

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.06.004

钟旭珍, 王媛, 王金亮, 等. 不同施肥条件下瓢菜和黄白菜的光合及光谱特性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(6): 42-55.

不同施肥条件下瓢菜和 黄白菜的光合及光谱特性研究

钟旭珍^{1,2,3,4,5}, 王媛¹, 王金亮^{1,3,4,5},
马军¹, 张建鹏^{1,4,5}, 张微雨^{1,4,5}

1. 云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500; 2. 内江师范学院 地理与测绘科学学院, 四川 内江 641100;
3. 云南师范大学 西南联合研究生院, 云南 昆明 650500; 4. 云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 云南 昆明 650500;
5. 云南省地理空间信息工程技术研究中心, 云南 昆明 650500

摘要: 为探究不同施肥模式对蔬菜生长生理特性的影响, 以瓢菜(*Brassica chinensis* L.) 和黄白菜(*Brassica rapa* var. *glabra* Regel) 为试验材料, 设置有机肥和复合肥 7 种不同配比组合, 测定幼苗期、生长期和成熟期 3 个生育期的光合参数及反射光谱参数, 分析不同施肥处理下蔬菜的光合特性、光合-光响应及光谱特征。结果表明: ① 不同施肥处理条件下不同生育期瓢菜和黄白菜光谱反射率具有差异。两种蔬菜的光谱反射率在成熟期均高于幼苗期和生长期, 其中瓢菜反射率以 C3 和 C7 处理较低、C5 处理较高, 黄白菜反射率以 C7 处理较低、C3 处理较高。② 不同施肥模式下, 瓢菜和黄白菜的光合性能差异明显。随着生育期的发展, 瓢菜净光合速率(P_n) 逐渐升高, 黄白菜 P_n 则呈现先升后降的趋势; 蒸腾速率(Tr) 峰值分别出现在瓢菜生长期 C5 处理与黄白菜生长期 C4 处理; 光合-光响应曲线表明, 有效光合辐射低于 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 两种蔬菜 P_n 增长较快。③ 光谱特征参数与光合性能的相关性因处理而异, 瓢菜 C7 处理的氮素反射率指数(NRI) 与胞间 CO_2 浓度(C_i) 呈显著正相关, 黄白菜 C3 处理的 NRI 与 C_i 呈显著正相关, C5 处理的归一化植被指数($NDVI$) 与气孔导度(G_s) 呈显著负相关。

关键词: 瓢菜; 黄白菜; 不同施肥处理; 光合特性; 光谱特性;

相关性分析

中图分类号: S634; O433.4

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2026)06-0042-14

Study on Photosynthetic and Spectral Characteristics of *Brassica chinensis* L. and *Brassica rapa* var. *glabra* Regel under Different Fertilization Conditions

收稿日期: 2025-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961060); 云南省重大科技专项计划项目(202302AO370003); 云南省高校创新团队项目(IRT-STYN); 四川省科技计划资助项目(2023NSFSC0754); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目(2022-30); 沱江流域高质量发展研究中心项目(TJGZL2025-05)。

作者简介: 钟旭珍, 博士研究生, 讲师, 主要从事 GIS 与环境遥感研究。

通信作者: 王金亮, 博士, 教授。

ZHONG Xuzhen^{1,2,3,4,5}, WANG Yuan¹, WANG Jinliang^{1,3,4,5},
MA Jun¹, ZHANG Jianpeng^{1,4,5}, ZHANG Weiyu^{1,4,5}

1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan 650500, China;

2. School of Geographic and Geomatics Sciences, Neijiang Normal University, Neijiang Sichuan 641100, China;

3. Southwest United Graduate School, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan 650500, China;

4. Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming Yunnan 650500, China;

5. Yunnan Provincial Engineering and Technology Research Center for Geospatial Information, Kunming Yunnan 650500, China

Abstract: To investigate the effects of different fertilization modes on the growth and physiological characteristics of vegetables, seven different combinations of organic and compound fertilizers were applied to *Brassica chinensis* L. and *Brassica rapa* var. *glabra* Regel as experimental materials. Photosynthetic parameters and reflectance spectrum data were measured at the seedling, growth, and maturity stages. Subsequently, the photosynthetic characteristics, photosynthetic-light response, and spectral properties of the vegetables under different fertilization treatments were analyzed. The results indicated that: ① Different fertilization treatments produced varying spectral reflectance at different growth stages. The spectral reflectance of both vegetables was higher at maturity than at the seedling and growth stages. For *Brassica chinensis* L., reflectance was lower at treatments C3 and C7 and higher at C5, whereas for *Brassica rapa* var. *glabra* Regel, reflectance was lower at C7 and higher at C3. ② Under different fertilization regimes, the photosynthetic performance of *Brassica chinensis* L. and *Brassica rapa* var. *glabra* Regel differed significantly. As the growth period progressed, the net photosynthetic rate (P_n) of *Brassica chinensis* L. increased gradually, while that of *Brassica rapa* var. *glabra* Regel initially increased and then decreased. The peak transpiration rate (T_r) occurred at the C5 treatment for *Brassica chinensis* L. and at the C4 treatment for *Brassica rapa* var. *glabra* Regel. The photosynthesis-light response curve indicated that P_n increased more rapidly at lower levels of effective photosynthetically active radiation, $PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. ③ The correlation between spectral characteristic parameters and photosynthetic performance varied depending on the treatments. The nitrogen reflectance index (NRI) of the C7 treatment in *Brassica chinensis* L. was significantly positively correlated with intercellular CO_2 concentration (C_i). Additionally, a significant positive correlation between NRI and C_i was observed in the C3 treatment of *Brassica rapa* var. *glabra* Regel, while a significant negative correlation was found between the normalized difference vegetation index ($NDVI$) and stomatal conductance (G_s) in the C5 treatment.

Key words: *Brassica chinensis* L.; *Brassica rapa* var. *glabra* Regel; different fertilization treatments; photosynthetic characteristics; spectral characteristics; correlation analysis

可持续农业发展及化肥的减量增效管理是备受关注的全球性议题,与此相应,“菜篮子”工程作为保障居民食物供给、提升膳食质量的重要民生工程,在我国农业转型中具有关键意义。蔬菜含有多种营养物质,是人们维持生命和健康的必需消费品,其品质和产量对我们日常生活非常重要。云南气候独特,区位优势明显,蔬菜以绿色、生态、反季节冬早蔬菜为特点。瓢菜和黄白菜作为昆明市主要栽培的蔬菜,是中国消费者普遍食用和流行的蔬菜^[1-2],其生长周期较短,利于进行盆栽试验。研究其不同施肥条件下的光合及光谱作用,对于了解其生长生产特性、实现绿色生产具有重要意义。

光合作用是植物在光照条件下将无机物合成为有机物并且贮存能量的过程,是自然界中最大的碳吸收

通量, 在减缓气候变化方面发挥着重要作用^[3], 其强弱对于植物生长及其抗逆性都具有十分重要的影响^[4]。作物产量的形成主要取决于光合系统的规模和效率, 即光合性能, 因此光合作用也是预测产量和品质的重要指标。大量研究表明蔬菜产量形成与其叶片光合性能、光抑制特性及抗衰老特性等关系密切。作物的生长发育受到土壤养分含量和光合特性的影响, 任何一种必需养分的缺乏都会降低产量, 而土壤养分含量和光合特性又受到施肥方式的调控^[5-6]。因此, 合理的施肥量及配置比例成为改善作物光合性能, 提高光合速率, 进而提高产量的有效措施^[7-8]。

由于光合作用对环境因子的响应高度敏感^[9], 不同生理因素、环境条件导致植物光合特性存在差异^[10], 而借助反射光谱信息可以及时地监测这种生理生化特性的变化^[11]。研究表明: 植物光谱特征与植物光合和生理有着密切的关系, 植物光谱反射信息可以反映出植物的营养状况和植物所处环境的变化^[12-13], 可用于估测植物理化参数含量, 推断植物光合能力, 监测植物生长状况等^[14-15]。因此, 作物光合光谱特性的研究也成为了作物生理生态领域研究的热点。

关于光合特性的研究, 不同学者从不同角度取得了丰硕的成果, 如不同施肥模式^[16-17]、不同种植模式^[18]、不同温度措施^[19]、不同灌溉模式^[20]、不同胁迫^[21]以及不同环境条件下作物的光合特性等诸多研究^[3, 22]。然而, 从前人的研究中关注瓢菜和黄白菜的研究相对较少, 且同时关注其光合和光谱特征及相关性的研究更少。因此, 本研究以云南省昆明市主要栽培的瓢菜和黄白菜为试验材料, 通过设置不同梯度施肥量进行试验处理, 测定对应蔬菜的光合性能和反射光谱信息, 深入探讨不同施肥条件下蔬菜生长生理、光合特性、光谱特性的机理, 旨在为蔬菜生产节约生产成本, 促进农业产业可持续发展, 同时, 也为大面积监测蔬菜的生长信息和预测产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验区位于云南师范大学, 地处昆明市呈贡区, 滇池东岸, 这里属于亚热带季风气候, 干湿季分明, 气候温暖, 四季如春, 昼夜温差较大, 一年四季都可以看到不同的蔬菜种植。研究选取云南省昆明市主要栽培的蔬菜(瓢菜和黄白菜)为试验材料。瓢菜品种为“金品绿霸青梗菜”, 黄白菜为“申荣火箭”一代杂交(F_1)品种。选取形态完整、大小一致的种子播种, 苗期充分灌溉, 植株长至 4~6 片真叶展开、高度为 6~8 cm 时, 选取其中生长性状一致的幼苗移栽至直径 20 cm、高 15 cm 的塑料圆盆中, 每盆 3 株。定植后施用肥料增加土壤养分, 确保施肥水平和时间一致。在 1~2 周的缓苗期后, 确保植株正常生长, 开始控制施肥量。根据昆明市菜农日常施肥量, 试验设计 7 种施肥模式: C1(对照处理, 不施肥)、C2 处理(有机肥 0 g/m^2 , 复合肥 40 g/m^2)、C3 处理(有机肥 0 g/m^2 , 复合肥 50 g/m^2)、C4 处理(有机肥 0 g/m^2 , 复合肥 60 g/m^2)、C5 处理(有机肥 22 g/m^2 , 复合肥 40 g/m^2)、C6 处理(有机肥 22 g/m^2 , 复合肥 50 g/m^2)、C7 处理(有机肥 22 g/m^2 , 复合肥 60 g/m^2), 每种模式设置 3 组重复。分别在蔬菜幼苗期(冬季 1 月 12 日)、生长期(冬季 1 月 25 日)、成熟期(冬季 2 月 11 日)共进行 3 次数据测量。

1.2 蔬菜光合参数测定

在晴朗少云、平静无风的天气条件下, 于每日 09:00—12:00 期间进行测定。为尽量减小天气、光照和测定时间差异对光合作用的影响, 所有测定均选择在气象条件基本一致的情况下进行。仪器采用 GFS-3000 高级光合作用-荧光测量系统(德国 WALZ 公司生产), 测定前调试并对设备进行充分预热, 通过设备控制测定条件, 设定测前温度为(26 ± 1) $^{\circ}C$, CO_2 摩尔分数为 400 ppm, 空气流速为 750 $\mu mol/s$, 光强为 1 000 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$, 测定时, 等待各个数据稳定后保存数据。为了使不同时期测定结果具有

可比性, 研究控制测定条件和参数尽量一致, 测定两种蔬菜幼苗期、生长期和成熟期的叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)等参数。不同施肥梯度中, 选择不同种类、不同时期且具有代表性的健康成长的植株 5 株, 分别从每株选取 3 个叶片(保证选择叶位朝向均一致, 叶片完全展开、健康、受光一致), 每片叶片测定 3 组数据。处理数据并分析不同施肥条件对蔬菜光合性能参数的影响。

1.3 蔬菜反射光谱信息测定

与光合参数测定同期进行, 利用美国 SVC 地物光谱仪(HR-1024i), 测定蔬菜反射光谱信息。测定均在晴朗少云天气进行, 时间为 11:00—15:00, 同样选择每株蔬菜 3 个叶片, 每片记录 10 次数据。统计分析不同施肥处理下蔬菜光谱特征变化。

1.4 蔬菜光合-光响应曲线测定

用 LED 红蓝光源设定在梯度光照强度下, 测定蔬菜净光合作用速率, 拟合光合-光响应曲线。同样设定测前温度为 $(26 \pm 1)^\circ C$, CO_2 摩尔分数为 400 ppm, 空气流速为 $750 \mu mol/s$, 叶室中光强由弱到强依次设置为 0、30、50、100、200、300、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800 和 $2 000 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。在测定时, 使蔬菜适应每一梯度光强 3~5 min。测定计算所得参数包括: 暗呼吸速率(R_{day})、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、最大净光合速率(A_{max})及表观量子效率(AQE)等。

1.5 数据处理

应用 Excel 2013、Origin 2022、SPSS 22、和 SVC HR-1024i 配套软件, 计算试验数据并作图, 计算归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[23], 氮素反射率指数(Nitrogen Reflectance index, NRI)^[24], 比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)^[25], 差值植被指数(Difference Vegetation Index, DVI)^[26]等相关光谱特征参数(表 1), 以深入探讨不同施肥条件下蔬菜叶绿素光合、光谱特性与施肥条件的相关性。

表 1 光谱植被指数

光谱植被指数	计算公式	光谱植被指数	计算公式
归一化植被指数	$NDVI = (R_{750} - R_{680}) / (R_{750} + R_{680})$	比值植被指数	$RVI = R_{NIR} / R_R$
氮素反射率指数	$NRI = (R_{670} - R_{570}) / (R_{670} + R_{570})$	差值植被指数	$DVI = R_{NIR} - R_R$

2 结果与分析

2.1 蔬菜光谱反射率强度变化

由于蔬菜在不同生长时期的生长量和生长发育速度不同, 对营养条件的要求也不同, 因此不同生育期不同施肥条件下蔬菜光谱反射率具有一定差异, 但总体上瓢菜和黄白菜均与绿色植物叶片光谱特征相似。在可见光区域(350~700 nm)形成两个叶绿素吸收谷和绿色反射峰; 在近红外区域(800~1 300 nm)形成高反射率红肩; 在红光波段与近红外区域之间(700~800 nm)形成“红边”; 在短波红外区域(1 300~2 500 nm), 主要为受水分控制形成的吸收谷和反射峰。

具体来看, 根据各时期的平均反射率可知, 不同施肥处理下瓢菜光谱反射率差异主要体现在反射率较强的绿峰和近红外区域的反射率红肩, 以及短波红外区域的水分反射峰处。在绿峰区域 C7 处理的反射率最高, 在近红外区域(800~1 300 nm)反射率较低的主要为 C3 处理和 C7 处理, 而反射率较高的主要为 C5 和 C6 处理, 在短波红外区域(1 300~2 500 nm)C3 处理的反射率依然较低, C5 处理的反射率较高。从不同生育期来看, 其差异主要体现在 800~1 300 nm 的近红外区域, 除 C3 处理, 7 种不同处理模式下成熟期的

反射率均较幼苗期和生长期高。其中 C1 未施肥对照处理模式下幼苗期和生长期反射率相差不大, 随着施肥量的增加, 幼苗期反射率变化不大, C6 处理和 C7 处理的反射率有所提高; 而生长期从 C2 处理开始反射率明显提高, 从 40% 左右提高到 60% 左右; 成熟期的反射率反而随着施肥量的增加有所降低, C7 处理模式下不同生育期的光谱反射率相差较小(图 1)。

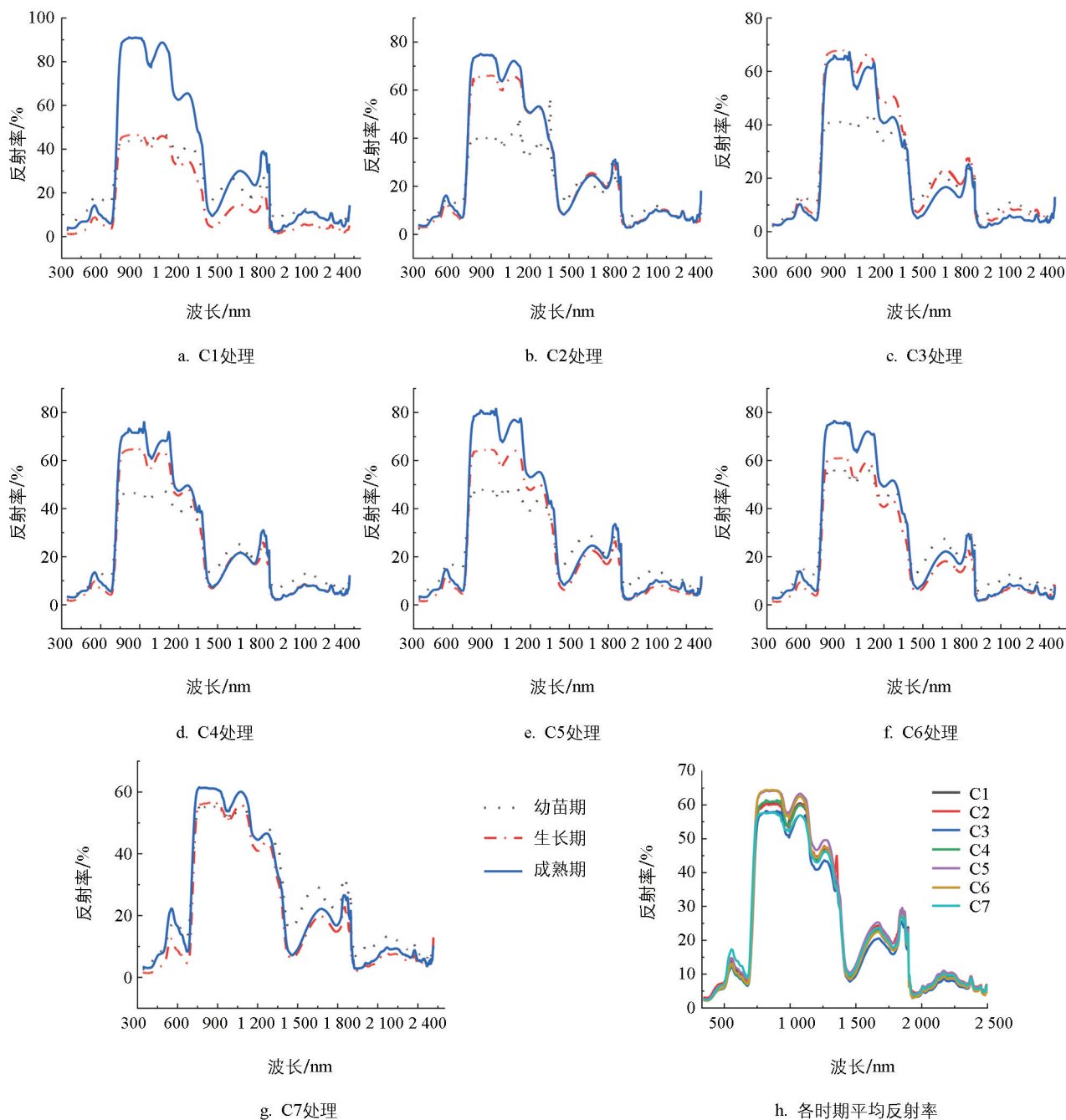


图 1 不同施肥水平下瓢菜的光谱反射率

黄白菜在不同施肥处理不同生育期光谱特征与瓢菜具有相似性又有差异性, 其中 C1 未施肥处理下两种蔬菜光谱反射率差异不大。由图 2 可知, 在不同施肥处理下黄白菜光谱反射率差异主要体现在 800~1 300 nm 的近红外区域和 1 550~1 890 nm 的短波红外区域, 主要表现为 C3 处理反射率较高, C7 处理反射率较低。不同施肥处理各生育期反射率均存在差异, C1 到 C6 处理下反射率以成熟期较高, 而 C7 处理变为生长期反射率较高, C4 处理下生长期和成熟期光谱反射率较为接近。

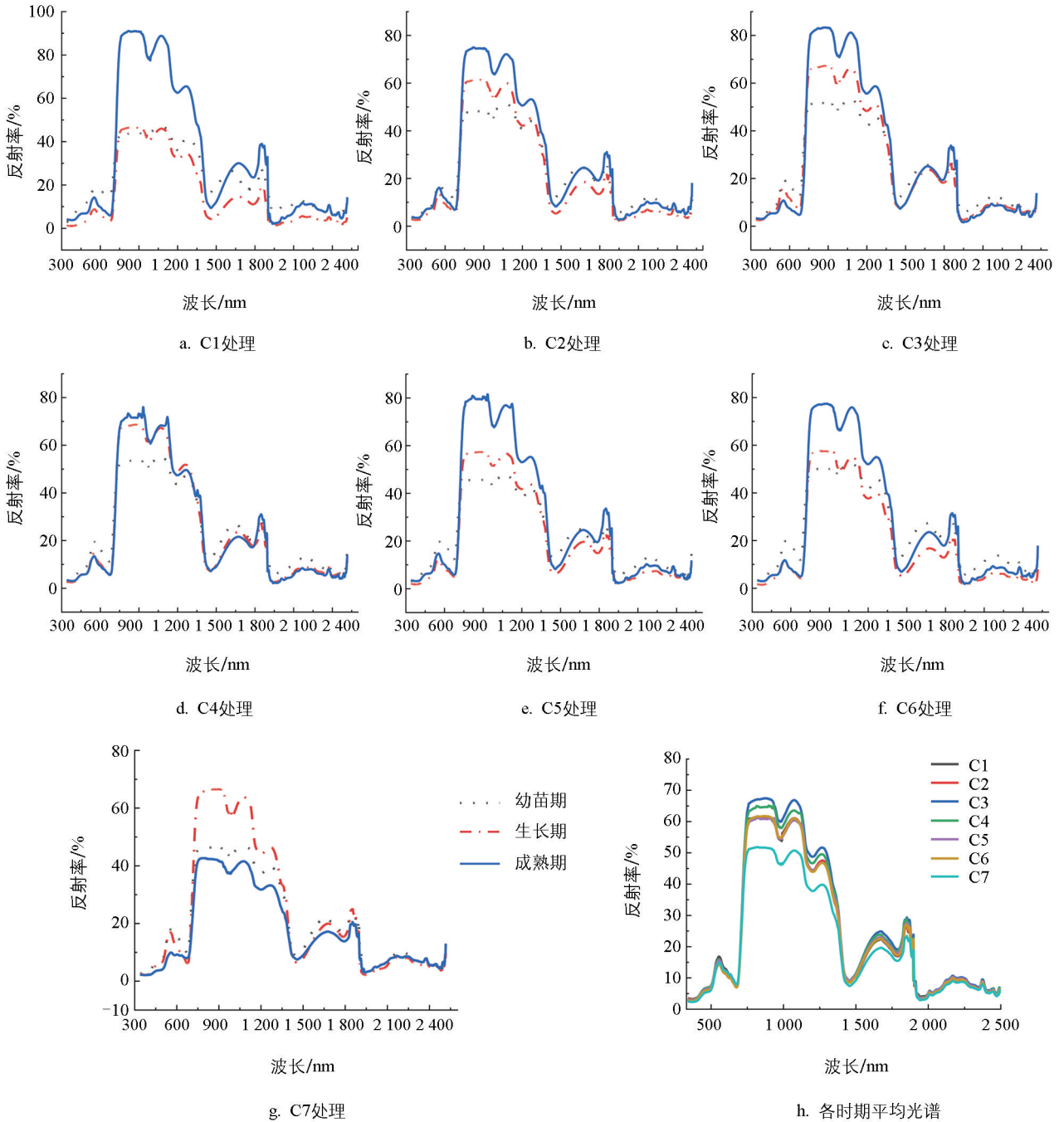


图 2 不同施肥处理下黄白菜的光谱反射率

2.2 蔬菜光合作用强度变化

2.2.1 蔬菜净光合速率(P_n)

光合速率是度量作物源强(源器官同化物形成和输出光合产物的总能力)最直观的一个指标。通过测定瓢菜和黄白菜净光合速率值(P_n),并绘制不同施肥处理下净光合速率变化图(图 3)。可以看出,瓢菜净光合速率随生育期的推进而明显升高,除 C4 施肥模式下生长期 P_n 值较幼苗期和成熟期低,其他施肥模式下瓢菜不同生育期 P_n 值从大到小依次为成熟期、生长期、幼苗期;随施肥水平的提高瓢菜净光合速率在幼苗期和成熟期呈现先增加后降低的趋势。 P_n 值最高为成熟期的 C2 处理,达到 $26 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;最低为幼苗期 C7 的处理, P_n 值为 $8.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

对比瓢菜, 黄白菜 P_n 值随生育期的推进呈先增高后降低的趋势, 生长期的净光合速率 P_n 值大于幼苗期和成熟期, 其中 C5、C6 处理下生长期 P_n 值较幼苗期增长较多。随施肥水平的提高, 黄白菜 P_n 值在成熟期 C5、C6、C7 处理下表现出明显的抑制作用, 尤其 C6 处理下黄白菜 P_n 值最低。说明适当施肥对黄白菜生长发育前期 P_n 值有明显的提高作用, 较高施肥量则对成熟期黄白菜 P_n 值表现出一定的抑制作用。

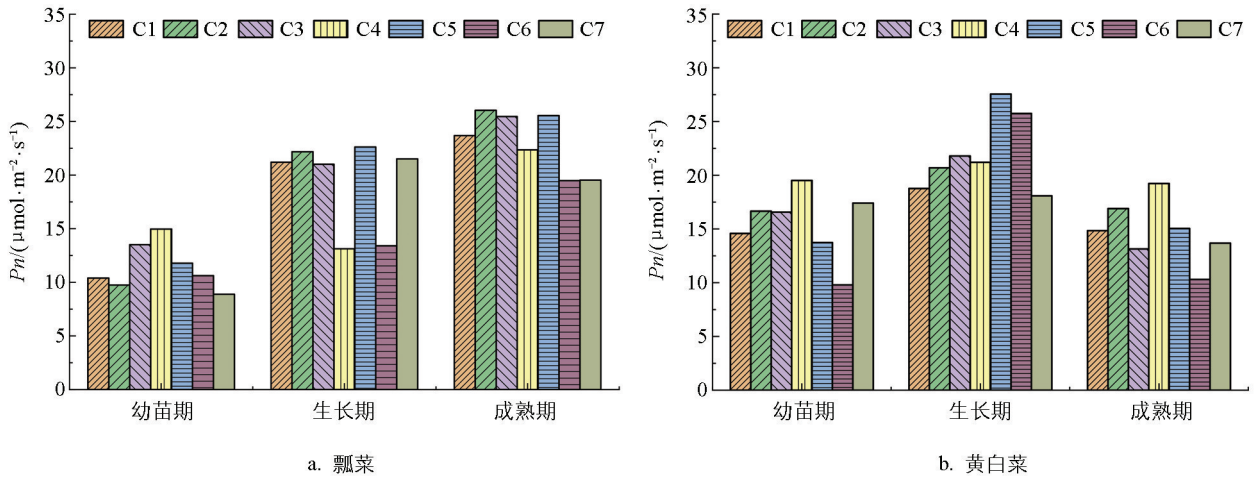


图 3 不同施肥条件下不同生育期蔬菜 P_n 的变化

2.2.2 蔬菜气孔导度(G_s)

图 4 为不同施肥处理下瓢菜和黄白菜气孔导度(G_s)的对比图, 从中可以看出, 随着生育期的推进和施肥水平的提高, 瓢菜 G_s 值呈不同的变化趋势。生长期 C5 处理的 G_s 值最高, 为 $315.9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 生长期 C6 处理的 G_s 值最低, 为 $113.9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。C3、C4、C5 处理 G_s 值整体上处于较高水平, C2、C6 处理 G_s 值明显较低。

不同施肥处理下, 黄白菜生长期 G_s 值大于幼苗期和成熟期。生长期 C4 处理的 G_s 值最高, 为 $678.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 幼苗期 C1 处理的 G_s 值最低, 为 $109.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在生长期和成熟期, 黄白菜 G_s 值随施肥水平的提高呈先增加后降低的趋势, C5 处理下 G_s 值明显降低, 与瓢菜相比, 施用肥料能显著提高黄白菜各生育时期的 G_s 值。

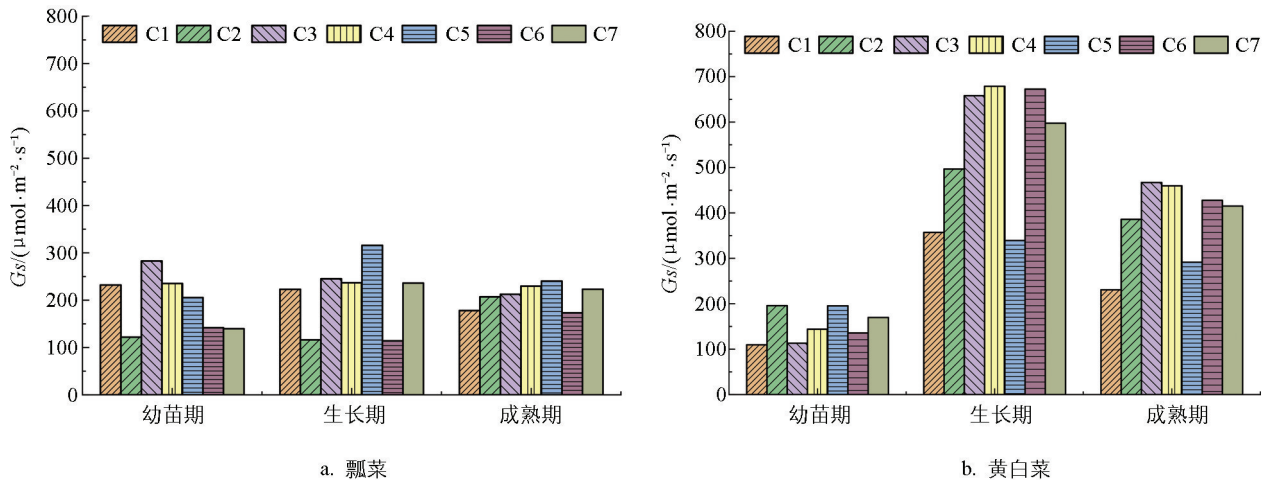


图 4 不同施肥条件下不同生育期蔬菜气孔导度(G_s)的变化

2.2.3 蔬菜胞间 CO_2 浓度(C_i)

图 5 为不同施肥处理下瓢菜胞间 CO_2 浓度(C_i)的对比图, 从中可以看出, 随生育期的推进, 瓢菜 C_i 值

逐渐下降,除了 C4 处理,其他施肥处理下均是幼苗期的 C_i 值大于生长期和成熟期。幼苗期 C3 处理的 C_i 值最高,为 $383.6 \mu\text{mol}/\text{mol}$;生长期 C2 处理的 C_i 值最低,为 $138.5 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

相比瓢菜,黄白菜 C_i 值在不同施肥处理下生长期大于幼苗期和成熟期,即随生育期的推进,黄白菜胞间 CO_2 浓度先增加后降低。生长期 C4 处理的 C_i 值最高,为 $394.6 \mu\text{mol}/\text{mol}$;成熟期 C3 处理的 C_i 值最低,为 $168.1 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

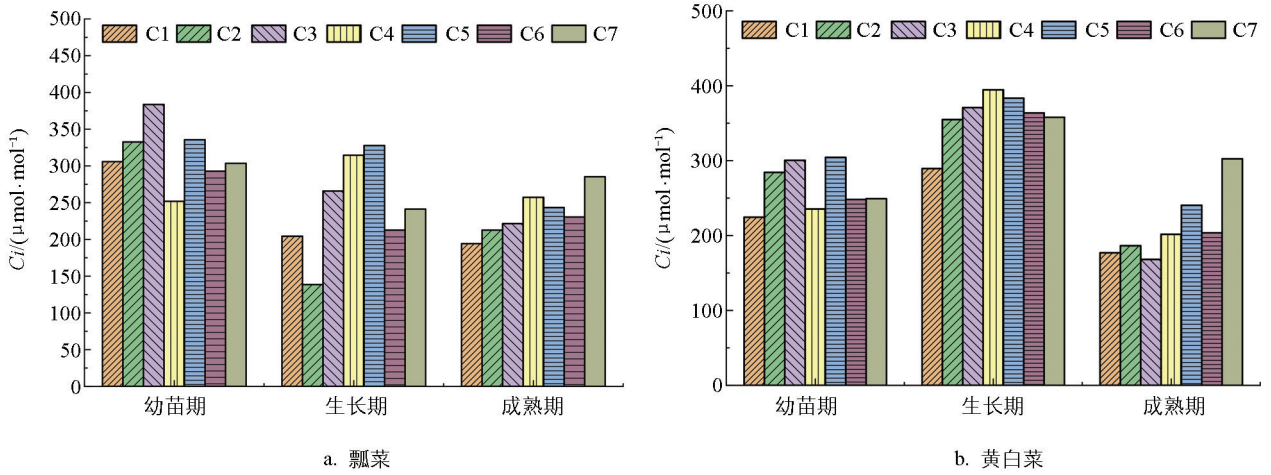


图 5 不同施肥条件下不同生育期蔬菜 C_i 的变化

2.2.4 蔬菜蒸腾速率(T_r)

图 6 为冬季不同施肥处理下瓢菜蒸腾速率(T_r)的对比图,从中可以看出,瓢菜和黄白菜 T_r 值随生育期的推进而呈现出不同的变化趋势。瓢菜生长期 C5 处理的 T_r 值最高,为 $3.6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;生长期 C2 处理的 T_r 值最低,为 $0.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。随施肥水平的提高,瓢菜幼苗期 T_r 值先升高后降低,生长期 C2、C6 处理下 T_r 值较低,C5 处理下 T_r 值最高,成熟期时 C5、C7 处理下 T_r 值较高。

黄白菜生长期 C4 处理的 T_r 值最高,为 $2.9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;生长期 C1 处理的 T_r 值最低,为 $0.4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。生长期 C4、C6 处理的 T_r 值较高,成熟期 C2、C4 处理的 T_r 值较高。与瓢菜相比,黄白菜总体 T_r 值处于较低水平。生长期时适量施肥能明显提高黄白菜 T_r 值,成熟期足量施肥反而有降低 T_r 值的作用。

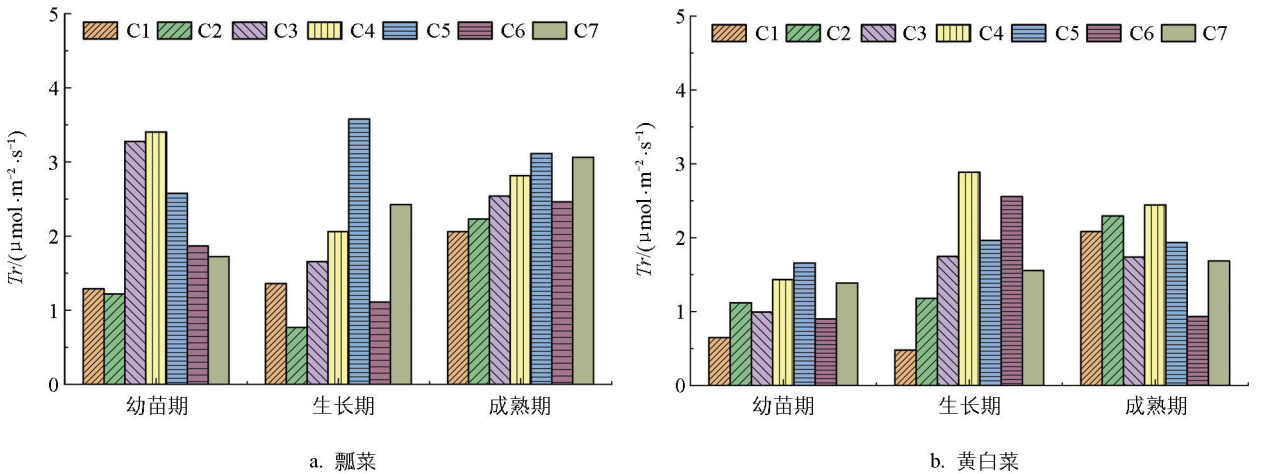


图 6 不同施肥条件下不同生育期蔬菜 T_r 的变化

2.3 蔬菜光合-光响应特性变化

非直角双曲线模型是目前拟合光合-光响应曲线较普遍使用的模型^[27], 由于模型本身的特点, 光合光响应曲线是一条趋近于极值的渐近线^[28]。非直角双曲线模型公式如下。

$$P_n = \frac{AQE * PAR + A_{max} - \sqrt{(AQE * PAR + A_{max})^2 - 4 * K * AQE * PAR * A_{max}}}{2K} - R_{day} \quad (1)$$

式中: P_n 为净光合速率; AQE 为表观量子效率; PAR 为有效光合辐射; A_{max} 为最大净光合速率; R_{day} 为暗呼吸速率; K 为光响应曲线曲角。在设置 AQE 、 A_{max} 、 R_{day} 、 K 初始值后, 运行 SPSS 22 软件进行迭代运算, 即可得到模型模拟值^[29-30]。

从图 7 中可知, 非直角双曲线模型拟合得到的净光合速率(P_n)变化趋势整体上是随光合有效辐射(PAR)增强而增大的, 增幅随着 PAR 的增强而减缓, 在达到光饱和点后 P_n 值迅速下降, 平均 R^2 为 0.944, 拟合效果较好。

从图 8 可以看出, 不同施肥处理下瓢菜和黄白菜 P_n 对光强具有不同响应趋势。整体来看, 瓢菜的 P_n 值变化趋势是先随光合有效辐射(PAR)增强而迅速增大, 增幅随着 PAR 的增强而减缓, 在达到光饱和点后 P_n 值迅速下降。随着生育期的推进, 光响应曲线的峰值逐渐增加。在试验设定的光合有效辐射范围内, 7 种处理均未出现光抑制现象。黄白菜的光合-

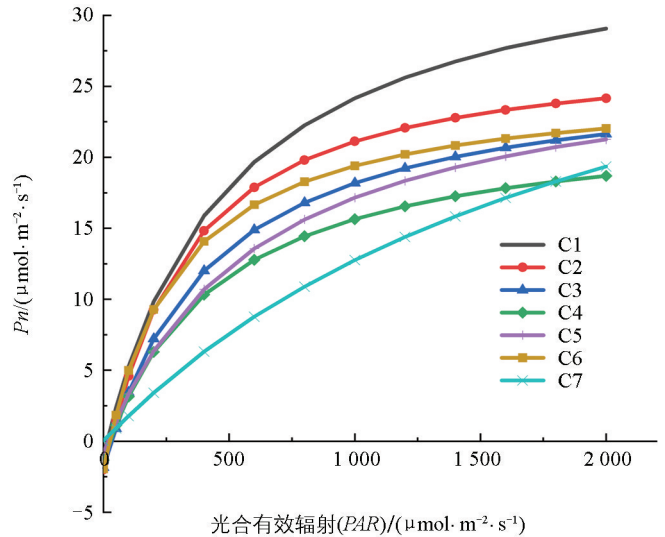


图 7 非直角双曲线模型拟合的光合-光响应曲线

光响应曲线比瓢菜变化大, 幼苗期 C4 处理、生长期 C1、C2 处理、成熟期 C4 处理的 P_n 先随 PAR 增强而迅速增大, 在达到光饱和点后 P_n 变化不大, 且其最大净光合速率在所有处理中最大; 幼苗期 C6 处理、生长期 C6 处理、成熟期 C5 处理的 P_n 在 PAR 较低光强下就出现光饱和。利用非直角双曲线对两种蔬菜进行拟合的整体效果较好, 在有效光合辐射(PAR)处于较低水平, 即 $PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 瓢菜和黄白菜 P_n 增长较快, 说明在低 PAR 下蔬菜利用光能的效率较高。从光合-光响应曲线可知, 合理配置施肥模式可以获得更高效益。

2.4 蔬菜光合性能与光谱植被指数相关性

不同施肥条件下瓢菜、黄白菜光合参数与光谱植被指数的相关系数见表 2。瓢菜最大正相关系数为 0.880, 说明 C7 处理的 NRI 与 C_i 呈显著正相关; 最小负相关系数为 -0.961, 说明 C5 处理的 $NDVI$ 与 C_i 呈显著负相关。黄白菜最大正相关系数为 0.880, 说明 C3 处理的 NRI 与 C_i 呈显著正相关; 最小负相关系数为 -0.930, 说明 C5 处理的 $NDVI$ 与 G_s 呈显著负相关。此外, 瓢菜比值植被指数 RVI 在 C2 处理下与光合参数的相关性均大于 0.5, C5 处理下归一化植被指数 $NDVI$ 与光合参数的相关性均大于 0.6, C4 处理下瓢菜氮素反射指数 NRI 与光合参数的相关性均大于 0.5, 且 C4 处理下差值植被指数 DVI 与两种蔬菜光合参数的相关性均大于 0.8, 说明 C4 处理下有利于提高两种蔬菜光合性能, 且瓢菜不同施肥处理下光谱指数与光合参数的相关性整体上较黄白菜更好。不同施肥条件蔬菜光合生理状况存在差异, 蔬菜植被指数与光合参数存在显著相关性, 因此, 可利用蔬菜对不同施肥条件的光谱特征和光合性能的响应来监测蔬菜生长状况。

续表 2

不同处理	光谱指数	瓢菜				黄白菜			
		P_n	G_s	C_i	T_r	P_n	G_s	C_i	T_r
C5	NDVI	-0.629	-0.930*	-0.961*	-0.922*	-0.629	-0.930**	-0.922**	-0.625
	NRI	0.382	0.463	-0.382	-0.435	0.382	0.516	-0.415	-0.481
	RVI	-0.445	0.355	0.890	0.665	-0.448	0.355	0.865	-0.575
	DVI	0.505	0.208	-0.027	0.430	0.543	0.208	0.430	0.725
C6	NDVI	0.275	-0.580	-0.183	-0.515	0.475	-0.580	-0.515	-0.325
	NRI	-0.435	-0.271	-0.140	0.292	0.292	0.375	-0.415	-0.605
	RVI	0.773	-0.345	-0.374	-0.374	-0.374	-0.539	-0.512	-0.430
	DVI	-0.732	-0.351	-0.006	0.385	0.335	0.389	-0.152	-0.225
C7	NDVI	-0.653	-0.251	0.264	-0.205	-0.225	-0.548	-0.655	0.162
	NRI	0.545	0.433	0.880**	0.780	0.780	-0.815*	-0.395	-0.349
	RVI	-0.945*	0.725	-0.182	-0.170	-0.170	0.418	0.688	-0.182
	DVI	0.615	-0.267	-0.202	0.292	0.292	0.745	0.165	-0.275

注: * 表示在 $p \leq 0.05$ 水平上显著相关(双尾); ** 表示在 $p \leq 0.01$ 水平上显著相关(双尾)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 不同施肥条件对蔬菜光合-光谱特征的影响

根据结果分析可知,不同施肥条件和生育期对两种蔬菜的光谱反射率和光合特征都有影响。在 C1 未施肥处理下两种蔬菜光谱反射率差异不大,总体上表现为成熟期的光谱反射率最大;而不同施肥模式下两种蔬菜的光谱反射率发生了不同的变化。这说明不同施肥模式使土壤中营养元素含量发生变化,进而影响蔬菜的生长发育。由于两种不同蔬菜叶片表面特性和内部结构以及营养成分浓度和分布都有差异,因此在不同施肥模式下光谱变化特征也具有差异^[31]。在不同生育期的光谱差异主要体现为:在生长期,瓢菜在 C1 施肥模式下各波段反射率均较低,在可见光和短波红外区域 C2 施肥模式反射率较高,在近红外区域 C3 施肥模式反射率较高;而黄白菜生长期光谱反射率较低的为 C6 施肥模式,在绿峰和近红外区域 C1 施肥模式反射率较高,在短波红外区域 C3 施肥模式光谱反射率较高。在成熟期,瓢菜在可见光区域 C7 处理模式光谱反射率较高, C3 处理模式反射率较低,在近红外和短波红外区域 C1 施肥模式光谱反射率较高, C3 和 C7 处理模式光谱反射率较低;黄白菜成熟期 C7 处理模式光谱反射率明显变低,在可见光区域 C2 施肥模式光谱反射率较高,在近红外区域 C3 和 C5 施肥模式光谱反射率较高。说明适量的肥料能加快作物生长发育,但当施肥水平超过一定值时,反而抑制作物生长,光谱反射率降低^[7]。

不同施肥条件下两种蔬菜光合性能差异主要表现为:净光合速率(P_n)值除 C4 和 C6 施肥处理模式以外,均是瓢菜大于黄白菜,瓢菜净光合速率随生育期的推进而明显升高,黄白菜净光合速率随生育期的推进呈先增高后降低的趋势。Li 等^[32]类似的研究表明,随着硅酸钾肥用量的增加,小麦旗叶叶绿素含量、净光合速率呈先增加后减少的趋势,说明适当施肥对黄白菜生长发育前期净光合速率有明显的提高作用,较高施肥量则对成熟期黄白菜表现出一定的抑制作用。蒸腾速率(T_r)值除 C2 施肥处理模式,其他均是瓢菜大于黄白菜,生长期时适量施肥能明显提高黄白菜蒸腾速率,成熟期足量施肥反而有所降低蒸腾速率。胞间 CO_2 浓度(C_i)值两种蔬菜相差不大,说明施肥对提升两种蔬菜胞间 CO_2 浓度的作用不明显。7 种施肥模式气孔导度(G_s)值均表现为黄白菜大于瓢菜,不同施肥处理下瓢菜气孔导度提升不显

著,而黄白菜各生育时期的气孔导度得到显著提高。冯茜等^[17]的研究表明气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率都与光合速率显著相关。Fu 等^[33]的研究表明光合速率的准确表征对于重新设计光合作途径以提高作物产量具有关键价值。因此,可以通过施肥调整这些光合参数来提高叶片光合速率,为提高蔬菜产量提供参考。

此外,光合-光响应曲线可以帮助我们理解光合机制,评估植物如何对光照条件做出反应,或评估植物内部生理可塑性的程度^[34]。本研究表明在有效光合辐射(PAR)处于较低水平,即 $PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,瓢菜和黄白菜净光合速率增长较快,说明在低 PAR 下蔬菜利用光能的效率较高。Babla 等^[35]的研究也表明与受弱光和中光照的植物相比,植物在长期强光下的光合作用潜力会受到影响,而从光合-光响应曲线可知,合理施用肥料则可以提高蔬菜对强光的利用,获得更高效益。

3.1.2 不同施肥条件下蔬菜光合-光谱特征相关性分析

不同施肥条件下瓢菜和黄白菜光谱特征参数与光合性能间相关性也具有差异。瓢菜 C7 处理的 NRI 与 C_i 呈显著正相关, C5 处理的 $NDVI$ 与 C_i 显著负相关;黄白菜 C3 处理的 NRI 与 C_i 显著正相关, C5 处理的 $NDVI$ 与 G_s 显著负相关。这说明两种蔬菜的同一光谱指数与同一光合参数和不同光合参数的相关性在不同施肥模式下均具有差异,这可能是蔬菜生理结构特征的差异造成的。C4 处理下差值植被指数 DVI 与两种蔬菜光合参数的相关性均大于 0.8,说明 C4 处理下有利于提高两种蔬菜光合性能,且瓢菜不同施肥处理下光谱指数与光合参数的相关性整体上较黄白菜更好。Peñuelas 等^[31]的研究表明植物光合作用能力是反映植物生长状况和适应逆境胁迫的重要指标,而植物在生长过程中的微小变化可以通过植物光谱特征表现出来,其研究结果表明归一化植被指数($NDVI$)、红边参数(λ_{re})、光化学反射指数(PRI)等与其他光合效率指标之间存在普遍的相关性。也有研究表明植物叶片不同生长阶段的光响应程度具有差异,如 Sánchez-de-Miguel^[36]等的研究表明成熟叶片光合作用的光响应高于年轻叶片和老叶片的光响应。因此,可应用蔬菜对不同施肥条件的的光谱特征和光合性能来监测蔬菜生长状况,从而促进蔬菜的科学管理和产量的提高。

3.2 结论

研究利用 GFS-3000 便携式光合-荧光测量系统和 SVC 便携式地物光谱仪对瓢菜和黄白菜的光合及光谱特性进行测量,主要结论如下:

1) 不同施肥条件和生育期对两种蔬菜的光谱反射率有很大影响,瓢菜反射率除 C3 处理外,其他处理模式下成熟期的反射率均较幼苗期和生长期高;黄白菜 C1 到 C6 处理下反射率以成熟期较高,而 C7 处理生长期反射率较高。

2) 7 种施肥模式下,瓢菜和黄白菜的光合性能表现出明显差异。瓢菜叶片净光合速率(P_n)随生育期的推进而明显升高,黄白菜 P_n 随生育期的推进呈先增高后降低的趋势;瓢菜叶片蒸腾速率(T_r)最高为生长期 C5 处理,黄白菜最高为生长期 C4 处理;两种蔬菜叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)波动不大;气孔导度(G_s)在不同施肥处理下瓢菜提升不显著,黄白菜 G_s 则显著提高;光合-光响应曲线表明在有效光合辐射(PAR)处于较低水平,即 $PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,瓢菜和黄白菜 P_n 增长较快。

3) 不同施肥条件下蔬菜光合生理状况存在差异,蔬菜光谱特征参数与光合性能间相关性也不同。瓢菜 C7 处理的氮素反射率指数 NRI 与 C_i 呈显著正相关, C5 处理的归一化植被指数 $NDVI$ 与 C_i 呈显著负相关;黄白菜 C3 处理的 NRI 与 C_i 呈显著正相关, C5 处理的 $NDVI$ 与 G_s 呈显著负相关。

研究选取的蔬菜为昆明地区常见设施蔬菜中的两种,受试验条件限制,为不覆盖塑料薄膜种植,但昆明地区蔬菜产业多为大棚设施种植,二者光谱信息存在差异,以后的试验应尽量还原大棚种植环境,进一步贴合蔬菜实际生产状况。此外,本试验数据仅为一季数据,所以其结果仍需在不同的田间环境下加以验证和完善。

参考文献:

- [1] MO L Y, FANG L S, YAO W H, et al. LC-QTOF/MS-Based Non-Targeted Metabolomics to Explore the Toxic Effects of Di(2-Ethylhexyl) Phthalate (DEHP) on *Brassica chinensis* L. [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 918: 170817.
- [2] XIONG Z T, LIU C, GENG B. Phytotoxic Effects of Copper on Nitrogen Metabolism and Plant Growth in *Brassica Pekinensis* Rupr [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64(3): 273-280.
- [3] ROGERS C A, CHEN J M, ZHENG T, et al. The Response of Spectral Vegetation Indices and Solar-Induced Fluorescence to Changes in Illumination Intensity and Geometry in the Days Surrounding the 2017 North American Solar Eclipse [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(10): e2020JG005774.
- [4] 朝木力嘎, 孙宇阳, 宋冰, 等. 不同叶色无芒雀麦光合特性与表型性状的相关性分析 [J]. *草地学报*, 2024, 32(11): 3417-3424.
- [5] CHAI Q, GAN Y T, TURNER N C, et al. Chapter Two -Water-Saving Innovations in Chinese Agriculture [J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 126: 149-201.
- [6] WANG J F, YANG X Y, HUANG S M, et al. Long-Term Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers Increases Crop Yield Sustainability by Improving Soil Fertility in Maize-Wheat Cropping Systems [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2025, 24(1): 290-305.
- [7] SHI Z J, LIU D H, LIU M, et al. Optimized Fertilizer Recommendation Method for Nitrate Residue Control in a Wheat-Maize Double Cropping System in Dryland Farming [J]. *Field Crops Research*, 2021, 271: 108258.
- [8] LI H Y, ZHANG Y H, SUN Y G, et al. Long-Term Effects of Optimized Fertilization, Tillage and Crop Rotation on Soil Fertility, Crop Yield and Economic Profit on the Loess Plateau [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 143: 126731.
- [9] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [10] 李枫, 邹定辉, 刘兆普, 等. 氮磷水平对龙须菜生长和光合特性的影响 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1140-1147.
- [11] SONOBE R, WANG Q. Assessing Hyperspectral Indices for Tracing Chlorophyll Fluorescence Parameters in Deciduous Forests [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 227: 172-180.
- [12] SANCHEZ F, BASSIL E, CRANE J H, et al. Spectral Light Distribution Affects Photosynthesis, Leaf Reflective Indices, Antioxidant Activity and Growth of *Vanilla Planifolia* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 182: 145-153.
- [13] HORLER D N H, DOCKRAY M, BARBER J. The Red Edge of Plant Leaf Reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(2): 273-288.
- [14] NAUMANN J C, YOUNG D R, ANDERSON J E. Leaf Chlorophyll Fluorescence, Reflectance, and Physiological Response to Freshwater and Saltwater Flooding in the Evergreen Shrub, *Myrica Cerifera* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63(1-3): 402-409.
- [15] 王媛, 王金亮. 不同施肥条件下蔬菜叶绿素荧光-光谱特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(8): 2427.
- [16] LUO C W, WANG R S, LI C N, et al. Photosynthetic Characteristics, Soil Nutrients, and Their Interspecific Competitions in an Apple-Soybean Alley Cropping System Subjected to Different Drip Fertilizer Regimes on the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 275: 108001.
- [17] 冯茜, 金丽惠, 薛海清, 等. 增温和土壤肥力对大豆光合特征和产量的影响 [J]. *中国农学通报*, 2023, 39(35): 111-117.
- [18] FAN Y L, LIU J M, ZHAO J T, et al. Effects of Delayed Irrigation during the Jointing Stage on the Photosynthetic Characteristics and Yield of Winter Wheat under Different Planting Patterns [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 371-376.
- [19] 吴钥, 乔云发, 金丽惠, 等. 增温及其应对措施对小麦光合特性和酶活性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(4): 42-51.

- [20] YANG F H, WU P T, ZHANG L, et al. Effects of Subsurface Irrigation Types on Root Distribution, Leaf Photosynthetic Characteristics, and Yield of Greenhouse Tomato [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 328: 112883.
- [21] 赵丝雨, 王思宇, 王文艳, 等. 低温和荫蔽双重胁迫对大豆光合特性的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(8): 22-30.
- [22] AHAMMED G J, WANG M M, ZHOU Y H, et al. The Growth, Photosynthesis and Antioxidant Defense Responses of Five Vegetable Crops to Phenanthrene Stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 80: 132-139.
- [23] PENUELAS J, GAMON J A, GRIFFIN K L, et al. Assessing Community Type, Plant Biomass, Pigment Composition, and Photosynthetic Efficiency of Aquatic Vegetation from Spectral Reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 46(2): 110-118.
- [24] 王洪飞. 不同施肥制度下玉米生长代谢和冠层光谱特征的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [25] 祁亚琴, 吕新, 陈冠文, 等. 基于高光谱植被指数的棉田冠层特征信息估算模型研究 [J]. *棉花学报*, 2011, 23(5): 476-480.
- [26] ZHANG H, ZHU L F, HU H, et al. Monitoring Leaf Chlorophyll Fluorescence with Spectral Reflectance in Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 4403-4408.
- [27] CANNELL M G R, THORNLEY J H M. Temperature and CO₂ Responses of Leaf and Canopy Photosynthesis: A Clarification Using the Non-Rectangular Hyperbola Model of Photosynthesis [J]. *Annals of Botany*, 1998, 82(6): 883-892.
- [28] 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型比较 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1356-1361.
- [29] 方宝华, 滕振宁, 刘洋, 等. 超高产杂交稻的光响应曲线及其模型拟合 [J]. *中国稻米*, 2017, 23(4): 1-5, 13.
- [30] 杨世琼, 杨再强, 蔡霞, 等. 高温高湿胁迫下设施番茄光响应曲线的拟合 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2003-2012.
- [31] PENUELAS J, FILELLA I. Visible and Near-Infrared Reflectance Techniques for Diagnosing Plant Physiological Status [J]. *Trends in Plant Science*, 1998, 3(4): 151-156.
- [32] LI W B, LI M, XU Y S, et al. Effects of Potassium Silicate Fertilizer on Photosynthetic Characteristics and Yield in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Bangladesh Journal of Botany*, 2021, 50(4): 1127-1132.
- [33] FU P, MEACHAM-HENSOLD K, GUAN K Y, et al. Estimating Photosynthetic Traits from Reflectance Spectra: A Synthesis of Spectral Indices, Numerical Inversion, and Partial Least Square Regression [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2020, 43(5): 1241-1258.
- [34] COE R A, LIN H C. Light Response Curves in Land Plants [M] //Photosynthesis. New York, NY: Springer US, 2024: 27-39.
- [35] BABLA M H, TISSUE D T, CAZZONELLI C I, et al. Effect of High Light on Canopy-Level Photosynthesis and Leaf Mesophyll Ion Flux in Tomato [J]. *Planta*, 2020, 252(5): 80.
- [36] SÁNCHEZ-DE-MIGUEL P, CENTENO A, BAEZA P, et al. Photosynthetic Response to Light of ‘tempranillo’ Leaves in the Field: Effects of Leaf Age, Position and Water Potential [J]. *Acta Horticulturae*, 2005(689): 357-364.

责任编辑 王新娟