

有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响

邢鹏飞^{1,2}, 高圣超², 马鸣超², 周晓琳³, 赵同凯³, 孙军德^{1*}, 沈德龙^{2*}

- (1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866;
2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;
3. 德州市农业科学研究院, 山东 德州 253015)

摘要:以华北平原农田土壤为研究对象, 2012~2015年连续4年研究了有机肥替代部分无机肥对土壤中养分含量、土壤酶活性和作物产量的影响。结果表明: 1) 0.3 M 处理(70%无机肥+3 000 kg/hm²有机肥)和0.5 M 处理(50%无机肥+6 000 kg/hm²有机肥)与NPK处理(单施无机肥)相比都提高了土壤中全氮、有效磷、速效钾含量, 且0.5 M 高于0.3 M, 说明有机肥替代无机肥的比例越高, 土壤中全氮、有效磷、速效钾含量就越高。2) 土壤中脲酶活性大小顺序NPK>0.3 M>0.5 M>CK, 蔗糖酶活性和过氧化氢酶活性为0.5 M>0.3 M>NPK, 说明有机肥可以显著提高蔗糖酶和过氧化氢酶活性。3) 小麦4年累计产量0.3 M 处理比NPK处理提高5.95%, 0.5 M 处理比NPK处理降低0.94%; 玉米4年累计产量则是0.3 M 比NPK处理降低1.27%, 0.5 M 处理比NPK处理降低2.00%。综上所述, 本研究表明, 有机肥替代30%无机肥处理能够保证粮食产量, 有机肥替代50%无机肥处理更能提高土壤肥力。

关键词: 有机替代无机肥; 土壤养分; 土壤酶活性; 作物产量

中图分类号: S147.5; S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257(2016)03-0098-07

由于近年来农业生产的社会化和分工化, 我国农村农业生产细化为种植户与养殖户, 这导致农业施肥结构由有机肥加化肥逐渐变为纯化肥施肥。放弃养殖的种植户失去了有机肥来源, 故而代偿性增加化肥使用量, 从而使我国化肥使用量持续增长。2001年我国化肥施用总量为4 253.76万t, 至2015年化肥施用总量增加到6 000万t。1980年中国单位耕地化肥使用量仅为94.83 kg/hm², 2004年单位面积耕地化肥施用量为300 kg/hm², 2010年为460 kg/hm², 2012年则增长到480 kg/hm², 增幅达5倍。同时期中国粮棉油综合产量从4 254.41 kg/hm²增至9 227.12 kg/hm², 增幅为2倍, 明显低于化肥使用量的增加^[1-2]。资料显示, 北方水稻施钾量超过50 kg/hm², 而目前已经有45%的农户超过这一比例; 而南方水稻施钾超过120 kg/hm², 目前湖南

过量施肥的农户比例为32%, 而广东已经有56%的农户过量施肥, 但增产效应下降严重^[3]。试验证明, 长期单施化肥可使土壤酸化、板结、含水量降低, 土壤养分流失, 而过量使用化肥无疑会加剧这些问题^[4-5]。

面对这种情况, 国内外学者做了大量研究, 发现施用有机肥可以大幅缓解由于过量施用化肥带来的土壤酸化、养分流失等问题, 还能直接增加土壤有效养分, 促进微生物繁殖, 增强保肥保水能力^[6-10]。纯有机肥有利于土壤的可持续利用, 却存在增产效果较低的弱点, 宇万太等^[11]研究表明, 施用有机肥能显著提高土壤中NPK的含量; 林治安等^[12]研究表明, 有机肥替代50%无机肥后小麦和玉米产量明显降低; 刘杏兰等^[13]研究也表明, 随着有机肥替代比例的增加, 小麦和玉米产量呈现明显的下降趋势。因此, 目前研究有机肥替代部分无机肥, 对指导合理施肥, 维持土壤可持续利用具有重要意义。

本试验以华北小麦-玉米轮作区农田土壤为研究对象, 研究有机肥替代无机肥的合适替代比例, 及不同替代比例下对土壤养分、土壤酶活性及作物产量的影响, 为华北平原地区与高产及合理施肥提供依据。

收稿日期: 2016-02-29; 最后修订日期: 2016-03-24

基金项目: 农业部公益性农业行业科研专项(201103004); 农业部生物有机肥创制重点实验室开放课题。

作者简介: 邢鹏飞(1988-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事微生物生态学方面的研究, E-mail: xingruofeng@126.com。

通讯作者: 孙军德, E-mail: sunjunde108@163.com; 沈德龙, E-mail: shendelong@caas.cn。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验田位于山东德州市哨马营村试验田, 即华北平原东经 $115^{\circ}45' \sim 117^{\circ}24'$, 北纬 $36^{\circ}24' \sim 38^{\circ}00'$, 属于黄河冲积平原, 土壤类型为棕壤。该地气候属于典型的温带大陆性季风气候, 年平均气温 12.9°C , 年平均降水量 547.5 mm 。试验田作物种植方式为典型的冬小麦-夏玉米轮作方式, 小麦种植品种为济麦 22, 玉米为郑单 958。试验前农田土壤养分含量: 全氮 (N) 1.2 g/kg , 有效磷 (P) 37.4 mg/kg , 速效钾 (K) 282 mg/kg , 有机质含量 20.3 g/kg , pH 值 8.3。

1.2 试验设计

试验设 CK (不施肥处理), NPK (全量无机肥), 0.3 M (70% 无机肥 + $3\,000 \text{ kg/hm}^2$ 有机肥), 0.5 M (50% 无机肥 + $6\,000 \text{ kg/hm}^2$ 有机肥) 4 个处理, 每个处理设 3 个重复。试验小区随机排列, 小区面积为 50 m^2 ($5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$), 小区间隔 1 m , 试验区外设置 5 m 保护行。施肥种类及用量: 氮肥为尿素 (N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (P_2O_5 16%), 钾肥为硫酸钾 (K_2O 50%)。猪粪有机肥总养分 (N + P_2O_5 + K_2O) 质量分数 $\geq 5\%$, 有机质含量 $\geq 45\%$ 。不同处理每个小区施肥量见表 1。

表 1 每个小区不同施肥处理下无机肥及

有机肥施用量 (kg/hm^2)

处理	尿素	P_2O_5	K_2O	有机肥
CK	0	0	0	0
NPK	543.48	281.25	90.00	0
0.3M	163.04	84.38	27.00	3 000.00
0.5M	271.74	140.63	45.00	6 000.00

1.3 采样及测定项目与方法

采样: 用土钻取 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品, 作为供试土样。每个小区取 9 个样点, 混合均匀, 作为一个重复。取得土壤样品后, 挑出土壤中石块和动植物残体, 风干, 研磨, 分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛, 用于土壤养分和酶活性测定。

用于酶活性测定的土壤样本分别于小麦返青期、拔节期、灌浆期、成熟期取样, 用于养分测定的土壤样本于小麦收获后取样。

土壤化学性质: 全氮 (Total N, TN), 采用凯氏定氮法测定; 有效磷 (Available P, AP), 用碳酸氢钠浸提, 钼锑抗比色法测定; 速效钾 (Availa-

ble K, AK), 用原子吸收分光光度计法测定; 有机质 (SOM), 用重铬酸钾容量法测定; pH 值 (土水比 1:1) 用酸度计测定^[14]。

土壤酶活性: 土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定, 以 24 h 每克土壤中产生的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的毫克数表示; 土壤蔗糖酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 以 24 h 每克土生成的葡萄糖的毫克数来表示; 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾容量法测定, 以每克土 1 min 消耗的 0.02 mol/L 的 KMnO_4 体积表示^[15]。

产量: 小麦产量在测产区每个小区取中间 3 行的小麦收割来进行测产, 最后换算为单位面积产量; 玉米产量在测产区每个小区取中间 3 行的玉米收割来进行测产。

数据处理: 采用 Excel 2010 进行数据整理, SPSS 19.0 统计分析软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 有机肥部分替代无机肥对土壤养分及 pH 值的影响

不同比例的有机肥替代无机肥对华北农田土壤养分的影响如表 2。结果显示, 2012 ~ 2015 年土壤中 TN、AP、AK 及有机质含量总体趋势是逐年降低的; 连续 4 年各施肥处理土壤中 TN、AP、AK 含量均明显高于 CK 处理; 受气候、降水等条件影响, 连续 4 年各施肥处理土壤 pH 值变化趋势不显著, 但不施肥处理土壤 pH 值显著高于施肥处理。

2.1.1 有机肥部分替代无机肥对土壤养分的影响

小麦季各施肥处理中, 2012 年全氮含量在施肥处理间差异不显著, 2013 年、2014 年 NPK 处理的全氮含量最高。到 2015 年小麦收获后, 0.3 M 、 0.5 M 处理的 TN 含量已经超过 NPK 处理, 其中 0.3 M 处理较 NPK 处理提高 8.67% , 0.5 M 处理较 NPK 处理提高 6.39% ($P < 0.05$); 连续 4 年不同施肥处理的 AP、AK 变化规律一致, 二者在土壤中的含量明显随施肥处理中有机肥比例增加而增加, NPK 处理最低, 0.5 M 处理最高, 2015 年 0.3 M 处理的 AP、AK 含量较 NPK 处理分别高 6.44% 和 4.59% , 0.5 M 的处理 AP、AK 含量较 NPK 处理分别提高 17.02% 和 10.14% 。连续 4 年小麦季土壤中有有机质含量发生了显著的变化, 处理顺序为 $\text{CK} < \text{NPK} < 0.3 \text{ M} < 0.5 \text{ M}$, 表明有机肥使用量越高, 土壤中 SOM 含量越高。

表2 不同施肥处理对土壤养分、pH 值及有机质的影响

处理			全氮 (g/kg)	有效磷 (P mg/kg)	速效钾 (K mg/kg)	pH 值	有机质 (g/kg)
小麦季	2012 年	CK	1.077 ± 0.092a	23.98 ± 2.52a	203.73 ± 11.32a	8.157 ± 0.040b	20.98 ± 0.48a
		NPK	1.550 ± 0.066b	51.69 ± 9.25b	247.87 ± 13.01b	8.065 ± 0.078a	22.60 ± 0.51b
		0.3M	1.572 ± 0.072b	45.23 ± 6.57ab	276.47 ± 0.90c	8.080 ± 0.016ab	23.20 ± 1.06b
		0.5M	1.600 ± 0.010b	51.76 ± 0.10b	278.17 ± 0.10c	8.080 ± 0.010ab	24.22 ± 0.11b
	2013 年	CK	1.229 ± 0.082a	19.75 ± 3.59a	192.91 ± 10.97a	8.268 ± 0.069c	21.44 ± 0.74a
		NPK	1.514 ± 0.076c	39.27 ± 5.44b	284.95 ± 21.08b	8.025 ± 0.035a	23.31 ± 0.23b
		0.3M	1.452 ± 0.053bc	44.19 ± 7.29bc	295.87 ± 32.53b	8.120 ± 0.035b	24.12 ± 0.78b
		0.5M	1.357 ± 0.074ab	52.21 ± 8.05c	327.73 ± 19.80b	8.103 ± 0.040ab	23.64 ± 0.11b
	2014 年	CK	1.103 ± 0.013a	13.58 ± 0.38a	161.02 ± 12.95a	8.417 ± 0.023d	18.51 ± 0.37a
		NPK	1.374 ± 0.016b	36.08 ± 2.42b	204.91 ± 11.93b	8.107 ± 0.029a	21.22 ± 1.11b
		0.3M	1.262 ± 0.023ab	38.01 ± 1.24b	207.59 ± 8.13b	8.363 ± 0.011c	21.45 ± 0.46b
		0.5M	1.345 ± 0.021b	42.72 ± 2.23c	274.33 ± 7.69c	8.210 ± 0.012b	23.27 ± 0.18c
	2015 年	CK	1.078 ± 0.020a	13.09 ± 0.53a	240.97 ± 1.31a	8.048 ± 0.054c	16.99 ± 0.08a
		NPK	1.177 ± 0.064ab	34.92 ± 1.68b	281.88 ± 2.32b	7.837 ± 0.025a	18.29 ± 0.07b
		0.3M	1.279 ± 0.018c	37.17 ± 0.25b	294.83 ± 1.32c	7.910 ± 0.007b	19.55 ± 0.31c
		0.5M	1.253 ± 0.017bc	40.87 ± 1.29c	310.46 ± 1.63d	7.910 ± 0.008b	19.78 ± 0.70c
玉米季	2012 年	CK	1.134 ± 0.081a	26.94 ± 0.58a	202.44 ± 4.58a	8.150 ± 0.088b	21.48 ± 0.34a
		NPK	1.662 ± 0.038b	38.25 ± 6.63b	258.45 ± 10.47b	8.048 ± 0.096ab	22.46 ± 0.66a
		0.3M	1.833 ± 0.047c	40.34 ± 6.45b	275.89 ± 4.42c	7.970 ± 0.048a	24.41 ± 0.72b
		0.5M	1.800 ± 0.010c	36.10 ± 0.01b	275.04 ± 0.01c	8.040 ± 0.001ab	24.50 ± 0.01b
	2013 年	CK	1.051 ± 0.040a	15.71 ± 0.65a	184.65 ± 11.40a	7.968 ± 0.053b	21.38 ± 0.26a
		NPK	1.355 ± 0.047b	43.64 ± 12.77b	293.90 ± 15.37b	7.833 ± 0.023a	23.35 ± 0.15b
		0.3M	1.388 ± 0.070b	50.11 ± 6.53b	306.10 ± 13.63b	7.753 ± 0.077a	24.89 ± 0.65c
		0.5M	1.391 ± 0.041b	48.62 ± 3.70b	302.75 ± 11.15b	7.775 ± 0.050a	24.22 ± 0.22c
	2014 年	CK	1.042 ± 0.010a	10.45 ± 0.15a	223.36 ± 11.60a	7.850 ± 0.051c	17.97 ± 0.30a
		NPK	1.293 ± 0.106b	34.02 ± 1.85b	305.45 ± 1.89b	7.733 ± 0.033b	19.23 ± 0.70b
		0.3M	1.226 ± 0.020b	34.24 ± 0.27b	314.19 ± 9.38b	7.663 ± 0.052ab	20.60 ± 0.49c
		0.5M	1.325 ± 0.054b	51.27 ± 1.54c	366.78 ± 7.06c	7.636 ± 0.037a	21.17 ± 0.46c
	2015 年	CK	1.087 ± 0.006a	17.09 ± 0.93a	229.82 ± 1.31a	7.967 ± 0.048c	16.53 ± 0.27a
		NPK	1.135 ± 0.035b	43.02 ± 1.46b	270.73 ± 2.00b	7.850 ± 0.016a	17.38 ± 0.19ab
		0.3M	1.180 ± 0.009c	44.22 ± 0.18b	297.01 ± 2.27c	7.907 ± 0.012b	17.85 ± 0.71b
		0.5M	1.302 ± 0.014d	54.56 ± 0.66c	339.30 ± 1.16d	7.940 ± 0.008bc	19.96 ± 0.13c

注：同列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

玉米季, 2012~2013 年不同施肥处理土壤养分差异较小, 2014~2015 年处理间差异较为显著。到 2015 年玉米收获后, 0.3 M、0.5 M 处理的 TN 含量已经超过 NPK 处理, 其中 0.3 M 处理较 NPK 处理提高 3.96%, 0.5 M 处理较 NPK 处理提高 14.71% ($P < 0.05$); 连续 4 年玉米季不同处理的 AP、AK 变化也与小麦季相同, NPK 处理最低, 0.5 M 处理最高。2015 年 0.3 M 处理的 AP、AK 含量较 NPK 处理分别高 2.79% 和 9.71%, 0.5 M 处理的 AP、AK 含量较 NPK 处理分别提高 26.82% 和 25.33%。4 年玉米季土壤 SOM 含量大小顺序为 CK < NPK <

0.3 M < 0.5 M, 结果与小麦季一致。

2.1.2 有机肥部分替代无机肥对土壤 pH 值的影响

连续 4 年不同处理土壤 pH 值变化显著, 其中 CK 处理 pH 值明显高于其他处理。小麦季中, NPK 处理 pH 值最低, 有机部分替代无机肥处理的 pH 值明显高于全量无机肥处理, 2013 年、2014 年 0.3 M 处理的 pH 值高于 0.5 M 处理。到 2015 年小麦收获后, 0.3 M 处理与 0.5 M 处理差异性不明显, 但都高于 NPK 处理。玉米季 pH 值变化规律不明显, 但 CK 处理的 pH 值仍是显著高于其他处理; 2015 年玉米收获后土壤 pH 值变化与小麦一致, 处理顺序为 NPK < 0.3 M < 0.5 M < CK。

2.2 有机肥部分替代无机肥对土壤酶活性的影响

2.2.1 有机肥部分替代无机肥对脲酶活性的影响

经过4年连续施肥后,2015年小麦4个不同生长时期取样测得土壤脲酶活性,结果如图1。图1显示,小麦4个生长时期内,拔节期土壤脲酶活性明显高于其它时期。返青期不同处理土壤脲酶活性差异最小,成熟期土壤脲酶活性差异最显著。不同时期NPK处理的脲酶活性要高于其他处理,其次是0.3 M处理,0.5 M处理较低,CK处理最低。

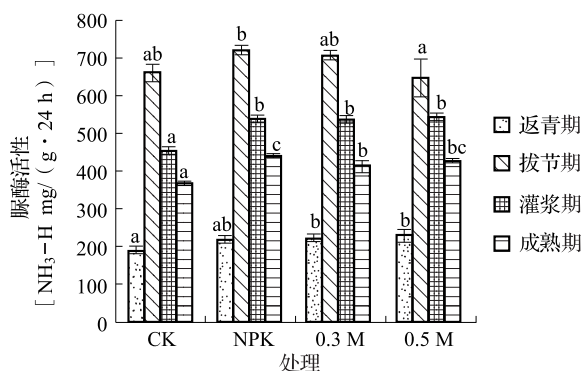


图1 不同有机肥比例对土壤脲酶活性的影响

注:同列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.2.2 有机肥部分替代无机肥对蔗糖酶活性的影响

经过4年连续施肥后,2015年小麦4个不同生长时期取样测得土壤蔗糖酶活性,结果如图2。图2显示,4个生长时期内,小麦成熟期土壤蔗糖酶活性明显高于其它时期。返青期和拔节期不同处理间蔗糖酶活性差异不显著,灌浆期和成熟期不同处理间蔗糖酶活性差异显著。根据灌浆期和成熟期数据,小麦土壤中蔗糖酶活性明显随有机肥使用量增加而增强,CK处理最低,NPK处理较低,0.3 M处理较高,0.5 M处理最高。灌浆期和成熟期不同有机肥比例对蔗糖酶活性的提高幅度略有不同。

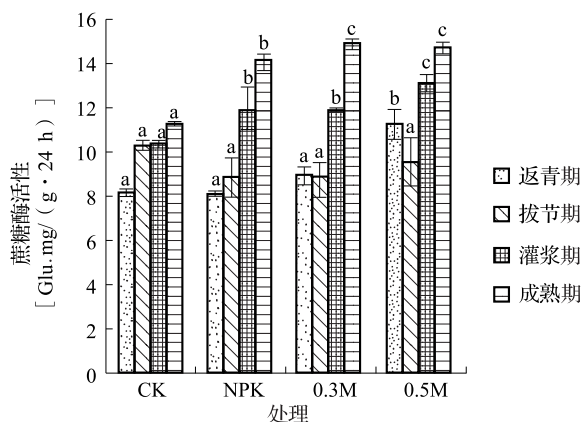


图2 不同有机肥比例对土壤蔗糖酶活性的影响

2.2.3 有机肥部分替代无机肥对过氧化氢酶活性的影响

经过4年连续施肥后,2015年小麦4个不同生长时期取样测得土壤过氧化氢酶活性,结果如图3。图3显示,4个生长时期内,小麦灌浆期土壤过氧化氢酶活性明显高于其它时期,且该时期不同处理间过氧化氢酶活性差异显著性高于其它时期。不同处理过氧化氢酶活性在小麦不同生长时期内变化规律一致,都与有机肥和无机肥施用量有密切关系,CK处理过氧化氢酶活最高,NPK处理最低,0.3 M处理较低,0.5 M处理较高。

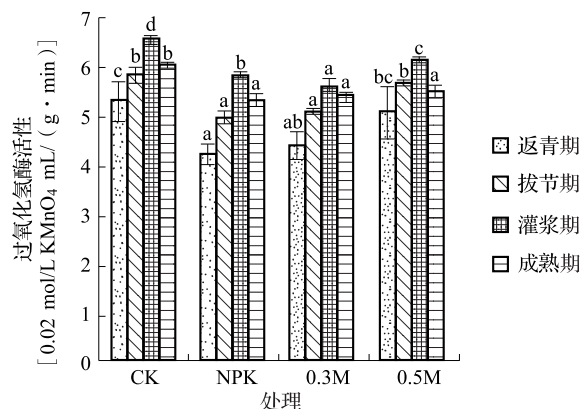


图3 不同有机肥比例对土壤过氧化氢酶活性的影响

2.3 有机肥部分替代无机肥对作物产量的影响

2012年到2015年小麦和玉米产量如表3所示。连续4年小麦产量差异性显著,其中CK产量明显低于施肥处理,2012年和2013年NPK、0.3 M、0.5 M 3个处理间小麦产量差异性显著性较低,2014年和2015年不同比例有机肥部分替代无机肥处理产量之间差异极显著($P < 0.01$)。2012~2015年小麦产量变化规律基本一致,CK处理小麦产量最低,0.5 M处理产量远高于CK,但明显低于NPK处理,0.3 M处理产量最高。2012年0.5 M与0.3 M处理产量较NPK处理分别高3.68%和10.28%;2013年0.5 M处理产量比NPK处理降低1.26%,0.3 M产量比NPK提高2.17%;2014年0.5 M产量比NPK处理降低1.09%,0.3 M产量比NPK处理提高7.39%;2015年0.5 M处理产量比NPK处理降低3.95%,0.3 M产量比NPK处理提高4.54%;小麦4年总产量0.5 M处理比NPK处理降低0.94%,0.3 M产量比NPK处理提高5.95%。

连续4年玉米产量差异性显著,CK产量同样最低。2012年和2013年0.3 M处理产量最高,2014年和2015年NPK处理产量最高,0.5 M

处理产量稍高于 0.3 M 处理。4 年玉米总产量 NPK > 0.3 M > 0.5 M > CK, 0.3 M 处理产量比 NPK 处理降低 1.27%, 0.5 M 处理产量比 NPK 处理降低 2.00%。

表 3 不同比例有机肥替代无机肥对作物产量的影响 (kg/hm²)

处理		2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	合计
小麦	CK	3 681.84 ± 160.57A	5 346.56 ± 118.02A	6 341.65 ± 318.45A	5 699.28 ± 61.93A	21 069.33
	NPK	7 224.72 ± 369.17B	8 611.99 ± 148.54B	10 301.77 ± 271.88B	9 661.17 ± 146.14C	35 799.58
	0.3M	7 967.32 ± 313.49B	8 799.18 ± 118.97B	11 062.58 ± 305.16C	10 099.32 ± 233.23D	37 928.39
	0.5M	7 490.41 ± 16.67B	8 503.44 ± 255.98B	10 189.01 ± 80.71B	9 279.28 ± 26.51B	35 462.13
玉米	CK	8 013.41 ± 728.76a	6 297.80 ± 106.92a	8 176.70 ± 166.99a	5 807.34 ± 276.94a	28 295.26
	NPK	9 622.86 ± 90.66b	9 121.49 ± 237.05bc	10 046.07 ± 105.85b	9 393.04 ± 608.99c	38 183.46
	0.3M	10 119.40 ± 254.49b	9 430.26 ± 233.57c	9 743.22 ± 198.89b	8 406.41 ± 259.29b	37 699.29
	0.5M	9 824.89 ± 675.49b	8 956.52 ± 280.56b	9 755.79 ± 220.32b	8 883.73 ± 310.78bc	37 420.93

注：同列数据后不同大写字母表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著，不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

2.4 土壤养分、酶活及小麦产量之间的相关关系

选取 2015 年 TN、AP、AK、pH 值、有机质和小麦产量，脲酶选拔节期酶活，蔗糖酶选择成熟期酶活，过氧化氢酶选择灌浆期酶活进行相关性分析，结果见表 4。

如表 4 所示，小麦产量与 TN、AP、AK、SOM、蔗糖酶极显著正相关，与 pH 值和过氧化氢酶极显著负相关，且 SOM 与 TN、AP、AK、蔗糖酶及小麦产量极显著正相关。

表 4 土壤养分、酶活及小麦产量之间的相关关系 (n = 12)

	TN	AP	AK	pH 值	SOM	脲酶	蔗糖酶	过氧化氢酶	产量
TN	1	0.806 **	0.854 **	-0.514	0.790 **	0.161	0.832 **	-0.715 **	0.791 **
AP		1	0.973 **	-0.807 **	0.886 **	0.208	0.987 **	-0.755 **	0.938 **
AK			1	-0.671 *	0.923 **	0.050	0.949 **	-0.643 *	0.863 **
pH 值				1	-0.529	-0.424	-0.823 **	0.762 **	-0.834 **
SOM					1	0.173	0.863 **	-0.637 *	0.788 **
脲酶						1	0.209	-0.618 *	0.391
蔗糖酶							1	-0.809 **	0.959 **
过氧化氢酶								1	-0.912 **
产量									1

注：* 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关，** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

3 讨论

3.1 土壤养分

有机肥对土壤养分影响的研究较多，大量的研究表明，有机肥可以增加土壤中有机质含量，使土壤形成良好的团聚体结构，提高土壤养分，从而增强土壤保肥供肥能力^[16]。

本研究 4 年的试验结果显示，2013 年和 2014 年 NPK 处理全氮含量最高。到 2015 年小麦收获后，有机肥部分替代无机肥处理 (0.3 M、0.5 M) 的全氮含量已经超过 NPK 处理。前人研究也证明有机肥施用显著促进了土壤氮素的积累^[8,11,17-19]。此外，0.3 M 和 0.5 M 处理全氮、有效磷、速效钾的含量显著高于 NPK 处理，这说明有机肥替代适当比例的无机

肥会提高土壤肥力。Jun 等^[20] 研究结果也证明，土壤中有有效磷、速效钾含量与配施有机肥的量呈正比。

本研究结果显示，有机肥使用量越高，土壤中有机质含量越高；施用无机肥处理都使土壤 pH 值不同程度降低，但配施有机肥能够减弱土壤的酸化。Guo 等^[21] 研究表明，土壤有机质随着配施肥料中有机肥百分比增加而增加，这与本研究一致。李静等^[22] 研究也证明，使用有机肥和无机肥都能使土壤 pH 值降低，但其有机肥 + 无机肥处理的 pH 值比纯无机肥处理要低，这与本研究不同，究其原因，可能是土壤或气候环境不同所致。因此，有机肥可以提高土壤中有机质的含量，并延缓土壤的酸化。

3.2 有机肥部分替代无机肥对土壤酶活性的影响

大量研究表明，施用有机肥可以提高土壤中相

关酶的活性^[23]。本研究显示,脲酶活性受尿素使用量影响较大。其原因可能是尿素的大量存在使分解尿素的微生物大量繁殖,从而使土壤中脲酶的酶活性升高。而蔗糖酶活性随着有机肥比例增大而增强,说明蔗糖酶活性与有机肥密切相关,邱珊莲等^[24]也得出相似结论。本研究中除CK处理外,0.5 M处理的过氧化氢酶活性最高,说明有机肥能够提高过氧化氢酶活性,这与鲁耀雄等^[25]研究结果相似,但本研究中CK处理过氧化氢酶最高,可能与本试验是在旱地棕壤环境下进行有关。

3.3 有机肥部分替代无机肥对作物产量的影响

本研究中,采取有机肥部分替代无机肥的施肥方式,降低了无机肥使用量,但小麦产量却没有大幅度降低。有机肥替代30%无机肥时,2012年到2015年连续4年0.3 M处理的小麦产量分别比NPK处理高10.28%、2.17%、7.39%、4.54%,小麦4年总产量比全量无机肥处理高5.95%;有机肥替代50%无机肥时,2012年0.5 M处理的小麦产量比NPK处理高3.68%,2013年到2015年3年0.5 M处理的小麦产量都比NPK处理分别低1.26%、1.09%、3.95%,小麦4年总产量仅比全量无机肥处理低0.94%。这与鲁耀雄等^[25]水稻试验结果类似。

而玉米季时,2012年到2013年0.3 M处理的玉米产量比NPK处理分别高5.16%和3.39%,2014年到2015年0.3 M处理的玉米产量比NPK处理分别低3.01%和10.50%。连续4年玉米总产量0.3 M处理的产量较NPK处理降低1.27%。2012年0.5 M处理的玉米产量比NPK处理高2.10%,2013年到2015年0.5 M处理的玉米产量比NPK处理分别低1.81%、2.89%、5.42%。连续4年玉米总产量0.5 M处理比NPK降低2.00%。这可能是由于玉米是喜大肥大水的作物,对土壤中N、P、K的需求量较高。

综上所述,有机肥替代30%无机肥对小麦有较好的增产作用,对玉米产量的负面影响也很小。有机肥替代50%无机肥虽然对小麦无增产作用,但能较好的维持小麦产量,50%替代化肥对玉米影响较大,玉米产量降低明显,所以不适合在玉米季采用50%替代化肥的施肥方式。以上二者相比,有机肥替代30%无机肥的施肥方式更适于目前的农业生产。

3.4 土壤养分、酶活及小麦产量之间的相关性分析

根据土壤养分、酶活及小麦产量之间的相关性分析结果,小麦产量与TN、AP、AK、SOM、蔗糖

酶极显著正相关,与pH值和过氧化氢酶极显著负相关。且SOM与TN、AP、AK、蔗糖酶和小麦产量极显著正相关。说明不同比例有机肥替代无机肥主要是通过有机肥中SOM和微生物对土壤中N、P、K和酶活性产生影响,并最终影响小麦产量。同时也解释了有机肥替代处理施入的N、P、K量要少于单施无机肥处理(NPK),但最终土壤中有有机肥替代无机肥处理的N、P、K量要高于NPK处理。

4 结论

不同比例有机肥替代无机肥对土壤中全氮、有效磷、速效钾和有机质影响显著,且有机肥比例越高,全氮、有效磷、速效钾和有机质含量越高。有机肥对土壤pH值影响显著,施肥处理中有机肥比例越高,土壤pH值就越高。不同比例有机肥替代无机肥对土壤酶活性影响显著。脲酶活性与无机肥使用量呈正比,有机肥比例越大,脲酶活性越低;蔗糖酶与有机肥成正比,有机肥比例越大,蔗糖酶活性越高;过氧化氢酶活性受施肥影响明显,不施肥处理(CK)活性最高,施肥处理中有机肥比例越大,过氧化氢酶活性越高。不同比例有机肥替代无机肥对小麦产量的影响极显著。有机肥替代30%无机肥小麦产量最高,有机肥替代50%无机肥后,小麦产量略低于单施无机肥处理,但土壤N、P、K水平最高。

综上所述,有机肥替代部分无机肥既能保证作物产量,又能在一定程度上提高土壤肥力,本研究表明,有机肥替代30%无机肥能够得到较高的产量,有机肥替代50%无机肥更能保持土壤肥力,但不一定是最优替代比例。若要得到既能满足较高的作物产量,又要保持较高的土壤肥力的有机肥与无机肥替代比例,则需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 杨慧,刘立晶,刘忠军,等.我国农田化肥施用现状分析及建议[J].农机化研究,2014,(9):260-264.
- [2] 刘钦普.中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J].中国农业科学,2014,47(18):3596-3605.
- [3] 张智峰,张卫峰.我国化肥施用现状及趋势[J].磷肥与复肥,2008,23(6):9-16.
- [4] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review [J]. Geoderma, 2005, 124 (1-2): 3-22.
- [5] Kaiser M, Ellerbrock R H. Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a

- long-term field experiment [J]. *Geoderma*, 2005, (127): 196–206.
- [6] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (5): 1153–1160.
- [7] 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.
- [8] Tong Y, Ove E, Lu D, et al. Effect of organic manure and chemical fertilizer on nitrogen uptake and nitrate leaching in a Eum-orthic anthrosols profile [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, (48): 225–229.
- [9] 邹原东, 范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29 (3): 12–16.
- [10] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35 (4): 403–409.
- [11] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 施用有机肥对土壤肥力的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (5): 1057–1064.
- [12] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42 (8): 2809–2819.
- [13] 刘杏兰, 高宗, 刘存, 等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究 [J]. *土壤学报*, 1996, 33 (2): 138–147.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 关松荫. 土壤酶及研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] 邹原东, 范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29 (3): 12–16.
- [17] 全少伟, 时连辉, 刘登民, 等. 不同有机堆肥对土壤性状及微生物生物量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (1): 110–117.
- [18] 邵兴芳, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (2): 326–335.
- [19] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期有机无机肥配施增强黄壤性水稻土有机氮的物理保护作用 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6): 1481–1486.
- [20] Jun Z, Tian N, Jing L, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, (99): 1–12.
- [21] Guo L Y, Wu G L, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, (156): 140–147.
- [22] 李静, 李志阳, 陈秀龙, 等. 不同施肥处理对木薯园土壤养分、酶活性及木薯生长的影响 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30 (36): 216–221.
- [23] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34 (21): 6137–6146.
- [24] 邱珊莲, 刘丽花, 陈济琛, 等. 长期不同施肥对黄泥田土壤酶活性和微生物的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (4): 30–34.
- [25] 鲁耀雄, 崔新卫, 范海珊, 等. 有机无机肥配施对湖南省晚稻生长、产量及土壤生物学特性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (5): 50–55.

Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the north China plain

XING Peng-fei^{1,2}, GAO Sheng-chao², MA Ming-chao², ZHOU Xiao-lin³, ZHAO Tong-kai³, SUN Jun-de^{1*}, SHEN De-long^{2*} (1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou Shandong 253015)

Abstract: In this article effects of different proportions of manure and chemical fertilizer on soil nutrition, enzyme activity and crop yield were studied in a four-year experiment. The results indicated that the treatments 0.3M (70% chemical fertilizer + 3 000 kg/hm² manure) and 0.5M (50% chemical fertilizer + 6 000 kg/hm² manure) had a higher level of total N, available P and available K than NPK treatment (only chemical fertilizer), and in 0.5M treatment was higher than those of 0.3M treatment ($P < 0.05$), which indicated that higher proportion of organic manure lead to higher soil nutrient. The order of soil urease activity was NPK > 0.3 M > 0.5 M > CK. For soil invertase activity and catalase activity the order was 0.5 M > 0.3 M > NPK. The total wheat yield of 0.3M treatment was 5.95% higher than that of NPK treatment, but that of 0.5M treatment was 0.94% lower than that of NPK treatment ($P < 0.01$). The total maize yield of 0.3M treatment was 1.27% lower than that of NPK treatment, while that of 0.5M treatment was 2.00% lower than that of NPK treatment ($P < 0.05$). These results confirmed that manure supplement 30% chemical fertilizer had a high yield in a low chemical fertilizer level, manure supplement 50% chemical fertilizer effectively conserved soil fertility.

Key words: manure supplement chemical fertilizer; soil nutrient; soil enzyme activity; crop yield