

鸡粪对芸豆土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的影响

井大炜 王明友 张 红 李士平
(德州学院生态与园林建筑学院, 德州 253023)

摘要: 为探讨鸡粪与化肥不同比例配施对芸豆/玉米轮作土壤有机碳氧化稳定性及碳库管理指数的影响,通过2009—2014年大田试验,研究了 N_{100} (尿素提供100%的氮)、 $M_{10}N_{90}$ (鸡粪和尿素分别提供10%和90%的氮)、 $M_{30}N_{70}$ (鸡粪和尿素分别提供30%和70%的氮)和 $M_{50}N_{50}$ (鸡粪和尿素各提供50%的氮)等不同施肥处理对芸豆/玉米轮作土壤有机碳(TOC)、微生物量碳(MBC)、易氧化碳(ROC)含量及有机碳氧化稳定性与碳库管理指数(CPMI)的影响。结果表明, $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的TOC含量分别比 N_{100} 处理提高5.21%、12.74%和19.87%; $M_{30}N_{70}$ 处理的MBC、ROC含量和CPMI均最高,并显著高于其他处理,其中ROC含量分别较 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理提高54.03%、16.50%和10.43%,CPMI分别提高75.10、30.75和27.94;但 $M_{30}N_{70}$ 处理的有机碳氧化稳定系数显著低于其他处理,并较 N_{100} 处理下降35.95%。此外,该处理能显著提高芸豆产量,明显改善品质,且影响效果明显优于其他处理。相关性分析表明,芸豆产量、维生素C含量与MBC、ROC、有机碳氧化稳定系数和CPMI之间有极显著或显著的相关性,各指标间具有紧密的内在联系。综合分析认为,在芸豆/玉米轮作种植中配施鸡粪措施有利于提高土壤质量,增强土壤供肥性能,并促进芸豆的高产优质生长,其中鸡粪氮与尿素氮以3:7比例搭配的作用效果最佳。

关键词: 芸豆/玉米轮作; 鸡粪; 易氧化碳; 氧化稳定系数; 碳库管理指数

中图分类号: S529; S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0192-09

Effects of Chicken Manure Co-applied with Nitrogen Fertilizer on Soil Organic Carbon Oxidation Stability and Carbon Pool Management Index in Kidney Bean/Maize Rotation Soil

Jing Dawei Wang Mingyou Zhang Hong Li Shiping
(College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou 253023, China)

Abstract: According to the difference in the degree of difficulty or easiness of decomposition, the soil organic carbon can be divided into readily oxidizable organic carbon and hardly oxidizable organic carbon. The readily oxidizable organic carbon plays an important role in supplying ability of soil nutrient, while hardly oxidizable organic carbon contributes to stabilizing the soil structure, and it is related to the storage of soil organic carbon. Meanwhile, soil carbon pool management index (CPMI) can reflect the effects of external condition on soil organic carbon contents and active organic carbon contents, and comprehensively reflect the extent of decline or update of soil quality. However, there is little information on the effect of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer on soil organic carbon oxidation stability and CPMI, especially the study of kidney bean/maize rotation soil was scarcely reported. Therefore, for exploring the effect of chicken manure co-applied with nitrogen fertilizer in different proportions on soil organic carbon oxidation stability and CPMI in kidney bean/maize rotation soil, a field experiment, including four treatments, i. e., N_{100} (100% of nitrogen was provided by urea), $M_{10}N_{90}$

(10% and 90% of nitrogen was provided by chicken manure and urea, respectively), $M_{30}N_{70}$ (30% and 70% of nitrogen was provided by chicken manure and urea, respectively), and $M_{50}N_{50}$ (50% and 50% of nitrogen was provided by chicken manure and urea, respectively) were carried out. The aim was to determine the effects of different treatments on total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), readily oxidizable carbon (ROC) contents, organic carbon oxidation stability, as well as CPMI of kidney bean/maize rotation soil during the 2009—2014 period. Results indicated that the TOC contents of $M_{10}N_{90}$, $M_{30}N_{70}$ and $M_{50}N_{50}$ treatments were increased by 5.21%, 12.74% and 19.87% in comparison with the N_{100} treatment, respectively. The MBC and ROC contents and CPMI achieved the highest value in $M_{30}N_{70}$ treatment and had significant differences with other treatments, which showed 54.03%, 16.50% and 10.43% increases in ROC content and 75.10, 30.75 and 27.94 increases in CPMI, respectively, compared with those in treatments of N_{100} , $M_{10}N_{90}$ and $M_{50}N_{50}$. However, the oxidation stability index of organic carbon in $M_{30}N_{70}$ treatment was obviously lower than other treatments, which was reduced by 35.95% compared with N_{100} treatment. Furthermore, the $M_{30}N_{70}$ treatment could significantly increase yield and improve quality of kidney bean, which had statistically significant differences with other treatments. Correlation analysis revealed that yield and Vc content of kidney bean were significantly or extremely significantly correlated with microbial biomass carbon, readily oxidizable carbon, organic carbon oxidation stability and carbon pool management index in the soil, indicating close inner link among each indicator. In conclusion, the application of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer, especially the $M_{30}N_{70}$ treatment, was beneficial to soil quality amelioration and soil nutrient-supply capacity improvement as well as growth of high-yield and high-quality kidney bean in the rotation plantation.

Key words: kidney bean/maize rotation; chicken manure; readily oxidizable carbon; oxidation stability index; carbon pool management index

引言

芸豆 (*Phaseolus vulgaris* L.) 属豆科菜豆属植物,在中国栽培历史悠久,分布非常广泛^[1]。芸豆籽粒营养丰富,含蛋白质高达 16.0% ~ 30.8%^[2];其荚壳、茎叶中的蛋白含量也较高,比小麦、水稻等作物高 1 ~ 15 倍^[2-3]。同时,食用芸豆还可提高人体自身免疫力,增强抗病能力^[4]。芸豆具有较强的抗旱性和耐瘠薄能力,且生育期短、适应性广,在优质高效型农业发展中具有举足轻重的作用^[5]。目前芸豆/玉米轮作的实际种植中,施肥的盲目性仍然普遍存在,这不仅造成肥料的严重浪费,对生态环境构成潜在威胁;而且还使土壤理化性状变劣,严重制约了芸豆、玉米产量的提高与品质的改善。为了克服施肥的不合理性,促进农业可持续发展,探讨芸豆/玉米的合理优化施肥措施是当前亟待解决的关键问题。

氧化稳定性是土壤有机碳重要的性质之一,关系到土壤有机碳分解的难易程度以及养分释放等诸多方面^[6]。按照分解的难易程度,可把土壤有机碳划分为易氧化有机碳与难氧化有机碳两大类,易氧化有机碳在土壤供肥性方面发挥着重要作用,而难氧化有机碳有助于稳定土壤结构,且关系到土壤有

机碳的储存^[7]。袁可能^[8]提出用氧化稳定系数 (K_{os})来衡量土壤的氧化稳定性, K_{os} 值愈大,氧化稳定性愈大,反之则愈小。同时,由于土壤有机碳的背景值较高,与自然土壤分异性大,使整个土壤有机碳的细微变化很难被发现,因此探求土壤全碳的敏感指示因子尤为重要。有研究表明^[9],土壤有机碳的活性、氧化稳定性与碳库管理指数(CPMI)是反映土壤碳库的重要指标,对评价土壤有机质与土壤肥力状况具有重要意义。施用不同配比的有机-无机肥和土壤有机碳含量及碳质量紧密相关。何翠翠等^[10]对玉米-大豆轮作的长期定位试验研究认为,采用有机-无机肥配施能明显提高土壤活性有机碳含量和碳库管理指数;兰宇等^[11]对玉米-玉米-大豆轮作的长期定位研究表明,化肥配施有机肥可以显著增加土壤有机碳储量。同时,通过绿肥轮作也能提高土壤碳库管理指数,改善土壤质量,提高土壤肥力^[12]。还有研究发现,配施味精废浆有机肥对土壤碳库管理指数的提升亦有明显的效果^[13]。鸡粪是植物生产中优质的天然有机肥,与其它家禽家畜粪便相比养分含量居第一位^[14]。利用鸡粪生产研制的有机肥或有机-无机复合肥对农作物有显著的增产效应。据统计^[15],在西瓜或大白菜等作物上施鸡

粪有机肥,能增产 15% ~ 25%。许多学者针对鸡粪有机肥开展了大量研究,但应用于芸豆/玉米轮作的研究鲜有报道,尤其是关于芸豆/玉米轮作土壤的有机碳氧化稳定性及碳库管理指数变化规律的研究尚未见报道。为此,本研究拟选用北京永丰泰生物科技有限公司生产的鸡粪有机肥为供试原料,进行鸡粪有机肥与化肥的不同配比比例对芸豆/玉米轮作土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的研究,并探讨施肥措施对芸豆产量与品质的作用效果,旨在提高土壤质量管理与增强农业固碳减排潜力提供理论依据,也为芸豆种植的合理优化施肥提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验地点设在德州市九龙湾低碳生态农业循环经济产业园(36°24'N、115°45'E),地处黄河冲积平原,属温带大陆性季风气候区,四季分明,年平均日照时数 2 592 h,年平均气温 12.9℃,年平均降雨量 547.5 mm,平均无霜期达 208 d。该区域具有优质良好的水土资源,农作模式以小麦、玉米、马铃薯与蔬菜的轮作为主,采用集约管理方式,每年可获得显著的经济效益和生态效益。供试土壤为轻壤土,土壤碱解氮、速效磷和速效钾质量比分别为 98.02、41.29、102 mg/kg, pH 值为 7.16,有机碳质量比为 14.86 g/kg。供试鸡粪为北京永丰泰生物科技有限公司生产,N、P₂O₅和 K₂O 质量分数分别为 1.28%、1.31%和 2.47%,有机碳质量比为 215.69 g/kg;所用化肥为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。

1.2 试验设计

试验于 2009—2014 年连续进行了 6 年,自 2009 年开始实行轮作种植,按“玉米-芸豆-玉米-芸豆-玉米-芸豆”的轮作顺序。玉米品种为“郑单 958”,芸豆品种为“老来少”。芸豆、玉米统一采用田间小区试验,随机区组设计,并设置相同的处理,分别为:① CK,不施肥。② N₁₀₀,尿素提供 100% 的氮。③ M₁₀N₉₀,鸡粪和尿素分别提供 10% 和 90% 的氮。④ M₃₀N₇₀,鸡粪和尿素分别提供 30% 和 70% 的氮。⑤ M₅₀N₅₀,鸡粪和尿素各提供 50% 的氮。每个处理重复 6 次,每小区面积为 52 m² (6.5 m × 8.0 m),共计 30 个小区。通过前期研究得出^[16],玉米与芸豆的施肥量基本相当,所以,本试验中玉米、芸豆采用相同的施肥量。除 CK 外,各处理均为等养分量,N、P₂O₅、K₂O 施加量分别相当于 280.50、206.50、175.00 kg/hm²,各处理 P 与 K 不足部分分别用 CaP₂H₄O₈、K₂SO₄补足。

玉米分别于 2009 年 6 月 12 日、2011 年 6 月 15

日和 2013 年 6 月 13 日播种,株、行距为 25 cm、60 cm,播种密度为 6.7 万株/hm²,其中有机肥与化肥作为基肥一次性施入。

芸豆栽培行宽 50 cm,株距 40 cm,操作行距 100 cm。按试验要求撒施定量有机肥与化肥,深翻搅拌均匀后整地起垄,覆盖地膜。在 2010 年 4 月 15 日、2012 年 4 月 20 日和 2014 年 4 月 18 日分别用点播器点播芸豆,植株抽蔓后支人字架,架高 2.0 m。生长期间每 15 d 进行一次除草,生长后期及时去除基部黄叶。6 年试验期间的月平均降雨量和月平均高温/低温如表 1 所示。

表 1 试验期间月平均降雨量与月平均气温
Tab.1 Monthly precipitation and temperature during experiment period

气象参数	年份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
月平均 降雨量/ mm	2009 年	26.8	38.2	70.5	169.9	131.6	46.3
	2010 年	29.2	40.6	68.7	173.5	142.5	48.9
	2011 年	25.7	36.8	75.3	168.1	156.8	45.5
	2012 年	23.9	42.3	76.5	176.6	135.3	39.7
	2013 年	30.8	39.5	73.9	165.9	129.7	42.1
	2014 年	27.5	38.7	72.2	171.8	138.5	45.9
月平均 高温/ 低温/℃	2009 年	29/2	32/10	35/19	37/22	32/18	30/14
	2010 年	28/5	31/9	36/16	38/21	35/15	28/11
	2011 年	30/1	33/11	35/18	32/23	33/19	29/10
	2012 年	27/9	33/14	37/18	35/21	33/17	31/11
	2013 年	29/0	35/9	36/14	36/20	36/15	31/10
	2014 年	29/7	38/7	34/16	38/20	35/19	30/13

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤有机碳与碳库管理指数

在试验开始前,于 2009 年 4 月 13 日在每个小区按“S”型各选取 8 点,用土钻法取 0 ~ 20 cm 土层未经处理的土样,混合均匀后迅速带回实验室,用四分法取出适量土样作为参考土壤,重复 3 次;同时于 2014 年 8 月 25 日在各小区按相同的方法采集土样,重复 3 次,并将所取土样分为两部分:一部分新鲜土样过 2 mm 筛立即测定土壤微生物量碳,另一部分土样风干过 0.25 mm 筛后进行土壤有机碳等指标的测定。

土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定;土壤总有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法测定^[17];易氧化碳(ROC)采用文献[8]方法测定。

参考土壤的总有机碳质量比为 14.93 g/kg,易氧化碳质量比为 3.89 g/kg,土壤碳库管理指数的计算方法如下:碳库指数(CPI)为样品全碳含量(g/kg)/参考土壤全碳含量(g/kg);碳库活度(A)为活性碳含量/非活性碳含量;碳库活度指数(AI)为样品碳库活度/参考土壤碳库活度;碳库管理指数

$CPMI = CPI \times AI \times 100$; 氧化稳定系数 (K_{os}) 为稳定性有机碳/易氧化碳; 稳定性有机碳为总有机碳 - 易氧化碳。

1.3.2 芸豆产量与品质

在 2010、2012 和 2014 年的芸豆种植试验时期内,按照当地采摘习惯每年分别进行采收测产,并随机选取芸豆样品测定荚果品质,重复 5 次。芸豆的产量和品质指标均为这 3 年所测数据的平均值。其中荚果的维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定,可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法测定,游离氨基酸含量采用水合茚三酮法测定,硝酸盐含量采用紫外分光光度法测定^[18]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 处理数据并制图,采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析和多重比较 (LSD 法, $p < 0.05$)。图表中数据的形式为“平均值 ± 标准差”。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳和微生物量碳含量

由图 1 可以看出,不同施肥措施对芸豆/玉米轮作土壤有机碳含量具有显著影响。 N_{100} 处理与 CK 差异未达显著水平,而配施鸡粪处理则显著升高。与 N_{100} 处理相比, $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的有机碳含量分别提高 5.21%、12.74% 和 19.87%。在鸡粪与化肥的 3 个配施处理中, $M_{50}N_{50}$ 处理的有机碳含量最高,依次是 $M_{30}N_{70}$ 与 $M_{10}N_{90}$ 处理,其中 $M_{50}N_{50}$ 处理分别较 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{30}N_{70}$ 处理提高 13.93% 和 6.32%。说明随鸡粪所占比重的增加,土壤有机碳含量亦呈逐渐升高的趋势。

从图 1 还可知, N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的微生物量碳 (MBC) 含量分别较 CK 显著提高 20.17%、52.56%、76.18% 和 58.97%。表明不同施肥措施均能显著提高芸豆/玉米轮作土壤的微生物生物量碳。在施肥处理中, $M_{30}N_{70}$ 处理的 MBC 含量明显高于其他处理,分别较 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理提高 46.61%、15.48% 和 10.82%; 其次是 $M_{10}N_{90}$ 与 $M_{50}N_{50}$ 处理,两处理间差异未达显著水平,但均明显高于 N_{100} 处理。数据分析说明,配施鸡粪处理对土壤微生物量碳含量的增加幅度显著大于单施化肥。而在鸡粪与化肥配施处理中,随鸡粪所占比例的增大,土壤微生物量碳含量呈现先升后降的变化趋势,表明鸡粪氮与尿素氮以 3:7 比例搭配对土壤微生物量碳的影响作用最明显。

2.2 土壤易氧化碳与有机碳氧化稳定性

从表 2 可见,同 CK 相比, N_{100} 处理的易氧化碳

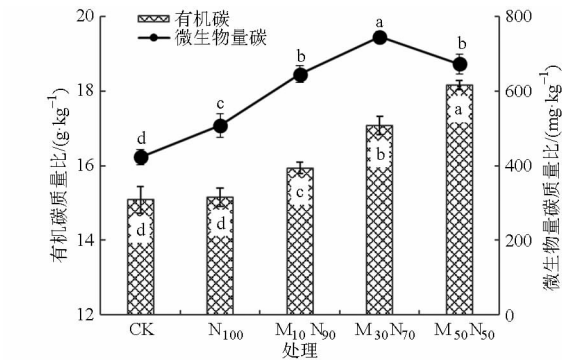


图 1 鸡粪与化肥配施对芸豆/玉米轮作土壤有机碳和微生物量碳质量比的影响

Fig. 1 Effect of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer on soil organic carbon and microbial biomass carbon contents of kidney bean/maize rotation

含量下降,但差异未达显著水平,而配施鸡粪处理的易氧化碳含量明显升高,其中 $M_{30}N_{70}$ 处理达最高值,并分别较 CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理提高 49.37%、54.03%、16.50% 和 10.43%。从易氧化碳占有有机碳的百分比可知,各处理的易氧化碳含量从多到少依次为: $M_{30}N_{70}$ 、 $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{50}N_{50}$ 、CK、 N_{100} 。 $M_{50}N_{50}$ 处理的稳定性有机碳含量显著高于其他处理,而其他处理之间的差异均不显著。从表 2 还可知,各处理的稳定性有机碳占有有机碳百分比及氧化稳定系数呈现出一致的变化规律,由多到少依次为: N_{100} 、CK、 $M_{50}N_{50}$ 、 $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$,可见 N_{100} 处理明显高于配施鸡粪处理,但与 CK 无显著性差异;在鸡粪与化肥的配施处理中, $M_{30}N_{70}$ 处理的稳定性有机碳占有有机碳百分比及氧化稳定系数均明显低于其他处理,其中氧化稳定系数分别较 CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理降低 32.88%、35.95%、11.80% 和 21.07%。以上分析认为,鸡粪与尿素搭配较单施尿素能明显提高土壤易氧化碳含量,且显著降低氧化稳定系数,其中以 3:7 比例搭配的作用效果最佳。

2.3 土壤碳库管理指数

表 3 中 CKT 表示参考土壤,是试验开始前每个处理的土样混匀后的测定结果。可以看出,各个处理 CPI 的变化规律与有机碳含量基本一致。 $M_{30}N_{70}$ 处理的 A、AI 和 CPMI 均达最高值,并明显高于其他处理,其中 CPMI 分别较 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理提高 75.10、30.75 和 27.94。 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的 A、AI 和 CPMI 也明显高于 CK 和 N_{100} 处理,其中 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理之间的 A、CPMI 差异未达显著水平,而 $M_{10}N_{90}$ 处理的 AI 显著高于 $M_{50}N_{50}$ 处理。由此分析可知,同单施尿素相比,鸡粪与尿素配施措施更有助于提高土壤的碳库管理指数,而在配施处理中,以 3:7 比例搭配的作用效果最显著。

表 2 鸡粪与化肥配施对芸豆/玉米轮作土壤易氧化碳与氧化稳定系数的影响

Tab.2 Effect of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer on readily oxidizable carbon and oxidation stability index in kidney bean/maize rotation soil

处理	易氧化碳质量比/ (g·kg ⁻¹)	易氧化碳占有机碳 百分比/%	稳定性有机碳质量比/ (g·kg ⁻¹)	稳定性有机碳占有机碳 百分比/%	氧化稳定系数 K _{ox}
CK	3.97 ± 0.08 ^d	26.31 ± 0.85 ^d	11.12 ± 0.20 ^b	73.69 ± 0.71 ^a	2.80 ± 0.09 ^a
N ₁₀₀	3.85 ± 0.14 ^d	25.41 ± 1.05 ^d	11.30 ± 0.49 ^b	74.59 ± 0.65 ^a	2.94 ± 0.07 ^a
M ₁₀ N ₉₀	5.09 ± 0.05 ^c	31.93 ± 0.62 ^b	10.85 ± 0.18 ^b	68.07 ± 1.02 ^c	2.13 ± 0.05 ^c
M ₃₀ N ₇₀	5.93 ± 0.07 ^a	34.72 ± 0.81 ^a	11.15 ± 0.33 ^b	65.28 ± 1.16 ^d	1.88 ± 0.12 ^d
M ₅₀ N ₅₀	5.37 ± 0.12 ^b	29.57 ± 0.47 ^c	12.79 ± 0.26 ^a	70.43 ± 0.53 ^b	2.38 ± 0.05 ^b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$),下同。

表 3 鸡粪与化肥配施对芸豆/玉米轮作土壤碳库管理指数的影响

Tab.3 Effect of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer on CPMI in kidney bean/maize rotation soil

处理	碳库指数 CPI	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库管理指数 CPMI
CKT	1.00 ± 0.00 ^d	0.35 ± 0.00 ^c	1.00 ± 0.00 ^d	100.00 ± 0.00 ^c
CK	1.01 ± 0.03 ^d	0.36 ± 0.03 ^c	1.02 ± 0.05 ^d	103.17 ± 5.76 ^c
N ₁₀₀	1.02 ± 0.01 ^d	0.34 ± 0.05 ^c	0.97 ± 0.08 ^d	98.85 ± 2.32 ^c
M ₁₀ N ₉₀	1.07 ± 0.03 ^c	0.47 ± 0.02 ^b	1.34 ± 0.07 ^b	143.20 ± 5.08 ^b
M ₃₀ N ₇₀	1.14 ± 0.02 ^b	0.53 ± 0.03 ^a	1.52 ± 0.05 ^a	173.95 ± 4.91 ^a
M ₅₀ N ₅₀	1.22 ± 0.02 ^a	0.42 ± 0.02 ^b	1.20 ± 0.03 ^c	146.01 ± 7.25 ^b

2.4 芸豆产量和品质

从表 4 可以看出,不同施肥措施对芸豆产量和荚果品质产生了明显的影响。各施肥处理较对照均显著提高了芸豆产量;而在施肥处理中,M₃₀N₇₀处理的产量显著高于其他处理,分别较 CK、N₁₀₀、M₁₀N₉₀和 M₅₀N₅₀处理高 36.02%、20.15%、10.23% 和 8.29%;其次是M₅₀N₅₀、M₁₀N₉₀处理,亦明显高于 N₁₀₀

处理。同 CK 相比,N₁₀₀处理使荚果的维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸含量均出现下降趋势,其中维生素 C 含量差异达显著水平;而配施鸡粪处理均显著提高了荚果的上述指标含量,其中 M₃₀N₇₀处理使荚果的维生素 C、可溶性糖和游离氨基酸含量均达最高值,并明显高于其他处理,分别较 N₁₀₀处理提高 42.25%、40.69% 和 50.88%,同时,M₃₀N₇₀处理的荚果可溶性蛋白含量与 M₅₀N₅₀处理无显著性差异,但明显高于 M₁₀N₉₀处理。此外,M₅₀N₅₀处理的维生素 C 和游离氨基酸含量显著高于 M₁₀N₉₀处理,而可溶性糖含量与 M₁₀N₉₀处理差异不显著。从表 4 还可知,各处理的荚果硝酸盐含量大小依次为:N₁₀₀、CK、M₁₀N₉₀、M₅₀N₅₀、M₃₀N₇₀,其中 M₃₀N₇₀处理分别较 CK、N₁₀₀、M₁₀N₉₀和 M₅₀N₅₀处理降低 22.89%、35.58%、21.07% 和 8.96%。由此可见,鸡粪与尿素配施措施较单施尿素能显著提高芸豆产量,并明显改善荚果品质,且随着鸡粪所占比例的增大,其产量和品质呈现出先升后降的变化趋势。

表 4 鸡粪与化肥配施对芸豆产量和品质的影响

Tab.4 Effect of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer on yield and quality of kidney bean

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	维生素 C 质量比/ (mg·(100 g) ⁻¹)	可溶性糖质量比/ (mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白质量比/ (mg·g ⁻¹)	游离氨基酸质量比/ (mg·kg ⁻¹)	硝酸盐质量比/ (mg·kg ⁻¹)
CK	2 085.35 ± 69.20 ^d	18.45 ± 0.29 ^d	13.89 ± 0.45 ^c	6.16 ± 0.08 ^c	232.91 ± 8.75 ^d	332.72 ± 6.21 ^b
N ₁₀₀	2 360.73 ± 51.16 ^c	17.28 ± 0.33 ^c	13.54 ± 0.20 ^c	6.08 ± 0.12 ^c	218.62 ± 9.82 ^d	398.29 ± 10.36 ^a
M ₁₀ N ₉₀	2 573.26 ± 32.58 ^b	19.91 ± 0.87 ^c	15.23 ± 0.59 ^b	6.59 ± 0.07 ^b	267.53 ± 9.06 ^c	325.06 ± 8.05 ^b
M ₃₀ N ₇₀	2 836.52 ± 49.27 ^a	24.58 ± 0.75 ^a	19.05 ± 1.26 ^a	6.96 ± 0.07 ^a	329.85 ± 7.25 ^a	256.57 ± 6.89 ^d
M ₅₀ N ₅₀	2 619.39 ± 65.03 ^b	22.62 ± 0.41 ^b	15.92 ± 0.32 ^b	6.85 ± 0.06 ^a	303.76 ± 6.31 ^b	281.82 ± 12.95 ^c

2.5 相关性分析

对芸豆/玉米轮作土壤有机碳、易氧化碳、有机碳氧化稳定性和碳库管理指数及芸豆产量、品质进行相关分析结果表明(表 5),有机碳与微生物量碳、易氧化碳呈显著正相关,易氧化碳与微生物量碳呈极显著正相关,说明不同类型的有机碳之间存在着相互转化的关系;氧化稳定系数与微生物量碳、易氧

化碳呈极显著负相关,这表明增加土壤微生物量碳或易氧化碳含量有利于减弱有机质的氧化稳定性,从而提高有机质活性,增强土壤的供肥性能;CPMI 与微生物量碳、易氧化碳呈极显著正相关,与氧化稳定系数呈极显著负相关,而与有机碳无显著相关性,说明 CPMI 与微生物量碳、易氧化碳的相关性均高于它与有机碳的相关性,可见,微生物量碳和易氧化

碳既区别于总有机碳,又与总有机碳紧密关联,是土壤总有机碳的一部分。芸豆产量与微生物量碳、易氧化碳、CPMI 极显著正相关,与氧化稳定系数显著负相关;芸豆维生素 C 含量与微生物量碳、易氧化碳、CPMI 极显著或显著正相关,与氧化稳定系数显著负相关;芸豆硝酸盐含量与易氧化碳、CPMI 呈显

著负相关关系。表明土壤有机碳的氧化稳定系数愈低、碳库管理指数愈高,愈有利于提高芸豆的产量和改善品质。这进一步说明土壤中不同类型有机碳、氧化稳定系数及碳库管理指数之间是相互影响、相互制约的,也表明芸豆/玉米对鸡粪的响应是多种生物学过程综合作用的结果。

表 5 芸豆/玉米轮作土壤有机碳氧化稳定性、碳库管理指数与芸豆产量、品质的相关性分析

Tab.5 Correlation analysis of organic carbon oxidation stability, carbon pool management index in kidney bean/maize rotation soil with yield and quality of kidney bean

指标	TOC	MBC	ROC	SOC	K _{os}	CPMI	产量	维生素 C
MBC	0.857 *							
ROC	0.865 *	0.968 **						
SOC	0.752	0.254	0.363					
K _{os}	-0.628	-0.906 **	-0.955 **	0.169				
CPMI	0.767	0.951 **	0.946 **	0.291	-0.972 **			
产量	0.746	0.922 **	0.939 **	0.282	-0.868 *	0.962 **		
维生素 C	0.802	0.889 *	0.916 **	0.357	-0.859 *	0.951 **	0.795	
硝酸盐	-0.793	-0.755	-0.890 *	-0.316	0.818	-0.895 *	-0.687	-0.569

注：* 表示显著性相关($p < 0.05$), ** 表示极显著性相关($p < 0.01$)。

3 讨论

关于单施化肥对土壤有机碳含量的影响作用说法不一致:土壤有机碳含量可能降低、升高或维持平衡^[19-20],其提高有机碳的主因在于化肥能促进作物生长,增加作物根茬和枝叶等残留量。反之,施用化肥,尤其氮肥,将加快消耗土壤固有的有机碳,使土壤中有机碳的积累量减少^[21]。本试验中,单施化肥对土壤有机碳含量的影响不显著,可能与芸豆、玉米的生长期较短有关,有机碳积累较少。而配施鸡粪处理的有机碳含量明显高于对照与单施化肥,这与李翀等^[22]在毛竹林上的研究结论相似。其原因在于:鸡粪不仅增加了土壤的有机碳库,还能增加作物归还土壤的根茬量,同时增强根系与微生物的活性,从而相应增加进入土壤的有机残体数量与根系分泌物^[23]。进一步分析发现,在配施鸡粪处理中,土壤有机碳含量随鸡粪所占比重的增加亦呈递增趋势,这一方面可能是所带入土壤的有机质量随鸡粪比例的增大而相应增多;另一方面可能是鸡粪氮与尿素氮以 1:9 和 3:7 比例配施,较 5:5 比例能更显著地降低土壤 C/N 值,故使有机碳的矿化分解进一步加快^[24]。

土壤微生物量碳和输入到土壤中有有机碳源的生物有效性紧密相关^[25-26]。本研究得出,配施鸡粪处理较对照和单施化肥能显著提高土壤微生物量碳含量,这与李文军等^[27]在水稻土上的研究结论基本一致。本研究还发现,鸡粪氮与尿素氮以 3:7 比例搭配的效果明显优于 1:9 与 5:5 比例,究其原因在于:

①鸡粪本身是一种含碳氮比较低的有机肥,而 3:7 比例搭配能使较多的有机肥被微生物分解转化为分子量低的有机质,并被微生物吸收成为其机体的一部分,从而既能增加土壤中低分子量的有机碳,也能更大程度地提高土壤微生物碳库^[28]。②3:7 比例搭配能提高养分的有效性,且较好地改善了土壤的理化性状,显著刺激了土壤微生物群落与活性^[29],有助于微生物的大量繁殖,从而显著增加微生物量碳。

氧化稳定性与腐殖质的抗氧化能力密切相关,并影响到土壤肥力的发挥^[30]。有研究表明^[31],K_{os} 值愈大,有机质的活性就愈低,土壤的供肥性能也相对越差。本研究得出,单施化肥措施使土壤易氧化碳含量下降,K_{os} 值增大,但与对照差异未达显著水平,而张春霞等^[32]对黑垆土长期轮作培肥的研究则认为,单施化肥能显著降低土壤易氧化碳含量,且明显增大 K_{os} 值,这与本研究结论不完全一致,造成这一差异可能与作物种类、土壤基础肥力及施肥周期等因素有关。鸡粪与化肥配施处理能明显提高易氧化碳含量,并显著减小 K_{os} 值,其中 3:7 比例的效果最明显。这可能是由于 3:7 比例配施更利于稳定性有机碳向易氧化碳的转变,从而提高有机质的活性。同时从相关性分析也表明,氧化稳定系数与易氧化碳含量呈极显著负相关关系。这既说明配施鸡粪可提高有机质质量,增强土壤对养分的供应、贮存能力,提高土壤肥力水平;同时也印证了鸡粪与化肥的搭配比例至关重要。

土壤碳库管理指数反映了外界条件对土壤有机

碳数量的影响与活性有机碳数量的变化,能比较全面地反映土壤质量的下降或更新程度^[33]。有研究认为^[34],碳库管理指数越大,土壤不稳定有机碳库的更新速度越快,土壤腐殖质与通气性亦显著提高,从而有利于作物生长发育。本试验研究表明,配施鸡粪处理较单施化肥能显著提高CPMI,同时从相关性分析可知,CPMI与土壤微生物量碳、易氧化碳含量和氧化稳定系数呈极显著相关关系,这进一步验证了鸡粪与化肥配施对土壤的培肥效应,能使土壤处于良性的管理状态;而单施化肥则使土壤质量呈下降趋势,管理措施不科学。此外,本研究还发现,在长期的芸豆/玉米轮作体系中,鸡粪与氮肥配施能改善土壤通气性、保水性,改良土壤结构,有效提高土壤肥力,这有助于增强根系活性,促进芸豆根瘤菌的活动^[35-36],从而对芸豆的固氮能力表现出正效应;而固氮能力的提高,可进一步增加土壤的供氮性,有利于刺激作物根系的生长发育,使根系分泌物、脱落物增多,并增强土壤生物学性状^[14],从而有助于提高土壤活性有机碳和CPMI。芸豆的生长发育受到多种因素的影响,配施鸡粪有机肥能改善土壤的供肥性能,进而促进芸豆生长。本研究得出,鸡粪氮与尿素氮以3:7比例搭配能使芸豆的产量和荚果品质显著优于其他处理。通过相关分析表明,芸豆产量、维生素C含量与微生物量碳、易氧化碳、氧化稳定系数和碳库管理指数之间呈极显著或显著的

相关关系。这说明土壤有机碳氧化稳定性的降低与碳库管理指数的提升,能改善芸豆根系生长的微生态环境条件,有利于促进芸豆的高产优质生长。

4 结论

(1) 化肥中配施鸡粪较单施化肥能明显提高芸豆/玉米轮作土壤的有机碳含量,且随着鸡粪所占比重增加,其提高幅度呈递增的趋势。

(2) 化肥中配施鸡粪显著提高了芸豆/玉米轮作土壤的微生物量碳、易氧化碳含量和碳库管理指数,其中3:7比例搭配处理的微生物量碳、易氧化碳含量与碳库管理指数均最高,并明显高于1:9和5:5比例搭配处理。

(3) 化肥中配施鸡粪能明显降低芸豆/玉米轮作土壤的有机碳氧化稳定系数,其中3:7比例搭配处理显著低于其他处理;同时,该处理既能明显提高芸豆产量,还可显著改善其品质。相关性分析表明,芸豆产量、维生素C含量与微生物量碳、易氧化碳、氧化稳定系数和碳库管理指数之间存在极显著或显著的相关关系,各指标间具有密切的内部关联。

(4) 在芸豆/玉米轮作种植中配施鸡粪措施有利于提高土壤质量,增强土壤供肥性能,并促进芸豆的高产优质生长,其中鸡粪氮与尿素氮以3:7比例搭配的作用效果最佳。

参 考 文 献

- 高运青,徐东旭,尚启兵,等.华北高寒区施肥量对芸豆产量和经济效益的影响[J].河北农业科学,2012,16(8):28-30.
Gao Yunqing, XU Dongxu, Shang Qibing, et al. Effects of fertilization rate on yield and economic benefit of kidney bean in cold plateau of north china [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2012, 16(8): 28-30. (in Chinese)
- 李俊华,刘建国,冯玉龙,等.施肥量对奶花芸豆产量效应和养分吸收的影响[J].土壤,2007,39(6):1004-1008.
LI Junhua, LIU Jianguo, FENG Yulong, et al. Effect of fertilization amount on *Phaseolus vulgaris* yield and nutrient absorption [J]. Soils, 2007, 39(6): 1004-1008. (in Chinese)
- 赵彬,王昭礼,余莉,等.黔西北地区芸豆高产栽培氮磷钾最佳施肥技术研究[J].中国农学通报,2012,28(7):151-154.
ZHAO Bin, WANG Zhaoli, YU Li, et al. Study on optimum application of N, P and K fertilizers in kidney bean of northwest guizhou [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(7): 151-154. (in Chinese)
- 杨启,马茂亭,赵丽平,等.不同施氮处理对芸豆产量和品质的影响[J].北方园艺,2014(13):176-180.
YANG Qi, MA Maoting, ZHAO Liping, et al. Effect of different nitrogen fertilizer treatments on yield and quality of greenhouse kidney bean [J]. Northern Horticulture, 2014(13): 176-180. (in Chinese)
- 曾玲玲,崔秀辉,李清泉,等.氮磷钾配施对芸豆产量的效应研究[J].黑龙江农业科学,2013(2):39-43.
ZENG Lingling, CUI Xiuhui, LI Qingquan, et al. Study on the effects of application ratios of nitrogen, phosphorus and potassium on yield of kidney bean [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013(2): 39-43. (in Chinese)
- 董雪,王春燕,黄丽,等.侵蚀程度对不同粒径团聚体中养分含量和红壤有机质稳定性的影响[J].土壤学报,2015,50(3):525-533.
DONG Xue, WANG Chunyan, HUANG Li, et al. Effect of erosion on nutrient content in aggregates of different particle-size fractions and stability of organic matter in ultisols [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 50(3): 525-533. (in Chinese)
- 花可可,朱波,杨小林,等.长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响[J].农业机械学报,2014,45(10):167-174.
HUA Keke, ZHU Bo, YANG Xiaolin, et al. Effects of long-term different fertilization on soil aggregates and organic carbon fractions on sloping upland of purple soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 167-174. (in Chinese)

- 8 袁可能. 土壤有机矿质复合体的研究 I: 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J]. 土壤学报, 1963, 11(3): 286 – 293.
YUAN Keneng. Studies on the organo-mineral complex in soil I. the oxidation stability of humus from different organo-mineral complexes in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1963, 11(3): 286 – 293. (in Chinese)
- 9 佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 等. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 466 – 473.
TONG Xiaogang, HAN Xinhui, YANG Gaihe, et al. Carbon management index as an indicator for changes in soil organic carbon pool under conversion from cropland to forestland [J]. China Environmental Science, 2013, 33(3): 466 – 473. (in Chinese)
- 10 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 194 – 202.
HE Cuicui, WANG Ligang, WANG Yingchun, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 194 – 202. (in Chinese)
- 11 兰宇, Muhammad I A, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 264 – 270.
LAN Yu, Muhammad I A, HAN Xiaori, et al. Effect of long-term fertilization on total organic carbon storage and carbon sequestration rate in a brown soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1): 264 – 270. (in Chinese)
- 12 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 146 – 152.
LAN Yan, HUANG Guoqin, YANG Binjuan, et al. Effect of greenmanure rotation on soil fertility and organic carbon pool [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 146 – 152. (in Chinese)
- 13 井大炜, 邢尚军, 刘方春, 等. 配施味精废浆促进杨树生长提高土壤活性有机碳及碳库管理指数[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊): 124 – 131.
JING Dawei, XING Shangjun, LIU Fangchun, et al. Applied monosodium glutamate wastewater promoting poplar growth, improving soil active organic carbon and carbon pool management index [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Suppl.): 124 – 131. (in Chinese)
- 14 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 Dawei, XING Shangjun. Effects of chicken manure mixed with inorganic fertilizer on soil enzyme activities, microbial biomass C and N at rhizosphere of poplar seedlings [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(2): 455 – 461. (in Chinese)
- 15 刘高峰. 有机营养对烤烟生理代谢与品质影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2006.
LIU Gaofeng. Studies on the effects of organic nutrients on metabolism, yield and quality of flue-cured tobacco [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2006. (in Chinese)
- 16 井大炜. 优化施氮对高产小麦/玉米间作产量和氮利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2008(9): 55 – 57, 60.
JING Dawei. Effect of optimum nitrogen fertilization on grain yield and nitrogen use efficiency of wheat and maize by high-yielding intercropping [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2008(9): 55 – 57, 60. (in Chinese)
- 17 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 18 王京伟, 牛文全, 许健, 等. 覆膜滴灌对日光温室甜瓜土壤环境及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 232 – 241.
WANG Jingwei, NIU Wenquan, XU Jian, et al. Effects of drip irrigation under plastic film on muskmelon soil environment and yield in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 232 – 241. (in Chinese)
- 19 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 157 – 164.
FAN Hongzhu, ZHANG Jianhui, WANG Yong, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of Northern Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 157 – 164. (in Chinese)
- 20 蔡苗, 孟延, Mohammad A A, 等. 长期不同施肥对玉米根茬生物量及养分累积量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2387 – 2396.
CAI Miao, MENG Yan, Mohammad A A, et al. Effects of long-term different fertilizations on biomass and nutrient content of maize root [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2387 – 2396. (in Chinese)
- 21 李萍萍, 林永锋, 胡永光. 有机肥与化肥配施对茶叶生长和土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 64 – 69.
LI Pingping, LIN Yongfeng, HU Yongguang. Effects of compound application of organic and chemical fertilizers on growth, quality of tea plants and soil nutrient [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 64 – 69. (in Chinese)
- 22 李翀, 周国模, 施拥军, 等. 不同经营措施对毛竹林土壤有机碳的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(4): 26 – 35.
LI Chong, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, et al. Effects of different management measures on soil carbon in bamboo forest ecosystems [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(4): 26 – 35. (in Chinese)
- 23 卢丽兰, 杨新全, 赵世翔, 等. 有机肥与化肥配施对广藿香生长、品质及土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 184 – 191.
LU Lilan, YANG Xinquan, ZHAO Shixiang, et al. Effects of compound application of organic and chemical fertilizers on growth, quality of *Pogostemon cablin* and soil nutrient [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,

- 46(10): 184 – 191. (in Chinese)
- 24 PAN G, ZHOU P, LI Z, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 131(3 – 4): 274 – 280.
- 25 杨宇虹, 晋艳, 黄建国, 等. 长期施肥对植烟土壤微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1186 – 1193.
YANG Yuhong, JIN Yan, HUANG Jianguo, et al. Effects of long-term fertilization on soil microorganisms in tobacco fields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1186 – 1193. (in Chinese)
- 26 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445 – 1451.
ZANG Yifei, HAO Mingde, ZHANG Liqiong, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445 – 1451. (in Chinese)
- 27 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 488 – 500.
LI Wenjun, PENG Baofa, YANG Qiyong. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 488 – 500. (in Chinese)
- 28 张亚杰, 钱慧慧, 刘坤平, 等. 施肥对玉米/大豆套作土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(3): 29 – 36.
ZHANG Yajie, QIAN Huihui, LIU Kunping, et al. Effect of fertilization on soil active organic carbon and carbon pool management index under maize/soybean intercropping condition [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(3): 29 – 36. (in Chinese)
- 29 徐香茹, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 753 – 760.
XU Xiangru, CAI Andong, XU Minggang, et al. Characteristics of organic carbon stabilization in paddy soil under long-term different fertilization [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(4): 753 – 760. (in Chinese)
- 30 徐云岩, 宫渊波, 付万权, 等. 川南马尾松低效林不同改造措施对土壤碳、氮特征及其碳稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 225 – 230.
XU Yunyan, GONG Yuanbo, FU Wanquan, et al. Effect of different reform measures on soil carbon and nitrogen characteristics and carbon stability in low efficiency forest of *Pinus massoniana* in southern Sichuan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 225 – 230. (in Chinese)
- 31 刘梦云, 付东磊, 常庆瑞, 等. 黄土台塬不同土地利用方式对土壤有机碳氧化稳定性及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12): 2415 – 2424.
LIU Mengyun, FU Donglei, CHANG Qingrui, et al. Effects of land-use type on soil organic carbon oxidability and enzyme activities in the tablelands of the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(12): 2415 – 2424. (in Chinese)
- 32 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 黑垆土长期轮作培肥土壤有机质氧化稳定性的研究[J]. 土壤肥料, 2004(3): 10 – 16.
ZHANG Chunxia, HAO Mingde, WEI Xiaorong, et al. Study of long-term rotation and fertilizations on black loessal soil on the oxidation stability of soil organic matter [J]. Soil Fertilizer, 2004(3): 10 – 16. (in Chinese)
- 33 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1223 – 1228.
WANG Shuolin, YANG Yanju, WANG Gailan, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic carbon in cinnamon soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1223 – 1228. (in Chinese)
- 34 苏丽丽, 徐文修, 李亚杰, 等. 耕作方式对干旱绿洲滴灌复播大豆农田土壤有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 150 – 156.
SU Lili, XU Wenxiu, LI Yajie, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon in soybean soil of drip irrigation in arid oasis [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 150 – 156. (in Chinese)
- 35 李亚杰, 徐文修, 苏丽丽, 等. 水氮管理对麦后复播大豆土壤固碳效应和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 524 – 531.
LI Yajie, XU Wenxiu, SU Lili, et al. Effects of water and nitrogen management on soil carbon sequestration and soybean yields in wheat-soybean cropping fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3): 524 – 531. (in Chinese)
- 36 徐蒋来, 胡乃娟, 张政文, 等. 连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 71 – 75.
XU Jianglai, HU Naijuan, ZHANG Zhengwen, et al. Effects of continuous straw returning on soil nutrients and carbon pool in rice-wheat rotation system [J]. Soils, 2016, 48(1): 71 – 75. (in Chinese)