

紫花苜蓿与禾本科牧草混播对土壤酶活性的影响

来幸樑,师尚礼,白杉杉,杨航,吴芳,王晓娟,刘中华

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中-美草地畜牧业可持续研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:紫花苜蓿(*Medicago sativa*)与无芒雀麦(*Bromus inermis*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、苇状羊茅(*Festuca arundinace*)均分别按 1:2(记作:A1、B1、C1)、1:1(A2、B2、C2)和 2:1(A3、B3、C3)比例进行同行混播,以紫花苜蓿单播、相应禾草单播为对照,研究紫花苜蓿与不同多年生禾草混播对土壤酶活性的影响。结果表明:与苜蓿单播相比,混播提高了 0~20 cm 土层的土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶活性;与禾草单播相比混播提高了 0~20 cm 土层脲酶活性以及 20~40 cm 土层的脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。紫花苜蓿+无芒雀麦混播处理土壤脲酶、过氧化氢酶活性以及紫花苜蓿+苇状羊茅混播处理的碱性磷酸酶活性高于其他组合,土壤蔗糖酶活性为 0~20 cm 土层紫花苜蓿+苇状羊茅混播和 20~40 cm 土层紫花苜蓿+草地早熟禾混播处理最高。同组合不同比例处理间,0~20,20~40 cm 土层 A2、B3、C3 处理土壤脲酶和过氧化氢酶活性最高,A1、B1、C3 处理的土壤蔗糖酶最高;土壤碱性磷酸酶活性为 0~20 cm 土层 C2 处理以及 20~40 cm 土层 C3 处理高于其他比例。

关键词:紫花苜蓿;禾草;混播;土壤酶活性

中图分类号:S541.1;S812

文献标志码:A

文章编号:1009-5500(2021)02-0075-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.02.011

畜牧业发达的国家,在栽培牧草、建植人工草地时,十分重视人工草地的混作。苜蓿(*Medicago sativa*)与禾草混播具有比单播苜蓿或单播禾草更为明显的优势^[1],主要表现在不仅能提高牧草产量^[2],改善牧草的品质和适口性^[3-4],更利于青干草的调制和青贮^[5],避免家畜得鼓胀病^[6],还能够很好地改善土壤状况^[7-9],实现土地的可持续利用,避免资源浪费。紫花苜蓿根系与其共生的根瘤菌具有生物固氮能力^[10],能够固定空气中的氮素,禾本科牧草吸收利用固氮产物后反过来又促进了苜蓿固氮效率的提高^[11-13]。

土壤酶活性直接影响着人工草地生态群落的物质循环和能量流动^[14],与牧草的生长发育息息相关^[15]。

研究表明,栽培方式、土壤类型、植物群落、土壤理化性质、耕作措施等均在一定程度上影响着土壤酶活性^[16-17],这种影响主要是通过改变根系分泌物、微生物和酶促底物实现。虎德钰等^[18]的研究表明土壤酶活性与土壤微生物显著正相关,且草田轮作能够提高土壤酶活性。豆科牧草与其他牧草混播往往会提高土壤酶活性,刘文辉等^[19]在高寒区研究表明,燕麦与箭筈豌豆在不同混播水平下土壤脲酶、纤维素酶和转化酶活性均显著高于休闲地土壤($P<0.05$);蔺芳等^[20]研究表明紫花苜蓿与多年生黑麦草混播土壤脲酶较沙化裸地提高了 266.80%。

豆科牧草与禾本科牧草具有不同的形态学、生态学、营养学和生长发育特征,通过合适的混播草种搭配和混播比例优化,能够利用各自的优点,相互促进,形成相对稳定的人工草地群落。此外,混播牧草种类和混播比例影响土壤近地面的小环境,土壤微生物和分泌物一定程度上影响土壤酶活性。基于此,本试验将紫花苜蓿与 3 种不同根系类型和株丛类型的禾本科牧草混播,通过对土壤酶活性特性进行分析,研究豆禾混

收稿日期:2020-04-23;修回日期:2020-06-04

基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS-34)

作者简介:来幸樑(1990-),女,甘肃省景泰人,在读研究生。

E-mail:2352104831@qq.com

师尚礼为通讯作者。

E-mail:shishil@gsau.edu.cn

播对土壤酶活性的影响,筛选最合适的混播配置,为人工栽培草地改善土壤肥力状况、维持农田的可持续发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在甘肃农业大学兰州牧草试验站进行,该站位于兰州市西北郊区,地处 E 103°34′~103°47′,N 36°5′~36°10′,海拔 1 517.3 m,属温暖半干旱气候,光照充足,气候干燥,昼夜温差大,年日照时数 2 600 h,无霜期 171 d,年降水量 345 mm,集中分布于 6~9 月,年均蒸发量 1 664 mm,年平均气温 9.3℃。土壤类型为黄绵土,肥力均匀。灌溉采用滴灌方式。

1.2 试验材料

供试紫花苜蓿品种为甘农 9 号紫花苜蓿(*M. sativa* cv. Gannong No. 9),由甘肃农业大学草业学院提供。无芒雀麦(*Bromus inermis*),苇状羊茅(*Festuca arundinace*),在甘肃省农业科学院种子市场购买,海波草地早熟禾(*Poa pratensis* cv. Haibo)由甘肃农业大学草业生态系统教育部重点实验室提供。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,小区面积 2 m×5 m,小区间距 0.50 m,行距 0.20 m。将无芒雀麦、海波草地早熟禾、苇状羊茅分别与甘农 9 号紫花苜蓿按 1:2、1:1 和 2:1 比例两两进行组合,同行混播,以 3 种禾草单播和紫花苜蓿单播为对照(分别记作 CK1、CK2、CK3、

CK4),13 个处理,3 次重复,共 39 个小区。播种时间为 2016 年 4 月 23 日,单播播种量紫花苜蓿 15 kg/hm²,无芒雀麦 30 kg/hm²、苇状羊茅 38 kg/hm、草地早熟禾 25 kg/hm²,混播播种量按 3 种不同比例以单播量为标准计算(表 1),条播。播前施底肥,尿素(总氮 ≥6.4%)、磷酸二铵(P₂O₅ ≥46%)和全水溶硝硫基钾肥(K₂O ≥23%)的施用量分别为 30,150,75 kg/hm²。播种前采用 Z 字取样法用土钻于 0~20,20~40 cm 土层分别取样,测定土壤有机质、氮、磷、钾等本底指标(表 2)。试验期间不再追施肥料,并采用人工除草,按生产田要求管理试验地,每次刈割后即行灌溉。紫花苜蓿初花期进行取样和指标测定,同时记录与其混播的禾本科牧草的生育时期。每年刈割 3 茬,第 2 年刈割时间分别为 6 月 1 日、7 月 28 日和 9 月 6 日,第 3 年刈割时间为 5 月 28 日、8 月 3 日和 9 月 2 日。采集土样时将地表的碎石以及凋落物清除,按 0~20,20~40 cm 的深度在距根 5 cm 处用土钻取土,重复 3 次。自然风干,采用四分法分取土样,过 1 mm 筛,测定相关指标,3 茬取其平均值。

1.4 测定指标与方法

脲酶活性采用次氯酸钠-苯酚钠比色法^[21],碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠(硼酸做缓冲液)比色法^[21],过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法^[21],蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[21]。

1.5 数据统计方法

试验数据用 SPSS19.0 统计软件对不同混播组

表 1 豆-禾混播方式、混播比例及播种量

Table 1 The ratio of alfalfa to grass in the mixed sowing and their sowing rate in both monoculture and mixed sowing					
处理代码		播种方式	播种比例	播种量/(kg · hm ⁻²)	
				紫花苜蓿	禾本科
CK	CK1	无芒雀麦单播	—	0	30
	CK2	草地早熟禾单播	—	0	15
	CK3	苇状羊茅单播	—	0	38
	CK4	紫花苜蓿单播	—	15	0
M+B	A1	紫花苜蓿+无芒雀麦	1:2	5	20
	A2		1:1	7.5	15
	A3		2:1	10	10
M+P	B1	紫花苜蓿+草地早熟禾	1:2	5	10
	B2		1:1	7.5	7.5
	B3		2:1	10	5
M+F	C1	紫花苜蓿+苇状羊茅	1:2	5	25
	C2		1:1	7.5	19
	C3		2:1	10	12.5

表 2 播前土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties before sowing

土层/cm	有机质/%	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	0.84	48.35	94.23	8.14	8.21
20~40	0.66	36.34	86.94	5.32	8.36

合、同组合不同比例混播处理进行单因素方差分析,并用 Duncan 法对各测定数据进行多重比较;采用 Excel 2010 制图。

2 结果与分析

2.1 混播栽培方式对土壤脲酶活性的影响

2.1.1 混播组合对土壤脲酶活性影响 不同草种组合效应下 0~20,20~40 cm 土层土壤脲酶活性为 M+B 组合显著高于其他组合,分别提高 15.27%、10.86%

和 21.59%、12.96%($P<0.05$)(图 1)。与 CK4 相比,0~20,20~40 cm 土层 M+B 组合的土壤脲酶活性分别增加 2.15%($P>0.05$)和 6.91%($P<0.05$),其他组合显著降低,分别低 11.38%、7.86%和 12.07%、5.35%($P<0.05$)。0~20,20~40 cm 土层所有混播组合的土壤脲酶活性均显著高于与之相对应的禾草单播,M+B 组合较 CK1 高 9.56%和 19.43%,M+P 组合较 CK2 高 6.75%和 14.28%,M+F 组合较 CK3 高 15.46%和 13.62%($P<0.05$)。

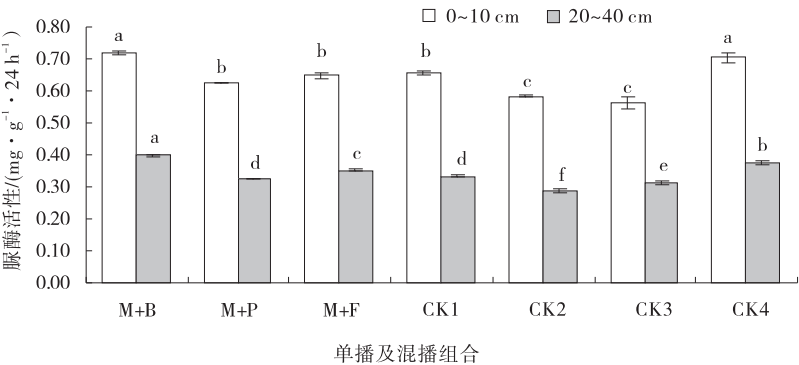


图 1 不同单播及混播组合土壤脲酶活性

Fig. 1 Soil urease activity in monoculture and mixed sowing

2.1.2 同组合不同混播比例对土壤脲酶活性影响 0~20,20~40 cm 土层 M+B 组合中 A2 处理的土壤脲酶活性最高,较其他比例分别高 4.27%、0.63%和 17.91%、0.48%,20~40 cm 土层 A2 与 A1 差异显著

($P<0.05$)(图 2);M+P 混播配比中 B3 较其他比例显著高 12.12%、9.97%和 15.57%、12.23%($P<0.05$);M+F 混播配比中 C3 最高,较其他比例分别高 11.42%、7.15%和 7.12%、4.39%,C3与C1差异显

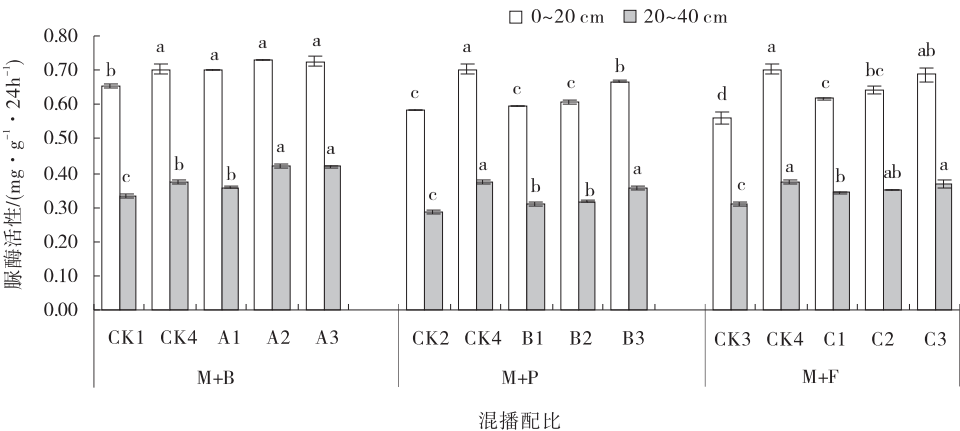


图 2 不同混播配比土壤脲酶活性

Fig. 2 Soil urease activity under different combination of mixed species and different ratio of alfalfa to grass

著($P<0.05$)。与 CK4 相比,A2、A3 处理 20~40 cm 土层土壤脲酶活性显著增加 12.81%、12.26% ($P<0.05$),0~20 cm 土层也增加但差异不显著,所有混播配比处理土壤脲酶活性均高于禾草单播。随着土层的加深,所有混播配比处理土壤脲酶活性均为 0~20 cm 高于 20~40 cm 土层。

2.2 混播栽培方式对土壤碱性磷酸酶活性的影响

2.2.1 混播组合对土壤碱性磷酸酶活性影响 M+F 处理 0~20 cm 土层的土壤碱性磷酸酶活性高于其他组合,提高 0.32%、0.64%,20~40 cm 土层也以 M+

F 为最高,较 M+B、M+P 显著提高 24.64%、27.93% ($P<0.05$) (图 3)。0~20 cm 土层所有混播组合的土壤碱性磷酸酶活性显著高于 CK4,分别高 6.20%、5.87%和 6.54% ($P<0.05$),20~40 cm 土层为 M+F 处理显著增加 5.70% ($P<0.05$),其他组合显著降低 ($P<0.05$)。与 CK1、CK2、CK3 相比,0~20 cm 土层 M+P 处理的土壤碱性磷酸酶活性提高了 3.37% ($P>0.05$),其他组合低于禾草单播,20~40 cm 土层所有混播组合则显著提高了 28.81%、22.63%和 4.56% ($P<0.05$)。

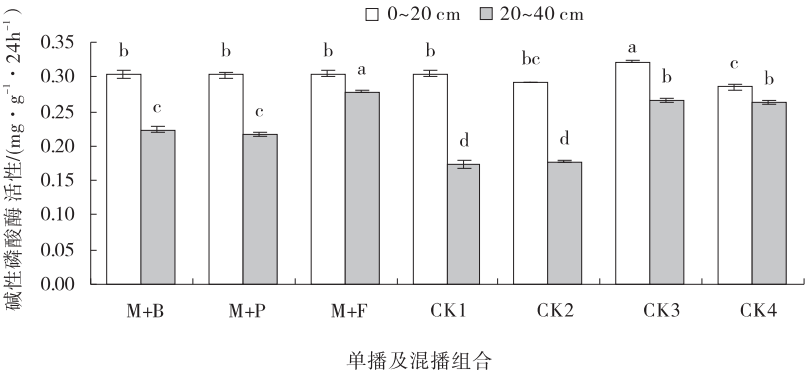


图 3 不同单播及混播组合土壤碱性磷酸酶活性

Fig. 3 Soil alkaline phosphatase enzyme activity in monoculture and mixed sowing

2.2.2 同组合不同混播比例对土壤碱性磷酸酶活性影响 0~20 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性为 A1、B1、C2 处理最高,较同组合其他比例分别提高了 9.49%、9.57%、3.26%、1.25%、3.34%、6.05%,A1 与 A2、A3 以及 C2 与 C3 差异显著 ($P<0.05$);20~40 cm 土层分别为 A1、B1、C3 处理最高,较同组合其他比例分别提高了 20.73%、6.27%、17.85%、26.01%、3.72%、6.97% ($P<0.05$) (图 4)。与 CK4 相比,土壤

碱性磷酸酶活性为 0~20 cm 土层所有配比处理均提高,最高高了 12.74% ($P<0.05$),20~40 cm 土层 M+F 配比处理增加 2.26%~9.38%,其他配比处理均低于 CK4。与 CK1、CK2、CK3 相比,土壤碱性磷酸酶活性为除 A1 配比 0~20 cm 土层增加 5.67%,M+P 增加 1.60%~4.91%,其他配比均降低;20~40 cm 土层所有混播配比处理均增加了。随着土层的加深,土壤碱性磷酸酶活性增加。

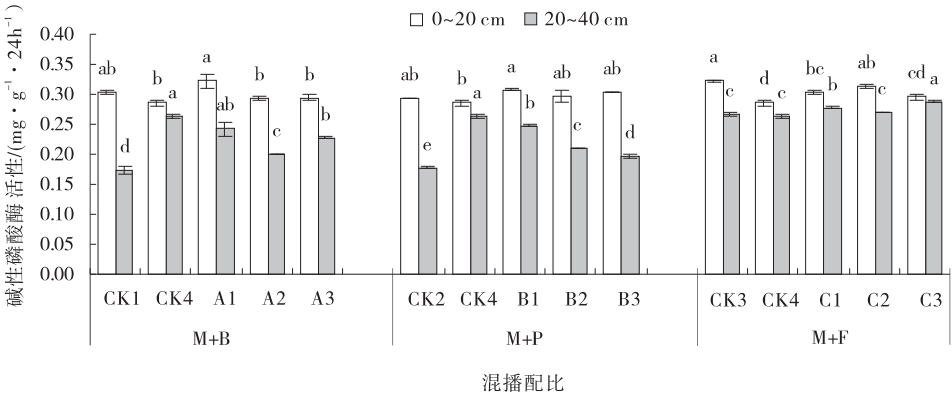


图 4 不同混播配比土壤碱性磷酸酶活性

Fig. 4 Activity of soil alkaline phosphatases under different combination of mixed species and different ratio of alfalfa to grass

2.3 混播栽培方式对土壤蔗糖酶活性的影响

2.3.1 混播组合对土壤蔗糖酶活性影响 0~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性为 M+F 组合最高,较 M+B 显著高 13.63% ($P<0.05$),但与 M+P 差异不显著 ($P>0.05$);20~40 cm 土层为 M+P 最高,较其他组合高 30.24% ($P<0.05$) 和 4.05% ($P>0.05$) (图 5)。0~20 cm 土层所有组合土壤蔗糖酶活性均显著高于 CK4,提高了 7.81%、19.60% 和 22.50% ($P<0.05$);

20~40 cm 土层 M+B 组合的土壤蔗糖酶活性显著降低 5.63% ($P<0.05$),其他组合分别显著增加 22.91% 和 18.13% ($P<0.05$)。与 CK1、CK2、CK3 相比,0~20 cm 土层 M+B 组合土壤蔗糖酶活性低了 8.29% ($P>0.05$),M+P、M+F 组合高了 12.11% ($P<0.05$)、0.54% ($P>0.05$);20~40 cm 土层所有组合土壤蔗糖酶活性均显著提高,高了 5.38%、63.35% 和 22.47% ($P<0.05$)。

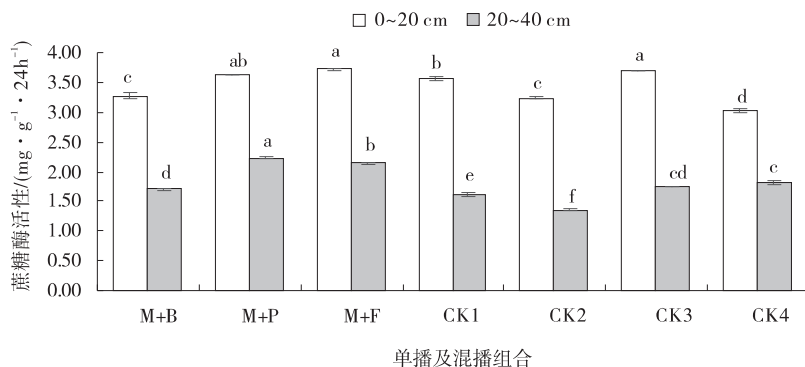


图 5 不同单播及混播组合土壤蔗糖酶活性

Fig. 5 Soil invertase activity in monoculture and mixed sowing

2.3.2 同组合不同混播比例对土壤蔗糖酶活性影响

两土层均为 A1、B1、C3 配比的土壤蔗糖酶活性高于同组合其他比例。与 CK4 相比,0~20 cm 土层所有配比处理的土壤蔗糖酶活性均提高了,最高高 37.68% ($P<0.05$);20~40 cm 土层除 A2、A3 和 C2 配比的土壤蔗糖酶活性降低 18.81%、2.85%、2.71%,其他配

比处理均提高了。0~20 cm 土层的土壤蔗糖酶活性为 A2、C2 低于禾草单播,其他配比处理高于禾草单播,最高高了 19.67%;20~40 cm 土层 M+B 配比处理中 A2 的土壤蔗糖酶活性较 CK1 降低 9.34%、其他配比高于禾草单播。随着土层的加深,土壤蔗糖酶活性降低。

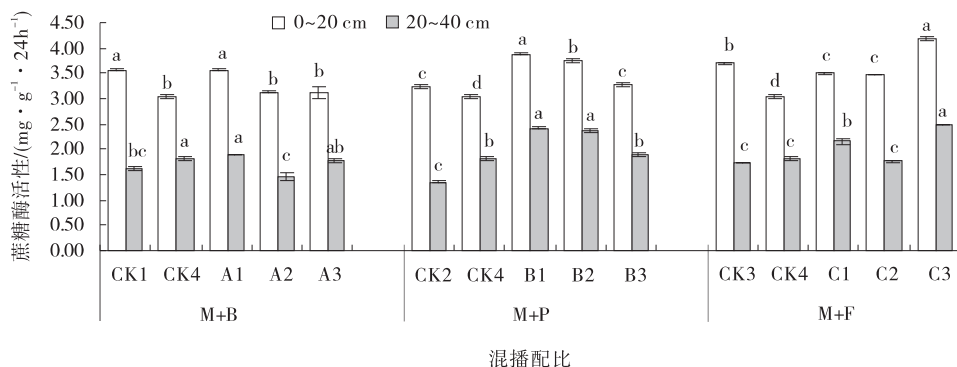


图 6 不同混播配比土壤蔗糖酶活性

Fig. 6 Soil invertase activity under different combination of mixed species and different ratio of alfalfa to grass

2.4 混播栽培方式对土壤过氧化氢酶活性的影响

2.4.1 混播组合对土壤过氧化氢活性影响 土壤过氧化氢酶活性均为 M+B 高于其他组合,0~20 cm 土层显著提高了 2.94%、2.58% ($P>0.05$),20~40 cm 土层高了 1.40% ($P>0.05$)、2.44% ($P<0.05$) (图 7)。除 M+B、M+F 组合 0~20 cm 土层的土壤过氧

化氢酶活性较 CK4 增加 2.74% ($P<0.05$) 和 0.16% ($P>0.05$),其他处理均降低了。0~20 cm 土层 M+B 组合的土壤过氧化氢酶活性较 CK1 高了 1.77% ($P<0.05$),其他组合低于禾草单播;20~40 cm 土层所有组合土壤过氧化氢酶活性均显著高于禾草单播,高了 3.78%、4.09% 和 2.01% ($P<0.05$)。

2.4.2 同组合不同混播比例对土壤过氧化氢活性影响 0~20,20~40 cm 土层均为 A2、B3 和 C3 配比的土壤过氧化氢酶活性高于同组合其他配比,0~20 cm 土层分别高了 1.48%、0.13%、3.89%、1.48%,3.36%、0.99%,20~40 cm 土层高了 5.00%、3.81%、3.55%、1.43%、5.04%、1.77%(图 8)。与 CK4 相比,除 B1、C1 低了 2.23%、1.71%,其他所有配比的土壤过氧化氢酶活性均提高,20~40 cm 土层 A2 增加

1.79%,其他配比处理均降低;与 CK1、CK2、CK3 相比,0~20 cm 土层的土壤过氧化氢酶活性为 M+B 所有比例处理较 CK1 高了 0.82%~2.32%,B2 和 B3 较 CK2 分别高 0.12%和 1.61%,其他处理均降低;20~40 cm 土层除 C1 处理的土壤过氧化氢酶活性较 CK3 降低 0.72%,其他配比均提高了。随着土层的加深,土壤过氧化氢酶活性降低。

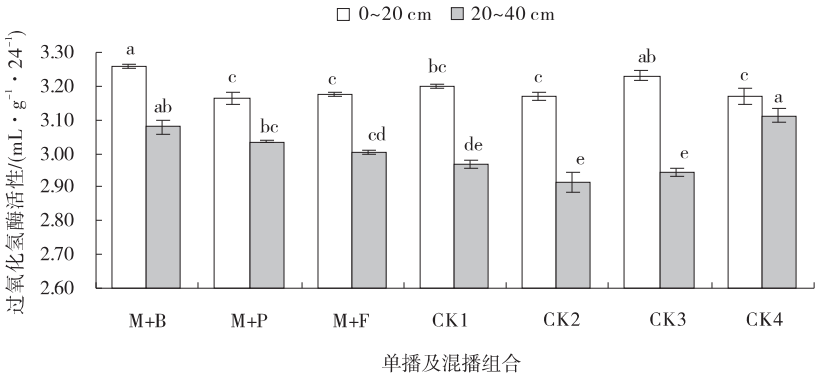


图 7 不同单播及混播组合土壤过氧化氢酶活性

Fig.7 Soil catalase activity in monoculture and mixed sowing

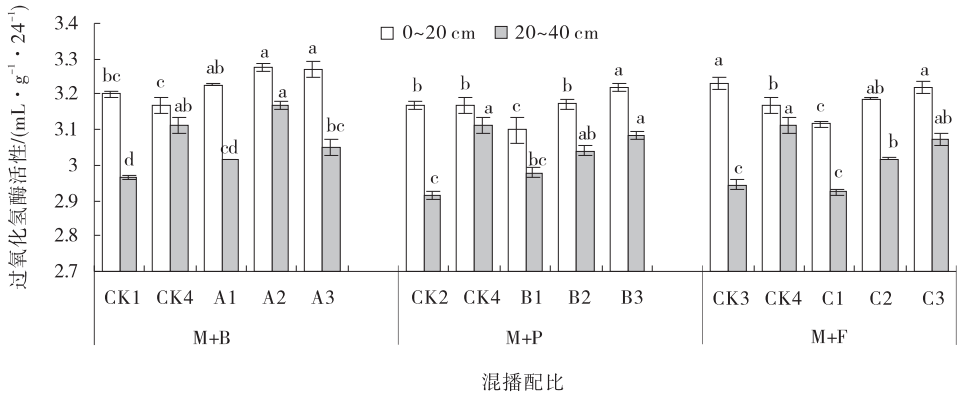


图 8 不同混播配比土壤过氧化氢酶活性

Fig. 8 Soil catalase activity under different combination of mixed species and different ratio of alfalfa to grass

3 讨论

土壤酶作为土壤中最活跃的部分,参与了许多生物化学反应过程,主要来源是腐殖质、动植物残体和微生物残体的分解与合成,其活性可反映土壤中碳、氮分解的方向和强度,植物对土壤养分的利用状况,以及土壤质地等,可作为判断土壤肥力的重要指标^[22-24]。其中土壤脲酶参与土壤氮素的转化、碱性磷酸酶将土壤中有机态磷转化为无机态磷、蔗糖酶参与有机碳的循环、过氧化氢酶能分解生物呼吸和生化反应产生的过氧化氢^[25-26]。不同的施肥措施,农田耕作方式显著

影响土壤微生物以及土壤酶活性^[14,27]。

有研究显示牧草种植方式显著影响了土壤脲酶活性,且土壤脲酶活性为混播高于单播处理^[28]。李硕等^[29]的试验结果表明,鸭茅和豆科牧草混播时土壤脲酶活性高于鸭茅和无芒雀麦混播,鸭茅和苜蓿或无芒雀麦混播土壤蔗糖酶和土壤过氧化氢酶活性高于鸭茅同白三叶混播。本试验中播混播处理较单播处理提高了脲酶活性,进一步验证了这一结论,这是由于脲酶参与土壤氮素转化,紫花苜蓿与禾本科牧草混播后禾草吸收、消耗氮素,间接促进苜蓿固氮,且土壤氮素为脲酶提供了酶促底物。紫花苜蓿+无芒雀麦 1:1 土壤脲

酶活性最高,较 2:1 混播提高了 0.63%,说明 1:1 混播紫花苜蓿与禾草处于一种协同生长的状态。土壤碱性磷酸酶参与磷的转化^[30],南丽丽等^[31]的研究显示土壤碱性磷酸酶活性与速效磷极显著正相关,本试验中与苜蓿单播相比,混播提高了土壤碱性磷酸酶活性,这是由于混播草地更有利于土壤速效磷的积累,需要转化磷素的碱性磷酸酶活性也就增强了。混播较苜蓿单播提高了土壤蔗糖酶活性,降低了过氧化氢酶活性,避免了较高的过氧化氢对植物的毒害。有研究结果显示土壤深度对酶活性也有影响,空间分布上随着土层加深,酶活性降低,表层具有较高酶活性^[32],本试验也得出相同的结论。栽培牧草种类不同,根系分泌物的种类和数量的差异,以及牧草生物学特征的差异也会影响土壤酶活性^[33]。紫花苜蓿与不同禾草混播因所处的生态位不同,对酶活性也有显著影响,本试验中紫花苜蓿为直立型、上繁草;无芒雀麦为短根茎疏丛型、上繁草;草地早熟禾为根茎疏丛型、下繁草;苇状羊茅为矮生-密丛型、下繁草,这 4 种牧草在形态学和生态学上都有差异^[34],因此豆科的紫花苜蓿与这 3 种禾草混播时混播组合对土壤酶活性影响显著。3 种混播组合中紫花苜蓿+无芒雀麦混播处理土壤脲酶、过氧化氢酶活性最高,且 1:1 混播时土壤酶活性高于其他比例,说明紫花苜蓿与无芒雀麦 1:1 混播的相容性最好,优于与草种及其他比例混播,主要是由于混播时无芒雀麦的叶片能够穿插在苜蓿叶片之间,对光和空间资源更能够合理利用,且无芒雀麦的须根繁多并集中在表层,将表层因常年种植未曾翻动而板结的土壤分解为细小颗粒,土壤通透性增强,根系分泌物多,因而土壤酶活性高。草地早熟禾和苇状羊茅均为下繁草,生物量主要在冠层的中下层,与紫花苜蓿混播形成的群落通风透气性较紫花苜蓿与无芒雀麦混播形成的群落差,因此随着混播年限的增加,混播群落中的草地早熟禾和苇状羊茅生物量下降,逐渐向紫花苜蓿单播群落演变,土壤酶活性低于紫花苜蓿+无芒雀麦。紫花苜蓿+草地早熟禾 1:2 和紫花苜蓿+苇状羊茅 2:1 处理酶活性高于其他两个比例,并非所有草种组合均为 1:1 混播时土壤酶活性最高,因此设置合适的比例进行混播时非常重要的。

4 结论

与苜蓿单播相比,混播处理提高了 0~20 cm 土层

的土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶活性以及 20~40 cm 土层的过氧化氢酶活性;与禾草单播相比混播提高了 0~20 cm 土层脲酶活性以及 20~40 cm 土层的 4 种酶活性。紫花苜蓿+无芒雀麦混播土壤具有较高的脲酶、过氧化氢酶活性且按 1:1 混播最优,而紫花苜蓿+苇状羊茅具有较高的碱性磷酸酶和蔗糖酶活性,2:1 处理高于其他 2 个比例。

参考文献:

- [1] 吴于飞. 兴义市林下种草混播组合模式及管理利用[J]. 草学, 2017(5): 79—80.
- [2] 马晓东, 孙金金, 汪鹏斌, 等. 青海省甘德县燕麦+毛苕子+豌豆混播比例生产性能的综合评价[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 76—83.
- [3] 李硕, 聂中南, 姜哲浩, 等. 鸭茅与伴生种不同混播比例对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 草原与草坪, 2017, 37(2): 12—19.
- [4] 苟文龙, 李平, 张建波, 等. 多花黑麦草+箭筈豌豆混播草地地上生物量和营养品质动态研究[J]. 草地学报, 2019, 27(2): 473—481.
- [5] 邝肖, 季婧, 梁文学, 等. 北方寒区紫花苜蓿/无芒雀麦混播比例和刈割时期对青贮品质的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(12): 187—198.
- [6] 蒋慧. 紫花苜蓿与无芒雀麦混播草地产量、品质和降解率研究及其综合评价[D]. 石河子: 石河子大学, 2007.
- [7] 芦奕晓, 牟乐, 杨惠敏. 豆科与禾本科牧草混播改良土壤的研究进展[J]. 中国草地学报, 2019, 41(1): 94—100.
- [8] 施春亮, 付晓晨. 创造良好土壤团粒结构提高土壤种植效益[J]. 现代化农业, 2012(1): 23—24.
- [9] 杨如萍, 郭贤仕, 吕军峰, 等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 252—256.
- [10] 师尚礼, 祁娟, 曹文侠. 草田耕作制度[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 108—123.
- [11] 张德, 龙会英, 金杰, 等. 豆科与禾本科牧草间作的生长互作效应及对氮、磷养分吸收的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(10): 15—22.
- [12] Beschow H, Schulze J, Merbach W. Transfer of symbiotically fixed nitrogen in an alfalfa—grass mixture studied through isotope dilution in a pot experiment[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2000, 36(1): 21—33.
- [13] Schipanski M E, Drinkwater L E. Nitrogen fixation in annual and perennial legume—grass mixtures across a fertility gradient[J]. Plant and Soil, 2012, 357(1—2):

- 147—159.
- [14] 梁秀芝,郑敏娜,李荫藩,等. 农牧交错带人工草地及农作物下土壤酶活性特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(20):171—176.
- [15] 卢越,张健琳,杨兰芳. 不同作物生长和施肥对土壤酶活性的影响[J]. 环境生态学, 2019, 1(6):81—85+90.
- [16] 王理德,王方琳,郭春秀,等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1):12—21.
- [17] 刘善江,夏雪,陈桂梅,等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21):1—7.
- [18] 虎德钰,毛桂莲,许兴. 不同草田轮作方式对土壤微生物和土壤酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(9):106—113.
- [19] 刘文辉,张英俊,师尚礼,等. 高寒区施肥和豆科混播水平对燕麦人工草地土壤酶活性的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(1):23—33.
- [20] 蔺芳,刘晓静,张家洋. 紫花苜蓿与多年生黑麦草不同种植模式下沙化土壤碳、氮含量和酶活性研究[J]. 草原与草坪, 2019, 39(3):43—49.
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:农业出版社, 1986:294—297.
- [22] (苏)哈兹耶夫著,郑洪元译. 土壤酶活性[M]. 北京:科学出版社, 1980.
- [23] Nannipieri P, Pankhurst C E, Doube B M. The potential use of soil enzymes as indicators of productivity, sustainability and pollution[M]. Soil Biota: Management in Sustainable Farming Systems. Melbourne: CSIRO Press, 1994:238—244.
- [24] Mawdsley J L, Burns R G. Inoculation of plants with a Flavobacterium species results in altered rhizosphere enzyme activities[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1994, 26(7):871—882.
- [25] 万忠梅,吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6):87—92.
- [26] 周礼凯. 土壤酶学[M]. 北京:农业出版社, 1987.
- [27] R. M. Niemi, M. Vepsäläinen, K. Wallenius, *et al.* Temporal and soil depth-related variation in soil enzyme activities and in root growth of red clover (*Trifolium pratense*) and timothy (*Phleum pratense*) in the field[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 30(2):123—125.
- [28] 赛吉日呼. 牧草不同种植方式对土壤酶活性和土壤微生物量及多样性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2019.
- [29] 李硕,聂中南,姜哲浩,等. 鸭茅与伴生种不同混播比例对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 草原与草坪, 2017, 37(2):12—19.
- [30] 李文华,邵学新,吴明,等. 杭州湾潮滩湿地土壤碱性磷酸酶活性分布及其与磷形态的关系[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12):3341—3349.
- [31] 南丽丽,郁继华,郭全恩,等. 苜蓿不同种植年限对土壤化学性状及酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10):100—105.
- [32] 石立媛,张永亮,高凯,等. 科尔沁沙地苜蓿草地土壤酶活性的时空变化特征[J]. 草地学报, 2017, 25(2):310—314.
- [33] 何君. 浅谈植物生长与土壤酶的关系[J]. 中国新技术新产品, 2011(16):234—235.
- [34] 陈宝书. 牧草饲料作物栽培学[M]. 北京:中国农业出版社, 2015:140—141.

Effects of mixed sowing of alfalfa and gramineous pasture on soil enzyme activity

LAI Xing-liang, SHI Shang-li, BAI Shan-shan, YANG Hang, WU Fang,
WANG Xiao-juan, LIU Zhong-hua

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University / Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Ministry of Education / Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province / Sion-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this experiment, alfalfa was mixed with bromus inermis, kentucky bluegrass and tall fescues at

in ratios of 1:1 (mark as A1,B1,C1), 1:2 (mark as A2,B2,C2) and 2:1 (mark as A3,B3,C3), respectively. Using the monoculture of alfalfa and grass species as the control, the effects of alfalfa mixed with different perennial grasses on soil enzyme activity were studied. The results showed that mixed sowing increased the activity of soil alkaline phosphatases and invertase in 0~20 cm soil layer compared with alfalfa monoculture, and increased urease activity in the top 20 cm soil layer and all enzyme activities in the 20~40 cm soil layer relative to the grass monoculture. Among all treatments, the mixed cropping of alfalfa and bromus inermis had the highest soil urease and catalase activity, while the mixture of alfalfa and tall fescuesat had the highest activity of alkaline phosphatases. Soil invertase activity was found highest in the mixture of alfalfa and tall fescuesat in the top 20 cm and in the mixture of alfalfa and kentucky bluegrass for the 20~40 cm soil layer. Among the treatments with different ratio of alfalfa to grass within the species combination, the highest soil urease and catalase activity was found in the 0~20 cm and 20~40 cm soil layers for the A2,B3 and C3 treatments, and the highest invertase activity was found in A1,B1 and C3 treated soil. The highest activity of alkaline phosphatases was found in 0~20 cm soil layer for C2 treatment and 20~40 cm soil layer for C3 treatment.

Key words: *Medicago sativa*; goamineous pasture; mix sowing; soil enzyme activity

.....
(上接 74 页)

Physiological Response of different Varieties of *Elymus sibiricus* to Drought Stress

TIAN Yong-lei¹, BAI Chun-li¹, DING Hai-jun¹, ZHAO He-ping²,
FANG Yong-yu¹, MU Zong-jie³

(1. Grassland Research Institute, Academy of agriculture and animal husbandry Sciences, Inner Mongolia, Hohhot 010031, Inner Mongolia; 2. Inner Mongolia CaoDu Forage Research Institute, Xilinhote 026099, Inner Mongolia 3. Institute of agriculture, animal husbandry economy and information, Academy of agriculture and animal husbandry Sciences, Inner Mongolia, Hohhot 010031, inner Mongolia)

Abstract: Three varieties of *E. sibiricus* L. were exposed to different concentrations of PEG (0%, 5%, 10%, 15%) to simulate drought stress. Physiological responses of *Elymus sibiricus* L. seedlings to drought stress were studied at seedling stage. Drought resistance of three varieties of *E. sibiricus* L. was analyzed by membership function. The results showed that along with the severity of drought stress, relative water content of leaves decreased; while a number of parameters including SOD, POD, CAT and other antioxidants, the content of soluble sugar, soluble protein, proline and malondialdehyde, all increased significantly ($P < 0.05$). According to the analysis of membership function, the order of drought resistance is as follows, new line (E02) > Hulunbeier (E03) > Chuancao 2 (E01).

Key words: *E. sibiricus*; drought stress; physiological characteristics