植物营养与肥料学报 2014,20(3):525-533
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0302

有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响

宋震震[1], 李絮花[1*], 李 娟[2], 林治安[2], 赵秉强[2]
(1 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018;
2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要: 本文以中国农业科学院山东禹城长期定位施肥试验为平台,研究了长期施用有机肥和化肥26年后对土壤活性氮库不同组分[颗粒有机氮(POM-N)、可溶性有机氮(DON)、微生物量氮(SMBN)及轻组有机氮(LFOM-N)]及土壤酶活性的影响。结果表明,与不施肥相比,长期施肥显著提高了土壤全氮、颗粒有机氮、可溶性有机氮、微生物量氮以及轻组有机氮的含量,长期施有机肥效果好于化肥,施用高量有机肥效果好于施用常量有机肥。常量施用量下,50%有机肥和50%化肥配施处理其土壤全氮和活性有机氮库各组分含量与高量化肥处理的相当。长期施化肥处理土壤全氮及活性有机氮库各组分含量随施肥量的增加而显著增高。POM-N对土壤全氮的贡献率最高,且明显受施肥方式的影响,LFOM-N对土壤全氮的贡献率不随施肥方式的改变而变化。长期施肥处理土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性显著增加,它们之间及与土壤全氮、速效磷及有机碳含量间呈现显著或极显著相关性,脲酶活性与土壤各活性氮组分间也存在显著或极显著相关性;但长期施肥后土壤过氧化氢酶的活性低于不施肥处理。

关键词: 长期施肥; 有机肥; 化肥; 土壤活性有机氮组分; 土壤酶活性
中图分类号: S153.6; S154.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)03-0525-09

Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil

SONG Zhen-zhen[1], LI Xu-hua[1*], LI Juan[2], LIN Zhi-an[2], ZHAO Bing-qiang[2]
(*1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 10081, China*)

Abstract: In this paper, the effects of long-term application of organic fertilizer and chemical fertilizer on soil labile nitrogen fractions and some kinds of soil enzyme activities (urease, catalase, alkaline phosphatase and sucrase) were studied based on a 26-year long-term field experiment in Chinese Academy of Agricultural Sciences Research Station in Yucheng City, Shandong province, China. The results show that, compared with CK, long term fertilization significantly increases soil total nitrogen, particle organic nitrogen (POM-N), dissolved organic nitrogen (DON), microbial biomass nitrogen (MBN) and light fraction organic nitrogen (LFON) contents. Treatments of applying organic fertilizers alone could improve soil total nitrogen and labile nitrogen fractions contents more effectively than the treatments of applying mineral fertilizers alone. The highest soil total nitrogen and labile nitrogen fractions contents appear in treatment of double organic fertilizer input, then is the treatment of common organic fertilizer input. The similar soil total nitrogen and labile nitrogen fraction contents are in treatment of

收稿日期: 2013-08-23 **接受日期:** 2014-03-05
基金项目: European Community Financial Participation for the Integrated Project NUE-CROPS(FP7-CP-IP222645); 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金202-5; 国家自然科学基金项目(31301843)资助。
作者简介: 宋震震(1989—), 女, 山东莱阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力监测及土壤微生物生态学方向的研究。
E-mail: szzfresh@163.com。 * 通信作者 E-mail: lixh@sdau.edu.cn

applying 50% organic fertilizer and 50% mineral fertilizer and the treatment of applied double amount of mineral fertilizers. The soil total nitrogen and labile nitrogen fraction contents are improved with the increased input levels of mineral fertilizers. POM-N is the main contributor of the soil total nitrogen, affected by fertilizer types and input levels. There is no difference in the contribution of LFOM-N to the soil total nitrogen among all the treatments, suggesting that fertilizer application types and input levels couldn't affect the contribution of LFOM-N to the soil total nitrogen. The activities of soil urease, alkaline phosphatase and sucrase are increased significantly by the application of fertilizers. The three enzyme activities are correlated significantly with each other, and also correlated with soil total nitrogen, available phosphorus and organic carbon, and closer correlation exists between the urease activity and soil labile nitrogen fractions contents. But the activity of soil catalase is decreased after long-term application of fertilizers.

Key words: long-term fertilization; organic fertilizer; mineral fertilizer; soil labile nitrogen fraction; soil enzyme activity

氮素不仅是地球上最丰富的化学元素之一,也是植物必需的营养元素之一。氮循环是农田生态系统最基本的生态过程,强烈地受到人为作用的影响和调控,对农田生态系统的稳定性、生产力及其环境效应具有关键性的影响作用。长期施肥能引起土壤氮库的改变,表现在能够稳定和增加土壤氮含量,提高土壤肥力[1],而施入农田的氮源可以迅速转化到土壤的活性库和稳定库[2]。土壤活性有机质组分一般包括颗粒有机质(particulate organic matter, POM),轻组有机质(light fraction organic matter, LFOM),微生物量(microbial biomass)以及可矿化有机质等,其转化速度较快,一般为几个周或几个月,能直接影响植物的养分供应[3]。这些活性组分中包含的氮组分,颗粒有机氮(Particulate organic matter nitrogen, POM-N),可溶性有机氮(Dissolved organic nitrogen, DON),轻组有机氮(Light fraction organic matter nitrogen, LFOM-N)以及微生物量氮(Soil microbial biomass nitrogen, SMBN)被认为是土壤活性氮库中的重要组成成分[3-4]。

土壤酶是由微生物、动植物活体分泌及动植物残骸的生物活性物质,具有生物化学催化活性,能参与土壤中许多重要的生物化学过程[5-6],在土壤养分循环以及植物生长所需养分供给过程中起到重要的作用[7]。土壤酶活性作为表征土壤性质的生物活性指标,已被广泛应用于评价土壤营养物质的循环转化情况,以及评价各种农业措施和肥料施用的效果[8]。

近年来,土壤活性氮库组分以及土壤酶活性成为国内外研究的热点,许多学者依据长期定位施肥试验对土壤酶活性与土壤肥力的关系[9-11]、一种或是两种组分土壤活性氮组分的变化进行了研究[3,12],如水稻土施入氮肥会减少或不影响土壤活性氮组分中的微生物量氮、颗粒态有机氮以及轻组有机氮的含量,但活性氮组分含量随着磷、钾肥和水稻秸秆的施入的增加有所增加[3]。小麦—玉米轮作体系中,长期有机肥与化肥NPK配施下颗粒有机氮含量高于单施化肥各处理,而化肥处理中NPK均衡施用效果最好[12]。与不施肥相比,长期单施化肥(N、P、K)或有机肥使稻田土壤活性有机氮含量的提高幅度分别为3.3%~27.1%和17.9%~105.8%,且土壤活性氮含量随有机肥施用量的提高而增加[13]。但是,迄今为止,长期施肥,特别是长期施有机肥与化肥条件下潮土活性氮库各不同组分之间的差异及其与土壤各养分之间的变化关系的研究未见报道。本研究以中国农业科学院山东禹城长期定位施肥试验为平台,探究了经过26年的长期施用有机肥和化肥土壤的不同活性氮库组分以及土壤酶活性的变化,以揭示土壤中生物化学环境的变化,为黄淮海平原潮土培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设在中国农业科学院德州盐碱土改良实验站禹城试验基地,位于华北平原中东部(东经116°34′,北纬36°50′),属暖温带半湿润季风气候。光热资源丰富,年平均气温13.4℃;≥0℃积温4951℃,≥10℃积温4441℃;年日照时数2640 h;雨热同季,多年平均降水量569.6 mm,最大1144.4 mm,最小248 mm,70%以上降雨集中在6~9月份;水面蒸发量2094.5 mm;无霜期206 d。试验地土壤类型为潮土,成土母质为黄河冲积物,耕层质地轻壤(粘粒含量21.4%;粉粒含量65.6%;砂粒含量

3.0%)。试验开始前,进行了两年匀地,于 1986 年 10 月冬小麦播种开始。试验前 0—20 cm 土壤有机质含量 3.933 g/kg、全氮 0.509 g/kg、有效氮 37.5 mg/kg、速效磷 17.2 mg/kg、速效钾 88 mg/kg。

1.2 试验设计

试验共设 6 个施肥处理,重复 4 次,共 24 个小区。分别为:1)不施肥处理(CK);2)常量化肥(SMF);3)常量有机肥(SMA);4)常量配施(1/2 MF+1/2MA);5)高量化肥(DMF);6)高量有机肥(DMA)。小区面积 4×7=28 m^2,每个小区之间用 0.8 m 水泥隔开。常量施肥下,单施化肥处理化肥用量为年施 N 375～450 kg/hm^2、P_2O_5 225～300 kg/hm^2、K_2O 150 kg/hm^2,有机肥施用量根据每年所选用肥料样品的分析结果,以全氮含量为标准折算。其中,常量施肥下 3 个处理的总氮量均相同,高量施肥处理的总氮量为常量施肥处理的 2 倍。因黄河冲积平原土壤一向被认为是富钾土壤,试验开始时化肥处理只施用氮、磷两种养分,自 1992 年起开始增加钾肥施用。氮、磷、钾化肥分别选用尿素、磷酸二铵、过磷酸钙和硫酸钾;有机肥选用当地农户或畜牧养殖场腐熟牛粪。

按照各处理全年施肥总量,冬小麦、夏玉米每季作物各 50%,磷肥、钾肥和有机肥在作物播种前做基肥一次性施入,氮肥 40% 做基肥,60% 做追肥。供试作物与种植方式选择本区域粮食作物种植最为普遍的冬小麦-夏玉米一年两熟制,肥、水管理等措施参考当地传统种植习惯,采用传统栽培模式。

1.3 样品采集

土壤样品于 2012 年 9 月底玉米收获后进行采集。每个小区均采集 0—20 cm 的耕层土壤。每个小区随机取 15 个点,混合后装好放入冰盒立即带回实验室,剔除可见的植物残根和石砾等杂物,然后分成两部分,一部分土样风干过 2 mm 筛,另一部分土样于 4℃冰箱保存。

1.4 项目测定方法及数据处理

土壤基本理化性状采用常量分析法测定[14]。有机质用重铬酸钾外加热法;全氮用半微量凯氏法;有效磷用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法;速效 K 用火焰光度法。

颗粒有机氮(POM-N)采用 5 g/L 六偏磷酸钠溶液分散[15],半微量凯氏法测定。

轻组有机氮(LFOM-N)采用密度为 1.78 g/cm^3 碘化钠进行提取,用 Multi N/C 2100 分析仪(Elementar Verio, Germany)测定[16]。

土壤微生物量氮采用氯仿熏蒸-K_2SO_4 浸提法[17],用 Multi 2011 N/C TOC 仪测定其含量。

可溶性有机氮(DON)用 0.5 mol/L 的 K_2SO_4 进行提取,用 Multi 2011 N/C TOC 仪测定氮含量[3]。

土壤脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定;碱性磷酸酶采用苯磷酸二钠法测定;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定;转化酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定[6]。

采用 Excel 2003 和 SAS 8.0 软件对数据进行统计分析,LSD 法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 有机肥和化肥长期施用对土壤全氮含量的影响

由图 1 可以看出,长期施肥 26 年后,不同施肥处理间 0—20 cm 土壤全氮含量差异显著,其含量变化顺序为高量有机肥处理>常量有机肥处理>常量配施处理>高量化肥处理>常量化肥处理>不施肥处理。与不施肥处理相比,施肥显著提高了土壤全氮含量,提高幅度为 26%～237%。常量施肥处理下,常量有机肥处理的全氮含量最高(1.8 g/kg),且与其他等氮量施肥处理之间差异显著,比常量化肥处理高 70.2%,比常量配施处理高 26.6%;高量施肥处理下,高量有机肥处理的全氮含量比高量化肥处理提高了 131%,为 2.8 g/kg。与常量施肥相比,高量施肥可提高土壤平均含氮量,但只有高量有机肥处理的土壤全氮含量高于常量施肥下三个处理的土壤全氮含量;而高量化肥处理的土壤全氮含量介于常量施肥处理下的常量化肥处理和常量配施处理之间,比常量配施处理土壤全氮含量低 49.9%。所有单施化肥处理中,高量施肥处理土壤全氮含量显著高于常量施肥处理。而在施有机肥的处理中,随着有机肥施入量的增加,其全氮含量也明显增加,即高量有机肥处理>常量有机肥处理>常量配施处理。

2.2 有机肥与化肥长期施用对土壤活性有机氮组分的影响

2.2.1 土壤活性有机氮组分含量　土壤颗粒有机质作为新鲜植物残体和腐殖化有机物转化之间短暂的库,是异养微生物细胞碳和能量的主要来源[18]。由表 1 可以看出,无论是常量施肥还是高量施肥处理,土壤颗粒有机氮含量都比不施肥处理高。与不施肥处理相比,常量有机肥处理、常量化肥处理和常量配施处理的土壤颗粒有机氮分别由 55.2 mg/kg 增

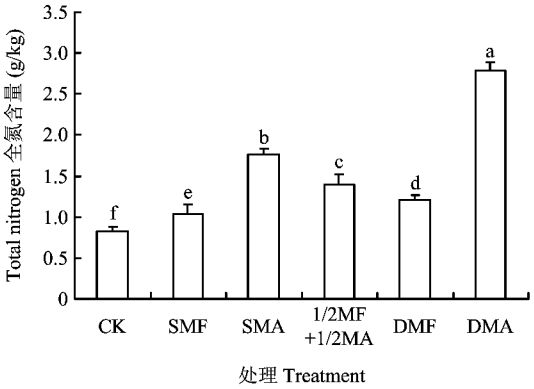

图1 有机肥与化肥长期施用对土壤全氮含量的影响

Fig. 1 Effects of long-term manure and mineral fertilizer application on soil total nitrogen content

[注(Note): CK—不施肥 No fertilizer; SMF—常量化肥处理 Standard mineral fertilizer input; SMA—常量有机肥处理 Standard manure input; 1/2MF + 1/2MA—常量配施 1/2 Mineral fertilizer applied with 1/2 Manure; DMF—高量化肥 Double mineral fertilizer input; DMA—高量有机肥 double manure input. 柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among treatments at 0.05 level.]

加至285.0、97.0和205.1 mg/kg; 高量有机肥和高量化肥处理分别增加至519.7和181.4 mg/kg。常量施肥处理下,土壤颗粒有机氮含量的变化顺序为常量有机肥处理 > 常量配施处理 > 常量化肥处理,且三个处理之间差异显著。高量施肥处理下,高量有机肥处理的颗粒有机氮含量比高量化肥处理提高了160.8%,两处理间差异显著。单施化肥处理中,高量施肥的土壤颗粒有机氮含量显著高于常量施肥处理。施有机肥处理中,土壤颗粒有机氮含量则是随着有机肥施入量的增加而增高。

可溶性有机氮(DON)是指土壤中可以溶于水或盐溶液的有机态氮,它可以直接或经过转化后为作物吸收[19]。由表1可以看出,经过26年长期施肥,土壤可溶性有机氮(DON)发生了显著的变化,其变化趋势与土壤全氮含量相似。与不施肥处理相比,无论是常量有机肥、化肥或是常量配施处理,土壤可溶性有机氮的含量都有明显的提高,提高幅度为51.8%~514.2%。在常量施肥的三个处理中,可溶性有机氮的含量变化顺序为常量有机肥处理 > 常量配施处理 > 常量化肥处理。在高量施肥处理下,高量有机肥处理的可溶性有机氮含量为51.2 mg/kg, 比高量化肥处理提高了160.8%,且两处理间差异显著。高量施肥处理与常量施肥相比,只有高量有机肥明显提高了土壤可溶性有机氮的含量。高量化肥处理可溶性有机氮含量高于常量化肥处理和常量配施处理,比常量配施处理可溶性有机氮含量高16.5%。在有机肥处理中,随着有机肥投入量的增加,土壤可溶性有机氮的含量也明显提高,单施化肥处理中,土壤可溶性有机氮含量随施肥量的增加而增加。

轻组有机质主要来自于植物的遗骸、微生物数量和微型动物残骸[3]。由表1可以看出,施肥显著提高了土壤轻组有机氮的含量。土壤轻组有机氮的变化趋势与全氮含量一致。施肥处理土壤轻组有机氮含量都比不施肥处理的高。常量有机肥处理和常量配施处理的土壤轻组有机氮含量分别比常量化肥处理增加66.3%、29.6%,且三者差异显著。高量施肥下,高量有机肥处理比高量化肥处理的土壤轻组有机氮含量增加了126.5%。在所有单施化肥的处理中,高量施肥处理的土壤轻组有机氮含量显著高于常量施肥处理。在施有机肥的处理中,土壤轻组有机氮含量则是随着有机肥施入量的增加而增高。

微生物生物量在土壤C和N循环过程中起着重要调节作用,受土壤管理措施的强烈影响[3]。由表1可以看出,在26年长期定位施肥下,土壤微生物量氮发生了明显的变化,其含量变化顺序为高量有机肥处理 > 常量有机肥处理 > 常量配施处理 > 高量化肥处理 > 常量化肥处理 > 不施肥处理,说明施有机肥与配施比单施化肥和不施肥显著提高了土壤微生物量氮的含量,且随着有机肥施入量的增加而增高。与不施肥处理相比,常量施肥处理及高量施肥处理的土壤微生物量氮含量有明显的增加,其变幅为33.7%~154.5%。在常量施肥处理下,土壤微生物量氮含量随着有机肥施入量的增加而增高,即常量有机肥处理 > 常量配施处理 > 常量化肥处理。在高量施肥处理下,高量有机肥处理的土壤微生物量氮含量为191.0 mg/kg,比高量化肥处理增加了79.3%。在单施化肥的处理中,高量施肥处理的土壤微生物量氮含量比常量施肥处理高6.2%。

2.2.2 土壤活性有机氮组分占土壤全氮比例 由表2可知,所有施肥处理中,土壤颗粒有机氮占土壤全氮百分比的变化顺序为高量有机肥处理 > 常量有机肥处理 > 常量配施处理 > 高量化肥处理 > 常量化肥处理 > 不施肥处理,其变化趋势与土壤颗粒有机氮相同。可溶性有机氮占土壤全氮的比例中,不施肥的处理最小,高量有机肥的处理最大。常量施肥处理下,常量有机肥处理的可溶性有机氮占全氮的

比例最大,为 2.0%,其次是有常量配施处理,最小的为常量化肥处理。在高量施肥处理下,高量有机肥处理的可溶性有机氮占全氮的比例大于高量化肥处理。在微生物量氮占土壤全氮的比例中,常量化肥处理最大,为 9.6%,而高量有机肥处理占比例最小,为 6.8%。

表 1　有机肥与化肥长期施用对土壤活性有机氮库组分含量(mg/kg)

Table 1　Contents of soil labile nitrogen fractions under the long-term manure and mineral fertilizer application

处理 Treatment	颗粒有机氮 POM - N	可溶性有机氮 DON	轻组有机氮 LFOM - N	微生物氮 MBN
CK	55.2 ±12.5 d	8.2 ±1.6 d	12.0 ±2.0 e	75.0 ±10.4 e
SMF	97.0 ±33.4 d	12.4 ±2.7 d	13.3 ±2.1 de	100.3 ±14.7 d
SMA	285.0 ±25.6 b	35.8 ±2.3 b	22.1 ±1.1 b	134.1 ±8.3 b
1/2MF +1/2MA	205.1 ±42.7 c	18.2 ±3.3 c	17.3 ±1.0 c	119.4 ±5.2 bc
DMF	181.4 ±7.90 c	21.2 ±5.6 c	15.8 ±1.9 cd	106.5 ±7.6 cd
DMA	519.7 ±30.0 a	51.2 ±5.8 a	35.8 ±2.9 a	191.0 ±9.0 a

注(Note):CK—不施肥 No fertilizer; SMF—常量化肥处理 Standard mineral fertilizer input; SMA—常量有机肥处理 Standard manure input; 1/2MF +1/2MA—常量配施 1/2 Mineral fertilizer applied with 1/2 Manure; DMF—高量化肥 Double mineral fertilizer input; DMA—高量有机肥 Double manure input. 不同字母表示不同施肥处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters mean significantly different among treatments at 5% level.

土壤微生物量氮占土壤全氮的比例随有机肥输入的增多而逐渐减小(表 2)。相同处理下,土壤活性氮组分占全氮的比例也有差异,对土壤全氮的贡献率最大的组分在施肥处理中是土壤颗粒有机氮,在不施肥处理中是土壤微生物量氮;贡献率其次为微生物量氮,而轻组有机氮及可溶性有机氮对土壤全氮的贡献率在土壤活性氮库中最低。

土壤全氮含量受施肥影响变化显著,不同活性有机氮组分对土壤全氮的贡献率不同,POM-N 对土壤全氮的贡献率受施肥方式的影响较大,轻组氮不同处理间几乎没有差异,说明轻组氮较为稳定,施肥主要通过增加土壤颗粒有机氮改变了土壤氮库库容。

表 2　土壤活性有机氮组分占全氮的比例(%)

Table 2　Percentages of soil labile organic nitrogen fractions to total nitrogen

处理 Treatment	颗粒有机氮/全氮 POM-N/TN	可溶性有机氮/全氮 DON/TN	轻组有机氮/全氮 LFOM-N/TN	微生物氮/全氮 MBN/TN
CK	6.6 ±1.3 c	1.0 ±0.2 b	1.5 ±0.2 a	8.8 ±1.2 ab
SMF	9.1 ±2.7 c	1.2 ±0.1 b	1.3 ±0.1 a	9.6 ±1.3 a
SMA	16.2 ±2.0 ab	2.0 ±0.1 a	1.3 ±0.1 a	7.6 ±0.3 bc
1/2MF +1/2MA	14.6 ±2.6 b	1.3 ±0.2 b	1.2 ±0.2 a	8.6 ±0.7 ab
DMF	15.0 ±0.6 b	1.7 ±0.4 a	1.3 ±0.2 a	8.8 ±0.9 ab
DMA	18.6 ±1.0 a	2.0 ±0.4 a	1.3 ±0.1 a	6.8 ±0.3 c

注(Note):CK—不施肥 No fertilizer; SMF—常量化肥处理 Standard mineral fertilizer input; SMA—常量有机肥处理 Standard manure input; 1/2MF +1/2MA—常量配施 1/2 Mineral fertilizer applied with 1/2 Manure; DMF—高量化肥 Double mineral fertilizer input; DMA—高量有机肥 Double manure input. 不同小写字母表示不同施肥处理间差异达到 5% 显著水平 Different lowercase letters at the different treatments mean significant at 5% level.

2.3 有机肥和化肥长期施用对土壤酶活性的影响

2.3.1 土壤酶活性 脲酶与土壤供氮能力有密切关系,能够表征土壤氮素的供应程度[10]。由图2可以看出,各施肥处理土壤脲酶活性均高于不施肥处理,以高量有机肥处理的土壤脲酶活性最高,其次是常量有机肥处理。在单施化肥的处理中,高量施肥处理土壤脲酶活性明显高于常量施肥处理。

过氧化氢酶是一种重要氧化还原酶,参与土壤中物质和能量转化,在一定程度上可以表征土壤生物氧化过程的强弱。由图2可以看出,经过26年的长期定位施肥,土壤中过氧化氢酶活性发生了明显的变化,其活性变化顺序为不施肥处理、常量化肥处理、高量化肥处理、常量有机肥处理、常量配施处理、高量有机肥处理。长期定位施肥降低了土壤中过氧化氢酶的活性。不施肥处理土壤中过氧化氢酶活性最高,常量有机肥处理最低。

土壤蔗糖酶活性大小不仅反映土壤有机碳积累与分解转化的规律,也是评价土壤熟化程度和土壤肥力水平的重要指标[10]。由图2可以看出,施肥处理土壤蔗糖酶均高于不施肥处理,高量有机肥处理蔗糖酶活性最高,之后依次是常量有机肥处理、常量配施处理、常量化肥处理。在同一施肥水平下,有机肥投入量越多,其蔗糖酶的活性越高。

磷酸酶可加速有机磷的脱磷速度,磷酸酶活性对土壤磷素的有效性具有重要作用[11]。由图2可以看出,不施肥处理碱性磷酸酶活性最低,高量施肥水平下有机肥处理的碱性磷酸酶活性最高。各处理之间碱性磷酸酶活性的变化幅度很小,且随着有机肥投入量的增多而呈升高的趋势。

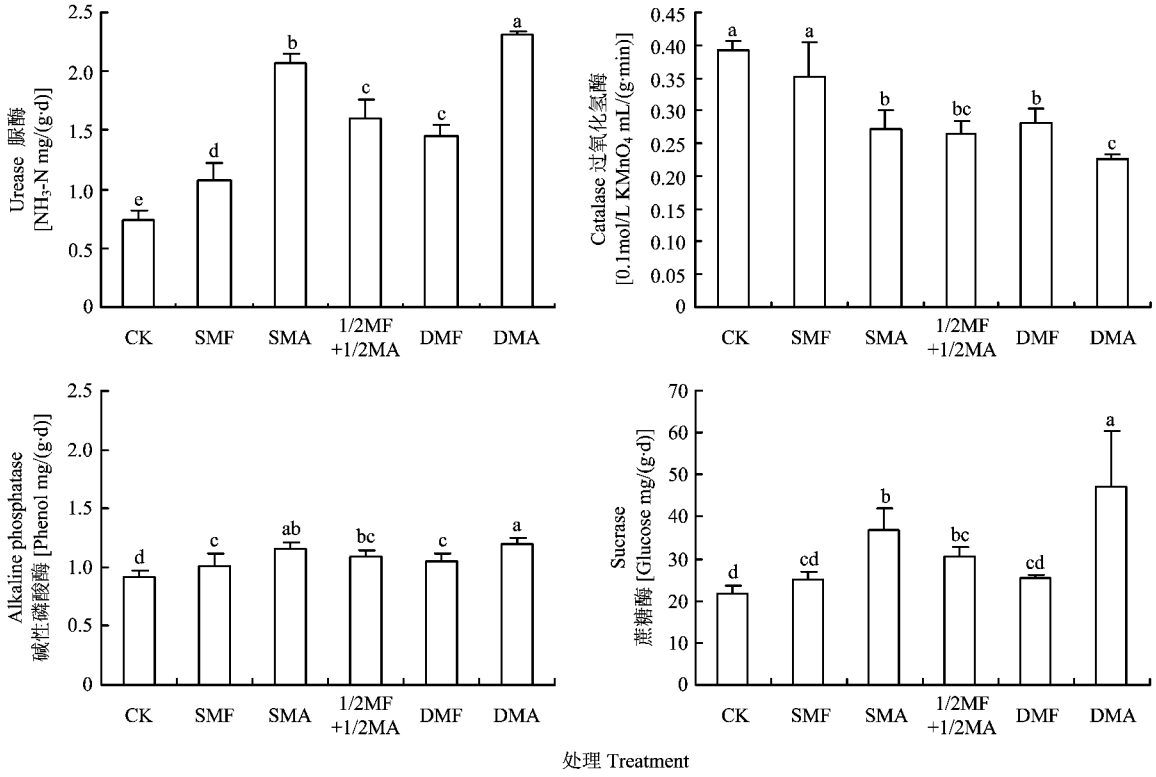

图2 有机肥与化肥长期施用对土壤酶活性的影响

Fig.2 Effects of long-term manure and mineral fertilizer application on soil enzymatic activities

[注(Note):CK—不施肥 No fertilizer; SMF—常量化肥处理 Standard mineral fertilizer input; SMA—常量有机肥处理 Standard manure input; 1/2MF+1/2MA—常量配施1/2 Mineral fertilizer applied with 1/2 Manure; DMF—高量化肥 Double mineral fertilizer input; DMA—高量有机肥 Double manure input. 柱上不同字母表示处理间在0.05水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among treatments at 0.05 level.]

2.3.2 土壤酶活性与土壤肥力相关性分析 由表3可以看出,脲酶与土壤有效磷、有机碳之间呈现出极显著或显著相关性。而碱性磷酸酶与全氮、有效磷、有机碳之间呈显著相关。过氧化氢酶与全氮、

有效磷呈显著负相关。蔗糖酶与全氮、有效磷、有机碳之间均呈极显著相关。而土壤酶之间脲酶与碱性磷酸酶、蔗糖酶均呈极显著相关。过氧化氢酶则与其他三种酶呈显著或极显著负相关。由于本试验样本容量小，对于土壤酶活性和土壤养分之间的相关性有待于进一步的研究证实。

2.3.3 土壤脲酶与土壤各活性氮库组分之间的相关性分析　由表 4 可以看出，脲酶与土壤颗粒有机氮，可溶性有机氮呈现极显著的相关性，而与微生物量氮、轻组有机氮呈现出显著相关性，显示出脲酶与土壤各活性氮库组分之间的密切相关性。

表 3　长期定位施肥下土壤酶活性和土壤养分之间的相关性

Table 3　Correlative coefficients between soil enzyme activities and soil nutrients under long-term fertilization

项目 Item	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Sucrase	全氮 Total N	有效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	有机碳 Organic C
脲酶 Urease	0.99**	-0.94**	0.94**	0.91*	0.94**	0.73	0.91*
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	1.00	-0.94**	0.91*	0.88*	0.91*	0.69	0.87*
过氧化氢酶 Catalase	-0.94**	1.00	-0.83*	-0.83*	-0.85*	-0.69	-0.81
蔗糖酶 Sucrase	0.91*	-0.83*	1.00	0.99**	0.99**	0.83*	0.99**

注(Note)：* 表示显著相关 Mean significant at 5% level；** 表示极显著相关 Mean significant at 1% level.

表 4　长期定位施肥下土壤脲酶和土壤活性氮组分之间的相关性

Table 4　Correlative coefficients between urease and soil laible nitrogen fractions under long-term fertilization

指标 Index	颗粒有机氮 POM-N	可溶性有氮 DON	微生物量氮 MBN	轻组有机氮 LFOM-N
脲酶 Urease	0.93**	0.93**	0.91*	0.89*

注(Note)：* 表示显著相关 Mean significant at 5% level；** 表示极显著相关 Mean significant at 1% level.

3　讨论

3.1　有机肥和化肥长期施用对土壤全氮及活性氮组分的影响

Gong 等[20]和 Yang 等[21]通过田间长期定位施肥试验证实，单施化肥、有机肥或是有机无机配施均能显著提高土壤全氮量，且随着有机肥投入量的增加，土壤全氮呈增加的趋势。本研究结果与前人研究结果一致。有机肥中包含大量的惰性有机物质，这是导致施有机肥土壤全氮增加的原因[22]。施入化肥刺激了土壤微生物，导致其分解有机质的速度加快，能给作物提供更多有效的养分，促进其生长的同时，有更多的枯枝落叶返回到土壤中，从而增加了土壤中全氮的含量[20]。

在本研究结果中，土壤颗粒有机氮、可溶性有机氮、轻组有机氮以及微生物量氮均表现出了与土壤全氮一致的趋势，即随着有机肥施入量的增加，土壤活性有机氮组分含量增加，这与 Yan 等[3]在水稻土上的结果一致。龚伟等[12]通过田间长期定位试验研究表明，在黄褐土上，施用有机肥以及有机无机配施的处理，其土壤颗粒有机氮的含量均高于单施有机肥的处理，这也与本研究结果一致。施入化肥后，加速了含有高氮的植物根茬的分解，而颗粒有机氮与轻组有机氮最初的来源均为植物残体，所以导致了土壤中颗粒有机氮及轻组有机氮的增加[22]。而有机肥中或许本身含有一些与活性氮组分相似的成分，也可能有机肥中含有大量微生物，微生物分解有机物质速度增加，从而引起了土壤活性氮组分的增加。本研究结果表明，无论是施肥量(高量施肥和常量施肥)不同，还是肥料种类(有机肥 100% 替代化肥和有机肥一半替代化肥)不同，有机肥较化肥或不施肥处理土壤微生物量氮有较大幅度的提高，究其原因，是由于施肥直接增加根系生物量及根系分泌物，促进了微生物的生长，有机肥不但增加了土壤养分，直接为微生物提供了充足的碳源，还通过同化作用将较多的氮素转移到微生物体内被暂时固定，减少了氮素的损失[23]。

3.2　有机肥和化肥长期施用对土壤酶活性的影响

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中起着重要的催化作用,其活性可以反映土壤中各种生物化学反应的强度和方向[24]。本研究表明,长期施肥对土壤酶活性影响很大。对于土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶总的趋势是施肥高于不施肥。同一施肥水平下,有机肥施入量越多,酶的活性越高,这与王俊华等[25]和李娟等[26]的研究结果基本一致。施肥之所以能提高土壤酶活性是因为施肥可促进作物根系代谢,使根系分泌物增多,微生物繁殖加快,从而有利于提高土壤酶活性[27]。施有机肥对提高土壤酶活性效果更佳,这是因为有机肥本身含有大量的酶类,而且有机肥可以为产酶微生物提供丰富的营养源,促进了土壤的生化过程;另外随营养元素的施入,促进了作物生长,从而增加了根系分泌物,提高了土壤酶类活性[28]。但是,长期施肥却降低了土壤过氧化氢酶的活性,不施肥处理的过氧化氢酶活性最高,高量施肥水平下单施有机肥处理最低。这与孙瑞莲等[11]报道类似,但与高瑞和吕家珑[27]的报道相反。这可能与土壤类型、气候条件、种植制度等的不同有关。

4 结论

1)无论是常量施肥处理还是高量施肥处理,长期施肥显著提高了土壤全氮、颗粒有机氮、可溶性有机氮、微生物量氮以及轻组有机氮的含量,长期施有机肥比长期施化肥更能提高土壤各活性氮库组分含量。

2)颗粒有机氮对土壤全氮的贡献率最高,且随施肥方式的改变而改变,与有机肥的施用量呈正相关,轻组有机氮对土壤全氮的贡献率不随施肥方式的改变而改变。

3)长期施肥提高了土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶的活性,降低了过氧化氢酶的活性;土壤脲酶、转化酶和碱性磷酸酶之间及与土壤全氮、速效磷及有机碳呈显著或极显著相关,脲酶与土壤各活性氮组分间存在显著或极显著相关性。

参 考 文 献:

[1] 李晓波,韩晓增,王风. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展[J]. 土壤通报,2007,38(2):384-388.
Li X B, Han X Z, Wang F. Review of soil carbon and nitrogen cycling under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 384-388.

[2] Polglase P J, Comerford N B, Jokela E J. Mineralization of nitrogen and phosphorus from soil organic matter in southern pine plantations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 921-927.

[3] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44: 93-101.

[4] 仇少君. 华北平原高累积硝态氮土壤碳氮交互作用机制研究[J]. 北京:中国农业大学博士论文,2010.
Qiu S J. Interaction of carbon and nitrogen in soil with high accumulated nitrate on the North China Plain[J]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2010.

[5] Burns R G. Soil enzymes[M]. London: Academic Press, 1978. 1-33.

[6] 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 research methods [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.

[7] 叶协锋,杨超,李正,等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):445-454.
Ye X F, Yang C, Li Z *et al*. Effects of green manure on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 445-454.

[8] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京:农业出版社,1986. 249-251.
Xu G H, Zheng H Y. Manual of soil microbiological analytical methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 249-251

[9] 王俊华,尹睿,张华勇,等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J]. 生态环境,2007,16(1):191-196.
Wang J H, Yin R, Zhang H Y *et al*. Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 191-196.

[10] 王灿,王德建,孙瑞娟,等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关[J]. 生态环境,2008,17(2):688-692.
Wang C, Wang D J, Sun R J *et al*. The relationship between soil enzyme activities and soil nutrients in long-term fertilizer experiments[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 688-692.

[11] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响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 soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 406-410.

[12] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等. 长期施肥对小麦玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(11) 2375-2381.
Gong W, Yan X Y, Cai Z C, *et al*. Effects of long-term fertilization on soil particulate carbon and nitrogen in a wheat-maize cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2375-2381.

[13] 黄威，陈安磊，王卫,等. 长期施肥对稻田土壤活性有机碳和氮的影响[J]. 农业环境科学学报，2012，31(9)：1854-1861.
Huang W, Chen A L, Wang W *et al*. Effect of long-term fertilization on active organic carbon and nitrogen in paddy soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(9): 1854-1861.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000.
Bao S D. Methods for soil agricultural and chemical analysis [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.

[15] Cambardella M R, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 777-778.

[16] Janzen H H, Campbel C A, Brandt S A *et al*. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56: 1799-1806.

[17] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.

[18] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85: 221-268.

[19] 周建斌，陈竹君，郑险峰. 土壤可溶性有机氮及其在氮素供应及转化中的作用[J]. 土壤通报,2005, 36 (2): 244-248.
Zhou J B, Chen Z J, Zhen X F. Soluble organic nitrogen in soil and its roles in the supply and transformation of N[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36 (2): 244-248.

[20] Gong W, Yan X Y , Wang J Y *et al*. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China [J]. Geoderma, 2009, 149: 318-324.

[21] Yang X Y , Ren W D, Sun B H, Zhang S L. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. Geoderma, 2012, 177-178: 49-56.

[22] Drinkwater L E, Wagoner M W, Sarrantonio M. Legume- based systems have reduced losses of nitrogen and carbon[J]. Nature, 1998, 396: 262-265.

[23] 井大炜,邢尚军. 鸡粪与化肥不同配比对杨树苗根际土壤酶和微生物量碳、氮变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报. 2013,19(2): 455-461.
Jing D W, Xing S J. Effects of chicken manure mixed with inorganic fertilizer on soil enzyme activities, microbial biomass C and N at rhizosphere of poplar seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 455-461.

[24] 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 farmlands: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 347-351.

[25] 王俊华,尹睿,张华勇，等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J]. 生态环境，2007，16(1)：191-196.
Wang J H, Yin R, Zhang H Y *et al*. Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 191-196.

[26] 李娟，赵秉强，李秀英，SO H B. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J]. 植物营养肥料学报，2009，15(5)：1093-1099.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, So H B. Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1093-1099.

[27] 高瑞,吕家珑. 长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究[J]. 中国生态农业学报，2005，13 (1)：143-145.
Gao R, Lü J L. Study on the enzyme activities and fertility change of soils by a long-term located application of different fertilizers [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13 (1): 143-145.

[28] 秦韧，杨团结，刘树堂,等. 长期定位施肥对无石灰性潮土酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报，2007，15 (1)：33-36.
Qin R, Yang T J, Liu S T *et al*. Effects of a long-term located fertilization on enzyme activity of the non-calcareous fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15 (1): 33-36.