

不同丛枝菌根真菌组合接种后对云南重楼根际土壤环境的影响

周游¹, 杨敏², 郭冬琴¹, 潘兴娇², 丁博¹, 张杰¹, 周浓^{1,2*}

(1. 重庆三峡学院生物与食品工程学院, 三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室, 重庆 404120; 2. 大理大学药学与化学学院, 大理 671000)

[摘要] 目的:探究接种不同丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌组合对云南重楼(*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*)根际土壤环境的影响。方法:在室温盆栽条件下,对种植于灭菌土壤中的云南重楼实生幼苗分别接种12种AM真菌的不同组合,观察不同AM真菌组合的侵染能力及其对云南重楼根系活力、根际土壤环境中养分含量、酶活性及土壤微生物群落结构的影响。结果:接种外源AM真菌对云南重楼根际土壤中AM真菌孢子密度、根系AM真菌侵染率具有调控作用,提高了云南重楼根系活力;外源AM真菌可调节云南重楼根际土壤中的养分含量,提高了根际土壤中总球囊霉素及易提取球囊霉素含量,提高了云南重楼对土壤中速效氮、磷、钾的吸收能力,提高了根际土壤中酶活性,同时改变了土壤微生物的群落结构,提高了细菌/真菌、细菌/放线菌数量比及降低了真菌/放线菌数量比,改善了云南重楼根际土壤环境。结论:不同AM真菌处理组合对云南重楼幼苗根际土壤的理化性质及微生物群落结构存在一定的影响,该研究结果为人工栽培云南重楼提供了技术基础。

[关键词] 云南重楼;丛枝菌根真菌;侵染力;土壤微生物;土壤酶活性

[中图分类号] R284.2;R289;R22;R2-031 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2020)22-0096-14

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20202080

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.r.20200902.1019.004.html>

[网络出版日期] 2020-9-2 13:27

Effect of Different Exogenous Arbuscular Mycorrhizal Fungi Combinations on Rhizosphere Soil Environment of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

ZHOU You¹, YANG Min², GUO Dong-qin¹, PAN Xing-jiao², DING Bo¹, ZHANG Jie¹, ZHOU Nong^{1,2*}

(1. *Green Planting and Deep Processing of Genuine Medical Materials in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Engineering Laboratory, College of Biology and Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120, China;*
2. *College of Pharmacy and Chemistry, Dali University, Dali 671000, China*)

[Abstract] **Objective:** To investigate the effect of different arbuscular mycorrhizal (AM) fungi combinations on the rhizospheric environment of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. **Method:** The different combinations of 12 arbuscular mycorrhizal (AM) fungi species were inoculated to the seedlings *P. polyphylla* var. *yunnanensis* planted in the sterilized soil under the condition of room temperature to investigate their infection abilities and effects on the root activity, soil nutrient contents, enzyme activities and microbial community structure of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* rhizospheric environment. **Result:** The inoculation of

[收稿日期] 20200508(023)

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81260622);云南省应用基础研究计划项目(2011FB081);云南省教育厅科学研究基金重点项目(2012Z119)

[第一作者] 周游,博士,讲师,从事药用植物资源研究,Tel:023-58102130,E-mail:zhyou0119@163.com

[通信作者] *周浓,硕士,教授,从事药用植物栽培与质量控制研究,Tel:023-58102522,E-mail:erhaizn@126.com

exogenous AM fungi can regulate the spore densities and infection rate of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* rhizosphere AM to improve the root activity, the exogenous AM fungi can also regulate the nutrient contents in the rhizosphere soil, increase the contents of total glomalin and easily extracted glomalin, increase the abilities of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* to absorb the available N, P and K, and increase the enzyme activities in the rhizosphere soil, improve the microbial community structure, and improve the rhizospheric environment of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* by increasing the bacteria/fungi and bacteria/actinomycetes quantity ratios and reducing the fungi/actinomycetes quantity ratio. **Conclusion:** Different AM fungal treatment groups had certain effects on the physicochemical properties and microbial community structure of the rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, which provided a technical basis for the cultivation of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*.

[Key words] *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; arbuscular mycorrhizal fungi; colonization; soil microorganism; soil enzyme activities

云南重楼(*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*)为百合科重楼属多年生草本植物,其干燥根茎入药具有清热解毒、消肿止痛、定肝平惊的功效,是2015年版《中国药典》所收录的重楼药材重要基源物种^[1]。云南重楼的自然分布区域为云南、贵州、四川、广西等地,典型生境为海拔2 000 m以上的冷凉高山沟谷林荫下,年平均气温12.6℃左右,年平均降雨量825~900 mm,适生土壤须含有丰富的腐殖质,对生长环境具有较严格的要求^[2]。云南重楼的繁殖主要依靠根茎切块无性繁殖,但该技术需要消耗大量原材料,并且后代植株难以长期保持稳定性及抗性,而依靠种子进行有性繁殖时,萌发所需的时间长,出芽率低^[3-4]。因此,长期以来,市场上的重楼药材来源主要依靠挖掘野生个体,导致云南重楼资源面临枯竭^[5-6]。近年来,研究者从土壤改良、水肥管控、病虫害防治等方面对云南重楼的人工种植技术进行了探索研究^[7-10],但中药材的种植不同于农作物,化肥及农药的施用对药用植物的有效成分具有较大的影响。在保持药用品质的同时,探索出人工高效种植云南重楼的方法对于云南重楼资源的可持续开发具有重要意义。

丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌是一类可以与高等植物根系形成互利共生体的土壤微生物^[11-13],可以与80%以上的陆生高等植物形成共生关系。有研究表明,在侵染植物根系后,丛枝菌根真菌的根外菌丝可以延伸到更深更远的土壤中,从而扩大了植物根系的吸收范围^[14-15],有助于宿主植物对营养物质、水分等的吸收。有研究表明,AM真菌可以为宿主植物所吸收的34%~90%的磷^[14]且能够直接吸收土壤中的 NH_4^+ ^[16]和 NO_3^- ^[17]以及小分子有机氮并传递给植物,同时,AM真菌还可

以提高土壤及植物根茎中钾的含量^[18]。AM真菌还可以调节植物体内的代谢活动,因此可以促进宿主植物的生长发育,增强其抗逆性和抗病能力,从而提高植物的产量,改善品质。郑舜怡等^[19]研究发现,AM真菌可以提高辣椒的光合效率,LIU等^[20]研究发现AM真菌可提高水稻对低温的耐受能力,LI等^[21]研究发现AM真菌能够增强大豆的疫霉病抗性。此外,AM真菌还可以改良栽培地的土壤性质^[22]。药用植物的栽培不仅要重视产量,更要注重药用品质,有研究表明接种AM真菌可以通过直接或间接地影响植物的次生代谢过程从而显著提高药用植物中的有效成分含量^[23-26]。目前,关于接种AM真菌对植物影响的研究主要集中于大田作物中。有关AM真菌对云南重楼根际土壤环境及生长的影响的研究还鲜有报道。本研究通过温室盆栽接种试验,以接种不同AM真菌组合的盆栽云南重楼根际微域为研究对象,了解接种AM真菌对云南重楼AM侵染率、根际土壤微生物数量、根际土壤养分含量和土壤酶活性的影响,比较不同AM真菌组合的施用下根际土壤状况的变化,旨在探索AM真菌对云南重楼生长和根际环境的影响,为更好地利用AM真菌促进云南重楼的生长和提高入药品质及科学栽培云南重楼提供理论指导。

1 材料

2013年10月,于云南省大理白族自治州农业科学院种植基地(海拔1 980 m,年平均气温15.1℃,年降水量1 078.9 mm)采集云南重楼种子,经重庆三峡学院三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室周浓教授鉴定确认为云南重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*。

供试的AM真菌购自美国国际丛枝菌根真菌种

质资源保藏中心(INVAM),均为纯净菌剂,由重庆三峡学院三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室进行扩繁及保存,接种菌剂为带有孢子、菌丝的栽培基质。

石油醚、无水乙醇、三氯甲烷、正丁醇、甲醇、醋酸铵、氯化钾、氢氧化钠、甲基红、溴甲酚绿指示剂、硼酸、浓硫酸、硫酸亚铁、硫酸钾、五水硫酸铜、硒粉、高锰酸钾、二硝基酚、酒石酸氧铈钾、左旋抗坏血酸、磷酸二氢钾、甲醛、冰乙酸、乳酸、甘油、苯酚、曲利苯蓝、碳酸氢钠、邻二氮菲指示剂等试剂均为分析纯;水为双蒸水。

DZF-6050MBE型电热恒温真空干燥箱(上海博讯实业有限公司);CP225D型分析天平(德国Sartorius公司);TDZ-WS型多管架自动平衡离心机(湖南赛特湘仪离心机仪器有限公司);SB-5200DTN型超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司);LC-20A型高效液相色谱仪,UV2450型紫-外可见光光度计(日本岛津集团)。

2 方法

2.1 试验设计 试验地点为位于重庆市万州区的铁峰山国家森林公园内试验种植基地(108°21.080'/30°55.489',海拔1230 m),用于盆栽试验的云南重楼种子用无菌水洗净,10%NaClO溶液浸泡15 min后再次用无菌水洗净备用;栽培基质为菜园土与河沙混合物(体积比3:1,2 mm过筛,高压灭菌锅内121 °C灭菌2 h);种植容器高40 cm,直径30 cm的花盆。于2013年10月播种,出苗后每盆间苗至30株,设置9个处理组(AM真菌组,S1~S9)及1个空白组(CK组),每组重复10次,处理组每盆接种4种或6种AM孢子共120枚(均分),CK组不接种,采用常温栽培,定期浇Hoagland营养液。见表1。

分别于2014年8月(T1),2015年6月(T2),2015年7月(T3),2015年8月(T4)及2015年9月(T5)采集盆栽云南重楼实生苗根系及根际土壤样品。根系洗净后剪成1.5 cm长根段,一部分用于根系活力测定,一部分于甲醛-乙酸-70%乙醇溶液(FAA)固定后用于菌根侵染率测定。根际土壤样品用于土壤孢子计数及土壤酶活性和理化性质分析。

2.2 AM真菌分析与评价 各处理组及CK组随机选取浸泡在FAA固定液中的云南重楼根段30条,采用PHILIPS等^[27]方法进行染色、制片及镜检处理,随后采用TROUVELOT等^[28]的方法统计菌根侵染率。

2.3 云南重楼根系活力测定 参照萧浪涛等^[29]的方法,取新鲜云南重楼根尖样品约0.5 g用氯化三苯

表1 实验处理方法

Table 1 Experimental treatments

组合	接种AM真菌
S1	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>Gigaspora albida</i> , <i>Gigaspora margarita</i> , <i>Gigaspora gigantea</i>
S2	<i>Scutellospora calospora</i> , <i>Scutellospora pellucida</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>Racocetra fulgida</i>
S3	<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Septogloium deserticola</i> , <i>Claroideogloium claroideum</i> , <i>Rhizophagus clarum</i>
S4	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>Gigaspora albida</i> , <i>Scutellospora pellucida</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>Claroideogloium claroideum</i> , <i>Rhizophagus clarum</i>
S5	<i>Gigaspora albida</i> , <i>Gigaspora margarita</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>Racocetra fulgida</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Septogloium deserticola</i>
S6	<i>Gigaspora margarita</i> , <i>Gigaspora gigantea</i> , <i>Scutellospora calospora</i> , <i>Scutellospora pellucida</i> , <i>Septogloium deserticola</i> , <i>Claroideogloium claroideum</i>
S7	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>Gigaspora margarita</i> , <i>Scutellospora pellucida</i> , <i>Racocetra fulgida</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Rhizophagus clarum</i>
S8	<i>Gigaspora albida</i> , <i>Gigaspora gigantea</i> , <i>Scutellospora calospora</i> , <i>Racocetra fulgida</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Claroideogloium claroideum</i>
S9	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>Gigaspora gigantea</i> , <i>Scutellospora calospora</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>Septogloium deserticola</i> , <i>Rhizophagus clarum</i>
CK	-

基四氮唑法测定云南重楼根系活力。

2.4 云南重楼根际土壤的采集与处理 采用四分法^[30]收集云南重楼根际土壤,混匀后收入无菌塑料袋中。一部分保存于4 °C条件下用于土壤微生物的分离与计数,一部分常温风干后过1 mm筛用于土壤酶活性及养分含量测定。

2.5 土壤微生物的分离与计数 采用湿筛倾注蔗糖离心法进行云南重楼根际土壤AM真菌孢子数测定^[31]。采用稀释平板法^[31]分离根际土壤微生物,细菌采用牛肉膏蛋白胨(YEB)培养基,真菌采用马丁培养基,放线菌采用改良高氏I号培养基。土壤微生物数以菌落数/克干土表示。

2.6 球囊霉素相关土壤蛋白的测定 球囊霉素相关土壤蛋白的测定参照WRIGHT等^[32]的方法,采用Bradford法对易提取球囊霉素和总球囊霉素相关土壤蛋白进行测定。

2.7 土壤酶活性测定 参照关松萌^[33]的方法,采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性,以24 h后1 g干土中葡萄糖含量表示;采用茚三酮比色法测定蛋白酶活性,以24 h后1 g土壤中氨基酸的含

量表示;采用次氯酸钠-苯酚钠比色法测定脲酶活性,以24 h后1 g土壤中氨基氮含量表示;采用邻苯三酚比色法测定过氧化氢酶活性,以20 min后1 g干土中紫色没食子素含量表示;酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性测定均采用磷酸苯二钠比色法,以24 h

后1 g干土中释放出酚的质量表示。

2.8 土壤化学分析 全氮,速效氮,全磷,速效磷,全钾,速效钾,pH,有机物含量均按照文献[27]方法分析,并按照1986年全国第2次土壤普查所制定的土壤养分分级标准^[34]进行评价,见表2。

表2 中国土壤养分含量分级标准

Table 2 Classification criterion of Chinese soil nutrient content

级别	全氮/g·kg ⁻¹	速效氮/mg·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	速效钾/g·kg ⁻¹	有机物/g·kg ⁻¹	养分评价
1级	>2	>150	>1	>40	>25	>0.2	>40	丰富
2级	1.5~2	120~150	0.8~1	20~40	20~25	0.15~0.2	30~40	较丰
3级	1~1.5	90~120	0.6~0.8	10~20	15~20	0.1~0.15	20~30	中等
4级	0.75~1	60~90	0.4~0.6	5~10	10~15	0.05~0.1	10~20	较缺
5级	0.5~0.75	30~60	0.2~0.4	3~5	5~10	0.03~0.05	6~10	缺乏
6级	<0.5	<30	<0.2	<3	<5	<0.03	<6	极缺

2.9 数据分析 采用SPSS 20.0软件及WPS Excel进行单因素方差分析并绘图,LSD进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 不同AM真菌组合处理对云南重楼根际土中孢子密度的影响 同一时期,多数处理组根际土壤中AM真菌孢子密度与CK组相比有显著增加,见

表3。个别处理组无明显变化或稍有降低,原因有待进一步研究。在各处理组及CK组内的不同时期中,T3和T4期根际土壤AM真菌孢子密度最高,T5期相对T3和T4又有所降低,可能与T5期AM真菌孢子萌发导致土壤中孢子减少有关,由此可知T3及T4时期为分离土壤AM真菌孢子的最佳时期。

表3 不同AM真菌处理云南重楼根际土壤孢子密度的变化($\bar{x}\pm s, n=10$)

Table 3 Changes of spore densities in rhizosphere soil treated by different AM ($\bar{x}\pm s, n=10$)

个/10 g土

处理组	T1	T2	T3	T4	T5
S1	26.5±3.501 ^a	14.5±1.500 ^f	26.0±1.000 ^b	39.0±0.001 ^d	13.0±1.000 ^{de}
S2	11.0±1.000 ^{ef}	19.0±0.002 ^d	71.5±1.500 ^a	57.0±0.001 ^b	13.5±0.500 ^d
S3	22.0±4.501 ^b	18.5±1.500 ^d	35.5±2.500 ^f	36.0±1.000 ^e	12.0±1.002 ^{de}
S4	10.5±4.501 ^f	16.5±0.500 ^e	58.0±1.000 ^b	28.5±3.500 ^a	21.0±1.002 ^b
S5	12.5±2.500 ^{ede}	14.0±2.000 ^f	54.5±1.500 ^d	37.0±1.000 ^e	16.5±0.500 ^e
S6	12.0±3.001 ^{def}	50.5±1.500 ^a	22.5±2.500 ⁱ	36.0±1.000 ^e	22.5±0.500 ^b
S7	13.0±2.000 ^{cd}	26.0±2.000 ^c	28.0±1.000 ^g	43.0±0.001 ^c	21.5±0.500 ^b
S8	13.0±0.001 ^{cd}	15.0±0.001 ^f	40.0±2.000 ^e	33.5±1.000 ^f	25.5±0.500 ^a
S9	14.0±4.001 ^c	46.5±1.500 ^b	56.0±3.000 ^c	84.0±3.001 ^a	17.5±0.500 ^e
CK	8.0±1.000 ^e	14.0±1.000 ^f	20.5±0.500 ⁱ	33.0±0.001 ^f	11.5±0.500 ^e

注:字母完全不同代表差异有统计学意义 $P<0.05$ (表4~13同)。

3.2 不同AM真菌组合处理对云南重楼根系侵染率的影响 除T2外,各时期各处理的云南重楼根系AM真菌侵染率大多都显著高于CK组;在T2时期,S1,S2,S3,S4和S8中云南重楼根系AM侵染率低于CK组;而在各处理组中,S1,S2,S3和S8中AM真菌侵染率在T2与T1相比有显著降低,随后又有显著升高,见表4。由此可见,外源AM真菌对云南重楼根内AM真菌的侵染强度具有调控(增减)作用。

3.3 不同AM真菌处理对云南重楼根际土壤易提取球囊霉素的影响 球囊霉素在调节土壤有机碳含量和维持土壤团聚体结构等方面具有重要作用。由表5可见,除T4时期S6处理外,各处理组云南重楼根际土壤中易提取球囊霉素含量较同时期CK组均有显著提高。各处理组及CK组不同时期的云南重楼根际土壤中易提取球囊霉素含量均以T2时期最低,后又呈上升趋势,原因可能是自T1至T2时期各

表4 不同AM真菌处理云南重楼根系菌根感染率的变化 ($\bar{x}\pm s$, $n=10$)

Table 4 Changes of mycorrhizal infection rates treated by different AM ($\bar{x}\pm s$, $n=10$) %

处理组	T1	T2	T3	T4	T5
S1	95±0.82 ^c	78±0.77 ^e	100±1.11 ^a	98±0.16 ^b	100±0.46 ^a
S2	95±2.25 ^c	70±0.15 ^f	100±0.38 ^a	100±2.50 ^a	100±0.81 ^a
S3	100±0.60 ^a	82±0.01 ^d	100±4.01 ^a	96±0.14 ^c	100±0.66 ^a
S4	67±1.70 ^e	90±0.09 ^c	100±0.86 ^a	100±1.32 ^a	100±0.42 ^a
S5	100±2.83 ^a	100±0.48 ^a	90±0.09 ^c	95±0.01 ^c	100±1.18 ^a
S6	75±2.21 ^d	100±0.01 ^a	100±1.80 ^a	98±0.35 ^b	100±0.45 ^a
S7	100±1.58 ^a	100±0.55 ^a	100±3.40 ^a	90±2.73 ^d	100±0.83 ^a
S8	100±0.01 ^a	90±0.38 ^c	100±0.53 ^a	100±2.05 ^a	100±0.34 ^a
S9	98±0.01 ^b	100±0.64 ^a	100±0.01 ^a	100±0.77 ^a	100±0.01 ^a
CK	56±1.61 ^f	95±0.72 ^b	96±0.51 ^b	90±0.12 ^d	94±0.14 ^b

处理组及CK组中AM真菌经历冬季休眠,使原有的易提取球囊霉素被植物根系吸收或降解。

3.4 不同AM真菌组合处理对云南重楼根际土壤总球囊霉素的影响 接种不同AM真菌组合对云南重楼根际土壤总球囊霉素含量的影响见表6。结果表明,除T1时期S9处理,T2时期S5,S7处理,T4时期S5处理外,各时期各处理云南重楼根际土壤总球囊霉素含量较CK组均有显著增加。各处理组及CK组云南重楼根际土壤中总球囊霉素含量在T2较T1显著降低,与易提取球囊霉素含量变化趋势类似。

3.5 不同AM真菌组合处理对云南重楼根系活力的影响 在T3时期,T4时期和T5时期,各处理组根系活力较CK组均有显著提高,而在T1,T2时期,各处理组根系活力显著低于CK组或与CK组差异不明显,见表7,其原因可能是侵染初期AM真菌成长过程中对植物体一部分养料的消耗降低了根系的活力,而当AM真菌与云南重楼植物体建立稳定的共生关系后则促进植物体生长,增强了云南重楼的根系活力。各处理组及CK组根系活力在不同时

表5 接种不同AM真菌对云南重楼根际土壤易提取球囊霉素的影响 ($\bar{x}\pm s$, $n=10$)

Table 5 Easily extracted glomalin contents in rhizospheric soils inoculated by different AM fungi treatment groups ($\bar{x}\pm s$, $n=10$) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

处理组	T1	T2	T3	T4	T5
S1	1 342.857±1.871 ^b	1 118.159±1.674 ^a	1 393.906±2.684 ^a	1 388.675±1.367 ^{bc}	1 356.542±1.985 ^c
S2	1 252.679±2.894 ^{bc}	841.664±2.945 ^{bc}	1 390.917±1.436 ^a	1 461.909±1.984 ^b	1 343.091±2.641 ^c
S3	1 289.286±2.945 ^{bc}	933.580±1.643 ^b	1 396.895±2.678 ^a	1 540.374±2.641 ^a	1 487.317±1.352 ^a
S4	1 342.857±1.947 ^b	831.202±2.734 ^c	1 426.039±1.694 ^a	1 375.224±1.369 ^{bc}	1 378.213±2.987 ^{bc}
S5	1 261.893±2.645 ^{bc}	808.037±1.367 ^c	1 331.135±2.423 ^a	1 405.115±2.684 ^{bc}	1 477.602±2.961 ^a
S6	1 303.572±1.654 ^{bc}	850.632±2.684 ^{bc}	1 380.455±2.671 ^a	1 314.694±1.642 ^c	1 468.635±1.658 ^a
S7	1 347.322±2.698 ^b	895.469±1.453 ^{bc}	1 378.961±1.384 ^a	1 414.830±2.934 ^{bc}	1 445.469±2.694 ^a
S8	1 490.179±1.678 ^a	878.281±2.974 ^{bc}	1 402.874±2.642 ^a	1 435.007±2.674 ^b	1 448.458±1.562 ^a
S9	1 214.732±1.645 ^{cd}	820.740±2.364 ^c	1 362.520±1.984 ^a	1 391.664±1.952 ^{bc}	1 408.105±2.375 ^b
CK	1 174.554±2.864 ^d	705.659±1.546 ^d	1 189.898±2.957 ^b	1 358.784±2.367 ^{bc}	1 208.580±2.634 ^d

表6 接种不同AM真菌对云南重楼根际土壤总球囊霉素的影响 ($\bar{x}\pm s$, $n=10$)

Table 6 Total glomalin contents in rhizospheric soils inoculated by different AM fungi treatment groups ($\bar{x}\pm s$, $n=10$) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

处理组	T1	T2	T3	T4	T5
S1	1 865.179±2.367 ^c	1 671.148±3.698 ^c	1 760.075±3.641 ^c	2 026.107±2.684 ^b	2 186.026±3.124 ^a
S2	1 885.715±3.105 ^{de}	1 731.678±3.425 ^b	1 741.393±2.314 ^c	1 729.436±2.458 ^d	2 141.936±2.147 ^b
S3	1 955.357±2.364 ^c	1 795.197±2.684 ^a	1 722.711±3.256 ^c	2 026.107±2.364 ^b	1 868.431±2.684 ^c
S4	1 923.215±2.984 ^d	1 732.425±2.147 ^b	1 724.205±2.641 ^c	2 080.659±2.654 ^a	2 097.099±2.214 ^c
S5	2 024.107±2.641 ^a	1 602.398±2.684 ^d	1 719.721±2.985 ^c	1 633.037±3.214 ^f	2 069.450±2.364 ^c
S6	1 886.607±2.984 ^{de}	1 614.355±2.159 ^d	1 828.825±2.324 ^b	1 982.018±3.684 ^c	2 091.121±2.846 ^c
S7	1 981.250±2.314 ^{bc}	1 602.398±2.364 ^d	1 882.629±2.426 ^a	2 077.670±2.641 ^a	2 145.673±2.684 ^b
S8	1 998.215±2.647 ^{ab}	1 664.049±2.156 ^c	1 881.882±2.398 ^a	1 672.643±2.123 ^e	1 915.510±2.158 ^d
S9	1 760.715±2.610 ^f	1 613.607±2.341 ^d	1 816.868±2.145 ^b	1 970.808±2.624 ^c	2 081.406±2.341 ^c
CK	1 774.107±3.258 ^f	1 605.387±2.694 ^d	1 671.895±2.168 ^d	1 630.048±2.843 ^f	1 794.449±2.145 ^f

期均呈先升高后下降的趋势,多数处理组及CK组云南重楼的根系活力在T3时期达到最高,随后在T4和T5时期降低,其原因可能是生长后期根系活动减弱。

表7 不同AM真菌处理云南重楼根系活力变化 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Table 7 Changes of root activities treated by different AM fungi ($\bar{x}\pm s, n=10$)

处理组	T1	T2	T3	T4	T5
S1	0.748±0.054	10.429±0.035	10.703±0.084	6.199±0.069	4.216±0.035
S2	0.733±0.026	8.337±0.036	7.648±0.068	5.066±0.064	4.795±0.034
S3	1.011±0.054	7.955±0.047	8.629±0.052	3.408±0.052	4.705±0.056
S4	0.483±0.034	5.574±0.064	10.647±0.056	5.335±0.047	4.372±0.047
S5	0.857±0.028	6.901±0.058	10.805±0.053	5.084±0.053	5.819±0.049
S6	0.838±0.054	7.235±0.064	6.824±0.062	3.922±0.042	6.021±0.056
S7	0.902±0.068	5.851±0.052	9.381±0.034	3.894±0.058	7.406±0.034
S8	0.811±0.064	3.902±0.034	7.522±0.038	1.793±0.034	4.985±0.064
S9	0.768±0.052	4.711±0.027	6.371±0.046	4.042±0.064	5.895±0.054
CK	0.770±0.035	8.688±0.035	7.032±0.049	0.944±0.051	3.884±0.042

3.6 不同AM真菌组合处理对云南重楼根际土壤酶活性的影响 与CK组相比,各处理组云南重楼根际土壤中蛋白酶活性均有明显提高,除S9以外,

各处理组及对照组蛋白酶活性均呈先上升后下降趋势,从T1到T5时期,各处理组根际土壤中蛋白酶活性分别最高的是S8,S8,S7,S3,S9。见表8。

表8 不同AM真菌混合处理对云南重楼根际土壤酶活性的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Table 8 Effect of different AM fungi treatments on enzyme activities in rhizospheric soils ($\bar{x}\pm s, n=10$)

处理组	取样时期	蛋白酶 /mg·kg ⁻¹	脲酶 /g·kg ⁻¹	酸性磷酸酶 /g·kg ⁻¹	中性磷酸酶 /g·kg ⁻¹	碱性磷酸酶 /g·kg ⁻¹	过氧化氢酶 /g·kg ⁻¹	蔗糖酶 /g·kg ⁻¹
S1	T1	1.341±0.114 ^h	13.426±0.012 ^d	0.607±0.067 ^e	0.272±0.070 ^f	0.426±0.109 ^{hg}	0.562±0.117 ^a	4.163±0.104 ^d
	T2	11.701±0.027 ^b	15.037±0.284 ^f	0.546±0.057 ^g	0.384±0.082 ^c	1.321±0.130 ^{dc}	0.713±0.043 ^a	2.601±0.066 ^{ba}
	T3	14.713±0.012 ^d	26.350±0.012 ^e	0.183±0.017 ^f	0.244±0.013 ^b	0.486±0.064 ^g	0.141±0.022 ⁱ	2.066±0.083 ^a
	T4	3.494±0.009 ^h	4.215±0.007 ^f	0.256±0.122 ^g	0.821±0.004 ^a	0.410±0.076 ^e	0.386±0.079 ^{ba}	1.562±0.110 ^{cb}
	T5	2.737±0.077 ^h	16.115±0.013 ^{dc}	0.450±0.061 ^{edc}	0.450±0.063 ^{ed}	1.590±0.078 ^b	0.258±0.105 ^c	1.659±0.073 ^{dc}
S2	T1	4.299±0.079 ^d	18.944±0.010 ^c	0.791±0.056 ^c	0.209±0.058 ^f	0.493±0.127 ^g	0.560±0.054 ^a	1.954±0.105 ^g
	T2	5.640±0.056 ^c	12.722±0.336 ^g	0.702±0.045 ^c	0.310±0.101 ^c	2.097±0.082 ^b	0.661±0.046 ^a	2.331±0.074 ^{cb}
	T3	17.862±0.010 ^c	24.245±0.013 ^f	0.182±0.017 ^f	0.180±0.017 ^f	0.737±0.042 ^e	0.156±0.019 ^b	1.623±0.106 ^{ba}
	T4	3.608±0.009 ^g	5.079±0.006 ^d	3.190±0.010 ^a	0.414±0.008 ^b	0.543±0.058 ^d	0.211±0.144 ^c	1.480±0.116 ^{cb}
	T5	3.974±0.014 ^f	20.670±0.016 ^a	0.544±0.033 ^c	0.544±0.034 ^c	1.357±0.104 ^b	0.560±0.121 ^a	1.628±0.100 ^{dc}
S3	T1	9.655±0.048 ^b	20.630±0.015 ^a	0.554±0.038 ^f	0.686±0.040 ^b	2.472±0.080 ^a	0.466±0.076 ^a	4.433±0.067 ^c
	T2	6.536±0.048 ^d	17.352±0.246 ^d	0.939±0.033 ^c	0.348±0.090 ^c	0.851±0.202 ^{ed}	0.697±0.043 ^a	2.901±0.059 ^a
	T3	8.320±0.021 ^f	23.018±0.014 ^g	0.232±0.013 ^c	0.167±0.019 ^g	1.058±0.030 ^b	0.313±0.010 ^c	2.051±0.084 ^a
	T4	9.872±0.003 ^a	7.343±0.004 ^c	0.290±0.108 ^e	0.260±0.012 ^f	0.449±0.070 ^e	0.419±0.072 ^{ba}	3.054±0.056 ^a
	T5	6.529±0.019 ^e	13.169±0.011 ^f	0.789±0.074 ^b	0.789±0.077 ^b	2.148±0.113 ^a	0.401±0.122 ^b	2.580±0.107 ^a
S4	T1	2.007±0.088 ^f	8.759±0.016 ^g	0.627±0.060 ^d	0.505±0.082 ^{dc}	0.917±0.153 ^d	0.491±0.102 ^a	2.519±0.077 ^f
	T2	2.784±0.113 ^f	15.889±0.269 ^e	0.592±0.053 ^g	0.533±0.059 ^b	0.900±0.191 ^{ed}	0.716±0.042 ^a	2.651±0.065 ^{ba}
	T3	8.463±0.020 ^f	30.807±0.010 ^b	0.208±0.015 ^d	0.244±0.013 ^b	0.611±0.051 ^f	0.214±0.014 ^g	1.949±0.088 ^{ba}
	T4	7.858±0.004 ^c	4.462±0.007 ^e	1.768±0.018 ^b	0.309±0.010 ^e	0.400±0.078 ^c	0.416±0.073 ^{ba}	1.682±0.102 ^b
	T5	3.572±0.013 ^g	12.882±0.012 ^{gf}	0.506±0.073 ^{dc}	0.381±0.092 ^{fc}	1.129±0.128 ^c	0.298±0.106 ^e	2.239±0.141 ^{ba}

续表 8

处理组	取样时期	蛋白酶 /mg·kg ⁻¹	脲酶 /g·kg ⁻¹	酸性磷酸酶 /g·kg ⁻¹	中性磷酸酶 /g·kg ⁻¹	碱性磷酸酶 /g·kg ⁻¹	过氧化氢酶 /g·kg ⁻¹	蔗糖酶 /g·kg ⁻¹
S5	T1	5.947±0.033 ^c	7.111±0.013 ^b	1.785±0.067 ^a	0.463±0.076 ^{cd}	0.574±0.120 ^f	0.487±0.092 ^a	2.825±0.092 ^c
	T2	4.905±0.064 ^f	19.315±0.221 ^b	1.691±0.019 ^a	0.622±0.050 ^a	0.584±0.294 ^e	0.666±0.046 ^a	2.214±0.078 ^{cb}
	T3	12.98±0.013 ^c	32.028±0.010 ^a	0.197±0.016 ^c	0.314±0.010 ^a	0.842±0.037 ^d	0.299±0.010 ^d	1.649±0.104 ^{ba}
	T4	4.905±0.006 ^e	9.600±0.003 ^b	0.274±0.114 ^f	0.373±0.008 ^d	0.644±0.049 ^c	0.490±0.062 ^a	1.542±0.111 ^{cb}
	T5	9.410±0.200 ^d	15.801±0.017 ^d	0.455±0.079 ^{edc}	0.410±0.102 ^{fed}	1.441±0.169 ^b	0.330±0.128 ^c	1.867±0.109 ^{cb}
S6	T1	2.007±0.077 ^f	9.583±0.013 ^f	1.579±0.061 ^b	0.535±0.063 ^{dc}	1.266±0.078 ^b	0.451±0.105 ^b	5.543±0.073 ^a
	T2	4.598±0.068 ^e	19.093±0.224 ^c	1.518±0.021 ^b	0.523±0.060 ^b	3.191±0.054 ^a	0.733±0.041 ^a	1.363±0.12 ^{6d}
	T3	17.601±0.010 ^c	27.855±0.011 ^d	0.259±0.012 ^a	0.229±0.014 ^c	0.942±0.033 ^c	0.285±0.011 ^c	1.582±0.109 ^{ba}
	T4	2.835±0.011 ⁱ	12.201±0.003 ^a	0.275±0.114 ^f	0.138±0.023 ^h	0.878±0.036 ^a	0.396±0.077 ^{ab}	1.613±0.106 ^b
	T5	4.051±0.077 ^f	14.896±0.013 ^c	0.500±0.061 ^{dc}	0.500±0.063 ^{dc}	2.219±0.078 ^a	0.290±0.105 ^c	2.346±0.073 ^a
S7	T1	1.565±0.014 ^g	12.667±0.016 ^c	0.798±0.033 ^c	0.575±0.034 ^c	0.842±0.104 ^c	0.531±0.121 ^a	0.702±0.100 ^h
	T2	3.301±0.095 ^b	23.870±0.179 ^a	1.636±0.019 ^a	0.505±0.062 ^b	3.081±0.056 ^a	0.737±0.041 ^a	2.056±0.084 ^{cb}
	T3	35.946±0.005 ^a	31.092±0.010 ^b	0.243±0.013 ^b	0.140±0.022 ^h	1.168±0.027 ^a	0.243±0.012 ^f	2.030±0.085 ^a
	T4	4.233±0.007 ^f	3.697±0.008 ^g	0.312±0.100 ^c	0.402±0.008 ^c	0.445±0.070 ^c	0.352±0.086 ^b	1.842±0.093 ^b
	T5	21.764±0.014 ^b	12.454±0.016 ^g	0.909±0.033 ^a	0.909±0.034 ^a	1.668±0.104 ^b	0.251±0.121 ^c	1.720±0.100 ^{dc}
S8	T1	2.539±0.019 ^a	13.111±0.011 ^d	0.627±0.074 ^d	0.397±0.077 ^c	1.028±0.113 ^c	0.368±0.122 ^b	0.579±0.107 ⁱ
	T2	9.254±0.034 ^a	24.481±0.175 ^a	0.670±0.047 ^f	0.353±0.089 ^c	1.084±0.158 ^{cdc}	0.727±0.042 ^a	2.158±0.080 ^{cb}
	T3	23.694±0.007 ^b	28.941±0.011 ^c	0.210±0.015 ^d	0.189±0.017 ^c	0.572±0.055 ^f	0.411±0.007 ^a	2.127±0.081 ^a
	T4	9.780±0.003 ^b	2.925±0.011 ⁱ	1.459±0.021 ^c	0.142±0.022 ^h	0.631±0.050 ^c	0.417±0.073 ^{ba}	0.905±0.190 ^d
	T5	16.274±0.019 ^c	17.784±0.011 ^b	0.407±0.074 ^{ed}	0.407±0.077 ^{fed}	1.524±0.113 ^b	0.249±0.122 ^c	1.598±0.107 ^{dc}
S9	T1	2.314±0.013 ^c	19.481±0.012 ^b	0.770±0.073 ^c	0.912±0.092 ^a	0.403±0.128 ^b	0.460±0.106 ^a	5.314±0.141 ^b
	T2	9.467±0.033 ^c	20.111±0.213 ^a	0.745±0.042 ^d	0.341±0.092 ^c	1.456±0.118 ^c	0.722±0.042 ^a	1.913±0.090 ^c
	T3	6.827±0.025 ^g	31.628±0.010 ^{ba}	0.233±0.013 ^c	0.204±0.015 ^d	0.927±0.034 ^c	0.326±0.009 ^b	2.216±0.078 ^a
	T4	6.508±0.005 ^d	3.485±0.009 ^h	1.353±0.023 ^d	0.251±0.012 ^g	0.766±0.041 ^b	0.442±0.069 ^{ba}	0.997±0.172 ^{dc}
	T5	24.309±0.013 ^a	16.444±0.012 ^c	0.418±0.073 ^{ed}	0.341±0.092 ^f	1.354±0.128 ^b	0.287±0.106 ^c	1.216±0.141 ^d
CK	T1	1.116±0.200 ⁱ	6.688±0.017 ⁱ	0.386±0.079 ^g	0.208±0.102 ^f	0.188±0.169 ^j	0.222±0.128 ^c	0.513±0.109 ^j
	T2	2.063±0.152 ⁱ	10.969±0.390 ^h	0.365±0.086 ^h	0.305±0.103 ^c	0.541±0.317 ^c	0.656±0.046 ^b	1.223±0.140 ^d
	T3	5.610±0.031 ^h	18.307±0.017 ^h	0.170±0.018 ^e	0.134±0.023 ^h	0.390±0.080 ^h	0.124±0.024 ^j	1.414±0.121 ^b
	T4	0.532±0.059 ^j	2.303±0.014 ^f	0.234±0.134 ^h	0.133±0.024 ⁱ	0.393±0.080 ^c	0.210±0.144 ^c	1.017±0.169 ^{dc}
	T5	1.564±0.200 ⁱ	11.840±0.017 ^h	0.385±0.079 ^c	0.307±0.102 ^f	1.024±0.169 ^c	0.237±0.128 ^c	1.572±0.109 ^{dc}

各时期各处理组云南重楼根际土壤中脲酶活性较CK组均有显著提高,各处理组及对照组云南重楼根际土壤中脲酶活性在T1至T3时期均呈上升趋势,而在T4及T5时期迅速下降。T1至T5时期各处理组云南重楼根际土壤中脲酶活性最高的分别是S3,S8,S5,S6,S2。

除T5时期S1,S8,S9处理以外,其余各处理组各时期酸性磷酸酶活性均显著高于CK组,其中T1时期S5处理,T2时期S5,S7处理,T3时期S6处理,T4时期S2处理,T5时期S7处理在同时期各处理中

酸性磷酸酶活性最高。同时,多数处理组及CK组酸性磷酸酶活性在不同时期呈下降趋势。

除T2时期S1,S2,S3,S8,S9处理,T5时期S4,S5,S8,S9处理与CK组差异不明显以外,各时期其余处理的云南重楼根际土壤中中性磷酸酶活性均显著高于CK组。从T1到T5时期,中性磷酸酶活性最高的分别是S9,S5,S5,S1和S7处理。多数处理组及CK云南重楼根际土壤中中性磷酸酶在T2时期较T1时期有显著升高,在T3时期较T2时期有显著降低,随后在T4和T5时期较T3时期又有显著升高。

除 T2 时期 S3, S4, S5, S8 处理, T4 时期 S1, S3, S4, S7 处理与 CK 组差异不明显外, 各时期其余处理的云南重楼根际土壤中碱性磷酸酶活性均显著高于 CK 组。从 T1 到 T5 时期, 碱性磷酸酶活性最高的分别是 T1 时期 S3 处理, T2 时期 S6 和 S7 处理, T3 时期 S7 处理, T4 时期 S6 处理, T5 时期 S3 和 S6 处理。各处理组及 CK 组云南重楼根际土壤中碱性磷酸酶活性在不同时期均呈上升趋势。

除 T4 时期 S2 处理与 CK 组差异不明显以外, 各时期其余处理组的云南重楼根际土壤中过氧化氢酶活性均显著高于 CK 组。其中, T1 时期 S1, S2, S3, S4, S5, S7, S9 处理, T2 时期所有处理, T3 时期 S8 处理, T4 时期 S1, S3, S4, S5, S6, S8, S9 处理, T5 时期 S2 处理中的过氧化氢酶活性在同时期中最高。各处理组及 CK 组过氧化氢酶活性在 T2 时期相对 T1 时期有显著升高后, 自 T3 至 T5 时期逐渐降低。

除 T2 时期 S6 处理, T3 时期 S2, S4, S5, S6 处理, T4 时期 S8, S9 处理, T5 时期 S1, S2, S5, S7, S8, S9 处理与 CK 组无显著差异外, 各时期其余处理云南重

楼根际土壤中蔗糖酶活性均显著高于 CK 组。其中 T1 时期 S6 处理, T2 时期 S1, S3 处理, T3 时期 S1, S3, S7, S8, S9 处理, T4 时期 S3 处理, T5 时期 S3, S4, S6 处理在同时期各处理中蔗糖酶活性最高。同时, S3 处理中云南重楼根际土壤中的蔗糖酶活性在各时期始终显著高于 CK 组。各处理组云南重楼根际土壤中蔗糖酶活性自 T1 至 T5 时期呈下降趋势, 而 CK 组中蔗糖酶活性自 T1 至 T5 时期呈上升趋势。

3.7 不同 AM 真菌组合处理对云南重楼根际土壤养分的影响 由表 9 可知, 各处理组和 CK 组中的全氮质量分数在 $(0.547 \pm 0.057) \sim (1.831 \pm 0.017) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于缺乏至中等范围, 速效氮质量分数在 $(105.004 \pm 0.043) \sim (384.962 \pm 0.015) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于中等到丰富范围。各时期各处理组云南重楼根际土壤中全氮及速效氮含量与 CK 组差异不明显或低于 CK 组。其原因可能是接种 AM 真菌后植物对土壤中氮元素营养吸收能力增强, 土壤中全氮及速效氮含量低于 CK 组。各处理组及 CK 组云南重楼根际土壤中全氮及速效氮含量随采样时间推移均呈下降趋势。

表 9 云南重楼根际土壤中全氮及速效氮含量在不同时期变化 ($\bar{x} \pm s, n=10$)

Table 9 Changes of contents of total nitrogen and available nitrogen ($\bar{x} \pm s, n=10$)

种类	处理组	T1	T2	T3	T4	T5
全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	S1	1.481±0.021 ^d	0.691±0.045 ^{ba}	0.595±0.053 ^c	0.573±0.055 ^{cb}	0.558±0.056 ^{cb}
	S2	1.491±0.021 ^d	0.711±0.044 ^{ba}	0.771±0.041 ^a	0.637±0.049 ^b	0.578±0.054 ^b
	S3	1.657±0.019 ^c	0.647±0.048 ^{ba}	0.701±0.045 ^{ba}	0.614±0.051 ^b	0.576±0.054 ^b
	S4	1.467±0.021 ^d	0.676±0.046 ^{ba}	0.652±0.048 ^b	0.612±0.050 ^b	0.547±0.057 ^c
	S5	1.755±0.018 ^b	0.736±0.043 ^{ba}	0.647±0.048 ^b	0.554±0.057 ^c	0.519±0.060 ^d
	S6	1.684±0.019 ^{cb}	0.681±0.046 ^{ba}	0.654±0.048 ^b	0.572±0.054 ^{cb}	0.368±0.085 ^f
	S7	1.692±0.019 ^{cb}	0.509±0.062 ^c	0.662±0.047 ^b	0.549±0.057 ^c	0.495±0.063 ^d
	S8	1.454±0.022 ^d	0.623±0.050 ^b	0.603±0.052 ^b	0.551±0.057 ^c	0.323±0.097 ^g
	S9	1.433±0.022 ^d	0.706±0.044 ^{ba}	0.653±0.048 ^b	0.628±0.050 ^b	0.387±0.081 ^e
	CK	1.831±0.017 ^a	0.760±0.041 ^a	0.774±0.040 ^a	0.739±0.042 ^a	0.607±0.052 ^a
速效氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	S1	314.528±0.018 ^c	220.478±0.019 ^a	175.007±0.024 ^b	133.000±0.022 ^{cb}	122.561±0.037 ^{cd}
	S2	306.225±0.019 ^c	203.001±0.021 ^b	132.934±0.032 ^d	118.941±0.024 ^d	108.533±0.042 ^c
	S3	276.434±0.021 ^d	181.972±0.023 ^{dc}	147.061±0.029 ^c	128.319±0.022 ^{dc}	112.056±0.041 ^{fe}
	S4	362.223±0.016 ^b	161.016±0.027 ^e	151.635±0.028 ^c	139.987±0.020 ^{ba}	105.004±0.043 ^f
	S5	306.233±0.019 ^c	206.541±0.021 ^b	139.992±0.031 ^{dc}	125.931±0.023 ^{dc}	125.987±0.036 ^a
	S6	265.913±0.021 ^{cd}	174.940±0.024 ^d	128.328±0.033 ^d	107.345±0.027 ^e	104.987±0.043 ^b
	S7	323.167±0.018 ^c	181.909±0.023 ^{dc}	140.009±0.031 ^{dc}	140.014±0.020 ^{ba}	116.637±0.039 ^{ba}
	S8	256.641±0.022 ^{fe}	189.006±0.023 ^c	165.728±0.026 ^b	123.595±0.023 ^d	104.930±0.043 ^b
	S9	244.977±0.023 ^f	132.966±0.032 ^f	125.950±0.034 ^d	118.935±0.024 ^d	102.633±0.044 ^b
	CK	384.962±0.015 ^a	189.020±0.023 ^c	221.629±0.019 ^a	143.514±0.020 ^a	125.950±0.036 ^a

由表 10 可知, 各处理组及 CK 组云南重楼根际土壤中全磷质量分数在 $(0.183 \pm 0.014) \sim (1.785 \pm 0.014) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

有效磷质量分数在 $(0.913 \pm 0.034) \sim (53.119 \pm 0.001) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均差异较大, 在极缺与丰富之间。

从T1到T5时间段内,各处理组和CK组云南重楼根际土壤中全磷含量多数呈先下降后上升趋势,T5时期全磷含量均低于T1时期,速效磷含量呈下降趋势。从T1到T5时期,各处理组云南重楼根际

土壤中全磷含量多数高于CK组,但除T2时期S2处理组及T4时期S2,S5,S6,S7,S8处理组以外,各处理组云南重楼根际土壤中速效磷含量均显著低于CK组。

表10 云南重楼根际土壤中全磷及速效磷含量在不同时期变化 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Table 10 Changes of contents of total phosphorus and available phosphorus ($\bar{x}\pm s, n=10$)

种类	处理组	T1	T2	T3	T4	T5
全磷/ $g\cdot kg^{-1}$	S1	0.607±0.012 ^d	0.546±0.011 ^f	0.183±0.014 ^d	0.256±0.010 ^f	0.450±0.012 ^e
	S2	0.791±0.012 ^b	0.702±0.011 ^d	0.182±0.015 ^d	0.190±0.011 ^h	0.544±0.012 ^c
	S3	0.554±0.013 ^e	0.939±0.013 ^c	0.232±0.014 ^b	0.290±0.015 ^d	0.789±0.013 ^b
	S4	0.627±0.012 ^d	0.592±0.013 ^d	0.208±0.014 ^b	1.768±0.013 ^a	0.506±0.016 ^d
	S5	1.785±0.014 ^a	1.691±0.012 ^a	0.197±0.012 ^c	0.274±0.011 ^e	0.455±0.014 ^e
	S6	1.579±0.014 ^a	1.518±0.015 ^b	0.259±0.014 ^a	0.275±0.009 ^e	0.500±0.014 ^d
	S7	0.798±0.015 ^b	1.636±0.013 ^a	0.243±0.012 ^b	0.312±0.014 ^d	0.909±0.014 ^a
	S8	0.627±0.015 ^d	0.670±0.015 ^e	0.210±0.014 ^c	1.459±0.013 ^b	0.407±0.012 ^g
	S9	0.770±0.015 ^c	0.745±0.019 ^d	0.233±0.018 ^b	1.353±0.009 ^e	0.418±0.019 ^f
	CK	0.386±0.015 ^f	0.365±0.031 ^g	0.170±0.015 ^e	0.234±0.017 ^g	0.385±0.018 ^h
速效磷/ $mg\cdot kg^{-1}$	S1	48.249±0.001 ^c	18.896±0.002 ^e	16.434±0.002 ^c	12.934±0.002 ^f	7.230±0.004 ^c
	S2	25.098±0.001 ^g	21.174±0.001 ^a	15.528±0.002 ^e	20.636±0.002 ^b	0.913±0.034 ^j
	S3	22.662±0.001 ^h	19.917±0.002 ^c	6.058±0.005 ⁱ	6.176±0.005 ^h	2.901±0.011 ^h
	S4	31.189±0.001 ^f	19.274±0.002 ^d	10.675±0.003 ^g	5.648±0.006 ^j	4.363±0.007 ^f
	S5	34.843±0.001 ^e	17.053±0.002 ^f	7.403±0.004 ^h	24.663±0.001 ^a	2.491±0.013 ⁱ
	S6	25.097±0.001 ^g	6.351±0.005 ^b	5.652±0.006 ^j	19.798±0.002 ^c	5.062±0.006 ^e
	S7	51.901±0.001 ^b	13.664±0.002 ^g	17.805±0.002 ^b	13.487±0.002 ^c	5.705±0.005 ^d
	S8	25.101±0.001 ^g	4.363±0.007 ^j	13.665±0.002 ^f	17.464±0.002 ^d	7.935±0.004 ^b
	S9	36.062±0.001 ^d	4.947±0.006 ⁱ	16.174±0.002 ^d	11.964±0.003 ^g	3.309±0.009 ^g
	CK	53.119±0.001 ^a	20.034±0.002 ^b	19.608±0.002 ^a	12.933±0.002 ^f	8.282±0.004 ^a

由表11可知,各处理组和CK组云南重楼根际土壤中全钾质量分数在(19.930±0.016)~(41.397±0.005) $g\cdot kg^{-1}$,速效钾质量分数在(0.124±0.028)~(0.073±0.056) $g\cdot kg^{-1}$,均属于含量较丰富至丰富水平。根际土壤中全钾含量除T2时期各处理组低于CK组,T4和T5时期各处理组多数与CK差异不明显以外,其余各时期各处理组多数高于CK组。根际土壤速效钾含量各时期各处理均高于CK组。CK组和各处理组同一组内云南重楼根际土壤全钾含量随采样时间推移呈总体上升趋势,其原因可能是施用营养液时的钾元素补充,速效钾含量随采样时间推移总体呈先上升后下降趋势,其原因可能是植物体对钾元素的吸收。

由表12可知,除T4和T5时期以外,其余各时期各处理组云南重楼根际土壤pH较对照组均有显著升高,而各处理组及CK组云南重楼根基土壤的

pH在不同时期呈先下降后上升趋势。

3.8 不同AM真菌组合处理对云南重楼根际土壤微生物数量的影响 由表13可知,其余各时期各处理中云南重楼根际土壤细菌数量均显著多于CK组。其中T1时期S4处理,T2时期S1处理,T3时期S8处理,T4时期S6,S6处理,T5时期S9处理中的细菌数量在同时期各处理中最高。

除T1时期各处理组中云南重楼根基土壤真菌数量高于CK组,T4时期S9处理组,T5时期S6处理组中云南重楼根际土壤细菌真菌数量与CK组差异不明显外,其余时期各处理中真菌数量显著少于CK组。

除T1时期S4,S5处理,T2时期S1~S9处理,T3时期S6,S8处理,T4时期S5~S9处理,T5时期S9处理中云南重楼根际土壤中放线菌数量与CK组差异不明显外,其余各时期各处理的云南重楼根际土壤

表11 云南重楼根际土壤中全钾及速效钾含量在不同时期变化 ($\bar{x} \pm s, n=10$)

Table 11 Changes of contents of total potassium and available potassium ($\bar{x} \pm s, n=10$)

种类	处理组	T1	T2	T3	T4	T5
全钾/g·kg ⁻¹	S1	20.500±0.015 ^{cd}	28.571±0.007 ^d	37.321±0.024 ^{cb}	28.996±0.050 ^{cb}	29.703±0.039 ^f
	S2	30.630±0.010 ^a	28.626±0.007 ^d	34.132±0.026 ^{fed}	25.976±0.056 ^c	42.513±0.027 ^a
	S3	19.330±0.016 ^f	26.389±0.008 ^f	34.237±0.026 ^{fed}	31.427±0.046 ^b	35.374±0.033 ^b
	S4	29.760±0.011 ^b	28.215±0.007 ^d	41.038±0.021 ^a	30.150±0.048 ^{cb}	36.139±0.032 ^b
	S5	20.940±0.015 ^d	32.471±0.006 ^c	32.519±0.027 ^{fe}	30.875±0.047 ^b	27.199±0.043 ^g
	S6	23.430±0.013 ^c	26.963±0.007 ^c	36.276±0.024 ^{dcb}	36.777±0.039 ^a	31.957±0.036 ^c
	S7	20.520±0.015 ^{cd}	13.463±0.015 ^g	33.713±0.026 ^{fed}	29.052±0.050 ^{cb}	35.005±0.033 ^{cb}
	S8	23.560±0.013 ^c	32.814±0.006 ^c	34.976±0.025 ^{edc}	31.404±0.046 ^b	41.278±0.028 ^a
	S9	30.550±0.010 ^a	33.563±0.006 ^b	38.105±0.023 ^b	36.717±0.039 ^a	34.707±0.033 ^c
	CK	19.930±0.016 ^{fe}	41.397±0.005 ^a	31.907±0.028 ^f	32.767±0.044 ^b	33.891±0.034 ^d
速效钾/mg·kg ⁻¹	S1	0.562±0.015 ^a	0.713±0.010 ^c	0.141±0.016 ^b	0.386±0.011 ^e	0.258±0.015 ^f
	S2	0.560±0.013 ^a	0.661±0.015 ^f	0.156±0.013 ^g	0.211±0.010 ^g	0.560±0.016 ^a
	S3	0.466±0.007 ^e	0.697±0.007 ^d	0.313±0.008 ^c	0.419±0.007 ^c	0.401±0.006 ^b
	S4	0.491±0.007 ^c	0.716±0.015 ^c	0.214±0.006 ^f	0.416±0.006 ^c	0.298±0.005 ^d
	S5	0.487±0.024 ^d	0.666±0.026 ^e	0.299±0.026 ^d	0.490±0.021 ^a	0.330±0.027 ^c
	S6	0.451±0.024 ^f	0.733±0.026 ^a	0.285±0.025 ^d	0.396±0.023 ^d	0.290±0.028 ^d
	S7	0.531±0.050 ^b	0.737±0.056 ^a	0.243±0.046 ^e	0.352±0.048 ^f	0.251±0.047 ^g
	S8	0.368±0.039 ^g	0.727±0.050 ^b	0.411±0.046 ^a	0.417±0.039 ^e	0.249±0.044 ^g
	S9	0.460±0.039 ^e	0.722±0.027 ^b	0.326±0.033 ^b	0.442±0.032 ^b	0.287±0.043 ^e
	CK	0.222±0.036 ^h	0.656±0.033 ^g	0.124±0.028 ⁱ	0.210±0.033 ^g	0.237±0.034 ^h

表12 云南重楼根际土壤pH变化

Table 12 Changes of pH in rhizosphere soil

处理组	T1	T2	T3	T4	T5
S1	5.61±0.03 ^b	4.33±0.03 ^b	4.43±0.03 ^c	4.67±0.03 ^d	4.52±0.03 ^f
S2	5.53±0.03 ^c	4.06±0.03 ^d	4.50±0.03 ^c	5.01±0.03 ^a	4.66±0.03 ^e
S3	5.47±0.04 ^d	4.36±0.04 ^b	4.31±0.04 ^e	4.80±0.04 ^c	4.84±0.04 ^{cb}
S4	5.20±0.04 ^{ba}	4.02±0.04 ^d	4.70±0.04 ^a	4.79±0.04 ^c	4.68±0.04 ^{ba}
S5	5.55±0.04 ^c	4.32±0.04 ^b	4.60±0.04 ^b	4.82±0.04 ^b	4.90±0.04 ^b
S6	5.85±0.04 ^a	4.61±0.04 ^a	4.39±0.04 ^d	4.81±0.04 ^b	4.81±0.04 ^c
S7	5.36±0.04 ^e	4.66±0.03 ^a	4.32±0.04 ^e	4.62±0.04 ^c	4.70±0.04 ^d
S8	5.30±0.04 ^e	4.28±0.04 ^c	4.38±0.04 ^d	4.68±0.04 ^d	5.19±0.04 ^a
S9	5.27±0.04 ^f	4.02±0.04 ^d	4.50±0.04 ^c	4.84±0.04 ^b	4.99±0.04 ^a
CK	5.12±0.04 ^g	3.94±0.04 ^e	4.32±0.03 ^c	4.67±0.04 ^d	5.11±0.03 ^a

表13 不同AM真菌混合处理对云南重楼根际土壤微生物数量的影响 ($\bar{x} \pm s, n=10$)

Table 13 Effect of the different AM fungi treatments on the numbers of microorganisms in rhizospheric soils ($\bar{x} \pm s, n=10$)

处理组	取样时期	细菌($\times 10^3$) /个	真菌($\times 10^3$) /个	放线菌($\times 10^3$) /个	微生物总量 ($\times 10^5$)/个	细菌 /真菌	细菌 /放线菌	真菌 /放线菌
S1	T1	8 966.670±0.018 ^c	54.333±0.081 ^d	26.000±0.050 ^a	90.470	165.031	344.872	2.090
	T2	9 066.670±0.017 ^a	48.000±0.092 ^e	20.333±0.064 ^g	91.350	188.889	445.903	2.361
	T3	7 166.670±0.022 ^f	58.000±0.076 ^c	44.667±0.029 ^c	72.693	123.563	160.448	1.299
	T4	5 366.670±0.030 ^f	50.333±0.088 ^c	91.667±0.014 ^a	55.087	106.623	58.545	0.549
	T5	7 000.000±0.020 ^e	41.667±0.080 ^d	43.667±0.062 ^b	70.853	168.000	160.305	0.954
S2	T1	9 033.330±0.018 ^c	51.000±0.087 ^e	20.667±0.063 ^c	91.050	177.124	437.096	2.468
	T2	8 233.330±0.019 ^b	66.000±0.067 ^b	35.333±0.037 ^e	83.347	124.747	233.019	1.868

续表 13

处理组	取样时期	细菌($\times 10^3$) /个	真菌($\times 10^3$) /个	放线菌($\times 10^3$) /个	微生物总量 ($\times 10^5$)/个	细菌 /真菌	细菌 /放线菌	真菌 /放线菌
S3	T3	7 800.000 \pm 0.020 ^c	63.667 \pm 0.069 ^b	50.000 \pm 0.026 ^b	79.137	122.513	156.000	1.273
	T4	7 866.670 \pm 0.020 ^c	49.667 \pm 0.089 ^c	64.667 \pm 0.020 ^b	79.810	158.389	121.649	0.768
	T5	8 633.330 \pm 0.019 ^c	43.333 \pm 0.075 ^c	31.333 \pm 0.077 ^c	87.080	199.231	275.532	1.383
	T1	9 000.000 \pm 0.018 ^c	61.000 \pm 0.072 ^a	23.667 \pm 0.055 ^b	90.847	147.541	380.281	2.577
	T2	7 266.670 \pm 0.022 ^c	46.667 \pm 0.095 ^f	20.000 \pm 0.065 ^e	73.333	155.714	363.334	2.333
S4	T3	7 800.000 \pm 0.020 ^c	55.000 \pm 0.080 ^d	19.000 \pm 0.069 ^f	78.740	141.818	410.526	2.895
	T4	7 833.330 \pm 0.020 ^c	51.000 \pm 0.087 ^c	61.333 \pm 0.021 ^c	79.457	153.595	127.717	0.832
	T5	6 900.000 \pm 0.017 ^c	45.333 \pm 0.077 ^b	31.667 \pm 0.055 ^c	69.770	152.206	217.895	1.432
	T1	9 900.000 \pm 0.016 ^a	58.333 \pm 0.076 ^b	16.667 \pm 0.078 ^d	99.750	169.714	593.999	3.500
	T2	4 833.330 \pm 0.033 ^f	34.333 \pm 0.129 ^d	23.000 \pm 0.057 ^f	48.907	140.777	210.145	1.493
S5	T3	8 300.000 \pm 0.019 ^b	50.667 \pm 0.087 ^e	37.000 \pm 0.035 ^d	83.877	163.816	224.324	1.369
	T4	8 266.670 \pm 0.019 ^b	47.333 \pm 0.093 ^d	64.667 \pm 0.020 ^b	83.787	174.648	127.835	0.732
	T5	9 133.330 \pm 0.018 ^b	42.333 \pm 0.076 ^c	57.667 \pm 0.054 ^a	92.333	215.748	158.381	0.734
	T1	9 466.670 \pm 0.017 ^b	56.667 \pm 0.078 ^c	18.000 \pm 0.072 ^d	95.413	167.059	525.926	3.148
	T2	6 233.330 \pm 0.025 ^d	47.000 \pm 0.094 ^e	35.000 \pm 0.037 ^e	63.153	132.624	178.095	1.343
S6	T3	8 333.330 \pm 0.019 ^b	52.667 \pm 0.084 ^e	54.333 \pm 0.024 ^a	84.403	158.228	153.374	0.969
	T4	9 066.670 \pm 0.017 ^a	48.667 \pm 0.091 ^d	54.000 \pm 0.024 ^d	91.693	186.301	167.901	0.901
	T5	9 266.670 \pm 0.020 ^b	41.333 \pm 0.085 ^d	39.000 \pm 0.074 ^c	93.470	224.194	237.607	1.060
	T1	8 033.330 \pm 0.020 ^c	55.333 \pm 0.080 ^d	21.000 \pm 0.062 ^c	81.097	145.181	382.540	2.635
	T2	8 000.000 \pm 0.020 ^b	43.000 \pm 0.103 ^e	37.000 \pm 0.035 ^d	80.800	186.047	216.216	1.162
S7	T3	8 333.330 \pm 0.019 ^b	44.667 \pm 0.099 ^f	31.000 \pm 0.042 ^e	84.090	186.567	268.817	1.441
	T4	8 833.330 \pm 0.018 ^a	54.333 \pm 0.081 ^b	55.000 \pm 0.024 ^d	89.427	162.577	160.606	0.988
	T5	6 966.670 \pm 0.023 ^c	48.333 \pm 0.091 ^a	33.667 \pm 0.039 ^d	70.487	144.138	206.931	1.436
	T1	8 433.330 \pm 0.019 ^d	59.000 \pm 0.075 ^a	17.000 \pm 0.077 ^d	85.093	142.938	496.078	3.471
	T2	5 766.670 \pm 0.027 ^c	52.333 \pm 0.084 ^d	24.667 \pm 0.053 ^f	58.437	110.191	233.784	2.122
S8	T3	8 066.670 \pm 0.020 ^d	56.667 \pm 0.078 ^c	54.667 \pm 0.024 ^a	81.780	142.353	147.561	1.037
	T4	7 866.670 \pm 0.020 ^c	38.667 \pm 0.114 ^f	50.667 \pm 0.026 ^c	79.560	203.448	155.263	0.763
	T5	8 600.000 \pm 0.018 ^c	43.333 \pm 0.102 ^c	24.667 \pm 0.053 ^f	86.680	198.462	348.648	1.757
	T1	9 266.670 \pm 0.017 ^b	57.667 \pm 0.077 ^b	23.667 \pm 0.055 ^b	93.480	160.694	391.549	2.437
	T2	7 033.330 \pm 0.023 ^c	60.667 \pm 0.073 ^c	41.333 \pm 0.032 ^c	71.353	115.934	170.161	1.468
S9	T3	9 100.000 \pm 0.017 ^a	65.333 \pm 0.068 ^d	31.333 \pm 0.042 ^e	91.967	139.286	290.426	2.085
	T4	6 533.330 \pm 0.024 ^c	46.000 \pm 0.096 ^e	53.000 \pm 0.025 ^d	66.323	142.029	123.270	0.868
	T5	8 366.670 \pm 0.019 ^d	23.000 \pm 0.192 ^f	15.333 \pm 0.085 ^f	84.050	363.768	545.654	1.500
	T1	8 933.330 \pm 0.018 ^b	58.333 \pm 0.076 ^b	24.333 \pm 0.054 ^b	90.160	153.143	367.124	2.397
	T2	4 600.000 \pm 0.034 ^f	62.000 \pm 0.071 ^c	50.333 \pm 0.026 ^a	47.123	74.194	91.391	1.232
CK	T3	8 266.670 \pm 0.019 ^c	64.667 \pm 0.068 ^b	38.333 \pm 0.034 ^d	83.697	127.835	215.652	1.687
	T4	7 166.670 \pm 0.022 ^d	55.000 \pm 0.080 ^a	53.000 \pm 0.025 ^d	72.747	130.303	135.220	1.038
	T5	10 000.000 \pm 0.016 ^a	34.667 \pm 0.127 ^e	39.000 \pm 0.033 ^c	100.737	288.461	256.410	0.889
	T1	7 833.330 \pm 0.020 ^f	52.000 \pm 0.085 ^c	17.667 \pm 0.074 ^d	79.030	150.641	443.395	2.943
	T2	4 300.000 \pm 0.037 ^e	68.667 \pm 0.064 ^a	45.333 \pm 0.029 ^b	44.140	62.621	94.853	1.515
CK	T3	4 600.000 \pm 0.034 ^e	67.000 \pm 0.066 ^a	30.333 \pm 0.043 ^c	46.973	68.657	151.649	2.209
	T4	4 266.670 \pm 0.037 ^e	56.000 \pm 0.079 ^a	54.667 \pm 0.024 ^d	43.773	76.191	78.049	1.024
	T5	6 100.000 \pm 0.026 ^f	49.333 \pm 0.090 ^a	25.000 \pm 0.052 ^f	61.743	123.649	244.000	1.973

放线菌数量均显著多于CK组。其中T1时期S1处理, T2时期S9处理, T3时期S5, S7处理, T4时期S1处理, T5时期S4处理中根际土壤放线菌数量在同时期各处理中最高。

各时期各处理中微生物总量均明显大于CK组。除T1时期S3, S6, S7处理外, 其余时期各处理中细菌/真菌数量比均显著高于CK组, 且从T1到T5时期细菌/真菌数量比呈升高趋势。除T1时期S1~S3, S6, S8, S9处理, T2时期S9处理, T3时期S7处理, T4时期S1处理, T5时期S1~S6处理外, 各时期各处理中根际土壤细菌/放线菌数量比值均高于CK组。除T1时期S4, S5, S7处理, T2时期S1~S3处理, S7处理, T3时期S3处理, T4时期S9处理外, 其余各时期各处理云南重楼根际土壤中真菌/放线菌数量比值均低于CK组。

4 讨论

实验结果表明, 各处理的云南重楼植物体均能与AM真菌形成共生关系, 且侵染率高于CK组, 表明本研究中所运用的AM真菌组合均能与云南重楼良好结合。研究表明, 通过比较低磷土壤中球囊霉属(*Glomus*)AM真菌根外菌丝吸收的磷元素和植物根系吸收的磷元素发现植物根系吸收的磷元素只占宿主植物磷吸收的10%^[35], 本研究所接种的*Rhizophagus intraradices*, *Septoglomus deserticola*, *Claroideoglomus claroideum* 和 *Rhizophagus clarum* 均属于球囊霉科, 可促进植物体对磷元素的吸收, 这与本研究结果中各处理组云南重楼根际土壤中有效磷含量低于CK组相吻合。研究者运用同位素¹⁵N标记不同的生境AM真菌对氮的吸收量关系后发现, 在植物生长周期的后期, 约20%的氮素由菌根提供, 并且宿主植物中约74%的氮来自于菌根, 而在一些次生林中, 植物体内约有38%的氮由菌根提供, 同时宿主中约43%的氮来自于菌根而非植物自身吸收^[36], 本研究中各时期各处理云南重楼栽培土壤中氮元素普遍缺乏, 植物体的正常生长依赖于共生的AM真菌促进了氮元素的吸收。同时, 本研究中多数时期多数处理组云南重楼根际土壤中全钾含量高于CK组而速效钾含量低于CK组表明接种AM真菌促进了植物体对钾元素的吸收。

土壤球囊霉素是土壤中微生物碳源的重要组成部分之一^[37], 是一种由AM真菌根外菌丝体代谢形成的含有金属离子的耐热糖蛋白。因其在环境中存在的状态十分稳定而被认为是土壤碳库的重要组成部分。球囊霉素所特有的粘线袋结构具有固定

土壤中有毒重金属离子, 改善根际微环境, 提高土壤肥力的功能^[38-40]。同时, 土壤球囊霉素通过对土壤细颗粒的胶结作用以及对土壤保水性能的改良而间接促进土壤团聚体的形成和土壤肥力的提升, 又可为土壤有机碳提供物理保护^[41]。本研究中接种AM组合菌后的各处理组云南重楼根际土壤中总球囊霉素及易提取球囊霉素含量均高于同时期CK组, 表明接种AM真菌可以有效改善云南重楼根际土壤结构和肥力状态, 促进植物体的生长。

土壤酶类主要来自土壤微生物和植物根系的分泌物, 其活性可以反映人为因素而导致的土壤性质变化^[42], AM真菌的存在有助于土壤酶活性的提高从而改善土壤状况^[43]。土壤蛋白酶直接参与了土壤中有机氮水解为氨基酸的过程, 在本研究中S8处理中云南重楼根际土壤蛋白酶活性相对于CK组提高最为显著; 脲酶直接参与土壤中有机氮的中间转化, 本研究中S5处理中云南重楼根际土壤脲酶活性相对于CK组提高最为显著; 磷酸酶直接影响土壤中有机磷的分解、转化及有效性, 本研究中S2, S4, S5和S7处理中云南重楼根际土壤酸性磷酸酶活性相对于CK组提高最为显著, S5处理中云南重楼根际土壤中中性磷酸酶活性相对于CK组提高最为显著, S6处理中云南重楼根际土壤碱性磷酸酶活性相对于CK组提高最为显著; 过氧化氢酶有助于土壤中对植物体有害的过氧化物的分解, 本研究中S2, S3, S4, S5, S8和S9处理中云南重楼根际土壤过氧化氢酶活性相对于CK组提高最为显著; 而蔗糖酶的活性强度是土壤或化程度和肥力水平的重要指标, 本研究中S3处理中云南重楼根际土壤蔗糖酶活性相对于CK组提高最为显著。综合各项指标, 本研究中S2, S3, S4, S5, S7, S8和S9处理对提高云南重楼根际土壤酶活性效果较好, 其中S5 (*Gigaspora albida*, *Gigaspora margarita*, *Racocetra coralloidea*, *Racocetra fulgida*, *Rhizophagus intraradices*, *Septoglomus deserticola*) 对于提高云南重楼根际土壤酶活性效果最为显著。

土壤中微生物的数量和组成结构对土壤肥力及植物的生长有着重要的影响。本研究中云南重楼根际土壤在接种AM真菌后, 真菌、细菌、放线菌的数量相对于CK组呈显著增加趋势, 表明接种AM真菌可以显著提高土壤微生物总量。接种AM真菌后, 细菌、真菌和放线菌的数量总体上高于CK组, 并各组之间具有显著性差异, 可能与AM真菌转化营养元素物质的能力不同有关^[44]。与CK组相比,

接种AM真菌处理的云南重楼根际土壤细菌、放线菌的数量整体呈现出增加趋势,而真菌数量整体呈现下降趋势。表明添加AM促使土壤中微生物区系从低肥力的“真菌型”土壤向高肥力的“细菌型”土壤转化^[45],有助于促进云南重楼植株对土壤养分的转化与吸收。因此,接种AM真菌处理在一定程度上提高了人工栽培云南重楼土壤的肥力。

5 结论

接种AM真菌能使云南重楼根际土壤中微生物数量增加,微生物种群结构改善,土壤酶活性升高,从而有利于促进土壤养分的转化和云南重楼对土壤养分的吸收。本研究中接种S5处理(*Gigaspora albida*, *Gigaspora margarita*, *Racocetra coralloidea*, *Racocetra fulgida*, *Rhizophagus intraradices*, *Septoglomus deserticola*)的AM真菌组合剂对提高云南重楼根系活力及改善云南重楼根际土壤环境的作用最为显著。

[参考文献]

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2010:260.

[2] 王丽萍,起学伟. 云南重楼野生驯化及栽培技术研究初探[J]. 中国野生植物资源,2002,21(1):62-63.

[3] 袁理春,陈翠,杨丽英,等. 温度和赤霉素对滇重楼种子二次发育的影响[J]. 种子,2003,5:33-34.

[4] 陈翠,康平德,杨丽英,等. 云南重楼种苗繁育技术[J]. 中国现代中药,2010,12(2):23-24.

[5] 张朝阳,赵庭周. 重楼资源再生策略及其关键技术环节探讨[J]. 中草药,2009,40(2):319-323.

[6] 黄璐琦,肖培根,王永炎. 中国珍稀濒危药用植物调查[M]. 上海:上海科学技术出版社,2011.

[7] 陈翠,袁理春,杨丽英,等. 不同海拔、土壤类型及肥力对云南重楼产量和质量的影响研究[J]. 西南农业学报,2009,22(5):1388-1391.

[8] 苏泽春,王泽清,李兆光,等. 不同环境因子种植云南重楼的差异性研究[J]. 西南农业学报,2016,29(6):1448-1452.

[9] 董文. 云南香格里拉重楼的人工栽培与管理要点[J]. 农业工程技术,2018(5):62.

[10] 伍建光. 云南文山重楼人工种植技术要点[J]. 农业工程技术,2019(11):87.

[11] SCHÜBLER A, SCHWARZOTT D, WALKER C. A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution[J]. Mycol Res,2001,105:1413-1421.

[12] 郭欢,曾广萍,刘红玲,等. 丛枝菌根真菌对红花根围微生物多样性特征的影响[J]. 微生物学通报,2013,

40(7):1214-1224.

[13] 李元敬,刘志蕾,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.

[14] LI X L, MARSCHNER H, GEORGE E. Acquisition of phosphorus and copper by VA-mycorrhizal hyphae and root-to-shoot transport in white clover[J]. Plant Soil, 1991,136(1):49-57.

[15] SOLAIMAN M Z, ABBOTT L K. Phosphorus uptake by a community of arbuscular mycorrhizal fungi in jarrah forest[J]. Plant Soil,2003,248(1/2):313-320.

[16] TANAKA Y, YANO K. Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied plant[J]. Cell Environ,2005,28(10):1247-1254.

[17] BAGO B, VIERHEILIG H, PICH Y, et al. Nitrate depletion and pH changes induced by the extraradical mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* grown in monoxenic culture[J]. New Phytol,1996,133(2):273-280.

[18] 王岩,邢丹,宋拉拉,等. AM真菌对石漠化地区桑树的促生及养分调控作用[J]. 热带作物学报,2020,41(1):7-14.

[19] 郑舜怡,郭世荣,张钰,等. 丛枝菌根真菌对辣椒光合特性及根际微生物多样性和酶活性的影响[J]. 西北植物学报,2014,34(4):800-809.

[20] LIU Z L, LI Y J, HOU H, et al. Differences in the arbuscular mycorrhizal fungi-improved rice resistance to low temperature at two N levels: aspects of N and C metabolism on the plant side[J]. Plant Physiol Bioch, 2013,71:87-95.

[21] LI Y J, LIU Z L, HOU H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-enhanced resistance against *Phytophthora sojae* infection on soybean leaves is mediated by a network involving hydrogen peroxide, jasmonic acid and the metabolism of carbon and nitrogen[J]. Acta Physiol Plant,2013,35:3465-3475.

[22] LI T, HU Y J, ZHANG Z P, et al. First cloning and characterization of two functional aquaporin genes from a arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*[J]. New Phytol,2013,197:617-630.

[23] 赵昕,阎秀峰. 丛枝菌根真菌对植物次生代谢的影响[J]. 植物生态学报,2006,30(3):514-521.

[24] 赵昕,王博文,阎秀峰. 丛枝菌根对喜树幼苗喜树碱含量的影响[J]. 生态学报,2006,26(4):1057-1062.

[25] 黄京华,谭钜发,揭红科,等. 丛枝菌根真菌对黄花蒿生长及药效成分的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(6):1443-1449.

[26] 郭巧生,程俐陶,刘作易. 丛枝菌根真菌对半夏产量

- 及化学成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2010, 35(3): 333-338.
- [27] PHILIPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing and attaining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. Trans Br Mycol Soc, 1970, 55 (1) : 158-161.
- [28] TROUVELOT A, KOUGH J L, GIANINAZZI-PEARSON V. Mesure du Taux De Mycorrhization VA D'un Système Radiculaire. Recherche De Méthods d'estimation Ayant Une Signification Fonctionnelle[M]. Pairs:INRA Publications, 1986:217-224.
- [29] 萧浪涛,王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:65.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:14-24.
- [31] GERDEMANN J W. Relation of a large soil-borne spore to phytomycetous mycorrhizal infections [J]. Mgcologia, 1955, 47: 619-632.
- [32] WRIGHT S F, UPADHYAYA A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant Soil, 1998, 198(1): 97-107.
- [33] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986:260-339.
- [34] 易海艳,马刘峰,李宁,等. 新疆叶尔羌河流域棉田土壤养分分析与评价[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 393-396.
- [35] LI X L, GEORGE E, MARSCHER H. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil [J]. Plant Soil, 1991, 136 (1): 41-48.
- [36] WRIGHT S, ABHA U. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Soil Sci, 1996, 161(9): 575-586.
- [37] TRESEDER K K, TURNER K M. Glomalin in ecosystems [J]. Soil Sci Soc Am J, 2007, 71: 1257-1266
- [38] VODNIK D, GRICMAN H, MACEK I, et al. The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil [J]. Sci Total Environ, 2007, 392(1): 130-136.
- [39] BENDINI S, PELLEGRINO E, AVIO L, et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* [J]. Soil Biol Biochem, 2009, 41 (7): 1491-1496.
- [40] 权常欣,马玲玲,林钊凯,等. 广东省森林球囊霉素相关土壤蛋白含量及影响因素[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 240-249.
- [41] HODGE A, FITTER A H. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling [J]. PNAS, 2010, 107(31): 1354-1359.
- [42] 曹慧,孙辉,杨浩,等. 土壤酶活性及其对土壤质量的只是研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9 (1): 105-109.
- [43] 赵萌,李敏,王淼焱,等. 西瓜连作对土壤主要为生物类群和土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报, 2008, 35(8): 1251-1254.
- [44] VERESOGLOU S D, CHEN B, RILLIG M C. Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling [J]. Soil Biol Biochem, 2012, 46: 3-62.
- [45] YE W, LI Y C, YU W W, et al. Microbial biodiversity in rhizospheric soil of *Torreya grandis* 'Merrillii' relative to cultivation history [J]. Chin J Appl Ecol, 2018, 29(11): 3783-3792.

[责任编辑 顾雪竹]