DOI: 10. 11686/cyxb2025521
http://cyxb. magtech. com. cn
成思瞳, 杨晓蕾, 李琦, 等. 不同溶磷菌剂施用对苜蓿土壤无机磷组分及有效性的影响. 草业学报, 2026, 35(12): 64－77.
CHENG Si-tong, YANG Xiao-lei, LI Qi, *et al*. Effects of different phosphorus-removing agents on soil inorganic phosphorus components and availability to alfalfa plants. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(12): 64－77.

不同溶磷菌剂施用对苜蓿土壤无机磷组分及有效性的影响

成思瞳[1], 杨晓蕾[1], 李琦[1], 李昌宁[1], 姚拓[1*], 陈龙[2], 吴珂瑞[1]
(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州市红古区科教兴农示范园区管理中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探究不同溶磷菌剂添加对苜蓿土壤无机磷组分及有效性的影响, 于 2023 年在河西走廊的武威市施用溶磷菌剂 1(贝提卡假单胞菌 GS6-5)、溶磷菌剂 2(曼德氏假单胞菌 GS10-1)和复合溶磷菌剂(贝提卡假单胞菌 GS6-5、曼德氏假单胞菌 GS10-1、曼德氏假单胞菌 GS3-6 和赖内克氏假单胞菌 GS14-1 等体积 1∶1∶1∶1 混匀), 并进行连续 3 年(2023－2025)实地监测。结果表明: 1)与对照(CK)相比, 施用不同溶磷菌剂的紫花苜蓿株高、干草产量均显著提升($P<0.05$), 其中复合菌剂处理下第 3 年的株高和干草产量最高(108.21 cm 和 24284.46 kg·hm^{-2})且逐年提升; 2)与对照(CK)相比, 施用不同溶磷菌剂的土壤黏粒与粉粒占比显著提升($P<0.05$), 其中复合菌剂处理下粉粒占比最高(33.87%), 砂粒含量最低; 3)与对照(CK)相比, 施用不同溶磷菌剂的土壤全磷、速效磷和无机磷组分含量均显著提升($P<0.05$), 除速效磷和十钙磷外(Ca_{10}-P), 其余磷素含量在 3 年内均保持较高水平; 4)与对照(CK)相比, 施用不同溶磷菌剂的土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、磷酸二酯酶、植酸酶活性均显著提升($P<0.05$), 其中植酸酶在 3 年内保持较高活性。5)经优劣解距离法(TOPSIS)综合评价, 施加复合溶磷菌剂在促进土壤无机磷形态转化, 提升土壤磷素含量方面的效果最佳, 为溶磷菌剂在河西走廊土壤磷素利用和紫花苜蓿高产提供理论依据。

关键词: 紫花苜蓿; 溶磷菌剂; 无机磷组分; 磷酸酶活性

Effects of different phosphorus-removing agents on soil inorganic phosphorus components and availability to alfalfa plants

CHENG Si-tong[1], YANG Xiao-lei[1], LI Qi[1], LI Chang-ning[1], YAO Tuo[1*], CHEN Long[2], WU Ke-rui[1]
1. *College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystems, Ministry of Education, Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Management Center of Science and Education for Agriculture Demonstration Park, Honggu District, Lanzhou* 730070, *China*

Abstract: In this study, we investigated the effects of different phosphorus (P)-solubilizing bacterial agents on inorganic P components and availability in the soil of alfalfa (*Medicago sativa*) crops. This field experiment was conducted over three consecutive years (2023－2025) in Wuwei City, Hexi Corridor, and consisted of a control (CK, no additions) and three treatments: P-solubilizing bacterial agent 1 (*Pseudomonas baetica* GS6-5), P-solubilizing bacterial agent 2 (*Pseudomonas mandelii* GS10-1), and a composite mix of P-solubilizing bacterial agents (a 1∶1∶1∶1 mixture of *P. baetica* GS6-5, *P. mandelii* GS10-1, *P. mandelii* GS3-6, and *Pseudomonas reinekei* GS14-1). The results demonstrate that: 1) Compared with the CK, all the treatments resulted in significant

收稿日期: 2025-12-24; 改回日期: 2026-03-12
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: 成思瞳(2001－), 男, 山西临汾人, 在读硕士。E-mail: 1121861760@qq. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: yaotuo@gsau. edu. cn

increases in alfalfa plant height and hay yield ($P<0.05$). The highest plant height (108.21 cm) and hay yield (24284.46 kg·ha^{-1}) were achieved in the third year with the composite bacterial agent after continuous annual improvements; 2) The proportions of clay and silt in soil were significantly elevated in the P-solubilizing bacterial treatments ($P<0.05$), with the composite bacterial agent treatment exhibiting the highest proportion of silt (33.87%) and the lowest sand content; 3) Compared with CK, all the treatments led to significant increases in total P, available P, and inorganic P contents in soil ($P<0.05$), but the available P and calcium-10 P (Ca_{10}-P) contents were not affected. All other P forms were maintained at high levels throughout the 3-year period in the three treatments; 4) Compared with CK, all the treatments led to marked increases in soil alkaline phosphatase, acid phosphatase, phosphodiesterase, and phytase activities ($P<0.05$), with phytase activity remaining consistently high during the whole experimental period in all the treatments; 5) Further analyses using the technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method indicated that the composite P-solubilizing bacterial agent was most effective for increasing soil inorganic P transformation and P content. These results provide scientific data for optimization of P utilization and high-yield alfalfa production in the Hexi Corridor.

Key words: alfalfa; phosphorus solubilizing bacteria; inorganic phosphorus components; phosphatase activity

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为河西走廊主要种植的喜磷豆科牧草,因其适应性广泛,具有极高的饲用及经济价值,有“牧草之王”的美誉[1-2]。作为紫花苜蓿生长不可或缺的三大营养元素之一,磷是合成核酸、磷脂与腺苷三磷酸(adenosine triphosphate,ATP)等生命活动核心物质的重要原料,直接参与细胞分裂和组织分化,从而显著提高其产量及品质,同时还参与脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质的合成,增强其抗寒、抗旱能力[3-6]。河西走廊普遍缺磷,缺磷会抑制苜蓿体内新细胞的形成,表现为根系发育不良,生长受到抑制或停滞[7-8]。土壤磷库中的磷素大多以难溶性无机磷与有机磷两种形态存在,在碱性土壤中二钙磷酸盐(dicalcium phosphate,Ca_2-P)、八钙磷酸盐(octacalcium phosphate,Ca_8-P)、十钙磷酸盐(decacalcium phosphate,Ca_{10}-P)作为主要的无机磷,占总磷含量的70%以上,铝结合态磷(aluminum-bound phosphorus,Al-P)、铁结合态磷(iron-bound phosphorus,Fe-P)、闭蓄态磷(occluded phosphorus,O-P)占比较少,大部分不能直接被植物吸收利用,降低了土壤有效磷浓度并限制植物生长[9-10]。近年来,国内外关于促进土壤磷素利用及磷形态转化的研究更多的是围绕不同种类磷肥的施用及施肥梯度展开[11],对于微生物菌剂的研究相对较少。

微生物菌剂(microbial inoculants)是一类以高活性功能微生物为核心组分的肥料制品,具有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的作用[12],其中溶磷菌剂的核心功能是通过溶磷微生物溶解土壤难溶磷素。溶磷微生物(phosphate soluble microorganisms,PSMs)广泛分布于土壤,是溶磷菌剂的核心功能组分,是一类能通过分泌有机酸、酶类等代谢产物溶解土壤难溶磷素、减少磷肥固定、提高磷肥利用率的微生物类群,与植物对磷营养的吸收关系密切[13-14]。溶磷微生物在优化土壤磷素循环、提升土壤有效磷供给水平、促进作物产量与品质协同提升、减少磷矿资源过度开采消耗以及降低化学磷肥过量施用引发的面源污染等方面展现出了不可替代的作用,其活化功能的突出,已成为改良土壤磷素生物有效性的重要生物技术手段[15-17]。彭松等[18]研究发现,在低磷胁迫下,根际微生物通过分泌磷酸酶与有机酸以活化难溶性有机磷和无机磷。Rawat等[19]研究表明假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)和伯克霍尔德菌属(*Burkholderia*)等能采用不同的策略将不可用磷转化为可用的无机磷,促进植物磷吸收。因此,解决土壤磷素固定,使其转化为更容易被利用的磷形态是提高土壤供磷能力的有效途径。团队前期已从7种优势-亚优势牧草根际土壤中分离出114株溶磷细菌,对其促生特性和拮抗关系进行测定,并通过盆栽试验验证其对植物生长、土壤磷素循环的效果,最终筛选出4株溶磷特性较强的菌株,但溶磷菌剂在田间的应用效果尚未得知[20]。

基于此,本试验选用复合溶磷菌剂与单一溶磷菌剂,通过对紫花苜蓿株高、干草产量,土壤粒径组成、全磷、速

效磷、无机磷组分含量，土壤磷酸酶活性进行综合评价，深入探究溶磷菌剂对河西走廊苜蓿土壤磷素含量及磷组分的影响，以提高土壤磷素活化利用效率为核心目标，为河西走廊苜蓿产业精准施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用甘农3号紫花苜蓿('Gannong No. 3')品种，由甘肃农业大学草业生态系统教育部重点实验室提供。溶磷菌剂中选用的4株菌株由甘肃农业大学草地有益微生物发掘与利用团队提供，菌株特性见表1。

从－80 ℃菌种保存冰箱中取出菌株，冷却至室温后，分别单独接种于LB(Lysogeny Broth)液体培养基[21](酵母粉5 g·L^{-1}，蛋白胨10 g·L^{-1}，氯化钠5 g·L^{-1}，pH 7.0，121 ℃灭菌30 min)中，置于摇床180 r·min^{-1}、28 ℃培养36 h，制成种子液备用。随后将种子液以接种量10%分别单独接种于发酵培养基[22](甘油13 mL·L^{-1}、蛋白胨9 g·L^{-1}、酵母粉5 g·L^{-1}和碳酸钙5 g·L^{-1}，pH 7.0，121 ℃灭菌30 min)中，装液量30 mL(每150 mL三角瓶)，置于摇床220 r·min^{-1}、31 ℃培养48 h，后用无菌水调节使OD_{600nm}值一致，制成菌剂，采用牛津杯法[20]测定供试菌株间无拮抗反应，将4种菌剂等体积比1∶1∶1∶1混匀制成复合菌剂。

表1 供试菌株的宿主植物及促生特性

Table 1 Host plant and growth promoting characteristic of tested strains

编号 Number	菌株 Strain	宿主植物 Host plant	促生特性 Growth promoting characteristic
GS6-5	贝提卡假单胞菌 *Pseudomonas baetica*	苜蓿 *M. sativa*	溶磷、固氮、分泌植物激素 Phosphorus dissolving, nitrogen fixing, plant hormone secretion[20]
GS10-1	曼德氏假单胞菌 *Pseudomonas mandelii*	苜蓿 *M. sativa*	
GS3-6	曼德氏假单胞菌 *P. mandelii*	甘肃嵩草 *Kobresia kansuensis*	
GS14-1	赖内克氏假单胞菌 *Pseudomonas reinekei*	草地早熟禾 *Poa pratensis*	

注：GS6-5、GS10-1、GS3-6、GS14-1为试验所选用菌株在甘肃农业大学草地有益微生物发掘与利用团队自建菌株资源库中的编号。

Note: GS6-5, GS10-1, GS3-6, and GS14-1 are the serial numbers assigned to the test strains in the strain resource bank established by the Grassland Beneficial Microorganisms Discovery and Utilization Team at Gansu Agricultural University.

1.2 试验设计

于2023年5月底施加溶磷菌剂，2024和2025年不施加菌剂，进行为期3年的长期试验。试验地采用随机区组设计，小区面积3 m×5 m，小区间隔0.7 m，均以100%化肥(磷酸二铵)作为底肥，施加菌剂时，将菌液与水2∶1混匀，洒施，施用量均为4.5 L·hm^{-2}[23]。2023－2025年期间，在每年的每茬刈割期内采集牧草和土壤样本，每年采样3次，分别为7、8、9月。采集同年不同茬次的土壤样品后放入4 ℃冰箱保存，每一年采集结束后将当年各茬次土壤等比例混合均匀，立即进行指标检测。

田间试验区域设于甘肃省武威市黄羊镇牧草试验站(102°53′20″ E、37°48′20″ N)，此地海拔1660 m，位于河西走廊东端，属温带大陆性气候，农业生产区划为中温带荒漠灌区。该区域年降水量150 mm，蒸发量2019.90 mm，无霜期154 d。气候特征为冬春干旱、夏季酷热，日照长，降水少，蒸发量大。土壤基本理化性质如下：有机质10.21 g·kg^{-1}、全氮0.66 g·kg^{-1}、全磷0.79 g·kg^{-1}、全钾11.07 g·kg^{-1}、碱解氮39.80 mg·kg^{-1}、有效磷9.26 mg·kg^{-1}、速效钾99.87 mg·kg^{-1}、pH值8.00、电导率190.60 μs·cm^{-1}、Ca_2-P 1.54 mg·kg^{-1}、Ca_8-P 9.46 mg·kg^{-1}、O-P 15.14 mg·kg^{-1}、Ca_{10}-P 89.17 mg·kg^{-1}、Al-P 12.43 mg·kg^{-1}、Fe-P 10.32 mg·kg^{-1}。试验共4个处理(表2)，重复3次。

1.3 指标测定

在初花期测定紫花苜蓿株高，每个小区选取10株长势相近的植株，用卷尺测植物基部到顶端的高度，精确到0.1 cm[23]；在初花期，每个小区分别取1 m×1 m的样方刈割测产，留茬5 cm，刈割后立即称其鲜重，选取300 g鲜草带回实验室于烘箱内105 ℃杀青30 min，后调至65 ℃烘至恒重，计算干鲜比，换算为单位面积干草产量[24]。采

用$HClO_4$-H_2SO_4法测定土壤全磷含量[25]；采用钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量[25]；采用顾益初等[26]的无机磷分级体系测定土壤无机磷组分含量；采用土壤粒径分析仪（SYNC，S3500，美国麦奇克有限公司）测定土壤粒径含量；采用苏州格瑞思生物科技有限公司试剂盒测定土壤酸性磷酸酶（acid phosphatase）、碱性磷酸酶（alkaline phosphatase）、磷酸二酯酶（phosphodiesterase）和植酸酶（phytase）活性。

表 2　不同溶磷菌剂组合试验处理

Table 2　Experimental treatment of different phosphorus-removing agents combination

处理 Treatment	处理方法 Processing method
T_1	GS6-5＋GS10-1＋GS3-6＋GS14-1复合菌剂＋100％磷酸二铵 GS6-5＋GS10-1＋GS3-6＋GS14-1 composite bacterial agent＋100％ diammonium phosphate
T_2	GS6-5单菌剂＋100％磷酸二铵 GS6-5 single bacterial agent＋100％ diammonium phosphate
T_3	GS10-1单菌剂＋100％磷酸二铵 GS10-1 single bacterial agent＋100％ diammonium phosphate
CK	不施菌剂＋100％磷酸二铵 No fungicide application＋100％ diammonium phosphate

1.4　数据分析

采用 Excel 2019 对试验数据进行整理，用平均值和标准误差表示统计分析结果；运用 SPSS 22.0 统计软件对试验所测数据（同一年份不同处理和同一处理不同年份）进行单因素 ANOVA 检验；采用 Chiplot 在线软件进行指标相关性分析；采用优劣解距离法（technique for order of preference by similarity to ideal solution，TOPSIS）[27]综合分析评价不同溶磷菌剂对土壤磷素活化效果及磷酸酶活性的影响；运用 Origin 2022 对试验所测数据进行图表制作。

2　结果与分析

2.1　不同种类菌剂处理对紫花苜蓿株高和干草产量的影响

从整体来看，同年内各处理组间的株高差异较为明显，各处理组紫花苜蓿的株高和干草产量随年份的增加而升高且差异显著。分析结果表明（图 1），各年份施加不同种类溶磷菌剂的株高均显著高于 CK（$P<0.05$），其中 T_1 处理在 2025 年最高，为 108.21 cm，较 CK 提升 50.34％，T_1 处理 2024 年较 2023 年显著提升 20.47％，2025 较 2023 年显著提升 42.75％。各年份施加不同种类溶磷菌剂的干草产量均显著高于 CK（$P<0.05$），其中 2025 年 T_1 处理最高，为 24284.46 kg·hm^{-2}，较 CK 提升了 27.45％，T_1 处理 2025 年较 2023 年显著提升 16.37％。

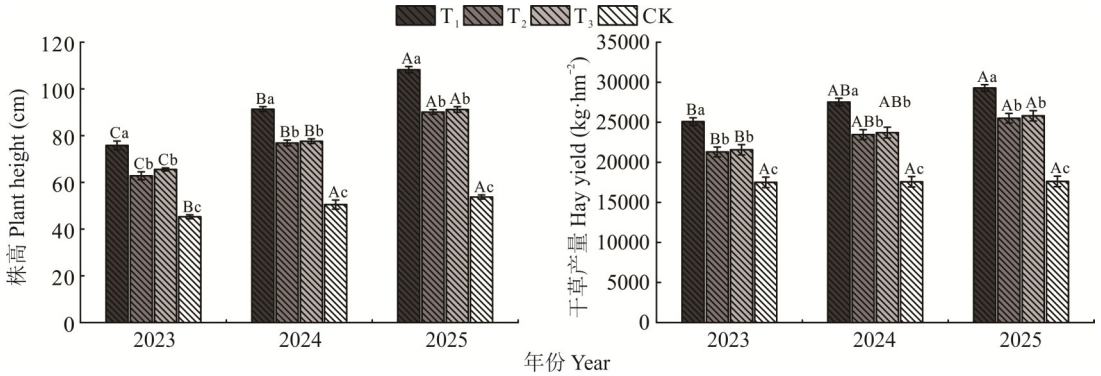

图 1　不同处理下各年份内紫花苜蓿株高、干草产量

Fig. 1　Plant height and hay yield of *M. sativa* under different treatments in different years

不同大写字母表示在 $P<0.05$ 水平上不同年份同一处理之间差异显著，不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上同一年份不同处理之间差异显著，下同。Capital letters indicate significant differences among different years at the $P<0.05$ level within the same treatment, while lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year at the $P<0.05$ level, the same below.

2.2 不同种类菌剂处理对苜蓿土壤粒径含量的影响

从整体来看,同年内各处理组间的差异较为明显。随年限增加,土壤各形态粒径占比未呈明显的变化趋势。施加不同种类溶磷菌剂的黏粒与粉粒含量较CK均显著提升(表3)。T_1和T_3处理的砂粒含量随时间推移逐渐升高,个别存在降低趋势,粉粒与黏粒含量随时间推移逐渐降低。其中2023年T_3处理的黏粒占比最高,为4.94%,2023年T_1处理的粉粒占比最高,为40.99%,同年粗砂粒含量最低,为4.83%。T_1处理下,黏粒含量在2023年较2024降低了12.75%,2024较2025年降低了44.85%。上述结果表明,相较于T_2处理,T_1和T_3处理的土壤质地表现更优。

表3 不同处理下不同年份内土壤粒径含量

Table 3 Soil particle size content in different years under different treatments (%)

年份 Year	处理 Treatment	占比 Proportion			
		粗砂粒 Coarse sand	细砂粒 Fine sand	粉粒 Silt particles	黏粒 Clay particles
2023	T_1	4.83±0.15Cd	50.74±0.34Cc	40.99±0.34Aa	3.45±0.11Ab
	T_2	13.15±0.41Ac	60.34±0.19Ca	23.06±0.22Ab	3.45±0.03Ab
	T_3	17.51±0.11Bb	56.43±0.17Bb	21.13±0.51Ac	4.94±0.01Aa
	CK	45.66±0.86Aa	42.88±0.80Bd	9.48±0.62Ad	0.98±0.10Ac
2024	T_1	8.47±0.44Bd	55.09±0.52Bc	33.42±0.49Ba	3.01±0.05Bb
	T_2	10.66±0.82Bc	70.54±0.35Ba	16.06±0.41Bc	2.74±0.02Bc
	T_3	16.54±0.23Cb	59.60±0.17Ab	20.52±0.08Bb	3.33±0.01Ba
	CK	39.77±0.92Ba	49.60±0.72Ad	9.78±0.49Ad	0.85±0.06Ad
2025	T_1	13.26±0.32Ac	57.87±0.47Ab	27.20±0.50Ca	1.66±0.05Cb
	T_2	2.65±0.17Cd	78.24±0.12Aa	17.77±0.11Cb	1.33±0.02Cc
	T_3	31.28±0.13Ab	54.46±0.12Cc	11.52±0.20Cc	2.73±0.02Ca
	CK	38.27±0.56Ba	51.26±0.73Ad	9.60±0.73Ac	0.87±0.11Ad

注:同列不同大写字母表示不同年份同一处理之间差异显著($P<0.05$),同列不同小写字母表示同一年份不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

Note: The different capital letters within the same column indicate significant differences among different years at the $P<0.05$ level within the same treatment, while the different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different treatments within the same year at the $P<0.05$ level.

2.3 不同种类菌剂处理对苜蓿土壤磷素含量的影响

2.3.1 不同溶磷菌剂对土壤全磷含量的影响 从整体来看,不同处理组在各年份下的全磷含量有一定波动,同年内各处理组间差异显著(图2)。各年份施加不同种类溶磷菌剂的全磷含量均显著高于CK($P<0.05$),其中2023年T_1处理最高,为0.35 g·kg^{-1},较CK提升了55.57%;各年份T_1处理的土壤全磷含量均显著高于T_2和T_3处理($P<0.05$),分别平均提升了22.27%和21.84%;2025年T_2较T_3处理显著提高10.58%($P<0.05$),表现为$T_1>T_2>T_3>CK$。同一处理在不同年份间无显著性差异($P>0.05$)。

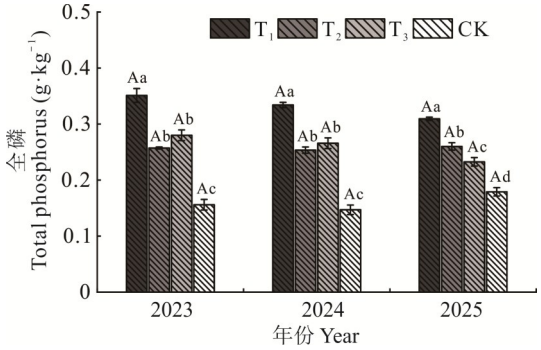

图2 不同处理下各年份内土壤的全磷含量

Fig. 2 Total phosphorus content in soil under different treatments in each year

2.3.2 不同溶磷菌剂对土壤速效磷含量的影响 从整体来看,不同处理组在各年份下的速效磷含量有一定波动,同年内各处理组间有一定的差异,但未呈明显的上升或下降趋势(图3)。除T_2处理外,各年份施加不同种类溶磷菌剂的速效磷含量均显著高于CK($P<0.05$),且T_2处理与CK间差异均不显著($P>0.05$),其中2023年T_1

处理的速效磷含量最高，为 74.48 mg·kg^{-1}，较 T_2 处理和 CK 分别提升了 28.33% 和 29.56%，较 T_3 处理显著提高了 15.69%（$P<0.05$），T_3 较 T_2 处理显著提高了 14.99%（$P<0.05$）；2024 年 T_3 较 T_1 处理的土壤速效磷含量显著提高了 3.10%（$P<0.05$）；2024 和 2025 年 T_1 和 T_3 处理的土壤速效磷含量显著高于 T_2 处理（$P<0.05$），分别平均提升了 16.52% 和 12.04%。除 2024 年外，T_1 处理在提升土壤速效磷含量方面效果最好，T_3 处理次之。T_1 处理下土壤速效磷含量在 2023 年较 2025 年提高了 21.36%，T_3 处理下土壤速效磷含量在 2023 年较 2025 年提高了 10.34%。

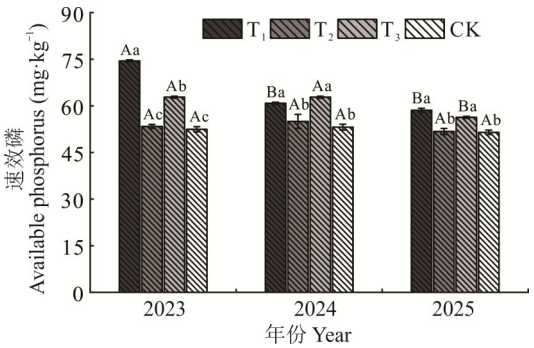

图 3　不同处理下各年份内土壤速效磷含量

Fig. 3　Available phosphorus content in soil in different years under different treatments

2.3.3　不同溶磷菌剂对土壤无机磷组分含量的影响　从整体来看，不同处理组在各年份下的无机磷组分含量有一定波动，同年内各处理组间差异较为明显，同一处理组各年份之间没有呈明显的上升或下降趋势（图 4）。各年份施加不同种类溶磷菌剂的 Ca_2-P、Ca_8-P、O-P、Ca_{10}-P 含量均显著高于 CK（$P<0.05$），其中各年份 T_1 处理无机磷各组分的含量均最高，分别为 4.57、21.39、20.31、16.39、28.63、173.10 mg·kg^{-1}，较 CK 分别平均提升 60.30%、48.17%、29.87%、24.46%、33.98%、42.59%。各年份 T_1 处理的无机磷各组分含量均显著高于 T_2 和 T_3 处理（$P<0.05$），分别平均提高 29.93% 和 24.34%、24.25% 和 17.73%、29.18% 和 20.13%、26.79% 和 18.89%、17.62% 和 21.84%、21.89% 和 21.84%。上述结果表明，T_1 处理在提升土壤无机磷组分含量方面效果

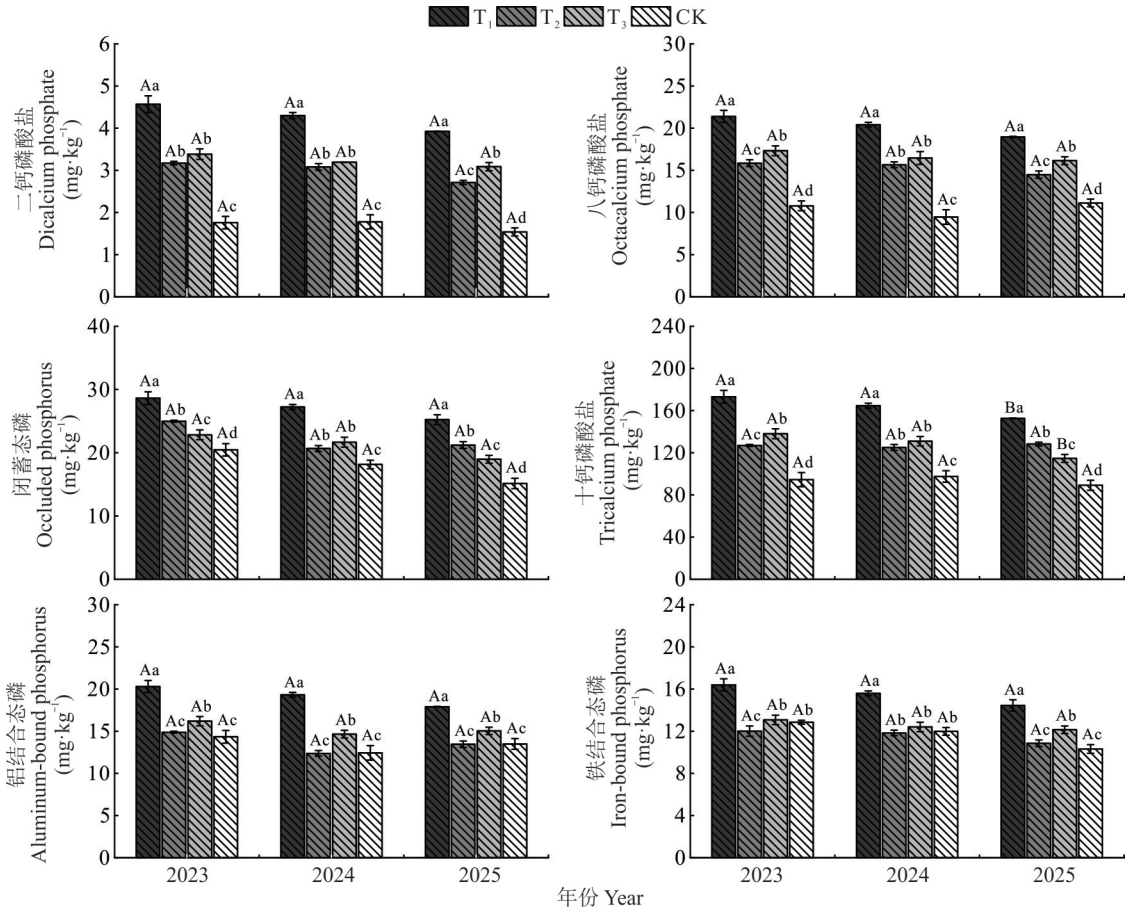

图 4　不同处理下各年份内土壤无机磷组分含量

Fig. 4　Content of inorganic phosphorus components in soil in different years under different treatments

最佳。T_1处理下Ca_{10}-P含量在2023年较2025年提高了11.88%,其余无机磷组分含量在同一处理下不同年份间均无显著性差异($P>0.05$)。

2.4 不同种类菌剂处理对苜蓿土壤磷酸酶活性的影响

从整体来看,不同处理组在各年份下的土壤磷酸酶活性有一定波动,同年内各处理组间差异较为明显,同一处理随年份递增,均呈下降趋势(图5)。各年份T_1和T_3处理的碱性磷酸酶活性均显著高于CK($P<0.05$),其中2023年T_3处理最高,为2470.25 nmol·h^{-1}·g^{-1},较CK显著提高了19.56%。各年份T_1和T_2处理的酸性磷酸酶活性均显著高于CK($P<0.05$),其中2023年T_1处理最高,为1006.43 nmol·h^{-1}·g^{-1},较CK显著提高25.07%。2023和2025年3个处理的磷酸二酯酶活性均显著高于CK($P<0.05$),2023年T_1处理最高,为1380.15 nmol·h^{-1}·g^{-1},较CK显著提高了38.96%。2023和2024年T_1和T_3处理的植酸酶活性均显著高于CK($P<0.05$),其中2023年T_1处理最高,为2.82 nmol·h^{-1}·g^{-1},较CK显著提升29.79%;2025年T_1和T_3处理均显著高于T_2处理($P<0.05$),而T_3处理和CK间无显著差异($P>0.05$)。除植酸酶外,在同一处理下各磷酸酶活性均逐年显著下降。

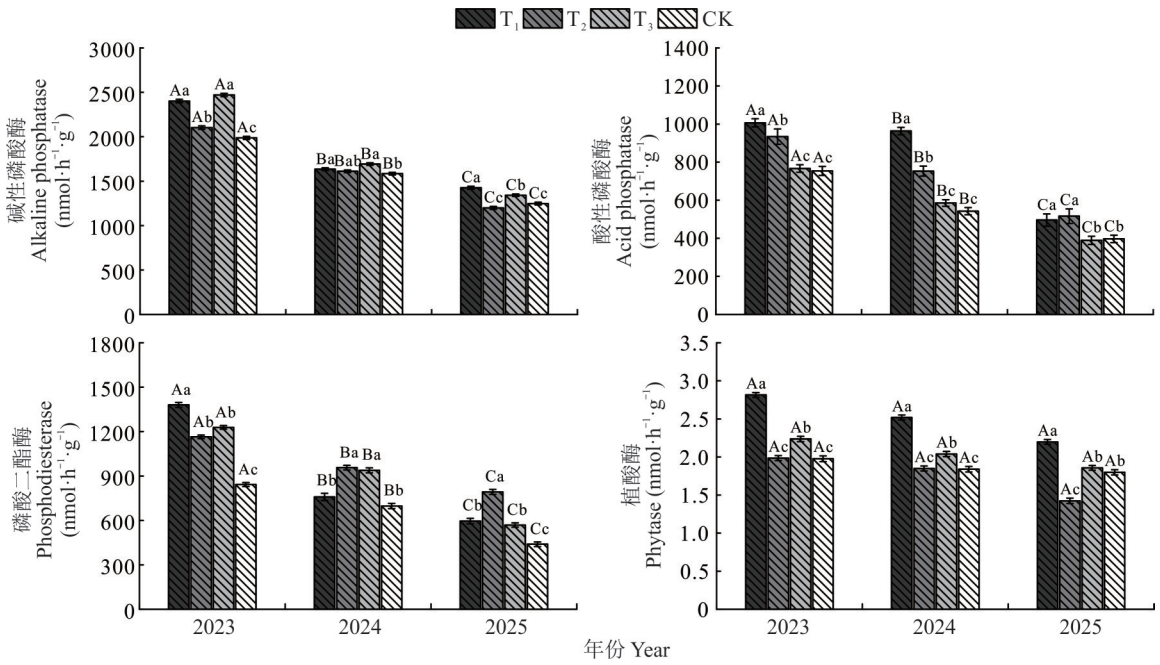

图5 不同处理各年份内土壤磷酸酶活性变化

Fig. 5 Activity of soil phosphatase in different treatments in each year

2.5 苜蓿土壤各指标间相关性分析

相关性分析结果(图6)显示,土壤Ca_2-P含量与紫花苜蓿株高、干草产量、土壤植酸酶活性呈极显著($P<0.001$)相关,相关系数(r)分别为0.63、0.77和0.82。表明Ca_2-P是决定紫花苜蓿株高和干草产量的关键有效磷源。此外,土壤Ca_2-P含量与土壤磷酸二酯酶、酸性磷酸酶活性呈显著正相关,与土壤Fe-P、Al-P、Ca_{10}-P、O-P含量呈极显著正相关。土壤速效磷与土壤Fe-P、Al-P、Ca_8-P、Ca_{10}-P、O-P含量及土壤碱性磷酸酶、磷酸二酯酶和植酸酶的活性呈极显著正相关,与土壤酸性磷酸酶活性和紫花苜蓿干草产量呈显著正相关。土壤全磷与紫花苜蓿株高、干草产量、土壤无机磷各组分含量、土壤植酸酶活性呈极显著相关,与土壤酸性磷酸酶、磷酸二酯酶呈显著正相关。

2.6 优劣解距离法综合评价筛选最佳菌剂处理

2.6.1 熵权法计算权重　　通过熵权法计算各个指标权重(表4)。结果显示:全磷的权重为11.997%,速效磷的权重为1.063%,二钙磷(Ca_2-P)的权重为25.524%,八钙磷(Ca_8-P)的权重为13.601%,铝结合态磷(Al-P)的权重为9.852%,铁结合态磷(Fe-P)的权重为10.455%,闭蓄态磷(O-P)的权重为7.138%,十钙磷(Ca_{10}-P)的权

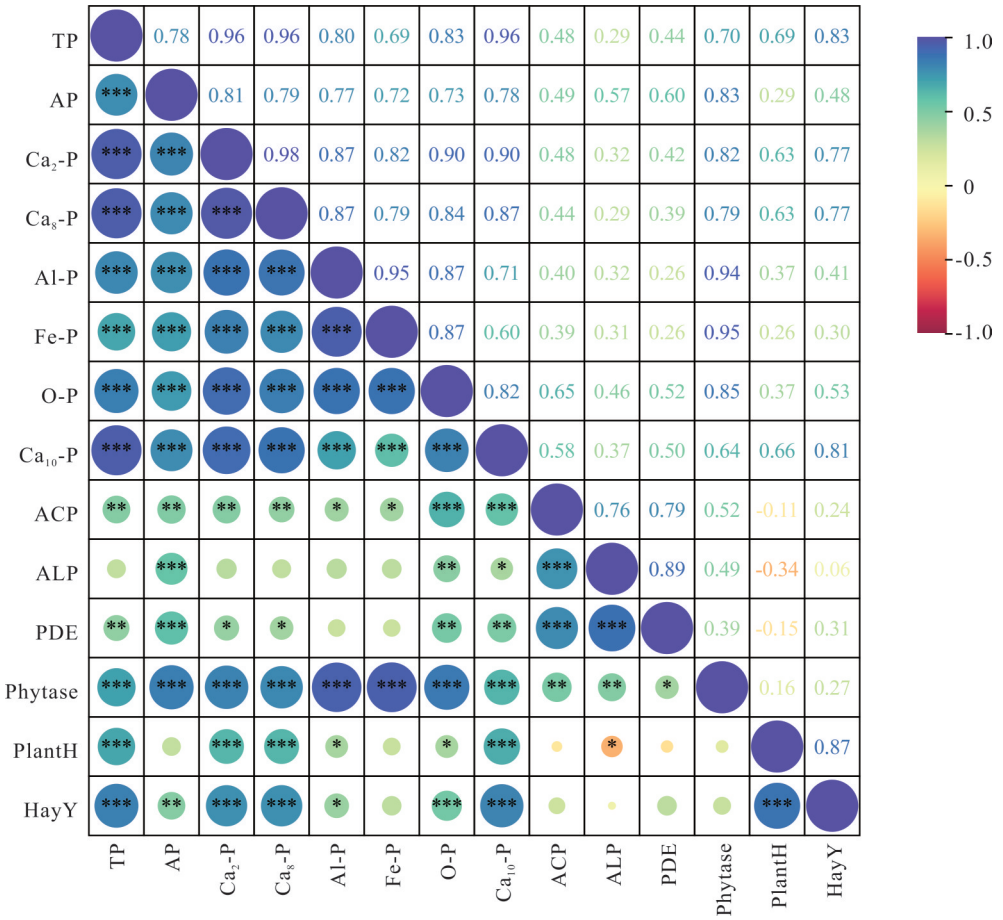

图 6　土壤全磷、速效磷、各形态无机磷含量、磷酸酶活性与紫花苜蓿株高、干草产量的相关性分析

Fig. 6　Correlation analysis within content of soil inorganic phosphorus fractions, total phosphorus, available phosphorus, soil phosphatase activity, and plant height, hay yield of *M. sativa*

TP、AP、Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca_{10}-P、ACP、ALP、PDE、Phytase、PlantH、HayY 分别表示土壤全磷、速效磷、二钙磷、八钙磷、铝结合态磷、铁结合态磷、闭蓄态磷、十钙磷、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、磷酸二酯酶、植酸酶、株高、干草产量 Soil total phosphorus, available phosphorus, dicalcium phosphate, octacalcium phosphate, aluminum-bound phosphorus, iron-bound phosphorus, occluded phosphorus, decacalcium phosphate, acid phosphatase, alkaline phosphatase, phosphodiesterase, phytase, plant height, and hay yield, respectively; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$; 紫色代表正相关，红色代表负相关，颜色越深代表相关性越强 Purple represents positive correlation, red represents negative correlation, and the darker color represents stronger correlation.

表 4　通过熵值法计算各个指标权重

Table 4　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, %)
全磷 TP	0.986	0.014	11.997	闭蓄态磷 O-P	0.993	0.007	7.138
速效磷 AP	0.998	0.002	1.063	十钙磷 Ca_{10}-P	0.992	0.008	6.801
二钙磷 Ca_2-P	0.973	0.027	25.524	酸性磷酸酶 ACP	0.996	0.004	4.709
八钙磷 Ca_8-P	0.985	0.015	13.601	碱性磷酸酶 ALP	0.999	0.001	0.429
铝结合态磷 Al-P	0.990	0.010	9.852	磷酸二酯酶 PDE	0.995	0.005	4.435
铁结合态磷 Fe-P	0.989	0.011	10.455	植酸酶 PHY	0.996	0.004	3.997

重为 6.801%，酸性磷酸酶的权重为 4.709%，碱性磷酸酶的权重为 0.429%，磷酸二酯酶的权重为 4.435%，植酸酶的权重为 3.997%，其中指标权重最大值为 Ca_2-P，最小值为碱性磷酸酶。

2.6.2 TOPSIS评价法计算结果 各处理综合评价排序结果(表5)表明,最优处理为T_1处理(GS6-5+GS10-1+GS3-6+GS14-1复合菌剂+100%磷酸二铵),第2名为T_2处理(GS6-5单菌剂+100%磷酸二铵),第3名为T_3处理(GS10-1单菌剂+100%磷酸二铵),最后1名为CK(不施菌剂+100%磷酸二铵)。

表5 优劣解距离法评价及排序

Table 5 Technique for order of preference by similarity to ideal solution evaluation

项目 Item	正理想解距离 Positive ideal solution distance (D^+)	负理想解距离 Negative ideal solution distance (D^-)	相对接近度 Relative proximity (C)	排序结果 Sorting result
T_1	6.551	23.869	0.763	1
T_2	10.721	19.004	0.653	2
T_3	17.827	12.367	0.420	3
CK	28.005	0.906	0.032	4

3 讨论

3.1 不同溶磷菌剂添加对紫花苜蓿生物量的影响

生物量作为评价植株生长状况最核心的表观指标,是植物生长相关研究中沿用的常规且具有直观性的方案[12]。研究表明,施加复合溶磷菌剂处理下各年份紫花苜蓿株高和干草产量均最高,分别较不施菌剂对照平均提升了45.13%和25.65%,这与雷生妍等[28]研究中发现复合菌剂对玉米(*Zea mays*)、燕麦(*Avena sativa*)和苜蓿的地上生物量的促生作用明显,其效果比单一菌剂更加显著的结论相吻合。同时经过连续3年的监测发现,复合溶磷菌剂处理下紫花苜蓿的干草产量逐年提升,2025较2023年显著提升16.37%,产生此现象的原因可能是产植酸酶的假单胞菌菌株普遍具备多重功能性状,可同时实现无机磷与有机磷的溶解、自生固氮及植物激素分泌等作用,且所有菌株均表现出两种及以上的复合促生能力[20]。在此基础上,复合菌剂中不同菌株通过分泌多种用于生物肥料的植物促生长性状,提升菌群在高钙、碱性土壤中的定殖率、活性及抗病性,避免单一菌株因环境胁迫导致促生效应衰减,为紫花苜蓿生长提供优秀的微生态条件。李琦[20]研究发现,施加复合溶磷菌剂可显著提升紫花苜蓿的株高和产量。据此推测,复合溶磷菌剂的施用可提高土壤磷酸酶活性,加速土壤有机磷矿化,使土壤全磷向有效形态转化,显著提升土壤速效磷含量,同时通过活化作用,降低土壤中难溶性无机磷组分比例,增加有效性较高的无机磷组分含量,改善土壤磷素供应,进而促进紫花苜蓿对磷素的吸收利用,实现促生效果,本研究结果与其相吻合。

3.2 不同溶磷菌剂添加对土壤磷素含量的影响

土壤全磷作为磷素储备的基础形式,其含量状况能够直接体现土壤向植物提供磷素的潜在能力,而有效磷作为植物可直接吸收利用的磷素形态,其含量既能反映土壤磷素的供应能力,也可反映施入溶磷细菌后磷素的活化释放速率,两者共同构成评价溶磷菌剂磷素调控效应的关键依据[29-31]。研究表明,施加不同溶磷菌剂处理的土壤全磷、速效磷含量显著提升,其中复合溶磷菌剂效果最佳,分别较不施菌剂对照提升了55.57%和29.56%。这与黄秋良等[32]的研究结果相吻合。本研究中复合菌剂处理下土壤速效磷含量2025较2023年降低了21.36%,且同一处理在不同年份间土壤全磷含量无显著差异,表明土壤全磷含量长效性较好。栗丽等[33]研究表明接种溶磷菌剂对土壤全磷含量没有显著影响,但能显著提高土壤有效磷含量。潘忠飞等[34]研究表明伯克霍尔德菌属(*Burkholderia* sp.)与泛菌属(*Pantoea* sp.)混合接种于土壤降低了土壤全磷含量,显著提高了速效磷含量。产生此现象的原因可能是本研究中在以化肥为底肥的基础上施加溶磷菌剂,并且在后续两年并没有持续施加溶磷菌剂,影响了土壤微生物群落结构、代谢活性及定殖能力,进而导致微生物介导的磷素转化功能逐年下降。并且溶磷菌剂的施用,提高了土壤磷酸酶活性,加速有机磷分解释放无机态磷,使土壤速效磷含量显著增加,同时对难溶性无机磷组分进行活化、溶解,使其转化为可被测定的磷形态,最终表现为土壤全磷含量提升。

土壤无机磷作为土壤总磷库中占比最高的部分,其形态分布与转化特征是解析磷素有效性及土壤-植物磷营养供给关系的核心载体,无机磷组分间的转化动态直接决定了土壤磷素的供给潜力[35-36]。研究表明,施加不同溶磷菌剂处理的土壤各无机磷组分含量均显著高于不施菌剂对照,经相关性分析发现,施加不同溶磷菌剂处理的土壤Ca_{10}-P、Ca_8-P、Al-P与Ca_2-P含量呈极显著相关,可能是溶磷微生物通过产生乳酸、琥珀酸、柠檬酸等难挥发性有机酸溶解土壤中的难溶性钙磷并将其转变为更容易被吸收的Ca_2-P形态,促进土壤中钙磷有效化[37]。这与

周鑫斌等[38]研究中，在富含难溶性磷的石灰性土壤中施用溶磷菌肥有利于Ca_{10}-P和Ca_8-P向Ca_2-P转化，并增加Al-P含量的结果相吻合。本研究中在复合溶磷菌剂处理下土壤2025年Ca_{10}-P含量较2023年降低了11.88%，其余无机磷组分含量在同一处理下不同年份间均无显著差异。孟会生等[39]研究发现低磷条件下接种溶磷菌剂可提高石灰性土壤中Ca_2-P、Ca_8-P和O-P含量，降低Al-P、Fe-P和Ca_{10}-P含量。产生部分差异的原因可能是本研究由于施加化肥，土壤初始有效磷水平较高，可溶性磷易与土壤中Ca^{2+}、Al^{3+}、Fe^{3+}等离子结合形成不同形态无机磷，这使得菌剂的溶磷效能被高磷环境削弱，其作用更多体现为调控磷素转化速率，而非驱动磷素形态发生显著改变。

土壤中不同形态磷通过固磷、解磷两个反向的生物化学过程实现相互转化：速效磷可与土壤中铁铝及其氧化物、黏土矿物、石灰性物质及有机物结合，形成相应磷酸化合物；而有效磷含量较高时，解磷微生物会将其固定为生物量磷，后续通过周转过程释放有效磷供植物利用[40−41]。本研究中土壤Ca_8-P、Ca_2-P、Al-P、Fe-P含量与速效磷含量呈正相关，且熵权法计算发现Ca_2-P的权重占比最高，为25.524%，据此推测Ca_2-P是土壤中最有效的磷源，Ca_8-P、Al-P、Fe-P对速效磷同样起主要的作用。邵煜庭等[42]对灌漠土的研究表明，Ca_2-P、Al-P和Ca_8-P与有效磷均呈显著正相关，Ca_2-P、Al-P和Ca_8-P均是作物利用的主要磷源，Adnan等[43]也得到相同结论。从转化关系看，钙结合态磷是速效磷的核心“储备库”，其中Ca_2-P（易溶态钙磷）可直接为土壤提供速效磷，Ca_8-P（中溶态钙磷）在微环境变化下可快速转化为速效磷，而Ca_{10}-P（难溶态钙磷）则是长效储备形态，三者与速效磷形成“难溶－中溶－易溶－速效”的阶梯式转化链，构成土壤磷素供给的核心循环[44]。从调控机理讲，土壤pH与钙离子活度是转化关键，河西走廊高pH环境下，速效磷易与游离Ca^{2+}结合，通过“磷酸根－钙离子”配位反应依次形成Ca_2-P、Ca_8-P，最终转化为稳定的Ca_{10}-P，此为“速效磷固定为钙结合态磷”的主要路径[45]；而溶磷菌剂分泌的草酸、柠檬酸等有机酸可降低局部土壤pH，溶解钙磷复合物并释放Ca^{2+}，同时通过螯合作用降低钙离子活度，打破“固定平衡”，促进Ca_8-P、Ca_{10}-P向Ca_2-P及速效磷转化[46−47]。溶磷菌剂通过提高土壤磷酸酶活性，促进有机磷矿化，增加土壤速效磷与全磷含量，并通过溶磷作用，将稳定态的Ca_{10}-P、O-P转化为有效性更高的Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P、Fe-P，从而使土壤无机磷各活性组分含量提升。

3.3　不同溶磷菌剂添加对土壤磷酸酶活性的影响

土壤磷酸酶是评价土壤磷素生物转化强度的重要指标，是衡量环境中有机态磷转化潜力与补给机制的重要因素[48]。在土壤难溶性有机磷转化为植物能吸收利用的无机磷过程中，磷酸酶起着重要作用[49]。研究表明，施加不同溶磷菌剂处理的土壤磷酸酶活性均显著高于不施菌剂对照，这与胡绮琪等[49]研究发现，微生物菌肥可以有效改善土壤理化性质，为微生物提供适宜的生长环境，从而提高磷酸酶活性相吻合。范娜等[50]研究了施用微生物菌剂对高粱（*Sorghum bicolor*）不同生育期土壤酶活性的变化，也发现施用微生物菌剂均能提高土壤磷酸酶活性。本研究中土壤全磷、速效磷、Ca_{10}-P、O-P、Ca_8-P、Ca_2-P含量与磷酸二酯酶、酸性磷酸酶、植酸酶活性呈显著正相关，Al-P、Fe-P含量与酸性磷酸酶和植酸酶活性呈显著正相关。这与郭冉冉等[51]研究发现，增强微生物酶活性会驱动土壤中磷转化相吻合。磷酸酶活性越高，土壤微生物将有机磷向无机磷矿化的速度越快[52−53]。根据上述分析，推测施加溶磷菌剂提升土壤磷酸酶活性后，磷酸酶可水解土壤中难利用的有机磷（如植酸、磷脂等），将其转化为植物可直接吸收的无机磷（正磷酸盐），破解土壤磷素固定难题，提升磷素有效性；同时，磷酸酶活性受土壤磷素水平调控，缺磷环境下会显著升高，通过激活微生物磷代谢功能基因（如*phoC*、*phoD*），进一步促进有机磷矿化，推动磷素在土壤－植物系统中的循环利用，维持土壤磷素平衡，为作物生长提供稳定磷源[54]。研究发现，相较于其他种类土壤磷酸酶，土壤植酸酶活性与土壤各磷素含量间呈极显著相关，并且在复合溶磷菌剂处理下，土壤植酸酶活性在3年内未显著下降，产生此现象的原因可能是植酸酶作为胞外酶可被土壤黏土矿物、腐殖质吸附形成复合物，减少降解流失，同时化肥输入提供的充足磷素，能诱导菌株持续合成植酸酶并降低酶的钝化速率。此外，溶磷菌剂还可以改良土壤理化性质，优化土著微生物群落结构，激发其植酸酶分泌潜力，化肥持续输入则为外源定殖菌株与土著微生物提供稳定营养，形成“外源菌株定殖－酶活性维持－土著微生物激活”的正向循环。

未来的研究可进一步探究在不施肥时溶磷菌剂对土壤磷素的转化效果,以及溶磷菌剂与其他新型植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria,PGPR)、有机肥等进行组合配施,实现养分协调供应,优化土壤生态环境,提高作物产量和质量,还可以深入探究溶磷菌与作物的信号传导、基因表达调控等互作方式,以及溶磷菌与土壤微生物群落的协同或抑制关系,为精准匹配不同作物与土壤的菌剂类型提供理论支撑。实际应用方面,溶磷菌剂因其良好的活化难溶性磷素、提高土壤磷酸酶活性的能力,能有效减少化肥施用,在紫花苜蓿等豆科作物的栽培中,可通过化肥减量配施溶磷菌剂,实现农业减肥增效、绿色可持续生产。

4 结论

综合分析可知,对于土壤无机磷组分转化效果最好的是施加复合溶磷菌剂处理T_1(贝提卡假单胞菌GS6-5、曼德氏假单胞菌GS10-1、曼德氏假单胞菌GS3-6和赖内克氏假单胞菌GS14-1等体积复配),有利于解决河西走廊苜蓿土壤磷素利用率低的问题,若连年施用,对苜蓿土壤磷素的调控效果或可进一步提升。

参考文献 References:

[1] Zhou Q, Zhang J, Wang Z L, *et al*. Effects of green manure incorporation and nitrogen fertilizer reduction on soil quality, oat yield and quality in Hexi irrigation district of Gansu Province. Crops, 2025(4): 188-196.
周琦, 张靖, 王振龙, 等. 绿肥还田和减量施氮对甘肃河西灌区土壤质量及燕麦产量和品质的影响. 作物杂志, 2025(4): 188-196.

[2] Zhou X Y, Jiang Q X, Jia H L, *et al*. Cloning and salt-tolerance functional analysis of alfalfa *MsBBX20* gene. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10): 55-73.
周昕越, 蒋庆雪, 贾会丽, 等. 紫花苜蓿*MsBBX20*基因克隆及耐盐功能分析. 草业学报, 2024, 33(10): 55-73.

[3] Li J N, Feng G L, Pang X P, *et al*. The impact of combined application of water and phosphorus on leaf characteristics and stoichiometric ratio of N, P in *Medicago sativa*. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(8): 2484-2497.
李婕娜, 冯甘霖, 庞晓攀, 等. 水磷配施对紫花苜蓿叶片特征及氮磷计量比的影响. 草地学报, 2024, 32(8): 2484-2497.

[4] Xia G Y, Shi C X. Influences of irrigation methods and phosphorus application on yield, water and phosphorus use efficiency and soil phosphorus components of *Medicago sativa*. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(14): 175-182.
夏广英, 施传信. 灌溉方式与施磷对紫花苜蓿产量、水磷利用及土壤磷组分的影响. 江苏农业科学, 2024, 52(14): 175-182.

[5] Zhang J Y, Han H B, Yin Q, *et al*. Advanced in continuous cropping obstacles of alfalfa. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(6): 135-143.
张静怡, 韩海斌, 尹强, 等. 紫花苜蓿连作障碍研究进展. 中国草地学报, 2024, 46(6): 135-143.

[6] Shan L W, Zhang Q, Zhu R F, *et al*. Effects of AMF on growth and photosynthetic physiological characteristics of *Leymus chinensis* and *Medicago sativa* with and without nitrogen and phosphorus application. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(8): 46-57.
单立文, 张强, 朱瑞芬, 等. 氮、磷添加下AMF对羊草和苜蓿生长与光合生理特性的影响. 草业学报, 2020, 29(8): 46-57.

[7] Li F X. A study on irrigation-warping soils of oases in Hexi Corridor, Gansu Province. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1995(4): 180-186.
李福兴. 河西走廊绿洲灌淤土的初步研究. 干旱区资源与环境, 1995(4): 180-186.

[8] Wang J X, Gong H Y, Tu X J, *et al*. Screening of phosphite-tolerant alfalfa varieties and identification of phosphite tolerance indicators. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(5): 186-199.
王吉祥, 宫焕宇, 屠祥建, 等. 耐亚磷酸盐紫花苜蓿品种筛选及评价指标的鉴定. 草业学报, 2021, 30(5): 186-199.

[9] Sun G F, Jin J Y, Shi Y L. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011(2): 1-9.
孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展. 中国土壤与肥料, 2011(2): 1-9.

[10] Su M, Wu J R, Zhang Z Z, *et al*. Effects of phosphorus fertilizer reduction on the photosynthetic production capacity of potato leaves. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(11): 2233-2244.
苏明, 吴佳瑞, 张正珍, 等. 磷肥减量对马铃薯光合生产能力的影响. 中国生态农业学报, 2025, 33(11): 2233-2244.

[11] Hu P J, Fan H B, Li H Q, *et al*. Effects of different phosphate fertilizer sources on phosphorus fractions and bioavailability in

calcareous soil. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(7): 1340－1352.
胡捧娟, 范浩博, 李海强, 等. 磷肥品种对石灰性土壤磷组分及其生物有效性的影响. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(7): 1340－1352.

[12] Zhang Y, He S M, He A L, *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.
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.

[13] Wang Y, Zhang Y, Su B B, *et al*. Effects of phosphorus solubilizing bacteria on germination and seedling growth of three forage seeds. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2019, 49(6): 1－5.
汪焱, 张英, 苏贝贝, 等. 溶磷菌对3种牧草种子发芽和幼苗生长的影响. 青海畜牧兽医杂志, 2019, 49(6): 1－5.

[14] Luo C Y, Wu Y H. Progress of research on the effect of biological soil crust on phosphorus cycling in alpine ecosystems. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(3): 867－875.
罗朝逸, 吴艳宏. 高山生态系统生物土壤结皮对磷循环影响研究进展. 土壤通报, 2024, 55(3): 867－875.

[15] Cheng Y Y, Narayanan M, Shi X J, *et al*. Phosphate-solubilizing bacteria: Their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity. Science of the Total Environment, 2023, 901: 166468.

[16] Beck M, Sanchez P A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin cultivation in the Amazon basin. Plant and Soil, 1996, 184(1): 23－31.

[17] Wang T, Kong L Y, Jiao J G, *et al*. Screening of phosphate-solubilizing bacteria in red soil and their acting mechanisms. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 373－380.
王同, 孔令雅, 焦加国, 等. 红壤溶磷菌的筛选及溶磷机制. 土壤学报, 2014, 51(2): 373－380.

[18] Peng S, Zhu X H, Huang Z Q, *et al*. Phosphorus transformation in rhizosphere of four green manure crops grown on lateritic red soil and calcareous soil. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(12): 3656－3664.
彭松, 祝晓慧, 黄焯芹, 等. 赤红壤和石灰土四种绿肥作物根际磷转化过程. 生态学杂志, 2024, 43(12): 3656－3664.

[19] Rawat P, Das S. Phosphate-solubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 21(1): 49－68.

[20] Li Q. Characteristics and phosphorus solubilization mechanism of phytase producing PGPR and phytase gene cloning and identification. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
李琦. 产植酸酶促生菌特性、解磷机理及植酸酶基因功能鉴定. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] Ban Q, Huang L K, Zhang X Q, *et al*. Agronomic traits of 15 annual *Ixeris polycephala* varieties in the southwest of Sichuan Province. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(2): 37－46.
班骞, 黄琳凯, 张新全, 等. 15个苦荬菜新品种(系)在川西南地区农艺性状综合评价. 草业学报, 2016, 25(2): 37－46.

[25] Bao S D. Agrochemical analysis of soil. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 70－90.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2006: 70－90.

[26] Gu Y C, Jiang B F. Method for determining the classification of inorganic phosphorus in calcareous soil. Soils, 1990, 22(2): 101－102, 110.
顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法. 土壤, 1990, 22(2): 101－102, 110.

[27] 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.

[28] Lei S Y, Zhang Y, Su B B, *et al*. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on three cultivated forages in alpine area. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2388－2399.
雷生妍, 张英, 苏贝贝, 等. 植物根际促生菌(PGPR)对高寒区3种栽培饲草促生效果研究. 草地学报, 2025, 33(7): 2388－2399.

[29] Andrea S, David W, Cindron L M, *et al*. Long-term biomass removal in grasslands reduces plant and soil phosphorus, increases carbon:phosphorus stoichiometry, but does not lead to microbial phosphorus limitation. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2025, 396: 110017.

[30] Shen Y, Duan Y H, McLaughlin N, *et al*. Phosphorus desorption from calcareous soils with different initial olsen-P levels and relation to phosphate fractions. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19: 2997－3007.

[31] Zhang A Q, He L Y, Zhao H E, *et al*. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soil with different phosphorus sources. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2009, 15(4): 474－478.
章爱群, 贺立源, 赵会娥, 等. 有机酸对不同磷源条件下土壤无机磷形态的影响. 应用与环境生物学报, 2009, 15(4): 474－478.

[32] Huang Q L, Yuan Z S, Jiang T Y, *et al*. Effects of four microbial agents on soil physical and chemical properties. Journal of Green Science and Technology, 2019(24): 1－4.
黄秋良, 袁宗胜, 蒋天雨, 等. 4种微生物菌剂对土壤理化性质影响. 绿色科技, 2019(24): 1－4.

[33] Li L, Li T L, Meng H S, *et al*. Effects of a phosphorus-dissolving agent on the phosphorus absorption of rape and inorganic phosphorus fractions in reclaimed soil supplemented with phosphorus fertilizers. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2020, 26(3): 612－618.
栗丽, 李廷亮, 孟会生, 等. 溶磷菌剂对施磷复垦土壤无机磷形态及油菜磷吸收的影响. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 612－618.

[34] Pan Z F, Yin Q, Ma R, *et al*. The mechanism of exogenous phosphate-solubilizing bacteria promoting nutrient absorption in *Camellia oleifera*. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(10): 292－302.
潘忠飞, 尹倩, 马容, 等. 外源溶磷菌促进油茶养分吸收的机制. 生物技术通报, 2025, 41(10): 292－302.

[35] Li Y, Sun Y B, Xu Y M, *et al*. Characteristics and speciation distribution of phosphorus in Cd contaminated paddy soil. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 542－548.
李烨, 孙约兵, 徐应明, 等. 镉污染区水稻土磷素含量特征及其形态分布规律. 环境化学, 2017, 36(3): 542－548.

[36] Sun Q Q, Wang Z Y, Zhao H, *et al*. Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2539－2549.
孙倩倩, 王正银, 赵欢, 等. 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响. 生态学报, 2012, 32(8): 2539－2549.

[37] Zhong C Q, Huang W Y. Effects and mechanism of P-solubilizing *Bacillus* P17 strain on phosphorus solubilization of different phosphate rocks. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 931－937.
钟传青, 黄为一. 磷细菌P17对不同来源磷矿粉的溶磷作用及机制. 土壤学报, 2004, 41(6): 931－937.

[38] Zhou X B, Hong J P, Xie Y H. Effects of phosphorous bacteria fertilizer on phosphorus validity of calcareous soil. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 72－75.
周鑫斌, 洪坚平, 谢英荷. 溶磷细菌肥对石灰性土壤磷素转化的影响. 水土保持学报, 2005, 19(6): 72－75.

[39] Meng H S, Hong J P, Wu W L, *et al*. Effect of amendment of biomanure of phosphate-solubilizing bacteria on soil phosphorus availability in reclaimed farmland in coal mining subsidence area. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(4): 357－363.
孟会生, 洪坚平, 吴文丽, 等. 配施解磷菌肥对采煤塌陷区复垦土壤磷有效性的影响. 生态与农村环境学报, 2017, 33(4): 357－363.

[40] Wang A K, Wang J J, Si Y K, *et al*. Mechanism of fungi in regulating phosphorus turnover in upland soils. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(10): 2998－3006.
王安康, 王继继, 司亚坤, 等. 真菌调控旱田土壤磷素周转的机制. 应用生态学报, 2025, 36(10): 2998－3006.

[41] Motsim B, Matiullah K, Asghari B, *et al*. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. Geomicrobiology Journal, 2019, 36(10): 904－916.

[42] Shao Y T, Zhen Q X. Study on the forms and availability of phosphorus in desert soil. Scientia Agricultura Sinica, 1991, 24(6): 51－57.
邵煜庭, 甄清香. 灌漠土磷素形态及其有效性的研究. 中国农业科学, 1991, 24(6): 51－57.

[43] Adnan M, Fahad S, Saeed M, *et al*. Integration of poultry manure and phosphate solubilizing bacteria improved availability of Ca bound P in calcareous soils. Biotechnology, 2019, 9(10): 368.

[44] Ye G K, E S Z, Yuan J H, *et al*. Response of phosphorus components in black loessial soil to long-term different fertilization treatments. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(5): 177－185.
冶赓康, 俄胜哲, 袁金华, 等. 黑垆土磷素组分对长期不同施肥处理的响应. 干旱地区农业研究, 2025, 43(5): 177－185.

[45] Shen J G, Zhu H C, Wang Z D, *et al*. Phosphorus characteristics and the impact to water quality across interface of overlying water and sediment of Xiazhuhu wetland in northern Zhejiang Province, China. Environmental Science, 2009, 30(6): 1595－1601.
沈建国, 朱焕潮, 王兆德, 等. 浙北下渚湖湿地上覆水－底泥界面磷素特征与水质响应研究. 环境科学, 2009, 30(6): 1595－1601.

[46] Li Y, Zhang J J, Zhang J Q. Characteristics of inorganic phosphate-solubilizing bacteria from the sediments of a eutrophic lake. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(12): 2141.

[47] Allison V J, Condron L M, Peltzer D A, *et al*. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(7): 1770－1781.

[48] Wang J, Liu W Z, Mu H F, *et al*. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application. Pedosphere, 2010, 20(3): 304－310.

[49] Hu Q Q, Yu Y M, Liang J W, *et al*. Effects of chemical fertilizer reduction combined with synergist on soil physicochemical properties, yield and quality of Chinese flowering cabbage. Guangdong Agricultural Science, 2023, 50(6): 53－61.
胡绮琪, 余炜敏, 梁嘉伟, 等. 化肥减量配施增效剂对土壤理化性质及菜心产量、品质的影响. 广东农业科学, 2023, 50(6): 53－61.

[50] 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.

[51] Guo R R, Xu K, Li Z P, *et al*. Effects of green manure returning methods on soil inorganic phosphorus fractions and phosphorus uptake by wheat. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2026, 38(1): 114－125.
郭冉冉, 徐珂, 李正鹏, 等. 绿肥还田对土壤无机磷组分及小麦磷吸收的影响. 浙江农业学报, 2026, 38(1): 114－125.

[52] Yang W N, Yu L, Luo D H, *et al*. Effect of combined application of biochar with chemical fertilizer and organic fertilizer on soil phosphatase activity and microbial community. Environmental Sciences, 2022, 43(1): 540－549.
杨文娜, 余泺, 罗东海, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响. 环境科学, 2022, 43(1): 540－549.

[53] Liu C, Chen J S, Zhu R F, *et al*. Mitigation of soil microbial carbon and phosphorus limitations through organic fertilizer and biochar inputs in subtropical cultivated grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 54－66.
刘畅, 陈积山, 朱瑞芬, 等. 有机肥和生物炭添加对亚热带人工草地土壤微生物碳、磷限制的缓解作用. 草业学报, 2026, 35(4): 54－66.

[54] Wen S J, Gu X R, Li A, *et al*. Ectomycorrhizal fungal inoculation alleviates aluminum stress in *Pinus massoniana* seedlings by modulating fine root antioxidant physiology. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(1): 377－393.
文思伽, 辜夕容, 李昂, 等. 接种外生菌根真菌对铝胁迫下马尾松幼苗细根抗氧化生理的影响. 微生物学报, 2026, 66(1): 377－393.