

不同光密度对不结球白菜的生长与品质的影响

陆海洋^{2,*}, 刘晓英^{1,*}, 司聪聪², 焦学磊¹, 徐志刚^{1,**}

南京农业大学¹农学院, ²园艺学院, 南京210095

摘要: 适宜光密度调控是植物工厂化栽培过程中, 实现高效、优质生产的关键措施之一。本研究选‘南农1号’ (‘NN-1’), ‘南农2号’ (‘NN-2’), ‘南农3号’ (‘NN-3’), ‘南农4号’ (‘NN-4’), ‘南农5号’ (‘NN-5’)五个品种, 采用红蓝比为3:1的LED植物光源, 设置150 (T150)、200 (T200)、250 (T250)和300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (T300)四个光密度处理, 研究不同光密度对不结球白菜生长和品质的影响。结果显示, 在T200处理中, ‘NN-3’和‘NN-4’呈现出最好的生长及品质指标; 在T150或T200处理中, ‘NN-1’、‘NN-2’及‘NN-5’的生长指标优于T250或T300处理, 且T200处理的品质指标优于T150处理; 在T300处理中, 5个品种都出现生长指标不良、品质指标下降的特征。比较5个不同品种的不结球白菜对光密度的需求, 表明200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光密度有利于不结球白菜的生长与品质提升, 可作为不结球白菜工厂化栽培的光密度参考。

关键词: 不结球白菜; 光密度; 品种; 生长; 品质

Effects of Different PPFD on Growth and Quality of Non-Heading Chinese Cabbages

LU Hai-Yang^{2,*}, LIU Xiao-Ying^{1,*}, SI Cong-Cong², JIAO Xue-Lei¹, XU Zhi-Gang^{1,**}

¹College of Agronomy, ²College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Suitable photosynthetic photon flux density (PPFD) controlling is one of the important measures for high yield and excellent quality of cultivation in plant factory. In this study, “Nannong-1” (‘NN-1’), “Nannong-2” (‘NN-2’), “Nannong-3” (‘NN-3’), “Nannong-4” (‘NN-4’) and “Nannong-5” (‘NN-5’) were investigated under four PPFD treatments of light emitting diode (LED) grow lights with red/blue ratio of 3:1, to study the growth and quality of five cultivars non-heading Chinese cabbages. Four treatments were 150 (T150), 200 (T200), 250 (T250) and 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (T300). The results showed that the growth and quality of ‘NN-3’ and ‘NN-4’ under PPFD of 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ were the best, and the growth of ‘NN-1’, ‘NN-2’ and ‘NN-5’ under PPFD of 150 or 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ were better than that of the other treatments, and the quality of plant under PPFD of 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ were better than that under 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Five cultivars non-heading Chinese cabbages under PPFD of 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ had the characteristics of growth inhibition and quality reduced. By comparing the demands for light of five cultivars non-heading Chinese cabbages, the results indicated that the PPFD of 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ which could promote the growth of non-heading Chinese cabbages and improve their quality, and can be used as non-heading Chinese cabbage cultivation optical density reference in plant factory.

Key words: non-heading Chinese cabbage; PPFD; cultivar; growth; quality

植物对光质的吸收具有选择性和优适性, 只有在适宜的光密度(光量子通量密度, photosynthetic photon flux density, PPFD)条件下, 适宜的光质才能被植物高效地利用。过低的光密度限制植株光合作用, 植株会出现徒长、叶色减淡、叶面积增大、叶片变薄等不良症状(战吉成等2003); 光密度过高会使植株出现萎蔫、叶片小而厚及叶色变黄等症状, 进而引起光合能力降低, 发生光抑制, 严重时还会造成光合机构的光氧化破坏(许大全2003), 对植物生长造成毁灭性破坏。

不结球白菜(*Brassica campestris* ssp. *Chinensis* L.), 属十字花科芸薹属。在叶菜类蔬菜工厂化栽培中, 多选用LED植物光源作为人工光源提供光照(郭世荣等2012; 闻婧等2009)。在自然光条件下

收稿 2015-02-26 修定 2015-05-25

资助 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2013AA103003)和农业部公益行业(农业)科研专项(201303108)。

* 共同第一作者。

** 通讯作者(E-mail: xuzhigang@njau.edu.cn; Tel: 13951879589)。

不结球白菜的光补偿点在 $45 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,光饱和点在 $1\ 100\sim 1\ 300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (徐明宇2005;黄俊等2006),但植物在LED光源下的光饱和点会发生变化,通常低于自然光下的光饱和点(刘晓英等2010)。

不同植物对光密度的需求特性不同,即使是同一种植物,不同品种的需光特性也有差异(黄俊等2006)。在人工光照条件下,不同光密度对不结球白菜生长与品质影响的研究还比较少见,因为缺乏理论数据的支撑,前人在进行不同光谱分布对不结球白菜的研究时,光密度设置偏低(王婷等2011),不利于高产,而盲目参考自然光下的光饱和点,设置工厂化栽培的光密度,又势必造成能源浪费并导致生长不良等特征。所以在人工光源条件下,开展不同光密度对叶菜生长与品质影响的研究,对工厂化叶菜栽培的光密度参数设置有重要的参考价值。

本研究采用LED植物光源,使用红蓝比为3:1的复合光,本着植物工厂节约能耗原则,以及参照前人综述(Olle和Virsilé 2013),设置4个光密度处理5个不同品种的不结球白菜,通过测定生长指标和品质指标,研究不同光密度对不结球白菜生长和品质的影响,旨在探明不结球白菜工厂化栽培的适宜光密度。

材料与方法

1 材料与试验方法

试验材料为南京农业大学园艺学院白菜课题组提供的不结球白菜[*Brassica campestris* ssp. *Chinensis* (L.) Makino],品种分别为‘南农1号’(‘NN-1’),‘南农2号’(‘NN-2’),‘南农3号’(‘NN-3’),‘南农4号’(‘NN-4’),‘南农5号’(‘NN-5’)。LED植物光源为红蓝比为3:1的复合光,由南京欧谱润生物科技有限公司提供,红光的主峰波长为660 nm,半波宽为20 nm,蓝光主峰波长为445 nm,半波宽为20 nm。采用叶菜专用基质在自然光下育苗,待苗长至四叶一心时,将其定植于栽培钵,每钵一株,黑暗处理1 d后,移入生长室实施光照处理。4个处理的光密度设置分别为150 (T150)、200 (T200)、250 (T250)和 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (T300),光照时数设为 $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 。生长室昼温设为 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$,夜温为

$(15\pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度设为60%~65%,定时通风,保持 CO_2 浓度均匀并与大气相同,正常水肥管理。

2 测定指标与方法

不同光密度处理28 d后,各处理随机抽样3株。用直尺测量株高、根长;叶面积测定采用肖强等(2005)的方法;用电子天平测量地上部鲜重、根重和干重,鲜样含水量采用称量法(张以顺等2009);将鲜样置于 105°C 杀青15 min, 80°C 烘干至恒量测定干重;比叶重为地上部干重与叶面积比值;色素含量使用Lichtenthaler (1987)的方法提取并根据Arnon公式计算测定(张以顺等2009);水杨酸比色法测硝酸盐含量(张以顺等2009);根据国家标准测定亚硝酸盐含量(中华人民共和国卫生部2010);可溶性蛋白测定采用双缩脲法(张以顺等2009);可溶性糖、淀粉含量测定采用蒽酮法(张以顺等2009);蔗糖含量采用间苯二酚法测定(张以顺等2009);使用比色法测定维生素C含量(张以顺等2009)。

3 数据处理

采用Microsoft Excel 2007整理数据,采用SPASS 20.0的Duncan法做差异显著性($P<0.05$)分析。

实验结果

1 不同光密度对不结球白菜的生物量和形态指标的影响

如图1所示,T150和T200处理下的5种不结球白菜的株型紧凑,叶片大且多,随着光密度增大,不结球白菜株型逐渐松散,而在T300处理下的5种不结球白菜长势均较矮小。如表1所示,各品种不结球白菜的生物量积累对光密度的变化表现出趋势的一致性,T200处理间的地上部和地下部干、鲜重的值相近,都高于T250和T300处理。光密度超过 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,生物量随光密度增大而降低。除‘NN-4’外,其余4个品种在T150处理下叶面积最大,在T300处理下叶面积最小。比叶重在品种间的差异性明显,对于‘NN-1’,T200和T250处理的比叶重值最大,对于‘NN-2’、‘NN-4’和‘NN-5’,T200处理的比叶重值最大,对于‘NN-3’,T200、T250和T300处理的比叶重指标无显著差异,均显著高于T150处理。‘NN-1’和‘NN-5’的株高对光密



图1 不同光密度对5个品种不结球白菜形态的影响
Fig.1 Effects of different PPFD on morphology of five cultivars of non-heading Chinese cabbages

表1 不同光密度对不结球白菜的生物量与形态指标的影响

Table 1 Effects of different PPFD on biomass and morphology of non-heading Chinese cabbages

品种	光密度	地上部 鲜重/g	地下部 鲜重/g	地上部 干重/g	地下部 干重/g	叶面积/ cm ²	比叶重/ mg·cm ⁻²	株高/ cm	根长/ cm	含水量/ %
'NN-1'	T150	13.41 ^a	1.55 ^a	1.40 ^a	0.13 ^a	32.93 ^a	0.04 ^c	9.45 ^a	13.79 ^b	89.83 ^a
	T200	13.47 ^a	1.28 ^b	1.34 ^{ab}	0.13 ^a	15.03 ^b	0.08 ^a	8.51 ^a	16.78 ^a	89.62 ^a
	T250	12.55 ^b	1.15 ^{bc}	1.30 ^{ab}	0.09 ^b	14.59 ^b	0.09 ^a	8.98 ^a	9.96 ^c	90.07 ^a
	T300	9.95 ^c	0.89 ^c	1.02 ^b	0.08 ^b	15.75 ^b	0.07 ^b	8.24 ^a	7.99 ^d	89.65 ^a
'NN-2'	T150	14.28 ^b	1.75 ^a	1.36 ^b	0.16 ^a	33.21 ^a	0.05 ^b	12.05 ^a	13.28 ^b	90.10 ^a
	T200	15.34 ^a	1.51 ^a	1.66 ^a	0.16 ^a	24.08 ^b	0.06 ^b	10.54 ^b	20.40 ^a	89.25 ^a
	T250	14.44 ^b	1.31 ^b	1.54 ^{ab}	0.13 ^b	19.81 ^c	0.08 ^a	10.60 ^b	12.13 ^b	89.15 ^a
	T300	14.28 ^b	1.27 ^b	1.41 ^b	0.12 ^b	18.77 ^c	0.06 ^b	9.96 ^b	7.51 ^c	90.37 ^a
'NN-3'	T150	13.80 ^b	1.51 ^a	1.29 ^b	0.14 ^b	24.76 ^a	0.04 ^b	10.59 ^a	12.89 ^b	89.30 ^a
	T200	15.27 ^a	1.63 ^a	1.43 ^a	0.18 ^a	24.77 ^a	0.07 ^a	10.10 ^a	21.75 ^a	90.39 ^a
	T250	13.98 ^b	1.59 ^a	1.34 ^b	0.12 ^b	16.03 ^b	0.08 ^a	9.34 ^b	13.69 ^b	91.05 ^a
	T300	13.50 ^b	1.12 ^b	1.37 ^a	0.08 ^c	23.49 ^b	0.08 ^a	9.46 ^b	7.91 ^c	90.62 ^a
'NN-4'	T150	13.52 ^a	1.58 ^a	1.36 ^{ab}	0.14 ^a	22.72 ^b	0.06 ^{ab}	10.43 ^a	12.23 ^b	89.25 ^a
	T200	13.90 ^a	1.31 ^{ab}	1.43 ^a	0.15 ^a	27.91 ^a	0.08 ^a	7.19 ^b	17.13 ^a	89.54 ^a
	T250	11.79 ^b	1.17 ^{ab}	1.24 ^b	0.10 ^b	15.90 ^c	0.07 ^{ab}	9.19 ^{ab}	10.76 ^c	89.60 ^a
	T300	8.78 ^c	0.83 ^b	0.95 ^c	0.07 ^c	12.87 ^d	0.05 ^b	7.16 ^b	7.96 ^c	89.93 ^a
'NN-5'	T150	13.91 ^b	2.09 ^a	1.42 ^b	0.21 ^a	33.64 ^a	0.04 ^c	10.94 ^a	13.29 ^b	90.26 ^a
	T200	16.11 ^a	1.71 ^b	1.65 ^a	0.20 ^a	15.77 ^d	0.08 ^a	9.34 ^a	17.92 ^a	90.23 ^a
	T250	14.84 ^b	1.43 ^b	1.52 ^a	0.13 ^b	29.65 ^b	0.06 ^{bc}	9.62 ^a	12.85 ^b	89.17 ^a
	T300	12.07 ^c	1.41 ^b	1.26 ^c	0.12 ^b	21.83 ^c	0.07 ^{ab}	9.34 ^a	7.83 ^c	88.90 ^a

同一品种同一测定项目间不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 下图和表同此。

度的变化不敏感, ‘NN-2’、‘NN-3’和‘NN-4’的株高在较低光密度处理下, 株高呈增大趋势。各品种的根长在不同光密度下表现出一致性, 在T200处理中均呈现出根长最大的特征。各品种各处理的含水量差异不显著。

2 不同光密度对不结球白菜的根系活力的影响

如图2所示, 对于‘NN-1’、‘NN-2’和‘NN-4’, T150和T200处理间的根系活力无显著差异, 但都显著高于T250和T300处理; 对于‘NN-3’, T150和

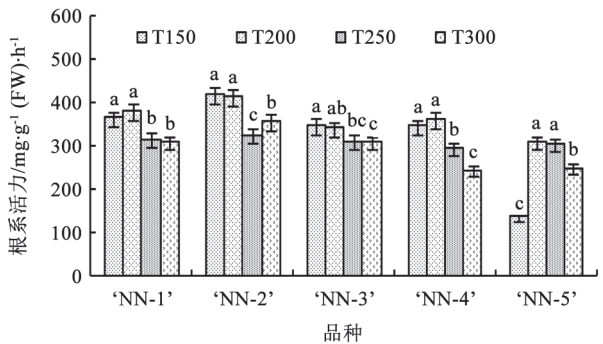


图2 不同光密度对不结球白菜的根系活力的影响
Fig.2 Effects of different PPFD on root activity of non-heading Chinese cabbages

T200处理间的根系活力无显著性差异, T250显著小于T150处理, 但与T200和T300处理无显著差异, 而T300处理的根系活力最低; 对于‘NN-5’, T200和T250处理的根系活力显著大于T150和T300处理, T150处理的根系活力最低。

3 不同光密度对不结球白菜光合色素含量的影响

如表2所示, ‘NN-1’、‘NN-2’和‘NN-5’品种的光合色素含量对光密度的变化表现出趋势的一致性, T150和T200处理的叶绿素a和叶绿素(a+b)含量都显著大于T250和T300处理, 且光密度越大, 其含量越低; T150处理的叶绿素b最大。5个品种的叶绿素a/b在T200处理下最大。‘NN-1’和‘NN-4’的类胡萝卜素含量的变化规律相同, T150和T300处理的类胡萝卜素含量显著大于T200和T250处理; ‘NN-2’、‘NN-3’和‘NN-4’的类胡萝卜素含量的变化规律相同, 都是在T150处理下最大。

4 不同光密度对不结球白菜的硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响

如图3所示, 各品种不结球白菜的硝酸盐含量和亚硝酸盐在不同光密度表现差异很大, 对于‘NN-1’和‘NN-2’, T200和T300处理的硝酸盐含量

表2 不同光密度对不结球白菜的光合色素的影响

Table 2 Effects of different PPFD on photosynthetic pigments of non-heading Chinese cabbages

品种	光密度	叶绿素a含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素b含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素(a+b)含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素a/b 含量	类胡萝卜素含量/ mg·g ⁻¹ (FW)
‘NN-1’	T150	1.26 ^a	0.67 ^a	1.93 ^a	1.58 ^b	0.50 ^a
	T200	1.31 ^a	0.51 ^b	1.82 ^b	2.03 ^a	0.42 ^b
	T250	1.03 ^b	0.51 ^b	1.54 ^c	1.87 ^a	0.42 ^b
	T300	0.82 ^c	0.41 ^c	1.23 ^d	1.43 ^b	0.48 ^a
‘NN-2’	T150	1.30 ^a	0.88 ^a	2.18 ^a	1.95 ^b	0.58 ^a
	T200	1.31 ^a	0.69 ^b	2.00 ^b	2.56 ^a	0.44 ^{bc}
	T250	1.17 ^b	0.57 ^c	1.74 ^c	2.31 ^{ab}	0.43 ^c
	T300	1.07 ^c	0.54 ^c	1.61 ^d	1.60 ^b	0.47 ^b
‘NN-3’	T150	1.11 ^b	0.77 ^a	1.88 ^a	1.43 ^d	0.53 ^a
	T200	1.18 ^a	0.55 ^b	1.74 ^b	2.14 ^a	0.44 ^c
	T250	1.08 ^b	0.55 ^b	1.63 ^c	1.98 ^b	0.42 ^c
	T300	0.82 ^c	0.53 ^c	1.35 ^d	1.56 ^c	0.46 ^b
‘NN-4’	T150	1.15 ^b	0.74 ^a	1.90 ^a	1.55 ^c	0.55 ^a
	T200	1.23 ^a	0.63 ^b	1.87 ^a	1.96 ^a	0.51 ^b
	T250	1.03 ^c	0.62 ^b	1.64 ^b	1.67 ^{bc}	0.50 ^b
	T300	0.83 ^d	0.46 ^c	1.28 ^c	1.82 ^b	0.54 ^a
‘NN-5’	T150	1.40 ^a	1.10 ^a	2.50 ^a	0.97 ^c	0.60 ^a
	T200	1.39 ^a	0.65 ^b	2.04 ^b	2.04 ^a	0.45 ^c
	T250	1.06 ^b	0.64 ^b	1.70 ^c	1.6 ^b	0.41 ^d
	T300	0.77 ^c	0.53 ^b	1.30 ^d	1.57 ^b	0.49 ^b

显著小于T150和T250处理, 亚硝酸盐含量无显著差异。对于‘NN-3’, T200的硝酸盐含量显著小于其他3个光密度处理, 亚硝酸盐含量也最低。对于‘NN-4’和‘NN-5’, T150处理的硝酸盐和亚硝酸盐含量显著小于其他3个光密度处理。

5 不同光密度对不结球白菜的营养品质的影响

如表3所示, T200处理的所有品种的可溶性

糖、蔗糖、淀粉以及维生素C含量都显著大于其他光密度处理。在T200处理下, 所有品种的可溶性蛋白含量最高, 对于‘NN-3’, T300处理与T200处理间的可溶性蛋白含量无显著差异, 对于其他品种, T300处理的可溶性蛋白含量显著低于其他光密度处理。对于‘NN-1’和‘NN-3’, T200处理与T150处理间的可溶性蛋白无显著差异。

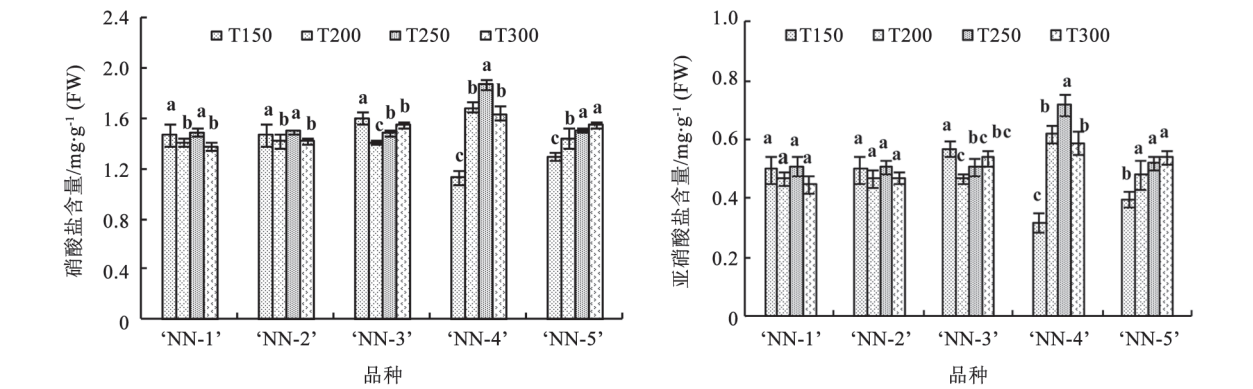


图3 不同光密度对不结球白菜的硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响

Fig.3 Effects of different PPFD on nitrate and nitrite of non-heading Chinese cabbages

表3 不同光密度对不结球白菜的营养品质的影响

Table 3 Effects of different PPFD on nutritional quality of non-heading Chinese cabbages

品种	光密度	可溶性糖含量/ mg·g ⁻¹ (DW)	可溶性蛋白含量/ mg·g ⁻¹ (DW)	蔗糖含量/ mg·g ⁻¹ (DW)	淀粉含量/ μg·g ⁻¹ (DW)	维生素C含量/ mg·100 g ⁻¹ (FW)
‘NN-1’	T150	14.97 ^d	54.10 ^a	51.09 ^c	17.05 ^b	1.53 ^c
	T200	20.81 ^a	58.79 ^a	65.54 ^a	22.21 ^a	2.51 ^a
	T250	19.26 ^b	36.30 ^b	55.90 ^b	17.05 ^b	2.14 ^b
	T300	16.16 ^c	11.84 ^b	39.66 ^d	11.01 ^c	1.71 ^c
‘NN-2’	T150	11.84 ^d	45.58 ^b	50.66 ^b	3.63 ^d	4.24 ^c
	T200	20.86 ^a	59.92 ^a	65.52 ^a	22.66 ^a	5.98 ^a
	T250	18.38 ^b	45.30 ^b	54.20 ^b	17.20 ^b	5.28 ^b
	T300	16.05 ^c	29.83 ^c	39.90 ^c	11.89 ^c	3.79 ^d
‘NN-3’	T150	16.11 ^c	23.65 ^{ab}	46.39 ^b	19.71 ^b	3.38 ^{bc}
	T200	20.68 ^a	31.24 ^a	50.05 ^a	25.31 ^a	5.02 ^a
	T250	18.92 ^b	17.74 ^b	45.45 ^b	17.94 ^b	3.56 ^b
	T300	16.59 ^c	27.58 ^a	38.26 ^c	12.92 ^c	2.93 ^c
‘NN-4’	T150	14.97 ^d	53.73 ^b	53.21 ^b	14.10 ^c	1.76 ^b
	T200	20.70 ^a	126.27 ^a	66.37 ^a	41.24 ^a	3.73 ^a
	T250	18.94 ^b	45.86 ^{bc}	57.31 ^b	24.72 ^b	3.32 ^a
	T300	16.36 ^c	26.46 ^c	40.19 ^c	9.83 ^c	1.80 ^b
‘NN-5’	T150	15.27 ^c	53.73 ^b	51.79 ^b	14.84 ^b	5.09 ^c
	T200	20.83 ^a	95.35 ^a	66.09 ^a	24.43 ^a	6.98 ^a
	T250	18.87 ^b	44.45 ^b	55.05 ^b	19.85 ^{ab}	6.13 ^b
	T300	18.01 ^b	27.02 ^c	42.31 ^c	16.02 ^b	3.82 ^d

讨 论

植物的形态差异是植物对光密度的自适应,光密度过弱或过强都会限制植物的生长。光密度较弱时,植株出现徒长、叶片大而薄,比叶重降低(Ruberti等2012; Franklin和Whitelam 2005)。当光密度超过补偿点时,随着光密度的增强,植物的生长速率加快,生物量快速增加(Li等2001),但当光密度继续增加,过高的光密度会抑制植物的生长,产量下降。在强光下植物为了适应环境,会减少叶面积、关闭气孔或减少气孔开度、增加叶片厚度,以避免吸收过量的光能(Wentworth等2006; Matos等2009)。本研究中发现5个品种的不结球白菜在 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光密度下出现上述现象(表1和图1)。植物根系可以为植物地上部提供水分与养分,不结球白菜在 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光密度下的根重、根系活力和根长比150和 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光密度下小,这是植物对高光密度的适应性应对机制,地下部活性的减少,有助于降低呼吸消耗,积累同化产物(乔云发等2009)。

光合色素尤其是叶绿素含量的高低直接影响叶片的光合作用,本研究发现不结球白菜叶绿素和类胡萝卜素在低光密度下含量较高,在高光密度下含量较低(表2),这与前人研究结果一致(李汉生和徐永2014)。低光密度有利于植物叶绿素的合成,使植物在低光密度下吸收较多的光能,提高光合效能,这是植物对低光密度环境的生理适应(张英云2006),而高光密度下的色素含量低于低光密度下的色素含量,这是因为叶片在高光密度下为避免吸收过多的光能而自发形成的一种生理适应,光合器官被损坏导致色素含量下降(种培芳和陈年来2008)。郑洁等(2008)认为类胡萝卜素可以通过叶黄素循环,以非辐射的方式消耗光系统II的过剩能量来保护强光条件下的叶绿素免受破坏;类胡萝卜素除了防止光氧化对植物产生的破坏作用外,还协助吸收光能(陈鹏飞等2011; 王素萍等2006),本试验发现 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光密度处理的类胡萝卜素含量显著高于200和 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光密度处理,此外, $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光密度处理的类胡萝卜素含量显著高于200、250和 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光密度处理,低光密度下,植物会产生较高含量的类胡萝卜素,协助叶绿素接收更多光能,更高效利用光能。

植物可食用部分的营养品质受光密度影响。当光密度较低时,植物可溶性糖、蔗糖和淀粉含量较低(张英云2006),本试验在 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低光密度处理中也发现类似现象(表3)。低光密度下植物光合作用较弱,植物运输到细胞溶质的磷酸丙糖减少,蔗糖和淀粉的合成速度减慢(张英云2006);光密度太大也不利于光合产物的积累(平晓燕等2010),在 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 高光密度处理与和 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 次高光密度处理中光合产物含量较低(表3)。这是因为光密度过大,会引起植物光合膜的破坏,不能正常吸收光能进行光合作用,同时水分蒸腾加剧,水分供需矛盾突出,不利于光合产物的积累(张英云2006)。 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光密度处理导致不结球白菜产生较高的碳水化合物、可溶性蛋白和维生素C含量(表3)。碳水化合物的含量与蛋白质含量通常是负相关(王月福等2003),光密度对蛋白的调控作用是通过影响光合产物积累运转、代谢酶活性及细胞分裂等实现的(黄发松等1998),较高的碳水化合物促进维生素C的合成(Toledo等2003),有利于不结球白菜营养品质的整体提升。

叶菜类蔬菜的安全品质衡量标准是硝酸盐和亚硝酸盐含量的高低,我国无公害叶菜类蔬菜的硝酸盐含量标准是要不高于 $3\ 000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,亚硝酸盐含量标准是要不高于 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会2001),本研究发现5种不结球白菜的硝酸盐含量都小于 $2\ 000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,亚硝酸盐含量小于 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,都低于国家无公害标准。硝酸盐和亚硝酸盐含量由硝酸还原酶活性控制,光密度越大,硝酸还原酶活性越大,硝酸盐与亚硝酸盐含量越低(周秋月等2009)。

综上所述, $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光密度下5个品种的不结球白菜产量最大,品质最佳, $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光密度是工厂化栽培不结球白菜的最佳光密度。

参考文献

- 陈鹏飞, 刘栓桃, 张志刚, 李巧云, 赵智中, 薛林宝(2011). 大白菜的类胡萝卜素种类鉴定. 中国农学通报, 27 (19): 137~143
- 郭世荣, 孙锦, 束胜, 李晶(2012). 国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析. 南京农业大学学报, 35 (5): 43~52
- 黄发松, 孙宗修, 胡培松, 唐绍清(1998). 食用稻米品质形成研究的现状与展望. 中国水稻科学, 12 (3): 172~176

黄俊, 郭世荣, 吴震, 李式军(2006). 6个不结球白菜品种光合作用特性的研究. 西北植物学报, 26 (6): 1183~1189

李汉生, 徐永(2014). 光照对叶绿素合成的影响. 现代农业科技, (21): 161~164

刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 郭世荣(2010). 不同光质LED 弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响. 西北植物学报, 30 (4): 645~651

平晓燕, 周广胜, 孙敬松(2010). 植物光合产物分配及其影响因子研究进展. 植物生态学报, 34 (1): 100~111

乔云发, 韩晓增, 苗淑杰, 王树起(2009). 黑土区长期施肥对大豆光合产物分配的影响. 大豆科学, 28 (3): 477~482

王素平, 郭世荣, 胡晓辉, 李璟, 焦彦生(2006). 盐胁迫对黄瓜幼苗叶片光合色素含量的影响. 江西农业大学学报, 28 (1): 32~38

王婷, 李雯琳, 巩芳娥, 郁继华(2011). LED 光源不同光质对不结球白菜生长及生理特性的影响. 甘肃农业大学学报, 46 (4): 69~73

王月福, 姜东, 于振文, 曹卫星(2003). 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础. 中国农业科学, 36 (5): 513~520

闻婧, 魏灵玲, 杨其长, 王凤武, 杨雅婷(2009). LED在叶菜植物工厂中的应用. 农业工程技术: 温室园艺, (6): 11~12

肖强, 叶文景, 朱珠, 朱珠, 陈瑶, 郑海雷(2005). 利用数码相机和Photoshop软件非破坏性测定叶面积的简便方法. 生态学杂志, 24 (6): 711~714

徐明宇(2005). 几份不结球白菜材料光合特性的研究[硕士论文]. 南京: 南京农业大学

许大全(2003). 植物光胁迫研究中的几个问题. 植物生理学通讯, 39 (5): 493~495

战吉成, 黄卫东, 王利军(2003). 植物弱光逆境生理研究综述. 植物学通报, 20 (1): 43~50

张以顺, 黄霞, 陈云凤(2009). 植物生理学实验教程. 北京: 高等教育出版社

张英云(2006). 不同光强下结球莴苣光保护机制和营养成分形成关系的研究[硕士论文]. 杭州: 浙江大学

郑洁, 胡美君, 郭延平(2008). 光质对植物光合作用的调控及其机理. 应用生态学报, 19 (7): 1619~1624

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会(2001). GB 18406.1-2001农产品安全质量无公害蔬菜安全要求. 北京: 中国标准出版社

中华人民共和国卫生部(2010). GB 5009.33-2010食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定. 北京: 中国标准出版社

种培芳, 陈年来(2008). 光照强度对园艺植物光合作用影响的研究进展. 甘肃农业大学学报, 43 (5): 104~109

周秋月, 吴沿友, 许文祥, 黄华坤, 桑小花(2009). 光强对生菜硝酸盐累积的影响. 农机化研究, 31 (1): 189~192

Franklin KA, Whitelam GC (2005). Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. Ann Bot, 96 (2): 169~175

Li Bo, Shibuya T, Yogo Y, Hara T, Matsuo K (2001). Effects of light quantity and quality on growth and reproduction of a clonal sedge, *Cyperus esculentus*. Plant Spec Biol, 16 (1): 69~81

Lichtenthaler HK (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods Enzymol, 148: 350~382

Matos FS, Wolfgramm R, Cavatte PC, Villela FG, Ventrella MC, DaMatta FM (2009). Phenotypic plasticity in response to light in the coffee tree. Environ Exp Bot, 67 (2): 421~427

Olle M, Virsile A (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. Agric Food Sci, 22 (2): 223~234

Ruberti I, Sessa G, Ciolfi A, Possenti M, Carabelli M, Morelli G (2012). Plant adaptation to dynamically changing environment: The shade avoidance response. Biotechnol Adv, 30 (5): 1047~1058

Toledo MEA, Ueda Y, Imahori Y, Ayaki M (2003). L-ascorbic acid metabolism in spinach (*Spinacia oleracea* L.) during postharvest storage in light and dark. Postharvest Biol Technol, 28 (1): 47~57

Wentworth M, Murchie EH, Gray JE, Villegas D, Pastenes C, Pinto M, Horton P (2006). Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. II. Acclimation of photosynthesis. J Exp Bot, 57 (3): 699~709