植物营养与肥料学报 2012,18(3):611-620
Plant Nutrition and Fertilizer Science

有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响

卫 婷[1,2], 韩丽娜[1,2], 韩清芳[1,2], 贾志宽[1,2*], 张 睿[2], 聂俊峰[1,2], 杨宝平[1,2]
(1 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室;
2 西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探明有机培肥对旱地土壤肥力的影响,为建立旱地土壤改良技术体系提供依据,在渭北旱塬进行了4年有机培肥定位试验,设置3个秸秆还田量水平9000 kg/hm^2(S_H)、6000 kg/hm^2(S_M)、3000 kg/hm^2(S_L)和3个有机肥施用量水平22500 kg/hm^2(M_H)、11250 kg/hm^2(M_M)、5250 kg/hm^2(M_L)处理,以不施有机肥为对照(CK)。结果表明,连续进行有机培肥第4年冬小麦收获后,各处理0—60 cm土层土壤有效养分和活性有机碳含量大小顺序均为M_M,S_M > S_H,M_H > M_L,S_L > CK,各培肥处理速效磷、速效钾、碱解氮和活性有机碳含量较对照提高幅度分别为13.27%~161.77%($P<0.05$)、7.51%~25.01%($P<0.05$)、10.52%~41.87%($P<0.05$)和39.43%~66.73%($P<0.05$),两种培肥措施间无显著差异;土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均显著高于CK($P<0.05$),提高程度因还田量和施肥量的多少而异,其中以S_M和M_M处理效果最显著,过氧化氢酶活性较CK变化不明显。说明旱地秸秆还田和施有机肥对提高土壤养分有效性、土壤活性有机碳和酶活性有显著效果。

关键词: 秸秆还田;有机肥;土壤养分;酶活性;渭北旱塬
中图分类号: S158.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0611-10

Effects of organic fertilization on soil nutrient availability and enzyme activity in arid areas

WEI Ting[1,2], HAN Li-na[1,2], HAN Qing-fang[1,2*], JIA Zhi-kuan[1,2], ZHANG Rui[2], NIE Jun-feng[1,2], YANG Bao-ping[1,2]
(*1 Chinese Institute of Water-Saving Agriculture Research in Arid Areas, Northwest A & F University/Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2 College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field experiment was conducted to determine the effects of organic fertilization on arid soil nutrients of winter wheat under different organic fertilizer applications, and to provide guidelines for establishing the soil amelioration technical system for the Weibei tablelands of Shaanxi. There were 3 manure application amounts (M_H 22500 kg/ha, M_M 11250 kg/ha and M_L 5250 kg/ha), 3 wheat straw returning amounts(S_H 9000 kg/ha, S_M 6000 kg/ha and S_L 3000 kg/ha) treatments, and taking no organic fertilization as the control. The soil nutrients, soil labile organic carbon (LOC) and enzyme activities are analyzed for four years (2007-2010). After the wheat harvested in 2010, the results of the four years field experiment show that different organic fertilization amounts have different effects on the contents of soil available nutrients and LOC in 0-60 cm soil layer, the order is M_M, S_M > S_H, M_H > M_L, S_L > CK. Compared with the CK, the contents of soil available P, available K, alkaline hydrolytic N and LOC are increased by 13.27%-161.77%, 7.51%-25.01% ($P<0.05$), 10.52%-41.87%

收稿日期: 2011-09-22　　**接受日期:** 2011-11-22
基金项目: "十一五"国家科技支撑计划(2006BAD29B03);国家"十二五"科技支撑计划(2011BAD29B09);国家"863"计划(2011AA1005A4);陕西科技创新项目(2010NKC-03,2011NXC01-16)资助。
作者简介: 卫婷(1986—),女,山西汾阳人,硕士研究生,主要从事旱地节水农业研究。E-mail: wtxz8661@163.com
*通讯作者 Tel: 029-87080168, E-mail: hanqf88@126.com

($P<0.05$) and 39.43%-66.73% ($P<0.05$), and there are no significant difference between the two kinds of fertility fertilization. The activities of urease, phosphatase and invertase in 0-60 cm soil layer are significant increased ($P<0.05$), and the S_M and M_M treatments have the most significant effects, while the catalase activity is not changed significantly. This study shows that in semi-arid areas the straw returning and organic fertilizer application can play an active role in improving soil LOC, promoting soil nutrient availabilities and enzyme activities significantly.

Key words: straw returning; manure; soil nutrient; enzyme activity; Weibei tableland

近年来,在农田施用化肥提高作物产量的同时,因长期过量施用的负面效应也逐渐凸显,土壤理化性状恶化,耕地营养失调、水土污染加重等问题,严重影响农业可持续发展。针对这一现状,众多学者提出了施用有机肥来部分代替化肥的解决措施[1-2]。有机肥料不仅含有作物需要的大量和多种微量元素,同时含有大量有机物质,在保持和提高土壤肥力、改善和活化土壤养分库容、促进水肥协调等方面有着特殊作用[3]。传统农业的长期实践和大量的研究也已证明有机肥在改善土壤结构,调节土壤水、肥、气、热和生物活性以及全面、持续地供给作物养分方面具有化肥不可替代的优势[4-5]。已有研究[6-7]指出,增施有机肥可提高土壤有机质和微生物量碳含量,并影响土壤酶的活性。有机肥能增加土壤蓄水保墒能力,在一定程度上协调作物需水与土壤供水之间的矛盾,对于促进旱地农业生产的持续发展具有重要意义。

随着农业机械的快速发展,近30年来,作物秸秆还田技术在生产上的应用不断扩大。秸秆作为作物生产过程中产生的有机物,其中富含的纤维素木质素等富碳物质是土壤有机质的主要来源,一直被认为是农田养分循环再利用的基础物质。研究表明,秸秆还田有利于更新和增加土壤有机质,对土壤养分的形成和积累产生积极影响,并能有效提高作物的养分利用效率[8]。劳秀荣等[9]发现,秸秆直接还田对改善土壤的理化性状有明显效果,能显著提高土壤养分,增强土壤蓄水能力和田间水分利用效率,进而提高作物经济产量。刘骅等[10]研究表明,长期秸秆还田可以提高土壤微生物多样性及酶活性,改善土壤养分指标,对培肥地力、改善农田生态环境具有积极作用。

大量研究均表明,有机培肥是提高资源利用率、节本增效、提高耕地基础地力和发展有机、可持续农业不可替代的有效途径[11-12]。已有的研究多注重以土壤的理化特性作为有机培肥对土壤影响的评价指标,施用化肥和有机肥的不同配比[13-14]对土壤酶活性的影响等方面亦进行了一定研究。渭北旱塬位居陕西省的中北部,被誉为"陕西第二粮仓",对陕西省粮食安全有着举足轻重的作用[15],由于土壤贫瘠,水资源严重缺乏,致使土壤养分释放等生物化学过程受到严重限制。本研究通过在渭北旱塬设置不同有机培肥方式及肥力梯度试验,探讨有机培肥对渭北旱塬土壤养分有效性及土壤酶活性的影响,进一步揭示有机培肥条件下土壤酶与土壤肥力间的关系,为建立旱区有机培肥技术体系,提升旱地土壤质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验于2007年9月~2010年7月在陕西省合阳县甘井镇西北农林科技大学旱作试验站进行。该站地处黄土高原南部旱塬区,海拔910 m,年均气温9~10℃,≥10℃积温2800~4000℃,年均降水量534.6 mm,54.7%的降水集中在7~9月份,冬春干旱,四季多风,属半湿润易旱气候区。试验地土壤类型为塿土。试验初期0—60 cm土层土壤及供试秸秆(小麦秸秆)和有机肥(腐熟鸡粪)的养分含量见表1。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,秸秆还田量设3个水平,分别为9000 kg/hm^2(S_H)、6000 kg/hm^2(S_M)、3000 kg/hm^2(S_L);有机肥施用量亦设3个水平,分别为22500 kg/hm^2(M_H)、11250 kg/hm^2(M_M)、5250 kg/hm^2(M_L),以不施肥(CK)作为对照,共7个处理,每个处理3次重复,小区面积为26.4 m^2。各处理于每年冬小麦收获后进行秸秆还田和施入有机肥,同时基施化肥,施用量为N 150 kg/hm^2、P_2O_5 120 kg/hm^2、K_2O 90 kg/hm^2,秸秆还田和施肥深度均为30 cm。供试小麦品种为晋麦47,每年9月下旬播种,第二年6月中旬收获。在作物生长期间不追肥,无灌溉。

表 1　试验前土壤、供试有机肥及还田小麦秸秆养分含量(g/kg)

Table 1　Nutrient contents of the trial soil, manure and wheat straw

养分 Nutrient	土壤层次 Soil layer(cm)			培肥物质 Fertilizing matter	
	0—20	20—40	40—60	秸秆 Straw	有机肥 Manure
有机碳 Organic C	14.04	14.6	8.25	669.15	579.58
全氮 Total N	0.69	0.55	0.44	9.83	17.26
全磷 Total P	0.66	0.54	0.37	0.37	7.69
全钾 Total K	9.34	10.17	10.81	37.81	25.17

1.3　样品采集与测定

于处理第 4 年作物收获后用土钻采样,采集土层深度分别为 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm。各试验小区随机取 5 个样点,同层混合,作为 1 次重复,每个处理取 3 次重复,样品经剔除石块和动植物残体等杂质后,一部分风干、磨细,过 1 mm 和 0.25 mm 筛用于养分的测定,另一部分鲜样冷藏,用于各种酶活性的测定。

土壤碱解氮采用碱解扩散法;速效磷采用钼锑抗比色法;全效钾及速效钾用火焰光度法[16]测定。土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定(37℃),单位为 NH_3-N mg/(g·d);磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定(37℃),单位为 Phenol mg/(g·d);过氧化氢酶用容量法测定(37℃),单位为 0.1 mol/L $KMnO_4$ mL/(g·min);蔗糖酶用二硝基水杨酸比色法测定(37℃),单位为 Glucose mg/(g·d)[17]。土壤活性有机碳(LOC)采用 $KMnO_4$ 氧化法测定。

用 Excel 2003 进行数据处理,SPSS 13.0 进行统计分析,Duncan 法进行多重比较,t 检验($P<0.05$)。

2　结果分析

2.1　有机培肥对土壤速效养分的影响

由表 2 看出,经过连续 4 年的试验处理,在 0—60 cm 土层内,各秸秆还田和有机肥处理土壤碱解氮含量较 CK 分别显著提高了 29.29%、35.80%、10.52% 和 26.85%、41.87%、19.17%,各处理碱解氮含量均随土层的加深呈下降趋势。在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,不同秸秆还田量处理 S_M 和 S_H 均显著高于 S_L,S_H 和 S_M 无显著差异;不同有机肥施用量处理间 M_M 显著($P<0.05$)高于 M_L,M_H 与 M_L 差异不显著。在 40—60 cm 土层,各培肥处理间土壤碱解氮均无显著差异。

各培肥处理在 0—20 cm 土层,速效磷含量随秸秆还田量和有机肥施用量由高到低较 CK 处理分别显著提高 59.58%、151.78%、12.15% 和 63.30%、185.52%、10.71%,不同秸秆还田量处理间及不同有机肥施用量处理间均差异显著,S_H 和 M_H、S_L 和 M_L 处理间无显著差异(表 2);20—40 cm 土层,不同有机肥施用量处理间的差异较不同秸秆还田处理间的差异更为显著;随着土层的加深,各处理速效磷含量均呈明显下降趋势,在 40—60 cm 土层,各处理较 0—20 cm 土层下降 12.25 ~ 35.76 mg/kg,不同培肥处理间的差异减小。

有机培肥措施显著提高了 0—40 cm 土层土壤速效钾含量。2010 年小麦收获后,各培肥处理速效钾含量均显著高于 CK(表 2),最大增幅达 90.42%。0—20 cm 土层,随着秸秆还田量和有机肥施用量的增加,两种有机培肥处理不同施肥水平间基本表现出显著差异($P<0.05$),且随土层的加深各处理间差异逐渐变小,在 40—60 cm 土层各处理间无显著差异,说明培肥对深层(40—60 cm)土壤速效钾含量的影响不明显。

2.2　有机培肥对土壤碳素指标的影响

由表 3 可知,较 CK 处理,经过 4 年秸秆还田和施用有机肥,在 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层各处理土壤有机碳含量较 CK 处理均有所增加。随着秸秆还田量和有机肥施用量由高到低,0—60 cm 土层土壤有机碳含量分别较 CK 显著提高 17.97%、22.22%、13.46% 和 20.77%、28.31%、12.28%($P<0.05$)。土壤活性有机碳(LOC)是土壤微生物活性能源和土壤养分的驱动力[18],可以在土壤总有机碳变化之前反映土壤微小的变化,是评价土壤碳平衡和土壤化学、生物化学肥力保持的重要指标。表 3 显示,4 年连续有机培肥处理显著提高了 0—40 cm 土层土壤活性有机碳含量,不同秸秆还田量间及

有机肥施用量间无显著差异。在0—20 cm土层,随秸秆还田量和有机肥施用量由高到低,活性有机碳含量分别较CK显著提高了82.24%、82.49%、64.15%和86.69%、92.42%、68.81%($P<0.01$),在20—40 cm土层也表现出相同的趋势;在40—60 cm土层,S_M、M_H和M_M处理土壤活性有机碳含量显著高于CK($P<0.05$)。在0—60 cm土层,随着秸秆还田和有机肥施用量的增加各处理的土壤活性有机碳含量平均较CK显著提高了52.85%、56.30%、39.43%和58.50%、66.73%、40.64%;处理间相比,M_M显著($P<0.05$)高于S_H、S_L、M_L,与S_M和M_H无显著差异。

表2 不同秸秆还田和有机肥处理0—60 cm土层土壤的速效养分含量(mg/kg)

Table 2 The available nutrients in 0–60 cm soil layer under different straw returning and manure treatments

处理 Treatment	碱解氮 Alkaline hydrolytic N			速效磷 Available P			速效钾 Available K		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
S_H	60.56 b	38.62 ab	25.90 a	22.34 c	6.70 b	4.01 bc	160.73 b	119.20 bc	92.20 a
S_M	65.01 ab	40.29 ab	26.09 a	35.24 b	9.33 a	4.25 ab	177.66 a	127.11 ab	93.30 a
S_L	52.42 cd	31.16 cd	23.34 a	15.70 d	5.93 b	3.14 bc	150.67 c	112.12 c	89.76 a
M_H	60.27 b	37.21 abc	25.25 a	22.86 c	7.13 b	5.36 a	160.31 b	120.44 bc	92.78 a
M_M	69.65 a	41.21 a	26.40 a	39.96 a	9.61 a	4.20 ab	180.97 a	132.79 a	96.17 a
M_L	57.19 bc	34.62 bc	23.49 a	15.50 d	4.53 c	3.24 bc	155.08 bc	111.75 c	90.35 a
CK	48.43 d	26.45 d	21.87 a	14.00 d	3.72 c	2.83 c	141.70 d	97.06 d	89.15 a

注(Note):同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Values followed by different small letters are significantly different($P<0.05$).

表3 不同秸秆还田和有机肥处理的土壤碳素变化(g/kg)

Table 3 The changes of soil carbon contents in 0–60 cm soil layer under different straw returning and manure treatments

土壤碳素指标 Soil C index	处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)			平均 Average
		0—20	20—40	40—60	
有机碳 Organic carbon	S_H	16.42 abc	9.67 b	7.29 a	11.13 b
	S_M	17.02 ab	10.02 ab	7.55 a	11.53 ab
	S_L	15.73 cd	9.20 bc	7.18 a	10.70 b
	M_H	16.99 ab	9.85 ab	7.34 a	11.39 ab
	M_M	17.31 a	11.46 a	7.55 a	12.11 a
	M_L	15.96 bc	9.11 bc	6.71 a	10.59 b
	CK	14.76 d	7.74 c	5.80 b	9.43 c
活性有机碳 Labile organic carbon	S_H	6.45 ab	4.09 ab	2.75 bc	4.43 b
	S_M	6.46 ab	4.10 ab	3.03 ab	4.53 ab
	S_L	5.81 b	3.77 b	2.55 cd	4.04 c
	M_H	6.61 ab	4.11 ab	3.06 ab	4.60 ab
	M_M	6.81 a	4.50 a	3.19 a	4.83 a
	M_L	5.98 b	3.74 b	2.51 cd	4.07 c
	CK	3.54 c	2.85 c	2.31 d	2.90 d

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Values followed by different letters are significantly different ($P<0.05$).

2.3　有机培肥对土壤酶活性的影响

2.3.1 对土壤蔗糖酶活性的影响　蔗糖酶是表征土壤碳素循环和土壤生物化学活性的重要酶类,被作为评价土壤熟化程度和土壤肥力水平的指标[17]。2010 年小麦收获后,不同培肥处理各个土层蔗糖酶活性均较 CK 有所提高(图 1),增幅为 16.03%～83.47%,处理效果显著;S_H 和 M_H 处理只在 0—20 cm 土层显著提高土壤蔗糖酶活性,各秸秆还田处理 S_H、S_M 和 S_L 和有机肥处理 M_H、M_M 和 M_L 分别较 CK 提高了 30.74%、56.81%、16.54% 和 34.72%、58.06%、20.27%,S_L 和 M_L 处理对 0—60 cm 各土层蔗糖酶活性的影响均不显著。不同秸秆还田量和不同有机肥施用量处理间蔗糖酶活性只在 0—20 cm 土层存在显著差异,S_M、M_M处理显著高于 S_L、M_L 处理。总体来看,随着土层的加深,各处理蔗糖酶活性均呈下降趋势,最大降幅达 601.47%,有机培肥可显著提高表层土壤(0—20 cm)的蔗糖酶活性。

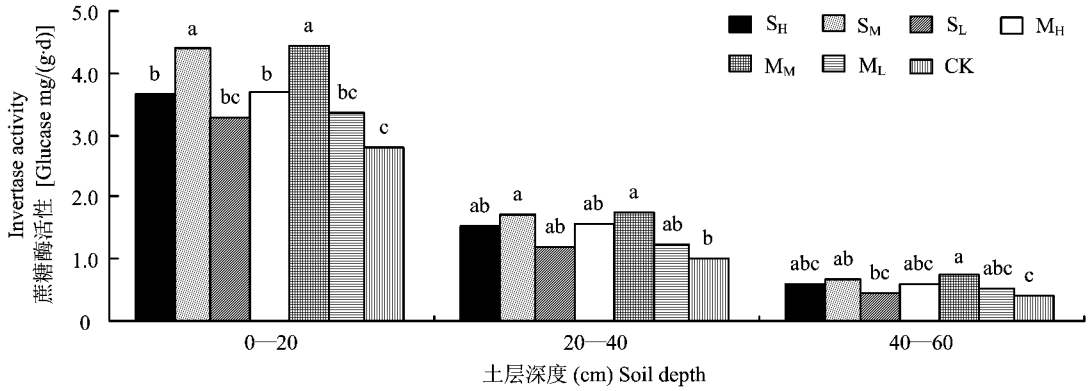

图 1　不同秸秆还田和有机肥处理下的土壤蔗糖酶活性(2010)

Fig. 1　The invertase activities in soils under different straw returning and manure treatments

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference at the 5% level.]

2.3.2 对土壤脲酶活性的影响　脲酶能够表征土壤氮素的供应程度,土壤中脲酶活性与土壤中稳定性较高的有机氮向有效氮的转化有密切关系,从而对土壤氮素的供应状况产生影响[19]。2010 年小麦收获后,秸秆还田和施有机肥处理以 S_M、S_H 和 M_M、M_H 在 0—40 cm 土层脲酶活性较对照增加显著(图 2);在 0—20 cm 土层 M_M处理脲酶活性最高,比 CK 提高了 38.99%,且 M_M 和 S_M 处理显著高于 S_L、M_L 处理。40—60 cm 土层,仅 S_M、M_M 处理的脲酶活性显著高于 CK,其余各处理间均无显著差异。与 CK 处理相比,各土层中 S_L、M_L 两处理的土壤脲酶活性提高均不显著。

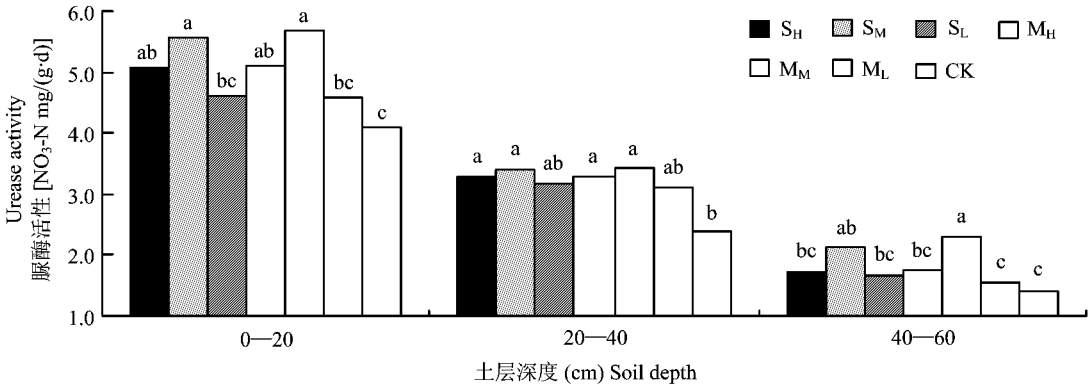

图 2　不同秸秆还田和有机肥处理下的土壤脲酶活性(2010)

Fig. 2　The urease activities in soils under different straw returning and manure treatments

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference at the 5% level.]

2.3.3 对土壤磷酸酶活性的影响　土壤磷酸酶在有机磷的活化和固定中起着重要作用,它既能矿化有机磷,又能促进植物对无机磷的吸收,从而调节土壤磷素供应[20]。经过4年培肥处理,2010年小麦收获后0—60 cm土层各秸秆还田和有机肥处理土壤磷酸酶活性随着施肥量由高到低分别较CK提高31.34%、55.80%、21.98%和36.66%、55.87%、21.89%($P<0.05$)(图3)。0—20 cm土层,各培肥处理土壤磷酸酶活性均显著高于CK,S_M处理最高。在20—40 cm与40—60 cm土层,各培肥处理的磷酸酶活性与CK间差异较表层(0—20 cm)逐渐变小,与CK差异均不显著,各施肥处理间差异也逐渐减弱。

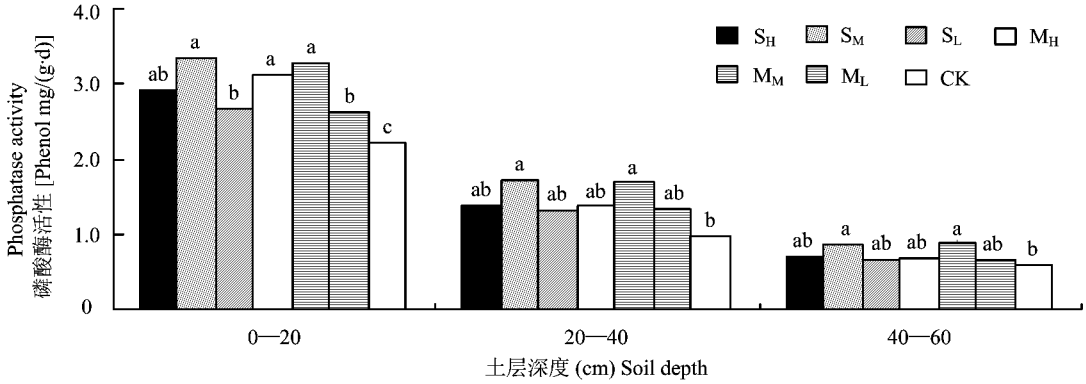

图3　不同秸秆还田和有机肥处理下的土壤磷酸酶活性(2010)

Fig. 3　The phosphatase activities in soils under different straw returning and manure treatments

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference at the 5% level.]

2.3.4 对土壤过氧化氢酶活性的影响　过氧化氢酶与土壤有机质的转化有密切关系[21],能促进过氧化氢分解为水和氧,解除过氧化氢的毒害作用,在一定程度上能表征土壤生物氧化过程的强度。2010年小麦收获后,各处理对各土层过氧化氢酶活性影响均不明显(图4),基本维持在6.23～6.52 mL/g,最大增幅仅为3.77%。随秸秆还田量和有机肥施用量由高到低,0—60 cm土层土壤过氧化氢酶活性分别较CK提高1.14%($P<0.05$)、1.49%($P<0.05$)、0.63%和1.72%($P<0.05$)、2.36%($P<0.05$)、1.15%,说明土壤过氧化氢酶活性对施用有机肥的响应更为强烈。在0—20 cm土层,各培肥处理间土壤过氧化氢酶活性未全部达到显著性差异,但与CK比较均差异显著($P<0.05$);在20—40 cm和40—60 cm土层,各培肥处理土壤过氧化氢酶活性较CK提高幅度有所降低,只有S_M、M_M处理达显著水平,其余各处理间差异均不显著。

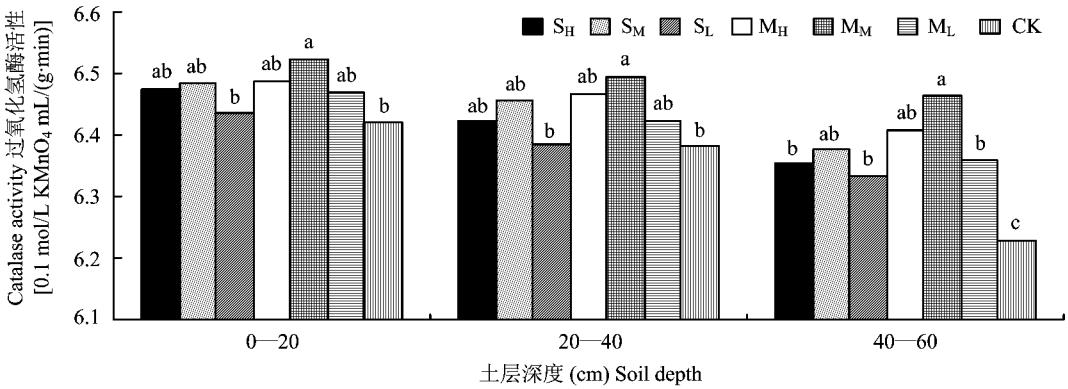

图4　不同秸秆还田和有机肥处理下的土壤过氧化氢酶活性(2010)

Fig. 4　The catalase activities in soils under different application amounts

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference at the 5% level.]

3 讨论

3.1 有机培肥对土壤养分的影响

杨希等[22]研究发现,增施有机肥可显著提高土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾的含量。通过合阳旱农试区 4 年冬小麦有机培肥试验发现,与单施化肥相比,无论是秸秆直接还田还是施用有机肥均可显著提高 0—60 cm 土层土壤的有效养分含量,其中土壤表层(0—20 cm)有效养分含量增幅更为明显,且二者对土壤养分的贡献大小较为一致。随秸秆还田量和有机肥施用量的增加,土壤氮、钾和磷的有效性较 CK 增加的幅度提高。从养分投入与消耗的平衡分析,中量秸秆还田(S_M)和中量有机肥(M_M)处理的土壤养分有效性增加最明显。在旱作小麦田,随着土层的加深,连续有机培肥措施增加土壤养分有效性的作用逐渐减弱,这与孙福来等[23]在山东莱阳石灰性潮土上进行的 22 年长期施用腐熟猪圈粪肥的试验结果基本一致。关于秸秆还田对土壤碱解氮含量的影响,不同研究得出了不同的结论。劳秀荣等[24]在低肥力潮土上的盆栽土培定位试验结果表明,秸秆还田可提高土壤速效氮含量。徐祖祥[25]在泥质田进行了 5 年秸秆还田田间定位试验,其结果表明秸秆还田后土壤碱解氮含量较试验前下降了 20.7 mg/kg。说明秸秆还田对土壤氮素养分有效性的影响可能与试验土壤的类型等有关。

土壤有机碳是土壤养分转化的核心,施有机肥可以提高土壤有机物质的输入量,有利于土壤有机碳的矿化分解,但这种作用需要经历较长时间。与土壤总有机碳相比,土壤活性有机碳更能反映由施肥管理措施的改变而导致的土壤质量变化,可以作为前者变化的早期指示指标[26]。王玲莉等[27]在棕壤的肥料定位试验表明,长期施用有机肥及有机肥配施化肥可以改变土壤总有机碳及活性有机碳的含量。本研究结果表明,与 CK 相比,连续 4 年秸秆还田和施用有机肥处理均能显著增加 0—60 cm 土层土壤活性有机碳的含量,但与中量处理(S_M,M_M)相比,高量处理(S_H,M_H)并未体现出优势,这可能是由于秸秆还田和有机肥施用量过高,反硝化作用明显,导致土壤 C/N 比失衡,从而影响其在土壤中的腐解效果[28-30]。张璐等[31]通过观测分析中国 3 种典型农田土壤—黑土、灰漠土和红壤有机碳在时间与空间上对长期不同施肥措施的响应特征,发现有机无机配施能维持和提高土壤活性有机碳含量,且效果优于秸秆还田,优于化肥配施(NPK)。李江涛等[32]通过分析稻麦轮作土壤上长期(>20 年)施用畜禽粪便和化肥后土壤活性有机碳含量的变化,认为施用畜禽粪便提高土壤总有机碳和活性有机碳的含量的作用受土壤发育母质等因素影响,不同土壤上其作用效果有一定差异。已有研究结果说明,有机培肥处理对不同土壤类型活性有机碳含量提高均有积极作用,但不同施肥量及与化肥配施比例提高活性有机碳含量的效果还有待深入研究。

3.2 有机培肥对土壤酶活性的影响

土壤酶活性作为评价土壤生物活性和土壤肥力的重要指标之一,其活性受施肥种类、田间管理和环境条件等因素影响[33]。大量研究表明,有机培肥可以提高土壤酶活性,并且随着有机肥施用量的增大效果明显[34-35]。何炎森等[36]通过丘陵旱地砂园土有机无机肥料配施试验,发现有机无机肥料配施可以为蔗糖酶、脲酶、蛋白酶、过氧化物酶提供底物,在一定范围内,底物越多,酶活性越强,且随着时间的延长,土壤酶活性持续提高。张电学等[37]通过 2 年田间定位试验,研究了冀东地区农田不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应,结果表明,在小麦—玉米轮作周期内,土壤表层过氧化氢酶、脲酶和磷酸酶活性均表现为还田处理高于对照,秸秆直接还田有助于提高土壤生物活性。太湖地区水稻土长期肥力试验结果同样也表明,NPK 和秸秆还田都有增加土壤酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、脱氢酶和脲酶活性的效果,而且随秸秆还田量增加,酶活性明显增加[38]。

本研究经过 4 年有机培肥处理,秸秆还田和施用有机肥均使土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性得到显著提高,这可能是因为有机肥施入后明显促进了微生物代谢和繁育,增加土壤微生物数量,使土壤酶活性提高;而还田秸秆是土壤酶的良好基质,可以为微生物提供充足的能源,从而引起土壤酶活性变化。秸秆还田和施用有机肥对土壤过氧化氢酶活性的影响均不显著,最大增幅仅为 3.77%,这与孙瑞莲等[39]对褐潮土 12 年肥料定位试验的土壤酶进行测定和分析的研究结果相似,但也有研究[40]认为长期施肥可提高土壤过氧化氢酶活性,这有可能与所研究的土壤质地和种植制度不同有关。本研究结果还表明,各秸秆还田和有机肥处理表层(0—20 cm)土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性均显著高于 20—40 cm 和 40—60 cm 土层,与高明等[41]在长期定位试验中研究的不同耕作方式对

稻田土壤酶活性的影响的结果一致,说明土壤酶活性存在表层激活效应,可能是因为表层土壤能较好地与外界进行物质和能量的交换,利于微生物的繁殖;随着土层的加深,土壤熟化程度、肥力水平及土壤营养元素状况等均不利于微生物的活动与繁殖,导致了酶活性降低。

4 结论

在经过4年定位培肥试验后,不同的有机培肥措施均可有效增加土壤氮、磷、钾养分有效性,其中对速效磷的增加幅度明显优于速效钾和碱解氮,0—20 cm土层土壤有效养分的增加尤为显著;有机培肥措施还能显著提高土壤活性有机碳含量和土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性,提高程度因施有机肥量的多少而异,以秸秆还田量6000 kg/hm^{2}及施用有机肥11250 kg/hm^{2}处理对土壤酶活性的作用最显著;有机培肥对土壤过氧化氢酶的影响不明显。秸秆还田和施用有机肥的培肥效果相似,中量秸秆和有机肥的培肥效果较有优势,在旱作农区秸秆还田的应用前景更为广阔。

参 考 文 献:

[1] 张余莽, 周海军, 张景野, 等. 生物有机肥的研究进展[J]. 吉林农业科学, 2010, 35(3): 37-40.
Zhang Y M, Zhou H J, Zhang J Y *et al*. Progress of studies of Bio-organic fertilizer[J]. J. Jilin Agric. Sci., 2010, 35(3): 37-40.

[2] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006, (1): 3-7.
Huang H X, Li S T, Li X L *et al*. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. Soils Fert., 2006, (1): 3-7.

[3] 吴光磊. 有机无机肥配施对玉米产量和品质的影响及生理基础[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2008.
Wu G L. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield and quality of maize and its physiological basis [D]. Taian, Shandong: Ms thesis, Shandong Agricultural University, 2008.

[4] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2004, (5): 12-16.
Wang L G, Li W J, Qiu J J *et al*. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield [J]. China Soils Fert., 2004, (5): 12-16.

[5] Bolan N S, Adriano D C. Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil[J]. J. Environ. Qual., 2003, 32(1): 120-128.

[6] Gil-Stores F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Seoane S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties [J]. Soil Biol. Biochem., 2005, 37: 877-887.

[7] 林瑞余, 林豪森, 张重义, 等. 不同施肥条件对鱼腥草根际土壤酶活性及根系活力的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 280-284.
Lin R Y, Lin H S, Zhang Z Y *et al*. Effects of different fertilizer application on enzyme activities of rhizospheric soil and root vigors in *Houttuynia cordata* Thunb [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(1): 280-284.

[8] 汪军, 王德建, 张刚, 王灿. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, (5): 40-44.
Wang J, Wang D J, Zhang G, Wang C. Effects of Different Nitrogen Fertilizer Rate with Continuous Full Amount of Straw Incorporated on Paddy Soil Nutrients[J]. J. Soil Water Conserv., 2010, (5): 40-44。

[9] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49-51.
Lao X R, Wu Z Y, Gao Y C. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2002, 18(2): 49-51.

[10] 刘骅, 林英华, 王西和, 等. 长期配施秸秆对灰漠土质量的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1492-1497.
Liu H, Lin Y H, Wang X H *et al*. Effect of long-term application of straw on grey desert soil quality[J]. Ecol. Environ., 2007, 16(5): 1492-1497.

[11] 张晓文, 赵改宾, 杨仁全, 王影. 农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增1): 107-109.
Zhang X W, Zhao G B, Yang R Q, Wang Y. Comprehensive utilization of agricultural straws in recycle economy[J]. Trans. Chin. Soc. Agric., 2006, 22(Suppl. 1): 107-109.

[12] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, (3): 522-528.
Lu W T, Jia Z K, Zhang P *et al*. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern ningxia, China[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2011, (3): 522-528.

[13] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 等. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1907-1910.
Sun R L, Zhu L S, Zhao B Q *et al*. Effects of long-term fertilization on soil microorganism and its role in adjusting and controlling soil fertility[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(10): 1907-1910.

[14] Bohme L, Bohme F. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilisation[J]. Eur. J. Soil. Biol., 2006, 42: 1-12.

[15] 李旭辉. 渭北旱塬春玉米高产栽培试验研究[J]. 陕西农业科学, 2008, (4): 1-2.
Li X H. The research on high yielding cultivation of spring maize in Weibei dry land[J]. Shanxi J. Agric. Sci., 2008, (4): 1-2.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京：中国农业出版社，2005.
Bao S D. Agricultural soil analysis (3rd edn.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986. 274-328.
Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986. 274-328.

[18] 倪进治，徐建民，谢正苗，唐才贤. 不同有机肥料对土壤生物活性有机质组分的动态影响[J]. 植物营养与肥料学报，2001，7(4)：374-378.
Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, Tang C X. Effects of different organic manure on biologically active organic fractions of soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2001, 7(4): 374-378.

[19] 王芳，张金水，高鹏程，同延安. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(3)：702-709.
Wang F, Zhang J S, Gao P C, Tong Y A. Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed highland[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 702-709.

[20] 王芸，韩宾，史忠强，等. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报，2006，20(4)：120-142.
Wang Y, Han B, Shi Z Q *et al*. Effects of conservati on tillageon soil microbial characters and soil enzyme activities[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(4): 120-142.

[21] 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.

[22] 杨希. 有机无机配施对黑土肥力的影响[D]. 哈尔滨：东北农业大学硕士学位论文，2009.
Yang X. Effects of organic manure and inorganic fertilizer combination on increasing fertility of black soil[D]. Harbin: Ms thesis, Northeast Agricultural University, 2009.

[23] 孙福来，张延霞，庞祥锋，等. 长期定位施肥对土壤有机质和碱解氮及冬小麦产量的影响[J]. 土壤通报，2007，38(5)：1016-1018.
Sun F L, Zhang Y X, Pang X F *et al*. Effects of long-term fertilization on soil organic matter, available N and wheat yield [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(5): 1016-1018.

[24] 劳秀荣，孙伟红，王真，等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报，2003，40(4)：618-623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z *et al*. Matching use of strao and chemical fertilizer no soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 618-623.

[25] 徐祖祥. 连续秸秆还田对作物产量和土壤养分的影响[J]. 浙江农业科学，2003，(1)：35-37.
Xu Z X. Effects of applying crop stalk of each crop to fields on the crop yield and soil nutrients[J]. J. Zhejiang Agric. Sci., 2003, (1): 35-37.

[26] 吴建国，张小全，徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J]. 应用生态学报，2004，15(4)：593-599.
Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Impact of land-use change on soil carbon storage[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(4): 593-599.

[27] 王玲莉，娄翼来，石元亮，韩晓日. 长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J]. 土壤通报，2008，39(4)：752-755.
Wang L L, Lou Y L, Shi Y L, Han X R. Long-term fertilization on indicators of soil active organic carbon[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(4): 752-755.

[28] Anthony M W, Graeme J B, Lefroy R D B. Managing legume leys, residues and fertilizers to enhance the sustainability of wheat yields and nutrient balance 2. Soil physical fertility and carbon [J]. Soil Till. Res., 2000, 54: 77-89.

[29] 洪春来，魏幼璋，黄锦法，等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版)，2003，29(6)：627-633.
Hong C L, Wei Y Z, Huang J F *et al*. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.), 2003, 29(6): 627-633.

[30] 王改玲，郝明德，陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学，2006，12(6)：840-844.
Wang G L, Hao M D, Chen D L. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(6): 840-844.

[31] 张璐，张文菊，徐明岗，等. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学，2009，42(5)：1646-1655.
Zhang L, Zhang W J, Xu M G *et al*. Effects of long-term fertilization on change of labile organic carbon in three typical upland soils of China[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(5): 1646-1655.

[32] 李江涛，钟晓兰，赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响[J]. 水土保持学报，2010，24(1)：233-238.
Li J T, Zhong X L, Zhao Q G. Soil active organic carbon pool and aggregate stability as affected by application of livestock and poultry excrement and chemical fertilizer[J]. J. Soil Water Conserv., 2010, 24(1): 233-238.

[33] 张鹏，贾志宽，路文涛，等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(5)：1122-1130.
Zhang P, Jia Z K, Lu W T *et al*. Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(5): 1122-1130.

[34] 陶军，张树杰，焦加国，等. 蚯蚓对秸秆还田土壤细菌生理菌群数量和酶活性的影响[J]. 生态学报，2010，30(5)：1306-1311.
Tao J, Zhang S J, Jiao J G *et al*. Effects of earthworm on number

of soil bacterial physiological groups and enzyme activity in a maize residue amended wheat agro-ecosystem [J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(5): 1306-1311.

[35] Plaza C, Hernadez D, Garea-Gil J C *et al*. Microbial activity in pig slurry-amended soil under semiarid conditions[J]. Soil Biol. Biochem., 2004, (36): 1577-1585.

[36] 何炎森, 李瑞美. 有机无机肥配施对甘蔗产量及土壤酶活性的影响[J]. 中国糖料, 2004, (4): 36-38.
He Y S, Li R M. Effect of the organo-inorgano-mixed fertilizer application on sugarcane yield and soil enzymatic activity[J]. Sugar Crops China, 2004, (4): 36-38.

[37] 张电学, 韩志卿, 刘微, 等. 不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 742-749.
Zhang D X, Han Z Q, Liu W *et al*. Biological effect of maize stalk return to field directly under different accretion decay conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(6): 742-749.

[38] 李腊梅, 陆琴, 严蔚东, 王校常. 太湖地区稻麦二熟制下长期秸秆还田对土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2006, 38(4): 422-428.
Li L M, Lu Q, Yan W D, Wang X C. Effect of long-term straw incorporation on enzyme activity in paddy soil under rice-wheat rotation in taihu region[J]. Soils, 2006, 38(4): 422-428.

[39] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性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.

[40] 任祖淦, 陈玉水, 张逸清, 等. 有机无机肥料配施对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(3): 279-283.
Ren Z G, Chen Y S, Zhang Y Q *et al*. Effect of inorganic fertilizer combined with organic manure the micro flora and enzyme activities in paddy soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1996, 2(3): 279-283.

[41] 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1177-1181.
Gao M, Zhou B T, Wei C F *et al*. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(7): 1177-118.