm 0.5b	49.4 \pm 3.2b

同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, LSD法). $N = 3$.

Different letters in the same column indicate significant differences according to LSD's multiple range test ($P < 0.05$). $N = 3$.

$\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$. 具体测定中所用的基质、培养条件和测定产物见表2. 所有酶均通过预实验确定最适培养时间与基质浓度.

另于2012年10月中旬, 与上文同样的方法采集土样, 带回实验室风干, 过0.02 mm筛, 用于测定土壤化学性质. 土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化-外加加热法; 全氮测定采用硒粉-硫酸铜-硫酸消化凯氏定氮法; 碱解氮测定采用碱解扩散法; 速效磷测定采用钼锑抗比色法; 土壤pH值测定采用电位法(水土比2.5:1).

1.4 数据统计

利用SPSS 18.0 (SPSS Inc. USA) 软件对数据进行统计分析, 不同处理间的差异性显著检验采用LSD多重比较法 ($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 改变碳输入对土壤化学性质的影响

不同处理下0-20 cm土壤的理化性质如表3所示. 与对照相比, 天然林中去凋处理和切根去凋处理的有机质分别下降了22.9%和25.9%, 差异显著 ($P < 0.05$), 全氮分别下降了15.5%和31.7%, 其中切根去凋处理与对照差异显著 ($P < 0.05$), 去凋处理与对照、切根去凋处理均无显著差异 ($P > 0.05$). 人工林中去凋处理和切根处理的有机质分别比对照低了23.8%和22.3%, 且差异显著 ($P < 0.05$), 全氮分别降低了13.6%和22.7%, 其中切根去凋处理与对照差异显著 ($P < 0.05$), 去凋处理与对照、切根去凋处理均无显著差异 ($P > 0.05$). 另外, 虽然差异不显著 ($P > 0.05$), 两种林型中的碱解氮均略有下降, 均值大小关系为对照>去凋=切根去凋, pH与速效磷没有明显变化.

2.2 改变碳输入对土壤酶活性的影响

改变碳输入对氧化酶活性的影响如图1所示, 图中“均

值”指2012年7、9月(以下简称7月、9月)与2013年5月(以下简称5月)测得的土壤酶活性的均值, 以下简称总均值. 不同处理对土壤过氧化物酶活性并无明显影响, 两种林型中不同处理间过氧化物酶活性的3次测定值及总均值均无显著差异 ($P > 0.05$), 但在两种林型中7月与5月切根去凋处理的土壤过氧化物酶活性均高于对照, 同时过氧化物酶活性的总均值大小关系在油松天然林(以下简称天然林)中为切根去凋>去凋>对照, 油松人工林(以下简称人工林)中为切根去凋>对照>去凋, 均为切根去凋处理最高(图1A、B).

土壤多酚氧化酶活性对改变碳输入响应同样不明显, 天然林中不同处理间多酚氧化酶活性的3次测定值及总均值均无显著差异 ($P > 0.05$), 总均值大小关系为对照>去凋>切根去凋(图1C). 人工林中7、9月不同处理间的多酚氧化酶活性均无显著差异 ($P > 0.05$); 5月的去凋处理和切根去凋处理分别比对照低了24.3%和22.7%, 差异极显著 ($P < 0.01$); 但不同处理间的总均值差异不显著 ($P > 0.05$), 总均值大小关系为对照>去凋=切根去凋(图1D).

改变碳输入对参与碳循环的水解酶活性的影响如图2所示, 不同处理间的纤维素酶活性差异显著, 天然林中仅7月不同处理间的纤维素酶活性差异不显著 ($P > 0.05$); 9月与5月的纤维素酶活性均值大小关系为对照>去凋>切根去凋, 且切根去凋处理显著低于对照 ($P < 0.05$); 总的来看, 天然林中去凋处理和切根去凋处理的纤维素酶活性总均值分别比对照低了4.9%与13.6%, 切根去凋处理与对照之间为极显著差异 ($P < 0.01$), 与去凋处理之间为显著差异 ($P < 0.05$), 总均值的大小关系为对照>去凋>切根去凋(图2A). 人工林中纤维素酶活性响应更为显著, 7、9月去凋处理和去凋切根处理的纤维素酶活性均极显著低于对照 ($P < 0.01$); 5月去凋处理显著低于对照 ($P < 0.05$), 大小关系为对照>切根去凋>去凋; 总的来看, 人工林中去凋处理和切根去凋处理的纤

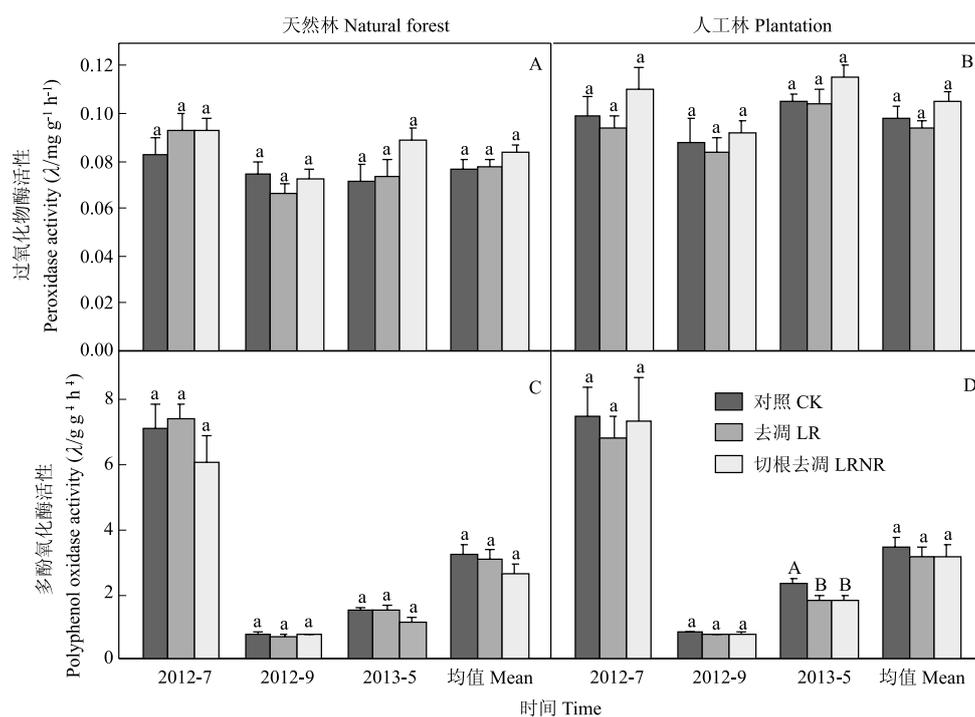


图1 不同处理下的氧化酶活性变化。“均值”指2012年7、9月与2013年5月测得的土壤酶活性的均值。不同大小写字母分别表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$, LSD法) 和差异显著 ($P < 0.05$, LSD法)。横条表示标准偏差 ($N = 3$)。

Fig. 1 Oxidase activities under different treatments. “Mean” represents the average of enzyme activities determined in July, September 2012 and May 2013. Bars indicate standard deviation ($N = 3$). The different capital and lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.01$ and 0.05 , respectively, based on LSD’s multiple range test.

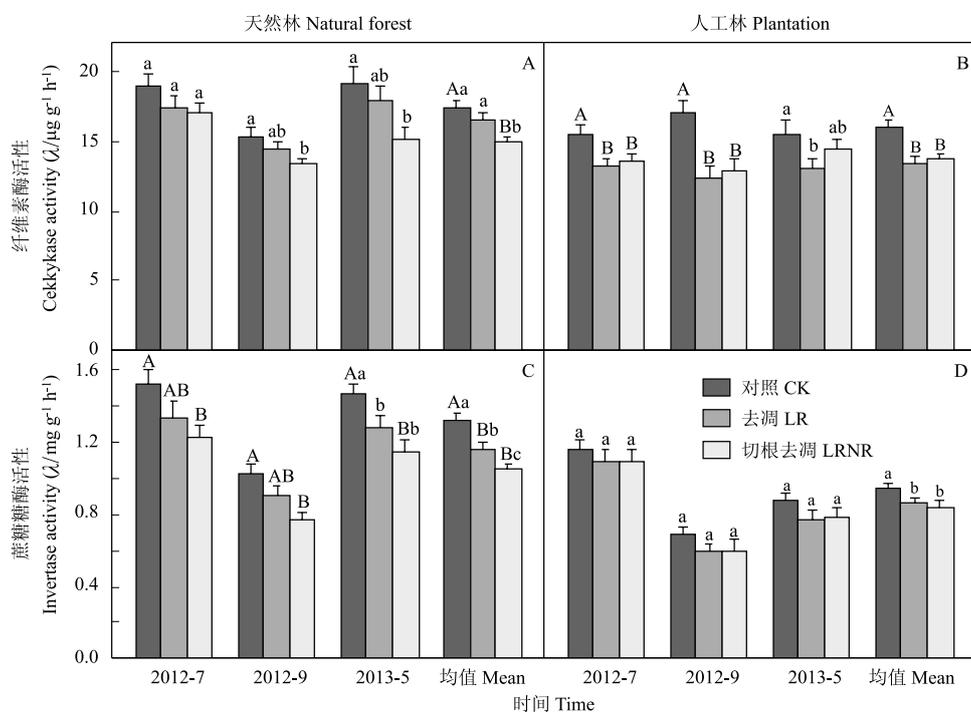


图2 不同处理下参与碳循环的水解酶活性变化。“均值”指2012年7、9月与2013年5月测得的土壤酶活性的均值。不同大小写字母分别表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$, LSD法) 和差异显著 ($P < 0.05$, LSD法)。横条表示标准偏差 ($N = 3$)。

Fig. 2 Hydrolase activities involving C cycling under different treatments. “Mean” represents the average of enzyme activities determined in July, September 2012 and May 2013. Bars indicate standard deviation ($N = 3$). The different capital and lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.01$ and 0.05 , respectively, based on LSD’s multiple range test.

纤维素酶活性总均值分别比对照低了16.4%和14.7%，差异极显著 ($P < 0.01$)，总均值的大小关系为对照 > 去凋 = 切根去凋 (图2B)。

天然林不同处理间的土壤蔗糖酶活性差异较显著，其中7、9月切根去凋处理的蔗糖酶活性极显著低于对照 ($P < 0.01$)；5月的去凋处理显著低于对照 ($P < 0.05$)，而切根去凋处理极显著低于对照 ($P < 0.01$)；总的来看，去凋处理与切根去凋处理的蔗糖酶活性总均值分别比对照低了11.6%和20.1%，差异极显著 ($P < 0.01$)，切根去凋处理比去凋处理低了9.7%，差异显著 ($P < 0.05$)，天然林中蔗糖酶活性的3次测定以及总均值大小关系均为对照 > 去凋 > 切根去凋 (图2C)。与天然林相比，人工林不同处理间的土壤蔗糖酶活性差异较不明显，3次测定中，不同处理间的蔗糖酶活性均无显著差异 ($P > 0.05$)；但去凋处理和切根去凋处理的蔗糖酶活性总均值显著低于对照 ($P < 0.05$)，分别比对照低了9.3%和10.9%，总均值的大小关系为对照 > 去凋 = 切根去凋 (图2D)。

改变碳输入处理对参与氮、磷循环的水解酶活性的影响如图3所示。天然林中7月各处理之间的中性磷酸酶活性差异不显著 ($P > 0.05$)；9月切根去凋处理极显著低于对照 ($P < 0.01$)，均值大小关系为对照 > 去凋 > 切根去凋；5月切根去凋处理极显著低于对照、去凋处理 ($P < 0.01$)；总的来看，天然林中去凋处理与切根去凋处理的中性磷酸酶活性总均值分别比对照低了5.7%和15.2%，切根去凋处理与对照、去凋处

理之间差异极显著 ($P < 0.01$)，总均值大小关系为对照 > 去凋 > 切根去凋 (图3A)。与天然林相似，人工林中7月各处理之间的中性磷酸酶活性无显著差异 ($P > 0.05$)；9月去凋处理和切根去凋处理极显著低于对照 ($P < 0.01$)；5月切根去凋处理极显著低于对照 ($P < 0.01$)，去凋处理与对照、切根去凋处理之间均无显著差异 ($P > 0.05$)，均值大小关系为对照 > 去凋 > 切根去凋；总的来看，人工林中去凋处理与切根去凋处理的中性磷酸酶活性总均值分别比对照低了16.8%与18.1%，差异极显著 ($P < 0.01$)，总均值大小关系为对照 > 去凋 = 切根去凋 (图3B)。

改变碳输入处理对脲酶影响显著，天然林中7月不同处理之间的脲酶活性差异不显著 ($P > 0.05$)；9月与5月的均值大小关系均为对照 > 去凋 > 切根去凋，两次测定中均为切根去凋处理与对照、去凋处理之间差异极显著 ($P < 0.01$)；总的来看，天然林中去凋处理的脲酶活性总均值比对照低了14.6%，差异显著 ($P < 0.05$)，切根去凋处理比对照低了28.9%，差异极显著 ($P < 0.01$)，切根去凋处理比去凋处理低了16.7%，差异显著 ($P < 0.05$)，总均值大小关系为对照 > 去凋 > 切根去凋 (图3C)。人工林中脲酶活性的变化同样明显，人工林中7月不同处理之间的脲酶活性无显著差异 ($P > 0.05$)；9月去凋处理及切根去凋处理均极显著低于对照 ($P < 0.01$)；5月切根去凋处理显著低于对照 ($P < 0.05$)，均值大小关系为对照 > 去凋 > 切根去凋；总的来看人工林中去凋处理与切根去凋处理的脲酶活性总均值分别比对照低了12.2%和

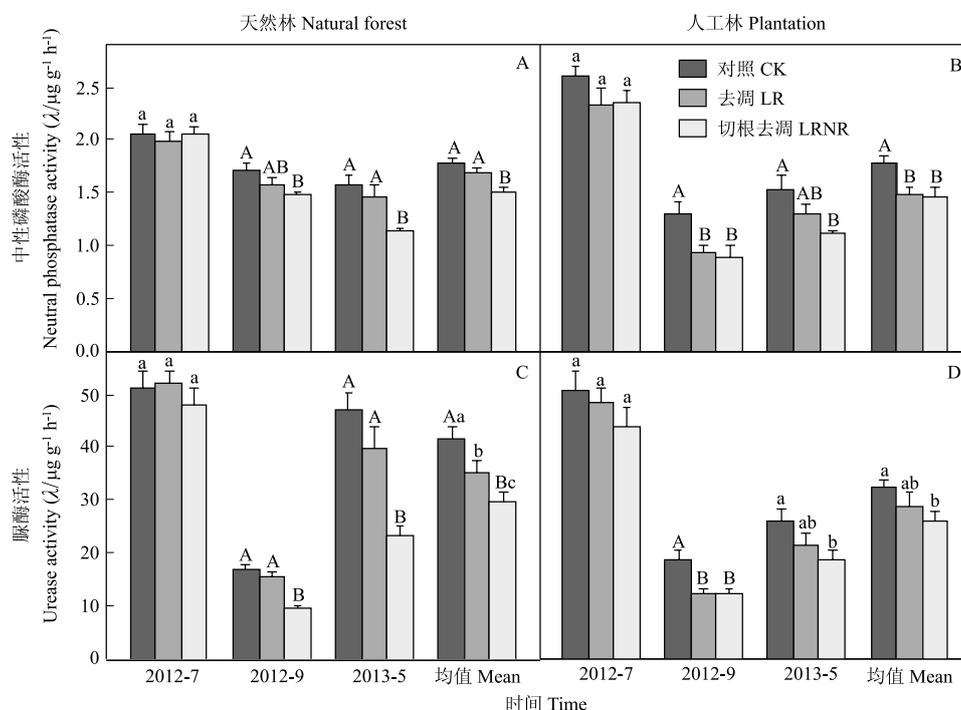


图3 不同处理下参与氮、磷循环的水解酶活性变化。“均值”指2012年7、9月与2013年5月测得的土壤酶活性的均值。不同大小写字母分别表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$, LSD法) 和差异显著 ($P < 0.05$, LSD法)。横条表示标准偏差 ($N = 3$)。

Fig. 3 Hydrolase activities involving N and P cycling under different treatments. “Mean” represents the average of enzyme activities determined in July, September 2012 and May 2013. Bars indicate standard deviation ($N = 3$). The different capital and lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.01$ and 0.05, respectively, based on LSD’s multiple range test.

19.9%, 其中切根去凋处理与对照之间差异显著 ($P < 0.05$), 总均值大小关系为对照 > 去凋 > 切根去凋 (图3D)

综上所述, 去凋处理和切根去凋处理会在不同程度上抑制土壤纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、中性磷酸酶的活性, 其中切根去凋处理影响更大, 而对多酚氧化酶和过氧化物酶影响不显著, 但切根去凋处理略微提高了土壤过氧化物酶活性。

3 讨论与结论

3.1 不同处理对土壤化学性质的影响

凋落物是森林生态系统中土壤营养元素的主要来源, 是森林土壤有机碳、氮、磷的主要补给者^[19], 去除凋落物将会减少土壤养分输入, 且郑卫国等 (2011) 发现去除凋落物不仅减少了土壤养分输入, 而且降低了土壤持水能力, 加快了养分流失, 最终导致土壤碳氮含量降低^[20]。根系分泌物同样是森林土壤养分的重要来源, 研究表明, 约有30%-60%的净光合产物被输送到根系, 其中约20%会以根系分泌物的形式进入土壤中^[21]。本研究中改变土壤碳输入对土壤化学性质产生了显著影响, 去凋、切根去凋处理均显著降低了土壤全氮和有机质含量, 且切根去凋处理的全氮低于去凋处理, 这可能是因为根系分泌物含有大量含氮化合物^[22], 而切根去凋处理阻断了这一氮来源, 李茂金等 (2012) 同样发现去除根系显著降低了土壤氮含量^[23]。但由于挖壕法未移除根系, 大量死根的降解成为了土壤中的新碳源, 使得切根去凋处理的有机质含量与去凋处理无显著差异。

3.2 改变碳输入对土壤酶活性的影响

土壤有机质是土壤中酶促反应的重要底物供源之一, 也是土壤微生物的主要碳源。去除凋落物减少了土壤有机质的来源, 使土壤微生物可利用的碳源减少, 进而生长受到抑制, 例如Xiong等 (2008) 发现随着土壤有机质和全氮的下降, 土壤微生物量显著降低。而这种抑制不仅会使微生物量下降, 还会造成土壤微生物活性下降^[24]。由于土壤酶主要由微生物活动产生, 所以土壤微生物活性的变化往往反映为土壤酶活性的变化^[25]。杨敬天等 (2010) 通过通径分析研究发现多种土壤酶活性与土壤有机质含量显著相关^[26]。本研究中, 去凋处理和切根去凋处理中的纤维素酶、蔗糖酶、脲酶与中性磷酸酶均显著降低, 而这些酶与微生物从土壤中获取碳、氮、磷等营养元素的能力密切相关, 这说明去凋处理和切根去凋处理中的土壤微生物活性下降, 这与Weintraub等 (2013) 在热带雨林进行的研究结果^[27]一致。

根系分泌物富含有机质, 是土壤微生物的重要营养来源^[22], 其变化对土壤微生物活性影响显著, 例如Courty等 (2006) 研究发现外生菌根与根际分泌物显著提高了土壤水解酶活性^[11]。在本研究中, 天然林切根去凋处理中4种水解酶 (纤维素酶、蔗糖酶、脲酶与中性磷酸酶) 的活性均显著低于去凋处理, 但在人工林中切根去凋处理与去凋处理之间的酶活性无显著差距。这可能是因为天然林中林下植被繁茂复杂, 而人工林中由于森林经营活动等人为干扰, 林下植被稀疏, 所以天然林土壤中的根系活动大于人工林, 切根处理对土壤酶的影响更为显著。

碳输入的变化不仅会通过改变微生物量来对土壤酶活

性产生影响, 还会通过改变酶促反应底物浓度来对土壤酶产生影响, Hernandez等 (2010) 研究发现, 碳水解酶活性与相应底物、产物的浓度呈正相关^[28], Geisseler等 (2012) 进行的室内培养实验发现土壤纤维素酶的活性会随着纤维素的添加而升高^[29], 而Fekete等 (2009) 研究发现切根处理与去凋处理均显著降低了土壤蔗糖酶活性^[30]。本研究中, 当土壤碳输入减少时, 纤维素酶与蔗糖酶活性均显著降低, 该结果从侧面证实了这一推论, 去凋、切根的处理阻断了来自凋落物和根系分泌物的纤维素、多聚糖输入, 减少了土壤中的纤维素、多聚糖含量, 导致了纤维素酶和蔗糖酶活性下降。另外, 在本研究中不同林型中纤维素酶与蔗糖酶活性的变化程度并不一致, 这可能与两种林型中的凋落物成分以及土壤微生物群落结构差异有关: 与人工林相比, 天然林的凋落物中含有较多阔叶^[31], 多聚糖等易溶性有机物所占比例较高, 因而两种林型中的微生物群落在碳水解酶的分泌上侧重于不同方面, 在天然林的土壤碳水解酶中蔗糖酶占主导地位, 而在人工林中纤维素酶占主导地位, 因此在天然林中蔗糖酶活性下降比人工林更为显著, 而人工林中纤维素酶活性下降更显著。

一般认为, 土壤中水解酶类的活性与土壤有机质降解过程有关, 氧化酶类的活性与土壤中腐殖质合成过程有关^[17], 因此可通过这两类酶系的活性变化规律来解释土壤有机质的降解和腐殖质化过程。在本研究中, 碳输入的减少对过氧化物酶和多酚氧化酶这两种氧化酶影响不显著, 其中切根去凋处理的过氧化物酶活性甚至略有上升, 这可能与挖壕法产生的大量死根为腐殖质合成提供了大量底物有关。同时, 纤维素酶、蔗糖酶、脲酶和中性磷酸酶等水解酶活性随着碳输入的减少而显著降低。土壤酶活性的变化说明在山西油松林, 碳输入的减少会降低参与有机质降解的土壤酶活性, 而对参与腐殖质合成的土壤酶活性没有显著影响。

参考文献 [References]

- 1 Arai H, Tokuchi N, Koba K. Possible mechanisms leading to a delay in carbon stock recovery after land use change [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2007, **71** (5): 1636-1638
- 2 Waldrop MP, Zak DR, Sinsabaugh RL, Gallo M, Lauber C. Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity [J]. *Ecol Appl*, 2004, **14** (4): 1172-1177
- 3 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1989 [Zhou LK. *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press, 1989]
- 4 Weand MP, Arthur MA, Lovett GM, McCulley RL, Weathers KC. Effects of tree species and N additions on forest floor microbial communities and extracellular enzyme activities [J]. *Soil Biol Biochem* 2010, **42** (12): 2161-2173
- 5 Cusack DF, Silver WL, Torn MS, Burton SD, Firestone MK. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests [J]. *Ecology*, 2011, **92** (3): 621-632
- 6 Allison S, Wallenstein M, Bradford M. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology [J]. *Nat Geosci*, 2010, **3** (5-S1): 336-

- 340
- 7 曹富强, 刘朝辉, 刘敏, 崔俊峰. 森林凋落物及其分解过程的研究进展[J]. 广西农业科学, 2010, **41** (7): 693-697 [Cao FQ, Liu ZH, Liu M, Cui JF. Research progress on the forest litterfall and its decomposition process [J]. *Guangxi Agric Sci*, 2010, **41** (7): 693-697]
 - 8 曾锋, 邱治军, 许秀玉. 森林凋落物分解研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, **19** (1): 239-243 [Zeng F, Qiu ZJ, Xu XY. Review on forest litter decomposition [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19** (1): 239-243]
 - 9 Gray DB, Mary KT, Julie EJ. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, **34** (8): 1073-1082
 - 10 杨万勤. 森林土壤生态学[M]. 成都: 四川科技出版社, 2006 [Yang WQ, Forest Soil Ecology[M]. Chengdu: Sichuan Sci-tech Publishing House, 2006]
 - 11 Courty PE, Pouysegur R, Bue'e M, Garbaye J. Laccase and phosphatase activities of the dominant ectomycorrhizal types in a lowland oak forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38** (6): 1219-1222
 - 12 Hu YL, Wang SL, Zeng DH. Effects of single Chinese fir and mixed leaf litters on soil chemical, microbial properties and soil enzyme activities [J]. *Plant Soil*, 2006, **282** (1/2): 379-386
 - 13 林晗, 陈辉, 吴承祯, 洪滔, 谢安强. 千年桐与毛竹凋落叶混合分解对土壤酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (4): 539-545 [Lin H, Chen H, Wu CZ, Hong T, Xie AQ. Effects of decomposition of *Aleurites montana* and *Phyllostachys pubescences* Mixed Foliage Litter on Activity of Soil Enzymes [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (4): 539-545]
 - 14 王茹华, 张启发, 周宝利, 廉华, 马光恕. 浅析植物根分泌物与根际微生物的相互作用关系[J]. 土壤通报, 2007, **38** (1): 167-170 [Wang RH, Zhang QF, Zhou BL, Lian H, Ma GS. Analysis on the interaction between root exudates and rhizosphere microbes [J]. *Chin J Soil Sci*, 2007, **38** (1): 167-170]
 - 15 Zhang C, Liu GB, Xue S, Zhang CS. Rhizosphere soil microbial properties on abandoned croplands in the Loess Plateau, China during vegetation succession [J]. *Eur J Soil Biol*, 2012, **50**: 127-136
 - 16 张明明. 改变碳输入对樟树林土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[D]. 湖南: 中南林业科技大学, 2012 [Zhang MM. Influence of change carbon input on soil microbial quantity and enzyme activity in *Cinnamomum camphora* Plantation [D]. Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2012]
 - 17 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社. 1986 [Guan S Y. Soil Enzyme and Its Study Methods [M]. Beijing: Agricultural Press. 1986]
 - 18 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报, 1986, **17** (3): 138-141 [Zhao LP, Jiang Y. Discussion on soil phosphatase activity assay method [J]. *Chin J Soil Sci*, 1986, **17** (3): 138-141]
 - 19 Maisto G, Marco AD, Meola A, Sessa L, Santo AVD. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43** (3): 520-530
 - 20 郑卫国, 薛立, 许鹏波, 梁丽丽, 冯慧芳. 加勒比松林地土壤对凋落物的响应[J]. 华南农业大学学报, 2011, **32** (1): 21-25 [Zheng WG, Xue L, Xu PB, Liang LL, Feng HF. Soil response to litter in a *Pinus caribaea* woodland [J]. *J S Chin Agric Univ*, 2011, **32** (1): 21-25]
 - 21 Mucha AP, Almeida CMR, Bordalo AA, Vasconcelos MTSD. Exudation of organic acids by a marsh plant and implications on trace metal availability in the rhizosphere of estuarine sediments [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2005, **65** (1-2): 191-198
 - 22 Li XG, Zhang TL, Wang XX, Hua K, Zhao L, Han ZM. The composition of root exudates from two different resistant peanut cultivars and their effects on the growth of soil-borne pathogen [J]. *Int J Biol Sci*, 2013, **9** (2): 164-173
 - 23 李茂金, 闫文德, 李树战, 赵大勇, 多祎帆. 改变碳源输入对针阔叶混交林土壤氮矿化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32** (5): 108-112 [Li MJ, Yan WD, Li SZ, Zhao DY, Duo YF. Effects of controlling carbon input on nitrogen mineralization in soils of broadleaved-needle mixed forest plantation [J]. *J Cent S Univ For Technol*, 2012, **32** (5): 108-112]
 - 24 Xiong Y, Xia H, Li ZA, Cai XA, Fu SL. Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China [J]. *Plant Soil*, 2008, **304** (1-2): 179-188
 - 25 Amaral HF, Sena JOA, Schwan-Estrada KRF, Balota EL, Andrade DS. Soil chemical and microbial properties in vineyards under organic and conventional management in southern Brazil [J]. *Rev Bras Cienc Solo*, 2011, **35** (5): 1517-1526
 - 26 杨敬天, 苏智先, 胡进耀, 吴庆贵, 贺静. 珙桐林土壤有机质与酶活性的通径分析[J]. 应用与环境生物学报, 2010, **16** (2): 164-167 [Yang JT, Su ZX, Hu JY, Wu QG, He J. Path analysis for soil organic matters and enzyme activities of *Davidia involucrate* virgin forest [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2010, **16** (2): 164-167]
 - 27 Weintraub SR, Wieder WR, Cleveland CC, Townsend AR. Organic matter inputs shift soil enzyme activity and allocation patterns in a wet tropical forest [J]. *Biogeochemistry*, 2013, **114** (1-3): 313-326
 - 28 Hernandez DL, Hobbie SE. The effects of substrate composition, quantity, and diversity on microbial activity [J]. *Plant Soil*, 2010, **335** (1-2): 397-411
 - 29 Geisseler D, Horwath WR. Relationship between carbon and nitrogen availability and extracellular enzyme activities in soil [J]. *Pedobiologia*, 2009, **53** (1): 87-98
 - 30 Fekete I, Kotroczo Z, Varga C, Hargitai R, Townsend K, Csanyi G, Varbiro G. Variability of organic matter inputs affects soil moisture and soil biological parameters in a European detritus manipulation experiment [J]. *Ecosystems*, 2012, **15** (5): 792-803
 - 31 汪金松. 模拟氮沉降对暖温带油松林土壤碳循环过程的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013 [Wang JS. Effects of simulated nitrogen deposition on soil carbon cycling processes of *Pinus tabulaeformis* forests in warm temperate of China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013]