

施用生物炭后土壤生物活性与土壤肥力的关系

陈心想,何绪生,耿增超,尚杰,赵军,刘春言,王亚萍,殷笑寒

(西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要: 分析了生物炭不同用量条件下土壤生物活性与土壤主要肥力指标之间的关系。相关分析表明,除蔗糖酶活性和微生物量碳外,土壤其它生物活性指标与土壤容重间呈显著负相关。土壤脲酶和过氧化氢酶活性、微生物量氮和三大类微生物与土壤主要肥力指标间呈显著或极显著正相关。除蔗糖酶外,酶活性与三类微生物数量间显著相关,但蔗糖酶、土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶的活性间并不完全显著相关。通径分析表明,脲酶和微生物量氮对土壤肥力影响以直接作用为主,而过氧化氢酶则以间接作用为主。主成分分析结果表明,可以用微生物因子、酶活性因子和速效磷因子进行综合描述土壤肥力特征。其中,各处理综合得分在玉米季大于小麦季,且随生物炭用量的增加而增加,表明高用量生物炭对土壤肥力的提高作用明显。

关键词: 生物炭;土壤生物活性;土壤肥力;土壤容重;通径分析;主成分分析

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A

Relationship between soil biological activities and soil fertility after biochar application

CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, SHANG Jie, ZHAO Jun, LIU Chun-yan, WANG Ya-ping, YIN Xiao-han

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University; Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The correlation between soil biological activities and soil fertility was studied after different amounts of biochar were applied. The correlation analysis results showed that soil biological activities, not including invertase activity and oil microbial biomass carbon, were negatively correlated with soil bulk density. There were significant correlations between soil urease and catalase activity, soil microbial biomass nitrogen, the quantities of microbes and soil chemical and physical factors. Except for invertase activity, the soil enzyme activities showed a positive correlation with the quantities of microbes. But the relationships between four soil enzyme activities were not totally significant. Path analysis showed that the soil urease and microbial biomass nitrogen played a predominantly direct role in soil fertility, while the catalase activity mainly provided an indirect contribution. According to the results of Principal Components Analysis (PCA), soil fertility could be described by microbe factor, enzyme activities factor, and available phosphorus factor. Soils after maize harvest had higher comprehensive score than those after wheat harvest. The comprehensive score of different treatments was escalated with the increase of biochar application rate, which indicated that high rate of biochar would have a more significant effect on improving soil fertility.

Keywords: biochar; soil biological activities; soil fertility; soil bulk density; Principal Components Analysis; Path Analysis

土壤质量不仅取决于土壤的理化性质,而且与土壤的生物学性质密切相关^[1]。土壤生物学性状(土壤微生物种群、微生物量、酶活性等)可以反映土壤质量、土壤肥力的演变,并可用作评价土壤健康的生物指标^[2]。土壤微生物是土壤中物质转化和养分循环的驱动者,微生物吸收和“临时”保持养分,是植

收稿日期:2014-05-29
基金项目:农业部“948”项目(2010-Z19);陕西省攻关项目(2010K02-12-1);国家级大学生创新创业训练计划项目;西北农林科技大学大学生创新创业训练计划项目
作者简介:陈心想(1986—),女,山东临沂人,硕士,研究方向为废弃生物质资源化利用研究。E-mail:xinxiang20073975@163.com。
通信作者:耿增超(1963—),男,陕西韩城人,教授,硕士生导师,主要从事农林废弃物资源化利用及森林土壤研究。E-mail: gengzengchao@126.com。

物养分的“有效库”,微生物量碳、氮被认为是土壤活性养分的储存库。微生物能够通过分泌有机酸和功能酶的成分直接“活化”固定态的 P、K 等养分^[3]。土壤酶主要来自土壤微生物和植物根系,而微生物和植物生长状况均与土壤肥力特征关系密切。大量研究表明,农业土壤和陆地森林土壤酶活性与土壤肥力水平密切相关^[4-5]。研究表明,与其它土壤性质相比,土壤微生物量及其酶活性对施肥管理、种植体系,以及土地利用方式的变化的响应更迅速^[6-7]。

已有研究表明^[8],生物炭可以改变土壤的物理性状和结构,促进土壤生物化学与物理化学的交互作用,促进微生物的生长和活性,提高土壤保肥性能从而提高土壤肥力。前人用 PLFA 技术研究认为生物炭对微生物群落结构影响较大,主要有利于个体较小且生长速度较快的微生物的生长^[9]。Grossman 等^[10]比较观察发现,含生物炭的土壤不论种类和用途其微生物种类基本相同,且和不含生物炭的土壤中微生物种类大有不同,说明生物炭对微生物的群落分布具有一定的控制作用。目前在森林土壤和农业土壤上关于土壤酶与土壤肥力间的关系研究较多^[11-12],但关于施用生物炭后,土壤生物活性与土

壤肥力间的关系研究较为罕见^[13],并且在陕西关中地区瘠土上的研究还鲜有报道。本文旨在通过对施用生物炭后土壤生物活性的研究,采用相关分析、通径分析和主成分分析,以讨论土壤生物活性与土壤肥力水平的关系以及将其作为土壤肥力指标的可行性,为生物炭在提高土壤性质方面提供一些生物学的参考指标,从而为土壤肥力的综合评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在西北农林科技大学试验田进行。试验地属温带大陆性气候地区,土壤类型为褐土类,瘠土亚类,红油土属,黄土母质,系统分类为土垫旱耕人为土,为石灰性土壤。研究所用生物炭由陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司提供,是在裂解炉、限氧环境下(450℃)由废弃果树树干、枝条热裂解所得,磨细过 1 mm 筛备用。供试作物选用西北农林科技大学选育小麦“小偃 22 号”和杂交玉米种“正大 12”。表层(0~20 cm)土壤和生物炭的基本性质见表 1。

表 1 供试土壤和生物炭的基本理化性质

Table 1 Elementary chemical and physical properties of soil and biochar in the experiment

土壤 Soil	pH (1:2.5)	容重 BD /(g·cm ⁻³)	有机质 OM /(g·kg ⁻¹)	全氮 TN /(g·kg ⁻¹)	全磷 TP /(g·kg ⁻¹)	全钾 TK /(g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK /(mg·kg ⁻¹)
	7.33	1.30	14.99	0.71	0.43	19.64	18.20	15.90	12.38	193.0
生物炭 Biochar	pH(1:10)	比表面积 Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)	N/%		O/%	C/%	H/%	NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	
	10.43	86.70	1.19		23.81	72.38	2.62	0.52	1.86	

注: BD:容重;OM:有机质;TN:全氮;TP:全磷;TK:全钾;AP:有效磷;AK:速效钾。下同。
Note: BD: Bulk density; OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium. The same below.

1.2 田间试验设计

生物炭用量为 5 个水平: B0(0 t·hm⁻²)、B20(20 t·hm⁻²)、B40(40 t·hm⁻²)、B60(60 t·hm⁻²)、B80(80 t·hm⁻²), 小区面积为 1.35 m×3.5 m, 采用完全随机排列, 3 次重复。除生物炭用量不同外, 氮、磷、钾肥(分别为尿素、磷酸二铵、硫酸钾)均作基肥施用, 用量为每公顷 225 kg N, 180 kg P₂O₅, 150 kg K₂O, 于 2012 年 4 月 28 日种植玉米前将生物炭一次性施入并与耕层(0~20 cm)土壤混匀, 肥料(包含有机肥)于每次种植前施入。

试验进行两季, 于 2012 年 4 月 28 日至 8 月 21 日种植玉米, 播种量为 52 500 株·hm⁻², 于 2012 年 10 月 17 日至 2013 年 5 月 31 日种植小麦, 播种量为 150 kg·hm⁻²。在作物生长期间根据天气及作物生

长状况适量灌水, 以满足作物正常生长发育所需。作物收获时于田间按蛇形采样法随机布 3 点采集 0~20 cm 混合土样, 一部分于 4℃ 冰箱保存用于测定土壤 NH₄⁺-N 含量和生物活性, 另一部分室内风干、过筛, 用于测定土壤化学性质。

1.3 测定指标及方法

土壤和生物炭的基本理化性质参照《土壤农化分析》常规方法测定^[14]。交换性盐基离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)采用 NH₄Cl + C₂H₅OH 交换-原子吸收分光光度法^[15]。

土壤 C/N 和盐基饱和度(Base saturation percentage, BSP)计算公式:

$$C/N = \text{有机碳} / \text{全氮}$$

$$\text{盐基饱和度}(\%) = C(K^+ + Na^+ + 1/2Ca^{2+} + 1/$$

2Mg²⁺)/阳离子交换量×100

土壤生物活性的测定:脲酶活性采用靛酚比色法^[16],过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法,蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[17];土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸提取-K₂SO₄提取法^[18];分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、高氏一号培养基和 PDA 培养基按稀释平板法对细菌、放线菌和真菌进行计数^[19]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 及 SPSS18.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用最小显著差异法(LSD),显著性水平设定为 0.05,各样本均服从正态分布,故应用 Pearson 相关系数对不同量生物炭处理的土壤肥力指标进行相关分析。采用主成分分析法对受不同量生物炭处理显著或极显著影响的理化和生物指标进行降维处理:其中,用 KMO

和 Bartlett 的球形度检验分析指标选取的适宜性;以各指标的相关系数矩阵为基础,用主成分法提取特征值大于 1 或累计方差贡献率大于 85%的公因子;用方差最大正交旋转法进行因子旋转;用回归法计算不同量生物炭处理的公因子得分。

2 结果与分析

2.1 相关分析

2.1.1 土壤生物活性与理化性质间的关系 由表 3 可知,小麦和玉米收获后,土壤肥力水平在不同程度上受土壤生物活性影响,土壤肥力与土壤生物活性密切相关。

脲酶活性与土壤容重在麦季呈显著负相关,与 pH 在玉米季显著相关,与有机 C、全 N、C/N 和 BSP 在两季均呈显著或极显著相关,与全 P、全 K、速效 K 和阳离子交换量(Cation exchange content, CEC)在麦季呈显著或极显著正相关。蔗糖酶活性与 C/N 和

表 2 作物收获后土壤生物活性和土壤肥力指标
Table 2 Soil biological activities and soil fertility factors after crops harvest

作物 Crop	处理 Treatment	Ur. /(g·cm ⁻³)	Inv. /(g·kg ⁻¹)	Pho. /(cmol·L ⁻¹)	Cat. /%	细菌 Bacteria /(10 ⁶ cfu·g ⁻¹)	放线菌 Actinomycetes /(10 ⁴ cfu·g ⁻¹)	真菌 Fungi /(10 ² cfu·g ⁻¹)	MBC /(ng·kg ⁻¹)	MBN /(mg·kg ⁻¹)
玉米 Maize	B0	2.08±0.08b	28.97±3.38a	0.93±0.04c	1.57±0.03b	251.78±27.5c	33.26±1.64d	6.23±0.34d	351.10±5.72aA	19.52±0.75bBC
	B20	2.29±0.08ab	29.60±0.61a	0.97±0.03bc	1.59±0.06b	342.36±85.1bc	40.67±1.47c	9.30±0.33c	336.60±1.99aA	17.05±0.51bBC
	B40	2.39±0.09ab	21.42±2.71a	1.01±0.01abc	1.75±0.01ab	398.86±17.7ab	88.46±3.23b	12.77±0.88b	339.26±9.38aA	19.83±3.21bD
	B60	2.35±0.10ab	24.08±5.09a	1.04±0.03ab	1.82±0.12a	406.93±19.8ab	98.69±2.59a	13.33±1.33b	339.46±2.38aA	29.52±1.36aB
	B80	2.58±0.13a	31.80±2.44a	1.06±0.02a	1.90±0.07a	512.33±18.6a	99.84±5.81a	16.3±0.2a	354.62±5.03aA	30.84±4.71aC
小麦 Wheat	B0	2.32±0.13b	19.72±2.78a	0.94±0.01a	1.59±0.04b	4.92±0.14c	4.12±0.26b	0.56±0.02d	251.15±2.3aB	21.92±2.74aB
	B20	2.53±0.16ab	19.82±2.32a	0.90±0.03a	1.79±0.06ab	5.19±0.46c	5.05±0.33b	0.61±0.04d	268.68±3.37aA	28.69±7.11aB
	B40	2.55±0.04ab	21.45±2.85a	0.91±0.08a	1.79±0.04ab	7.23±0.46b	7.76±0.35a	0.88±0.06c	274.92±2.04aAB	30.18±3.51aC
	B60	2.66±0.05ab	14.26±0.12a	0.84±0.02a	1.75±0.06ab	7.82±0.09ab	8.35±0.84a	1.34±0.11b	278.09±3.39aA	24.60±0.33aB
	B80	2.91±0.18a	15.21±2.49a	0.91±0.03a	1.91±0.13a	8.71±0.8a	8.84±0.34a	1.54±0.03a	234.81±9.99aB	31.19±0.19aC

作物 Crop	处理 Treatment	BD /(g·cm ⁻³)	pH	OC /(g·kg ⁻¹)	CEC /(cmol·L ⁻¹)	BSP /%	TN /(g·kg ⁻¹)	C/N	TP /(g·kg ⁻¹)	TK (g·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)	AP /(mg·kg ⁻¹)	AK /(mg·kg ⁻¹)
玉米 Corn	B0	1.42±0.04a	7.39±0.20b	7.73±0.35e	22.43±0.38a	43.84e	0.87±0.02b	8.94	0.51±0.04a	17.53±1.89b	2.37±0.35a	9.58±0.71a	177.94±7.46b
	B20	1.41±0.01a	8.29±0.01a	11.89±0.62d	22.60±0.38a	63.54d	0.87±0.02b	13.74	0.51±0.02a	20.31±1.31ab	3.38±0.90a	11.48±1.42a	178.93±5.74b
	B40	1.39±0.05a	8.31±0.04a	18.79±0.99c	21.85±0.23a	65.93c	0.88±0.02b	21.31	0.50±0.01a	19.60±0.53ab	2.02±0.45a	10.11±0.46a	183.41±7.82b
	B60	1.31±0.05ab	8.26±0.04a	22.32±0.69b	21.67±0.20a	80.03b	0.95±0.06b	23.40	0.51±0.01a	21.32±0.44a	2.84±0.57a	11.55±0.76a	206.30±3.76ab
	B80	1.27±0.03b	8.26±0.07a	28.11±1.87a	22.49±0.61a	80.98a	1.07±0.04a	26.34	0.49±0.00a	21.70±0.38a	1.83±0.36a	9.91±0.40a	215.26±15.58a
小麦 Wheat	B0	1.33±0.02a	8.05±0.02b	9.24±0.21d	20.21±0.35b	41.35e	0.83±0.02b	11.09	0.44±0.01c	20.67±1.01c	3.13±0.24b	10.09±0.78b	189.88±7.90b
	B20	1.25±0.02ab	8.05±0.02b	12.03±0.73c	21.09±0.26b	59.59d	0.88±0.04ab	13.71	0.46±0.01bc	20.97±0.28c	3.16±0.23b	10.19±0.66b	208.79±10.71ab
	B40	1.25±0.02ab	8.10±0.01ab	13.81±0.18c	20.74±0.20b	54.28c	0.90±0.03ab	15.33	0.47±0.01abc	21.27±0.54bc	2.83±0.28b	13.63±1.55a	222.72±9.94ab
	B60	1.23±0.03b	8.09±0.01ab	18.36±1.44b	20.86±0.35b	69.87b	0.90±0.04ab	20.41	0.49±0.02ab	22.63±0.27ab	2.67±0.16b	10.69±0.75b	226.20±10.91a
	B80	1.21±0.04b	8.11±0.02a	23.19±1.34a	22.08±0.34a	80.34a	0.97±0.05a	23.87	0.50±0.01a	23.64±0.34a	4.21±0.18a	10.08±0.33b	231.68±14.19a

注: OC:有机碳; Ur.:脲酶; Inv.:蔗糖酶; Pho.:碱性磷酸酶; Cat.:过氧化氢酶; MBC:土壤微生物量碳; MBN:土壤微生物量氮; CEC:阳离子交换量。下同。

Note: OC:Organic carbon; Ur.:Urease; Inv.:Invertase; Pho.: Alkali phosphatease; Cat.: Catalase; MBC: Microbial biomass carbon; MBN: Microbial biomass nitrogen; CEC: Cation exchange content. The same below.

全 K 在麦季显著负相关,与麦季速效 P 和玉米季 CEC 显著相关。碱性磷酸酶活性与玉米季容重显著负相关,与有机 C、C/N、全 K 和 BSP 在玉米季均呈极显著相关。过氧化氢酶活性与容重呈在两季均显著或极显著负相关,与有机 C、全 N、C/N 和速效 K 在两季均呈显著或极显著正相关,与 NH_4^+ -N 和 CEC 在

麦季分别呈极显著正相关和负相关,与 BSP 在玉米季显著相关。微生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 与 NH_4^+ -N 和 CEC 在玉米季均呈显著正相关。微生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN) 与容重在玉米季呈极显著负相关,与有机 C、全 N、C/N 和速效 K 在玉米季均呈显著或极显著正相关。

表 3 土壤生物活性与肥力因素的相关矩阵									
Table 3 Correlation matrix(r^2 values) between soil biological activities and soil fertility factors									
肥力因素 Fertility factors	Ur.	Inv.	Pho.	Cat.	MBC	MBN	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungi
BD	(-0.914 [*])		-0.600 [*]	-0.648 ^{**} (-0.611 [*])		-0.668 ^{**}	-0.569 [*] (-0.519 [*])	-0.603 [*] (-0.743 ^{**})	-0.674 ^{**} (-0.569 [*])
pH	0.546 [*]						0.575 [*] (0.581 [*])	0.590 [*] (0.667 ^{**})	0.664 ^{**} (0.635 [*])
OC	0.705 ^{**} (0.710 ^{**})		0.655 ^{**}	0.676 ^{**} (0.596 [*])		0.679 ^{**}	0.783 ^{**} (0.895 ^{**})	0.893 ^{**} (0.724 ^{**})	0.916 ^{**} (0.902 ^{**})
TN	0.670 ^{**} (0.983 ^{**})			0.515 [*] (0.945 [*])		0.632 [*]	0.607 [*] (0.672 ^{**})	0.563 [*]	
C/N	0.702 ^{**} (0.706 ^{**})	(-0.533 [*])	0.794 ^{**}	0.776 ^{**} (0.544 [*])		0.666 ^{**}	0.781 ^{**} (0.859 ^{**})	0.971 ^{**} (0.849 ^{**})	0.947 ^{**} (0.964 ^{**})
TP	(0.653 ^{**})						(0.687 ^{**})		(0.705 ^{**})
TK	(0.514 [*])	(-0.582 [*])	0.656 ^{**}				(0.695 ^{**})	(0.654 ^{**})	(0.824 ^{**})
NH ₄ ⁺ -N				(-0.670 ^{**})	0.550 [*]		(-0.618 [*])	(-0.725 ^{**})	(-0.556 [*])
AP		(0.567 [*])							
AK	(0.895 [*])		0.664 ^{**} (0.578 [*])			0.799 ^{**}	0.642 ^{**} (0.773 ^{**})	0.639 [*] (0.566 [*])	0.642 ^{**} (0.612 [*])
CEC	(0.937 [*])	0.601 [*]		(0.734 ^{**})	0.559 [*]				(0.610 [*])
BSP	0.882 [*] (0.973 ^{**})	0.966 ^{**}	0.888 ^{**}			0.915 [*]			0.932 [*] (0.901 [*])
Ur.			0.655 ^{**}	(0.908 [*])			0.602 [*] (0.695 ^{**})	0.651 ^{**}	0.686 ^{**} (0.644 ^{**})
Inv.			(0.733 ^{**})						
Pho.				0.695 ^{**}		0.539 [*]	0.590 [*]	0.782 ^{**}	0.734 ^{**}
Cat.						0.727 ^{**} (0.914 [*])	0.752 ^{**} (0.586 [*])	0.781 ^{**} (0.559 [*])	0.770 ^{**}
MBN							0.573 [*]	0.681 ^{**}	0.603 [*]
细菌 Bacteria								0.726 ^{**} (0.838 ^{**})	0.798 ^{**} (0.853 ^{**})
放线菌 Actinomycetes									0.898 ^{**} (0.836 ^{**})

注:括号外为玉米季线性相关数据,括号内为麦季线性相关数据。
Note: Inside of bracket are coefficients of line correlation of the wheat season, outside of bracket are coefficients of line correlation of the corn season. *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

三类微生物数量与容重在两季和 NH_4^+ -N 在麦季均呈显著或极显著负相关,与 pH、有机 C、C/N 和速效 K 在两季均呈显著或极显著正相关,与全 K 在麦季均呈极显著正相关。此外,细菌和真菌数量与全 P 在麦季呈极显著正相关,细菌数量与全 N 在两季呈显著正相关,与 BSP 在玉米季亦呈显著正相关。放线菌数量与全 N 在玉米季显著相关。真菌数量与 CEC 在麦季和 BSP 在两季均呈显著相关。

2.1.2 土壤生物活性间的关系 脲酶与碱性磷酸酶活性和放线菌数量在玉米季呈极显著正相关,与细菌和真菌数量在两季均呈显著或极显著正相关,与过氧化氢酶活性在麦季呈显著相关。蔗糖酶与碱性磷酸酶活性在麦季呈极显著相关,表明土壤碳素和磷素的转化是相互影响的。碱性磷酸酶与过氧化氢酶活性、MBN 和三类微生物数量在玉米季呈显著或极显著相关。过氧化酶活性与 MBN 和三类微生物

物数量在玉米季均呈极显著相关,与 MBN、细菌和放线菌数量在麦季呈显著正相关。MBN 与三类微生物数量在玉米季呈显著相关。土壤三类微生物数量间在两季均呈极显著正相关。

2.2 通径分析

土壤生物活性对土壤养分影响作用是相互制约、互相促进的复杂关系,仅从测定结果相关分析说明是不够的。通径分析是在各变量无量纲的基础上,计算通径系数,通过其大小与正负来表示自变量对因变量作用的大小与方向,且通径系数间可进行

相互比较,比相关分析提供更多的信息^[20]。直接通径系数反应了自变量对因变量的直接影响,而间接通径系数为某一自变量通过其它自变量对因变量的作用效应,即为直接通径系数乘以肥力因子间的相关系数,更具有客观性,因而也更具有真实表现力^[11]。各自变量即脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和微生物量碳氮对因变量即有机碳、总氮、碳氮比、速效磷、速效钾和盐基饱和度的通径系数见表 4,划横线的为直接通径系数,其余为间接通径系数。

表 4 土壤生物活性与土壤养分含量的通径分析
Table 4 Path coefficients of soil biological activities affecting soil nutrient contents

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	Ur.→Y	Inv.→Y	Pho.→Y	Cat.→Y	MBC→Y	MBN→Y	总和 Sum
OC	Ur.	<u>1.653</u> *	0.417	-0.232	-1.043	-0.764	0.586	0.617
	Inv.	-0.998	<u>-0.691</u> *	0.533	0.325	1.036	-0.214	-0.010
	Pho.	-0.491	-0.471	<u>0.782</u> *	-0.252	0.875	0.031	0.474
	Cat.	1.322	0.172	0.151	<u>-1.304</u>	-0.217	0.734	0.858**
	MBC	-1.007	-0.571	0.546	0.226	<u>1.254</u> *	-0.294	0.154
	MBN	1.157	0.177	0.029	-1.144	-0.440	<u>0.837</u> *	0.616
TN	Ur.	<u>1.432</u>	-0.043	-0.113	-0.870	-0.577	0.678	0.506
	Inv.	-0.865	<u>0.071</u>	0.258	0.271	0.783	-0.248	0.271
	Pho.	-0.425	0.048	<u>0.379</u>	-0.210	0.662	0.036	0.490
	Cat.	1.146	-0.018	0.073	<u>-1.088</u>	-0.164	0.849	0.798**
	MBC	-0.872	0.059	0.265	0.188	<u>0.948</u>	-0.340	0.248
	MBN	1.002	-0.018	0.014	-0.954	-0.333	<u>0.968</u>	0.679*
C/N	Ur.	<u>1.587</u> **	0.534	-0.239	-0.954	-0.789	0.496	0.635*
	Inv.	-0.959	<u>-0.884</u> **	0.548	0.297	1.070	-0.182	-0.108
	Pho.	-0.471	-0.603	<u>0.804</u> **	-0.230	0.905	0.026	0.430
	Cat.	1.270	0.220	0.155	<u>-1.193</u> *	-0.224	0.622	0.849**
	MBC	-0.966	-0.730	0.561	0.206	<u>1.296</u> **	-0.249	0.118
	MBN	1.111	0.226	0.030	-1.046	-0.455	<u>0.709</u> *	0.575
AP	Ur.	<u>0.708</u>	0.217	-0.038	-1.297	-0.437	0.918	0.071
	Inv.	-0.428	<u>-0.360</u>	0.087	0.404	0.593	-0.336	-0.039
	Pho.	-0.210	-0.246	<u>0.128</u>	-0.313	0.501	0.049	-0.091
	Cat.	0.566	0.090	0.025	<u>-1.621</u>	-0.124	1.150	0.085
	MBC	-0.431	-0.297	0.089	0.280	<u>0.718</u>	-0.460	-0.101
	MBN	0.496	0.092	0.005	-1.422	-0.252	<u>1.311</u>	0.230
AK	Ur.	<u>1.331</u> **	0.297	0.002	-1.154	-0.553	0.970	0.893**
	Inv.	-0.804	<u>-0.492</u> *	-0.005	0.359	0.750	-0.355	-0.547
	Pho.	-0.395	-0.336	<u>-0.008</u>	-0.278	0.634	0.051	-0.332
	Cat.	1.065	0.123	-0.002	<u>-1.443</u> *	-0.157	1.216	0.801**
	MBC	-0.811	-0.406	-0.006	0.250	<u>0.908</u> **	-0.486	-0.551
	MBN	0.932	0.126	0.000	-1.266	-0.319	<u>1.386</u> **	0.859**
BSP	Ur.	<u>1.507</u>	0.356	-0.160	-0.733	-0.737	0.379	0.612
	Inv.	-0.910	<u>-0.590</u>	0.367	0.228	1.000	-0.138	-0.043
	Pho.	-0.448	-0.402	<u>0.538</u>	-0.177	0.845	0.020	0.377
	Cat.	1.206	0.147	0.104	<u>-0.916</u>	-0.210	0.474	0.805**
	MBC	-0.918	-0.487	0.376	0.158	<u>1.211</u>	-0.190	0.150
	MBN	1.055	0.151	0.020	-0.803	-0.425	<u>0.541</u>	0.538

除过氧化氢酶外,其它土壤生物指标对有机 C 的直接影响均达到显著水平,其顺序(按绝对值大小)为:脲酶>过氧化氢酶>MBC>MBN>碱性磷酸酶>蔗糖酶,但过氧化氢酶的负影响被其通过脲酶和 MBN 的正影响相抵消,反使其总影响最大并达到极显著水平;相反,脲酶和 MBN 的显著正影响被其间接效应所消弱,降低其总影响。

土壤生物活性对全 N 的直接影响均未达到显著水平,其中过氧化氢酶的负影响被其通过脲酶和 MBN 的正影响所消弱,而使其总的正影响达到极显著水平,而 MBN 的正影响被其通过脲酶的正影响综合后达到显著正影响。

土壤生物活性对 C/N 的直接影响均达到显著或极显著水平,顺序(按绝对值大小)为:脲酶>MBC>过氧化氢酶>蔗糖酶>碱性磷酸酶>MBN。脲酶对 C/N 的极显著正影响被其间接作用相互中和而降低了总影响,但仍为显著正影响,而过氧化氢酶的显著负影响被其通过脲酶和 MBN 的正影响相抵消而使其总的正影响达到极显著水平。

土壤生物活性对速效 P 的直接影响均未达到显著水平。除碱性磷酸酶外,其它生物指标对速效 K 的直接影响均达到显著或极显著水平,顺序(按绝对值大小)为:过氧化氢酶>MBN>脲酶>MBC>蔗糖酶>碱性磷酸酶,其中脲酶和 MBN 的极显著正影响被其通过过氧化氢酶的负影响抵消,而使其总的正影响仍达到极显著水平,而过氧化氢酶的显著负影响被其通过脲酶和 MBN 的间接作用抵消,亦为极显著正影响。土壤生物活性对 BSP 的直接影响均未达到显著水平,其中过氧化氢酶的负影响被其通过脲酶和 MBN 的正影响抵消,而使其达到极显著正影响。

2.3 土壤肥力因素的主成分分析

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^[15]。对选取指标的检验显示(表 5),其 KMO 统计量为 0.711>0.5,表明指标间的偏相关性较强;Bartlett 的球形度检验 Sig. 值小于 0.01,表明各指标的相关系数矩阵不是单位阵,故所选取指标可进行因子分析。

表 5 KMO 和 Bartlett 检验		
Table 5 KMO and Bartlett's tests		
项目 Item	值 Value	
KMO 统计量 Kaiser - Meyer - Olkin Measure	0.711	
Bartlett 的球形度检验(显著性)		
Bartlett's Test of Sphericity (Sig.)	0.000	

由表 6 可见,所提取 3 个公因子的累计贡献率达到 85.252%,对该区土壤的肥力特征具有较强的

解释。第一主成分主要综合了三大微生物类群和 BSP 的变异信息,因此命名为微生物因子。在第 2 公因子(F_2)上具有较高因子载荷的指标为有机 C、总 N、速效 K、脲酶和过氧化氢酶,因此命名为酶活性因子。在第 3 公因子(F_3)上具有较高因子载荷的指标为速效 P,因此命名为速效 P 因子。

将因子载荷换算为规格化特征向量后^[21],可以得到反映土壤肥力水平的 3 个主成分表达式:

$$F_1 = 0.194x_1 + 0.142x_2 - 0.019x_3 - 0.175x_4 - 0.429x_5 - 0.173x_6 + 0.029x_7 + 0.486x_8 + 0.485x_9 + 0.475x_{10};$$

$$F_2 = 0.479x_1 + 0.420x_2 + 0.053x_3 + 0.446x_4 + 0.178x_5 + 0.403x_6 + 0.426x_7 + 0.020x_8 + 0.071x_9 + 0.107x_{10};$$

$$F_3 = -0.054x_1 + 0.295x_2 + 0.881x_3 + 0.310x_4 - 0.059x_5 - 0.163x_6 + 0.030x_7 + 0.016x_8 - 0.071x_9 - 0.050x_{10}$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_{10}$ 分别代表 OC、TN、AP、AK、BSP、Ur.、Cat.、细菌、放线菌和真菌的特征值。将各原始变量标准化后,带入上述表达式,计算各主成分得分,再以各主成分的方差贡献率为权数,对所提取的得分进行加权求和,得到不同量生物炭处理下反映土壤肥力水平的综合得分(表 7)。

表 6 旋转的因子载荷矩阵
Table 6 Rotated component matrix

项目 Item	F_1	F_2	F_3
OC	0.390	0.867	-0.059
TN	0.286	0.761	0.321
AP	-0.039	0.096	0.958
AK	-0.353	0.809	0.337
BSP	-0.864	0.323	-0.064
Ur.	-0.349	0.731	-0.177
Cat.	0.058	0.771	0.033
细菌 Bacteria	0.979	0.036	0.017
真菌 Fungi	0.977	0.129	-0.077
放线菌 Actinomycetes	0.957	0.194	-0.054
特征根 Eigenvalue	4.06	3.283	1.183
方差贡献率 Rate of variance/%	40.597	32.829	11.826
累计贡献率 Cumulative rate/%	40.597	73.425	85.252

结果表明,土壤肥力水平综合得分总体上表现为玉米季大于小麦季,各处理综合得分随生物炭用量的增加而增加。原因可能是玉米季土壤温度和湿度较高而更适合三类群微生物生长,且生物炭为微

生物提供良好的生长环境,其作为土壤酶的主要来源,进而增加了土壤酶活性,且其作为第 1 和第 2 主成分对土壤肥力的影响较大。

表 7 主成分因子得分及土壤肥力水平综合得分
Table 7 Principal components factor scores and synthetic scores of soil fertility levels

处理 Treatment	作物 Crop	F_1	F_2	F_3	综合得分 Comprehensive score	综合排名 Comprehensive rank
B0	玉米 Corn	0.50	- 2.53	- 0.63	- 0.82	8
	小麦 Wheat	- 1.61	- 1.89	- 0.50	- 1.56	10
B20	玉米 Corn	1.03	- 1.75	- 0.02	- 0.18	4
	小麦 Wheat	- 1.91	- 0.22	- 0.22	- 1.02	9
B40	玉米 Corn	2.19	- 0.38	- 0.67	0.80	3
	小麦 Wheat	- 1.84	0.37	1.44	- 0.53	6
B60	玉米 Corn	2.44	0.77	0.43	1.52	2
	小麦 Wheat	- 1.93	0.81	0.11	- 0.59	7
B80	玉米 Corn	3.09	2.42	0.10	2.42	1
	小麦 Wheat	- 1.96	2.39	- 0.04	- 0.02	5

3 讨论与结论

3.1 相关分析

研究表明^[22],紧实土壤通气性降低,土壤微生物数量减少、活性降低,进而降低土壤酶活性,土壤生物活性与容重之间呈负相关,而本研究结果与其不完全一致。添加生物炭会降低土壤容重,增加土壤孔隙度,改善土壤生物活性,表现为蔗糖酶活性和微生物量碳与土壤容重间无显著关系,而土壤其它生物活性与容重之间仍呈负相关,这可能是由于生物炭的施用时间较短而效果尚不显著,其长期效应有待进一步研究。

Monreal^[23]认为,用包含几个酶活性的生物因子可以表征土地利用对土壤有机质的氧化及 C、N 养分的矿化的程度。本研究结果显示,土壤脲酶和过氧化氢酶活性、MBN 和三大类微生物与土壤主要肥力因子间呈显著或极显著正相关,说明施用生物炭后土壤酶仍可以用来表征土壤肥力状况,这与前人研究结果相似^[24-25],表明添加生物炭并不会大幅度改变土壤性质间的关系。蔗糖酶活性和 MBC 与有机碳、碱性磷酸酶活性与速效磷含量并无显著相关关系,原因可能是生物炭的大量施用增加了土壤有机碳含量,其增加的惰性有机碳并不能立即被蔗糖酶所分解而转化为微生物量碳等活性有机碳,而且生物炭还会吸附磷素从而影响土壤磷含量^[26]。

土壤酶活性间存在相互刺激机制,在进行酶促反应时,不仅具有自身的专一特性,同时存在一些共性,而这些有共性关系的土壤酶类的总体活性在某

种程度上反映着土壤肥力水平的高低^[27]。已有研究表明^[28-29],土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性之间均呈显著或极显著正相关,而本研究中仅脲酶与碱性磷酸酶活性和碱性磷酸酶与过氧化氢酶活性在玉米季呈极显著相关,脲酶与过氧化氢酶活性和蔗糖酶与碱性磷酸酶活性在小麦季显著相关,原因可能是同一种类的酶在不同植被以及不同质地土壤中所起的作用不同,且与生物炭在土壤存留时间有关,导致与土壤肥力因子间的相关性也存在差异^[30]。

蔗糖酶活性和 MBC 与三大类微生物数量不相关或不显著相关,这可能是由于平板计数法并不能准确反映土壤中微生物数量,将应用如测定总土壤 DNA 含量、底物诱导呼吸法、熏蒸浸提法和磷脂酸提取法等^[31]先进方法对其具体效应进行研究;此外,土壤中的酶可能来源于植物根系、残体与土壤动物等途径^[12]。

3.2 通径分析

通径分析结果表明,综合直接和间接作用可以认为,脲酶、过氧化氢酶和 MBN 与主要土壤肥力因子密切相关,其中脲酶和 MBN 以直接作用为主,而过氧化氢酶则以通过脲酶和 MBN 等土壤生物指标的间接作用为主。

3.3 主成分分析

主成分分析结果表明,对于施用不同量生物炭的主要土壤肥力特征,可以用微生物因子、酶活性因子和速效磷因子进行综合描述。这与前人^[20]利用主成分分析得出 3 种酶与土壤肥力间具有良好的相

关性,可用来指示草原退化与恢复状况的结论一致。其中,玉米季各处理综合得分大于小麦季,各处理综合得分随生物炭用量的增加而增加,表明较高用量生物炭对土壤肥力的提高作用明显,这与前人研究结果一致^[32]。因此,综合土壤养分与土壤生物活性的密切关系,认为将土壤生物活性与土壤养分相结合进行土壤肥力评价。

参 考 文 献:

[1] 刘恩科,赵秉强,李秀英,等.长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J].植物生态学报,2008,32(1):176-182.

[2] 宋长青,吴金水,陆雅海,等.中国土壤微生物学研究 10 年回顾[J].地球科学进展,2013,28(10):1087-1105.

[3] Wu Jinshui, Huang Min, Xiao Heai, et al. Dynamics in microbial immobilization and transformations of phosphorus in highly weathered sub-tropical soil following organic amendments[J]. Plant and Soil, 2007, 290(1/2):333-342.

[4] 陈立新.落叶松人工林施肥对土壤酶和微生物的影响[J].应用生态学报, 2004, 15(6):1000-1004.

[5] 徐福利,梁银丽,张成娥,等.施肥对日光温室黄瓜生长和土壤生物学特性的影响[J].应用生态学报,2004,15(7):1227-1230.

[6] 贾伟,周怀平,解文艳,等.长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 700-705.

[7] Liu Enke, Zhao Bingqiang, Mei Xurong, et al. Effects of no-tillage management on soil biochemical characteristics in Northern China[J]. Agric Sci Camb, 2010, 148(2):217-223.

[8] 王萌萌,周启星.生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J].环境化学,2013,32(5):768-780.

[9] Pietikainen J, Kiikkila O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. Oikos, 2000, 89(2):231-242.

[10] Grossman J M, O'Neill B E, Tsai S M, et al. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy[J]. Microbial Ecology, 2010, 60(1):192-205.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 张玉兰,陈利军,段争虎,等.荧光光谱法测定生物炭/秸秆输入土壤后酶活性的变化[J].光谱学与光谱分析,2014,34(2):455-459.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2001.

[15] 中华人民共和国农业部. NY/T1615-2008 石灰性土壤交换性盐基及盐基总量的测定[S].北京:中国农业出版社,2008.

[16] 严昶升.土壤肥力研究法[M].北京:中国农业出版社,1988:141-147.

[17] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:中国农业出版社,1986:271-319.

[18] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006:54-79.

[19] 程丽娟,薛泉宏.微生物学实验技术[M].西安:世界图书出版公司,2000:63-83.

[20] 袁志发,周静宇.多元统计分析[M].北京:科学出版社,2002.

[21] 林海明,张文霖.主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J].统计研究,2005,(3):65-69.

[22] 李潮海,王群,郝四平.土壤物理性质对土壤生物活性及作物生长的影响研究进展[J].河南农业大学学报,2002,36(1):32-37.

[23] Monreal C M, Bergstrom D W. Soil enzymatic factors expressing the influence of land use, tillage system and texture on soil biochemical quality[J]. Soil Sci, 2000,80:419-428.

[24] 焦婷,常根柱,周学辉,等.温性荒漠化草原不同放牧强度下土壤酶与肥力的关系[J].草地学报,2009,17(5):581-587.

[25] 柳燕兰,宋尚有,郝明德.长期定位施肥对黄绵土酶活性及土壤养分状况的影响[J].土壤通报,2012,43(4):798-803.

[26] 何绪生,张树清,余雕,等.生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J].中国农学通报,2011,27(15):16-25.

[27] 关松荫,沈桂琴,孟昭鹏,等.我国主要土壤剖面酶活性状况[J].土壤学报,1984,21(4):368-381.

[28] 薛冬,姚槐应,何振立,等.红壤酶活性与肥力的关系[J].应用生态学报,2005,16(8):1455-1458.

[29] 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.

[30] 张超,刘国彬,薛,等.黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤酶演变特征[J].林业科学,2010,46(12):23-29.

[31] 孙大荃,孟军,张伟明,等.生物炭对棕壤大豆根际微生物的影响[J].沈阳农业大学学报,2011,42(5):521-526.

[32] 尚杰,耿增超,陈心想,等.生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):146-158.