

DOI: 10.11686/cyxb2024355

http://cyxb.magtech.com.cn

李文秀, 姚拓, 李昌宁, 等. “凹凸棒-有机基质”菌肥载体最佳配比的筛选及对紫花苜蓿的促生效果研究. 草业学报, 2025, 34(8): 88—98.

LI Wen-xiu, YAO Tuo, LI Chang-ning, *et al.* Screening of the best ratio of ‘attapulgitic-organic matrix’ bacterial fertilizer carrier and its growth-promotion effect on alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(8): 88—98.

## “凹凸棒-有机基质”菌肥载体最佳配比的筛选 及对紫花苜蓿的促生效果研究

李文秀<sup>1</sup>, 姚拓<sup>1\*</sup>, 李昌宁<sup>1</sup>, 贾倩民<sup>2</sup>, 何傲蕾<sup>1</sup>, 周杨<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 3. 甘肃杨柳青牧草饲料开发有限公司, 甘肃 金昌 737205)

**摘要:**为了探究凹凸棒加有机基质作为菌肥载体的可行性以及制作菌肥时菌液的最佳添加量。本试验通过向有机基质中添加不同梯度凹凸棒(分别为5%、7.5%、10%)作为菌肥载体,然后向其中添加不同梯度菌液(分别为25%、27.5%、30%)制作成固体菌肥;通过测定菌肥货架期及紫花苜蓿盆栽试验验证菌肥促生效果,确定凹凸棒添加量以及菌液添加量。结果显示:菌肥保存180 d后,不同载体菌肥有效活菌数均大于 $2 \times 10^8$  cfu·g<sup>-1</sup>,杂菌数均小于 $3 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup>,其中5%凹凸棒加25%的菌液(F<sub>2</sub>+25%菌液)处理效果最好;7.5%凹凸棒加30%菌液(F<sub>3</sub>+30%菌液)处理下,紫花苜蓿结瘤数最多,为62.7个·盆<sup>-1</sup>,较对照提高了317.8%。5%凹凸棒加25%的菌液(F<sub>2</sub>+25%菌液)处理下,紫花苜蓿地上、地下生物量、叶绿素含量较对照分别提高了46.5%、86.2%和54.9%;总根长、总根表面积、根尖数和根分叉数较对照提高了87.7%、108.4%、96.2%和252.0%;通过隶属函数分析得出,5%凹凸棒加25%的菌液(F<sub>2</sub>+25%菌液)处理对紫花苜蓿促生效果最好。

**关键词:**凹凸棒;菌肥载体;紫花苜蓿;促生特性

### Screening of the best ratio of ‘attapulgitic-organic matrix’ bacterial fertilizer carrier and its growth-promotion effect on alfalfa

LI Wen-xiu<sup>1</sup>, YAO Tuo<sup>1\*</sup>, LI Chang-ning<sup>1</sup>, JIA Qian-min<sup>2</sup>, HE Ao-lei<sup>1</sup>, ZHOU Yang<sup>3</sup>

1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Grassland Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 3. Gansu Yangliuqing Forage Feed Development Co., LTD., Jinchang 737205, China

**Abstract:** This experiment explored the feasibility of attapulgitic plus an organic matrix as a carrier of bacterial fertilizer and the optimal amount of bacterial liquid to be added when making bacterial fertilizer. Different amounts of attapulgitic (5%, 7.5%, 10%; F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> and F<sub>3</sub>, respectively) were added to an organic matrix as the carrier for bacterial fertilizer, and then different quantities of bacterial liquid (25%, 27.5%, 30%) were added to make solid bacterial fertilizer. The shelf life of bacterial fertilizer was evaluated and the growth-promotion effect of the bacterial fertilizer was verified by measuring plant traits of alfalfa (*Medicago sativa*) in a pot experiment, for the various attapulgitic and bacterial liquid addition treatments. It was found that 180 days after preparation, the effective viable

收稿日期:2024-09-23;改回日期:2024-10-28

基金项目:甘肃农业大学科研启动经费(GAU-KYQD-2022-01)、“有机肥-土壤-牧草”中的传播机制研究(GAU-KYQD-2022-01)和基于科技小院的农业人才培养及草畜肥循环技术集成与示范资助。

作者简介:李文秀(1999—),女,甘肃天水人,在读硕士。E-mail: 2905666796@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yaotuo@gsau.edu.cn

count of all the different bacterial fertilizer carrier formulations was more than  $2 \times 10^8$  cfu·g<sup>-1</sup>, and the number of miscellaneous bacteria was less than  $3 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup>. The number of alfalfa nodules was the highest (62.7 per pot; 317.8% higher than control plants with no bacterial fertilizer added) under the treatment combination F<sub>3</sub>+30% bacterial liquid. The above-ground and below-ground biomass and chlorophyll content of alfalfa under the treatment comprising F<sub>2</sub>+25% bacterial liquid were increased by 46.5%, 86.2% and 54.9%, respectively, while the total root length, total root surface area, root tip number and root bifurcation number were increased by 87.7%, 108.4%, 96.2% and 252.0%, respectively, compared with the control plants. However, when data were analyzed by multivariate membership function, the treatment comprising F<sub>2</sub>+25% bacterial liquid was found to have the best effect on the growth of alfalfa.

**Key words:** attapulgite; bacterial fertilizer carrier; alfalfa; plant growth-promoting characteristics

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是世界各国广泛种植的优良豆科牧草,具有生长快、生物量大和对不良环境适应性强等特性<sup>[1]</sup>。虽然苜蓿可通过根瘤固氮获得生长发育所需要的氮素营养,但作为一种需磷量大的多年生作物,其对磷素的含量极为敏感<sup>[2]</sup>,在种植过程中对磷肥的需求量较高,主要通过大量化肥来补充,但长期大量施用化肥会对环境造成严重污染。因此,寻找一种绿色、安全、环保的新型肥料已成为当前的热点,近些年来菌肥的发展为这一问题的解决带来了新的思路。

菌肥作为一种新型环保型肥料,具有促进植物对养分的吸收、抑制病原菌、提高肥料利用率、改良土壤质量等优点,已广泛应用于禾谷类、油料类等作物,且增产与土壤改良效果明显<sup>[3]</sup>。但菌肥自身的特殊性直接影响其在农业生产中的推广应用,尤其是质量控制方面,比如用于菌肥的载体质量较差<sup>[4]</sup>,载体能够给微生物提供一个稳定的环境,以免受到外界不利环境的影响。理想的载体应该具有较大的比表面积、较强的吸附性、来源广泛,对菌种、土壤和作物无毒无害,同时载体必须有利于菌种生存且可持续生产<sup>[5]</sup>。我国对菌肥载体的研究起步较晚,目前以泥炭作为菌肥载体的研究较多<sup>[6]</sup>,但其作为天然矿产资源再生能力较低,长期持续开采会对生态环境造成极大的破坏,并且开采成本较高。因此,寻找其他的材料来替代泥炭已成为菌肥生产中的重要问题之一。

凹凸棒(attapulgite, ATP)是一种存在于自然界中2:1型的层链状晶质水合镁铝盐矿物,具有较大比表面积、丰富的孔隙及较强的极性,其特殊的胶体性质和晶体结构提供了出色的离子交换性能<sup>[7]</sup>,被广泛用于材料学以及土壤修复领域。有研究表明,凹凸棒可以钝化修复重金属污染土壤,缓解金属铬对植物的胁迫<sup>[8]</sup>,改良土壤,调理土壤结构,和其他材料组合包埋制作新型肥料<sup>[9]</sup>。此外,凹凸棒能够吸附霉菌毒素和重金属离子<sup>[10]</sup>。因此,将凹凸棒作为菌肥载体具有很大的应用潜力,然而凹凸棒在作为菌肥载体方面的研究较少。

因此,本试验选用有机肥加凹凸棒作为复合菌系的载体,分析了该物质作为菌肥载体的可行性,并通过对紫花苜蓿的促生效果评价,以期筛选出优良且平价的菌肥载体配方。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

**1.1.1 供试菌株** 由甘肃农业大学草地微生物多样性实验室提供,菌株分离自不同植物根际,其促生特性见表1。

**1.1.2 供试载体及制作** 载体由有机基质(有机肥)和凹凸棒两部分组成,按照一定比例向有机肥中添加凹凸棒(表2)制成菌肥载体。

有机肥来源于甘肃大行农业科技开发有限公司,含水率为9.26%,pH为7.87,有机质含量为48.14%,全氮含量为3.28 g·kg<sup>-1</sup>,全钾含量为1.28 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量为2.69 g·kg<sup>-1</sup>;凹凸棒购自甘肃临泽县兰花循环农业示范园区,形状为棕色大圆颗粒,pH为7.63,含水率14.5%,全氮含量为0.35 g·kg<sup>-1</sup>,全钾含量为0.37 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量为0.48 g·kg<sup>-1</sup>,还富含钙、钾、镁和锌等营养元素。

表1 供试菌株

Table 1 Strains for test

| 编号 Code | 菌株 Strain                          | 寄主植物 Host plant                | 促生特性 Growth promoting characteristic                                    |
|---------|------------------------------------|--------------------------------|---|
| LY      | 草状芽孢杆菌 <i>Bacillus mycoides</i>    | 珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i> | 溶磷,分泌植物生长素 Phosphorus dissolving, secreting auxin                       |
| LM3     | 猴假单胞菌 <i>Pseudomonas simiae</i>    | 毛稈羊茅 <i>Festuca kirilowii</i>  | 溶磷,固氮,分泌植物生长素 Phosphorus dissolving, nitrogen fixation, secreting auxin |
| LM2     | 莫哈韦芽孢杆菌 <i>Bacillus mojavensis</i> | 黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>  | 固氮,分泌植物生长素 Nitrogen fixation, secreting auxin                           |

## 1.2 试验方法

**1.2.1 载体吸水率测定** 在无菌条件下,将无菌水与各载体材料充分混匀,每次加入无菌水的量按照一定梯度逐渐增加,使载体材料保持湿润、疏松、不结块。以100 g载体所含无菌水量为载体吸水率,重复3次,取平均值(表3)。

**1.2.2 载体理化性质分析** 全氮(半微量凯氏定氮法)、全磷(钼锑抗试剂测定法)、有效磷(0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>法)、全钾(氢氧化钠熔融-原子吸收分光光度计法)、速效钾(醋酸铵-原子吸收分光光度计法)含量参考鲍士旦<sup>[11]</sup>的方法测定。不同载体配方之间氮、磷、钾含量差异不显著(表4)。

**1.2.3 菌肥制作** 将供试菌株LY、LM3、LM2分别单独接种于LB液体培养基(氯化钠5.0 g、酵母粉5.0 g、蛋白胨10.0 g、1000.0 mL蒸馏水)中,160 r·min<sup>-1</sup>、28 °C培养24 h,待菌株充分生长后,采用牛津杯法<sup>[12]</sup>对菌株进行拮抗测定,将确定无拮抗反应的各菌株分别接种于LB培养基中

表2 菌肥载体配方

Table 2 Formulation of bactericide carrier

| 处理 Treatment   | 载体 Carrier  |
|----------------|---|
| F <sub>1</sub> | 有机肥 Organic fertilizer                            |
| F <sub>2</sub> | 有机肥+5%凹凸棒 Organic fertilizer+5% attapulgitite     |
| F <sub>3</sub> | 有机肥+7.5%凹凸棒 Organic fertilizer+7.5% attapulgitite |
| F <sub>4</sub> | 有机肥+10%凹凸棒 Organic fertilizer+10% attapulgitite   |

表3 载体吸水率

Table 3 Water absorbing capability of carriers (%)

| 处理 Treatment   | 重复 Repeat |    |    | 平均 Mean |
|----------------|-----------|----|----|---------|
|                | 1         | 2  | 3  |         |
| F <sub>1</sub> | 30        | 27 | 28 | 28a     |
| F <sub>2</sub> | 26        | 26 | 27 | 26a     |
| F <sub>3</sub> | 29        | 27 | 28 | 28a     |
| F <sub>4</sub> | 26        | 28 | 27 | 27a     |

注:同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences among different treatments ( $P < 0.05$ ), the same below.

表4 载体营养成分分析

Table 4 Analysis of nutrient composition of carriers

| 处理 Treatment   | 全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷 Total phosphorus (g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷 Available phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> ) | 全钾 Total potassium (g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效钾 Available potassium (g·kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------|---|---|---|--|---|
| F <sub>1</sub> | 3.28±0.26a                              | 2.69±0.17a                                | 446.48±0.55a                                    | 1.18±0.01a                               | 1.76±0.09a                                    |
| F <sub>2</sub> | 2.91±0.13a                              | 2.64±0.02a                                | 411.80±41.95a                                   | 1.21±0.02a                               | 1.88±0.01a                                    |
| F <sub>3</sub> | 2.99±0.33a                              | 3.05±0.02a                                | 388.88±34.55a                                   | 1.19±0.01a                               | 1.82±0.01a                                    |
| F <sub>4</sub> | 2.75±0.03a                              | 3.15±0.36a                                | 433.99±15.01a                                   | 1.15±0.03a                               | 1.84±0.01a                                    |

180 r·min<sup>-1</sup>、28 °C培养24 h后,将3种菌液按体积比1:1:1接种于LB液体培养基中160 r·min<sup>-1</sup>、28 °C混合培养48 h,测定并调节菌液含菌量约10<sup>8</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>,备用<sup>[13]</sup>。

将1.1.2节中不同载体组合灭菌2 h后分装成250 g小袋,接种制作好的菌株悬浮液(接菌量为载体质量的25.0%、27.5%和30.0%),先将菌液与载体充分混匀后装入自封袋中立即封口,用灭菌针在塑料袋的四周随机扎4个孔,再外套一个聚乙烯塑料袋,一切操作均在无菌条件下进行。将制作好的固体菌肥置于28 °C下培养15

d,之后常温保存备用。

**1.2.4 菌肥货架期测定** 用 LB 培养基<sup>[14]</sup>对储存于室温下的菌肥进行培养;于 30、60、90、120、150、180 d 采用稀释平板计数法<sup>[15]</sup>各测定一次有效活菌数;同时,检查是否有霉变和产生异味等。

用马丁培养基<sup>[16]</sup>(磷酸二氢钾 1.0 g、葡萄糖 10.0 g、七水硫酸镁 0.5 g、蛋白胨 5.0 g、1% 孟加拉红水溶液 3.3 mL、氯霉素 0.1 g、琼脂 18.0 g、蒸馏水 1000 mL)对储存于室温下的菌肥进行培养;于 30、60、90、120、150、180 d 采用稀释平板计数法各测定一次杂菌数量。

### 1.3 菌肥促生效果评价

**1.3.1 供试植物** 供试植物为紫花苜蓿中苜一号(*M. sativa* cv. Zhongmu No. 1),由甘肃农业大学草业学院提供。

**1.3.2 土壤来源** 土壤取自于甘肃省白银市景泰县五佛乡旱坝;地理位置 N 37°15', E 104°07',位于景泰县东北部;地处低山丘陵区,平均海拔 1300 m,年平均气温 10.8 °C,年平均降水量 156.6 mm,蒸发量 3038 mm,年平均日照时数 2725.5 h,无霜期 160 d 左右,试验地土壤 pH 为 8.01,全氮为 0.25 g·kg<sup>-1</sup>,全钾为 1.69 g·kg<sup>-1</sup>,全磷为 0.98 g·kg<sup>-1</sup>。

**1.3.3 盆栽试验设计** 于 2023 年 10 月在甘肃农业大学恒温生长室内种植,白天 24 °C、湿度 45%、光照 6000 lx、时间 16 h;夜晚 24 °C、湿度 45%、时间 8 h。选择饱满且大小一致的紫花苜蓿种子,用 20% 的 NaClO 灭菌 2 min 左右,蒸馏水冲洗 5 次。将种子(30 粒·盆<sup>-1</sup>)均匀种植于盛有 1 kg 土壤的花盆(上口径 11.6 cm、底径 8.8 cm、高度 15.8 cm)中,待幼苗生长 60 d 左右,测定各项指标。播种前将菌肥与紫花苜蓿种子进行拌种,菌肥用量为 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>。试验共有 16 个处理,每个处理 3 次重复(表 5)。

表 5 试验处理

Table 5 Experimental treatments

| 简称 Abbreviation       | 处理 Treatment  | 简称 Abbreviation       | 处理 Treatment  |
|-----------------------|---|-----------------------|---|
| F <sub>1</sub> +0     | F <sub>1</sub> +0 菌液 F <sub>1</sub> +0 bacterial solution         | F <sub>3</sub> +0     | F <sub>3</sub> +0 菌液 F <sub>3</sub> +0 bacterial solution         |
| F <sub>1</sub> +25%   | F <sub>1</sub> +25% 菌液 F <sub>1</sub> +25% bacterial solution     | F <sub>3</sub> +25%   | F <sub>3</sub> +25% 菌液 F <sub>3</sub> +25% bacterial solution     |
| F <sub>1</sub> +27.5% | F <sub>1</sub> +27.5% 菌液 F <sub>1</sub> +27.5% bacterial solution | F <sub>3</sub> +27.5% | F <sub>3</sub> +27.5% 菌液 F <sub>3</sub> +27.5% bacterial solution |
| F <sub>1</sub> +30%   | F <sub>1</sub> +30% 菌液 F <sub>1</sub> +30% bacterial solution     | F <sub>3</sub> +30%   | F <sub>3</sub> +30% 菌液 F <sub>3</sub> +30% bacterial solution     |
| F <sub>2</sub> +0     | F <sub>2</sub> +0 菌液 F <sub>2</sub> +0 bacterial solution         | F <sub>4</sub> +0     | F <sub>4</sub> +0 菌液 F <sub>4</sub> +0 bacterial solution         |
| F <sub>2</sub> +25%   | F <sub>2</sub> +25% 菌液 F <sub>2</sub> +25% bacterial solution     | F <sub>4</sub> +25%   | F <sub>4</sub> +25% 菌液 F <sub>4</sub> +25% bacterial solution     |
| F <sub>2</sub> +27.5% | F <sub>2</sub> +27.5% 菌液 F <sub>2</sub> +27.5% bacterial solution | F <sub>4</sub> +27.5% | F <sub>4</sub> +27.5% 菌液 F <sub>4</sub> +27.5% bacterial solution |
| F <sub>2</sub> +30%   | F <sub>2</sub> +30% 菌液 F <sub>2</sub> +30% bacterial solution     | F <sub>4</sub> +30%   | F <sub>4</sub> +30% 菌液 F <sub>4</sub> +30% bacterial solution     |

**1.3.4 测定指标及方法** 每盆随机选取 6 株,测定土壤到枝条的垂直高度为株高。将各处理的植株地上、地下部分分开采集,装入自封袋中,用烘干法<sup>[17]</sup>测定生物量。采用 LA2400 scanner 型根系扫描仪(Epson Expression 1000 XL,中国)测定总根长、总根表面积和总根体积等指标<sup>[18]</sup>。将每个处理植株的根全部取出,采用传统计数法<sup>[19]</sup>测定每盆紫花苜蓿的根瘤数。采用乙醇提取法<sup>[20]</sup>测定叶绿素含量,计算公式如下:

$$Chla = 13.95D_{665} - 6.68D_{649}$$

$$Chlb = 24.96D_{649} - 7.32D_{665}$$

$$\text{叶绿素总含量} = Chla + Chlb$$

式中:Chla 代表叶绿素 a 的含量;Chlb 代表叶绿素 b 的含量; $D_{665}$  代表 665 nm 下的吸光值; $D_{649}$  代表 649 nm 下的吸光值。

## 1.4 数据分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行显著性检验,采用 Duncan's 新复极差法进行显著性方差分析;采用 Origin 2022 进行绘图与数据处理。用模糊数学隶属函数法对各处理紫花苜蓿各项指标进行综合评价<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌肥货架期的测定

**2.1.1 不同处理菌肥有效活菌数变化** 菌肥中的有效活菌数量是判定菌肥质量的关键指标(图1)。随着菌肥存放时间的延长,不同处理中的有效活菌数大部分呈先上升后下降趋势。贮存0~30 d,当菌液添加量为25%时,除F<sub>4</sub>以外,其余处理有效活菌数均呈上升趋势;当菌液添加量为27.5%时,F<sub>3</sub>和F<sub>4</sub>有效活菌数呈下降趋势,F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>呈上升趋势;当菌液添加量为30%时,F<sub>2</sub>有效活菌数呈下降趋势。60~180 d时,各处理有效活菌数整体呈先上升后缓慢下降趋势。不同处理菌肥保存180 d时,有效活菌数均大于 $2 \times 10^8$  cfu·g<sup>-1</sup>;其中当菌液添加量为25%时,F<sub>3</sub>处理的有效活菌数最高,当菌液添加量为27.5%和30%时,F<sub>2</sub>处理的有效活菌数最高。

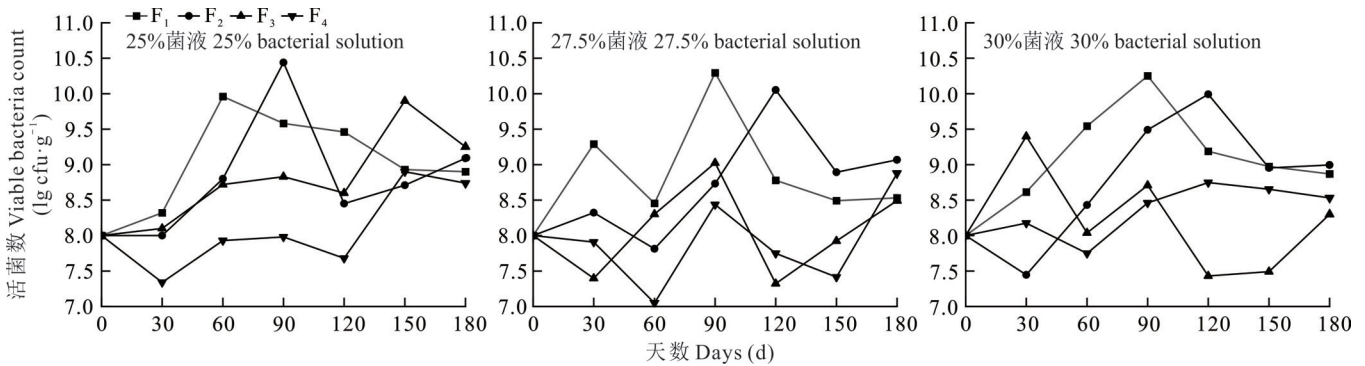


图1 不同处理菌肥有效活菌数变化

Fig. 1 Change of effective viable bacteria count of different treatments

**2.1.2 不同处理菌肥杂菌数变化** 国家农用微生物菌剂要求固体菌肥保存6个月之后杂菌数必须低于 $3 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>。在0~30 d时,不同处理菌肥杂菌数迅速增长(图2)。在30~180 d时,不同处理菌肥杂菌数呈缓慢增长趋势。当贮存180 d时,菌液添加量为25%时,F<sub>2</sub>处理杂菌数最少,菌液添加量为27.5%时,F<sub>4</sub>处理杂菌数最少,菌液添加量为30%时,F<sub>4</sub>处理杂菌数最少,但不同处理菌肥杂菌数均不超过 $3 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup>,符合国家菌肥制作标准。

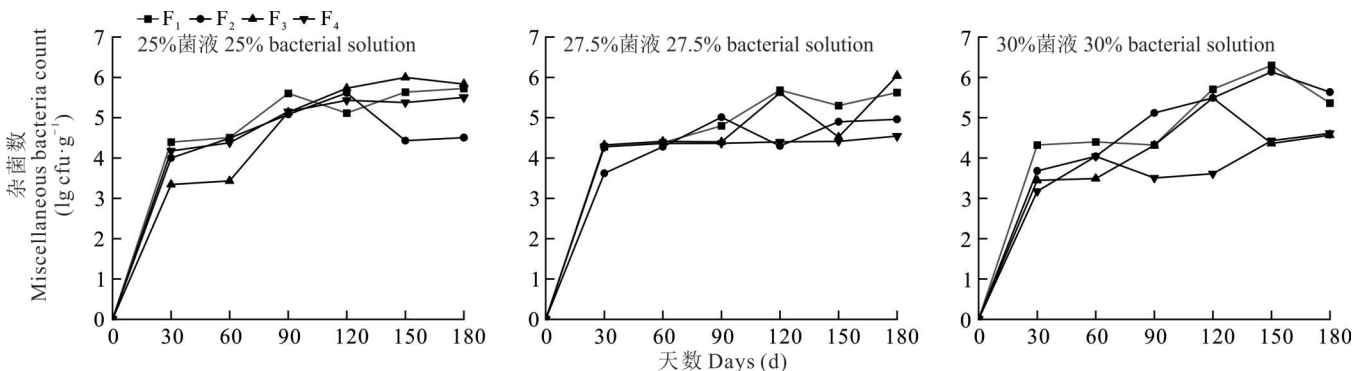


图2 不同处理菌肥杂菌数变化

Fig. 2 The change of miscellaneous bacteria count under different treatments

2.2 盆栽试验结果

2.2.1 不同处理菌肥对紫花苜蓿农艺性状的影响

不同载体和菌液添加量对紫花苜蓿株高均有显著影响(图 3)。在同一载体处理下,添加菌液处理紫花苜蓿株高较不添加菌液处理下显著提高,且添加 25% 和 27.5% 菌液处理株高较添加 30% 菌液处理有显著提高;在相同菌液添加量下, F<sub>2</sub> 处理紫花苜蓿株高最高,与 F<sub>4</sub> 相比有显著差异(除 0 菌液添加); F<sub>2</sub>+25% 菌液处理紫花苜蓿株高最高,为 33.9 cm,较无添加的对照处理提高了 70.4%。

不同载体和不同菌液添加量对紫花苜蓿地上生物量的影响呈不同的趋势(图 4A)。在相同的菌液添加量下,不同载体影响了紫花苜蓿的地上生物量,当菌液添加量为 27.5% 时, F<sub>3</sub> 处理比 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 和 F<sub>4</sub> 处理紫花苜蓿地上生物量增加了 21.3%、3.4% 和 181.2%。在 F<sub>2</sub> 处理下,不同菌液之间没有显著差异, F<sub>3</sub> 处理下, 27.5% 菌液与 30% 菌液之间有显著差异;在 F<sub>3</sub>+27.5% 的菌液处理下,紫花苜蓿地上生物量最高,较无添加对照处理增加了 58.3%。

不同载体和不同菌液添加量对紫花苜蓿地下生物量有显著影响(图 4B)。在 25% 菌液添加下, F<sub>2</sub> 处理紫花苜蓿地下生物量最高,较 F<sub>1</sub>、F<sub>3</sub> 和 F<sub>4</sub> 处理分别提高了 40.1%、62.5% 和 64.4%。在相同载体处理下,不同菌液处理之间存在显著差异。在 F<sub>2</sub>+25% 的菌液处理下,紫花苜蓿地下生物量最高,较无添加对照处理提高了 86.2%。

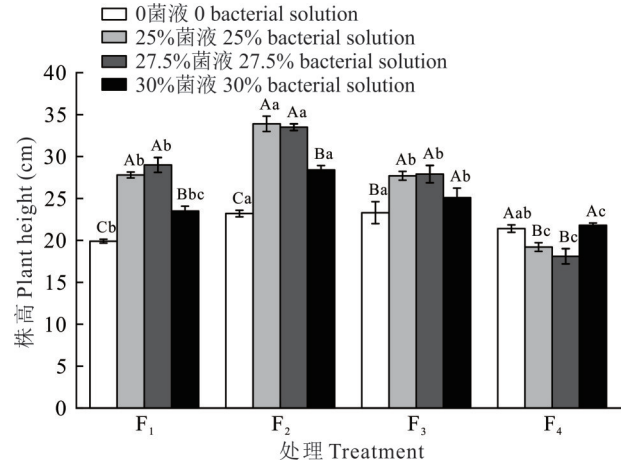


图 3 不同处理菌肥对紫花苜蓿株高的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on plant height of alfalfa

不同大写字母表示在同一载体处理下不同菌液浓度处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示在同一菌液浓度处理下不同载体处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。The capital letters represent the significant differences ( $P < 0.05$ ) among different bacterial solution concentrations treated with the same carrier, and the lowercase letters represent the significant differences ( $P < 0.05$ ) among different carrier treated with the same bacterial solution concentration, the same below.

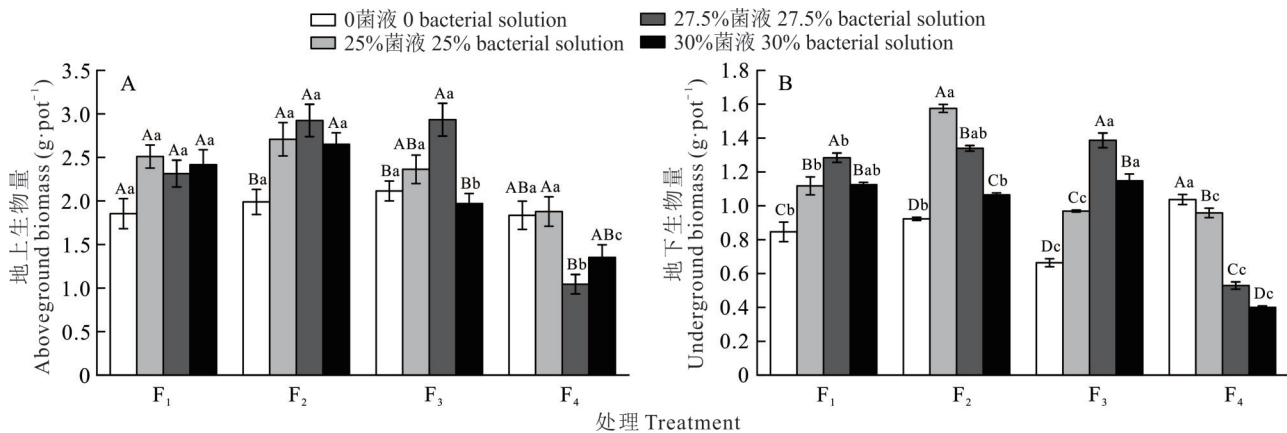


图 4 不同处理菌肥对紫花苜蓿生物量的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on biomass of alfalfa

2.2.2 不同处理菌肥对紫花苜蓿根系形态的影响

在 F<sub>2</sub>+25% 菌液处理下,紫花苜蓿总根长、总根表面积、根尖数和根分叉数增加最多; F<sub>4</sub>+0 菌液处理下总根体积最大; F<sub>2</sub>+27.5% 菌液处理下,根交叉数最多(表 6)。

2.2.3 不同处理菌肥对紫花苜蓿叶绿素含量的影响

在 25% 的菌液添加下, F<sub>2</sub> 处理较 F<sub>1</sub> 处理对紫花苜蓿叶绿素含量促进作用显著 ( $P < 0.05$ ); 除 F<sub>3</sub>+25% 菌液及 F<sub>4</sub>+30% 菌液之外,添加菌液 25%、27.5% 和 30% 较不添加菌液均对紫花苜蓿叶绿素含量有促进作用。 F<sub>2</sub>+25% 菌液处理下,紫花苜蓿的叶绿素含量最高,为 38.44 mg·L<sup>-1</sup>,较无添加的对照处理提高了 54.9%(图 5)。

表 6 不同处理菌肥对紫花苜蓿根系形态的影响

Table 6 Effect of different treatments on root morphology of alfalfa

| 处理<br>Treatment       | 总根长<br>Total root length<br>(cm) | 总根表面积<br>Total root surface<br>area (cm <sup>2</sup> ) | 总根体积<br>Total root volume<br>(cm <sup>3</sup> ) | 根尖数<br>Root tip<br>number | 根分叉数<br>Root bifurcation<br>number | 根交叉数<br>Root crossing<br>number |
|-----------------------|----------------------------------|--|---|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| F <sub>1</sub> +0     | 368.50±18.50bcd                  | 89.95±7.51c  | 2.07±0.39cd                                     | 430.00±30.99b             | 356.33±23.38c                      | 42.00±4.04c                     |
| F <sub>1</sub> +25%   | 252.86±26.99def                  | 36.97±3.61d  | 0.38±0.02d                                      | 241.33±11.10de            | 522.00±19.01bc                     | 86.33±4.41abc                   |
| F <sub>1</sub> +27.5% | 256.94±19.61def                  | 34.20±2.39d  | 0.36±0.02d                                      | 365.67±11.35bc            | 551.33±30.60bc                     | 100.67±13.69abc                 |
| F <sub>1</sub> +30%   | 283.73±63.04cde                  | 39.66±8.61d  | 0.44±0.09d                                      | 228.67±14.66def           | 578.67±164.66bc                    | 122.00±19.86ab                  |
| F <sub>2</sub> +0     | 474.50±43.47b                    | 122.68±17.03b  | 2.73±0.37c                                      | 399.00±23.86b             | 416.33±17.52bc                     | 70.33±16.46bc                   |
| F <sub>2</sub> +25%   | 691.52±80.19a                    | 187.42±10.63a  | 5.66±0.47b                                      | 843.67±23.55a             | 1254.33±78.61a                     | 125.67±6.17ab                   |
| F <sub>2</sub> +27.5% | 386.25±6.37bc                    | 123.29±16.46b  | 1.39±0.40cd                                     | 448.00±47.90b             | 751.33±69.87b                      | 152.67±12.67a                   |
| F <sub>2</sub> +30%   | 206.67±51.73efg                  | 34.17±9.29d  | 0.45±0.14d                                      | 244.00±61.52de            | 561.67±174.94bc                    | 93.67±34.92abc                  |
| F <sub>3</sub> +0     | 169.38±28.07efg                  | 25.03±4.35d  | 7.97±1.38a                                      | 213.00±25.70def           | 385.00±77.53bc                     | 67.67±14.45bc                   |
| F <sub>3</sub> +25%   | 340.30±44.85cd                   | 67.31±17.73c   | 1.22±0.63cd                                     | 299.00±37.40cd            | 737.00±289.66b                     | 147.00±67.51a                   |
| F <sub>3</sub> +27.5% | 160.21±5.62fg                    | 23.63±1.06d  | 0.28±0.02d                                      | 175.33±11.33ef            | 386.33±6.49bc                      | 81.67±3.28abc                   |
| F <sub>3</sub> +30%   | 138.57±8.28fg                    | 21.00±1.43d  | 0.25±0.02d                                      | 163.67±25.31ef            | 326.67±45.48c                      | 66.33±10.71bc                   |
| F <sub>4</sub> +0     | 208.29±33.02efg                  | 28.71±4.67d  | 9.14±1.49a                                      | 222.67±41.86def           | 386.00±89.18bc                     | 66.67±22.02bc                   |
| F <sub>4</sub> +25%   | 101.00±6.65g                     | 15.93±0.59d  | 0.20±0.01d                                      | 131.00±7.23f              | 210.33±22.33c                      | 28.67±2.19c                     |
| F <sub>4</sub> +27.5% | 155.34±23.19fg                   | 24.41±4.76d  | 0.31±0.08d                                      | 190.33±27.02ef            | 423.00±90.07bc                     | 71.33±11.67bc                   |
| F <sub>4</sub> +30%   | 206.66±14.55efg                  | 28.96±2.48d  | 0.32±0.04d                                      | 243.33±26.08de            | 461.33±82.49bc                     | 102.33±11.89abc                 |

注：同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著(P<0.05)。

Note: The different lowercase letters in the same column represent the significant differences among different treatments (P<0.05).

2.2.4 不同处理菌肥对紫花苜蓿根系结瘤数的影响

根系结瘤数随着菌液添加量的增加而增多,当菌液添加量为30%时,根系结瘤数最多(F<sub>2</sub>除外);在F<sub>3</sub>+30%菌液处理下根系结瘤数最多,为62.7个·盆<sup>-1</sup>,较无添加处理提高了317.8%(图6)。

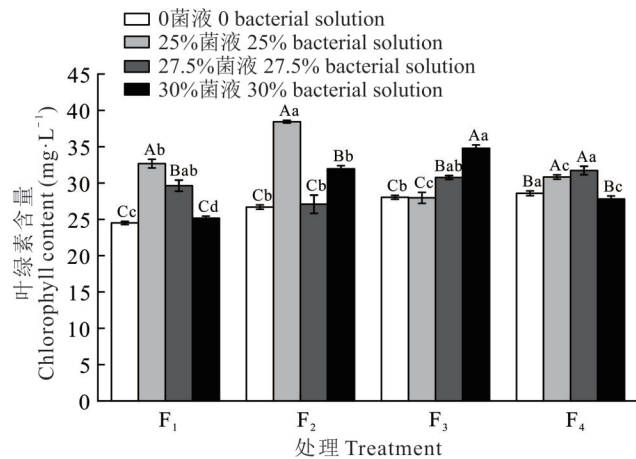


图 5 不同处理菌肥对紫花苜蓿叶绿素含量的影响  
Fig. 5 Effect of different treatments on chlorophyll content of alfalfa

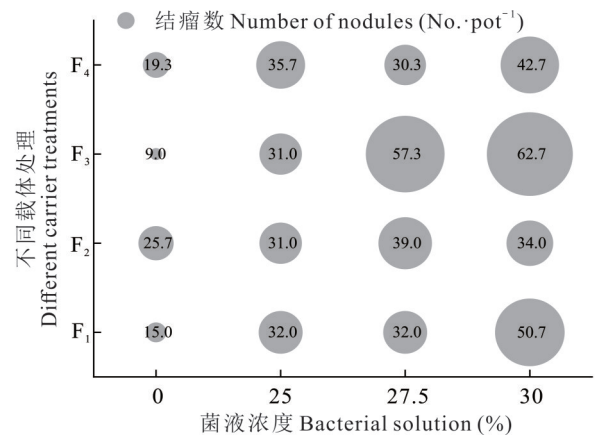


图 6 不同处理菌肥对紫花苜蓿根系结瘤数的影响  
Fig. 6 Effect of different treatments on root nodule numbers of alfalfa

2.2.5 隶属函数综合性分析

采用模糊隶属函数法对所测的10个盆栽指标进行计算分析,综合评价不同处理菌肥对紫花苜蓿生长的促进作用。结果表明,在所有的处理中,F<sub>2</sub>+25%菌液处理隶属函数值最高,表现最好,

其次为  $F_2+27.5\%$  菌液;隶属函数值最低的为  $F_4+25\%$  菌液处理(表 7)。

### 3 讨论

菌肥是由于微生物生命活动而使农作物得到特定肥料效应的一类制品<sup>[23]</sup>。许多有益微生物在生长发育过程中能够为植物提供一些营养元素以及分泌对植物生长有利的初级或次级代谢产物,如吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)、脱落酸(abscisic acid, ABA)等<sup>[24]</sup>,进而促进植物生长。因此菌肥中的有效活菌数是评价菌肥质量的一个重要指标。本试验通过稀释平板计数法测定了不同处理菌肥的有效活菌数;结果表明:不同处理菌肥的有效活菌数整体随贮存时间的延长而降低,在贮存 180 d 后各处理有效活菌数均符合菌肥行业 GB 20287-2006 国家标准<sup>[22]</sup>;其中,在 0~90 d,  $F_2+25\%$  菌液处理有效活菌数最高;90~180 d,  $F_2+27.5\%$  菌液处理有效活菌数最高;整体来看,在 0~180 d,  $F_2+25\%$  菌液处理有效活菌数最高。原因可能是不同梯度菌液添加影响了菌肥的含水量。菌肥中含水量过低会导致细菌的活性受到抑制,含水量过高会造成厌氧环境,导致需氧细菌的死亡,菌肥中有效活菌数降低;添加 5% 凹凸棒时菌剂中有效活菌数比其他凹凸棒添加量高的原因可能是,少量凹凸棒添加时会对微生物提供一定的营养物质,当添加量过高时有效活菌数反而低的原因可能是在有机肥中添加凹凸棒的量超过 10% 时,将会使得有机肥中氮素损失增加,有机质含量降低<sup>[25]</sup>,微生物可利用的营养减少,使得菌剂中有效活菌数降低,具体原因有待进一步探究。

根系是土壤养分的利用者和产量的贡献者<sup>[26]</sup>,且对植株起固定作用,同时根系是作物吸收水分和营养物质的主要通道,以供植物体正常生长发育<sup>[27]</sup>。本研究结果发现,菌肥中有效活菌数与紫花苜蓿的根系形态呈正相关,在  $F_2+25\%$  菌液处理下菌肥活菌数最高,同时该处理能够有效促进紫花苜蓿总根长、总根表面积、根尖数和根分叉数,这是因为菌肥中包含的有益微生物可产生大量的有机酸,将土壤中的不溶性磷转变为植物可利用的有效磷,从而增强土壤中磷对作物的供应。此外植物根系周围的促生菌还可将少量固定的氮素供给植物,发挥良好的固氮促生作用<sup>[28]</sup>。其部分原因还可能来自菌肥载体,本试验所用的菌肥载体由有机肥加不同比例凹凸棒构成,为富营养介质,在幼苗生长阶段为其提供了部分营养。杨建军等<sup>[29]</sup>发现凹凸棒能显著提高红芪(*Radix hedysari*)主根长和地下根干物质积累量,本试验结果与其基本一致。

根系与地上部分的生长关系复杂而微妙,根系发达且生理活动旺盛,可以有效促进地上部分枝叶的生长发育,为植株其他部分的生长提供能源和原材料。紫花苜蓿作为一种多年生豆科植物,以其高生物量产出和优良的营养价值而著称<sup>[30]</sup>。株高和生物量则是衡量紫花苜蓿生长发育状况的重要指标,可作为描述紫花苜蓿生长状况及产量的直观表象。本研究结果表明,  $F_2+25\%$  菌液处理对紫花苜蓿的株高和地上、地下生物量促进作用最明显,分别较对照提高了 70.4%、46.5% 和 86.2%。贺生兵等<sup>[31]</sup>研究发现,在葡萄(*Vitis vinifera*)上施用凹凸棒复合微生物肥料能够使葡萄表现出增产和提质的效果,Guan 等<sup>[32]</sup>研究发现凹凸棒包衣化肥可以使玉米(*Zea mays*)产量提高 15.1%~18.4%,李昌宁等<sup>[33]</sup>研究发现植物根际促生菌能够有效促进紫花苜蓿的生长、改善紫花苜蓿的品质,本试验结果与其基本一致。

植物的光合作用对生态系统的能量和物质循环有非常重要的作用,是作物产量和品质的决定性因素<sup>[34]</sup>。叶

表 7 不同处理菌肥的综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of different treatments of bacterial fertilizer

| 处理 Treatment | 隶属平均值 Membership mean | 排序 Sequence |
|--------------|-----------------------|-------------|
| $F_1+0$      | 0.241                 | 13          |
| $F_1+25\%$   | 0.372                 | 7           |
| $F_1+27.5\%$ | 0.378                 | 5           |
| $F_1+30\%$   | 0.361                 | 8           |
| $F_2+0$      | 0.374                 | 6           |
| $F_2+25\%$   | 0.869                 | 1           |
| $F_2+27.5\%$ | 0.592                 | 2           |
| $F_2+30\%$   | 0.384                 | 4           |
| $F_3+0$      | 0.278                 | 11          |
| $F_3+25\%$   | 0.448                 | 3           |
| $F_3+27.5\%$ | 0.378                 | 5           |
| $F_3+30\%$   | 0.323                 | 9           |
| $F_4+0$      | 0.298                 | 10          |
| $F_4+25\%$   | 0.146                 | 15          |
| $F_4+27.5\%$ | 0.170                 | 14          |
| $F_4+30\%$   | 0.252                 | 12          |

绿素是植物光合作用不可或缺的物质<sup>[35]</sup>,本研究发现,在25%的菌液添加下,F<sub>2</sub>处理紫花苜蓿叶绿素含量最高;本研究还发现,与不添加菌液相比,添加25%、27.5%和30%菌液整体上均对紫花苜蓿叶片叶绿素含量有促进作用,其中添加25%菌液促进效果最明显。菌肥含水量过高或过低都会影响菌肥中有效活菌的数量,添加25%菌液较27.5%和30%菌液效果好的原因可能是添加25%菌液的菌肥中含水量更适合微生物存活。综合凹凸棒与菌液添加量分析发现,F<sub>2</sub>+25%菌液处理下紫花苜蓿叶绿素含量最高,可能是由于该处理下菌肥有效活菌数高,促进了植物根系吸收周围土壤中的氮、磷等叶绿素合成所需要的关键营养元素,进而导致叶绿素含量增加。

#### 4 结论

不同处理菌肥有效活菌数在保存180 d后均大于 $2 \times 10^8$  cfu·g<sup>-1</sup>,杂菌数均低于 $3 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup>,符合国家菌肥制作标准。其中F<sub>2</sub>+25%菌液处理能够有效提高菌肥中的有效活菌数,通过对植物生长指标进行模糊隶属函数分析发现,该处理对紫花苜蓿的促生效果最好,可作为豆科植物紫花苜蓿的菌肥载体进一步推广应用。

#### 参考文献 References:

- [1] Liu F, Jing S X, Hu J, *et al.* Effects of cadmium and arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the growth and nitrogen uptake of alfalfa (*Medicago sativa*). *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(2): 69–77.  
刘芳, 景成旋, 胡健, 等. 镉污染和接种丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生长和氮吸收的影响. *草业学报*, 2017, 26(2): 69–77.
- [2] Ge X L, Yang H S, Liu J, *et al.* Effects of phosphorus level on growth and hay yield of alfalfa. *Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences)*, 2009, 24(5): 509–513.  
葛选良, 杨恒山, 刘晶, 等. 施磷水平对紫花苜蓿生长及草产量的影响. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2009, 24(5): 509–513.
- [3] Li Y B, Li Y L, Guan G H, *et al.* Screening, identification of plant growth promoting rhizobacteria and its effect on reducing fertilization while increasing efficiency in wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2020, 28(8): 1471–1476.  
李永斌, 李云龙, 关国华, 等. 植物根际促生菌的筛选、鉴定及其对小麦的减肥增产效果. *农业生物技术学报*, 2020, 28(8): 1471–1476.
- [4] Duan Q B, Yao T, Han H W, *et al.* Formulation of biofertilizer carrier using solid agricultural residues. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(1): 147–151.  
段淇斌, 姚拓, 韩华雯, 等. 利用几种固体农业废弃物配制生物肥料载体的研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(1): 147–151.
- [5] Zhang S Y. Application of fly ash in absorbing silicate bacteria. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 2006, 23(3): 30–33.  
章淑艳. 粉煤灰在硅酸盐菌剂中的应用. *河北省科学院学报*, 2006, 23(3): 30–33.
- [6] Stephens J H G, Rask H M. Inoculant production and formulation. *Field Crops Research*, 2000, 65(2/3): 249–258.
- [7] Wei Y F, Wang J T, Li W H, *et al.* Effects of attapulgite–biochar composites on nutrient slow-release in pakchoi field and the growth of pakchoi. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(22): 121–132.  
魏彦凤, 王继涛, 李文慧, 等. 凹凸棒土–生物炭缓释材料对养分缓释及小白菜生长的影响. *农业工程学报*, 2023, 39(22): 121–132.
- [8] Sainao W Q, Zhang M D, Ma X J, *et al.* Physiological effects of cadmium stress on *Astragalus membranaceus* seedlings and alleviative effects of attapulgite clay on cadmium stress. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, 43(15): 3115–3126.  
赛闹汪青, 张牡丹, 马小俊, 等. 镉胁迫对黄芪幼苗的生理学影响及凹凸棒粘土对镉胁迫缓解作用的研究. *中国中药杂志*, 2018, 43(15): 3115–3126.
- [9] Tian Z H, Xue S P. Attapulgite modification and its research of repairing the soil of heavy metal contaminated. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(4): 883–887.  
田振华, 薛胜平. 凹凸棒石改性及其修复重金属污染土壤的研究. *应用化工*, 2019, 48(4): 883–887.
- [10] Wang A Q, Lu Y S, Kang Y R, *et al.* Research progress on the applications of attapulgite in animal healthy breeding. *Feed Industry*, 2024, 45(10): 1–9.  
王爱勤, 卢予沈, 康玉茹, 等. 凹凸棒石在动物健康养殖中应用研究进展. *饲料工业*, 2024, 45(10): 1–9.
- [11] Bao S D. *Agrochemical analysis of soil*. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 39–114.

- 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2006: 39—114.
- [12] Hu Z Q, Wang K H, Li C, *et al.* Cluster analysis of bacteriostatic effects of 50 heat-clearing Chinese medicine against *Staphylococcus aureus*. Chinese Journal of Medical Guide, 2023, 25(11): 1161—1166.  
胡子卿, 王珂慧, 李驰, 等. 50种清热类中药对金黄色葡萄球菌抑菌作用的聚类分析. 中国医药导刊, 2023, 25(11): 1161—1166.
- [13] Li Q, Yao T, Yang X M, *et al.* Effects of different dosages of microbial fertilizers on growth and quality of oat in semi-arid area. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(3): 159—165.  
李琦, 姚拓, 杨晓玫, 等. 半干旱地区不同剂型微生物菌肥替代部分化肥对燕麦生长和品质的影响. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 159—165.
- [14] Jin Y L, Yao T, Lan X J, *et al.* Inhibition characteristics of four strains of biocontrol bacteria against root rot pathogens of oats. Grassland and Turf, 2023, 43(6): 9—16.  
金艳丽, 姚拓, 兰晓君, 等. 4株生防细菌对燕麦根腐病原菌抑菌特性研究. 草原与草坪, 2023, 43(6): 9—16.
- [15] Xie X, Yang J L, Liu X Y. Optimizing the determination conditions of total bacterial colonies in soil. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(11): 92—95.  
谢夏, 杨建兰, 刘新育. 土壤中细菌菌落总数的测定条件优化. 中国农学通报, 2020, 36(11): 92—95.
- [16] Lou X D, Zhang G L, Ye B C. Screening of high selenium-enriched yeast and enhancement of its selenium-enriched capacity. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(12): 132—137.  
娄兴丹, 张根林, 叶邦策. 高富硒酵母的筛选及富硒强化研究. 生物技术通报, 2017, 33(12): 132—137.
- [17] Wang L R, Wang W, Pu X J, *et al.* Comparison of feeding quality and production performance of different alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties in the arid zone of eastern Qinghai Province. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1936—1943.  
王龙然, 王伟, 蒲小剑, 等. 青海东部干旱区不同紫花苜蓿品种饲用品质和生产性能比较. 草地学报, 2024, 32(6): 1936—1943.
- [18] Han D R, Yao T, Li H Y, *et al.* Effect of reducing chemical fertilizer and substitution with microbial fertilizer on the growth of *Elymus nutans*. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(4): 53—61.  
撤冬荣, 姚拓, 李海云, 等. 化肥减量配施微生物肥料对垂穗披碱草生长的影响. 草业学报, 2022, 31(4): 53—61.
- [19] Li X M, Yao T, Li C N, *et al.* Screening and identification of symbiotically efficient and stress-resistant rhizobia of wild *Medicago lupulina* in Gannan. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 134—143.  
李雪梅, 姚拓, 李昌宁, 等. 甘南野生天蓝苜蓿高效共生、抗逆根瘤菌筛选鉴定. 草业学报, 2025, 34(3): 134—143.
- [20] Li H S. Plant physiology biochemistry experiment principle and technology. Beijing: Higher Education Press, 2000: 186—187.  
李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000: 186—187.
- [21] Dong W K, Ma X, Zhou X W, *et al.* Effects of exogenous glycine betaine on the physiological characteristics in *Medicago sativa* seedlings under low-temperature stress. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 130—140.  
董文科, 马祥, 周学文, 等. 外源甜菜碱对低温胁迫下紫花苜蓿幼苗生理特性的影响. 草地学报, 2019, 27(1): 130—140.
- [22] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Microbial inoculants in agriculture, GB20287-2006. Beijing: China Standard Press, 2006.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农用微生物菌剂, GB20287-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [23] Andreeva O A, Kozhevin P A. Optimization of natural communities of soil microorganisms as a way to create microbial fertilizers. Moscow University Soil Science Bulletin, 2014, 69(4): 184—187.
- [24] Liu J J. Effects of microbial fertilizer on maize seedling and growth in black soil. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.  
刘京京. 微生物肥料对黑土农田玉米苗情及生长发育的影响研究. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [25] Wang Y X, E S Z, Yuan J H, *et al.* Effects of attapulgit addition on fermentation temperature and nutrient content of organic fertilizer. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(12): 2779—2787.  
王钰轩, 俄胜哲, 袁金华, 等. 凹凸棒添加对有机肥发酵温度及养分的影响. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2779—2787.
- [26] Lynch J P, Brown K M. New roots for agriculture: exploiting the root phenome. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2012, 367(1595): 1598—1604.
- [27] Niu X L, Nan Z B. Review of minirhizotron applications for study of fine roots in grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(11): 205—215.

- 牛学礼, 南志标. 运用微根管技术研究草地植物细根的进展. 草业学报, 2017, 26(11): 205–215.
- [28] Li Z Y, Zhang R, Zhang J, *et al.* Effect of compound microbial fertilizer on the root growth of *Trifolium pratense* L. cv. Minshan by partly replacing chemical fertilizer. *China Herbivore Science*, 2018, 38(1): 38–42.  
李智燕, 张榕, 张洁, 等. 微生物专用菌肥与化肥配施对红三叶根系生长的影响. 中国草食动物科学, 2018, 38(1): 38–42.
- [29] Yang J J, Cheng W D, Lin H M, *et al.* Effect of palygorskite adding NPK fertilizer on plant dry matter accumulation and polysaccharide content of *Radix hedysari*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(9): 4536–4538, 4541.  
杨建军, 程卫东, 蒯海明, 等. 坡缕石与氮磷钾配施对红芪干物质积累及多糖含量的影响. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4536–4538, 4541.
- [30] Kusi N Y O. Growth response of alfalfa to Azomite composite micronutrient fertilizer on four lime-amended Virginia soils. *Grassland Science*, 2021, 67(3): 225–233.
- [31] He S B, Yu C F, Pei H D, *et al.* Application effect of Xinqing attapulgite compound microbial fertilizer on red Earth grape. *Agricultural Technology and Information*, 2023(10): 132–136.  
贺生兵, 余彩芬, 裴海东, 等. 欣庆凹凸棒复合微生物肥料在红地球葡萄上的应用效果. 农业科技与信息, 2023(10): 132–136.
- [32] Guan Y, Song C, Gan Y, *et al.* Increased maize yield using slow-release attapulgite-coated fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(3): 657–665.
- [33] Li C N, Li Z X, Cao Q X, *et al.* Effects of 5 plant growth-promoting rhizobacteria on the growth and quality of *Medicago sativa*. *Grassland and Turf*, 2018, 38(3): 29–34.  
李昌宁, 李政璇, 曹全熙, 等. 5株植物根际促生菌对紫花苜蓿生长和品质的影响. 草原与草坪, 2018, 38(3): 29–34.
- [34] Cheng Q D. Research on the effects of microbial fertilizer on growth and development of *Lycium barba* L. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014.  
程乾斗. 微生物肥料对枸杞生长发育影响的研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [35] Zhu D. Study on growth promoting effect of compound microbial fertilizer on oat growth. Harbin: Harbin Normal University, 2022.  
祝丹. 复合微生物肥料对燕麦的促生效果研究. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.