

# 纸坊沟流域土壤酶活性与土壤肥力关系研究

刘庆新<sup>1</sup>, 吴发启<sup>1\*</sup>, 刘海斌<sup>1</sup>, 张青峰<sup>1</sup>, 张金鑫<sup>1</sup>, 李宏亮<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 内蒙古自治区通辽市水土保持局, 内蒙古通辽 028000)

**摘要:** 本文通过野外调查和室内分析相结合, 运用相关分析和通径分析等方法, 研究了纸坊沟流域空间尺度范围内不同土地利用方式土壤肥力与土壤酶活性的内在关系。结果表明: 土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶之间均呈极显著正相关; 有机质、全氮和碱解氮通过直接作用和彼此间接作用成为影响脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性的主要因素, 它们对 4 种酶的直接通径系数分别为 0.148、0.415、0.345、-0.018; 0.241、0.202、0.190、0.318 和 0.394、0.375、0.507、0.277; 而 pH 对这 4 种酶活性的直接作用在很大程度上通过其他因素的间接作用所抵消; 4 种土壤酶活性可以作为黄土丘陵沟壑区小流域土壤肥力的评价指标。

**关键词:** 土壤酶活性; 土壤肥力; 相关分析; 通径分析; 纸坊沟

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)05-1100-07

## Study on the relationships between soil enzyme activities and soil fertility in Zhifanggou Watershed

LIU Qing-xin<sup>1</sup>, WU Fa-qi<sup>1\*</sup>, LIU Hai-bin<sup>1</sup>, ZHANG Qing-feng<sup>1</sup>, ZHANG Jin-xin<sup>1</sup>, LI Hong-liang<sup>2</sup>

(1 College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Tongliao Soil and Water Conservation Bureau, Tongliao, Inner Mongolia 028300, China)

**Abstract:** The relationships between soil enzyme activities and soil fertility under the different land uses (forest, shrub, grass and farmland) in the Zhifanggou watershed were studied through field investigation and laboratory analysis. The correlation between soil enzyme activities and soil fertility were evaluated by the methods of correlation analysis and path analysis. The results there are significant positive correlations between soil organic matter, total N, available N, available K, urease, invertase, alkaline-phosphatase and catalase. Soil organic matter, total N and available N are important factors of affecting activities of urease, invertase, alkaline-phosphatase and catalase, and their direct path coefficients to the four enzymes are 0.148, 0.415, 0.345, -0.018; 0.241, 0.202, 0.190, 0.318 and 0.394, 0.375, 0.507, 0.277, respectively. The direct impacts of pH values upon four enzymes are largely minimized by the indirect effects of other factors. The results derived from correlation analysis and path analysis indicate that the four enzyme activities can be used to evaluate soil fertility in the loess hilly region.

**Key words:** soil enzyme activity; soil fertility; correlation analysis; path analysis; Zhifanggou watershed

土壤酶是土壤生态系统中各种生化反应的催化剂, 它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>[1-2]</sup>, 在土壤生态系统的物质循环和能量流动方面扮演着重要角色。近年来, 不同土地利用方式下土壤酶活性与土壤理化性质的研究成为探讨土地利用生态效应的热点问题之一, 已成为微

观研究和宏观分析相结合的发展趋势。土壤酶活性作为能较为敏感地反映土壤中生物活性的预警指标已被广泛接受<sup>[3-4]</sup>。许多学者对不同土地利用方式下或长期施肥条件下的红壤、黑土、黑垆土、褐潮土、棕色石灰土、冲积土等研究表明: 土壤蛋白酶、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性与土壤有机质、

收稿日期: 2008-09-22

接受日期: 2009-03-24

基金项目: 中国科学院知识创新项目“黄土高原旱果复合型生态经济建设模式试验示范研究”(KZCX2-XB2-05-01)资助。

作者简介: 刘庆新(1982—)男, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀及流域管理研究。E-mail: liuqingxin666@163.com

\* 通讯作者 E-mail: wufaq@263.net

氮、磷等土壤肥力呈显著或极显著相关,土壤酶活性可以作为衡量土壤肥力的指标<sup>[5-14]</sup>,但关于小流域尺度范围内的土壤酶活性与土壤肥力的关系研究尚未见报道。为此,本文以黄土高原丘陵沟壑区纸坊沟流域为研究对象,分析小流域空间尺度范围内土壤酶活性和土壤肥力的分布特征,并运用通径分析方法进一步探讨土壤酶活性与土壤肥力的关系,旨在揭示小流域空间尺度内土壤酶活性作为土壤肥力指标的可行性,为评价黄土丘陵沟壑区小流域水土保持治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

纸坊沟流域(36°42′~36°46′N,109°13′~109°16′E)位于延河支流杏子河下游的一级支流,属于黄土丘陵沟壑区第二副区,隶属于陕西省安塞县。流域面积 8.27 km<sup>2</sup>,海拔 1100~1400 m;暖温带半干旱气候,年平均气温 8.8℃,年平均降水量 549.1mm,其中 7~9 月份降水量占全年的 61%。土壤类型为黄绵土,土质疏松,抗侵蚀能力极弱。从 1973 年中国科学院水土保持研究所开始纸坊沟流域水土保持综合治理与治理工作起,该流域已成为黄土高原水土流失综合治理的典型小流域,并起到了良好的示范作用。到目前为止,该流域的土地利用主要以乔木林、灌木林、草地和农耕地为主,主要植物种类为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb)、白羊草[*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng]、糙隐子草[*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng]、玉米(*Zea mays* L.)、谷子[*Setaria italica* (L.) Beauv]、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等。

### 1.2 采样与处理

从“七五”开始,该流域被列入国家黄土高原水土流失综合治理的 11 个典型小流域之列。当时的科技工作者编制了纸坊沟土地类型图、土地利用现状图、坡度图、土壤侵蚀类型图和综合治理图等系列图件。为了真实反映流域土壤酶活性和肥力的空间变化,我们选择了系列图件中的土地类型图、坡度图和土地利用现状图作为采样单元划分的参考图件。具体的做法为,以土地类型图为基础控制图件,采用 GIS 技术将 2005 年野外人工调绘的新的土地利用现状图和坡度图与其进行迭加生成采样单元图,在每个单元中按“S”型采集 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 的样品各 5 个,并进行充分混合后带回室内进

行分析。具体采样及分析结果见表 1。

### 1.3 土壤指标及其测定方法

土壤性质测定 10 个指标:(1)有机质,重铬酸钾—外加热法;(2)全氮,半微量开氏法;(3)碱解氮,碱解扩散法;(4)速效磷,碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;(5)速效钾,乙酸铵浸提—火焰光度法;(6)pH 值,采用水土体积比 1:1 电极法<sup>[15]</sup>;(7)脲酶,靛酚蓝比色法,酶活性单位 NH<sub>3</sub>-N mg/(g·d);(8)蔗糖酶,硫代硫酸钠滴定法,单位 0.1mol/L Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mL/(g·d);(9)碱性磷酸酶,磷酸苯二钠比色法,单位 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mg/(g·d);(10)过氧化氢酶,高锰酸钾滴定法,单位 0.1 mol/L KMnO<sub>4</sub> mL/(g·d)<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据分析与处理

本文采用 Pearson 简单相关分析研究各指标之间联系的紧密程度,探讨土壤酶活性与土壤肥力之间的关系<sup>[11]</sup>,而通径分析是在各变量无量纲的基础上,计算直接通径系数和间接通径系数,通过直接或间接通径系数的大小与正负来表示自变量对因变量作用的大小与方向,且通过通径系数之间的相互比较,揭示土壤酶活性与土壤肥力之间的密切程度,比简单相关分析更具有说服力。所有数据均在 SPSS16.0 软件下进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤肥力的特征值

从土壤垂直剖面来看(见表 1)8 种土地利用现状的土壤有机质、全氮、碱解氮和速效钾均随土层深度(0—60 cm)的增加而减小,而 pH 却逐渐增大;除梁峁地草地、沟坡地乔木林和沟坡地草地的速效磷含量随土层深度的增加而减小以外,其他 5 种土地利用现状的速效磷含量均为 0—20 cm 最大,40—60 cm 次之,20—40 cm 最小。

梁峁地:有机质含量 0—20 cm 和 20—40 cm 土层为乔木林 > 灌木林 > 农耕地 > 草地,40—60 cm 为灌木林 > 乔木林 > 农耕地 > 草地;全氮含量 0—20 cm 为乔木林 > 灌木林 > 农耕地 > 草地,20—40 cm 为灌木林 > 乔木林 = 农耕地 > 草地,40—60 cm 为农耕地 > 灌木林 > 乔木林 > 草地;碱解氮含量 3 个土层均为乔木林 > 灌木林 > 农耕地 > 草地;速效磷含量 0—20 cm 和 20—40 cm 为乔木林 > 灌木林 > 农耕地 > 草地,40—60 cm 为草地 > 乔木林 = 农耕地 > 灌木林;速效钾含量 0—20 cm 为乔木林 > 灌木林 > 农耕地 > 草地,20—40 cm 和 40—60 cm 为农耕地 > 草地 > 乔木林 > 灌木林。

表 1 不同土地类型上土壤肥力和土壤酶活性特征值  
Table 1 Eigenvalues of soil fertility and soil enzyme activities upon land type

土地类型 Land types	土地利用现状 Land use status	样数 Sample No.	土层 Soil layer (cm)	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Tot. N (g/kg)	碱解氮 Avail. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	碱性磷酸酶 Alk-phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
梁茆地 Upland	乔木林	6	0—20	8.24 ± 0.05	2.28 ± 0.58	0.62 ± 0.09	22.05 ± 5.32	3.27 ± 0.45	110.36 ± 21.50	0.51 ± 0.02	3.16 ± 0.54	0.18 ± 0.04	3.51 ± 0.20
	栎林		20—40	8.23 ± 0.05	1.49 ± 0.05	0.26 ± 0.02	12.31 ± 5.41	1.74 ± 0.43	50.75 ± 5.29	0.16 ± 0.05	0.82 ± 0.28	0.04 ± 0.02	2.98 ± 0.18
			40—60	8.32 ± 0.03	0.75 ± 0.12	0.19 ± 0.03	6.62 ± 1.46	2.04 ± 0.49	43.38 ± 4.72	0.06 ± 0.02	0.36 ± 0.05	0.02 ± 0.01	2.97 ± 0.17
灌木林 Shrub	乔木林	11	0—20	8.29 ± 0.03	2.07 ± 0.27	0.51 ± 0.05	21.44 ± 2.39	3.30 ± 0.42	103.75 ± 11.20	0.47 ± 0.02	3.38 ± 0.37	0.18 ± 0.02	3.47 ± 0.13
			20—40	8.32 ± 0.04	1.07 ± 0.17	0.27 ± 0.02	5.93 ± 0.92	1.83 ± 0.34	39.97 ± 3.52	0.16 ± 0.03	0.99 ± 0.38	0.02 ± 0.00	2.78 ± 0.10
			40—60	8.36 ± 0.03	0.89 ± 0.10	0.24 ± 0.03	4.77 ± 0.75	1.95 ± 0.49	37.78 ± 4.2	0.05 ± 0.01	0.46 ± 0.12	0.02 ± 0.00	2.80 ± 0.07
草地 Grass	草地	2	0—20	8.43 ± 0.04	0.92 ± 0.02	0.32 ± 0.03	11.35 ± 1.41	4.79 ± 0.12	64.71 ± 16.00	0.36 ± 0.02	2.24 ± 0.39	0.08 ± 0.02	3.18 ± 0.04
			20—40	8.43 ± 0.04	0.55 ± 0.01	0.24 ± 0.00	4.96 ± 0.71	3.47 ± 0.48	54.68 ± 2.02	0.11 ± 0.01	0.31 ± 0.00	0.01 ± 0.00	2.68 ± 0.08
			40—60	8.41 ± 0.03	0.50 ± 0.06	0.18 ± 0.00	2.84 ± 1.42	3.03 ± 0.52	52.68 ± 7.98	0.06 ± 0.04	0.27 ± 0.00	0.01 ± 0.00	2.83 ± 0.00
农耕地 Crop	农耕地	8	0—20	8.37 ± 0.04	1.12 ± 0.14	0.39 ± 0.02	11.88 ± 1.80	3.05 ± 0.39	77.74 ± 3.37	0.46 ± 0.03	1.34 ± 0.10	0.08 ± 0.01	3.13 ± 0.08
			20—40	8.41 ± 0.03	0.80 ± 0.11	0.26 ± 0.03	5.85 ± 0.78	1.42 ± 0.20	57.68 ± 2.48	0.16 ± 0.05	0.41 ± 0.07	0.01 ± 0.00	3.00 ± 0.08
			40—60	8.42 ± 0.03	0.64 ± 0.09	0.25 ± 0.02	4.23 ± 0.67	2.04 ± 0.37	57.23 ± 2.89	0.09 ± 0.03	0.35 ± 0.04	0.01 ± 0.00	3.12 ± 0.08
沟坡地 Gully slopeland	乔木林	15	0—20	8.10 ± 0.02	3.42 ± 0.26	0.92 ± 0.09	31.80 ± 2.76	3.21 ± 0.38	170.94 ± 22.00	0.45 ± 0.03	4.47 ± 0.07	0.24 ± 0.02	3.64 ± 0.06
	栎林		20—40	8.21 ± 0.01	1.25 ± 0.08	0.30 ± 0.02	8.58 ± 1.00	2.26 ± 0.60	93.56 ± 2.72	0.15 ± 0.03	0.83 ± 0.11	0.03 ± 0.00	2.82 ± 0.13
			40—60	8.25 ± 0.01	1.10 ± 0.07	0.28 ± 0.02	7.44 ± 0.76	2.05 ± 0.46	91.36 ± 28.00	0.12 ± 0.03	0.81 ± 0.13	0.03 ± 0.01	2.74 ± 0.14
沟底地 Channel land	草地	10	0—20	8.26 ± 0.03	1.84 ± 0.10	0.68 ± 0.06	22.15 ± 3.17	4.66 ± 0.44	121.66 ± 11.80	0.51 ± 0.03	3.33 ± 0.29	0.16 ± 0.02	3.70 ± 0.14
	栎林		20—40	8.28 ± 0.03	1.17 ± 0.21	0.47 ± 0.07	13.55 ± 2.48	3.84 ± 0.59	78.01 ± 9.00	0.33 ± 0.06	1.22 ± 0.35	0.05 ± 0.01	3.60 ± 0.20
			40—60	8.32 ± 0.03	0.76 ± 0.11	0.35 ± 0.03	8.92 ± 1.51	2.97 ± 0.57	77.72 ± 9.60	0.18 ± 0.02	0.59 ± 0.09	0.02 ± 0.00	3.67 ± 0.19
沟底地 Channel land	栎林	3	0—20	8.16 ± 0.07	3.10 ± 0.47	0.62 ± 0.10	25.17 ± 3.34	3.11 ± 1.25	423.95 ± 22.60	0.60 ± 0.03	4.15 ± 0.36	0.18 ± 0.02	3.93 ± 0.22
	栎林		20—40	8.23 ± 0.08	1.40 ± 0.22	0.31 ± 0.08	10.90 ± 3.12	4.19 ± 2.99	308.03 ± 6.40	0.26 ± 0.12	0.78 ± 0.28	0.03 ± 0.01	3.12 ± 0.42
			40—60	8.28 ± 0.09	1.11 ± 0.08	0.23 ± 0.03	8.52 ± 2.98	4.49 ± 1.69	292.75 ± 4.93	0.12 ± 0.02	0.45 ± 0.06	0.01 ± 0.00	2.84 ± 0.50
农耕地 Crop	农耕地	3	0—20	8.20 ± 0.05	1.42 ± 0.04	0.32 ± 0.02	12.55 ± 0.85	3.53 ± 0.55	90.25 ± 3.70	0.27 ± 0.07	1.55 ± 0.14	0.05 ± 0.01	3.42 ± 0.48
	栎林		20—40	8.20 ± 0.03	1.20 ± 0.18	0.23 ± 0.01	9.96 ± 0.01	0.83 ± 0.21	68.96 ± 2.32	0.15 ± 0.03	0.71 ± 0.06	0.03 ± 0.00	3.07 ± 0.03
			40—60	8.27 ± 0.01	0.75 ± 0.06	0.19 ± 0.02	4.73 ± 1.26	1.66 ± 0.75	58.06 ± 1.39	0.07 ± 0.01	0.35 ± 0.09	0.01 ± 0.00	2.75 ± 0.02

注: 脲酶单位为  $\text{NH}_3\text{-N mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ; 蔗糖酶  $0.1\text{mol/L Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{ ml}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ; 碱性磷酸酶为  $\text{P}_2\text{O}_5\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ; 过氧化氢酶为  $0.1\text{mol/L KMnO}_4\text{ ml}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 。  
Note: Units of urease, invertase, alk-phosphatase, and catalase are  $\text{NH}_3\text{-N mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,  $0.1\text{mol/L Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{ ml}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$  and  $\text{NH}_3\text{-N mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ , respectively.

沟坡地：土壤有机质和速效钾含量 3 个土层均为乔木林 > 草地；全氮和碱解氮含量 0—20 cm 为乔木林 > 草地，20—40 cm 和 40—60 cm 为草地 > 乔木林。

沟底地：土壤有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量 3 个土层均为乔木林 > 农耕地；pH 和速效钾 0—20 cm 为农耕地 > 乔木林，20—40 cm 和 40—60 cm 为乔木林 > 农耕地。乔木林各土样之间变异性最大。

从小流域的空间范围来看，土壤肥力特征差别较大。土壤肥力 0—20 cm 和 20—40 cm 表现为沟底地乔木林 > 沟坡地乔木林 > 梁卯地乔木林；沟坡地草地 > 梁卯地草地；沟底地农耕地 > 梁卯地农耕地，40—60 cm 肥力变化则不明显。

## 2.2 土壤酶活性特征值

从土壤垂直剖面可以看出(见表 1) 8 种土地利用现状的土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性均随土层深度(0—60 cm)的增加而显著降低；过氧化氢酶活性在每个土地利用现状的垂直剖面层次上变化不大。

梁卯地：土壤脲酶活性 0—20 cm 和 20—40 cm 土层为乔木林 > 灌木林 > 农耕地 > 草地，40—60 cm 为农耕地 > 乔木林 = 草地 > 灌木林；蔗糖酶活性 0—20 cm 土层为灌木林 > 乔木林 > 草地 > 农耕地，20—40 cm 和 40—60 cm 为灌木林 > 乔木林 > 农耕地 > 草地；碱性磷酸酶活性 0—20 cm 为乔木林 = 灌

木林 > 草地 > 农耕地，20—40 cm 和 40—60 cm 为乔木林 > 灌木林 > 农耕地 > 草地。

沟坡地：土壤脲酶活性在 3 个土层均为草地 > 乔木林；蔗糖酶和碱性磷酸酶活性 0—20 cm 和 40—60 cm 为乔木林 > 草地，20—40 cm 为草地 > 乔木林。

沟底地：脲酶和蔗糖酶活性在 3 个土层均为乔木林 > 农耕地；碱性磷酸酶活性 0—20 cm 和 20—40 cm 为乔木林 > 农耕地，40—60 cm 为农耕地 > 乔木林。过氧化氢酶活性在 8 种土地利用现状之间变化不大，差异也不明显。

4 种酶活性在流域空间的变化与土壤肥力相一致。土壤酶活性表现为沟底地乔木林 > 沟坡地乔木林 > 梁卯地乔木林；沟坡地草地 > 梁卯地草地。由于受人为管理等因素影响较大，农耕地土壤酶活性的空间变化比较复杂。

## 2.3 土壤性质之间的相关关系

由表 2 可知，土壤酶活性与土壤肥力之间有着密切的关系。速效磷除与 pH、有机质和过氧化氢酶活性无显著相关外，与其他所有的土壤养分指标和土壤生物指标均呈显著或极显著的正相关关系。pH 除与速效磷无显著相关性外，与所测定的其他所有土壤指标均呈显著或极显著的负相关关系。土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶各指标之间存在极显著的正相关关系。

表 2 土壤酶活性与土壤肥力之间的相关矩阵(r)

Table 2 Correlation matrix(r-values) between soil enzyme activities and soil fertility

项目 Item	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>
X <sub>1</sub>	-0.624**	-0.528**	-0.567**	0.106	-0.332*	-0.288**	-0.515**	-0.481**	-0.345**
X <sub>2</sub>		0.752**	0.740**	0.032	0.373**	0.560**	0.820**	0.795**	0.454**
X <sub>3</sub>			0.864**	0.180*	0.289**	0.657**	0.826**	0.836**	0.560**
X <sub>4</sub>				0.178*	0.329**	0.674**	0.844**	0.871**	0.558**
X <sub>5</sub>					0.465**	0.329**	0.215**	0.206**	0.102
X <sub>6</sub>						0.388**	0.395**	0.353**	0.233**
X <sub>7</sub>							0.756**	0.713**	0.513**
X <sub>8</sub>								0.907**	0.563**
X <sub>9</sub>									0.548**

注( Note ): 样本数 n = 174 ; \*\* 0.01 水平显著 ; \* 0.05 水平显著 ; X<sub>1</sub> ~ X<sub>10</sub> 分别代表 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶。 Sample number n = 174 ; \*\* Correlation is significant at the 0.01 level ; \* Correlation is significant at the 0.05 level. X<sub>1</sub> - X<sub>10</sub> mean pH , organic matter , total N , available N , available P , available K , urease , invertase , alkaline phosphatase and catalase , respectively.

## 2.4 土壤肥力与土壤酶活性之间的通径分析

土壤酶在参与土壤生化反应的过程中并不是孤

立存在的，而是相互间存在着密切的配合和相互促进的复杂关系，这种关系仅用简单的相关分析不能

完全说明。因此,我们引进数理统计分析中的通径分析方法,进一步揭示土壤酶活性与土壤肥力的关系。

将脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性分别与所测土壤养分指标进行回归,得到四个标准多元回归方程:

$$U_1 = 0.187X_1 + 0.148X_2 + 0.241X_3 + 0.394X_4 + 0.127X_5 + 0.136X_6 \quad (1)$$

$$U_2 = 0.072X_1 + 0.415X_2 + 0.202X_3 + 0.375X_4 + 0.067X_5 + 0.052X_6 \quad (2)$$

$$U_3 = 0.124X_1 + 0.345X_2 + 0.190X_3 + 0.507X_4 + 0.047X_5 + 0.022X_6 \quad (3)$$

$$U_4 = -0.003X_1 - 0.018X_2 + 0.318X_3 + 0.277X_4 - 0.038X_5 + 0.073X_6 \quad (4)$$

式中:  $U_1 \sim U_4$  分别为标准化的脲酶、蔗糖酶、碱性

磷酸酶和过氧化氢酶活性;  $X_1 \sim X_6$  分别为标准化的 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾。方程中的标准回归系数就是直接通径系数,它乘以相应的肥力指标间的相关系数就得到间接通径系数。其直接通径系数和间接通径系数之和在数值上等于相关系数,可揭示出哪种作用途径处于主导地位。四种土壤酶活性的剩余通径系数分别为 0.672、0.423、0.409 和 0.813。

2.4.1 脲酶活性与土壤肥力的关系 由表 3 可知,碱解氮和全氮对脲酶活性的直接通径系数较大,而且两者彼此相互作用对脲酶活性的间接通径系数也较大。相关分析表明,碱解氮、全氮与脲酶活性均呈极显著正相关关系,说明土壤氮素是影响土壤脲酶活性的主要因素,这与脲酶分解尿素的专一性有关。有机质通过全氮和碱解氮对脲酶活性的间接通径系数较大,使其呈极显著正相关(0.559\*\*),而 pH 对

表 3 土壤肥力对土壤酶活性的通径系数

Table 3 Path coefficients between soil fertility and soil enzyme activities

项目 Item		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	r
脲酶活性 Urease activity	$X_1$	<u>0.187</u>	-0.092	-0.127	-0.223	0.013	-0.045	-0.288**
	$X_2$	-0.117	<u>0.148</u>	0.181	0.292	0.004	0.051	0.559**
	$X_3$	-0.099	0.111	<u>0.241</u>	0.340	0.023	0.039	0.656**
	$X_4$	-0.106	0.110	0.208	<u>0.394</u>	0.023	0.045	0.673**
	$X_5$	0.020	0.005	0.043	0.070	<u>0.127</u>	0.063	0.328**
	$X_6$	-0.062	0.055	0.070	0.130	0.059	<u>0.136</u>	0.387**
蔗糖酶 活性 Invertase activity	$X_1$	<u>0.072</u>	-0.259	-0.107	-0.213	0.007	-0.017	-0.516**
	$X_2$	-0.045	<u>0.415</u>	0.152	0.278	0.002	0.019	0.821**
	$X_3$	-0.038	0.312	<u>0.202</u>	0.324	0.012	0.015	0.827**
	$X_4$	-0.041	0.307	0.175	<u>0.375</u>	0.012	0.017	0.845**
	$X_5$	0.008	0.013	0.036	0.067	<u>0.067</u>	0.024	0.215**
	$X_6$	-0.024	0.155	0.058	0.123	0.031	<u>0.052</u>	0.396**
碱性磷酸酶 活性 Alkaline phosphatase activity	$X_1$	<u>0.124</u>	-0.215	-0.100	-0.287	0.005	-0.007	-0.481**
	$X_2$	-0.077	<u>0.345</u>	0.143	0.375	0.002	0.008	0.795**
	$X_3$	-0.065	0.259	<u>0.190</u>	0.438	0.008	0.006	0.837**
	$X_4$	-0.070	0.255	0.164	<u>0.507</u>	0.008	0.007	0.872**
	$X_5$	0.013	0.011	0.034	0.090	<u>0.047</u>	0.010	0.206**
	$X_6$	-0.041	0.129	0.055	0.167	0.022	<u>0.022</u>	0.353**
过氧化氢酶 活性 Catalase activity	$X_1$	<u>-0.003</u>	0.011	-0.168	-0.157	-0.004	-0.024	-0.345**
	$X_2$	0.002	<u>-0.018</u>	0.239	0.205	-0.001	0.027	0.454**
	$X_3$	0.002	-0.014	<u>0.318</u>	0.239	-0.007	0.021	0.560**
	$X_4$	0.002	-0.013	0.275	<u>0.277</u>	-0.007	0.024	0.557**
	$X_5$	0.001	-0.001	0.057	0.049	<u>-0.038</u>	0.034	0.102
	$X_6$	0.001	-0.007	0.092	0.091	-0.018	<u>0.073</u>	0.233**

注 (Note):  $X_1 \sim X_6$  分别代表 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾;划横线的数据为直接通径系数,其他为间接通径系数。

$X_1 \sim X_6$  mean pH, organic matter, total N, available N, available P and available K, respectively; The underlined data are direct path coefficients, other data are indirect path coefficients.

脲酶活性的正向直接途径系数被通过其他因子对土壤脲酶活性的反向间接途径系数所抵消,使得 pH 与脲酶活性呈极显著负相关。速效磷和速效钾对土壤脲酶活性的直接途径系数和间接途径系数均较小,说明速效磷和速效钾并不是影响脲酶活性的主要因素。

2.4.2 蔗糖酶活性与土壤肥力的关系 有机质、碱解氮和全氮对蔗糖酶活性的直接途径系数较大,且三者彼此间对蔗糖酶活性的间接途径系数都比通过其他因子的间接途径系数大,结合其相关系数可知,它们是影响蔗糖酶活性的主要因子。虽然 pH、速效磷和速效钾与蔗糖酶活性均呈极显著正相关,但他们对蔗糖酶活性的直接途径系数和间接途径系数均较小,说明他们并不是影响蔗糖酶活性的主要因素。

2.4.3 碱性磷酸酶活性与土壤肥力的关系 碱解氮对碱性磷酸酶活性的直接途径系数最大(0.507),且通过有机质和全氮对碱性磷酸酶活性的间接途径系数较大,由此可知,碱解氮是影响土壤碱性磷酸酶活性的主要因子。有机质通过碱解氮对碱性磷酸酶活性的间接途径系数比通过其他因子对碱性磷酸酶活性影响的间接途径系数之和还大。全氮通过碱解氮对碱性磷酸酶活性的间接途径系数(0.438)大于全氮对碱性磷酸酶活性直接途径系数(0.190),从相关系数可知,全氮与碱解氮呈极显著正相关(0.837\*\*),进一步说明氮素是影响土壤碱性磷酸酶活性的主要因素。

2.4.4 过氧化氢酶活性与土壤肥力的关系 碱解氮和全氮对过氧化氢酶活性的直接途径系数以及两者彼此间相互作用的间接途径系数均较大,由此可知,碱解氮和全氮是影响过氧化氢酶活性的主要因子。有机质对过氧化氢酶活性的负向直接途径系数被通过其他因子对过氧化氢酶活性的正向间接途径系数所抵消,说明有机质主要是通过其他因子对过氧化氢酶活性的间接作用较大。因此认为,速效磷、速效钾和 pH 并不是影响土壤过氧化氢酶活性的主要因素。

### 3 结论

1)从小流域空间尺度来看,不同土地利用方式下土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶相互之间均呈极显著正相关关系。

2)途径分析可知,土壤有机质、全氮和碱解氮通过直接作用和彼此相互间接作用成为影响脲酶、

蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性的主要因素。

3)就途径分析的直接作用而言,pH对脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性的直接作用在很大程度上通过其他因素对4种酶的间接作用所抵消。相关分析和途径分析结果说明,4种土壤酶活性可以作为黄土丘陵沟壑区小流域土壤肥力的评价指标。

### 参考文献:

- [1] Abdul K S, Katayama A, Kimura M. Activities of some soil enzymes in different land use system after deforestation in hilly areas of west Lampung, South Sumatra, Indonesia[J]. *Soil Sci*, 2000, 80: 91-97.
- [2] Badiane 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]. *Appl. Soil Ecol.*, 2001, 18(3): 229-238.
- [3] 杨万勤,王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. *林业科学*, 2004, 40(2): 152-159.  
Yang W Q, Wang K Y. Advances in forest soil enzymology[J]. *For. Sci.*, 2004, 40(2): 152-159.
- [4] Dick R P A. Review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters[J]. *Agric Ecosyst. Environ.*, 1992, 40: 25-36.
- [5] 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.  
Qiu L P, Liu J, Wang Y Q *et al.* Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(3): 277-280.
- [6] 沈慧,姜凤岐,杜晓军,等. 水土保持林土壤肥力及其评价指标[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 60-65.  
Shen H, Jiang F Q, Du X J *et al.* Study on soil fertility of water and soil conservation forest and its evaluation indexes[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2000, 14(2): 60-65.
- [7] 张成娥,陈小利. 黄土丘陵区不同撂荒年限自然恢复的退化草地土壤养分及酶活性特征[J]. *草地学报*, 1997, 5(3): 195-199.  
Zhang C E, Chen X L. Characteristics of soil enzymatic activity and nutrient of pasture from abandoned field in different years on the loess hilly areas[J]. *Acta Agre. Sin.*, 1997, 5(3): 195-199.
- [8] 安韶山,黄懿梅,李壁成,刘梦云. 用典范相关分析研究宁南宽谷丘陵区不同土地利用方式土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 704-709.  
An S S, Huang Y M, Li B C, Liu M Y. The relation between soil enzyme activities and soil properties of different land use way in Loess Hilly region by canonical correlation analysis[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(5): 704-709.
- [9] 郑勇,高勇生,张丽梅,等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 316-321.  
Zheng Y, Gao Y S, Zhang L M *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2008, 14(2): 316-321.

- [ 10 ] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[ J ]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9( 4 ): 406-410.  
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S *et al.* Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility [ J ]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003, 9( 4 ): 406-410.
- [ 11 ] 樊军,郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 II. 土壤酶活性与土壤肥力[ J ]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9( 2 ): 146-150.  
Fan J, Hao M D. Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the Loess plateau II. Relationship between soil enzyme activities and soil fertility [ J ]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003, 9( 2 ): 146-150.
- [ 12 ] 张崇邦,金则新,柯世省. 天台山不同林型土壤酶活性与土壤微生物、呼吸速率以及土壤理化特性关系研究[ J ]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10( 1 ): 51-56.  
Zhang C B, Jin Z X, Ke S X. Study on the relationship among enzymes activities, microorganism, respiration rate and physico-chemical properties of soil under different forests of Tiantai mountain [ J ]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10( 1 ): 51-56.
- [ 13 ] 邱凤琼,周礼恺,陈恩凤. 东北黑土有机质和酶活性与土壤肥力的关系[ J ]. 土壤学报, 1981, 18( 3 ): 244-252.  
Qiu F Q, Zhou L K, Chen E F. Relationship between organic matter and enzymatic activities and blackland fertility in northeast of China [ J ]. *Acta Pedol. Sin.*, 1981, 18( 3 ): 244-252.
- [ 14 ] 张志明,曹承绵,周礼恺. 耕作棕壤酶活性的研究[ J ]. 土壤通报, 1985, 21( 6 ): 281-285.  
Zhang Z M, Cao C M, Zhou L K. Study on enzymatic activities of farming brown soils [ J ]. *Acta Pedol. Sin.*, 1985, 21( 6 ): 281-285.
- [ 15 ] 关松荫. 土壤酶及其研究法[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 1986. 274-323.  
Guan S Y. Soil enzyme and research methods [ M ]. Beijing: Agricultural Press, 1986, 274-323.
- [ 16 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-109.  
Bao S D. Soil chemical analysis [ M ]. Beijing: China Agricultural Press, 2002. 25-109.