黄土高原种植不同人工牧草对土壤酶活性的影响

韩国君[1]，何明珠[2]，黄海霞[3]，宋 捷[3]，马乐元[1]

(1. 甘肃农业大学 资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；2. 中国科学院
西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000；3. 甘肃农业大学 林学院，甘肃 兰州 730070)

摘 要：[目的] 研究黄土高原人工种植牧草土壤酶活性的变化，为提高黄土高原人工植被的稳定性和土壤肥力提升等相关研究提供科学依据。[方法] 以种植 3 a 的冷地早熟禾、垂穗披碱草、猫尾草、陆地中间偃麦草、紫花苜蓿、沙打旺、红豆草等牧草地为研究对象。分别在 3,6,9,12 月的 0—5 cm 和 5—10 cm 土层取土壤样品，测定的脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶的活性变化。[结果] 脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶的活性在 0—5 cm 土层显著高于 5—10 cm 土层，但土壤过氧化氢酶活性在这两个土层之间差异不显著。在 6 月土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性高于 3 月、9 月和 12 月，但过氧化氢酶的活性差异不显著。7 种人工种植的牧草中紫花苜蓿的土壤酶活性表现较高，而种植沙打旺的土壤酶活性较低。土层深度和季节的交互作用对 4 种土壤酶活性产生极显著影响($p<0.01$)，牧草品种和季节对脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性的具有显著的交互作用。[结论] 黄土高原人工牧草地土壤酶活性呈现季节性变化，且种植人工牧草能够有效提高土壤酶活性而改善土壤肥力条件。

关键词：黄土高原；牧草品种；土壤酶活性；季节性特征

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)03-0019-06 **中图分类号**：S153.6，S154.2

文献参数：韩国君，何明珠，黄海霞，等. 黄土高原种植不同人工牧草对土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(3)：19-24. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.004；Han Guojun，He Mingzhu，Huang Haixia，et al. Effects of different forage varieties on soil enzyme activities in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(3)：19-24.

Effects of Different Forage Varieties on Soil Enzyme Activities in Loess Plateau

Han Guojun[1]，He Mingzhu[2]，Huang Haixia[3]，Song Jie[3]，Ma Leyuan[1]

(1. *College of Resources and Environmental Sciences，Gansu Agricultural University，Lanzhou，Gansu* 730070，*China*；2. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources，Chinese Academy of Sciences，Lanzhou，Gansu* 730000，*China*；3. *College of Forestry，Gansu Agricultural University，Lanzhou，Gansu* 730070，*China*)

Abstract：[Objective] The soil enzyme activities in different artificial forage in the Loess Plateau was researched in order to provide a scientific basis for improving the stability of artificial vegetation and soil fertility on the Loess forage. [Methods] Seven grasslands planted 3 years including *Poa crymophila*，*Elymus nutans*，*Uraria crinite*，*Elytrigia intermedia*，*Medicago sativa*，*Astragalus adsurgens*，*Onobrychis viciaefolia*，were selected as the research objects. Soil samples were taken from 0—5 cm and 5—10 cm soil layers in March，June，September and December，to investigate the activity of urease，sucrose enzyme，alkaline phosphatase and catalase. [Results] The activity of urease，sucrose enzyme，alkaline phosphatase in 0—5 cm layer was higher than that in 5—10 cm layer，but there was no significant difference in the activities of catalase between the two soil layers. The activity of urease，sucrose enzyme，and alkaline phosphatase in June was higher than that in March，September and December，but the activity of catalase was not significant different. The activity of soil enzyme in *M. sativa* was the highest，while the lowest in *A. adsurgens*. The

收稿日期：2018-11-09 **修回日期**：2018-12-07

资助项目：甘肃农业大学科技创新基金项目“局部根区水氮供给调控作物氮素高效利用的协同作用机理”(GSAUXKJS-2018209)；国家自然科学基金项目“荒漠地区植被—土壤系统氮、磷生态化学计量特征对干湿交替循环的响应机制研究”(41671103)

第一作者：韩国君(1977—)，男(汉族)，甘肃省白银市人，博士，副教授，主要从事植物逆境生理与水肥资源高效利用研究。E-mail：hangj@gsau.edu.cn。

interaction of soil depth and season had a significant effect on the activities of four enzymes($p<0.01$). Herbage variety and season showed significant interaction on the activity of the urease, sucrose enzyme and phosphatase. [Conclusion] The soil enzyme activities of different grasslands in the Loess Plateau changed seasonally, and planting artificial forage could effectively improve soil enzyme activities and soil fertility conditions.

Keywords: Loess Plateau; forage varieties; soil enzyme activities; seasonal characteristics

黄土高原是中国典型的生态脆弱区和水土保持重点区,也是中国治理水土流失和建设生态环境的关键区[1-2]。该区长期开展生态恢复的综合治理研究,退耕还林还草是黄土高原人工植被建设的重要措施之一,对脆弱生态恢复、土壤结构改良和土壤肥力提升发挥积极作用[2-3]。土壤酶是土壤有机体的代谢动力,是评价土壤质量和生态环境质量一项重要生物指标[4-6],土壤酶学特征也是反映生态系统中土壤肥力和土壤有机氮库变化一个潜在指标[5,7]。土壤酶活性受到植被类型、土地利用方式、施肥、放牧、种植年限和季节变化等多因素的影响[8-10]。分析种植牧草后土壤酶活性的变化是评价人工植被建设成效的一项主要指标。土壤酶具有较强的抗逆性,可有效调节干旱贫瘠土壤养分的转化。有关牧草种植的研究表明,青海湖沙化区人工种植披碱草、碱茅和早熟禾显著提高土壤养分、土壤脲酶和过氧化氢酶的活性[11]。人工重建牧草截叶胡枝子和宽叶雀稗能增加退化红壤养分含量和提高土壤过氧化氢酶、酸性磷酸酶和脲酶活性[12]。由于入侵植物通过影响牧草的土壤酶活性和微生物群落结构而改变植物之间的竞争格局,入侵植物对垂穗披碱草、老芒麦和早熟禾土壤养分、土壤微生物量和土壤酶活性产生显著影响[13]。石羊河退耕地土壤酶活性与土壤微生物存在缓慢的互馈响应,0—10 cm 表层土壤中土壤微生物生物量及酶活性占较大比例[14]。前人较为集中地研究了人工种植苜蓿对土壤有机碳、土壤微生物、土壤理化性质、土壤养分及土壤酶活性的影响[15-17],但较少研究人工种植不同牧草对土壤酶活性的影响。因此,研究黄土高原种植人工牧草品种对土壤酶活性的影响十分必要。本试验以黄土高原主要优良人工牧草地为研究对象,旨在探讨牧草品种、土层深度和季节变化对土壤酶活性的影响,以期为提高黄土高原人工植被的稳定性、提升土壤肥力和防治水土流失相关研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于农业部兰州黄土高原生态环境重点野外科学观测试验站,地理位置为 36°01′N,103°45′E,海拔 1 751 m,属于典型的黄土高原半干旱区。年均降水量约 323.5 mm,主要集中于 7—9 这 3 个月,蒸发量约 1 445.0 mm,日照时间 2 741.6 h,年平均气温达 9.4 ℃。该试验区属于黄土高原半干旱丘陵沟壑区,土壤母质类型为第四纪风成黄土,土层深厚,土壤为灰钙土。试验区 0—10 cm 土层基本土壤养分情况如表 1 所示。

表 1 试验地土壤基础养分情况

碱解氮/(mg·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	pH 值
19.14	4.08	109.35	5.46	0.41	0.46	18.24	8.25

1.2 试验处理

试验于 2014 年 4 月条播种植了 4 种豆科牧草和 3 种禾本科牧草,行距 30 cm,播种深度 2～5 cm,设紫花苜蓿、猫尾草、红豆草、沙打旺、陆地中间偃麦草、冷地早熟禾、垂穗披碱草 7 种人工牧草地,以无种植的撂荒地为对照,共 8 个试验处理(见表 1)。小区面积 15 m^2 (5 m×3 m),每个试验处理 3 个重复,共计 24 个小区,按随机区组排列。播种前施用尿素 75 kg/hm^2 作为底肥,此后不施肥,每年 3 月返青,10 月刈割,地力和田间管理条件基本一致。2016 年 3,6,9,12 月取土壤样品,取样土层深度为 0—5 cm 和 5—10 cm。土壤样品装于自封袋中保存并置于 4 ℃冰箱进行冷藏。

表 2 人工种植牧草地的试验处理

处理	牧草品种	科
CK	撂荒地	—
L_1	紫花苜蓿(*Medicago sativa*)	豆科(Leguminosae)
L_2	猫尾草(*Uraria crinita*)	豆科(Leguminosae)
L_3	红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)	豆科(Leguminosae)
L_4	沙打旺(*Astragalus adsurgens*)	豆科(Leguminosae)
P_1	陆地中间偃麦草(*Elytrigia intermedia*)	禾本科(Poaceae)
P_2	冷地早熟禾(*Poa crymophila*)	禾本科(Poaceae)
P_3	垂穗披碱草(*Elymus nutans*)	禾本科(Poaceae)

1.3 土壤酶测定方法

土壤脲酶活性的测定方法采用苯酚钠－次氯酸

钠比色法[18],酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH_3-N 的毫克数表示;土壤蔗糖酶活性的测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法[18],酶活性以 24 h 后 1 g 土壤生成葡萄糖毫克数表示;土壤磷酸酶活性的测定采用磷酸苯二钠比色法[18],酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的毫克数表示;土壤过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法[18],酶活性以高锰酸钾溶液滴定过氧化氢分解反应剩余过氧化氢的量表示。

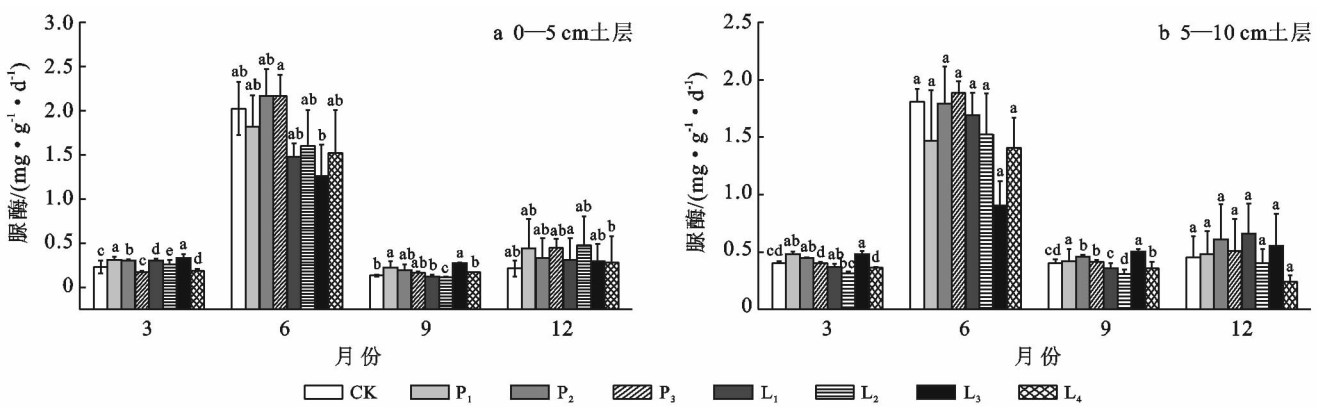
1.4　数据处理

用 SPSS 20.0 对数据进行单因素方差分析及交互作用分析,用 Duncan 氏法进行多重比较。用 Origin Pro 8.0作图。

2　结果与分析

2.1　不同牧草地土壤脲酶活性的季节性变化

通过比较不同牧草土壤脲酶活性季节间的变化(图 1),6 月不同人工牧草地土壤脲酶活性明显高于 3,9,12 月。在 6 月垂穗披碱草(P_3)地和红豆草(L_3)地的土壤脲酶活性差异显著($p<0.05$),垂穗披碱草(P_3)地土壤脲酶活性比红豆草(L_3)地高 52.1%。0—5 cm 土层土壤脲酶活性显著高于 5—10 cm 土层,0—5 cm 土层和 5—10 cm 土层中冷地早熟禾(P_2)、垂穗披碱草(P_3)地的土壤脲酶活性较高,红豆草(L_3)、沙打旺(L_4)地的土壤脲酶活性较低。



注:CK 为撂荒地对照;P_1 为陆地中间偃麦草;P_2 为冷地早熟禾;P_3 为垂穗披碱草;L_1 为紫花苜蓿;L_2 为猫尾草;L_3 为红豆草;L_4 为沙打旺。不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$),下同。

图 1　不同牧草土壤脲酶活性的季节性变化特征

2.2　不同牧草地土壤蔗糖酶活性的季节性变化

不同牧草土壤蔗糖酶活性的季节变化如图 2 所示。6 月份不同牧草地土壤的蔗糖酶活性显著高于 3 月份、9 月份和 12 月份。在 0—5 cm 土层中,蔗糖酶的活性显著高于其在 5—10 cm 土层中的活性($p<0.05$)。在 0—5 cm 的土层中,猫尾草(L_2)和陆地中间偃麦草(P_1)地的土壤蔗糖酶活性较高,沙打旺(L_4)地的酶活性较低。在 5—10 cm 的土层中,陆地中间偃麦草(P_1)地的蔗糖酶活性较高,沙打旺(L_4)草地酶活性较低。

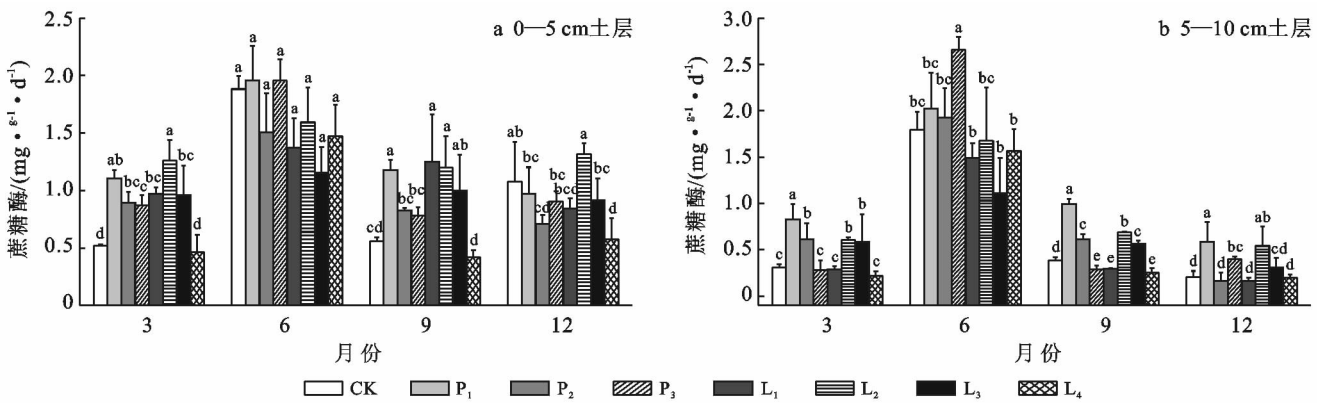


图 2　不同牧草土壤蔗糖酶活性的季节性变化

2.3　不同牧草地土壤碱性磷酸酶活性的季节性变化

通过不同牧草土壤碱性磷酸酶活性的季节变化规律如图 3 所示。从图 3 可以看出,3,6,9,12 月份不同人工牧草地土壤碱性磷酸酶均较高。其中 6 月份

土壤碱性磷酸酶活性较高，9 月份酶活性较低。3，6，9，12 月份，在 0—5 cm 土层中土壤碱性磷酸酶活性显著高于 5—10 cm 土层（$p<0.05$）。在 0—5 cm 土层中，紫花苜蓿（L_1）草地土壤碱性磷酸酶活性较高，沙打旺（L_4）地酶活性较低。其中，紫花苜蓿（L_1）草地土壤碱性磷酸酶活性比沙打旺（L_4）地高 22.9%。在 5—10 cm 土层中，垂穗披碱草（P_3）地土壤的碱性磷酸酶活性较高，沙打旺（L_4）地的酶活性较低。其中，垂穗披碱草（P_3）地的土壤碱性磷酸酶活性比沙打旺（L_4）地高 33.2%。

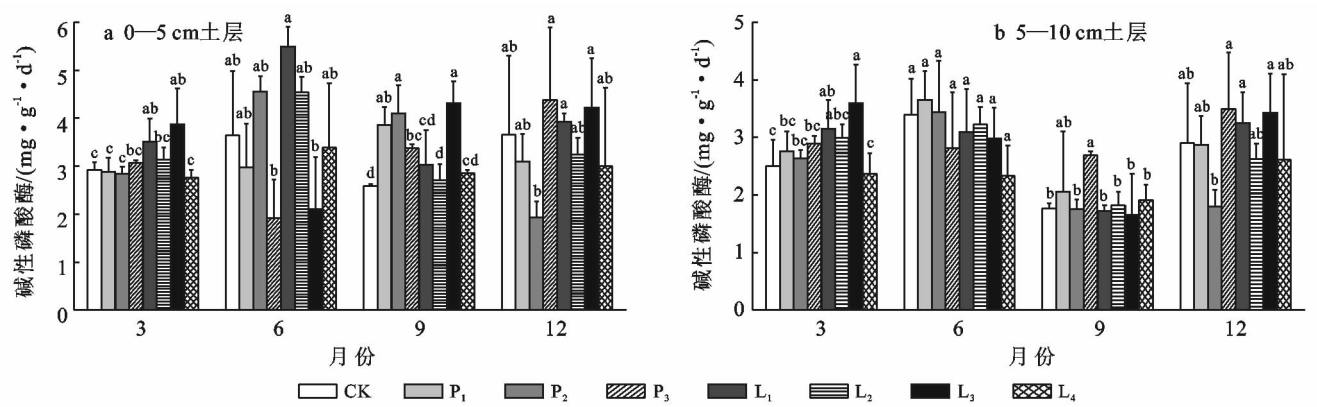


图 3 不同牧草土壤碱性磷酸酶活性的季节性变化

2.4 不同牧草地不同季节的土壤过氧化氢酶活性

不同牧草土壤过氧化氢酶活性的季节变化如图 4 所示。由图 4 可知 6 月不同人工牧草地土壤过氧化氢酶活性高于 3 月、9 月和 12 月，除紫花苜蓿和猫尾草地的酶活性有着较为明显的季节变化差异外，其它处理下的人工牧草地土壤过氧化氢酶活性变化不显著。在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的土壤过氧化氢酶活性差异不显著。在 0—5 cm 土层中，沙打旺（L_4）和冷地早熟禾（P_2）草地的过氧化氢酶活性较低，其他处理无显著差异。5—10 cm 土层中，红豆草（L_3）和沙打旺（L_4）草地中的过氧化氢酶活性较低，其他处理无显著差异。

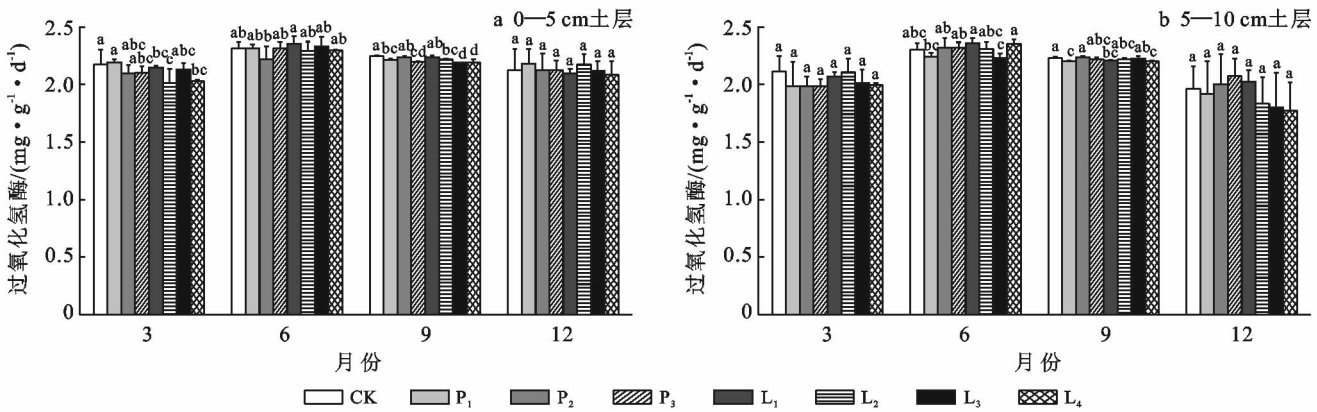


图 4 不同牧草土壤过氧化氢酶活性的季节性变化

2.5 土壤酶活性的交互效应

由牧草品种、季节和土层深度对土壤酶活性影响的交互作用分析（表 3）可知，季节和土层深度的交互作用对脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性产生极显著影响。品种和季节的交互作用对脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶产生极显著影响；而品种和土层深度互作以及品种、季节和深度 3 因素互作对脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性的影响不显著。

2.6 根据土壤酶活性对不同人工牧草品种进行聚类

通过运用聚类分析方法，将不同处理作为变量进行 Q 型聚类分析，计算距离时选择平方欧氏距离，通过 SPSS 20.0 进行处理得到分析结果（图 5）。根据 4 种主要土壤酶活性的综合排序分组，CK，L_1，L_3，L_4 为一类，P_1，P_2，P_3 和 L_2 为另一类。即撂荒地、紫花苜蓿、红豆草和沙打旺为一组，陆地中间偃麦草、冷地熟草禾、垂穗披碱草和猫尾草为另一组。

表 3　牧草品种、季节和土层深度对土壤酶活性影响的交互作用分析

因 素	土壤酶	平方和	F 临界值	p 值
品种＋季节	脲 酶	5.535	2.266	0.002
	蔗糖酶	8.164	3.750	0
	碱性磷酸酶	62.844	4.439	0
	过氧化氢酶	0.242	0.988	0.48
品种＋土层深度	脲 酶	0.232	0.285	0.959
	蔗糖酶	1.184	1.632	0.129
	碱性磷酸酶	4.827	1.023	0.417
	过氧化氢酶	0.089	1.092	0.37
季节＋土层深度	脲 酶	1.463	4.192	0.007
	蔗糖酶	5.28	16.978	0
	碱性磷酸酶	9.301	4.599	0.004
	过氧化氢酶	0.453	12.969	0
品种＋季节＋土层深度	脲 酶	0.684	0.28	0.999
	蔗糖酶	1.792	0.823	0.689
	碱性磷酸酶	15.779	1.114	0.336
	过氧化氢酶	0.265	1.086	0.366

注:$p<0.01$ 为极显著,$p<0.05$ 为显著。

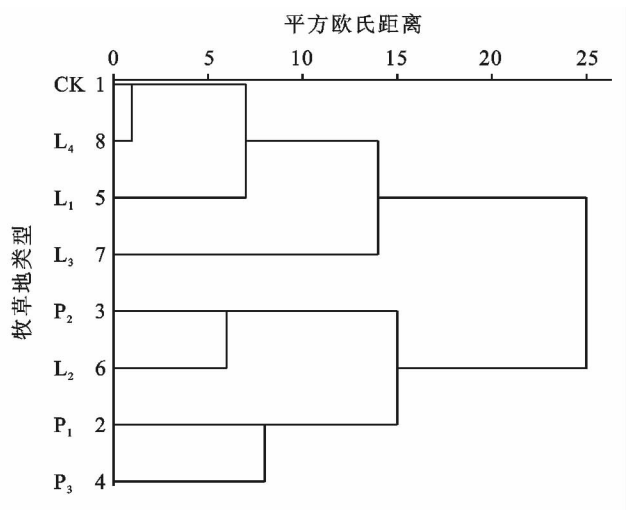


图 5　不同牧草地土壤酶综合活性的聚类分析结果

3　讨论与结论

3.1　讨 论

土壤酶活性与土壤微生物量、土壤呼吸、土壤有机碳之间有一个明显的互动过程,是一个敏感的生物指标,能反映出土壤微生物活性的高低[19-21]。植物群落物种组成与土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶等水解酶类的活性具有一定相关性,而土壤转化酶差异不显著[11,22]。通过添加生物炭提高了土壤碱性磷酸酶、纤维素酶的活性且延长酶活性的周期[23]。土壤活性有机碳组分在土壤表层显著高于下层,土壤酶活性也随土层深度的增加而降低,表明土壤活性有机碳与土壤酶活性密切相关[24]。有关人工植被建成后土壤酶活性变化表明,在三江源区重度退化草地人工种植优势种垂穗披碱草的土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶的活性显著提高,而过氧化氢酶活性无明显变化规律[22]。在人工杨树林土壤中酶活性存在季节变化,春季的土壤脲酶、土壤蔗糖酶活性较高,而秋季的磷酸酶活性较高,过氧化氢酶季节变化不明显[25]。果园生草可有效调节果园土壤微环境,增加了土壤微生物多样性和土壤酶活性[26]。对比清耕、生草梨园土壤酶活性的空间变化,生草能提高梨园土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶的活性[27]。本试验研究结果为在黄土高原人工种植牧草后土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性增高,而过氧化氢酶在季节间差异不显著。季节和土层深度的交互作用对脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性产生极显著影响;品种和季节的交互作用对脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶产生极显著影响。本试验研究结果与前人[9,14]研究结果相似,说明牧草品种、季节和土层深度之间的土壤酶活性的存在差异。总体来看,人工种植紫花苜蓿土壤酶活性较高,种植沙打旺土壤酶活性较低。

研究人工种植牧草土壤酶活性的垂直分布特征,在青海湖东沙化区人工建植 5 a 的披碱草、碱茅和早熟禾后,土壤脲酶、过氧化氢酶的活性及土壤养分含量均显著提高,且土壤酶活性与土壤养分含量呈显著相关性[11]。在内蒙古人工种植紫花苜蓿 0—40 cm 土壤中脲酶、蔗糖酶过和氧化氢酶活性均随土层深度的增加而降低[28]。同样,在贺兰山农牧场的这 3 种土壤酶活性随土壤深度和种植年限的增加而降低,土壤酶活性主要集中在 0—20 cm 土层内。在盐碱化草地土壤酶活性随着土层深度的增加而逐渐降低,在 0—5 cm 土层土壤酶活性最强,具有“表聚性”特征[16,29]。受盐碱化的影响过氧化氢酶、转化酶对季节变化的敏感性下降而变化幅度较小,种植紫花苜蓿各土层之间的过氧化氢酶活性无显著差异[9,16,29]。土壤过氧化氢酶也受土壤水热状况的协同作用,且过氧化氢酶活性与草地群落的生长状态显著相关[30]。但本试验研究显示,土壤过氧化氢酶活性在各土层之间差异不显著,0—5 cm 土层土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性显著高于 5—10 cm。土壤酶活性主要集中在 0—5 cm 土层内,也表现出土壤酶活性在土层“表聚性”。

3.2　结 论

(1) 种植人工牧草后 0—5 cm 土壤中脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶的活性显著高于 5—10 cm,其中土壤脲酶活性差异最显著,其次是碱性磷酸酶和蔗糖酶,而过氧化氢酶在各土层中的酶活性无显著差异。

(2) 不同人工牧草地酶活性均以 6 月最高,其中脲酶和蔗糖酶表现最明显,呈现“夏高型”特征。但土壤过氧化氢酶在各月中酶活性无显著差异,可见季节

变化对土壤过氧化氢酶活性的影响最小。

(3) 在黄土高原区种植人工牧草,可提高土壤酶活性,其中,种植紫花苜蓿对提高土壤酶活性的作用最为显著,而种植沙打旺对提高土壤酶活性的作用则低于其它牧草品种。

致谢:感谢中国农业科学院兰州畜牧与兽药研究所/农业部兰州黄土高原生态环境重点野外科学观测试验站提供试验平台。

[参 考 文 献]

[1] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.

[2] 袁晓波,尚振艳,牛得草,等.黄土高原生态退化与恢复[J].草业科学,2015,32(3):363-371.

[3] 王盛萍,张志强,张化永,等.黄土高原防护林建设的恢复生态学与生态水文学基础[J].生态学报,2010,30(9):2475-2483.

[4] 邱莉萍,刘军,王益权,等.土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(3):277-280.

[5] 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.

[6] Yang Lijuan, Zhang Yulong, Li Fusheng. Soil Enzyme Activities and Soil Fertility Dynamics[M]. Advances in Citrus Nutrition. Springer Netherlands, 2012.

[7] Yang Kai, Zhu Jiaojun, Yan Qiaoling, et al. Soil enzyme activities as potential indicators of soluble organic nitrogen pools in forest ecosystems of Northeast China[J]. Annals of Forest Science, 2012,69(7):795-803.

[8] Zeglin L H, Stursova M, Sinsabaugh R L, et al. Microbial responses to nitrogen addition in three contrasting grassland ecosystems[J]. Oecologia, 2007,154(2):349-359.

[9] 向泽宇,王长庭,宋文彪,等.草地生态系统土壤酶活性研究进展[J].草业科学,2011,28(10):1801-1806.

[10] 王理德,王方琳,郭春秀,等 壤酶学研究进展[J].土壤学报, 2016,48(1):12-21.

[11] 魏小星.青海湖东沙化治理过程中土壤酶活性及养分含量特征[J].草业科学,2017,34(7):1408-1418.

[12] 欧阳克蕙,王堃.人工草地植被重建对退化红壤化学性质和酶活性的影响[J].江西农业大学学报,2007,29(3):474-478.

[13] 阿的鲁骥,何兵,王长庭,等.入侵植物土荆芥对川西北高寒草甸3种培育牧草根际土壤酶活性、微生物数量及土壤养分的影响[J].西南农业学报, 2015,28(2):815-821.

[14] 王理德,姚拓,何芳兰,等.石羊河下游退耕区次生草地自然恢复过程及土壤酶活性的变化[J].草业学报,2014,23(4):253-261.

[15] 杨恒山,张庆国,刘晶,等.不同生长年限紫花苜蓿根系及其土壤微生物的分布[J].草业科学,2007,24(11):38-41.

[16] 吴旭东,张晓娟,谢应忠,等.不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J].草业学报,2013,22(1):245-251.

[17] 韩国君,田福平,何明珠,等. 黄土高原长期种植紫花苜蓿对土壤酶活性的影响[J].许昌学院学报,2016,35(5):110-114.

[18] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[19] Zhang Yongmei, Wu Ning, Zhou Guoyi, et al. Changes in enzyme activities of spruce (*Piceabal fouriana*) forest soil as related to burning in the Eastern Qinghai-Tibet an Plateau[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 30(3): 215-225.

[20] 陈娟,马忠明,刘莉莉,等.不同耕作方式对土壤有机碳、微生物量及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3):667-675.

[21] 庞荔丹,婷婷,张宇飞,等. 玉米秸秆配氮还田对土壤酶活性、微生物量碳含量及土壤呼吸量的影响[J].作物杂志,2017(1):107-112.

[22] 张莉,王长庭,刘伟,等.不同建植期人工草地优势种植物根系活力、群落特征及其土壤环境的关系[J].草业学报,2012,21(5):185-194.

[23] Xin Zexin, Liu Jun, Shi Xiaorong, et al. Effects of Biochar on Soil Enzyme Activity and Mechanism of Action[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(9):2085-2089.

[24] 刘学东,陈林,杨新国,等.荒漠草原典型植物群落土壤活性有机碳组分特征及其与酶活性的关系[J].西北植物学报,2016,36(9):1882-1890.

[25] 王艮梅,罗琳琳,郑聚锋.苏北不同代次和林龄杨树人工林土壤酶活性季节变化特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(4):45-50.

[26] 曹铨,沈禹颖,王自奎,等.生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J].草业学报,2016,25(8):180-188.

[27] 徐凌飞,韩清芳,吴中营,等.清耕和生草梨园土壤酶活性的空间变化[J].中国农业科学,2010,43(23):4977-4982.

[28] 郜继承,杨恒山,张庆国,等.不同生长年限紫花苜蓿人工草地土壤酶活性及分布[J].草业科学,2008,25(4):76-78.

[29] 南丽丽,郭全恩,向华,等.甘肃省盐碱草地主要植物群落土壤酶活性研究[J].水土保持学报,2015,29(4):311-315.

[30] 鲁萍,郭继勋,朱丽.东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究[J].应用生态学报,2002,13(6):675-679.