

不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳、氮的影响

王文锋¹, 李春花¹, 黄绍文^{1*}, 高伟², 唐继伟¹

(1 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;

2 天津市农业资源与环境研究所, 天津 300192)

摘要:【目的】本文利用天津日光温室蔬菜不同施肥模式定位试验, 研究了不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳、氮含量的影响, 为设施蔬菜高效施肥和菜田土壤可持续利用提供依据。【方法】调查在第9茬蔬菜(秋冬茬芹菜)和第10茬蔬菜(春茬番茄)进行。定位试验设8个处理, 分别为: 1) 不施氮; 2) 全部施用化肥氮(4/4CN); 3) 3/4化肥氮+1/4猪粪氮(3/4CN+1/4PN); 4) 2/4化肥氮+2/4猪粪氮(2/4CN+2/4PN); 5) 1/4化肥氮+3/4猪粪氮(1/4CN+3/4PN); 6) 2/4化肥氮+1/4猪粪氮+1/4秸秆氮(2/4CN+1/4PN+1/4SN); 7) 2/4化肥氮+2/4秸秆氮(2/4CN+2/4SN); 8) 农民习惯施肥(CF), 除不施氮肥和农民习惯施肥外, 其余处理为等氮磷钾处理。在不同生育时期, 采0—20 cm土壤样品, 测定土壤微生物量碳、氮含量, 并分析其与蔬菜产量之间的关系。【结果】两茬蔬菜不同施肥模式土壤微生物量碳、氮含量总体上均随生育期的推进呈先增后降的趋势。芹菜季较高土壤微生物量碳含量出现在定植后90 d, 土壤微生物量氮较高含量出现在定植后60 d; 番茄季分别出现在定植后20~80 d和60 d。芹菜季5个有机无机肥料配施模式土壤微生物量碳、氮含量分别在185.0~514.6和34.3~79.1 mg/kg之间, 较化肥(4/4CN)模式平均分别增加15.1%~81.7%和24.5%~100.0%, 其中以配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量相对较高, 平均分别增加62.0%~81.7%和81.1%~100.0%; 番茄季5个有机无机肥料配施模式土壤微生物量碳、氮含量分别在120.7~338.0和25.5~68.8 mg/kg之间, 较4/4CN模式平均分别增加16.9%~86.9%和12.2%~109.3%, 又以配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量最高, 平均分别增加61.4%~86.9%和78.2%~109.3%。两季蔬菜不同生育期土壤微生物量碳、氮含量与当季蔬菜产量和定位试验开始以来蔬菜总产量之间均呈极显著正相关关系。【结论】同等养分投入量下, 有机无机肥料配合施用提高土壤微生物量碳、氮的效果显著好于单施化肥, 又以化肥配施秸秆效果更佳; 土壤微生物量碳、氮含量与设施蔬菜产量之间呈极显著正相关关系。证明有机无机肥配施, 特别是配施一定量的秸秆可有效提高土壤微生物量碳、氮含量, 维持较高的菜田土壤肥力, 有利于设施蔬菜的可持续和高效生产。

关键词: 施肥模式; 设施菜田; 土壤微生物量碳、氮

中图分类号: S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)05-1286-12

Effects of different fertilization patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in greenhouse vegetable soil

WANG Wen-feng¹, LI Chun-hua¹, HUANG Shao-wen^{1*}, GAO Wei², TANG Ji-wei¹

(1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture /Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin 300192, China)

Abstract: 【Objectives】A fixed-site greenhouse vegetable fertilization experiment has been carried out with rotation of tomato in spring season and celery in autumn-winter season in Tianjin city since 2009. The effects of different fertilization patterns on soil microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) were investigated in order to provide a scientific fertilization basis for sustainable and high-efficient vegetable

收稿日期: 2015-01-27 接受日期: 2015-05-15 网络出版日期: 2016-01-26

基金项目: 国家重点研发计划支持项目(2016YFD0201000); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25-C-11); 公益性行业(农业)科研专项(201203095)资助。

作者简介: 王文锋(1988—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事肥料资源利用研究。

* 通信作者 Tel: 010-82108662, E-mail: huangshaowen@caas.cn

production in greenhouse. **【 Methods 】** The experiment comprises eight treatments: 1) No nitrogen input (No N); 2) Complete chemical nitrogen fertilizer (4/4CN); 3) 3/4 N from chemical fertilizer, 1/4 from pig manure (3/4CN + 1/4PN); 4) 2/4 N from chemical fertilizer, 2/4 from pig manure (2/4CN + 2/4PN); 5) 1/4 N from chemical fertilizer, 3/4 from pig manure (1/4CN + 3/4PN); 6) 2/4 N from chemical fertilizer, 1/4 from pig manure and 1/4 from straw (2/4CN + 1/4PN + 1/4SN); 7) 2/4 N from chemical fertilizer, 2/4 from straw (2/4CN + 2/4SN); and 8) Conventional fertilization (CF). Except for No nitrogen and CF treatments, all the treatments were applied with the same amounts of N, P₂O₅ and K₂O nutrients, but varied proportion of nitrogen from different sources. Until this investigation, it was the ninth harvest for autumn-winter season celery and the tenth harvest for spring season tomato. 0–20 cm surface soil samples were collected, the soil MBC and MBN contents were measured at different growth stages of celery and tomato growing seasons, and their correlations with vegetable yields were analyzed. **【 Results 】** 1) Soil MBC and MBN contents in different treatments increased first and then decreased during the studied periods. The relatively higher values for soil MBC and MBN contents respectively appeared at 90 and 60 days after transplanting of celery, and at 20–80 days for soil MBC and 60 days for soil MBN after transplanting of tomato. 2) In the celery season when it was in autumn-winter, the soil MBC and MBN contents were respectively 185.0–514.6 and 34.3–79.1 mg/kg, with increases of 15.1%–81.7% and 24.5%–100.0% in treatments of combined application of manure and/or straw with chemical fertilizers, compared to the 4/4CN treatment, and the highest increases for the contents of MBC and MBN in straw-incorporated treatments were 62.0%–81.7% and 81.1%–100.0%, respectively. In the tomato season when it was in spring, the soil MBC and MBN contents in the combined application of manure and/or straw with chemical fertilizers were respectively 120.7–338.0 and 25.5–68.8 mg/kg, with increases of 16.9%–86.9% and 12.2%–109.3%, compared to the 4/4 CN treatment, and the highest increase values in straw-applied treatments were 61.4%–86.9% and 78.2%–109.3%, respectively. 3) Significant correlation relationships were found between the soil MBC, MBN contents and the corresponding vegetable yield of current season and total yield since the start of the experiment. **【 Conclusions 】** Under the same input of nutrients, the increase effects in soil MBC, MBN contents are significantly higher in the fertilization patterns of combined application of manure and/or straw with chemical fertilizers. Soil MBC, MBN contents are positively and significantly correlated with the growing season and the total greenhouse vegetable yields. Therefore, the combined use of organic and inorganic fertilizers is capable of increasing the soil MBC, MBN contents and keeping the soil fertility and sustainability in greenhouse vegetable production.

Key words: fertilization patterns; greenhouse vegetable soil; microbial biomass carbon and nitrogen

设施栽培产值高, 不受季节限制, 种植面积不断增加。但设施菜田过量施肥现象非常普遍, 温室土壤养分比例失调, 土壤理化性质越来越不利于蔬菜的生长。土壤微生物在土壤养分转化中起着重要作用^[1–3], 并被广泛用作评价土壤质量和肥力的敏感指标^[4–7]。

土壤中微生物量碳氮含量受许多因素的影响, 如土壤类型^[8]、土壤理化性质^[9–10]、季节和气候变化^[11]、植被类型^[12–13]和生育期^[14–16]以及土地利用方式^[17]等。施肥作为一项重要的农业生产措施, 能显著影响土壤微生物量碳、氮含量^[18–19]。目前, 国内外有关施肥措施对土壤微生物量碳氮影响的研究已有大

量报道, 但主要集中于玉米^[20–21]、水稻^[22–24]、小麦^[14, 25]等粮田土壤。设施菜田蔬菜种植年限^[26–28]、种植制度^[29–30]和施肥措施^[31–32]对土壤微生物数量和区系的影响, 以及不同栽培方式^[33]对微生物量碳、氮的影响也有报道, 而不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳、氮影响方面的研究鲜见报道。本文利用设在天津的日光温室蔬菜不同施肥模式定位试验, 研究蔬菜轮作周期内不同施肥模式土壤微生物量碳、氮动态变化特征及其与蔬菜产量之间的关系, 以期寻求经济节约、高效合理的施肥模式, 为实现设施蔬菜生产的可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本定位试验地点位于天津市西青区辛口镇第六埠村, 试验区域属暖温带半湿润大陆性气候, 全年平均温度为 11.6℃, 全年日照总量为 2810 h, 全年无霜期为 203 d, 自然降水总量为 586 mm。供试日光温室东西走向, 长 80 m, 宽 6.5 m (含 0.5 m 通道), 前部有通风口, 白天适时敞开通风, 夜间或降雨时关闭。供试土壤类型为中壤质潮土, 地下水埋深为 1 m。定位试验于 2009 年 10 月开始 (定位试验开始时棚龄为 7 年), 种植制度为春茬番茄-秋冬茬芹菜轮作, 试验开始前 0—20 cm 耕层土壤基本理化性质为: 有机质 25.4 g/kg, 硝态氮 186.2 mg/kg, 速效磷 144.6 mg/kg, 速效钾 404.0 mg/kg, pH 7.9。供试芹菜 (*Apium graveolens*) 品种为文图拉, 番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 品种为朝研 299。

1.2 试验设计

定位试验共设 8 个处理, 分别为: 1) 不施氮; 2) 全部施用化肥氮 (4/4CN); 3) 3/4 化肥氮 + 1/4 猪粪氮 (3/4CN + 1/4PN); 4) 2/4 化肥氮 + 2/4 猪粪氮 (2/4CN + 2/4PN); 5) 1/4 化肥氮 + 3/4 猪粪氮 (1/4CN + 3/4PN); 6) 2/4 化肥氮 + 1/4 猪粪氮 + 1/4 秸秆氮 (2/4CN + 1/4PN + 1/4SN); 7) 2/4 化肥氮 + 2/4 秸秆氮 (2/4CN + 2/4SN); 8) 农民习惯施肥 (CF)。处理 2~7 为大幅减施肥料的有机无机肥料配合施用模式, 等氮等磷等钾, 番茄茬施用的 N、P₂O₅ 和 K₂O 总量分别为 450、225 和 600 kg/hm², 芹菜茬 N、P₂O₅ 和 K₂O 总量分别为 450.0、300.0 和 600.0 kg/hm²。无氮处理与处理 2~7 为等磷等钾。农民习惯施肥处理番茄茬化肥 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 450.0、300.0 和 450.0 kg/hm², 猪粪施入量为 30.0 t/hm²; 芹菜茬化肥 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 450.0、600.0 和 300.0 kg/hm², 猪粪施入量为 32.0 t/hm²。春茬番茄和秋冬茬芹菜各处理的具体氮和碳投入量见表 1。每个处理 3 次重复, 随机排列。试验小区面积 14.4 m² (宽 2.4 m × 长 6.0 m), 番茄株、行距分别为 0.3 m 和 0.6 m, 种植密度为 25000 株/hm²; 芹菜株、行距分别为 0.20 m 和 0.15 m, 种植密度为 330570 株/hm²。小区间埋设 PVC 板 (深度 105 cm: 100 cm 地下, 5 cm 地上; 厚度 4 mm), 防止小区之间养分和水分的横向迁移。

有机肥全部基施。番茄季处理 20% 氮肥、70% 磷肥和 20% 钾肥基施, 剩余氮肥和钾肥分别在番茄开花期、第一穗果膨大期、第二穗果膨大期和第三

穗果膨大期追施, 氮肥追施比例为 30%、30%、10% 和 10%, 钾肥为 10%、30%、30% 和 10%, 剩余磷肥在第一和第二追肥各施入 15%; 习惯施肥处理 20% 的氮肥和 80% 的磷肥基施, 其余氮磷钾肥分 4 次平均追施。芹菜季 20% 氮肥、70% 磷肥和 20% 钾肥基施, 剩余氮肥和钾肥在芹菜 5~6 叶期、8~9 叶期和 11~12 叶期分 3 次追施, 氮肥的追施比例为 35%、35% 和 10%, 钾肥的追施比例为 10%、35% 和 35%, 剩余磷肥在第一次追肥时全部施入; 习惯施肥处理 20% 氮肥和 100% 磷肥基施, 剩余氮肥和全部钾肥平均分 3 次追施。

定位试验所施用的化肥为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P₂O₅ 12%)、磷酸二铵 (N 18%, P₂O₅ 46%)、氯化钾 (K₂O 60%)、磷酸二氢钾 (P₂O₅ 52%, K₂O 34%)。所用商品猪粪含 N 2.17%, P₂O₅ 1.39%, K₂O 1.63%, C 218.00 g/kg (干基), 水分含量为 28.9%; 所用秸秆含 N 1.04%、P₂O₅ 0.32%、K₂O 1.69%, C 426.9 g/kg (干基), 水分含量为 64.9%。

基施方式为肥料撒施后旋耕入土, 追施方式为肥料溶于水后随水冲施。处理 1~7 是依据田间持水量进行灌溉, 当田间持水量低于 60% 时进行灌溉; 处理 8 采用习惯灌溉方式, 即定期采用大水漫灌的方式。为保证灌水量的准确, 每个小区均安装有单独的 PVC 进水管, 并用水表记录灌水量。习惯施肥处理番茄季和芹菜季灌水总量分别为 4861 和 4167 m³/hm², 其余处理番茄季和芹菜季灌水总量分别为 3889 和 3334 m³/hm²。

1.3 土壤样品采集及测定方法

第 9 茬蔬菜 (秋冬茬芹菜) 于 2013 年 9 月 18 日 (芹菜基肥施用前)、10 月 20 日 (芹菜定植后 30 d)、11 月 20 日 (芹菜定植后 60 d)、12 月 20 日 (芹菜定植后 90 d) 及 2014 年 1 月 9 日 (芹菜定植后 110 d, 拉秧期) 采集土壤样品。第 10 茬蔬菜 (春茬番茄) 于 2014 年 1 月 26 日 (番茄施基肥前)、2 月 21 日 (番茄定植后 20 d)、3 月 12 日 (番茄定植后 40 d)、4 月 2 日 (番茄定植后 60 d)、4 月 22 日 (番茄定植后 80 d)、5 月 12 日 (番茄定植后 100 d) 及 6 月 3 日 (番茄定植后 120 d, 拉秧期) 采集土壤样品。取样方法是在每个小区内按 S 形布设 10 个点, 用不锈钢土钻采取 0—20 cm 土壤样品, 立即剔除石砾和植物残根等杂物, 混合均匀, 迅速过 2 mm 筛后于 4℃ 冰箱内保存, 用于土壤微生物量碳、氮含量的测定。

土壤微生物量碳采用熏蒸提取-容量分析法测定^[34], 计算公式为: $B_c \text{ (mg/kg)} = E_c/k_{ec}$

表 1 试验处理及其氮和碳投入量(kg/hm²)

Table 1 Treatments and the corresponding N and C inputs from different sources

处理 Treatment	氮投入量 N input				碳投入量 C input		
	化肥氮 Chemical N	猪粪氮 Pig manure N	玉米秸秆氮 Corn straw N	合计 Total N	猪粪碳 Pig manure C	玉米秸秆碳 Corn straw C	合计 Total C
番茄季 Tomato season							
无氮 No N	0	0	0	0	0	0	0
4/4CN	450.0	0	0	450.0	0	0	0
3/4CN + 1/4PN	337.5	112.5	0	450.0	1130	0	1130
2/4CN + 2/4PN	225.0	225.0	0	450.0	2260	0	2260
1/4CN + 3/4PN	112.5	337.5	0	450.0	3391	0	3391
2/4CN + 1/4PN + 1/4SN	225.0	112.5	112.5	450.0	1130	4618	5748
2/4CN + 2/4SN	225.0	0	225.0	450.0	0	9236	9236
CF	450.0	462.0	0	912.0	4992	0	4992
芹菜季 Celery season							
无氮 No N	0	0	0	0	0	0	0
4/4CN	450.0	0	0	450.0	0	0	0
3/4CN + 1/4PN	337.5	112.5	0	450.0	1130	0	1130
2/4CN + 2/4PN	225.0	225.0	0	450.0	2260	0	2260
1/4CN + 3/4PN	112.5	337.5	0	450.0	3391	0	3391
2/4CN + 1/4PN + 1/4SN	225.0	112.5	112.5	450.0	1130	4618	5748
2/4CN + 2/4SN	225.0	0	225.0	450.0	0	9236	9236
CF	450.0	493.0	0	943.0	4743	0	4743

注 (Note): CN—化肥氮 Nitrogen in chemical fertilizer; PN—猪粪氮 Nitrogen in pig manure; SN—秸秆氮 Nitrogen in straw; CF—习惯施肥 Conventional fertilization

式中, E_c 为熏蒸土与未熏蒸土壤的差值; k_{Ec} 为转换系数, 取值 0.38。

土壤微生物量氮采用熏蒸提取-全氮测定法测定^[34], 计算公式为: B_N (mg/kg) = E_N/k_{EN}

式中, E_N 为熏蒸土与未熏蒸土壤的差值; k_{EN} 为转换系数, 取值 0.45。

土壤田间持水量采用室内环刀法测定^[35]: 用环刀采集原状土带回实验室, 进行土样吸水、排水、烘干称重等步骤, 测得土壤田间持水量。土壤基本化学性质采用常规分析方法测定^[36]: 土壤有机质用重铬酸钾-浓硫酸氧化 (外加加热法), 硫酸亚铁溶液滴定法测定; 土壤硝态氮采用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提, 双波长紫外分光光度法测定; 土壤速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用 NH₄OAc 溶液浸提, 原子吸收分光光度计测定; 土壤 pH 采用 2.5 : 1 水土比, 酸度计测定。

1.4 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SAS 8.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳动态变化的影响

2.1.1 芹菜生育期间不同施肥模式土壤微生物量碳动态变化特征 由表 2 可以看出, 芹菜生育期间不同施肥模式土壤微生物量碳含量总体上均呈先增后降的趋势。芹菜施基肥前不同施肥模式土壤微生物量碳含量均相对较低, 在 37.2~336.9 mg/kg 之间, 平均为 212.6 mg/kg; 芹菜定植后 90 d 不同施肥模式土壤微生物量碳含量均相对较高, 芹菜定植后 30、60、90 和 110 d 土壤微生物量碳含量分别在 122.5~374.4、

表 2 芹菜定植后不同时间不同施肥模式土壤微生物量碳含量(mg/kg)

Table 2 Soil microbial biomass carbon contents in different growth period of celery under different fertilization patterns

处理 Treatment	定植前 Before transplanting	定植后天数 Days after transplanting			
		30 d	60 d	90 d	110 d
无氮 No N	37.2 ± 15.9 eE	122.5 ± 12.9 eC	96.7 ± 23.2 dD	267.9 ± 5.4 eA	216.1 ± 2.8 eB
4/4CN	193.3 ± 21.4 cdC	236.7 ± 19.5 dB	217.5 ± 19.6 cBC	332.4 ± 19.1 dA	216.0 ± 34.1 eBC
3/4CN + 1/4PN	185.0 ± 25.1 dD	234.3 ± 18.5 dC	245.4 ± 20.1 cBC	430.3 ± 9.6 bcA	280.9 ± 45.0 dB
2/4CN + 2/4PN	194.5 ± 14.5 cdE	230.0 ± 4.0 dD	265.0 ± 8.4 cC	454.5 ± 21.0 bA	338.0 ± 13.4 cB
1/4CN + 3/4PN	234.7 ± 3.6 bcB	267.5 ± 47.5 cdB	399.9 ± 66.9 bA	397.9 ± 13.6 cA	261.5 ± 21.0 deB
2/4CN + 1/4PN + 1/4SN	264.4 ± 34.5 bD	326.4 ± 8.2 bC	440.5 ± 22.5 bB	514.6 ± 33.7 aA	391.6 ± 13.3 bB
2/4CN + 2/4SN	336.9 ± 41.3 aB	374.4 ± 16.21 aB	497.2 ± 30.5 aA	497.4 ± 11.3 aA	467.5 ± 36.2 aA
CF	255.0 ± 33.3 bC	291.4 ± 30.5 bcC	414.3 ± 2.0 bAB	460.2 ± 30.2 bA	375.0 ± 15.5 bcB

注 (Note): 数据后不同小写字母表示相同取样时间不同施肥处理间差异达 5% 显著水平; 不同大写字母表示同一处理不同取样时期差异达 5% 显著水平 Different lowercase letters were significantly different at 5% for the different treatments under the same sampling period; Different capital letters were significantly different at 5% for the different sampling periods under the same treatment.

96.7~497.2、267.9~514.6 和 216.0~467.5 mg/kg 之间, 平均分别为 260.4、322.1、419.4 和 318.3 mg/kg。

芹菜生育期间各取样时期有机无机肥料配施土壤微生物量碳含量均高于单施化肥, 3/4CN + 1/4PN、2/4CN + 2/4PN、1/4CN + 3/4PN、2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量碳含量较 4/4CN 分别增加 15.1%、23.9%、30.6%、62.0% 和 81.7%。

中量配施猪粪 2/4CN + 2/4PN 和高量配施猪粪 1/4CN + 3/4PN 土壤微生物量碳含量较低量配施猪粪平均分别增加 7.7% 和 13.5%。配施秸秆土壤微生物

量碳含量高于配施猪粪, 2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量碳含量较 1/4CN + 3/4PN 平均分别增加 24.1% 和 39.2%。

大幅减施肥料的配施秸秆土壤微生物量碳含量高于高量施肥的习惯施肥, 2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量碳含量较习惯施肥平均分别增加 4.4% 和 24.7%。

2.1.2 番茄生育期间不同施肥模式土壤微生物量碳动态变化特征 表 3 显示, 番茄生育期间不同施肥模式土壤微生物量碳含量总体上呈先增后降的趋势。番

表 3 番茄定植后不同时间不同施肥模式土壤微生物量碳含量(mg/kg)

Table 3 Soil microbial biomass carbon contents under different fertilization patterns in different days after transplanting of tomato

处理 Treatment	定植前 Before transplanting	定植后天数 Days after transplanting					
		20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	120 d
无氮 No N	97.2 ± 11.7 fC	122.5 ± 2.3 dBC	139.8 ± 24.2 dAB	139.9 ± 5.6 eAB	164.3 ± 12.7 cA	128.5 ± 4.4 bcB	57.4 ± 25.2 cD
4/4CN	110.5 ± 9.1 efC	132.3 ± 8.3 dBC	164.8 ± 21.2 cdAB	135.4 ± 9.1 eBC	189.2 ± 49.1 cA	118.6 ± 24.9 abcC	111.7 ± 1.6 bcC
3/4CN + 1/4PN	120.7 ± 4.3 eC	202.0 ± 37.5 cA	195.2 ± 21.9 bcA	150.4 ± 43.5 deAB	186.4 ± 45.1 cAB	132.5 ± 10.3 abcBC	137.8 ± 19.9 abBC
2/4CN + 2/4PN	152.1 ± 11.0 dBCD	190.4 ± 40.5 cAB	186.4 ± 12.2 bcABC	187.2 ± 11.3 cdABC	201.1 ± 11.8 bcA	148.6 ± 9.5 abcC	139.1 ± 32.7 abD
1/4CN + 3/4PN	195.2 ± 16.0 cBC	231.9 ± 18.8 cAB	267.5 ± 22.8 aA	196.6 ± 6.8 bcdBC	259.5 ± 31.2 aA	151.2 ± 41.2 abcC	159.4 ± 57.5 abc
2/4CN + 1/4PN + 1/4SN	232.9 ± 8.9 bBC	281.3 ± 15.3 bA	226.0 ± 20.6 bC	234.4 ± 33.3 abBC	256.9 ± 17.6 abAB	161.5 ± 8.1 aD	160.1 ± 10.5 abD
2/4CN + 2/4SN	286.7 ± 6.8 aA	338.0 ± 35.1 aA	267.7 ± 41.5 aA	272.1 ± 45.7 aA	281.2 ± 55.5 aA	162.1 ± 19.7 aB	191.0 ± 46.8 aB
CF	188.2 ± 17.5 cCD	216.3 ± 30.7 cBC	193.4 ± 13.9 bcBCD	220.4 ± 11.0 bcB	276.3 ± 15.9 aA	155.4 ± 3.0 abE	165.0 ± 14.8 abDE

注 (Note): 数据后不同小写字母表示相同取样时间不同施肥处理间差异达 5% 显著水平; 不同大写字母表示同一处理不同取样时期差异达 5% 显著水平 Different lowercase letters were significantly different at 5% for the different treatments under the same sampling period; Different capital letters were significantly different at 5% for the different sampling periods under the same treatment.

茄施基肥前和定植后 100、120 d 不同施肥模式土壤微生物量碳含量总体相对较低, 分别在 97.2~286.7、118.6~162.1 和 57.4~191.0 mg/kg 之间, 平均分别为 172.9、144.8 和 140.0 mg/kg; 番茄定植后 20、40、60 和 80 d 不同施肥模式土壤微生物量碳含量总体相对较高, 分别在 122.5~338.0、139.8~267.7、135.4~272.2 和 164.3~271.2 mg/kg 之间, 平均分别为 214.3、205.1、192.1 和 226.9 mg/kg。

番茄生育期间各取样时期有机无机肥料配施模式土壤微生物量碳含量总体高于单施化肥模式, 其中以配施秸秆模式(2/4CN + 2/4SN、2/4CN + 1/4PN + 1/4SN)土壤微生物量碳含量总体上相对较高。五种有机无机肥料配施模式 3/4CN + 1/4PN、2/4CN + 2/4PN、1/4CN + 3/4PN、2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量碳含量较 4/4CN 模式平均分别增加 16.9%、25.2%、51.8%、61.4% 和 86.9%。

猪粪用量较高的处理, 土壤微生物量碳含量也较高。2/4CN + 2/4PN 和 1/4CN + 3/4PN 土壤微生物量碳含量较 3/4CN + 1/4PN 平均分别增加 7.1% 和 29.9%。

配施秸秆模式土壤微生物量碳含量总体高于配施猪粪模式。2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量碳含量较 1/4CN + 3/4PN 平均分别增加 6.3% 和 23.1%。

配施秸秆模式施 N 量较常规施肥大幅减少了 50% 多, 总 C 投入增加了 10%~40%, 相应地各取样时期土壤微生物量碳含量也高于习惯施肥模式,

2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量碳含量较习惯施肥平均分别增加 9.7% 和 27.1%。

2.2 不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量氮动态变化的影响

2.2.1 芹菜生育期间不同施肥模式土壤微生物量氮动态变化特征

表 4 表明, 芹菜生育期不同施肥模式土壤微生物量氮含量总体上均随生育期的推进先增后降, 在芹菜定植后 60 d 不同施肥模式土壤微生物量氮含量均达到最高。

芹菜生育期间各取样时期有机无机肥料配施土壤微生物量氮含量均高于单施化肥, 其中以配施秸秆模式(2/4CN + 2/4SN、2/4CN + 1/4PN + 1/4SN)土壤微生物量氮含量相对较高。五种有机无机肥料配施模式 3/4CN + 1/4PN、2/4CN + 2/4PN、1/4CN + 3/4PN、2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量氮含量较 4/4CN 模式平均分别增加 24.5%、37.2%、64.2%、81.1% 和 100.0%。

随着猪粪用量的增加, 土壤微生物量氮含量总体上呈增加的趋势, 中量配施猪粪模式 2/4CN + 2/4PN 和高量配施猪粪模式 1/4CN + 3/4PN 土壤微生物量氮含量较低量配施猪粪模式平均分别增加 10.2% 和 31.9%。

配施秸秆模式土壤微生物量氮含量高于配施猪粪模式, 2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量氮含量较高量配施猪粪模式 1/4CN + 3/4PN 平均分别增加 10.3% 和 21.8%。

大幅减施肥料的高量配施秸秆土壤微生物量氮

表 4 芹菜定植后不同时间不同施肥模式土壤微生物量氮含量(mg/kg)

Table 4 Soil microbial biomass nitrogen contents in different growth period of celery under different fertilization patterns

处理 Treatment	定植前 Before transplanting	定植后天数 Days after transplanting			
		30 d	60 d	90 d	110 d
无氮 No N	31.8 ± 7.5 eA	33.3 ± 4.9 cA	33.6 ± 7.4 dA	33.1 ± 3.6 deA	32.8 ± 5.7 dA
4/4CN	34.3 ± 4.2 eA	38.6 ± 2.0 bcA	40.3 ± 17.3 cdA	30.4 ± 0.9 eA	33.9 ± 1.3 dA
3/4CN + 1/4PN	44.2 ± 5.6 dAB	40.9 ± 10.0 bcB	55.9 ± 7.3 bcA	39.4 ± 4.5 cdB	40.5 ± 11.2 cdB
2/4CN + 2/4PN	50.4 ± 8.6 cdAB	50.3 ± 4.7 bAB	60.4 ± 12.4 abcA	34.3 ± 6.3 deB	48.0 ± 9.2 bcAB
1/4CN + 3/4PN	60.6 ± 7.3 bB	66.1 ± 6.7 aAB	74.1 ± 11.3 abA	47.0 ± 1.3 bcC	43.7 ± 7.5 cdC
2/4CN + 1/4PN + 1/4SN	61.3 ± 5.8 abBC	68.4 ± 9.6 aAB	79.0 ± 5.4 aA	51.7 ± 7.8 abC	61.1 ± 4.2 aBC
2/4CN + 2/4SN	69.1 ± 1.9 aAB	75.7 ± 9.7 aAB	79.1 ± 16.1 aA	65.9 ± 2.7 aAB	65.4 ± 8.9 aB
CF	56.7 ± 5.3 bcB	74.5 ± 2.3 aA	75.0 ± 14.0 abA	53.8 ± 2.8 abB	58.9 ± 11.8 abAB

注 (Note): 数据后不同小写字母表示相同取样时间不同施肥处理间差异达 5% 显著水平; 不同大写字母表示同一处理不同取样时期差异达 5% 显著水平 Different lowercase letters were significantly different at 5% for the different treatments under the same sampling period; Different capital letters were significantly different at 5% for the different sampling periods under the same treatment.

含量高于高量施肥的习惯施肥, 低量配施秸秆土壤微生物量氮含量与习惯施肥的相近。2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量氮含量较习惯施肥平均分别增加 0.8% 和 11.4%。

2.2.2 设施番茄生育期间不同施肥模式土壤微生物量氮动态变化特征 由表 5 可以看出, 番茄生育期间 CK 和 4/4CN 土壤微生物量氮含量总体上呈先增后降的趋势, 而有机无机肥料配施模式土壤微生物量氮含量总体上呈先增后降再增的趋势。番茄施基肥前

不同施肥模式土壤微生物量氮含量均相对较低, 在 9.5~43.1 mg/kg 之间, 平均为 28.4 mg/kg; 番茄定植后 60 d 不同施肥模式土壤微生物量氮含量相对较高, 番茄定植后 20、40、60、80、100 和 120 d 土壤微生物量氮含量分别在 10.2~52.6、13.5~57.2、23.3~68.8、11.4~48.2、22.7~50.1 和 16.2~66.1 mg/kg 之间, 平均分别为 32.8、40.0、48.5、32.6、32.2 和 42.2 mg/kg。

番茄生育期间各取样时期有机无机肥料配施模

表 5 番茄定植后不同时间不同施肥模式土壤微生物量氮含量(mg/kg)

Table 5 Soil microbial biomass nitrogen contents under different fertilization patterns in different days after transplanting of tomato

处理 Treatment	定植前 Before transplanting	定植后天数 Days after transplanting					
		20	40	60	80	100	120
无氮 No N	9.5 ± 1.7 fC	10.2 ± 1.3 eC	13.5 ± 1.3 dBC	23.3 ± 5.0 dA	11.4 ± 5.9 dBC	22.7 ± 2.1 dA	16.2 ± 2.2 dB
4/4CN	20.1 ± 1.9 eC	22.3 ± 1.7 deBC	26.9 ± 2.9 cBC	38.6 ± 5.5 cA	28.1 ± 4.1 cB	24.9 ± 3.3 cdBC	23.8 ± 6.1 cdBC
3/4CN + 1/4PN	25.5 ± 2.4 deB	28.0 ± 4.1 cdB	35.8 ± 16.0 bcB	39.1 ± 6.4 cA	30.1 ± 8.1 bcAB	26.0 ± 0.8 cdB	31.7 ± 7.2 cAB
2/4CN + 2/4PN	27.2 ± 3.6 cdeD	29.4 ± 2.4 cdCD	47.0 ± 1.6 abB	53.4 ± 3.2 bA	33.3 ± 5.8 bcC	26.2 ± 3.0 cdD	45.3 ± 0.4 bB
1/4CN + 3/4PN	33.3 ± 4.0 bcC	38.1 ± 13.8 bcBC	49.4 ± 3.4 aAB	49.0 ± 5.7 bA	36.1 ± 2.4 bcBC	32.4 ± 5.1 bcdBC	50.5 ± 8.5 bA
2/4CN + 1/4PN + 1/4SN	36.6 ± 5.7 abD	46.4 ± 9.6 abBCD	48.5 ± 1.4 aBC	66.8 ± 2.9 aA	38.5 ± 3.9 bCD	39.4 ± 6.9 abCD	52.7 ± 2.1 bB
2/4CN + 2/4SN	43.1 ± 6.3 aC	52.6 ± 5.8 aBC	57.2 ± 4.4 aAB	68.8 ± 4.7 aA	48.2 ± 4.4 aBC	50.1 ± 11.8 aBC	66.1 ± 9.7 aA
CF	32.2 ± 7.2 bcdB	35.6 ± 8.1 bcB	51.0 ± 5.6 aA	49.0 ± 5.4 bA	35.1 ± 4.3 bcB	35.6 ± 9.5 bcB	51.1 ± 0.7 bA

注 (Note): 数据后不同小写字母表示相同取样时间不同施肥处理间差异达 5% 显著水平; 不同大写字母表示同一处理不同取样时期差异达 5% 显著水平 Different lowercase letters were significantly different at 5% for the different treatments under the same sampling period; Different capital letters were significantly different at 5% for the different sampling periods under the same treatment.

式土壤微生物量氮含量均高于单施化肥模式, 秸秆配施模式(2/4CN + 1/4PN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN)又高于化肥猪粪配施模式。3/4CN + 1/4PN、2/4CN + 2/4PN、1/4CN + 3/4PN、2/4CN + 1/4 PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量氮含量较 4/4CN 分别增加了 12.2%、41.8%、56.5%、78.2% 和 109.3%。

猪粪用量高的处理土壤微生物量氮含量总体上也较高。与低量配施猪粪模式 3/4CN + 1/4PN 相比, 中量配施猪粪模式 2/4CN + 2/4PN 和高量配施猪粪模式 1/4CN + 3/4PN 土壤微生物量氮含量平均分别增加 26.4% 和 39.2%。

配施秸秆模式土壤微生物量氮含量高于配施猪粪模式, 2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量氮含量较高量配施猪粪模式 1/4CN + 3/4PN 平均分别增加 14.1% 和 34.0%。

配施秸秆模式施 N 量较习惯施肥模式减少了

50%, 但配施秸秆处理 2/4CN + 1/4 PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 土壤微生物量氮含量较习惯施肥模式平均分别增加 13.5% 和 33.3%。

2.3 设施菜田土壤微生物量碳氮含量与蔬菜产量之间的关系

2.3.1 芹菜土壤微生物量碳、氮含量与蔬菜产量之间的相关性 从表 6 可以看出, 芹菜各取样时期土壤微生物量碳氮含量与其产量以及前 9 茬蔬菜总产量之间均呈极显著正相关关系, 土壤微生物量碳和氮含量与第 9 茬芹菜产量之间的相关系数分别为 0.71~0.88 和 0.59~0.77, 与前 9 茬蔬菜总产量之间的相关系数分别为 0.72~0.88 和 0.64~0.77。

2.3.2 番茄不同取样时间土壤微生物量碳氮含量与蔬菜产量之间的相关性 从表 7 可以看出, 第 10 茬蔬菜各取样时期土壤微生物量碳、含量与第 10 茬和前 10 茬番茄总产量之间均呈极显著正相关关系, 土壤

表 6 芹菜不同取样时间土壤微生物量碳、氮含量与蔬菜产量之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between soil microbial biomass C, N contents in different sampling time and the yield of the ninth-season vegetable (celery) and the total vegetable yield

定植天数 Days after transplanting	项目 Item	第 9 茬产量 The 9 th yield	总产量 Total yield
定植前 Before	MBC	0.83**	0.88**
	MBN	0.77**	0.77**
30 d	MBC	0.88**	0.87**
	MBN	0.68**	0.66**
60 d	MBC	0.82**	0.83**
	MBN	0.70**	0.72**
90 d	MBC	0.83**	0.88**
	MBN	0.59**	0.63**
110 d	MBC	0.71**	0.72**
	MBN	0.62**	0.64**

注 (Note): ** — $P < 0.01$.

表 7 番茄生育期间不同取样时间土壤微生物量碳氮、含量与蔬菜产量之间的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between soil microbial biomass C, N contents with the yield of tenth-season vegetable (tomato) and total vegetable yield

定植天数 Days after transplanting	项目 Item	第 10 茬产量 The 10 th yield	前 10 茬番茄总产量 Total ten season yield
定植前 Before	MBC	0.82**	0.77**
	MBN	0.85**	0.88**
20 d	MBC	0.83**	0.81**
	MBN	0.78**	0.83**
40 d	MBC	0.76**	0.71**
	MBN	0.81**	0.81**
60 d	MBC	0.71**	0.67**
	MBN	0.86**	0.86**
80 d	MBC	0.62**	0.62**
	MBN	0.85**	0.88**
100 d	MBC	0.52**	0.53**
	MBN	0.65**	0.64**
120 d	MBC	0.70**	0.77**
	MBN	0.82**	0.82**

注 (Note): ** — $P < 0.01$.

微生物量碳和氮含量与第 10 茬番茄产量之间的相关系数分别为 0.52~0.83 和 0.65~0.86, 与前 10 茬番茄总产量之间相关系数分别为 0.53~0.81 和 0.64~0.88。

3 讨论

3.1 不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳氮含量的影响

本试验结果表明, 有机无机肥料配施较单施化肥可显著提高设施菜田土壤微生物量碳氮含量, 配施秸秆又高于配施猪粪。第 9 茬蔬菜(设施秋冬茬芹菜)生育期间, 有机无机肥料配施模式(1/4CN + 1/4PN、2/4CN + 2/4PN、1/4CN + 3/4PN、2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN)土壤微生物量碳、氮含量较单施化肥模式(4/4CN)平均分别增加 15.1%~81.7% 和 24.5%~100.0%, 其中配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量平均分别增加 62.0%~81.7% 和 81.1%~100.0%; 第 10 茬蔬菜(设施春茬番茄)生育期间, 土壤微生物量碳、氮较单施化肥模式平均分别增加 16.9%~86.9% 和 12.2%~109.3%, 配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量平均分别增加 61.4%~86.9% 和 78.2%~109.3%。施用有机肥不仅可为土壤微生物生长提供碳源、氮源和其他养分^[37-38], 而且能够提高土壤透水排水性和透气性^[39], 改善土壤微生物的生活环境。与无机肥配合施用由于增加了土壤速效养分的含量, 且碳氮比例更加合理, 有机无机肥料配施能够显著提高土壤中微生物量含量。单施无机肥对土壤养分总量没有显著影响^[40-41], 长期施用还可能导致土壤酸化^[42], 不利于土壤微生物的生长繁殖。所以, 有机无机肥料配施模式土壤微生物量碳氮含量显著高于单施化肥模式。本研究中, 化肥配施秸秆模式较化肥配施猪粪模式对设施菜田土壤微生物量碳氮的提高作用更显著。原因是土壤微生物分解有机质的适宜的碳氮比大约为 25 : 1^[43]。配施猪粪模式(1/4CN + 1/4PN、2/4CN + 2/4PN 和 1/4CN + 3/4PN)的碳氮总投入比分别为 2.5、5.0 和 7.5, 配施秸秆模式(2/4CN + 1/4PN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN)碳氮总投入比分别为 12.8 和 20.5(表 1), 更接近 25 : 1 的碳氮总投入比, 土壤微生物因碳源充足而生长繁殖迅速, 因而配施秸秆模式土壤微生物量碳氮含量相对较高。

3.2 设施蔬菜不同生育期土壤微生物量碳氮含量的差异

设施菜田土壤微生物量碳、氮含量受蔬菜生育

期的影响显著。第 9 茬蔬菜(秋冬茬芹菜)和第 10 茬蔬菜(春茬番茄)生育期间不同施肥模式土壤微生物量碳氮含量总体上均随生育期的推进先增后降,且均在作物长势较盛时,土壤微生物量碳氮含量相对较高(秋冬茬芹菜土壤微生物量碳、氮分别在定植后 60 和 90 d 时相对较高,分别属于芹菜 8~9 叶期和 11~12 叶期;春茬番茄土壤微生物量碳氮在番茄开花-盛果期相对较高)。不同生育期作物根系分泌物的种类和数量不同^[44],植物根系能够分泌大约 17% 的光合作用产物于土壤中,其中大多数可被土壤微生物所利用^[45]。当作物生长旺盛时,根系代谢较快,分泌较多可被微生物利用的有机化合物,这些化合物能够维持土壤微生物群落的生长,导致土壤微生物数量的增加^[46]。此外,设施蔬菜不同生育时期的温度变化也可能对土壤微生物量碳氮含量产生影响。因为微生物的生命活动都是由一系列生物化学反应组成的,而这些反应受温度影响又极其明显,故温度成了影响微生物生长繁殖的重要因素之一^[47]。有研究表明,随着温度的升高,土壤微生物量含量降低^[48-49],土壤细菌在较高温度($\geq 35^{\circ}\text{C}$)下大量热变性可能是土壤微生物数量减少的原因^[48]。而温度过低也可能降低土壤微生物的活性和土壤有机质的分解速率。本研究中,秋冬茬芹菜生育期间表层土壤温度在芹菜生长前期高于 25°C ,芹菜 8~9 叶至 11~12 叶期时在 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间,拉秧期时低于 5°C ,土壤微生物生长温度总体上呈“较高—较适—过低”变化;春茬番茄生育期间表层土壤温度在番茄生长前期低于 10°C ,开花期至盛果期时在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间,拉秧期高于 25°C ,土壤微生物生长温度总体上呈“较低—较适—较高”趋势。因而秋冬茬芹菜和春茬番茄生育期间土壤微生物量碳氮含量呈先增后降的趋势可能受土壤温度变化的影响。可见,设施蔬菜生育期间土壤微生物量碳氮动态变化是蔬菜作物生育期、土壤温度等因素综合作用的结果,但关于设施菜田土壤温度对土壤微生物量碳氮含量的影响程度还有待进一步研究。

3.3 设施菜田土壤微生物量碳氮与蔬菜产量的关系

土壤微生物量作为土壤养分的“库”和“源”,是土壤肥力的一个重要指标,与作物产量的形成密切相关。已有研究表明,碳在土壤微生物量中的转化速率比在土壤有机质中快 200 倍^[3],土壤微生物态氮是土壤氮素转化的关键环节及土壤有效氮的重要组成部分,其消长反映了土壤的供氮特征^[50],因而土壤微生物量碳氮与土壤中有有机碳、全氮和可溶性有机碳氮

等密切相关^[51-53]。另有研究指出,土壤微生物量碳氮与土壤中磷和钾等养分的含量也具有极好的相关性^[16,54]。可见,土壤微生物量碳氮含量可以指示土壤肥力状况。而土壤肥力可以通过作物产量来体现,研究证明,土壤微生物量碳氮与作物产量之间关系密切。孙建等^[55]对内蒙古旱作玉米田和王芳等^[56]对渭北旱塬麦田土壤的研究表明,土壤微生物量碳、氮与作物产量之间分别呈极显著和显著相关关系。张雪艳等^[33]研究了不同栽培方式对温室连作黄瓜土壤微生物量碳氮和作物产量的影响,结果显示,土壤微生物量碳与秋冬茬作物产量呈显著正相关($P < 0.05$),土壤微生物量氮与各茬黄瓜产量呈正相关,但未达到显著水平。本研究结果表明,第 9 茬蔬菜(设施秋冬茬芹菜)生育期间各取样时期土壤微生物量碳氮含量与第 9 茬蔬菜(秋冬茬芹菜)产量及前 9 茬蔬菜总产量之间均呈极显著正相关关系;第 10 茬蔬菜(设施春茬番茄)生育期间各取样时期土壤微生物量碳氮含量与第 10 茬蔬菜(春茬番茄)产量及前 10 茬蔬菜总产量之间也均呈极显著正相关关系。说明了土壤微生物量碳氮作为土壤-作物两者之间极其重要的纽带,推动着土壤有机质和土壤养分的转化与循环,为植物生长提供养分,促进作物产量的增加,是评价土壤肥力的敏感指标。

4 结论

1) 两季设施蔬菜(春茬番茄和秋冬茬芹菜)生育期间不同施肥模式土壤微生物量碳、氮含量总体上均呈先增后降的趋势,且均在蔬菜长势旺盛时(芹菜在 8 至 12 叶期,番茄在开花至盛果期),土壤微生物量碳、氮含量相对较高。

2) 同等养分投入量下,两季设施蔬菜生育期间各取样时期有机无机肥料配施模式土壤微生物量碳、氮含量均显著高于单施化肥模式,较单施化肥模式平均分别增加 $15.1\%\sim 86.9\%$ 和 $12.2\%\sim 109.3\%$,其中以配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量相对较高,较单施化肥模式平均分别增加 $61.4\%\sim 86.9\%$ 和 $78.2\%\sim 109.3\%$ 。

3) 两季设施蔬菜不同生育期土壤微生物量碳、氮含量与当季蔬菜产量和定位试验开始以来蔬菜总产量之间均呈显著或极显著正相关关系。

参考文献:

- [1] Jenkinson D S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil[J]. *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural*

- Ecosystems, 1988, 368–386.
- [2] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: effects of management changes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(7): 969–975.
- [3] Blagodatskaya E, Yuyukina T, Blagodatsky S, *et al.* Turnover of soil organic matter and of microbial biomass under C3-C4 vegetation change: Consideration of ^{13}C fractionation and preferential substrate utilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 159–166.
- [4] Lin X G, Yin R, Zhang H Y, *et al.* Changes of soil microbiological properties caused by land use changing from rice-wheat rotation to vegetable cultivation[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2): 119–128.
- [5] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 162–171.
Zhou L X, Ding M M. Soil microbial characteristics as bio-indicators of soil health[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 162–171.
- [6] 张杰琼, 方凤满, 余健, 等. 淮南大通矿区复垦土壤微生物量碳氮的分布特征[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 267–270.
Zhang J Q, Fang F M, Yu J, *et al.* Spatial characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in Datong reclaimed coal mine area of Huainan region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(3): 267–270.
- [7] 朱新玉, 胡云川, 芦杰. 豫东黄河故道湿地土壤生物学性状及土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 27–32.
Zhu X Y, Hu Y C, Lu J. Evaluation on soil biological characteristics and quality of the wetlands in ancient bed of Yellow River of East He'nan Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(2): 27–32.
- [8] 金发会, 李世清, 卢红玲, 等. 黄土高原不同土壤微生物量碳、氮与氮素矿化势的差异[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 227–236.
Jin F H, Li S Q, Lu H L, *et al.* Variation of soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and nitrogen mineralization potential in different soil types on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 227–236.
- [9] Han W Y, Kemmitt S J, Brookes P C. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(7): 1468–1478.
- [10] 吴建国, 艾丽. 祁连山3种典型生态系统土壤微生物活性和生物量碳氮含量[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 465–476.
Wu J G, Ai L. Soil microbial activity and biomass C and N content in three typical ecosystems in Qi-Lian Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(2): 465–476.
- [11] Van Meeteren M J M, Tietema A, Van Loon E E, *et al.* Microbial dynamics and litter decomposition under a changed climate in a Dutch heathland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38(2): 119–127.
- [12] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用[J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1718–1725.
Zhou J B, Chen Z J, Li S X. Contents of soil microbial nitrogen and its mineralized characteristics and relationship with nitrogen supplying ability of soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1718–1725.
- [13] 张剑, 汪思龙, 王清奎, 等. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 41–47.
Zhang J, Wang S L, Wang Q K, *et al.* Content and seasonal change in soil labile organic carbon under different forest covers[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 41–47.
- [14] Mandal A, Patra A K, Singh D, *et al.* Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(18): 3585–3592.
- [15] 侯化亭, 张丛志, 张佳宝, 陈效民. 不同施肥水平及玉米种植对土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 163–166.
Hou H T, Zhang C Z, Zhang J B, Chen X M. Effects of fertilization and maize growing on soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Soils*, 2012, 44(1): 163–166.
- [16] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5502–5511.
Ma X X, Wang L L, Li Q H, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5502–5511.
- [17] 彭佩钦, 吴金水, 黄道友, 等. 洞庭湖区不同利用方式对土壤微生物生物量碳氮磷的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(7): 2261–2267.
Peng P Q, Wu J S, Huang D Y, *et al.* Microbial biomass C, N, P of farmland soils in different land uses and cropping systems in Dongting Lake region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2261–2267.
- [18] Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B, *et al.* Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72(1): 9–17.
- [19] Kautz T, Wirth S, Ellmer F. Microbial activity in a sandy arable soil is governed by the fertilization regime[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2004, 40(2): 87–94.
- [20] Peacock A D, Mullen M D, Ringelberg D B, *et al.* Soil microbial community responses to dairy manure or ammonium nitrate applications[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7): 1011–1019.
- [21] 徐永刚, 宇万太, 马强, 等. 长期不同施肥制度对潮棕壤微生物生物量碳、氮及细菌群落结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2078–2085.
Xu Y G, Yu W T, Ma Q, *et al.* Effects of long-term fertilizations on microbial biomass C and N and bacterial community structure in an aquic brown soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2078–2085.
- [22] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土活性碳的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 554–559.
Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, *et al.* Effects of long-term different fertilization on labile organic carbon in red paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 554–559.
- [23] 蔡晓红, 杨京平, 马维娜, 等. 稻田根际微生物生物量碳与水分、氮素影响效应分析[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2008, 34(6): 662–668.
Cai X H, Yang J P, Ma W N, *et al.* Effects of nitrogen supply levels and water schemes on rice rhizosphere microbial biomass carbon in rice development stage at paddy field[J]. *Journal of Zhejiang*

- University (Agric & Life Sci), 2008, 34(6): 662–668.
- [24] Liu M, Hu F, Chen X, *et al.* Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: the influence of quantity, type and application time of organic amendments[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 166–175.
- [25] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 等. 施氮量对土壤无机氮分布和微生物量氮含量及小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 466–472.
Zhao J Y, Yu Z W, Li Y Q, *et al.* Effects of nitrogen application rate on soil inorganic nitrogen distribution, microbial biomass nitrogen content and yield of wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 466–472.
- [26] 马云华, 魏珉, 王秀峰. 日光温室连作黄瓜根区微生物区系及酶活性的变化[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1005–1008.
Ma Y H, Wei M, Wang X F. Variation of microflora and enzyme activity in continuous cropping cucumber soil in solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 1005–1008.
- [27] 张国红, 任华中, 高丽红, 等. 京郊日光温室土壤微生物状况和酶活性[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(7): 1447–1452.
Zhang G H, Ren H Z, Gao L H, *et al.* The soil microbe populations and enzyme activities in Helio-greenhouse of Beijing Suburbs[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(7): 1447–1452.
- [28] 吴忠红, 杜新民, 张永清, 等. 晋南日光温室土壤微生物及土壤酶活性变化规律研究[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(1): 296–298.
Wu Z H, Du X M, Zhang Y Q, *et al.* The microbe amount and enzymes activities of soil in greenhouse in Jinnan area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(1) 296–298.
- [29] 庄岩, 吴凤芝, 杨阳, 等. 轮作对黄瓜土壤微生物多样性及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 204–209.
Zhuang Y, Wu F Z, Yang Y, *et al.* Effect of rotation and interplanting on cucumber yield and soil microbial diversity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 204–209.
- [30] 孙彩菊, 程智慧, 孟焕文, 等. 大棚番茄连续定位套蒜第3年度土壤微生物数量和酶活性的变化[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(12): 97–105.
Sun C J, Cheng Z H, Meng H W, *et al.* Variation of soil microorganism quantities and enzyme activities at the third year cultivation of continuous positional intercropping of tomato with garlic under plastic tunnel[J]. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2012, 40(12): 97–105.
- [31] 杜社妮, 梁银丽, 徐福利, 等. 施肥对日光温室土壤微生物与酶活性变化的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 68–71.
Du S N, Liang Y L, Xu F L, *et al.* Effect of fertilization on soil microorganisms and enzyme activity under greenhouse condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4): 68–71.
- [32] 张雪, 刘守伟, 吴凤芝, 等. 不同氮素形态对黄瓜根区土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. *中国蔬菜*, 2014, (3): 19–25.
Zhang X, Liu S W, Wu F Z, *et al.* Effects of different nitrogen forms on soil microorganism population and soil enzyme activities around cucumber root zone[J]. *China vegetables*, 2014, (3): 19–25.
- [33] 张雪艳, 曹云娥, 田蕾, 等. 不同栽培方式对温室连作黄瓜土壤微生物量碳氮和作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 562–569.
- Zhang X Y, Cao Y E, Tian L, *et al.* Effect of different cultivation systems on the soil microbial biomass carbon and nitrogen amount and the yield of cucumber in greenhouse[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(3): 562–569.
- [34] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Soil microbial biomass methods and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006
- [35] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间含水量[J]. *中国新技术新产品*, 2014, (5): 13–16.
Yuan N N. Indoor cutting-ring method to determining field capacity[J]. *China New Technologies and Products*, 2014, (5): 13–16.
- [36] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [37] Bastida F, Kandler E, Hernández T, *et al.* Long-term effect of municipal solid waste amendment on microbial abundance and humus-associated enzyme activities under semiarid conditions[J]. *Microbial Ecology*, 2008, 55(4): 651–661.
- [38] Elfstrand S, Hedlund K, Mårtensson A. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(3): 610–621.
- [39] Hopkins D W, Shiel R S. Size and activity of soil microbial communities in long-term experimental grassland plots treated with manure and inorganic fertilizers[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22(1–2): 66–70.
- [40] 程东娟, 刘树庆, 王殿武, 等. 长期定位培肥对土壤酶活性及土壤养分动态变化影响[J]. *河北农业大学学报*, 2004, 26(3): 33–36.
Cheng D J, Liu S Q, Wang D W, *et al.* The effect of long-term experiment improving soil fertility on the dynamical changes of soil nutrient and soil enzyme activities[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2004, 26(3): 33–36.
- [41] Ai C, Liang G, Sun J, *et al.* Responses of extracellular enzyme activities and microbial community in both the rhizosphere and bulk soil to long-term fertilization practices in a fluvo-aquic soil[J]. *Geoderma*, 2012, 173: 330–338.
- [42] 马宁宁, 李天来, 武春成, 等. 长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1766–1771.
Ma N N, Li T L, Wu C C, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and soil physicochemical properties of facility vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1766–1771.
- [43] 李娟, 赵秉强, 李秀英. 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]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1093–1099.
Li J, Zhao B Q, Li X Y. Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in deferent long-term fertilizer regimes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1093–1099.
- [44] Wichern F, Mayer J, Joergensen R G, *et al.* Release of C and N from

- roots of peas and oats and their availability to soil microorganisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2829–2839.
- [45] Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls[J]. *Agronomie*, 2003, 23(5–6): 375–396.
- [46] Kent A D, Triplett E W. Microbial communities and their interactions in soil and rhizosphere ecosystems[J]. *Annual Reviews in Microbiology*, 2002, 56(1): 211–236.
- [47] 庞绪, 何文清, 严昌荣, 等. 耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1308–1316.
Pang X, He W Q, Yan C R, *et al.* Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1308–1316.
- [48] Joergensen R G, Brookes P C, Jenkinson D S. Survival of the microbial biomass at elevated temperatures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1129–1136.
- [49] Verburg P S J, Dam V D, Hefting M, Tietema A. Microbial transformation of C and N in a boreal forest floor as affected by temperature[J]. *Plant and Soil*, 1999, 208(2): 187–197.
- [50] 沈其荣, 余玲. 有机无机肥料配合施用对滨海盐土土壤生物量态氮及土壤供氮特征的影响[J]. *土壤学报*, 1994, 31(3): 287–294.
Shen Q R, Yu L. Effects of combining application of organic and inorganic nitrogen fertilizers on biomass nitrogen and nitrogen-supplying characteristics of coastal saline soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(3): 287–294.
- [51] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89–96.
Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89–96.
- [52] 汪文霞, 周建斌, 严德翼, 等. 黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 103–106.
Wang W X, Zhou J B, Yan D Y, *et al.* Contents of soil microbial biomass C, N and K₂SO₄-extractable organic C, N and their relations in different soil types on Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 103–106.
- [53] 薛菁芳, 高艳梅, 汪景宽, 等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2): 247–250.
Xue J F, Gao Y M, Wang J K, *et al.* Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 247–250.
- [54] 张海燕, 肖延华, 张旭东, 等. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨[J]. *土壤通报*, 2006, 37(3): 422–425.
Zhang H Y, Xiao Y H, Zhang X D, *et al.* Microbial biomass as an indicator for evaluation of soil fertility properties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 422–425.
- [55] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 不同耕作方式对内蒙古旱作农田土壤性状及作物产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 295–302.
Sun J, Liu M, Li L J, *et al.* Effects of different tillage modes on soil properties and crop yield in a rain-fed field of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2): 295–302.
- [56] 王芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 702–709.
Wang F, Zhang J S, Gao P C, *et al.* Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed highland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 702–709.