

DOI:10.11686/cyxb2025075

http://cyxb.magtech.com.cn

张颖, 贺善睦, 何傲蕾, 等. 微生物菌剂与有机钙蛋白配施对紫花苜蓿生长和土壤酶活性的影响. 草业学报, 2026, 35(1): 25—39.

ZHANG Ying, HE Shan-mu, HE Ao-lei, *et al.* Effects of microbial inoculants combined with organic calcium protein on alfalfa growth and soil enzyme activity. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 25—39.

## 微生物菌剂与有机钙蛋白配施对紫花苜蓿生长和土壤酶活性的影响

张颖, 贺善睦, 何傲蕾, 李昌宁, 姚拓\*

(草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为研究微生物菌剂与有机钙蛋白联合配施对紫花苜蓿生长和土壤酶活性的影响,以蕈状芽孢杆菌 Y1、莫哈韦芽孢杆菌 LrM2 和产黄假单胞菌 M1 为候选菌株,制备了 3 种浓度的微生物菌剂 ( $10^8$ 、 $10^9$  和  $10^{10}$  cfu·mL<sup>-1</sup>),每种浓度的微生物菌剂分别配施 5 种有机钙蛋白添加量 (2%、4%、6%、8% 和 10%),通过盆栽试验观测各处理对紫花苜蓿生长性状、营养品质、根系形态和土壤酶活性的影响。结果表明:1)各处理均能促进紫花苜蓿生长,第 1 茬干重最高的是 D<sub>4</sub> 处理 ( $10^{10}$  cfu·mL<sup>-1</sup> 微生物菌剂 + 6% 有机钙蛋白),为 1.47 g·30 株<sup>-1</sup>,第 2 茬干重最高的是 B<sub>5</sub> 处理 ( $10^8$  cfu·mL<sup>-1</sup> 微生物菌剂 + 8% 有机钙蛋白),为 5.5 g·30 株<sup>-1</sup>;2)微生物菌剂与有机钙蛋白配施显著提高了紫花苜蓿的总根长、根直径、根表面积和根体积,在同一微生物菌剂浓度前提下,随有机钙蛋白增加,以上指标均呈先增加后降低的趋势;3)C<sub>5</sub> 处理 ( $10^9$  cfu·mL<sup>-1</sup> 微生物菌剂 + 8% 有机钙蛋白)的紫花苜蓿相对饲用价值可达 226.56, D<sub>5</sub> 处理 ( $10^{10}$  cfu·mL<sup>-1</sup> 微生物菌剂 + 8% 有机钙蛋白)的总叶绿素含量最高;4)与单独施用微生物菌剂相比,两者配施提高了土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶及脲酶活性;5)经优劣解距离法 (TOPSIS) 综合评价, D<sub>4</sub> 处理不但能促进紫花苜蓿生长,还可以提高土壤酶活性,可在生产上推广应用。

**关键词:**紫花苜蓿;微生物菌剂;有机钙蛋白;营养品质;土壤酶活性

## Effects of microbial inoculants combined with organic calcium protein on alfalfa growth and soil enzyme activity

ZHANG Ying, HE Shan-mu, HE Ao-lei, LI Chang-ning, YAO Tuo\*

Key Laboratory of Grass Ecosystem of Ministry of Education, College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** To investigate the effects of the combined application of microbial inoculants and organic calcium protein on alfalfa (*Medicago sativa*) growth and soil enzyme activity, three candidate strains [*Bacillus mycoides* (Y1), *Bacillus mojavenensis* (LrM2), and *Pseudomonas synxantha* (M1)] were used to prepare a microbial inoculant applied at three concentrations ( $10^8$ ,  $10^9$ , and  $10^{10}$  cfu·mL<sup>-1</sup>). Each inoculant concentration was paired with five supplementation levels of organic calcium protein (2%, 4%, 6%, 8%, and 10%) in a pot experiment. The effects of these treatments on alfalfa growth traits, nutritional quality, root morphology, and soil enzyme activity were evaluated. The results showed that: 1) All treatments promoted alfalfa growth. The highest dry yield in the first crop (1.47 g·30 plants<sup>-1</sup>) was achieved with treatment D<sub>4</sub> ( $10^{10}$  cfu·mL<sup>-1</sup> microbial inoculant + 6% organic calcium

收稿日期:2025-03-11;改回日期:2025-05-06

基金项目:国家牧草产业体系金昌综合试验站(CARS-34)资助。

作者简介:张颖(2002—),女,甘肃渭源人,在读硕士。E-mail: 3165939484@qq.com

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

protein), while treatment B<sub>5</sub> (10<sup>8</sup> cfu·mL<sup>-1</sup> microbial inoculant+8% organic calcium protein) yielded the highest in the second crop (5.5 g·30 plants<sup>-1</sup>). 2) The combined application significantly enhanced alfalfa's total root length, root diameter, root surface area, and root volume. At a fixed inoculant concentration, these parameters initially increased and then decreased with increasing organic calcium protein supplementation. 3) Alfalfa plants in treatment C<sub>5</sub> (10<sup>9</sup> cfu·mL<sup>-1</sup> microbial inoculant+8% organic calcium protein) showed the highest relative feed value (RFV=226.56), whereas treatment D<sub>5</sub> (10<sup>10</sup> cfu·mL<sup>-1</sup> microbial inoculant+8% organic calcium protein) resulted in the maximum total chlorophyll content. 4) Compared to the application of microbial inoculant alone, the combined treatment significantly increased the activities of soil alkaline phosphatase, sucrase, catalase, and urease. 5) Based on the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) evaluation, treatment D<sub>4</sub> not only enhanced alfalfa growth but also improved soil enzyme activity, demonstrating high potential for practical agricultural application.

**Key words:** *Medicago sativa*; microbial inoculants; organic calcium protein; nutritional quality; soil enzyme activity

微生物菌剂(microbial inoculants)是一种含有活性微生物的肥料,作用包括促进作物生长和土壤难溶养分转化,抑制病原菌和改良土壤<sup>[1]</sup>,近年来,微生物菌剂的研究与应用有了很大的突破,其中以植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)主要成分研制的新型PGPR菌剂已成为国内外化肥替代物研究的热点之一<sup>[2]</sup>。微生物菌剂可分为单一菌剂和复合菌剂,其中,单一微生物菌剂是由一种微生物经工业化生产制成的,如固氮菌剂、生防菌剂和溶磷菌剂等。目前市面上主要是应用复合微生物菌剂,是将两种或两种以上互不拮抗或是互相增效的菌剂组合工业化生产而来<sup>[3-4]</sup>。在促进作物生长和品质方面,复合微生物菌剂具有更大的开发潜力和应用价值。

有机钙蛋白(organic calcium protein)是一种苜蓿(*Medicago sativa*)专用肥,用于酸化、盐碱化土壤改良,该肥料呈弱碱性,富含丰富的多肽蛋白和有机螯合钙,可调理土壤pH值,同时中和土壤中的酸根离子,提高土壤有机质,改善土壤物理性状,且降低因连续多年种植苜蓿而对苜蓿生长、发育和产量等造成的不利影响。有研究表明,施加有机钙蛋白不仅可以减少土传病害的发病率,也可抑制根部的病害发病率和蔓延,增强土壤中有益微生物的生命活动和繁殖能力<sup>[5-6]</sup>。与其他肥料相比,有机钙蛋白还能额外补充作物生长必需的钙元素,但单独施用有机钙蛋白,无法满足作物生长所需的全部元素。因此为保证作物高产高质以及提高土壤活力,本研究采用微生物菌剂和有机钙蛋白联合施用的方式。

紫花苜蓿是一种广泛分布于众多地区的优良豆科牧草,富含粗蛋白,对各种环境具有较强的适应能力,因此被誉为“牧草之王”<sup>[7]</sup>。紫花苜蓿不仅适应性广泛,还有极高的饲用及经济价值,且由于其独特的氮利用方式,能够固氮改土,发挥出了较高的生态价值<sup>[8-9]</sup>。目前提升紫花苜蓿产量和品质的研究主要集中于育种、播种方式以及施肥等方面,其中微生物菌剂与复合肥单独施用或配施对其增产提质影响的研究是热点,然而微生物菌剂与有机钙蛋白配施对其产量提升、品质优化及土壤生态改良等影响的研究鲜见报道<sup>[10-11]</sup>。

鉴于此,本研究选取课题组前期筛选的综合表现良好的3株PGPR菌株(Y1、LrM2、M1)<sup>[12-13]</sup>,将其培养制成微生物菌剂,采用不同浓度微生物菌剂与多种有机钙蛋白比例配施用于紫花苜蓿,测定紫花苜蓿的生物量、根系形态、营养品质及土壤酶活性等指标,筛选微生物菌剂与有机钙蛋白最佳配比,以期研究更适宜紫花苜蓿生长的施肥方案,为紫花苜蓿的高效种植开辟新路径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

紫花苜蓿品种选用‘中苜1号’(*M. sativa* ‘Zhongmu No. 1’),发芽率≥98%,购自甘肃创绿草业科技有限公司。

微生物菌剂中选用的3株菌株,由甘肃农业大学草业学院草地有益微生物挖掘与利用课题组提供,菌株特性

见表 1。有机钙蛋白(苜蓿专用肥)市售,有机螯合钙 $\geq 8\%$ ,多肽蛋白 $\geq 8\%$ ,氮磷钾 $\geq 5\%$ ,有机质 $\geq 20\%$ ,由天津纽艾格农业科技有限公司生产。

微生物菌剂制备:将在 LB 固体培养基上生长 24 h 的供试菌株分别单独接种于 LB 液体培养基中,置于摇床  $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $28 \text{ }^\circ\text{C}$  培养 48 h,后用无菌水调节使  $\text{OD}_{600\text{nm}}$  值一致,制成菌液,备用。3 种菌液按体积比 1:1:1 混合,将制备好的混合菌液扩大培养至菌液中细胞数量达到  $10^8$ 、 $10^9$ 、 $10^{10} \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,加入不同梯度有机钙蛋白(2%、4%、6%、8% 和 10%)后再培养,常温保存备用<sup>[14]</sup>。

LB 培养基全称 Lysogeny Broth,即溶菌肉汤。配方( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ):酵母粉 5 g,蛋白胨 10 g,氯化钠 5 g,琼脂粉 18 g, pH 7.0,  $121 \text{ }^\circ\text{C}$  灭菌 30 min<sup>[15]</sup>;液体培养基不加琼脂。

表 1 供试菌株

Table 1 Tested strains

菌株编号 Strain code	菌株学名 Scientific name	宿主植物 Host plant	促生特性 Growth promoting characteristic
Y1	蕈状芽孢杆菌 <i>Bacillus mycoides</i>	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	固氮,溶磷,分泌植物生长素 <sup>[16-17]</sup> 。
LrM2	莫哈韦芽孢杆菌 <i>Bacillus mojaviensis</i>	洽草 <i>Koeleria glauca</i>	Nitrogen fixation, phosphorus dissolving, secreting auxin <sup>[16-17]</sup> 。
M1	产黄假单胞菌 <i>Pseudomonas synxantha</i>	草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	

## 1.2 试验设计

于 2023 年 10 月在温室中进行盆栽试验,模拟室外生长条件。白天:光照 16 h,湿度 40%,温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;夜晚:黑暗 8 h,湿度 40%,温度  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[18]</sup>。将种子(35 粒 $\cdot$ 盆 $^{-1}$ )均匀种植于盛有 1 kg 土壤的花盆(高 13.9 cm,上口直径 9.8 cm,下口直径 7.3 cm)中,播种深度为 1 cm 左右。出苗后间苗(每盆留 30 株长势均一的幼苗),待其长到第 1 片真叶时施用前期制备好的菌剂 10 mL,分别于盛花期收获第 1 和 2 茬植株,测定各项指标。

试验土采自甘肃景泰县五佛乡( $37^\circ 11' 57'' \text{ N}$ ,  $104^\circ 19' 26'' \text{ E}$ ),试验前期土壤 pH 8.08,电导率  $1420 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,土壤碱性磷酸酶活性  $3.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,过氧化氢酶活性  $2.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,脲酶活性  $0.460 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,蔗糖酶活性  $5.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,有机质含量  $10.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量  $0.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,钠离子含量  $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验共设置 24 个处理(4 个重复),设置如表 2 所列。

## 1.3 测定指标

每个花盆中选取长势均一的 10 株植物进行生长性状测定,采用直尺法测定株高(自然高度),采用游标卡尺测定茎粗(相同位置)<sup>[19]</sup>。留茬 2~3 cm,刈割后立即称其鲜重,烘干法测定干重。采用乙醇-丙酮法测定叶绿素含量<sup>[20]</sup>。根系形态采用根系扫描仪(LA 2400Scanner,美国 Delta-T 公司;Expression 1000XL,日本爱普生公司),对根系进行扫描,采用 Win-RHIZO 根系分析系统软件对根系图像进行分析,获得植株总根长、根表面积、根体积、根平均直径<sup>[21]</sup>。利用干法灰化法测定粗灰分含量;采用烘干法测定干物质;利用凯氏定氮法测定粗蛋白质含量;依据 Van Soest 的方法测定酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量;采用索氏抽提法测定粗脂肪含量。同时计算相对饲用价值(relative feeding value, RFV),以上指标均以干物质基础表示<sup>[22]</sup>。

土壤酶活性的测定:参考关松荫<sup>[23]</sup>的酶活性测定方法,土壤脲酶活性采用苯酚钠比色法测定;土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定。

## 1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2019 软件进行数据整理,统计分析中用平均值和标准误表示测定结果,运用 SPSS 22.0 统计软件对试验所测数据进行显著性检验。采用优劣解距离法<sup>[12]</sup>(technique for order of preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)综合分析评价不同施肥方案对紫花苜蓿的促生效果,采用 Origin 2022 制作图表。

表2 试验处理

Table 2 Experimental treatments

处理 Treatment	处理方法 Processing method	处理 Treatment	处理方法 Processing method
A <sub>1</sub>	LB液体培养基 LB liquid medium	C <sub>1</sub>	10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂 10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants
A <sub>2</sub>	LB液体培养基+2%有机钙蛋白 LB liquid medium+2% organic calcium protein	C <sub>2</sub>	10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+2%有机钙蛋白 10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+2% organic calcium protein
A <sub>3</sub>	LB液体培养基+4%有机钙蛋白 LB liquid medium+4% organic calcium protein	C <sub>3</sub>	10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+4%有机钙蛋白 10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+4% organic calcium protein
A <sub>4</sub>	LB液体培养基+6%有机钙蛋白 LB liquid medium+6% organic calcium protein	C <sub>4</sub>	10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+6%有机钙蛋白 10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+6% organic calcium protein
A <sub>5</sub>	LB液体培养基+8%有机钙蛋白 LB liquid medium+8% organic calcium protein	C <sub>5</sub>	10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+8%有机钙蛋白 10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+8% organic calcium protein
A <sub>6</sub>	LB液体培养基+10%有机钙蛋白 LB liquid medium+10% organic calcium protein	C <sub>6</sub>	10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+10%有机钙蛋白 10 <sup>9</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+10% organic calcium protein
B <sub>1</sub>	10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂 10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants	D <sub>1</sub>	10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂 10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants
B <sub>2</sub>	10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+2%有机钙蛋白 10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+2% organic calcium protein	D <sub>2</sub>	10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+2%有机钙蛋白 10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+2% organic calcium protein
B <sub>3</sub>	10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+4%有机钙蛋白 10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+4% organic calcium protein	D <sub>3</sub>	10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+4%有机钙蛋白 10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+4% organic calcium protein
B <sub>4</sub>	10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+6%有机钙蛋白 10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+6% organic calcium protein	D <sub>4</sub>	10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+6%有机钙蛋白 10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+6% organic calcium protein
B <sub>5</sub>	10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+8%有机钙蛋白 10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+8% organic calcium protein	D <sub>5</sub>	10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+8%有机钙蛋白 10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+8% organic calcium protein
B <sub>6</sub>	10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+10%有机钙蛋白 10 <sup>8</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+10% organic calcium protein	D <sub>6</sub>	10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> 微生物菌剂+10%有机钙蛋白 10 <sup>10</sup> cfu·mL <sup>-1</sup> microbial inoculants+10% organic calcium protein

鉴于A、B、C、D组分别采用了不同浓度的微生物菌剂与有机钙蛋白配施,为评估不同浓度微生物菌剂与有机钙蛋白的配施效果,对A、B、C、D组处理进行组内差异性检验分析。Given that groups A, B, C, and D were respectively treated with different concentrations of microbial inoculants combined with organic calcium proteins, in order to evaluate the combined application effects of different concentrations of microbial inoculants and organic calcium proteins, intra-group difference test analysis was adopted for the treatment of groups A, B, C, and D.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对苜蓿生长性状的影响

不同施肥条件下苜蓿株高均呈不同程度变化(图1)。A系列中A<sub>6</sub>处理下的苜蓿株高第1、2茬均为最高,较A<sub>1</sub>分别显著提高106.59%、40.89%( $P < 0.05$ );B系列中B<sub>5</sub>处理苜蓿株高第1、2茬均为最高,较B<sub>1</sub>处理分别提高83.16%、16.52%;C系列中C<sub>4</sub>株高第1、2茬均最高,较C<sub>1</sub>分别提高17.70%、32.60%;D系列中D<sub>3</sub>处理的第1、2茬株高均高于其他处理,较D<sub>1</sub>分别提高13.10%、39.61%,且第2茬相较D<sub>1</sub>差异显著( $P < 0.05$ )。在4个系列中,第1茬株高最高的是B<sub>5</sub>处理,为33.20 cm,第2茬株高最高的是C<sub>4</sub>处理,为34.20 cm。

不同施肥处理下,紫花苜蓿茎粗的结果分析表明,A系列中A<sub>6</sub>处理下的苜蓿茎粗第1茬最高,达到了1.12 mm,A<sub>4</sub>处理下的苜蓿茎粗第2茬最高,达到了1.29 mm;B系列中B<sub>4</sub>处理下的第1茬茎粗最高,达到了1.22 mm,B<sub>2</sub>处理下第2茬的茎粗最高,达到了1.28 mm;C系列中C<sub>5</sub>处理第1、2茬的茎粗均高于其他处理,分别达到了1.13和1.37 mm;D系列中D<sub>1</sub>处理的茎粗第1、2茬均高于其他处理,分别达到了1.06和1.19 mm。在4个系列中,第1茬茎粗最高的是B<sub>4</sub>处理,较B<sub>1</sub>处理显著提高0.24 mm,第2茬茎粗最高的是C<sub>5</sub>处理,较C<sub>1</sub>显著提高0.39 mm( $P < 0.05$ ,图2)。

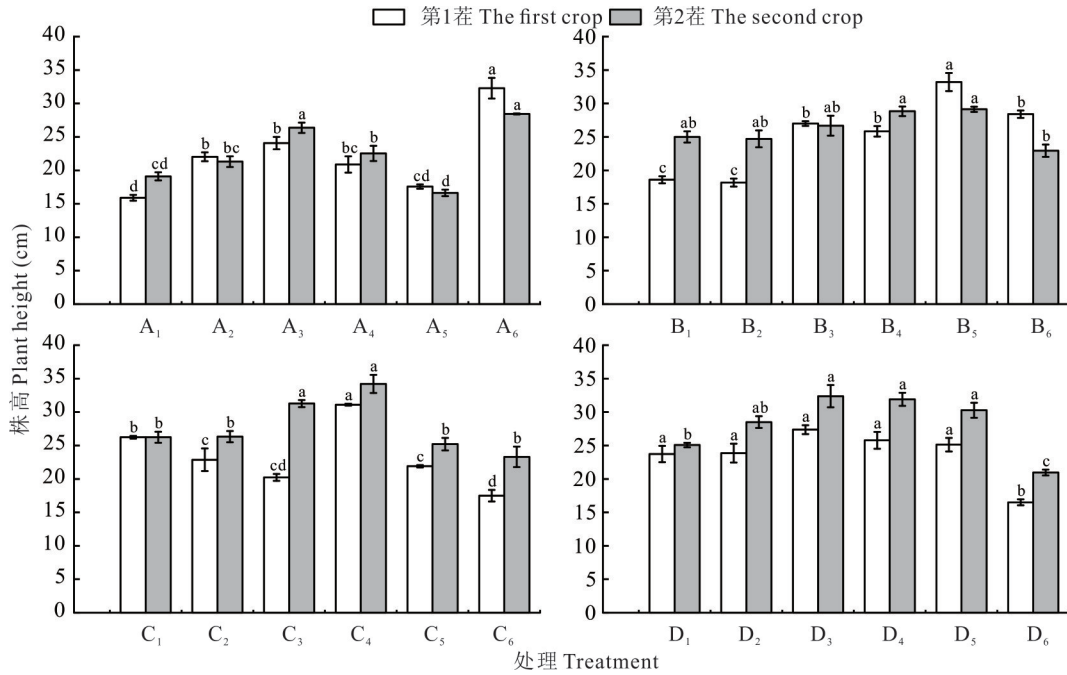


图 1 不同施肥处理对紫花苜蓿株高的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on plant height of alfalfa

不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平上同茬紫花苜蓿不同处理间差异显著,下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments of the same crop of alfalfa at the  $P < 0.05$  level, the same below.

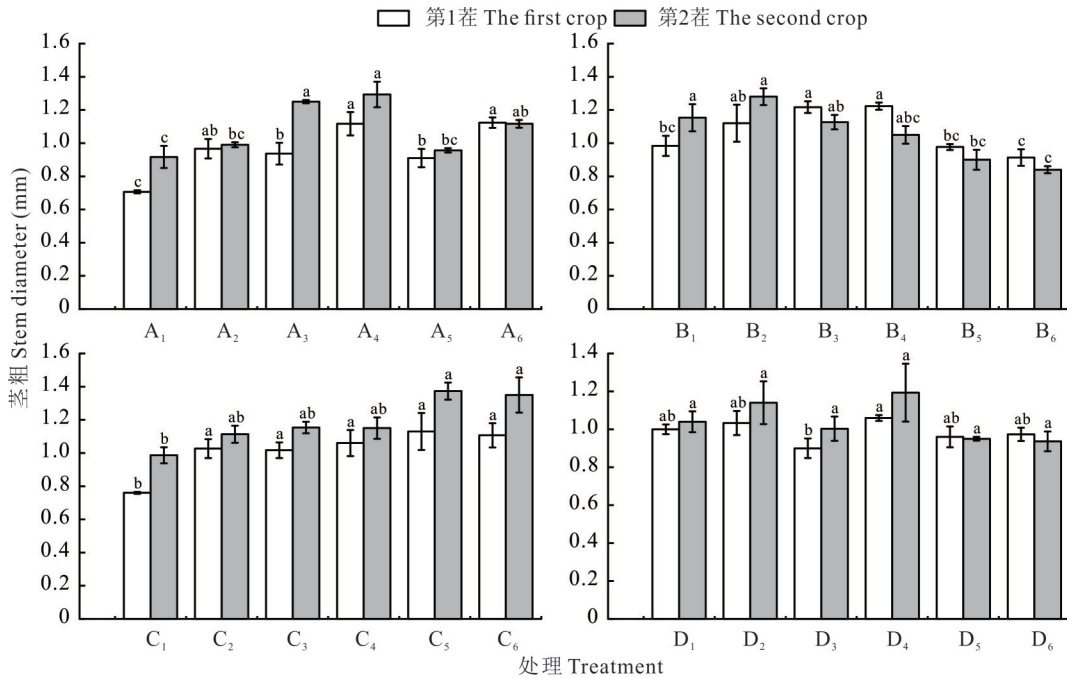


图 2 不同施肥处理对紫花苜蓿茎粗的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on stem diameter of alfalfa

2.2 不同处理对苜蓿生物量的影响

A 系列中  $A_6$  处理下的苜蓿第 1 茬鲜重与第 1、2 茬干重均为最高,分别达到了  $5.77、1.34、4.77 \text{ g} \cdot 30 \text{ 株}^{-1}$ ,  $A_4$  处理下的苜蓿第 2 茬鲜重最高,较  $A_1$  提高 67.66%; B 系列中  $B_5$  处理第 1、2 茬鲜、干重均为最高,较  $B_1$  处理分别提高 98.26%、111.55%、47.45%、29.99%; C 系列中  $C_4$  处理第 1 茬鲜、干重均为最高,达到了  $6.45、1.42 \text{ g} \cdot 30 \text{ 株}^{-1}$ ,  $C_5$  处理第 2 茬鲜、干重均为最高; D 系列中  $D_3$  处理第 1 茬鲜重最高,较  $D_1$  处理提高 126.81%,  $D_4$  处理第 1 茬干重最

高,达到了 $1.46\text{ g}\cdot 30\text{株}^{-1}$ , $D_5$ 处理第2茬鲜重最高, $D_6$ 处理第2茬干重最高,较 $D_1$ 处理提高 $5.09\%$ 。在4个系列中,第1茬鲜重最高的是 $D_3$ 处理,为 $7.10\text{ g}\cdot 30\text{株}^{-1}$ ,第1茬干重最高的是 $D_4$ 处理,为 $1.46\text{ g}\cdot 30\text{株}^{-1}$ ,第2茬鲜重最高的是 $D_5$ 处理,为 $10.90\text{ g}\cdot 30\text{株}^{-1}$ ,第2茬干重最高的是 $B_5$ 处理,为 $5.50\text{ g}\cdot 30\text{株}^{-1}$ (图3)。

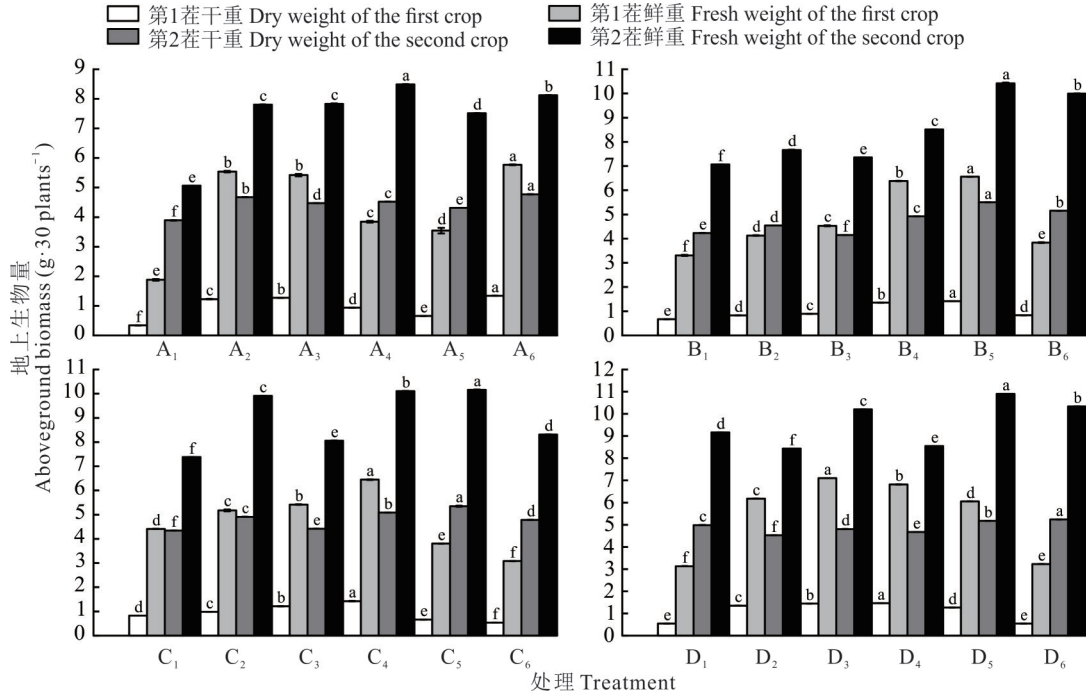


图3 不同施肥处理对紫花苜蓿地上生物量的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on aboveground biomass of alfalfa

### 2.3 不同处理对苜蓿根系形态的影响

不同施肥条件下苜蓿根系形态均呈不同程度的变化(表3)。A系列中 $A_5$ 处理的苜蓿总根长、根表面积、根平均直径、根体积均为最高,分别较 $A_1$ 处理提高 $50.11\%$ 、 $34.84\%$ 、 $40.00\%$ 、 $87.76\%$ ;B系列中 $B_5$ 处理的苜蓿总根长、根平均直径均为最高,分别较 $B_1$ 处理提高 $25.35\%$ 、 $48.76\%$ , $B_3$ 处理的苜蓿根体积最高;C系列中 $C_4$ 处理的苜蓿总根长最高,较 $C_1$ 处理提高 $15.84\%$ , $C_6$ 处理的苜蓿根平均直径最高,较 $C_1$ 处理提高 $4.23\%$ ,且相较 $C_1$ 差异不显著( $P>0.05$ );D系列中 $D_4$ 处理的苜蓿总根长最高,较 $D_1$ 处理提高 $47.27\%$ , $D_2$ 处理的苜蓿根表面积、根体积最高, $D_5$ 处理的苜蓿根平均直径最高。在4个系列中,总根长和根平均直径最高的均是 $B_5$ 处理,分别为 $309.41\text{ cm}$ 、 $0.601\text{ mm}$ ,根表面积最高的是 $D_2$ 处理,为 $33.26\text{ cm}^2$ ,根体积最高的是 $C_1$ 处理,为 $0.456\text{ cm}^3$ 。

### 2.4 不同处理对苜蓿叶绿素的影响

A系列中 $A_5$ 处理下苜蓿总叶绿素含量最高,达到了 $5.23\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , $A_1$ 处理总叶绿素含量最低,为 $3.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;B系列中 $B_6$ 处理下苜蓿总叶绿素含量最高,达到了 $5.54\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , $B_5$ 处理总叶绿素含量最低,为 $4.31\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;C系列中 $C_6$ 处理下苜蓿总叶绿素含量最高,达到了 $6.17\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , $C_2$ 处理总叶绿素含量最低,为 $5.38\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;D系列中 $D_5$ 处理下苜蓿总叶绿素含量最高,达到了 $7.15\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , $D_1$ 处理总叶绿素含量最低,为 $6.09\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;在4个系列中,总叶绿素含量最高的是 $D_5$ 处理,最低的是 $A_1$ 处理(表4)。

### 2.5 不同处理对苜蓿营养品质的影响

不同处理对苜蓿营养品质均产生影响(表5)。其中 $C_5$ 处理下苜蓿的干物质含量最高,为 $13.88\%$ ;C<sub>1</sub>处理下粗灰分含量最高,为 $95.00\%$ ;C<sub>4</sub>处理粗蛋白含量最高,为 $30.57\%$ ;B<sub>6</sub>处理下苜蓿的粗脂肪含量最高,为 $2.31\%$ ;C<sub>5</sub>处理中性洗涤纤维含量最低,为 $28.25\%$ ;B<sub>1</sub>处理酸性洗涤纤维含量最低,为 $25.31\%$ 。不同处理下苜蓿的平均RFV为 $185.01$ ,其中 $C_5$ 处理下苜蓿RFV最高,为 $226.56$ ,较最低的处理 $A_1$ 增加 $100.74\%$ 。

表 3 不同施肥处理对紫花苜蓿根系形态的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on root morphology of alfalfa

处理 Treatment	总根长 Total root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm <sup>2</sup> )	根平均直径 Average root diameter (mm)	根体积 Root volume (cm <sup>3</sup> )
A <sub>1</sub>	131.18±13.02ab	15.96±1.86a	0.375±0.004b	0.147±0.014c
A <sub>2</sub>	171.03±14.13ab	15.83±1.34a	0.436±0.017ab	0.179±0.022bc
A <sub>3</sub>	145.22±12.25ab	19.91±1.64a	0.482±0.025a	0.230±0.022ab
A <sub>4</sub>	114.99±5.77b	16.81±0.83a	0.465±0.004ab	0.195±0.010bc
A <sub>5</sub>	196.92±18.47a	21.52±1.08a	0.525±0.041a	0.276±0.008a
A <sub>6</sub>	154.90±11.29ab	17.27±1.93a	0.227±0.028c	0.141±0.015c
B <sub>1</sub>	246.83±2.84b	29.22±1.55ab	0.404±0.008c	0.299±0.006ab
B <sub>2</sub>	258.93±8.16ab	26.43±0.90ab	0.451±0.017bc	0.236±0.020bc
B <sub>3</sub>	207.39±21.88b	32.32±1.20a	0.372±0.022c	0.360±0.012a
B <sub>4</sub>	210.77±22.09b	24.09±2.96b	0.390±0.011c	0.201±0.037c
B <sub>5</sub>	309.41±14.24a	26.19±1.17ab	0.601±0.059a	0.341±0.007a
B <sub>6</sub>	194.96±6.60b	16.40±0.14c	0.555±0.037ab	0.227±0.014bc
C <sub>1</sub>	204.56±7.64a	18.20±0.90a	0.497±0.047a	0.456±0.052a
C <sub>2</sub>	178.80±17.74a	21.02±2.57a	0.416±0.028a	0.241±0.034b
C <sub>3</sub>	192.11±18.62a	17.70±1.92a	0.372±0.031a	0.180±0.024b
C <sub>4</sub>	236.96±7.54a	24.20±3.76a	0.411±0.027a	0.321±0.051ab
C <sub>5</sub>	226.22±32.33a	31.26±5.13a	0.443±0.062a	0.437±0.050a
C <sub>6</sub>	229.44±9.05a	26.04±2.66a	0.518±0.039a	0.335±0.032ab
D <sub>1</sub>	178.76±22.26c	21.99±1.23ab	0.413±0.030a	0.226±0.005b
D <sub>2</sub>	256.41±12.76ab	33.26±1.01a	0.415±0.025a	0.346±0.028a
D <sub>3</sub>	191.90±16.97bc	23.48±1.36ab	0.392±0.011a	0.229±0.007b
D <sub>4</sub>	263.26±16.34a	30.96±3.69a	0.387±0.015a	0.339±0.036a
D <sub>5</sub>	255.12±5.42ab	16.91±3.42b	0.451±0.026a	0.188±0.035b
D <sub>6</sub>	247.81±9.93ab	24.02±3.03ab	0.429±0.020a	0.255±0.020ab

同一组中同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。Different lowercase letters in the same column of the same group show significant difference ( $P < 0.05$ ), the same below.

## 2.6 不同处理对土壤酶活性的影响

不同处理下土壤酶活性均有所变化。A<sub>6</sub>、B<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>、D<sub>6</sub>土壤碱性磷酸酶活性为各系列中最优的,其中C<sub>3</sub>是所有处理中碱性磷酸酶活性最高的,为 $5.58 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,较C<sub>1</sub>提升了40.67%,较碱性磷酸酶活性最低的处理A<sub>1</sub>提高了58.97%(图4A)。A<sub>4</sub>、B<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>、D<sub>6</sub>过氧化氢酶活性为各系列中最优的,其中D<sub>6</sub>是所有处理中过氧化氢酶活性最高的,为 $4.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,较D<sub>1</sub>提升了25.83%,较过氧化氢酶活性最低的处理A<sub>2</sub>提高了135.45%(图4B)。A<sub>5</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>6</sub>、D<sub>4</sub>脲酶活性为各系列中最优的,其中B<sub>2</sub>是所有处理中脲酶活性最高的,为 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,较B<sub>1</sub>提升了53.46%,较脲酶活性最低的处理A<sub>1</sub>提高了124.89%(图4C)。A<sub>6</sub>、B<sub>5</sub>、C<sub>3</sub>、D<sub>3</sub>蔗糖酶活性为各系列中最优的,其中C<sub>3</sub>是所有处理中蔗糖酶活性最高的,为 $29.71 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,较C<sub>1</sub>提升了27.18%,较蔗糖酶活性最低的处理A<sub>4</sub>提高了106.62%(图4D)。

## 2.7 优劣解距离法综合评价筛选最佳施肥处理

### 2.7.1 熵权法计算权重

通过熵权法计算各个指标权重(表6)。结果显示:第1茬株高的权重为6.978%,第

表4 不同施肥处理对紫花苜蓿叶绿素的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on chlorophyll of alfalfa ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )

处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	总叶绿素含量 Total chlorophyll content	处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	总叶绿素含量 Total chlorophyll content
A <sub>1</sub>	1.48±0.07c	2.07±0.07c	3.55±0.09d	C <sub>1</sub>	2.95±0.00c	2.70±0.02c	5.65±0.02b
A <sub>2</sub>	2.41±0.01b	2.05±0.03c	4.46±0.03b	C <sub>2</sub>	2.97±0.00ab	2.41±0.02e	5.38±0.02d
A <sub>3</sub>	1.53±0.06c	2.53±0.00a	4.06±0.06c	C <sub>3</sub>	2.98±0.00a	2.55±0.02d	5.53±0.03c
A <sub>4</sub>	2.89±0.00a	2.23±0.01b	5.12±0.01a	C <sub>4</sub>	2.96±0.00bc	3.14±0.03b	6.10±0.02a
A <sub>5</sub>	2.89±0.01a	2.34±0.02b	5.23±0.03a	C <sub>5</sub>	2.97±0.00ab	3.13±0.03b	6.10±0.03a
A <sub>6</sub>	2.56±0.01b	2.01±0.01c	4.56±0.03b	C <sub>6</sub>	2.66±0.01d	3.51±0.03a	6.17±0.03a
B <sub>1</sub>	2.88±0.01b	2.45±0.02b	5.33±0.03b	D <sub>1</sub>	2.91±0.01a	3.18±0.04e	6.09±0.04d
B <sub>2</sub>	2.96±0.00a	2.51±0.02b	5.46±0.02a	D <sub>2</sub>	3.03±0.10a	3.18±0.06e	6.22±0.11cd
B <sub>3</sub>	2.87±0.01b	2.23±0.02d	5.10±0.03d	D <sub>3</sub>	2.87±0.01a	3.48±0.02d	6.34±0.03c
B <sub>4</sub>	2.86±0.00b	2.37±0.02c	5.23±0.03c	D <sub>4</sub>	2.93±0.00a	3.73±0.02c	6.67±0.02b
B <sub>5</sub>	2.59±0.01c	1.72±0.01e	4.31±0.03e	D <sub>5</sub>	2.90±0.01a	4.25±0.03a	7.15±0.03a
B <sub>6</sub>	2.95±0.00a	2.58±0.02a	5.54±0.02a	D <sub>6</sub>	2.91±0.00a	3.88±0.03b	6.79±0.03b

表5 不同施肥处理对紫花苜蓿营养品质的影响

Table 5 Effects of different fertilization treatments on nutritional quality of alfalfa

处理 Treatment	干物质 Dry matter (%)	粗灰分 Crude ash (%)	粗蛋白 Crude protein (%)	粗脂肪 Crude fat (%)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fi- ber (%)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%)	相对饲用价值 Relative feeding value (RFV)
A <sub>1</sub>	6.57±0.03d	92.41±1.16b	18.09±0.10d	1.26±0.01c	49.88±0.13a	36.43±0.19b	112.86±0.23b
A <sub>2</sub>	7.02±0.13c	94.63±0.32a	20.93±0.83b	2.23±0.07a	46.60±0.23bc	39.64±1.20a	115.83±2.34b
A <sub>3</sub>	12.25±0.12b	94.30±0.34a	26.14±0.20a	2.17±0.07a	34.67±1.59d	27.34±0.18c	182.15±8.55a
A <sub>4</sub>	12.88±0.15a	94.05±0.04a	26.84±0.27a	2.24±0.10a	31.68±1.27e	27.29±1.10c	199.43±10.44a
A <sub>5</sub>	6.35±0.14d	94.63±0.15a	18.89±0.31cd	1.69±0.22b	48.75±0.47ab	38.15±1.10ab	112.91±0.86b
A <sub>6</sub>	7.19±0.11c	94.38±0.18a	20.09±0.29c	1.81±0.06b	45.00±0.20c	38.40±0.27ab	121.96±0.91b
B <sub>1</sub>	12.46±0.20c	94.16±0.31c	28.93±0.30a	2.20±0.00a	29.28±0.12a	25.31±0.15b	219.79±1.25a
B <sub>2</sub>	13.67±0.04a	94.65±0.02ab	28.87±0.30a	1.97±0.10a	30.56±0.55a	25.97±0.14ab	209.14±3.50ab
B <sub>3</sub>	13.84±0.15a	94.76±0.11a	29.16±0.08a	2.00±0.11a	29.70±0.66a	27.25±0.27ab	212.21±5.37ab
B <sub>4</sub>	13.02±0.19bc	94.70±0.09a	28.58±0.18ab	1.89±0.05a	30.11±0.47a	28.29±0.54a	206.72±4.41ab
B <sub>5</sub>	13.44±0.30ab	94.68±0.07a	27.44±0.68c	1.05±0.38b	31.92±1.64a	26.14±1.28ab	200.52±7.64b
B <sub>6</sub>	13.01±0.16bc	94.20±0.11bc	27.65±0.20bc	2.31±0.10a	31.58±0.85a	27.81±1.19ab	198.48±8.05b
C <sub>1</sub>	7.05±0.02b	95.00±0.03a	20.48±0.14b	2.05±0.06a	46.18±0.30a	39.88±0.22a	116.54±1.10b
C <sub>2</sub>	12.88±0.22a	94.42±0.22a	28.47±0.01a	2.06±0.02a	29.36±0.04b	27.80±0.37c	213.06±1.21a
C <sub>3</sub>	7.67±0.12b	94.45±0.08a	20.43±0.49b	1.66±0.07a	45.19±0.76a	37.02±0.42b	123.72±2.78b
C <sub>4</sub>	13.40±0.44a	94.95±0.17a	30.57±0.60a	1.95±0.17a	29.38±1.09b	27.54±0.38c	214.20±8.61a
C <sub>5</sub>	13.88±0.16a	94.72±0.08a	29.02±0.92a	1.09±0.20b	28.25±0.70b	25.89±0.29d	226.56±4.85a
C <sub>6</sub>	13.35±0.15a	94.57±0.16a	28.32±0.46a	1.76±0.21a	28.88±0.85b	28.01±0.32c	216.40±5.50a
D <sub>1</sub>	13.07±0.29a	94.13±0.07b	28.06±0.36bc	2.27±0.05a	29.44±0.23a	26.82±0.80bc	214.93±3.11a
D <sub>2</sub>	13.04±0.30a	94.54±0.27ab	29.95±0.47a	1.91±0.14b	30.79±1.32a	27.88±0.33ab	203.81±9.88a
D <sub>3</sub>	13.14±0.30a	94.27±0.12ab	28.04±0.22bc	2.08±0.06ab	30.54±0.26a	26.49±0.23bc	208.01±2.28a
D <sub>4</sub>	13.24±0.10a	94.65±0.21ab	28.96±0.16b	1.55±0.04c	30.32±0.54a	28.69±0.56a	204.36±4.98a
D <sub>5</sub>	13.11±0.15a	94.46±0.08ab	27.44±0.05c	1.79±0.04bc	31.08±0.05a	26.11±0.18c	205.20±0.17a
D <sub>6</sub>	12.65±0.16a	94.72±0.08a	28.75±0.33b	1.88±0.14b	31.46±0.44a	26.78±0.63bc	201.34±4.20a

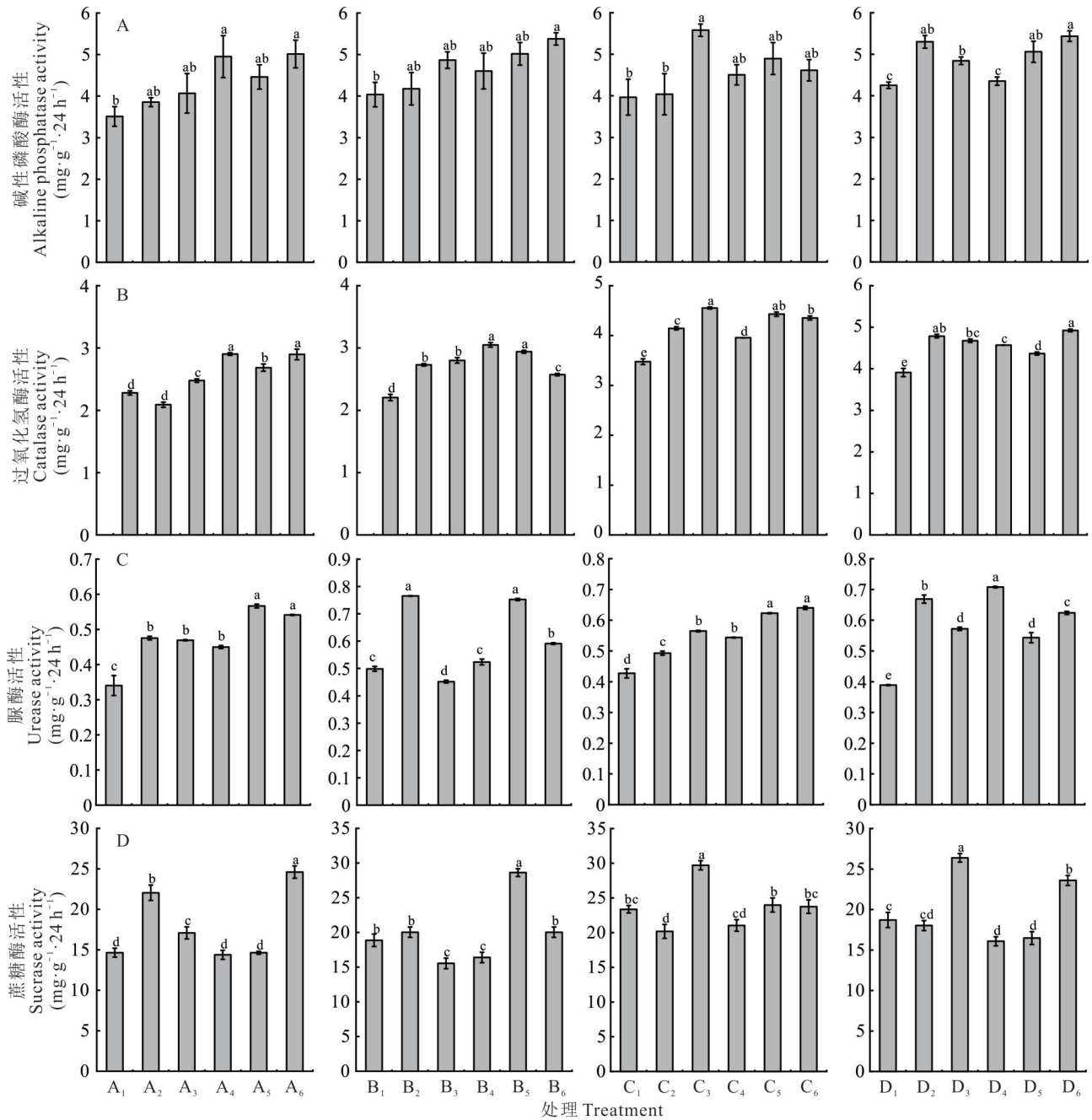


图 4 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on enzyme activity of soil

2 茬株高的权重为 3.767%，第 1 茬茎粗的权重为 3.228%，第 2 茬茎粗的权重为 5.596%，叶绿素 a 含量的权重为 2.664%，叶绿素 b 含量的权重为 6.274%，总叶绿素含量的权重为 3.790%，第 1 茬鲜重的权重为 4.194%，第 1 茬干重的权重为 5.053%，第 2 茬鲜重的权重为 2.810%，第 2 茬干重的权重为 4.103%，总根长的权重为 4.460%，根表面积的权重为 10.399%，根平均直径的权重为 2.435%，根体积的权重为 7.433%，干物质的权重为 1.527%，粗灰分的权重为 6.075%，粗蛋白质的权重为 4.829%，粗脂肪的权重为 3.804%，中性洗涤纤维的权重为 5.022%，酸性洗涤纤维的权重为 5.560%，其中指标权重最大值为根表面积，最小值为干物质。

**2.7.2 TOPSIS 评价法计算结果** 各施肥处理综合评价排序结果(表 7)表明,最优处理为 D<sub>4</sub>处理(10<sup>10</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>微生物菌剂+6%有机钙蛋白),第 2 名是 C<sub>4</sub>处理(10<sup>9</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>微生物菌剂+6%有机钙蛋白),最后 1 名是 A<sub>1</sub>处理(LB 液体培养基)。

表6 熵值法计算权重结果汇总

Table 6 Summary of weight results calculated by entropy method

项目 Item	信息熵值 Information entropy (e)	信息效用值 Information utility value (d)	权重系数 Weight coefficient (w, %)	项目 Item	信息熵值 Information entropy (e)	信息效用值 Information utility value (d)	权重系数 Weight coefficient (w, %)
第1茬株高 The plant height of the first crop	0.929	0.071	6.978	总根长 Total root length	0.954	0.046	4.460
第2茬株高 The plant height of the second crop	0.962	0.038	3.767	根表面积 Root surface area	0.894	0.106	10.399
第1茬茎粗 Stem diameter of the first crop	0.967	0.033	3.228	根平均直径 Average root diameter	0.975	0.025	2.435
第2茬茎粗 Stem diameter of the second crop	0.943	0.057	5.596	根体积 Root volume	0.924	0.076	7.433
叶绿素a含量 Chlorophyll a content	0.973	0.027	2.664	干物质 Dry matter	0.984	0.016	1.527
叶绿素b含量 Chlorophyll b content	0.936	0.064	6.274	粗灰分 Crude ash	0.938	0.062	6.075
总叶绿素含量 Total chlorophyll content	0.961	0.039	3.790	粗蛋白质 Crude protein	0.951	0.049	4.829
第1茬鲜重 Fresh weight of the first crop	0.957	0.043	4.194	粗脂肪 Crude fat	0.961	0.039	3.804
第1茬干重 Dry weight of the first crop	0.948	0.052	5.053	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.949	0.051	5.022
第2茬鲜重 Fresh weight of the second crop	0.971	0.029	2.810	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	0.943	0.057	5.560
第2茬干重 Dry weight of the second crop	0.958	0.042	4.103				

表7 TOPSIS评价计算结果

Table 7 TOPSIS evaluation results

项目 Item	正理想解距离 Positive ideal solution distance (D <sup>+</sup> )	负理想解距离 Negative ideal solution distance (D <sup>-</sup> )	相对接近度 Relative proximity (C)	排序结果 Sorting result	项目 Item	正理想解距离 Positive ideal solution distance (D <sup>+</sup> )	负理想解距离 Negative ideal solution distance (D <sup>-</sup> )	相对接近度 Relative proximity (C)	排序结果 Sorting result
A <sub>1</sub>	0.945	0.108	0.102	24	C <sub>1</sub>	0.655	0.506	0.436	19
A <sub>2</sub>	0.736	0.408	0.356	22	C <sub>2</sub>	0.482	0.618	0.562	13
A <sub>3</sub>	0.549	0.571	0.510	17	C <sub>3</sub>	0.662	0.453	0.406	21
A <sub>4</sub>	0.596	0.581	0.493	18	C <sub>4</sub>	0.304	0.777	0.719	2
A <sub>5</sub>	0.744	0.359	0.325	23	C <sub>5</sub>	0.387	0.777	0.667	4
A <sub>6</sub>	0.697	0.496	0.416	20	C <sub>6</sub>	0.453	0.674	0.598	10
B <sub>1</sub>	0.494	0.640	0.565	12	D <sub>1</sub>	0.503	0.617	0.551	15
B <sub>2</sub>	0.471	0.658	0.583	11	D <sub>2</sub>	0.318	0.760	0.705	3
B <sub>3</sub>	0.419	0.713	0.630	6	D <sub>3</sub>	0.406	0.713	0.637	5
B <sub>4</sub>	0.447	0.666	0.599	8	D <sub>4</sub>	0.289	0.779	0.729	1
B <sub>5</sub>	0.463	0.755	0.620	7	D <sub>5</sub>	0.480	0.715	0.598	9
B <sub>6</sub>	0.564	0.614	0.521	16	D <sub>6</sub>	0.519	0.645	0.554	14

### 3 讨论

#### 3.1 微生物菌剂与有机钙蛋白配施对苜蓿生长的影响

株高、茎粗和生物量作为评价植株生长状况的表观指标,是符合植物生长研究常规且具有直观性与综合性的选择<sup>[24]</sup>。本研究是微生物菌剂与有机肥的应用与探索,通过多浓度梯度配施揭示了二者对紫花苜蓿生长和土壤环境的调控作用。相较于单菌作用,微生物菌剂凭借菌群间的协同效应,能够更全面地调控植物生长过程。菌株 Y1、LrM2 和 M1 的固氮、溶磷和分泌生长素等促生特性各不相同,其中菌株 M1 具有较强的溶磷能力,菌株 Y1 分

泌生长素特性较强,菌株 LrM2 耐盐能力较强,且菌株 M1 和 Y1 均可促进青稞(*Hordeum vulgare* var. *nudum*)的生长<sup>[14]</sup>。

本研究以课题组前期筛选的 3 株促生菌为候选菌株,将其制成不同浓度梯度的微生物菌剂,以发挥不同菌株间的相互协作能力和功能互补效应,从而构建更稳定的功能微生物以及施用最适浓度,研究其与有机钙蛋白配施对紫花苜蓿生长的影响。研究表明,不同浓度的微生物菌剂对苜蓿生长的影响呈显著梯度差异,其中, D<sub>4</sub>处理( $10^{10}$  cfu·mL<sup>-1</sup>微生物菌剂+6% 有机钙蛋白)在两次刈割中均表现出显著的促生效果,第 1 茬的株高、茎粗和鲜、干重较 A<sub>1</sub>处理(LB 液体培养基)分别提高 62.08%、49.99%、262.57% 和 331.76%,第 2 茬中,该处理的株高、茎粗和鲜、干重较 A<sub>1</sub>处理分别提高 67.02%、30.17%、68.76% 和 20.02%,表明较低浓度的菌剂可能因微生物数量不足,难以形成足够的代谢产物刺激植物生长;而过高浓度的菌剂可能导致微生物间资源竞争加剧,或对植物产生潜在的抑制作用。 $10^{10}$  cfu·mL<sup>-1</sup>的菌剂浓度恰好达到菌群代谢与植物生长需求的最佳平衡,充分发挥了微生物菌剂的促生潜力。虽然与第 1 茬指标增长幅度有所不同,但也进一步证明了 D<sub>4</sub>处理效果的持续性。这与赵阳安<sup>[25]</sup>发现施有机肥和接种根瘤菌剂可以提高紫花苜蓿株高和产量,在作物生产中使用微生物和复合肥可以显著改善作物生长情况的结果类似<sup>[26]</sup>。进一步验证了“微生物-有机肥”协同策略在豆科作物生产中的普适性。

叶绿素是植物进行光合作用的关键物质,其含量动态直接反映植物光能转化效率,叶绿素含量的显著提高对苜蓿的光合作用过程具有重要意义<sup>[27]</sup>。本研究表明特定菌剂浓度可显著提升苜蓿叶绿素含量,该发现不仅揭示了菌剂浓度与苜蓿光合作用促进效果间存在最佳适配区间,更为苜蓿栽培的精准化菌剂施用提供了理论依据。这与屈魏蕾等<sup>[28]</sup>关于微生物菌剂对小麦(*Triticum aestivum*)叶片叶绿素含量提升的研究、张子嘉<sup>[29]</sup>发现微生物菌剂增强多年生黑麦草(*Lolium perenne*)光合能力的成果相互印证,以上研究均表明微生物菌剂在提升植物叶绿素含量、增强光合作用方面具有普适性效应。微生物菌剂配施有机钙蛋白对苜蓿叶绿素含量的提升具有显著效果,在 D<sub>4</sub>处理下总叶绿素含量较对照 A<sub>1</sub>处理提高 87.89%,且呈随有机钙蛋白添加量增加而先升后降的趋势。这一结果与王海娟等<sup>[30]</sup>发现菌剂与肥料配施提升紫花苜蓿叶绿素含量 30%~50% 的结论相呼应,进一步证实菌剂与肥料的合理配施是强化植物光合作用的有效策略。

### 3.2 微生物菌剂与有机钙蛋白配施对苜蓿根系形态的影响

根际作为微生物肥料发挥作用的关键区域,其微环境的变化对于植物根系的生长发育以及植物整体的健康状况具有决定性影响<sup>[31-32]</sup>。本研究的总根长、根表面积、根平均直径和根体积等根系形态指标,可从不同维度反映根系的生长状态和功能特性。D<sub>4</sub>处理总根长、根表面积、根平均直径、根体积较 A<sub>1</sub>处理提高 100.69%、93.98%、3.20%、130.61%。菌剂中的不同菌株可在根际形成功能互补的微生物群落,一方面通过分泌植物激素诱导侧根原基分生组织活化,另一方面通过改善土壤微环境、增强养分转化能力,共同促进根系的生长发育,这与李琦等<sup>[33]</sup>通过微胶囊包埋技术证实,促生菌可通过分泌吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)等植物激素类物质促进苜蓿和燕麦(*Avena sativa*)生长的结果一致。刘玲等<sup>[34]</sup>研究发现,微生物菌剂能促进水稻(*Oryza sativa*)根表面积和根体积。孙广正等<sup>[35]</sup>发现微生物菌剂能显著促进西葫芦(*Cucurbita pepo*)根系形态,本研究结果与上述研究结果相似。总根长的显著增加意味着与土壤颗粒的接触面积增大,从而提高对水分和养分的吸收效率。较大的根表面积为根际微生物提供了更多的附着位点,有利于微生物与根系之间的相互作用<sup>[36-37]</sup>。微生物菌剂添加可以使根粗大,其内部结构上具有更发达的维管束系统,有利于水分和养分的长距离运输,提高根系整体的运输效率,满足植物生长和代谢的需求<sup>[38]</sup>。根体积提高意味着更多的根系组织能够储存养分和水分,在外界胁迫时为植物提供一定的缓冲<sup>[39]</sup>。菌剂浓度梯度对根系形态的影响方面,呈先抑制后促进的非线性变化趋势。当微生物菌剂细胞数量较低时,其对土壤环境的改善作用有限,无法有效促进根系生长;随着菌剂浓度增加,微生物在根系周围固定殖过程中可能与根系竞争养分资源,或产生短时间内抑制根系生长的代谢产物,致使根系形态指标下降<sup>[40]</sup>。然而,当微生物菌剂细胞数量达到一定阈值后,大量有益微生物通过分解土壤有机物质释放植物可利用养分,并分泌多种植物生长促进物质,使得根系各指标显著上升<sup>[41]</sup>。菌剂与有机钙蛋白的配施则展现出显著的协同增效作用,研究发现,随着有机钙蛋白添加量的增加,根系形态相关指标均优于对照且呈上升趋势,可能是因为

机钙蛋白本身含有丰富的营养成分,能够为根系生长提供直接的物质支持。充足的钙供应有助于维持根系细胞的正常结构和功能,促进细胞的分裂和伸长。

### 3.3 微生物菌剂与有机钙蛋白配施对苜蓿营养品质的影响

牧草的粗蛋白、粗脂肪、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量是评价优质饲草的重要指标,而这与科学合理地施肥息息相关<sup>[42]</sup>。作为优质豆科牧草,紫花苜蓿的营养特性不仅决定其饲用价值,更与畜牧业的可持续发展密切相关<sup>[43]</sup>。本研究通过微生物菌剂与有机钙蛋白的协同施用,显著提高了紫花苜蓿的营养品质,这一发现为优化牧草品质的施肥策略提供了理论依据。施用微生物菌剂可促进植物对营养元素的吸收和转化,提高了植物抗性并改善植物品质<sup>[44]</sup>。韩华雯等<sup>[45]</sup>研究表明复合菌肥替代半量磷肥后,苜蓿的蛋白质、Ca、P以及粗脂肪含量分别较对照组平均增加16.4%、14.1%、11.9%和4.2%,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量平均下降10.9%和7.7%,本研究结果与之高度一致。本研究中,苜蓿的相对饲用价值随着有机钙蛋白添加量和微生物菌剂中细胞数量增多而提高,同时紫花苜蓿的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量有所降低。D<sub>4</sub>处理干物质、粗灰分、粗蛋白和粗脂肪较A<sub>1</sub>处理提高101.52%、2.42%、60.09%、23.02%,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量平均下降39.21%和21.25%。这一结果不仅验证了微生物菌剂对植物营养品质的调控潜力,更揭示了有机钙蛋白在协同增效中的关键作用。有机钙蛋白中的有机成分可以作为微生物的碳源、氮源等营养物质,促进微生物的生长繁殖,使其在根际或土壤中形成更大的有益微生物群落。这些微生物刺激苜蓿的生长和发育,调节其营养物质的合成与积累过程<sup>[46]</sup>,这与Zhang等<sup>[47]</sup>研究的微生物菌剂与磷肥配施提高番茄(*Solanum lycopersicum*)品质结果类似,进一步验证了微生物—养分协同调控植物品质的普适性。

### 3.4 微生物菌剂与有机钙蛋白配施对土壤酶活性的影响

土壤酶作为土壤生物化学过程的催化剂,在土壤生态系统中起着至关重要的作用,其活性的变化影响着土壤的肥力状况以及植物的生长发育<sup>[48]</sup>。单菌在土壤中的作用往往具有局限性,其功能相对单一,对土壤生态系统的影响范围较窄。而微生物菌剂包含多种微生物,各微生物之间可协同作用,通过增强微生物群落功能多样性,对土壤酶活性产生更全面且显著的影响。本研究发现,微生物菌剂与有机钙蛋白配施对土壤酶活性具有显著调控作用。其中,D<sub>4</sub>处理土壤碱性磷酸酶、过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶活性分别较A<sub>1</sub>处理提高24.03%、100.54%、107.96%、9.88%。范娜等<sup>[49]</sup>研究指出,适宜浓度的微生物菌剂可通过增强微生物群落功能多样性,显著提高土壤蔗糖酶和磷酸酶活性,进而改善土壤的肥力状况,提高作物对养分的吸收,本研究结果与其高度吻合。李丽等<sup>[50]</sup>研究发现微生物菌剂施加对土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶活性均有提高的效果。He等<sup>[51]</sup>研究发现微生物菌剂与其他肥料配合施用,对于土壤养分以及酶活性的影响大于单独施用,本研究结果与之类似。这表明微生物菌剂与有机钙蛋白的配施策略为紫花苜蓿的养分吸收与土壤肥力可持续性提供了双重保障,在农业生产和土壤生态系统维护方面具有重要的应用潜力。未来的研究可进一步深入探究不同微生物菌剂组合、最佳浓度配比以及与其他有机肥的协同作用,以优化土壤生态环境,提高农作物产量和质量。

## 4 结论

微生物菌剂与有机钙蛋白配施对紫花苜蓿促生效果显著,且第1茬促生效果优于第2茬。优劣解距离法综合评价结果表明,D<sub>4</sub>处理(10<sup>10</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>微生物菌剂+6%有机钙蛋白)配施对紫花苜蓿生长性状、根系形态、营养品质积累效果优于其他施肥方案,且提升了土壤酶活性。因此,10<sup>10</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>微生物菌剂+6%有机钙蛋白可以作为紫花苜蓿的最佳肥料比例。

## 参考文献 References:

- [1] Wang J, Li M C. Research progress in the application of microbial fertilizers in chemical fertilizer reduction and efficiency increase in orcharding. *Microbiology China*, 2024, 51(11): 4394—4415.  
王佳, 李明聪. 微生物菌肥在植物减肥增效中的应用研究进展: 以果树为例. *微生物学通报*, 2024, 51(11): 4394—4415.
- [2] Dai J X, Tian P Y, Shen C, *et al.* Screening of rhizosphere bacteria from salt tolerant plants and their growth promoting effects.

- Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(5): 968—975.
- 代金霞, 田平雅, 沈聪, 等. 耐盐植物根际促生菌筛选及促生效应研究. 生态环境学报, 2021, 30(5): 968—975.
- [3] Wei D Q, Zhu D, Zhang Y F, *et al.* Characterization of rhizosphere *Pseudomonas chlororaphis* IRHB3 in the reduction of fusarium root rot and promotion of soybean growth. *Biological Control*, 2023, 186: 105349.
- [4] Zhang B, Shi F, Zheng X, *et al.* Effects of AMF compound inoculants on growth, ion homeostasis, and salt tolerance-related gene expression in *Oryza sativa* L. under salt treatments. *Rice*, 2023, 16(1): 18.
- [5] Tao C Y, Rong L, Wu X, *et al.* Bio-organic fertilizers stimulate indigenous soil *Pseudomonas* populations to enhance plant disease suppression. *Microbiome*, 2020, 8: 1—14.
- [6] Zhao G X, Zhu X L, Zheng G, *et al.* Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980—2022). *Geography and Sustainability*, 2024, 5(1): 19—28.
- [7] Halamuji, Xia S N, Cui L J, *et al.* Effects of six nitrogenous compounds on seed germination of *Medicago sativa* L. under  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(14): 1—5.
- 哈拉木吉, 夏盛楠, 崔连军, 等. 6 种含氮化合物对  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下紫花苜蓿种子萌发特性的影响. 中国农学通报, 2014, 30(14): 1—5.
- [8] Li Q P, Bai J H, Yao T, *et al.* Effects of the combined application of microbial inoculant and nitrogen fertilizer reduction on the growth, and soil physicochemical properties of alfalfa in Hexi area. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 314—321.
- 李青璞, 白建海, 姚拓, 等. 微生物菌剂与氮肥配施对紫花苜蓿生长及土壤性质的影响. 草地学报, 2024, 32(1): 314—321.
- [9] Qi P, Liu X J, Liu Y N, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation in alfalfa and the content of nitrogen in soil. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(5): 1026—1032.
- 齐鹏, 刘晓静, 刘艳楠, 等. 施氮对不同紫花苜蓿品种氮积累及土壤氮动态变化的影响. 草地学报, 2015, 23(5): 1026—1032.
- [10] Chen C J, Bao M F, Wang W H, *et al.* Current situation and prospects for drought-resistance breeding in *Medicago sativa*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(3): 204—223.
- 陈彩锦, 包明芳, 王文虎, 等. 紫花苜蓿抗旱育种研究现状及展望. 草业学报, 2025, 34(3): 204—223.
- [11] He S M, Yao T, Lei Y, *et al.* Effects of microbial inoculants and chemical fertilizers on the production performance and quality of *Phleum pratense*. *Pratacultural Science*, 2024, 41(11): 2706—2714.
- 贺善睦, 姚拓, 雷杨, 等. 微生物菌剂与化肥减量配施对猫尾草生长的影响. 草业科学, 2024, 41(11): 2706—2714.
- [12] Fu W G. Effects of four kinds of middle-microelement addition on the functional and growth-promoting efficiency of microbial inoculants. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
- 付卫刚. 4 种中微量元素添加对复合菌剂功能及促生效果的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [13] Zhang Y C. Mitigation effect and mechanism of plant growth promoting *Bacteria mojavensis* on salt stress in oats. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- 张银翠. 莫哈韦芽孢杆菌(*Bacillus mojavensis*)对燕麦盐胁迫的缓解效应及机理研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- [14] Yang X L, Li J H, Yao T, *et al.* Optimization of fermentation conditions of three growth promoting strains and evaluation of effects on *Highland barley*. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 212—219.
- 杨晓蕾, 李建宏, 姚拓, 等. 复合促生菌剂发酵条件优化及其对青稞促生效果评价. 草地学报, 2022, 30(1): 212—219.
- [15] Yang X L, Li J H, Yao T, *et al.* Functional characteristics and culture conditions of five plant growth-promoting rhizobacteria strains. *Pratacultural Science*, 2022, 39(1): 30—38.
- 杨晓蕾, 李建宏, 姚拓, 等. 5 株植物根际促生菌功能特性及培养条件. 草业科学, 2022, 39(1): 30—38.
- [16] Li Q P. Effect of microbial inoculum with fertilizers on yield, quality and soil properties of alfalfa in the Hexi Corridor. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
- 李青璞. 菌剂配施化肥对河西走廊紫花苜蓿产量、品质及土壤特性影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [17] Zhang Y C, Yao T, Zhao G Q, *et al.* Screening and identification of salt-tolerant growth promoting rhizobacteria and its effects on oat growth under salt stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(12): 2645—2652.
- 张银翠, 姚拓, 赵桂琴, 等. 耐盐促生菌筛选鉴定及对盐胁迫燕麦生长的影响. 草地学报, 2021, 29(12): 2645—2652.
- [18] Han D R, Yao T, Li H Y, *et al.* Effects of combined application of microbial fertilizer and chemical fertilizer on the growth of *Lolium perenne*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 136—143.
- 撒冬荣, 姚拓, 李海云, 等. 微生物肥料与化肥减量配施对多年生黑麦草生长的影响. 草业学报, 2022, 31(3): 136—143.
- [19] Cai W Q, Li S X, Wang X T, *et al.* Effects of interaction between exogenous melatonin and ethylene on the growth and

- physiological characteristics of *Medicago sativa* seedlings under salt stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(1): 80–93.
- 蔡文祺, 李淑霞, 王晓彤, 等. 外源褪黑素与乙烯交互对盐胁迫下紫花苜蓿幼苗生长和生理特性的影响. *草业学报*, 2025, 34(1): 80–93.
- [20] Wang X K. The principles and techniques of physiological and biochemical experiment of plants. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 王学奎. 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [21] Cong L L, Gao K, Liu Z H, *et al.* Effects of phosphorus addition on biomass, root characteristics and stoichiometric characteristics of alfalfa. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(11): 66–73.
- 丛龙丽, 高凯, 刘之浩, 等. 磷添加对紫花苜蓿生物量、根系特性及化学计量特征的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 66–73.
- [22] Zhang L, Song Q, Ma S M, *et al.* Applying grey correlation degree analysis to evaluate nutritional value of 12 *Medicago sativa* varieties. *China Feed*, 2023(9): 136–140, 161.
- 张兰, 宋谦, 马淑梅, 等. 利用灰色关联度法评价 12 个苜蓿品种的营养价值. *中国饲料*, 2023(9): 136–140, 161.
- [23] Guan S Y. Soil enzymes and their research methods. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [24] 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.
- [25] Zhao Y A. Effect of organic fertilizers and rhizobacterial agents on the growth and inter-root microbial diversity of alfalfa. Xining: Qinghai University, 2023.
- 赵阳安. 有机肥和根瘤菌剂对苜蓿生长及根际微生物多样性的影响. 西宁: 青海大学, 2023.
- [26] Dilfuza E, Gabriela B, Kristina L, *et al.* Alleviation of salt stress of symbiotic *Galega officinalis* L. (goat's rue) by co-inoculation of rhizobium with root-colonizing *Pseudomonas*. *Plant and Soil*, 2013, 369(1/2): 453–465.
- [27] Li Y Z, Li X R, Zhang J, *et al.* Physiological and proteomic responses of contrasting alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties to high temperature stress. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 753011.
- [28] Qu W L, Tian Y L, Jing F Y, *et al.* Effects of microbial agents on growth, physiology and chlorophyll fluorescence parameters of wheat under drought stress. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(10): 30–37.
- 屈魏蕾, 田玉磊, 井方宇, 等. 微生物菌剂对干旱胁迫下小麦生长生理和叶绿素荧光参数的影响研究. *江西农业学报*, 2022, 34(10): 30–37.
- [29] Zhang Z J. Effects of different microbial agents on heat resistance and drought resistance of *Lolium perenne*. Jingzhou: Yangtze University, 2023.
- 张子嘉. 不同微生物菌剂对多年生黑麦草耐热性与抗旱性的影响. 荆州: 长江大学, 2023.
- [30] Wang H J, Bao Y Y, Niu T X, *et al.* Effect of combined application of microbial inoculum and fertilizer on fertility of open-pit mine dump reclaimed soil. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(4): 186–191.
- 王海娟, 包玉英, 牛天心, 等. 菌剂与肥料配施对露天矿排土场苜蓿生长及土壤养分含量的影响. *华北农学报*, 2014, 29(4): 186–191.
- [31] Cui C, Li F, Zeng Q, *et al.* Influence of fertilization methods and types on wheat rhizosphere microbiome community and functions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(14): 7794–7806.
- [32] Xia J, Nan L L, Wang K, *et al.* Effects of low phosphorus stress on root growth and rhizosphere bacteria of different root types alfalfa. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(6): 86–94.
- 夏静, 南丽丽, 汪堃, 等. 低磷胁迫对不同根型苜蓿根系生长及根际细菌的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(6): 86–94.
- [33] Li Q, Yao T, Abuman, *et al.* Development of plant growth promoting rhizobacteria microcapsules and evaluation of its growth promotion effects on alfalfa and oats. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(5): 1392–1399.
- 李琦, 姚拓, 阿不满, 等. 根际促生菌微胶囊剂研发及对苜蓿、燕麦促生效果评价. *草地学报*, 2019, 27(5): 1392–1399.
- [34] Liu L, Feng N J, Zheng D F, *et al.* Effects of different microbial agents on the morphogenesis and physiological characteristics of rice seedlings. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(1): 88–95.
- 刘玲, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 不同微生物菌剂对水稻幼苗形态建成和生理特性的影响. *南方农业学报*, 2022, 53(1): 88–95.
- [35] Sun G Z, Yao T, Hou D, *et al.* Biocontrol potential of antagonistic bacteria strains against *Fusarium oxysporum* and their

- growth-promoting effects on zucchini. *Microbiology China*, 2017, 44(5): 1121–1130.
- 孙广正, 姚拓, 侯栋, 等. 西葫芦根腐病菌拮抗细菌的防病促生作用. *微生物学通报*, 2017, 44(5): 1121–1130.
- [36] Bu M N, Yang X W, Teng Z K, *et al.* Effects of layered fertilization under different irrigation conditions on vertical distribution of soil nutrients and root growth and function of wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(11): 2125–2142.
- 卜明娜, 杨习文, 滕政凯, 等. 不同灌水条件下分层施肥对土壤养分垂直分布与小麦根系生长和功能的影响. *中国农业科学*, 2024, 57(11): 2125–2142.
- [37] Dollete D, Lumactud R A, Carlyle C N, *et al.* Effect of drought stress on symbiotic nitrogen fixation, soil nitrogen availability and soil microbial diversity in forage legumes. *Plant and Soil*, 2023, 495(1/2): 445–467.
- [38] Zhong S Z, Liu X J, Ouyang J H, *et al.* Effects of biochar and phosphorus fertilizer combination on the physiological growth characteristics of alfalfa in saline-alkali soil of the Yellow River Delta. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(7): 35–45.
- 钟尚志, 刘学金, 欧阳江晗, 等. 黄河三角洲盐碱土下生物炭配施磷肥对紫花苜蓿生长及生理特性的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(7): 35–45.
- [39] Madhuri K M, Ameena M, Michel J J, *et al.* Endophytic fungus *Piriformospora indica* mitigates moisture stress in rice by modifying root growth. *Rhizosphere*, 2023, 28: 100799.
- [40] Chen C, Bauske E M, Musson G, *et al.* Biological control of *Fusarium* wilt on cotton by use of endophytic bacteria. *Biological Control*, 1995, 5(1): 83–91.
- [41] Lu K H, Jin J R, Xiao M. Prospect of microbial fertilizer in saline soil. *Microbiology China*, 2019, 46(7): 1695–1705.
- 鲁凯珩, 金杰人, 肖明. 微生物肥料在盐碱土壤中的应用展望. *微生物学通报*, 2019, 46(7): 1695–1705.
- [42] Wang X Y, Yu X, Shen Y Y, *et al.* Fertilization increased alfalfa yield and nutritive value in northern China: A Meta-analysis. *Pratacultural Science*, 2023, 40(1): 208–217.
- 王晓雨, 于鑫, 沈禹颖, 等. 整合分析施肥类型对中国北方紫花苜蓿产量和营养品质的影响. *草业科学*, 2023, 40(1): 208–217.
- [43] Wang J, Yang B Y, Zhang S J, *et al.* Using mixed silages of sweet sorghum and alfalfa in total mixed rations to improve growth performance, nutrient digestibility, carcass traits and meat quality of sheep. *Animal*, 2021, 15(7): 100246.
- [44] Yao T. Characteristics and biofertilizer of plant growth promoting rhizobacteria isolated from oat and wheat in northwest China. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2002.
- 姚拓. 饲用燕麦和小麦根际促生菌特性研究及其生物菌肥的初步研制. 兰州: 甘肃农业大学, 2002.
- [45] Han H W, Sun L N, Yao T, *et al.* Effects of bio-fertilizers with different PGPR strain combinations on yield and quality of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(5): 104–112.
- 韩华雯, 孙丽娜, 姚拓, 等. 不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响. *草业学报*, 2013, 22(5): 104–112.
- [46] Kumari R, Pandey E, Bushra S, *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) induced protection: a plant immunity perspective. *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(5): e14495.
- [47] Zhang Y, Lu S. Study on phosphorus uptake utilization and morphological transformation in greenhouse soil under the combination of phosphorus reduction and microbial agent application. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2025, 25(1): 784–797.
- [48] Wang G, Zhang L S, Zhang S H, *et al.* The combined use of a plant growth promoting *Bacillus* sp. strain and GABA promotes the growth of rice under salt stress by regulating antioxidant enzyme system, enhancing photosynthesis and improving soil enzyme activities. *Microbiological Research*, 2023, 266: 127225.
- [49] Fan N, Peng Z D, Bai W B, *et al.* Influences of microbial agents on soil enzyme activity and sorghum growth. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(2): 185–192.
- 范娜, 彭之东, 白文斌, 等. 微生物菌剂对土壤酶活性及高粱生长的影响. *中国农业科技导报*, 2021, 23(2): 185–192.
- [50] Li L, Han Z, Zhang Y, *et al.* Effects of reducing nitrogen fertilizer combined with microbial agents on rice root growth and soil enzyme activities. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4): 932–939.
- 李丽, 韩周, 张昀, 等. 减氮配施微生物菌剂对水稻根系发育及土壤酶活性的影响. *土壤通报*, 2019, 50(4): 932–939.
- [51] He S M, Zhang Y, Yang X L, *et al.* Effects of microbial inoculants combined with chemical fertilizer on growth and soil nutrient dynamics of timothy (*Phleum pratense* L.). *Agronomy*, 2024, 14(5): 1016.