

不同丛枝菌根真菌组合与接种时期对滇重楼幼苗根际土壤理化性质与微生物数量的影响

谷文超^{1,2}, 张杰², 周浓^{1,2}, 潘兴娇¹, 丁博², 祁俊生², 杨敏^{1*}

(1. 大理大学 药学与化学学院, 云南大理 671000;

2. 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)

[摘要] 目的:研究不同组合丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌在不同接种时期对滇重楼幼苗根际土壤理化性质与微生物数量的影响,为培育高品质的滇重楼奠定基础。方法:采用室温盆栽接种试验及土壤农化分析方法,对不同AM真菌组合及不同接种时期侵染的滇重楼幼苗根际土壤中的孢子密度、侵染率、根围微生物数量、土壤养分及土壤酶活性等进行分析。结果:不同AM真菌处理组在不同接种时期的侵染率均在80%以上,孢子密度在部分时期高于同时期的对照组(CK),AM真菌与滇重楼幼苗根系共生关系良好。土壤中氮含量降低,速效磷、速效钾含量及土壤pH提高,1年生滇重楼实生苗与野生种源滇重楼幼苗土壤养分较高。土壤微生物数量整体表现出细菌>放线菌>真菌,S3,S5和S8的AM真菌组合的2年生实生苗微生物群落对土壤结构较好,生物量碳的含量较高。土壤中磷酸酶和蛋白酶活性增长率较高,过氧化氢酶活性增长率最低,S2~S6处理组的野生种源滇重楼幼苗和1年生滇重楼实生苗土壤酶活性最佳。结论:不同AM真菌处理组及不同接种时期对滇重楼幼苗根际土壤理化性质与微生物数量存在一定的影响,为人工栽培滇重楼提供了技术基础。

[关键词] 滇重楼; 丛枝菌根真菌; 土壤理化性质; 土壤养分; 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)22-0116-15

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20202072

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20200827.1050.003.html>

[网络出版日期] 2020-8-27 12:23

Effect of Different Arbuscular Mycorrhizal Fungi Combinations and Inoculation Periods on Rhizosphere Soil Physicochemical Properties and Microbial Quantity of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* Seedlings

GU Wen-chao^{1,2}, ZHANG Jie², ZHOU Nong^{1,2}, PAN Xing-jiao¹, DING Bo², QI Jun-sheng², YANG Min^{1*}

(1. College of Pharmacy and Chemistry, Dali University, Dali 671000, China;

2. 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)

[Abstract] **Objective:** To study the effects of different arbuscular mycorrhizal (AM) fungi combinations on rhizosphere soil physicochemical properties and microbial quantity in the seedlings of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* at different inoculation periods, so as to lay a foundation for cultivating high-quality *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. **Method:** The spore density, infection rate, nutrient and enzyme activity in the

[收稿日期] 20200210(009)

[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] 谷文超,在读硕士,从事药用植物栽培与质量控制研究,E-mail:1776114687@qq.com

[通信作者] * 杨敏,副教授,从事中药材质量标准化研究,Tel:0872-2219936,E-mail:yang_min_0302@163.com

soil around the roots of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings under different AM fungi combinations and different inoculation periods were analyzed by the greenhouse pot inoculation trials and soil agrochemical analysis methods. **Result:** The infection rate of different AM fungi treatment groups was more than 80% in different inoculation periods, and the spore density was higher than control (CK) group in some periods. It reflected that the relationship between AM fungi and roots of *Paris polyphylla* seedlings was favorable. The content of nitrogen in the soil decreased, but the content of available P, available K and soil pH increased. The soil nutrients in the cultivar one-year seedlings and wild seedlings were higher. The total number of soil microorganisms showed that bacteria>actinomycetes>fungi. The cultivar two-year seedlings with AM fungi combinations of S3, S5 and S8 had better soil structure and higher biomass carbon content. The growth rates of phosphatase and protease activity were higher in the soil, but catalase activity was lowest. In the treatment groups S2, S3, S4, S5 and S6, the soil enzyme activities of the wild seedlings and one-year-old seedlings were best. **Conclusion:** Different AM fungal treatment groups and different inoculation periods had certain effects on rhizosphere soil physicochemical properties and microbial quantity in the seedlings 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; soil physicochemical properties; soil nutrients; soil microorganism; soil enzyme activity

滇重楼为百合科多年生药用植物,主要分布于我国西南地区,以干燥根茎入药,具有清热解毒,消肿止痛,凉肝定惊等功效^[1]。近年来以滇重楼为原料的药品、化妆品及保健品不断增多^[2],使得其野生品采挖严重,资源濒临灭绝,已不能满足市场需求,培育高品质的栽培品成为了解决这一问题的关键。

丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌是陆地上分布最广泛的一类菌根类型,能与植物根系形成互惠共生体^[3]。研究表明,AM真菌与植物根系形成共生体后,能够增加宿主对土壤养分的吸收^[4],提高宿主的耐盐性^[5]和抗病性^[6],并改善宿主体内的水分代谢^[7],促进宿主植株生长,进而提高宿主的有效成分含量^[8],因此AM真菌也被称为植物的“生物肥料”。根际土壤是植物生长的直接基质,根际土壤中的各类营养成分,包括矿质元素、内源性物质、土壤酶、土壤微生物及其分泌的次生代谢产物,为植物的生长发育提供了基础。但是土壤受地理位置,种植年限的影响,肥力千差万别^[9]。因此采用接种AM真菌来丰富和改善土壤环境已成为一种趋势。赵秀山等^[10]研究表明,AM真菌能够有效改善连作土壤的生物环境问题、降低作物产生的毒性物质、改变土壤微生物结构等问题。杜俊卿^[11]通过接种AM真菌对绿化植物根际微环境影响的研究发现,接种AM真菌的绿化植株根际土壤微生物数量、土壤酶活性、土壤养分含量及生物量都显著增加,土壤肥力显著提高。

滇重楼生长于凉爽阴湿、水分适宜的环境,生

长周期为8~10年^[12],其种植条件对土壤环境要求较高。课题组前期研究表明,接种AM真菌可有效改善滇重楼根际土壤环境,增加营养元素吸收,提高重楼皂苷含量^[13-15]。但是AM真菌种类众多,不同的AM真菌在不同接种时期的活性也不尽相同^[15-16]。目前针对不同接种时期接种和不同AM真菌组合对滇重楼根际土壤理化性质及微生物数量影响的研究未见报道。本研究采用常规方法对不同接种时期滇重楼幼苗根际土壤化学性质、土壤微生物数量、土壤酶活性及其之间的相关性进行研究,探讨不同AM真菌组合和不同接种时期根际土壤的变化规律,为菌根化滇重楼种植产业提供一定的技术基础。

1 材料

曲利苯蓝,柠檬酸,氢氧化钾,氢氧化钠,苯酚,次氯酸钠,硫酸铵,磷酸氢二钠,磷酸二氢钾,重碳酸,硼酸,硫酸铝,蔗糖,二氧化硅,3,5-二硝基水杨酸,酒石酸钾钠,葡萄糖,30%过氧化氢,铝钾矾,高锰酸钾,甲基红,溴钾酚绿,硫酸亚铁,阿拉伯胶,碳酸钾,甘油,甘氨酸,碳酸氢钠,钼酸铵,酒石酸锶钾,抗坏血酸,重铬酸钾,邻菲罗啉,乙酸铵,浓硫酸,浓盐酸,氨水,甲苯,三氯甲烷,丙酮(均为分析纯)。

ML204型1/1万分析天平(梅特勒-托利多仪器上海有限公司);SZX2-FOF型体视显微镜,BX-53F型荧光生物照相显微镜(日本奥林巴斯集团);TDZ5-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);UV-2450型紫外-可见分光光度计(日本岛津公司);JB-CJ-1500FX型超净工作台(苏州佳宝净化工程设备有限公司);YXQ-LS-50SLL型高压灭菌锅(中国常仪仪器设备有限公司)。

2 方法

2.1 丛枝菌根真菌 通过美国国际丛枝菌根真菌种质资源保藏中心(INVAM)购得相应的AM真菌纯净菌剂,相应AM真菌纯净菌剂由重庆三峡学院微生物实验室进行扩增繁殖、储存保管^[18],菌剂扩繁的基质使用山基土和河沙按3:1体积比混合制成。利用文献^[19]方法构建不同组合菌种的试验方案。

2.2 样品种源 2012年10月,滇重楼2年生育苗的鲜种采自云南省大理州农业科学院种植基地;2013年10月,滇重楼1年生实生苗和育苗栽培种源的鲜种采自贵州省种植基地,滇重楼育苗野生种源的鲜种采自贵州省野生环境,常温下河沙贮存4个月,并经三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工

程实验室(重庆三峡学院)周浓教授鉴定为百合科植物滇重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* 的成熟种子,种子采用单株保存、保证种质资源的稳定性和均一性^[15]。

2.3 样品栽培 滇重楼种子的前处理,采用河沙打磨去外果皮,洗净后用10%次氯酸钠溶液浸泡15 min,再用蒸馏水洗净备用。滇重楼2年生,1年生实生苗分别于2013年1月和2014年1月播种育苗,栽培种源及野生种源新鲜种子均于2014年1月播种育苗。均采用室内常温的栽培方法,栽培基质为重庆三峡学院百安校区菜园土与河沙混合物(体积比3:1,121 °C高压灭菌锅内灭菌2 h,过2 mm筛)。每种方法均设置9个处理组(S1~S9,AM真菌组)和1个对照组(S10,CK组)共10组,每个处理组做10个重复,见表1。每组菌剂层施于种子处,每盆接种含180个孢子的混合菌剂(均分),与紫云英混合培养,紫云英种子的前处理同滇重楼种子,滇重楼种子出土后移除生长出的紫云英植株,每盆间苗20株。在幼苗期间定期浇Hoagland营养液。

表1 不同处理组及其接种AM真菌

Table1 Different treatment groups and inoculated AM fungi

处理组	AM真菌
S1	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>G. albida</i> , <i>G. margarita</i> , <i>G. gigantea</i>
S2	<i>Scutellospora calospora</i> , <i>S. pellucida</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>R. fulgida</i>
S3	<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Septoglomus deserticola</i> , <i>Claroideoglomus claroideum</i> , <i>Rhizophagus clarum</i>
S4	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>G. albida</i> , <i>Scutellospora pellucida</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>Claroideoglomus claroideum</i> , <i>Rhizophagus clarum</i>
S5	<i>Gigaspora albida</i> , <i>G. margarita</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>Racocetra fulgida</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Septoglomus deserticola</i>
S6	<i>Gigaspora margarita</i> , <i>G. gigantea</i> , <i>Scutellospora calospora</i> , <i>S. pellucida</i> , <i>Septoglomus deserticola</i> , <i>Claroideoglomus claroideum</i>
S7	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>G. margarita</i> , <i>Scutellospora pellucida</i> , <i>Racocetra fulgida</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>R. clarum</i>
S8	<i>Gigaspora albida</i> , <i>G. gigantea</i> , <i>Scutellospora calospora</i> , <i>Racocetra fulgida</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Claroideoglomus claroideum</i>
S9	<i>Gigaspora rosea</i> , <i>G. gigantea</i> , <i>Scutellospora calospora</i> , <i>Racocetra coralloidea</i> , <i>Septoglomus deserticola</i> , <i>Rhizophagus clarum</i>
S10	CK

2.4 样品采集 于2015年6月,收获栽培种源滇重楼育苗(T1,即2014年1月播种的栽培种源实生苗)和一年生滇重楼实生苗(T5,即2014年1月播种的一年生实生苗)待测滇重楼样品;于2015年7月,收获一年生滇重楼实生苗(T6,即2014年1月播种的一年生实生苗)待测滇重楼样品;于2015年8月,收获栽培种源滇重楼育苗(T2,即2014年1月播种的栽培种源实生苗),野生种源滇重楼育苗(T4,即2014年1月播种的野生种源实生苗),一年生滇重楼实生苗(T7,即2014年1月播种的一年生实生苗)和二年生滇重楼实生苗(T8,即2013年1月播种的二

年生实生苗)待测滇重楼样品;于2016年8月,收获种子栽培种源滇重楼育苗(T3,即2014年1月播种的栽培种源实生苗)待测滇重楼样品。

2.5 指标测定方法

2.5.1 孢子密度的测定 孢子密度参照GERDEMANN等^[17]的方法,采用湿筛倾注蔗糖离心法测定孢子数量,以每10 g土样所含孢子的数量表示孢子密度。

2.5.2 AM真菌的侵染率 随机选取浸泡于FAA固定液中滇重楼根系30条,采用左龙亚等^[18]的方法染色、制片、镜检,根据TROUVELOT等^[19]的方法统计

菌根侵染率。

2.5.3 土壤养分的测定 土壤养分的测定主要参照鲍士旦^[20],鲁如坤^[21]的方法进行,土壤中全氮含量采用凯氏蒸馏法测定,全磷含量采用硫酸-高氯酸消煮法测定,全钾含量采用氢氟酸-高氯酸消煮法测定,速效氮含量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用乙酸铵-原子吸收法测定,铵态氮含量采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定,硝态氮含量采用酚二磺酸比色法测定,pH采用常规方法测定。

2.5.4 土壤微生物数量的测定 土壤中微生物数量的测定参照林先贵^[22]的方法进行,采用稀释平板计数法测定细菌,真菌,放线菌的数量。

2.5.5 土壤微生物生物量碳的测定 土壤微生物生物量碳参照 VANCE 等^[23]的方法,采用氯仿熏蒸浸提法对土壤微生物生物量碳进行测定。

2.5.6 土壤酶活性的测定 土壤酶活性的测定主要参照关松荫^[24]的方法进行,土壤蛋白酶活性采用改良茚三酮比色法测定,脲酶活性采用靛酚比色法测定,磷酸酶活性采用对硝基苯磷酸二钠法测定,过氧化氢酶活性采用紫外分光光度法测定,蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定。

2.5.7 数据分析 采用 Microsoft Excel 2003 软件和 SPSS 20.0 软件进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 接种时期对滇重楼幼苗根际土中孢子密度的影响 由表2可知,与CK组比较,9个AM真菌处理组滇重楼根际土壤中的孢子密度均显著增加,各个处理组的孢子密度差异较大($P < 0.05$),其中处理组S2的孢子密度增加更为显著,表明S2真菌组合对滇重楼根际土壤孢子密度增加具有明显促进作用。各个时期比较发现,栽培种源滇重楼幼苗根际土壤T1,T2及T3时期孢子数量逐渐增多;栽培种源滇重楼幼苗(T2)根际土壤孢子数量较野生种源滇重楼幼苗(T4)根际土壤孢子数量少;不同种源幼苗根际土壤的孢子数量呈现出栽培种源滇重楼幼苗(T2) < 一年生滇重楼实生苗(T7) < 二年生滇重楼实生苗(T8)。表明接种时间的增长有助于AM真菌的增长,AM真菌与野生种源滇重楼共生关系较好。综合来看,各接种时期处理组的反应良好,孢子数量较对照组增多,说明AM真菌的成熟度较高,有助于AM真菌对滇重楼幼苗的侵染。

3.2 接种时期对滇重楼幼苗根系侵染率的影响

由表3可知,CK组未被侵染,AM真菌处理组的滇

表2 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤孢子密度的变化($n=6$)

Table 2 Change of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings rhizosphere soil spore density of inoculation period($n=6$) 个/10 g 土

处理组	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
S1	14 ^g	25 ^d	48 ^b	18 ^h	6 ⁱ	36 ^d	34 ^c	73 ^a
S2	51 ^a	23 ^f	49 ^b	85 ^a	78 ^b	45 ^b	24 ^g	22 ^f
S3	19 ^e	26 ^c	30 ^d	23 ^g	10 ^h	77 ^a	17 ^h	20 ^g
S4	31 ^c	24 ^e	23 ^e	43 ^b	12 ^g	22 ^f	30 ^e	8 ⁱ
S5	18 ^f	69 ^a	29 ^d	37 ^d	16 ^f	24 ^e	59 ^a	19 ^h
S6	19 ^e	23 ^{ef}	58 ^a	38 ^c	40 ^c	12 ^h	47 ^b	48 ^c
S7	48 ^b	16 ^g	47 ^c	28 ^f	80 ^a	18 ^g	27 ^f	36 ^e
S8	8 ^h	24 ^c	9 ^g	28 ^f	37 ^d	22 ^f	29 ^e	54 ^b
S9	23 ^d	29 ^b	12 ^f	29 ^e	21 ^e	41 ^c	33 ^d	42 ^d
CK	0 ⁱ	0 ^h	0 ^h	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ

注:不同小写字母表示具有显著性差异($P < 0.05$),下同。

重楼根系各个时期均在一定程度上被侵染。S1处理组的T2,T3时期,S3处理组的T3时期,S4处理组的T4时期,S5处理组T3时期以及S6处理组的T3时期存在显著性差异($P < 0.05$),其他处理组及不同时期之间无显著性差异。所有处理组的各个时期侵染率均在80.00%以上,与周浓等^[25]研究结果一致。说明接种的外源AM真菌发育良好,均能与滇重楼根系形成菌根共生体。

表3 不同接种时期对滇重楼幼苗根系菌根侵染率的变化($n=6$)

Table 3 Changes of mycorrhizal infection rate of the root in the seedling of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* during the injection period ($n=6$) %

处理组	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
S1	100.00 ^a	91.67 ^b	90.00 ^b	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S2	100.00 ^a	100.00 ^a	94.28 ^{ab}	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S3	100.00 ^a	100.00 ^a	93.75 ^{ab}	90.00 ^b	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S4	100.00 ^a	100.00 ^a	91.29 ^{ab}	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S5	100.00 ^a	100.00 ^a	80.00 ^c	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S6	100.00 ^a	100.00 ^a	87.50 ^b	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S7	100.00 ^a	100.00 ^a	93.33 ^{ab}	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S8	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
S9	100.00 ^a	100.00 ^a	89.47 ^{ab}	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a
CK	0 ^b	0 ^c	0 ^d	0 ^e	0 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b

3.3 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤养分的影响

由表4可以看出,土壤pH在3.91~6.23,显示酸性和弱酸性,绝大部分达到了滇重楼最适生长pH(4.5~6.3)^[26]。与CK组相比,9个AM真菌组的土壤pH在同一时期略微上升,表明接种外源AM真菌有助于

土壤到达滇重楼适宜生长的pH。土壤元素含量方面,9个AM真菌处理组滇重楼根际土壤中全钾>全磷>全氮,速效钾>速效氮>速效磷。与CK组相比,AM真菌处理组的速效磷和速效钾含量提高显著,表明接种AM真菌增加了滇重楼根际土壤的钾、磷养分。栽培种源滇重楼幼苗(T1,T2,T3)土壤全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、铵态氮、硝态氮含量随接种时期延长逐渐降低。同一收获时期,

栽培种源滇重楼幼苗(T2)土壤全氮含量高于野生种源滇重楼幼苗(T4)土壤全氮含量,而速效氮、全磷、速效磷、全钾、铵态氮、硝态氮含量低于野生种源滇重楼幼苗(T4)土壤其含量。整体来看,接种AM真菌提高了滇重楼根际土壤肥力,其中菌根化栽培种源滇重楼幼苗T7时期及菌根化野生种源滇重楼幼苗T4时期土壤养分含量总体较高,表明接种AM真菌更利于早期接种和野生种源滇重楼生长。

表4 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤养分含量的变化(n=6)

Table 4 Change of soil nutrient content of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings rhizosphere inoculation period (n=6)

处理组	取样时期	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 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /g·kg ⁻¹	硝态氮 /g·kg ⁻¹	pH
S1	T1	0.163 ^a	161.000 ^{bc}	0.228 ^a	20.400 ^f	25.074 ^e	677.500 ^e	18.236 ^b	6.753 ^f	5.05 ^a
	T2	0.141 ^e	104.937 ^d	0.213 ^c	21.400 ^d	25.782 ^d	314.374 ^{cde}	4.064 ^a	5.622 ^f	4.59 ^{ab}
	T3	0.108 ^e	82.346 ^{fg}	0.176 ^{ef}	16.800 ^d	13.048 ^{bc}	110.689 ^a	3.643 ^b	3.128 ^g	5.42 ^{abc}
	T4	0.141 ^e	110.816 ^f	0.239 ^c	24.000 ^h	26.361 ^d	293.801 ^{bc}	6.650 ^f	6.721 ^g	4.22 ^{ab}
	T5	0.153 ^{de}	174.913 ^{cd}	0.226 ^c	38.100 ^b	32.928 ^{cde}	857.518 ^d	2.748 ^g	5.528 ^h	4.64 ^a
	T6	0.176 ^a	146.723 ^{bc}	0.205 ^d	35.200 ^a	23.049 ^d	850.017 ^a	5.892 ^c	4.617 ^h	4.84 ^a
	T7	0.105 ^d	150.463 ^a	0.181 ^e	31.700 ^a	22.478 ^f	312.414 ^{ab}	9.860 ^a	3.612 ^f	5.60 ^a
	T8	0.081 ^f	118.941 ^c	0.119 ⁱ	9.900 ^c	31.076 ^{bc}	421.326 ^b	1.547 ^g	4.868 ^g	5.81 ^a
S2	T1	0.151 ^a	150.448 ^{cd}	0.237 ^a	17.600 ^j	29.720 ^d	664.934 ^e	16.347 ^{bcd}	6.030 ^g	5.29 ^a
	T2	0.165 ^c	100.313 ^d	0.195 ^d	19.300 ^e	27.953 ^{cd}	313.063 ^{cde}	4.163 ^a	5.653 ^{ef}	4.51 ^{ab}
	T3	0.134 ^c	76.188 ^g	0.189 ^d	15.200 ^e	18.234 ^a	69.405 ^c	3.267 ^d	2.916 ^h	5.68 ^{abc}
	T4	0.135 ^e	154.023 ^{bc}	0.251 ^d	28.900 ^c	38.079 ^b	294.375 ^{bc}	4.310 ⁱ	6.847 ^e	4.64 ^a
	T5	0.144 ^e	167.267 ^d	0.207 ^e	31.700 ^c	25.136 ^f	984.977 ^b	1.758 ⁱ	5.591 ^h	4.54 ^a
	T6	0.176 ^a	145.092 ^{bc}	0.216 ^c	31.900 ^b	32.010 ^{bc}	744.927 ^c	0.995 ⁱ	4.114 ^j	4.72 ^a
	T7	0.125 ^{bc}	132.993 ^{bc}	0.193 ^b	29.600 ^c	27.339 ^{cde}	299.442 ^{bc}	1.774 ^g	3.046 ^g	5.72 ^a
	T8	0.088 ^e	126.013 ^{bc}	0.234 ^d	9.800 ^d	30.641 ^{bc}	368.722 ^c	2.066 ^f	7.977 ^c	5.86 ^a
S3	T1	0.160 ^a	153.985 ^{cd}	0.219 ^a	23.100 ^b	31.484 ^{cd}	624.844 ^f	16.026 ^{bcd}	5.653 ⁱ	5.05 ^a
	T2	0.165 ^c	109.647 ^{cd}	0.255 ^a	21.800 ^c	30.227 ^{bcd}	311.891 ^{cde}	3.480 ^a	3.989 ^h	4.96 ^a
	T3	0.116 ^e	106.237 ^{cd}	0.226 ^a	20.100 ^b	17.634 ^{ab}	82.417 ^{bc}	2.534 ^f	1.852 ^j	5.12 ^c
	T4	0.169 ^b	161.670 ^b	0.260 ^c	27.800 ^c	38.441 ^b	296.212 ^{bc}	5.455 ^h	8.166 ^b	4.14 ^{ab}
	T5	0.190 ^a	188.962 ^{bc}	0.265 ^a	40.900 ^a	30.453 ^{de}	725.036 ^f	4.213 ^c	5.779 ^g	4.56 ^a
	T6	0.180 ^a	157.832 ^b	0.217 ^c	31.500 ^b	40.134 ^a	722.319 ^d	0.872 ^j	6.030 ^g	4.77 ^a
	T7	0.122 ^{bc}	126.025 ^{bc}	0.203 ^c	29.500 ^c	25.203 ^{ef}	333.125 ^a	1.677 ^h	4.899 ^e	5.69 ^a
	T8	0.138 ^c	146.956 ^a	0.266 ^b	9.600 ^e	38.193 ^a	273.146 ^c	3.075 ^c	2.732 ^h	5.08 ^a
S4	T1	0.180 ^a	156.306 ^{cd}	0.204 ^a	19.300 ^c	28.932 ^{de}	680.002 ^c	14.227 ^{cd}	7.318 ^c	5.41 ^a
	T2	0.184 ^a	130.664 ^b	0.253 ^a	5.900 ^j	30.183 ^{bcd}	304.306 ^{de}	4.993 ^a	5.716 ^e	4.53 ^{ab}
	T3	0.157 ^a	121.359 ^b	0.214 ^b	6.200 ^j	19.197 ^a	76.531 ^{bc}	3.184 ^d	3.205 ^f	5.69 ^{abc}
	T4	0.175 ^{ab}	130.222 ^c	0.224 ^{fg}	24.800 ^g	31.019 ^c	323.719 ^a	9.014 ^d	5.496 ⁱ	4.77 ^a
	T5	0.151 ^{de}	194.911 ^{ab}	0.211 ^{de}	29.700 ^d	29.051 ^e	852.669 ^d	6.307 ^c	8.040 ^d	4.54 ^a
	T6	0.135 ^d	148.645 ^{bc}	0.178 ^f	30.000 ^c	40.481 ^a	687.306 ^c	1.458 ^h	8.919 ^d	4.97 ^a
	T7	0.122 ^{bc}	132.983 ^{bc}	0.233 ^b	30.700 ^b	31.704 ^{bc}	319.36 ^{ab}	0.946 ⁱ	5.056 ^d	5.63 ^a
	T8	0.198 ^a	147.000 ^a	0.279 ^a	9.000 ^g	31.793 ^{bc}	314.383 ^d	2.246 ^c	5.119 ^e	6.03 ^a

续表 4

处理组	取样时期	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 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /g·kg ⁻¹	硝态氮 /g·kg ⁻¹	pH
S5	T1	0.175 ^a	170.284 ^b	0.253 ^a	22.100 ^d	35.078 ^{bc}	759.812 ^c	16.718 ^{bc}	7.852 ^b	5.33 ^a
	T2	0.151 ^d	137.616 ^b	0.210 ^c	27.500 ^b	33.900 ^b	403.144 ^a	4.065 ^a	6.187 ^c	4.84 ^{ab}
	T3	0.112 ^e	110.274 ^{bcd}	0.171 ^f	19.400 ^c	15.727 ^{abc}	49.366 ^d	2.965 ^c	4.783 ^c	5.78 ^{ab}
	T4	0.107 ^g	115.460 ^f	0.222 ^{fg}	28.500 ^d	26.133 ^d	289.978 ^{bc}	1.141 ^j	4.523 ^j	4.43 ^{ab}
	T5	0.147 ^{de}	188.975 ^{bc}	0.220 ^{cd}	31.500 ^c	32.347 ^{cde}	937.324 ^c	3.286 ^f	7.161 ^f	4.48 ^a
	T6	0.151 ^c	134.132 ^{cd}	0.192 ^e	23.100 ^f	29.378 ^c	630.089 ^f	4.675 ^f	6.438 ^f	4.84 ^a
	T7	0.125 ^{bc}	125.962 ^{bc}	0.195 ^d	25.100 ^e	26.172 ^{def}	330.444 ^a	2.750 ^e	6.093 ^c	5.74 ^a
	T8	0.110 ^d	125.974 ^{bc}	0.204 ^f	6.900 ⁱ	27.940 ^c	422.475 ^b	3.497 ^b	4.962 ^f	5.91 ^a
S6	T1	0.162 ^a	157.485 ^c	0.232 ^a	27.200 ^a	37.360 ^{ab}	807.333 ^b	14.445 ^{cd}	5.779 ^h	5.18 ^a
	T2	0.160 ^c	111.988 ^{cd}	0.175 ^c	27.600 ^a	42.237 ^a	376.933 ^b	4.989 ^a	3.643 ⁱ	4.75 ^{ab}
	T3	0.123 ^d	90.129 ^{ef}	0.157 ^g	21.000 ^a	5.538 ^d	100.064 ^{ab}	3.209 ^d	1.984 ⁱ	5.82 ^a
	T4	0.152 ^d	157.453 ^{bc}	0.228 ^f	29.600 ^b	32.040 ^c	323.173 ^a	7.754 ^e	6.219 ^h	4.30 ^{ab}
	T5	0.129 ^f	174.995 ^{cd}	0.263 ^a	24.400 ^f	37.962 ^{ab}	840.019 ^{de}	2.652 ^h	7.286 ^e	4.60 ^a
	T6	0.136 ^d	126.679 ^d	0.144 ^g	23.800 ^e	32.683 ^{bc}	810.241 ^b	29.511 ^a	6.595 ^c	4.98 ^a
	T7	0.159 ^a	132.973 ^{bc}	0.184 ^e	24.600 ^e	27.553 ^{cde}	301.257 ^{bc}	2.406 ^f	4.962 ^e	5.55 ^a
	T8	0.162 ^b	140.000 ^{ab}	0.149 ^h	7.900 ^h	27.953 ^c	308.149 ^d	2.652 ^d	2.324 ⁱ	5.61 ^a
S7	T1	0.184 ^a	141.499 ^d	0.222 ^a	16.900 ⁱ	35.371 ^{bc}	817.503 ^b	13.963 ^d	6.910 ^{de}	5.12 ^a
	T2	0.141 ^e	139.944 ^b	0.195 ^d	10.200 ^h	25.476 ^d	330.608 ^c	1.068 ^a	5.245 ^g	4.77 ^{ab}
	T3	0.101 ^f	113.255 ^{bc}	0.203 ^c	6.700 ^h	11.398 ^c	78.842 ^{bc}	0.982 ^g	3.892 ^d	5.41 ^{abc}
	T4	0.117 ^f	140.308 ^d	0.298 ^a	27.900 ^e	41.109 ^{ab}	310.619 ^{ab}	11.627 ^b	6.972 ^d	4.21 ^{ab}
	T5	0.156 ^d	186.630 ^{bc}	0.237 ^b	31.500 ^c	39.585 ^a	735.001 ^f	9.429 ^b	8.574 ^c	4.45 ^a
	T6	0.165 ^b	100.775 ^e	0.256 ^a	30.100 ^c	40.486 ^a	725.055 ^d	19.039 ^d	10.835 ^c	4.71 ^a
	T7	0.130 ^{bc}	118.988 ^c	0.262 ^a	27.400 ^d	30.597 ^{bcd}	304.383 ^{bc}	3.091 ^d	7.883 ^b	5.51 ^a
	T8	0.132 ^c	140.002 ^{ab}	0.184 ^g	4.600 ^j	33.766 ^b	542.581 ^a	2.067 ^f	9.296 ^b	5.656 ^a
S8	T1	0.158 ^a	155.132 ^{cd}	0.218 ^a	22.300 ^c	36.064 ^b	834.840 ^a	16.131 ^{bcd}	6.847 ^e	5.243 ^a
	T2	0.160 ^c	112.010 ^{cd}	0.217 ^c	11.600 ^g	30.599 ^{bc}	295.603 ^c	3.773 ^a	5.967 ^d	4.58 ^{ab}
	T3	0.099 ^f	98.245 ^{de}	0.182 ^e	8.100 ^g	11.802 ^c	78.845 ^{bc}	2.984 ^e	3.287 ^e	5.36 ^{abc}
	T4	0.159 ^c	152.258 ^{bc}	0.286 ^b	14.000 ^j	29.969 ^{cd}	331.801 ^a	9.378 ^c	7.695 ^c	4.32 ^{ab}
	T5	0.173 ^c	180.582 ^{cd}	0.220 ^{cd}	29.100 ^e	36.398 ^{abc}	847.579 ^d	9.527 ^a	9.611 ^b	4.25 ^a
	T6	0.165 ^b	140.905 ^c	0.236 ^b	22.500 ^f	35.438 ^b	724.928 ^d	19.188 ^c	11.935 ^b	4.78 ^a
	T7	0.120 ^c	136.507 ^b	0.177 ^c	20.900 ^f	41.424 ^a	336.833 ^a	2.774 ^c	8.668 ^a	5.61 ^a
	T8	0.103 ^d	136.432 ^{ab}	0.184 ^g	10.500 ^b	33.068 ^b	308.728 ^d	1.019 ^h	1.382 ^j	5.47 ^a
S9	T1	0.165 ^a	148.863 ^{cd}	0.233 ^a	21.900 ^e	28.546 ^{de}	747.331 ^c	17.228 ^b	6.972 ^d	5.41 ^a
	T2	0.174 ^b	120.122 ^c	0.231 ^b	9.700 ⁱ	30.830 ^{bc}	324.400 ^{cd}	4.358 ^a	6.281 ^b	4.52 ^{ab}
	T3	0.114 ^c	100.383 ^{cde}	0.204 ^c	5.300 ^j	14.766 ^{abc}	94.200 ^{abc}	3.516 ^c	5.127 ^b	5.89 ^a
	T4	0.1108 ^g	146.966 ^{cd}	0.217 ^g	15.600 ^j	41.887 ^{ab}	324.338 ^a	5.740 ^g	6.721 ^f	4.57 ^a
	T5	0.078 ^g	167.941 ^d	0.227 ^c	22.501 ^g	38.175 ^{ab}	827.292 ^c	3.310 ^f	5.779 ^g	4.36 ^a
	T6	0.151 ^c	142.530 ^c	0.214 ^c	22.900 ^f	34.602 ^b	642.415 ^f	1.774 ^g	4.415 ⁱ	4.83 ^a
	T7	0.058 ^e	140.007 ^b	0.193 ^d	21.400 ^f	28.008 ^{cde}	326.801 ^a	3.821 ^c	3.643 ^f	5.58 ^a
	T8	0.105 ^d	92.741 ^d	0.216 ^e	15.700 ^a	22.933 ^d	282.517 ^c	1.604 ^g	6.187 ^d	6.23 ^a
CK	T1	0.218 ^a	182.000 ^a	0.263 ^a	18.900 ^h	40.252 ^a	710.016 ^d	20.400 ^a	8.700 ^a	4.89 ^a

续表4

处理组	取样时期	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 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /g·kg ⁻¹	硝态氮 /g·kg ⁻¹	pH
	T2	0.187 ^a	157.453 ^a	0.227 ^b	13.700 ^f	33.235 ^b	275.611 ^f	5.576 ^a	7.098 ^a	4.24 ^b
	T3	0.149 ^b	140.258 ^a	0.198 ^c	10.300 ^f	14.761 ^{abc}	89.526 ^{abc}	4.181 ^a	6.186 ^a	5.17 ^{bc}
	T4	0.178 ^a	174.965 ^a	0.247 ^d	33.200 ^a	44.388 ^a	283.166 ^c	11.965 ^a	8.417 ^a	3.91 ^b
	T5	0.182 ^b	203.009 ^a	0.213 ^{de}	29.900 ^d	34.681 ^{bcd}	1004.674 ^a	4.797 ^d	11.558 ^a	4.22 ^a
	T6	0.184 ^a	169.38 ^a	0.197 ^c	27.900 ^d	42.511 ^a	595.000 ^b	22.914 ^b	12.374 ^a	4.35 ^a
	T7	0.132 ^b	158.672 ^a	0.163 ^f	21.200 ^f	33.857 ^b	286.215 ^c	5.330 ^b	8.668 ^a	5.256 ^a
	T8	0.199 ^a	150.028 ^a	0.246 ^c	9.200 ^f	35.043 ^{ab}	309.375 ^d	5.721 ^a	9.485 ^a	5.30 ^a

3.4 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤微生物数量的影响 接种时期滇重楼幼苗根际土壤微生物数量的变化见表5。结果表明,8个接种时期的菌根化滇重楼根际土壤里的细菌数量均高于CK组,部分达到显著性差异($P<0.05$),表明接种AM真菌改变了土壤微生物数量比例。所有处理组8个时期的微

生物总量除S6处理组的T4时期和S9处理组的T7时期低于CK组外,其他处理组均比CK组同时期高。且所有时期微生物总量整体表现出先降低后增高的趋势。整体上看,滇重楼幼苗根际土壤微生物数量表现出细菌>放线菌>真菌的趋势,细菌数量最多,放线菌次之,与张静等^[27]研究结果一致。

表5 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤微生物数量的变化 ($\bar{x}\pm s, n=6$)

Table 5 Changes in the number of microbial inoculation time on seedling rhizosphere soil in *Paris polyphylla* var *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=6$)

处理组	取样时期	细菌/10 ³ 个	真菌/10 ³ 个	放线菌/10 ³ 个	微生物总量/10 ³ 个	细菌/真菌	细菌/放线菌	真菌/放线菌
S1	T1	443.333±0.020 ^c	37.667±0.015 ^c	45.000±0.013 ^b	526.000	11.770	9.852	0.837
	T2	466.667±0.019 ^d	27.667±0.021 ^d	41.000±0.014 ^b	535.334	16.867	11.382	0.675
	T3	456.667±0.020 ^c	28.667±0.020 ^f	38.000±0.015 ^b	523.334	15.930	12.018	0.754
	T4	253.333±0.036 ^e	34.667±0.016 ^c	107.333±0.005 ^b	395.333	7.308	2.360	0.323
	T5	583.333±0.016 ^{ab}	59.333±0.010 ^d	86.333±0.007 ^d	729.000	9.831	6.757	0.687
	T6	686.667±0.013 ^a	40.667±0.014 ^d	50.333±0.011 ⁱ	777.667	16.885	13.642	0.808
	T7	530.000±0.017 ^{de}	30.000±0.019 ^e	32.667±0.017 ^d	592.667	17.667	16.224	0.918
	T8	870.000±0.010 ^a	35.333±0.016 ^c	59.000±0.010 ^{ef}	964.333	24.623	14.746	0.599
S2	T1	536.667±0.017 ^b	32.667±0.017 ^f	15.667±0.036 ^g	585.000	16.429	34.255	2.085
	T2	493.333±0.018 ^c	14.000±0.041 ⁱ	34.000±0.017 ^{ef}	541.333	35.238	14.510	0.412
	T3	300.000±0.030 ^g	29.667±0.019 ^f	42.667±0.013 ^f	372.333	10.112	7.031	0.695
	T4	393.333±0.023 ^b	21.000±0.027 ⁱ	101.667±0.006 ^f	516.000	18.730	3.869	0.207
	T5	486.667±0.019 ^d	57.333±0.010 ^e	81.333±0.007 ^g	625.334	8.488	5.984	0.705
	T6	573.333±0.016 ^c	49.667±0.011 ^a	73.333±0.008 ^a	696.333	11.544	7.818	0.677
	T7	556.667±0.016 ^{bcd}	33.333±0.017 ^b	37.667±0.015 ^a	627.667	16.700	14.779	0.885
	T8	666.667±0.014 ^b	28.000±0.020 ^f	58.000±0.010 ^f	752.667	23.810	11.494	0.483
S3	T1	446.667±0.020 ^c	36.667±0.016 ^c	33.000±0.017 ^e	516.334	12.182	13.535	1.111
	T2	393.333±0.023 ^f	19.000±0.030 ^g	35.667±0.016 ^d	448.000	20.702	11.028	0.533
	T3	450.000±0.020 ^c	44.667±0.013 ^{bc}	42.333±0.013 ^f	537.000	10.075	10.630	1.055
	T4	326.667±0.028 ^{cd}	25.000±0.023 ^g	94.000±0.006 ^b	445.667	13.067	3.475	0.266
	T5	540.000±0.017 ^c	69.667±0.008 ^a	106.333±0.005 ^a	716.000	7.751	5.078	0.655
	T6	516.667±0.018 ^c	42.000±0.014 ^c	58.333±0.010 ^f	617.000	12.302	8.857	0.720
	T7	566.667±0.016 ^{bc}	30.667±0.019 ^e	38.000±0.015 ^a	635.334	18.478	14.912	0.807
	T8	686.667±0.013 ^b	22.333±0.025 ^g	73.333±0.008 ^a	782.334	30.746	9.364	0.305

续表5

处理组	取样时期	细菌/10 ³ 个	真菌/10 ³ 个	放线菌/10 ³ 个	微生物总量/10 ³ 个	细菌/真菌	细菌/放线菌	真菌/放线菌
S4	T1	353.333±0.026 ^d	39.667±0.014 ^d	35.000±0.016 ^d	428.000	8.908	10.095	1.133
	T2	373.333±0.024 ^{de}	17.667±0.032 ^h	42.667±0.013 ^a	433.666	21.132	8.750	0.414
	T3	560.000±0.016 ^a	45.667±0.012 ^b	67.667±0.008 ^a	673.333	12.263	8.276	0.675
	T4	343.333±0.026 ^c	40.000±0.014 ^d	104.667±0.005 ^{sd}	488.000	8.583	3.280	0.382
	T5	563.333±0.016 ^b	70.667±0.008 ^a	84.667±0.007 ^c	718.666	7.972	6.654	0.835
	T6	693.333±0.013 ^a	44.667±0.013 ^b	61.667±0.009 ^d	799.666	15.522	11.243	0.724
	T7	533.333±0.017 ^{de}	36.667±0.016 ^a	34.000±0.017 ^c	604.000	14.545	15.686	1.078
	T8	526.667±0.017 ^d	34.000±0.017 ^c	61.667±0.009 ^d	622.334	15.490	8.541	0.551
S5	T1	280.000±0.032 ^f	50.000±0.011 ^a	36.667±0.016 ^c	366.667	5.600	7.636	1.364
	T2	570.000±0.016 ^b	30.000±0.019 ^c	27.000±0.021 ^g	627.000	19.000	21.111	1.111
	T3	330.000±0.027 ^f	41.667±0.014 ^d	51.333±0.011 ^c	423.000	7.920	6.429	0.812
	T4	406.667±0.022 ^b	42.000±0.014 ^c	97.000±0.006 ^g	545.667	9.683	4.192	0.433
	T5	473.333±0.019 ^d	65.000±0.009 ^c	99.333±0.006 ^b	637.666	7.282	4.765	0.654
	T6	540.000±0.017 ^d	40.333±0.014 ^d	67.000±0.008 ^b	647.333	13.388	8.060	0.602
	T7	570.000±0.016 ^b	31.000±0.018 ^c	30.000±0.019 ^c	631.000	18.387	19.000	1.033
	T8	526.667±0.017 ^d	42.000±0.014 ^b	63.667±0.009 ^c	632.334	12.540	8.272	0.660
S6	T1	550.000±0.016 ^b	40.667±0.014 ^d	13.333±0.043 ^h	604.000	13.525	41.250	3.050
	T2	640.000±0.014 ^a	36.667±0.016 ^b	38.000±0.015 ^c	714.667	17.455	16.842	0.965
	T3	360.000±0.025 ^e	28.667±0.020 ^f	44.000±0.013 ^c	432.667	12.558	8.182	0.652
	T4	223.333±0.041 ^f	23.000±0.025 ^h	106.000±0.005 ^c	352.333	9.710	2.107	0.217
	T5	533.333±0.017 ^c	58.000±0.010 ^c	83.000±0.007 ^f	674.333	9.195	6.426	0.699
	T6	596.667±0.015 ^b	33.000±0.017 ^c	64.667±0.009 ^c	694.334	18.081	9.227	0.510
	T7	606.667±0.015 ^a	28.333±0.020 ^d	27.333±0.021 ^f	662.334	21.412	22.195	1.037
	T8	363.333±0.025 ^g	49.333±0.012 ^a	65.000±0.009 ^b	477.666	7.365	5.590	0.759
S7	T1	650.000±0.014 ^a	39.333±0.014 ^d	11.667±0.049 ⁱ	701.000	16.525	55.714	3.371
	T2	450.000±0.020 ^d	23.333±0.024 ^f	35.000±0.016 ^{de}	508.333	19.286	12.857	0.667
	T3	386.667±0.023 ^d	41.000±0.014 ^d	41.333±0.014 ^f	469.000	9.431	9.355	0.992
	T4	310.000±0.029 ^d	45.667±0.012 ^b	103.667±0.005 ^{de}	459.333	6.788	2.990	0.441
	T5	590.000±0.015 ^a	68.333±0.008 ^b	80.000±0.007 ^h	738.333	8.634	7.375	0.854
	T6	670.000±0.014 ^a	25.333±0.022 ^g	59.667±0.010 ^{ce}	755.000	26.447	11.229	0.425
	T7	540.000±0.017 ^{cde}	17.667±0.032 ^f	36.333±0.016 ^b	594.000	30.566	14.862	0.486
	T8	453.333±0.020 ^e	34.333±0.017 ^c	60.000±0.009 ^c	547.666	13.204	7.556	0.572
S8	T1	316.667±0.029 ^c	37.667±0.015 ^c	86.000±0.007 ^a	440.334	8.407	3.682	0.438
	T2	420.000±0.022 ^e	30.000±0.019 ^c	42.333±0.013 ^a	492.333	14.000	9.921	0.709
	T3	573.333±0.016 ^a	50.000±0.011 ^a	47.000±0.012 ^d	670.333	11.467	12.199	1.064
	T4	446.667±0.020 ^a	24.667±0.023 ^g	103.000±0.006 ^c	574.334	18.108	4.337	0.239
	T5	400.000±0.023 ^e	64.333±0.009 ^c	100.333±0.006 ^b	564.667	6.218	3.987	0.641
	T6	456.667±0.020 ^f	18.667±0.030 ^h	52.000±0.011 ^h	527.334	24.464	8.782	0.359
	T7	563.333±0.016 ^{bc}	27.667±0.021 ^d	35.667±0.016 ^b	626.666	20.361	15.794	0.776
	T8	573.333±0.016 ^c	37.000±0.015 ^d	63.000±0.009 ^c	673.333	15.495	9.101	0.587
S9	T1	326.667±0.028 ^e	45.333±0.013 ^c	10.000±0.057 ^j	382.000	7.206	32.667	4.533
	T2	356.667±0.025 ^g	47.667±0.012 ^a	33.333±0.017 ^f	437.667	7.483	10.700	1.430

续表5

处理组	取样时期	细菌/10 ³ 个	真菌/10 ³ 个	放线菌/10 ³ 个	微生物总量/10 ³ 个	细菌/真菌	细菌/放线菌	真菌/放线菌
	T3	506.667±0.018 ^b	31.333±0.018 ^e	58.333±0.010 ^b	596.334	16.170	8.686	0.537
	T4	273.333±0.033 ^e	31.000±0.018 ^f	109.667±0.005 ^a	414.000	8.817	2.492	0.283
	T5	363.333±0.025 ^f	33.000±0.017 ^g	89.667±0.006 ^e	486.000	11.010	4.052	0.368
	T6	433.333±0.021 ^g	27.667±0.021 ^f	51.000±0.011 ^{hi}	512.000	15.663	8.497	0.542
	T7	526.667±0.017 ^e	17.000±0.033 ^f	23.000±0.025 ^g	566.667	30.980	22.899	0.739
	T8	406.667±0.022 ^f	39.333±0.014 ^e	50.333±0.011 ^g	496.334	10.339	8.079	0.781
CK	T1	260.000±0.035 ^f	47.333±0.012 ^b	21.000±0.027 ^f	328.333	5.493	12.381	2.254
	T2	296.667±0.031 ^h	24.667±0.023 ^e	36.000±0.016 ^d	357.334	12.027	8.241	0.685
	T3	230.000±0.039 ^h	44.000±0.013 ^e	35.000±0.016 ^b	309.000	5.227	6.571	1.257
	T4	220.000±0.041 ^f	51.000±0.011 ^a	105.667±0.005 ^e	376.667	4.314	2.082	0.483
	T5	350.000±0.026 ^f	54.667±0.010 ^f	64.000±0.009 ⁱ	468.667	6.402	5.469	0.854
	T6	413.333±0.022 ^g	27.333±0.021 ^f	55.000±0.010 ^g	495.666	15.122	7.515	0.497
	T7	513.333±0.018 ^e	25.667±0.022 ^e	31.000±0.018 ^g	570.000	20.000	16.559	0.828
	T8	333.333±0.027 ^h	49.667±0.011 ^a	65.333±0.009 ^b	448.333	6.711	5.102	0.760

土壤中微生物群落结构的改变可以从细菌/真菌、细菌/放线菌、真菌/放线菌的数量之比反映出来^[28]。放线菌是抗生素的主要产生菌,细菌/放线菌和真菌/放线菌比值越小,土壤中病原菌含量越低;细菌/真菌愈小、真菌/放线菌比值越大,则表示土壤微生物区系异常,有害微生物对作物根系的潜在危害愈大^[29]。从表5中可以看出,不同处理组各个时期的细菌/真菌比值与CK组相比,均有所提高,其中S3处理组T8时期最高,比CK组高4.58倍。不同处理组各个时期的细菌/放线菌与CK组相比,有部分时期比值较CK组低,其中S8处理组T1时期的比值最低。各个时期的真菌/放线菌比值也显著低于CK组。表明接种AM真菌改变重楼幼苗土壤微生物群落结构,减少了土壤中的潜在病害,其中S3,S5和

S8的AM真菌组合的土壤状况较好。

3.5 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤微生物生物量碳的影响 由表6可知,接种丛枝菌根真菌种类及接种时期对滇重楼幼苗根际土壤中微生物生物量碳含量能产生较大影响,8个处理组接种时期的根际土壤中微生物生物量碳含量明显高于对照组根际土壤,其中S3,S6,S7,S8真菌组合部分时期生物量碳的含量相对较高,S8处理组的T7,T8时期与其他时期相比含量较高,表明接种AM真菌可以显著增加滇重楼幼苗根际土壤中微生物生物量碳的含量,且早期接种AM真菌更有利于土壤肥力的增长与稳定。

3.6 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤酶活性的影响 由表7可知,不同接种时期对滇重楼幼苗根际

表6 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤微生物生物量碳的变化(n=6)

Table 6 Change of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings rhizosphere soil microbial biomass carbon inoculation period (n=6) mg·kg⁻¹

处理组	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
S1	174.895 ^e	214.526 ^f	226.123 ^d	99.842 ^g	353.892 ^a	190.526 ^e	131.368 ^e	302.000 ^e
S2	109.632 ^g	253.158 ^c	268.146 ^b	118.526 ^f	114.105 ^d	206.526 ^d	80.947 ^d	312.789 ^d
S3	204.105 ^d	291.789 ^b	289.217 ^a	150.842 ^b	78.105 ^e	306.211 ^a	295.368 ^b	332.947 ^c
S4	51.684 ^h	133.316 ⁱ	142.585 ^f	70.105 ^h	178.789 ^c	242.526 ^c	133.579 ^e	288.421 ^f
S5	232.895 ^b	194.158 ^g	241.023 ^c	142.789 ^e	33.105 ^f	163.316 ^f	119.053 ^f	349.632 ^b
S6	319.263 ^a	220.842 ^e	287.632 ^a	125.053 ^e	271.281 ^b	256.895 ^b	162.632 ^d	285.316 ^f
S7	238.895 ^b	170.053 ^h	201.369 ^a	177.316 ^a	180.789 ^c	129.105 ^b	188.842 ^c	293.000 ^f
S8	214.526 ^c	233.421 ^d	238.120 ^e	131.421 ^d	119.000 ^d	138.000 ^h	421.421 ^a	362.000 ^a
S9	144.000 ^f	317.737 ^a	289.121 ^a	77.789 ^h	28.421 ^f	93.632 ⁱ	78.737 ^g	238.579 ^g
CK	34.421 ⁱ	120.474 ^j	145.268 ^f	70.579 ^h	32.211 ^f	55.842 ^j	77.158 ^g	150.895 ^h

土壤酶活性的影响具有差异,除过部分时期过氧化氢酶活性较CK组低外,各个接种时期处理组滇重楼幼苗根际土壤中蛋白酶、脲酶、磷酸酶和蔗糖酶的活性均高于CK组根际土壤,部分接种时期之间达到显著性差异($P<0.05$)。表明接种AM真菌可显著增强滇重楼幼苗根际土壤酶的活性。其中,蛋白酶活性在T1,T4,T5,T7时期较高,脲酶活性在T4,

T5时期较高,磷酸酶在T4,T5时期较高,过氧化氢酶活性在T2,T3时期较高,蔗糖酶活性在T3,T4,T7时期较高。整体来看,与CK组相比,土壤酶活性的相对增长率大小顺序为磷酸酶>蛋白酶>蔗糖酶>脲酶>过氧化氢酶,与张华等^[13]研究结果一致。S2~S6处理组的T4,T5时期土壤酶活性较高,蛋白酶,脲酶以及蔗糖酶活性与CK组相比提高了3倍以上。

表7 接种时期对滇重楼幼苗根际土壤酶活性的变化 ($\bar{x}\pm s, n=6$)

Table 7 Change of soil enzyme activity in the rhizosphere of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings inoculation period ($\bar{x}\pm s, n=6$)

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	14.601±0.002 ^a	11.944±0.003 ^f	1.713±0.018 ^e	0.145±0.216 ^{bc}	2.206±0.014 ^a	0.654±0.048 ^a	17.843±0.002 ^a
	T2	10.188±0.003 ^f	26.990±0.001 ^a	0.641±0.049 ^e	0.629±0.050 ^a	2.317±0.014 ^b	0.387±0.081 ^c	1.735±0.018 ^e
	T3	11.218±0.003 ^b	18.652±0.002 ^d	1.246±0.025 ^f	0.782±0.040 ^a	2.486±0.013 ^a	0.695±0.045 ^b	3.776±0.008 ^b
	T4	13.946±0.002 ^b	64.074±0.005 ^f	3.732±0.008 ^g	0.461±0.068 ^f	1.558±0.020 ^d	0.429±0.073 ^c	0.702±0.045 ⁱ
	T5	6.898±0.005 ^d	24.722±0.013 ^g	0.892±0.035 ^f	0.224±0.014 ^g	1.053±0.030 ^c	0.631±0.050 ^{ab}	4.204±0.007 ^c
	T6	5.749±0.005 ^e	8.221±0.004 ^d	0.465±0.067 ^c	0.136±0.230 ^c	1.301±0.024 ^c	0.715±0.044 ^{bc}	4.230±0.007 ^b
	T7	10.663±0.003 ^d	30.245±0.001 ^d	0.792±0.040 ^d	0.454±0.069 ^b	0.752±0.042 ^f	0.404±0.078 ^b	1.175±0.027 ^g
	T8	8.780±0.004 ^f	10.211±0.003 ^h	0.579±0.054 ^{de}	0.132±0.237 ^c	0.591±0.053 ^c	0.439±0.071 ^d	1.949±0.016 ^d
S2	T1	7.919±0.004 ^d	21.389±0.001 ^b	1.798±0.017 ^d	0.570±0.055 ^a	0.611±0.061 ^c	0.683±0.046 ^a	0.987±0.032 ^j
	T2	12.033±0.003 ^c	19.063±0.002 ^d	0.935±0.033 ^{bc}	0.428±0.073 ^b	2.296±0.014 ^b	0.367±0.085 ^c	2.392±0.013 ^c
	T3	10.523±0.003 ^d	21.087±0.001 ^c	1.823±0.017 ^c	0.514±0.061 ^c	2.183±0.014 ^c	0.367±0.085 ^d	2.477±0.013 ^c
	T4	6.834±0.005 ^e	34.074±0.009 ^h	5.605±0.006 ^c	1.895±0.017 ^a	2.817±0.011 ^a	0.558±0.056 ^{ab}	7.860±0.004 ^c
	T5	5.678±0.006 ^f	22.037±0.014 ^h	0.752±0.042 ^g	0.960±0.003 ^d	1.176±0.027 ^b	0.628±0.050 ^{ab}	4.306±0.007 ^b
	T6	8.071±0.004 ^c	3.498±0.009 ⁱ	0.598±0.052 ^b	0.428±0.073 ^a	1.878±0.017 ^b	0.504±0.062 ^c	5.528±0.006 ^a
	T7	7.032±0.004 ^g	22.054±0.001 ^h	0.686±0.046 ^c	0.474±0.066 ^b	1.909±0.016 ^b	0.591±0.053 ^c	1.465±0.021 ^f
	T8	11.097±0.003 ^c	20.109±0.002 ^b	0.603±0.052 ^{de}	0.193±0.162 ^{bc}	0.834±0.038 ^c	0.342±0.092 ^d	1.491±0.021 ^g
S3	T1	10.237±0.003 ^c	7.500±0.004 ⁱ	1.340±0.023 ^h	0.168±0.187 ^{bc}	1.649±0.019 ^b	0.658±0.048 ^a	8.343±0.004 ^c
	T2	13.085±0.002 ^b	6.467±0.006 ⁱ	0.881±0.036 ^{bc}	0.362±0.193 ^b	1.829±0.017 ^d	0.797±0.039 ^a	1.567±0.020 ^f
	T3	14.085±0.002 ^a	6.128±0.005 ^h	1.244±0.025 ^f	0.279±0.112 ^{de}	2.017±0.016 ^d	0.797±0.039 ^a	1.882±0.017 ^g
	T4	8.152±0.004 ^d	10.463±0.030 ⁱ	3.960±0.008 ^f	1.649±0.019 ^c	1.917±0.016 ^c	0.495±0.063 ^{bc}	8.679±0.004 ^a
	T5	3.333±0.009 ^g	58.611±0.005 ^d	0.921±0.034 ^{ef}	0.154±0.020 ^h	1.103±0.029 ^{bc}	0.659±0.048 ^{ab}	3.578±0.009 ^f
	T6	4.450±0.007 ^h	10.704±0.003 ^b	0.510±0.061 ^c	0.194±0.161 ^c	1.718±0.018 ^{cd}	0.779±0.040 ^b	3.329±0.009 ^e
	T7	14.103±0.002 ^b	33.014±0.001 ^b	0.936±0.033 ^c	0.192±0.163 ^d	1.532±0.020 ^d	0.348±0.090 ^b	3.028±0.010 ^a
	T8	13.327±0.002 ^b	10.862±0.003 ^f	0.673±0.047 ^{cd}	0.150±0.209 ^c	0.689±0.045 ^d	0.250±0.125 ^e	2.224±0.014 ^b
S4	T1	5.891±0.005 ^e	17.130±0.002 ^d	1.613±0.019 ^f	0.610±0.051 ^a	1.043±0.030 ^d	0.693±0.045 ^a	15.058±0.002 ^b
	T2	3.049±0.010 ⁱ	14.946±0.002 ^g	0.774±0.040 ^d	0.366±0.189 ^b	2.506±0.012 ^a	0.390±0.080 ^c	2.209±0.014 ^d
	T3	6.012±0.005 ^h	15.234±0.002 ^g	1.715±0.018 ^d	0.623±0.050 ^b	2.319±0.014 ^b	0.390±0.080 ^d	3.484±0.009 ^c
	T4	9.370±0.003 ^c	65.926±0.005 ^e	6.451±0.005 ^b	0.250±0.125 ^g	2.248±0.014 ^b	0.566±0.055 ^{ab}	5.838±0.005 ^d
	T5	6.667±0.005 ^e	19.352±0.016 ⁱ	1.043±0.030 ^d	0.117±0.027 ⁱ	1.147±0.027 ^{bc}	0.692±0.045 ^a	4.474±0.007 ^a
	T6	5.661±0.006 ^f	9.374±0.003 ^c	0.718±0.044 ^a	0.335±0.093 ^b	2.488±0.013 ^a	0.630±0.050 ^{cd}	4.026±0.008 ^c
	T7	7.506±0.004 ^f	25.429±0.001 ^g	0.866±0.036 ^{cd}	0.713±0.044 ^a	1.011±0.031 ^c	0.433±0.072 ^b	1.806±0.017 ^d
	T8	8.895±0.004 ^c	9.971±0.003 ⁱ	0.852±0.037 ^b	0.178±0.176 ^{bc}	0.605±0.052 ^{de}	1.026±0.031 ^a	2.102±0.015 ^c
S5	T1	2.732±0.011 ^h	37.685±0.001 ^a	2.113±0.015 ^b	0.139±0.225 ^{bc}	0.662±0.194 ^e	0.609±0.051 ^a	5.625±0.006 ^g

续表7

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
	T2	6.773±0.005 ^b	23.395±0.001 ^b	1.068±0.029 ^a	0.333±0.134 ^b	2.200±0.014 ^c	0.527±0.059 ^b	1.475±0.021 ^g
	T3	5.184±0.006 ⁱ	32.121±0.001 ^a	2.387±0.013 ^a	0.319±0.098 ^d	1.926±0.016 ^e	0.527±0.059 ^c	2.889±0.011 ^d
	T4	16.136±0.002 ^a	99.722±0.003 ^a	8.439±0.004 ^a	1.260±0.025 ^d	1.170±0.027 ^e	0.515±0.061 ^{bc}	3.318±0.009 ^f
	T5	5.665±0.006 ^f	50.556±0.006 ^c	0.987±0.032 ^{de}	2.807±0.001 ^a	1.106±0.029 ^{bc}	0.652±0.048 ^{ab}	3.685±0.008 ^e
	T6	5.444±0.006 ^g	12.581±0.002 ^a	0.449±0.076 ^e	0.142±0.221 ^c	1.754±0.018 ^c	0.591±0.053 ^d	2.239±0.014 ^h
	T7	4.087±0.008 ⁱ	26.070±0.001 ^f	0.868±0.036 ^{cd}	0.194±0.161 ^d	1.836±0.017 ^{bc}	0.610±0.051 ^a	1.638±0.019 ^e
	T8	15.996±0.002 ^a	10.428±0.003 ^g	0.986±0.032 ^a	0.269±0.116 ^b	0.770±0.041 ^c	0.551±0.057 ^c	2.117±0.015 ^c
S6	T1	12.084±0.003 ^b	16.296±0.002 ^e	1.873±0.017 ^c	0.133±0.236 ^{bc}	1.380±0.023 ^c	0.729±0.043 ^a	6.846±0.005 ^c
	T2	7.662±0.004 ^g	11.511±0.003 ^h	0.971±0.032 ^b	0.561±0.056 ^a	1.791±0.017 ^d	0.730±0.043 ^a	2.713±0.012 ^b
	T3	10.689±0.003 ^c	18.268±0.002 ^e	2.055±0.015 ^b	0.715±0.044 ^a	2.124±0.015 ^c	0.730±0.043 ^{ab}	2.003±0.016 ^f
	T4	3.045±0.010 ^h	69.722±0.005 ^c	3.358±0.009 ^h	0.425±0.074 ^f	1.217±0.026 ^e	0.460±0.068 ^{bc}	1.007±0.031 ^h
	T5	11.786±0.003 ^a	74.444±0.004 ^c	1.287±0.024 ^c	0.325±0.010 ^f	1.121±0.028 ^{bc}	0.645±0.049 ^{ab}	3.222±0.011 ^g
	T6	3.584±0.009 ⁱ	6.866±0.005 ^e	0.643±0.049 ^{ab}	0.208±0.151 ^c	1.667±0.019 ^{cd}	0.718±0.044 ^{bc}	2.677±0.012 ^g
	T7	10.534±0.003 ^c	31.813±0.001 ^c	1.126±0.028 ^a	0.219±0.143 ^d	1.903±0.016 ^b	0.423±0.074 ^b	1.908±0.016 ^c
	T8	6.802±0.005 ^b	13.026±0.002 ^d	0.581±0.054 ^{de}	0.223±0.140 ^{bc}	1.509±0.021 ^a	0.367±0.085 ^d	2.295±0.014 ^a
S7	T1	5.842±0.005 ^e	20.000±0.002 ^c	1.510±0.021 ^g	0.237±0.132 ^b	0.659±0.068 ^c	0.680±0.046 ^a	8.129±0.004 ^d
	T2	11.207±0.003 ^d	21.573±0.001 ^c	0.856±0.037 ^{cd}	0.404±0.078 ^b	1.548±0.020 ^c	0.372±0.084 ^c	1.623±0.019 ^f
	T3	7.830±0.004 ^g	23.147±0.001 ^b	1.429±0.022 ^c	0.537±0.058 ^c	1.689±0.019 ^f	0.372±0.084 ^d	2.826±0.011 ^d
	T4	4.222±0.007 ^g	80.741±0.004 ^b	3.706±0.008 ^g	0.846±0.037 ^e	1.179±0.027 ^e	0.503±0.062 ^{bc}	2.499±0.013 ^g
	T5	10.446±0.003 ^b	167.315±0.002 ^b	1.289±0.024 ^c	1.445±0.002 ^b	1.167±0.027 ^b	0.692±0.045 ^a	3.705±0.008 ^e
	T6	8.310±0.004 ^b	5.083±0.006 ^g	0.514±0.061 ^c	0.404±0.078 ^{ab}	1.627±0.019 ^d	0.614±0.051 ^d	3.232±0.010 ^f
	T7	12.625±0.002 ^c	20.149±0.002 ⁱ	1.013±0.031 ^b	0.166±0.193 ^d	1.479±0.021 ^d	0.519±0.060 ^a	2.514±0.012 ^b
	T8	3.459±0.009 ⁱ	18.168±0.002 ^c	0.725±0.043 ^c	0.353±0.089 ^a	0.789±0.040 ^c	0.717±0.044 ^b	1.735±0.018 ^f
S8	T1	4.004±0.008 ^g	10.000±0.003 ^h	2.204±0.014 ^a	0.191±0.164 ^{bc}	0.650±0.090 ^c	0.702±0.045 ^a	6.388±0.005 ^f
	T2	10.627±0.003 ^c	17.383±0.002 ^e	0.848±0.037 ^{cd}	0.363±0.086 ^b	1.862±0.017 ^d	0.552±0.057 ^b	2.361±0.013 ^c
	T3	8.954±0.003 ^f	18.215±0.002 ^e	1.851±0.017 ^c	0.497±0.063 ^c	1.712±0.018 ^f	0.552±0.057 ^c	3.987±0.008 ^a
	T4	4.779±0.007 ^f	35.648±0.009 ^g	4.549±0.007 ^d	0.494±0.063 ^f	1.005±0.031 ^f	0.617±0.051 ^a	8.348±0.004 ^b
	T5	7.926±0.004 ^c	169.444±0.002 ^a	3.018±0.010 ^a	0.878±0.004 ^e	1.180±0.027 ^b	0.599±0.052 ^{ab}	2.545±0.012 ⁱ
	T6	7.089±0.004 ^d	4.526±0.007 ^h	0.702±0.045 ^a	0.170±0.184 ^c	1.241±0.025 ^c	0.870±0.036 ^a	3.583±0.009 ^d
	T7	6.951±0.005 ^b	33.197±0.001 ^a	1.026±0.031 ^b	0.269±0.116 ^d	1.775±0.018 ^c	0.517±0.061 ^a	0.554±0.057 ⁱ
	T8	10.644±0.003 ^d	12.133±0.003 ^e	0.829±0.038 ^b	0.161±0.195 ^{bc}	0.661±0.047 ^{de}	0.272±0.115 ^c	1.873±0.017 ^e
S9	T1	4.947±0.006 ^f	10.556±0.003 ^g	1.941±0.016 ^c	0.157±0.200 ^{bc}	1.334±0.023 ^c	0.695±0.045 ^a	3.721±0.008 ⁱ
	T2	13.463±0.002 ^a	16.192±0.002 ^f	0.959±0.033 ^b	0.394±0.079 ^b	1.531±0.020 ^c	0.769±0.041 ^a	3.278±0.010 ^a
	T3	10.237±0.003 ^c	17.213±0.002 ^f	2.012±0.016 ^b	0.481±0.065 ^c	1.678±0.019 ^f	0.769±0.041 ^{ab}	0.675±0.046 ^h
	T4	1.848±0.017 ⁱ	67.037±0.005 ^d	4.420±0.007 ^e	1.761±0.018 ^b	1.164±0.027 ^c	0.463±0.068 ^{bc}	4.953±0.006 ^c
	T5	3.094±0.010 ^h	32.685±0.010 ^f	2.712±0.012 ^b	0.976±0.003 ^c	2.347±0.013 ^a	0.565±0.055 ^b	3.797±0.008 ^d
	T6	16.346±0.002 ^a	5.778±0.005 ^f	0.446±0.070 ^c	0.233±0.134 ^c	1.720±0.018 ^{cd}	0.631±0.050 ^{cd}	2.241±0.020 ^h
	T7	15.769±0.002 ^a	27.824±0.001 ^e	0.858±0.036 ^{cd}	0.347±0.090 ^c	2.483±0.013 ^a	0.356±0.088 ^b	0.798±0.039 ^h
	T8	7.938±0.004 ^g	23.886±0.001 ^a	0.645±0.049 ^{cd}	0.178±0.176 ^{bc}	0.937±0.033 ^b	0.391±0.080 ^d	1.388±0.042 ^h
CK	T1	1.393±0.022 ⁱ	5.833±0.005 ^j	1.224±0.026 ⁱ	0.082±0.381 ^c	0.544±0.049 ^f	0.674±0.046 ^a	4.988±0.006 ^h

续表7

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
	T2	3.044±0.010 ⁱ	6.451±0.005 ⁱ	0.621±0.050 ^e	0.329±0.095 ^b	0.872±0.036 ^f	0.304±0.103 ^c	1.139±0.027 ^h
	T3	4.556±0.007 ^j	6.110±0.005 ^h	1.128±0.028 ^g	0.229±0.137 ^e	1.025±0.031 ^g	0.304±0.103 ^d	0.568±0.055 ⁱ
	T4	1.317±0.024 ^j	9.444±0.033 ^j	2.892±0.011 ⁱ	0.086±0.029 ^h	1.011±0.031 ^f	0.435±0.072 ^c	0.564±0.056 ^j
	T5	1.533±0.020 ⁱ	12.778±0.025 ^j	0.651±0.048 ^h	0.026±0.120 ^j	1.101±0.028 ^{bc}	0.674±0.046 ^{ab}	2.237±0.010 ^h
	T6	1.916±0.016 ^j	3.069±0.010 ^j	0.444±0.071 ^c	0.122±0.257 ^c	1.247±0.025 ^e	0.488±0.064 ^e	1.529±0.012 ⁱ
	T7	2.595±0.012 ^j	20.147±0.001 ⁱ	0.629±0.050 ^e	0.164±0.191 ^d	0.740±0.021 ^f	0.347±0.090 ^b	0.419±0.022 ^j
	T8	3.410±0.008 ⁱ	6.617±0.005 ^j	0.520±0.060 ^e	0.124±0.253 ^c	0.568±0.055 ^e	0.375±0.084 ^d	0.884±0.023 ⁱ

3.7 相关性分析 从表8可知侵染率与多数土壤指标具有一定的相关性。侵染率与孢子密度,土壤pH,细菌数量,蛋白酶含量,过氧化氢酶含量之间呈极显著正相关($r=0.840, 0.790, 0.806, 0.854, 0.787, 876, P<0.01$),与碱性磷酸酶呈显著正相关($r=0.681, P<0.05$),与速效氮呈极显著负相关($r=-0.891, P<0.01$),与全氮、铵态氮、硝态氮呈显著

负相关($r=-0.697, -0.636, -0.759, P<0.05$)。孢子密度除与侵染率有极显著正相关外($r=0.840, P<0.01$),与细菌数量也呈极显著正相关($r=0.765, P<0.01$),与土壤pH,蛋白酶,中性磷酸酶呈显著正相关($r=0.679, 0.753, 0.692, P<0.05$),与速效氮呈极显著负相关($r=-0.905, P<0.01$),与全氮和硝态氮呈显著负相关($r=-0.685, -0.688, P<0.05$)。

表8 指标相关性分析

Table 8 Correlation analysis of ndex component

指标	侵染率	孢子密度	全氮	速效氮	全磷	速效磷	全钾	速效钾	pH	铵态氮	硝态氮
侵染率	-										
孢子密度	0.840 ²⁾	-									
全氮	-0.697 ¹⁾	-0.685 ¹⁾	-								
速效氮	-0.891 ²⁾	-0.904 ²⁾	0.883 ²⁾	-							
全磷	-0.074	-0.184	0.287	0.290	-						
速效磷	0.074	0.251	0.126	-0.072	-0.190	-					
全钾	-0.591	-0.598	0.631	0.718 ¹⁾	0.522	-0.428	-				
速效钾	0.290	0.500	-0.424	-0.501	-0.673 ¹⁾	0.026	-0.413	-			
pH	0.790 ²⁾	0.697 ¹⁾	-0.629	-0.731 ¹⁾	-0.267	-0.052	-0.629	0.269	-		
铵态氮	-0.636 ¹⁾	-0.578	0.472	0.532	-0.237	-0.248	0.555	0.249	-0.695 ¹⁾	-	
硝态氮	-0.759 ¹⁾	-0.688 ¹⁾	0.519	0.714 ¹⁾	0.302	-0.511	0.712 ¹⁾	-0.058	-0.674 ¹⁾	0.668 ¹⁾	-
细菌	0.806 ²⁾	0.765 ²⁾	-0.363	-0.717 ¹⁾	-0.095	0.422	-0.635 ¹⁾	0.398	0.496	-0.437	-0.648 ¹⁾
真菌	-0.358	-0.477	0.491	0.557	-0.041	0.068	0.152	0.014	-0.091	0.203	0.389
放线菌	0.454	0.095	-0.011	-0.142	0.079	-0.037	-0.153	-0.057	0.200	-0.236	-0.230
蛋白酶	0.854 ²⁾	0.753 ¹⁾	-0.737 ¹⁾	-0.863 ²⁾	-0.089	0.347	-0.687 ¹⁾	0.139	0.553	-0.631	-0.857 ²⁾
脲酶	0.592	0.529	-0.542	-0.565	-0.104	-0.281	-0.137	0.677 ¹⁾	0.370	0.017	-0.041
酸性磷酸酶	0.570	0.409	-0.504	-0.430	-0.147	-0.310	-0.290	0.244	0.724 ¹⁾	-0.489	-0.265
中性磷酸酶	0.452	0.692 ¹⁾	-0.653 ¹⁾	-0.581	0.034	-0.044	-0.368	0.309	0.588	-0.631	-0.243
碱性磷酸酶	0.681 ¹⁾	0.621	-0.424	-0.634 ¹⁾	-0.151	0.253	-0.613	-0.095	0.786 ²⁾	-0.746 ¹⁾	-0.877 ²⁾
过氧化氢酶	0.787 ²⁾	0.398	-0.366	-0.497	0.013	-0.048	-0.233	0.001	0.617	-0.383	-0.598
蔗糖酶	0.539	0.258	0.011	-0.297	0.182	0.235	-0.442	-0.093	0.302	-0.412	-0.420

续表 8

指标	细菌	真菌	放线菌	蛋白酶	脲酶	酸性磷酸酶	中性磷酸酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	蔗糖酶
侵染率										
孢子密度										
全氮										
速效氮										
全磷										
速效磷										
全钾										
速效钾										
pH										
铵态氮										
硝态氮										
细菌	-									
真菌	-0.227	-								
放线菌	0.420	0.138	-							
蛋白酶	0.733 ¹⁾	-0.558	0.240	-						
脲酶	0.447	0.006	0.258	0.319	-					
酸性磷酸酶	0.176	0.175	0.516	0.222	0.531	-				
中性磷酸酶	0.209	-0.210	-0.148	0.340	0.401	0.582	-			
碱性磷酸酶	0.522	-0.404	0.097	0.679 ¹⁾	-0.113	0.270	0.307	-		
过氧化氢酶	0.514	-0.018	0.555	0.595	0.488	0.526	0.017	0.500	-	
蔗糖酶	0.756 ¹⁾	0.008	0.659 ¹⁾	0.453	0.064	0.086	-0.178	0.432	0.474	-

注: ¹⁾ $P < 0.05$, ²⁾ $P < 0.01$ 水平上存在显著差异。

土壤营养养分之间存在一定的相关性,全氮与速效氮呈极显著正相关($r=0.883, P < 0.01$),而速效氮与硝态氮、全钾呈显著正相关($r=0.714, 0.781, P < 0.05$),硝态氮与全钾、铵态氮呈显著正相关($r=0.712, 0.668, P < 0.05$),速效钾与全磷呈显著负相关($r=-0.673, P < 0.05$),土壤 pH 与速效氮、铵态氮、硝态氮呈显著负相关($r=-0.731, -0.695, -0.674, P < 0.05$)。脲酶与速效钾呈显著正相关($r=0.677, P < 0.05$)。

土壤微生物种类之间无显著的相关性,但与土壤营养养分和土壤酶之间存在一定的相关性。其中细菌与速效氮、硝态氮、全钾之间呈显著负相关($r=-0.717, -0.648, -0.635, P < 0.05$),与蛋白酶和蔗糖酶呈显著正相关($r=0.733, 0.756, P < 0.05$),放线菌与蔗糖酶也呈显著正相关($r=0.659, P < 0.05$)。

土壤酶之间除蛋白酶与碱性磷酸酶呈显著正相关外($r=0.679, P < 0.05$),其他各土壤酶之间均无显著相关性。但土壤酶与土壤营养养分之间存在一定的相关性,其中蛋白酶与速效氮和硝态氮呈极

显著负相关($r=-0.863, -0.857, P < 0.01$),与全氮、全钾呈显著负相关($r=-0.737, -0.687, P < 0.05$)。酸性磷酸酶与土壤 pH 呈显著正相关($r=0.741, P < 0.05$)。中性磷酸酶与全氮呈显著负相关($r=-0.653, P < 0.05$)。碱性磷酸酶与土壤 pH 呈极显著正相关($r=0.786, P < 0.01$),与硝态氮呈极显著负相关($r=-0.877, P < 0.01$),与速效氮和铵态氮呈显著负相关($r=-0.634, -0.746, P < 0.05$)。

4 讨论

AM 真菌在陆地生态系统中分布广泛,可以侵染 80% 以上陆地高等植物^[30]。本研究结果表明,接种 AM 真菌处理组滇重楼根际土壤中的孢子密度显著增加,S2 真菌组合对滇重楼根际土壤孢子密度增加具有显著作用。从接种时期看,接种时间的增长有助于 AM 真菌种群的增长。并且各个时期的 AM 真菌侵染率均在 80% 以上,表明各时期的滇重楼幼苗根系均能与 AM 真菌形成良好的共生关系。

现有研究表明,接种 AM 真菌可增加根际土壤和滇重楼药材中相关营养元素的含量,从而起到提

高重楼品质的作用^[14]。9个AM真菌处理组滇重楼根际土壤中,含氮养分较CK组表现出不同程度的降低,而速效磷和速效钾与CK组相比均显著提高,土壤pH也提高到滇重楼的最适pH范围内。同一处理组菌根化栽培种源T7时期及野生种源T4时期土壤养分含量总体较高,表明接种AM真菌提高了滇重楼根际土壤肥力,并且早期接种更有利于重楼幼苗的生长。

土壤微生物数量可以直接影响到土壤生化活性及其养分的组成和转化,研究土壤微生物数量和土壤性质的相关性,一方面有助于营造出最佳生态效益,保持水土;另一方面可以防止土壤肥力衰退,改善生态环境^[31]。本研究结果表明接种AM真菌提高了土壤微生物丰富度,在土壤中微生物群落结构方面,S3,S5和S8处理组滇重楼根际土壤中细菌/放线菌和真菌/放线菌的比值都小于CK组,而细菌/真菌比值大于CK组,说明这3个处理组的土壤中病原菌潜在危害较小,适宜滇重楼幼苗的生长发育。2年生滇重楼实生苗(T8)根际土壤中微生物结构变化最为显著,表明随着接种年限的增长,土壤微生物结构向更健康的方向发展。同时,接种丛枝菌根真菌及接种时期的增长对滇重楼幼苗根际土壤微生物数量的影响也间接影响了土壤生物量碳含量的改变。土壤微生物生物量是土壤养分的储库和药用植物生长可利用养分的重要来源之一^[32]。9个处理组不同接种时期中,T7,T8时期的生物量碳含量与其他时期相比含量较高,与微生物结构变化规律一致,表明早期接种AM真菌有利于土壤肥力的增长与稳定。

土壤酶活性是土壤肥力和土壤养分转化能力的重要标志,土壤酶参与土壤中的一切生物化学过程,在土壤生态系统中起着重要作用。土壤蛋白酶和脲酶参与土壤氮素的转化;土壤磷酸酶能加快土壤有机磷的脱磷速度,提高速效磷含量;土壤过氧化氢酶通过分解土壤中过氧化氢减轻其对植物毒害作用;土壤蔗糖酶分解高分子有机物为葡萄糖和果糖,改善土壤营养状况^[33-34]。本研究中AM真菌接种时期对滇重楼幼苗根际土壤酶活性的影响不尽相同,部分达到显著性差异。接种AM真菌后磷酸酶和蛋白酶活性增长率高于其他土壤酶活性,表明磷酸酶和蛋白酶对接种丛枝菌根真菌的反应更为敏感。S2,S3,S4,S5,S6处理组的T4和T5时期土壤酶活性整体较高,说明接种这几种组合的AM真菌有利于滇重楼1年生实生苗和野生种源幼苗的

生长。

相关性分析表明,在接种AM真菌后,侵染率与多种指标呈现一定相关性,与孢子密度,土壤pH,细菌数量及多种土壤酶呈正相关,与土壤含氮养分呈负相关,表明接种AM真菌对土壤理化性质及微生物数量影响显著。同时,土壤中各个因子之间存在着一定的相关性,其中蛋白酶与孢子密度,细菌数量呈正相关,与全氮、全钾、速效氮及硝态氮呈负相关,表明滇重楼幼苗根际土壤肥力是多种土壤因子的复合作用结果,各土壤因子之间既存在协同作用,又存在拮抗作用。在接种AM真菌后,AM真菌提高了包括蛋白酶在内的多种土壤酶活性,蛋白酶对氮素具有分解作用,使植物体更容易吸收土壤中的氮素,进而使土壤中的各类氮素明显降低,因此接种AM真菌后含氮的土壤养分与侵染率呈负相关,但整体上土壤的其他营养成分呈上升状态。

综上所述,接种AM真菌对滇重楼根际土壤微生物数量、微生物生物量碳、土壤养分及酶活性等相关土壤因子均起到了一定的调节作用,但不同接种时期对滇重楼幼苗根际土壤产生的影响不同。总体上,T1,T4,T7及T8时期的各土壤指标相比其他时期改善更为明显。AM真菌组合中,S2,S3,S4,S6,S8处理组对根际土壤相关因子影响更为显著。接种适宜的AM真菌改善了滇重楼幼苗根际土壤结构,提高了土壤养分及土壤酶活性,增加了土壤微生物数量,适宜的土壤有利于滇重楼幼苗的生长发育,增强其对外界生态环境适应能力,从一定程度上可以提高滇重楼品质和产量。

[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,2015:260.
- [2] 赵飞亚,陶爱恩,夏从龙. 基于国内专利结合资源、应用与开发现状的重楼发展策略探讨[J]. 中国中药杂志,2018,43(2):404-409.
- [3] 张华,孙纪全,包玉英. 丛枝菌根真菌影响植物次生代谢产物的研究进展[J]. 农业生物技术学报,2015,23(8):1093-1103.
- [4] 杨应,蒋长洪,何跃军,等. 丛枝菌根网对喀斯特适生植物氮、磷化学计量特征的影响[J]. 植物生理学报,2017,53(12):2078-2090.
- [5] 金樑,陈国良,赵银,等. 丛枝菌根对盐胁迫的响应及其与宿主植物的互作[J]. 生态环境,2007(1):228-233.
- [6] 郭涛,刘先良,申鸿. 丛枝菌根菌丝桥传递作用对烟

- 草抗病性相关酶活性的影响[J]. 植物保护学报, 2015, 42(3): 390-395.
- [7] 孟静静, 贺学礼. 干旱胁迫下AM真菌对丹参生长和养分含量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2011, 34(1): 51-55, 61.
- [8] 杨敏, 张杰, 张德全, 等. 丛枝菌根真菌对掌叶大黄产量及次生代谢产物的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(10): 33-37.
- [9] 母茂君, 聂松莹, 王莺, 等. 太白贝母根际区土壤养分变化规律[J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(7): 189-194.
- [10] 赵秀山, 赵秀云, 唐艳领, 等. 丛枝菌根真菌修复设施蔬菜连作障碍机制[J]. 中国瓜菜, 2018, 31(1): 1-4.
- [11] 杜俊卿. 接种丛枝菌根真菌对不同绿化植物根际微环境的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 149-152.
- [12] 太光聪, 方其仙, 李行, 等. 滇重楼栽培技术及有效成分积累研究综述[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(16): 8881-8883.
- [13] 张华, 郭冬琴, 周浓, 等. 丛枝菌根化滇重楼幼苗根际土壤微环境的研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1845-1851.
- [14] 张海珠, 李杨, 张彦如, 等. 菌根真菌处理下滇重楼对营养元素的吸收和积累[J]. 环境化学, 2019, 38(3): 615-625.
- [15] 黄艳萍, 张杰, 杨敏, 等. 接种时期对丛枝菌根真菌侵染的滇重楼幼苗生长发育及甾体皂苷含量的影响[J]. 中草药, 2019, 50(18): 4438-4448.
- [16] 唐超, 李敏, 刘永举, 等. 单一及复合AM真菌初侵染对番茄苗的生理影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(13): 114-119.
- [17] GERDEMANN J W. Relation of a large soil-borne spore to phytomycetous mycorrhizal infections [J]. *Mycologia*, 1955, 47(5): 619-632.
- [18] 左龙亚, 郭冬琴, 周浓, 等. 8属22种AM真菌增殖技术的初步研究[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(11): 1281-1283.
- [19] TROUVELOT A, KOUGH J L, GIANINAZZI-PEARSON V. *Mesure Du Taux De Mycorrhization VA D'un Système Radiculaire. Recherche de Méthodes D'estimation Ayant Une Signification Fonctionnelle* [M]. Paris: INRA Publications, 1986.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-24.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 146-195.
- [22] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 32-45.
- [23] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6): 703-707.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 274-339.
- [25] 周浓, 张德全, 孙琴, 等. 真菌诱导子对滇重楼中次生代谢产物甾体皂苷的影响研究[J]. 药学报, 2012, 47(9): 1237-1242.
- [26] 杨永红, 戴丽君, 何昆鸿, 等. 土壤营养与人工栽培滇重楼品质相关性评价[J]. 中药材, 2012, 35(10): 1557-1561.
- [27] 张静, 肖国生, 周浓, 等. 三峡库区栽培重楼属药用植物根际土壤微生物数量和酶活性的变化[J]. 中国中医药信息杂志, 2016, 23(10): 95-99.
- [28] BARDGETT R D, FRANKLAND J C, WHITTAKER J B. The effects of agricultural practices on the soil biota of some upland grasslands [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 1993, 45(2): 25-45.
- [29] 段佳丽, 舒志明, 魏良柱, 等. 丹参红叶病发生的微生态机制[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1991-1999.
- [30] 闫飞扬, 段廷玉, 张峰. 农业管理措施对AM真菌功能影响的研究进展[J]. 草业科学, 2014, 31(12): 2230-2241.
- [31] KEUN H K, STEPHAN P. Landscape character, biodiversity and land use planning: the case of Kwangju City Region, South Korea [J]. *Land Use Policy*, 2007, 24(1): 264-275.
- [32] 欧洪, 郭冬琴, 林俊杰, 等. AM真菌对滇重楼根际土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 中药材, 2016, 39(5): 948-955.
- [33] 闫瑞瑞, 闫玉春, 辛晓平, 等. 不同放牧梯度下草甸草原土壤微生物和酶活性研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 259-265.
- [34] 张友杰, 刘国顺, 叶协锋, 等. 烤烟不同生育期土壤酶及微生物活性的变化[J]. 土壤, 2010, 42(1): 39-44.

[责任编辑 顾雪竹]