棘孢曲霉对多年生黑麦草牧草品质和产量的影响

张 婷 赵春程 傅金民 刘林德* 李晓宁*
(鲁东大学山东省滨海耐盐草业工程技术研究中心, 山东烟台 264025)

摘 要 多年生黑麦草(*Lolium perenne*)作为一种优良牧草,在畜牧业中被广泛应用。研究表明,棘孢曲霉(*Aspergillus aculeatus*)能够提高多年生黑麦草的抗逆性,促进其生长。本实验在田间条件下,研究了棘孢曲霉对多年生黑麦草生长量、产量、干草产量、牧草品质、矿质元素、生长激素以及代谢产物的影响。结果表明:外源添加棘孢曲霉显著提高多年生黑麦草的生长量、产量和干草产量以及叶片中 N、P、K、Ca 和 Mn 的含量。此外,接种棘孢曲霉的多年生黑麦草叶片含有较多的粗蛋白和粗脂肪,同时对多年生黑麦草的生长激素和代谢产物有显著影响。这些研究结果为棘孢曲霉在多年生黑麦草上进一步应用提供了科学依据。

关键词 棘孢曲霉; 黑麦草; 矿质元素; 代谢产物

Effects of *Aspergillus aculeatus* on the quality and yield of perennial ryegrass. ZHANG Ting, ZHAO Chun-cheng, FU Jin-min, LIU Lin-de*, LI Xiao-ning* (*Coastal Salinity Tolerant Grass Engineering and Technology Research Center, Ludong University, Yantai* 264025, *Shandong, China*).

Abstract: Perennial ryegrass (*Lolium perenne*), a fine forage grass, is widely used in animal husbandry. Previous studies reported that application of fungi *Aspergillus aculeatus* could improve stress resistance and growth of perennial ryegrass. In this study, we investigated the effects of *A. aculeatus* application on perennial ryegrass growth, yield, hay yield, forage quality, mineral element content, growth phytohormones and metabolites under field conditions. Exogenous *A. aculeatus* application significantly increased the biomass, yield, hay yield of perennial ryegrass as well as the contents of N, P, K, Ca and Mn in leaves. Furthermore, leaves of perennial ryegrass treated with *A. aculeatus* had higher concentrations of crude protein and crude fat. Application of *A. aculeatus* had significant effects on growth phytohormones as well as metabolites of perennial ryegrass. These results provide a theoretical basis for further application of *A. aculeatus* on perennial ryegrass.

Key words: *Aspergillus aculeatus*; *Lolium perenne*; mineral element; metabolite.

多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)属禾本科草本植物,作为一种冷季型草种,在畜牧业和草坪建植中被广泛应用(苏洪宇,2018)。牧草品质包括粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、粗纤维等,是评价牧草是否优良的关键指标(杨泽新等,1994)。优质牧草的标准是:鲜嫩口感好,粗蛋白含量高,营养价值高,有机物消化率高,粗纤维含量低等特点(李艳琴,2008;古丽美拉·依林别克,2016)。多年生黑麦草品质好,粗蛋白含量占干物质的四分之一以上,生长速度快等优点(苏洪宇,2018)。目前,提高牧草品质的方法包括施肥、刈割、生物技术、微生物措施等,其中,微生物措施是符合我国环境友好型农业,响应我国农业可持续发展的重要举措之一(韩华雯等,2013;李超,2015)。

土壤中存在数量巨大的有益微生物,在土壤发育、物质转化、提高作物养分有效性等方面发挥着不可替代的作用(田平雅等,2018)。在传统的农业种植中,由于大量使用有机肥,使土壤理化性质发生改变,对水资源以及环境造成污染,因此微生物与植物互作这种环境友好,绿色健康,优质高产,不会造成二次污染的新型施肥措施引起了人们的广泛关注

国家自然科学基金项目(31772662)资助。
收稿日期: 2019-04-25 接受日期: 2019-09-17
*通讯作者 E-mail: lixiaoning0724@126.com; linde_liu@163.com

(吴建峰等,2002)。此外,菌根真菌与植物之间的互利共生关系,不仅能够提高植物对营养物质的吸收利用,而且还能改善植物对逆境胁迫的抗性(Barretti *et al.*,2008;Kuldau *et al.*,2008;Hassan *et al.*,2017)。棘孢曲霉(*Aspergillus aculeatus*),属于曲霉菌属,能够产生铁载体,生长激素等促生因子,促进黑麦草、狗牙根、水稻等植物的生长(Li *et al.*,2017a;Yan *et al.*,2017;Han *et al.*,2018),并兼具溶磷解钾的特性,促进植物对土壤中可溶性磷和钾的吸收与利用 (Narsian *et al.*,2000)。

研究表明,棘孢曲霉能够促进黑麦草在镉、盐胁迫下的生长(Li *et al.*,2017b;Han *et al.*,2018),然而,关于棘孢曲霉对黑麦草生长促进作用的研究均通过盆栽实验完成的,大多集中在生理抗性的研究。本实验通过田间试验,研究棘孢曲霉对多年生黑麦草生长量、产量、干草产量、牧草品质、矿质元素、生长激素以及代谢产物等指标的影响,为广泛使用植物-微生物互作,加快棘孢曲霉产业化应用,提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

试验在山东省烟台市鲁东大学滨海草业种质资源与育种基地完成,位于 37°31′N,121°21′E,海拔约为 120 m,属暖温带半湿润季风气候。

1.1 供试材料

研究所用材料为"维达斯"多年生黑麦草种子,购自北京百斯特草业有限公司。取饱满的多年生黑麦草种子共 200 g,用 10%的过氧化氢溶液中消毒 5 min,再用无菌水反复冲洗,备用(刘鑫等,2017)。

棘孢曲霉真菌由本课题组从湖南省中部重金属污染区提取,为根际真菌。经由固体培育基和液体培育基活化和扩繁(谢燕,2015),具体药品含量见表 1 和表 2。

表 1 固体培养基方法(g)
Table 1 Solid medium method

固体培养基	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	KH_2PO_4	葡萄糖	蛋白胨	琼脂	孟加拉红
药品含量	0.5	1	10	5	18	0.04

表 2 液体培养基方法(g)
Table 2 Liquid medium method

液体培养基	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	KH_2PO_4	葡萄糖	蛋白胨
药品含量	2.5	5	50	25

按上述操作方法结束后,用双蒸水定容到 1 L,高压灭菌 20 min,接种棘孢曲霉菌后放在 30 ℃恒温培养箱中备用。

用双蒸水定容到 5 L,高压灭菌 20 min,灭菌后每瓶加入 0.5 mL 1%的链霉素,接种棘孢曲霉菌后放入摇床(200 r · min^{-1},48 h)内扩繁。

用纱布将液体培养基培养出的真菌菌球过滤,使用无菌水冲洗 2~3 次,去除培养基溶液后将菌球转移至 15 L 含有 1/2Hoagland 营养液中备用。

1.2 试验区设计

采用完全随机区组实验设计,3 个重复,设置两个处理:未接种真菌区(CK)与接种真菌区(F)。小区面积为 1.0 m×1.0 m 的正方形,小区间隔 40 cm,每小区内播种 5 行,行间距为 25 cm,播量为 6 g。将准备好的菌悬液,以 8000 r · min^{-1} 离心 8 min 收集孢子,每行定量称重 20 g,用 1/2 Hoagland 营养液复苏,每行均匀施加 500 mL 菌悬液。

1.3 测定项目

本实验于 2018 年 9 月 22 日开始,处理 40 d,采用地上部分做如下指标测定:

生长量采用称重法:将多年生黑麦草紧贴地面切割,收割后立即将收获的每一小区内的多年生黑麦草称鲜重,计算方法:G(kg · d^{-1}) = FW/D,其中 FW 为鲜重(kg),D 为天数,G 为生长量。

产量采用鲜物质重称重法,计算方法:Y(kg · m^{-2}) = FW/S,其中 FW 为鲜重(kg),S 为每小区面积(m^2),Y 为产量。

干草产量采用烘干称重法:将新鲜的多年生黑麦草晾晒 48 h 后,将大部分水分蒸发,放入烘箱杀青后烘干至恒重,计算方法:DB(kg · m^{-2}) = DW/S,其中 DW 为干重(kg),S 为每小区面积(m^2),DB 为干草产量。

牧草品质测定包括粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、粗纤维,详细操作步骤如下:

粗蛋白采用凯氏定氮仪法:精确称取干样质量 0.2 g(随机取样,磨碎至粉末状),硫酸钾 3.0 g,五水合硫酸铜 0.2 g,均放入玻璃消化管中并加入 10 mL 浓硫酸,将消化管置于石墨消解仪上,设温度为 420 ℃,时间为 2 h。将消煮后的透明溶液使用 Hana 凯氏定氮仪测定粗蛋白,含蛋白质量即为粗蛋白(CP)含量(%)。

粗脂肪使用脂肪测定仪法:精确称取干样质量 0.2 g(随机取样,磨碎至粉末状),放入含有 50 mL

石油醚的抽提杯内,设置温度为 130 ℃,时间为 2 h。抽提以后放在烘箱(130 ℃,2 h)内。计算方法:$CF(\%)=(DM-EC)/M$,DM 为烘干后的质量(g),EC 为抽提杯的质量(g),M 为样品质量(g),CF 为粗脂肪含量。

粗纤维采用纤维测定仪和马弗炉:精确称取干样质量 0.2 g(随机取样,磨碎至粉末状)以及 2.0 g 硅藻土放入仪器附带的坩埚内放入 Hana 纤维测定仪,使用稀酸(硫酸溶液 0.127 mol · L^{-1})稀碱(氢氧化钠 0.313 mol · L^{-1})进行酸碱煮(消除淀粉,蛋白质,果胶质,部分纤维素等),达到沸点后维持 30 min,完成后放入烘箱(设置为 130 ℃)内 2 h,称量烘干后坩埚+硅藻土+样品的总质量,称量之后立即放入马弗炉中,设置温度为 500 ℃,灰化 4 h,称量灰化后的总质量,粗纤维计算方法即为:$CFi(\%)=(PDM-AM)/M$,PDM 为烘干后总质量(g),AM 为灰化后总质量(g),M 为样品质量(g),CFi 为粗纤维含量。

粗灰分用马弗炉干灰化法测定:准确称取烘干的样品 1 g(随机取样,磨碎至粉末状)放入坩埚内,称量烘干前的总质量。使用马弗炉在 700 ℃下灰化 7 h,冷却后称量灰化后的总质量,$Ash(\%)=(PDM-AM)/M$,PDM 为烘干前总质量(g),AM 为灰化后总质量(g),M 为样品质量(g),Ash 为粗灰分含量。

矿质元素使用电感耦合等离子体质谱仪测定:精确称取植物干样 0.2 g 放入消解管中,加入 5 mL 浓硫酸,再加入 2 mL H_2O_2 溶液使用石墨消解仪(370 ℃)加热 7 min,冷却后继续加入 2 mL H_2O_2 溶液,继续加热 1 h,直到样品透明为止,使用电感耦合等离子体质谱仪进行测定。矿质元素浓度计算方法为:矿质元素(mg · g^{-1})$=\rho\times V/M$,ρ 为测得的浓度(μg · mL^{-1}),V 为定容体积(mL),M 为样品质量(g)(谢燕,2015)。

生长激素测定:精确称取新鲜根系和叶片各 0.1 g,放入液氮中冰冻,在 1 mL 色谱级乙酸乙酯(内参标样 D_6-IAA,D_5-JA,终浓度为 100 ng · mL^{-1})研磨成匀浆。将匀浆放置在黑暗条件下震荡(4 ℃,12 h),离心 10 min(4 ℃,18000 r · min^{-1},下同),收集的上清液加入 1 mL 的色谱级乙酸乙酯,再离心 10 min,使用高纯氮气吹干上清液再加入 0.5 mL 的 70% (*v*/*v*)的色谱级甲醇,离心 4 min,将上清液使用高效液相色谱系统及三级串联杆质谱仪测定(Ashley *et al.*,2006;Wang *et al.*,2010)。

代谢物测定:取新鲜的多年生黑麦草根系 0.3 g,立即冷冻于液氮中,将冻样用打样机打磨成粉末,然后将粉末转移到含有 4.2 mL 80% (v/v)甲醇的 5 mL离心管中。放置室温 200 r · min^{-1}的摇床中提取 2 h,然后把 60 μL 核糖醇(2 mg · mL^{-1})作为极性成分的内标添加到溶液中。将溶液在 70 ℃的水浴中加热 15 min,离心 15 min(12000 r · min^{-1}),然后将上清液转移到新的 10 mL 离心管中,其中含有 4.5 mL 去离子水和 2.25 mL 氯仿。将以上溶液涡旋 15 s,进行离心(10000 r · min^{-1},10 min)。将 0.3 mL 的上清液转移到含有 2 mL HPLC 小瓶中,放在离心浓缩器(900 r · min^{-1})中干燥过夜。加入 80 mL 的甲氧胺盐酸盐(20 mg · mL^{-1})溶解在吡啶中放入摇床中(200 r · min^{-1}, 30 ℃) 2 h。后加入 50 μL N-Methyl-N -(三甲基硅烷基)和三氟乙酰胺(MSTFA)放入摇床中(200 r · min^{-1},30 ℃)2 h。最后使用气相色谱质谱联用仪测定(Xie *et al.*,2014)。

1.4　数据分析

数据的统计分析在 SPSS 22.0 软件中进行,采用单因素方差分析以及独立样本 T 检验,显著水平为 $P<0.05$,绘图采用 SigmaPlot 12.3。

2　结果与分析

2.1　外源添加棘孢曲霉真菌对多年生黑麦草生长的影响

外源棘孢曲霉真菌对黑麦草的生长具有一定的促进作用(表 3),与对照相比,接种真菌显著提高了多年生黑麦草的生长量、产量以及干草产量,分别提高了 50%、58.31%和 55.17%。

2.2　外源添加棘孢曲霉真菌对牧草品质的影响

多年生黑麦草地上部分粗蛋白、粗脂肪、粗灰分和粗纤维平均含量分别为 21.8、3.0、18.1、25.7 g · kg^{-1}。在田间自然条件下,外源添加棘孢曲霉真菌(F),显著提高多年生黑麦草地上部粗蛋白和粗

表 3　棘孢曲霉对多年生黑麦草生长量、产量、干草产量的影响

Table 3　Effects of *Aspergillus aculeatus* on growth biomass, yield and hay yield of perennial ryegrass

处理	生长量 (kg · d^{-1})	产量 (kg · m^{-2})	干草产量 (kg · m^{-2})
对照 CK	0.10±0.02	2.95±0.54	0.29±0.03
棘孢曲霉 F	0.15±0.00*	4.67±0.17*	0.45±0.02*

F 表示接种棘孢曲霉真菌,CK 表示未接种棘孢曲霉真菌,* 表示处理之间差异显著($P<0.05$),下图(表)同。

表 4 棘孢曲霉对多年生黑麦草离子含量的影响

Table 4 Effect of *Aspergillus aculeatus* on the ion content of perennial ryegrass

处理	N (mg·g^{-1})	P (mg·g^{-1})	K (mg·g^{-1})	Ca (mg·g^{-1})	Mg (mg·g^{-1})	Cu (mg·g^{-1})	Zn (mg·g^{-1})	Mn (mg·g^{-1})
对照 CK	34.84±0.15	8.71±0.11	34.96±0.27	5.80±0.09	8.55±0.09	1.05±0.01	0.62±0.01	0.57±0.00
棘孢曲霉 F	36.52±0.18*	10.20±0.35*	40.45±0.15*	6.41±0.05*	8.12±0.18	1.03±0.01	0.63±0.00	1.68±0.03*

表 5 棘孢曲霉对多年生黑麦草代谢产物的影响

Table 5 Effect of *Aspergillus aculeatus* on metabolites of perennial ryegrass

代谢产物	硅烷醇 (μmol·g^{-1})	丙三醇 (μmol·g^{-1})	苹果酸 (μmol·g^{-1})	果糖 (μmol·g^{-1})	肌醇 (μmol·g^{-1})	蔗糖 (μmol·g^{-1})
对照 CK	0.45±0.05	0.53±0.09	1.93±0.00	0.60±0.26	0.03±0.00	3.25±0.01
棘孢曲霉 F	0.24±0.04	0.33±0.02	1.90±0.00*	0.35±0.01	0.02±0.00	2.00±0.19*

脂肪的含量($P<0.05$),分别增加 4.83% 和 4.80%。但棘孢曲霉对多年生黑麦草地上部粗纤维和粗灰分的含量影响不显著($P>0.05$)(图 1)。

2.3 外源添加棘孢曲霉真菌对矿质元素的影响

由表 4 得出,外源添加棘孢曲霉真菌(F),显著提高多年生黑麦草地上器官 N、P、K、Ca 和 Mn 的含量($P<0.05$),且分别增加 17.14%、15.70%、10.61%、4.80%和 194.74%(表 4)。

2.4 外源添加棘孢曲霉真菌对生长激素的影响

由图 2 得出,在田间自然条件下,多年生黑麦草叶片的 IAA 和 JA 平均含量分别为 0.45 和 0.27,根的 IAA 和 JA 平均含量分别为 0.40 和 3.00。外源添加棘孢曲霉真菌(F),能显著提高多年生黑麦草叶和根 IAA 的含量,且分别增加 44.44%,65.00%,此外,其还能够降低叶的 JA 含量($P<0.05$),且降低了 68.75%,而且能增加根部 JA 的含量($P<0.05$),增加了 174.67%(图 2)。

2.5 外源添加棘孢曲霉真菌对代谢产物的影响

外源添加棘孢曲霉真菌(F),显著降低多年生

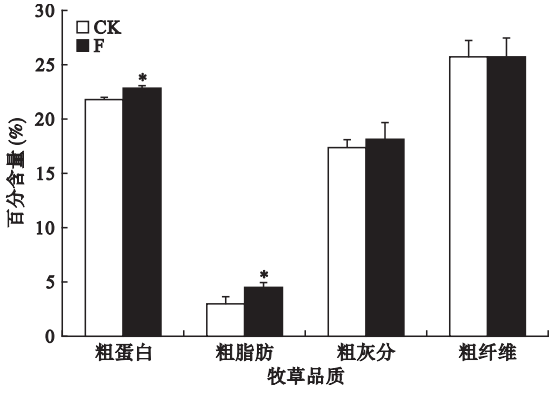


图 1 棘孢曲霉对多年生黑麦草牧草品质的影响

Fig.1 Effect of *Aspergillus aculeatus* on forage quality of perennial ryegrass

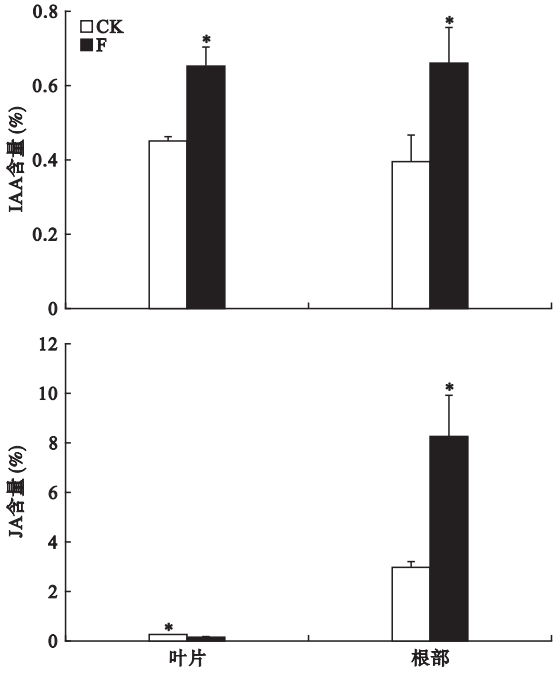


图 2 棘孢曲霉对多年生黑麦草生长激素的影响

Fig.2 Effect of *Aspergillus aculeatus* on hormones of perennial ryegrass

黑麦草根部的苹果酸和蔗糖的含量($P<0.05$),分别降低 71.43%和 62.5%。但是,棘孢曲霉对多年生黑麦草根部的烷基醇、丙三醇、果糖、肌醇的含量影响不明显($P>0.05$)(表 5)。

3 讨 论

牧草的产量和品质是畜牧业发展的关键,与牧民的收入也有着密切的联系。近年来,随着人们生活水平不断提高,对蛋白质品质等需求也越来越高,发展高产、绿色、可持续发展的畜牧业迫在眉睫(赵树民等,2017),然而,随着世界人口剧增,可利用的人均土地面积越来越少,并且环境问题也日益严峻,

大量的土壤盐碱化等地质灾害使可利用的土地不断减少(肖锐,2014),因此利用有限的土地提高多年生黑麦草的产量是需要解决的关键问题之一。研究发现,植物与微生物相互作用能够有效地促进植物生长是通过真菌菌丝增加了植物对水和矿物质养分的探索能力(Gutjahr *et al.*, 2013; Ferrol *et al.*, 2018),作为回报,植物为真菌提供脂质和糖的途径(Smith *et al.*, 2008; Bravo *et al.*, 2017; Jiang *et al.*, 2017),因此,真菌使牧草中矿质元素的提升同时改善牧草的生理状态,从而提高牧草品质、产量和干草产量(刘盛林等,2009;韩华雯等,2013)。也有大量研究表明,外源施加微生物对植物的矿质元素、牧草品质、生长量、干草产量以及产量有显著的积极作用(李研学等,1992;陈利云等,2008;陈双双等,2015;Li 等,2017b;刘辉等,2018;段媛君等,2019)。本研究表明,外源添加棘孢曲霉提高多年生黑麦草矿质元素、牧草品质、生长量、干草产量以及产量。因此,外源添加棘孢曲霉对多年生黑麦草的促进作用,进一步证明了棘孢曲霉与多年生黑麦草联合互作具有产业化及商业化价值。

植物的生长发育离不开激素的调节作用。本实验测定了棘孢曲霉真菌对多年生黑麦草的 IAA 和 JA 含量的影响。研究表明,棘孢曲霉真菌通过促进植物产生生长素,从而影响植物的生长发育(Han *et al.*,2018),此结果与本实验一致,棘孢曲霉真菌提高多年生黑麦草的 IAA 含量,促进植物生长。JA 不仅具有促进植物衰老,抑制植物生长的特性,也具有调节植物抗逆性的作用(王俊斌等,2009)。以往大量研究表明,外源添加 AM 真菌会提高苜蓿、黄瓜等根系的 JA 含量(Hause *et al.*,2002;Meixner *et al.*, 2005;Stumpe *et al.*,2005),与本实验多年生黑麦草的根系 JA 含量显著增加相符。而外源接种真菌后,JA 对植物叶片的影响存在两种不同的结果。一方面,番茄幼苗接种 AM 之后再接种尖孢镰刀菌,茎叶中 JA 水平显著提高,能够防止病害(Kapoor,2008),而另一方面,番茄接种摩西球囊霉之后再接种番茄斑点枯萎病毒,未发现植物茎和根部的 JA 水平升高(Hilou *et al.*,2014)。而本研究中,叶片中 JA 含量明显降低。原因可能是棘孢曲霉提高了叶片的对外界的抗病和胁迫的能力,降低了 JA 调节植物抗逆性的作用,同时也促进了叶片的生长。迄今为止,对添加真菌后 JA 的调节机制尚不明确,还需进一步的研究。

王英男等(2018)在盐逆境下对羊草施加 AM 真菌后,发现羊草中苹果酸的含量降低。以往研究表明,具有溶磷作用的细菌可能会使土壤的 pH 值降低,从而分解有机酸,减少有机酸的含量(Zaidi *et al.*,2009)。而本实验采用的棘孢曲霉真菌具有溶磷解钾的特性,同样降低了多年生黑麦草根系中苹果酸的含量。Li 等(2017b)研究表明,棘孢曲霉可能参与糖的合成、降解等过程,且加入棘孢曲霉后,降低了多年生黑麦草根系中蔗糖的含量。此外,菌根真菌具有分解有机碳的作用,接种真菌使根系蔗糖含量降低,能够促进植物根系的生长发育,使根系的形态发育更好(邹英宁等,2014),本实验在多年生黑麦草根际接种棘孢曲霉真菌,使根系蔗糖含量降低,促进多年生黑麦草地下部发育。

目前,对于棘孢曲霉广泛使用在多年生黑麦草的技术并未开始,微生物-植物互作能够利用更少的土地获得高产高质的黑麦草。本实验为棘孢曲霉应用于多年生黑麦草进行产业化发展提供了技术支持和理论依据。

参考文献

陈利云, 张丽静, 周志宇. 2008. 耐盐根瘤菌对紫花苜蓿接种效果的研究. 草业学报, **17**(5): 43-47.

陈双双, 王　腾, 朱丽静, 等. 2015. 菌根真菌处理下板栗对矿质元素的吸收和积累. 北京农学院学报, **30**(2): 28-34.

段媛君, 王百田. 2019. 不同肥料与 AM 真菌配施对沙打旺品质的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **47**(5): 124-130.

古丽美拉·依林别克. 2016. 优质牧草在肉牛饲养中的利用. 当代畜牧, (14): 57.

韩华雯, 孙丽娜, 姚　拓, 等. 2013. 不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响. 草业学报, **22**(5): 104-112.

李　超. 2015. 提高牧草品质方法的研究进展. 黑龙江畜牧兽医, (5): 59-61.

李研学, 张学文, 胡岫岚, 等. 1992. 增产菌对朝阳地区豆科牧草增产效果的试验研究. 微生物学杂志, (1): 50-53.

刘　辉, 吴小芹, 任嘉红, 等. 2018. 荧光假单胞菌与红绒盖牛肝菌共接种对杨树氮代谢和矿质元素含量的影响. 林业科学, **54**(10): 56-63.

刘盛林, 贺学礼. 2009. 水分胁迫下 AM 真菌对甘草生长的影响. 核农学报, **23**(4): 692-696.

刘　鑫, 黄兴如, 张晓霞, 等. 2017. 高浓度多环芳烃污染土壤的微生物-植物联合修复技术研究. 南京农业大学学报, **40**(4): 632-640.

苏洪宇. 2018. 多年生黑麦草的栽培与利用. 农村新技术,

(7): 8-9.
田平雅, 沈 聪, 赵 辉, 等. 2018. 银北盐碱区植物根际土壤酶活性及微生物群落特征研究. 土壤学报: 1-11. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20181127.0937.002.html.
王俊斌, 李 欣, 王海凤, 等. 2009. 茉莉酸对植物花器官发育和叶片衰老的分子调控研究进展. 天津农学院学报, **16**(3): 40-43.
王英男, 陶 爽, 华晓雨, 等. 2018. 盐碱胁迫下 AM 真菌对羊草生长及生理代谢的影响. 生态学报, **38**(6): 2187-2194.
吴建峰, 林先贵. 2002. 我国微生物肥料研究现状及发展趋势. 土壤, **34**(2): 68-73.
肖 锐. 2014. 人类活动影响下流域土壤及植被的时空格局变化(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.
谢 燕. 2015. 棘孢曲霉对狗牙根和水稻镉的耐性及运转分配的影响(博士学位论文). 北京: 中国科学院大学.
杨泽新,蔡维湘. 1994. 贵州灌丛草地几种常见灌木和草本类牧草营养成分含量变化规律研究. 中国草地, (4): 54-58.
李艳琴, 徐敏云, 王振海, 等. 2008. 牧草品质评价研究进展. 安徽农业科学, **36**(11): 4485-4486.
赵树民, 李晓东, 虞方伯, 等. 2017. 巨大芽孢杆菌 LY02 对黑麦草修复重金属污染土壤的影响. 水土保持学报, **31**(5): 340-344.
邹英宁, 吴强盛, 李 艳, 等. 2014. 丛枝菌根真菌对枳根系形态和蔗糖, 葡萄糖含量的影响. 应用生态学报, **25**(4): 1125-1129.
Ashley MK, Grant M, Grabov A. 2006. Plant responses to potassium deficiencies: A role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*, **57**: 425-436.
Barretti PB, de Souza RM, Pozza AAA, *et al*. 2008. Increased nutritional efficiency of tomato plants inoculated with growth-promoting endophytic bacteria. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **32**: 1541-1548.
Bravo A, Brands M, Wewer V, *et al*. 2017. Arbuscular mycorrhiza-specific enzymes FatM and RAM2 fine-tune lipid biosynthesis to promote development of arbuscular mycorrhiza. *New Phytologist*, **214**: 1631-1645.
Ferrol N, Azcón-Aguilar C, Pérez-Tienda J. 2018. Arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: An overview on the mechanisms involved. *Plant Science*, **280**: 441-447.
Gutjahr C, Parniske M. 2013. Cell and developmental biology of arbuscular mycorrhiza symbiosis. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, **29**:593-617.
Han SJ, Li XN, Amombo E, *et al*. 2018. Cadmium tolerance of perennial ryegrass induced by *Aspergillus aculeatus*. *Frontiers in Microbiology*, **9**: 1579.
Hassan N, Nakasuji S, Elsharkawy MM, *et al*. 2017. Biocontrol potential of an endophytic *Streptomyces* sp. strain MBCN152-1 against *Alternaria brassicicola* on cabbage plug seedlings. *Microbes and Environments*, **32**: 133-141.
Hause B, Maier W, Miersch O, *et al*. 2002. Induction of jasmonate biosynthesis in arbuscular mycorrhizal barley roots. *Plant Physiology*, **130**: 1213-1220.
Hilou A, Zhang H, Franken P, *et al*. 2014. Do jasmonates play a role in arbuscular mycorrhiza-induced local bioprotection of *Medicago truncatula* against root rot disease caused by *Aphanomyces euteiches*? *Mycorrhiza*, **24**: 45-54.
Jiang Y, Wang W, Xie Q, *et al*. 2017. Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi. *Science*, **356**: 1172-1173.
Kapoor R. 2008. Induced resistance in mycorrhizal tomato is correlated to concentration of jasmonic acid. *Online Journal of Biological Sciences*, **8**: 49-56.
Kuldau G, Bacon C. 2008. Clavicipitaceous endophytes: Their ability to enhance resistance of grasses to multiple stresses. *Biological Control*, **46**: 57-71.
Li X, Gitau MM, Han S, *et al*. 2017a. Effects of cadmium-resistant fungi *Aspergillus aculeatus* on metabolic profiles of bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] under Cd stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, **114**: 38-50.
Li X, Han S, Wang G, *et al*. 2017b. The fungus *Aspergillus aculeatus* enhances salt-stress tolerance, metabolite accumulation, and improves forage quality in perennial ryegrass. *Frontiers in Microbiology*, **8**: 1664.
Meixner C, Ludwig-Müller J, Miersch O, *et al*. 2005. Lack of mycorrhizal autoregulation and phytohormonal changes in the supernodulating soybean mutant nts1007. *Planta*, **222**: 709-715.
Narsian V, Patel HH. 2000. *Aspergillus aculeatus* as a rock phosphate solubilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**: 559-565.
Smith SE, Read DJ. 2008. Mycorrhizal symbiosis. Cambridge, UK: Academic Press.
Stumpe M, Carsjens JG, Stenzel I, *et al*. 2005. Lipid metabolism in arbuscular mycorrhizal roots of *Medicago truncatula*. *Phytochemistry*, **66**: 781-791.
Wang Z, Wu Y, Martin DL, *et al*. 2010. Identification of vegetatively propagated turf bermudagrass cultivars using simple sequence repeat markers. *Crop Science*, **50**: 2103-2111.
Xie Y, Hu L, Du Z, *et al*. 2014. Effects of cadmium exposure on growth and metabolic profile of bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]. *PLoS ONE*, **9**: e115279.
Xie Y, Li X, Liu X, *et al*. 2017. Application of *Aspergillus aculeatus* to rice roots reduces Cd concentration in grain. *Plant and Soil*, **422**: 1-14.
Zaidi A, Khan M, Ahemad M, *et al*. 2009. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, **56**: 263-284.

作者简介 张 婷,女,1993 年生,硕士,研究方向为植物生理学。E-mail: 2028675817@qq.com
责任编辑 张 敏