

方凯凯,贾曼莉,杜毅飞,等. 生草栽培下果园土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):461-466.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.08.133

# 生草栽培下果园土壤酶活性与肥力因子的关系

方凯凯, 贾曼莉, 杜毅飞, 王志康, 李会科

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

**摘要:**为探究生草栽培下土壤酶活性与肥力因子的关系,通过短期室内培养法测定苹果园清耕、苹果 || 百脉根间作、苹果 || 白三叶间作、苹果 || 小冠花间作、苹果 || 鸡脚草间作这 5 种管理模式下,土壤理化性质变化和 4 种土壤酶活性。结果表明,土壤剖面中 4 种酶活性的变化趋势是表层明显高于下层。土壤酶活性与有机质、全氮、速效钾含量呈极显著正相关,与土壤 pH 值呈极显著负相关。通径分析结果表明,土壤肥力因子对纤维素酶活性的直接作用系数从小到大依次为有机质含量 > 全氮含量 > pH 值 > 速效钾含量,有机质含量和全氮含量是影响土壤酶活性的最主要因素,而速效钾含量和 pH 值含量的直接和间接通径系数相对较小,是影响土壤酶活性的次要因素。

**关键词:**生草;肥力因子;通径分析;酶活性

**中图分类号:**S812.8;S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)08-0461-06

土壤酶常以稳定蛋白质形态存在,是具有高度催化作用的生物催化剂,土壤中的一切生物化学过程都是在土壤酶的作用下进行的。土壤酶素参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环,既是土壤有机物转化的执行者,又是植物营养元素的活性库<sup>[1-5]</sup>。土壤酶活性反映了土壤营养循环过程的速率<sup>[6-7]</sup>,可作为土壤生物功能多样性的指标<sup>[8]</sup>、土壤生产力<sup>[9]</sup>和微生物活性潜力的指标<sup>[10]</sup>,土壤酶活性能够及时反映土地利用和生物的改变<sup>[2]</sup>。因此,研究土壤酶活性,有助于了解土壤的供肥能力,并可用其作为评判土壤肥力的辅助指标。土壤酶活性与土壤肥力状况的关系历来为各国学者所关注,但目前所用的分析方法多见于简单相关、多元回归分析。应用通径分析不仅能测定两变数间的相互关系,而且还能给出原因对结果的重要性,并可将相关系数分解为直接作用和间接作用,提示各个因素对结果的相对重要性<sup>[11-12]</sup>。通过通径系数的大小与正负来表示自变量对应变量的大小与方向,且通径系数之间可进行相互比较,比相关分析提供更多的

信息<sup>[11-14]</sup>。

长期以来,酶活性研究已成为土壤学的研究热点,但国内外学者对酶活性的研究主要集中在农田<sup>[15-16]</sup>、森林<sup>[17-18]</sup>、草地<sup>[19-20]</sup>生态系统,对生草种植下的苹果园生态系统的研究还较少。本研究以渭北黄土高原苹果园为例,对 4 种生草栽培下的土壤不同酶活性及理化性质进行深入的探讨,应用通径分析方法定量解释土壤酶活性与理化性质之间的相关关系,以期进一步阐明渭北苹果园土壤酶活性特征,并揭示其对土壤肥力因子的指示作用,为渭北黄土高原苹果园的合理开发利用提供理论依据,同时丰富我国黄土高原苹果园土壤酶活性研究的基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区是白水县中部杜康镇塬面西北农林科技大学苹果试验站果园,位于渭北黄土高原苹果代表产区白水,地处 109°16'~109°45'E,35°4'~35°27'N,属暖温带大陆性季风气候,平均海拔 850 m 左右,土壤为黄绵土,土层深厚,剖面质地均匀,多年平均气温 11.4℃,多年平均降水量 577.8 mm,降水年际变化大,年内分配不均,日照充足,光热资源丰富,全年无霜期 207 d。苹果品种为十三年生乔化红富士[富士/新疆野苹果(*Malus demestica* Borkh)],栽植密度 3 m×8 m。

### 1.2 试验设计与土壤样品采集

选取苹果园清耕、苹果 || 百脉根、苹果 || 鸡脚草、苹果 || (1):61-68。

[9]张荣胜,梁雪杰,刘永锋,等. 解淀粉芽胞杆菌 Lx-11 生物发酵工艺优化[J]. 中国生物防治学报,2013,29(2):254-262.

[10]Li Y, Jiang H, Xu Y, et al. Optimization of nutrient components for enhanced phenazine-1-carboxylic acid production by *gacA*-inactivated *Pseudomonas* sp. M18G using response surface method[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 77(6):1207-1217.

[11]胡升,梅乐和,姚善径. 响应面法优化纳豆激酶液体发酵[J]. 食品与发酵工业,2003,9(1):13-17.

收稿日期:2015-07-10

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201103005-9-4);

国家现代农业产业技术体系专项(编号:CARS-28)。

作者简介:方凯凯(1991—),男,浙江衢州人,硕士,主要从事生态环境研究。E-mail:fangkaikai@nwsuaf.edu.cn。

通信作者:李会科,博士,副教授,主要从事生态环境研究。E-mail:lihuike@nwsuaf.edu.cn。

[5]郝学财,余晓斌,刘志钰,等. 响应面方法在优化微生物培养基中的应用[J]. 食品研究与开发,2006,27(1):38-41.

[6]肖怀秋,李玉珍. 海金沙草总黄酮提取工艺的响应面优化[J]. 氨基酸和生物资源,2010,34(8):68-72.

[7]杨铭. Minitab 用于中心复合设计与数据处理[J]. 药学服务与研究,2007,7(3):231-234.

[8]Xiao Z J, Liu P H, Qin J Y. Statistical optimization of medium components for enhanced acetoin production from molasses and soybean meal hydrolysate[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 74

白三叶、苹果 || 小冠花间作 5 种管理模式(下文分别用对照、百脉根、鸡脚草、白三叶和小冠花简称),每个模式重复 3 次,共有 9 个小区,每小区面积是 30 m<sup>2</sup>(6 棵苹果树),2005 年 3 月进行间生草播种,现已持续种生草 7 年,播前深翻整地,开沟条播,播种密度为 0.74 g/m<sup>2</sup>,每年刈割 2~3 次,覆盖于苹果树行间,各处理区的生态条件和田间管理措施保持一致。

2012 年 7 月在各处理区随机布设 3 个采样点,清除表层凋落物,用土钻分别采集 0~5、5~10、10~20、20~40 cm 土层土样,同一采样点同一层次土壤混匀作为 1 个样品,共 36 个样,土样去除根系、枯落物,分成 2 个部分,一部分自然风干用于测定土壤基本理化性质和土壤酶活性,另一部分装入冰袋立即运回实验室用于土壤有机碳矿化的室内培养测定。

1.3 试验方法

土壤有机碳矿化培养:将样品放在 30 ℃ 恒温培养箱中预培养 1 周,以使土壤从 4 ℃ 状态下恢复到常温状态,使各种条件相对一致。称取 20 g 预培养过的鲜土置于广口瓶底部,用

蒸馏水调土壤含水量至田间持水量的 60%,在 50 mL 吸收瓶装入 20 mL 0.01 mol/L NaOH 溶液,并置于广口瓶内,加盖密封,置于 30 ℃ 的恒温培养箱中培养,每个样设置 3 个重复,每次用称质量法矫正土壤含水量。分别在培养的第 1 天、第 3 天、第 5 天、第 7 天、第 10 天、第 13 天、第 17 天、第 23 天、第 31 天,取出装有碱液的吸收瓶,加入 2 mL 1 mol/L BaCl<sub>2</sub> 溶液和 2 滴酚酞指示剂,用 0.1 mL/L 盐酸滴定至微红色,测定土壤中 CO<sub>2</sub>-C 的释放量。

土壤有机碳含量用重铬酸钾容量法(外加热)测定;土壤 pH 值直接用 pH 计进行测定,水土比 2.5:1;土壤全氮消解,用凯氏定氮仪测定;速效钾用醋酸铵浸提,用火焰分光光度法测定;轻组有机碳用碘化钠提取,在岛津 TOC-SSM-5000A 碳分析仪上测定;土壤蔗糖酶和纤维素酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定;土壤脲酶活性用靛酚比色法测定<sup>[20]</sup>。各处理土壤的基本性质见表 1。

表 1 5 种不同处理下的土壤理化性质

不同处理 (生草种类)	土壤深度 (cm)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	土壤 pH 值	土壤全氮含量 (g/kg)	土壤有机碳含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	轻组有机碳含量 (mg/kg)
百脉根	0~5	1.08	8.18	0.87	13.46	89.63	7.09
	5~10	1.20	8.20	0.68	12.31	87.07	5.17
	10~20	1.25	8.21	0.61	11.20	80.14	1.42
	20~40	1.27	8.21	0.50	11.07	68.74	0.89
鸡脚草	0~5	1.02	8.23	0.98	16.54	112.34	8.12
	5~10	1.15	8.20	0.83	15.38	108.72	6.77
	10~20	1.20	8.21	0.71	12.06	97.43	3.02
	20~40	1.24	8.24	0.62	12.46	86.73	1.32
白三叶	0~5	1.05	8.21	0.99	16.04	115.45	7.99
	5~10	1.19	8.22	0.78	15.02	116.32	6.32
	10~20	1.24	8.19	0.67	13.97	99.56	2.15
	20~40	1.30	8.24	0.52	11.84	81.64	1.45
小冠花	0~5	1.14	8.16	0.92	14.97	93.33	7.05
	5~10	1.27	8.18	0.71	14.93	89.83	5.43
	10~20	1.28	8.19	0.65	13.78	85.33	1.65
	20~40	1.34	8.21	0.58	12.64	77.17	0.57
对照组	0~5	1.30	8.16	0.67	11.64	71.33	1.47
	5~10	1.32	8.14	0.62	11.60	66.00	1.08
	10~20	1.39	8.17	0.58	11.58	62.67	0.84
	20~40	1.39	8.18	0.55	10.58	61.00	0.48

1.4 数据处理

采用 Origin 8.5 和 Excel 软件作图表,数据的相关分析采用 SPSS 18.0 统计软件进行处理,用单因素方差分析对不同土地利用方式下土壤酶活性和理化指标的差异性进行分析,对数据进行标准化后建立土壤酶活性与理化因子的多元线性回归方程并完成显著性检验,在显著性检验成功的基础上运用通径分析方法<sup>[21]</sup>计算理化因子对土壤酶活性的直接、间接通径系数和决定系数。

2 结果与分析

2.1 不同生草栽培下 4 种酶活性特征

图 1 表示在白三叶、小冠花、百脉根、鸡脚草 4 种生草的栽培下,取 0~5、5~10、10~20、20~40 cm 深度的土样,测定

过氧化氢酶活性。结果表明,在同一取样深度,种植生草后过氧化氢酶活性比清耕高,种生草的过氧化氢酶活性为 0.32~0.70 mg/g,而清耕的仅为 0.25~0.45 mg/g,说明生草能够显著增强土壤中过氧化氢酶的活性。在各剖面中土壤过氧化氢酶的变化趋势是表层活性明显高于下层,随着土层的加深,酶活性逐渐减弱。

图 2 中的蔗糖酶活性在各个土层深度都比图 1 中的过氧化氢酶强。土壤浅层部分(0~5、5~10 cm)不同生草蔗糖酶的活性从强到弱依次是百脉根>白三叶>鸡脚草>小冠花>清耕;而在土壤深层部分(10~20、20~40 cm)蔗糖酶的活性强弱顺序与浅层不一致,表现为白三叶>百脉根>小冠花>鸡脚草>清耕。

图 3 和图 4 表明,在土壤的不同层级中,白三叶与百脉根

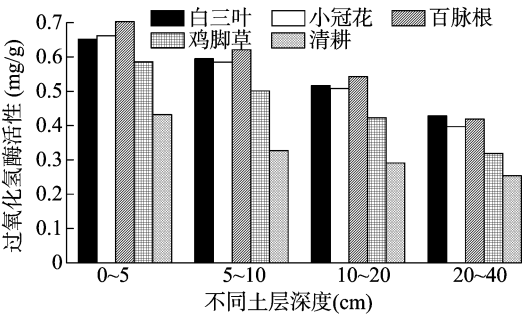


图1 4 种生草栽培对过氧化氢酶活性的影响

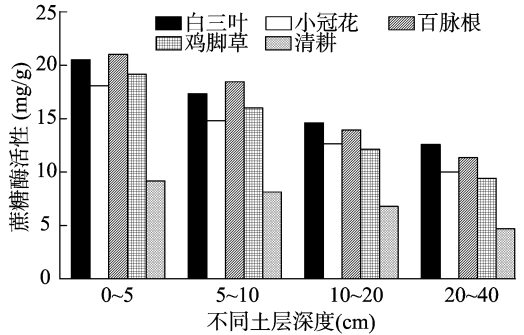


图2 4 种生草栽培对蔗糖酶活性的影响

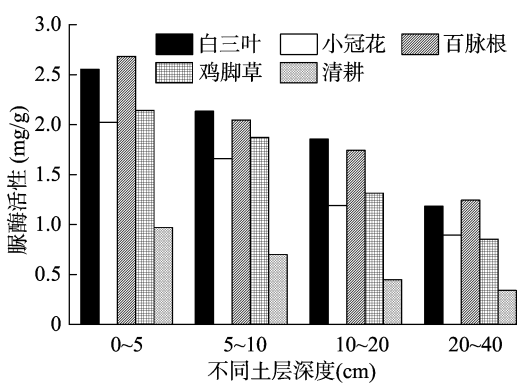


图3 4 种生草栽培对脲酶活性的影响

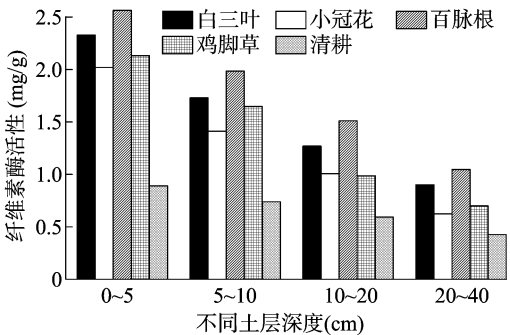


图4 4 种生草栽培对纤维素酶活性的影响

较强<sup>[22]</sup>。果园生草与清耕对比能显著增强土壤酶活性,这与徐凌飞等<sup>[23-26]</sup>的研究结果一致。

2.2 土壤酶活性之间及其与土壤养分含量之间的相关分析

2.2.1 多种酶活性之间的关系 土壤酶活性之间存在一定的线性相关关系,表 2、表 3 和表 4 中蔗糖酶和纤维素酶的相关性较高, $r$  值分别为 0.989、0.936 和 0.940。蔗糖酶和纤维素酶的活性显著相关,表明土壤中多糖的转化与纤维素转化之间关系密切并相互影响。同时,脲酶与纤维素酶的相关性较高, $r$  值分别为 0.995、0.884 和 0.904,表明土壤中尿素氮肥的水解与纤维素类物质的转换关系密切。土壤酶活性之间的相互关系表明,土壤酶在促进土壤有机物转化中不仅显示专性特性,同时也存在共性关系。酶的专性作用反映了土壤中与某类酶相关的有机化合物转化过程,而有共性关系酶的总体活性在一定程度上反映土壤肥力水平的高低<sup>[27]</sup>。

2.2.2 酶活性与养分含量的关系 相关分析结果(表 2、表 3 和表 4)表明,土壤脲酶活性与所测土壤肥力因子存在极密切的关系。土壤脲酶活性与有机质、全氮、速效钾含量呈正相关。其中,与有机质和全氮含量呈极显著正相关,相关系数在表 1 中最高达 0.955 和 0.996,在表 3 中最低为 0.836 和 0.892,这表明脲酶在土壤中参与 C、N 转化过程。

过氧化氢酶活性与有机质、全氮含量具有极显著的关系。表 2 的  $r$  值分别为 0.920、0.966,表 3 中为 0.839、0.840,表 4 的  $r$  值是 0.758、0.774,与 pH 值呈负相关关系。

蔗糖酶活性与有机质、全氮含量呈显著正相关,图 2 中相关系数为 0.964、0.958,表 3 中的为 0.906、0.955,表 4 为 0.872、0.940,与速效钾含量呈显著正相关,与 pH 值呈负相关关系。

由表 2、表 3、表 4 可知,纤维素酶活性与有机质、全氮含量呈极显著正相关,表 4 中纤维素酶与速效钾呈显著正相关,

对酶活性的贡献最大,这与图 1 和图 2 的分析结果一致。

图 1、图 2、图 3 和图 4 分析结果表明,酶的活性随着土壤深度的加大而呈减弱的趋势。这主要是由于土壤表层积累了较多的枯枝落叶和腐殖质,有机质含量高,有充分的营养源以利于微生物的生长,加之表层水热条件和通气状况好,因微生物生长旺盛、代谢活跃、呼吸强度加大而使表层的土壤酶活性

表 2 百脉根 - 土壤酶活性及土壤性质的相关矩阵( $r$  值)

指标	$r$ 值							
	脲酶活性 $X_1$	过氧化氢酶活性 $X_2$	蔗糖酶活性 $X_3$	纤维素酶活性 $X_4$	有机质含量 $X_5$	全氮含量 $X_6$	速效钾含量 $X_7$	pH 值 $X_8$
$X_1$	1.000	0.984 **	0.971 **	0.995 **	0.955 **	0.996 **	0.936 **	-0.932 **
$X_2$		1.000	0.981 **	0.988	0.920 **	0.966 **	0.983 **	-0.866 *
$X_3$			1.000	0.989 **	0.964 **	0.958 **	0.956 **	-0.906 **
$X_4$				1.000	0.968 **	0.989 **	0.946 **	-0.933 **
$X_5$					1.000	0.964 **	0.850 *	-0.983 **
$X_6$						1.000	0.902 **	-0.955 **
$X_7$							1.000	-0.767 *
$X_8$								1.000

注:“\*”表示 0.05 水平显著,“\*\*”表示 0.01 水平显著。下表同。

表 3 白三叶 - 土壤酶活性及土壤性质的相关矩阵(*r* 值)

指标	<i>r</i> 值							
	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub>	<i>X</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub>	<i>X</i> <sub>7</sub>	<i>X</i> <sub>8</sub>
<i>X</i> <sub>1</sub>	1.000	0.748 **	0.896 **	0.884 **	0.942 **	0.905 **	0.715 **	-0.391 *
<i>X</i> <sub>2</sub>		1.000	0.730 **	0.814 **	0.839 **	0.840 **	0.746 **	-0.045
<i>X</i> <sub>3</sub>			1.000	0.936 **	0.906 **	0.955 **	0.746 **	-0.280
<i>X</i> <sub>4</sub>				1.000	0.942 **	0.972 **	0.847 **	-0.146
<i>X</i> <sub>5</sub>					1.000	0.953 **	0.886 **	-0.309
<i>X</i> <sub>6</sub>						1.000	0.801 **	-0.208
<i>X</i> <sub>7</sub>							1.000	-0.201
<i>X</i> <sub>8</sub>								1.000

表 4 小冠花 - 土壤酶活性及土壤性质的相关矩阵(*r* 值)

指标	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub>	<i>X</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub>	<i>X</i> <sub>7</sub>	<i>X</i> <sub>8</sub>
<i>X</i> <sub>1</sub>	1.000	0.779 **	0.844 **	0.904 **	0.836 **	0.892 **	0.469 *	-0.602 **
<i>X</i> <sub>2</sub>		1.000	0.762 **	0.756 **	0.758 **	0.774 **	0.599 **	-0.566 **
<i>X</i> <sub>3</sub>			1.000	0.940 **	0.872 **	0.940 **	0.635 **	-0.650 **
<i>X</i> <sub>4</sub>				1.000	0.851 **	0.917 **	0.559 **	-0.623 **
<i>X</i> <sub>5</sub>					1.000	0.831 **	0.638 **	-0.649 **
<i>X</i> <sub>6</sub>						1.000	0.601 **	-0.590 **
<i>X</i> <sub>7</sub>							1.000	-0.281
<i>X</i> <sub>8</sub>								1.000

而与 pH 值呈显著负相关关系。说明有机质、全氮含量等肥力因子是影响土壤多种酶活性的重要因素。

2.3 土壤酶活性与土壤理化性质的通径分析

1921 年 Sewall 首先提出通径系数(Path coefficient)的分析方法<sup>[28]</sup>。通径分析不仅能测定两变数间的相互关系,而且还能给出原因对结果的重要性,并可将相关系数分解为直接作用和间接作用,提示各个因素对结果的相对重要性。通径分析是一种因果机理分析方法,其直接和间接通径系数之和在数值上等于相关系数,比相关分析提供更多信息,可揭示土壤酶活性与各理化性质的密切程度,且能指出这种关系中哪种作用途径处于主导地位<sup>[27]</sup>。将 3 种生草的脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和纤维素酶活性与主要肥力因子的测定结果进行回归分析,得到标准多元回归方程,即

(1)百脉根。过氧化氢酶: $Y_1 = -0.234X_1 + 0.594X_2 + 0.305X_3 + 0.334X_4$ ;

蔗糖酶: $Y_2 = -1.447X_1 + 0.192X_2 + 1.975X_3 + 0.265X_4$ ;

脲酶: $Y_3 = -1.391X_1 + 0.500X_2 + 1.605X_3 + 0.266X_4$ ;

纤维素酶: $Y_4 = -1.835X_1 + 0.565X_2 + 1.812X_3 + 0.430X_4$ ;

式中: $X_1$  为 pH 值; $X_2$  为全氮含量; $X_3$  为有机质含量; $X_4$  为速效钾含量。

(2)白三叶。过氧化氢酶: $Y_1 = 0.217X_1 + 0.229X_2 + 0.703X_3 - 0.017X_4$ ;

蔗糖酶: $Y_2 = 0.101X_1 + 1.078X_2 - 0.138X_3 - 0.016X_4$ ;

脲酶: $Y_3 = 0.051X_1 - 0.138X_2 + 1.563X_3 - 0.570X_4$ ;

纤维素酶: $Y_4 = 0.064X_1 + 0.844X_2 - 0.025X_3 + 0.206X_4$ ;

(3)小冠花。过氧化氢酶: $Y_1 = 0.063X_1 + 0.406X_2 + 0.284X_3 + 0.242X_4$ ;

蔗糖酶: $Y_2 = -0.119X_1 + 0.532X_2 + 0.360X_3 + 0.092X_4$ ;

脲酶: $Y_3 = -0.012X_1 + 0.536X_2 + 0.666X_3 - 0.291X_4$ ;

纤维素酶: $Y_4 = -0.055X_1 + 0.548X_2 + 0.494X_3 - 0.085X_4$ 。

将方程中的标准回归系数即直接通径系数乘以各理化性质的偏相关系数得到间接通径系数(表 5、表 6 和表 7)。直接通径系数反映各主要肥力因子对土壤酶活性直接影响作用的大小,而间接通径系数却反映了某一个肥力因子通过其他肥力因子对土壤酶活性产生的间接影响程度,这种影响力更具客观性,因而也更具真实表现力<sup>[29]</sup>。

由表 5、表 6 和表 7 可知,在不同生草栽培下,同一土壤理化因子对同种酶活性的通径系数不尽相同。在百脉根栽培下,土壤肥力因子对过氧化氢酶活性的直接作用系数从大到小依次为全氮含量>速效钾含量>有机质含量>pH 值;对蔗糖酶的直接作用系数从大到小依次为有机质含量>速效钾含量>全氮含量>pH 值;对脲酶直接作用系数从大到小依次为有机质含量>全氮含量>速效钾含量>pH 值;对纤维素酶直接作用系数大小顺序与脲酶的一致。有机质含量对脲酶活性和纤维素酶活性的直接作用分别达到 1.605 和 1.812,其他因子通过有机质含量对脲酶活性和纤维素酶活性的间接作用也在 1.500~2.000 之间。

在白三叶栽培下,土壤肥力因子对过氧化氢酶活性的直接作用系数从大到小依次为有机质含量>全氮含量>pH 值>速效钾含量;对脲酶活性的直接作用系数从大到小依次为有机质含量>pH 值>全氮含量>速效钾含量;对蔗糖酶活性和纤维素酶活性的直接作用系数从大到小依次为全氮含量>速效钾含量>pH 值>有机质含量。全氮含量对过氧化氢酶活性的直接作用系数较大,其通过有机质含量对过氧化氢酶活性的间接作用系数也很大,作用系数总和在所有因子中也是较高的,说明全氮含量是影响过氧化氢酶活性的主要因素之一。

在小冠花的栽培下,土壤肥力因子对过氧化氢酶和纤维素酶活性的直接作用系数从大到小依次为全氮含量>有机质含量>速效钾含量>pH 值;对脲酶活性的直接作用系数从大

表 5 百脉根－土壤理化因子对酶活性的通径系数

因变量	自变量	通径系数(直接)	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	合计
过氧化氢酶活性	$X_1$	-0.234	-0.234	0.582	0.304	0.331	0.983
	$X_2$	0.594	-0.229	0.594	0.303	0.330	0.998
	$X_3$	0.305	-0.233	0.589	0.305	0.333	0.994
	$X_4$	0.334	-0.232	0.588	0.304	0.334	0.994
蔗糖酶活性	$X_1$	-1.447	-1.447	0.188	0.304	0.331	-0.624
	$X_2$	0.192	-0.229	0.192	0.303	0.330	0.596
	$X_3$	1.975	-0.233	0.589	1.975	0.333	2.664
	$X_4$	0.265	-0.232	0.588	0.304	0.265	0.925
脲酶活性	$X_1$	-1.391	-1.391	0.490	1.600	0.264	0.963
	$X_2$	0.500	-1.362	0.500	1.592	0.263	0.993
	$X_3$	1.605	-1.387	0.496	1.605	0.265	0.979
	$X_4$	0.266	-1.380	0.495	1.599	0.266	0.980
纤维素酶活性	$X_1$	-1.835	-1.835	0.553	1.807	0.427	0.952
	$X_2$	0.565	-1.796	0.565	1.798	0.425	0.992
	$X_3$	1.812	-1.829	0.560	1.812	0.428	0.971
	$X_4$	0.430	-1.820	0.559	1.805	0.430	0.974

表 6 白三叶－土壤理化因子对酶活性的通径系数

因变量	自变量	通径系数(直接)	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	合计
过氧化氢酶活性	$X_1$	0.217	0.217	-0.048	-0.217	0.003	-0.045
	$X_2$	0.229	-0.045	0.229	0.670	-0.014	0.840
	$X_3$	0.703	-0.067	0.218	0.703	-0.015	0.839
	$X_4$	-0.017	-0.044	0.183	0.623	-0.017	0.745
蔗糖酶活性	$X_1$	-0.101	-0.101	-0.224	0.043	0.003	-0.279
	$X_2$	1.078	0.021	1.078	-0.132	-0.013	0.954
	$X_3$	-0.138	0.031	1.027	-0.138	-0.014	0.906
	$X_4$	-0.016	0.020	0.863	-0.122	-0.016	0.745
脲酶活性	$X_1$	-0.051	-0.051	0.029	-0.483	0.115	-0.390
	$X_2$	-0.138	0.011	-0.138	1.490	-0.457	0.906
	$X_3$	1.563	0.016	-0.132	1.563	-0.505	0.942
	$X_4$	-0.570	0.010	-0.111	1.385	-0.570	0.714
纤维素酶活性	$X_1$	0.064	0.064	-0.176	0.008	-0.041	-0.145
	$X_2$	0.844	-0.013	0.844	-0.024	0.165	0.972
	$X_3$	-0.025	-0.198	0.804	-0.025	0.183	0.764
	$X_4$	0.206	-0.013	0.676	-0.022	0.206	0.847

表 7 小冠花－土壤理化因子对酶活性的通径系数

因变量	自变量	通径系数(直接)	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	合计
过氧化氢酶活性	$X_1$	0.063	0.063	-0.127	-0.108	-0.039	-0.211
	$X_2$	0.406	-0.020	0.406	0.222	0.153	0.761
	$X_3$	0.284	-0.024	0.317	0.284	0.186	0.763
	$X_4$	0.242	-0.010	0.257	0.218	0.242	0.707
蔗糖酶活性	$X_1$	-0.119	-0.119	-0.167	-0.137	-0.015	-0.438
	$X_2$	0.532	0.037	0.532	0.281	0.058	0.908
	$X_3$	0.360	0.045	0.415	0.360	0.071	0.891
	$X_4$	0.092	0.019	0.337	0.277	0.092	0.725
脲酶活性	$X_1$	-0.012	-0.012	-0.168	-0.253	0.047	-0.386
	$X_2$	0.536	0.004	0.536	0.519	-0.184	0.875
	$X_3$	0.666	0.005	0.418	0.666	-0.224	0.865
	$X_4$	-0.291	0.002	0.340	0.512	-0.291	0.563
纤维素酶活性	$X_1$	-0.055	-0.055	-0.172	-0.188	0.014	-0.401
	$X_2$	0.548	0.017	0.548	0.385	-0.054	0.896
	$X_3$	0.494	0.021	0.427	0.494	-0.065	0.877
	$X_4$	-0.085	0.009	0.347	0.380	-0.085	0.651

到小依次为有机质含量>全氮含量>pH值>速效钾含量;对蔗糖酶活性的直接作用系数从大到小依次为全氮含量>有机质含量>速效钾含量>pH值。虽然速效钾含量对土壤纤维素酶活性的直接通径系数为负,但其通过pH值、有机质含量和全氮含量对土壤纤维素酶活性起正的间接作用,负的作用系数被抵消,作用系数总和表现为正。

### 3 结论

果园生草能显著提高土壤酶活性,4种不同类型的生草对提高土壤酶活性的作用效果不完全一致,总体上表现为百脉根>白三叶>鸡脚草>小冠花。随着土层深度的增加,苹果园土壤酶活性逐渐降低,表层土壤的酶活性明显高于下层土壤,层次之间变化明显。土壤酶活性与土壤养分含量的变化规律基本一致,但并不完全相同。

土壤有机质含量与全氮、速效钾含量、pH值等密切相关。土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、纤维素酶4种酶活性之间有显著的相关性,表明土壤酶在促进土壤有机物转化中存在共性关系,而有共性关系酶的总体活性在一定程度上能指示土壤肥力水平。4种酶活性与全氮含量、速效钾含量、pH值及有机质含量等显著相关,土壤酶活性也能较好地反映土壤肥力状况。

综合3种生草的通径分析得出,土壤肥力因子对过氧化氢酶活性的直接作用系数从大到小依次为全氮含量>速效钾含量>有机质含量>pH值;土壤肥力因子对蔗糖酶活性的直接作用系数从大到小依次为全氮含量>有机质含量>速效钾含量>pH值;土壤肥力因子对脲酶活性的直接作用系数从大到小依次为有机质含量>全氮含量>速效钾含量>pH值;土壤肥力因子对纤维素酶活性的直接作用系数从大到小依次为有机质含量>全氮含量>pH值>速效钾含量。

相关分析和通径分析的结果均说明土壤过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性和纤维素酶活性可以表征土壤的养分水平,反映土壤的肥力状况,可作为评价土壤肥力水平的指标。

### 参考文献:

- [1]周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [2]Salam A K, Katayama A, Kimura M. Activities of some soil enzymes in different land use systems after deforestation in hilly areas of West Lampung, South Sumatra, Indonesia[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1998, 44(1): 93–103.
- [3]Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(3): 229–238.
- [4]Acosta-Martinez V, Zobeck T M, Gill T E, et al. Enzyme activities and microbial community structure in semiarid agricultural soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 38(4): 216–227.
- [5]曹慧, 孙辉, 杨浩. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 105–109.
- [6]关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1987.
- [7]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.
- [8]Bending G D, Turner M K, Jones J E. Interactions between crop resi-

- due and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(8): 1073–1082.
- [9]Sicardi M, Garcia-Préchac F, Frioni L. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 27(2): 125–133.
  - [10]Bending G D, Turner M K, Rayns F, et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1785–1792.
  - [11]刘广深, 徐冬梅, 许中坚. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 756–762.
  - [12]曲国辉, 郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系[J]. 草业学报, 2003, 12(1): 18–22.
  - [13]袁志发, 周静芋. 多元统计数据分析[M]. 北京:科学出版社, 2002.
  - [14]唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其DPS数据处理系统[M]. 北京:科学出版社, 2002.
  - [15]朱新萍, 贾宏涛, 郑春霞, 等. 高产棉田土壤碱性磷酸酶及脲酶空间变异特征分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 586–591.
  - [16]张雪梅, 吕光辉, 杨晓东, 等. 农田耕种对土壤酶活性及土壤理化性质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 177–182.
  - [17]王丹, 王兵, 戴伟, 等. 杉木人工林土壤系统有机碳相关变量的通径分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 823–827.
  - [18]漆良华, 张旭东, 彭镇华. 湘西北小流域植被恢复区土壤酶活性及养分相关性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 83–88.
  - [19]侯彦会, 周学辉, 焦婷, 等. 甘肃永昌县放牧草地土壤脲酶活性与土壤肥力的关系初探[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 111–116.
  - [20]安韶山, 黄懿梅, 郑粉莉. 黄土丘陵区草地土壤脲酶活性特征及其与土壤性质的关系[J]. 草地学报, 2005, 13(3): 233–237.
  - [21]徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
  - [22]贾曼莉, 郭宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 340–347.
  - [23]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.
  - [24]吴玉森, 张艳敏, 冀晓昊, 等. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤养分、酶活性及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 99–108.
  - [25]张桂玲. 秸秆和生草覆盖对桃园土壤养分含量、微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1236–1244.
  - [26]龙妍, 惠竹梅, 程建梅, 等. 生草葡萄园土壤微生物分布及土壤酶活性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(6): 99–103.
  - [27]安韶山, 黄懿梅, 刘梦云. 宁南山区土壤酶活性特征及其与肥力因子的关系[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 55–58.
  - [28]明道绪. 通径分析[M]. 雅安:四川农业大学出版社, 1990.
  - [29]王菊兰, 何文寿, 何进智. 宁夏引黄灌区温室土壤脲酶、过氧化氢酶活性与土壤肥力因素的关系[J]. 宁夏大学学报:自然科学版, 2007, 28(2): 162–165.