

## 不同施肥条件下蔬菜叶绿素荧光-光谱特性研究

王媛<sup>1, 2, 3</sup>, 王金亮<sup>1, 2, 3\*</sup>

1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500
2. 云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 云南 昆明 650500
3. 云南省地理空间信息技术工程技术研究中心, 云南 昆明 650500

**摘要** 测定不同施肥条件下瓢菜、黄白菜的反射光谱及叶绿素荧光参数, 以便进一步分析不同施肥条件下蔬菜生长生理及光谱、叶绿素荧光之间的响应关系。结果表明: (1) 可见光波段内, 黄白菜光谱反射率随生育期的推进呈增加的趋势, 瓢菜光谱反射率随生育期的推进呈先增后减的趋势; 在近红外波段, 瓢菜、黄白菜光谱反射率随蔬菜生长发育逐渐增加。(2) 不同施肥条件下蔬菜光谱反射率不同, 特别是在近红外波段表现显著。生长期时, 黄白菜在 C3 和 C5 水平上反射率较高, 瓢菜在 C2 和 C3 水平上反射率较高; 成熟期时, 黄白菜在 C5 和 C6 水平上反射率较高; 瓢菜在 C3 和 C5 水平上光谱反射率较高。(3) 瓢菜、黄白菜叶绿素荧光参数  $Fv/Fm$  随生育期的推进总体呈增加的趋势, 瓢菜  $Fv/Fm$  在 C6 水平上最高, 黄白菜  $Fv/Fm$  在 C2 和 C6 水平上较高。(4) 不同施肥条件下, 蔬菜光谱特征参数与叶绿素荧光都表现出显著的正负相关关系。叶绿素荧光与光谱特性的这种关系, 可为监测蔬菜生长生理和健康状况提供参考。

**关键词** 蔬菜; 叶绿素荧光; 光谱特性; 相关性; 不同施肥处理

**中图分类号:** S127 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2427-07

### 引言

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。人民日益增长的物质文化需要使得人们对新鲜蔬菜的需求逐渐增加, 各地蔬菜播种面积迅速增加<sup>[1]</sup>。我国作为蔬菜生产和消费大国, 其蔬菜产业在国内农业和全球蔬菜出口市场中发挥着越来越重要的作用。云南气候独特, 区位优势明显。云南蔬菜以绿色、生态、反季节冬早蔬菜为特点, 加之蔬菜品质好、种类多, 备受国内外广大消费者的喜爱。蔬菜产业快速发展, 种植规模、产量、产值等都快速提升, 取得了较好的社会经济效益。但同时由于大部分农户缺乏科学的施肥观念, 不合理施肥导致严重的农业污染问题。其中化肥污染是导致滇池水体氮磷含量居高不下的主要原因, 近年来国家持续投入大量人力物力进行治理, 但收效甚微。如何在减少化肥施用量的同时提高蔬菜产量, 在最大限度发

挥经济效益的同时兼顾生态环境具有重要研究意义。

叶绿素荧光是植物体自身发射的内源光, 它与光合作用、热辐射一起参与植物体内能量的分配, 作为无损检测指示器可以反映植物生理生长状态。光合作用对环境因子的响应高度敏感, 不同生理因素、环境条件会使植物光合特性产生差异<sup>[2-3]</sup>, 而借助反射光谱信息和叶绿素荧光信息可以及时地监测这种生理生化特性的变化<sup>[4]</sup>。

利用高光谱数据探讨植被的生物化学成分和农学参数的研究不断发展起来。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<sup>[5]</sup>, 可用于估测植物叶绿素含量和水分含量, 推断植物光合能力, 监测植物生长状况等。因而, 利用反射光谱和叶绿素荧光参数间接地监测植物生理生态状况成为热点问题, 被普遍应用于作物生理信息研究、质量鉴定和病虫害遥感监测等各方面。如谭昌伟等利用高光谱特征参数构造叶绿素荧光参数  $Fv/Fm$  估算模型。Zhang 等<sup>[6]</sup>利用光谱反射率估算叶绿素荧光参数, 探讨了水稻光合

**收稿日期:** 2019-11-23, **修订日期:** 2020-04-11

**基金项目:** 国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目(2018YFE0184300), 欧盟文化执行署(EACEA)伊拉斯谟+国际高等教育能力建设基金项目(586037-EPP-1-2017-1-HU-EPPKA2-CBHE-JP), 国家自然科学基金项目(41561048), 云南省哲学社会科学重点项目(ZDZZD201506), 云南省中青年学术技术带头人(2008PY056), 云南省高校科技创新团队和云南师范大学研究生科研创新基金项目(yssdyjs2019143)资助

**作者简介:** 王媛, 女, 1994年生, 云南师范大学旅游与地理科学学院硕士研究生 e-mail: 1558861825@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: wang\_jinliang@hotmail.com

机构对根系氧和水稻类型变化的响应机制。王慧等<sup>[7]</sup>对甘薯进行不同肥料添加剂处理,研究其光谱特征、叶绿素荧光参数以及光合参数的影响。Simko 等<sup>[8]</sup>基于高光谱成像和叶绿素荧光成像技术开发了两种生菜衰变指数(lettuce decay indices, LEDI),用于检测鲜切生菜叶组织的腐烂情况。

研究通过进行控制实验,设置不同梯度施肥量,测量对应蔬菜的叶绿素荧光参数和反射光谱信息,深入探讨不同施肥条件对蔬菜叶绿素荧光特性和光谱特性的影响,寻找最优施肥量组合。为蔬菜生产发展节约生产成本,以及大面积监测蔬菜的生长发育情况提供理论依据。

## 1 实验部分

### 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,水网密集属低纬度高原季风型气候,光照充足,年平均日照时数 2 200 h,年均温度 14.7 °C,全年无霜期 285 d,全年平均降雨 789.6 mm。呈贡土壤分为 5 个土类、10 个亚类、18 个土属、26 个土种。其中红壤土占全县总面积的 52.53%,为该区粮果主要用地。

选取云南省昆明市主要栽培的蔬菜为试验材料,均为春播品种。瓢菜品种为“金品绿霸青梗菜”,黄白菜为“一代交配大白菜”。试验设计 7 种施肥模式:C1(对照处理,不施肥)、C2(施复合肥 400 kg·hm<sup>-2</sup>)、C3(施复合肥 500 kg·hm<sup>-2</sup>)、C4(施复合肥 600 kg·hm<sup>-2</sup>)、C5(施复合肥 400 kg·hm<sup>-2</sup>,有机肥 220 kg·hm<sup>-2</sup>)、C6(施复合肥 500 kg·hm<sup>-2</sup>,有机肥 220 kg·hm<sup>-2</sup>)、C7(施复合肥 600 kg·hm<sup>-2</sup>,有机肥 220 kg·hm<sup>-2</sup>),每种模式设置 3 组重复。

### 1.2 蔬菜叶绿素荧光参数测定

分别在蔬菜幼苗期(1月12日)、生长期(1月25日)、成熟期(2月11日)进行 3 次测定。选择每个梯度不同种类蔬菜每株 3 个健康叶片,每片记录 10 次数据。使用 GFS-3000 便携式光合-荧光测量系统荧光测量模块,对荧光参数进行测量,数据记录每次均间隔 3~5 min,每次仅记录一次数据。测得参数有:初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )和 PS II 最大光化学效率  $F_v/F_m$ ,其中  $F_v = F_m - F_0$ 。

### 1.3 蔬菜反射光谱信息测定

与上述测定同期进行,利用美国 SVC 地物光谱仪(HR-1024i),测量蔬菜反射光谱信息。测量均在晴朗少云天气进行,时间为 11 点至 15 点之间,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 数据处理

应用 Excel、SPSS 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),氮素反射率指数(nitrogen reflectance index, NRI),比值植被指数(ratio vegetation index, RVI),差值植被指数(difference vegetation index, DVI)等相关光谱特征参数(表 1),深入探讨不同施肥条件下蔬菜叶绿素荧光、光谱特性的响应机制。

表 1 光谱植被指数

Table 1 Spectral vegetation index

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

## 2 结果与讨论

### 2.1 蔬菜光谱特性

#### 2.1.1 不同生育期蔬菜光谱特性

在蔬菜的不同生长阶段,由于其生物量、叶绿素含量、水分含量以及覆盖地面程度等发生变化,植物反射光谱也将发生改变<sup>[9]</sup>。以瓢菜、黄白菜反射光谱为例(C4 处理),如图 1(a)可以看出,波长 400~700 nm 内的可见光区域是植物叶绿素的强吸收波段,黄白菜光谱反射率的大小顺序为:幼苗期>生长期>成熟期,在波长 550~560 nm 的绿光处有 1 个反射峰,此处黄白菜光谱反射率最小值是成熟期为 13.17,最大值为幼苗期 19.48;而在波长 490~500 nm 和 670~680 nm 处为吸收谷,此处黄白菜光谱反射率最大值是幼苗期为 11.29,最小值为成熟期 5.58;在波长 690~750 nm 之间,黄白菜反射率增长较快。主要由于随着生育期的推进,黄白菜植株生长叶片层数增多,叶面积迅速扩大,整个黄白菜群体叶片逐渐失黄,对绿光的反射逐渐降低。

在波长为 780~1 350 nm 的近红外区,黄白菜光谱反射率处于较高水平,其光谱反射率的大小顺序为:成熟期>生长期>幼苗期。主要是由于随着黄白菜叶片层数逐渐增加且内部组织结构不断发育成熟,叶肉的海绵组织结构中空腔增加,反射表面增大,反射率逐渐增加。

由图 1(b)可知,在波长 550~560 nm 之间有一个反射峰,瓢菜光谱反射率的顺序为:幼苗期>成熟期>生长期,此时瓢菜光谱反射率最小值是生长期为 9.53,最大值为幼苗期 14.36。主要由于生长期时施肥量过多反而降低叶片叶绿素含量,导致瓢菜对绿光的反射减少。在波长为 780~1 350 nm 的近红外区,光谱反射率依次为:成熟期>生长期>幼苗期。

#### 2.1.2 不同施肥条件下蔬菜光谱特性

##### (1) 不同施肥条件下瓢菜光谱特性

由于瓢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,因此不同施肥条件下瓢菜光谱反射率也不同。平均 SE 值 2.58,SD 值为 16.70。由图 2 可知,幼苗期瓢菜光谱反射率无明显差别;生长期时,波段 550~560 nm 之间(反射峰),瓢菜光谱反射率顺序依次为:C2>C3>C7>C5>C4>C6>C1;在近红外波段,其顺序依次为:C3>C2>C4>C5>C6>C7>C1。主要是由于肥料施用量过多或不足会降低叶绿素含量,导致瓢菜徒长且易染病,适量施肥有利于根系的发育,为其后期旺盛生长打下基础。

成熟期时，在波段为 550~560 nm 之间，瓢菜光谱反射率依次为：C7>C2>C5>C1>C6>C4>C3；在近红外波段，

则为：C1>C5>C6>C2>C4>C3>C7。主要由于充足的肥料能提供瓢菜生理生长和干物质积累所需养分。

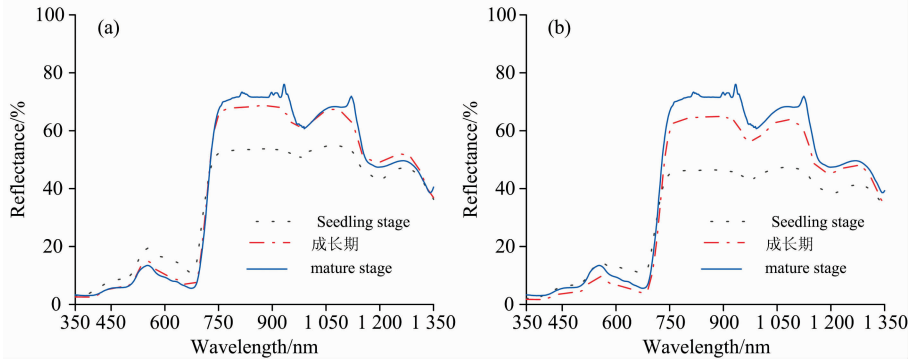


图 1 蔬菜不同生育期的光谱反射率

(a): 黄白菜光谱反射率; (b): 瓢菜光谱反射率

Fig. 1 Spectral reflectance of vegetables at different growth stages

(a): Spectral reflectance of *Brassica pekinensis* Rupr.; (b): Spectral reflectance of *Brassica campestris* L.

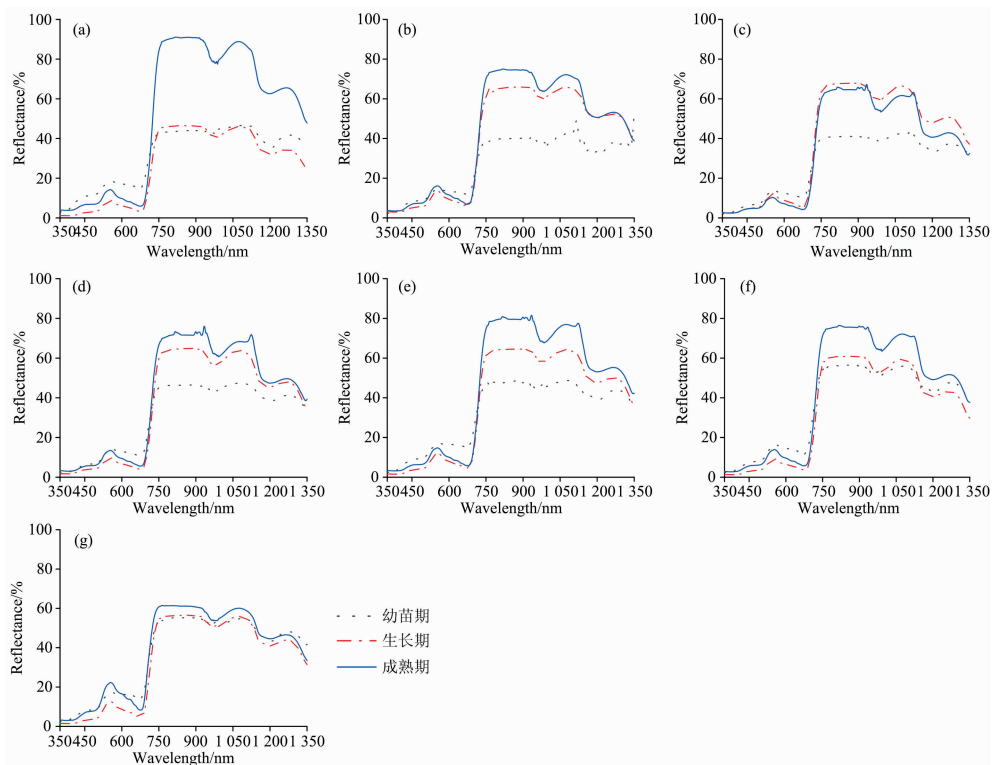


图 2 不同施肥水平下瓢菜的光谱反射率

(a): C1 处理; (b): C2 处理; (c): C3 处理; (d): C4 处理; (e): C5 处理; (f): C6 处理; (g): C7 处理

Fig. 2 Spectral reflectance of *Brassica campestris* L. under different fertilization levels

(a): C1 treatment; (b): C2 treatment; (c): C3 treatment; (d): C4 treatment; (e): C5 treatment; (f): C6 treatment; (g): C7 treatment

(2)不同施肥条件下黄白菜光谱特性

图 3 是 7 种施肥条件下黄白菜光谱反射曲线，幼苗期黄白菜光谱反射率在变化趋势和数值上无明显差别。平均 SE 值 2.57, SD 值为 13.03。生长期时，在 550~560 nm 波段间，黄白菜光谱反射率的大小依次为：C1>C7>C3>C4>

C2>C5>C6；在近红外波段，单独施用无机肥，C2 和 C3 施肥处理下黄白菜光谱反射率较 C1、C4 处理明显降低。混合施用有机肥、无机肥时，肥料用量减少，黄白菜光谱反射率逐渐降低。主要是由于肥料施用量过多或不足会导致黄白菜徒长且易染病。

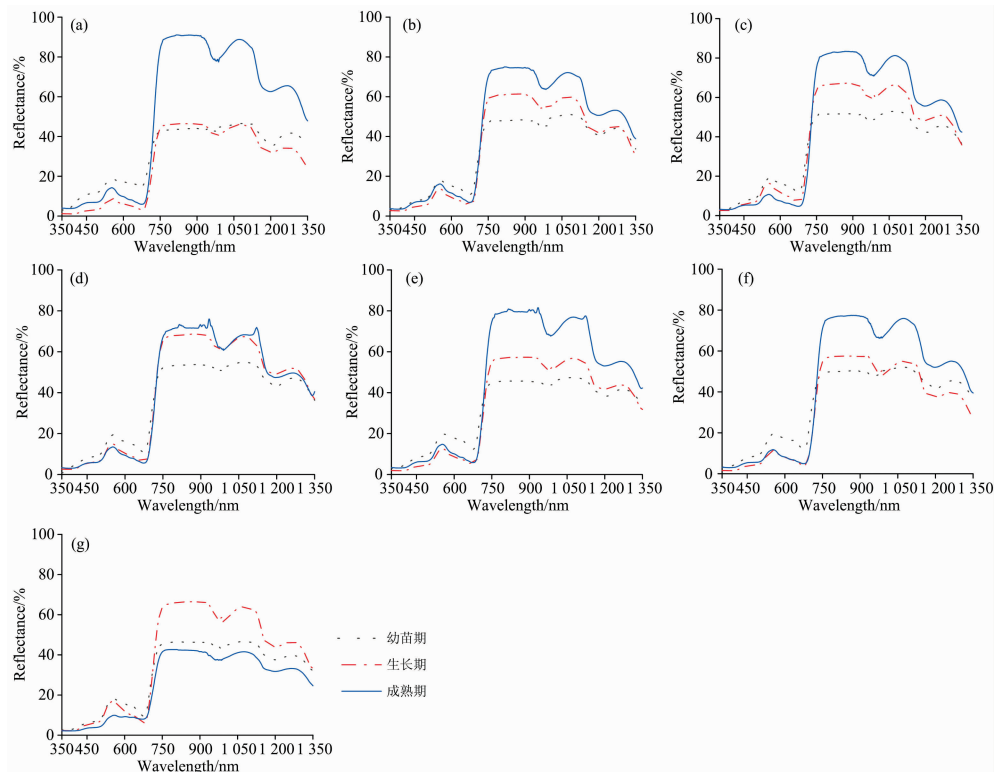


图 3 不同施肥处理下黄白菜的光谱反射率

(a): C1 处理; (b): C2 处理; (c): C3 处理; (d): C4 处理; (e): C5 处理; (f): C6 处理; (g): C7 处理

Fig. 3 Spectral reflectance of *Brassica pekinensis* Rupr. under different fertilization levels

(a): C1 treatment; (b): C2 treatment; (c): C3 treatment; (d): C4 treatment; (e): C5 treatment; (f): C6 treatment; (g): C7 treatment

成熟期时, 黄白菜光谱反射率变化规律与生长期相反, 在 550~560 nm 波段, 黄白菜光谱反射率的大小顺序为: C2 > C5 > C4 > C1 > C6 > C3 > C7; 在近红外波段, 单独施用无机肥时, 其值从大到小依次为: C3 > C2 > C4 > C1, 混合施用有机肥、无机肥时, 其值从大到小依次为: C5 > C6 > C7。主要由于黄白菜逐渐生长发育成熟, 干物质积累量逐渐增加, 对养分的需求量也明显增加。黄白菜是珍贵的白菜品种, 其单位产量较高, 因而对化肥的需求量较大。

## 2.2 蔬菜叶绿素荧光特性

叶绿素荧光作为探测器能反映植物进行光合作用的能力与效率, 是植物光合作用研究中的关键因素。最大光化学效率( $F_v/F_m$ )表示对光能的转化效率, 它可以说明 PS II 使用叶绿素吸收能量的程度和它被过量光线破坏的程度, 也可以反映植物受胁迫条件的状况。当植物的光合器官完好无损时, 其  $F_v/F_m$  值介于 0.7~0.85 之间, 而低于 0.7 则表明植物处于胁迫状态, 从而降低了植物的光合潜力<sup>[10]</sup>。由图 4 可知, 不同施肥条件下, 瓢菜、黄白菜叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  随生长发育进程的推进总体呈增加的趋势。在整个生育期内, 施肥对瓢菜、黄白菜的生长发育的影响逐渐表现出显著差异。瓢菜、黄白菜  $F_v/F_m$  逐渐增加并在成熟期时达到最大值, 其值分别为瓢菜 0.851, 黄白菜 0.849。瓢菜  $F_v/F_m$  在 C6 水平上最高, 在 C2 和 C3 水平上增幅最大。在生长期

时, 黄白菜叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  在 C1, C3 和 C5 水平上较高; 成熟期时  $F_v/F_m$  在 C2, C4 和 C6 水平上较高; 同时  $F_v/F_m$  在 C4 水平上增幅最大。

综合图 2、图 3 和图 4, 不同施肥处理下, 瓢菜、黄白菜叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  及光谱反射率随生育期的推进呈现出相应的变化趋势和特征, 说明瓢菜、黄白菜  $F_v/F_m$  及光谱反射率对其营养和生长状况具有良好的表征作用。

## 2.3 蔬菜叶绿素荧光参数与光谱植被指数相关性分析

利用 SPSS 软件, 得到瓢菜、黄白菜  $F_v/F_m$  与植被指数的相关系数(表 2、表 3)。黄白菜最大正系数为 0.99, 说明成熟期时 C2 处理的 DVI 与  $F_v/F_m$  呈显著正相关; 最小负系数为 -0.972, 说明成熟期时 C2 处理的 NRI 与  $F_v/F_m$  呈显著负相关。瓢菜最大正系数为 0.978, 说明幼苗期时 C5 处理的 DVI 与  $F_v/F_m$  呈显著正相关; 最小负系数为 -0.908, 说明生长期时 C2 处理的 NDVI 与  $F_v/F_m$  呈显著负相关。表 2 当中多个相关系数绝对值小于 0.7, 说明两者间的相关性差, 不同施肥处理对瓢菜叶绿素的含量有较大影响, 导致得到的光谱植被指数与  $F_v/F_m$  的相关性差异较大。不同施肥条件不同生育期蔬菜光合生理状况存在差异, 蔬菜植被指数与  $F_v/F_m$  存在显著相关性, 因此可应用蔬菜对不同施肥条件的光谱特征和叶绿素荧光参数响应监测来监测蔬菜生长状况。

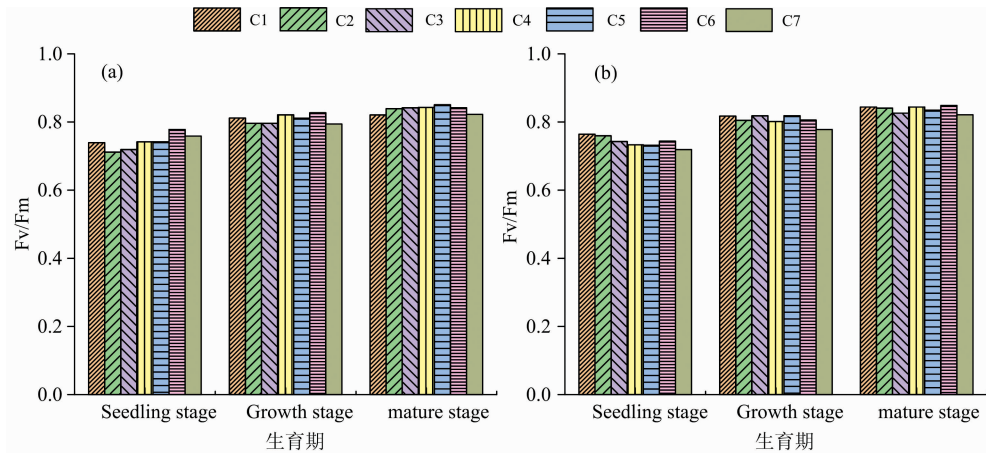


图 4 不同施肥条件下不同生育期蔬菜叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  的变化  
(a): 瓢菜  $F_v/F_m$  的变化; (b): 黄白菜  $F_v/F_m$  的变化

Fig. 4 Changes of chlorophyll fluorescence parameters  $F_v/F_m$  in different growth stages of vegetables under different fertilization conditions

(a):  $F_v/F_m$  in *Brassica campestris* L.; (b):  $F_v/F_m$  in *Brassica pekinensis* Rupr.

表 2 不同施肥条件下不同生育期瓢菜叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  与光谱植被指数的相关性

Table 2 Correlation between chlorophyll fluorescence parameter  $F_v/F_m$  and spectral vegetation index of *Brassica campestris* L. at different growth stages under different fertilization conditions

生育期	不同处理	植被指数			
		NDVI	NRI	RVI	DVI
幼苗期	C1	-0.385	0.157	-0.402	-0.140
	C2	-0.304	0.471	-0.316	-0.374
	C3	-0.704	-0.769	-0.696	-0.006
	C4	0.520	-0.740	-0.566	0.264
	C5	0.424	-0.324	0.433	0.978*
	C6	0.332	-0.716	0.327	-0.182
	C7	-0.313	0.634	-0.311	-0.202
生长期	C1	0.724	-0.649	-0.181	0.095
	C2	-0.908**	-0.539	-0.486	-0.022
	C3	0.683	0.095	-0.399	-0.239
	C4	-0.705	-0.391	0.060	-0.158
	C5	0.078	-0.441	-0.349	0.205
	C6	0.148	0.688	-0.036	0.864*
	C7	0.786	0.723	-0.393	-0.402
成熟期	C1	0.302	-0.274	0.449	0.279
	C2	-0.700	-0.163	0.845*	-0.492
	C3	-0.501	0.085	0.178	-0.325
	C4	0.743	-0.541	0.002	-0.119
	C5	-0.01	0.106	-0.119	-0.216
	C6	0.280	-0.107	-0.029	-0.199
	C7	0.383	0.608	-0.120	-0.156

表 3 不同施肥条件下不同生育期黄白菜叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  与光谱植被指数的相关性

Table 3 Correlation between chlorophyll fluorescence parameter  $F_v/F_m$  and spectral vegetation index of *Brassica pekinensis* Rupr. at different growth stages under different fertilization conditions

生育期	不同处理	植被指数			
		NDVI	NRI	RVI	DVI
幼苗期	C1	-0.770	0.771	-0.749	-0.238
	C2	0.426	-0.067	0.281	0.358
	C3	0.103	-0.527	0.142	0.189
	C4	0.258	-0.511	0.184	0.467
	C5	-0.580	0.262	-0.344	-0.022
	C6	-0.538	0.088	-0.356	-0.541
	C7	-0.519	0.508	-0.503	-0.488
生长期	C1	-0.537	0.043	0.192	-0.128
	C2	-0.248	0.263	-0.502	-0.587
	C3	-0.844*	-0.441	-0.074	-0.102
	C4	-0.251	-0.592	-0.185	0.448
	C5	0.087	-0.008	-0.587	-0.337
	C6	0.811	-0.198	-0.150	-0.345
	C7	0.665	0.378	-0.702	-0.208
成熟期	C1	0.514	-0.859	0.870	-0.945
	C2	0.859	-0.972*	0.870	0.990*
	C3	-0.328	-0.93	-0.961*	-0.922
	C4	-0.898*	0.382	-0.382	-0.481
	C5	-0.798	-0.099	0.890	0.483
	C6	0.638	0.443	-0.027	0.887
	C7	0.188	0.067	-0.183	-0.838

注: \* 相关性在 0.05 层上显著(双尾); \*\* 相关性在 0.01 层上显著(双尾)

### 3 结 论

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不同施肥条件下蔬菜叶绿素荧光及光谱特性进行了测量,通过分析可以得出:

(1)不同施肥条件下的瓢菜、黄白菜反射光谱在可见光区域由于叶绿素的吸收产生 2 个吸收谷,波长为 550~560 nm 处产生 1 个反射峰,随蔬菜生长发育成熟,黄白菜光谱反射率逐渐增加,瓢菜光谱反射率呈现先增高后降低的趋势;在 780 nm 波长后,瓢菜、黄白菜光谱反射率增长较快。这种主要是由蔬菜叶片对绿光的反射,对红、蓝光的吸收以及叶肉海绵组织结构的强烈反射造成的,是叶片表面特性和内部结构以及生化成分浓度和分布差异的体现。由此可以得出,蔬菜的光谱反射曲线随种群生长发育的变化而变化;不同蔬菜光谱曲线存在差异。

(2)在 7 种施肥量下,生长期时,在可见光波段,黄白菜 C1, C4 和 C7 水平上反射率较高,在近红外波段则呈相反的变化;瓢菜在 C2, C3 和 C5 水平上整体反射率较高。主要由于蔬菜经历定植缓苗后吸收的养分多用于促进根系发育,肥料施用量过多或不足会导致植株徒长且易染病。成熟期时,黄白菜在 C5 和 C6 水平上光谱反射率较高;瓢菜在 C3 和 C5 水平上光谱反射率较高。主要由于此时蔬菜生长发育进程加快,充足的肥料能提供黄白菜生理生长和干物质积累所需养分。说明适量的肥料能加快作物生长发育,叶绿素含量不断

增加,作物对红、蓝光的吸收作用逐渐增强,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。

(3)叶绿素荧光参数是表征蔬菜生长生理情况的关键指标,其变化规律能反映蔬菜生理的内在特征。不同施肥条件下,瓢菜、黄白菜  $Fv/Fm$  随蔬菜生长发育总体呈增加的趋势。瓢菜  $Fv/Fm$  在 C6 水平上最高,在 C2 和 C3 水平上增幅最大。在生长期时,黄白菜叶绿素荧光参数  $Fv/Fm$  在 C1, C3 和 C5 水平上较高;成熟期时在 C2, C4 和 C6 水平上较高;在 C4 水平上增幅最大。瓢菜、黄白菜叶绿素荧光参数  $Fv/Fm$  及光谱反射率随生育期的推进呈现出相应的变化趋势和特征,说明瓢菜、黄白菜  $Fv/Fm$  及光谱反射率对蔬菜营养和生理生长状况具有良好的表征作用。

(4)不同施肥条件不同生育期蔬菜光合生理状况存在差异,蔬菜光谱特征参数与叶绿素荧光参数间相关性也不同。成熟期时 C2 处理的黄白菜 DVI 与  $Fv/Fm$  呈显著正相关,相关系数为 0.99; NRI 与  $Fv/Fm$  呈显著负相关,相关系数为 -0.972。幼苗期时 C5 处理的瓢菜 DVI 与  $Fv/Fm$  呈显著正相关,相关系数为 0.978;生长期时 C2 处理的 NDVI 与  $Fv/Fm$  呈显著负相关,相关系数为 -0.908。

目前已有相关研究利用高光谱遥感技术监测蔬菜生长生理状况,探讨胁迫条件对蔬菜生长生理特征的影响。通过构建光谱指数与光合参数之间的最优模型,可以估测蔬菜光合性能,监测其生长、生理和健康状况。由于试验数据为一季,所以其结果仍需在不同的田间环境下加以验证和完善。

### References

- [ 1 ] XIAO Ti-qiong, HE Chun-xia, CAO Guang-qiao, et al(肖体琼,何春霞,曹光乔,等). Research of Agricultural Modernization(农业现代化研究), 2015, 36(5): 857.
- [ 2 ] PEI Bin, ZHANG Guang-can, ZHANG Shu-yong, et al(裴斌,张光灿,张淑勇,等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2013, 33(5): 1386.
- [ 3 ] Liu E K, Mei X R, Yan C R. Agricultural Water Management, 2016, 167: 75.
- [ 4 ] Sonobe R, Wang Q. Journal of Environmental Management, 2018, 227: 172.
- [ 5 ] Horler D N H, Dockray M, Barber J. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273.
- [ 6 ] Zhang H, Zhu L, Hu H. Procedia Engineering, 2011, 15: 4403.
- [ 7 ] WANG Hui, ZENG Lu-sheng, LIU Qing, et al(王慧,曾路生,刘庆,等). Acta Agriculturae Boreali-Sinica(华北农学报), 2017, 32(1): 142.
- [ 8 ] Simko I, Jimenez-Berni J A, Furbank R T. Postharvest Biology and Technology, 2015, 106: 44.
- [ 9 ] GUAN Chun-yun, YU Zhen-wen, CAO Wei-xing(官春云,于振文,曹卫星). Modern Crop Cultivation(现代作物栽培学). Beijing: Higher Education Press(北京:高等教育出版社), 2011. 179.
- [ 10 ] Ghobadi M, Taherabadi S, Ghobadi M E. Industrial Crops and Products, 2013, 50: 29.

# Chlorophyll Fluorescence-Spectral Characteristics of Vegetables Under Different Fertilizer Treatments

WANG Yuan<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Jin-liang<sup>1, 2, 3\*</sup>

1. College of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

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

3. Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China

**Abstract** The reflectance spectra and chlorophyll fluorescence parameters of *Brassica campestris* L. and *Brassica pekinensis* Rupr. under different fertilization conditions were measured in order to further analyze the growth physiology of vegetables under different fertilization conditions and the response relationship between the spectra and chlorophyll fluorescence. The results show that: (1) In the visible light range, the reflectance spectrum of *Brassica pekinensis* Rupr. increased with the growth and development of vegetables. The reflection spectrum of the *Brassica campestris* L. increased first and then decreased with the growth of vegetables; in the near-infrared range, the reflection of *Brassica campestris* L. and yellow cabbage The spectrum increases with the growth and development of vegetables. (2) Under different fertilization conditions, the spectrum of vegetables was significantly different, and it showed significant performance in the near-infrared band. During the growth period, the reflectance of *Brassica pekinensis* Rupr. was higher at the C3 and C5 levels, and the reflectance of the *Brassica campestris* L. at the C2 and C3 levels was high. At the maturity stage, the spectral reflectance of the *Brassica pekinensis* Rupr. had a higher reflectance at the C5 and C6 levels; the *Brassica campestris* L. was higher at the C3 and C5 levels. (3) The chlorophyll fluorescence parameters  $F_v/F_m$  of *Brassica campestris* L. and *Brassica pekinensis* Rupr. increased with the development of the growth period.  $F_v/F_m$  of *Brassica campestris* L. was the highest at C6 level, and  $F_v/F_m$  of *Brassica pekinensis* Rupr. was the highest at C2 and C6 level. (4) Under different fertilization conditions, the characteristic spectral parameters and chlorophyll fluorescence showed a significant positive and negative correlation. The relationship between chlorophyll fluorescence and spectral characteristics can provide a reference for monitoring the growth physiology and health status of vegetables.

**Keywords** Vegetables; Chlorophyll fluorescence; Spectral characteristics; Relationship; Different fertilizer treatments

(Received Nov. 23, 2019; accepted Apr. 11, 2020)

\* Corresponding author