

不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化*

褚慧¹ 宗良纲^{1†} 汪张懿¹ 谢少华¹ 杨旒¹ 罗敏²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 环境保护部有机食品发展中心, 南京 210042)

摘要 通过在南京普朗克有机农场开展的 9 年长期定位监测,研究了有机(露地和大棚)和常规种植模式下蔬菜地耕层土壤有机碳和土壤腐殖质组分特性的动态变化。结果表明,有机露地、有机大棚和常规露地种植土壤有机碳含量分别从 11.41、9.29、9.00 g kg⁻¹ 提高至 15.35、20.90、10.00 g kg⁻¹;胡敏酸碳(C_{HA})分别从 1.79、1.23、1.14 g kg⁻¹ 提高至 2.11、3.11、1.31 g kg⁻¹;富里酸碳(C_{FA})分别从 2.19、1.88、1.73 g kg⁻¹ 提高至 2.44、2.68、1.91 g kg⁻¹。两种有机种植模式的土壤有机碳及腐殖质组分含量增加达到显著水平,而常规种植模式下的变化不显著。两种有机种植模式下表征土壤腐殖质品质的胡/富比(C_{HA}/C_{FA})、胡敏酸占总腐殖物质的比例(PQ 值)均高于常规种植模式,土壤富里酸的光学密度值 E₄/E₆、色调系数(ΔlogK)值随着种植时间增加的幅度较常规种植模式更大,土壤胡敏酸芳化度呈现先降低后增高的趋势,但在常规种植下变化不明显。说明土壤在长期有机种植模式下不仅更有利于土壤有机碳的积累,而且能促进土壤腐殖化进程。

关键词 有机农业;土壤有机碳;腐殖质;胡敏酸;富里酸;动态变化

中图分类号 S153.62 **文献标识码** A

土壤作为全球碳循环的源和汇,其微小变化就能引起大气中 CO₂ 浓度的较大波动,从而对全球环境变化产生重大影响。据估算,土壤中以有机质形式存在的碳含量(约 1 550 Pg)约占陆地总有机碳库的 2/3,为大气碳库的 2 倍^[1]。国外科学家提出,农业土壤固碳是唯一在控制气候变化上没有遗憾的技术^[2]。根据 IPCC 建议,89% 的农业温室气体减排潜力在于提高土壤固碳水平方面^[3]。良好的农业生产系统是提高土壤固碳水平的有效方式,而有机农业与常规农业系统相比,在土地资源利用、养分管理、肥料运筹以及病虫害防治等方面显著不同,因此有机农业被认为具有更大的减缓农田土壤温室气体排放的潜力^[4-5]。有机农业内涵完全符合低碳经济的要求,是国际社会认同的具有环保理念的农业发展模式。

近年来,有机农业及其相关的学术研究得到了较快的发展。Clark 等^[6]通过八年的田间定位试验发现有机种植能够明显提高土壤有机碳的含量,而

常规种植方式下土壤有机碳却没有明显变化;这一种结论在 Pimentel 等^[7]的试验结果中得到了验证。Fliessbach 等^[8]通过长期定位试验发现施用有机肥的土壤有机碳提高了 1%,而不施肥和施用化肥的土壤有机碳分别降低了 22% 和 15%。Liu 等^[9]研究表明有机种植系统中土壤微生物多样性显著高于常规种植系统。也有研究表明有机种植系统中的土壤微生物量和土壤酶活性显著高于常规种植系统^[10]。我国有机种植业起步较晚,相关研究则主要致力于通过对有机和常规种植的相互比较来制定各种生产、加工和销售的管理条例,而有关有机农业和常规农业的固碳特性固碳潜力方面的比较研究鲜有报道,尤其是对于在我国种植业结构中所占比重越来越高的蔬菜生产的固碳潜力研究较缺乏。

本文以南京普朗克有机农场长期定位观测的菜地土壤为研究对象,比较有机种植(有机露地和有机大棚)和常规种植模式下蔬菜地土壤有机碳、腐殖质组分碳含量及特性的动态变化,分析不同种

* 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(11)3042)资助

† 通讯作者, E-mail: zonglg@njau.edu.cn

作者简介:褚慧(1987—),女,硕士研究生,主要研究方向为环境质量与食品安全。Tel: 025-84396406; E-mail: 2010103062@njau.edu.cn

收稿日期:2012-10-26;收到修改稿日期:2013-03-06

植模式与土壤固碳特性的关系,为实现农业可持续发展提供理论依据与实践借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

从 2003 年开始,采用 GPS 定位技术在南京市溧水县境内的普朗克有机农场(118°34'~119°14'

E,31°23'~31°48' N)选取 9 个地块作为长期监测采样地块(表 1),每块面积约 0.5 hm²,供试土壤为由黄棕壤发育演变而成的菜园土。该农场属北亚热带季风气候,年平均降水量为 1 037 mm,年均气温 15.5 °C,年均日照 2 146 h。试验开始前,各地块均有抛荒数年的历史,土壤养分含量较低。2003 年供试土壤耕层(0~20 cm)的基本理化性质见表 2。

表 1 不同种植模式作物布局与管理方式
Table 1 Different crop layouts and management modes

种植模式 ¹⁾ Planting patterns	各个地块的经纬度 Latitude and longitude of each plot	管理方式 Management mode	种植作物 Crops
OR	31°35'10"N, 119°03'55"E	经过有机认证的商品有机肥,无化学投入品,灯诱法捕虫等	油菜,白菜,萝卜,胡萝卜,生菜,西红柿,青菜,黄瓜,采用轮作的方式
	31°35'10"N, 119°03'58"E		
	31°35'12"N, 119°04'01"E		
ZH	31°35'24"N, 119°04'01"E	同上	同上
	31°35'25"N, 119°04'03"E		
	31°35'29"N, 119°04'04"E		
CN	31°35'45"N, 119°04'07"E	农家肥、化肥和农药等化学投入品	同上
	31°35'44"N, 119°03'59"E		
	31°35'36"N, 119°04'03"E		

1)OR,有机露地种植模式(2003 年获得有机认证);OR stands for organic cultivation in open field (certified organic since 2003);ZH,有机大棚种植模式(2006 年获得有机认证);ZH for organic cultivation in greenhouse (certified organic since 2006);CN,常规种植模式;CN for conventional cultivation. 下同 The same below

表 2 不同种植模式下土壤的理化性质
Table 2 Soil physical and chemical properties as affected by cultivation mode

种植模式 Planting patterns	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Readily available K (mg kg ⁻¹)	pH
OR	1.64 ± 0.04	9.34 ± 0.49	1.31 ± 0.12	0.21 ± 0.04	19.35 ± 2.98	148.8 ± 13.1	5.86 ± 0.09
ZH	1.65 ± 0.01	9.22 ± 0.10	1.29 ± 0.17	0.18 ± 0.01	17.95 ± 1.70	143.8 ± 16.1	5.79 ± 0.04
CN	1.67 ± 0.02	9.27 ± 0.23	1.36 ± 0.07	0.19 ± 0.05	18.40 ± 0.71	138.5 ± 23.6	5.82 ± 0.21

1.2 试验设置

本试验共设 3 种植模式:两个有机种植模式组(有机露地种植用 OR 表示;有机大棚种植用 ZH 表示)和一个常规露地种植模式组(CN)。其中 2006 年获得有机认证的大棚种植模式 ZH 的轮作频率高于 2003 年获得有机认证的露地种植模式 OR。为避免互相干扰,常规地块与有机地块的过渡区域足够大。

各地块均采用轮作的方式种植蔬菜,作物种类见表 1。OR 和 ZH 施用的有机肥(有效活菌数 ≥ 0.5 × 10⁸ CFU g⁻¹,有机质含量 ≥ 250 g kg⁻¹,速效氮

612.5 mg kg⁻¹,pH 6.24)是经过环境保护部有机食品发展中心认证的,每年每季蔬菜施用量为 7.5 t hm⁻²,并且无植保化学投入品,采用物理和生物措施防治病虫害。CN 种植模式主要施用尿素(N, ≥ 46%),过磷酸钙(P₂O₅, ≥ 16%)、氯化钾(K₂O, ≥ 50%),每年每季蔬菜施氮量为 200~400 kg hm⁻²,按氮、磷、钾的质量比 1:0.35:0.15 的比例施肥;植保化学投入品为市售多菌灵、阿维菌素及分除虫菊酯(使用量为生产上推荐使用量)。其他栽培管理方式保持一致。

1.3 样品采集与分析

本研究自 2004 年开始,每隔一年于上述地块中采用棋盘法选择 8~10 个采样点,采集 0~20 cm 土层的土样,混合均匀后再按四分法进行取舍,保留 1 kg 左右土样装袋带回实验室,自然晾干并去除植物根系、砾石后研磨过筛备用。

土壤容重采用环刀法测定;土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷、速效钾、pH 的测定参考文献[11];土壤腐殖质的提取和分离参照 Kumada 等^[12]的方法,用 0.1 mol L⁻¹ NaOH + 0.1 mol L⁻¹ Na₄P₂O₇ 混合液 (pH = 13) 作为提取剂提取;可提取腐殖物质 (HE)、胡敏酸 (HA) 的含碳量采用重铬酸钾比色法;富里酸 (FA) 含碳量采用差减法获得。

胡敏酸和富里酸的光学性质采用可见光比色法^[13] (722N 型分光光度计),用色调系数 ($\Delta \log K$) 和光学密度值 E_4/E_6 来表示^[14],其中 $\Delta \log K$ 为胡敏酸 (或富里酸) 在 400nm 吸光值的对数 ($\log K$) 与 600nm 吸光值的对数 ($\log K$) 的差值, E_4/E_6 值为胡敏酸 (或富里酸) 在波长 465nm 与 665nm 处分别测定的吸光度的比值。

1.4 数据处理

数据采用 SPSS 16.0 进行方差分析,同时用 Excel 2003 绘图。

2 结果

2.1 不同种植模式下菜地土壤有机碳含量的变化

不同种植模式影响土壤有机碳的积累。监测结果 (表 3) 显示,与 2004 年相比,至 2012 年 OR 有机碳含量增加 34.53%, 差异达到极显著水平 ($p < 0.01$); 而 ZH 在有机转换初期土壤有机碳含量低, 经过三年转换期 (2004—2006) 后, 土壤有机碳增加明显, 2012 年较 2004 年增加 125.0%, 差异极显著 ($p < 0.01$); 而 CN 模式 2012 年土壤有机碳含量较 2004 年仅增加 11.11%, 差异不显著, OR 和 ZH 有机碳含量增幅明显大于 CN。表 3 的监测结果还可以看出, 2004—2006 年间 3 种植模式下的土壤有机碳含量均无显著性差异, 至 2008 年后, OR、ZH 的土壤有机碳含量远远超过 CN, 差异显著 ($p < 0.05$), 土壤在有机种植模式下将更利于土壤有机碳的积累。

2004—2008 年, OR 土壤有机碳含量高于 ZH, 2008 年后, 相较于种植时间较长的 OR, 种植时间较短的 ZH 的土壤有机碳含量增加较快, 至 2012 年有机种植 6 年的大棚模式 ZH 的有机碳含量甚至显著高于有机种植 9 年的露地模式 OR ($p < 0.05$)。

表 3 不同种植模式下土壤耕层有机碳含量的变化情况

Table 3 Change in soil organic carbon content in the top soil as affected by cultivation mode

种植模式 Planting patterns	土壤有机碳含量 Soil organic carbon contents (g kg ⁻¹)				
	2004	2006	2008	2010	2012
OR	11.41 ± 0.51aA	13.23 ± 0.87aA	13.21 ± 0.62aA	14.49 ± 0.42aA	15.35 ± 1.41bAB
ZH	9.29 ± 1.89aA	10.94 ± 1.36aA	12.99 ± 2.18aAB	15.53 ± 1.39aA	20.90 ± 3.45aA
CN	9.00 ± 0.97aA	10.53 ± 2.26aA	10.72 ± 1.42bB	10.32 ± 0.63bB	10.00 ± 1.10cB

注:同一列中大小写字母不同分别表示在 0.01 和 0.05 水平上差异显著 Note: The different uppercase and lowercase letters in the same column mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels

2.2 不同种植模式下土壤腐殖质组成及其特性变化

2.2.1 不同种植模式下土壤腐殖质各组分碳含量的变化 腐殖质作为土壤有机碳的最大组成部分,对土壤中许多复杂化学反应起重要作用,其主要成分包括胡敏酸 (HA)、富里酸 (FA) 和胡敏素 (HM)。HA 是腐殖质中最活跃的,其酸度较 FA 要小,呈微酸性,但阳离子交换量高,对土壤结构形成起重要作用^[15]。FA 分子量较小、活性较大、氧化程度较高,既是形成 HA 的一级物质,又是 HA 分解的一级产物,在 HA 的积累和更新中起重要的作用^[15]。

由表 4 可知,监测年中 OR、ZH、CN 的土壤富里酸碳 (C_{FA}) 占全碳比例分别为 15.7% ~ 19.2%、12.8% ~ 20.2%、17.3% ~ 19.9%; 胡敏酸碳 (C_{HA}) 占全碳比例分别为 13.4% ~ 15.7%、13.2% ~ 16.3%、11.7% ~ 13.7%, 3 种植模式下的耕层土壤可提取腐殖质碳均以富里酸高于胡敏酸。且通过单因素方差分析,OR、ZH、CN 各自的腐殖质组分碳占全碳比例均未随种植年限延长呈现显著性差异,波动较小。而土壤中可提取腐殖质总碳 (C_{HE}) 在这 3 种植模式中均随种植年限延长有所提高,并与土壤有机碳含量的变化趋势基本一致。从

2004 年至 2012 年, CN、ZH 和 OR 中土壤 C_{HE} 含量分别增加 12.15%、86.17% 和 13.82%; 土壤 C_{HA} 含量分别增加 14.91%、152.8% 和 17.87%; C_{FA} 含量分别增加 10.40%、42.55% 和 11.42%。CN 土壤腐殖质所有组分碳含量增加率均较 ZH、OR 的小, ZH、OR 土壤腐殖质各组分在 2012 年较 2004 年均有提高, 并有显著性差异 ($p < 0.05$)。另外, OR、ZH 和 CN 的 C_{HE} 从 2010 年后差异显著 ($p < 0.05$), C_{HA} 从 2008 年后差异显著 ($p < 0.05$), C_{FA} 至 2012 年差异

显著 ($p < 0.05$)。由此看出, 经过较长时间的不同种植模式, 土壤腐殖质组分碳含量差异显著增大。

对于 OR、ZH, 在 2004—2006 年间, 有机种植年限长的 OR 可提取腐殖质、胡敏酸和富里酸的碳含量较有机种植年限短的 ZH 高, 但 OR 和 ZH 的可提取腐殖质和胡敏酸的碳含量从差异显著到不显著, 差异变小, 并从 2008 年开始 ZH 的腐殖质组分碳含量较 OR 高。

表 4 不同种植模式下土壤腐殖质组分相对含量的变化趋势

Table 4 Trend of the change in variation of the relative contents of soil humus components as affected by cultivation mode

种植年份 Planting year	种植模式 Planting pattern	可提取腐殖质碳 Extractable humic substance carbon ($g\ kg^{-1}$)	胡敏酸碳 Humic acid carbon ($g\ kg^{-1}$)	富里酸碳 Fulvic acid carbon ($g\ kg^{-1}$)
2004	CN	2.88 ± 0.33bA	1.14 ± 0.20bA	1.73 ± 0.26bA
	ZH	3.11 ± 0.58bA	1.23 ± 0.33bA	1.88 ± 0.24abA
	OR	3.98 ± 0.35aA	1.79 ± 0.15aA	2.19 ± 0.21aA
2006	CN	3.41 ± 0.55aA	1.31 ± 0.15bA	2.10 ± 0.23aA
	ZH	3.76 ± 0.54aA	1.57 ± 0.29.abA	2.19 ± 0.32aA
	OR	4.23 ± 0.29aA	1.98 ± 0.16aA	2.25 ± 0.13aA
2008	CN	3.48 ± 0.38bA	1.47 ± 0.16bB	2.07 ± 0.24aA
	ZH	4.24 ± 0.76aA	2.12 ± 0.32aA	2.12 ± 0.20aA
	OR	4.11 ± 0.28abA	1.98 ± 0.10aA	2.12 ± 0.16aA
2010	CN	3.02 ± 0.30bA	1.21 ± 0.11bA	1.79 ± 0.16bA
	ZH	4.23 ± 0.76aA	2.18 ± 0.23aA	2.04 ± 0.23abA
	OR	4.22 ± 0.24aA	1.94 ± 0.08aA	2.28 ± 0.15aA
2012	CN	3.23 ± 0.21cB	1.31 ± 0.14cB	1.91 ± 0.14bA
	ZH	5.79 ± 0.74aA	3.11 ± 0.16aA	2.68 ± 0.14aA
	OR	4.53 ± 0.20bAB	2.11 ± 0.08bAB	2.44 ± 0.15aA

注: 同一列中, 同一年份下无相同大小写字母分别表示处理在 0.01 和 0.05 水平上差异显著 Note: The different uppercase and lowercase letters in the same column mean significant difference in the same year at 0.01 and 0.05 levels

2.2.2 不同种植模式下土壤腐殖质组成相对比例的变化 × 土壤腐殖质组分碳含量的差异使各组分的相对比例也呈现出一些规律性的变化(表 4)。因此, 可以通过具体指标 C_{HA}/C_{FA} 或 PQ 值来分析这些相对比例的变化规律。 C_{HA}/C_{FA} 或 PQ 值作为腐殖化程度的指标, 是衡量土壤腐殖质品质优劣的一个重要指标, 比值越大, 胡敏酸含量越高, 分子量增大、分子结构越复杂, 品质越好^[16]。

图 1 可看出, 腐殖质的 C_{HA}/C_{FA} 和 PQ 值的变化趋势基本一致, 其中 OR、ZH、CN 的 C_{HA}/C_{FA} 值分别为 0.82 ~ 0.93、0.65 ~ 1.16、0.65 ~ 0.71, PQ 值分别

为 0.45 ~ 0.48、0.39 ~ 0.54、0.39 ~ 0.42, 可知 OR、CN 的土壤 C_{HA}/C_{FA} 和 PQ 值随着种植年限的延长变化幅度较小, ZH 土壤 C_{HA}/C_{FA} 和 PQ 值随着种植年限的延长变化幅度相对较大, 这是由于 ZH 为有机大棚种植模式, 轮作频率高, 每年施入的有机肥量大, 新形成的年轻腐殖质多, 有利于土壤腐殖质的更新和活化, 进而提高腐殖质的品质。OR、ZH 的 C_{HA}/C_{FA} 和 PQ 值均高于 CN。单因素方差分析结果表明, OR 和 CN 的 C_{HA}/C_{FA} 和 PQ 值差异显著 ($p < 0.05$), ZH 在 2008 年后与 CN 差异显著 ($p < 0.05$)。以上说明有机种植模式下土壤中有机质的腐殖化

程度高,有利于胡敏酸的积累和土壤腐殖质品质的提高。2004—2006年,ZH的PQ值和 C_{HA}/C_{FA} 低于OR,2008年后有机大棚种植2年的ZH的PQ值和

C_{HA}/C_{FA} 开始高于有机种植5年的露地种植模式OR。

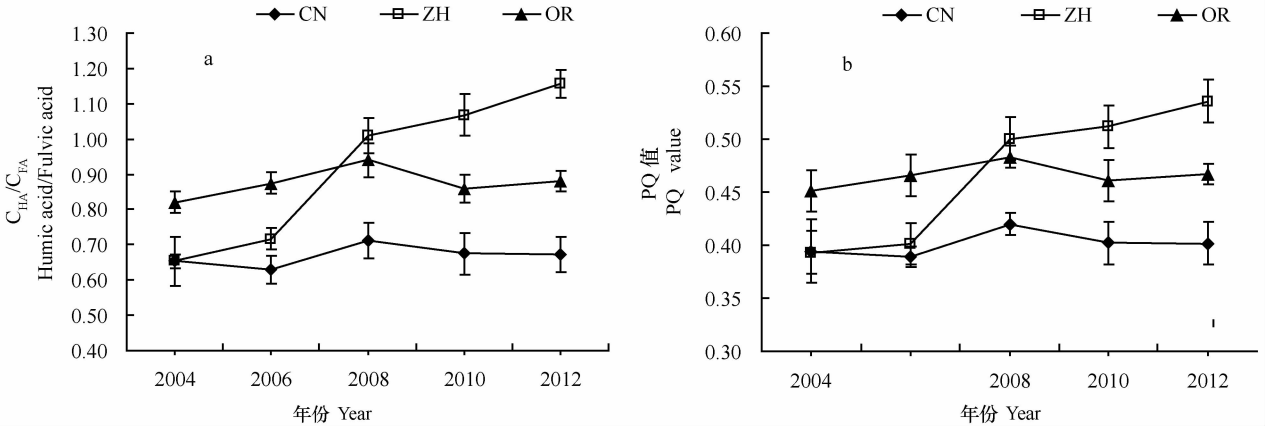


图1 不同种植模式下土壤腐殖质组成相对比例的变化趋势

Fig. 1 Trend of the variation of relative proportions of the soil humus components as affected by cultivation mode (a. C_{HA}/C_{FA} , b. PQ)

2.3 不同种植模式对土壤腐殖质可见光谱特征的影响

不同种植模式除了影响土壤腐殖质组分的数量变化,还影响到腐殖质结构特性。土壤腐殖质的 $\Delta\log K$ 值、 E_4/E_6 比值可来表征土壤腐殖质的复杂程度^[17],胡敏酸(富里酸)的 $\Delta\log K$ 值越大, E_4/E_6 的比值越高,胡敏酸(富里酸)的光密度愈小,芳香缩合度低,并可推测具有较多的脂族成分。长期不同种植模式对土壤耕层胡敏酸可见光谱特征的影响如图2所示。3种植植模式下胡敏酸分子的 E_4/E_6 、 $\Delta\log K$ 值随种植时间而变化,其中CN变化不大,与监测初期相比, E_4/E_6 、 $\Delta\log K$ 值略有降低,胡敏酸芳香化程度略有升高;OR和ZH波动稍大,总体呈现先升后降的态势, E_4/E_6 、 $\Delta\log K$ 值均有所增大,胡敏酸芳香化程度略有降低。CN的胡敏酸分子的 E_4/E_6 、 $\Delta\log K$ 值在除2004年后的其他年份均小于OR和ZH,说明有机种植模式下的土壤胡敏酸分子芳香化程度低。ZH的 E_4/E_6 、 $\Delta\log K$ 值在监测后期(2010—2012年)均大于OR,这主要是受大棚种植模式轮作频率较高、投入有机肥较多的影响。

长期不同的种植模式对土壤耕层富里酸可见光谱的影响与胡敏酸不同,这3种植植模式均能提高土壤富里酸的 E_4/E_6 、 $\Delta\log K$ 值(图3),并随种植年限处于动态变化中。ZH和OR中土壤FA的 E_4/E_6 、 $\Delta\log K$ 值增加较CN多,说明了有机种植模式中作为土壤腐殖质化的中间产物的土壤FA分子量变化大,更易活化从而促进土壤腐殖化进程。结合图

2可以看出,FA的 $\Delta\log K$ 值、 E_4/E_6 要大于HA,说明FA分子较HA分子结构简单,氧化程度和芳构化程度低。

3 讨论

不同种植模式会影响土壤有机碳积累。瑞士DOK试验站通过21年的长期定位研究表明农业系统中肥料的施入对土壤有机质有着直接的影响^[8]。本研究也获得了常规和有机种植模式的菜地土壤有机碳和腐殖质组分碳均随种植时间延长而增加的结果(表3、表4)。此外,本研究中两种有机种植模式的土壤有机碳及腐殖质组分碳含量增加率均高于常规种植模式,且到2012年,上述各指标的差异达到显著水平,这与Clark^[6]、Pimente^[7]、Melerol^[18]等利用长期田间试验得出的结果相一致。究其原因在于有机和常规种植在所施用的肥料种类、数量和管理方式上存在差异,从而影响到土壤微生物群落和酶活性,进而制约着土壤矿化和腐殖化过程。Worknen和van Bruggen^[19]发现与常规农业土壤相比,有机农业土壤具有较高的微生物活性,而土壤微生物是有机残体降解和腐殖化过程的直接参与者,其对土壤中的一系列生物化学过程起着决定性的作用。本课题组已有研究也表明有机种植模式下土壤真菌、放线菌菌落、微生物生物量及土壤脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性显著高于常规种植的土壤,而矿化碳并无显著性差异^[20],这意

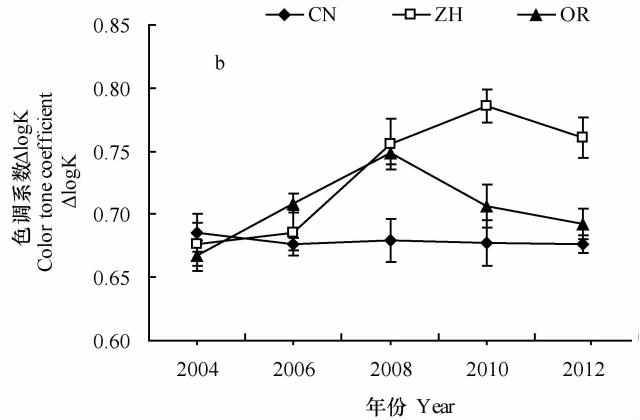
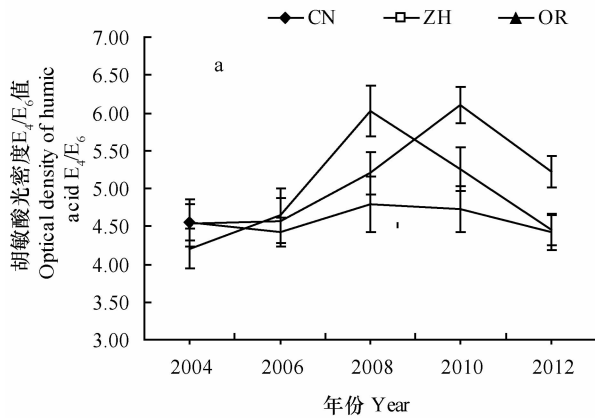


图2 不同种植模式下胡敏酸光密度特性的变化趋势

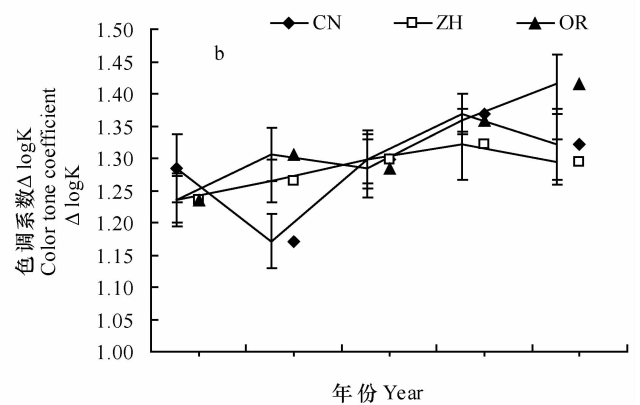
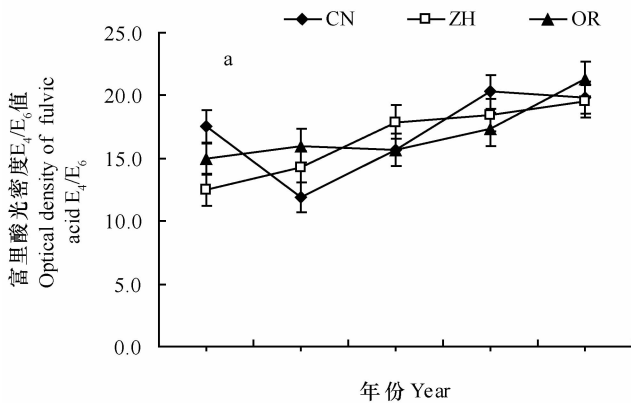
Fig. 2 Trend of the variation of optical density of the humic acid as affected by cultivation mode (a, E_4/E_6 ; b, $\Delta \log K$)

图3 不同种植模式下富里酸光密度特性的变化趋势

Fig. 3 Trend of the variation of optical density of the fulvic acid as affected by cultivation mode (a, E_4/E_6 ; b, $\Delta \log K$)

味着有机种植模式在具有较高微生物数量和活性的前提下并未使矿化作用增强而导致较多的 CO_2 释放,因此,相对于常规种植模式,在有机种植模式下有机肥的投入将更有利于土壤腐殖化进程。

作为腐殖化程度指标的 $C_{\text{HA}}/C_{\text{FA}}$ 和 PQ 值的动态变化特征,一方面在数值上 OR、ZH 均高于 CN,另一方面由于投入品种类和数量的不同,也将影响到土壤腐殖化进程(图 1)。有机种植模式中禁止施用阿维菌素等能抑制土壤微生物的农药,同时所施加的有机肥能促进土壤微生物活性,增加微生物群落。土壤微生物会不断分解并利用分子结构简单、活性强的富里酸组分中的氨基酸等含氮化合物,不断向胡敏酸转化,从而使胡敏酸含量相对增高。此外,土壤的 $C_{\text{HA}}/C_{\text{FA}}$ 也能反映土壤的熟化程度以及肥力状态,且随土壤肥力的提高而增加^[21]。初度熟化的水稻土 $C_{\text{HA}}/C_{\text{FA}}$ 为 0.2~0.3,中度熟化者为 0.5 左右,高度熟化可达 1.4 左右^[22]。本研究中土壤的

$C_{\text{HA}}/C_{\text{FA}}$ 分别为 OR 0.82~0.93、ZH 0.65~1.16、CN 0.65~0.71。由此可见,有机种植模式组的土壤熟化度相对较高。这与蔡晓布等^[23]研究的施肥条件下土壤 $C_{\text{HA}}/C_{\text{FA}}$ 的提高显示了土壤从低肥力到高肥力的演变趋势相一致。

土壤中腐殖物质组分含量的变化(表 4)不仅受投入品的影响,同时也与土壤中由微生物制约的土壤矿化和腐殖化进程有关。在本研究 2003—2012 年的定位监测中,土壤中胡敏酸分子芳化度在常规种植模式下变化不大;而两种有机种植模式下土壤胡敏酸芳化度总体高于常规种植模式,其规律上呈先降低后增高的变化趋势,意味着土壤向芳化度更高的腐殖物质的转化能力增强,这也是受到施加肥料类型制约的具体表现,说明土壤腐殖物质结构特性的变化滞后于土壤腐殖质数量变化。有机种植系统中施入的商品有机肥的氮含量低且成分复杂,除了秸秆、菜饼等植物性成分外,还有动物粪便、鱼

粉、骨粉等。本课题组曾研究比较了植物源材料的油菜饼肥与秸秆堆肥在土壤中分解特性^[24],结果显示,新投入土壤的商品有机肥中的易分解部分参与腐殖化过程,整体上增加了新成腐殖物质的数量,并成为土壤腐殖质的主体部分,进而表现为土壤腐殖化程度降低,而新成腐殖质的加入对土壤腐殖质的更新和活化十分有利,又再进一步缩合成为结构复杂的 HA。而不同种植模式对土壤耕层富里酸可见光谱的影响与胡敏酸不同,3 种植模式下富里酸的氧化程度和芳化度均有所降低,主要是 FA 的分子小、活性大,易受微生物利用。至于微生物是如何具体影响腐殖质组成及其转化,尚需进一步研究。

国内对设施和露地栽培方式下常规菜地土壤理化性质研究较多,大多数研究者认为设施栽培的土壤有机碳和全氮含量高于露地土壤^[25-26],在本研究中,种植时间较短的有机大棚组 ZH 的土壤有机碳、腐殖质碳含量、PQ 值、 C_{HA}/C_{FA} 和胡敏酸的芳化度在前期 2004—2008 年均低于有机种植年限长的露地种植 OR,到后期这些指标均高于种植年限较长的露地有机种植模式。这是由于设施大棚种植条件下土壤的轮作频率较高,每年施入的有机肥数量多,而且因大棚常处于半封闭状态下,其土壤处于相对高温高湿的环境中,土壤微生物种类丰富,活性更强,这对土壤腐殖化进程影响更大。

4 结 论

经过 9 年的定位观测,两种有机种植模式的土壤有机碳及腐殖质组分碳含量随着种植时间的延长呈现增加趋势,至 2012 年达显著水平,同时其增加率均高于常规种植模式;而常规种植模式的相应指标变化不显著。不同种植模式的长期影响还会导致土壤腐殖质组分特性的变化:两种有机种植模式土壤腐殖质的 C_{HA}/C_{FA} 、PQ 值均高于常规种植模式;土壤胡敏酸芳化度随着种植时间延长,其在常规种植模式下变化不大,而在有机大棚和露地种植模式下呈先降低后增高的趋势;土壤富里酸的芳化度在有机种植模式下较常规种植模式降低更多。此外,有机大棚种植模式更利于土壤有机碳和腐殖质积累,其腐殖质的 PQ 值、 C_{HA}/C_{FA} 、胡敏酸的 E_4/E_6 、 $\Delta \log K$ 值均高于种植年限较长的有机露地种植模式。

参 考 文 献

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1—22
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623—1627
- [3] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789—813
- [4] Scialabba N, Hattam C. Organic agriculture, environment and food security (No. 4). Rome: Food and Agricultural Organization, 2002
- [5] Kotschi J, Müller-Samann K. The role of organic agriculture in mitigating climate change—A scoping study. Bonn: IFAOM, 2004
- [6] Clark M S, Ferris H, Klonsky K, et al. Agronomic, economic, and environmental comparison of pest management in conventional and alternative tomato and corn systems in northern California. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1998, 68(1/2): 51—71
- [7] Pimentel D, Hepperly P, Hanson J, et al. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience*, 2005, 55(7): 573—582
- [8] Fliessbach A, Oberholzer H R, Gunst L, et al. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 118(1/4): 273—284
- [9] Liu B, Tu C, Hu S J, et al. Effect of organic, sustainable, and conventional management strategies in grower fields on soil physical, chemical, and biological factors and the incidence of Southern blight. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(3): 202—214
- [10] 王延军, 宗良纲, 李锐, 等. 不同肥料对有机栽培番茄生长和土壤酶及微生物量的影响. *南京农业大学学报*, 2007, 30(3): 83—87. Wang Y J, Zong L G, Li R, et al. Effects of different fertilizers on the growth of tomato and soil enzymes activities and microbial biomass-C (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(3): 83—87
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30—172. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 30—172
- [12] 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
- [13] 文启孝. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社, 1984. Wen Q X. Research methods of soil organic matter (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1984
- [14] 熊田恭一. 土壤有机质化学. 北京: 科学出版社, 1984. Kumada K. Chemistry of soil organic matter (In Chinese). Beijing: Science Press, 1984
- [15] 龚伟, 颜晓元, 王景燕, 等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009,

- 15(6):1245—1252. Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil humus carbon and nitrogen fractions in a wheat-maize cropping system (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1245—1252
- [16] 江泽普, 黄绍民, 韦广泼, 等. 不同免耕模式对水稻产量及土壤理化性状的影响. *中国农学通报*, 2007, 23(12): 362—365. Jiang Z P, Huang S M, Wei G P, et al. Effects of different no-tillage modes on rice field and properties of paddy soil (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 362—365
- [17] 王晶, 何忠俊, 王立东, 等. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究. *土壤学报*, 2010, 47(4): 723—733. Wang J, He Z J, Wang L D, et al. Properties of humus and content of soil aggregates in soils on Gaoligong mountain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 723—733
- [18] Melero S, Porras J C R, Herencia J F, et al. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. *Soil & Tillage Research*, 2006, 90(1/2): 162—170
- [19] Worknen F, van Bruggen A H C. Microbial density, composition and diversity in organically and conventionally managed rhizosphere soil in relation to suppression of corky root of tomatoes. *Applied Soil Ecology*, 1994, 1(3): 219—230
- [20] 汪润池, 宗良纲, 邱晓蕾, 等. 有机与常规种植蔬菜地土壤微生物群落特征的比较. *南京农业大学学报*, 2012, 35(2): 99—104. Wang R C, Zong L G, Qiu X L, et al. Comparison of soil microbial community characteristics of organic and conventional vegetable fields(In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(2): 99—104
- [21] 李海波, 韩晓增, 王凤, 等. 不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化. *土壤学报*, 2008, 45(1): 112—119. Li H B, Han X Z, Wang F, et al. Distribution of soil organic carbon and nitrogen in density fractions on black soil as affected by land use (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 112—119
- [22] 古小治, 章钢娅, 俞元春, 等. 滨海水稻土腐殖质的组成及随种稻时间演变的研究初报. *土壤学报*, 2008, 45(4): 635—640. Gu X Z, Zhang G Y, Yu Y C, et al. Composition of humus in coastal paddy soil and its succession with cultivation age (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 635—640
- [23] 蔡晓布, 钱成, 彭岳林, 等. 西藏中部退化农田土壤肥力的变化特征及其重建. *土壤学报*, 2004, 41(4): 603—611. Cai X B, Qian C, Peng Y L, et al. Fertility and restoration of degraded soil in central Tibet (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 603—611
- [24] 汪张懿, 宗良纲, 褚慧, 等. 有机肥分解及其对土壤有机碳矿化影响的模拟研究. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4): 36—42. Wang Z Y, Zong L G, Chu H, et al. A simulation study on decomposition of organic fertilizers and its effects on soil organic carbon mineralization (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 36—42
- [25] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2): 332—335. Zhou J B, Zhai B N, Chen Z J, et al. Nutrient accumulations in soil profiles under canopy vegetable cultivation and their potential environmental impacts (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 332—335
- [26] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征. *中国农业科学*, 2010, 43(3): 514—522. Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 514—522

DYNAMIC CHANGES IN HUMUS COMPOSITION IN VEGETABLE SOILS DIFFERENT IN CULTIVATION MODE

Chu Hui¹ Zong Lianggang^{1†} Wang Zhangyi¹ Xie Shaohua¹ Yang Ni¹ Luo Min²

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Organic Food Development Centre, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract A long-term (9 years) field observation was carried out in the Plank Organic Farm in Nanjing to study dynamic changes in soil organic carbon and soil humus composition in vegetable soils different in cultivation mode (organic field, organic greenhouse and conventional field). Results show that the 9 years of vegetable cultivation increased soil organic carbon (SOC) from 11.41 to 15.35 g kg⁻¹, from 9.29 to 20.90 g kg⁻¹ and from 9.00 to 10.00 g kg⁻¹, humic acid carbon (C_{HA}) from 1.79 to 2.11 g kg⁻¹, from 1.23 to 3.11 g kg⁻¹ and from 1.14 to 1.31 g kg⁻¹, and fulvic acid carbon (C_{FA}) from 2.19 to 2.44 g kg⁻¹, from 1.88 to 2.68 g kg⁻¹ and from 1.73 to 1.91 g kg⁻¹, in the organic field, organic greenhouse and conventional field, respectively. The increases in the soils under organic cultivation either in open field or in greenhouse were significant, but not so in the soil under conventional cultivation. C_{HA}/C_{FA} ratio and PQ value are two important indicators characterizing quality of soil humus, and were both higher in the soils under organic cultivation than

in the soil under conventional cultivation. E_4/E_6 ratio and $\Delta\log K$ value of soil fulvic acid increased, too, in all the soils, but the increase grew more significant with age of the vegetable cultivation in the former than in the latter. Aromaticity of the soil humic acid displayed a trend of declining first and then rising, which was not so significant in the soil under conventional cultivation. All the findings indicate that long-term organic cultivation may not only be conducive to SOC accumulation, but also promote the process of soil humification.

Key words Organic farming; Soil organic carbon; Humus; Humic acid; Fulvic acid; Dynamic changes

(责任编辑:卢 萍)