



王乐, 高游慧, 高永, 徐鹏举, 裴海军, 胡跃高. 肥料种类及其不同施用方式对黄芪有机生产的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(06): 86-101.
WANG Le, GAO Youhui, GAO Yong, XU Pengju, PEI Haijun, HU Yuegao. Effects of fertilizer types and their different application methods on the organic production of *Astragalus membranaceus*[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 86-101.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.10

肥料种类及其不同施用方式对黄芪有机生产的影响

王乐¹ 高游慧^{1*} 高永² 徐鹏举³ 裴海军⁴ 胡跃高¹

(1. 中国农业大学农学院, 北京 100193;

2. 贵州农业职业学院, 贵阳 551499;

3. 山西省灵丘县现代农业发展中心, 山西 灵丘 034400;

4. 山西省灵丘县农村改革与经济事务中心, 山西 灵丘 034400)

摘要 为探索适合中药材有机生产的施肥技术, 以山西省道地药材-黄芪(*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge)为研究对象, 在山西省灵丘县设置化肥(C)、有机肥(O)、有机肥+矿物肥(OM)、有机肥+矿物肥+微生物肥(移栽时蘸根)(OMD)、有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期灌根)(OMI)、有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期喷施)(OMS)6个处理对二年生黄芪的生长发育、产量、品质和土壤微生物影响的研究。结果表明: OMD地下部产量最高, 较C处理产量提高13.25%, 较O处理产量提高了35.75%; OMD处理可以显著提高黄芪多糖和总黄酮的含量, 较CK处理分别提高了20.88%和98.50%; OMD和OMI处理对根体积、根长和根系干物质积累的促进作用显著高于C处理; 土壤微生物高通量测序结果表明, OMD处理提高了土壤中放线菌门(Actinobacteria)和绿弯菌门(Chloroflexi)丰度。综合考虑得出有机肥+矿物肥+微生物肥(移栽时蘸根)为最优处理方式。

关键词 有机生产; 黄芪; 有机肥; 矿物肥; 微生物肥

中图分类号 S345

文章编号 1007-4333(2024)06-0086-16

文献标志码 A

Effects of fertilizer types and their different application methods on the organic production of *Astragalus membranaceus*

WANG Le¹, GAO Youhui^{1*}, GAO Yong², XU Pengju³, PEI Haijun⁴, HU Yuegao¹

(1. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Guizhou Vocational College of Agriculture, Guiyang 551499, China;

3. Modern Agricultural Development Center of Lingqiu County, Lingqiu 034400, China;

4. Center for Rural Reform and Economic Affairs, Lingqiu County, Lingqiu 034400, China)

Abstract In order to explore the optimal fertilization technology for the organic production of Chinese medicinal materials, *Astragalus membranaceus*, a native medicinal material in Shanxi Province, was studied in Lingqiu County, Shanxi Province. Six different treatments including fertilizer (C), organic fertilizer (O), organic fertilizer+mineral fertilizer (OM), organic fertilizer+mineral fertilizer+microbial fertilizer (dip roots during transplanting period) (OMD), organic fertilizer+mineral fertilizer+microbial fertilizer (full bloom period) (OMI) and organic fertilizer+mineral fertilizer+microbial fertilizer (spraying during the flowering

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(2021YFD1901103)

第一作者: 王乐(ORCID: 0000-0003-1241-6276), 博士研究生, E-mail: wl15034595059@163.com

通讯作者: 高游慧(ORCID: 0009-0008-0415-1830), 博士后, 主要从事全域有机农业研究, E-mail: gyohui@cau.edu.cn

stage) (OMS) were designed. The effects of the 6 treatments on the effects of growth and development, yield, quality, and soil microorganisms of biennial *A. membranaceus* were studied. The results showed that: The yield of OMD underground was the highest, which was 13.25% higher than that of C treatment and 35.75% higher than that of O treatment. Compared with CK treatment, OMD treatment significantly increased the content of *Astragalus polysaccharide* and total flavone by 20.88% and 98.50%, respectively. The effects of OMD and OMI treatment on root volume, root length and root dry matter accumulation were significantly higher than those of C treatment. The results of high-throughput sequencing showed that OMD treatment increased the abundance of Actinobacteria and Chloroflexi in soil. After comprehensive consideration, it is concluded that organic fertilizer+mineral fertilizer+microbial fertilizer (dipping root during transplanting) is the most optimal treatment method.

Keywords organic production; *Astragalus membranaceus*; organic fertilizer; mineral fertilizer; microbial fertilizer

近年来,世界天然药物的价格呈持续增高趋势,然而我国中药材的出口价格却不断跌落。这与我国中药材生产过程中不合理使用化肥、农药等造成农药与重金属含量超标、中药材品质下降息息相关^[1-2]。无公害农业和有机农业的相继出现,不仅为解决中药材栽培过程中出现的问题提供了发展思路,也促进了无公害中药材的发展。有机农业严格的生产标准和“健康、生态、公平、关爱”的原则,不仅能保证中药材优良的品质,为中药材的可持续发展奠定良好的基础,而且还能够修复土壤、改善环境^[3-4]。因此,只有发展有机中药材生产,才能更好地进行中药材生产、研究和开发,为我国中药材生产与国际接轨创造良好的条件。

黄芪(*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge)是常见大宗药材,素有“十药八芪”之称,具有补气升阳和利水消肿等功效,其根、茎和叶均有较高的药用价值^[5-7]。随着黄芪的需求量不断增大,野生黄芪资源逐渐减少,急需发展人工栽培来满足国内外市场对黄芪的需求^[8]。山西省是黄芪的主产区之一,也是出口黄芪的主产地^[9]。山西省具有独特的地理位置和复杂的地形地貌,50%的农田多集中在偏远的山区或贫困地区,农民很少或完全不用化肥农药;并且还拥有丰富的精耕细作和用养结合等方面的种植经验,这为山西省有机中药材生产奠定了良好的基础^[10]。

肥料是中药材优质高产的基础,施肥不当会使中药材出现重金属超标、病虫害严重和土壤板结等问题^[11]。在中药的种植过程中,不仅需要合理施肥实现优质高产,而且还要注重土壤的生物活性^[12]。但是,目前大部分对中药材合理施肥的研究主要集中于有机肥、无机肥对中药材生长和产量的影响,

以及证明某种营养元素或元素配比对药用有效成分和中药材产量的作用^[13-16]。施肥的不同会引起土壤中微生物的数量、群落结构和活性的差异^[17]。有机肥的施用可以改善微生物的群落结构,提高生物量^[18]。微生物肥的施用可以改善微生物群落,施用方式有浸种、灌根和叶面喷施^[19-20]。有研究表明通过有机肥、矿物肥和微生物肥的配施可以有效改善作物的生长^[21]。而有机肥、微生物肥和矿物肥合理配套组合对中药材的生长发育、产量、品质及土壤微生物的影响研究未见报道。因此,本研究对有机肥、微生物肥和矿物肥部分配套组合进行微生物肥蘸根、灌根和叶面喷施操作,开展不同肥料处理对中药材生长发育、产量、品质以及土壤微生物的影响研究,为有机中药材发展提供技术指导和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018年4—11月在山西省大同市灵丘县落水河乡(39°45′72″N, 114°05′23″E)进行。灵丘县属温带半干旱大陆性气候,全县年平均气温7℃,平均大于5℃的积温3 329.5℃,无霜期一般在150 d左右,年平均降水量为432.4 mm。试验地表层土壤(0~20 cm)理化性质为:pH值8.30,有机质质量分数为7.23 mg/kg,全氮质量分数为0.47 g/kg,速效磷质量分数为9.34 mg/kg,速效钾质量分数为108.21 mg/kg。

1.2 试验材料

“黄芪商品规格等级标准”并没有相应的规格区分^[22],市场上流通的黄芪品种以蒙古黄芪为主,并大多为采用育苗移栽生长2年^[23],因此本试验黄

芪品种为‘蒙古棉芪’(*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao), 试验材料为落水河宝鼎合作社培育的1年生黄芪幼苗进行移栽1年后得到的两年生黄芪。有机肥购买当地羊粪,并充分发酵腐熟,全氮含量为2.43%,含水率为28.40%。化肥为落水河宝鼎合作社常用富S时代硫酸钾复合肥料,N-P₂O₅-K₂O为15-15-15,总养分≥45%,由落水河宝鼎合作社提供。微生物肥由北京六合神州生物技术有限公司提供,该微生物肥为多种微生物菌株混合而成,吸附基质为褐煤;其中有效活菌数≥2×10⁸个/g,全氮质量分数为8.05 g/kg,全磷质量分数为26.57 g/kg,全钾质量分数为2.19 g/kg。矿物肥由山西世纪亚科丰肥料有限公司提供,主要指标含量:K₂O≥4.0%,CaO≥

30.0%, MgO≥16.0%, SiO₂≥12.0%, pH 为11.0~12.0。

1.3 试验设计

该试验采用完全随机设计,对1年生黄芪幼苗进行移栽试验,前茬作物为柴胡。该试验以落水河宝鼎合作社常用施肥量1 500 kg/hm²复合肥(N-P₂O₅-K₂O为15-15-15)即纯氮含量225 kg/hm²为基准,进行等氮处理。根据有机肥的全氮含量及含水率计算有机肥的使用量,有机肥、矿物肥基施,矿物肥及微生物肥用量较少,其中的氮磷钾含量较低可忽略不计。该试验共设计7个处理,具体施肥方式见表1,每个处理重复4次,共28个小区。小区面积为5 m×6 m,四周种植4 m宽的保护行,每个小区之间留有30 cm宽过道。

表1 试验处理
Table 1 Test processing

处理 Treatment	处理方式 Treatment method	肥料用量/(kg/hm ²) Fertilizer dosage
CK	不施肥	0
C	化肥	1
O	有机肥	32 143
OM	有机肥+矿物肥	32 143+750
OMD	有机肥+矿物肥+微生物肥(移栽时蘸根)	32 143+750+75
OMI	有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期灌根)	32 143+750+75
OMS	有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期喷施)	32 143+750+75

1.4 测定项目及方法

1.4.1 根系性状测定

待黄芪幼苗出土后,分别于2018年5月30日、7月4日、7月29日、9月3日和10月26日取黄芪植株样品,即黄芪移栽后30、65、90、125和180 d时进行取样。采用随机取样法选取黄芪植株,选取12株黄芪,用直尺测量其根长,用排水法测定根体积。

1.4.2 干物质积累量测定

按照1.4.1方法进行取样,每个小区选取的植株样品分成根和茎叶两部分,分别测定地上部分鲜重及地下部分鲜重即根系的鲜重,随后在烘箱内105℃杀青10 min,70℃烘干至恒重,并称干重。

1.4.3 产量测定

药用植物栽培的目的是获得较多有经济价值

的药材。实际栽培药用植物的产量包括两部分:生物产量和经济产量。人们常说的产量是指有经济价值的药材的总量,根类药用植物的经济产量即根系产量^[24]。

生物产量测定方法:在收获期每小区收获1 m²,测定根系的鲜重,并折算成公顷产量。

1.4.4 黄芪有效成分的测定

黄芪收获后测定黄芪干燥根中的黄芪多糖及总黄酮含量。黄芪多糖含量采用苯酚-浓硫酸比色法测定^[25-26],总黄酮含量采用紫外分光光度法测定^[27]。根据黄芪生长状况和黄芪多糖、总黄酮含量筛选处理,选出CK、O、C、OM和OMD处理进行分析,参照2015年版《中国药典》中规定的黄芪药材质量检测方法对黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含

量进行测定^[28]。

1.4.5 土壤微生物高通量测序

为了探究不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响,根据黄芪生长状况和黄芪品质筛选处理,筛选出CK、O、C、OM和OMD处理进行土壤分析。土壤采用五点取样法,将每个小区的5个采样点的土样混匀为1份土壤,每个处理重复3次;去除土样中石块、动植物残体后带回实验室于-80℃冰箱保存,用于16S rRNA高通量测序分析。委托上海美吉生物医药科技有限公司对样品进行DNA提取与纯化、PCR扩增和建库,利用Illumina MiSeq系统进行双端测序,测序完成后在美吉云平台上进行分析(<https://cloud.majorbio.com/>)。

1.5 数据统计及分析

试验数据采用Microsoft Excel 2016进行数据处理、表格制作、平均数、标准差的计算以及简单图表的绘制,利用SPSS 26.0进行统计分析($P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著)。

2 结果与分析

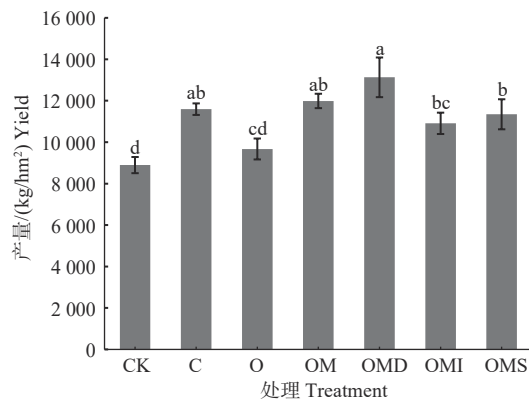
2.1 不同肥料处理对黄芪产量的影响

不同肥料对黄芪产量(鲜重)的影响见图1。各施肥处理的产量均显著高于CK($P<0.05$),且OMD地下部产量最高,较CK处理产量显著提高47.61%($P<0.05$),较C处理产量提高13.25%,较O处理产量显著提高了35.75%($P<0.05$),较OM处理产量提高了9.51%。OM和C处理间没有显著差异,OMI和OMS处理间没有显著差异,但均显著高于CK处理($P<0.05$)。各处理产量的排序为OMD>OM>C>OMS>OMI>O>CK。结果表明单施有机肥较单施化肥的产量会有所降低,但是通过有机肥配施矿物肥或有机肥配施矿物肥和微生物肥方式可以显著提高有机黄芪的产量,达到与单施化肥相当的水平,实现有机黄芪不减产。微生物肥的施用方式对产量影响显著,最佳的施用方式为移栽时蘸根,通过有机肥+矿物肥+微生物肥的施肥方式,可以显著提高有机黄芪产量,并超过单施化肥的水平。

2.2 不同肥料处理对黄芪品质的影响

2.2.1 对黄芪多糖的影响

不同肥料处理对黄芪多糖含量的影响不同,结果如图2所示。不同处理黄芪多糖含量整体表现为



CK:不施肥;C:化肥;O:有机肥;OM:有机肥+矿物肥;OMD:有机肥+矿物肥+微生物肥(移栽时蘸根);OMI:有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期灌根);OMS:有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期喷施)。不同小写字母代表不同处理间在0.05水平差异显著($P<0.05$)。下同。

CK: No fertilization; C: Chemical fertilizer; O: Organic fertilizer; OM: Organic fertilizer+Mineral fertilizer; OMD: Organic fertilizer+Mineral fertilizer+Microbial fertilizer (dip roots during transplanting period); OMI: Organic fertilizer+Mineral fertilizer+Microbial fertilizer (full bloom period); OMS: Organic fertilizer+Mineral fertilizer+Microbial fertilizer (spraying during the flowering stage). Different lower case letters indicate significant differences ($P<0.05$) between the treatments. The same below.

图1 不同肥料处理对黄芪产量的影响

Fig. 1 Effects of different fertilizer treatments on the yield of *A. membranaceus*

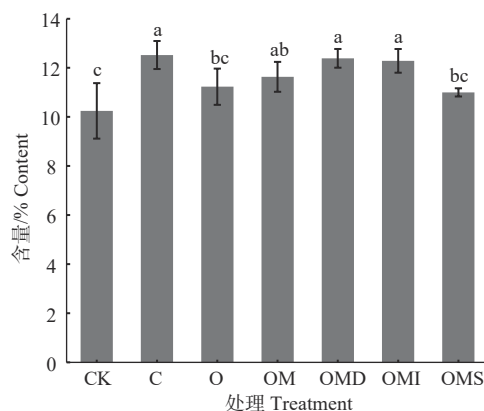


图2 不同肥料处理对黄芪多糖含量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilizer treatments on the content of A. polysaccharides in *A. membranaceus*

C>OMD>OMI>OM>O>OMS>CK。C、OMD和OMI处理的多糖含量显著高于O、OMS和CK处理($P<0.05$);C处理的多糖含量最高,较O、OMS和CK处理的多糖含量分别高出11.49%、13.82%和22.15%;C处理与OMD、OMI处理没有显著差

异。OM处理的多糖含量显著高于CK($P<0.05$), O、OMS和CK处理之间没有显著差异。研究结果表明C、OM、OMD和OMI处理可以显著增加黄芪多糖的含量($P<0.05$)。

2.2.2 对黄芪总黄酮含量的影响

不同肥料处理对黄芪总黄酮含量的影响见图3。除O处理的黄芪总黄酮含量与CK没有显著差异外,其他肥料处理的总黄酮含量均显著高于CK处理($P<0.05$),但是在O处理下每克黄芪中总黄酮质量较CK提高了1.48 mg。OMD处理的黄芪总黄酮质量分数最高,高达6.63 mg/g,较CK处理显著提高98.50%;C、OM、OMI和OMS处理间没有显著差异,但均较CK处理显著提升,总黄酮含量具体表现为OMD>OMS>OMI>C>OM>O>CK。试验表明施肥会在一定程度上增加黄芪总黄酮的含量,单施有机肥的增加效果不太明显,有机肥、矿物肥和微生物肥3种肥料组合可以显著提高黄芪总黄酮的含量。

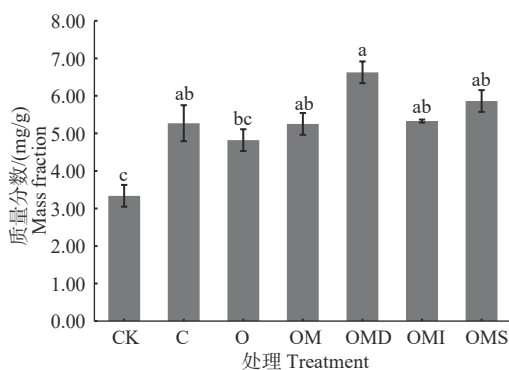


图3 不同肥料处理对黄芪总黄酮含量的影响

Fig. 3 Effect of different fertilizer treatments on the content of total flavonoids in *A. membranaceus*

2.2.3 对黄芪甲苷含量的影响

不同肥料处理对黄芪甲苷含量的影响研究结果见图4。OM处理的黄芪甲苷含量最高,为0.149%,较CK处理显著提高19.20%;O处理的黄芪甲苷含量最低,为0.102%,较CK处理降低了18.13%;C和OMD处理的黄芪甲苷含量与CK没有显著差异。黄芪甲苷含量具体表现为OM>C>CK>OMD>O。表明施肥会在一定程度上增加黄芪甲苷的含量,有机肥和矿物肥2种肥料组合可以显著提高黄芪甲苷的含量。

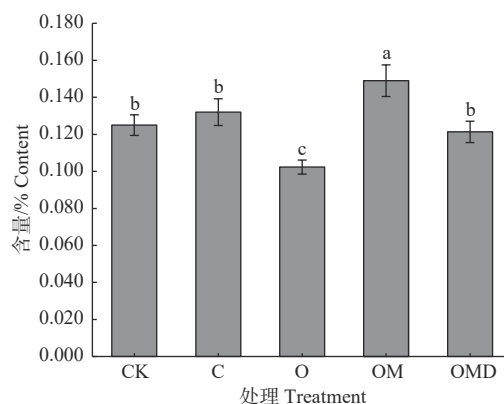


图4 不同肥料处理对黄芪甲苷含量的影响

Fig. 4 Effects of different fertilizer treatments on the content of astragaloside IV in *A. membranaceus*

2.2.4 对毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的影响

不同肥料处理对毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的影响结果如图5所示。C处理的毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量与CK没有显著差异,O、OM和OMD处理间毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量没有显著差异,但C和CK处理的毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量均显著高于O、OM和OMD处理,毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量具体表现为CK>C>O>OM>OMD。表明施肥会影响毛蕊异黄酮葡萄糖苷的含量,单施化肥影响不显著,对毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的增加效果不太明显,有机肥的施用显著影响毛蕊异黄酮葡萄糖苷的含量。

2.3 不同肥料处理对黄芪干物质积累的影响

作物干物质积累是反映其田间生长动态的重要指标,对黄芪根系及茎叶干物质的积累进行研究

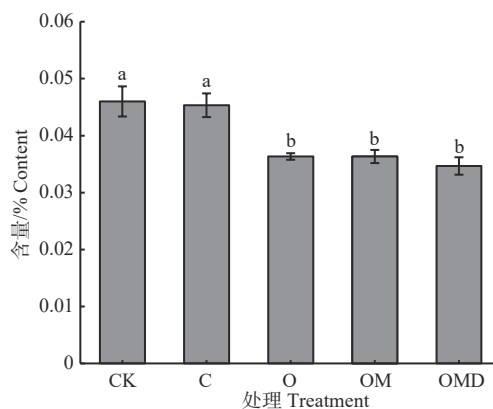


图5 不同肥料处理对毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的影响

Fig. 5 Effect of different fertilizer treatments on the content of calycosin-7-glucoside in *A. membranaceus*

究,结果如表 2 和图 6 所示。黄芪根系干物质积累从出苗至收获呈不断增加的趋势,且在移栽 90 d 后根系干物质积累速度明显增加。移栽后 30 d,OMD 处理的根系干物质积累量为 0.99 g/株,显著高于其他处理($P<0.05$);O 处理的根系干物质积累量为 0.59 g/株,其根系干物质积累量最低。移栽后 65 d,OMD 处理的根系干物质积累量为 2.75 g/株,依然显著高于其他处理($P<0.05$),O、OM 和 OMI 处理的根系干物质积累量显著高于 CK、C 和 OMS 处理($P<0.05$)。移栽后 90 d,C 处理根系干物质积累量显著高于除 OMD 处理外的其他处理($P<0.05$),OM 和 CK 处理显著低于其他处理($P<0.05$)。移栽后 125 d,除 OM 处理,其余施肥处理下根系干物质积累量均显著高于 CK($P<0.05$),排序依次为 OMS>OMD>O>C>OMI>OM>CK。收获时(移栽后 180 d),施肥处理下的根系干物质积累量均显著高于 CK($P<0.05$),OMD 和 OMI 处理的根系干物质积累量没有显著差异,OMI 处理的根系干物质积累量显著高于 OMS、C、O 及 CK 处理($P<0.05$)。整体看来,OMD 和 OMI 处理在黄芪的整个生长周期中根系干物质积累量均处于较高的水平,说明 OMD 和 OMI 处理对根系干物质的积累有显著促进的作用。

如图 6 所示,不同肥料处理黄芪茎叶干物质积累呈现先增加后减小的趋势,在生育期中整体呈现“抛物线”生长的趋势。在移栽后 90 d 时出现最高峰,移栽 90 d 后,茎叶干物质积累量逐渐下降,地上部光合产物逐渐向地下部转移,黄芪生长重心从地上部转移到地下部。在移栽 65 d 后叶面喷施微生物肥,使得 OMS 处理茎叶干物质积累迅速增加,在移栽 90 d 后下降;但 OMD 处理在移栽时蘸根,使得移栽后 90 d 时的茎叶干物质积累量仍保持增加,移栽后 125 d 时的茎叶干物质积累量达到最大值;O 处理也促进了茎叶干物质积累量的提高。研究表明有机肥、矿物肥和微生物肥的合理施用可以促进黄芪地上部生长,能够持续的为地上部的生长提供营养,延长地上部的生长时期。

2.4 不同肥料处理对黄芪根长和根体积的影响

根体积和根长是影响黄芪产量及等级的直接因素,不同肥料处理对黄芪根体积及根长的研究结果如表 4 和 5 所示。随着黄芪的生长,黄芪的根体积呈现逐渐增加的趋势,尤其在 9 月 3 日之后即移

表 2 不同肥料处理在不同移栽期对黄芪根系干物质积累的影响

Table 2 Effect of different fertilizer treatments on the root dry matter accumulation of *A. membranaceus* at different

处理 Treatment	根系干物质积累量 Root dry matter accumulation				
	g/株				
	30 d	65 d	90 d	125 d	180 d
CK	0.71 b	1.81 c	2.52 c	4.23 c	9.20 d
C	0.65 bc	1.87 c	4.03 a	5.83 ab	14.20 bc
O	0.59 c	2.37 b	3.56 b	6.44 a	13.42 c
OM	0.74 b	2.50 b	2.66 c	5.02 bc	15.05 abc
OMD	0.99 a	2.75 a	3.84 ab	6.47 a	15.82 ab
OMI	0.66 bc	2.35 b	3.46 b	5.53 ab	16.38 a
OMS	0.66 bc	1.86 c	3.49 b	6.51 a	14.28 bc

注:不同处理字母代表含义见表 1。不同小写字母代表不同处理间在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The meanings of different processing letters are shown in Table 1. Different lower case letters indicate significant differences ($P<0.05$) between the treatments. The same below.

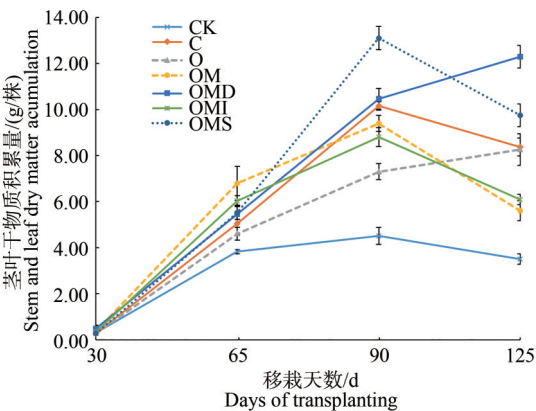


图 6 不同肥料处理对黄芪茎叶干物质积累的影响

Fig. 6 Effect of different fertilizer treatments on the stem and leaf dry matter accumulation of *A. membranaceus*

栽 125 d 后根系体积迅速增加。在移栽后 65 d 时,OMD 处理的根体积显著高于其余处理($P<0.05$),O 和 OM 处理的根体积显著高于 OMI、OMS、C 及 CK 处理($P<0.05$),OMI 处理的根体积显著高于 OMS 和 C 处理($P<0.05$),OMS、C 与 CK 处理的根

表 4 不同肥料处理在不同移栽期对黄芪根体积的影响

Table 4 Effect of different fertilizer treatments on root volume of *A. membranaceus* at different transplanting stages
 cm³

处理 Treatment	根体积 Root volume				
	30 d	65 d	90 d	125 d	180 d
CK	4.58 c	6.60 cd	10.43 cd	10.83 d	26.13 e
C	1.78 e	6.58 d	10.13 d	11.43 d	33.75 cd
O	7.93 a	10.03 b	11.29 cd	20.50 ab	31.98 d
OM	3.25 d	9.88 b	11.40 c	15.08 c	40.50 a
OMD	5.83 b	11.63 a	17.58 a	20.50 ab	41.50 a
OMI	4.43 c	7.60 c	12.88 b	17.58 bc	38.88 ab
OMS	2.98 d	6.78 d	11.00 cd	21.75 a	35.95 b

表 5 不同肥料处理在不同移栽期对黄芪根长的影响

Table 5 Effect of different fertilizer treatments on root length of *A. membranaceus* at different transplanting stages
 cm

处理 Treatment	根长 Root length				
	30 d	65 d	90 d	125 d	180 d
CK	19.33 d	20.18 e	26.60 d	62.23 f	28.35 c
C	20.93 d	23.90 d	34.90 c	68.03 e	35.60 a
O	28.15 bc	30.73 ab	37.50 bc	72.38 cd	34.85 a
OM	30.90 a	31.48 a	36.38 bc	75.05 bc	36.85 a
OMD	29.60 ab	30.05 abc	41.68 a	82.15 a	35.50 a
OMI	27.50 c	28.75 bc	38.73 b	76.45 ab	30.93 b
OMS	28.15 bc	28.40 c	35.15 c	71.58 d	31.75 b

体积没有显著差异。移栽后 180 d 即收获时,各施肥处理的根体积均显著高于 CK($P<0.05$),根体积的整体趋势为 OMD>OM>OMI>OMS>C>O>CK。OM 和 OMD 处理的根体积显著高于 OMS、C、O 和 CK 处理($P<0.05$),OMI 和 OMS 处理的根体积显著高于 C 和 O 处理($P<0.05$)。由此可见,在黄芪整个生长周期中,OM 和 OMD 处理在黄芪生育期中对根体积的增长有显著影响,在收获时表现最好;而 C 处理在整个生长周期根体积均处于较低的水平。

黄芪根长随着生长进程呈现先增加后减小的趋势,移栽 90 d 后增速明显,而收获时根长减小,分析其主要原因是在测量黄芪根长时,9 月 3 日时黄芪沿主根方向的须根较长,而且收获机器的下挖深度不足。在整个生长周期中,不同肥料处理对黄芪根长的影响与对根体积的影响相似,OM 和 OMD 处理处于较高的水平,C 处理处于较低的水平(表 5)。移栽 30 和 65 d 时,OM 和 OMD 处理对黄芪的根长促进作用显著;移栽后 90 d 时,OMD 处理的根长显著高于其余处理($P<0.05$),较 CK、C、O 和 OM 处理分别提高 56.69%、19.43%、11.15% 和 14.57%;移栽后 125 d,黄芪的平均根长为 72.55 cm,OMD 处理的根长为 82.15 cm,显著高于 O、OM、OMS、C 及 CK 处理($P<0.05$),C 和 CK 处理的根长为 68.03 和 62.23 cm,显著低于其他处理($P<0.05$)。收获时即移栽后 180 d,黄芪的平均根长为 33.40 cm,可见机械采收造成深层黄芪根系损失严重。OMD、OM、O 和 C 处理的根长显著高于 OMI、OMS 及 CK 处理($P<0.05$)。

通过不同肥料处理对黄芪根体积和根长影响的研究发现,OM 和 OMD 处理对黄芪根体积和根长有显著促进的作用。

2.5 不同肥料处理对黄芪根际土壤微生物群落丰富度和多样性的影响

ACE 指数和 Chao 指数是微生物丰富度的重要指标,Shanon 指数和 Pd 指数是微生物多样性的指标。除 C 处理外,其他施肥处理 α 多样性均较 CK 处理有所升高(图 7)。C 处理的 ACE 指数与 O 处理存在极显著差异($P<0.01$),OM 处理的 Chao 指数显著高于 C 处理($P<0.05$),O 处理的 Chao 指数、Shanon 指数和 Pd 指数均显著高于 C 处理($P<0.05$)。结果表明:O 和 OM 处理与 C 处理相比均可以显著增加土壤微生物的丰富度和多样性,并且存在显著性差异($P<0.05$)。

偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)结果表明(图 8),CK、C、O、OM 和 OMD 处理分别分布在 3 个象限,说明不同处理的微生物群落结构具有明显差异。CK 和 C 处理的微生物群落结构相似,与其他处理存在明显差异,受第一主成分(COMP1)影响较大;O 处理群落结构与其他处理具有明显差异,也受 COMP1 的影响较大;OM 和 OMD 处理群落结构组成相似,与其他处理存在明显差异,受第二主成分(COMP2)影响较大。

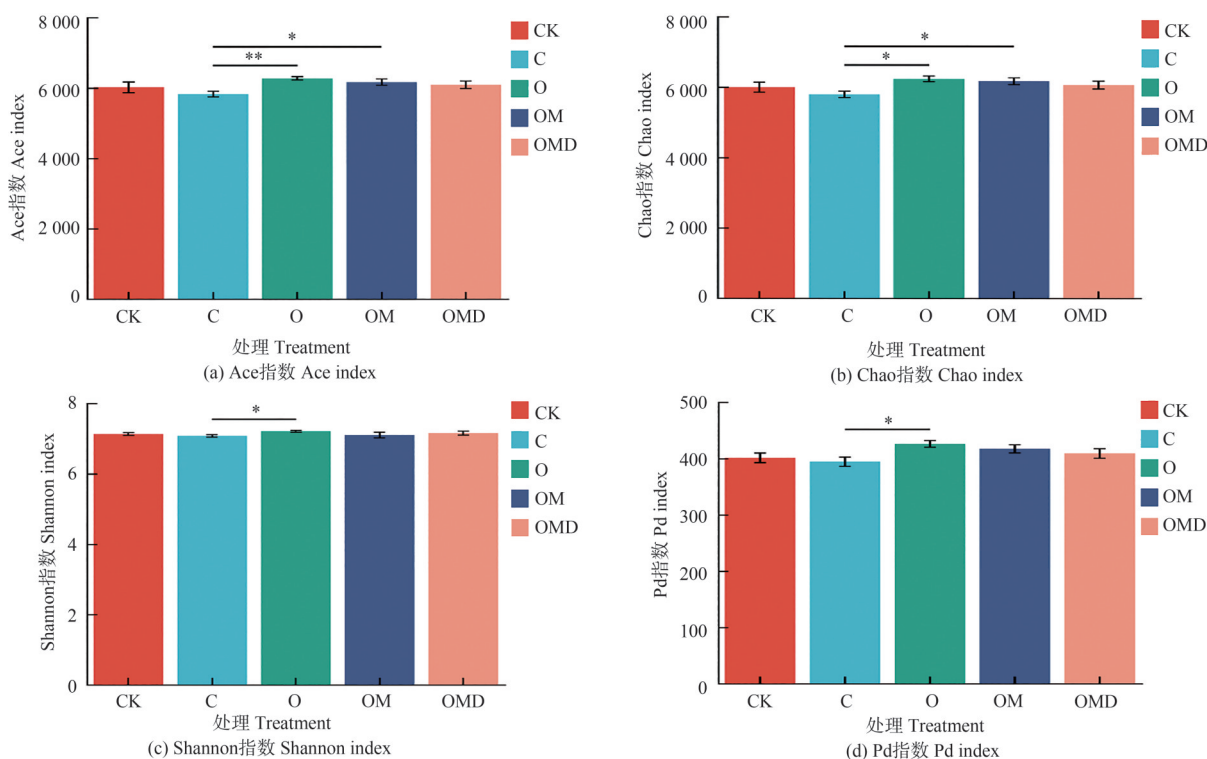
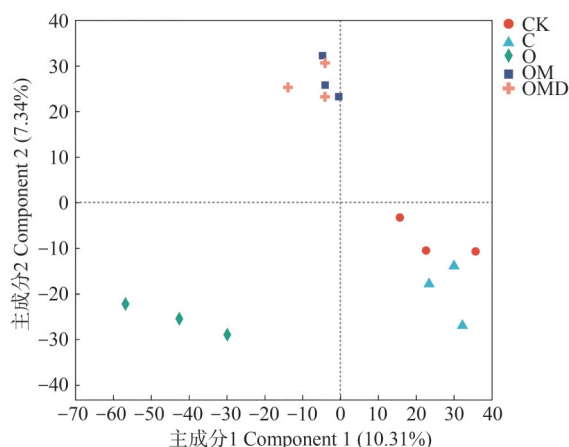
图7 不同施肥处理土壤微生物 α 多样性指数Fig. 7 Soil microbial α diversity index under different fertilization treatments

图8 不同施肥处理土壤微生物PLS-DA分析

Fig. 8 PLS-DA analysis of soil microorganisms under different fertilization treatments

2.6 不同肥料处理对黄芪根际土壤微生物群落组成的影响

通过上述结果表明微生物肥以移栽时灌根的施用方式最佳,因此分别对CK、C、O、OM和OMD处理的土壤样品进行了高通量测序,共检测出927 037条有效序列,平均序列长度为417.26 bp,各

组文库的覆盖率均达到97%以上,能够真实表明样本中细菌实际数量。

在门水平上,不同施肥处理下土壤微生物各处理的优势物种均为:放线菌门(Actinobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、浮霉菌门(Planctomycetes)、硝化螺旋菌门(Nitrospirae)、疣微菌门(Verrucomicrobia)、细菌未分类门(Unclassified_k_norank)、厚壁菌门(Firmicutes)、Saccharibacteria、GAL15和蓝藻门(Cyanobacteria),相对丰度分别为23.67%~25.92%、20.82%~25.07%、13.03%~16.72%、13.84%~15.01%、3.83%~5.64%、3.58%~4.18%、2.16%~2.54%、1.77%~2.75%、1.41%~1.67%、1.07%~1.30%、1.04%~1.30%、0.78%~1.28%、0.76%~1.17%、0.55%~1.43%和1.07%~1.30%。其中放线菌门在各处理中丰度均为最高。O、OM和OMD处理较CK和C处理降低了变形菌门和芽单胞菌门的相对丰度,但提高了放线菌门和绿弯菌门的相对丰度(图9)。

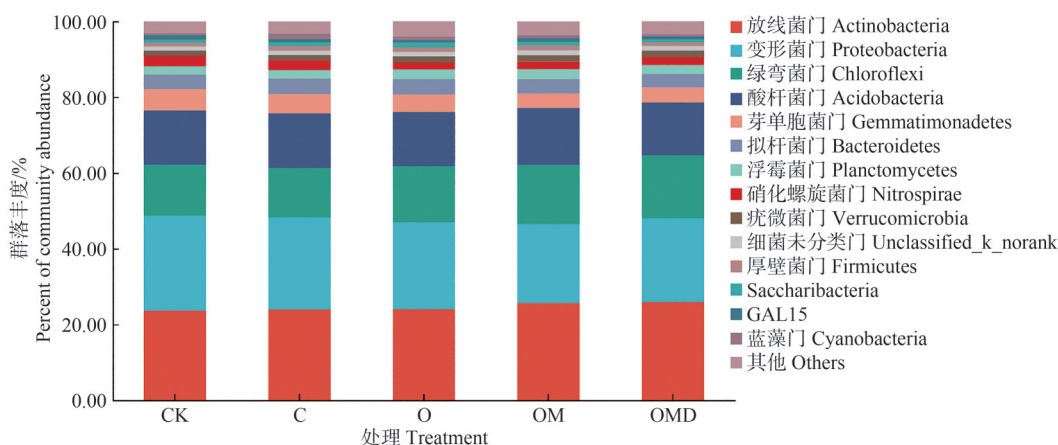


图9 门水平上不同肥料处理的主要土壤微生物群落相对丰度

Fig. 9 Relative abundance of major soil microbial communities under different fertilizer treatments on phylum level

交互物种关系 Circos图反映了每个处理中优势物种分布比例,以及各优势物种在不同处理中的分布比例(图10)。不同处理之间优势菌种相似,放线菌门是第一大优势菌,在CK、C、O、OM和OMD处理中的占比分别为:24%、24%、24%、26%和26%;第二大优势菌群为变形菌门,各处理的占比分别为:25%、24%、23%、21%和22%;第三大优势菌群为绿弯菌门,各处理的占比为:13%、13%、15%、16%和17%;第四大优势菌为酸杆菌门,各处理的占比为:14%、14%、14%、15%和14%。O、OM和OMD处理较CK、C处理降低了变形菌门的相对丰度,OM和OMD处理提高了放线菌门、绿弯菌门的相对丰度。

2.7 不同肥料处理对黄芪根际土壤微生物群落差异性的影响

在门水平上对不同处理之间物种差异进行分析发现(图11),OMD处理与CK相比能够显著增加放线菌门和绿弯菌门丰度($P<0.05$);OMD处理与C处理相比显著增加了放线菌门丰度($P<0.05$)、降低了芽单胞菌门($P<0.05$),极显著增加了绿弯菌门丰度($P<0.01$)。OM处理与C处理相比显著降低了芽单胞菌门丰度($P<0.05$),极显著增加了浮霉菌门丰度($P<0.01$)。表明施用有机肥、矿物肥和微生物肥相对于施用化肥促进了土壤中优势细菌群落的丰度。

3 讨论

3.1 不同肥料处理对黄芪产量的影响

土壤肥力是限制植物生长和产量形成最重要

的因素之一,施肥是提高药用植物产量和经济效益的最有效的方法^[29]。Al-Humaid^[30]研究发现随着复合肥施用量的增加,藏红花的产量也随之增加。Gardner等^[31]在美国开展有机氮肥对藿香、荆芥、益母草产量和效益的研究,结果表明施肥可以显著增加几种中药材的产量和经济效益。仲艳丽^[32]研究发现迷迭香在施用有机肥的基础上,再配以适量微生物肥能够得到低投入高产出的效果。刘军民等^[33]研究发现不同种类的生物有机肥均能显著提高中药材阳春砂的产量。Wang等^[34]研究表明生物有机肥能有效改善土壤条件,降低雏菊的连作障碍,从而提高连作系统中雏菊的产量。安世伟等^[35]研究发现不同有机肥作基肥均可显著增加黄芪的产量,增产幅度可达25.4%。胡小芸^[36]研究发现施用微生物肥能够提高黄芪的产量,增产率达11.65%。本试验中,施肥处理的黄芪产量均高于对照,OMD处理地下部生物产量较高,单施有机肥的地下部生物产量最低。OMD地下部产量最高,较C处理产量提高13.25%,较O处理产量提高了35.75%,这与前人的研究相一致,对之后通过改善肥料施用来提高黄芪产量有借鉴意义。

3.2 不同肥料处理对黄芪品质的影响

不同的肥料对作物品质影响的作用和机理不同。苏立新^[37]在探究有机肥改善农产品品质的作用和机理中指出有机肥能够保持农作物养分平衡和内源激素平衡,从而改善农产品的品质。张洪胜等^[38]研究发现因为微生物肥中含有大量的有益微生物,所以能够抑制致病菌的生长和提高作物的抗病性,而且通过提高作物生长激素水平,改善作物

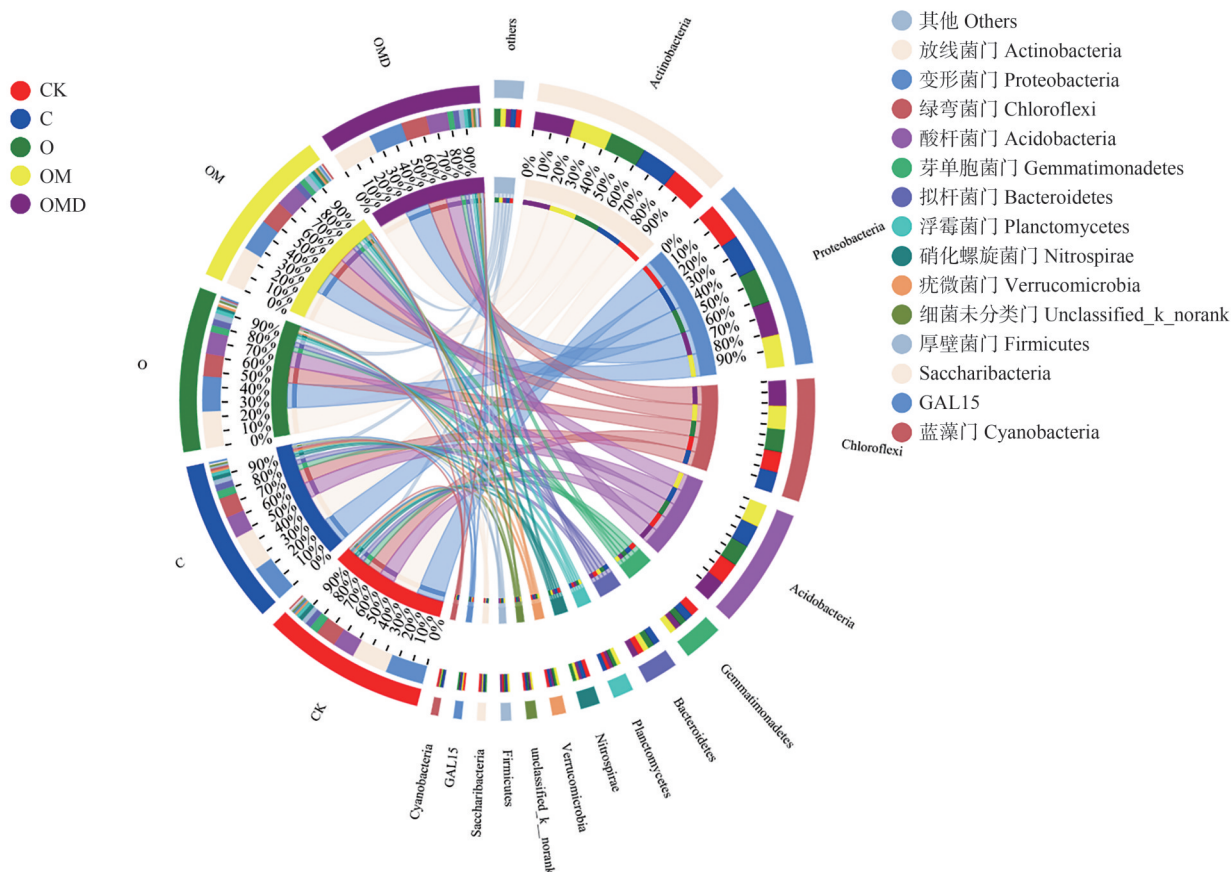


图 10 门水平上不同肥料处理与主要土壤微生物群落 Circos 图

Fig. 10 Circos map of different fertilizer treatments and major soil microbial communities at phylum level

品质。唐孟武等^[39]指出矿物肥具有改善作物品质、改良土壤功能的关键因素是其自身富含的矿质元素及其特有的物理性质。植物类药材的品质优劣集中表现在有效活性成分含量的高低上^[40],施肥可以改变药用植物生长的土壤环境,影响有效活性成分的合成和积累,进而影响药材品质^[29]。

黄芪多糖和黄酮类化合物是黄芪的主要有效活性成分^[41-42]。王渭玲等^[43]研究发现适当的氮磷钾配施能够显著促进黄芪甲苷和黄芪多糖的含量。秦梦等^[44]研究也证明了化肥能够显著增加黄芪多糖的含量。彭玉婷等^[45]研究表明,黄芪甲苷的含量随着施磷量的增加而增加,与本研究矿物磷的施用导致黄芪甲苷增加的结果一致。土壤环境会影响药材品质^[46],OMD和OMI处理通过微生物改善土壤环境,促进植株生长。赵佳琛等^[47]的研究表明移栽黄芪的毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量明显高于仿野生黄芪,与本试验中有机黄芪生态种植得出结果

相一致。在本试验中,施肥处理的黄芪多糖含量和总黄酮含量均明显高于对照。OMD和OMI处理的黄芪多糖含量与化肥处理的黄芪多糖含量水平相当,均显著高于O处理。OMD处理的总黄酮含量最高,单施有机肥的总黄酮含量显著低于其他施肥处理。黄芪甲苷含量受到肥料处理的影响,其中OM处理的黄芪甲苷含量最高。证明单施有机肥没有单施化肥和有机肥配施矿物肥、微生物肥有效成分含量高,通过肥料配施能显著提高黄芪品质。

黄芪的根体积和根长是决定黄芪产量的重要指标。张会会等^[48]发现使用微生物肥蘸根能够显著促进黄芪的根长和根粗。孔春雨^[49]研究发现微生物肥显著影响西洋参和人参的茎粗和叶面积。李庆等^[50]研究发现微生物肥与其他肥料混合施用对黄芪根长促进效果更好。王渭玲等^[51]研究发现施肥能够显著促进黄芪根系的生长,提高根冠比。本研究发现施肥对黄芪根系生长有显著促进的作

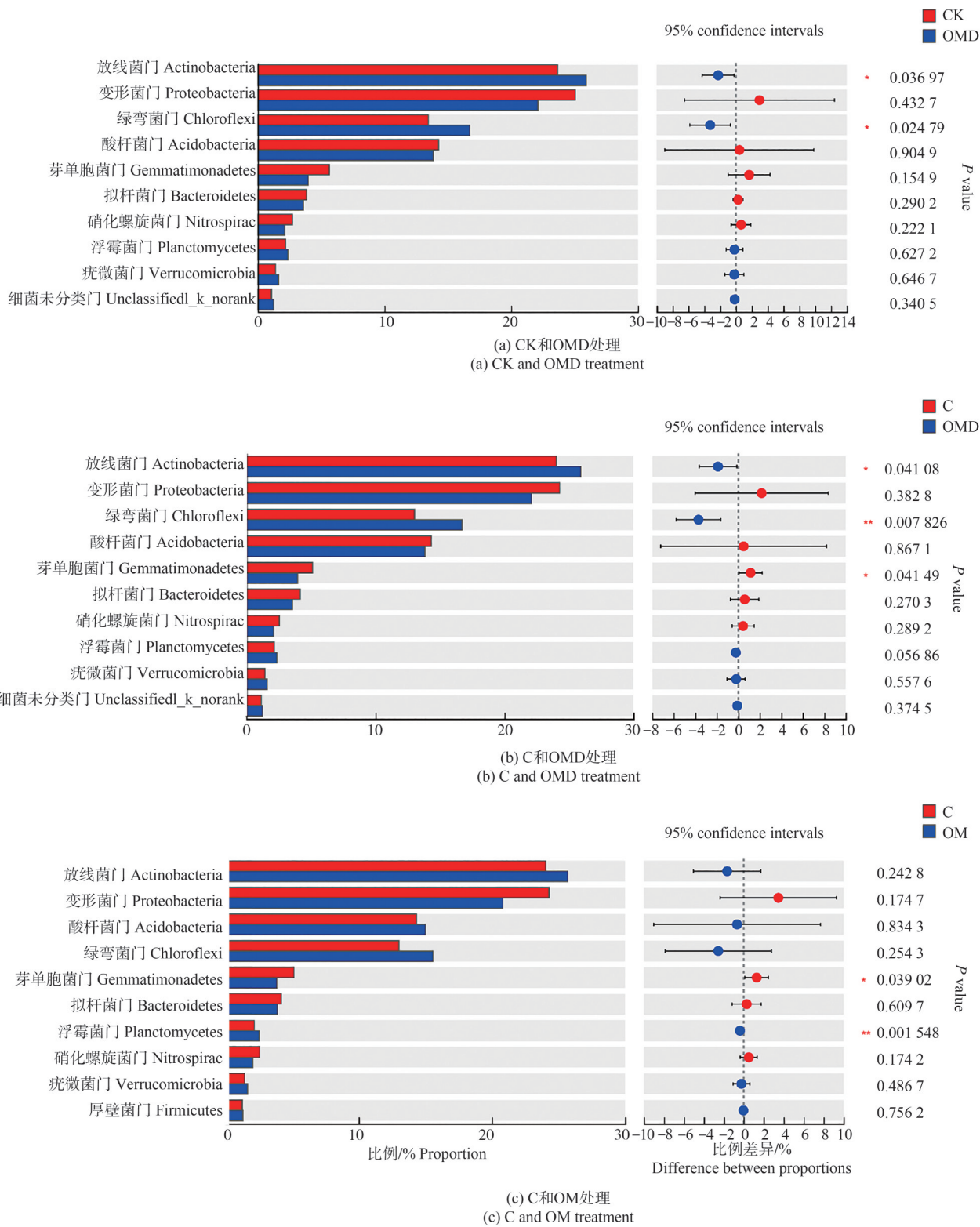


图 11 门水平上不同肥料处理层级聚类图

Fig. 11 Cluster diagram of different fertilizer treatment levels at phylum level

用,有机肥+矿物肥2种肥料配施和有机肥+矿物肥+微生物肥3种肥料配施对黄芪的根体积、根长

有显著促进作用,O和OMD处理的提升效果较显著。

干物质积累是作物产量的物质基础,改善干物质分配是提高作物产量的关键^[52]。黄芪产量的形成过程就是光合产物不断向根系转移的过程,黄芪根系干物质积累直接决定着黄芪产量的高低,是衡量黄芪种植效益的重要标准^[53]。王渭玲等^[54]通过研究膜荚黄芪的干物质积累和养分吸收规律指出施肥能够显著促进黄芪干物质积累。本研究表明,施肥处理能够明显提高黄芪的干物质积累,并且不同肥料处理干物质积累的趋势相同。移栽30 d前,干物质积累缓慢,积累量少;移栽30 d后干物质开始快速积累。移栽90 d前茎叶干物质积累迅速,根系干物质积累速度缓慢;移栽后90 d茎叶干物质积累达到最大,之后缓慢下降,黄芪根系干物质积累持续增加,直到收获时,根系干物质达到最大值。彭玉婷等^[45]在施肥对黄芪生长、干物质积累和品质影响的研究中也得出了相同的物质积累规律。本研究还发现单施化肥处理茎叶干物质积累速度较快,但后期根系干物质积累并没有优势,其主要原因是化肥肥效利用较快,主要用于前期地上部的生长,后期根系干物质积累主要依靠茎叶的光合产物向根系的转化。王振^[55]研究指出合理施用化肥能显著促进黄芪幼苗的生长和前期茎叶干物质的积累,从而保证了后期黄芪根系生长、产量形成和有效成分积累的营养供给。在本试验中,单施有机肥黄芪的茎叶干物质积累速度缓慢,推迟了茎叶干物质积累最高峰的出现时间。杨玉爱等^[56]研究发现有机肥能够延缓作物的衰老,主要与有机肥能够促进作物内源激素的平衡密切相关。同时,本研究还发现盛花期叶面喷施微生物肥可以快速促进地上部干物质的积累。有机肥+矿物肥和有机肥+矿物肥+微生物肥均能有效提高黄芪幼苗期的干物质积累。OMD和OMI处理在黄芪的整个生长周期中根系干物质积累量均处于较高的水平,说明OMD和OMI处理对根系干物质的积累有显著增加的作用。

3.3 不同肥料处理对黄芪根际微生物的影响

袁红朝等^[57]在水稻种植中进行不同施肥研究表明施肥和秸秆还田均显著增加细菌多样性,徐永刚等^[58]的研究表明玉米种植中的有机肥施用使得土壤细菌多样性高于施用化肥的土地。在本研究中同样证实不同肥料处理能够显著影响土壤微生

物多样性,O和OM处理与C处理相比均可以显著增加土壤微生物的丰富度和多样性。其中施用肥料的相似使得各处理的土壤微生物组成展示出相似性,CK和C处理微生物组成相似,OM和OMD微生物组成相似,O处理的微生物组成与其他处理有明显差异,并且特有OTU数目最多。细菌是土壤中微生物的重要组成部分,对于维持土壤生态系统的稳定有着重要作用^[59]。不同肥料对微生物群落组成影响不同,各处理优势物种均为:放线菌门、变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门和芽单胞菌门,这与孙瑞波等^[60]从土壤中得到的菌落相近。OMD与C处理相比增加了放线菌门($P<0.05$)、绿弯菌门($P<0.01$)的丰度。放线菌门对促进植株的养分吸收及调节土壤健康方面有着重要作用^[61],绿弯菌门中含有大量的有益微生物^[62]。说明通过有机肥、矿物肥和微生物肥的合理施用,有效增加了有益微生物的群落,改善了土壤生态环境。

4 结 论

本研究设置了化肥(C)、有机肥(O)、有机肥+矿物肥(OM)、有机肥+矿物肥+微生物肥(移栽时蘸根)(OMD)、有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期灌根)(OMI)、有机肥+矿物肥+微生物肥(盛花期喷施)(OMS)等不同肥料处理于山西省灵丘县进行试验,分析了不同肥料组合对黄芪植物学性状、干物质积累、产量、品质及土壤微生物的影响。结果发现,OMD地下部产量最高,较C处理提高13.25%,较O处理提高35.75%。OM和OMI处理与C处理均可以显著提高黄芪多糖的含量。施肥会一定程度的增加黄芪总黄酮的含量,OMD处理的总黄酮含量最高。OM处理的黄芪甲苷含量最高,单施有机肥的增加效果不太明显。OMD和OMI处理显著增加黄芪的根系干物质积累、根体积和根长。OMD处理有效改善了土壤中有益微生物群落丰度和多样性。

综合考虑黄芪生长发育、产量、品质和土壤微生物等方面,有机肥+矿物肥和有机肥+矿物肥+微生物肥配套组合较单施化肥或单施有机肥更适合黄芪生产。有机肥+矿物肥+微生物肥(移栽时蘸根)对黄芪根系生长的影响显著,可作为黄芪有机生产中最佳的肥料组合施用。

参考文献 References

- [1] 王宝平, 蔡翠芳, 邢志雄. 中药材GAP基地进行有机农业研究的必要性[J]. 山西中医学院学报, 2003, 4(3): 45-47
Wang B P, Cai C F, Xing Z X. Necessity of organic agriculture research in GAP base of Chinese herbal medicine[J]. *Journal of Shanxi College of Traditional Chinese Medicine*, 2003, 4(3): 45-47 (in Chinese)
- [2] 刘明言, 元英进, 朱世斌. 中药现代化进展[J]. 中草药, 2002, 33(3): 193-196
Liu M Y, Yuan Y J, Zhu S B. Progress of modernization in TCM[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2002, 33(3): 193-196 (in Chinese)
- [3] 孟凡乔. 中国有机农业发展: 贡献与启示[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 198-205
Meng F Q. Organic agriculture development in China: Challenges and implications[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(2): 198-205 (in Chinese)
- [4] 封超年, 周桂生, 陆建飞. 有机农业发展现状及其研究趋向[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 4-7
Feng C N, Zhou G S, Lu J F. The development, current status and research trends of organic agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(4): 4-7 (in Chinese)
- [5] 王丽玲, 丰华玲, 杨柯, 滕红梅, 胡正海. 黄芪生物学及化学成分研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(6): 2581-2585
Wang L L, Feng H L, Yang K, Teng H M, Hu Z H. Research progress on biology and chemical constituents of *Astragalus membranaceus* [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2017, 36(6): 2581-2585 (in Chinese)
- [6] 余文赞, 张淑珍. 黄芪的应用及栽培技术[J]. 畜牧兽医杂志, 2007, 26(1): 115-116
She W Y, Zhang S Z. Application and cultivation techniques of *Astragalus membranaceus* [J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2007, 26(1): 115-116 (in Chinese)
- [7] 张艳, 周庆民, 徐馨, 冯万宇, 黄健, 王靓靓, 宁秀云. 黄芪茎叶药物成分及营养成分测定[J]. 中国草食动物科学, 2016, 36(5): 32-35
Zhang Y, Zhou Q M, Xu X, Feng W Y, Huang J, Wang J J, Ning X Y. Determination of medicinal components and nutritional components in stems and leaves of *Astragalus membranaceus* [J]. *China Herbivore Science*, 2016, 36(5): 32-35 (in Chinese)
- [8] 杨宏昕, 张春霞, 魏慧, 王建华. 黄芪栽培研究进展[J]. 临床合理用药杂志, 2015, 8(2): 180-181
Yang H X, Zhang C X, Wei H, Wang J H. Research progress of astragalus cultivation [J]. *Chinese Journal of Clinical Rational Drug Use*, 2015, 8(2): 180-181 (in Chinese)
- [9] 白效令, 张秀珍, 陈素苹, 赵双生. 黄芪横向移栽[J]. 山西农业科学, 1988(2): 17-18
Bai X L, Zhang X Z, Chen S P, Zhao S S. Transverse transplanting of astragalus membranaceus [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 1988(2): 17-18 (in Chinese)
- [10] 孙贵臣. 山西发展有机农业的现状与潜力[J]. 农业开发与装备, 2014(1): 4-5
Sun G C. Present situation and potential of developing organic agriculture in Shanxi [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2014(1): 4-5 (in Chinese)
- [11] 刘德辉, 郭巧生, 孙玉华, 马飞, 董小卫, 李荣锦, 蔡玉新. 苏北中药材种植地土壤肥力衰退原因及其恢复对策[J]. 土壤通报, 2000, 31(2): 76-78, 97
Liu D H, Guo Q S, Sun Y H, Ma F, Dong X W, Li R J, Cai Y X. Causes of soil fertility decline upon cultivation of Chinese herbal medicine and counter-measures for improving soil fertility [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(2): 76-78, 97 (in Chinese)
- [12] 魏新雨. 中药材GAP种植允许使用哪些肥料[J]. 农家参谋, 2005(6): 10
Wei X Y. What fertilizers are allowed to be used in GAP cultivation of Chinese herbal medicines? [J]. *The Farmers Consultant*, 2005(6): 10 (in Chinese)
- [13] 李隆云, 秦松云. 有机肥、无机肥配合施用对郁金块根产量的影响[J]. 中国中药杂志, 1996, 21(11): 651-652
Li L Y, Qin S Y. Effect of combined application of organic fertilizer and inorganic fertilizer on tuber yield of *Curcuma aromatica* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 1996, 21(11): 651-652 (in Chinese)
- [14] 王利利, 董民, 张璐, 杜相革. 不同碳氮比有机肥对有机农业土壤微生物生物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(9): 1073-1077
Wang L L, Dong M, Zhang L, Du X G. Effects of organic manures with different carbon-to-nitrogen ratios on soil microbial biomass of organic agriculture [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(9): 1073-1077 (in Chinese)
- [15] 孟祥颖, 鲁歧, 李向高, 罗维莹, 刘银燕, 杨晓虹. 氮、磷、钾配合施用对人参质量影响的研究[J]. 标准化报道, 1996, 17(6): 36-37
Meng X Y, Lu Q, Li X G, Luo W Y, Liu Y Y, Yang X H. Studying of Panax Ginseng C. A. meyer quality affected by N, P, K mixed [J]. *Reporting of Standardization*, 1996, 17(6): 36-37 (in Chinese)
- [16] 李勇, 黄小芳, 丁万隆. 微量元素亏缺对人参根系分泌物组成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 64-69
Li Y, Huang X F, Ding W L. Effect of microelement deficiency on root exudates of ginseng [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 64-69 (in Chinese)
- [17] 乔洁, 毕利东, 张卫建, 沈仁芳, 张斌, 胡锋, 刘艳丽. 长期施用化肥对红壤性水稻土中微生物生物量、活性及群落结构的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 772-776
Qiao J, Bi L D, Zhang W J, Shen R F, Zhang B, Hu F, Liu Y L. Effects of long-term chemical fertilization on soil microbial biomass, activity and community in paddy soil in red soil region of China [J]. *Soils*, 2007, 39(5): 772-776 (in Chinese)
- [18] 杨亚东, 王志敏, 曾昭海. 长期施肥和灌溉对土壤细菌数量、多样性和群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(2): 290-301
Yang Y D, Wang Z M, Zeng Z H. Effects of long-term different fertilization and irrigation managements on soil bacterial abundance, diversity and composition [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(2): 290-301 (in Chinese)
- [19] 刘杰, 张雄杰, 盛晋华, 霍秉新, 贾长松. 肥料类型对盐碱地蒙古黄芪生长与光合特征及药材产量和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(6): 1012-1018
Liu J, Zhang X J, Sheng J H, Huo B X, Jia C S. Effects of fertilizer types on growth, photosynthesis, yield and quality of *Astragalus membranaceus* var *mongholicus* in saline-alkali land [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(6): 1012-1018 (in Chinese)
- [20] 李文倩, 张莹, 王梦茹, 曹健, 陈家炜, 柴智, 侯美利, 梁建萍. 不同施肥配比对蒙古黄芪产量及品质的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 221-229
Li W Q, Zhang Y, Wang M R, Cao J, Chen J W, Chai Z, Hou M L, Liang J P. Effects of different fertilization ratio on yield and quality of *Astragalus membranaceus* var *mongholicus* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(1): 221-229 (in Chinese)

- [21] 高游慧, 江春艳, 胡跃高, 王小芬. 不同肥料处理对有机黄芪养分吸收与分配的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(3): 453-464
Gao Y H, Jiang C Y, Hu Y G, Wang X F. Effects of different fertilizer treatments on nutrient absorption and distribution in organic *Astragalus* [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(3): 453-464 (in Chinese)
- [22] 张瑞, 曹庆伟, 李科, 秦雪梅. 黄芪药材性状和化学特征与绝对生长年限的相关性分析研究[J]. 中草药, 2020, 51(2): 451-460
Zhang R, Cao Q W, Li K, Qin X M. Analysis of correlation between commercial traits and chemical characteristics and absolute growth years of *Astragali Radix*[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2020, 51(2): 451-460 (in Chinese)
- [23] 熊一峰, 秦雪梅, 李科, 刘月涛, 高四云. 从黄芪化学成分测定分析药材商品品规的合理性[J]. 中草药, 2016, 47(12): 2194-2198
Xiong Y F, Qin X M, Li K, Liu Y T, Gao S Y. Analysis on rationality of medicinal product commodity specifications from determination of chemical components in *Astragalus Radix*[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2016, 47(12): 2194-2198 (in Chinese)
- [24] 杨继祥, 田义新. 药用植物栽培学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2004
Yang J X, Tian Y X. *Medicinal Herbs Cultivation*[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2004 (in Chinese)
- [25] 李春红, 田吉, 何兵, 肖顺汉. 紫外分光光度法测定黄芪总黄酮的含量[J]. 重庆医科大学学报, 2011, 36(8): 954-956
Li C H, Tian J, He B, Xiao S H. Determination of total saponins in *astragalus membranaceus* by ultraviolet spectroscopy [J]. *Journal of Chongqing Medical University*, 2011, 36(8): 954-956 (in Chinese)
- [26] 赵强强, 韩丽, 潘媛, 王森, 杨明. 黄芪中黄芪多糖含量的测定[J]. 中国现代中药, 2011, 13(7): 29-30, 37
Zhao Q Q, Han L, Pan Y, Wang M, Yang M. Determination of *Astragalus* polysaccharides in *Astragalus*[J]. *Modern Chinese Medicine*, 2011, 13(7): 29-30, 37 (in Chinese)
- [27] 杨莉, 王志华, 陶健生. 黄芪中黄芪多糖含量测定方法的比较[J]. 中国医药工业杂志, 2005, 36(9): 562-563
Yang L, Wang Z H, Tao J S. Comparison of the methods for determination of astragalus polysaccharides in *Radix astragali*[J]. *Chinese Journal of Pharmaceuticals*, 2005, 36(9): 562-563 (in Chinese)
- [28] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 2015 年版[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015
Chinese Pharmacopoeia Commission. *Pharmacopoeia of People's Republic of China (PRC) 2015 Edition*[M]. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2015 (in Chinese)
- [29] 程萌萌. 氮磷钾对蒙古黄芪生长发育及次生代谢产物积累的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
Cheng M M. The influence of nitrogen, phosphorus and potassium on growth and secondary metabolism of *Astragalus Mongholicus* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016 (in Chinese)
- [30] Al-Humaid A I. Effects of compound fertilization on growth and alkaloids of *Datura* plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(12): 2203-2219
- [31] Gardner Z E, Erhardt E B, Shaikouskaya E, Baek J P, Craker L E. Yield and effects of organic nitrogen fertilizer on field-grown Chinese medicinal plants in the United States[J]. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 2015, 21(1): 9-22
- [32] 仲艳丽. “菜老大”微生物肥对迷迭香产量的影响[J]. 云南农业科技, 2006(2): 23-24
Zhong Y L. Effect on yield of *Rosmarinus officinalis* L. Fertilized by microbe fertilizer “Cailaoda” [J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2006(2): 23-24 (in Chinese)
- [33] 刘军民, 张丹雁, 潘超美, 徐鸿华. 生物肥料对阳春砂产量及质量的影响[J]. 广州中医药大学学报, 2005, 22(1): 4-6
Liu J M, Zhang D Y, Pan C M, Xu H H. Effect of biological fertilizers on the yield and quality of *Amomum villosum* [J]. *Journal of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine*, 2005, 22(1): 4-6 (in Chinese)
- [34] Wang J F, Li X L, Xing S Z, Ma Z Y, Hu S J, Tu C. Bio-organic fertilizer promotes plant growth and yield and improves soil microbial community in continuous monoculture system of *Chrysanthemum morifolium* cv *chuju* [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2017, 19(3): 563-568
- [35] 安世伟, 付录生, 郭强强, 徐永强, 姚彦斌, 张金文. 不同有机肥作基肥对黄芪产量的影响[J]. 农业科技与信息, 2018(9): 32-33, 40
An S W, Fu L S, Guo Q Q, Xu Y Q, Yao Y B, Zhang J W. Effect of different organic fertilizers as base fertilizer on yield of *Astragalus membranaceus* [J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2018(9): 32-33, 40 (in Chinese)
- [36] 胡小芸. 不同叶面肥对黄芪产量和质量的影响[J]. 农业科技与信息, 2016(20): 94-95
Hu X Y. Effects of different foliar fertilizers on yield and quality of *Astragalus membranaceus* [J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2016(20): 94-95 (in Chinese)
- [37] 苏立新. 有机肥料对改善农产品品质的作用及其机理[J]. 农业工程技术, 2017, 37(17): 73
Su L X. Effect and mechanism of organic fertilizer on improving the quality of agricultural products[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2017, 37(17): 73 (in Chinese)
- [38] 张洪胜, 杨述. 复合微生物肥的主要功效与作用机理[J]. 烟台果树, 2014(3): 1-2
Zhang H S, Yang S. Main efficacy and mechanism of compound microbial fertilizer[J]. *Yantai Fruits*, 2014(3): 1-2 (in Chinese)
- [39] 唐孟武, 曹洪松. 优质矿肥对土壤改良及提高名特果品品质机制研究[C]//中国农业地学研究新进展: 2000 年全国农业地学学术研讨会论文集. 北京: 中国地质学会, 2000: 304-307
Tang M W, Cao H S. Study on the mechanism of high-quality mineral fertilizers on soil improvement and the improvement of the quality of famous and special fruits[C]. In: *New Progress in China's Agricultural Geology Research: Proceedings of the 2000 National Agricultural Geology Symposium*. Beijing: Geological Society of China, 2000: 304-307 (in Chinese)
- [40] 李凤丽, 王曼丽. 浅论影响植物类药材品质的几种因素[J]. 中国民康医学, 2006, 18(4): 154-154, 封3
Li F L, Wang M L. Discussion on several factors affecting the quality of plant medicinal materials [J]. *Medical Journal of Chinese People's Health*, 2006, 18(4): 154-154, Feng 3 (in Chinese)
- [41] Kuang H X, Okada Y, Yang B Y, Tian Z K, Okuyama T. Secocycloartane triterpenoidal saponins from the leaves of *Astragalus membranaceus* Bunge [J]. *Helvetica Chimica Acta*, 2009, 92(5): 950-958
- [42] 孙佳慧, 周援, 孙月娥, 李春阳, 王卫东, 张军. 黄芪生物活性成分及在食品中的应用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(12): 272-276
Sun J H, Zhou Y, Sun Y E, Li C Y, Wang W D, Zhang J. Research progress on bioactive components of *Astragalus membranaceus* and their

- application in food[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(12): 272-276 (in Chinese)
- [43] 王渭玲, 王振, 徐福利. 氮、磷、钾对膜荚黄芪生长发育及有效成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(15): 1802-1806
- Wang W L, Wang Z, Xu F L. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium application on growth and active ingredient of *Astragalus membranaceus*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008, 33(15): 1802-1806 (in Chinese)
- [44] 秦梦, 田伟, 张益铭, 陈燕涛, 尹春梅. 不同施肥配比对黄芪产量和多糖含量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(1): 148-151
- Qin M, Tian W, Zhang Y M, Chen Y T, Yin C M. Effect of fertilizer proportion on yield and polysaccharide content of *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge var *mongholicus* (Bge) Hsiao[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2015, 42(1): 148-151 (in Chinese)
- [45] 彭玉婷, 李莹莹, 边小禹, 韩蕊莲, 常朝阳. 施肥对膜荚黄芪生长及黄芪甲苷含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(12): 140-146, 154
- Peng Y T, Li Y Y, Bian X Y, Han R L, Chang Z Y. Effects of fertilization on growth, dry matter accumulation and quality of *Astragalus membranaceus* [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2018, 46(12): 140-146, 154 (in Chinese)
- [46] 张金文, 张玉云, 郭强强. 中微量元素肥料对蒙古黄芪生长和品质的影响[J]. 中兽医医药杂志, 2020, 39(6): 55-59
- Zhang J W, Zhang Y Y, Guo Q Q. Effects of medium and trace element fertilizers on the growth and quality of *A. membranaceus* var *mongholicus* [J]. *Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine*, 2020, 39(6): 55-59 (in Chinese)
- [47] 赵佳琛, 王亚鹏, 王艺涵, 钱锦秀, 邓爱平, 南铁贵, 康利平, 詹志来. 基于传统品质评价的移栽与仿野生黄芪比较[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(1): 21-30
- Zhao J C, Wang Y P, Wang Y H, Qian J X, Deng A P, Nan T G, Kang L P, Zhan Z L. Comparison of cultivated and wild-simulated astragali radix based on traditional quality evaluation [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2024, 30(1): 21-30 (in Chinese)
- [48] 张会会, 史娟, 王俊, 辛学发. 不同微生物菌剂和生物有机肥对黄芪地下生长量及根腐病的影响[J]. 北方园艺, 2016(1): 140-143
- Zhang H H, Shi J, Wang J, Xin X F. Effect of different microbial agents and biological organic fertilizer on root growth and root rot underground of *Astragalus*[J]. *Northern Horticulture*, 2016(1): 140-143 (in Chinese)
- [49] 孔春雨. 鸡粪生物肥在人参等中药材上的应用效果研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007
- Kong C Y. Study on the effects of biological fertilizer of chicken manure in Chinese herb panax ginseng C. A. meyer etc [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007 (in Chinese)
- [50] 李庆, 孙义林. 施肥条件对黄芪生长的影响[J]. 牡丹江师范学院学报: 自然科学版, 2010(2): 39-40
- Li Q, Sun Y L. Effect of fertilization conditions on the growth of *Astragalus membranaceus* [J]. *Journal of Mudanjiang Normal University: Natural Sciences Edition*, 2010(2): 39-40 (in Chinese)
- [51] 王渭玲, 梁宗锁, 仇理云, 王铁铸, 文山应, 李晓娟. 矿质营养元素对黄芪生长发育及抗病性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 41-43
- Wang W L, Liang Z S, Chou L Y, Wang T Z, Wen S Y, Li X J. The impacts of nutrient elements on the growth and disease resistance of *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 41-43 (in Chinese)
- [52] 陆欣, 谢英荷. 土壤肥科学[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011
- Lu X, Xie Y H. *Soil Fertilizer Science* [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2011 (in Chinese)
- [53] 宋庆燕, 杨相, 王秋玲, 夏贵惠, 闫滨滨, 崔旭盛, 张媛, 王文全. 氮磷钾元素对黄芪生长和干物质积累的影响[J]. 中国现代中药, 2017, 19(8): 1157-1161
- Song Q Y, Yang X, Wang Q L, Xia G H, Yan B B, Cui X S, Zhang Y, Wang W Q. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and dry matter accumulation of *Astragalus membranaceus* [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2017, 19(8): 1157-1161 (in Chinese)
- [54] 王渭玲, 梁宗锁, 谭勇. 膜荚黄芪干物质累积及氮、磷、钾吸收规律的研究[J]. 中国中药杂志, 2007, 32(9): 789-793
- Wang W L, Liang Z S, Tan Y. Study on accumulation of dry matter and absorption of N, P and K of *Astragalus membranaceus*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2007, 32(9): 789-793 (in Chinese)
- [55] 王振. 矿质营养对黄芪生长发育和有效成分积累的影响[D]. 北京: 中国科学院水利部水土保持研究所; 中国科学院·教育部水土保持与生态环境研究中心, 2008
- Wang Z. Effects of mineral nutrition on the growth and development of *Astragalus membranaceus* and the accumulation of effective components [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2008 (in Chinese)
- [56] 杨玉爱, 叶正钱, 陈峰, 孙羲. 有机肥料延缓日本黄瓜早衰作用的研究[J]. 土壤学报, 1992, 29(4): 447-450
- Yang Y A, Ye Z Q, Chen F, Sun X. Function of organic manure delaying senescence of Japanese cucumbers [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(4): 447-450 (in Chinese)
- [57] 袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 童成立, 魏文学, 吴金水. 长期施肥对红壤性水稻土细菌群落结构和数量的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4610-4617
- Yuan H Z, Qin H L, Liu S L, Tong C L, Wei W X, Wu J S. Response of abundance and composition of the bacterial community to long-term fertilization in paddy soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(22): 4610-4617 (in Chinese)
- [58] 徐永刚, 宇万太, 马强, 周桦. 长期不同施肥制度对潮棕壤微生物生物量碳、氮及细菌群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2078-2085
- Xu Y G, Yu W T, Ma Q, Zhou H. Effects of long-term fertilizations on microbial biomass C and N and bacterial community structure in an aquic brown soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2078-2085 (in Chinese)
- [59] Girvan M S, Campbell C D, Killham K, Prosser J I, Glover L A. Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, 7(3): 301-313
- [60] 孙瑞波, 郭熙盛, 王道中, 褚海燕. 长期施用化肥及秸秆还田对砂姜黑土细菌群落的影响[J]. 微生物学通报, 2015, 42(10): 2049-2057
- Sun R B, Guo X S, Wang D Z, Chu H Y. The impact of long-term application of chemical fertilizers and straw returning on soil bacterial community [J]. *Microbiology China*, 2015, 42(10): 2049-2057 (in Chinese)
- [61] Eichorst S A, Kuske C R, Schmidt T M. Influence of plant polymers on the distribution and cultivation of bacteria in the Phylum *Acidobacteria* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(2): 586-596
- [62] 唐涛, 袁斌, 王帆帆, 郭杰, 郭晓亮, 段媛媛, 游景茂. 黄连根腐病发生与根际土壤、根茎内生、叶内生细菌群落结构变化关系[J]. 植物保护, 2022,

48(1): 73-81, 103

Tang T, Yuan B, Wang F F, Guo J, Guo X L, Duan Y Y, You J M.

Relationships between the occurrence of root-rot and the change in the community structure of rhizosphere soil bacteria, rhizome and leaf

endophytic bacteria of *Coptis chinensis* [J]. *Plant Protection*, 2022, 48

(1): 73-81, 103 (in Chinese)

责任编辑:董金波



第一作者简介:王乐,中国农业大学农学院博士研究生,专业为生物质工程。研究方向为有机农业高产优质栽培技术及农业废弃物资源转化。曾获第一届乡村振兴志愿服务技能大赛二等奖、第三届全国农科学子创业大赛二等奖,参与2023年首都志愿服务公益创业赛示范项目。在山西省灵丘县、长子县和河北省邢台市金沙河集团等地开展县域有机农业生产技术服务、技术培训等工作。



通讯作者简介:高游慧,女,中国农业大学博士后。研究方向:有机农业栽培技术及农业废弃物资源转化。长期致力于揭示农用酵素发酵机理及农用酵素抗根腐病的作用机制,农用酵素低本高质有机种植技术科研创新。在*Frontiers in microbiology*、*Environment research*、《中国农业大学学报》、《中国生态农业学报》(中英文版)等期刊发表论文5篇,发布山西省省级地方标准1项,参编《北泉村志》1部。曾获第八届中国国际互联网+大学生创新创业大赛北京市一等奖、中国农业大学“社会服务卓越贡献奖”、中国农业大学“崇农尚美”敏聪乡村振兴奖学金等多项荣誉。在山西省灵丘县、沁源县、长子县和河北省邢台市金沙河集团等地开展县域有机农业生产技术服务、技术培训等工作。