

刘沙沙, 李兵, 张古彬, 冯翔, 杨坡, 郭林, 李自涛, 李志娟. 猪粪有机肥替代化肥对黄淮地区油麦菜品质及养分利用的影响 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(8): 71-79.

猪粪有机肥替代化肥对黄淮地区油麦菜品质及养分利用的影响

刘沙沙¹, 李兵², 张古彬², 冯翔¹, 杨坡², 郭林², 李自涛¹, 李志娟²

(1. 河南省地质科学研究所, 河南 郑州 450001;

2. 河南省地质调查院 / 河南省地球化学生态修复工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 【目的】针对农村普遍存在的化肥施用过量、农产品质量下降和畜禽废弃物大量堆存等问题, 开展猪粪有机肥替代化肥试验。【方法】在黄淮地区选择典型种养结合区, 采用田间小区试验方法, 以 N 200.0 kg/hm²、P₂O₅ 96.8 kg/hm² 为参考施肥量 (M), 研究了不同猪粪有机肥施加量 (减量 50%M、M 和增量 100%M) 及替代比例 (0%M、25%M、50%M、75%M 和 100%M, 以氮磷为基准) 对油麦菜产量、品质和氮磷利用率的影响, 确定最佳施肥量和有机肥替代化肥的比例。【结果】在单独施加有机肥且施肥量小于参考施肥量条件下, 油麦菜产量、氮磷利用率随施肥量增加而增加; 而继续增加施肥量, 增产效果不显著, 且品质及氮磷利用率均有所下降。相同施肥量, 有机肥部分替代化肥对油麦菜氮磷含量影响不显著, 但可提高其产量、品质及氮磷利用率。与化肥对照相比, 当有机肥替代比例为 25%~75% 时, 油麦菜硝酸盐和亚硝酸盐含量可降低 19.4% 和 73.3% ($P < 0.05$)。有机肥替代比例为 75% 氮磷利用率为最高, 较单施化肥提高 30.4% 和 44.9%。【结论】采用参考施肥量 M 且有机肥替代比例为 75% 处理效果最优, 不仅可保证油麦菜产量, 还能有效提高品质和氮磷利用率。研究结果可为区域蔬菜种植合理减量配施有机肥提供重要的科学依据, 降低区域面源污染风险。

关键词: 猪粪; 油麦菜; 产量; 品质; 氮利用率; 磷利用率

中图分类号: S147.34

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2019) 08-0071-09

Effect of Pig Manure Instead of Chemical Fertilizer on Quality and Nutrient Utilization Efficiency of Lettuces in Huanghuai Plain

LIU Shasha¹, LI Bing², ZHANG Gubin², FENG Xiang¹, YANG Po²,

GUO Lin², LI Zitao¹, LI Zhijuan²

(1. Henan Institute of Geological Sciences, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Institute of Geological Survey / Henan Geochemical Ecological Restoration Engineering Research Center, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】In view of the prevailing problems such as excessive use of chemical fertilizer, decline in quality of agricultural products and the massive storage of livestock and poultry waste in rural areas, the experiment of fertilizer replaced by organic pig manure was carried out. 【Method】In order to optimize the application amount of organic fertilizer and the replacement ratio of chemical fertilizer by organic fertilizer, the experiment was carried out in typical planting-breeding combined area of Huanghuai region by using the field plot trial method, and the effects of application

收稿日期: 2019-05-28

基金项目: 河南省重大科技专项 (161100310600)

作者简介: 刘沙沙 (1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为农业环境及污染修复, E-mail: shasha0813@126.com

通信作者: 张古彬 (1963—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为地球化学、农业地质, E-mail: hnddy81@126.com

amount and the replacement ratio of pig manure fertilizer on lettuces production, quality and nitrate/phosphorus utilization rates were investigated. The basic fertilization amount (M) was N 200.0 kg /hm², P₂O₅ 96.8 kg/hm², and the fertilizer amount(M reduced by 50%, M, and M increased by 100%) and organic fertilizer replacement ratios (0% M, 25% M, 50% M, 75% M, and 100% M, based on nitrogen and phosphorus) were set according to test requirements. 【 Result 】 When the fertilizer amount was less than M, the yield of lettuces and the utilization rate of nitrogen and phosphorus increased with the increase of fertilizer application rate under the condition of single organic fertilizer application. When continuing to increase the amount of fertilizer application, the yield increased insignificantly, and the quality and nitrogen and phosphorus utilization rates decreased slightly. When fertilization amount was the same, replacing certain amount of chemical fertilizer with organic fertilizer had no significant effect on the nitrogen and phosphorus contents of lettuces, but it could improve its yield, quality and nitrogen and phosphorus utilization rates. When the replacement ratio of organic fertilizer was 25%–75%, the nitrate and nitrite contents of lettuces were reduced by 19.4% and 73.3% ($P < 0.05$) compared with those of the chemical fertilizer control. The highest utilization rates of nitrogen and phosphorus was obtained with an organic fertilizer replacement ratio of 75%, which were 30.4% and 44.9% higher than those of chemical fertilizer control. 【 Conclusion 】 The 75% organic fertilizer with 25% chemical fertilizer group has the best effect on the yield of lettuces, and can improve the quality and utilization rate of nitrogen and phosphorus fertilizer effectively. The results of this study provide an important scientific basis for the determination of fertilizer reduction for regional vegetable planting and reduce risk of non-point source pollution.

Key words: pig manure; lettuces; yield; quality; utilization efficiency of nitrogen; utilization efficiency of phosphorus

【研究意义】随着社会需求的日益增长和农业的快速发展,化肥投入量逐年增加。据统计,2015年我国化肥使用量达6 022万t,约占世界总量的1/3,然而有效利用率较低,仅为35.2%^[1]。长期过量施用化肥不仅造成作物品质下降,影响人类健康,还会造成土壤板结、酸化、养分盐渍化等肥力障碍。我国农业面源污染调查结果显示,黄淮地区化肥导致的环境影响处于中高风险水平,远高于西部地区^[2-3]。沙颍河是黄淮地区的较大支流,陈云增等^[4]在此区域内的调查研究表明施用化肥导致饮用水和灌溉用水硝酸盐水平不断上升,水质不断恶化;特别是癌病高发村庄的蔬菜、土壤及地下水硝酸盐积累均明显高于平均水平,严重危害身体健康。因此,优化施肥和提高肥料利用率是黄淮地区农村地区生态环境保护的迫切需求。

【前人研究进展】对小麦、玉米和水稻等粮食作物施肥研究表明畜禽粪便有机肥替代化肥可显著提高作物产量、吸收养分量及养分利用率,降低氮磷淋溶的环境风险^[5-7]。在养殖业快速发展的黄淮地区,畜禽粪便量大、营养成分丰富,不合理的处理处置破坏周边生态环境,还造成氮磷资源的浪费^[8-9]。畜禽粪便有机肥替代化肥,是实现化肥零增长、解决畜禽养殖污染以及发展种养结合模式的重要途径。蔬菜作为城郊区的主要作物类型,具有根系浅、生长周期短、肥料用

量高和灌水量大等特点,养分更易流失^[10-11]。因此,加强对蔬菜有机肥替代研究是减少氮磷流失,防治面源污染的重要组成部分。【本研究切入点】有机肥替代效果还受气候条件、作物类型及土壤理化性质等多种因素的影响,具有很强的区域性^[12-14]。油麦菜作为黄淮地区广泛种植的蔬菜作物,如何合理利用有机肥,对于黄淮地区有效降低肥料成本和防控养殖业环境污染风险具有至关重要的作用。【拟解决的关键问题】本研究选择位于黄淮地区的典型种养结合区作为基地,应用田间小区试验方法,系统研究了不同有机肥施肥量及替代比例条件下油麦菜产量、品质、氮磷利用率的变化特征,探讨适合于该区域的有机肥最佳施肥量及替代化肥的比例,以期为推动该区有机肥可持续消纳和农业面源污染防控工作提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验区概况

试验区位于河南省开封市祥符区种养结合公司的蔬菜种植基地(34.80° N, 114.48° E)。该区地处淮河流域惠济河段,属于引黄灌区。区内为温带季风气候,年平均气温14.5℃,年积温4 700℃,年降水量627.5 mm,无霜期221 d。试验区土壤类型为淡色潮湿雏形土(潮土),土壤

母质为黄河冲积物，耕层土壤质地多以轻壤为主，深层（100 cm 以下）则为砂质土壤。由于项目区距离黄河较近（15 km 左右），加之长期引黄灌溉，试验区地下水位较浅，一般为 150~200 cm。试验区土壤分布均匀，试验开始前采集 0~20 cm 耕层土壤测试其基本理化性质，pH 8.0、有机质 14.7 g/kg、全氮 1.1 g/kg、全磷 1.1 g/kg、碱解氮 118.5 mg/kg、速效磷 192.5 mg/kg。

1.2 试验材料

根据当地种植情况及蔬菜类型，选择当地主栽叶菜品种油麦菜（抗热无斑 001 品种）作为供试材料。化肥采用尿素（N 46%）、过磷酸钙（ P_2O_5 12%）和氯化钾（ K_2O 60.0%），有机肥采用蔬菜基地所属公司的养猪场中温快速腐熟无害化处理制造的猪粪有机肥，有效成分含量为：有机质 57.2%，总氮（以 N 计）2.2%，总磷（以 P_2O_5 计）1.0%，总钾（以 K 计）1.6%，pH 8.1。

1.3 试验方法

试验设不施肥（CK）、施 0.5 倍有机肥（M1）、1.0 倍有机肥（M2）、2.0 倍有机肥（M3）、施加化肥（NPK）、施 25% 化肥 +75% 有机肥（75M）、施 50% 化肥 +50% 有机肥（50M）、施 75% 化肥 +25% 有机肥（25M）8 个处理（表 1），其中 M²、NPK、75M、50M、25M 处理施肥量相同，每个处理 3 次重复，随机排列，小区面积 9.0 m²（1.0 m × 9.0 m）。各小区周边设置田埂（宽 50 cm，高 20 cm）将相邻小区隔开。施肥量根据营养平衡并参考当地常规肥料用量，本试验确定参照施肥量为：施 N 200.0 kg/hm²，施 P_2O_5 96.8 kg/hm²，施 K 150.0 kg/hm²。磷肥、钾肥和有机肥全部以基施方式施入小区，氮肥则预留 50% 用作后期追肥，结合灌水采用撒施方式施入。试验采用直播方式种植，于 2017 年 9 月 13 日播种，9 月 25 日间苗，11 月 2 日采收测产，整个生长期 51 d。

表 1 试验处理设置与施肥量分配
Table 1 Test treatment setting and fertilization amount allocation

处理 Treatment	总施肥量 Total fertilization (kg/hm ²)		化肥用量 Chemical fertilization (kg/hm ²)		有机肥用量 Organic fertilization (kg/hm ²)		占比 Proportion (%)
	N	P_2O_5	N	P_2O_5	N	P_2O_5	
	CK	0	0	0	0	0	
M1	100.0	48.4	0	0	100.0	48.4	100.0
M2	200.0	96.8	0	0	200.0	96.8	100.0
M3	400.0	193.6	0	0	400.0	193.6	100.0
NPK	200.0	96.8	200.0	96.8	0	0	0
75M	200.0	96.8	50.0	24.2	150	72.6	75.0
50M	200.0	96.8	100.0	48.4	100.0	48.4	50.0
25M	200.0	96.8	150.0	72.6	50.0	24.2	25.0

1.4 样品采集与分析

蔬菜收获时，对每个小区进行称重测产，同时每个小区选取 200 g 均一、成熟的蔬菜，沿土面剪取地上部分用作品质分析。采集至实验室的蔬菜样品使用自来水冲洗干净，再使用去离子水反复冲洗 2~3 遍，使用吸水滤纸吸干植物样表面水分。硝酸盐和亚硝酸盐含量测试采用紫外分光光度法，可溶性糖含量采用铜还原碘量法测定^[15]。植物样品经 105 °C 烘干 2 h，85 °C 烘干 24 h 以上，测定干重及含水率。样品经浓硫酸 - 过氧化氢混合液消煮后，用半微量凯氏定氮法测定植株氮含

量，用钒钼黄比色法测定磷含量^[16]。氮、磷吸收量及表观利用率计算公式如下^[17]：

$$A_i = Y_i \times C_i$$

$$R_i = \frac{A_i - A_{CK}}{D_i}$$

式中， A_i 为第 i 组蔬菜对 N 或 P 的吸收量（kg/hm²）， A_{CK} 为不施肥对照蔬菜 N 或 P 的吸收量（kg/hm²）， Y_i 为第 i 组蔬菜产量（t/hm²）； C_i 为第 i 组蔬菜 N 或 P 含量（g/kg）； R_i 为第 i 组蔬菜 N 或 P 表观利用率（%）， D_i 为第 i 组 N 或 P 的施加量（kg/hm²）。

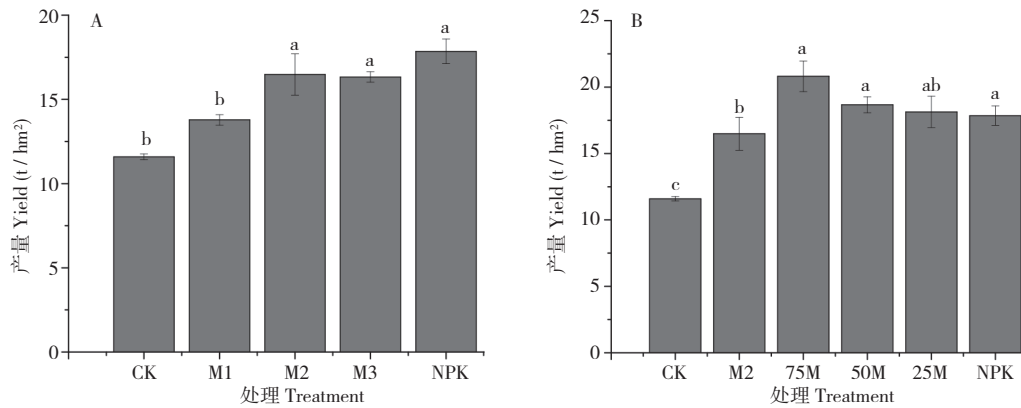
试验数据采用 Origin8.0 作图和 SPSS10.0 进行统计分析, 采用一维方差分析 (ANOVA) 进行差异显著性测验。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对油麦菜产量的影响

不同施肥处理油麦菜产量统计结果见图 1。试验结果显示, 与不施肥对照相比, 无论施用化肥还是有机肥均可显著增加油麦菜产量, 增产幅

度为 7.1%~61.1%。单施有机肥对比试验结果 (图 1A) 表明: 随着施肥量增加 (M1~M3), 产量表现为先增加后稳定的变化趋势, 但总体上低于单施化肥处理 (NPK)。当有机肥施用量达到 M2 处理后, 产量不再随施肥量的增加而增加; M2、M3 处理产量差异不显著。在氮磷施用量相同条件下 (图 1B), 有机肥替代比例为 75.0% (75M) 时油麦菜产量最高, 但是除了显著高于纯有机肥处理 (M2) 外, 均与其他处理差异不显著。



柱状上小写英文字母不同者表示处理间差异显著

Different lowercase letters on the histogram represent significant differences among treatments

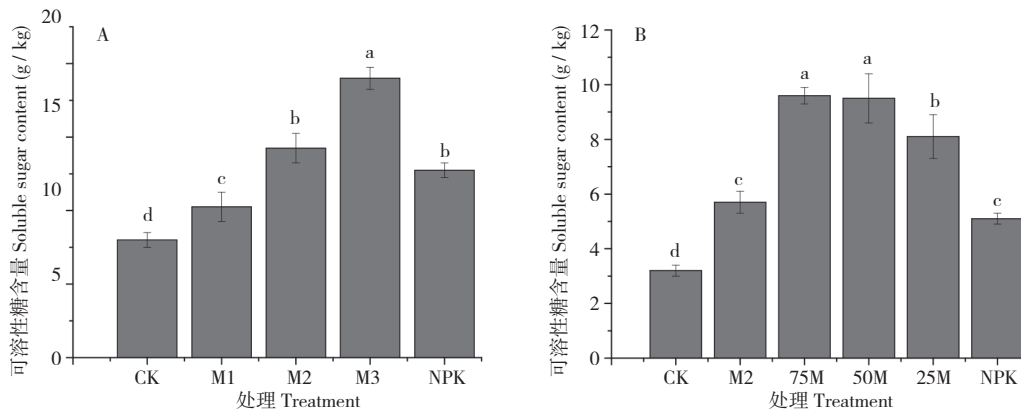
图 1 不同施肥处理油麦菜产量对比

Fig. 1 Comparison of yield of lettuces among different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对油麦菜品质的影响

不同有机肥施用量试验结果 (图 2A) 表明, 施肥能显著提高油麦菜可溶性糖含量, 与不施肥对照相比, 提高幅度达到 59.4%~200.0%, 差异显著。油麦菜可溶性糖含量随着有机肥施用量的增加而上升, 其中 2 倍有机肥施用量 (M3) 处理可溶性糖

含量最高。施肥量相同条件下 (图 2B), 有机肥替代比例 25.0%~75.0% 处理油麦菜可溶性糖含量均较 100% 化肥 (NPK) 处理提高 58.8%~88.2%, 差异显著, 其中有机肥替代比例 75% (75M) 处理可溶性糖含量最高。相同施肥量条件下, 有机肥 (M2) 与化肥 (NPK) 处理差异不显著。



柱状上小写英文字母不同者表示处理间差异显著

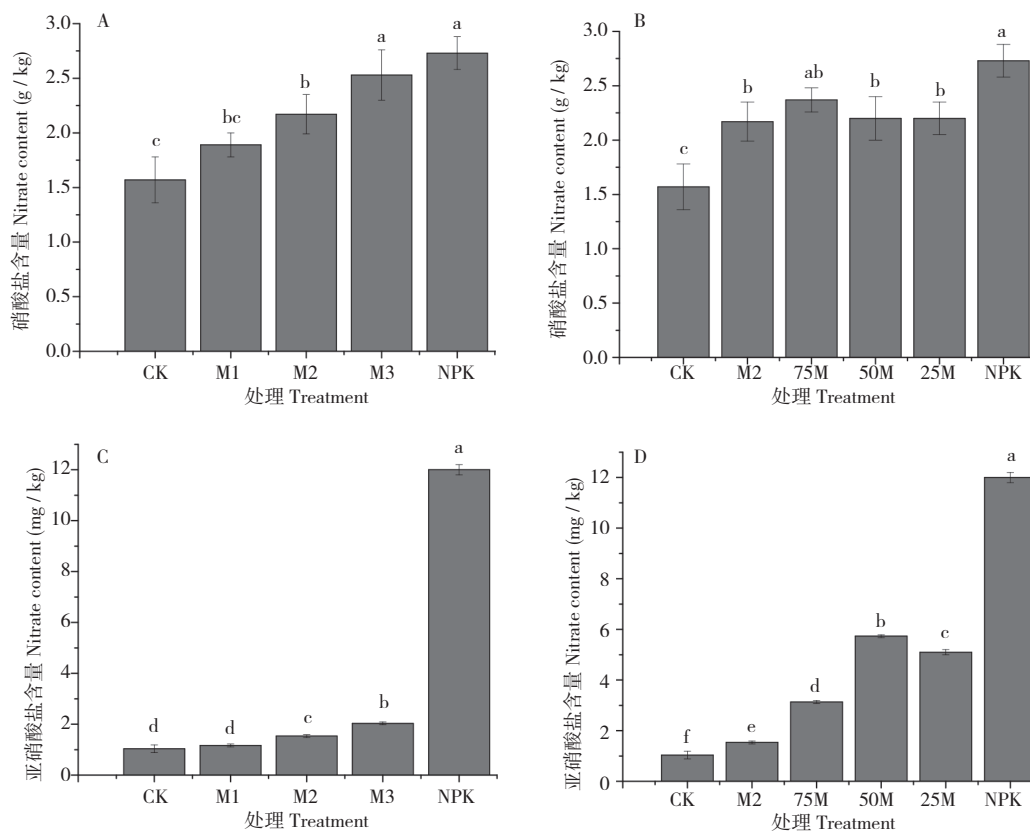
Different lowercase letters on the histogram represent significant differences among treatments

图 2 不同施肥处理油麦菜可溶性糖含量对比

Fig. 2 Comparison of the soluble sugar content of lettuces among different fertilization treatments

有机肥梯度处理结果(图3A、图3C)显示,硝酸盐和亚硝酸盐含量随施肥量增加呈现增加趋势。M1处理较对照亚硝酸盐含量增加13.0%,M2较M1处理增加30.8%;因此,施肥量越大亚硝酸盐含量增加量越大。施用化肥(NPK)处理硝酸盐和亚硝酸盐含量最高,分别达到2.7 g/kg和12.0 mg/kg。

蔬菜硝酸盐测定结果显示,总体上无论是施用化肥还是有机肥均会显著增加蔬菜硝酸盐含量(图3A、图3B),但是有机肥处理对硝酸盐增加的幅度显著低于纯化肥处理(图3B)。亚硝酸盐含量测定结果表明,有机肥施用均会显著降低蔬菜亚硝酸盐含量(图3C、图3D),降低幅度高达52.5%~87.3%。



柱状上小写英文字母不同者表示处理间差异显著

Different lowercase letters on the histogram represent significant differences among treatments

图3 不同施肥处理油麦菜硝酸盐含量和亚硝酸盐含量对比

Fig. 3 Comparison of nitrate content and nitrite content of lettuces among different fertilization treatments

2.3 不同施肥处理对油麦菜氮、磷含量的影响

供试蔬菜氮、磷含量见表2。施肥会显著增加油麦菜氮、磷含量,增幅分别为52.6%~125.1%和31.6%~80.6%,施肥提高植株氮含量更明显。单施有机肥处理油麦菜氮、磷含量随施肥量的增加而增加,但增加幅度呈降低趋势。此外,同一施肥水平不同有机肥替代比例对植株氮、磷含量的影响较小。

2.4 不同施肥处理对油麦菜氮、磷表观利用率的影响

供试蔬菜氮、磷吸收量及表观利用率如表

表2 不同施肥处理油麦菜氮含量和磷含量比较

Table 2 Comparison of nitrogen and phosphorus contents of lettuces among different fertilization treatments

处理	氮含量	磷含量
Treatment	Nitrogen content (g/kg)	Phosphorus content (g/kg)
CK	23.1 ± 2.6d	8.2 ± 0.4c
M1	35.9 ± 0.9c	48.0 ± 0.6b
M2	8.7 ± 0.5c	10.8 ± 0.7ab
M3	50.2 ± 1.4ab	11.9 ± 0.6a
NPK	50.8 ± 1.6ab	10.3 ± 0.6b
75M	52.9 ± 3.1a	10.7 ± 1.0ab
50M	50.4 ± 2.3ab	10.9 ± 0.4ab
25M	50.9 ± 0.4ab	10.0 ± 0.8b

注: 同列数据后小写字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference.

3 所示。有机肥梯度试验结果表明, 氮、磷吸收量随施肥量的增加呈先增加后稳定趋势; 氮、磷表观利用率先升高后降低。施肥量由 M 至 2M, 氮、磷吸收量变化不显著, 氮、磷表观利用率较 M2 处理分别下降 8.8% 和 5.1%。不同有机肥替代比例 (75M~50M) 的磷吸收

量显著高于 100% 化肥处理, 而 25M 相关结果与 NPK 处理差异不显著。有机肥替代比例为 75% (75M) 的氮、磷吸收量及利用率最高, 吸收量较 100% 化肥处理提高 21.3% 和 21.5%, 利用率较 100% 化肥处理提高 30.4% 和 44.9%。

表 3 不同施肥处理油麦菜氮、磷吸收量及表观利用率比较

Table 3 Comparison of nitrogen / phosphorus uptake and utilization rate of lettuces among different fertilization treatment

处理 Treatment	氮吸收量 Nitrogen absorption (kgN / hm ²)	氮肥利用率 Nitrogen utilization rate (%)	磷吸收量 Phosphorus absorption (kg P / hm ²)	磷肥利用率 Phosphorus utilization rate (%)
CK	19.0 ± 2.4 e		6.8 ± 0.1 e	
M1	35.0 ± 1.7 d	16.1 ± 1.7 d	8.5 ± 0.6 d	8.2 ± 2.7 e
M2	56.1 ± 3.6 c	18.6 ± 1.8 c	12.6 ± 0.8 c	13.8 ± 1.9 d
M3	58.2 ± 0.6 c	9.8 ± 0.2 e	13.8 ± 0.7 b	8.3 ± 0.8 e
NPK	64.4 ± 4.5 b	22.7 ± 2.3 b	12.9 ± 0.4 c	14.7 ± 0.9 c
75M	78.1 ± 5.6 a	29.6 ± 2.8 a	15.8 ± 0.9 a	21.3 ± 2.2 a
50M	66.7 ± 5.1 b	23.9 ± 2.6 b	14.5 ± 0.8 b	18.2 ± 1.8 b
25M	65.5 ± 4.7 b	23.3 ± 2.4 b	12.8 ± 0.3 c	14.3 ± 0.7 c

注: 同列数据后小写字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference.

3 讨论

3.1 有机肥替代对油麦菜产量与品质的影响

肥料供给与蔬菜产量、品质密切相关^[18]。本研究结果表明, 施肥不足影响油麦菜生长, 但过量施肥不能显著增加油麦菜产量, 还造成硝酸盐和亚硝酸盐含量增加。相关研究证实 N 150 kg/hm² 条件下黄秋葵产量最高, 进一步增加氮肥用量, 产量会有所下降, 此外, 黄秋葵株高、茎粗和可溶性蛋白等外观及内在品质也呈现相似变化规律^[19]。施肥量与蔬菜品质研究表明过量施肥降低蔬菜体内可溶性糖、维生素 C 和氨基酸等有效成分含量, 硝酸盐和亚硝酸盐含量与施氮量呈正相关^[20-21]。植物主要吸收硝酸盐形式氮, 硝酸盐进入植物体内在硝酸还原酶和亚硝酸还原酶作用下还原为氨, 进而合成机体所需的蛋白质。氮元素过量供应, 植物将以超过自身需求的速度吸收并储存硝酸盐, 因此造成硝酸盐含量增加, 降低蔬菜品质^[22]。兰翔等研究表明, 0~375 kg/m³ 施磷量范围内, 粉质黏土中大白菜产量随施肥量的增加而增加, 而粘壤土中产量随施肥量增加呈先增加后稳定趋势^[23]。以上结果说明供试作物产量与施肥量有关外, 还受土壤肥力、类型等因素影响。

除施肥量外, 肥料种类也是影响蔬菜产量和品质的重要因素。本研究结果表明, 有机肥替代化肥保障产量的同时可显著提高蔬菜品质。相关研究也表明, 有机肥替代可提高甘蓝、小白菜等蔬菜可溶性糖含量, 降低硝酸盐含量, 提高蔬菜产量和品质^[24-26]。有机肥部分替代化肥可提高作物产量、品质原因有以下几点: (1) 有机肥含有作物生长所需常规养分外, 还含有大量微量元素、有机物和微生物等, 营养供给全面、均衡, 可提高蔬菜产量, 促进可溶性糖、氨基酸等物质的合成; (2) 有机肥氮以有机形态为主, 硝酸盐含量较少, 且土壤中有机氮转化速度较慢, 硝酸盐不易被植物大量吸收积累^[27]; (3) 过量化肥容易造成土壤板结、盐渍化等不良影响, 而有机肥所含有的有机物、微生物等可改善土壤性质, 提高土壤肥力, 从而提高作物的产量及品质^[28]; (4) 肥料供给与作物养分需求规律的关系也是影响作物产量和品质的重要因素。有机肥释放速度较慢, 前期养分浓度低, 无法满足作物营养需求; 有机肥部分替代化肥可发挥二者的互补作用, 保证全过程营养需求, 产品高产优质^[29]。朱菜红等^[30]采用 ¹⁵N 示踪技术和盆栽试验对水稻生长期不同施肥处理氮的动态变化发现, 有机肥增加

了氮素供应与水稻氮需求时间上的同步性是提高产量和肥料利用率的重要原因。

3.2 有机肥替代对油麦菜养分利用率的影响

本试验结果表明, 养分利用率与施肥量及肥料种类密切相关, 一定范围内增加施肥量可提高氮磷吸收量, 但施肥量超过 $N\ 200.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $P_2O_5\ 96.8\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 继续增加施肥量不能增加油麦菜吸收氮磷量, 氮、磷利用率显著下降; 相同施肥量条件下, 有机肥替代可增加肥料利用率。有关施肥量与养分利用率的研究也表明过量施用氮肥, 氮肥利用率大幅下降^[31-32]。杨晓梅等^[33]有关不同有机肥替代比例条件下华北地区冬小麦产量和氮肥利用率的研究表明, 有机肥部分替代化肥可增加氮肥利用率, 替代比例为 50% 处理产量和氮肥利用率最高。在山东滨海地区有机肥替代比例为 70% 条件下水稻产量最优, 磷肥利用率最大^[34]。不同作物、不同地区的有机肥最佳替代比例不同, 本研究中有有机肥替代比例为 75% 条件下产量和养分利用率最高。

有机肥替代可增加蔬菜产量, 增加土壤微生物种群数量、丰度, 提高酶活, 从而加速了氮、磷等营养物质的活化, 增强蔬菜对氮、磷的吸收能力, 从而增加养分利用率^[35-36]。王玉胜等^[37]研究表明, 施加生物有机肥有利于根际细菌、真菌和放线菌的增殖, 提高土壤代谢强度, 促进植物吸收。此外, 化肥中氮、磷多以无机形式存在, 易被淋失也是有机肥替代可增加肥料利用率的原因之一。张凤华等^[38]在蔬菜种植过程中连续过量施肥, 土壤 Olsen-P 含量持续增加, 土壤磷素大量积累, 雨季地表径流流失负荷达 $0.3\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 是造成周边水体富营养化的主要来源之一, 而减少化肥磷和配施有机肥可显著消减养分流失量。作为农作物和畜禽产品重要产区之一的黄淮地区, 环境形势严峻, 合理利用有机肥、推进有机肥替代化肥是防治化肥和畜禽粪便造成的面源污染的重要途径之一。

4 结论

(1) 单独施加有机肥, 施 $N\ 200.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施 $P_2O_5\ 96.8\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 可保证较高的油麦菜产量和氮、磷利用率, 然而施肥量过大不仅对产量没有增加作用, 还造成硝酸盐和亚硝酸盐含量不断上升, 蔬菜品质下降; 氮、磷利用率也大幅下降。

(2) 在不增加氮、磷总量条件下, 有机肥

替代在保障作物高产优质的基础上, 提高氮、磷利用率; 其中替代比例为 75%, 油麦菜产量、品质及氮、磷利用率均可达到较高水平。

(3) 有机肥合理替代化肥不仅有效合理利用禽畜粪便, 还可减少化肥施用。本研究可为种植业和养殖业分布广泛的黄淮地区防治面源污染, 保障环境质量提供依据。

参考文献 (References):

- [1] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 张桃林, 赵其国. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境, 2004, 13(4):656-660. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2004.04.055. HUANG G Q, WANG X X, QIAN H Y, ZHANG T L, ZHAO Q G. Negative impact of inorganic fertilizers application on agricultural environment and its countermeasures [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4):656-660. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2004.04.055.
- [2] 刘钦普. 中国化肥面源污染环境风险时空变化[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1247-1253. doi: 10.11654/jaes.2016-1378. LIU Q P. Spatio-temporal changes of fertilization environmental risk of China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1247-1253. doi: 10.11654/jaes.2016-1378.
- [3] 丘雯文, 钟涨宝, 原春辉, 李兆亮. 中国农业面源污染排放的空间差异及其动态演变[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(1): 152-163. doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2018.01.19. QIU W W, ZHONG Z B, YUAN C H, LI Z L. Spatial differences and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(1):152-163. doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2018.01.19.
- [4] 陈云增, 陈志凡, 马建华, 孙瑞玲, 邹桂英. 沙颍河流域典型癌症高发区土壤硝态氮对地下水和蔬菜硝酸盐积累的影响[J]. 环境科学学报, 2016(3):990-998. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0497. CHEN Y Z, CHEN Z F, MA J H, SUN R L, ZOU G Y. Effects of soil nitrate nitrogen on the nitrate accumulation in groundwater and vegetables in a typical high cancer incidence area of Shaying River basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016(3):990-998. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0497.
- [5] 张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉. 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1):124-133. doi: 10.11654/jaes.2016-0827. ZHANG H Q, YU X Y, ZHAI B N, JIN Z Y, MA C, WANG C H. Reducing N fertilization rate through a combination of manure and chemical fertilizer in Weibei dry land [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2017, 36(1):124-133. doi: 10.11654/jaes.2016-0827.
- [6] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘毅, 强久次仁, 周应田, 路国艳, 赵秉强, 杨学云, 张树兰. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):22-32. doi: 10.11674/zwyf.17210. LV F L, HOU M M, ZHANG H T, QIANG J C R, ZHOU Y T, LU G Y, ZHAO B Q, YANG X Y, ZHANG S L. Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat-summer maize rotation system in Lou soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,

- 2018, 24(1):22–32. doi: 10.11674/zwf.17210.
- [7] 吴萌, 李委涛, 刘佳, 刘明, 江春玉, 李忠佩. 红壤水稻土上双季稻氮素减施增效方法比较[J]. 土壤, 2017, 49(4):685–691. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2017.04.007.
- WU M, LI W T, LIU J, LIU M, JIANG C Y, LI Z P. Comparison of nitrogen fertilizer reduction with efficiency increase methods in double-rice system in reddish paddy soil [J]. *Soils*, 2017, 49(4):685–691. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2017.04.007.
- [8] 孙超, 潘瑜春, 刘玉. 畜禽粪便资源现状及替代化肥潜力研究: 以安徽省固镇县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(4):324–331. doi: 10.11934/j.issn.1673–4831.2017.04.005.
- SUN C, PAN Y C, LIU Y. Nutrient resources in livestock manure and its potential of substituting fertilizers: a case study of Guzhen county, Anhui province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(4):324–331. doi: 10.11934/j.issn.1673–4831.2017.04.005.
- [9] 宣梦, 许振成, 吴根义, 欧玮祺, 李婧, 何文博. 我国规模化畜禽养殖粪污资源化利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 35(2):126–132. doi: 10.13254/j.jare.2017.0257.
- XUAN M, XU Z C, WU G Y, OU W Q, LI J, HE W B. Analysis of utilization of fecal resources in large-scale livestock and poultry breeding in China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 35(2):126–132. doi: 10.13254/j.jare.2017.0257.
- [10] 吴晓妮, 付登高, 段昌群, 闫曦, 蒋霞. 柴河流域种植方式与沟渠类型对农田径流氮、磷含量的影响[J]. 水土保持学报, 2016(6):38–42. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.06.007.
- WU X N, FU D G, DUAN C Q, YAN X, JIANG X. Effects of planting modes and agriculture drainage ditches on runoff nitrogen and phosphorus concentration in Chaihe Watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016(6):38–42. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.06.007.
- [11] JIANG H M, ZHANG J F, SONG X Z, Liu Z H, Jiang L H, Yang J C. Responses of agronomic benefit and soil quality to better management of nitrogen fertilizer application in greenhouse vegetable land [J]. *Pedosphere*, 2012, 22(5):650–660. doi: 10.1016/s1002–0160(12)60050–2.
- [12] 胡留杰, 刘剑飞, 廖敦秀, 聂敏, 谢永红, 张洪霞, 周正科, 肖和艾. 施用猪粪对油菜产量、硝酸盐含量及土壤养分的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7):1931–1937.
- HU L J, LIU J F, LIU D X, NIE M, XIE Y H, ZHANG H X, ZHOU Z K, XIAO H A. Effects of pig manure application on yield, nitrate content and soil nutrient of oilseed rape [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7):1931–1937.
- [13] 李强, 马晓君, 豆攀, 程秋博, 余东海, 袁继超, 孔凡磊. 不同生态条件下氮肥对玉米氮素吸收利用及产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1):156–164. doi: 10.7668/hbxb.2017.01.024.
- LI Q, MA X J, DOU P, CHENG Q B, YU D H, YUAN J C. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen uptake and utilization and yield of maize under different ecological conditions [J]. *Acta Agriculture Borealisinica*, 2017, 32(1):156–164. doi: 10.7668/hbxb.2017.01.024.
- [14] 孙波, 郑宪清, 胡锋, 李辉信, 孔滨, 王帘里, 隋跃宇. 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1):206–213. doi: 10.3321/j.issn:0250–3301.2009.01.035.
- SUN B, ZHENG X Q, HU F, LI H X, SUN B, WANG L L, SUI Y Y. Effect of temperature, rainfall and soil properties on farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1):206–213. doi: 10.3321/j.issn:0250–3301.2009.01.035.
- [15] 余光辉, 张杨珠, 王大娟. 喷施稀土和微肥对小白菜硝酸盐和亚硝酸盐含量及其他品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1):9–12. doi: 10.3321/j.issn:1672–2043.2005.z1.003.
- YU G H, ZHANG Y Z, WAN D J. Effects of spraying rare earth element and micronutrient fertilizers on contents of nitrate and nitrite and other qualities in Chinese cabbage [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(S1):9–12. doi: 10.3321/j.issn:1672–2043.2005.z1.003.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005:431–437.
- BAO S D. Soil Agrochemical Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005:431–437.
- [17] 郭李萍, 王兴仁, 张福锁, 陈新平, 毛达如. 不同年份施肥对作物增产效应及肥料利用率的影响[J]. 中国农业气象, 1999, 20(04):20–23. doi: 10.1111/j.1551–2916.2012.05349.x.
- GUO L P, WANG X R, ZHANG F S, CHEN X P, MAO D R. Effect of Fertilizer Application in Different Years on Crop Yields and Fertilizer Recovery [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1999, 20(04):20–23. doi: 10.1111/j.1551–2916.2012.05349.x.
- [18] AYENI L S. Combined effect of cattle dung and urea fertilizer on organic carbon, forms of nitrogen and available phosphorus in selected Nigerian soils [J]. *Journal of Central European Agriculture*, 2012, 13(3):610–616. doi: 10.5513/JCEA01/13.3.1098.
- [19] 陈连珠, 杨小锋, 黄小燕, 张雪彬, 白大娟, 柯用春. 不同施氮量对黄秋葵生长、产量及品质的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(5):77–81. doi: 10.3969/j.issn.1004–874X.2016.05.015.
- CHENG L Z, YANG X F, HUANG X Y, ZHANG X B, BAI D J, KE Y C. Effects of different nitrogen levels on the growth, yield and quality of okra [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(5):77–81. doi: 10.3969/j.issn.1004–874X.2016.05.015.
- [20] 姚春霞, 郭开秀, 赵志辉, 陈亦, 杨业凤, 陆利民. 减量施肥对三种蔬菜硝酸盐含量、营养品质和生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4):153–156.
- YAO C X, GUO K X, ZHAO Z H, CHEN Y, YANG Y F, LU L M. Effects of fertilizing decreasing on nitrate contents, nutritional quality and biological characteristics of three vegetables [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4):153–156.
- [21] 邱孝焯, 黄东风, 蔡顺香, 陈锋, 蔡元呈. 施肥对蔬菜硝酸盐累积的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 111–114.
- QIU X X, HHUANG D F, CAI S X, CHEN F, CAI Y C. Effect of applying fertilizer on nitrate accumulation in vegetables [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2):111–114.
- [22] 刘永刚, 陈利军, 武志杰. 蔬菜中硝酸盐的积累机制及其调控措施[J]. 土壤通报, 2006, 37(3):612–616. doi: 10.3321/j.issn:0564–3945.2006.03.045.
- LIU Y G, CHEN L J, WU Z J. The mechanism of nitrate accumulation in vegetables and its control measures [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3):612–616. doi: 10.3321/j.issn:0564–3945.2006.03.045.
- [23] 兰翔, 王婷, 杨春玲, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成. 不同施磷量对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016,

- 22(4):958-964. doi: 10.11674/zwyf.15245.
- LAN X, WANG T, YANG C L, HU C X, TAN Q L, SUN X C. Effects of different phosphorus application rates on soil nitrate leaching in vegetable fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4):958-964. doi: 10.11674/zwyf.15245.
- [24] 黄东风, 王果, 李卫华, 邱孝焯. 不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5):5-10. doi: 10.3321/j.issn:1009-2242.2008.05.002.
- HUANG D F, WANG G, LI W H, QIU X X. Effects of fertilization mode on growth and nutrition accumulation in vegetables, and loss of nitrogen and phosphorus in vegetable fields [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 22(5):5-10. doi: 10.3321/j.issn:1009-2242.2008.05.002.
- [25] 徐捷, 单立楠, 俞丹萍, 李竺霖, 何云峰. 不同施肥模式对甘蓝氮素利用与流失的影响 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2013, 39(5):556-564. doi: 10.3785/j.issn.1008-9209.2012.12.251.
- XU J, SHAN L N, YU D P, LI Z L, HE Y F. Effects of different fertilization modes on nitrogen use efficiency of cabbages and nitrogen loss from vegetable field [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2013, 39(5):556-564. doi: 10.3785/j.issn.1008-9209.2012.12.251.
- [26] 汤桂容, 周旋, 田昌, 彭辉辉, 张玉平, 荣湘民. 有机无机氮肥配施对蔬菜产量、品质及经济效益的影响 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5):1292-1299. doi: 10.13292/j.1000-4890.201705.003.
- TANG G R, ZHOU X, TIAN C, PENG H H, ZHANG Y P, RONG X M. Effects of combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizers on vegetable yield, quality and economic benefits [J]. *Journal of Ecology*, 2017, 36(5):1292-1299. doi: 10.13292/j.1000-4890.201705.003.
- [27] 周焱, 罗安程. 有机肥对大棚蔬菜品质的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2004, 16(4):210-212. doi: 10.3969/j.issn.1004-1524.2004.04.009.
- ZHOU Y, LUO A C. Effect of organic manure on the quality of vegetables in plastic-sheet-covered sheds [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2004, 16(4):210-212. doi: 10.3969/j.issn.1004-1524.2004.04.009.
- [28] YANG J, GAO W, REN S R. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 151:67-74. doi: 10.1016/j.still.2015.03.008
- [29] XU H L, WANG R, XU R Y, Mridha M A U. Yield and quality of leafy vegetables grown with organic fertilizations [J]. *Acta Horticulturae*, 2003(627):25-33. doi: 10.17660/actahortic.2003.627.2
- [30] 朱菜红, 董彩霞, 沈其荣, 徐春阳. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2):282-288. doi: 10.11674/zwyf.2010.0204.
- ZHU C H, DONG C X, SHEN Q R, XU C Y. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2):282-288. doi: 10.11674/zwyf.2010.0204.
- [31] 年耀萍, 夏体渊, 何明珠, 章君果, 达良俊. 养分管理对油菜菜氮磷养分利用率及硝酸盐累积的影响 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 2011(6):47-56. doi: 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.06.006.
- NIAN Y P, XIA TY, HE M Z, ZHANG J G, DA L J. Effects of nutrient management on nutrient utilization of N, P and nitrate accumulation in lettuce [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2011, 2011(6):47-56. doi: 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.06.006.
- [32] PAVINATO P S, MERLIN A A, ROSOLEM C A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(1):149-155. doi: 10.1016/j.still.2009.07.001.
- [33] 杨晓梅, 李桂花, 李贵春, 章君果, 达良俊. 有机无机配施比例对华北褐土冬小麦产量与氮肥利用率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014(4):48-52. doi: 10.11838/sfsc.20140409.
- YANG X M, LI G H, LI G C, ZHANG J G, DA J L. Effects of combined application of chemical fertilizer with manure on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in cinnamon soil on North China plain [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(4):48-52. doi: 10.11838/sfsc.20140409.
- [34] 吴立鹏, 张士荣, 娄金华, 魏立兴, 王凯荣, 丁效东. 有机无机配施对滨海盐渍化土壤磷含量及水稻生长、产量的影响 [J]. *华北农学报*, 2018(1):203-210. doi: 10.7668/hbxb.2018.01.029.
- WU L P, ZHANG S R, LOU J H, WEI L X, WANG K R, DING X D. Effects of organic-inorganic fertilizer on soil P, the yield and growth of rice in coastal saline soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2018, 33(1):203-210. doi: 10.7668/hbxb.2018.01.029.
- [35] WU Y, Li Y, ZHENG C, ZHANG Y F. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54:32-40. doi: 10.1016/j.ejsobi.2012.10.006.
- [36] 关天霞, 马国泰, 张昊, 景根茂. 不同类型畜禽粪便有机肥对辣椒产量及根际土壤酶活性的影响 [J]. *广东农业科学*, 2018, 45(11):53-59. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2018.11.009.
- ZHANG T X, MA G T, ZHANG H, JING G M. Effects of different types of livestock manure on pepper yield and enzyme activities in rhizosphere soils [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(11):53-59. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2018.11.009.
- [37] 王玉胜, 管成伟, 李旭华, 张启明, 叶为民, 张海伟. 饼肥配施对烤烟产质量与土壤改良的影响 [J]. *广东农业科学*, 2018, 45(3):45-50. doi: CNKI:SUN:GDNY.0.2018-03-009.
- WANG Y S, GUAN C W, LI X H, ZHANG Q M, YE W M, ZHANG H W. Effects of cake fertilizer on yield and quality of flue-cured tobacco and the improvement of soil properties [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(3):45-50. doi: CNKI: SUN: GDNY.0.2018-03-009.
- [38] 张风华, 廖文华, 刘建玲. 连续过量施磷和有机肥的产量效应及环境风险评价 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6):1280-1287. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2009.06.006.
- ZHANG F H, LIAO W H, LIU J L. Applications of phosphorus and organic fertilizers on yields of vegetables and their environmental impacts [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6):1280-1287. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2009.06.006.

(责任编辑 杨贤智)