

# 渭北旱塬苹果园土壤酶特征研究

谭向平<sup>1</sup>, 和文祥<sup>1,\*</sup>, 杨 静<sup>1</sup>, 孔 龙<sup>1</sup>, 王旭东<sup>1</sup>, 郝明德<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup> 中国科学院, 水利部西北水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘 要:** 采用非缓冲液法, 研究渭北旱塬苹果园不同层次土壤磷酸酶、转化酶、脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶活性特征, 探讨其与土壤肥力的关系, 构建土壤总体酶活性参数。结果表明: 土壤磷酸酶、转化酶、脲酶、脱氢酶活性的空间变异性明显, 随剖面深度增加而降低, 对肥力和环境变化较敏感, 与多数土壤化学性质呈显著或极显著正相关, 显示其在一定程度上可表征果园土壤肥力水平; 而过氧化氢酶的变化规律性较差; 土壤化学性质与酶活性主成分分析组成的土壤肥力信息系统较好地表征了土壤肥力水平的差异, 获得的综合得分, 计算的土壤总体酶活性参数 (TEI) 与土壤理化性质达显著或极显著正相关, 且尤以 TEI 的相关性最高。不同层次的土样表现出类似的规律性变化。显示出 TEI 比单一酶系可更好地表征土壤肥力水平。

**关键词:** 土壤; 酶; 苹果园; 酶活性; 主成分分析; 生物学指标

**中图分类号:** S 606.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2011) 04-0621-10

## Characteristics of Enzyme Activities in Apple Orchard Soil in Weibei Arid Region

TAN Xiang-ping<sup>1</sup>, HE Wen-xiang<sup>1,\*</sup>, YANG Jing<sup>1</sup>, KONG Long<sup>1</sup>, WANG Xu-dong<sup>1</sup>, and HAO Ming-de<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** This study investigated invertase, urease, phosphatase, catalase, dehydrogenase at different soil layers in apple orchard at Weibei arid region, and the relationship between soil enzyme activities and fertility by no-buffer method. A total enzyme activity index (TEI) was established. The results showed that the activities of invertase, urease, phosphatase and dehydrogenase had significant spatial variations and greatly decreased with increasing soil depth; And positively correlated with soil chemical properties significantly except soil catalase and thus can be used to indicate soil fertility. By analyzing the biochemical activities and chemical properties of soil using principal component analysis (PCA), the composite scores of the soil fertility information system with chemical properties and enzyme activities as principal components and TEI had remarkably significant positive correlation with soil chemical properties, TEI is better. These correlations happened similarly at different soil layers. This study indicated that TEI was a better index as an indicator for apple orchard soil fertility than many individual enzymes at

收稿日期: 2010-11-29; 修回日期: 2011-03-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KSCX-YW-09-07); 西北农林科技大学“青年学术骨干人才支持”计划联合资助项目

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: wxhe1968@163.com)

Weibei arid region.

**Key words:** soil; enzyme; apple orchard; enzyme activity; principal component analysis; biological indicator

土壤酶在营养物质转化、能量代谢、污染物降解等方面发挥作用 (Burns, 1982; Welp, 1999), 被称为土壤生态系统核心 (Tabatabai & Dick, 2002), 土壤脲酶、磷酸酶、脱氢酶等常作为表征土壤肥力的指标 (Benitez et al., 2006; Trasar-Cepeda et al., 2008; Iovieno et al., 2009)。但研究报道土壤脲酶活性与有机质的关系大相径庭, 分别有显著正相关 (赵林森和王九龄, 1995)、显著负相关 (於忠祥 等, 1996) 和不相关 (Sakorn, 1987) 的报道。

渭北旱塬作为我国两大苹果产区之一 (杨文杰 等, 2004), 长期的传统管理模式引起土壤结构破坏, 土传病害严重, 肥力退化, 生物多样性降低等诸多问题, 已严重妨碍了当地果业的可持续发展 (殷瑞敬 等, 2009)。对果园土壤退化等过程中酶活性的变化方面, 仅见一些不同耕作模式和管理措施影响土壤酶活性的报道 (张成娥和梁银丽, 1999; 张成娥 等, 2001; 刘建新 等, 2005; Floch et al., 2009)。国内外对林果类土壤酶的研究较少, 且结果不尽一致, 亟需深入开展果园土壤酶活性与土壤肥力水平间的关系研究。

为此作者采用非缓冲液法, 在渭北旱塬的长武县境内较大范围采样, 较为系统地分析与土壤碳、氮、磷循环以及微生物活性密切相关的土壤酶活性, 探讨土壤酶的变化规律, 构建土壤肥力的生物学指标, 为苹果园的可持续发展和准确快速评价提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样

2008 年 10 月在陕西省长武县 5 个乡镇 (芋园乡、相公乡、彭公乡、马寨乡和地掌乡) 选取不同种植年限果园 25 个进行采样, 围绕苹果树树冠的阴影正下方五点法布点, 先去除 0 ~ 5 cm 土样后, 分别采集表层 (5 ~ 20 cm) 和下层 (20 ~ 40 cm) 土样, 混匀风干, 过 1 mm 尼龙筛备用。常规方法测定土壤化学性质 (鲍士旦, 2000)。当地土壤为黑垆土 (堆垫湿润均腐土, Cumuli-Ustic Isohumosols)。

### 1.2 测定方法

非缓冲液法测定土壤酶活性。转化酶: 3, 5 - 二硝基水杨酸比色法; 脲酶: 靛酚蓝比色法; 磷酸酶: 磷酸苯二钠比色法; 过氧化氢酶: 容量法; 脱氢酶: TTC 法。重复 3 次, 并设无土和无基质处理为对照 (关松荫, 1987)。

### 1.3 数据处理

采用 EXCEL 和 DPS7.05 软件对数据进行相关、多重比较和主成分分析等。

对土壤酶和化学性质进行主成分分析, 根据综合主成分函数模型  $F = \sum b_j Z_j = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots + b_m Z_m$  ( $b$  为贡献率) 获得综合主成分值并进行排序, 对各样品的肥力水平进行综合评价 (袁志发和周静芋, 2002)。

总体酶活性参数 TEI (Total enzyme index)  $= \sum_{i=1}^n X_i / \bar{X}_i$ , 其中  $\bar{X}_i$  为第  $i$  种土壤酶活性, 为第  $i$  种酶活性的平均值 (和文祥 等, 2010)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土样有机质

有机质是土壤肥力水平的重要指标之一。表 1 显示有机质在果园表层和下层土壤的范围和均值分别为  $5.32 \sim 16.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $11.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $3.88 \sim 12.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $9.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 下层平均值为表层平均值的 82.21%。参照黄土高原土壤养分含量分级标准(贾恒义 等, 1994), 可知本地区果园土壤有机质处于中等水平。与我国无公害苹果技术规程要求有机质含量  $\geq 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  相比, 本地区达标土样仅占 4%, 有必要开展提高本地果园土壤有机质的工作, 以满足苹果高产、丰产、绿色的要求。

表 1 供试土壤的化学性质  
Table 1 Chemical properties of soils tested

土样 编号 Soil No.	经度 Longitude 107°	纬度 Latitude 35°	种植 年限 Year	土层/cm Layer	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Organic matter	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Total N	全磷/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Total P	全钾/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Total K	碱解氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Alkali hydrolysable N	速效磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Available P	速效钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Available K	pH
1	56.217'	15.712'	16	5~20	5.32	0.44	0.58	20.99	19.25	4.09	125.48	8.53
				20~40	3.88	0.34	0.56	20.16	14.00	3.33	72.73	8.66
2	56.321'	15.557'	8	5~20	12.30	0.76	1.17	22.30	35.00	7.41	248.98	8.34
				20~40	9.91	1.09	1.51	21.28	24.50	11.03	204.62	8.53
3	54.911'	13.847'	23	5~20	11.61	0.89	0.71	21.60	40.25	9.45	246.58	8.45
				20~40	8.31	0.78	0.66	20.85	29.75	4.57	207.01	8.48
4	56.234'	10.995'	13	5~20	13.29	1.09	1.62	22.12	56.00	76.56	438.66	8.13
				20~40	12.11	1.00	1.36	23.49	50.75	96.80	277.39	8.10
5	55.580'	11.820'	13	5~20	10.67	0.82	0.93	25.10	31.50	7.33	315.90	8.46
				20~40	9.76	0.89	0.82	21.70	29.75	4.31	232.31	8.52
6	55.538'	12.802'	17	5~20	9.97	1.02	0.86	23.81	35.00	9.87	69.13	8.42
				20~40	8.32	0.83	0.64	22.48	36.75	7.98	69.13	8.06
7	55.374'	12.691'	9	5~20	11.24	1.01	0.91	21.76	47.25	25.16	151.86	8.27
				20~40	9.77	1.07	0.77	22.85	33.25	1.44	116.12	8.43
8	52.712'	13.137'	15	5~20	12.20	1.05	0.75	22.91	43.75	10.35	338.10	8.09
				20~40	8.28	0.85	0.65	22.17	31.50	1.44	84.72	8.08
9	52.713'	13.128'	5	5~20	12.47	0.93	0.75	21.60	47.25	6.76	142.27	8.28
				20~40	9.69	0.89	0.64	21.19	36.75	3.02	95.51	8.31
10	51.872'	12.964'	10	5~20	11.72	0.97	0.84	23.47	42.00	6.98	127.88	8.35
				20~40	10.02	0.84	0.68	22.80	36.75	4.15	72.73	8.33
11	52.028'	13.984'	14	5~20	16.46	1.27	0.88	22.96	63.00	18.40	323.73	8.32
				20~40	12.10	0.93	0.85	22.18	43.75	20.00	280.64	8.42
12	50.052'	15.604'	16	5~20	9.86	0.85	0.67	20.48	36.75	11.51	263.37	8.43
				20~40	8.10	0.67	0.59	19.57	29.75	6.70	172.24	8.36
13	50.186'	16.030'	20	5~20	13.68	1.09	1.19	21.19	45.50	39.15	319.82	8.33
				20~40	10.43	0.81	1.29	22.28	42.00	44.34	217.95	8.01
14	50.268'	16.227'	11	5~20	10.38	0.90	0.83	21.48	39.55	28.49	305.45	8.72
				20~40	6.77	0.89	0.74	21.53	22.75	13.96	262.35	8.71
15	48.669'	13.920'	16	5~20	11.84	0.99	1.16	21.67	40.25	34.22	345.94	8.12
				20~40	10.18	0.96	1.06	22.07	33.25	18.99	386.42	8.07
16	47.721'	16.954'	18	5~20	9.31	0.85	1.08	21.74	35.00	39.60	399.48	8.55
				20~40	7.91	0.62	0.81	20.86	21.00	12.69	368.14	8.44
17	47.583'	16.348'	12	5~20	13.18	1.13	1.08	20.04	52.50	37.68	291.08	8.22
				20~40	9.50	0.96	0.81	21.75	35.00	18.28	293.70	8.09

续表 1

土样 编号 Soil No.	经度 Longitude 107°	纬度 Latitude 35°	种植 年限 Year	土层/cm Layer	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Organic matter	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Total N	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Total P	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Total K	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) Alkali hydrolysable N	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) Available P	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) Available K	pH
18	47.910'	15.141'	18	5 ~ 20	12.01	1.03	1.19	22.81	45.50	54.13	429.52	7.89
				20 ~ 40	10.68	1.14	1.01	22.82	42.00	39.81	352.76	7.97
19	48.166'	15.026'	12	5 ~ 20	13.98	1.21	1.31	22.14	52.50	54.13	292.39	8.04
				20 ~ 40	12.82	1.09	1.22	22.23	28.00	2.50	298.92	8.07
20	48.050'	14.709'	15	5 ~ 20	12.57	1.04	0.81	21.51	63.00	9.89	225.78	8.28
				20 ~ 40	10.27	1.04	0.64	21.80	35.00	4.65	242.76	8.37
21	45.752'	17.786'	7	5 ~ 20	8.57	0.91	0.98	21.90	45.50	15.96	343.32	8.33
				20 ~ 40	8.16	0.78	0.74	21.36	29.75	14.77	259.74	8.18
22	45.405'	16.914'	13	5 ~ 20	10.51	1.08	1.00	19.59	45.50	29.64	127.88	7.98
				20 ~ 40	8.52	0.95	0.69	21.24	38.50	17.56	72.48	8.04
23	45.377'	15.572'	15	5 ~ 20	11.91	1.11	1.10	19.38	45.50	49.25	254.52	8.19
				20 ~ 40	11.56	1.02	1.21	21.93	47.25	43.49	174.67	8.00
24	45.369'	15.054'	14	5 ~ 20	12.03	1.08	1.28	21.56	50.75	46.37	83.52	8.27
				20 ~ 40	9.97	0.92	0.93	20.71	35.00	20.07	308.06	8.37
25	45.946'	13.487'	13	5 ~ 20	12.39	0.99	1.08	20.36	49.00	30.94	275.36	8.27
				20 ~ 40	10.99	0.85	0.77	20.16	38.50	11.71	212.72	8.17

2.2 土壤酶活性

转化酶是碳素循环的重要催化酶。表 2 显示供试土壤的转化酶活性范围 137.40 ~ 476.77  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 每个土样表层酶活性为下层的 0.935 ~ 1.847 倍, 其中低于下层的仅两个土样; 60%的土样在两土层间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

表 2 供试土壤酶活性  
Table 2 Enzyme activities of soils tested

土样编号 Soil No.	土层/cm Layer	转化酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Invertase	脲酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Urease	磷酸酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Phosphatase	过氧化氢酶/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Catalase	脱氢酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Dehydrogenase
1	5 ~ 20	210.46±15.56aA	9.57±0.04aA	19.73±0.32aA	12.90±0.74aA	0.30±0.00aA
	20 ~ 40	137.40±5.86bA	8.85±0.09bB	7.29±0.54bB	15.15±0.74aA	0.13±0.01bB
2	5 ~ 20	283.92±23.75aA	33.06±0.63aA	27.92±0.57aA	16.13±0.85aA	0.78±0.01aA
	20 ~ 40	270.92±20.11aA	7.59±0.42bB	9.13±0.27bB	14.85±0.11aA	0.32±0.01bB
3	5 ~ 20	325.45±17.45aA	44.95±0.89aA	25.76±0.53aA	16.13±0.21aA	0.62±0.01aA
	20 ~ 40	193.52±13.30bB	17.42±0.25bB	15.73±0.63bB	13.88±0.85aA	0.29±0.01bB
4	5 ~ 20	252.29±15.30aA	43.50±0.96aA	33.55±0.28aA	13.95±0.32aA	0.41±0.01aA
	20 ~ 40	221.38±4.56bA	48.97±1.05bA	23.13±0.00bB	13.95±0.32aA	0.15±0.00bB
5	5 ~ 20	336.95±17.08aA	52.11±1.72aA	27.12±1.39aA	16.73±0.42aA	0.62±0.01aA
	20 ~ 40	334.77±17.59aA	48.10±0.32bB	26.01±1.88aA	16.88±1.27aA	0.62±0.02aA
6	5 ~ 20	366.29±3.52aA	43.85±3.43aA	28.17±1.17aA	16.35±0.53aA	0.83±0.01aA
	20 ~ 40	218.40±9.58bB	30.78±0.47bA	12.62±0.54bB	15.75±0.53aA	0.52±0.03bB
7	5 ~ 20	339.54±15.86aA	69.56±1.47aA	26.06±0.11aA	16.28±0.42aA	0.66±0.00aA
	20 ~ 40	298.01±21.00aA	28.65±0.90bB	19.86±0.36bB	16.20±0.53aA	0.50±0.01bB
8	5 ~ 20	452.51±21.60aA	89.86±3.26aA	30.89±1.60aA	15.30±0.11bB	0.81±0.00aA
	20 ~ 40	244.89±24.71bB	22.62±0.45bB	17.63±2.24bA	17.55±0.11aA	0.46±0.02bB
9	5 ~ 20	476.77±21.86aA	47.48±2.13aA	39.63±2.88aA	17.10±0.32bA	1.04±0.00aA
	20 ~ 40	343.46±28.58bB	41.21±0.23aA	18.80±0.00bB	16.05±0.11aA	0.50±0.01bB

续表 2

土样编号 Soil No.	土层/cm Layer	转化酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Invertase	脲酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Urease	磷酸酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Phosphatase	过氧化氢酶/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Catalase	脱氢酶/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Dehydrogenase
10	5 ~ 20	404.90±25.41aA	65.08±1.13aA	29.00±0.64aA	17.33±0.00aA	0.63±0.02aA
	20 ~ 40	266.45±19.80bA	39.23±1.08bB	18.53±0.78bB	15.53±0.42bA	0.56±0.00bA
11	5 ~ 20	406.10±22.72aA	55.63±0.42aA	45.10±0.99aA	17.40±0.11aA	1.48±0.02aA
	20 ~ 40	385.73±24.26aA	56.69±0.01aA	25.76±0.75bB	13.35±0.74bA	0.77±0.03bB
12	5 ~ 20	265.94±11.35aA	19.36±0.59aA	27.00±0.88aA	13.13±0.21aA	0.26±0.03bB
	20 ~ 40	155.57±14.64bB	5.50±0.34bB	22.31±0.68bA	14.25±0.32aA	0.63±0.02aA
13	5 ~ 20	280.32±18.34aA	46.12±1.01aA	37.97±1.14aA	15.00±0.32aA	0.87±0.03aA
	20 ~ 40	299.78±8.89aA	76.93±0.32bB	21.17±1.07bB	14.85±0.11aA	0.49±0.01bB
14	5 ~ 20	393.77±6.22aA	30.45±0.50aA	30.79±0.39aA	16.88±0.64aA	0.75±0.00aA
	20 ~ 40	378.88±20.91aA	12.75±1.18bB	14.39±0.39bB	17.40±0.53aA	0.37±0.01bB
15	5 ~ 20	391.42±26.68aA	58.98±0.06aA	26.67±0.96aA	13.95±0.32bA	0.58±0.02aA
	20 ~ 40	301.62±9.80aA	54.72±0.62bA	19.56±0.29bB	15.45±0.32aA	0.48±0.04aA
16	5 ~ 20	336.27±22.79aA	20.71±1.28aA	22.25±1.56aA	16.58±0.21aA	0.53±0.01aA
	20 ~ 40	337.04±5.45aA	17.48±0.91aA	12.67±0.88bA	16.43±0.00aA	0.53±0.01aA
17	5 ~ 20	356.51±36.59aA	68.64±1.51aA	31.54±0.85aA	15.08±0.21aA	0.84±0.04aA
	20 ~ 40	345.00±17.51aA	27.02±0.70bB	16.18±0.19bB	15.45±0.53aA	0.74±0.04aA
18	5 ~ 20	385.13±25.41aA	68.09±1.57aA	32.39±0.11aA	14.25±0.11aA	0.65±0.00aA
	20 ~ 40	325.84±3.11aA	53.74±0.17bB	23.95±0.32bB	14.25±0.32aA	0.72±0.03aA
19	5 ~ 20	440.63±13.50aA	66.72±0.36aA	31.94±0.00aA	15.30±0.11aA	1.03±0.02aA
	20 ~ 40	339.26±18.30bA	51.36±0.19bB	27.62±0.43bB	15.23±0.64aA	0.82±0.02bA
20	5 ~ 20	353.43±15.91aA	37.23±1.05aA	29.43±0.99aA	15.68±0.42aA	0.83±0.03bA
	20 ~ 40	349.70±10.56aA	32.59±0.18bA	18.70±1.47bA	16.95±0.53aA	1.02±0.00aA
21	5 ~ 20	292.48±11.73aA	22.01±1.42aA	16.87±0.92aA	13.65±0.11bB	0.53±0.00aA
	20 ~ 40	216.74±6.70bA	13.96±0.41bA	12.31±0.55bA	16.13±0.21aA	0.34±0.02bA
22	5 ~ 20	295.86±25.10aA	74.62±1.41aA	25.46±0.96aA	13.58±0.85aA	0.53±0.03aA
	20 ~ 40	197.94±11.61bB	41.44±1.49bB	11.98±0.83bB	15.08±0.85aA	0.43±0.03aA
23	5 ~ 20	337.52±10.25aA	56.00±0.29aA	29.83±0.43aA	15.30±0.32aA	0.67±0.01bA
	20 ~ 40	294.05±1.81bA	60.52±0.38bB	17.70±1.92bA	13.58±0.42bA	0.84±0.02aA
24	5 ~ 20	380.39±14.64aA	68.57±0.13aA	25.24±0.21aA	13.65±0.95aA	0.69±0.01bB
	20 ~ 40	290.27±18.34bA	34.96±1.02bB	17.00±0.18bB	16.28±0.64aA	0.54±0.00aA
25	5 ~ 20	328.47±9.58aA	74.81±1.10aA	20.49±0.32aA	13.13±0.64bA	0.58±0.00bA
	20 ~ 40	310.35±2.56bA	13.75±0.00bB	15.56±0.14bB	17.03±0.00aA	0.63±0.02aA
均值 Average	5 ~ 20	342.81	50.68	28.86	15.26	0.69
	20 ~ 40	282.28	33.87	17.82	15.50	0.54
变异系数/%	5 ~ 20	18.58	40.35	21.46	9.46	35.99
CV	20 ~ 40	24.09	56.89	29.49	7.74	39.55

注：不同小写字母表示 5%显著差异水平，不同大写字母表示 1%显著差异水平。

Note: Different small and capital letters mean significance at 5% and 1% levels.

脲酶是水解尿素肥料的唯一酶类。供试土样的脲酶活性为  $5.50 \sim 89.86 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ；每个土样表层酶活性为下层的  $0.60 \sim 5.44$  倍，其中低于下层的有 4 个土样；两土层脲酶活性平均值相差 1.5 倍，且 88% 的供试土样脲酶活性在土层间差异达显著水平，其中 68% 的呈极显著差异。

磷酸酶可催化土壤有机磷为无机磷。土壤磷酸酶活性为  $7.29 \sim 45.10 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ；表层的酶活性为下层的  $1.04 \sim 3.06$  倍；整体上层磷酸酶活性是下层的 1.6 倍，且其中 96% 和 72% 的土样酶活性在两土层间差异分别达显著和极显著水平。

过氧化氢酶可减轻或解除土壤中的过氧化氢的毒害作用，促进有机物的分解。供试土样的过氧

化氢酶活性为  $12.90 \sim 17.55 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 每个土样表层的酶活性为下层的  $0.77 \sim 1.30$  倍, 其中一半低于下层土壤; 两土层过氧化氢酶活性均值较接近, 相差仅  $1.57\%$ ;  $68\%$  土样酶活性在两土层间差异不显著, 这可能是由于果树根系较深, 使得在  $40 \text{ cm}$  剖面中过氧化氢酶活性无明显变化。

脱氢酶活性反映土壤微生物的数量和活性。供试土样的脱氢酶活性为  $0.13 \sim 1.48 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 每个土样表层的酶活性为下层土壤的  $0.41 \sim 2.73$  倍, 其中低于下层土壤的仅 5 个土样; 表层酶活性是下层的  $1.3$  倍, 且  $52\%$  的土样酶活性在两层次间达显著差异。

可见随土壤剖面深度增加, 除过氧化氢酶外, 其余土壤酶的  $80\%$  以上样品活性降低, 降幅随土样和土壤酶种类不同而有明显差异, 如土壤脲酶活性是急剧减小, 幅度较大, 而磷酸酶的变幅较小。

表 2 显示试果园土壤中酶活性变异系数呈现脲酶 > 脱氢酶 > 磷酸酶 > 转化酶 > 过氧化氢酶的规律性变化, 其中两土层脲酶变异系数为过氧化氢酶的  $4.27$  和  $7.35$  倍, 下层土壤呈现类似变化, 揭示在本地区果园土壤中, 脲酶、脱氢酶对土壤环境变化等较敏感, 过氧化氢酶则较迟钝。不同层次间除过氧化氢酶外, 下层土壤酶活性变异系数大于表层, 表明在果园土壤中  $20 \sim 40 \text{ cm}$  土层土壤酶对肥力、环境等变化更为敏感。

### 2.3 土壤酶活性与土壤化学性质相关分析

如表 3 所示, 土壤化学性质和酶活性呈显著或极显著正相关的为: 表层土壤的转化酶、脲酶、磷酸酶、脱氢酶与有机质、全氮、碱解氮, 过氧化氢酶与全钾、pH; 下层土壤的脲酶、磷酸酶、转化酶与有机质、碱解氮, 脲酶与全钾、全氮、速效磷、全磷, 脱氢酶与有机质。而土壤脲酶与 pH 呈极显著负相关。表明土壤转化酶、脲酶、磷酸酶和脱氢酶与理化性质的关系十分密切; 不管是在果园的表层还是下层土壤上都可作为土壤肥力指标之一。

表 3 土壤酶活性与土壤化学性质相关系数  
Table 3 Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil chemical properties

土壤酶 Soil enzymes	土层/cm Layer	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Alkali hydrolysable N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	pH
转化酶 Invertase	5 ~ 20	0.480*	0.491*	-0.071	0.318	0.364	-0.034	-0.037	-0.240
	20 ~ 40	0.504**	0.522**	0.220	0.307	0.175	-0.024	0.499*	0.024
脲酶 Urease	5 ~ 20	0.556**	0.651**	0.266	0.041	0.447*	0.265	-0.057	-0.684**
	20 ~ 40	0.658**	0.451*	0.468*	0.622**	0.685**	0.482*	0.173	-0.557**
磷酸酶 Phosphatase	5 ~ 20	0.763**	0.564**	0.122	0.180	0.509**	0.158	0.167	-0.212
	20 ~ 40	0.702**	0.458*	0.245	0.440*	0.488*	0.245	0.301	-0.273
过氧化氢酶 Catalase	5 ~ 20	0.311	0.145	-0.265	0.515**	0.057	-0.332	-0.037	0.398*
	20 ~ 40	-0.252	-0.038	-0.361	-0.064	-0.351	-0.447*	-0.064	0.204
脱氢酶 Dehydrogenase	5 ~ 20	0.729**	0.594**	0.017	0.255	0.553**	-0.060	-0.012	-0.124
	20 ~ 40	0.535**	0.450*	-0.019	0.113	0.316	-0.177	0.215	-0.291

注: 自由度  $n - 2 = 23$ ,  $r_{0.05} = 0.396$ ,  $r_{0.01} = 0.505$ 。下同。

Note: Freedom  $n - 2 = 23$ ,  $r_{0.05} = 0.396$ ,  $r_{0.01} = 0.505$ . The same below.

土壤酶间相关分析 (表 4) 表明, 表层土的转化酶与脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、脱氢酶, 磷酸酶与过氧化氢酶、脱氢酶, 过氧化氢酶与脱氢酶分别呈显著或极显著正相关。下层土壤转化酶与磷酸酶、脱氢酶, 脲酶与磷酸酶, 磷酸酶与脱氢酶分别达到显著或极显著正相关。揭示出由于各种土壤酶性质、来源等的不同, 其间关系并不完全一致; 但总的来讲土壤脲酶、磷酸酶、转化酶和脱氢酶是关系密切的酶类, 这可能与它们中的 3 个同属水解酶类, 脱氢酶代表微生物活性有关。而过

氧化氢酶属于氧化还原酶类。

表 4 土壤酶活性间的相关系数  
Table 4 Correlation coefficients among soil enzyme activities

土壤酶 Soil enzyme	转化酶 Invertase		脲酶 Urease		磷酸酶 Phosphatase		过氧化氢酶 Catalase	
	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm
脲酶 Urease	0.548**	0.383						
磷酸酶 Phosphatase	0.464*	0.424*	0.251	0.635**				
过氧化氢酶 Catalase	0.456*	0.343	- 0.016	- 0.266	0.455*	- 0.231		
脱氢酶 Dehydrogenase	0.654**	0.589**	0.331	0.360	0.750**	0.502**	0.547**	0.001

2.4 土壤酶与土壤化学性质的主成分分析

为更好探讨土壤酶与土壤肥力间的关系，对土壤化学性质和酶活性进行了主成分分析。结果发现两土层的前 5 个主成分累计方差贡献率均大于 80%，分别为 86.56%、83.98%，表明这 5 个主成分即可反映土壤肥力系统的变异信息。其中表层土壤中第一主成分综合了磷酸酶、有机质、全氮、碱解氮的信息，第二主成分综合了蔗糖酶、过氧化氢酶、脱氢酶、速效磷，第三、四、五主成分分别综合了脲酶、pH、全钾和速效钾、全磷的信息；下层与表层土壤相比有所差异，但基本类似。

根据特征值和因子载荷量，得到土壤肥力系统的第一至第五主成分函数表达式，计算各土样主成分的得分（图 1），可知表层土样的综合得分最高的为 11 号土样，各土样顺序为 11 > 19 > 9 > 8 > 18 > 10 > 13 > 17 > 20 > 4 > 6 > 5 > 7 > 24 > 14 > 15 > 23 > 2 > 3 > 25 > 16 > 22 > 21 > 12 > 1，揭示出其在一定程度上可反映土样综合肥力水平的差异。

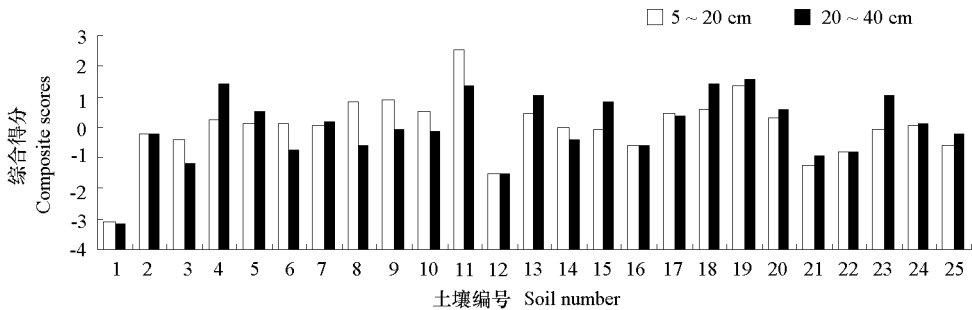


图 1 供试土壤的综合得分  
Fig. 1 The composite scores of soils tested

相关分析（表 5）可见综合得分在表层土中与有机质、全氮、碱解氮和 5 种酶活性均达极显著正相关，在下层土壤中与所有化学性质及 4 种酶活性呈显著或极显著正相关。表明利用土壤酶—化学性质综合信息系统不仅可反映土壤酶与化学性质对土壤肥力的贡献及其相互关系，并可作为指标表征土壤肥力水平高低。

2.5 土壤总体酶活性特征

借鉴利用总体酶活性指标（TEI）来对果园土壤肥力进行初步评价。计算的果园土壤 TEI 值见图 2，表层和下层土样 TEI 值分别在 2.75 ~ 7.09 和 2.39 ~ 6.79 之间，表层土样顺序为：11 > 8 > 9 > 19 > 17 > 10 > 18 > 7 > 13 > 24 > 6 > 23 > 14、20 > 15 > 5 > 22 > 25 > 3 > 2 > 4 > 16 > 12 > 1，与主成分综合得分得到的顺序类似；下层亦同。

表 5 显示 TEI 与有机质、全氮、碱解氮间达极显著正相关，且与土壤酶活性、理化性质的相关系数大于单一酶活性和综合得分的，揭示出 TEI 是监测果园土壤肥力水平的重要指标；而且表层和下层土样 TEI 与主成分综合得分的相关系数分别达 0.930<sup>\*\*</sup>、0.867<sup>\*\*</sup>。进一步佐证了构建的总体酶活性是一个简单、易行、可靠、准确的土壤肥力指标。

表 5 综合得分和总体酶活性与土壤性质相关系数  
Table 5 Correlation coefficient between composite score, TEI and soil properties

项目 Item	综合得分 Composite score		TEI	
	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm
有机质 Organic matter	0.887 <sup>**</sup>	0.904 <sup>**</sup>	0.804 <sup>**</sup>	0.760 <sup>**</sup>
全氮 Total N	0.787 <sup>**</sup>	0.803 <sup>**</sup>	0.734 <sup>**</sup>	0.591 <sup>**</sup>
全磷 Total P	0.284	0.631 <sup>**</sup>	0.106	0.300
全钾 Total K	0.386	0.675 <sup>**</sup>	0.263	0.508 <sup>*</sup>
碱解氮 Alkali hydrolysable N	0.680 <sup>**</sup>	0.670 <sup>**</sup>	0.589 <sup>**</sup>	0.571 <sup>**</sup>
速效磷 Available P	0.219	0.492 <sup>*</sup>	0.087	0.197
速效钾 Available K	0.215	0.495 <sup>*</sup>	- 0.003	0.328
pH	- 0.341	- 0.474 <sup>*</sup>	- 0.393	- 0.416 <sup>*</sup>
转化酶 Invertase	0.731 <sup>**</sup>	0.688 <sup>**</sup>	0.820 <sup>**</sup>	0.719 <sup>**</sup>
脲酶 Urease	0.553 <sup>**</sup>	0.771 <sup>**</sup>	0.710 <sup>**</sup>	0.825 <sup>**</sup>
磷酸酶 Phosphatase	0.801 <sup>**</sup>	0.728 <sup>**</sup>	0.747 <sup>**</sup>	0.799 <sup>**</sup>
过氧化氢酶 Catalase	0.561 <sup>**</sup>	- 0.140	0.484 <sup>*</sup>	- 0.044
脱氢酶 Dehydrogenase	0.849 <sup>**</sup>	0.531 <sup>**</sup>	0.865 <sup>**</sup>	0.757 <sup>**</sup>

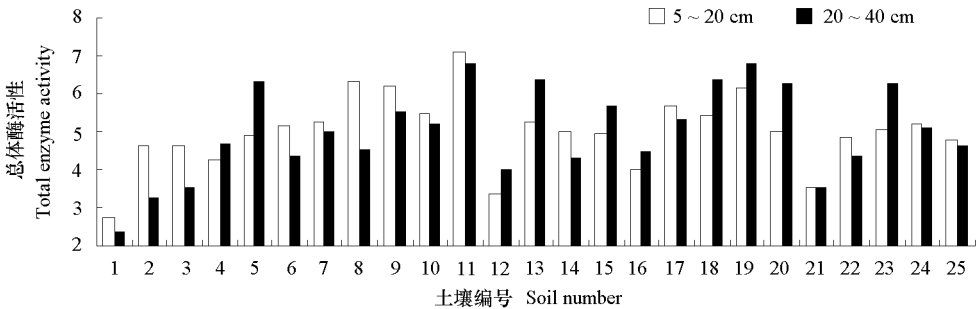


图 2 供试土壤总体酶活性  
Fig. 2 Total enzyme activity index of soils tested

3 讨论

土壤酶与土壤肥力关系一直是国内外学者关注的热点问题之一，研究先后提出了土壤脲酶、转化酶、磷酸酶、脱氢酶、多酚氧化酶等肥力指标（唐玉姝，2008；Yao et al., 2009），但结果并不一致。如本文中以脲酶活性来划分，供试土样酶活性顺序为：8 > 25 > 22 > 7 > 17 > 24 > 18 > 19 > 10 > 15 > 23 > 11 > 5 > 9 > 13 > 3 > 6 > 4 > 20 > 2 > 14 > 21 > 16 > 12 > 1，而其中转化酶和磷酸酶排第一位的 9 号和 11 号土样，在脲酶中分别排第 14 和 12 位；可见采用单一酶系表征土壤肥力水平的高低，结果差异较大，这主要是由于不同酶类在不同土壤中对肥力的敏感性差异所致。此外土壤酶类单位的千差万别，也导致不同土壤酶指标的结果无法比较。但通过相关分析等，显示土壤脲酶、转化酶、磷酸酶和脱氢酶是与土壤性质密切相关的酶类（Puglisi et al., 2006；陈伟 等，2008），故在一定程度上可定性表征土壤肥力水平。



在对酶活性分析的基础上,构建复合酶指标是一种可行的途径。国外一些学者提出了 BIF、EAN 等指标(Beck, 1984; Stefanic et al., 1984),但是由于这些指标仅涉及到两种或者 5 种酶类,结果并不理想。为此作者首次构建的总体酶活性的思路是:a. 不考虑酶活性的量纲和每个土样酶活性绝对值的大小,因为由于单位不同,有的酶活性值很大,有的很小,而且量纲的差异,导致无法比较;而本方法可统一起来,最终的参数是一个无量纲数值,便于进行比较;b. 每一种酶在土壤中发挥的作用是平等的,就是它们的权重是等同的,在土壤生化活性中发挥的作用是一样的,从土壤酶学和多样性原则基本理论上讲,这个是可行的。本文中计算得到的总体酶活性可较好地表征土壤肥力状况,与土壤理化性质等的相关性远远大于单一酶活性和综合得分,揭示出此总体酶活性在表征土壤肥力水平方面更有优势、更加准确。同时此参数还可以应用在环境污染监测等方面,只是选取的土壤酶类不应小于 3 个。

综上所述,除过氧化氢酶外,土壤转化酶、脲酶、磷酸酶、脱氢酶活性的空间变异性明显,对肥力和环境变化较敏感,其活性值与土壤大多数化学性质呈显著或极显著正相关,揭示其在一定程度上可表征果园土壤肥力水平;土壤化学性质与酶活性主成分分析组成的土壤肥力信息系统较好地表征土壤肥力水平的差异,获得的综合得分、计算的土壤总体酶活性参数(TEI)与土壤理化性质达显著或极显著正相关,且尤以 TEI 的相关性最高。揭示出 TEI 比单一酶系可更准确地表征土壤肥力水平。

今后主要是开展选择合适土壤酶的研究,以使针对某方面的酶总体活性计算结果更为合理,如土壤肥力方面应包括主要营养物质转化的作用酶类,污染程度监测方面应包括主要的敏感酶类。

## References

- Bao Shi-dan. 2000. Agricultural chemistry analysis for soil. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 鲍士旦. 2000. 土壤化学分析. 北京: 中国农业出版社.
- Beck T. 1984. Methods and application of soil microbiological analysis at the Landensanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBB) for the determination of some aspects of soil fertility // Nemes M P, Kiss S, Papacostea P, Stefanic G, Rusan M. Proceeding of the fifth symposium on soil biology. Rumania: Bucharest: 13 - 20.
- Benítez E, Nogales R, Campos M, Ruano F. 2006. Biochemical variability of olive orchard soils under different management systems. *Appl Soil Ecol*, 32: 221 - 231.
- Burns R G. 1982. Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biology & Biochemistry*, 12: 423 - 427.
- Chen Wei, Jiang Zhong-wu, Hu Yan-li, Shu Huai-rui. 2008. Study on biological character of rhizosphere microorganism in apple orchard. *Journal of Soil and Water Conservation*, 22 (3): 168 - 171. (in Chinese)
- 陈伟, 姜中武, 胡艳丽, 束怀瑞. 2008. 苹果园土壤微生物生态特征研究. *水土保持学报*, 22 (3): 168 - 171.
- Floch C, Capowiez Y, Criquet S. 2009. Enzyme activities in apple orchard agroecosystems: How are they affected by management strategy and soil properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 61 - 68.
- Guan Song-yin. 1987. Soil enzymes and research. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 关松荫. 1987. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社.
- He Wen-xiang, Tan Xiang-ping, Wang Xu-dong, Hao Ming-de. 2010. Study on total enzyme activity index in soil. *Acta Pedologica Sinica*, 7 (6): 211 - 215. (in Chinese)
- 和文祥, 谭向平, 王旭东, 郝明德. 2010. 土壤总体酶活性指标的初步研究. *土壤学报*, 7 (6): 211 - 215.
- Iovieno P, Morra L, Leone A, Pagano L, Alfani A. 2009. Effect of organic and mineral fertilizers on soil respiration and enzyme activities of two Mediterranean horticultural soils. *Biol Fertil Soils*, 45: 555 - 561.
- Jia Heng-yi, Peng Lin, Peng Xiang-lin, Yu Cun-zu. 1994. The divide region and evaluation of soil nutrient resources in the Loess Plateau Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 8 (3): 22 - 28. (in Chinese)
- 贾恒义, 彭琳, 彭祥林, 余存祖. 1994. 黄土高原地区土壤养分资源分区及其评价. *水土保持学报*, 8 (3): 22 - 28.

- Liu Jian-xin, Wang Xin, Yang Jian-xia. 2005. Effects of covering straw in orchard on humus composition and biological characteristics. *Journal of Soil and Water Conservation*, 19 (4): 93 - 95. (in Chinese)
- 刘建新, 王 鑫, 杨建霞. 2005. 覆草对果园土壤腐殖质组成和生物学特性的影响. *水土保持学报*, 19 (4): 93 - 95.
- Puglisi E, Del Re A A M, Rao M A, Gianfreda L. 2006. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 1673 - 1681.
- Sakorn P P. 1987. Urease activity and fertility status of some lowland rice soils in the central plain. *Thai Journal of Agricultural Science*, 20: 173 - 186.
- Stefanic G, Eliade G, Chirnoageanu J. 1984. Researches concerning a biological index of soil fertility // Nemes M P, Kiss S, Papacostea P, Stefanic G, Rusan M. *Proceedings of the fifth symposium on soil biology*. Rumania: Bucharest: 35 - 45.
- Tabatabai M A, Dick W A. 2002. Enzymes in soil. Research and developments in measuring activities // Burns R G, Dick R P. *Enzymes in the environment. Activity, Ecology, and Applications*. New York: Marcel Dekker: 567 - 595.
- Tang Yu-shu, Ci En, Yan Ting-mei, Wei Chao-fu, Yang Lin-zhang, Shen Ming-xing. 2008. Relationship between soil enzyme activity and soil fertility of paddy fields under wheat-rice cropping system in a long-term experiment in Taihu Lake Region. *Acta Pedologica Sinica*, 45 (5): 1000 - 1006. (in Chinese)
- 唐玉姝, 慈 恩, 颜廷梅, 魏朝富, 杨林章, 沈明星. 2008. 太湖地区长期定位试验稻麦两季土壤酶活性与土壤肥力关系. *土壤学报*, 45 (5): 1000 - 1006.
- Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Gil-Sotres F. 2008. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, 40 (9): 2146 - 2155.
- Welp G. 1999. Inhibitory effects of the total and water-soluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a loess soil. *Biol Fertil Soils*, 30: 132 - 139.
- Yang Wen-jie, Wu Fa-qi, Cui Bin, Fang Li. 2004. Strategy status of apple industry in Shaanxi economy development and the models of apple industrialization in Weiwei Loess Plateau. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 20 (5): 284 - 377. (in Chinese)
- 杨文杰, 吴发启, 崔 彬, 方 丽. 2004. 苹果产业在陕西省经济发展中的战略地位及渭北地区苹果产业化发展模式研究. *中国农学通报*, 20 (5): 284 - 377.
- Yao Huai-ying, Bowman D, Rufty T, Shi Wei. 2009. Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: Implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 41 (7): 1425 - 1432.
- Yin Rui-jing, Wen Xiao-xia, Liao Yun-cheng, Huang Jin-hui, Gao Mao-sheng. 2009. Effect of tillage and mulching on enzyme activities of apple orchard soil. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (5): 717 - 722. (in Chinese)
- 殷瑞敬, 温晓霞, 廖允成, 黄金辉, 高茂盛. 2009. 耕作和覆盖对苹果园土壤酶活性的影响. *园艺学报*, 36 (5): 717 - 722.
- Yu Zhong-xiang, Wang Wei-yun, Sha Zong-heng, Xia Ju-hua. 1996. Study on characteristics of enzyme activities in vegetable garden soil of Hefei suburb. *Chinese Journal of Soil Science*, 27 (4): 179 - 181. (in Chinese)
- 於忠祥, 汪维云, 沙宗珩, 夏菊花. 1996. 合肥郊区菜园土壤酶活性研究. *土壤通报*, 27 (4): 179 - 181.
- Yuan Zhi-fa, Zhou Jing-yu. 2002. *Multivariate statistical analysis*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 袁志发, 周静芋. 2002. 多元统计分析. 北京: 科学出版社.
- Zhang Cheng-e, Du She-ni, Bai Gang-shuan, Liang Yin-li. 2001. Influence of intercropping in the garden on soil microbe and enzymatic activity in highland of Loess Plateau. *Soil and Environmental Sciences*, 10 (2): 121 - 123. (in Chinese)
- 张成娥, 杜社妮, 白岗栓, 梁银丽. 2001. 黄土塬区果园套种对土壤微生物及酶活性的影响. *土壤与环境*, 10 (2): 121 - 123.
- Zhang Cheng-e, Liang Yin-li. 1999. Study on soil nutrients and enzymatic activity in intercropping young apple orchards in gully region of the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 17 (14): 22 - 26. (in Chinese)
- 张成娥, 梁银丽. 1999. 高原沟壑区套作苹果幼园土壤养分及酶活性研究. *干旱地区农业研究*, 17 (14): 22 - 26.
- Zhao Lin-sen, Wang Jiu-ling. 1995. Research on relations between growth effect and soil enzyme activities and soil nutrient factors in mixed poplar and black locust plantations. *Journal of Beijing Forestry University*, 17 (4): 1 - 7. (in Chinese)
- 赵林森, 王九龄. 1995. 杨槐混交林生长及土壤酶与肥力的相互关系. *北京林业大学学报*, 17 (4): 1 - 7.