

丛枝菌根真菌对白茅枯落物养分特征及酶活性的影响

张越,姚玉珊,郑梦瑶,贾彤*

(山西大学 黄土高原研究所 山西省黄河实验室 山西省黄土高原生态恢复重点实验室,山西 太原 030006)

摘要:在受损生态系统中,枯落物作为土壤有机质的主要来源,对改善矿区土壤肥力具有重要作用。本研究模拟铜尾矿贫瘠土壤环境,研究不同氮素水平下接种近明球囊霉(GC)、幼套球囊霉(GE)、根内球囊霉(RI)和摩西管柄囊霉(FM)四种AMF对白茅枯落物属性及其酶活性的影响。研究表明,矿砂中接种GE可显著提高白茅枯落物总氮含量。低氮处理下,接种GC和GE提高了白茅枯落物纤维素酶活性,RI可提高蔗糖酶活性。非矿砂高氮处理下,枯落物pH与多酚氧化酶和脲酶活性均显著负相关,低氮处理下,枯落物pH与脲酶和过氧化氢酶显著正相关。矿砂低氮条件下,枯落物蔗糖酶活性均与枯落物总碳和pH显著正相关,多酚氧化酶活性与枯落物硝态氮含量、枯落物pH呈显著正相关。该研究对铜尾矿受损生态系统枯落物分解机制的研究有一定意义,对筛选有益的微生物菌种资源,提高矿区生态系统物种循环和营养转化效率有正向作用。

关键词:矿区生态系统;丛枝菌根真菌;氮素水平;枯落物酶活性

中图分类号:S792.35

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2025)05-1025-12

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Nutrient Characteristics and Enzyme Activities of *Imperata Cylindrica* Litter

ZHANG Yue, YAO Yushan, ZHENG Mengyao, JIA Tong*

(Shanxi Laboratory for Yellow River, Shanxi Key Laboratory of Ecological Restoration on Loess Plateau, Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In damaged ecosystems, litter, being the main source of soil organic matter, improves soil fertility. This study simulated the barren soil environment of copper tailings and studied the effects of inoculation with four arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), namely, *Glomerales Claroideum* (GC), *Glomus Etunicatum* (GE), *Glomus Intraradices* (RI), and *Funneliformis Mosseae* (FM), on the properties and enzyme activity of white fescue litter under different nitrogen (N) levels. Results show that *Glomus etunicatum* inoculation in mineralized (copper tailings) sand significantly increased the TN content of *I. cylindrica* litter. Under the low nitrogen (LN) treatment, *Glomus Claroideum* and *G. etunicatum* increased cellulase activity while *Rhizophagus irregularis* increased sucrase activity. Under the high nitrogen (HN) treatment in non-mineralized sand (*i.e.*, local river sand), litter pH significantly and negatively correlated with polyphenol oxidase (PPO) and urease activity, while under the LN treatment, litter pH significantly and positively correlated with urease and catalase activity. Under the LN treatment, litter sucrase activity positively correlated with litter TC and pH, while PPO activity positively correlated with litter NO_3^- and pH. This study has certain significance in studying the decomposition mechanism of litter in the damaged ecosystem (*e.g.*, copper tailings areas) of copper tailings, and has a positive effect on screening beneficial microbial resources and improving the efficiency of species cycling and nutrient transformation in the mining area ecosystem.

收稿日期:2023-05-20;接受日期:2024-01-08

基金项目:国家自然科学基金(32171524);山西省高等学校科技创新项目(2019L0005);山西省留学回国人员资助项目(2021-018);山西省研究生教育创新项目(2022Y121;2023KY129)

作者简介:张越(2000—),女,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向为植物与微生物生态学,E-mail:584694626@qq.com

*通信作者:贾彤(JIA Tong),E-mail:jiatong@sxu.edu.cn

引文格式:张越,姚玉珊,郑梦瑶,等.丛枝菌根真菌对白茅枯落物养分特征及酶活性的影响[J].山西大学学报(自然科学版),2025,48(5):1025-1036. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2024046.

Key words: mining area ecosystem; arbuscular mycorrhizal fungi; nitrogen level; litter enzyme activity

0 引言

枯落物是生态系统的重要组成部分^[1],对维持生态系统功能的稳定具有重要作用^[2]。一方面,在生态系统内枯落物能为分解者和部分消费者提供物质和能量来源^[3]。另一方面,植物吸收土壤中的氮、磷,并通过光合作用固定碳来支持自身生长发育,最后形成枯落物将养分归还于土壤,形成了植物-凋落物-土壤有机连续体^[4]。植物、枯落物和土壤之间相互转换实现生态系统内部碳、氮、磷循环。因此,枯落物转化是土壤有机质的主要来源^[5],为改善土壤理化性质奠定了基础,同时,枯落物分解释放的矿质元素与营养物质对陆地植物的生长也具有重要的调节作用^[6]。以往研究表明,氮、磷添加可以显著影响植物和枯落物的氮磷含量,且土壤可由改变植物的再吸收效率和养分的利用策略,进而影响凋落物养分含量^[7]。酶是催化枯落物中复杂化合物降解的重要驱动因子,枯落物蔗糖酶、淀粉酶、脲酶和磷酸酶是参与植物残体有机质转化重要的水解酶类^[8],酶活性影响枯落物的分解速率^[9],进而影响生态系统的物质循环转化过程。研究表明,营养元素的添加会显著影响着植物的生长状况、枯落物养分^[10-11]和枯落物酶活性特征。目前,关于枯落物的研究主要集中在枯落物分解动态及其影响因素等方面^[12-14]。有关外源营养物质输入后,枯落物酶活性动态变化特征的研究多见于森林生态系统^[15-17]。

枯落物是土壤微生物代谢的能量和营养来源,通过土壤微生物代谢维持陆地生态系统的物质循环^[18]。枯落物能为多种土壤动物和土壤微生物提供栖息地,防止降水破坏土壤团聚体同时保持微气候稳定。同时,枯落物还是土壤微生物的主要生命物质和能量来源^[19]。土壤微生物中,丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)可以与陆地80%的维管植物形成互利共生的丛枝菌根共生体^[20],对生态系统养分周转产生间接影响,真菌输送给植物氮、磷及其他营养元素,而植物则把光合固定

的碳传递给真菌以满足其生长需要^[21]。已有研究表明,在养分贫瘠的环境下,AMF有促进植物吸收水分和碳、氮、磷、硫、铁、锌、锰等元素,提高植物的抗逆性等作用^[22]。此外,AMF对宿主植物凋落物的分解具有重要意义。Leifheit等^[23]发现接种*Rhizophagus irregularis*会显著降低木本植物凋落物的分解率。Cheng等^[24]表明AMF在高CO₂及高N₂浓度下,会促进有机碳分解。李欢等^[25]对羊草(*Leymus chinensis*)不同部位凋落物研究发现,接种AMF(*Glomus Mosseae*和*Glomus Claroideum*)会显著降低羊草根系凋落物的分解系数,但对其地上部分均未产生显著性影响。AMF主要通过影响宿主植物枯落物性质或者微生物群落间接参与枯落物的分解过程^[26]。因此,探究AMF对枯落物养分特征及其酶活性的调控作用,对理解枯落物分解机制具有重要意义。

枯落物可以有效促进土壤养分循环,改善贫瘠土壤现状。近年来,随着我国矿产资源的开采,导致周边生态环境受损严重,如土壤养分含量和生物多样性降低等问题。因此,矿区受损生态系统的恢复就成为人们关注的热点问题之一。山西省中条山铜矿是中国北方最大的铜业生产基地,年产矿量700万吨以上,为全国最大的非煤地下开采矿山。该区域矿产资源以铜为主,伴生有钴、钼、金、银等多种金属^[27]。随排砂量的增加,尾矿坝抬升速度逐渐加快,尾矿的大量堆积对当地生态环境造成严重污染和破坏^[28]。该尾矿矿砂养分含量低,随着尾矿坝植被恢复年限的增加,每年植被枯落物不断堆积^[29],且优势植被白茅(*Imperata cylindrica*)能够与AMF形成共生体^[30]。基于此,本研究以铜尾矿区优势种白茅为对象,利用温室盆栽试验,模拟铜尾矿的土壤基质,研究不同氮素水平下AMF对白茅枯落物酶活性的影响,以期对铜尾矿受损生态系统养分循环起到积极的推动作用,为提高矿区生态系统的物种循环和营养转化效率提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

白茅(*Imperata cylindrica*)是禾本科、白茅属多年生草本植物,秆直立,高可达80 cm,节无毛。白茅种子使用前先用体积分数10% H_2O_2 浸泡10 min,然后用无菌水冲洗数次,以杀死种子表面杂菌^[31]。供试AMF为近明球囊霉(GC)、幼套球囊霉(GE)、根内球囊霉(RI)和摩西管柄囊霉(FM),原种以高粱(*Sorghum bicolor*)为宿主植物,在温室进行扩繁培养。供试土壤为河沙以及铜尾矿矿砂,过2 mm筛除去杂质,121 °C,0.11 MPa高压灭菌2 h。种植白茅前对土壤进行冲洗,消除原有养分对实验的影响。

1.2 试验设计

2020年1月在温室中开展试验,称取灭菌基质于21 cm×12 cm的塑料花盆中,装至花盆三分之二处,AMF处理中加入100 g AMF接种剂,平铺在灭菌基质上,不接种AMF处理中加入等量灭菌接种剂,再覆盖2 cm灭菌基质,最后均匀播种白茅种子20~30颗。一个月后对白茅植株进行间苗,每盆中保留白茅15株^[32]。试验采用2×5×2的三因素完全随机区组设计,因素一为土壤类型,设置矿砂和河沙2个水平;因素二为AMF接种处理,设置接种GC、GE、RI、FM和不接种共5个水平;因素三为养分处理,分为低氮(LN)和高氮(HN)处理2个水平,每个处理设置5个重复,共100盆。

氮素以尿素的形式进行接种,依据铜尾矿区氮素含量最低子坝523子坝进行接种,高氮组的接种量是低氮组的10倍^[33]。营养液使用霍格兰营养液,其组成包括:5.0 mmol/L $CaCl_2$, 5.0 mmol/L KCl , 2.5 mmol/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 2.0 mmol/L KH_2PO_4 , 29 μ mol/L Na_2-EDTA , 20 mmol/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$;以及微量元素45 mmol/L H_3BO_3 , 6.6 mmol/L $MnSO_4$, 0.8 mmol/L $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.6 mmol/L H_2MoO_4 , 0.4 mmol/L $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, pH(6.0±0.1),每盆每次浇营养液800 mL。在2020年9月对盆栽植株进行刈割,并采集盆栽白茅植株枯落物。

1.3 枯落物性质

枯落物pH用pH计测量(HANNA HI3221, 枯落物与水的比例为1:20, m/V)^[34];枯落物样

品在65 °C下烘干至恒重,测定其含水率以及枯落物重量。用元素分析仪(vario MACRO cube, Germany)测定枯落物总碳(TC)、总氮(TN)和总硫(TS)含量^[35]。用全自动间断化学分析仪(De Chem-Tech, CleverChem380, Germany)测定铵态氮(NH_4^+)和硝态氮(NO_3^-)含量。

1.4 枯落物酶活性

脲酶活性用苯酚钠-次氯酸钠比色法,以24 h,1 g枯落物中 NH_3^+-N 的质量(mg)表示。蔗糖酶和纤维素酶活性用3'5-二硝基水杨酸比色法,其中,蔗糖酶活性以24 h,1 g枯落物生成葡萄糖质量(mg)表示^[36],纤维素酶以72 h,10 g枯落物生成葡萄糖质量(mg)表示。过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测得,以20 min后1 g枯落物消耗的高锰酸钾的体积(mL)表示^[37]。

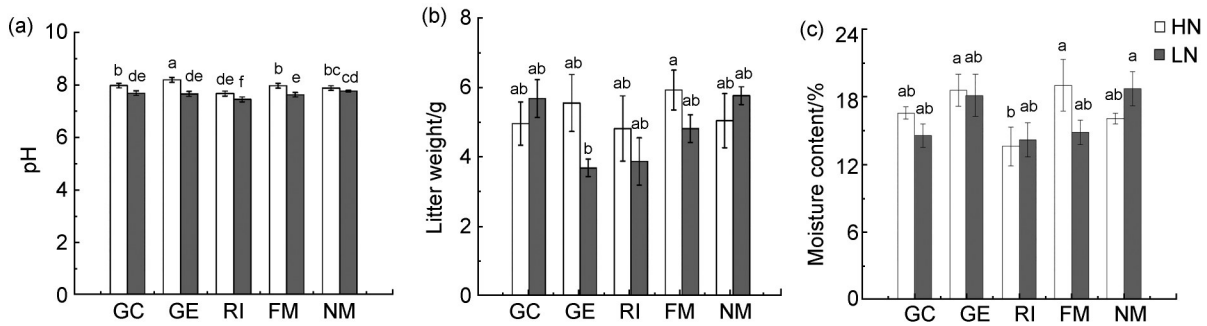
1.5 数据分析

数据采用SPSS.25进行统计分析。通过双因素方差分析(Two-way ANOVA)和单因素方差分析(One-way ANOVA),事后检验使用邓肯多重比较(Duncan's Multiple Range test)来检验不同菌剂处理间的差异。通过用Origin2021进行对统计结果可视化。通过相关分析(Correlation analysis)来研究相同条件下各指标间的相关性。

2 结果

2.1 白茅枯落物性质

非矿砂条件下接种AMF菌剂对白茅枯落物生物量没有显著影响(图1)。矿砂条件下低氮处理接种GC、RI菌剂白茅枯落物生物量显著低于对照NM(No Mycelium)(图2)。非矿砂条件下,高氮处理接种GE菌剂白茅枯落物pH显著高于对照NM($P < 0.05$),接种RI菌剂白茅枯落物pH显著低于对照NM($P < 0.05$);低氮处理接种GE、RI菌剂白茅枯落物pH显著低于对照NM(图1)。矿砂条件下高氮处理和低氮处理接种AMF菌剂白茅枯落物pH均显著低于对照NM(图2)。而多因素方差分析结果表明,氮素、土壤类型、AMF种类及三者交互作用对白茅枯落物pH有显著影响(表1)。



注:不同小写字母表示枯落物性质在各个分解阶段差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in litter properties at different decomposition stages ($P < 0.05$). The same below.

图1 非矿砂条件下枯落物pH(a)、凋落物重量(b)及含水量特征(c)

Fig. 1 Characteristics of pH (a), litter weight (b), and moisture content (c) of litter in non-mineralized sand

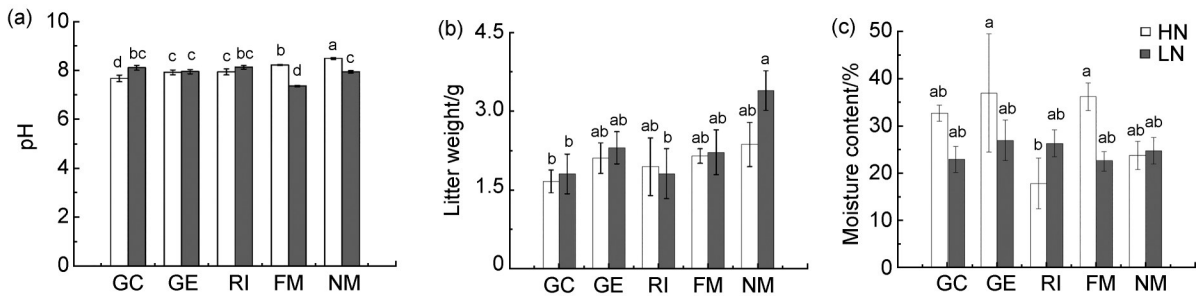


图2 矿砂条件下枯落物pH(a)、凋落物重量(b)及含水量特征(c)

Fig. 2 Characteristics of pH (a), litter weight (b), and moisture content (c) of litter in mineralized sand

表1 不同氮条件下接种AMF对枯落物胞外酶活性的多因素方差分析

Table 1 Multi-way ANOVA analysis of AMF infection on extracellular enzyme activity of litter under different nitrogen conditions

	pH		含水量/%		铵态氮/(mg/kg)		硝态氮(mg/kg)		总氮/%		总碳/%		总硫/%	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Nitrogen	56.134	<0.001	2.743	0.102	998.756	<0.001	94.763	<0.001	103.491	<0.001	13.441	<0.001	1.621	0.207
Soil type	37.697	<0.001	41.334	<0.001	69.868	<0.001	8.155	0.005	28.146	<0.001	738.163	<0.001	8.492	0.005
AMF	8.197	<0.001	2.091	0.091	58.021	<0.001	50.165	<0.001	3.301	0.015	2.912	0.027	3.342	0.014
Nitrogen×Soil type	6.237	0.015	1.557	0.216	49.124	<0.001	11.623	0.001	3.747	0.056	17.752	<0.001	0.171	0.681
Nitrogen×AMF	16.104	<0.001	2.343	0.062	82.054	<0.001	13.556	<0.001	6.275	<0.001	2.016	0.101	13.819	<0.001
Soil type×AMF	11.507	<0.001	0.639	0.636	48.449	<0.001	21.058	<0.001	18.065	<0.001	6.176	<0.001	3.597	0.010
Nitrogen×Soil type×AMF	18.958	<0.001	1.019	0.403	27.648	<0.001	9.454	<0.001	2.879	0.028	5.013	0.001	3.813	0.007

注:符号×表示不同处理之间的交互作用。下同。

Note: The symbol × represents the interaction between different treatments. The same below.

2.2 白茅枯落物养分特征

非矿砂条件下高氮处理接种GC菌剂白茅枯落物铵态氮含量显著高于对照NM ($P < 0.05$) (图3)。矿砂条件下,高氮处理接种FM菌剂对白茅枯落物铵态氮含量显著提高(图4);低氮处理下,接种AMF菌剂对白茅枯落物铵态氮含量显著提高($P < 0.05$)。

非矿砂条件下高氮处理接种GC、RI、FM菌剂白茅枯落物硝态氮含量显著提高

($P < 0.05$);低氮处理接种AMF菌剂白茅枯落物硝态氮含量显著提高(图3)。矿砂条件下高氮处理接种AMF菌剂白茅枯落物硝态氮含量均显著提高($P < 0.05$);低氮处理接种GC、RI菌剂白茅枯落物硝态氮含量显著提高(图4)。矿砂条件下,接种GE显著提高了白茅枯落物总氮含量(图4)。非矿砂条件下,高氮处理接种FM菌剂白茅枯落物总碳含量显著提高

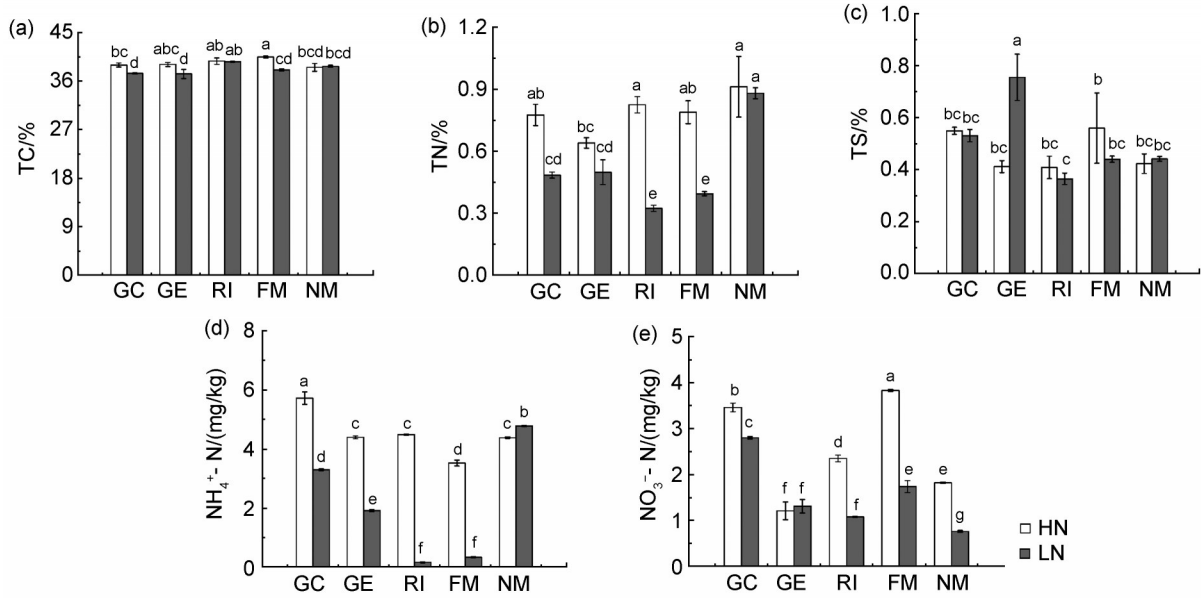


图3 非矿砂条件下枯落物总碳(a)、总氮(b)、总硫(c)、铵态氮(d)和硝态氮(e)的特征

Fig. 3 Characteristics of total carbon (a), total nitrogen (b), total sulfur (c), ammonium nitrogen (d), and nitrate nitrogen (e) of litter in non-mineralized sand

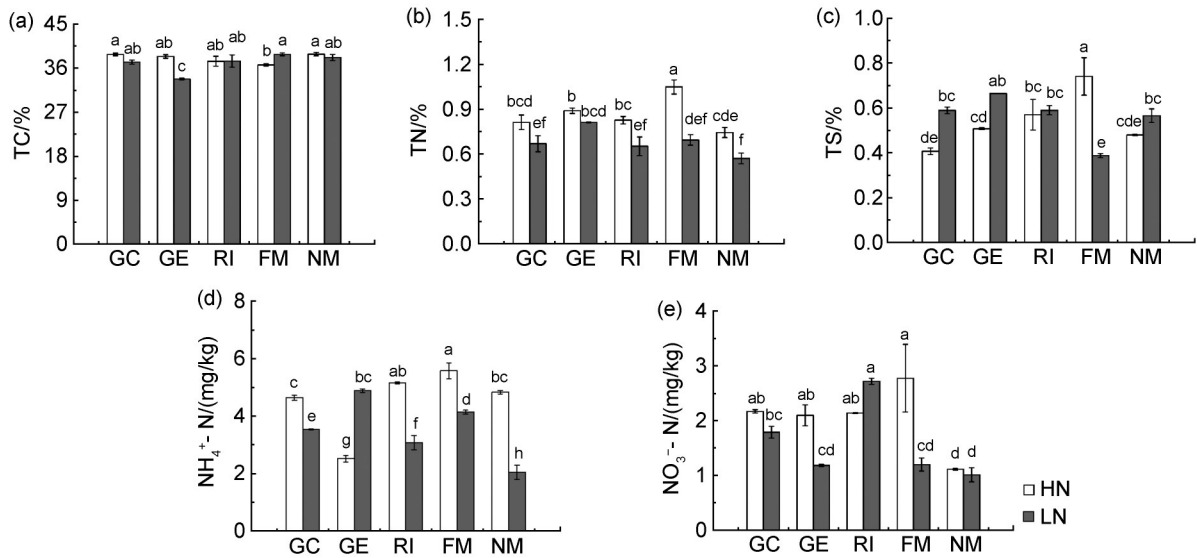


图4 矿砂条件下枯落物总碳(a)、总氮(b)、总硫(c)、铵态氮(d)和硝态氮(e)的特征

Fig. 4 Characteristics of total carbon (a), total nitrogen (b), total sulfur (c), ammonium nitrogen (d), and nitrate nitrogen (e) of litter in mineralized sand

($P < 0.05$), 低氮处理接种 GE 菌剂白茅枯落物总硫含量显著提高(图 3)。氮素、土壤类型、AMF 种类及三者交互作用对白茅枯落物铵态氮、硝态氮、总碳、总氮含量有显著影响(表 1)。

2.3 白茅枯落物酶活性特征

非矿砂条件下,接种 AMF 菌剂白茅枯落物脲酶活性显著降低(图 5)。矿砂基质的低氮处理下,接种 RI 菌剂显著提高了白茅枯落物蔗糖酶活性(图 6)。非矿砂条件下高氮处理接种

GC 菌剂对白茅枯落物纤维素酶活性显著提高(图 5),低氮处理接种 RI 菌剂对白茅枯落物纤维素酶活性显著提高($P < 0.05$)。矿砂条件下低氮处理接种 GC、GE 菌剂对白茅枯落物纤维素酶活性显著提高(图 6)。矿砂基质下,接种 RI 菌剂对白茅枯落物多酚氧化酶活性显著提高(图 6)。

本研究中,氮素、土壤类型、AMF 种类及三者交互作用对白茅枯落物脲酶、蔗糖酶和纤维素

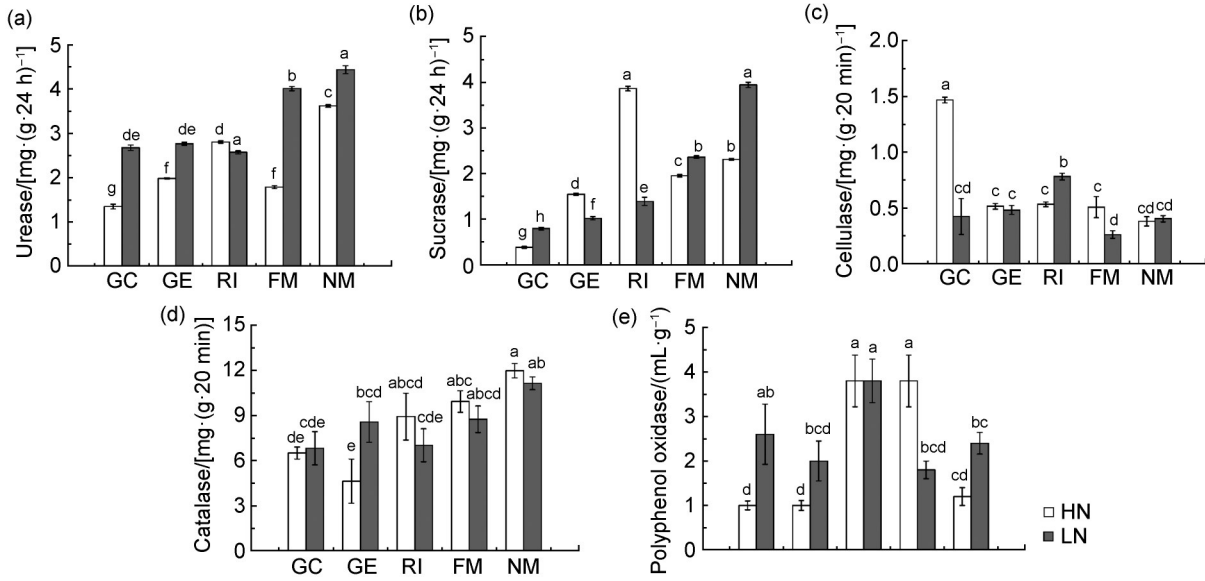


图5 非矿砂条件下枯落物的脲酶(a)、蔗糖酶(b)、纤维素酶(c)、过氧化氢酶(d)和多酚氧化酶(e)的活性

Fig. 5 The activities of urease (a), sucrase (b), cellulase (c), catalase (d), and polyphenol oxidase (e) in litter under non-mineralized sand

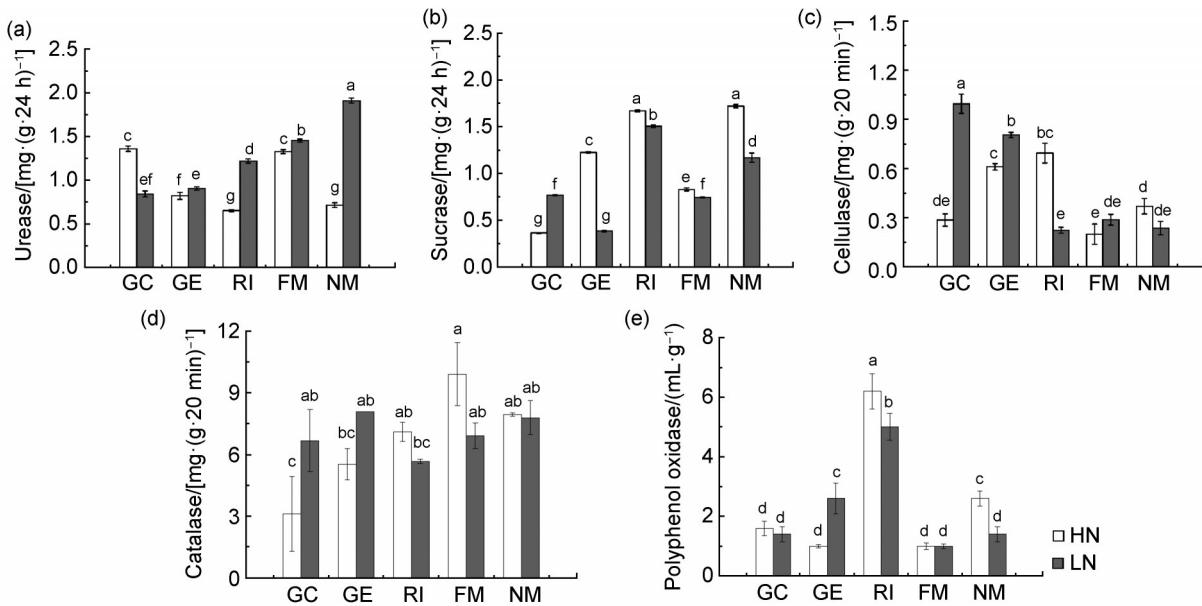


图6 矿砂条件下枯落物的脲酶(a)、蔗糖酶(b)、纤维素酶(c)、过氧化氢酶(d)和多酚氧化酶(e)的活性

Fig. 6 The activities of urease (a), sucrase (b), cellulase (c), catalase (d), and polyphenol oxidase (e) in litter under mineralized sand

酶有显著影响($P < 0.05$),此外,AMF种类还显著影响过氧化氢酶和多酚氧化酶活性(表2)。

2.4 不同氮素条件下枯落物酶活性与其理化性质之间的相关性分析

非矿砂高氮条件下,枯落物脲酶活性与枯落物硝态氮含量、枯落物pH呈显著负相关(表3)。蔗糖酶活性与总氮含量呈正相关,与总硫、硝态氮含量呈负相关($P < 0.05$)。过氧化氢酶活性与总氮含量呈正相关($P < 0.05$)。纤

维素酶活性与铵态氮含量、硝态氮含量呈显著正相关($P < 0.05$)。多酚氧化酶活性与总碳含量呈显著正相关,枯落物pH呈显著负相关(表3)。非矿砂低氮条件下,枯落物脲酶活性与枯落物总氮含量、枯落物pH呈显著正相关,过氧化氢酶活性与枯落物pH、枯落物含水率呈显著正相关,与枯落物硝态氮含量呈显著负相关($P < 0.05$),纤维素酶活性以及多酚氧化酶活性与枯落物总碳含量呈显著正相关(表4)。

表2 不同氮条件下接种AMF对枯落物胞外酶活性的多因素方差分析

Table 2 Multi-way ANOVA analysis of AMF infection on extracellular enzyme activity of litter under different nitrogen conditions

	Urease/ [(mg•(g•24 h) ⁻¹)]		Sucrase/ [(mg•(g•24 h) ⁻¹)]		Catalase/ [(mg•(g•20 min) ⁻¹)]		Cellulase/ [(mg•(g•72 h) ⁻¹)]		Polyphenol oxidase/ (mL•g ⁻¹)	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Nitrogen	701.641	<0.001	192.913	<0.001	0.172	0.683	7.209	0.009	0.232	0.631
Soil type	4 868.701	<0.001	5 097.588	<0.001	11.798	0.001	17.602	<0.001	0.058	0.812
AMF	290.325	<0.001	2 474.171	<0.001	10.069	<0.001	50.656	<0.001	50.051	<0.001
Nitrogen×Soil type	207.481	<0.001	28.142	<0.001	0.072	0.788	33.823	<0.001	2.841	0.096
Nitrogen×AMF	64.118	<0.001	764.772	<0.001	5.235	0.001	2.812	0.031	6.355	<0.001
Soil type×AMF	149.194	<0.001	544.085	<0.001	1.981	0.105	12.193	<0.001	12.123	<0.001
Nitrogen×Soil type×AMF	144.233	<0.001	781.038	<0.001	0.984	0.421	68.662	<0.001	5.993	<0.001

表3 高氮处理非矿砂条件下白茅枯落物酶活性与理化性质的相关分析

Table 3 Correlation analysis between enzyme activity and physicochemical properties of litter of *I. cylindrica* under high nitrogen treatment in non-mineralized sand

	TN	TC	TS	LWC	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Urease	Sucrase	Catalase	Cellulase	Polyphenol oxidase
TC	0.061										
TS	-0.042	-0.530**									
LWC	0.190	0.043	0.051								
NH ₄ ⁺ -N	0.750**	0.132	0.001	0.190							
NO ₃ ⁻ -N	0.083	0.392**	0.101	0.181	0.090						
Urease	0.044	-0.272	-0.18	-0.060	-0.251	-0.466**					
Sucrase	0.412**	0.221	-0.325*	-0.011	0.151	-0.298*	0.644**				
Catalase	0.336*	0.201	-0.201	0.121	0.070	0.071	0.460**	0.442**			
Cellulase	0.021	0.191	0.121	-0.060	0.318*	0.440**	-0.627**	-0.462**	-0.260		
Polyphenol oxidase	-0.131	0.373**	0.020	-0.241	-0.251	0.210	-0.020	0.270	0.041	-0.060	
pH	0.457**	0.152	0.081	0.303*	0.653**	0.181	-0.402**	-0.131	-0.080	0.201	-0.384**

注:显著性差异表示为:*为 $P < 0.05$,**为 $P < 0.01$,***为 $P < 0.001$ 。下同。

Note: Significant differences are expressed as: * for $P < 0.05$, ** for $P < 0.01$, *** for $P < 0.001$. The same below.

表4 低氮处理非矿砂条件下白茅枯落物酶活性与理化性质的相关分析

Table 4 Correlation analysis between enzyme activity and physicochemical properties of litter of *I. cylindrica* under low nitrogen treatment in non-mineralized sand

	LWC	Urease	Sucrase	Catalase	Cellulase	Polyphenol oxidase	TN	TC	TS	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
Urease	0.261										
Sucrase	0.297	0.903**									
Catalase	0.404*	0.543**	0.556**								
Cellulase	-0.066	-0.495*	-0.254	-0.068							
Polyphenol oxidase	-0.188	-0.298	-0.116	-0.224	0.670**						
TN	0.439*	0.634**	0.714**	0.376	-0.304	-0.21					
TC	0.001	0.118	0.287	0.271	0.416*	0.442*	-0.174				
TS	0.209	-0.274	-0.361	-0.168	-0.107	-0.297	0.168	-0.831**			
NH ₄ ⁺ -N	0.345	0.363	0.439*	0.339	-0.222	-0.127	0.854**	-0.176	0.143		
NO ₃ ⁻ -N	-0.372	-0.403	-0.598**	-0.485*	-0.233	-0.079	-0.337	-0.498*	0.162	-0.028	
pH	0.248	0.425*	0.371	0.534**	-0.329	-0.347	0.623**	-0.337	0.312	0.655**	0.074

矿砂高氮条件下, 枯落物蔗糖酶活性以及过氧化氢酶活性与枯落物 pH 呈显著正相关(表 5)。矿砂低氮条件下, 枯落物脲酶活性与枯落物总氮含量、总硫含量、铵态氮含量呈显著负相关, 与枯落物总碳含量呈显著正相关($P < 0.05$), 蔗糖酶活性与枯落物总碳含量和 pH 显著正相关(表 5)。过氧化氢酶活性与枯落物总氮含量呈显著正相关。纤维素酶活性与枯落物总碳含量呈显著负相关, 与枯落物铵态氮含量呈显著正相关($P < 0.05$)。多酚氧化酶活性与枯落物硝态氮含量、pH 呈显著正相关($P < 0.05$)。

3 讨论

枯落物性质受多种生物和非生物因子的影响^[38]。本研究结果发现, 氮素、土壤类型、AMF 种类及三者交互作用对白茅枯落物 pH、铵态氮、硝态氮、总碳、总氮、枯落物脲酶、蔗糖酶、纤维素酶有显著影响($P < 0.05$)。这可能是由于土壤理化性质的改变间接影响了白茅枯落物属性^[39]。AMF 在氮元素的生物地球化学循

环中发挥着重要的作用, 可显著影响氮素的吸收、转化、氨化、硝化和反硝化作用^[40]。AMF 可以利用 NH_4^+ 、 NO_3^- 和氨基酸, 将其转化为可利用的氮素形态, 转运至宿主细胞^[41]。本研究结果发现, 氮素对白茅枯落物理化因子有显著影响, 且矿砂低氮条件下, 接种 4 种 AMF 菌剂对白茅枯落物铵态氮含量显著提高, 其原因一方面是氮添加使得可以被植物吸收利用的有效氮增加, 菌根共生加强, 促进了 AMF 菌丝对有效氮的吸收^[42]。另一方面是 AMF 可以促进固氮作用, AMF 根外菌丝更偏向吸收铵态氮^[43]。

枯落物酶活性变化是枯落物分解过程中十分重要的指标, 能够加快植物残体中含氮化合物和碳化合物的降解, 为植物的生长发育提供充足的氮素和碳源。研究发现, 蔗糖酶和淀粉酶均参与枯落物中碳水化合物的降解, 氮输入促进了小叶章枯落物 (*Calamagrostis angustifolia*) 落物蔗糖酶和淀粉酶活性, 但这两种酶活性对氮输入响应不同^[8], 这与本研究结果不一致。本研究中, 矿砂低氮处理下, 接种 RI 菌

表 5 矿砂条件下白茅凋落物酶活性与理化性质的相关分析

Table 5 Correlation analysis between enzyme activity and physicochemical properties of litter of *I. cylindrica* in mineralized sand

		LWC	Urease	Sucrase	Catalase	Cellulase	Polyphenol oxidase	TN	TC	TS	NH_4^+-N	NO_3^--N
高氮	Urease	0.318										
	Sucrase	-0.347	-0.929**									
	Catalase	-0.041	-0.137	0.316								
	Cellulase	-0.182	-0.667**	0.559**	-0.159							
	Polyphenol oxidase	-0.415*	-0.585**	0.581**	0.056	0.518**						
	TN	0.187	0.379	-0.311	0.336	-0.296	-0.364					
	TC	0.029	-0.135	0.002	-0.328	-0.067	-0.196	-0.450*				
	TS	0.078	0.155	0.037	0.395	-0.091	0.065	0.401*	-0.776**			
	NH_4^+-N	-0.174	0.241	-0.022	0.363	-0.428*	0.336	0.155	-0.288	0.216		
	NO_3^--N	0.109	0.396	-0.391	0.218	-0.186	-0.127	0.596**	-0.238	0.001	0.246	
pH	-0.101	-0.303	0.488*	0.421*	-0.197	0.007	0.051	-0.246	0.349	0.251	-0.318	
低氮	Urease	-0.003										
	Sucrase	-0.012	0.469*									
	Catalase	-0.286	0.084	-0.288								
	Cellulase	-0.076	-0.800**	-0.656**	0.021							
	Polyphenol oxidase	0.175	-0.205	0.513**	-0.172	-0.253						
	TN	-0.263	-0.505**	-0.522**	0.404*	0.332	0.031					
	TC	-0.153	0.529**	0.444*	-0.221	-0.450*	-0.279	-0.431*				
	TS	0.169	-0.428*	-0.063	-0.082	0.479*	0.354	0.191	-0.647**			
	NH_4^+-N	0.102	-0.329	0.282	-0.221	0.326	0.435*	-0.003	-0.219	0.732**		
	NO_3^--N	0.026	-0.648**	-0.717**	0.118	0.473*	-0.006	0.571**	-0.513**	0.008	-0.297	
pH	0.077	-0.342	0.605**	-0.344	-0.105	0.705**	-0.051	0.059	0.176	0.465*	-0.109	

剂显著提高了白茅枯落物蔗糖酶活性,接种 GC、GE 菌剂对白茅枯落物纤维素酶活性显著提高。这可能是由于枯落物酶活性因枯落物种类不同而显著变化^[44]。此外,刘圆圆等^[45]研究发现,接种 AMF 也会显著增加脲酶的活性和植株中氮的吸收量。然而,本研究发现,非矿砂条件下接种 AMF 的白茅枯落物脲酶活性显著降低。这可能是由于植物枯落物酶活性对不同 AMF 的响应具有差异性而导致的。

已有研究表明,氮素对凋落物酶活性的研究结论不一致,有表现为促进的^[46-47],也有表现为抑制的^[48],还有没有影响的^[49]。研究表明,小叶章枯落物酶活性受到气温、土温及降水等主要环境因子的综合作用^[8]。本研究结果表明,非矿砂低氮条件下,纤维素酶活性以及多酚氧化酶活性与枯落物总碳含量呈显著正相关,非矿砂高氮处理下,枯落物 pH 与多酚氧化酶和脲酶活性均呈显著负相关($P < 0.05$),低氮处理下,枯落物 pH 与脲酶和过氧化氢酶显著正相关。这表明枯落物脲酶活性与 pH 的关系取决于氮素水平。造成这种差异的原因可能是:一方面,不同氮素改变了枯落物的外部营养环境,进而影响了枯落物酶活性;另一方面,枯落物酶主要来源于植物-土壤界面微生物及动植物残体分解过程,接种 AMF 和氮素输入,改变了植物和土壤相关微生物的群落组成和结构,进而影响了枯落物酶活性^[16]。

AMF 菌丝分泌的胞外酶也会影响有机质的分解。Staddon 等通过研究 AMF 菌丝中碳的周转率发现,涉及营养物质吸收的 AMF 菌丝传输效率更快^[50]。球囊霉素是球囊霉属 AMF 分泌的一种糖蛋白,是目前发现的可以从 AMF 分泌到土壤中的蛋白质^[51]。有研究认为,氮素对丛枝菌根真菌与植物的共生关系有显著影响^[52]。本研究发现,矿砂条件下,无论氮素水平如何,接种 GE 均显著提高了白茅枯落物总氮含量。这可能是因为接菌对根际微生态环境表达为正效应,促进了氮元素的积累。球囊霉素通过 AMF 菌丝,会改善其他土壤微生物的活性^[51],进而对枯落物的养分特征和酶活性产生影响。因此,枯落物属性的改变可有效提高矿区生态系统的物种循环和营养转化效率,为矿

区生态修复提供科学基础。

4 结论

(1)白茅枯落物养分特征及酶活性受到氮素、土壤类型、AMF 种类及三者交互作用的影响。

(2)矿砂中接种 GE 可显著提高白茅枯落物总氮含量。不同的 AMF 对土壤酶活性的影响具有差异性,矿砂低氮处理下接种 GC 和 GE 提高了白茅枯落物纤维素酶活性,RI 提高蔗糖酶活性。

(3)非矿砂高氮处理下,枯落物 pH 与多酚氧化酶和脲酶活性均显著负相关,低氮处理下,枯落物 pH 与脲酶和过氧化氢酶显著正相关。矿砂低氮条件下,枯落物蔗糖酶活性均与枯落物总碳和 pH 显著正相关,多酚氧化酶活性与枯落物硝态氮含量、枯落物 pH 呈显著正相关。影响酶活性的关键因子可以有效提高营养转化效率。

参考文献:

- [1] 解婷婷,单立山,张鹏.不同水分条件下杨树-玉米复合系统凋落物分解特性[J].生态学报,2022,42(19):8041-8049. DOI: 10.5846/stxb202104060884. XIE T T, SHAN L S, ZHANG P. Litter Decomposition Characteristics of Poplar-maize Agroforestry System under Different Water Conditions[J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42(19): 8041-8049. DOI: 10.5846/stxb202104060884.
- [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. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850. casb2021-1133. ZHOU T Y, XIAO Y, HUANG Q Y, et al. Forest Litter Decomposition: Research Progress and Prospect[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2022, 38(33): 44-51. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850. casb2021-1133.
- [3] KRISHNA M P, MOHAN M. Litter Decomposition in Forest Ecosystems: A Review[J]. *Energy Ecol Environ*, 2017, 2(4): 236-249. DOI: 10.1007/s40974-017-0064-9.
- [4] HOBBIE S E. Plant Species Effects on Nutrient Cycling: Revisiting Litter Feedbacks[J]. *Trends Ecol Evol*, 2015, 30(6): 357-363. DOI: 10.1016/j.tree.2015.03.015.
- [5] HOLMES K W, CHADWICK O A, KYRIAKIDIS P C, et al. Large-area Spatially Explicit Estimates of Tropical Soil Carbon Stocks and Response to Land-cover Change [J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2006, 20(3): GB3004.

- DOI: 10.1029/2005GB002507.
- [6] 刘洋. 巨桉人工林凋落物养分归还、转移及分解动态的研究[D]. 雅安:四川农业大学,2006.
LIU YANG. Study on the Dynamics of Nutrient Return, Transfer and Decomposition of Litter from Eucalyptus Grandis Plantation[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2006.
- [7] 刘姝莹, 安慧, 张馨文, 等. 氮磷添加对荒漠草原植物-凋落物-土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2022, **42**(21): 8773-8783. DOI: 10.5846/stxb202110293043.
LIU S X, AN H, ZHANG X W, *et al.* Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on the Ecological Stoichiometry of Plant-litter-soil in Desert Grassland[J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, **42**(21): 8773-8783. DOI: 10.5846/stxb202110293043.
- [8] 万忠梅, 宋长春, 刘德燕. 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, 2009, **29**(9): 1830-1835. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2009.09.008.
WAN Z M, SONG C C, LIU D Y. The Enzyme Activity of *Calamagrostis angustifolia* Litter Decomposition Affected by Exogenous Nitrogen Input in a Freshwater Marsh[J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2009, **29**(9): 1830-1835. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2009.09.008.
- [9] 包滢丽. 大小兴安岭典型冻土区水分变化对植物酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022. DOI: 10.27064/d.cnki.ghasu.2022.000094.
BAO Y L. Effect of Water Change on Plant Enzyme Activities in Typical Frozen Soil Region of Xiaoxing 'an Mountains[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.
- [10] AERTS R, WALLÉN B, MALMER N, *et al.* Nutritional Constraints on *Sphagnum*-growth and Potential Decay in Northern Peatlands[J]. *J Ecol*, 2001, **89**(2): 292-299. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2001.00539.x.
- [11] BRAGAZZA L, TAHVANAINEN T, KUTNAR L, *et al.* Nutritional Constraints in Ombrotrophic *Sphagnum* Plants under Increasing Atmospheric Nitrogen Deposition in Europe[J]. *New Phytol*, 2004, **163**(3): 609-616. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01154.x.
- [12] GESSNER M O. Breakdown and Nutrient Dynamics of Submerged *Phragmites* Shoots in the Littoral Zone of a Temperate Hardwater Lake[J]. *Aquat Bot*, 2000, **66**(1): 9-20. DOI: 10.1016/s0304-3770(99)00022-4.
- [13] ATKINSON R B, CAIRNS J. Plant Decomposition and Litter Accumulation in Depressional Wetlands: Functional Performance of Two Wetland Age Classes that were Created via Excavation[J]. *Wetlands*, 2001, **21**(3): 354-362. DOI: 10.1672/0277-5212(2001)021[0354: PDALAI] 2.0.CO;2.
- [14] 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]. *Aquat Microb Ecol*, 2000, **22**: 271-282. DOI: 10.3354/ame022271.
- [15] 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**(9): 2359. DOI: 10.2307/177459.
- [16] HOBBIIE S E. Interactions between Litter Lignin and Nitrogen Lignin and Soil Nitrogen Availability during Leaf Litter Decomposition in a Hawaiian Montane Forest[J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(5): 484-494. DOI: 10.1007/s100210000042.
- [17] SINSABAUGH R L, CARREIRO M M, REPERT D A. Allocation of Extracellular Enzymatic Activity in Relation to Litter Composition, N Deposition, and Mass Loss[J]. *Biogeochemistry*, 2002, **60**(1): 1-24. DOI: 10.1023/A: 1016541114786.
- [18] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报, 2002, **22**(9): 1534-1544. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2002.09.024.
PENG S L, LIU Q. The Dynamics of Forest Litter and Its Responses to Global Warming[J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, **22**(9): 1534-1544. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-0933.2002.09.024.
- [19] 余涵霞, 王家宜, 万方浩, 等. 植物凋落物影响土壤有机质分解的研究进展[J]. 生物安全学报, 2018, **27**(2): 88-94. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2018.02.003.
YU H X, WANG J Y, WAN F H, *et al.* Research Progress on Effects of Plant Litter on the Decomposition of Soil Organic Matter[J]. *J Biosaf*, 2018, **27**(2): 88-94. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2018.02.003.
- [20] LANFRANCO L, YOUNG J P. Genetic and Genomic Glimpses of the Elusive Arbuscular Mycorrhizal Fungi [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2012, **15**(4): 454-461. DOI: 10.1016/j.pbi.2012.04.003.
- [21] 李元敬, 刘智蕾, 何兴元, 等. 丛枝菌根共生体中碳、氮代谢及其相互关系[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 903-910. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20140102.0036.
LI Y J, LIU Z L, HE X Y, *et al.* Metabolism and Interaction of C and N in the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(3): 903-910. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20140102.0036.
- [22] HE Y J, CORNELISSEN J H C, WANG P P, *et al.* Nitrogen Transfer from one Plant to Another Depends on Plant Biomass Production Between Conspecific and Heterospecific Species via a Common Arbuscular My-

- corrhizal Network[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, **26**(9): 8828–8837. DOI: 10.1007/s11356-019-04385-x.
- [23] LEIFHEIT E F, VERBRUGGEN E, RILLIG M C. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Reduce Decomposition of Woody Plant Litter while Increasing Soil Aggregation[J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, **81**: 323–328. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.12.003.
- [24] CHENG L, BOOKER F L, TU C, *et al.* Arbuscular Mycorrhizal Fungi Increase Organic Carbon Decomposition under Elevated CO₂[J]. *Science*, 2012, **337**(6098): 1084–1087. DOI: 10.1126/science.1224304.
- [25] 李欢, 李晓林, 向丹. 丛枝菌根真菌对羊草凋落物降解作用的研究[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(7): 1569–1573. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.07.040.
- LI H, LI X L, XIANG D. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in *Leymus chinensis* Litter Decomposition[J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(7): 1569–1573. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.07.040.
- [26] 王雪蓉, 梁如玉, 王玉龙, 等. 重金属胁迫下丛枝菌根真菌对白茅生长和生理生态特征的影响[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2023, **46**(2): 439–448. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2021143.
- WANG X R, LIANG R Y, WANG Y L, *et al.* Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and Ecophysiological Characteristics of *Imperata cylindrica* under Heavy Metal Stress[J]. *J Shanxi Univ Nat Sci Ed*, 2023, **46**(2): 439–448. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2021143.
- [27] 曾阿莹, 胡伟芳, 张林海, 等. 盐度和淹水程度对短叶荳蔻枯落物分解初期DOM含量及其组成结构的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(8): 2751–2762. DOI: 10.5846/stxb201902250351.
- ZENG A/E/E Y, HU W F, ZHANG L H, *et al.* Effect of Salinity and Flood on the Dissolved Organic Matter Content and Composition Structure in the Early Stage of Decomposition of *Cyperus malaccensis* Litter[J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(8): 2751–2762. DOI: 10.5846/stxb201902250351.
- [28] LEIGH J, FITTER A H, HODGE A. Growth and Symbiotic Effectiveness of an Arbuscular Mycorrhizal Fungus in Organic Matter in Competition with Soil Bacteria[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2011, **76**(3): 428–438. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2011.01066.x.
- [29] JIA T, WANG R, CHAI B. Effects of Heavy Metal Pollution on Soil Physicochemical Properties and Microbial Diversity over Different Reclamation Years in a Copper Tailings Dam[J]. *J Soil Water Conserv*, 2019, **74**(5): 439–448. DOI: 10.2489/jswc.74.5.439.
- [30] JIA T, WANG X R, GUO T Y, *et al.* Litter Decomposition of *Imperata cylindrica* in a Copper Tailing Areas with Different Restoration History: Fungal Community Dynamics and Driving Factors[J]. *Front Microbiol*, 2021, **12**: 780015. DOI: 10.3389/fmicb.2021.780015.
- [31] JIA T, WANG X R, GUO T Y, *et al.* Litter Decomposition of *Imperata cylindrica* in a Copper Tailing Areas with Different Restoration History: Fungal Community Dynamics and Driving Factors[J]. *Front Microbiol*, 2021, **12**: 780015. DOI: 10.3389/fmicb.2021.780015.
- [32] JIA T, WANG Y, LIANG X X, *et al.* Effect of AM Fungi Inoculation on Litter Bacterial Community Characteristics under Heavy Metal Stress[J]. *Microorganisms*, 2022, **10**(2): 206. DOI: 10.3390/microorganisms10020206.
- [33] 张晓松, 孟祥英, 王薇, 等. 丛枝菌根真菌对镉污染土壤中黑麦草幼苗生长的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(6): 122–127. DOI: 10.11838/sfsc.20150620.
- ZHANG X S, MENG X Y, WANG W, *et al.* Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth of Ryegrass Seedling in Cadmium Contaminated Soils[J]. *Soil Fertil Sci China*, 2015(6): 122–127. DOI: 10.11838/sfsc.20150620.
- [34] 辛晓静, 刘磊, 申俊芳, 等. 羊草基因型数目与氮添加对土壤微生物群落的交互影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(13): 3923–3932. DOI: 10.5846/stxb201506251289.
- XIN X J, LIU L, SHEN J F, *et al.* Interactions between Genotypic Number and Nitrogen Addition on Soil Microbial Communities in the Population of *Leymus chinensis*[J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(13): 3923–3932. DOI: 10.5846/stxb201506251289.
- [35] FIORETTO A, PAPA S, CURCIO E, *et al.* Enzyme Dynamics on Decomposing Leaf Litter of *Cistus incanus* and *Myrtus communis* in a Mediterranean Ecosystem[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**(13): 1847–1855. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00158-9.
- [36] 王晓莉. 不同碳氮化处理对餐厨废弃物堆肥及其对小白菜生长影响的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020. DOI: 10.27257/d.cnki.gnxhc.2020.000880
- WANG X L. Effects of Different Carbonitriding Treatments on Composting of Kitchen Waste and Growth of Chinese Cabbage[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020. DOI: 10.27257/d.cnki.gnxhc.2020.000880
- [37] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y, Soil Enzymes and their Research Methods [M]. Beijing: Agricultural Publishing House. 1986.
- [38] LÓPEZ-MONDÉJAR R, ZÜHLKE D, BECHER D, *et al.* Cellulose and Hemicellulose Decomposition by For-

- est Soil Bacteria Proceeds by the Action of Structurally Variable Enzymatic Systems[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 25279. DOI: 10.1038/srep25279.
- [39] 李鹏, 陈璇, 杨章旗, 等. 不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(2): 368–377. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.02.047.
- LI P, CHEN X, YANG Z Q, *et al.* Effects of Litter Input on Soil Physical and Chemical Properties of *Pinus massoniana* Plantations with Different Densities[J]. *J Soil Water Conserv*, 2022, **36**(2): 368–377. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.02.047.
- [40] VERESOGLOU S D, CHEN B D, RILLIG M C. Arbuscular Mycorrhiza and Soil Nitrogen Cycling[J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, **46**: 53–62. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.11.018.
- [41] HODGE A, CAMPBELL C D, FITTER A H. An Arbuscular Mycorrhizal Fungus Accelerates Decomposition and Acquires Nitrogen Directly from Organic Material [J]. *Nature*, 2001, **413**(6853): 297–299. DOI: 10.1038/35095041.
- [42] 刘婷岩, 张之月, 郝龙飞, 等. 接种丛枝菌根真菌和氮沉降处理对灌木铁线莲根际微生态环境的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2022, **50**(8): 55–60. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2022.08.018.
- LIU T Y, ZHANG Z Y, HAO L F, *et al.* Effect of AMF Inoculation and Nitrogen Deposition on Rhizosphere Microecological Environment of *Clematis fruticosa* Seedling[J]. *J Northeast For Univ*, 2022, **50**(8): 55–60. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2022.08.018.
- [43] OWEN A, JONES D. Competition for Amino Acids between Wheat Roots and Rhizosphere Microorganisms and the Role of Amino Acids in Plant N Acquisition[J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, **33**(4/5): 651–657. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00209-1
- [44] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Extracellular Enzyme Activities and Carbon Chemistry as Drivers of Tropical Plant Litter Decomposition[J]. *Biotropica*, 2004, **36**(3): 285–296. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2004.tb00321.x.
- [45] 刘圆圆, 张丽, 王硕, 等. 氮和土著AMF对黄瓜间作土壤酶活性及氮利用的影响[J]. *菌物学报*, 2019, **38**(11): 1965–1975. DOI: 10.13346/j.mycosystema.190221.
- LIU Y Y, ZHANG L, WANG S, *et al.* Effects of Nitrogen and Inoculation of Indigenous Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Enzyme Activity and Nitrogen Utilization of Cucumber under Intercropping Conditions[J]. *Mycosystema*, 2019, **38**(11): 1965–1975. DOI: 10.13346/j.mycosystema.190221.
- [46] 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**(9): 2359. DOI: 10.2307/177459.
- [47] FOG K. The Effect of Added Nitrogen on the Rate of Decomposition of Organic Matter[J]. *Biol Rev*, 1988, **63**(3): 433–462. DOI: 10.1111/j.1469-185X.1988.tb00725.x.
- [48] DEFOREST J L, ZAK D R, PREGITZER K S, *et al.* Atmospheric Nitrate Deposition and the Microbial Degradation of Cellobiose and Vanillin in a Northern Hardwood Forest[J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**(6): 965–971. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.02.011.
- [49] ANDERSSON M, KJØLLER A, STRUWE S. Microbial Enzyme Activities in Leaf Litter, Humus and Mineral Soil Layers of European Forests[J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**(10): 1527–1537.
- [50] STADDON P L, RAMSEY C B, OSTLE N, *et al.* Rapid Turnover of Hyphae of Mycorrhizal Fungi Determined by AMS Microanalysis of ¹⁴C[J]. *Science*, 2003, **300**(5622): 1138–1140. DOI: 10.1126/science.1084269.
- [51] 田慧, 刘晓蕾, 盖京苹, 等. 球囊霉素及其作用研究进展 [J]. *土壤通报*, 2009, **40**(5): 1215–1220. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2009.05.051.
- TIAN H, LIU X L, GAI J P, *et al.* Review of Glomalin-related Soil Protein and Its Function[J]. *Chin J Soil Sci*, 2009, **40**(5): 1215–1220. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2009.05.051.
- [52] GAO F, CUI X Y, SANG Y, *et al.* Changes in Soil Organic Carbon and Total Nitrogen as Affected by Primary Forest Conversion[J]. *For Ecol Manag*, 2020, **463**: 118013. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118013.