植物营养与肥料学报 2011,17(5):1122-1130
Plant Nutrition and Fertilizer Science

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

张 鹏,贾志宽*,路文涛,张晓芳,孙红霞,杨保平
(西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,农业部旱地作物生产与生态重点开放实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:为了给有机培肥技术体系的建立提供依据,在宁南旱区4年有机培肥定位试验中,以不施有机肥作为对照(CK),设置了3种有机肥施用量处理(高90000 kg/hm^2、中60000 kg/hm^2、低30000 kg/hm^2),对不同处理条件下的土壤养分、酶活性、作物产量及水分利用效率进行了研究。结果表明,在2010年冬小麦收获后,各处理0—60 cm土层土壤养分含量、脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性大小顺序均为高、中量有机肥>低量有机肥>不施有机肥,各施肥处理较CK差异显著($P<0.05$)。随有机肥施肥量由高到低,产量分别较CK提高35.05%、20.77%和11.51%;作物水分利用效率分别较CK提高38.26%、22.61%和11.88%,差异均极显著。说明在宁南半干旱区长期施用有机肥对提高土壤养分含量、酶活性、冬小麦的产量和水分利用效率有显著效果。

关键词:有机肥;宁南旱区;土壤养分;土壤酶活性
中图分类号:S158.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2011)05-1122-09

Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia

ZHANG Peng, JIA Zhi-kuan*, LU Wen-tao, ZHANG Xiao-fang, SUN Hong-xia, YANG Bao-ping
(*The Chinese Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A & F University/ Key Laboratory of Crop Production and Ecology, Minister of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: To provide a theoretical basis for establishing the organic fertilization system in the semi-arid areas of southern Ningxia, the effects of organic fertilization, taking no organic fertilizer as the control, on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity were studied under different organic fertilizer treatments (H 90000 kg/ha, M 60000 kg/ha, L 30000 kg/ha) for four years (2007-2010). After the winter wheat harvest (2010), the results of four years field experiment show that different organic fertilizer amounts have different effects on the contents of soil nutrient, Urease, Phosphatase, Catalase and Invertase activities of 0-60 cm soil layer, the order is high and middle straw returning treatments > low straw returning treatments > CK, the fertilizer treatments have significant differences with the CK. Compared with the CK, with the reduction of organic fertilizer applications, the yield are increased by 35.05%, 20.77% and 11.51% ($P<0.01$), the crop water use efficiencies are increased by 38.26%, 22.61% and 11.88% ($P<0.01$). The study shows that in semi-arid areas of southern Ningxia, the organic fertilizer technology can play an active role in improving soil nutrient, promoting enzyme activity, increasing crop yield and crop water use efficiency significantly.

Key words: organic fertilizer; semi-arid areas of southern Ningxia; soil nutrient; enzyme activity

收稿日期:2011-03-25　　**接受日期**:2011-05-18
基金项目:"十一五"国家科技支撑课题"农田集雨保水关键技术研究"(2006BAD29B03);"节水共性技术研究"(2007BAD88B10)资助。
作者简介:张鹏(1987—),男,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事旱地节水农业研究。E-mail:pengzhang121@hotmail.com
* 通讯作者 Tel:029-87080168, E-mail:zhikuan@tom.com

半个世纪以来,我国化肥施用量大幅度增长,在保证粮食安全方面发挥了重要作用[1]。但由于化肥的过量施用引起了肥料利用率低、生态环境恶化等一系列的社会问题[2-3]。为了减少化肥施用量,缓解化肥对环境的污染,提出了以有机肥部分代替化肥的解决措施[1,4-6]。大量的研究证明,有机肥料在提供作物养分、维持地力、更新土壤有机质、促进微生物繁殖、增强土壤保水保肥能力,特别是在改善土壤结构和保护农业生态环境方面具有化肥不可替代的作用[7-8]。土壤酶是植物、动物、微生物活动的产物,是土壤生物化学反应的重要指标之一,土壤中许多重要的物理、化学和微生物活性物质等,都与土壤酶有着密切的相关性[9]。许多研究发现,有机肥不仅直接增加土壤有效养分和改善土壤理化性质,还对土壤的生物和生物化学特性有明显的影响[10-11]。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[12-13]。高菊生[14-15]等研究表明,长期施有机肥不仅可显著提高土壤养分含量,而且保持和提高了土壤微生物种的丰富度和分子多样性,显著提高水稻土生态系统初级生产力和稳定性。Bohme 等[16]研究发现,对比传统施化肥处理,施用有机肥后,土壤有机碳含量上升,微生物碳量显著增加。

对于土壤瘠薄、干旱少雨的宁南旱区,有机培肥是解决当地作物生产和环境生态问题的关键技术,但目前研究多侧重于地表覆盖、耕作方式、种植方式等对土壤水分的影响[17-18],关于长期定位施有机肥对宁南旱区土壤养分、土壤酶活性及作物产量的影响尚未见报道。因此,定位研究有机肥不同施用量下土壤养分及酶活性的变化,对旱区有机培肥技术体系的建立具有重要的理论意义。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2007 ～2010 年在宁夏固原市彭阳县的西北农林科技大学试验基地进行。该试验基地位于宁夏回族自治区南部六盘山东麓,属温带半干旱气候,年平均气温 6 ～8.5℃,无霜期 147 ～168 d,年降水量 350 ～450 mm,其中 70% 的降水集中在 7 ～9 月份。年蒸发量较大,为 650 ～850 mm,干燥度(≥0℃的蒸发量)为 1.21 ～1.99,无霜期 140 ～160 d,主要气象灾害有干旱、霜冻、冰雹等。土壤类型为黄绵土。试验地耕层土壤有机质 8.32 g/kg,全氮 0.61 g/kg,全磷 0.58 g/kg,全钾 5.40 g/kg; 土壤碱解氮 46.25 mg/kg,速效磷 10.41 mg/kg,速效钾 104.82 mg/kg。土壤各种基础酶活性见表 1。

表 1　试验地 0—40 cm 土壤中各种酶活性(在 37℃条件下)

Table 1　Enzyme activities of 0 – 40 cm soil layer (At 37℃)

土层 Soil layer	脲酶 Urease [NH_3 –N mg/(g · 24 h)]	磷酸酶 Phosphatase [Phenol mg/(g · 24 h)]	过氧化氢酶 Catalase [0.1 mol/L $KMnO_4$ mL/(g · min)]	蔗糖酶 Invertase [Glucose mg/(g · 24 h)]
0—20 cm	1.28	0.86	8.31	1.32
20—40 cm	0.93	0.82	8.25	1.31

1.2　试验设计

试验设高肥(有机肥 90 000 kg/hm^2,H)、中肥(有机肥 60 000 kg/hm^2,M)和低肥(有机肥 30 000 kg/hm^2,L)及对照(不施有机肥,CK)共 4 个处理,3 次重复,随机区组排列,小区面积为 18 m^2。有机肥为牛粪(含有机质 35.36 g/kg、全氮 3.53 g/kg、全磷 0.15 g/kg、全钾 1.87 g/kg)。2007 年 4 月 8 日种植胡麻,品种为宁亚 17 号,收获于 2007 年 8 月 5 日; 其后 3 年均种植冬小麦,品种为西峰 26 号,分别在 2007 年 9 月 15 日、2008 年 9 月 18 日、2009 年 9 月 21 日种植,2008 年 6 月 21 日、2009 年 6 月 23 日、2010 年 7 月 6 日收获。2007 ～2010 年以鲁西化工生产的磷酸二铵(N≥17%,P_2O_5 ≥45%)为基肥,各处理小区施肥量相同,施用量 60 kg/hm^2,于整地时和有机肥一起施入,在作物生长期间不追肥,不灌溉。

1.3　采样及测定项目与方法

每年作物收获后进行采样,最后一次采样是 2010 年 7 月 7 日即小麦收获后第二天。用土钻在各试验小区采集土层深度分别为 0—20、20—40 和 40—60 cm 的土壤作为供试土样。各试验小区随机采 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,另一部分冷藏,保持新鲜土样,用于各种酶活性的测定。

土壤养分的测定: 有机质采用重铬酸钾外加热

法,全氮采用开氏定氮法,全磷采用酸溶—钼锑抗比色法,碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用钼锑抗比色法,全钾及速效钾用火焰光度法测定。

土壤酶活性的测定:脲酶采用靛酚蓝比色法[NH_3-N mg/(g·24 h),37℃][19];磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法[Phenol mg/(g·24 h),37℃][20];过氧化氢酶采用容量法[0.1 mol/L $KMnO_4$ mL/(g·min),37℃][19];蔗糖酶采用二硝基水杨酸比色法[Glucose mg/(g·24 h),37℃][19]测定。

土壤活性有机碳测定及碳库管理指数(CMI)的计算:采用 $KMnO_4$ 氧化法测定土壤样品中活性有机碳含量,以2007年试验前土壤为参照。碳库指数(CPI)及碳库管理指数(CMI)等相关指标参照徐明岗[21]等的方法计算。

碳库指数(CPI)=样品总有机碳含量(g/kg)/参考土壤总有机碳含量(g/kg);

土壤碳的不稳定性,即碳库活度(L)=活性有机碳(LOC)/非活性有机碳(NLOC);

碳损失及其对稳定性的影响用活度指数(LI)表示,LI=样本的不稳定性(L)/对照的不稳定性(L_0);

碳库管理指数(CMI):$CMI = CPI \times LI \times 100$;

土壤耗水量:全生育期耗水量 ETa(mm)=$W_1 - W_2 + P$

式中:W_1 为播前土壤贮水量(mm);W_2 为收获后土壤贮水量(mm);P 为生育期有效降水量(mm)。

水分利用效率:产量水平水分利用效率 WUE_Y [kg/(mm·hm^2)]=Y/ETa

式中:WUE_Y 为水分利用效率;Y 为作物子粒产量(kg/hm^2)。

产量和产量构成因素:收获后每个小区选取10株有代表性的植株进行室内考种。以小区为单位实收晒干,换算出单位面积产量。

采用 Excel 2003 进行数据处理,SPSS 13.0 统计分析软件进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析,不同处理之间多重比较采用 Duncan 新复极差法,然后进行 t 检验($P<0.05$)。

2 结果分析

2.1 施用有机肥对土壤养分含量的影响

不同有机肥施用量对宁南旱作农田土壤养分影响(表2)看出,2010年小麦收获后土壤中各养分含量均表现为随着土层深度的增加而减少;有机肥的效果受土层深度变化的影响比较明显,在0—20 cm土层,施用有机肥处理各土壤养分指标均极显著地高于CK($P<0.01$),随着土层的加深,各指标有机肥处理较CK差异逐渐变小。

表2 不同有机肥施用量下0—60 cm土壤养分状况(2010)

Table 2 The soil nutrients in top 60 cm of soil layers under different application amount of organic fertilizer

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Alk.-hydro. N	速效钾 Available K	速效磷 Available P
		(g/kg)			(mg/kg)		
0—20	H	0.78 a	0.73 a	6.84 a	78.62 b	249.50 a	23.02 a
	M	0.81 a	0.74 a	6.41 b	81.25 a	203.92 b	22.95 a
	L	0.73 b	0.71 b	6.39 c	76.29 c	107.53 c	14.43 b
	CK	0.63 c	0.70 c	5.83 d	49.36 d	98.02 d	13.83 c
20—40	H	0.72 a	0.66 a	6.62 a	66.83 a	97.48 b	6.64 b
	M	0.72 a	0.64 b	6.54 b	64.51 b	148.41 a	8.94 a
	L	0.68 a	0.63 b	6.41 c	56.81 c	88.78 c	5.28 bc
	CK	0.58 b	0.59 c	5.24 d	41.39 d	80.88 d	4.93 c
40—60	H	0.67 a	0.58 a	6.23 a	60.49 a	78.59 b	3.41 ab
	M	0.65 b	0.58 a	6.11 ab	57.51 a	86.49 a	5.10 a
	L	0.63 b	0.57 a	6.07 b	49.73 b	76.01 c	2.35 ab
	CK	0.57 c	0.55 b	5.09 c	39.66 c	65.07 d	1.78 b
平均 Average	H	0.73 a	0.66 a	6.57 a	67.87 a	141.85 b	11.02 a
	M	0.72 a	0.65 a	6.35 b	67.76 a	146.27 a	12.33 a
	L	0.68 b	0.64 b	6.29 c	61.72 b	90.77 c	7.35 b
	CK	0.60 c	0.61 c	5.39 d	43.47 c	81.32 d	6.86 b

注(Note):同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in within a column are significantly different at $P<0.05$ level.

2.1.1 对土壤全氮、全磷和全钾的影响　表 2 显示,在 0—20 cm 土层全氮含量在有机肥施用量为高、中、低时,分别较 CK 显著提高 23.80%、27.16%、15.26%,全磷分别提高 4.90%、5.20%、1.47%($P<0.05$);其中,高肥和中肥处理间无显著差异,但较低肥处理均显著增加($P<0.05$);在 20—40 和 40—60 cm 土层也表现出相似的趋势。在 0—60 cm 土层土壤全钾含量在有机肥施用量高、中、低时,分别较 CK 显著提高 21.81%、17.90% 和 16.71%,各施肥处理间也差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 对土壤速效养分的影响　与试验开始时相比,在 0—60 cm 整个耕层内,经过 4 年的试验,施有机肥高、中、低各处理土壤碱解氮含量较 CK 分别提高了 56.13%、55.86% 和 41.98%($P<0.01$),各处理碱解氮含量均随土层的加深呈下降趋势。在 0—20 cm 土层,各处理间碱解氮含量差异显著($P<0.05$),施有机肥高、中、低各处理较 CK 分别提高了 54.56%、64.59% 和 59.27%,而在 20—40 和 40—60 cm 土层,各处理间的差异未全部达显著水平(表 2)。

表 2 还看出,在 0—20 cm 土层,各施肥处理速效磷含量随有机肥施用量由高到低分别较 CK 处理提高 65.87%($P<0.01$)、65.38%($P<0.01$)和 3.96%($P<0.05$),各施肥处理间仅高肥和低肥,中肥和低肥间存在显著性差异,其余处理间均无明显差异;随着土层的加深,各处理速磷含量均呈明显下降趋势,在 40—60 cm 土层,施有机肥高、中、低和 CK 处理较 0—20 cm 分别下降了 19.60、17.85、12.08 和 12.10 mg/kg。

速效钾含量对施肥量的响应也较为明显,在 0—60 cm 土层,各有机肥处理均显著高于 CK,最大增幅达 79.86%,说明施有机肥能显著提高土壤速效钾的含量,且随着有机肥施用量的增加而增加,各施肥处理间差异显著($P<0.05$)。在 0—20 cm 土层,各施肥处理速效钾含量顺序为 H > M > L > CK,在 20—40 和 40—60 cm 为 M > H > L > CK。随着土层的加深,各处理速效钾含量表现出同速效磷相同的下降趋势,最大降幅达 170.92 mg/kg。说明施有机肥对深层(40—60 cm)土壤速效钾含量的影响不明显。

2.2　施用有机肥对土壤碳素的影响

有机肥不同施用量对宁南旱作农田土壤有机碳、活性有机碳及碳库管理指数(CMI)的影响(表 3)看出,土壤中活性有机碳和有机碳含量在层次上具有明显的规律性,均表现为随着土层深度的增加而减少。

由表 3 可知,经过 4 年施有机肥处理,在 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层各施肥处理土壤有机碳含

表 3　有机肥不同施用量处理下土壤碳素的变化(2010)

Table 3　The change of soil carbon content under different application amount treatments of organic fertilizer

项目 Item	处理 Treatment	土层 Soil layer (cm) 0—20	20—40	40—60	平均 Average
有机碳(g/kg)	H	12.70 a	11.27 ab	11.15 a	11.77 a
Organic carbon	M	12.60 a	11.90 a	11.50 a	12.00 a
	L	11.80 a	10.51 b	10.27 b	10.86 b
	CK	8.53 b	8.48 c	7.71 c	8.24 c
活性有机碳(g/kg)	H	4.68 a	3.73 a	2.23 a	3.55 a
Labile organic carbon	M	3.28 b	2.53 b	1.81 ab	2.54 b
	L	2.78 b	2.29 b	1.41 b	2.16 b
	CK	1.62 c	1.18 c	0.84 c	1.21 c
碳库管理指数	H	404.7 a	302.9 a	151.3 a	275.8 a
CMI	M	240.0 b	174.5 b	116.7 ab	175.1 b
	L	198.2 bc	162.3 b	88.9 b	146.4 b
	CK	108.8 c	74.2 c	51.4 c	77.2 c

注(Note):同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters within a column are significantly different at $P<0.05$ level.

量均高于CK。随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提高42.10%、45.67%和31.82%($P<0.05$);其中,高肥和中肥处理间无显著差异,但较低量有机肥处理显著增加。施有机肥对土壤活性有机碳含量和碳库管理指数(CMI)的影响也很明显,在0—20 cm土层,随有机肥施用量的由高到低,活性有机碳含量分别较CK显著提高189.0%、102.92%和71.75%($P<0.05$),碳库管理指数(CMI)较CK分别上升了295.85、135.17和89.36,差异达极显著水平;在20—40和40—60 cm土层也表现出相同的趋势。总体上说,在0—60 cm土层,有机肥施用量为高、中、低处理的土壤有机碳含量较CK显著提高了192.74%、109.71%和78.25%($P<0.01$),碳库管理指数(CMI)分别上升了198.60、97.85和69.13($P<0.01$)。施肥处理间高肥处理较中肥、低肥处理差异显著,但中肥和低肥处理间无明显差异。总之,施有机肥尤其是高肥、中肥处理,其有机碳含量和活性有机碳含量均较CK得到显著提升,碳库管理指数(CMI)明显提高。

2.3 施用有机肥对土壤酶活性的影响

2.3.1 对土壤脲酶活性的影响 脲酶活性在0—60 cm土层随有机肥施入量的增加而增加,高、中、低施肥处理脲酶活性分别较CK提高165.83%、161.59%和153.41%,差异达极显著水平($P<0.01$),但各施肥处理间均未表现出显著差异,随着土层的加深,各处理脲酶活性均略有下降(图1a)。

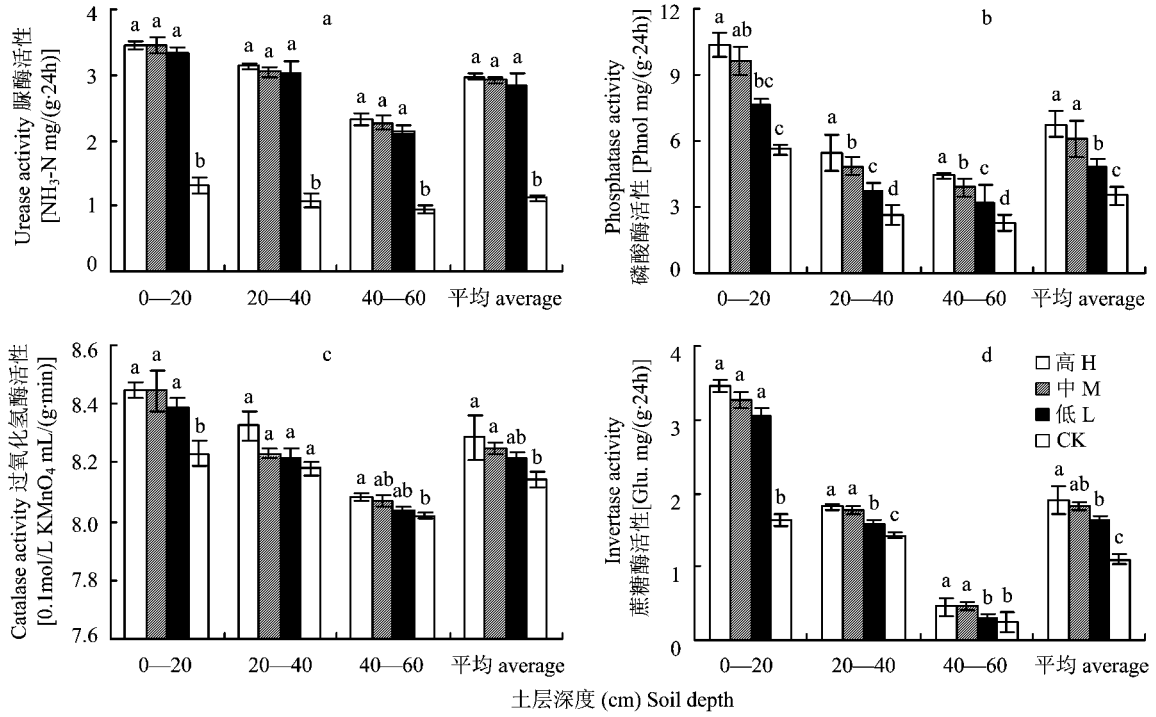

图1 有机肥不同施用量处理下土壤酶活性的变化(在37℃条件下,2010)

Fig. 1 The changes of enzyme activities in soils under different application amount treatments of organic fertilizer (At 37℃, 2010)

[注(Note):柱上不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$)

Different small letters above the bars indicate significant difference at the 0.05 level.]

2.3.2 对土壤磷酸酶活性的影响 经过4年施有机肥,在2010年小麦收获后0—60 cm土层各施肥处理磷酸酶活性随着施肥量的由高到低,分别较CK显著提高92.73%、74.45%和37.87%($P<0.05$)。在0—20 cm各施肥处理间土壤磷酸酶活性未全部达到显著性差异;而在20—40 cm和40—60 cm土层,随施肥量的由高到低,土壤磷酸酶活性在20—40 cm土层分别较CK显著提高106.24%、83.20%和39.56%($P<0.01$),在40—60 cm土层显著提高94.98%、70.17%和40.26%($P<0.01$),且各施肥处理间差异均达显著水平(图1b)。

2.3.3 对土壤过氧化氢酶活性的影响 图1c看出,过氧化氢酶活性各个土层各个处理间无明显变化,基本维持在8.0~8.5 mL/g,各土层各处理最大增幅仅为2.60%。随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

1.74%($P<0.05$)、1.29%($P<0.05$)和0.87%,可见,土壤过氧化氢酶活性随着施肥量的增加而不断提高。在0—20和20—40 cm土层,各施肥处理间土壤过氧化氢酶活性未全部达到显著性差异水平,但较CK处理均差异显著($P<0.05$);而在40—60 cm土层,随施肥量由高到低,土壤过氧化氢酶活性分别较CK处理提高0.82%、0.66%和0.26%,只有高肥处理达显著水平,其余各处理间差异均未达显著水平。

2.3.4 对土壤蔗糖酶活性的影响　施有机肥处理各个土层间蔗糖酶活性均有所提高(图1d),增幅为11.40%～111.90%。在0—20 cm土层变化尤为明显,高、中、低施肥处理分别较CK提高了111.90%、100.01%和86.61%,差异达极显著水平($P<0.01$),各施肥处理间也表现出显著差异。在20—40和40—60 cm土层,各施肥处理虽较CK处理差异显著($P<0.05$),但各施肥处理与CK间差异较表层(0—20 cm)逐渐变小,且施肥处理间表现出了一定的差异性。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922.18%。说明有机肥不同施用量均可显著提高表层(0—20 cm)土壤的蔗糖酶活性。

2.4　不同有机肥施用量对冬小麦产量和水分利用效率的影响

表4表明,旱塬地施用有机肥对小麦的出苗、分蘖、穗粒数、千粒重和产量等均有明显的促进作用,而且随施用量的增加而增加。2010年随有机肥施用量的由高到低,产量分别较CK提高35.05%、20.77%和11.51%,差异极显著($P<0.01$);作物水分利用效率分别较CK提高38.26%、22.61%和11.88%,差异极显著($P<0.01$)。

表4　有机肥不同施用量对冬小麦产量和水分利用效率的影响(2010)

Table 4　Effects different organic fertilizer amounts on winter wheat yield and WUE_Y under

处理 Treatment	有效分蘖数 Effective spikes (No./plant)	穗粒数 Kernel (No./spike)	千粒重 1000-kernel wt. (g)	产量 Grain yield (kg/hm^2)	耗水量 Water consumption (mm)	水分利用效率 WUE_Y [$kg/(mm \cdot hm^2)$]
H	2.43±0.03 aA	32.58±1.20 aA	33.22±1.47 aA	3063±35.64 aA	321.19±3.75 aA	9.54±0.17 aA
M	2.34±0.05 abA	32.58±0.41 abA	31.58±1.05 aA	2739±7.57 bB	323.76±0.88 aA	8.46±0.18 bB
L	2.29±0.07 abA	31.19±0.34 abA	30.89±1.64 aA	2529±24.85 cC	327.49±2.96 aA	7.72±0.07 cC
CK	2.20±0.05 bA	29.54±1.26 bA	29.72±0.68 aA	2268±21.62 dD	328.73±2.89 aA	6.90±0.12 dD

注(Note): WUE_Y—Water use efficiency; 同列数据后不同大、小写字母分别表示差异达极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)水平 Values followed by different capital and small letters within a column are significantly different at the 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3　讨论

3.1　养分

长期施用有机肥在提高土壤全效和速效养分等方面有良好的作用[22]。崔文华等[23]提出,欲提高土壤碱解氮含量水平,应施用有机肥料,使土壤碳、氮保持同步。张夫道等[24]在一些长期试验中发现,施有机肥料区土壤含氮量均高于化肥区和不施肥区;蒋仁成等[25]的研究也表明,施用有机肥能显著提高土壤全效养分的含量。

本试验结果看出,通过连续4年试验,土壤耕层各养分含量与试验前相比有明显变化,施有机肥能显著增加0—60 cm土层土壤养分含量。随施肥量的增加,各施肥处理全氮、全钾和全磷含量分别较CK有显著提高;有机肥对土壤全氮和全钾含量的影响明显高于全磷,这可能主要是因为磷在土壤中移动性较小所造成的。土壤速效养分也表现出相同的趋势,但随着土层的加深,各处理速效养分含量均迅速降低。说明施有机肥对土壤表层(0—20 cm)速效养分含量影响显著,随着土层的加深,这种影响也随之减弱,各处理间差异显著,这与一些研究结果[26]基本一致。

3.2　土壤碳素

土壤有机碳是土壤养分转化的核心,其含量与土壤质量和农业生产力密切相关,直接影响着土壤肥力的保持与提高,从而影响作物的产量与质量[27-28]。吴庆标[29]等的研究看出,有机肥施用量的多少直接影响土壤有机质的积累量;而且经过腐熟的有机肥中含有的大量相对比较稳定的有机碳,在土壤中不易被分解而在土壤中累积下来,显著增加了土壤有机质含量。本研究结果表明,施有机肥能显著增加0—60 cm土层土壤有机碳和活性有机

碳的含量,由此可看出,长期施用有机肥能显著增加土壤碳库,这与孟磊等[30]的研究结果相似。通过对比发现,高量有机肥处理较中量有机肥处理在提高土壤有机碳(OC)含量方面并没有体现出优势,这可能是由于土壤有机碳(OC)容易受到土壤质地、气候、生物量以及采样时间等因素的影响,从而影响测定结果。

3.3 酶活性

土壤酶活性作为一个敏感的生化指标,能够反映出土壤质量在时间序列或各种不同条件下的变化,在植物营养物质的转化中起重要作用。酶活性会随着施肥种类、管理与耕作方式、作物种类、土壤水分和环境条件的变化而受到影响。大量研究表明施有机肥可增加土壤酶活性[31-32]。本研究显示,经过4年施用有机肥,土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性均得到显著提高,这与任祖淦等[33]研究结果一致;但也有研究认为长期施用有机肥对过氧化氢酶活性的提高较小[34],这可能是由于所研究的土壤类型、施肥方式及肥料用量不同的缘故。本研究表明,各有机肥用量处理,0—20 cm土层土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性均显著高于20—40和40—60 cm土层,与高明等[35]研究认为,土壤酶活性存在表层富集效应的结论一致。土壤酶活性存在表层富集效应的原因可能是表层土壤能较好地与外界进行物质与能量交换,利于微生物的繁殖;随着土壤层次的加深,土壤熟化程度、肥力水平及土壤营养元素含量等都有所降低,不利于微生物的活动与繁殖,因此导致了酶活性的降低。

3.4 产量与水分利用效率

研究表明,旱地施用有机肥,无论是丰雨年、欠雨年还是干旱年其增产趋势一致,产量随施肥量的增加而升高。苏秦等[36]研究认为增施有机肥料能显著提高旱地作物水分利用效率和底墒利用率,还有利于提高土壤的蓄水保水性能。张永清等[37]研究认为有机肥在一定程度上可以缓解干旱胁迫的影响,从而使土壤水分利用率提高,产量增加。这些研究结论与本试验结果基本一致。

4 结论

1)施有机肥可有效增加土壤各种养分含量,显著提高土壤有机碳含量和碳库管理指数。

2)连年施有机肥显著提高了土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性,提高程度因有机肥施用量的多少而异。

3)旱塬地连年施用有机肥可极显著地提高冬小麦产量和水分利用效率。

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] 侯云鹏,秦裕波,尹彩侠,等. 生物有机肥在农业生产中的作用及发展趋势[J]. 吉林农业科学,2009,34(3):28-29.
Hou Y P, Qin Y B, Yin C X *et al*. The role of bio-organic fertilizer in agricultural production and its developing trends [J]. J. Jilin Agric. Sci.,2009, 34(3): 28-29.

[3] 沈德龙,曹凤明,李力. 我国生物有机肥的发展现状及展望[J]. 中国土壤与肥料,2007,(6):1-5.
Shen D L, Cao F M, Li L. Development status and prospect of microbial organic fertilizer in China [J]. China Soils Fert., 2007, (6): 1-5.

[4] 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.

[5] 张世贤. 我国有机肥料的资源、利用、问题和对策[J]. 磷肥与复肥,2001,16(1):8-11.
Zhang S X. Issues on utilization of domestic fertilizer resources and its countermeasure [J]. Phos. & Comp. Fert., 2009, 16(1): 8-11.

[6] 刘睿,王正银,朱洪霞. 中国有机肥料研究进展[J]. 中国农学通报,2007,23(1):310-312.
Liu R, Wang Z Y, Zhu H X. Research progress of organic fertilizer in China [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(1): 310-312.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 王书锦,胡江春,张宪武. 新世纪中国土壤微生物学的展望[J]. 微生物学杂志,2002,22(1):36-39.
Wang S J, Hu J C, Zhang X W. Prospect of Chinese soil microbiology in the new century [J]. J. Microbiol., 2002, 22(1): 36-

39.

[10] 侯光炯. 农业土壤学[M]. 成都: 四川科技出版社, 2000.
Hou G J. Agricultural soil science [M]. Chengdou: Sichuan Publish House of Science Technology, 2000.

[11] Govi M, Francioso O, Ciavatta C *et al*. Influence of long-term residue and fertilizer applications on soil humic substances: A study by electro focusing [J]. Eur. J. Soil Sci., 1992, 154 (1): 8-13.

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

[13] 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 thumb [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(1): 280-284.

[14] 高菊生,秦道珠,刘更另,徐明岗. 长期施用有机肥对水稻生长发育及产量的影响[J]. 耕作与栽培,2002,(2): 31-33.
Gao J S, Qin D Z, Liu G L, Xu M G. Effects of long-term organic fertilizer and chemical cooperation on the rice yield and soil nutrient [J]. Cult. Plant., 2002, (2): 31-33.

[15] 张平究,李恋卿,潘根兴,张俊伟. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土表土微生物碳氮量及基因多样性变化[J]. 生态学报,2004,24(12): 2818-2824.
Zhang P J, Li L Q, Pan G X, Zhang J W. Influence of long-term fertilizer management on topsoil microbial biomass and genetic diversity of a paddy soil from the Tai Lake region, China [J]. Acta Ecol. Sin., 2004, 24(12): 2818-2824.

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

[17] 侯贤清,韩清芳,贾志宽,等. 半干旱区夏闲期不同耕作方式对土壤水分及小麦水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(5): 52-58.
Hou X Q, Han Q F, Jia Z K *et al*. Effects of different tillage practices in summer fallow period on soil water and crop water use efficiency in semi-arid areas [J]. Agric. Res. Arid Areas, 2009, 27(5): 52-58.

[18] Ren X L, Jia Z K, Chen X L. Rainfall concentration for increasing corn production under semiarid climate [J]. Agric. Water Manag., 2008, (95): 1293-1302.

[19] 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.

[20] 赵兰波,姜岩. 土壤磷酸酶测定方法探讨[J]. 土壤通报, 1986,17(3): 138-141.
Zhao L B, Jiang Y. Discussion on measurements of soil phosphates [J]. Chin. J. Soil Sci., 1986, 17(3): 138-141.

[21] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报,2006,43(5): 723-729.
Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization [J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(5): 723-729.

[22] 林葆,林继雄,李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报,1994,1(1): 17.
Li B, Li J X, Li J K. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1994, 1(1): 17.

[23] 崔文华,卢亚东. 化肥和有机肥对作物产量和土壤养分影响的研究[J]. 土壤通报,1993,24(6): 271-272.
Cui W H, Lu Y D. Study on fertilizer and organic fertilizer to crop yield and soil nutrient [J]. Chin. J. Soil Sci., 1993, 24 (6): 271-272.

[24] 张夫道. 长期施肥条件下土壤养分的动态和平衡. Ⅱ对土壤氮的有效性和腐殖质氮组成的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1996,2(1): 39-48.
Zhang F D. Dynamic and balance of soil nutrients under long-term fertilization conditions Ⅱ. Effect on N availability and composition of humus N [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1996, 2(1): 39-48.

[25] 蒋仁成,厉志华,李德民. 有机肥和无机肥在提高黄潮土肥力中的作用研究[J]. 土壤学报,1990,27(2): 179-185.
Jiang R C, Li Z H, Li D M. Studies on role of chemical and organic fertilizer in promoting the fertility of yellow fluvo-aquic soils [J]. Acta Pedol. Sin., 1990, 27(2): 179-185.

[26] 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.

[27] 展争艳,李小刚,张德呈,王哲锋. 利用方式对高寒牧区土壤有机碳含量及土壤结构性质的影响[J]. 土壤学报,2005,42 (5): 777-782.
Zhan Z Y, Li X G, Zhang D C, Wang Z F. Effects of land use on organic C concentration and structural properties in alpines grassland soil [J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(5): 777-782.

[28] 李海波,韩晓增,王风,乔云发. 不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化[J]. 土壤学报,2008,45(1): 113-117.
Li H B, Han X Z, Wang F, Qiao Y F. Distribution of soil organic carbon and nitrogen in density factions on black soil as affected by land use [J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(1): 113-117.

[29] 吴庆标,王效科,郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(5): 743-747.
Wu Q B, Wang X K, Guo R. Soil organic carbon stability and influencing factors [J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(5): 743-747.

[30] 孟磊,蔡祖聪,丁维新,等. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响[J]. 土壤学报,2005,42(5): 769-776.
Meng L, Cai Z C, Ding W X *et al*. Carbon contents in soils and

crops as affected by long-term fertilization [J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(5): 769-776.

[31] Leiros M C, Gil-Sotres F, Trasarcepeda M C *et al*. Soil recovery at the meirama opencast lignite mine in northwest Spain: A Comparison of the effectiveness of cattle slurry and inorganic fertilizer [J]. Water, Air, Soil Poll., 1996, 91: 109-124.

[32] 曾玲玲,张兴梅,洪音,刘德福. 长期施肥与耕作方式对土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2008,(2): 28-29.
Zeng L L, Zhang X M, Hong Y, Liu D F. Effect of long-term fertilization and tillage system on soil enzyme activities [J]. China Soils Fert., 2008, (2): 28-29.

[33] 任祖淦,陈玉水,唐福钦,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, Tang F Q *et al*. Effect of inorganic fertilizer combined with organic manure on the microflora and enzyme activities in paddy soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1996, 2(3): 279-283.

[34] 袁玲,杨邦俊,郑兰君,刘学成. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1997,3(4): 300-306.
Yuan L, Yang B J, Zhen L J, Liu X C. Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1997, 3(4): 300-306.

[35] 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): 1177-1181.

[36] 苏秦,贾志宽,韩清芳,等. 宁南旱区有机培肥对土壤水分和作物生产力影响的研究 [J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6): 1466-1469.
Su Q, Jia Z K, Hang Q F *et al*. Effects of organic fertilization on soil moisture and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(6): 1466-1469.

[37] 张永清,苗果园. 水分胁迫条件下有机肥对小麦根苗生长的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(6): 811-816.
Zhang Y Q, Miao G Y. Effects of manure on root and shoot growth of winter wheat under water stress [J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(6): 811-816.

植物营养与肥料学报 2011,17(5):1131-1139
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄河上游灌区稻田氨挥发损失研究

张 惠[1,2],杨正礼[1*],罗良国[1*],张晴雯[1],易 军[1],王永生[1],陈媛媛[1],王 明[1]
(1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;2 宁夏职业技术学院,宁夏银川 750002)

摘要:采用密闭气室间歇式抽气法研究了黄河上游灌区不同施肥处理下稻田氨挥发损失特征。结果表明,在水稻全生育期不同施肥处理下稻田氨挥发量为 N 27.6～94.1 kg/hm^2,肥料氮损失率为 16.4%～22.2%;不同施肥阶段氨挥发损失持续时间为 10 d 左右,氨挥发最大峰值均发生在施肥后 2～3 d;分蘖肥后氨挥发损失量最大,损失量占全生育期损失总量的 27.1%～37.0%。温度、光照、pH 值是黄河上游灌区氨挥发的主要影响因素,稻田田面水铵浓度与氨挥发呈显著线性正相关。稻田氨挥发损失量随氮肥施用量的增加而增加,与习惯施肥(N_{300})相比,减氮 20%(N_{240})及有机肥和化肥配合施用($N_{240-1/2OM}$)均能有效减少稻田氨挥发损失,且这两个处理的水稻产量最高,是生态效益和经济效益双赢的最佳模式。

关键词:黄灌区;稻田;施肥;氨挥发
中图分类号:S153.6$^+$1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2011)05-1131-09

Study on the ammonia volatilization from paddy field in irrigation area of the Yellow River

ZHANG Hui[1,2], YANG Zheng-li[1*], LUO Liang-guo[1*], ZHANG Qing-wen[1], YI Jun[1], WANG Yong-sheng[1], CHEN Yuan-yuan[1], WANG Ming[1]
(*1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China;*
2 Ningxia Vocational and Technical College, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The batch-type airflow enclosure method was adopted to measure the ammonia volatilization (AV) from paddy field under different fertilization rates in irrigation area of the Yellow River. The results indicated that, total amount of AV loss generally increased with the urea application rate in paddy field. During the whole rice growing season, AV loss varied from N 27.6 to 94.1 kg/ha, which accounted for 16.4%-22.2% of applied N. The AV lasted for 10 days and the peak of AV occurred 2-3 days after fertilization. Most of the AV loss occurred at the tillering dressing stage, which accounted for 27.1%-37.0% of the total AV loss throughout the rice growing season. The AV in irrigation area of the Yellow River was affected mainly by temperature, light and pH value. The AV loss has a significant positive linear relationship with the ammonium concentrations in surface water of paddy field. Compared with the local fertilizer application (N_{300}), optimizing N application (N_{240}) and N fertilizer application amended with organic manure ($N_{240-1/2OM}$) could obviously reduce the AV loss from the field, meanwhile, get a desirable yield. Based on our experiment, the optimum fertilization formula for the paddy field in irrigation area of the Yellow River is N_{240} and $N_{240-1/2OM}$.

Key words: irrigation area of the Yellow River; paddy soil; fertilization; ammonia volatilization

收稿日期:2010-12-28　　**接受日期**:2011-03-24
基金项目:国家科技重大专项课题(2009ZX07212-004);国家自然科学基金(40701099);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助。
作者简介:张惠(1967—),女,宁夏银川人,博士研究生,主要从事植物营养及农业污染控制方面的研究。E-mail: zhanghuinany@yahoo.com.cn
* 通讯作者 Tel: 010-82108989, E-mail: yangzl426@126.com, luolg@caas.net.cn