植物营养与肥料学报 2013,19(2):445-454
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0223

绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响

叶协锋[1], 杨 超[2], 李 正[3], 敬海霞[3]
(1 河南农业大学,国家烟草栽培生理生化研究基地,烟草行业烟草栽培重点实验室,河南郑州 450002;
2 重庆烟草科学研究所,重庆 400700; 3 重庆市烟草公司巫溪分公司,重庆 405800)

摘要: 通过田间试验,研究翻压绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响。结果表明,翻压绿肥能够明显提高土壤酶活性和土壤肥力水平,当绿肥翻压量在 15000 kg/hm^2 以上时,尤其在 22500～30000 kg/hm^2 之间时对土壤各项指标的影响更加明显。与对照相比,翻压绿肥的各处理土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶增幅分别为 13.10%～23.81%、12.92%～29.38%、75.35%～234.51%、29.17%～37.08%;土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、pH、孔隙度增幅分别为 13.01%～70.41%、6.42%～27.52%、1.14%～10.99%、15.97%～34.99%、10.28%～38.30%、2.74%～7.05%、0.19%～2.50%,土壤容重降幅为 1.47%～5.15%。简单相关分析表明,脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶 4 种酶之间以及 4 种酶与土壤理化因子之间均有极显著的相关关系,而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质转化中不仅显示其专性特性,同时也存在共性关系;典型相关分析结果为,第一对典型变量线性函数反映了土壤酶活性和土壤养分因子对土壤综合肥力水平的影响,第二对典型变量线性函数反映了施入绿肥对土壤内部重要的生理生化过程变化的影响;主成分分析结果显示,第一主成分反映了土壤的综合肥力水平,所有因子均对土壤肥力水平起到了正效应,土壤酶活性能够和土壤理化因子共同评价土壤综合肥力水平。以上结果说明,翻压绿肥后土壤生物过程活跃,有利于土壤有机物质的转化和烤烟正常生长所需的营养供应。

关键词: 绿肥;土壤酶活性;土壤肥力
中图分类号: S142;S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)02-0445-10

Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils

YE Xie-feng[1], YANG Chao[2], LI Zheng[3], JING Hai-xia[3]
(*1 Henan Agricultural University/National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Centre/Key Laboratory for Tobacco Cultivation of Tobacco Industry, Zhengzhou 450002, China; 2 Chongqing Institute of Tobacco Science, Chongqing 400700, China; 3 Wuxi Tobacco Company of Chongqing, Chongqing 405800, China*)

Abstract: Field experiments were conducted to study the effects of returning green manure on the relationship between enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils. The results show that the returning green manure could obviously increase the soil enzyme activities and soil nutrients. In comparison with the control, the treatments which the returning green manure amounts are more than 15000 kg/ha, especially between 22500 and 30000 kg/ha, the effects on soil enzyme activities and nutrients are more obviously. In comparison with the control, the activities of soil urease, acid phosphatase (ACP), invertase and catalase are increased by 13.10%-23.81%, 12.92%-29.38%, 75.35%-234.51% and 29.17%-37.08% respectively. Soil organic matter, total N, akalytic N, available P, available K, pH, and porosity are increased by 13.01%-70.41%, 6.42%-27.52%, 1.14%-10.99%, 15.97%-34.99%, 10.28%-38.30%, 2.74%-7.05%, 0.19%-2.50% respectively. Soil

收稿日期: 2012-08-24 **接受日期:** 2012-11-09
基金项目: 国家烟草专卖局项目"重庆市山地特色烟叶生产技术体系研究"(200801001/200801002)资助。
作者简介: 叶协锋(1979—),男,河南郏县人,讲师,博士,主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail: yexiefeng@163.com

bulk density is decreased by 1.47% -5.15%. The results of correlation analysis reveal that there are significant positive correlations between soil edaphic physicochemical factors and activities of soil urease, acid phosphatase, invertase and catalase. The linear function of the first pair of canonical variables reveals that soil enzyme activities and soil fertility factors are indicators of soil comprehensive fertility, and the linear function of the second pair of canonical variables reveals that the effects of green manure application on the changes of some physiological and biochemical processes of tobacco-planting soils. The results of principal components analysis show that the first principal component is the composite indicator of reflecting soil fertility level, all the factors have actively influence on soil fertility. Four soil enzymes are in the first principal component, and more closely correlate with soil fertility, so soil fertility could be objectively evaluated by soil enzyme activities and edaphic physicochemical factors, and using soil enzyme activities and edaphic physicochemical factors to characterize the soil fertility is feasible. The above results reveal burying green manure could promote the activity of soil organism, it is in favor of the turnover of organic matter in the soil and provision of nutrition to meet the needs of tobacco's normal growth.

Key words: green manure; soil enzyme activities; soil fertility

土壤酶作为土壤生物活性及土壤肥力的重要组成部分,在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要的催化作用,其活性高低可以反映土壤中各种生物化学反应的强度和方向[1],对土壤肥力的演化具有重要影响[2-3]。土地利用的变化可以改变陆地生态系统以及地球生化循环过程,促使土壤性质的变化和土地生产力的改变,影响土壤质量和土壤环境变迁,进而引起土壤酶活性的空间变异和生物活性变化[4-5]。

近年来,对土壤酶活性和土壤肥力的研究已成为土壤学界研究的热点[6-10],尤其对土壤酶活性与土壤养分关系进行了深入的探讨[11-15]。然而土壤酶活性能否作为土壤肥力的指标尚无定论,多数研究者[13-15]认为,土壤酶与土壤主要肥力因子有显著相关关系,可作为土壤肥力的指标之一;而 Sakorn 等[16]及周瑞莲等[17]研究却表明,土壤酶活性与土壤的营养水平间并不存在显著相关。尽管如此,土壤酶能够促进土壤中物质转化与能量交换是不争的事实。因此,对土壤酶与土壤肥力之间关系的进一步研究在理论和实践上都有着重要意义。绿肥作为一种重要的有机肥料,其在减少化肥用量、提高作物产量、培肥土壤地力等方面起到了积极的作用。由于当前对绿肥肥效的研究主要集中在单一因素如不同酶活性或不同肥力因子上[18-20],而对他们之间关系的研究较少,本文旨在通过对翻压绿肥后植烟土壤酶活性与土壤肥力关系的研究,并采用简单相关分析、典型相关分析和主成分分析,以探讨施用绿肥情况下土壤酶活性与土壤肥力的关系以及将土壤酶作为评价土壤肥力指标的可行性,为改良植烟土壤,减少化肥使用,改善生态环境,发展低碳烟草农业提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在重庆市武隆县赵家乡新华村老街自然村进行(海拔 1036 m、东经 107°33.588′、北纬 29°16.593′)。供试土壤类型为水稻土,烤烟品种为云烟87。烤烟大田行距 1.2 m,株距 0.55 m,密度 15000 plant/hm^2,移栽时间均为每年 5 月 5 日左右,供试绿肥品种为黑麦草。2005 年 10 月份烟叶采收结束后,在试验地撒播种植绿肥,2006 年 4 月份进行绿肥翻压,同时测定鲜草平均含水率为 87.38%,干草平均含碳量为 38.26%,平均含氮量为 1.03%,C/N 为 37.14。试验地全年降水多在 1000 mm 以上,4 至 6 月降水量占 39% 左右,属亚热带季风气候区,立体气候明显,年平均气温 15℃～18℃,无霜期 240 ～285 d。

1.2 试验设计

试验设 5 个处理: CK(对照),不翻压绿肥,只施用化肥; T1,翻压绿肥 7500 kg/hm^2;T2,翻压绿肥 15000 kg/hm^2;T3,翻压绿肥 22500 kg/hm^2;T4,翻压绿肥 30000 kg/hm^2,每个处理 3 次重复,小区面积 334 m^2,随机区组排列。绿肥在移栽前 20 d 左右翻压。试验始于 2005 年,每年度各处理均在固定田块上进行,各处理配施化肥量均按当地常规施肥量(表1)。

表 1　2005～2009 年大田施用化肥情况(kg/hm²)

Table 1　Fertilizer rates of the years 2005–2009

年份 Year	基肥 Base fertilizer			追肥 Topdressing	
	烤烟专用复合肥 Special compound fertilizer for flue-cured tobacco	过磷酸钙 Superphosphate	油枯 Oil cake	硝酸钾 Potassium nitrate	硝铵锌 Nitrate ammonium zinc
2005	750	75	150	150	45
2006	600	75	0	150	0
2007	600	75	0	150	0
2008	600	75	0	150	0
2009	600	75	0	150	0

1.3　测定项目与方法

连年翻压绿肥后,每个处理于 2009 年烟株移栽 30 d(团棵期)左右随机选取烟垄上两株烟正中位置(距烟株 27.5 cm 处)0—20 cm 土层采集 5 个土样,混匀,阴凉处风干。实验室内测定土壤酶活性及相关土壤肥力因子指标;每次取样时测定土壤容重,计算孔隙度。

土壤脲酶采用比色法,酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,过氧化氢酶采用 $KMnO_4$ 滴定法,蔗糖酶采用 3,5－二硝基水杨酸比色法测定[21];土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法,土壤全氮采用半微量凯氏定氮法,土壤碱解氮采用碱解扩散法,土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗显色分光光度法,土壤速效钾采用醋酸铵提取火焰光度法测定[22];土壤 pH 采用电位法;土壤容重采用环刀法测定[22],利用容重数据计算孔隙度。

1.4　数据处理

试验数据用 DPS6.55 和 Excel 2003 进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　翻压绿肥对土壤酶活性和土壤肥力的影响

根据绿肥的矿化腐解规律,绿肥中养分释放主要集中在前 6 周[23],因此,烟株移栽后 30 d 左右的土壤肥力指标最能反映绿肥对植烟土壤培肥改良效应。由表 2 和表 3 可以看出,翻压绿肥处理均能明显提高土壤酶活性和土壤养分含量,改善土壤的物理性状,尤其是绿肥使用量在 15000 kg/hm² ～ 30000 kg/hm²(T2 ～ T4)之间时对土壤酶活性和土壤肥力各项指标的影响更加明显,4 种土壤酶活性随着绿肥翻压量的增加而增强,土壤养分指标则以翻压量在 15000 kg/hm² ～30000 kg/hm² 之间较好,翻压绿肥后,土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶提高幅度分别为 13.10% ～ 23.81%、12.92%～29.38%、75.35%～234.51%、29.17%～37.08%;土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、pH、孔隙度增幅分别为 13.01% ～ 70.41%、6.42% ～ 27.52%、1.14% ～ 10.99%、15.97%～34.99%、10.28%～38.30%、2.74%～7.05%、0.19% ～ 2.50%,容重降幅为 1.47% ～ 5.15%。T2、T3、T4 处理的土壤酶活性指标和土壤肥力指标与对照相比差异均显著;T1(7500 kg/hm²)处理除碱解氮、速效钾、容重外,其余指标与对照均差异显著;同时可以看出,T1 处理与其他处理相比,土壤各指标相对较差,说明绿肥翻压的量达到一定程度后对土壤酶活性和肥力的影响才能发挥出来。

2.2　土壤酶活性和土壤肥力因子的关系分析

土壤酶活性是全面反映土壤生物学肥力质量变化的潜在指标[24],土壤肥力水平在很大程度上受制于土壤酶的影响,因此要探究土壤酶活性和土壤肥力因子之间的关系,有必要进行简单相关分析、典型相关分析和主成分分析。

2.2.1 简单相关分析　由表 4 可以看出,脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶 4 种土壤酶之间均呈极显著正相关,同时 4 种酶与土壤肥力指标均呈极显著相关关系。其中,4 种酶与容重呈极显著负相关,与其他肥力因子呈极显著正相关,说明 4 种酶在

表2 翻压绿肥对土壤酶活性的影响

Table 2 Effects of returning green manure on soil enzyme activities

处理 Treatment	脲酶 Urease [NH_3-N mg/(g·24h)]	酸性磷酸酶 Acid phosphatase [Phenol mg/(kg·24h)]	蔗糖酶 Sucrase [Glu. mg/(kg·24h)]	过氧化氢酶 Catalase [0.01 mol/L $KMnO_4$ mL/(g·20s)]
T4	1.04 a	15.72 a	9.50 a	3.29 a
T3	1.03 a	15.65 a	8.95 a	3.28 a
T2	0.98 b	14.52 b	6.22 b	3.17 b
T1	0.95 c	13.72 b	4.98 c	3.10 b
CK	0.84 d	12.15 c	2.84 d	2.40 c

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表3 翻压绿肥对土壤养分含量的影响

Table 3 Effects of returning green manure on nutrients

处理 Treatment	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Akal. N (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	pH	容重 Bulk density (g/cm^3)	孔隙度 Porosity (%)
T4	33.40 a	1.26 b	122.80 ab	28.82 a	208.97 a	5.37 a	1.29 d	51.28 a
T3	29.30 b	1.34 a	125.99 a	27.22 b	186.27 b	5.47 a	1.30 c	51.23 a
T2	24.12 c	1.39 a	119.42 b	26.17 c	172.27 bc	5.38 a	1.34 b	49.59 b
T1	22.15 c	1.16 c	114.80 c	24.76 d	166.63 cd	5.25 b	1.36 a	48.97 c
CK	19.60 d	1.09 d	113.51 c	21.35 e	151.10 d	5.11 c	1.36 a	48.78 d

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

促进土壤养分转化,改良土壤理化性状方面发挥着重要作用。从表4还可以看出,同一种酶不仅对特定的土壤肥力因子有显著相关性,而且对多种土壤养分因子均有极显著的相关性,说明4种土壤酶不仅在促进单一土壤养分因子转化中发挥着作用,而且均参与了其他土壤养分因子的转化过程,共同影响着土壤的理化性状。

2.2.2 典型相关分析 典型相关分析(Canonical correlation analysis)是一种研究两组变量之间相关关系的多元分析方法,揭示两组指标间的内在联系,更深刻地反映两组随机变量之间的线性相关情况[13]。根据不同绿肥翻压量对土壤酶活性和土壤肥力因子的影响,本研究选择脲酶(X_1)、酸性磷酸酶(X_2)、蔗糖酶(X_3)、过氧化氢酶(X_4)4个土壤酶活性指标和土壤有机质(Y_1)、全氮(Y_2)、碱解氮(Y_3)、有效磷(Y_4)、速效钾(Y_5)、pH(Y_6)、容重(Y_7)、孔隙度(Y_8)8个土壤养分含量指标(表5),建立土壤酶活性典型变量(U)和土壤养分典型变量(V)的组合线性函数。由于只有第一对典型变量和第二对典型变量呈显著相关($P<0.01$)(表6),因此着重研究相关关系较大的第一对和第二对典型变量。

第一对典型变量为:

$$U_1 = -0.4468X_1 - 0.1449X_2 - 0.2741X_3 - 0.1812X_4$$

$$V_1 = -0.3373Y_1 + 0.1244Y_2 - 0.4432Y_3 - 0.5546Y_4 - 0.1067Y_5 - 0.3251Y_6 + 0.2162Y_7 - 0.3275Y_8$$

第二对典型变量为:

$$U_2 = -0.0534X_1 + 1.3127X_2 + 0.7737X_3 - 2.0415X_4$$

$$V_2 = 1.5118Y_1 + 0.7107Y_2 + 0.0998Y_3 - 2.8690Y_4 + 0.7671Y_5 - 0.4069Y_6 + 0.0465Y_7 + 0.6098Y_8$$

表 4　土壤酶活性与主要养分含量的相关系数

Table 4　The coefficients between soil enzyme activities and nutrients

项目 Item	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	蔗糖酶 Sucrase	过氧化氢酶 Catalase	有机质 Org. matter	全氮 Total N
脲酶 Urease	—	0.89**	0.86**	0.91**	0.83**	0.72**
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.89**	—	0.89**	0.89**	0.88**	0.70**
蔗糖酶 Sucrase	0.86**	0.89**	—	0.81**	0.88**	0.63**
过氧化氢酶 Catalase	0.91**	0.89**	0.81**	—	0.72**	0.72**

项目 Item	碱解氮 Akal. N	有效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	PH	容重 Bulk density	孔隙度 Porosity
脲酶 Urease	0.75**	0.92**	0.83**	0.89**	-0.79**	0.82**
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.85**	0.90**	0.80**	0.74**	-0.84**	0.89**
蔗糖酶 Sucrase	0.88**	0.88**	0.88**	0.76**	-0.93**	0.94**
过氧化氢酶 Catalase	0.70**	0.91**	0.73**	0.80**	-0.66**	0.71**

注(Note):* 和 ** 分别表示差异达5%和1%显著水平 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

由典型变量组合线性函数可以看出,第一对典型变量线性函数中,4 种土壤酶之间呈正相关关系(系数均为负,符号相同,因此为正相关),土壤综合养分因子中土壤全氮和容重与其他养分因子呈负相关(土壤全氮和容重系数为正,其他因子符号为负),土壤酶活性与全氮和土壤容重呈负相关,与其他肥力因子呈正相关;第二对典型变量线性函数中,脲酶、过氧化氢酶与其他两种酶呈负相关,有效磷、pH 与其他肥力因子呈负相关。从第二对线性函数还可以看出,土壤酶活性综合因子中起主要作用的是酸性磷酸酶和过氧化氢酶,土壤养分综合因子中起主要作用的是有机质和速效钾。

由表 5 可知,第一对和第二对典型变量的相关系数分别为 0.9924、0.9770,卡方检验结果表明第一对和第二对典型变量均呈极显著相关($P<0.01$)(表6),第一土壤酶综合因子中起主要作用的是脲酶(X_1 其特征向量为 -0.4468,绝对值最大,因此影响也最大,下同),第一土壤养分综合因子中起主要作用的是碱解氮(Y_3)和有效磷(Y_4),脲酶(X_1)与碱解氮(Y_3)和有效磷(Y_4)均呈正相关关系(特征向量均为负,因此为正相关)。同样,第二土壤酶活性综合因子中起主要作用的是酸性磷酸酶(X_2)和过氧化氢酶(X_4),第二土壤养分综合因子中起主要作用的是有机质(Y_1)和有效磷(Y_4)。

2.2.3 主成分分析　主成分分析是一种采取降维,将多个指标化为少数几个综合指标的统计分析方法。这些综合指标尽可能地反映了原来变量的信息量,而且彼此之间互不相关[25]。为了进一步探讨土壤酶活性与土壤肥力的关系,对翻压绿肥后土壤酶活性与土壤肥力因子进行主成分分析,以便能筛选出产生影响的主要因子群。表 7 显示,前两个主成分的累计方差贡献率为 89.2856%(大于 85%),根据主成分分析原理,当累积方差贡献率大于 85% 时,即可用于近似反映系统全部的变异信息。因此前两个主成分能完全反映土壤肥力系统的变异信息。 两个主成分中第一主成分的方差贡献率达到

表5 土壤酶活性与土壤肥力因子的典型变量

Table 5 Canonical variables of soil enzyme activities and properties

项目 Item	土壤酶 Soil enzyme			土壤性质 Soil property		
	第一变量 1st variable	第二变量 2nd variable	第三变量 3rd variable	第一变量 1st variable	第二变量 2nd variable	第三变量 3rd variable
特征值 Eigenvalues	0.9849	0.9545	0.8014	0.9849	0.9545	0.8014
典型相关系数 Canonical correlation coefficient	0.9924	0.9770	0.8952	0.9924	0.9770	0.8952
特征向量 Eigenvectors						
X_1	**-0.4468**	-0.0534	-1.3671			
X_2	-0.1449	**1.3127**	2.4194			
X_3	-0.2741	0.7737	-1.4234			
X_4	-0.1812	**-2.0415**	0.3950			
Y_1				-0.3373	1.5118	1.9184
Y_2				0.1244	0.7107	-0.2149
Y_3				**-0.4432**	0.0998	1.3374
Y_4				**-0.5546**	**-2.8690**	0.9291
Y_5				-0.1067	0.7671	-1.1048
Y_6				-0.3251	-0.4069	-0.8464
Y_7				0.2162	0.0465	3.2544
Y_8				-0.3275	0.6098	1.0749

注(Note):划线数据为典型变量中相关程度较大的特征向量 The data underlined are eigenvectors which absolute value are larger than others.

表6 典型变量的显著性检验

Table 6 Chi-square tests

典型变量 Canonical vector	相关系数 Canonical correlation coefficient	特征值 Eigenvalue	Wilk's	卡方值 χ^2	自由度 *Df*	*P*
1	0.9924	0.9849	0.0001	73.4598	32	0.0001
2	0.9770	0.9545	0.0037	42.0282	21	0.0042
3	0.8952	0.8014	0.0809	18.8615	12	0.0919
4	0.7700	0.5929	0.4070	6.7414	5	0.2406

81.1474%,在全部因子中占主导地位,是土壤肥力的最重要方面,故第一主成分代表了土壤各项指标的大小,是反映"土壤肥力水平"的综合指标。因此,第一主成分可以近似地表示土壤的综合肥力(表8)。用 Y_1 表示土壤综合肥力,用线性函数表示第一主成分,则土壤综合肥力和土壤各因子之间的关系为:

$$Y_1 = 0.3030X_1 + 0.3054X_2 + 0.3078X_3 + 0.2835X_4 + 0.2937X_5 + 0.2336X_6 + 0.2770X_7 + 0.3046X_8 + 0.2851X_9 + 0.2658X_{10} - 0.2935X_{11} + 0.3024X_{12}$$

式中:X_1 代表脲酶,X_2 代表酸性磷酸酶,X_3 代表蔗糖酶,X_4 过氧化氢酶,X_5 土壤有机质,X_6 代表全氮,X_7 代表碱解氮,X_8 代表有效磷,X_9 代表速效钾,X_{10} 代表 pH,X_{11} 代表容重,X_{12} 代表孔隙度。除了土壤容重(X_{11})系数为负外,其余指标的系数均为正,即容重与土壤酶和其他土壤肥力因子呈负相关,这与简单相关分析和典型相关分析的结

表 7　供试土壤主成分特征值

Table 7　Principal component eigenvalues of the soils tested

项目 Item	第一主成分 1st principal component	第二主成分 2nd principal component	第三主成分 3rd principal component
特征值 Eigenvalue	9.7377	0.9766	0.5395
方差贡献率(%) Proportion of variance	81.1474	8.1382	4.4961
累积方差贡献率(%) Proportion of cumulative variance	81.1474	89.2856	93.7817

表 8　供试土壤主成分的规格化特征向量

Table 8　Principal component eigenvectors of the soils tested

测定项目 Analysis item	第一主成分 1st principal component	载荷 Loading capacity	第二主成分 2nd principal component	载荷 Loading capacity	第三主成分 3rd principal component	载荷 Loading capacity
脲酶 Urease	0.3030	0.9455	0.1761	0.1740	0.1661	0.1220
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.3054	0.9530	0.0241	0.0238	0.0013	0.0010
蔗糖酶 Sucrase	0.3078	0.9605	-0.1210	-0.1196	-0.1338	-0.0983
过氧化氢酶 Catalase	0.2835	0.8847	0.2931	0.2897	0.2714	0.1993
有机质 Organic matter	0.2937	0.9165	-0.3189	-0.3151	0.1947	0.1430
全氮 Total N	0.2336	0.7290	0.5651	0.5584	-0.0003	-0.0002
碱解氮 Akalytic N	0.2770	0.8644	-0.0069	-0.0068	-0.6414	-0.4711
有效磷 Available P	0.3046	0.9505	0.0238	0.0235	0.3971	0.2917
速效钾 Available K	0.2851	0.8897	-0.2869	-0.2835	0.3576	0.2627
pH	0.2658	0.8294	0.4196	0.4147	-0.2376	-0.1745
容重 Bulk density	-0.2935	-0.9159	0.3503	0.3462	0.1911	0.1404
孔隙度 Porosity	0.3024	0.9436	-0.2552	-0.2522	-0.2301	-0.1690

注(Note):划线数据为绝对值最大的载荷值 The data underlined are loading capacity which absolute value are largest.

果相似。式中各变量(指标)的系数可以理解为各因子在土壤肥力系统所占的权重,第一主成分载荷越大,表明对土壤综合肥力水平的贡献越大。

同样,用 Y_2 表示第二主成分与各因子的关系为:

$$Y_2 = 0.1761X_1 + 0.0241X_2 - 0.1210X_3 + 0.2931X_4 - 0.3189X_5 + 0.5651X_6 - 0.0069X_7 + 0.0238X_8 - 0.2869X_9 + 0.4196X_{10} + 0.3503X_{11} - 0.2552X_{12}$$

式中:X_1 代表脲酶,X_2 代表酸性磷酸酶,X_3 代表蔗糖酶,X_4 过氧化氢酶,X_5 土壤有机质,X_6 代表全氮,X_7 代表碱解氮,X_8 代表有效磷,X_9 代表速效钾,X_{10}代表 pH,X_{11} 代表容重,X_{12}代表孔隙度。第二主成分并不能代表土壤综合养分信息,但第二主成分中,过氧化氢酶,有机质、全氮、速效钾、pH、容重、孔隙度均有相对较大的载荷,因而对第二主成分的影响也较大。第二主成分关系式还可反映出有机质不断分解减少时,全氮、pH、容重将增加,速效钾、孔隙度减少。因而第二主成分主要反映了土壤内部生理生化过程的某些重要变化。

3　讨论与结论

土壤是生态系统中物质循环和能量转化过程的重要场所,土壤酶直接参与了土壤营养元素的有效

化过程,在一定程度上反映了土壤养分转化的动态,对维持土壤生态系统的碳、氮平衡起着重要的作用[21,26]。本研究结果表明,翻压绿肥能够明显提高土壤酶活性和土壤肥力水平,当翻压量在15000 kg/hm^{2}以上时,对土壤均有较好的培肥效果,绿肥作为一种优质的有机肥料,与施用芝麻饼肥[27]和菜籽饼肥[28]等有机肥培肥植烟土壤的效果一样,翻压绿肥后可为微生物提供大量的有机碳源,促进土壤中细菌、真菌和放线菌3大类群微生物的总量成倍或成十几倍的大幅度增加[19],而绿肥腐解过程也需要微生物的参与,同时其分解产生的养分能有效补充土壤养分的散失,促进烟株的旺盛生长。本研究以烟株移栽后30 d的土壤数据为依据,根据绿肥翻压时间和绿肥腐解规律[23],绿肥中大部分养分能够在移栽后30 d左右释放,而此时烟株尚未进入旺长期,对养分吸收较少,根系分泌物也较少,因此,此时期的土壤酶活性和土壤肥力指标更能近似地检验绿肥的供肥能力。

在本研究中,随着绿肥翻压量的增加,土壤酶活性有逐渐增强的趋势,土壤养分指标则在绿肥翻压量达到一定程度时效果较好。随着翻压量的逐步增大,土壤酶活性和土壤理化指标的增加变缓,尤其土壤养分指标还表现出降低的趋势,这可能与土壤微生物分解绿肥所需的碳源和氮源状况有关[29],当有机物质投入土壤后,增加了土壤的碳源和氮源,有机物质分解本身能够带入土壤各种酶类,同时有机物质促进微生物繁殖,微生物活动能够产生大量土壤酶。但土壤养分的变化趋势则说明翻压绿肥必须注意量的控制,绿肥翻压量在适当的范围内能够快速分解并释放土壤有效养分,而当绿肥翻压量较大时,由于存在微生物和烟株争夺土壤养分,尤其争夺土壤氮源的矛盾,反而会抑制绿肥分解和土壤养分释放,因此绿肥腐解和土壤养分释放存在着随微生物数量及其活动、以及土壤碳源和氮源变化既促进又抑制的作用,这可能是当绿肥翻压量增加到30000 kg/hm^2(T4处理)时,土壤酶活性增加趋势变缓和部分土壤肥力指标反而变差的原因。

本研究通过简单相关分析发现,4种土壤酶之间以及土壤酶与土壤肥力因子之间存在有极显著的相关关系。不同土壤酶在土壤中的作用不仅表现在其专性作用上,而且还表现在共性作用上,相关系数的大小反映不同酶的专性作用或共性作用的大小,因而对土壤理化因子的影响也不同。而典型相关分析结果表明,第一对典型变量线性函数基本上反映了土壤酶和土壤养分因子之间的关系,较为真实地反映了土壤酶活性综合因子和土壤养分综合因子对土壤肥力水平的影响,这与简单相关分析结果相似,但第二对典型变量线性函数反映的结果和简单相关分析结果差异较大,它反映土壤酶活性综合因子和土壤养分综合因子之间的变异信息,说明典型相关分析比简单相关分析在更深层面上反映出了土壤酶和土壤养分因子之间的关系。而简单相关和典型相关的差异可能是由于在多个变量的系统中,任意两个变量的线性相关关系都会受到其它变量的影响[13],因此,无论是简单相关还是复相关,都只是孤立考虑单个变量之间的相关,没有考虑变量组内部各变量间的相关。但无论从简单相关还是典型相关分析都可以看出,土壤酶在促进土壤中碳、氮、磷、钾等矿质元素的转化,促进土壤中碳源、氮源、多糖类、有机物质等的转化中并不是孤立的,而是紧密联系且互相影响的。简单分析和典型相关分析的结果进一步说明了土壤酶在促进土壤有机物质转化中不仅显示专性特性,同时也存在共性关系,酶的专性特性反映了土壤中与某类酶相关的有机化合物的转化过程,而有共性关系的土壤酶的总体活性在一定程度上反映着土壤肥力水平[14,30]。

土壤酶是土壤中活跃的有机成分之一,在土壤养分循环以及植物生长所需养分的供给过程中起到重要作用。土壤酶活性能否作为土壤肥力的评价指标一直是土壤学界争论的热点问题。许多学者认为土壤酶活性可以作为衡量土壤生物学活性和土壤生产力的指标[13-15],但也有学者持相反意见[16-17]。本研究通过主成分分析发现,第一主成分的累积方差贡献率最大,对土壤肥力起着主要作用,土壤养分因子和土壤酶因子均在第一主成分中具有较大的载荷,对第一主成分的影响最大。因此,第一主成分能够近似地反映土壤的综合肥力。对第二主成分的研究发现,第二主成分虽然不能代表土壤的肥力水平,但其能够在更深层次上反映土壤内部重要的生理生化过程的变化,如可反映土壤熟化过程的部分特征,同时也说明有机物质的投入和分解对土壤理化性状、生物学性状具有明显的影响。综合简单相关分析、典型相关分析和主成分分析可以看出,第一主成分线性函数式所表示的土壤酶及土壤养分因子对土壤综合肥力的影响结果与简单相关分析和典型相关分析中第一对典型变量线性函数所表示的影响结果一致。说明翻压绿肥能够明显影响土壤酶活性和土壤养分因子,通过绿肥的投入,不仅能够增强土壤

酶活性,而且能够提升土壤养分因子含量,进而影响土壤的综合肥力水平。

参 考 文 献:

[1] 姜勇,梁文举,闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响[J]. 土壤通报,2004,35(3):347-351.
Jiang Y, Liang W J, Wen D Z. Effects of no-tillage on soil biological properties in earmlands: a review[J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(3): 347-351.

[2] Boerner R E J, Brinkman J A, Smith A. Seasonal variations in enzyme activity and organic carbon in soil of a burned and unburned hardwood forest[J]. Soil Biol. Biochem., 2005, (37): 1419-1426.

[3] Zhang Y M, Zhou G Y, Wu N *et al*. Soil enzyme activity changes in different-aged spruce forests of the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Pedosphere, 2004, 14(3): 305-312.

[4] Paz F J, Trasar C C, Leircds M C *et al*. Biochemical properties in managed grassland soils in a temperate humid zone: modifications of soil quality as a consequence of intensive grassland use[J]. Biol. Fert. Soils., 2009, 45(7): 711-722.

[5] Guo Y J, Ni Y, Han J G. The Influence of land use change on chemical and biological properties of steppe soils in northern china[J]. Arid. Land. Res. Manag., 2009, 23(3): 197-212.

[6] 刘兰兰,史春余,梁太波,等. 腐植酸肥料对生姜土壤微生物量和酶活性的影响[J]. 生态学报,2009,29(11):6136-6141.
Liu L L, Shi C Y, Liang T B *et al*. Microbial and enzyme activity in response to humic acid in soil with a ginger crop[J]. Acta Ecol. Sin., 2009, 29(11): 6136-6141.

[7] 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.
Xu L F, Han Q F, Wu Z Y *et al*. Spatial variability of soil enzyme activity in pear orchard under clean and sod cultivation models[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(23): 4977-4982.

[8] 徐振锋,唐正,万川,等. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2727-2733.
Xu Z F, Tang Z, Wan C *et al*. Effects of simulated warming on soil enzyme activities in two subalpine coniferous forests in west Sichuan[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(11): 2727-2733.

[9] 田永强,曹之富,张雪艳,等. 不同农艺措施下温室土壤酶活性的动态变化及其相关性分析[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(4):857-864.
Tian Y Q, Cao Z F, Zhang X Y *et al*. Changes of soil enzyme activities under different agricultural treatments in greenhouse and its correlation analysis[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(4): 857-864.

[10] 马宁宁,李天来,武春成,等. 长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1766-1771.
Ma N N, Li T L, Wu C C *et al*. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and soil physicochemical properties of facility vegetable field[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(7): 1766-1771.

[11] 王树起,韩晓增,乔云发,等. 不同土地利用和施肥方式对土壤酶活性及相关肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6):1311-1316.
Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F *et al*. Effects of land uses and fertilization systems on soil enzyme activities and nutrients[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(6): 1311-1316.

[12] 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.
An S S, Huang Y M, Liu M Y. Characteristics of soil enzyme activities and their relationships with soil properties in southern ningxia loess hilly region[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 15(5): 55-58.

[13] 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.

[14] 徐华勤,章家恩,冯丽芳,等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1464-1471.
Xu H Q, Zhang J E, Feng L F *et al*. Effects of typical soil types and land use patterns on soil enzyme activities in Guangdong province[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1464-1471.

[15] 唐玉姝,慈恩,颜廷梅,等. 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[J]. 土壤学报,2008,45(5):1000-1006.
Tang Y S, Ci E, Yan T M *et al*. 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[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 1000-1006.

[16] Sakorn P P. Urease activity and fertility status of some lowland rice soils in the central plain[J]. Thai. J. Agric. Sci., 1987, (20): 173-186.

[17] 周瑞莲,张普金,徐长林. 高寒山区火烧土壤对其养分含量和酶活性的影响及灰色关联分析[J]. 土壤学报,1997,34(1):89-96.
Zhou R L, Zhang P J, Xu C L *et al*. Effect of burning turf on nutrient contents and enzymatic activities of alpine meadow soil and its grey relationship analysis[J]. Acta Pedol. Sin., 1997, 34(1): 89-96.

[18] 刘国顺,李正,敬海霞,等. 连年翻压绿肥对植烟土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1472-1478.
Liu G S, Li Z, Jing H X *et al*. Effects of consecutive turnover of green manures on soil microbial biomass and enzyme activity[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1472-1478.

[19] 刘国顺，罗贞宝，王岩，等. 绿肥翻压对烟田土壤理化性状及土壤微生物量的影响[J]. 水土保持学报，2006，20(1)：95-98.
Liu G S, Luo Z B, Wang Y *et al*. Effect of green manure application on soil properties and soil microbial biomass in tobacco field[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(1): 95-98.

[20] 李正，刘国顺，敬海霞，等. 翻压绿肥对植烟土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 草业学报，2011，20(3)：225-232.
Li Z, Liu G S, Jing H X *et al*. Effects of green manure application on microbial biomass C, N and enzyme activity of tobacco-planting soils[J]. Acta Pratac. Sin., 2011, 20(3): 225-232

[21] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986.
Guan S Y. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2005.
Bao S D. Analysis of agricultural chemistry in soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[23] 王岩，刘国顺. 绿肥中养分释放规律及对烟叶品质的影响[J]. 土壤学报，2006，43(2)：273-279.
Wang Y, Liu G S. Nutrient release from green manures and its effect on quality of tobacco leaves[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(2): 273-279.

[24] 曹慧，孙辉，杨浩，等. 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.
Cao H, Sun H, Yang H *et al*. A review soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. Chin. J. Appl. Environ. Biol., 2003, 9(1): 105-109

[25] 和文祥，朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析[J]. 土壤学报，1997，34(4)：392-397.
He W X, Zhu M E. Study on relationship between soil urease and soil fertility of Shaanxi[J]. Acta Pedol. Sin., 1997, 34(4): 392-397

[26] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京：科学出版社，1987.
Zhou L K. Soil enzymology[M]. Beijing: Science Press, 1987.

[27] 武雪萍，刘增俊，赵跃华，等. 施用芝麻饼肥对植烟根际土壤酶活性和微生物碳、氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(4)：541-546.
Wu X P, Liu Z J, Zhao Y H *et al*. Effects of sesame cake fertilizer on soil enzyme activities and microbial C and N at rhizosphere of tobacco[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(4): 541-546.

[28] 刘天毅，李春英，熊德中，等. 烤烟有机肥与化肥配合施用效应的探讨[J]. 中国烟草科学，2000，21(4)：23-26.
Liu T Y, Li C Y, Xiong D Z *et al*. Study on the effects of tobacco-planting soils applied with manure and fertilizer[J]. Chin. Tob. Sci., 2000, 21(4): 23-26.

[29] 韩晓日，郑国砥，刘晓燕，等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J]. 中国农业科学，2007，40(4)：765-772.
Han X R, Zheng G D, Liu X Y *et al*. Dynamics, sources and supply charecteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(4): 765-772.

[30] 安韶山，黄懿梅，李壁成，等. 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 *et al*. 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.