

# 施用竹炭对卷心菜 叶绿素含量和荧光参数的影响<sup>①</sup>

舒海燕<sup>1</sup>, 江洪<sup>1,2</sup>, 马锦丽<sup>2</sup>, 潘晓娇<sup>1</sup>, 孙文文<sup>2</sup>

1. 西南大学/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300

**摘要:** 为探究人工施用竹炭对卷心菜叶绿素含量和荧光参数的影响, 进而明确卷心菜的最适竹炭有机肥施用量, 在田间试验条件下设置了无碳(CK)、中碳(MC)和高碳(SC) 3 个处理, 对卷心菜莲座期和结球期的叶绿素含量及荧光参数进行测量研究。结果表明: (1) 结球期的卷心菜叶绿素含量极显著高于莲座期( $p < 0.01$ ), 且随着竹炭量的增加, 两个时期的叶绿素含量变化趋势一致, 从高到低依次为: MC, CK, SC。(2) 结球期的卷心菜初始最小荧光  $F_0$ 、初始最大荧光  $F_m$ 、PS II 的最大光化学效率  $F_v/F_m$ 、PS II 的潜在活性  $F_v/F_0$ 、非光化学猝灭系数  $q_N$  均低于莲座期, 而 PS II 实际光化学效率  $\Phi PS II$ 、光化学猝灭系数  $q_P$  高于莲座期, 且随着竹炭量的增加, 两个时期的这些参数均表现出一致的变化趋势,  $F_0$  和  $q_N$  均呈“V”型变化, 而  $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_0$ 、 $\Phi PS II$  和  $q_P$  均呈现倒“V”趋势, 但对  $\Phi PS II$  和  $q_P$  没有显著影响( $p > 0.05$ ), 说明结球期的卷心菜光合作用高于莲座期; 当竹炭量由 CK 增加到 MC, 有利于提高叶片叶绿素含量, 增强光能利用率, 减少植株热耗散, 提高植株光合作用; 但随着竹炭量进一步增加到 SC, 卷心菜叶片叶绿素含量降低, 光能利用率减弱, 热耗散增加, 光合作用受到抑制, 即中炭(MC)处理条件下, 此卷心菜长势最优, 表明中炭是该卷心菜生长的最适竹炭有机肥施用量。

**关键词:** 竹炭; 卷心菜; 叶绿素含量; 荧光参数; 有机农业

**中图分类号:** Q945.79; S345

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2015)09-0049-09

我国是农业大国, 农业的可持续发展关系到粮食安全和生态安全, 而实现农业可持续发展的根本, 在于推进清洁生产, 用低耗能、低污染、低排放、高效益的农业经济模式取代高能耗、高污染、高排放、低效益的农业经济模式, 发展有机农业<sup>[1-2]</sup>。很长时间以来, 由于受传统农业的影响, 农作物的肥料投入量较大, 不仅造成了产品本身养分失衡, 还造成如温室效应加剧等巨大的环境污染, 而建设低碳农业园区<sup>[3]</sup>, 发展有机农业, 可以有效地解决当前农业生产日益加剧的化肥施用给环境带来的污染问题。有机农业是典型的资源节约型和环境友好型农业, 具有循环农业的因素, 又有生态农业的成分<sup>[4]</sup>, 它用最自然的肥料、饲料来种养农产品, 用最贴近自然的方式让它们生长、生产, 是保证食品安全的最好途径<sup>[5]</sup>。低碳有机食品符合人们的需求, 也符合现代社会生态环保的发展趋势, 因此在近 20 年来得到有效发展<sup>[6]</sup>。蔬菜是人们生存不可缺少的食物, 是人类膳食中维生素、矿物质、有机酸、纤维素等的主要来源<sup>[7]</sup>, 长久以来, 由于传统栽培模式与经验的影响, 蔬菜作物的肥料投入量也较大, 反而降低了蔬菜的安全品质, 因此发展有机蔬菜迫在眉睫。

① 收稿日期: 2014-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61190114 和 41171324); 国家“973”重点基础研究发展规划项目(2011CB302705); 上海市科学委员会项目(12231205101); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110091110028); 科技部国家科技基础条件平台项目(2005DKA32300); 上海市战略性新兴产业重大项目(重大 2013-14 号)。

作者简介: 舒海燕(1990-), 女, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态学研究。

通信作者: 江洪, 教授, 博士研究生导师。

竹炭质地坚硬不腐烂,孔隙度高,吸附力强,使得其保水、保肥性好,适合作为土壤微生物和有机营养成分的载体,能调整土壤酸碱度(pH值),对CO<sub>2</sub>的吸附性能高,从而固定更多的CO<sub>2</sub>,故可改良土壤,提高土壤肥力,促进作物根系良好生长,而且,竹炭能吸附湿气且含矿物质,有利于一些有助于植物生长的微生物、细菌的存活;此外,竹炭为黑色,可较好吸收阳光,使地温升高,有助于地表融雪及防止植物霜冻<sup>[8]</sup>。加上竹炭原料易得,便于获取,因此,竹炭成为目前有机农业的“宠儿”,运用广泛。

相关研究还进一步表明,竹炭对土壤中铵态氮具有良好的持留作用,从而实现氮素缓释<sup>[9]</sup>,减少NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的流失<sup>[10]</sup>;还可以减少土壤中CH<sub>4</sub>等温室气体的排放<sup>[11-14]</sup>;对土壤肥力有正效应,可缓解土壤酸度,提高土壤有机碳和K、P等元素含量,有效提高土壤电导率<sup>[13, 15-16]</sup>,进而提高作物产量<sup>[17-19]</sup>等。随着研究的不断深入,竹炭在农业领域的应用研究关注度也随之提高,尤其是竹炭对农作物产量的影响研究已经取得了较大的成果,如小青菜<sup>[20]</sup>、玉米<sup>[18, 21]</sup>、萝卜<sup>[22]</sup>、大豆<sup>[23]</sup>、菠菜<sup>[24]</sup>、旱稻<sup>[25]</sup>、水稻<sup>[14, 26]</sup>等,但关于竹炭对农作物的生理特性的研究相对较少。

卷心菜,又称结球甘蓝(*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.),是十字花科、芸苔属的植物,为甘蓝(*Brassica oleracea* L.)的变种,又名洋白菜、包菜、圆白菜、莲花白等,具有耐寒、抗病、适应性强、易贮耐运、产量高、品质好等特点,生长周期4个月左右,但各生长期所需日数不同,发芽期需8~10 d,幼苗期需25~30 d,莲座期需20~25 d,结球期需20~25 d。其营养丰富,每百克卷心菜含蛋白质1.1 g,脂肪0.2 g,碳水化合物3.4 g,粗纤维0.5 g,钙32 mg,维生素C 41 mg<sup>[27]</sup>,是我国各地区的主要蔬菜之一,在全国各地普遍栽培。目前关于卷心菜有机生长和生产影响的研究较多,如盐分(NaCl)<sup>[28]</sup>、液体猪粪<sup>[29]</sup>、测土配方施肥<sup>[30]</sup>、氮磷钾施肥<sup>[27]</sup>等,但是关于碳素(尤其是竹炭)对卷心菜有机生产和生理的影响鲜有报道。本研究着重探讨了不同竹炭水平(无炭、中炭和高炭)处理下卷心菜莲座期和结球期叶绿素含量(SPAD值)和荧光特性的变化情况,旨在了解卷心菜对竹炭处理变化的生理适应,看其在不同水平竹炭条件下的长势,明确最适竹炭有机肥施用水平,为后来卷心菜的大规模种植和有机肥施用提供理论依据和支撑,以促进我国有机农业的发展。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验材料包括竹炭和卷心菜幼苗。竹炭是不可多得的天然、绿色材料,由天然高分子化合物竹材受热经过干燥、预炭化、炭化和煅烧4个阶段分解得到,分子结构呈六角形,质地坚硬,细密多孔,吸附力强,其含炭量为79%~82%,吸收量180~190 mL/g,强热损耗2.1%~2.2%,发热量7 790 kcal/kg, pH值8~9,耐酸耐碱<sup>[31]</sup>,灰分(钾、钙)2%~4%,比表面积300~600 m<sup>2</sup>/g,挥发成分6%~8%,干碳热值3 000~33 000 kJ/kg,气干密度0.800~1.320/cm<sup>3</sup><sup>[32]</sup>,用途广泛,可用作燃料、吸附剂、保健产品,也可用于水质处理、果蔬保鲜、防静电与屏蔽电磁辐射、土壤改良剂等等。试验选用竹炭为竹炭有机肥(BBP NO. 1),由上海时科(SEEK)生物科技有限公司提供,其富含稳定态有机碳,可提高作物产量,适用于蔬菜类、瓜果类、果树类等经济作物。

卷心菜幼苗由上海市浦东新区多利农庄提供,品种为珍宝甘蓝,圆球型,果质量1.2~2.5 kg,株型紧凑,中心柱极短,适应密植栽培,是市场性极好的早熟高产品种。种子购买于上海惠和种业有限公司,于2014年5月在上海多利农庄育苗间进行幼苗培育。

### 1.2 试验设计

试验于2014年5—8月在上海崇明县中兴镇低碳有机农业示范基地——多利农场中进行,试验样地总面积为60×60 m<sup>2</sup>,5月24日向样地中增施有机肥4.5 kg/m<sup>2</sup>(大约45 t/hm<sup>2</sup>),作为底肥,土壤基础肥力全氮0.114%,全磷178 mg/kg,全钾2.40×10<sup>4</sup> mg/kg,有机质10.6 g/kg,水解氮78.5 mg/kg,硝酸盐氮13.2 mg/kg,有效磷56.8 mg/kg,速效钾414 mg/kg, pH值7.83。崇明地处北半球亚热带,环江靠海,是典型海洋性气候,温和湿润,全年雨水充沛,年均日照时间2 094.2 h,年平均气温15.2℃,无霜期229 d,地势平坦,土壤肥沃,适合蔬菜生长和大规模种植。

试验采用单因素完全随机设计法,设置无炭(CK,对照)、中炭(moderate charcoal, MC)和高炭(severe

charcoal, SC)3 个处理水平, 分别施用竹炭 0 kg、60 kg 和 180 kg, 共设置 3 次重复, 共 9 块样地, 每块样地面积  $20 \times 20 \text{ m}^2$ , 由于耕种需要, 每块样地再分成 6 垄. 碳素以竹炭供应, 在移栽幼苗之前(5 月 26 日), 作为基肥一次施入. 将生长状况一致的卷心菜幼苗, 在 5 月 28—29 日, 按照株距  $\times$  行距为  $35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$  的种植规格进行移栽, 每块样地大概 1 800 株(每垄大概 300 株). 种植期间(7 月 4—6 日), 进行一次人工除草.

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 叶绿素含量(SPAD 值)

利用便携式叶绿素含量测定仪 SPAD-502 分别对不同处理下卷心菜莲座期(7 月中旬)和结球期(8 月中旬)的叶片进行叶绿素含量(SPAD 值)的测定. 选择长势一致、生长状况良好、健康、营养状况相当的卷心菜, 自下而上, 取 2~4 层成熟叶片进行测量, 每个叶片不同部位测量 5 次, 取平均值, 每个样地选择 100 片重复测量, 再求取平均值.

#### 1.3.2 叶绿素荧光参数

用便携式调制叶绿素荧光仪 PAM-2500(德国)分别对不同处理下卷心菜莲座期(7 月中旬)和结球期(8 月中旬)的叶片进行叶绿素荧光参数的测定. 每个样地选择长势一致的、生长状况良好的卷心菜, 自下而上, 取 2~4 层成熟叶片进行测量. 测定前, 先用暗适应夹夹住叶片, 暗适应 20 min, 得到初始荧光( $F_0$ )、初始最大荧光( $F_m$ ), 并计算出 PS II (photo-system II, 光系统 II) 的最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、PS II 的潜在活性( $F_v/F_0$ )等参数. 之后, 照射饱和脉冲光, 得到作用光照射下 PS II 实际光化学效率( $\Phi PS II$ )、光化学猝灭系数( $qP$ )、非光化学猝灭系数( $qN$ )等. 每块样地重复 10 次测量.

### 1.4 数据处理

采用统计分析软件 IBM SPSS Statistics 21.0 对数据进行处理和双因素方差(Two-way ANOVA)分析, 检验不同竹炭水平处理对不同生育期(莲座期和结球期)卷心菜叶绿素含量和荧光参数的影响, 同时运用最小显著差数法(LSD)进行平均数多重比较检验. 采用 Origin 8.6 作图软件进行作图分析. 统计学显著水平, 取  $p=0.05$ ; 极显著水平, 取  $p=0.01$ . 数据以平均数  $\pm$  标准差(Mean  $\pm$  SD)形式呈现.

## 2 结果和分析

### 2.1 施用竹炭对叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的必需色素, 其含量与植物的光合作用密切相关. 卷心菜叶片顶端的叶绿素含量高于底部, 中央高于边缘<sup>[33]</sup>. 无论是竹炭量的变化, 抑或是卷心菜自身生育期的改变, 对其叶片叶绿素的含量都有着极显著( $p < 0.01$ )的影响, 使得结球期高于莲座期; 但无论哪个时期, MC 处理条件下的卷心菜叶片叶绿素的含量均高于 CK 和 SC, 表明 MC 是卷心菜生长的最适竹炭浓度.

经方差分析结果(表 1)可知, 结球期叶绿素含量极显著高于莲座期( $p < 0.01$ ), 表明随着卷心菜的生长, 生长后期(结球期)光合作用高于前期(莲座期); 随着竹炭量的增加, 卷心菜叶片叶绿素含量变化极显著( $p < 0.01$ ), 且竹炭处理和生育期的交互作用对叶绿素含量也有极显著的影响( $p < 0.01$ ), 表明外源竹炭浓度增加会明显影响卷心菜叶片的叶绿素含量, 也反映出竹炭对植物生长是有影响作用的, 且对莲座期的影响大于结球期.

表 1 不同竹炭水平不同生育期对卷心菜叶绿素含量的影响

变异来源	叶绿素含量(SPAD 值)	变异来源	叶绿素含量(SPAD 值)
竹炭处理	0.004 **	生育期	0.000 **
竹炭处理 * 生育期	0.000 **		

注: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ .

由多重检验结果(表 2)可知, 随着竹炭施用量的增加, 卷心菜莲座期和结球期两个时期叶片叶绿素的含量均表现出先增加后下降的趋势, 即从高到低依次为: MC, CK, SC. 表明随着竹炭量的增加, 卷心菜顺利生长, 叶绿素含量逐渐升高, 在 MC 处理下达到最大值, 之后随着竹炭量的进一步增加, 叶绿素含量反而下降, 甚至低于 CK, 表现出一定的抑制作用. 分析其显著性可知, 与 MC 相比, SC 处理下的两期叶绿素含量均极显著降低( $p < 0.01$ ), 莲座期 CK 极显著低于 MC( $p < 0.01$ ), 但结球期 CK 降低程度没有达到极

显著水平( $p < 0.05$ ), 而 CK 和 SC 两个处理之间均没有显著差异( $p > 0.05$ ). 说明在 MC 时, 两个生育期的卷心菜均生长最好, 其叶绿素含量远远高于 CK 和 SC, 而 CK 仅次于 MC, SC 则表现出一定的抑制作用.

表 2 不同竹炭水平下卷心菜不同生育期的叶绿素含量(SPAD 值)

竹炭处理	生 育 期	
	莲座期	结球期
CK	48.947±3.7270 Bc	60.873±5.5755 bc
MC	49.983±3.2784 A	62.531±3.6343 A
SC	48.772±3.4953 C	60.554±5.0029 C

注: 同列相同字母没有差异, 不同字母有差异, 小写字母表示显著( $p < 0.05$ ), 大写字母表示极显著( $p < 0.01$ ).

## 2.2 施用竹炭对叶绿素荧光参数的影响

### 2.2.1 $F_0, F_m, F_v/F_m, F_v/F_0$ 参数的变化

$F_0$  是初始荧光, 表示 PS II 反应中心处于完全开放时的最小荧光产量, 其大小与叶绿素浓度有关.  $F_m$  为初始最大荧光, 是 PS II 反应中心处于完全关闭时的荧光产量, 反映了通过 PS II 的电子传递情况.  $F_v/F_m$  是 PS II 的最大光化学效率(原初光能转化效率), 一般在 0.75~0.85 之间, 不受物种和生长环境的限制, 非胁迫条件下变化极小, 而胁迫条件下明显下降<sup>[34]</sup>; 也被用于衡量 PS II 的能量捕捉效率<sup>[35]</sup>, 此值下降越多, 表示 PS II 损伤越大.  $F_v/F_0$  用于衡量 PS II 的潜在活性.

不同竹炭处理条件下,  $F_0, F_m, F_v/F_m, F_v/F_0$  变化情况不一致, 但是随着卷心菜的生长成熟, 这 4 个参数均降低, 尤其是  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$ . 表现更加明显(表 3), 表明竹炭量会影响卷心菜的光合能力, 使高碳低于低碳. 随着卷心菜生育期的改变, 莲座期  $F_0, F_m, F_v/F_m, F_v/F_0$  均极显著低于结球期( $p < 0.01$ ), 但随着竹炭施用量的增加, 这 4 个参数变化情况有所不同,  $F_0$  变化极显著( $p < 0.01$ ),  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  变化均达到显著水平( $p < 0.05$ ), 而竹炭改变对  $F_m$  没有显著影响( $p > 0.05$ ); 竹炭处理和生育期的交互作用下,  $F_m$  显著降低( $p < 0.05$ ),  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  均极显著降低( $p < 0.01$ ), 但  $F_0$  没有显著变化( $p > 0.05$ ). 说明卷心菜生长初期(莲座期)具有较高的光合潜能, 结球期光合能力减弱, 但实际光合作用依然高于莲座期.

表 3 不同竹炭处理及不同生育期对卷心菜叶绿素荧光参数  $F_0, F_m, F_v/F_m, F_v/F_0$  的影响

参 数	变 异 来 源		
	竹炭处理	生育期	竹炭处理 * 生育期
$F_0$	0.000**	0.000**	0.125
$F_m$	0.491	0.000**	0.017*
$F_v/F_m$	0.015*	0.000**	0.002**
$F_v/F_0$	0.017*	0.000**	0.002**

注: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ .

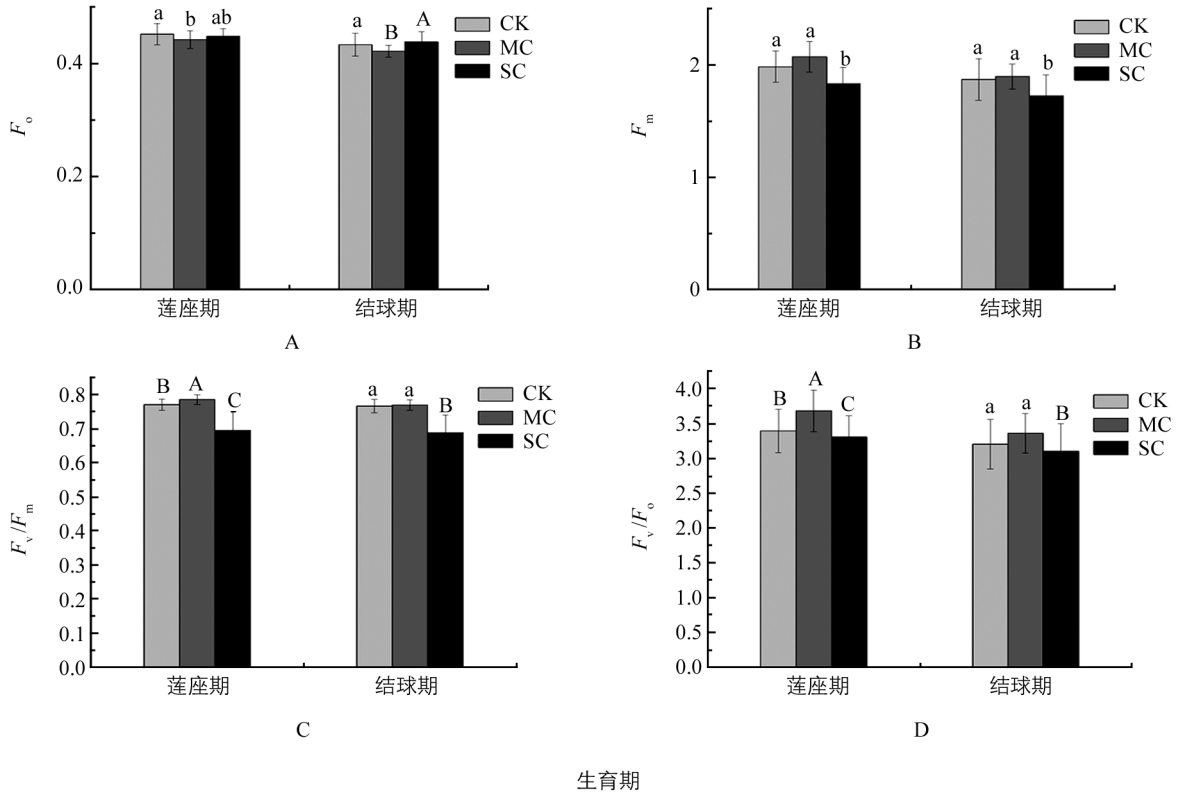
运用多重比较分析 3 种竹炭水平处理下卷心菜不同生育期荧光参数的变化可知, 莲座期和结球期的  $F_0$  均随着竹炭施用量的增加而先下降后升高, 呈“V”型变化, 但又有不同(图 1-A). 说明随着竹炭量的升高, 卷心菜植株的光合能力逐渐增强, 达到一定程度时, 随着竹炭量的进一步增加, 其光合能力反而降低, 生长后期表现更加明显. 表明 MC 处理条件下, 卷心菜长势最优. 显著性结果可知, 与 CK 相比, 莲座期 MC 显著降低( $p < 0.05$ ), SC 没有显著变化( $p > 0.05$ ), SC 和 MC 两个处理间也没有显著差异( $p > 0.05$ ); 但结球期 MC 极显著下降( $p < 0.01$ ), SC 变化不显著( $p > 0.05$ ), 而 SC 极显著高于 MC( $p < 0.01$ ).

莲座期和结球期的  $F_m, F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  变化一致, 均随着竹炭量的增加而表现为先上升后下降的倒“V”型变化, 但表现出不同的显著性变化(图 1-B, C, D). 说明在卷心菜生长过程中, 一定程度的竹炭可以适当提高其光合作用, 促进其生长, 但竹炭浓度过高时, 可能造成高碳胁迫, 其光合能力反而降低. 即中炭处理对卷心菜最好. 就  $F_m$  而言, 无论是莲座期还是结球期, CK 和 MC 两个竹处理均显著高于 SC( $p < 0.05$ ), 而前两者之间没有明显变化( $p > 0.05$ ), 表明 MC 处理时, 通过 PS II 的电子传递最好.  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  表现出相同的显著性变化. 当卷心菜处于莲座期时, 相较于 MC, CK 和 SC 两个处理下的参数均极显著降低( $p < 0.01$ ), 且 SC 极显著低于 CK( $p < 0.01$ ); 而在结球期, CK 和 MC 两个处理之间没有明显变化( $p > 0.05$ ), 却极显著高于 SC( $p < 0.01$ ). 可以看出, 处于 MC 的卷心菜具有较高的光化学效率和潜能,

而 SC 时, 可能导致高炭胁迫.

### 2.2.2 $\Phi PS II$ , $qP$ , $qN$ 参数的变化

$\Phi PS II$  是指  $PS II$  光化学量子产量, 代表  $PS II$  实际光化学效率, 反映植物光能利用率的高低.  $qP$  为光化学猝灭系数, 表示  $PS II$  天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的比例, 只有  $PS II$  处于开放状态, 叶片才能保持较高的光化学猝灭, 其数值大小反映了  $PS II$  反应中心的开放程度.  $qN$  是非光化学猝灭系数, 反映热耗散, 是植物的一种自我保护机制, 避免植物类囊体膜在过多光能时被过度激发, 从而受到损伤.



同组相同字母没有差异, 不同字母有差异, 小写字母表示显著 ( $p < 0.05$ ), 大写字母表示极显著 ( $p < 0.01$ ). (下同).

图 1 不同竹炭水平下卷心菜不同生育期的叶绿素荧光参数  $F_0$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_0$  的比较

由表 4 可知, 卷心菜结球期实际光合作用高于莲座期, 使得  $\Phi PS II$  和  $qP$  升高; 但环境外源竹炭增加对  $\Phi PS II$  和  $qP$  的影响较小, 反而导致  $qN$  明显升高, 表明在高炭条件下, 植物的热耗散系数增加, 对光的利用能力减弱, 植株光合能力下降. 进一步分析可知, 竹炭处理只对  $qN$  有影响, 而卷心菜的不同生长期,  $\Phi PS II$ ,  $qP$ ,  $qN$  均有变化, 但程度各异. 随着卷心菜的生长, 从莲座期到结球期,  $\Phi PS II$  和  $qP$  极显著升高 ( $p < 0.01$ ), 而  $qN$  显著降低 ( $p < 0.05$ ); 随着竹炭量的增加,  $\Phi PS II$ ,  $qP$ ,  $qN$  变化各异,  $qN$  变化极显著 ( $p < 0.01$ ), 而  $\Phi PS II$  和  $qP$  均没有显著改变 ( $p > 0.05$ ); 不同竹炭水平处理和生育期的交互作用下, 这 3 个参数均没有明显变化 ( $p > 0.05$ ).

表 4 不同竹炭处理以及不同生育期对卷心菜叶片叶绿素荧光参数  $\Phi PS II$ ,  $qP$ ,  $qN$  的影响

参 数	变 异 来 源		
	竹炭处理	生育期	竹炭处理 * 生育期
$\Phi PS II$	0.057	0.000 **	0.098
$qP$	0.133	0.000 **	0.491
$qN$	0.001 **	0.018 *	0.332

注: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ .

比较卷心菜莲座期和结球期  $\Phi PS II$  随竹炭量增加的变化可知, 随着竹炭施用量的增加, 两个生育期的  $\Phi PS II$  均呈现出先上升后下降的趋势, 但是变化程度不同(图 2-A). 说明中炭时, 卷心菜长势最好, 而高炭条件下, 卷心菜光能利用率最低, 可能因为其光合作用受到抑制, 莲座期卷心菜表现更加明显. 与 CK 相

比, 莲座期 MC 没有明显变化( $p > 0.05$ ), 而 SC 则极显著下降( $p < 0.01$ ); 结球期 CK, MC 和 SC 3 个处理间均无明显差异( $p > 0.05$ ).

$qP$  变化和  $\Phi PS II$  相同, 随着竹炭施用量的增加, 两个生育期的  $qP$  均表现为先上升后下降, 但 3 个处理间变化均不显著( $p > 0.05$ )(图 2-B), 说明环境中碳浓度的升高对卷心菜植株  $PS II$  反应中心的开放程度及其电子传递活性没有显著影响.

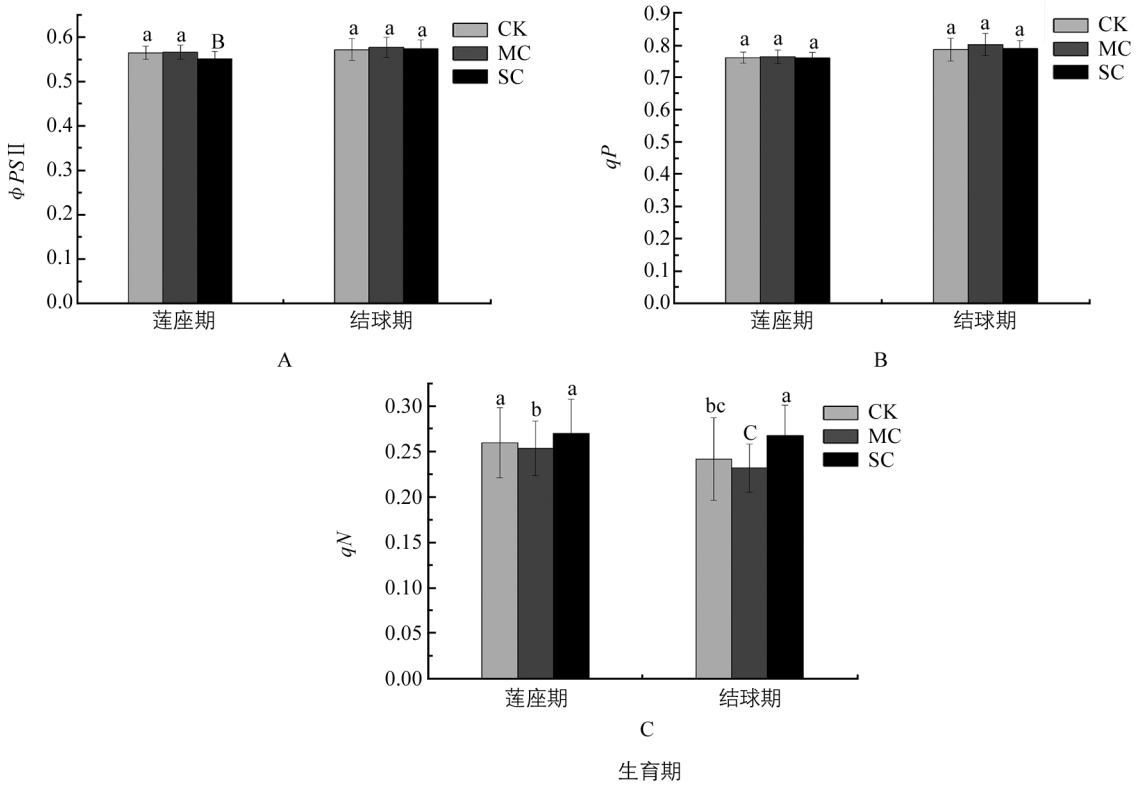


图 2 不同竹炭水平下卷心菜不同生育期的叶绿素荧光参数  $\Phi PS II$ ,  $qP$ ,  $qN$  的比较

$qN$  变化与  $\Phi PS II$  和  $qP$  刚好相反, 随着竹炭施用量的增加, 两个生育期均是先下降后上升, 但变化幅度不同(图 2-C). 说明 MC 处理有助于  $PS II$  进行光合作用, 降低光能热耗散, 但随着竹炭量的增加, 这种作用减弱, 生长后期的卷心菜表现更加明显. 相较于 CK, 莲座期 MC 显著降低( $p < 0.05$ ), 而 SC 没有明显变化( $p > 0.05$ ); 结球期 MC 没有显著变化( $p > 0.05$ ), 而 SC 显著升高( $p < 0.05$ ), 且 MC 和 SC 处理间存在极显著差异( $p < 0.01$ ).

## 3 讨论

### 3.1 卷心菜叶片叶绿素含量(SPAD 值)的变化

植物体的叶绿素是植物光合作用的重要色素, 也是光合作用的敏化剂, 其含量标志着植物光合能力的强弱, 不同的生长环境对植株叶绿素含量的影响也有所差异<sup>[36]</sup>. 试验表明, 生长后期(结球期)的卷心菜叶绿素含量明显高于前期(莲座期)( $p < 0.01$ ), 有利于植株光合能力和作物产量的提高. 另外, 随着竹炭量的增加, 两个时期的叶绿素含量变化趋势一致, 均是先升高后降低, 从高到低依次为:  $MC > CK > SC$ . 表明中炭条件下, 卷心菜叶片的叶绿素含量最高, 光合能力最好, 而高炭环境下, 卷心菜的叶绿素含量偏低, 不利于光合作用的进行. 可能是因为叶绿素与氮代谢密切相关, 长期处于高炭条件下, 会降低植物对  $NO_3^-$  的同化能力, 进而会影响叶片叶绿素含量<sup>[37]</sup>. Asai H 等<sup>[25]</sup>研究也发现, 竹炭可能通过减少土壤中的可用性氮素来减少叶片 SPAD 值, 从而降低早稻的产量. 姚建武等<sup>[38]</sup>研究发现, 碳铵与有机肥配施的 SPAD 值有增加趋势, 但是尿素与有机肥配施的 SPAD 值却降低; 而单独进行尿素或者碳铵处理时, 前者高于后者.

### 3.2 卷心菜叶片叶绿素荧光参数的变化

叶绿素荧光与植物的光合作用等生理活动息息相关, 故可以直接有效反映植物的光合生理状况. 本试

验结果表明,结球期的卷心菜  $F_o$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_o$ ,  $qN$  均低于莲座期,且  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  的下降达到极显著水平 ( $p < 0.01$ ),而  $\Phi PS II$ ,  $qP$  高于莲座期,表明结球期实际光合作用高于莲座期,但光合能力有下降趋势.随着竹炭量的增加,两个时期的这些参数均表现出一致的变化趋势,  $F_o$  和  $qN$  均呈“V”型变化,而  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_o$ ,  $\Phi PS II$  和  $qP$  的变化与上述相反,均呈现倒“V”趋势,但对  $\Phi PS II$  和  $qP$  没有显著影响 ( $p > 0.05$ ).表明在卷心菜生长过程中,一定程度竹炭浓度升高(中炭)能够促进植株捕获光能,有利于  $PS II$  进行光合作用,提高光能利用效率,进而增强其光合作用;但随着竹炭量的继续增加,植株长期处于高炭环境中,造成高炭胁迫,通过  $PS II$  的电子传递能力有所下降,光能利用率降低,植物热耗散增加,从而降低甚至抑制植株的光合作用.因为过高的竹炭量使植物产生光适应现象,即高浓度炭对植物光合速率的促进作用逐渐减弱或消失,甚至抑制其光合作用.

就  $F_o$  变化的原因,其值降低可能是由于非辐射能量热耗散的增加,而升高则可能由  $PS II$  反应中心可逆或不可逆失活引起<sup>[39]</sup>,即 SC 处理下,  $F_o$  降低可能是因为高炭胁迫,使得卷心菜生长过程中  $PS II$  反应中心结构遭到破坏,从而使得荧光增多,植株的光合能力降低.此外,  $qN$  降低,表明竹炭浓度较低时,卷心菜可以充分利用光能,减少热耗散,促进光合作用的进行;随着竹炭量的增加和处理时间的延长,  $qN$  升高,说明高炭引起  $PS II$  反应中心过剩的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉.而  $qP$  表现不显著,说明环境中竹炭浓度的升高对卷心菜植株  $PS II$  反应中心的开放程度及其电子传递活性没有显著影响.但是,植物叶片叶绿素荧光参数的变化也可能会因植物的种类不同而有所差异<sup>[40]</sup>,有待深入研究.

## 4 结 论

综上所述,试验表明,在一定范围内,竹炭量的增加(CK→MC),有利于提高叶片叶绿素含量,增强光能利用率,减少植株热耗散,提高植株光合作用;但随着竹炭量的进一步增加(MC→SC),卷心菜叶片叶绿素含量降低,光能利用率减弱,热耗散增加,光合作用受到抑制.总体来说,生长后期的光合作用高于生长前期.说明中炭(MC)条件下,此卷心菜长势最优.表明本次试验处理中,中炭(60 kg/样地)是该卷心菜生长的最适竹炭有机肥施用量,以此为据进行蔬菜种植,可以有效避免有机肥的浪费,从而进一步促进我国有机农业的发展.

除了蔬菜等农作物,其他有机肥在甘薯<sup>[41]</sup>、柑橘<sup>[42]</sup>、脐橙<sup>[43]</sup>、苹果<sup>[44]</sup>、烤烟<sup>[45-46]</sup>、棉花<sup>[47]</sup>等经济作物方面也有研究,并取得一定成果.该试验的不足之处在于本次结果只针对本次试验,其他物种或者地区有待进一步研究.

## 参考文献:

- [1] 黄 璜.我国低碳农业发展现状与对策 [J]. 作物研究, 2010, 24(4): 215-217, 223.
- [2] 张莉侠,曹黎明.中国低碳农业发展现状与对策探讨 [J]. 经济问题探索, 2011(11): 103-106.
- [3] 范纯增,顾海英,许 源.低碳农业园区建设研究——以东滩低碳农业示范园区为例 [J]. 生态经济, 2013(3): 117-121.
- [4] 许广月.中国低碳农业发展研究 [J]. 经济学家, 2010(10): 72-78.
- [5] 吕 迅,何慧丽.我国有机农业发展的制约因素及其对策 [J]. 湖北社会科学, 2011(12): 93-95.
- [6] 高照全,戴 雷.我国有机农业发展现状和存在问题 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(3): 943-944.
- [7] 吴德慧.典型有机蔬菜的物理保鲜技术研究及应用 [D]. 临安:浙江农林大学, 2013.
- [8] 黄 彪,高尚愚.竹炭、竹醋液生产技术与应用研究综述 [J]. 福建林学院学报, 2003, 23(1): 93-96.
- [9] 刘玉学,刘 微,吴伟祥,等.土壤生物质炭环境行为与环境效应 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
- [10] 沈 泉,沈 颖,徐秋芳,等.外源竹炭对土壤硝酸根离子的吸附效应 [J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(4): 541-546.
- [11] 蒋 晨,麻培侠,胡保国,等.生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 184-191.
- [12] 李 松,李海丽,方晓波,等.生物质炭输入减少稻田痕量温室气体排放 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 234-240.
- [13] 杨 敏,刘玉学,孙 雪,等.生物质炭提高稻田甲烷氧化活性 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 145-151.
- [14] 张 斌,刘晓雨,潘根兴,等.施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844-4853.
- [15] 沈信权,徐佳乐,沈建林,等.添加竹炭对土壤肥力的影响 [J]. 浙江林业科技, 2012, 32(5): 9-12.

- [16] 傅秋华, 张文标, 钟泰林, 等. 竹炭对土壤性质和高羊茅生长的影响 [J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(2): 159—163.
- [17] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153—157.
- [18] STEINER C, TEIXEIRA W G, LEHMANN J, et al. Long Term Effects of Manure, Charcoal and Mineral Fertilization on Crop Production and Fertility on a Highly Weathered Central Amazonian Upland soil [J]. Plant and Soil, 2007, 291(1—2): 275—290.
- [19] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil [J]. Soil Sci, 2009, 174(2): 105—112.
- [20] 刘玉学, 王耀峰, 吕豪豪, 等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1438—1444.
- [21] MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Maize Yield and Nutrition During 4 Years After Biochar Application to a Colombian Savanna Oxisol [J]. Plant and Soil, 2010, 333(1—2): 117—128.
- [22] CHAN K Y, VAN ZWIETEN L, MESZAROS I, et al. Agronomic Values of Green Waste Biochar as a Soil Amendment [J]. Aust J Soil Res, 2007(45): 629—634.
- [23] RONDON M A, LEHMANN J, RAMIREZ J, et al. Biological Nitrogen Fixation by Common Beans (*Phaseolus vulgaris*) Increases with Bio-Charcoal Additions [J]. Biol Fertilization Soils, 2007(43): 699—708.
- [24] 张万杰, 李志芳, 张庆忠, 等. 生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 1946—1952.
- [25] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Bio-Char Amendment Techniques for Upland Rice Production in Northern Laos. 1. Soil Physical Properties, Leaf SPAD, and Grain Yield [J]. Field Crop Res, 2009, 111(1—2): 81—84.
- [26] 宿贤超, 胡杨勇, 赵 薇, 等. 添加竹炭对土壤化学性质和重金属有效性及水稻生长的影响 [J]. 浙江农业学报, 2014, 26(2): 439—443.
- [27] 沈金芳, 黄卫红, 王 华, 等. 不同氮磷钾用量对卷心菜的影响 [J]. 上海农业学报, 2008, 24(3): 128—131.
- [28] MUHAMMAD JAMIL, SHAFIQ REHMAN, RHA E S. Salinity Effect on Plant Growth, PS II Photochemistry and Chlorophyll Content in Sugar Beet (*beta vulgaris* L.) and Cabbage (*brassica oleracea capitata* L.) [J]. Pak J Bot, 2007, 39(3): 753—760.
- [29] LIM Sang-sun, CHOI Woo-jung, KWAK Jin-Hyeob, et al. Nitrogen and Carbon Isotope Responses of Chinese Cabbage and Chrysanthemum to the Application of Liquid Pig Manure [J]. Plant Soil, 2007, 295(1): 67—77.
- [30] 陆 萍, 程秋华, 饶燕铭. 测土配方施肥对卷心菜增产效果研究 [J]. 上海农业学报, 2011, 27(4): 139—143.
- [31] 华锡奇, 李 琴. 竹炭的烧制和用途开发 [J]. 竹子研究汇刊, 2001, 20(2): 55—58.
- [32] 张文标, 叶良明, 张 宏, 等. 竹炭生产和应用 [J]. 竹子研究汇刊, 2001, 20(2): 49—54.
- [33] ZDENEK SESTAK, JIRI BARTOS. Photosynthesis and Chlorophyll Content in Different Areas of Fodder Cabbage Leaves [J]. Biologia Plantarum (PRAHA), 1962, 4(1): 47—53.
- [34] 赵会杰, 邹 琦, 于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用 [J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(3): 248—251.
- [35] GENTY B, BRIANTAIS J, BAKER N R. The Relationship Between the Quantum Yield of Photosynthetic Electron Transport and Quenching of Chlorophyll Fluorescence [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 1989, 990(1): 87—92.
- [36] 杨再强, 朱 凯, 彭晓丹, 等. 昼夜温差对设施番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3190—3196.
- [37] 王佩玲, 许育彬, 宋淑英, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度倍增和施氮对冬小麦光合及叶绿素荧光特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 144—151.
- [38] 姚建武, 艾绍英, 王艳红, 等. 尿素、碳铵及其配施有机肥对叶菜连续种植的效应 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(18): 241—244.
- [39] 陶宗娅, 邹 琦. 强光和短期高浓度 CO<sub>2</sub> 对玉米和大豆光能转化效率的影响 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 244—249.
- [40] 欧英娟, 彭晓春, 董家华, 等. CO<sub>2</sub> 浓度升高对龙血树和春羽生长及光合生理的影响 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(11): 2265—2272.
- [41] 王 菲, 陈 怡, 冉 烈, 等. 肥料组合对甘薯产量和品质的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(10): 25—29.



- [42] 叶荣生,石孝均,周鑫斌. 有机肥对柑橘苗期生物学特性的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(10): 12-18.
- [43] 林 斌. 菌糠、沼渣有机肥对脐橙产量和品质的影响 [J]. 福建农业学报, 2006, 21(3): 293-295.
- [44] 姚胜蕊. 有机物料对苹果生长发育及土壤肥力影响的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 1997.
- [45] 杨柳青,杨 超,白百一,等. 不同碳氮比有机肥对烤烟生长和土壤肥力的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(7): 87-92.
- [46] 韩小斌,杨 超,许安定,等. 氨基酸有机肥对植烟土壤及烤烟生长的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(8): 6-12.
- [47] 李俊华,沈其荣,褚桂新,等. 氨基酸有机肥对棉花根际和非根际土壤酶活性和养分有效性的影响 [J]. 土壤, 2011, 43(2): 277-284.

## Influence of Bamboo Charcoal Application on Chlorophyll Content and Fluorescence Parameters of Cabbage

SHU Hai-yan<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>1,2</sup>, MA Jin-li<sup>2</sup>,  
PAN Xiao-jiao<sup>1</sup>, SUN Wen-wen<sup>2</sup>

1. Southwest University/Key Laboratory of Eco-Environments of Three Gorges Reservoir Region,  
Ministry of Education, Chongqing 400715, China;

2. College of Forestry & Bio-Technology, Zhejiang A & F University, Lincan Zhejiang 311300, China

**Abstract:** To reveal the effects of bamboo charcoal application on cabbage chlorophyll content and fluorescence parameters and to determine the optimum rate of charcoal organic fertilizer for cabbage, three treatments, i. e. control (CK), moderate charcoal (MC) and severe charcoal (SC), were made in a field test, and chlorophyll content (SPAD value) and fluorescence parameters of the leaves at the rosette and heading periods of the plants were measured. Chlorophyll content was highly significantly higher at the heading period than at the rosette period ( $p < 0.01$ ). With the increase in the amount of bamboo charcoal application, chlorophyll contents at both periods showed a similar trend:  $MC > CK > SC$ . The initial minimum fluorescence  $F_o$ , the initial maximum fluorescence  $F_m$ , the maximum photochemical efficiency of PS II  $F_v/F_m$ , the potential activity of PS II  $F_v/F_o$  and non-photochemical quenching coefficient  $qN$  at the heading period were lower than those at the rosette period, but PS II actual photochemical efficiency  $\Phi PS II$  and photochemical quenching  $qP$  at the heading period were higher than those at the rosette period. Increased bamboo charcoal application resulted in a similar trend in the above seven parameters at both periods, i. e.  $F_o$  and  $qN$  exhibited a V-shaped variation, and  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_o$ ,  $\Phi PS II$  and  $qP$  an inverted V-shaped variation, but there was no significance for  $\Phi PS II$  or  $qP$  ( $p > 0.05$ ). These results indicated that the photosynthesis at the heading period was higher than that at the rosette period. Increasing bamboo charcoal application rate from CK to MC contributed to raising chlorophyll content, enhancing energy efficiency, reducing plant heat dissipation and improving plant photosynthesis. However, with further increase in charcoal rate to SC, chlorophyll content and energy use rate decreased, heat dissipation increased and, as a result, photosynthesis was inhibited. In conclusion, cabbage grew most vigorously in the Treatment MC in this experiment, indicating that MC is the optimum application rate of bamboo charcoal manure in cabbage production.

**Key words:** bamboo charcoal; cabbage; chlorophyll content; fluorescence parameter; organic agriculture

