

DOI: 10.11766/trxb201807270342

氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响*

孙莹 侯玮 迟美静 虞娜 范庆锋 邹洪涛 张玉玲[†]

(沈阳农业大学土地与环境学院, 农业部东北耕地保育重点实验室, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866)

摘要 以连续 5 a 设施番茄栽培定位施肥田间试验为依托, 选择施氮量 0、187.5、375.0、562.5 kg·hm⁻² (N0、N1、N2、N3) 及氮肥与有机肥 (M: 75 000 kg·hm⁻²) 配施 (MN0、MN1、MN2、MN3) 8 个处理, 研究了不同施氮及氮肥与有机肥配施处理土壤总有机碳 (Total organic carbon, TOC) 和水溶性有机碳 (Water soluble organic carbon, WSOC) 的含量及其剖面分布, 土壤松/稳结态胡敏酸碳 (Humic acid carbon, HA-C) 和富里酸碳 (Fulvic acid carbon, FA-C) 含量、组成及其剖面分布。结果表明: 各施肥处理 TOC、WSOC、稳结态胡敏酸碳 (HA₂-C) 和稳结态富里酸碳 (FA₂-C) 含量均随土层深度增加呈逐渐下降趋势, 而松结态胡敏酸碳 (HA₁-C) 和松结态富里酸碳 (FA₁-C) 含量均随土层深度增加呈先增加后逐渐下降趋势。与单施氮肥处理相比, 氮肥与有机肥配施处理均使 0~50 cm 土壤 TOC、WSOC、HA₁-C、FA₁-C 和 HA₂-C 含量有所提高, 其提高幅度分别为 12.44%~87.38%、11.01%~168.32%、10.15%~235.54%、2.41%~205.21% 和 3.42%~92.61%; 同时也显著提高了 0~20 cm 土层 HA/FA 及 PQ (HA 占 (HA+FA) 的比例) ($P < 0.05$), 使 0~20 cm 土层 HA₁、HA₂ 和 FA₁ 的 C/N 比增加, FA₂ 的 C/N 比略有下降, HA 的 E₄/E₆ (在波长为 465 nm 和 665 nm 处吸光度的比值) 降低, FA 的 E₄/E₆ 增加。本设施番茄栽培田间试验条件下, 连续 5 a 氮肥与有机肥配施不仅显著提高了 0~20 cm 土壤有机碳数量, 而且有利于 FA 向 HA 转化, 促进胡敏酸的形成与累积, 尤其是松结态胡敏酸的形成与累积, 进而使土壤有机碳品质得到明显改善。

关键词 设施土壤; 连续定位施肥; 松结态腐殖质; 稳结态腐殖质; PQ

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

近年来, 我国设施蔬菜生产快速发展, 2016 年设施蔬菜生产面积已达 391.5 万 hm²^[1]。由于设施蔬菜生产长期处于高温、高湿、无降水淋洗的封闭环境中, 设施土壤已出现板结、酸化、盐渍化等问题^[2]; 同时, 设施蔬菜栽培中盲目过量施肥现象仍较为普遍, 这也使土壤问题进一步加剧, 在一定程度上制约了设施农业的可持续发展^[3]。辽宁省设施蔬菜生产中有机肥施用多以鸡粪为主, 施用量在 30~120 t·hm⁻², 化肥施用量为 3~4.5 t·hm⁻²,

番茄追施氮素总量为 150~1 200 t·hm⁻²^[4]。课题组对辽宁省沈阳、大连、鞍山、朝阳、锦州、丹东、抚顺、铁岭等 121 个农户设施蔬菜生产中肥料施用情况 (种植年限 2~35 a 不等、土壤类型以棕壤、褐土和草甸土为主) 进行调查显示, 设施内每年有机肥施用量超过 150 t·hm⁻² (以鲜重计) 约占 63.7%, 化肥施用量超过 4.5 t·hm⁻² 约占 57.7%^[5]。由此可见, 辽宁省设施蔬菜生产中施肥量过大、施肥结构不合理问题尤为突出。因此, 科学合理施肥

* 国家科技支撑计划项目 (2015BAD23B01) 资助 Supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2015BAD23B01)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yuling_zhang@163.com

作者简介: 孙莹 (1993—), 女, 内蒙古乌兰浩特市人, 硕士研究生, 主要从事设施土壤肥力变化的研究。E-mail: 524087592@qq.com

收稿日期: 2018-07-27; 收到修改稿日期: 2018-09-28; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-10-31

对于改善设施土壤的不良特性及其土壤可持续利用具有重要意义。

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标, 是保证土地可持续利用的物质基础^[6]。土壤腐殖质是土壤有机质的重要组成部分, 对土壤结构和质量具有重要影响^[7]。胡敏酸 (Humic acid, HA) 是土壤腐殖质中的活跃物质, 其组成、结构和性质的变化与土壤保肥和供肥性质密切相关; 富里酸 (Fulvic acid, FA) 分子量小、活性大、氧化程度高, 对HA的形成与分解具有重要作用^[8]。HA/FA比和PQ (HA占 (HA+FA) 的比例) 是评价土壤腐殖质品质优劣的重要指标, 也能反映土壤的熟化程度及肥力状态, 其值越大说明胡敏酸含量越高, 品质越好^[9]。土壤腐殖物质的 E_4/E_6 (HA (或FA) 在波长为465nm和665nm处吸光度的比值) 可反映土壤腐殖质的缩合度、芳香度和分子量的大小, E_4/E_6 越小, 表示分子复杂程度越高, 芳香核原子团多, 缩合度高, 反之, 则芳香度低, 脂肪键越多^[10]。研究表明, 过量及长期使用化肥会加快土壤有机碳损失^[11], 而氮肥与有机肥配施可显著提高土壤有机碳含量^[12], 同时可增加土壤腐殖质含量^[13]。施用有机物料有利于土壤松结态腐殖质和稳结态腐殖质的形成^[14], 显著增加土壤腐殖质的PQ^[9], 改善土壤腐殖质组成并促进土壤腐殖化程度^[15]。氮肥与有机肥配施能较好地维持和提高土壤肥力, 增加作物产量和品质^[16]。

近年来, 设施栽培条件下氮肥与有机肥配施对土壤供氮能力^[3,17]、土壤呼吸^[12]、蔬菜产量和品

质^[16]等方面的影响有较多报道, 课题组通过定位施肥田间试验已表明, 氮肥与有机肥配施显著提高土壤有机碳含量^[12], 但目前关于连续定位氮肥与有机肥配施对土壤腐殖质组分含量、组成及其剖面分布的影响尚缺乏深入的研究和探讨。因此, 本文结合辽宁省设施蔬菜生产中大量施用有机肥和化肥的现状, 以连续5 a设施番茄栽培定位施肥田间试验为依托, 研究单施氮肥、氮肥与有机肥配施对土壤松结态和稳结态腐殖质组分碳含量、组成比例、光学特性及其剖面分布的影响, 研究结果可为设施蔬菜生产合理施用氮肥、有机肥以及可持续生产提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验在沈阳农业大学设施生产试验基地进行。试验基地于2012年建成使用, 常年有设施薄膜覆盖。由于试验地建成初期土壤比较坚实、结构较差、肥力较低, 故于2012年和2013年春季整地时均施入腐熟牛粪 (22 500 kg·hm⁻², 鲜重; 以干基计, 有机碳189.6 g·kg⁻¹、全氮18.4 g·kg⁻¹, C/N为10.3) 和腐熟鸡粪 (37 500 kg·hm⁻², 鲜重; 以干基计, 有机质217.0 g·kg⁻¹、全氮31.0 g·kg⁻¹, C/N为7.0, 铵态氮5.7 mg·kg⁻¹、硝态氮3.3 mg·kg⁻¹) 以进行基础地力培肥。土壤类型为棕壤。2012年春季整地前土壤基本理化性质见表1。

表1 2012年试验之前土壤理化性质

Table 1 The Physical – chemical properties of soil before trial in 2012

土层 Soil layer /cm	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N /(mg·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	pH	容重 Soil bulk density /(g·cm ⁻³)
0~10	25.2	2.1	58.5	0.8	13.5	19.3	29.7	7.1	1.3
10~20	8.4	1.2	53.2	0.7	11.3	18.5	42.5	7.0	1.6
20~40	9.8	1.5	34.2	0.4	8.5	18.6	35.5	7.0	1.8
40~60	12.0	1.5	26.6	0.3	9.2	17.2	63.3	7.0	1.9

1.2 试验设计

定位施肥田间试验于2013年开始连续实施, 结合当地设施番茄生产中肥料用量的调查结果和

本课题组的前期研究结果, 确定田间试验的有机肥用量和化学氮、磷和钾素用量。本研究选择8个处理, 分别为N0、N1、N2、N3、MN0、

MN1、MN2、MN3。其中N0、N1、N2、N3为施氮处理，施氮量分别为0、187.5、375.0和562.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；MN0、MN1、MN2和MN3为氮肥与有机肥配施处理，有机肥（鸡粪）施用量相同，为75 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，N0、N1、N2和N3处理施氮量与前面相同。8个处理均施用等量磷肥（ P_2O_5 为225.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）和钾肥（ K_2O 为450.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）。有机肥作为基肥均匀撒施地表，尔后人为耕翻约15~20 cm，全部磷肥、1/3氮肥和1/3钾肥作为底肥施入，2/3氮肥和2/3钾肥分别于第一穗果和第二（三）穗果膨大期分2次进行滴灌追施，每次追施量相同。各处理随机排列，3次重复。各处理间用60 cm深塑料薄膜隔开，每一处理小区面积3.8 m^2 。各处理每年有机肥和氮、磷、钾素用量相同。每年栽培作物为春茬番茄，番茄目标产量为6 000~8 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

番茄于每年4月中下旬定植，8月上旬采收结束（其他时间为土壤休闲）。每一处理共定植24株番茄（2013—2014年，每株番茄留3穗花，每穗花留4个果；2015—2017年，每株番茄留4穗花，每穗花留4个果）。各处理在番茄移栽时灌缓苗水，缓苗后采用滴灌系统进行灌溉，每隔3~5天一次，持续至番茄采收结束；用张力计进行灌水指示，当张力计读数（灌水控制下限）为35 kPa时开始灌水，各施肥处理灌溉定额相同，年平均为94.3 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。每年均有设施塑料薄膜覆盖，田间管理大致相同，每年记录各处理番茄产量。

1.3 土壤样品采集

本研究采用连续5 a定位施肥田间试验土壤样品。于2017年9月初进行采集，各小区按“S”形随机布设5点，同一土层5点取样混合为一个样品，取样深度为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm。采集的土样经风干、研磨、过60目筛后备用。

1.4 测定项目及方法

采用傅积平^[18]法提取腐殖质，采用腐殖质组成修改法^[19]分离胡敏酸（HA）和富里酸（FA）。称取过0.25 mm筛的风干土，加入蒸馏水（土：水=1：10）70℃震荡提取1 h，离心，过滤，滤液为水溶性物质（Water soluble substance, WSS）。向残渣中加入0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH（土：液比为1：10）提取松结态腐殖质

（ HE_1 ），继续向剩余残渣中加入0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH和0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ （土：液比为1：10）提取稳结态腐殖质（ HE_2 ）。吸取提取液（ HE_1 ）30 mL，加入1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H_2SO_4 调其pH为1.0~1.5，将其置于70℃水浴锅中保温1.5 h，静置过夜，次日将溶液过滤定容，此溶液即为松结态富里酸（Loosely combined fulvic acid, FA_1 ），滤纸上残渣用温热（60℃）的0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH溶解，并用其定容，即为松结态胡敏酸（Loosely combined humic acid, HA_1 ）；稳结态胡敏酸（Stably combined humic acid, HA_2 ）和稳结态富里酸（Stably combined fulvic acid, FA_2 ）分离方法同上。松/稳结态胡敏酸和富里酸均调节pH为7.0后待测^[20]。

土壤总有机碳（Total organic carbon, TOC）含量用元素分析仪（Elementar Vario EL III，德国）测定，WSOC、 $\text{HA}_1\text{-C}$ 、 $\text{FA}_1\text{-C}$ 、 $\text{HA}_2\text{-C}$ 、 $\text{FA}_2\text{-C}$ 均用TOC分析仪（Phoenix-8000，Tekmar-Dohrmann，美国）测定，土壤腐殖质各组分的光学性质采用可见光比色法（N2S可见分光光度计，上海）测定，用光学密度值 E_4 和 E_6 表示。

1.5 数据处理与分析

使用Excel 2010和Origin 8.5软件绘制图表，使用SPSS 22.0软件分析数据，使用邓肯（Duncan）法进行多重比较。无特殊说明试验数据均为3次重复的平均值。

2 结果

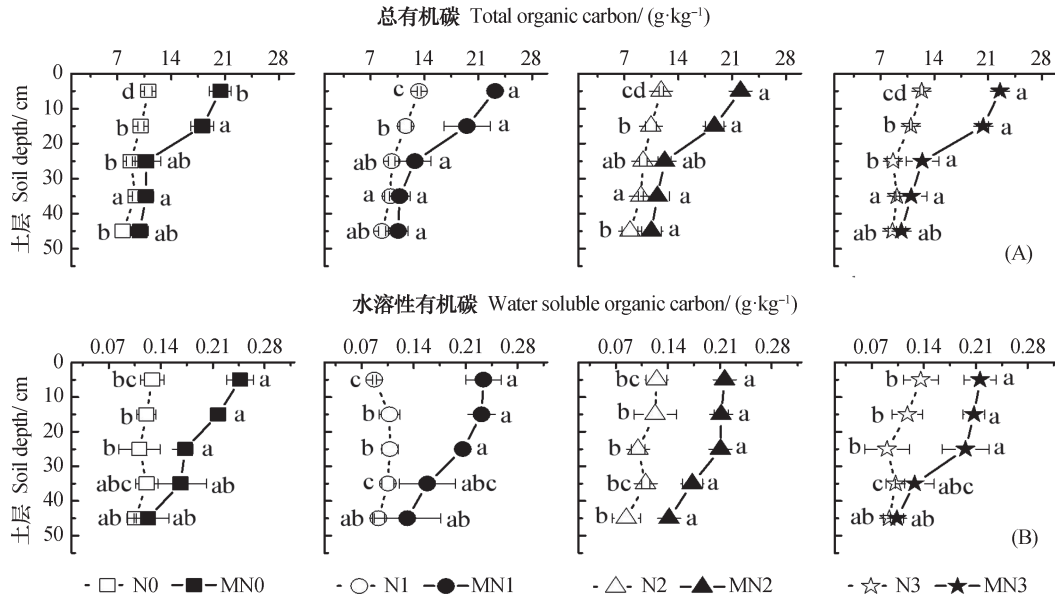
2.1 土壤总有机碳和水溶性有机碳含量及剖面分布

由图1(A)可知，氮肥与有机肥配施处理土壤TOC含量均高于施氮处理，在0~20 cm土层其含量增加显著（ $P < 0.05$ ）；单施氮肥处理土壤TOC含量为7.70~13.30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，相同土层，施氮量对TOC含量影响不显著，在0~20 cm土层，TOC含量均为 $\text{N1} > \text{N3} > \text{N2} > \text{N0}$ ；氮肥与有机肥配施处理TOC含量为9.71~23.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，施氮处理仅在0~10 cm土层显著高于单施有机肥处理，施氮量对TOC含量影响也不显著（ $P > 0.05$ ）。相同施氮条件下，氮肥与有机肥配施处理TOC含量较单施氮肥处理提高了12.44%~87.38%，各施肥处理TOC含量均随土层深度的加深呈逐渐下降趋势，但氮肥与有机肥配施

处理TOC含量在20~30 cm土层中下降最明显。总体上，单施氮肥处理和氮肥与有机肥配施处理分别以N1和MN1处理TOC含量为最高。

由图1(B)可知，施用有机肥明显增加了WSOC含量，在0~30 cm土层，施用有机肥处理WSOC含量显著高于单施氮肥处理 ($P<0.05$)，与TOC含量相比，WSOC含量有向下移动趋势。单施氮肥处理WSOC含量为0.08~0.14 g·kg⁻¹，在不同施氮处理中，

仅N3处理WSOC含量在0~10 cm土层显著高于N1处理 ($P<0.05$)，除N1处理外，其他处理WSOC含量在0~30 cm土层中均随土层深度的增加而减小；施用有机肥处理WSOC含量为0.10~0.25 g·kg⁻¹，相同施氮条件下，与单施氮肥处理相比，氮肥与有机肥配施处理WSOC含量较单施氮肥处理提高了11.01%~168.32%，各处理WSOC含量均随土层深度增加逐渐降低，与其TOC含量的剖面分布相一致。



注：N0、N1、N2、N3为施氮处理，氮素用量分别为0、187.5、375.0、562.5 kg·hm⁻²；MN0、MN1、MN2、MN3为氮肥与有机肥配施处理，其中M为有机肥（鸡粪），施用量为75 000 kg·hm⁻²（以干基计），N0、N1、N2、N3为施氮量，氮素用量与前面相同。不同小写字母表示相同土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同 Note: N0, N1, N2 and N3 stands for treatment applied with 0 kg·hm⁻², 187.5 kg·hm⁻², 375.0 kg·hm⁻² and 562.5 kg·hm⁻² N fertilizer, respectively; MN0, MN1, MN2 and MN3 stands for treatment applied with nitrogen fertilizer (0 kg·hm⁻², 187.5 kg·hm⁻², 375.0 kg·hm⁻² and 562.5 kg·hm⁻²) plus organic manure (75 000 kg·hm⁻² dry mass of chicken droppings), respectively. Different lowercase letters in the same column of soil layer mean statistically significant difference at 0.05 level. The same below

图1 不同施肥处理土壤总有机碳和水溶性有机碳含量

Fig. 1 Contents of total organic carbon and water soluble organic carbon in the soil relative to treatment

2.2 土壤松结态胡敏酸和富里酸碳含量及剖面分布

施用有机肥处理土壤HA₁-C和FA₁-C含量均高于单施氮肥处理，在0~20 cm和40~50 cm土层中，其含量均显著高于单施氮肥处理 ($P<0.05$)（图2）。由图2(A)可见，单施氮肥处理HA₁-C含量为0.51~1.53 g·kg⁻¹，占土壤TOC的4.97%~13.97%；在0~10 cm土层中，HA₁-C含量为N3 > N2 > N1 > N0，各处理之间差异显著 ($P<0.05$)，在各土层中N0处理HA₁-C含量均最小。氮肥与有机肥配施处理HA₁-C含量为1.07~3.64 g·kg⁻¹，

占土壤TOC的9.03%~17.87%，在0~20 cm土层，施氮处理HA₁-C含量显著高于单施有机肥处理，且施氮量之间差异显著 ($P < 0.05$)，相同施氮条件下，氮肥与有机肥配施处理HA₁-C含量较单施氮肥处理提高了10.15%~235.54%。总体上，所有处理HA₁-C含量的剖面分布基本一致，均随土层深度的增加呈先增加后降低趋势，各处理HA₁-C含量均在10~20 cm土层为最高，氮肥与有机肥配施处理其含量均在20~30 cm土层下降最明显。

由图2(B)可见, 单施氮肥处理FA₁-C含量为0.38~1.27 g·kg⁻¹, 占土壤TOC的3.23%~13.73%, 在0~10 cm和40~50 cm土层, 施氮量对FA₁-C含量影响显著 (*P* < 0.05); 氮肥与有机肥配施处理FA₁-C含量为1.11~1.78 g·kg⁻¹, 占土壤TOC的5.44%~12.65%, 施氮处理仅在0~10 cm土层显著高于单施有机肥处理, 且施氮

量对FA₁-C含量影响显著 (*P* < 0.05); 相同施氮条件下, 氮肥与有机肥配施处理FA₁-C含量较单施氮肥处理提高了2.41%~205.21%。总体上, 所有处理FA₁-C含量均随土层深度的增加大体呈先增加后降低的趋势, 单施氮肥处理FA₁-C含量在40~50 cm土层下降最明显, 施用有机肥处理FA₁-C含量在10~20 cm土层为最高。

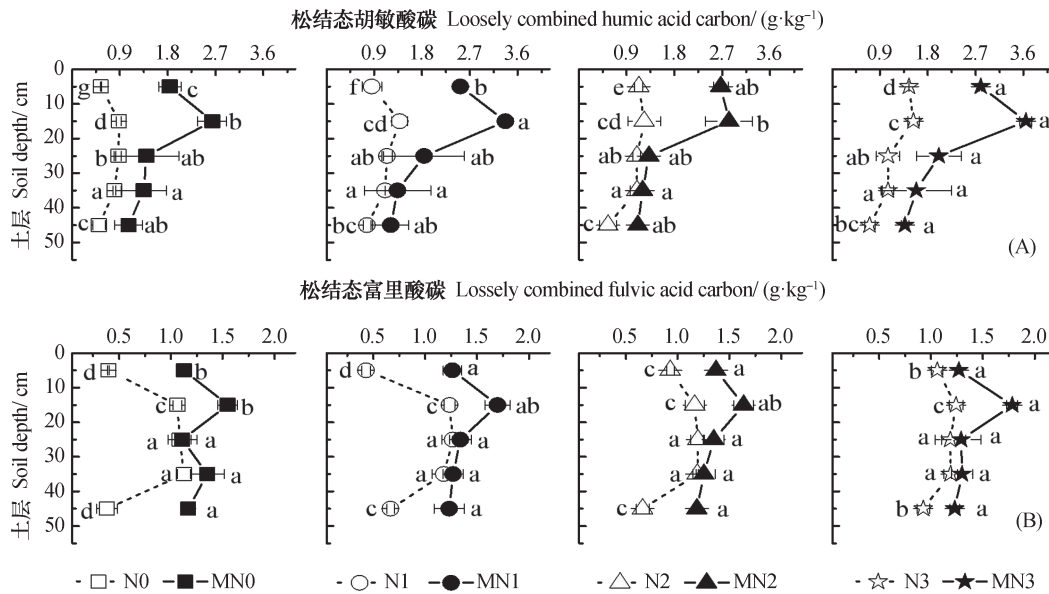


图2 不同施肥处理土壤松结态胡敏酸和富里酸碳含量

Fig. 2 Contents of soil loosely combined humic acid and fulvic acid carbon in the soil relative to treatment

2.3 土壤稳结态胡敏酸和富里酸碳含量及剖面分布

施用有机肥明显增加了各土层HA₂-C含量, 其中, 在0~20 cm和40~50 cm土层, 其含量均显著高于单施氮肥处理 (*P* < 0.05) (图3(A))。单施氮肥处理HA₂-C含量为0.58~1.56 g·kg⁻¹, 占土壤TOC的6.81%~11.70%, N1处理HA₂-C含量在0~20 cm土层显著高于其他处理 (*P* < 0.05); 氮肥与有机肥配施处理HA₂-C含量为0.77~2.08 g·kg⁻¹, 占土壤TOC的6.46%~9.08%, 施氮处理仅在0~10 cm显著高于单施有机肥处理, 施氮量对HA₂-C含量影响不显著 (*P* > 0.05); 相同施氮条件下, 氮肥与有机肥配施处理HA₂-C含量较单施氮肥处理提高了3.42%~92.61%。在0~30 cm土层中, 所有处理HA₂-C含量均随土层深度的增加而逐渐降低。

在0~10 cm土层中, MN0和MN1处理的

FA₂-C含量显著低于N0和N1处理 (*P* < 0.05), 而MN2和MN3处理FA₂-C含量则显著高于N2和N3处理 (*P* < 0.05); 在10~40 cm土层中, 各处理FA₂-C含量变化不明显 (图3(B))。单施氮肥处理FA₂-C含量为0.41~1.13 g·kg⁻¹, 占土壤TOC的4.48%~9.45%, 氮肥与有机肥配施处理FA₂-C含量为0.46~1.02 g·kg⁻¹, 占土壤TOC的3.22%~4.88%。各处理FA₂-C含量均在0~30 cm土层下降较快, 而在30~50 cm土层下降缓慢。

总体而言, 各施肥处理稳结态腐殖质组分 (HA和FA) 含量及其占TOC的比例均低于松结态腐殖质组分 (HA和FA), 这一结果说明连续5 a田间定位施肥的设施土壤腐殖质组分 (HA和FA) 以松结态为主, 但氮肥与有机肥配施则促进了松结态组分的形成和积累。

2.4 土壤胡敏酸/富里酸 (HA/FA) 比及PQ

不同处理HA/FA比和PQ在0~20 cm土层变

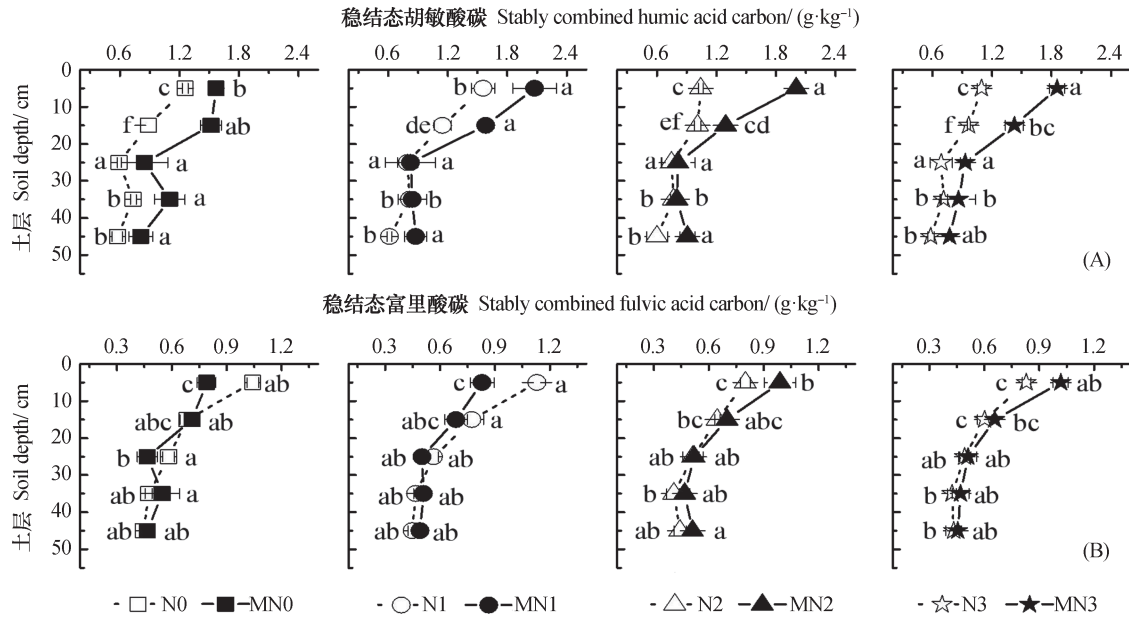


图3 不同施肥处理土壤稳结态胡敏酸和富里酸碳含量

Fig. 3 Contents of soil stably combined humic acid and fulvic acid carbon in the soil relative to treatment

化明显（表2，0~20 cm数据）。氮肥与有机肥配施显著提高了0~20 cm土层 HA_1/FA_1 、 HA_2/FA_2 和 HA/FA 比（ $P < 0.05$ ）。N1处理 HA_1/FA_1 和 HA/FA 比在0~10 cm土层显著高于其他单施氮肥处理（ $P < 0.05$ ）；氮肥与有机肥配施处理 HA_1/FA_1 、 HA_2/FA_2 和 HA/FA 比在0~10 cm土层显著高于单施有机肥处理，且施氮量对 HA_2/FA_2 比影响显著（ $P < 0.05$ ）。

氮肥与有机肥配施显著提高了0~20 cm土层 PQ_1 、 PQ_2 和 PQ （ $P < 0.05$ ），也显著提高40~50 cm土层 PQ_2 （ $P < 0.05$ ）。N1处理 PQ_1 、 PQ_2 和 PQ 在0~10 cm土层显著高于其他单施氮肥处理，且施氮量对 PQ_2 影响显著（ $P < 0.05$ ）；氮肥与有机肥配施处理 PQ_1 、 PQ_2 和 PQ 在0~10 cm土层显著高于单施有机肥处理，且施氮量仅对 PQ_2 影响显著（ $P < 0.05$ ）。

总体上，与单施氮肥相比，氮肥与有机肥配施显著提高了0~20 cm土层 HA_1/FA_1 、 HA_2/FA_2 、 HA/FA 比和 PQ_1 、 PQ_2 、 PQ ，且以 MN_1 处理提高较为明显。

2.5 土壤腐殖质组分的C/N比及 E_4/E_6

土壤C/N比及腐殖质各组分C/N比和 E_4/E_6 结果如表3所示（0~20 cm数据）。与单施氮肥处理相比，氮肥与有机肥配施处理土壤C/N比略有下降；腐殖质组分中除 FA_2 的C/N比略有降低外，

HA_1 、 FA_1 和 HA_2 的C/N比均有所增加，在0~10 cm土层， MN_1 处理 HA_1 、 FA_1 和 HA_2 的C/N比增加显著（ $P < 0.05$ ），但 HA_1 和 HA_2 的C/N比要大于 FA_1 和 FA_2 的C/N比。总体而言，与单施氮肥相比，氮肥与有机肥配施使 HA_1 、 FA_1 和 HA_2 的C/N比增加， FA_2 的C/N比下降。

不同处理腐殖质组分的 E_4/E_6 差异在0~10 cm土层表现明显。与单施氮肥处理相比，氮肥与有机肥配施处理下 HA_1 和 HA_2 的 E_4/E_6 均有所降低，而 FA_1 和 FA_2 的 E_4/E_6 有所增加，且 FA_1 和 FA_2 的 E_4/E_6 均明显大于 HA_1 和 HA_2 的 E_4/E_6 。这一结果表明氮肥与有机肥配施后 HA_1 和 HA_2 的结构复杂化， FA_1 和 FA_2 的结构简单化。

3 讨论

3.1 氮肥与有机肥配施对设施土壤总有机碳及水溶性有机碳的影响

土壤有机碳是衡量土壤肥力和质量的重要指标，也是影响土壤稳定性和生产力的重要因素^[6,21]。在旱田土壤的研究表明，施用有机肥可提高土壤有机碳含量，有机肥与无机肥配施更有利于土壤有机碳的积累^[22-23]，土壤有机碳含量随土层深度的增加而逐渐降低，且各处理之间的差异也逐渐减小^[23]；与单施化肥相比，增施有机肥或化

表2 不同施肥处理HA/FA比及PQ

土层 Soil depth	处理 Treatment	HA/FA			PQ		
		HA ₁ /FA ₁	HA ₂ /FA ₂	HA/FA	PQ ₁	PQ ₂	PQ
0 ~ 10 cm	N0	1.38bc	1.22e	1.27d	0.58c	0.55f	0.56c
	N1	1.89a	1.40d	1.54c	0.65a	0.58d	0.61b
	N2	1.22c	1.28de	1.25d	0.55c	0.56ef	0.56c
	N3	1.32c	1.35de	1.33d	0.57c	0.57de	0.57c
	MN0	1.62b	1.70c	1.66c	0.62b	0.63c	0.62b
	MN1	1.89a	2.44a	2.10a	0.65a	0.71a	0.68a
	MN2	1.96a	2.18b	2.05ab	0.66a	0.69b	0.67a
	MN3	2.02a	1.77c	1.91b	0.67a	0.64c	0.66a
	10 ~ 20 cm	N0	0.86d	1.35d	1.05d	0.46c	0.57d
N1		1.09cd	1.57c	1.26c	0.52bc	0.61c	0.56c
N2		1.00cd	1.57c	1.20cd	0.50bc	0.61c	0.55c
N3		1.19c	1.66c	1.33c	0.54b	0.62c	0.57c
MN0		1.77ab	2.15a	1.89ab	0.64a	0.68a	0.65ab
MN1		2.06a	2.15a	2.08a	0.67a	0.68a	0.68a
MN2		1.74b	1.82b	1.77b	0.64a	0.65b	0.64b
MN3		2.01ab	2.15a	2.05a	0.67a	0.68a	0.67a

注: HA/FA: 胡敏酸碳与富里酸碳的比; PQ: 胡敏酸在可提取腐殖质 (HA+FA) 中所占的比例; HA₁和FA₁: 松结态胡敏酸和富里酸; HA₂和FA₂: 稳结态胡敏酸和富里酸。不同小写字母表示相同土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同 Note: HA/FA: The ratio of humic acid and fulvic acid carbon; PQ: The ratio of humic acid proportion in ex-tractable humus (HA+FA); HA₁ and FA₁: Loosely combined humic acid and fulvic acid; HA₂ and FA₂: Stably combined humic acid and fulvic acid. Different lowercase letters in the same column of soil layer mean statistically significant difference at 0.05 level. The same below

肥与有机物料配施均显著提高土壤水溶性有机碳含量^[10,24]。对设施土壤的研究也表明,有机物料与氮肥配施可显著增加表层土壤有机碳含量和碳储量^[25]。课题组通过连续3 a的定位施肥试验也得出氮肥与有机肥配施显著提高了土壤有机碳含量,且施氮量对土壤有机碳含量的影响显著^[12]。而本研究连续5 a定位施肥试验的结果与之相似,与单施氮肥相比,氮肥与有机肥配施提高了0~50 cm土层土壤有机碳含量,且在0~20 cm土层增加显著 ($P < 0.05$),氮肥与有机肥配施处理0~10 cm土壤有机碳含量显著高于单施有机肥处理,各处理土壤有机碳含量均随土层深度的增加大体呈逐渐下降趋势,各处理之间差异逐渐减小(图1(A)),这与兰宇等^[23]的研究结果一致。此外,本研究中,与单施氮肥相比,施用有机肥、氮肥与有机肥配施显著增加了0~30 cm土层土壤水溶性有机碳含量;在0~50 cm土层,土壤水溶性有机碳含量随土层深

度的增加呈下降趋势,不同施氮量之间差异不显著(图1(B))。这一结果说明设施栽培条件下,由于设施内半封闭条件及高温高湿的土壤环境,促进了有机肥料的矿化分解及其向下淋移,致使连续5 a氮肥与有机肥配施不仅影响了土壤有机碳数量,也影响了土壤水溶性有机碳数量,并且连续5 a施用有机肥料处理的土壤水溶性有机碳含量的变化较土壤总有机碳的变化更为明显,这也进一步说明土壤水溶性有机碳占总有机碳的比例虽然很小,但它对土壤腐殖质的形成、土壤养分元素的活化等影响很大^[26]。

3.2 氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分含量及其特性的影响

土壤腐殖质以松结合态和稳结态存在,其中,松结态的活性较高。李阳和王继红^[15]研究认为,长期施用有机肥,不仅可提高旱地土壤游离态(松结态)腐殖质含量,而且可提高旱地土壤结态(稳

表3 不同施肥处理C/N及胡敏酸(富里酸)在波长为465nm (E₄)和665nm (E₆)处吸光度的比值Table 3 C/N and ratio of absorbance at 465nm (E₄) and 665nm (E₆) wavelengths of the humic acid (fulvic acid) in the soil relative to treatment

土层 Soil depth	处理 Treatment	C/N					E ₄ /E ₆			
		TOC/TN	HA ₁	FA ₁	HA ₂	FA ₂	HA ₁	FA ₁	HA ₂	FA ₂
0 ~ 10 cm	N0	9.60a	5.07c	5.99b	10.09c	12.04a	6.32bc	6.50d	4.63a	13.83de
	N1	9.14ab	8.53b	5.41b	13.00b	11.69a	6.65bc	10.67cd	4.66a	10.18e
	N2	9.37a	9.37ab	9.81a	11.01c	9.34bc	7.34ab	8.82d	4.56a	19.17c
	N3	8.32ab	11.31ab	10.43a	10.01c	9.84abc	7.91a	14.33bc	4.59a	28.39b
	MN0	8.54ab	12.25a	10.46a	10.81c	8.04c	5.20d	8.54d	4.46a	15.94cd
	MN1	8.53ab	11.82a	10.35a	15.22a	8.91bc	6.31bc	15.67b	3.28b	14.25de
	MN2	8.43ab	11.31ab	10.88a	13.84ab	10.63ab	6.22c	18.83b	4.34a	37.89a
	MN3	7.34b	12.46a	10.50a	14.82ab	10.28ab	6.32bc	23.33a	4.38a	40.67a
10 ~ 20 cm	N0	10.03a	13.92cd	12.85b	16.33d	14.40a	6.58ab	7.56b	4.40a	13.44b
	N1	9.36ab	12.85d	14.34ab	16.48d	13.97a	6.92a	8.33b	4.29ab	13.61b
	N2	9.70ab	15.08cd	14.02ab	17.84c	12.78abc	6.49ab	10.36b	4.35ab	11.67b
	N3	8.74ab	15.08cd	14.17ab	17.91c	12.73abc	6.82a	10.36b	4.37ab	11.09b
	MN0	8.90ab	27.58a	14.49ab	20.21a	11.91bc	6.26b	20.67a	4.07b	22.42a
	MN1	8.79ab	16.19c	14.79a	17.22cd	13.39ab	6.30b	22.50a	4.20ab	14.56b
	MN2	8.63ab	19.94b	14.25ab	18.07c	13.24abc	6.47ab	12.58b	4.13ab	14.72b
	MN3	7.63b	17.03bc	14.11ab	19.12b	11.53c	6.47ab	11.68b	4.22ab	12.31b

注: TOC/TN: 总有机碳与全氮的比 Note: TOC/TN: The ratio of total organic carbon and total nitrogen

结态)腐殖质含量;但任玲^[14]的研究则表明,施用有机肥料显著提高了土壤松结态腐殖质含量,但联结态腐殖质含量增加不明显。本研究结果显示,设施栽培连续5 a定位施肥条件下,各施肥处理土壤稳结态腐殖质组分(HA₂和FA₂)含量及其占TOC的比例均低于松结态腐殖质组分(HA₁和FA₁);与单施氮肥处理相比,氮肥与有机肥配施显著提高了0~20 cm土层土壤松结态胡敏酸、富里酸和稳结态胡敏酸碳含量(P<0.05),其中,松结态胡敏酸碳含量及其占TOC的比例提高最为明显,且施氮量对0~20 cm土层土壤松结态胡敏酸碳含量影响显著,这表明氮肥与有机肥配施对土壤松结态腐殖质组分影响要明显大于对稳结态腐殖质组分的影响,氮肥与有机肥配施则促进了松结态组分,尤其是松结态胡敏酸的形成和积累。

研究表明,滴灌处理设施土壤松结态腐殖质和联结态腐殖质碳含量均随土层加深而不断下降^[27];设施土壤松结态腐殖质活性较高,且设施环境内二氧化碳含量较高、水分灌溉较多,更有利于富

里酸的稳定^[28]。本研究显示,土壤松结态胡敏酸和富里酸碳含量的剖面分布特征表现为随着土层深度的增加呈先增加后降低的趋势,在10~20 cm土层含量最高(图2),而土壤稳结态胡敏酸和富里酸碳含量则大体呈下降趋势(图3),这可能一方面由于采用滴灌系统进行灌溉,灌水相对较为频繁,表层经常维持较高的水分状态,在这一水分条件下,土壤稳结态富里酸相对稳定,受施肥影响较小,而土壤松结态腐殖质受施肥影响较大,导致其容易被分解、转化,向下层移动;另一方面,有机肥混合施入土壤深度为15~20 cm,设施内高温高湿的环境条件下,0~10 cm土层形成的松结态腐殖质组分进一步腐解转化速率较快,而10~20 cm土层形成的松结态腐殖质组分腐解转化速度则相对较慢,因此,10~20 cm土层土壤松结态胡敏酸和富里酸碳含量大于表层。

施用有机物料可提高作物根系土壤HA/FA比和PQ,有利于胡敏酸积累,进一步加深土壤腐殖化程度^[10]。施用有机肥可提高土壤HA/FA比,促进

了稳定的腐殖质化合物形成,增加了土壤有机质的稳定性^[29]。本研究中,连续5 a氮肥与有机肥配施增加了土壤HA₁/FA₁、HA₂/FA₂和HA/FA比及PQ₁、PQ₂和PQ,在0~20 cm土层增加显著(表2),这说明氮肥与有机肥配施处理,每年施入的大量有机肥使得土壤中新形成的年轻腐殖质多,不仅有利于土壤腐殖质的更新和活化,更有利于胡敏酸的积累和土壤腐殖质品质的提高^[8]。

C/N比可以反映土壤腐殖质的腐殖化程度,其值越高,腐殖化程度越低^[10]。氮肥与有机肥配施使HA₁、HA₂和FA₁的C/N比增加,FA₂的C/N比略有下降(表3),说明设施内连年施用较高用量(75 000 kg·hm⁻²)有机肥促进土壤中活性较高的富里酸和胡敏酸组分的形成,活性较高的腐殖质增多,易于土壤矿化,有利于土壤结构改善、土壤肥力及土壤固碳功能提高^[30]。此外,氮肥与有机肥配施使HA₁和HA₂的E₄/E₆均有所降低,使HA的芳构化程度增加,结构趋于复杂化,而FA₁和FA₂的E₄/E₆则有所增加,使FA的芳构化程度降低,结构趋于简单化(表3)。课题组对连续3 a定位施肥田间试验的研究结果显示,氮肥与有机肥配施可显著提高土壤呼吸,促进CO₂排放^[12],说明随着大量有机肥的连年施用,土壤中新形成的活性较高、结构较为简单腐殖质在微生物作用下易于分解转化,一部分被矿化分解生成CO₂、H₂O,另一部分则作为微生物的代谢产物残存下来,通过聚合反应使土壤胡敏酸结构进行再缩合和重组,形成新的芳香度程度较高、难分解的高分子化合物^[31]。这也进一步说明,在设施栽培条件下,连续5 a氮肥与有机肥配施可促进土壤富里酸向胡敏酸转化,提高有机质的腐殖化程度,尤其是提高0~20 cm土层腐殖质的品质,这对于改善和提高设施土壤质量具有重要意义。

此外,连续5 a施用有机肥条件下,总体上MN1处理在0~20 cm土层的TOC含量(图1(A))和HA/FA比、PQ为最大(表2),0~10 cm土层HA₁、HA₂和FA₁的C/N比显著增加($P<0.05$),腐殖质各组分的E₄/E₆在0~10 cm土层也较低(表3)。课题组前期研究结果表明,MN1处理土壤可溶性氮库和固定态铵含量相对较低^[17,32],土壤呼吸提高^[12],这说明大量有机肥与少量化学氮肥配施条件下,会促进土壤腐殖质的更新和活化,更有

利于腐殖质的积累,因此,MN1处理不仅可提高土壤有机碳数量、改善腐殖质品质,而且有利于设施土壤的培肥。

4 结 论

通过连续5 a设施番茄栽培定位施肥田间试验,与单施氮肥相比,氮肥与有机肥配施可使0~50 cm土层土壤TOC、WSOC、HA₁-C、FA₁-C和HA₂-C含量明显增加,均以0~20 cm土层的增加显著($P<0.05$);土壤TOC、WSOC、稳结态HA₂-C和FA₂-C含量均随土层深度加深呈逐渐下降趋势,各处理间含量差异逐渐减弱,而土壤松结态HA₁-C和FA₁-C含量则随土层深度的加深呈先上升后下降的趋势,各处理间含量差异在0~20 cm土层表现明显;氮肥与有机肥配施增加了土壤HA₁/FA₁、HA₂/FA₂、HA/FA的比及PQ₁、PQ₂、PQ,有利于土壤中活性较高的腐殖质的形成,使HA的结构趋于复杂化,FA的结构趋于简单化,促进土壤FA向HA转化,加深土壤腐殖化程度。总体而言,本试验条件下连续5 a施用大量且含氮量高的有机肥(75 000 kg·hm⁻²),化学氮素用量为187.5 kg·hm⁻²时,既可提高土壤有机碳数量,又有利于改善有机碳品质。

参 考 文 献

- [1] 许斌星,马标,陈永生,等.我国设施蔬菜有机肥撒施装备研究现状及发展趋势.中国农机化学报,2017,38(6):40-44
Xu B X, Ma B, Chen Y S, et al. Status and development trend of organic fertilizer broadcast application equipments in greenhouse vegetables in China (In Chinese). Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6):40-44
- [2] Yin Y, Liang C H, Pei Z J, et al. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China. Catena, 2015, 133: 412-419
- [3] Duan P P, Zhang Y L, Cong Y H, et al. The dynamics of soil-soluble nitrogen and soil-retained nitrogen in greenhouse soil. Acta Agriculturae Scandinavica, 2016, 67(1):51-61
- [4] 王颖.辽宁省设施蔬菜施肥现状及建议.辽宁农业科学,2015(3):49-50

- Wang Y. Situation and recommendations of facility vegetable fertilizer in Liaoning Province (In Chinese). *Liaoning Agricultural Sciences*, 2015 (3): 49—50
- [5] 段鹏鹏. 氮肥与有机肥配施对设施土壤供氮能力的影响. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016
- Duan P P. Effect of combined application N fertilizer and manure on soil N supply capacity in greenhouse condition (In Chinese). *Shenyang: Shenyang Agricultural University*, 2016
- [6] Hua K, Wang D, Guo X, et al. Carbon sequestration efficiency of organic amendments in a long-term experiment on a vertisol in Huang-Huai-Hai Plain, China. *PLoS One*, 2014, 9: e108594
- [7] Sandrine S. Changes in humus forms, soil invertebrate communities and soil functioning with forest dynamics. *Applied Soil Ecology*, 2018, 123: 345—354
- [8] 褚慧, 宗良纲, 汪张懿, 等. 不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 931—939
- Chu H, Zong L G, Wang Z Y, et al. Dynamic changes in humus composition in vegetable soils different in cultivation mode (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 931—939
- [9] 董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (2): 322—328
- Dong S S, Dou S. Effect of different ways of corn stover application to soil on composition and structural characteristics of organic carbon in black soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (2): 322—328
- [10] 王维, 吴景贵, 李蕴慧, 等. 有机物料对不同作物根系土壤腐殖质组成和结构的影响. *水土保持学报*, 2017, 31 (2): 215—220
- Wang W, Wu J G, Li Y H, et al. Effects of organic materials on the composition and structure of humic substance in the rhizosphere soil of different crops (In Chinese). *Journal of Soil & Water Conservation*, 2017, 31 (2): 215—220
- [11] Shen H, Xu Z H, Yan X L. Effect of fertilization on oxidizable carbon, microbial biomass carbon, and mineralizable carbon under different agro ecosystems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32 (9-10): 1575—1588
- [12] 王春新, 于鹏, 张玉玲, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤呼吸的影响. *土壤通报*, 2017, 48 (1): 146—154
- Wang C X, Yu P, Zhang Y L, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and manure on soil respiration in greenhouse cultivation (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (1): 146—154
- [13] Tripolskaja L, Romanovskaja D, Slepeticene A, et al. Effect of the chemical composition of green manure crops on humus formation in soddy-podzolic soil. *Eurasian Soil Science*, 2014, 47 (4): 310—318
- [14] 任玲. 覆膜滴灌有机培肥土壤有机碳的变化特征研究. 长春: 吉林农业大学, 2016
- Ren L. Drip irrigation with plastic and organic fertilizer effect on change characteristics of soil organic carbon research (In Chinese). *Changchun: Jilin Agricultural University*, 2016
- [15] 李阳, 王继红. 长期施肥土壤腐殖质变化及其与土壤酸度变化的关系. *南京农业大学学报*, 2016, 39 (1): 114—119
- Li Y, Wang J H. Variation of soil humus under long-term fertilization and its relation to soil acidity (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39 (1): 114—119
- [16] Kisetu E, Heri P. Effects of poultry manure and NPK (23: 10: 5) fertilizer on tomato variety tanya grown on selected soil of morogoro region, tanzania. *Asian Journal of Crop Science*, 2014, 6 (2): 165—175
- [17] 段鹏鹏, 丛耀辉, 徐文静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响. *中国农业科学*, 2015, 48 (23): 4717—4727
- Duan P P, Cong Y H, Xu W J, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and manure on the dynamic of soil soluble N in greenhouse cultivation (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (23): 4717—4727
- [18] 傅积平. 土壤结合态腐殖质分组测定. *土壤通报*, 1983, 12 (2): 36—37
- Fu J P. Group determination of soil combined humus (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1983, 12 (2): 36—37
- [19] Kumada K, Sato O, Ohsumi Y, et al. Humus composition of mountain soils in Central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13 (5): 151—158
- [20] 窦森, 周桂玉, 邵晨, 等. 土壤提取液中有机碳量测定方法的比较. *东北林业大学学报*, 2013, 41 (2): 99—101
- Dou S, Zhou G Y, Shao C, et al. Comparison on determination methods of organic carbon content in soil extracts (In Chinese). *Journal of Northeast*

- Forestry University, 2013, 41 (2): 99—101
- [21] Clercq T D, Heiling M, Dercon G, et al. Predicting soil organic matter stability in agricultural fields through carbon and nitrogen stable isotopes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 29—38
- [22] 郝小雨, 马星竹, 周宝库, 等. 长期不同施肥措施下黑土有机碳的固存效应. *水土保持学报*, 2016, 30 (5): 316—321
- Hao X Y, Ma X Z, Zhou B K, et al. Effect of different long-term fertilization practices on carbon sequestration in black soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (5): 316—321
- [23] 兰宇, Muhammad Imran Asshraf, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响. *环境科学学报*, 2016, 36 (1): 264—270
- Lan Y, Muhammad I A, Han X R, et al. Effect of long-term fertilization on total organic carbon storage and carbon sequestration rate in a brown soil (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36 (1): 264—270
- [24] 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 不同施肥措施对白土腐殖质组成的影响. *土壤*, 2016, 48 (1): 76—81
- Wu P P, Wang J J, Li L J. Effects of different fertilizations on humus components of white soil (In Chinese). *Soils*, 2016, 48 (1): 76—81
- [25] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124 (4): 119—130
- [26] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2010
- Dou S. Soil organic matter (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [27] 杨洋. 灌溉方式对设施土壤腐殖质含量及其组分的影响. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017
- Yang Y. Effects of irrigation methods on humus and its components of facilities Soil (In Chinese). Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017
- [28] 窦森, Yves Tardy, 张晋京, 等. 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究. *土壤学报*, 2010, 47 (1): 71—76
- Dou S, Yves T, Zhang J J, et al. Thermodynamic stability of humic acid and fulvic acid in soil and its driving factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (1): 71—76
- [29] Dębska B, Długosz J, Piotrowska-Długosz A, et al. The impact of a bio-fertilizer on the soil organic matter status and carbon sequestration—Results from a field-scale study. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16 (10): 1—9
- [30] 王景燕, 龚伟, 胡庭兴. 川南坡地不同退耕模式对土壤腐殖质及团聚体碳和氮的影响. *水土保持学报*, 2012, 26 (2): 155—160
- Wang J Y, Gong W, Hu T X. Soil humus and aggregate carbon and nitrogen in slope farmland with different de-farming patterns in southern sichuan province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (2): 155—160
- [31] 董珊珊, 窦森, 邵满娇, 等. 秸秆深还不同年限对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 150—159
- Dong S, Dou S, Shao M, et al. Effect of corn stover deep incorporation with different years on composition of soil humus and structural characteristics of humic acid in black soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 150—159
- [32] 段鹏鹏, 张玉玲, 丛耀辉, 等. 氮肥与有机肥配施协调土壤固定态铵与可溶性氮的研究. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (6): 1578—1585
- Duan P P, Zhang Y L, Cong Y H, et al. Regulation of soil fixed ammonium and soluble N through combined application of N fertilizer and manure (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (6): 1578—1585

Effect of Combined Application of Nitrogen Fertilizer and Organic Manure on Soil Humus Composition in Greenhouse

SUN Ying HOU Wei CHI Meijing YU Na FAN Qingfeng ZOU Hongtao ZHANG Yuling[†]
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University; Key Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China), Ministry of Agriculture; National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

Abstract 【 Objective 】 Composition and component ratio of soil humus are important indicators for assessing soil organic carbon quality, and also have important influences on soil structure and quality. Soil humus varies in combination form and hence in effect on soil structure and soil fertility as well. Therefore, it is of great significance to rational fertilization in facilitated vegetable production to study effect of application of nitrogen(N) fertilizer and organic manure on component contents, composition and profile distribution of soil humus under greenhouse. 【 Method 】 For this study a field fertilization experiment was conducted in a greenhouse growing tomato for five consecutive years. The experiment was designed to have four treatments (N0, N1, N2 and N3) of applying merely N fertilizer at a rate of 0, 187.5, 375.0, and 562.5 kg·hm⁻², respectively, and four (MN0, MN1, MN2 and MN3) combined application of N fertilizer and organic manure that is, each of the four N treatments coupled with organic manure (M: 75 000 kg·hm⁻²). Total organic carbon (TOC), water soluble organic carbon (WSOC), soil loosely and stably combined humic acid carbon (HA-C) and fulvic acid carbon (FA-C) in all the eight treatments were monitored for content, composition and profile distribution in the greenhouse soil. Soil water soluble substance (WSS), loosely combined humus and stably combined humus were extracted with Fu Jiping, soil humic acid (HA) and fulvic acid (FA) separated with the modified humus component method, and organic carbon content of each determined. 【 Result 】 In all fertilization treatments, the contents of TOC, WSOC, stably combined humic acid carbon (HA₂-C) and fulvic acid carbon (FA₂-C) gradually decreased with soil depth, whereas the contents of loosely combined humic acid carbon (HA₁-C) and fulvic acid carbon (FA₁-C) increased first and then decreased with soil depth. But the contents of soil TOC, WSOC and humus components were the highest in the 0 ~ 20 cm soil layer. Compared with application of mere N fertilizer, combined fertilization increased the content of TOC, WSOC, HA₁-C, FA₁-C and HA₂-C by 12.44% ~ 87.38%, 11.01% ~ 168.32%, 10.15% ~ 235.54%, 2.41% ~ 205.21% and 3.42% ~ 92.61%, respectively, in the 0 ~ 50 cm soil layer. The effect was especially significant for TOC, WSOC, HA₁-C, FA₁-C and HA₂-C in the 0 ~ 20 cm soil layer ($P < 0.05$) and for HA₁-C, FA₁-C and HA₂-C in the 40 ~ 50 cm soil layer ($P < 0.05$). Combined fertilization also significantly improved the ratio of HA₁/FA₁, HA₂/FA₂, and HA/FA and PQ₁ (HA₁-C/(HA₁-C+ FA₁-C)), PQ₂ (HA₂-C/(HA₂-C+ FA₂-C)), and PQ (HA-C/(HA-C+ FA-C)) in the 0 ~ 20 cm soil layer ($P < 0.05$), increased the C/N ratios of HA₁, HA₂ and FA₁, but slightly decreased that of FA₂ in the 0 ~ 20 cm soil layer. Besides, combined fertilization also decreased E₄/E₆ (The ratio of absorbance at 465 nm and 665 nm wavelengths) of the soil HA, but increased E₄/E₆ of the soil FA. 【 Conclusion 】 Under the conditions of tomato cultivation in the greenhouse, combined fertilization for 5 consecutive years not only significantly increases the amount of soil organic carbon in the 0 ~ 20 cm soil layer, but also helps FA transform to HA, promotes formation and accumulation of humic acid, especially loosely combined humic acid, and consequently improves quality of

the soil organic carbon significantly. It is, therefore, concluded that combined application of $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ N fertilizer and $75\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ organic manure is the best option to improve quantity and quality of soil organic carbon.

Key words Greenhouse soil; Consecutive stationary fertilization; Loosely combined humus; Stably combined humus; PQ

(责任编辑: 陈荣府)