

# 黑土区不同种类凋落物输入对土壤氮素的影响

张玉坤, 李温静, 肖璐璐, 王南超, 崔湘驰, 夏祥友

(东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** [目的] 探讨典型黑土区退耕还林过程中不同凋落物输入对土壤氮组分的影响, 为黑土土壤养分调控、退耕还林树种筛选及植被重建提供理论依据。[方法] 试验设银中杨凋落物(*Populus alba*)、落叶松凋落物(*Larix gmelinii*)及玉米秸秆 3 种处理, 并设置空白对照。将各处理凋落物与风干土壤混合后在 25℃ 培养箱中培养 28 d, 分别测定土壤氮组分含量及两种酶[ $\beta$  葡萄糖苷酶( $\beta$ G)和脲酶(URE)]活性, 并利用方差分析和 Pearson 相关性等方法分析, 探讨不同种类凋落物输入对黑土区土壤氮素及酶活性的影响。[结果] 方差分析表明, 在 3, 7, 14, 28 d 时添加银中杨凋落物处理的 TN 值显著高于对照、添加落叶松凋落物及玉米秸秆( $p < 0.05$ ); 3 种凋落物的输入对土壤速效氮(AN)含量没有显著影响; 对于微生物量氮(MBN), 添加银中杨凋落物的处理在 7 和 14 d 的提升效果显著高于对照、添加落叶松凋落物及玉米秸秆这 3 种处理( $p < 0.05$ ), 在 28 d 时添加银中杨和落叶松凋落物的处理的 MBN 值显著高于对照和玉米秸秆( $p < 0.05$ ); 添加不同种类凋落物均显著降低土壤无机氮含量。 $\beta$ G 与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  呈极显著、显著负相关, 与 URE, TN, AN 均呈极显著正相关; URE 与总有机碳(TOC), MBN, TN 呈显著、极显著相关性, 与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  呈显著负相关。[结论] 3 种外源输入物分解对土壤全氮、速效氮、微生物量氮、无机氮和酶活性含量有密切联系, 凋落物的输入有利于促进土壤养分循环和积累, 其中阔叶树种银中杨的凋落物输入对土壤氮素及酶活性的提高效果最为显著。

**关键词:** 黑土; 土壤无机氮; 凋落物添加; 酶活性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0038-07

中图分类号: S714.2

**文献参数:** 张玉坤, 李温静, 肖璐璐, 等. 黑土区不同种类凋落物输入对土壤氮素的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 38-44. Zhang Yukun, Li Wenjing, Xiao Lulu, et al. Effects of different litter inputs on soil nitrogen fractions in black soil regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 38-44. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.005; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.005.

## Effects of different litter inputs on soil nitrogen fractions in black soil regions

Zhang Yukun, Li Wenjing, Xiao Lulu, Wang Nanchao, Cui Xiangchi, Xia Xiangyou

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** [Objective] The impact of different litter inputs on soil nitrogen fractions during the process of returning farmlands to forests in typical black soil regions was explored, in order to provide a theoretical basis for soil nutrient regulation, tree species selection for afforestation, and vegetation restoration. [Methods] The experiment included three treatments (*Populus alba* litter, *Larix gmelinii* litter, and maize straw) and a blank control. The litter from each treatment was mixed with air-dried soil and incubated at 25 °C for 28 days. The content of soil nitrogen components and the activities of the two enzymes [ $\beta$ -glucosidase ( $\beta$ G) and urease (URE)] were then measured. Variance analysis and Pearson's correlation were used to investigate how different litter inputs affect soil nitrogen and enzyme activities in black soil regions. [Results] Variance analysis showed that at 3, 7, 14, and 28 days, the total nitrogen (TN) values in the *P. alba* litter treatment were significantly higher than those in the control, *L. gmelinii* litter, and maize straw treatments ( $p < 0.05$ ). The input of the three kinds of litter did not significantly impact the soil available nitrogen (AN) content. For microbial biomass nitrogen, inorganic nitrogen, and enzyme activities (MBN), the *P. alba* litter treatment displayed a significantly greater increase at 7 and 14 days compared to the control and

收稿日期: 2024-10-26

修回日期: 2024-12-13

采用日期: 2024-12-14

资助项目: 国家重点研发计划课题“黑土农田侵蚀阻控原理及水土保持措施效应”(2021YFD1500705)

第一作者: 张玉坤(1998—), 女(汉族), 山东省潍坊市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 2022120236@nefu.edu.cn。

通信作者: 夏祥友(1977—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 讲师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: xiabuyi@nefu.edu.cn。

the other two treatments ( $p<0.05$ ). At 28 days, the MBN values in both the *P. alba* and *L. gmelinii* litter treatments were significantly higher than those in the control and maize straw treatments ( $p<0.05$ ). All litter treatments significantly reduced the soil's inorganic nitrogen content.  $\beta$ G was highly or significantly negatively correlated with  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ; it was highly positively correlated with URE, TN, and AN. URE was significantly or highly significantly correlated with TOC, MBN, and TN and negatively correlated with  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ . [Conclusion] The decomposition of the three types of exogenous inputs was closely linked to the soil's TN, the AN, MBN, inorganic nitrogen, and enzyme activities. Litter input promoted soil nutrient cycling and accumulation, with litter input from the broadleaf tree species *P. alba* having the most significant impact on improving soil nitrogen and enzyme activities.

**Keywords:** black soil; soil inorganic nitrogen; litter input; enzyme activity

东北黑土区耕地面积约  $3.20\times10^7\text{ hm}^2$ , 是世界四大黑土区之一。由于土壤有机质含量高、土壤肥沃, 该区域被誉为中国粮食生产的“压舱石”和“稳压器”<sup>[1]</sup>。然而长期不合理的耕作方式及自然因素的叠加, 导致黑土区土壤侵蚀和退化严重, 养分流失加剧, 生态环境受到威胁。为应对这一问题, 保护黑土资源, 东北黑土区开展了大规模的退耕还林<sup>[2]</sup>。在退耕还林过程中, 凋落物作为联系陆地生态系统地上和地下部分物质和能量交换的重要“纽带”, 对改善土壤理化性质、生物特征以及水土保持和水源涵养具有重要作用<sup>[2]</sup>。研究普遍认为, 凋落物分解通过增加土壤养分(尤其是氮元素), 可显著提高土壤肥力, 促进植物生长发育<sup>[3]</sup>。

然而, 不同研究对凋落物对土壤氮的影响存在争议。例如, 张成富等<sup>[4]</sup>、李常准等<sup>[5]</sup>人发现凋落物添加和去除对土壤氮含量无显著影响; 阮超越等<sup>[6]</sup>对杉木人工林的研究发现, 凋落物添加显著降低了铵态氮和硝态氮, 但对土壤全氮和微生物生物量氮的影响不显著; 而卢胜旭等<sup>[7]</sup>在米楮人工林的研究中发现, 凋落物添加使土壤铵态氮、硝态氮、全氮含量分别显著增加 30.00%, 49.66% 和 12.77%。目前, 关于凋落物添加和去除的研究多集中于点位尺度, 主要探讨其对不同陆地生态系统中土壤碳、氮和微环境的影响。然而, 由于自然条件的差异, 相关研究结果在土壤养分调控方面尚存争议。

为进一步明确东北黑土地区退耕还林过程中不同凋落物输入对土壤氮组分的影响, 本研究以典型黑土为研究对象, 选取退耕还林常见针阔叶树种落叶松 (*Larix gmelinii*)、银中杨 (*Populus alba*) 的凋落物, 以及 C/N 较高的传统还田作物玉米秸秆作为外源输入物, 通过室内模拟试验, 测定土壤氮组分及相关酶活性, 通过分析不同凋落物处理对土壤氮组分的影响, 旨在为典型黑土区退化土壤修复及退耕还林树种的选择提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区域与样地概况

试验土壤样品采集于黑龙江省讷河市与克山县克山农场 ( $48^{\circ}12'-48^{\circ}23'\text{ N}$ ,  $125^{\circ}8'-125^{\circ}37'\text{ E}$ ), 该区属温带亚湿润季风性气候, 年平均气温  $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量  $500\text{ mm}$  左右, 年均蒸发量  $1\,329\text{ mm}$ 。地貌类型以漫川漫岗为主, 土壤以黏化湿润均腐土为主, 属典型黑土区。

## 1.2 试验设计与培养

在 4—5 月收集两种树种的凋落物——银中杨 (*P. alba*)、落叶松 (*L. gmelinii*) 以及玉米秸秆, 将收集的凋落物粉碎并通过  $2\text{ mm}$  孔径筛备用。同时, 对采集的土壤样品进行风干处理, 并过  $2\text{ mm}$  孔径筛储存储备用。试验前, 测定初始土壤和凋落物的养分指标。试验设立 3 种凋落物处理组和 1 个空白对照组, 每组设置 3 次重复。具体处理方式如下: 添加银中杨凋落物 (LP)、添加落叶松凋落物 (LL)、添加玉米秸秆 (LS)、未添加任何凋落物土壤 (空白对照 CK)。试验操作步骤: 每种凋落物各取  $1\text{ g}$ , 与  $100\text{ g}$  风干土均匀混合后, 混合样品放入培养盒中, 置于  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  的培养箱中培养。在培养过程中, 每  $3\text{ d}$  添加相应水分, 以保持土壤湿度在最大田间持水量的  $60\%$ , 培养  $3, 7, 14, 28\text{ d}$  后分别进行破坏性取样, 将一部分土样经风干处理后过  $2\text{ mm}$  孔径筛, 分取部分样品过  $0.25\text{ mm}$  孔径筛测定土壤理化性质和酶活性; 一部分新鲜土壤样品保存于  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 用于土壤无机氮及微生物生物量氮的测定, 具体培养设计详见表 1。供试土壤及凋落物的基本性状详见表 2。

表 1 凋落物处理及添加量  
Table 1 Litter treatments and addition amounts

| 凋落物处理    | 土壤质量/g | 凋落物添加量/g |
|----------|--------|----------|
| 空白(CK)   | 100    | 1        |
| 银中杨(LP)  | 100    | 1        |
| 落叶松(LL)  | 100    | 1        |
| 玉米秸秆(LS) | 100    | 1        |

表 2 供试土壤与凋落物基本性状  
Table 2 Basic traits of test soils and litters

| 凋落物处理    | 全氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 总有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碳氮比                      | 微生物生物量氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | pH 值      |
|----------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------|
| 空白(CK)   | 1.63±0.00 <sup>D</sup>   | 21.00±0.00 <sup>B</sup>    | 12.86±0.32 <sup>D</sup>  | 18.31±0.47                     | 6.03±0.06 |
| 银中杨(LP)  | 16.11±0.83 <sup>A</sup>  | 441.95±7.96 <sup>A</sup>   | 27.50±1.99 <sup>C</sup>  | —                              | —         |
| 落叶松(LL)  | 6.61±0.08 <sup>B</sup>   | 429.19±8.65 <sup>A</sup>   | 64.97±1.15 <sup>B</sup>  | —                              | —         |
| 玉米秸秆(LS) | 3.96±0.09 <sup>C</sup>   | 442.94±8.91 <sup>A</sup>   | 111.87±1.42 <sup>A</sup> | —                              | —         |

注:数据为平均值(±标准误),同列不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。样本单元数  $n=3$ 。

1.3 测定方法

土壤全氮采用元素分析仪(科斯泰克元素燃烧系统 4024,意大利)进行测定;土壤微生物生物量氮采用氯仿熏蒸—硫酸钾提取法测定;土壤硝态氮和铵态氮采用氯化钾溶液浸提后,经振荡、过滤,于 24 h 内使用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3 型,德国 BRAN LUEBBE)测定;碱解氮采用碱解扩散法 40℃培养 24 h 测定。脲酶运用苯酚钠比色法测定;葡萄糖苷酶采用对硝基比色法。

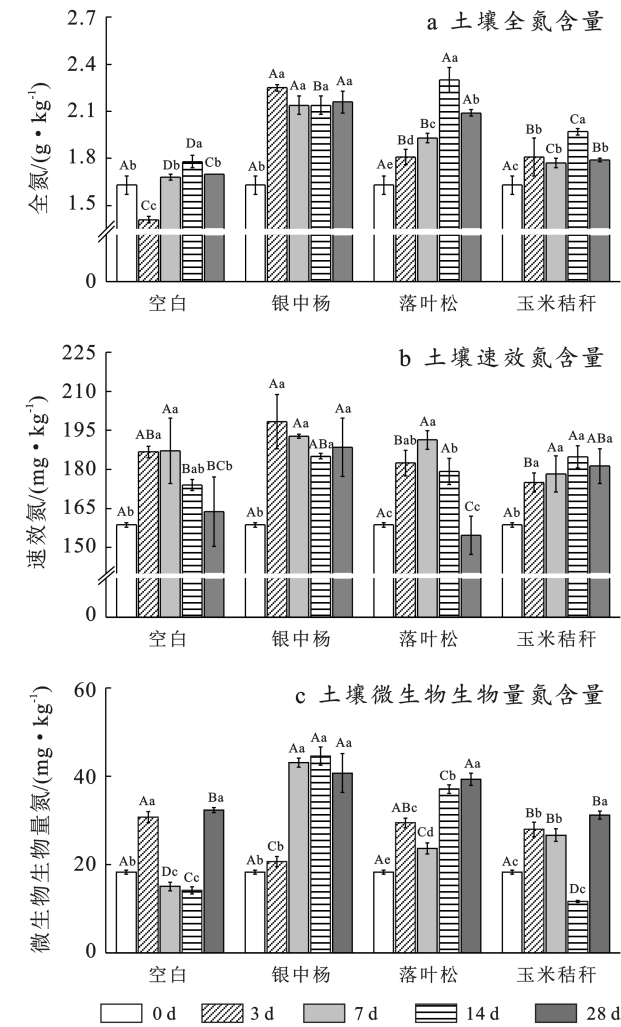
1.4 数据分析

首先在 Excel 2010 中进行简单的数据统计,使用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和沃勒—邓肯法(Waller-Duncan's test)检验同一时间不同凋落物输入的差异性( $\alpha=0.05$ ),采用 Pearson 相关性法对 3 种凋落物添加后土壤氮组分及酶活性之间的关系进行分析,应用 Origin Pro 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同凋落物输入对土壤全氮、微生物量氮及速效氮含量变化的影响

由图 1a 可见,在培养期间,全氮(TN)值的变化范围在 1.41~2.30 g/kg。与对照相比,添加凋落物的 3 组处理均显著提高了土壤的全氮含量( $p<0.05$ ),其中添加银中杨凋落物的处理(LP)全氮显著高于其他三组( $p<0.05$ )。不同凋落物添加下 0~28 d 的速效氮(AN)含量如图 1b 可见,AN 含量变化范围为 154.70~198.33 mg/kg,在培养期间 4 组处理的速效氮含量没有显著差异( $p>0.05$ )。由图 1c 可见,不同凋落物添加处理土壤微生物生物量氮(MBN)含量在 11.61~43.11 mg/kg 之间。其中添加银中杨凋落物处理(LP)在 3 d 时显著低于其他 3 组处理( $p<0.05$ );添加银中杨凋落物处理(LP)在 7 和 14 d 的 MBN 含量显著高于对照(CK)、添加落叶松凋落物(LL)及玉米秸秆(LS)( $p<0.05$ );添加银中杨和落叶松凋落物的处理 28 d 的 MBN 值显著高于对照和玉米秸秆( $p<0.05$ )。凋落物处理有利于促进土壤有机质积累和提高微生物活性,其中银中杨凋落物表现尤为突出。



注:不同大写字母表示相同测试期内不同处理的测试指标差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母相同处理在不同测试期的测试指标差异显著( $p<0.05$ )。

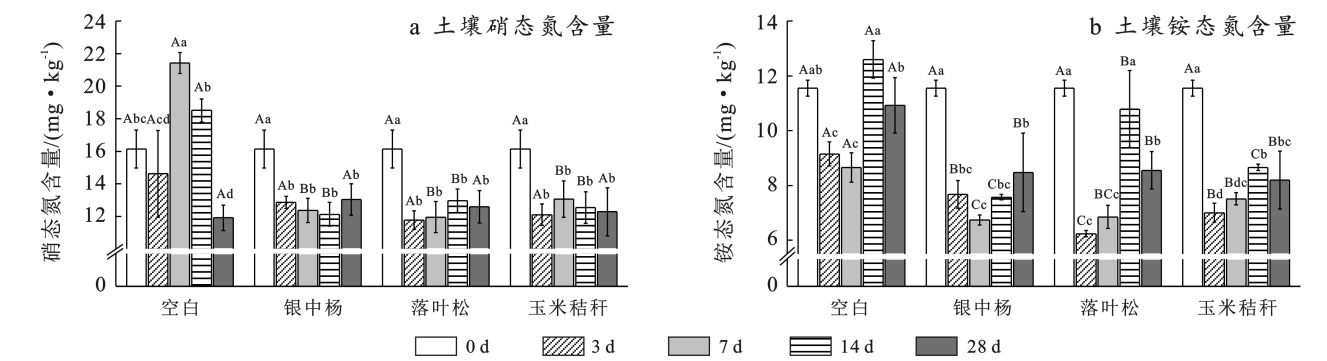
图 1 不同凋落物输入土壤养分含量  
Fig.1 Soil nutrient content of different litter inputs

2.2 不同种类凋落物输入对土壤无机氮变化的影响

由图 2a 可见,不同处理下土壤硝态氮( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )的含量变化范围别为 11.76~21.43 mg/kg。7 和 14 d 对照(CK)的硝态氮含量显著高于添加银中杨(LP)、落叶松凋落物(LL)和玉米秸秆(LS)处理( $p<0.05$ );3 和 28 d 时 4 组处理间硝态氮含量差异不显著。与  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  相比,土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ )含量变化较为显

著(如图 2b 所示),铵态氮含量变化范围为 6.24~12.6 mg/kg,培养期间对照组的铵态氮含量始终显著高于添加银中杨、落叶松凋落物和玉米秸秆处理( $p<0.05$ )。

研究表明,不同凋落物处理虽在不同培养时间点有差异,但与对照组相比,均显著降低了土壤硝态氮和铵态氮的含量。



注:不同大写字母表示相同测试期内不同处理的测试指标差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母相同处理在不同测试期的测试指标差异显著( $p<0.05$ )。

图 2 不同凋落物输入土壤的无机氮含量

Fig.2 Inorganic nitrogen content of soil with different litter inputs

2.3 不同种类凋落物输入对土壤酶活性的影响

不同凋落物输入下酶活性变化见图 3。其中脲酶活性变化范围为 43.49~174.85  $\mu\text{g/g}$ (图 3a),3,14,28 d 对照(CK)的脲酶活性显著低于添加银中杨(LP)、落叶松凋落物(LL)和玉米秸秆(LS)处理( $p<0.05$ );7 d 添加银中杨和玉米秸秆处理脲酶活性显著高于对照和添加落叶松凋落物处理。 $\beta$ -葡萄糖苷酶

活性变化范围为 473.73~1 580.89  $\mu\text{g/g}$ (图 3b),对照 3,7,14,28 d 的酶活性均显著低于添加银中杨、落叶松凋落物和玉米秸秆处理( $p<0.05$ )。凋落物的输入显著提高了土壤中脲酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性,且不同凋落物的影响存在差异。银中杨凋落物和玉米秸秆处理在促进脲酶活性方面表现尤为突出,而 3 种凋落物处理均对葡萄糖苷酶活性有显著促进作用。

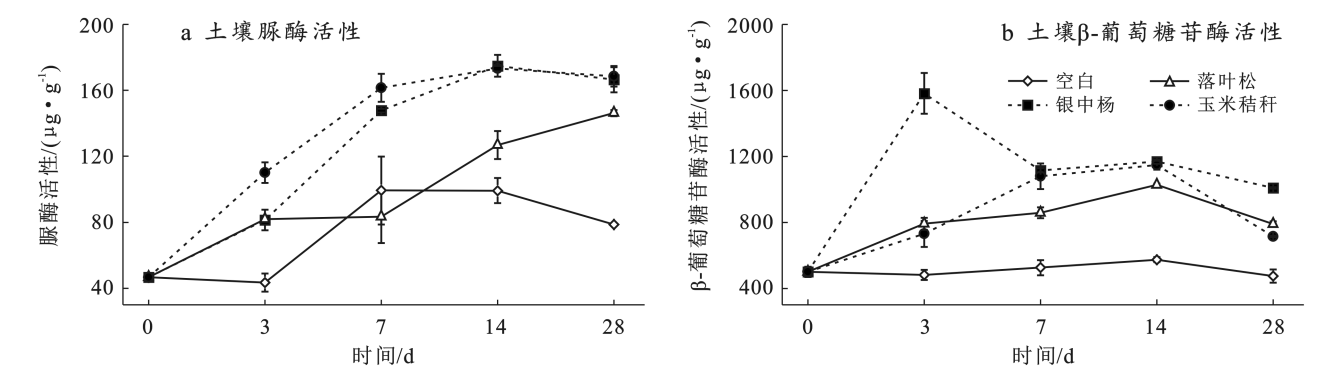


图 3 不同凋落物输入土壤的酶活性变化

Fig.3 Changes in enzyme activity of soil with different litter inputs

2.4 不同种类凋落物输入后土壤氮素与酶活性相关性分析

凋落物输入后土壤氮素与酶活性相关性分析表明(图 4), $\beta\text{G}$  除与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  呈极显著、显著负相关外,与 URE, TOC, TN, AN 均呈极显著正相关,可能因为凋落物作为丰富碳源输入到土壤中, $\beta\text{G}$  作为与 C 相关的酶,所以与各指标均相关性显著; URE 与 TOC, MBN, TN 呈显著、极显著相关性,与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  呈显著负相关; TOC 与 TN, MBN 呈极显著相关,与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  呈显著、极显著负相关; TN 与 AN, MBN 呈显著相关,与  $\text{NO}_3^--\text{N}$  呈显著负

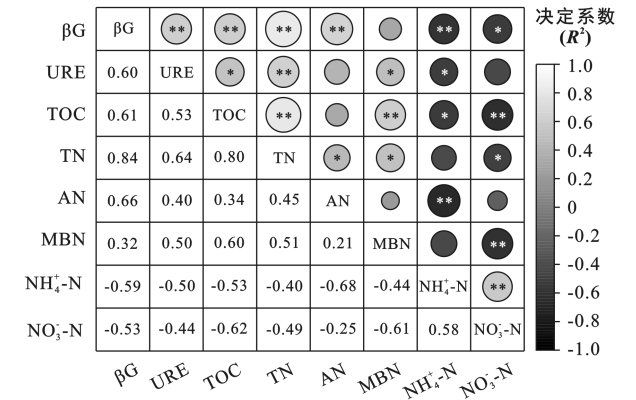
相关; AN 与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  呈极显著负相关; MBN 与  $\text{NO}_3^--\text{N}$  呈极显著负相关;与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  与  $\text{NO}_3^--\text{N}$  呈极显著相关。

3 讨论

3.1 土壤氮素对不同种类凋落物输入的响应  
本研究发现,凋落物输入显著提高了土壤的 TN 含量,这是由于凋落物作为林木生长发育过程中新陈代谢的产物<sup>[8]</sup>,含有大量的有机质,对土壤碳氮含量有显著影响。这与沈杨阳等<sup>[9]</sup>对不同龄级杉木林添加凋落物的研究结论一致。与添加玉米秸秆(LS)处



理相比,添加银中杨凋落物(LP)与落叶松凋落物(LL)的处理土壤全氮含量显著提高( $p<0.05$ )。针阔叶凋落物含有较高的 N 含量可能是其对土壤氮含量影响显著的原因。其中银中杨作为阔叶树种,C/N 比低,分解快,而落叶松为针叶树种,含有较多的难分解成分(纤维素、木质素和单宁等),造成针叶凋落物分解相对缓慢。这一趋势与赵勇等<sup>[10]</sup>在太行山针、阔叶森林凋落物分解及养分归还比较中研究结果一致。试验期间 MBN 含量在 18.28~44.51 mg/kg,外源输入物显著影响了 MBN 的动态变化。张圣喜等<sup>[11]</sup>对中亚热带 3 种典型阔叶树种凋落物分解时发现,土壤微生物的 C/N 比一般维持在 10 左右,添加的凋落物 C/N 比高时,土壤微生物对氮的需求增加。马红亮等<sup>[12]</sup>也在探讨土壤及凋落物氮源对中亚热带森林土壤 SON 的影响的研究中指出,当凋落物的 C/N 比越接近 25,其土壤微生物生物量氮越高。本研究中,银中杨、落叶松凋落物及玉米秸秆的 C/N 比分别为 27.50,64.97,111.87,且各处理 MBN 含量与 C/N 比呈负相关关系,与前述研究结论一致。结合本研究来看,C/N 比越接近 25,分解速率较快的阔叶凋落物能有效提升土壤生态功能,建议在实际应用中根据不同目标选择适宜的凋落物种类。



注:βG 表示葡萄糖苷酶;URE 表示土壤脲酶;TOC 表示土壤全碳;TN 表示全氮;AN 表示碱解氮;MBN 表示微生物量氮;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 表示铵态氮;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 表示硝态氮。\* 表示相关性显著( $p<0.05$ ),\*\* 表示相关性极显著( $p<0.01$ )。

图 4 土壤氮素与酶活性的相关性

Fig.4 Correlation between soil nitrogen and enzyme activity

方差分析表明不同凋落物添加较对照组显著降低了土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N ( $p<0.05$ ),唐佐芯等<sup>[13]</sup>在研究氮添加和凋落物处理对混交林土壤氮的影响中发现,铵态氮含量在凋落物输入的处理中较高,与本文研究结果相反,可能与本试验在培养期间土壤养分下降时微生物加速氮素吸收有关<sup>[14]</sup>。而铵态氮相较于硝态氮更容易被微生物吸收利用,本试验

研究结果中铵态氮的消耗更加显著,这与王军等<sup>[14]</sup>在去除凋落物和草毡层对寒温带典型森林土壤氮素的短期影响中研究结果一致。Xiong Y 等<sup>[15]</sup>研究说明,高 C/N 比的阔叶林凋落物 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量非常低,分解初期需要足够的无机氮<sup>[12]</sup>,本试验中,低 C/N 比的银中杨凋落物处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量最低且变化不显著,与前述研究结论一致。汪军等<sup>[16]</sup>在关于秸秆还田与土壤氮素之间的影响机制中发现,当外源物 C/N 比超出土壤水平时,微生物会吸收无机氮以调节至适宜 C/N 比,从而降低土壤中无机氮含量。本试验结果显示,银中杨、落叶松凋落物及玉米秸秆的 C/N 比分别为 27.50,64.97,111.87,均高于土壤 C/N 比 12.86,且培养期间三组处理无机氮含量均低于对照组,该发现进一步印证了前述观点。同时凋落物的输入可能增强厌氧条件下的反硝化作用,使得部分 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 以气体形式流失从而减少土壤无机氮含量<sup>[17]</sup>,综上所述,凋落物的添加对土壤无机氮转化过程具有重要调控作用,尤其在氮素的矿化与固定方面表现出显著影响,但其长期影响仍需进一步研究,以期更全面了解其在大规模退耕还林中的作用。

3.2 土壤酶对不同种类凋落物输入的响应

土壤酶通过分解底物为微生物提供满足其生长需求的养分和能量,在土壤碳氮循环过程中扮演着重要角色,其活性可以作为生态系统养分循环的重要指标<sup>[18]</sup>。本研究发现,各处理组酶活性均高于对照组。这可能是由于凋落物输入增加了土壤 C、N 含量,为养分积累创造了有利条件,从而增强了 URE 和 βG 活性。该结果与 F. Cattaneo, I. Mijangos 等<sup>[19-20]</sup>关于松树人工林替代草地对土壤酶活性影响的研究结论相一致。隗英华等<sup>[21]</sup>研究表明,在秸秆还田条件下,土壤 C/N 比被调控在适宜范围可促进微生物活性及酶分泌,提升土壤酶活性。本研究中,添加玉米秸秆是处理 URE 活性最高,支持了这一观点。此外,刘淑娟等<sup>[22]</sup>研究了不同植被演替阶段对土壤脲酶活性的影响指出,当土壤全氮(TN)含量低于 3.5 g/kg 时,URE 活性与 TN 呈显著正相关。本研究中,各处理的 TN 值均低于该阈值,且相关性分析 URE 活性与 TN 显著正相关,印证了前述观点。李涛等<sup>[23]</sup>在秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性研究中表明,高无机氮含量会极大抑制土壤脲酶的活性,本试验相关性分析也表明,URE 与无机氮呈显著负相关,进一步验证了这一结论。土壤 βG 活性与土壤有机质关系紧密,凋落物分解产生的养分(尤其是氮)为土壤微生物提供了丰富的生长资源,显著提高了微生物分泌 βG 的能力<sup>[24]</sup>。值得注意的是,银中杨凋落

物处理的  $\beta\text{G}$  活性显著高于其他处理(图 3b),可能因为银中杨凋落物氮含量相对较高,为  $\beta\text{G}$  的酶促反应提供了适宜的微环境条件<sup>[25]</sup>。

## 4 结论

(1) 不同凋落物的输入在不同程度上均提高了土壤的全氮、微生物生物量氮含量。其中添加银中杨凋落物的处理显著提高了土壤 TN 含量( $p<0.05$ ),表现出其较强的养分供给能力。

(2) 土壤无机氮含量随时间和处理变化显著。7 d 和 14 d 对照处理硝态氮含量显著高于添加凋落物处理( $p<0.05$ );对照组铵态氮含量始终显著高于其他 3 组添加处理( $p<0.05$ )。

(3) 土壤脲酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶与全氮、速效氮、微生物生物量氮呈显著或极显著正相关关系;与无机氮呈显著或极显著负相关关系,表明这些土壤酶活性可作为评价退耕还林土壤养分修复的重要指标。

本研究揭示了凋落物输入在土壤氮素循环和养分修复中的关键作用,强调了通过优化凋落物管理促进土壤功能恢复的潜力。研究结果为退耕还林地区土壤生态功能的提升提供了理论支持,对生态系统的可持续管理具有重要指导意义。

## 参考文献(References)

[1] 师立鹏,谷会岩,王秀伟.典型黑土区不同树种退耕还林地土壤活性有机碳差异及影响因素[J].生态学报,2025,45(1).  
Shi Lipeng, Gu Huiyan, Wang Xiwei. Vertical variation patterns of soil labile organic carbon under the different tree species for the Grain for Green Project in typical black soil region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(1).

[2] 周庭宇,肖洋,黄庆阳,等.森林凋落物分解的研究进展与展望[J].中国农学通报,2022,38(33):44-51.  
Zhou Tingyu, Xiao Yang, Huang Qingyang, et al. Forest litter decomposition: Research progress and prospect [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38 (33): 44-51.

[3] 罗国娜,车震宇.马尾松凋落物对土壤氮循环与微生物的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2023,54(4):553-561.  
Luo Guona, Che Zhenyu. The effects of litters from *Pinus massoniana* Lamb. On nitrogen cycle and microbes in soil [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2023,54(4):553-561.

[4] 张成富,赵庆霞,蔡银美,等.凋落物输入对根系分泌物碳输入及土壤氮的影响[J].森林与环境学报,2021,41(3):263-271.

Zhang Chengfu, Zhao Qingxia, Cai Yinmei, et al. Effect of litter input on root exudative carbon input and rhizosphere nitrogen [J]. Journal of Forest and Environment, 2021,41(3):263-271.

[5] 李常准,陈立新,段文标,等.凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):100-109.  
Li Changzhun, Chen Lixin, Duan Wenbiao, et al. Effects of litter treatment on soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in different forest types [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18 (1):100-109.

[6] 阮超越,刘小飞,吕茂奎,等.杉木人工林凋落物添加与去除对土壤碳氮及酶活性的影响[J].土壤学报,2020,57(4):954-962.  
Ruan Chaoyue, Liu Xiaofei, Lü Maokui, et al. Effects of litter carbon, nitrogen and enzyme activity in soil under Chinese fir [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (4): 954-962.

[7] 卢胜旭,许恩兰,吴东梅,等.米楮人工林土壤微生物群落组成对凋落物输入的响应[J].森林与环境学报,2020,40(1):16-23.  
Lu Shengxu, Xu Enlan, Wu Dongmei, et al. Response of soil microbial community composition on litterfall input in a *Castanopsis carlesii* plantation [J]. Journal of Forest and Environment, 2020,40(1):16-23.

[8] 李永涛,魏海霞,王莉莉,等.凋落物输入变化对黄河三角洲桤柳人工林土壤有机碳及其组分的影响[J].东北林业大学学报,2024,52(7):64-70.  
Li Yongtao, Wei Haixia, Wang Lili, et al. Effects of litter input changes on soil organic carbon and its fractions in *Tamarix chinensis* plantation in the Yellow River delta [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024,52(7):64-70.

[9] 沈杨阳,白彦峰,靳云铎,等.凋落物添加对不同龄级杉木林土壤养分与微生物特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2022,42(3):114-125.  
Shen Yangyang, Bai Yanfeng, Jin Yunduo, et al. Effects of litter additions on the soil nutrients and microbial properties in *Cunninghamia lanceolata* plantations of different stand ages [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022,42(3):114-125.

[10] 赵勇,吴明作,樊巍,等.太行山针、阔叶森林凋落物分解及养分归还比较[J].自然资源学报,2009,24(9):1616-1624.  
Zhao Yong, Wu Mingzuo, Fan Wei, et al. Comparison of nutrient return and litter decomposition between coniferous and broad-leaved forests in hilly region of Taihang Mountains [J]. Journal of Natural Resources, 2009,24(9):1616-1624.

- [11] 张圣喜, 陈法霖, 郑华. 土壤微生物群落结构对中亚热带三种典型阔叶树种凋落物分解过程的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3020-3026.  
Zhang Shengxi, Chen Falin, Zheng Hua. Response of soil microbial community structure to the leaf litter decomposition of three typical broadleaf species in mid-subtropical area, Southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3020-3026.
- [12] 马红亮, 马芬, 邱泓, 等. 土壤及凋落物源氮对中亚热带森林土壤 SON 的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 8167-8175.  
Ma Hongliang, Ma Fen, Qiu Hong, et al. Effects of soil and litter source nitrogen on SON in mid-subtropical forest soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 8167-8175.
- [13] 唐佐芯, 赵静, 孙筱璐, 等. 氮添加和凋落物处理对油松—辽东栎混交林土壤氮的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 75-81.  
Tang Zuoxin, Zhao Jing, Sun Xiaolu, et al. Effects of nitrogen addition and litter manipulation on soil nitrogen in a mixed *Pinus tabulaeformis* and *Quercus wutaishanica* forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 75-81.
- [14] 王军, 满秀玲. 去除凋落物和草毡层对寒温带典型森林土壤氮素的短期影响[J]. 森林工程, 2023, 39(4): 1-9.  
Wang Jun, Man Xiuling. Short-term effects of litter and sod layer removal on soil nitrogen in typical forests in cold temperate zone [J]. Forest Engineering, 2023, 39(4): 1-9.
- [15] Xiong Yanmei, Zeng Hui, Xia Hanping, et al. Interactions between leaf litter and soil organic matter on carbon and nitrogen mineralization in six forest litter-soil systems [J]. Plant and Soil, 2014, 379 (1/2): 217-229.
- [16] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40-44.  
Wang Jun, Wang Dejian, Zhang Gang, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 40-44.
- [17] 张学林, 吴梅, 何堂庆, 等. 秸秆分解对两种类型土壤无机氮和氧化亚氮排放的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 729-742.  
Zhang Xuelin, Wu Mei, He Tangqing, et al. Effects of crop residue decomposition on soil inorganic nitrogen and greenhouse gas emissions from fluvo-aquic soil and Shajiang black soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(4): 729-742.
- [18] 于洋, 张常仁, 杨雅丽, 等. 长期免耕和秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 695-704.  
Yu Yang, Zhang Changren, Yang Yali, et al. Effects of long-term no-tillage and different stover mulching amounts on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities of carbon and nitrogen cycle in Mollisols [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 695-704.
- [19] Cattaneo F, Di Gennaro P, Barbanti L, et al. Perennial energy cropping systems affect soil enzyme activities and bacterial community structure in a South European agricultural area [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 84: 213-222.
- [20] Mijangos I, Epelde L, Garbisu C, et al. Modification of soil enzyme activities as a consequence of replacing meadows by pine plantations under temperate climate [J]. Pedobiologia, 2014, 57(2): 61-66.
- [21] 隽英华, 何志刚, 刘慧屿, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1223-1229.  
Juan Yinghua, He Zhigang, Liu Huiyu, et al. Regulation effects of straw returning and nitrogen application management on farmland brown soil microbial biomass and enzyme activities [J]. Soils, 2023, 55(6): 1223-1229.
- [22] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5789-5796.  
Liu Shujuan, Zhang Wei, Wang Kelin, et al. Soil urease activity during different vegetation successions in karst peak-cluster depression area of Northwest Guangxi, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5789-5796.
- [23] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1633-1642.  
Li Tao, He Chune, Ge Xiaoying, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2016, 24(12): 1633-1642.
- [24] Adetunji A T, Lewu F B, Mulidzi R, et al. The biological activities of  $\beta$ -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: A review [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 17(3): 794-807.
- [25] Foudyl-Bey S, Brais S, Drouin P. Litter heterogeneity modulates fungal activity, C mineralization and N retention in the boreal forest floor [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 100: 264-275.