

# 暗期中断对蕹菜和叶用莴苣光合及品质的调控效应

刘彬彬<sup>1</sup>, 孔静雯<sup>2</sup>, 李政元<sup>1</sup>, 李清明<sup>3,4</sup>

(1. 成都大学食品与生物工程学院, 四川 成都 610106; 2. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018; 3. 中国农业科学院都市农业研究所, 四川 成都 610213; 4. 农业农村部植物工厂加代育种实验室, 四川 成都 610213)

**摘要:** 为了探究暗期中断对不同光周期蔬菜作物光合特性的影响及品质调控效应, 通过调控暗期光照模式, 研究其对光周期响应型蔬菜生长发育及品质形成的调控作用, 为设施蔬菜光环境精准调控提供依据。试验选取典型短日照作物蕹菜(台湾竹叶空心菜)与长日照作物叶用莴苣(紫莴苣)为供试材料, 日间采用LED红蓝复合光(红:蓝为4:1)进行12 h的人工光照管理, 光照强度为200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。夜间设置3种暗期处理, 即无光照中断(CK)、每1 h中断光照5 min(夜间共中断11次)、每2 h中断光照5 min(夜间共中断5次), 系统探究暗期中断对2种蔬菜生长形态、光合特性、氮代谢过程及品质指标的影响规律。结果表明, 暗期中断可显著促进长日照作物叶用莴苣的生长进程并提升品质, 反之, 对短日照作物蕹菜进行暗期中断处理显著抑制其生长, 降低其品质, 抑制效应随中断次数的增加呈增强趋势。暗期中断处理能够有效提高长日照作物叶用莴苣的净光合速率和电子传递速率, 促进植株生长发育, 增加可溶性蛋白、游离氨基酸等含氮化合物的含量, 从而提升其营养品质, 以每1 h中断5 min的处理效果最优; 短日照作物蕹菜在暗期中断处理下表现出生长抑制效应, 不利于品质的形成和提升。本研究结果可为设施条件下蕹菜和叶用莴苣的高产优质栽培提供光环境精准调控的理论依据与技术支持。

**关键词:** 蕹菜; 叶用莴苣; 暗期中断; 生长发育; 光合特性; 氮代谢; 品质调控

**中图分类号:** S636.2; S636.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2026)04-0332-08

[doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2026.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-2172.2026.04.008)

光照是植物生长发育的关键环境因子, 不仅为光合作用提供能量, 还通过光周期、光质和光强等信号调控植物的形态建成、生理代谢、品质形成及延缓衰老等一系列生理生化反应和生理过程<sup>[1-2]</sup>。光周期对植物的开花诱导、营养生长及物质积累具有重要调控作用, 其中暗期长度是影响光周期响应的核心要素之一。暗期中断(Night interruption, NI)即在植物的光周期中适时插入短时间的光照以中断原本的黑暗期, 作为一种非常有效的光周期调控手段, 调节植物的光信号反应, 已被证实能够显著影响多种作物的开花时间、生物量积累及器官发育<sup>[3-5]</sup>。

近年来, 发光二极管(LED)光源因其光质可调、节能高效、发热量低等优点, 在设施园艺光环境精准调控中得到了广泛应用<sup>[6-7]</sup>。因此, 利用LED光源实施暗期中断, 为生产上实现作物生

育周期、产量品质的定向调控提供了新的技术途径<sup>[8]</sup>。近年来大量研究表明, 暗期中断对不同日照特性植物的影响截然不同, 比如在特定条件下暗期中断促进长日照植物开花却抑制短日照植物开花<sup>[9]</sup>; 姜平等<sup>[10]</sup>研究表明, 暗期中断能够促进萝卜在短日照条件下抽薹开花; Cao等<sup>[11]</sup>发现, 利用红光施加暗期中断使番茄的株高生长被抑制、开花期被延迟; 刘学群等<sup>[12]</sup>在小麦上的研究表明, 暗期红光、远红光中断通过影响叶片细胞壁木质素含量和抗纤维素水解酶活性从而调控叶片的伸展; 还有研究发现, 红光和远红光的暗期中断能够提高罗勒叶片的色素含量、光合能力和营养品质<sup>[13]</sup>。但是, 关于暗期中断对不同光周期响应型蔬菜生长发育及品质形成的影响仍缺乏系统性研究, 尤其对于典型短日照作物与长日照作物在相同光中断模式下的响应差异及其生理机制

收稿日期: 2026-01-19; 修订日期: 2026-03-10

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程(34-IUA-03); 四川省自然科学基金(2024NSFSC0397); 成都农业科技中心地方财政专项资金项目(NASC2022KR01、NASC2023ST06、NASC2024KR03)。

作者简介: 刘彬彬(1980—), 女, 河南三门峡人, 博士, 副教授, 主要从事蔬菜生理生态及品质调控研究工作。Email: liubinyin@caas.cn。

通信作者: 李清明(1974—), 男, 甘肃陇西人, 博士, 研究员, 主要从事设施园艺光生物学与光环境调控研究。Email: liqingming@caas.cn。

尚不明晰。

本研究以典型短日照作物蕹菜(台湾竹叶空心菜)和长日照作物叶用莴苣(紫莴生菜)为材料,在日间固定光环境[LED红蓝复合光,红:蓝为4:1,光照强度 $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,光照12 h]基础上,于夜间设置不同频次的暗期中断处理,系统探究暗期中断对两种蔬菜生长形态、光合特性、氮代谢及品质指标的影响,旨在阐明暗期中断对光周期响应型蔬菜的调控效应与差异,为设施蔬菜光环境的精准调控提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试短日照作物蕹菜品种为台湾竹叶空心菜,购自北京华明亿友种苗科技有限公司;长日照作物叶用莴苣品种为紫莴生菜,购自北京金润东田农业科技有限公司。试验光源采用专用人工LED红蓝复合光光源,由中科稀土(长春)有限责任公司提供,该光源红:蓝为4:1,红光波长为620~680 nm,蓝光波长为440~460 nm,光照强度为 $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

### 1.2 试验设计

将大小一致且饱满的种子浸种催芽,出芽后挑选整齐一致的种子播于穴盘(长、宽、高分别为54.0、28.0、5.0 cm),每盘播50粒。将草炭、蛭石、珍珠岩按体积比3:1:1混合配制栽培基质,生长期内的水肥及田间管理统一进行。蕹菜幼苗长至2叶1心、莴苣幼苗长至4叶1心时,选择长势一致的幼苗移栽至营养钵(直径11.0 cm、高10.0 cm),在日光温室进行缓苗,然后移入光照培养架(长、宽、高分别1.4、0.6、1.0 m)进行暗期中断处理,每个培养架放置16株幼苗。日间进行12 h的人工光照管理,光照强度为 $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

夜间设置3种暗期处理,分别为无光照中断(对照);每1 h中断光照5 min(夜间共11次);每2 h中断光照5 min(夜间共5次)。暗期中断时间通过定时器精准控制,各处理除暗期中断条件外,其余管理措施保持一致。处理15 d后,每处理随机选取5株测定各项生理指标。具体试验设计见表1。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标 采用直尺测量株高(自基部至生长点的直线距离);采用游标卡尺测定植株茎粗;使用CI-202叶面积仪(美国,CID Inc公司)测定真叶叶面积;将植株地上部与地下部用去离子水冲洗干净,室内自然晾干后称取鲜重,然后装入烘干袋置于烘箱,105℃杀青15 min后,80℃烘干至恒重,测定干重。

1.3.2 光合特性 叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量采用95%乙醇浸提法测定<sup>[14]</sup>;光合作用气体交换参数使用CIRAS-3便携式光合作用测定仪测定(美国,PP Systems公司);叶绿素荧光参数采用FMS-2型调制式叶绿素荧光仪(英国,Hansatech公司)测定。

1.3.3 氮代谢指标 去除叶片叶脉及边缘部分后称取鲜样0.5 g,硝态氮含量采用水杨酸比色法测定<sup>[15]</sup>;铵态氮含量采用靛酚蓝比色法测定<sup>[15]</sup>;硝酸还原酶活性采用磺胺比色法进行测定<sup>[15]</sup>;谷氨酰胺合成酶、谷氨酸脱氢酶、谷氨酸合成酶活性测定参考孔静雯<sup>[16]</sup>的方法。

1.3.4 品质指标 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定<sup>[15]</sup>;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定<sup>[17]</sup>;游离氨基酸含量测定采用茚三酮比色法<sup>[18]</sup>;维生素C含量采用2,6-二氯靛酚比色法测定<sup>[15]</sup>。

表1 暗期中断试验设计

蔬菜	处理	暗期中断设置	暗期中断次数/次	暗期中断时长/(min/次)	暗期中断总时长/min
蕹菜	T <sub>0</sub>	不中断	0	0	0
	T <sub>1</sub>	每1 h中断1次	11	5	55
	T <sub>2</sub>	每2 h中断1次	5	5	25
叶用莴苣	P <sub>0</sub>	不中断	0	0	0
	P <sub>1</sub>	每1 h中断1次	11	5	55
	P <sub>2</sub>	每2 h中断1次	5	5	25

#### 1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2019软件进行试验数据整理,使用DPS 15.10软件进行数据统计分析,采用Duncan新复极差法进行多重比较,采用SigmaPlot 12.5软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 薹菜和叶用莴苣生长对暗期中断的响应

由表2可知,与T<sub>0</sub>处理相比,T<sub>1</sub>处理显著降低了薹菜的株高、茎粗、叶片数、叶面积、全株鲜重、全株干重,降幅分别达25.67%、17.73%、12.50%、21.89%、43.02%、48.37%。T<sub>2</sub>处理的薹菜全株鲜重、全株干重分别较T<sub>0</sub>处理显著降低14.80%、20.26% ( $P < 0.05$ ),但显著高于T<sub>1</sub>处理;叶面积较T<sub>0</sub>处理显著降低12.5% ( $P < 0.05$ ),较T<sub>1</sub>处理增加12.0%,差异不显著;株高、茎粗、叶片数均低于T<sub>0</sub>处理,但差异不显著。

对叶用莴苣而言,与P<sub>0</sub>处理相比,P<sub>1</sub>处理显著提高了莴苣茎粗、叶面积、全株鲜重、全株干重,增幅分别为6.53%、26.05%、25.53%、26.49%;株高、叶片数分别较P<sub>0</sub>处理增加9.15%、15.34%,差异不显著。P<sub>2</sub>处理株高、叶片数、叶面积、全株鲜重、全株干重均较P<sub>0</sub>处理增加,其中叶面积较对照P<sub>0</sub>处理显著提高8.26% ( $P < 0.05$ ),株

高、叶片数、茎粗、鲜重和干重与P<sub>0</sub>处理无显著差异;与P<sub>1</sub>处理相比,P<sub>2</sub>处理莴苣株高、叶片数、叶面积、全株鲜重、全株干重均降低,其中株高、叶片数无显著差异。这表明,暗期中断对薹菜和叶用莴苣生长的影响存在显著差异,对长日照的叶用莴苣表现为促进作用,对短日照的薹菜表现为抑制作用,且薹菜的抑制效应随中断次数增加而增强。

### 2.2 薹菜和叶用莴苣光合特性对暗期中断的响应

2.2.1 光合色素含量的响应 由表3可知,经暗期中断处理后,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>处理薹菜的叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量均显著低于T<sub>0</sub>处理,与T<sub>0</sub>处理相比,T<sub>1</sub>处理降幅分别为11.78%、14.90%、10.93%;T<sub>2</sub>处理降幅分别为12.67%、12.20%、8.79%,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>处理间差异不显著,表明暗期中断可降低薹菜叶片光合色素的积累,但中断次数对光合色素含量无显著影响。

与P<sub>0</sub>处理相比,P<sub>1</sub>处理显著提高了叶用莴苣的叶绿素a和类胡萝卜素含量,分别提高12.59%、24.07%;与P<sub>2</sub>处理相比,P<sub>1</sub>处理的叶绿素a和类胡萝卜素含量分别提高8.30%、11.67%;P<sub>0</sub>处理与P<sub>2</sub>处理间的各项光合色素含量差异均未达到显著水平。说明P<sub>1</sub>处理更有利于叶用莴苣光

表2 薹菜和叶用莴苣形态指标对暗期中断的响应

处理	株高 /cm	茎粗 /mm	叶片数 /片	叶面积 /(cm <sup>2</sup> /株)	全株鲜重 /g	全株干重 /g
T <sub>0</sub>	15.97±1.00 a	9.08±0.44 a	8.00±0.00 a	251.02±11.26 a	20.34±1.00 a	1.53±0.07 a
T <sub>1</sub>	11.87±0.25 b	7.47±0.42 b	7.00±0.00 b	196.07±10.02 b	11.59±1.04 c	0.79±0.07 c
T <sub>2</sub>	14.93±1.46 a	7.90±0.87 ab	7.33±0.58 ab	219.56± 8.65 b	17.33±0.25 b	1.22±0.01 b
P <sub>0</sub>	1.53±0.06 a	7.20±0.13 b	8.67±1.15 a	955.56±12.95 c	31.49±0.81 c	1.51±0.14 b
P <sub>1</sub>	1.67±0.06 a	7.67±0.24 a	10.00±1.00 a	1 204.52±20.37 a	39.53±0.94 a	1.91±0.03 a
P <sub>2</sub>	1.60±0.10 a	7.00±0.09 b	9.33±0.58 a	1 034.53±30.21 b	34.77±2.85 b	1.59±0.13 b

表3 薹菜和叶用莴苣光合色素对暗期中断的响应

处理	叶绿素 a /(mg/g FW)	叶绿素 b /(mg/g FW)	叶绿素 a+b /(mg/g FW)	叶绿素 a/b	类胡萝卜素 /(mg/g FW)
T <sub>0</sub>	2.037±0.029 a	0.631±0.010 a	2.668±0.039 a	3.226±0.016 b	0.421±0.010 a
T <sub>1</sub>	1.797±0.055 b	0.537±0.512 b	2.334±0.077 b	3.350±0.037 a	0.375±0.009 b
T <sub>2</sub>	1.779±0.032 b	0.554±0.017 b	2.374±0.055 b	3.283±0.044 ab	0.384±0.016 b
P <sub>0</sub>	0.278±0.015 b	0.099±0.008 a	0.377±0.016 b	2.815±0.283 a	0.054±0.006 b
P <sub>1</sub>	0.313±0.005 a	0.102±0.004 a	0.414±0.008 a	3.080±0.099 a	0.067±0.004 a
P <sub>2</sub>	0.289±0.007 b	0.092±0.002 a	0.381±0.009 b	3.131±0.016 a	0.060±0.001 b

合色素的合成与积累。

**2.2.2 光合气体交换参数的响应** 图1显示, 与 $T_0$ 处理相比,  $T_1$ 处理薺菜的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $Tr$ )分别显著下降了25.55%、20.89%、11.49% ( $P < 0.05$ ); 胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )显著增加了3.18% ( $P < 0.05$ )。  $T_2$ 处理 $C_i$ 、 $G_s$ 、 $Tr$ 均与 $T_0$ 处理差异不显著,  $P_n$ 较 $T_0$ 处理显著降低19.87% ( $P < 0.05$ );  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$ 较 $T_1$ 处理均增加, 其中 $G_s$ 、 $Tr$ 分别显著增加32.96%、23.12%,  $C_i$ 较 $T_1$ 处理显著降低3.48% ( $P < 0.05$ )。表明暗期中断可通过抑制气孔开放程度和蒸腾作用强度, 降低薺菜的光合碳同化能力。

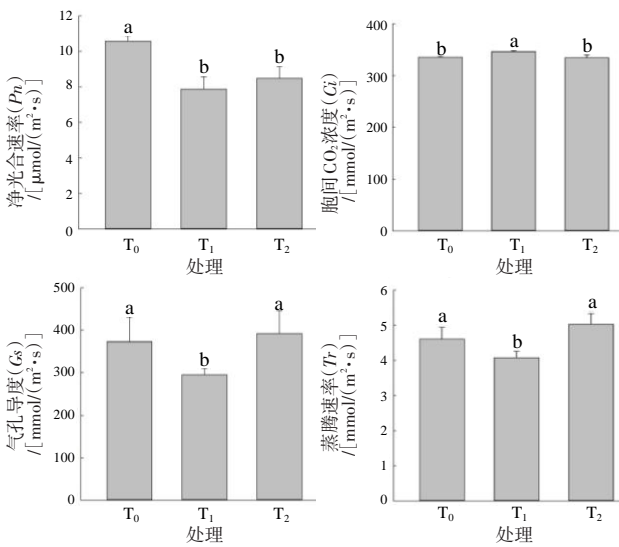


图1 薺菜光合气体交换参数对暗期中断的响应

由图2可知,  $P_1$ 、 $P_2$ 处理叶用莴苣 $P_n$ 均显著高于 $P_0$ 处理, 其中 $P_1$ 处理最高, 分别较 $P_0$ 、 $P_2$ 处理显著增加40.12%、12.22% ( $P < 0.05$ ); 在 $P_1$ 处理下,  $G_s$ 、 $Tr$ 也达到峰值, 分别为388.33、4.71  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 而 $C_i$ 则呈相反趋势,  $P_1$ 处理显著低于 $P_0$ 、 $P_2$ 处理 ( $P < 0.05$ ), 降幅分别为13.40%、

7.59%。这表明暗期中断可通过提高气孔导度和促进 $CO_2$ 吸收, 进而增强叶用莴苣的光合能力, 其中 $P_1$ 处理效果最优。

**2.2.3 叶绿素荧光参数的响应** 叶绿素荧光参数可直观反映植物光系统的光能吸收、转化与利用效率。由表4可知,  $T_1$ 、 $T_2$ 处理的薺菜最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、光适应下 $PSII$ 的最大量子产额( $F_v/F_m'$ )较 $T_0$ 处理显著降低, 且两处理间无显著差异。与 $T_0$ 处理相比,  $T_1$ 处理薺菜的实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、电子传递速率( $ETR$ )和光化学猝灭系数( $qP$ )分别显著降低14.29%、14.26%、15.39%; 非光化学猝灭系数( $NPQ$ )显著增加63.72%;  $T_2$ 处理 $qP$ 显著降低8.25%,  $NPQ$ 显著增加15.58%。这表明暗期中断会损伤薺菜的 $PSII$ 反应中心引发光化学转化效率和电子传递速率的降低以及光能的热耗散增加, 从而抑制光合作用的光反应过程。

$P_1$ 处理叶用莴苣 $\Phi_{PSII}$ 、 $ETR$ 、 $qP$ 分别较 $P_0$ 处

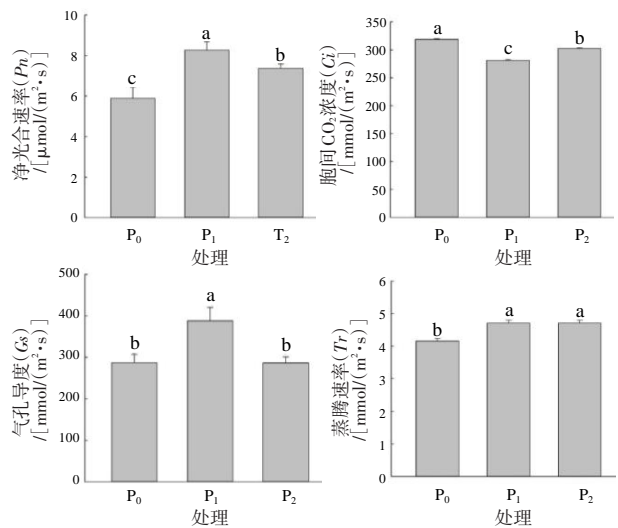


图2 叶用莴苣光合气体交换参数对暗期中断的响应

表4 薺菜和叶用莴苣叶绿素荧光参数对暗期中断的响应

处理	$F_v/F_m$	$F_v/F_m'$	$\Phi_{PSII}$	$qP$	$NPQ$	$ETR$
$T_0$	0.838±0.006 a	0.807±0.023 a	0.525±0.007 a	0.812±0.034 a	0.430±0.145 c	176.451± 2.407 a
$T_1$	0.824±0.004 b	0.742±0.024 b	0.450±0.025 b	0.687±0.049 c	0.704±0.107 a	151.288± 8.463 b
$T_2$	0.817±0.006 b	0.755±0.755 b	0.502±0.004 a	0.745±0.013 b	0.497±0.085 b	168.672± 1.416 a
$P_0$	0.818±0.007 b	0.753±0.026 a	0.630±0.034 b	0.837±0.065 b	0.474±0.056 a	211.605±11.548 b
$P_1$	0.836±0.003 a	0.747±0.022 a	0.799±0.005 a	0.906±0.017 a	0.369±0.015 b	268.365± 1.765 a
$P_2$	0.827±0.003 ab	0.765±0.043 a	0.655±0.024 b	0.878±0.055 ab	0.428±0.008 ab	220.040± 7.906 b

理显著增加 26.83%、26.82%、8.24%，NPQ 显著降低 22.15%；P<sub>2</sub> 处理与 P<sub>0</sub> 处理间差异未达显著水平。说明 P<sub>1</sub> 处理可增强叶用莴苣光能利用效率，减少光能的热耗散损失的同时提升电子传递效率，从而促进光反应过程的高效顺利进行。

2.3 薹菜和叶用莴苣氮代谢对暗期中断的响应

2.3.1 硝态氮含量与硝酸还原酶活性的响应 由图 3 可以看出，薹菜硝态氮含量、硝酸还原酶 (NR) 活性均以 T<sub>0</sub> 处理最高，但 3 个处理间差异均不显著，表明薹菜硝态氮积累及 NR 活性对暗期中断无显著响应。由图 4 可知，叶用莴苣的硝态氮含量、NR 活性均以 P<sub>1</sub> 处理最高，分别较 P<sub>0</sub> 处理显著提高了 31.50%、27.00% (P < 0.05)；而 P<sub>2</sub>、P<sub>0</sub> 处理间无显著差异，说明 P<sub>1</sub> 处理可显著促进叶用莴苣对硝态氮的吸收与还原转化这一氮代谢过程。

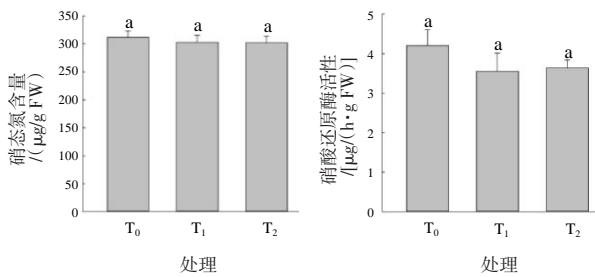


图 3 薹菜硝态氮含量及其还原酶活性对暗期中断的响应

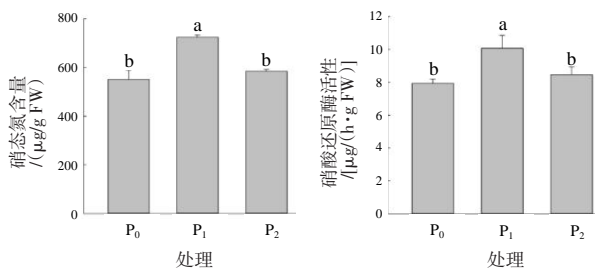


图 4 叶用莴苣硝态氮含量及其还原酶活性对暗期中断的响应

2.3.2 铵态氮含量与铵同化相关酶活性的响应 由图 5 可知，T<sub>1</sub> 处理的薹菜铵态氮含量、谷氨酰胺合成酶 (GS)、谷氨酸脱氢酶 (GDH) 活性均显著低于 T<sub>0</sub> 处理，降幅分别为 46.94%、18.57%、54.25%；各处理谷氨酸合成酶 (GOGAT) 活性无显著差异。表明暗期中断显著抑制了薹菜的铵态氮同化代谢过程，进而影响氮素的有效利用。由图 6 可知，叶用莴苣 P<sub>1</sub> 处理的铵态氮含量、GS、GOGAT、GDH 活性均显著高于 P<sub>0</sub> 处理，增幅分别达到了 59.10%、44.44%、39.07%、111.10%；而 P<sub>2</sub> 处理

铵态氮含量和 GS 活性显著高于 P<sub>0</sub> 处理，增幅分别达到了 31.82%、18.89%。说明暗期中断可通过提高铵同化相关酶活性，提高叶用莴苣的氮代谢效率，为其生长发育和品质形成提供基础保障。

2.4 薹菜和叶用莴苣品质对暗期中断的响应

由表 5 可知，T<sub>1</sub> 处理的薹菜可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸、维生素 C 含量均显著低于 T<sub>0</sub> 处理，降幅分别为 30.44%、5.16%、50.56%、18.17%；T<sub>2</sub> 处理的可溶性糖、游离氨基酸含量显著低于 T<sub>0</sub> 处理，降幅分别为 16.66%、42.22%，但可溶性蛋白、维生素 C 含量与 T<sub>0</sub> 处理无显著差异。表明暗期中断会抑制薹菜营养物质的积累，降低其食用品质，且中断次数越多，抑制效果越明显。

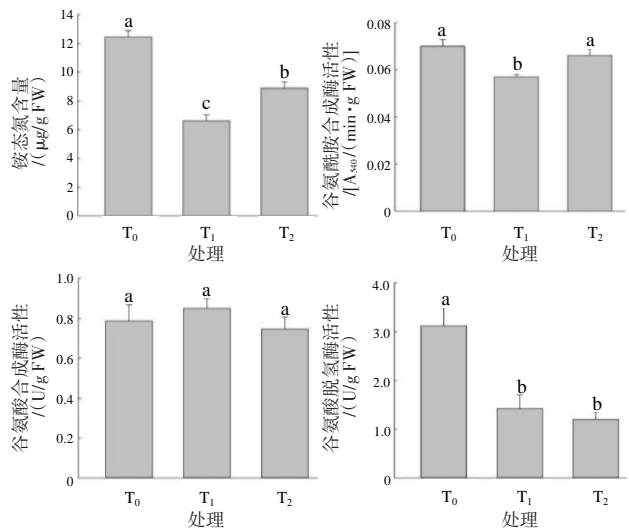


图 5 薹菜铵态氮含量及铵同化相关酶对暗期中断的响应

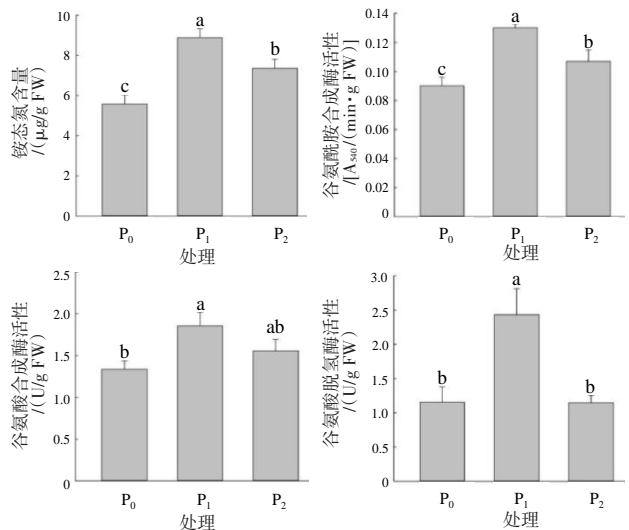


图 6 叶用莴苣铵态氮含量及铵同化相关酶对暗期中断的响应

表5 蕹菜和叶用莴苣品质对暗期中断的响应

处理	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	游离氨基酸含量	维生素C含量
T <sub>0</sub>	11.697±0.671 a	6.797±0.080 a	0.180±0.041 a	2.262±0.039 a
T <sub>1</sub>	8.137±0.390 c	6.446±0.083 b	0.089±0.008 b	1.851±0.075 b
T <sub>2</sub>	9.748±1.200 b	6.623±0.128 ab	0.104±0.008 b	2.269±0.008 a
P <sub>0</sub>	10.463±0.733 b	3.323±0.157 b	0.069±0.005 b	2.161±0.004 b
P <sub>1</sub>	17.205±1.339 a	3.775±0.185 a	0.104±0.019 a	2.309±0.004 a
P <sub>2</sub>	12.290±0.432 b	3.609±0.109 ab	0.073±0.006 b	2.177±0.016 b

P<sub>1</sub>处理的叶用莴苣可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸、维生素C含量均显著高于P<sub>0</sub>处理,增幅分别达64.44%、13.60%、50.72%、6.85%; P<sub>2</sub>处理较P<sub>0</sub>处理各指标均增加,未达显著差异。说明暗期中断可显著提升叶用莴苣的营养品质,其中以P<sub>1</sub>处理效果最佳。

### 3 讨论与结论

光周期作为重要的环境调控因子,对植物生长发育具有显著影响。将番茄和红辣椒在相同光照强度下的光周期从12 h/d延长至20 h/d,可显著提升其株高、茎粗、叶片数、叶面积及叶面积指数<sup>[19]</sup>;光周期缩短可逐渐降低西葫芦幼苗的株高、茎粗、叶面积及干鲜重<sup>[20-21]</sup>;黄瓜在24 h光周期处理下其株高、茎粗、叶面积显著高于14 h和9 h光周期处理<sup>[22]</sup>。暗期中断本质上属于暗期增加光照时间,可间接延长植物生长的有效光周期。本研究夜间每1 h中断5 min的处理显著提高了长日照植物叶用莴苣的茎粗、叶片数和叶面积,与陈丽丽等<sup>[23]</sup>关于暗期中断促进菜心生长的研究结果一致,说明长日照植物对暗期中断具有正向响应特性。与叶用莴苣相反,暗期中断对短日照植物蕹菜而言显著抑制了生长,株高和干鲜重均降低,这可能是由于光敏色素光受体的调控作用:暗期作物体内光敏色素会从活性状态的Pfr构型逐渐转化为非活性状态的Pr构型,相反暗期中断可促使光敏色素快速从Pr构型逆转为活性状态Pfr构型,从而引起对短日照植物的茎伸长生长产生抑制效应<sup>[24]</sup>。

光合特性是反映植物生长发育状况的核心生理指标。李孟洋等<sup>[25]</sup>对茅苍术研究发现,叶片净光合速率(*P<sub>n</sub>*)和气孔导度(*G<sub>s</sub>*)随着光周期缩短而下降,胞间CO<sub>2</sub>浓度(*C<sub>i</sub>*)则升高;李冬梅<sup>[26]</sup>对桃树的研究发现短光周期诱导会降低叶片的叶片

净光合速率(*P<sub>n</sub>*)和气孔导度(*G<sub>s</sub>*)而提高胞间CO<sub>2</sub>浓度(*C<sub>i</sub>*)。刘杰等<sup>[27]</sup>在水培生菜上的研究结果表明延长光周期可提高的叶绿素含量以及光合参数*P<sub>n</sub>*和*G<sub>s</sub>*。植物的光合作用时长随光周期延长增加,进而提升光合积累。本研究发现夜间每1 h暗期中断5 min的处理提高了叶用莴苣的叶绿素含量、*P<sub>n</sub>*和*G<sub>s</sub>*,光合能力也增强,因而促进了生物量积累,地上部和地下部干重显著增加。但短日照植物蕹菜而言,对暗期中断的响应与叶用莴苣不同,暗期中断导致其*P<sub>n</sub>*显著下降。分析原因一方面由于暗期中断降低了气孔导度,增加了气孔阻力,同时对Rubisco酶活性也产生抑制效果,从而CO<sub>2</sub>利用效率降低,最终净光合速率下降;另一方面可能是由于蒸腾速率降低导致叶温升高,亚适宜高温会减少叶绿体基粒数量甚至破坏基粒片层结构完整性,从而抑制光合作用。此外,作为短日照植物的蕹菜对光信号响应更为敏感,暗期中断可能会引发光保护或发生光抑制,加速叶绿素降解,使光合色素含量降低,最终导致光合性能下降。

硝态氮和铵态氮经植物根系从土壤中吸收后,发生一系列酶促反应合成氨基酸,最终给植物生长发育提供蛋白质。本试验结果显示,暗期中断显著提高了叶用莴苣的硝态氮含量,这与吴雪霞等<sup>[28]</sup>研究结果一致。暗期中断处理导致蕹菜硝态氮含量下降,可能是由于暗期中断抑制了蕹菜根系的生长发育,导致根系从环境中吸收氮素的能力减弱。硝酸还原酶是光诱导酶和氮代谢过程中的关键调节酶及限速酶<sup>[29]</sup>,可催化硝态氮还原为亚硝态氮,其活性的升高可能是由于硝态氮含量增加所激活。暗期中断处理降低蕹菜叶绿素含量、提高叶用莴苣叶绿素含量的结果与Ma等<sup>[30]</sup>在叶片氮素水平直接影响叶绿素的合成结果相一致。

植物体内亚硝酸还原酶则催化亚硝酸盐转化

为铵态氮，硝态氮含量和硝酸还原酶活性的升高最终会导致铵态氮含量增加，但铵态氮的过量会对植物造成毒害作用，须通过同化作用迅速将其转化为无毒的有机态氮。谷氨酰胺合成酶是氮代谢“GS-GOGAT循环”的核心调控酶<sup>[31]</sup>，主要催化谷氨酰胺的合成。谷氨酸合酶是氨同化途径中的关键酶，催化谷氨酰胺生成谷氨酸，与GS协同作用共同完成氨同化过程<sup>[32]</sup>，而谷氨酸脱氢酶参与谷氨酸的合成与分解代谢<sup>[33]</sup>。本试验结果显示暗期中断提高了叶用莴苣GS、GOGAT、GDH活性，却降低了莴苣GS和GDH活性，说明暗期中断对叶用莴苣的氮代谢起促进作用，对莴苣的氮代谢则起抑制作用，从而影响各自不同的氨基酸和蛋白质的合成与分解代谢。

关于品质形成，暗期中断处理能够提高叶用莴苣的可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸和维生素C含量，刘磊等<sup>[34]</sup>在洋葱上的研究也得到类似结果。本试验结果也表明暗期中断提高了叶用莴苣可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸含量，说明暗期中断有利于提升长日照植物的营养品质。对于短日照植物莴苣而言，暗期中断处理则抑制了可溶性糖、可溶性蛋白和维生素C的积累，这可能是由于暗期中断抑制了短日照植物莴苣的氮代谢过程，导致氨基酸、可溶性蛋白和游离氨基酸含量下降进而影响品质形成，这与王雷山等<sup>[35]</sup>在棉花上的研究结果类似。

综合分析表明，暗期中断处理能够有效提高长日照作物叶用莴苣的净光合速率和电子传递速率，促进植株生长发育，增加可溶性蛋白、游离氨基酸等含氮化合物的含量，从而提升其营养品质；短日照作物莴苣在暗期中断处理下表现出抑制效应，不利于品质的形成和提升。本研究结果可为不同日长类型蔬菜作物的光环境精准调控策略提供理论依据和技术参考。

#### 参考文献:

- [1] 李洁, 高静, 胡阳, 等. 光强处理对不同生长阶段草莓叶片光合的影响[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2012, 45(1): 69-76.
- [2] 张毅华, 张晓燕, 崔瑾. 光强对黑豆芽苗菜生长和营养品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2013(16): 49-54.
- [3] BLANCHARD M G, RUNKLE E S. Intermittent light from a rotating high-pressure sodium lamp promotes flowering of long-day plants[J]. Hortscience, 2010, 45(2): 236-241.
- [4] 尹燕, 杨道兰, 梁玉文, 等. 光暗条件下蔗糖和大量元素对兰州百合鳞茎生长的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(3): 254-259.
- [5] PARK Y G, JEONG B R. Both the quality and positioning of the night interruption light are important for flowering and plant extension growth[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020, 39: 583-593.
- [6] 冯丽, 张莉, 胡志峰. 光调控技术对番茄果实品质改善的研究进展[J]. 寒旱农业科学, 2025, 4(5): 393-400.
- [7] 汤雄, 王鹏, 吕玲玲. LED植物照明灯具技术发展及应用现状[J]. 应用技术学报, 2023, 23(2): 120-124.
- [8] 王佳淇, 韦晓桐, 何莹钰, 等. LED补光系统对设施园艺作物的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(5): 950-954.
- [9] ISHIKAWA R, TAMAKI S, YOKOI S, et al. Suppression of the floral activator Hd3a is the principal cause of the night break effect in rice[J]. Plant Cell, 2005, 17(12): 3326-3336.
- [10] 娄平, 汪隆植. 暗期中断对萝卜开花的影响[J]. 2000, 28(2): 231-232.
- [11] CAO K, CUI L R, YE L, et al. Effects of red light night break treatment on growth and flowering of tomato plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 527.
- [12] 刘学群, 杜爱玲, 王春台, 等. 暗期红光、远红光间断处理对小麦叶片细胞壁成分的影响[J]. 华中农业大学学报, 1996, 15(3): 221-224.
- [13] FALLAH S, ALINIAEIFARD S, MEHRJERDI M Z, et al. Night interruption with red and far-red light optimizes the phytochemical composition, enhances photosynthetic efficiency, and increases biomass partitioning in Italian Basil[J]. Plants, 2024, 13(22): 3145.
- [14] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [16] 孔静雯. 暗期中断对莴苣和叶用莴苣生长及生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [17] IRIGOYEN J J, EINERICH D W, SÁNCHEZ-DÍAZ M. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants[J]. Physiologia Plantarum, 2010, 84(1): 55-60.
- [18] AURISANO N, BERTANI A, REGGIANI R. Involvement of calcium and calmodulin in protein and amino acid metabolism in rice roots under anoxia[J]. Giornale

- Botanico Italiano, 1995, 129(4): 1087–1088.
- [19] HWANG H, AN S, PHAM M D, et al. The combined conditions of photoperiod, light intensity, and air temperature control the growth and development of tomato and red pepper seedlings in a closed transplant production system [J]. *Sustainability*, 2020, 12(23): 9939.
- [20] 康恩祥, 陈年来, 谭雪莲. 低温弱光逆境对西葫芦幼苗生理指标的影响研究[J]. *甘肃农业科技*, 2006(6): 14–17.
- [21] 李海云, 李长新, 张复君, 等. 不同光周期对西葫芦幼苗生长的影响[J]. *北方园艺*, 2009(5): 17–19.
- [22] 李海云, 韩国徽, 任秋萍, 等. 不同光周期对黄瓜幼苗生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2009(3): 201–203.
- [23] 陈丽丽, 宁哲, 戴晓萍, 等. 暗期间断对菜心生长和品质的影响[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(7): 22–25.
- [24] 姜敏, 李魏, 董铮, 等. 光敏色素对植物抗逆反应的调控研究进展[J]. *生物技术通报*, 2017, 33(7): 15–21.
- [25] 李孟洋, 韩怡, 王玉卓. 缩短光周期对茅苍术生理生化指标的影响[J]. *北方园艺*, 2021(14): 122–127.
- [26] 李冬梅. 光周期诱导设施桃树休眠的生理生化变化及蛋白质组学初探[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [27] 刘杰, 胡笑涛, 王文娥, 等. 光强和光周期对水培生菜光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(8): 1784–1790.
- [28] 吴雪霞, 尚静, 张圣美, 等. 苗期不同光周期处理对西葫芦幼苗生长、碳氮代谢关键酶活性和激素含量的影响[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(9): 36–39.
- [29] 张华珍, 徐恒玉. 植物氮素同化过程中相关酶的研究进展[J]. *北方园艺*, 2011(20): 180–183.
- [30] MA B L, MORRISON M J, DWYER L M. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize[J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88(6): 915–920.
- [31] FORDE B G, LEA P J. Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signalling[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2339–2358.
- [32] 徐洪超, 靖商, 刘铭荟, 等. 氮代谢相关酶的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(4): 17–20.
- [33] 汪建飞, 董彩霞, 沈其荣. 氮素不同形态配比对菠菜体内游离氨基酸含量和相关酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 664–670.
- [34] 刘磊, 刘世琦, 许莉, 等. 光周期及春化处理对洋葱蛋白质合成代谢与POD活性的影响[J]. *西北农业学报*, 2005, 14(6): 90–95.
- [35] 王雷山, 宋兴虎, 黄颖, 等. 棉花主茎叶与根系硝酸还原酶活性分布对播期和密度的响应[J]. *棉花学报*, 2017, 29(1): 88–98.

## Effects of Night-break Treatment on Photosynthetic Characteristics and Quality of Water Spinach and Leaf Lettuce

LIU Binbin<sup>1</sup>, KONG Jingwen<sup>2</sup>, LI Zhengyuan<sup>1</sup>, LI Qingming<sup>3,4</sup>

(1. College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu Sichuan 610106, China; 2. College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an Shandong 271018, China; 3. Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chengdu Sichuan 610213, China; 4. The Plant Factory Generation Breeding Laboratory, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu Sichuan 610213, China)

**Abstract:** To explore the effects of dark period interruption on photosynthetic characteristics and quality regulation in vegetable crops with different photoperiodic responses, this study aimed to clarify the regulatory mechanism of night-break on growth, development, and quality formation of photoperiod-responsive vegetables, thereby providing a basis for the precise regulation of light environments in protected vegetable production. We selected water spinach (Taiwanese Bamboo Leaf Water Spinach) and leaf lettuce (Zimeng Lettuce) as research materials, respectively representing short-day crop and long-day crop. During the diurnal period, the plants were irradiated with LED Red-blue light (R:B=4:1) with intensity of 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  for 12 hours. 3 night-break treatments were set during night period: no light interruption (CK), 5 minutes of light interruption every 1 hour (11 times per night), and 5 minutes of light interruption every 2 hours (5 times per night). The effects of night-break on growth morphology, photosynthetic characteristics, nitrogen metabolism process and quality indexes were investigated with those two vegetables. Results showed that night interruption significantly promoted the growth process and improved the quality of long-day crop lettuce, whereas night interruption treatment significantly inhibited the growth and reduced the quality of short-day crop water spinach, with the inhibitory effect showing an increasing trend as the number of interruptions increased. Night interruption treatment effectively enhanced the net photosynthetic rate and electron transport rate of long-day crop lettuce, promoted plant growth and development, and increased the contents of nitrogen-containing compounds such as soluble protein and free amino acids, thereby improving its nutritional quality, with the treatment of 5 min interruption per hour showing the optimal effect. Short-day crop water spinach exhibited growth inhibition under night interruption treatment, which was unfavorable for quality formation and improvement. These findings provide theoretical basis and technical support for precise regulation of light environment in high-yield and high-quality cultivation of water spinach and lettuce under protected cultivation conditions.

**Key words:** Water spinach; Leaf lettuce; Night-break; Growth and development; Photosynthetic characteristic; Nitrogen metabolism; Quality regulation