

长期有机培肥黑土有机碳、全氮及玉米产量稳定性的变化特征

张秀芝^{1,2}, 高洪军², 彭畅², 李强², 朱平^{2*}, 高强^{1*}

(1 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033)

摘要:【目的】探讨东北黑土区长期有机培肥对土壤有机碳、全氮含量及产量稳定性的影响, 为优化黑土培肥技术及玉米稳产高效提供指导。【方法】以 38 年长期定位试验为研究平台, 选择 6 个施肥处理: 不施肥 (CK), 氮磷钾配施 ($N\ 150\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 75\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 75\ kg/hm^2$, NPK), 常量有机肥 (有机肥 $30\ t/hm^2$, 折纯 $N\ 150\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 135\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 45\ kg/hm^2$, M_1), 常量有机肥配施氮磷钾肥 (M_1NPK), 高量有机肥 (有机肥 $60\ t/hm^2$, M_2), 高量有机肥配施氮磷钾肥 (M_2NPK)。测定耕层土壤有机碳、全氮含量及玉米籽粒产量。【结果】玉米籽粒产量以 M_2NPK 处理最高, 平均产量为 $9637\ kg/hm^2$, 其次是 M_2NPK 处理, 平均产量为 $9422\ kg/hm^2$, CK 处理产量最低, 平均产量为 $3551\ kg/hm^2$, 且显著低于其他各处理。前 10 年试验施用有机肥可显著提升土壤基础地力, 降低玉米籽粒产量对化肥的依赖, M_2 与 M_4 处理的籽粒产量与 NPK 处理均无显著差异。之后至 2017 年, 单施有机肥处理玉米产量较 NPK 处理平均提高 3.8%。拟合方程表明, 地力产量每增加 $1000\ kg/hm^2$, 肥料贡献率降低 9.2%~12.2%。在培肥 30 年后, 肥料对籽粒产量贡献率开始下降。有机无机配施处理下, 玉米产量变异系数较低, 平均为 19.3%, 产量可持续性指数 SYI 为 0.58, 达到稳定水平。土壤有机碳含量随施肥年限在不同施肥处理间差异逐步变大, 且在 10 年后出现显著差异, 增施有机肥后, 土壤有机碳显著增加, 以 M_2NPK 和 M_4 处理最高; 土壤全氮与土壤有机碳呈显著正相关 ($r = 0.826^{**}$), 土壤有机碳每升高 $1\ g/kg$, 土壤全氮含量增加 $0.086\ g/kg$ 。施用有机肥, 玉米籽粒产量与土壤有机碳、土壤全氮含量显著正相关, 表明长期有机培肥对实现玉米高产稳产具有重要贡献。【结论】在供试黑土条件下, 单施有机肥在一段时间内主要提高土壤有机碳含量, 有机碳达到一定水平后才可以提高产量。有机肥配合氮磷钾化肥可以快速有效提高土壤有机碳和全氮含量, 提高玉米产量。本试验条件下, 有机无机配合施用的土壤有机碳年增加量为 $0.35\sim0.47\ g/kg$, 全氮含量增加 46.3%~84.2%, 玉米产量稳定系数 (SYI = 0.58) 达到较高水平。土壤基础地力的提高可减少玉米产量对外源肥料的依赖, 地力产量每增加 $1000\ kg/hm^2$, 肥料贡献率降低 9.2%~12.2%。因此, 有机肥配施化肥是黑土区保证玉米稳产高产、不断提升土壤肥力、保障黑土资源可持续利用的重要措施。

关键词: 黑土; 肥料贡献率; 土壤有机碳; 全氮; 产量可持续指数

Variation trend of soil organic carbon, total nitrogen and the stability of maize yield in black soil under long-term organic fertilization

ZHANG Xiu-zhi^{1,2}, GAO Hong-jun², PENG Chang², LI Qiang², ZHU Ping^{2*}, GAO Qiang^{1*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2 Institute of Agricultural Resource and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: 【Objectives】 This study investigated the different influences of long-term organic, chemical fertilizers and their combined fertilization on soil organic carbon storage and yield stability in northeast black soil region, which would provide valuable reference for obtaining high and stable yield and culturing black soil fertility in Northeast China. 【Methods】 The surveyed long-term fertilization experiment was located

收稿日期: 2018-09-28 接受日期: 2019-04-12

基金项目: 国家重点研发项目 (2016YFD0800103, 2018YFD0800905, 2016YFE0112700-3)。

联系方式: 张秀芝 Tel: 0431-87063170, E-mail: zhangxiuzhi2006@163.com

* 通信作者 朱平 Tel: 0431-87063170, E-mail: zhuping1962@sohu.com; 高强 E-mail: gyt199962@163.com

Gongzhuling City of Jilin Province, started in 1980. The chosen treatments included no fertilizer control (CK), balanced chemical fertilization ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 150–75–75 kg/hm^2 , NPK), applying manure 30 t/hm^2 , i.e. N 150 kg/hm^2 , P_2O_5 135 kg/hm^2 and K_2O 45 kg/hm^2 (M_2), applying double amount of manure (M_4), chemical and manure combination M_2NPK and M_4NPK . The maize yield, soil organic carbon and total nitrogen contents were recorded annually. **【 Results 】** The highest maize grain yield was in M_4NPK treatment, with an average yield of 9637 kg/hm^2 , followed by M_2NPK , with an average yield of 9422 kg/hm^2 , and the lowest in CK treatment, with an average yield of 3551 kg/hm^2 , significantly lower than other treatments. For the first 10 years' consecutive organic fertilization, the soil basic fertility had been significantly improved, and the dependence of maize yield on fertilizer was reduced, the yields in M_2 and M_4 treatments were similar to that in NPK treatment. From then to 2017, the maize yield was annually increased by 3.8% on average in M_2 and M_4 treatments, compared with that in NPK. The fitting equation showed that the contribution rate of fertilizer would be decreased by 9.2% to 12.2% for every 1000 kg/hm^2 increase in base yield. By the practical monitoring, the contribution of fertilizer to yields stated to decrease after 30 years' organic fertilization. In the organic and inorganic combination treatments, the variation coefficient of maize yield was 19.3% in averaged, and the yield sustainability index SYI was as high as 0.58, which was ranking in high stability level. The difference of soil organic C content among the treatments gradually increased with fertilization years, and became significant since the 11th year. Soil organic carbon content increased significantly in treatments of M_4NPK and M_4 . The soil total nitrogen was significantly and positively correlated with soil organic carbon ($r = 0.826^{**}$). For every 1 g/kg of increase in soil organic carbon would bring an increase of 0.086 g/kg of total nitrogen. Grain yield was significantly and positively correlated with organic carbon and total N. **【 Conclusions 】** Under the experimental condition, pure organic fertilization mainly contributes to the improvement of soil organic carbon pool at the early stage, and would not increase the yield until the soil organic carbon arriving certain level. The combination of organic and chemical fertilizer could increase soil carbon and nitrogen pools rapidly, and achieve high and stable yield increase. With organic and chemical combination, the annual soil organic carbon increase is 0.35–0.47 g/kg, total nitrogen by 46.3%–84.2%, and maize yield stable index reaches high level (SYI = 0.58). Improving soil fertility can reduce the dependence of maize yield on exogenous fertilizers. The combination rate of fertilizer would be decreased by 9.2%–12.2% for every 1000 kg/hm^2 of increase in indigenous soil yield. Therefore, the combination of organic and chemical fertilizers should be maintained for keeping increase of soil fertility, which is the base of high and stable yield and sustainable productivity of black soil in Northeast China.

Key words: black soil; contribution rate of fertilizer; soil organic carbon; total nitrogen; sustainable yield index

我国东北黑土是世界上最肥沃的土壤之一，随着农业生产的发展及农民对产量的需求，黑土肥力逐步下降，有机质含量锐减，显著影响了土壤的供肥和保肥能力^[1]；同时，长期的以小型动力为主的机械耕作方式也破坏了土壤的物理属性，造成了耕层的“浅、实、薄”^[2]。近年来，国家对东北黑土地退化问题非常重视，2017年以来，中央一号文件中均提出要加大东北黑土地的保护力度。

土壤有机碳和全氮是土壤肥力最核心的指标，其中土壤有机碳是土壤养分转化的核心，其储量反映了土壤截留碳的能力，其含量的高低直接影响着土壤肥力的保持与提高。有机碳又是作物产量可持续发展的因素，有机碳库的减少是作物获得高

产的主要限制因子^[3-5]。土壤氮素是土壤肥力中最活跃的因素，土壤全氮包括所有形式的有机无机氮，能综合反映土壤氮素状况^[6]。土壤碳氮比可用于衡量土壤 C、N 营养平衡的状况，它的演变趋势对土壤碳氮循环有重要影响^[7]。为系统掌握土壤肥力演变特征，并建立土壤肥力定向培育技术，农业部在全国主要农区的 9 个土壤类型上建立了多个长期定位试验基地，基于长期定位试验具有时间上的长期性和气候上的代表性，在评价肥料效益及农田生态系统的可持续方面具有显著的代表性，国内外学者多以此为基础开展研究。对黑土^[8-9]、红壤^[10-11]、棕壤^[12-13]、灰漠土^[14]、褐土^[15-16]等的研究表明有机无机配施可显著提高土壤有机质、全量养分及速效养分含量，增

加土壤碳、氮储量,提升土壤基础地力,增加作物产量。本研究以吉林公主岭国家黑土肥力与肥效长期定位试验为研究平台,探讨长期有机无机培肥方式对土壤有机碳、全氮的影响,并系统评价不同培肥模式下玉米产量的稳定性和可持续性,为黑土肥力保育提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

国家黑土肥力与肥料效益长期监测基地位于吉林省公主岭市吉林省农业科学院试验地(E124°48'33.9", N43°30'23")。海拔 220 m,属于温带大陆性季风气候区,年平均气温 5.5℃,无霜期 125~140 d,有效积温 2600~3000℃,年降水量 450~650 mm,年蒸发量 1200~1600 mm,年日照时数 2500~2700 h。每年 12 月至翌年 3 月份为土壤冻结期,冻土层厚可达 1.5 m 左右,地下水埋深 14 m。试验始于 1980 年,土壤类型为发育于黄土母质上的中层黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物,地势平坦,地形呈漫岗波状起伏。耕层土壤有机质含量 28.1 g/kg,全氮 1.9 g/kg,碱解氮 114 mg/kg,全磷 0.61 g/kg,速效磷 11.8 mg/kg,全钾 18.4 g/kg,速效钾 158.3 mg/kg, pH 值 7.8。

1.2 试验设计

试验设置 6 个处理,分别为:CK(不施肥)、NPK(常量化肥)、M₂(常量有机肥)、M₂NPK(常量有机肥+常量化肥)、M₄(高量有机肥)、M₄NPK(高量有机肥+常量化肥)。大区试验,不设重复,每个试验区面积 100 m²。种植的主要作物是玉米,一年一熟制。玉米在整个生育期内不灌水,主要依靠自然降水。常量施肥区化肥处理为 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm²。化肥 N、P、K 分别由尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)、硫酸钾(K₂O 50%)提供。有机肥施用量根据每年所用肥料的养分分析结果,以全氮含量为标准折算。有机肥为堆肥,有机质含量 13.0%~15.0%,全氮 0.45%~0.55%,全磷(P₂O₅)0.40%~0.50%,全钾(K₂O)0.1%~0.2%。M₂ 每年施用有机肥 30 t/hm²,折纯 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 135 kg/hm²、K₂O 45 kg/hm²。M₄ 为 2 倍量的 M₂。有机肥在秋季收获后施入土壤,化肥氮 1/3 基施,2/3 于拔节期追施。磷钾肥作为底肥一次性施入。供试作物为玉米,品种为杂交玉米‘吉单 101’(1980—1988 年)、“丹玉 13”(1989—

1993 年)、“吉单 304”(1994—1996 年)、“吉单 209”(1997—2003 年)、“郑单 958”(2004—2017 年)。玉米株行距为 23.8 cm × 70 cm,播种密度为 60000 株/hm²,人工播种。播种时间为 4 月下旬,9 月下旬收获。玉米收获后将地上部秸秆移出,实施根茬还田,其他管理措施与当地农田一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品的采集与测定 秋季收获时采用样方测产,每小区划分三个样方,晒干后人工脱粒,称重计产。文中每年各处理的产量数据均为三个样方的平均产量。玉米收获后采集 0—20 cm 土层土壤,每小区选 5 点。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定。

1.3.2 计算方法 以对照产量即不施肥处理产量作为基础地力产量,增产率=(施肥处理产量-对照产量)/对照产量×100%^[17];肥料贡献率=(施肥处理产量-对照产量)/施肥处理产量×100%;产量变异系数 CV(%)=σ/ $\bar{Y}$ ×100%,σ 为标准差(kg/hm²), $\bar{Y}$ 为平均产量(kg/hm²);产量可持续指数=($\bar{Y}$ -σ)/Y_{max},σ 为标准差(kg/hm²), $\bar{Y}$ 为平均产量(kg/hm²),Y_{max} 为产量的最大值(kg/hm²)^[18]。

1.4 数据分析

数据统计与分析采用 Excel 2016 和 SAS 9.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理玉米产量的变化特征

2.1.1 玉米产量年际间波动 图 1 表明,长期施肥情况下玉米产量年际间变化较大,总体呈上升趋势。玉米平均产量以 CK 处理最低,为 3551 kg/hm²,NPK、M₂、M₄ 处理依次为 8862、8443、8896 kg/hm²,M₂NPK、M₄NPK 处理依次为 9422、9637 kg/hm²。与初始年份玉米产量相比,CK 产量平均下降 31.8%,而施肥处理产量平均增加 37.5%~48.3%。在试验开始的前 10 年,单施有机肥处理玉米产量明显低于 NPK 处理和有机无机配施处理。随着试验年份的增加,有机肥、化肥、有机无机配施处理间玉米产量的差距逐渐缩小,但有机无机配施处理始终稳定在高产水平。与 NPK 相比,M₂、M₄ 处理 1980 年至 1990 年 10 年间平均减产 19.3%、12.6%。随后两处理产量提高,1990—2017 年,M₂、M₄ 处理平均产量比 NPK 分别提高 1.7% 和 5.9%。M₂NPK、M₄NPK 处理稳定在高产水平,1980—2017 年,较

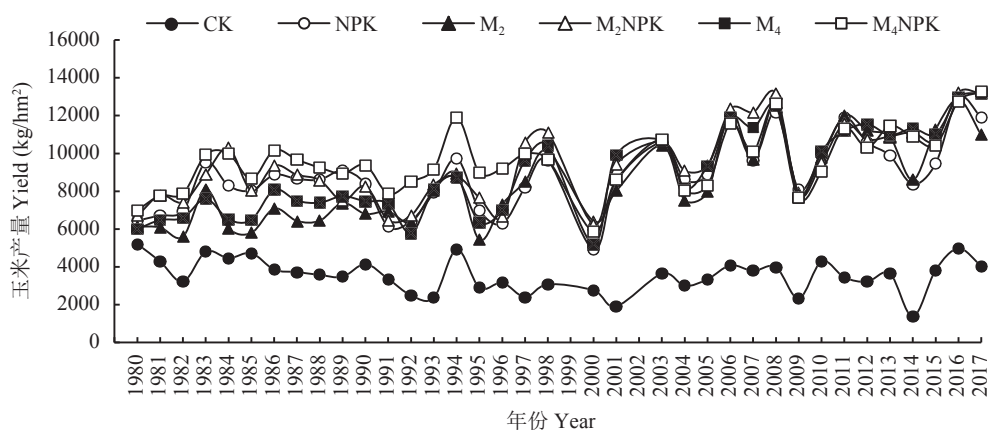


图 1 1980—2017 年玉米产量

Fig. 1 Annual fluctuation of maize yields during 1980–2017

NPK 处理年均增产 8.5% 和 10.2%。

2.1.2 长期施肥玉米产量的稳定性、可持续性分析

1980—2017 年不同处理玉米平均产量结果 (表 1) 表明, 多年连续施用有机肥或氮磷钾肥, 或有机无机配施, 均有显著的增产效果。单施有机肥与单施化肥处理玉米平均产量差异不显著, 有机无机配施处理则显著高于单施化肥或单施有机肥处理。M₄NPK 和 M₂NPK 处理的产量差异不显著。

玉米产量标准差值 (σ)、产量变异系数 (CV) 及可持续产量指数 (SYI) 可以用来表征产量的稳定性。玉米产量标准差 σ 值和变异系数越高, 说明产量的变异越大, 即产量越不稳定。各处理 σ 值及其顺序为: M₄(2259) > M₂(2210) > M₂NPK (2010) > NPK (1868) > M₄NPK (1655), 单施有机肥处理的产量标准差高于 NPK 及有机无机配施处理。有机无机配施及氮磷钾处理 CV 相对较小, 单施有机肥处理产量变异较大。与 σ 、CV 值相反, SYI 指数越高, 产量越可持续。各处理玉米产量可持续性指数值的大小顺

序为 M₄NPK > M₂NPK > NPK > M₄ > CK > M₂, 有机无机配施处理的 SYI 值高于单施化肥、单施有机肥处理。综合产量变异系数、可持续产量指数, 说明有机无机配施更有利于提高玉米产量稳定性和生产可持续性, 氮磷钾配施的玉米产量稳定性和生产可持续性优于单施有机肥。

2.2 长期不同施肥的肥料贡献率变化

肥料对于产量的贡献率在不同年份间存在波动性, 但整体上随着施肥年限的增加呈现先上升后下降的趋势 (图 2)。通过一元二次方程拟合发现, 各处理方程拐点均出现在 2009 年前后, 即玉米籽粒产量对肥料的依赖性随年限逐渐增加, 但培肥至 30 年左右, 肥料贡献率开始下降, 籽粒产量对肥料的依赖性开始下降。

2.3 土壤基础供肥能力与肥料贡献率的关系

不施肥处理作物的产量反映了农田的基础地力。图 3 表明, 所有施肥处理肥料贡献率随不施肥

表 1 长期不同施肥处理对玉米的平均产量、变异系数及可持续指数的影响

Table 1 Effects of long-term fertilization on maize average yield, coefficient of variation and sustainable index

处理 Treatment	平均产量 (kg/hm ²) Average yield	变异系数 (%) CV	产量年均增长率 (kg/hm ²) Annual increase	可持续性指数 Sustainable yield index
CK	3551 ± 890 c	25.1		0.51
NPK	8862 ± 1868 b	21.1	164.9 bc	0.54
M ₂	8443 ± 2210 b	26.2	154.8 c	0.48
M ₂ NPK	9422 ± 2010 a	21.3	185.8 a	0.56
M ₄	8896 ± 2259 b	25.4	172.0 b	0.50
M ₄ NPK	9637 ± 1655 a	17.2	190.9 a	0.60

注 (Note): 同列数据后不同字母表示不同施肥处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments at 5% level.

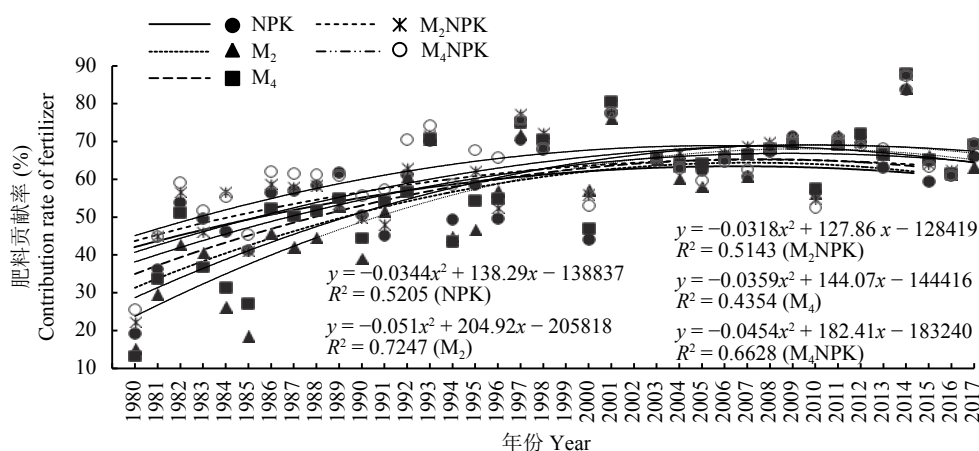


图 2 肥料贡献率随试验年限的变化趋势

Fig. 2 Variations of the contribution rate of fertilizers with experimental years

处理产量的增加呈现明显的下降趋势, 可用线性方程进行拟合, 均达到显著水平。有机无机配施处理与不施肥处理产量的相关程度最高 ($R^2 = 0.5585^{**}$)。不施肥处理产量每增加 1000 kg/hm^2 , 氮磷钾配施、有机无机配施、单施有机肥的肥料贡献率分别降低 9.2%、9.5% 和 12.2%。这表明提高土壤基础地力可减少玉米产量对外源肥料的依赖, 从而降低肥料施用量。

2.4 长期施肥土壤有机碳及全氮含量变化

2.4.1 长期施肥土壤有机碳含量变化 连续耕种施肥 38 年后, 各处理土壤有机碳发生了明显的变化 (图 4)。CK 与 NPK 处理有机碳含量呈下降趋势。施有机肥处理土壤有机碳含量较试验初始值均有所提升, 试验起始的前 12 年内, 处理间有机碳含量的差异较小, 1992 年土壤有机碳含量在 $16.3 \sim 19.9$

g/kg 之间, 平均最大增幅为 4.6% ($M_4\text{NPK}$)。12 年后, 随着种植年份的增加, 土壤有机碳含量增加, 处理间差异逐渐增大, 单施有机肥处理及有机无机配施处理有机碳含量显著高于单施化肥处理和对照, 有机肥施用量大, 土壤有机碳的含量相对较高。从 1992 年到 2017 年, M_2 、 $M_2\text{NPK}$ 、 M_4 、 $M_4\text{NPK}$ 处理土壤有机碳分别增加了 39.6%、29.7%、54.6%、72.4%, 增加幅度显著高于前 12 年, 且处理间差异达显著水平。

从土壤有机碳含量平均值 (图 5) 来看, 与初始土壤有机碳含量相比, 施用有机肥和有机无机配施显著提高土壤有机碳含量, 而不施肥、单施化肥土壤有机碳含量下降。与初始有机碳含量相比, M_2 、 $M_2\text{NPK}$ 、 M_4 、 $M_4\text{NPK}$ 处理土壤有机碳含量分别增加 15.4%、14.4%、18.9%、31.1%, 差异显著, CK 与

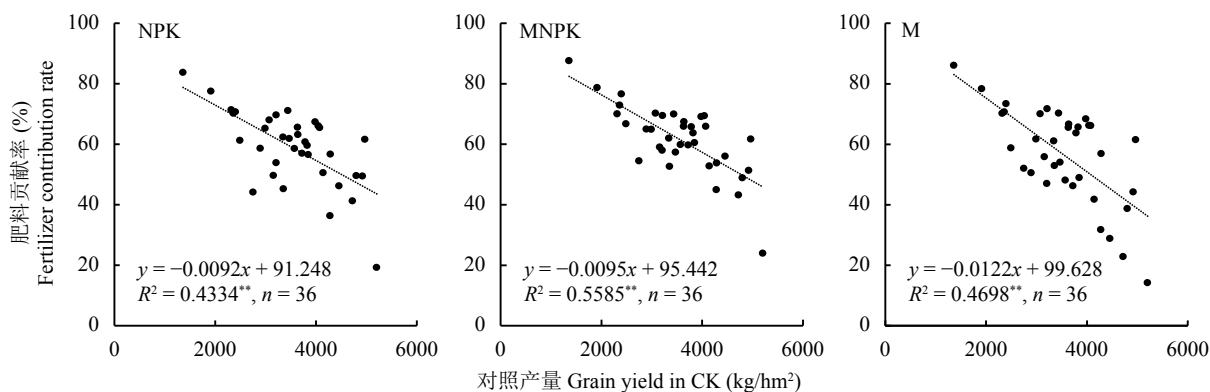


图 3 土壤基础产量与肥料贡献率的关系

Fig. 3 Relationship between soil inherent yield and fertilizer contribution rate

[注 (Note): M—有机肥 Organic manure; MNPK—有机无机配施 Organic and chemical fertilizer combination; M 肥料贡献率为 M_2 、 M_4 处理平均值, MNPK 肥料贡献率为 $M_2\text{NPK}$ 、 $M_4\text{NPK}$ 平均值 The contribution rate of M fertilizer was the average of M_2 and M_4 treatment and MNPK fertilizer contribution rate was the average of $M_2\text{NPK}$ and $M_4\text{NPK}$. **— $P < 0.01$.]

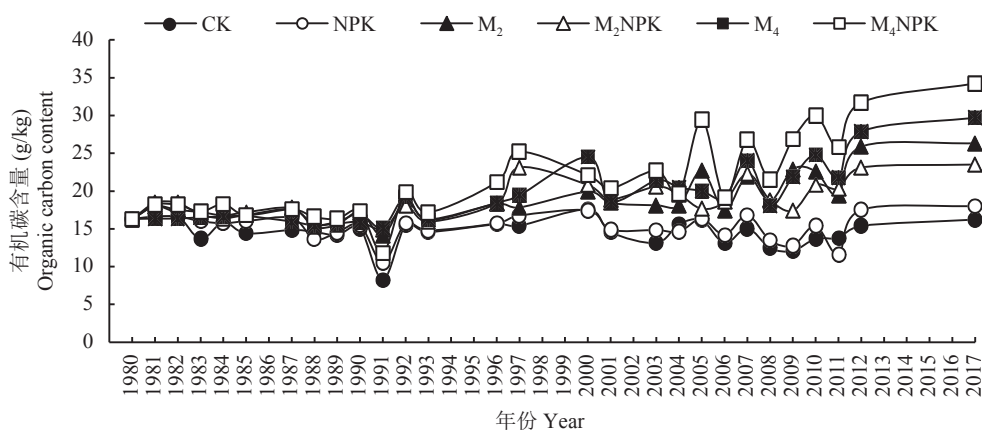


图 4 长期不同施肥处理下土壤有机碳含量变化

Fig. 4 Variation of soil organic carbon contents in different treatments with experimental years

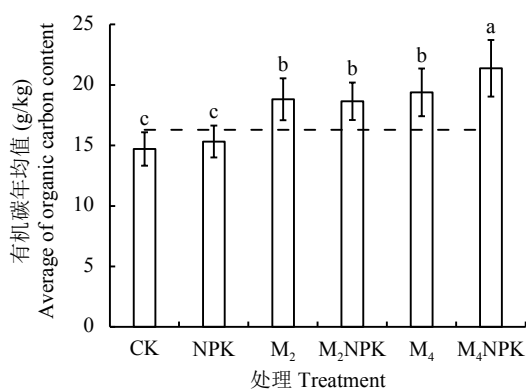


图 5 长期施肥下土壤有机碳含量平均值

Fig. 5 Effect of long-term fertilizer application on soil average organic carbon content

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$, $n = 28$); 短虚线代表土壤原始有机碳含量 Short dash lines indicate initial soil organic carbon content.]

NPK 处理有机碳含量分别减少 9.8% 和 6.0%，未达显著水平。2017 年土壤有机碳含量增加量以 M_4 NPK 处理最高，其次是 M_4 处理。 M_4 NPK、 M_4 、 M_2 、 M_2 NPK 处理有机碳年均增加量分别为 0.47、0.35、0.26、0.19 g/kg。这说明施用有机肥或有机无机配施可显著提高土壤有机碳含量，且有机碳含量随有机肥施用量的增加而增加，单施化肥对有机碳含量影响不大。

2.4.2 长期施肥土壤全氮含量变化 土壤全氮含量的变化趋势与土壤有机碳含量的变化趋势大致相同。CK 与 NPK 处理全氮含量呈缓慢下降趋势。施有机肥处理，随着种植年限的延长土壤全氮含量呈现增加趋势。与初始全氮含量相比，到 2012 年，CK、NPK 处理全氮含量分别下降 7.4%、3.7%，而 M_2 、 M_2 NPK、 M_4 、 M_4 NPK 处理土壤全氮含量分别增加了 21.6%、28.9%、46.3%、84.2%，且处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$) (图 6)。

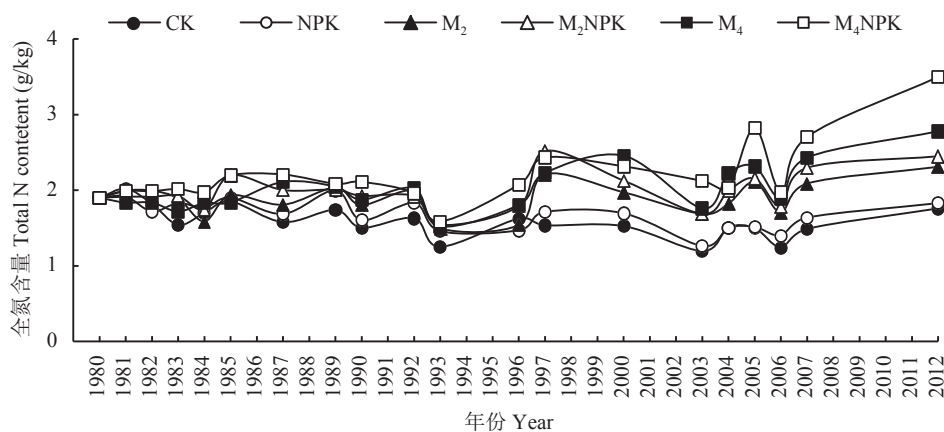


图 6 不同施肥处理土壤全氮含量随试验年份的变化

Fig. 6 Variation of soil total N contents in different treatments with experimental years

2.4.3 土壤有机碳与全氮含量的相关性分析及碳氮比

土壤全氮含量与有机碳含量之间呈极显著线性正相关关系 ($n=120$, $P<0.01$), 相关系数为 0.826^{**} (图 7)。土壤有机碳每升高 1 g/kg , 土壤全氮含量增加 0.086 g/kg 。土壤有机碳含量高, 土壤全氮含量也高, 从而使碳氮比趋于稳定, 碳氮比的稳定程度对土壤性状及作物生长具有重要意义。从多年碳氮比平均值来看, 与不施肥相比, 施肥没有显著改变土壤碳氮比, 土壤碳氮比的范围是 $9.34\sim 9.79$ 。与初始碳氮比相比, 各处理碳氮比呈增加趋势, 增幅在 $10.0\%\sim 24.5\%$ (图 8)。总体来看, 无论是常规施肥, 单施有机肥还是有机无机配施, 对土壤碳氮比的影响都不大。

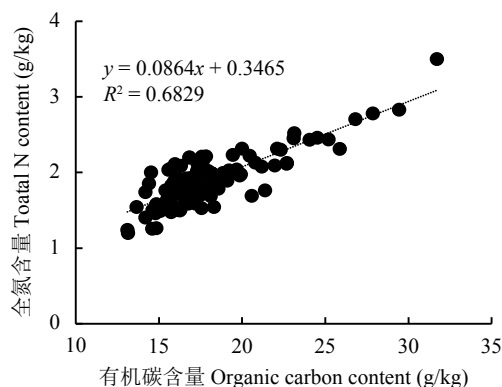


图 7 土壤有机碳与全氮含量的相关性

Fig. 7 Correlation between soil organic carbon and total N content

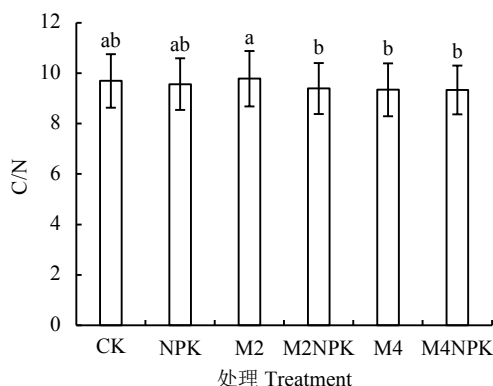


图 8 38 年后长期不同施肥处理土壤碳氮比

Fig. 8 Soil C/N in different treatments after 38 years' fertilization

3 讨论

3.1 长期有机培肥对黑土基础地力及玉米产量的影响

化肥肥效较快, 可以增加土壤速效养分含量,

提高土壤供肥强度, 有机肥肥效慢, 具有长效性, 可以改善土壤养分库容, 提高土壤供肥容量^[19-21]。本研究中, 在试验开始的前 10 年, 单施有机肥处理玉米产量显著低于 NPK 处理, 随着试验年限的增加, 处理间玉米产量的差距逐渐缩小, 从 1990 年之后, 单施有机肥处理即表现出与 NPK 处理相同的产量, 且略高于 NPK 处理, 这表明提高基础地力产量后, 可有效减少作物产量对外源肥料的依赖, 从而降低肥料施用量^[22-23]。在化肥基础上增施有机肥后, 增产效应显著提升, 处理间比较, M_4 NPK 处理下的产量可持续指数最高, 且产量年际间变幅较小; 这说明有机无机配施更有利于维持玉米产量的稳定性及生产可持续性^[24-26]。此外, 作物产量与施肥土壤有机碳、全氮含量存在极显著正相关关系^[26-28]。本研究中, 在增施有机肥的条件下, 产量与有机碳、全氮呈现极显著正相关。单施有机肥, 产量与土壤有机碳、全氮的相关系数分别为 0.694^{**} 、 0.650^{**} , 有机无机配施条件下, 产量与土壤有机碳、全氮的相关系数分别为 0.474^{**} 、 0.447^{**} , 而不施肥和单施化肥处理, 有机碳、全氮与产量的相关性较差。邱建军等^[29]利用农田生态系统生物地球化学模型 DNDC 对我国 6 个典型农业区域典型种植模式下改变土壤有机碳本底值对作物产量的响应进行模拟, 结果表明, 有机碳含量增加 1 g/kg , 东北、西北地区春玉米产量分别提高 176 kg/hm^2 、 328 kg/hm^2 。这表明可以通过提升耕地有机碳、全氮来增加作物产量的潜力。

3.2 有机无机配施对土壤有机碳和全氮含量的影响

土壤有机碳的动态变化主要取决于系统碳的输入与输出水平^[30], 根系分泌物、根茬、秸秆和有机肥等是农田土壤有机碳的输入主要来源等^[31]。施用有机肥不仅向土壤直接输入有机碳, 而且能够改善土壤营养环境状况, 增强土壤酶的活力和提升土壤生物多样性, 进而极大地提升土壤有机碳含量, 有机无机配施提升效果更为显著^[26, 32-33]。本研究中, 长期施用有机肥显著提高土壤有机碳含量, 其中 M_4 NPK 有机碳提升效果最为显著。这说明有机肥的投入有利于土壤有机碳的积累, 且有机肥投入量越高, 积累量越高, 高量的有机肥配施较无机肥单施效果更佳。土壤全氮变化规律与有机碳相似, 施用有机肥全氮含量呈现增加趋势, 与初始土壤全氮相比, 有机肥处理全氮含量的增幅在 $21.6\%\sim 84.2\%$, 有机肥施用量越高, 全氮含量增幅越大。土壤全氮含量与有机碳含量之间呈极显著线性正相关关系 ($r=0.826^{**}$, $n=120$)。但本研究中, 不同处理下土壤碳氮比无显

著差异,这可能是由于黑土碳氮具有较好的耦合特性^[34]。

4 结论

在东北中部黑土区,连续 10 年有机培肥后可显著提升土壤有机碳、全氮含量,降低化肥贡献率,实现玉米产量与单施化肥处理无显著差异;通过化肥配施有机肥可稳步提升玉米产量可持续性指数,保障玉米高产稳产;且增施有机肥后,玉米产量与土壤有机碳、全氮含量间呈显著正相关,表明在东北黑土区,有机无机配施是提升地力、保障玉米高产稳产的有效途径。

参考文献:

- [1] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032–1041.
Han X Z, Li N. Research progress of black soil in northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032–1041.
- [2] 谭国波, 边少锋, 刘武仁, 等. 浅析玉米宽窄行耕作栽培技术[J]. 玉米科学, 2002, 10(2): 80–83.
Tan G B, Bian S F, Liu W R, *et al.* Analysis on planting of corn about wide alternative narrow row with cultivation technique[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(2): 80–83.
- [3] 马莉, 吕宁, 冶军, 等. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 976–981.
Ma L, Lv N, Ye J, *et al.* Effects of biochar on organic carbon content and fractions of gray desert soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8): 976–981.
- [4] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220–228.
Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220–228.
- [5] Woomer P L, Martin A, Albrecht A. The importance and management of soil organic matter in the tropics[M]. John Wiley & Sons, 1994.
- [6] 叶优良, 张福锁, 李生秀. 土壤供氮能力指标研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(6): 273–276.
Ye Y L, Zhang F S, Li S X. Study on soil nitrogen supplying indexes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(6): 273–276.
- [7] 汪娟, 蔡立群, 毕冬梅, 等. 保护性耕作对麦-豆轮作土壤有机碳全氮及微生物量碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1516–1521.
Wang J, Cai L Q, Bi D M, *et al.* Effects of conservation tillage on the SOC, TN, SMBC and SMBN in two sequence rotation systems with spring wheat and pea[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1516–1521.
- [8] 高洪军, 朱平, 彭畅, 窦森. 黑土有机培肥对土地生产力及土壤肥力影响研究[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(1): 65–69.
Gao H J, Zhu P, Peng C, Dou S. Effects of organic soil fertility improving material in black soil on soil productivity and fertility[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2007, 29(1): 65–69.
- [9] 查燕, 武雪萍, 张会民, 等. 长期有机无机配施黑土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4649–4659.
Zha Y, Wu X P, Zhang H M, *et al.* Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4649–4659.
- [10] 夏文建, 王萍, 刘秀梅, 等. 长期施肥对红壤旱地有机碳、氮和磷的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(12): 27–31.
Xia W J, Wang P, Liu X M, *et al.* Effects of long-term fertilization on organic carbon, nitrogen and phosphorus in upland red soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2017, 29(12): 27–31.
- [11] 袁颖红, 黄欠如, 黄荣珍, 等. 长期施肥对红壤土有机碳和全氮含量的影响[J]. 南昌工程学院学报, 2007, 26(4): 29–33.
Yuan Y H, Huang Q R, Huang R Z, *et al.* Effects of long-term fertilization on the contents of soil organic carbon and total nitrogen in red paddy soil[J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2007, 26(4): 29–33.
- [12] 高晓宁, 韩晓日, 战秀梅, 等. 长期不同施肥处理对棕壤氮储量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 567–572.
Gao X N, Han X R, Zhan X M, *et al.* Effect of long-term fertilization on total nitrogen storage in a brown soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 567–572.
- [13] 曹宏杰, 汪景宽. 长期不同施肥处理对棕壤不同组分有机碳的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2011, 6: 85–88.
Cao H J, Wang J K. Effect of long-term fertilization on different fractions of organic carbon of brown soil[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2011, 6: 85–88.
- [14] 许咏梅, 刘骅, 王西和. 长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 154–162.
Xu Y M, Liu H, Wang X H. Evolution of soil organic carbon and crop yield under long-term fertilization in grey desert soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(2): 154–162.
- [15] 赵玉皓, 张艳杰, 李贵春, 等. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1826–1833.
Zhao Y H, Zhang Y J, Li G C, *et al.* Soil organic carbon stock and active carbon fractions under four kinds of long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(7): 1826–1833.
- [16] 李忠芳, 唐政, 李继光, 等. 长期施肥对辽西褐土区土壤有机碳含量和玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2013, 2(4): 150–156.
Li Z F, Tang Z, Li J G, *et al.* Soil organic carbon content and maize yield affected by long-term fertilization in cinnamon soil region of Liaoning Province[J]. *Soil and Crop*, 2013, 2(4): 150–156.
- [17] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 426–432.
Wang D J, Lin J H, Sun R J, *et al.* Optimum nitrogen rate for a high productive rice-wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu Lake area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 426–432.
- [18] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1264–1269.

- Li Z F, Xu M G, Zhang H M, *et al.* Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1264–1269.
- [19] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3): 538–547.
- Hao X Y, Gao W, Wang Y J, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of tomato and soil nitrate leaching loss under greenhouse condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 538–547.
- [20] 黄东风, 王果, 李卫华, 邱孝煊. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 631–638.
- Huang D F, Wang G, Li W H, Qiu X X. Effects of different fertilization modes on vegetable growth, fertilizer nitrogen utilization, and nitrogen loss from vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 631–638.
- [21] 王艳玲, 何园球, 周晓冬. 两种培肥途径下红壤磷素储供能力的动态变化[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 639–643.
- Wang Y L, He Y Q, Zhou X D. Dynamic changes of phosphorus fertility supply and reserves in red soils under two fertilization approaches[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 639–643.
- [22] 黄少辉, 杨云马, 刘克桐, 等. 不同施肥方式对河北省小麦产量及肥料贡献率的影响[J]. *作物杂志*, 2018, (1): 113–117.
- Huang S H, Yang Y M, Liu K T, *et al.* Effects of different fertilization method on wheat yield[J]. *Crops*, 2018, (1): 113–117.
- [23] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 597–606.
- Lu Y H, Liao Y L, Zhou X, *et al.* Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 597–606.
- [24] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4790–4799.
- Gao H J, Peng C, Zhang X Z, *et al.* Effect of long-term different fertilization on maize yield stability in the northeast black soil region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4790–4799.
- [25] 南镇武, 刘树堂, 袁铭章, 等. 长期定位施肥土壤硝态氮和铵态氮积累特征及其与玉米产量的关系[J]. *华北农学报*, 2016, 31(2): 176–181.
- Nan Z W, Liu S T, Yuan M Z, *et al.* Characteristics of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen accumulation in soil and its relationship with maize yield on long-term located fertilization[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(2): 176–181.
- [26] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 304–312.
- Wei M, Zhang A J, Zhuge Y P, *et al.* Effect of different long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrient contents in yellow fluvo-aquic soil area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 304–312.
- [27] 高祥照, 胡克林, 郭焱, 等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精准施肥[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(6): 660–666.
- Gao X Z, Hu K L, Guo Y, *et al.* Spatial variability of soil nutrients and crop yield and site-specific fertilizer management[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(6): 660–666.
- [28] 董春华, 高菊生, 曾希柏, 等. 长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 336–345.
- Dong C H, Gao J S, Zeng X B, *et al.* Effects of long-term organic manure and inorganic fertilizer combined application on rice yield and soil organic carbon content in reddish paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 336–345.
- [29] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 154–161.
- Qiu J J, Wang L G, Li H, *et al.* Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 154–161.
- [30] Banger K, Kukal S S, Toor G, *et al.* Impact of long-term additions of chemical fertilizers and farmyard manure on carbon and nitrogen sequestration under rice-cowpea cropping system in semi-arid tropics[J]. *Plant and Soil*, 2009, 318: 27–35.
- [31] Jiang M B, Wang X H, Liusui Y H, *et al.* Diversity and abundance of soil animals as influenced by long-term fertilization in grey desert soil, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7: 10837–10853.
- [32] 门明新, 李新旺, 许皞. 长期施肥对华北平原潮土作物产量及稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(8): 2339–2346.
- Men M X, Li X W, Xu H. Effects of long-term fertilization on crop yield and stability[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8): 2339–2346.
- [33] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2183–2193.
- Lu T W, Cai A D, Xu M G, *et al.* Variation in sequestration of organic carbon associated with differently sized aggregates after organic manure application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2183–2193.
- [34] 骆坤. 黑土碳氮及其组分对长期施肥的响应[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2012.
- Luo K. Black soil carbon nitrogen and its fraction in response to long-term fertilization[D]. Wuhan: Ms Thesis of Huazhong Agricultural University, 2012.