

# 不同微肥处理下油菜产量与高光谱反射率关系分析

常 涛, 谢 鑫, 官 梅, 张秋平, 张振乾\*, 官春云

湖南农业大学农学院/中国南方粮油作物协同创新中心, 湖南 长沙 410128

**摘要** 油菜是我国第一大国产植物油来源, 大田生产中需要施加适量的微肥以提高产量和品质。筛选出一种可提高油菜产量的微肥配方需要经过复杂的大田统计和产量测定, 因此构建出能快速筛选微肥的模型十分重要。以高油酸油菜“帆鸣1号”为试验材料, 使用地物波谱仪测定了不同微肥条件下全生育期的光谱反射率, 并用乙醇提取法准确测定叶绿素含量。将光谱反射率、叶绿素含量和最终产量性状两两间进行相关性分析。产量测定表明, 施加微肥可以提高油菜产量和蕾薹期时叶绿素的含量, 使单株产量最高提高2%。光谱参数与叶绿素相关性分析表明, 蕊薹期时叶绿素含量与光谱参数550和720 nm相关性较高, 表明蕾薹期光谱参数可用于预测产量进而筛选出能提高油菜产量的微肥。叶绿素含量和产量相关性分析表明, 蕊薹期时, 叶绿素含量与产量相关性较高。光谱参数与产量相关分析表明, 550和720 nm的光谱反射率与产量之间均呈显著负相关性。光谱参数与产量相关分析表明, 550和720 nm的反射率与产量之间均呈显著负相关性。综合分析施肥量、光谱参数、产量和叶绿素变化可知, 蕊薹时光谱参数550和720 nm与产量相关系数模拟的线性方程可用于微肥的筛选, 线性方程分别为 $y = -32.362x + 33.097$ ,  $y = 4.0695x + 35.386$ ,  $y = 28.849x + 23.735$ ,  $y = -19.023x + 31.005$ ,  $y = 12.447x + 24.586$ ,  $R^2$ 均大于0.6。综合分析施肥量、光谱参数、产量和叶绿素变化, 油菜生长至蕾薹期时光谱参数550和720 nm与产量相关系数模拟的线性方程 $R^2 \geq 0.6$ 时的微肥配比可以使产量提升。本研究结果表明, 蕊薹期光谱参数可用于预测产量进而筛选出能提高油菜产量的微肥, 可增加样本量进一步检测相关性并开展后续验证。鉴于地物波谱检测技术具有过程高效, 不使用化学试剂, 无需对样本进行破坏性取样, 成本低, 该模型的建立对开展大规模高油酸油菜微肥配方的快速筛选具有重要意义, 为筛选油菜微肥和促进油菜产量研究提供了理论基础。

**关键词** 微肥; 油菜; 光谱反射率; 叶绿素含量; 产量

**中图分类号:** S-3    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0552-06

## 引言

在油菜种植中存在多施氮磷钾复合肥、放弃施用微肥或微肥施用不足的问题, 导致微肥达到临界值<sup>[1]</sup>。与均衡施肥相比, 土壤中缺少镁、钼、锌、锰、钙的油菜会导致光合作用减弱分别呈现出叶片发黄、植株倒伏严重、角果不结实、病害严重等症状<sup>[2-4]</sup>, 严重影响产量。为了弥补氮磷钾复合肥肥力不足的状况, 开展了不少相关研究, 发现在油菜生长期适当施加叶面微肥对提高油菜最终产量性状有重要作用<sup>[5-6]</sup>, 但筛选合适的微肥需要经过繁琐的大田试验和后续测定, 费时费力。因此, 构建一种能快速筛选微肥的方法十

分重要。

近年来, 如何筛选可以促进油菜产量的微肥成为了栽培研究的一个热点<sup>[7]</sup>。有研究表明, 油菜的产量和叶片叶绿素含量关系密切<sup>[8]</sup>, 可通过对叶片叶绿素含量检测以选择产量较高的微肥材料。但传统测定叶绿素含量的方法比较复杂, 不仅需要经过繁琐的实验室实验, 还要对植物造成破坏性取样, 影响作物后续生长, 无法投入实际应用。本工作前期研究表明<sup>[9]</sup>, 利用高光谱技术进行植被光谱监测, 可监测油菜生长中叶绿素含量的变化以预测产量。以常规油菜“帆鸣1号”为试验材料, 利用高光谱技术分析不同微肥处理下油菜生长情况, 以期筛选出可促进产量增加的微肥。

收稿日期: 2019-11-15, 修订日期: 2020-03-15

基金项目: 油菜化肥农药减施技术集成研究与示范项目(2018YFD0200900), 湖南农业大学南方粮油协同创新中心基金项目(CICP02018006)资助

作者简介: 常 涛, 1994年生, 湖南农业大学农学院/南方粮油作物协同创新中心硕士研究生 e-mail: 522366562@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: zzq770204@163.com

# 1 实验部分

## 1.1 材料

试验材料为“帆鸣1号”，由湖南农业大学油料所提供。

本试验于2018年—2019年度，在湖南农业大学耘园基地进行。试验地位于东经 $113^{\circ}4'$ 、北纬 $28^{\circ}10'$ ，四季分明，年均气温 $17^{\circ}\text{C}$ ，是典型的亚热带季风性气候。试验田为土壤黑色壤土，种植制度为稻油轮作。

试验采用随机区组设计。于2018年12月20日在油菜幼苗期时对油菜喷施叶面肥，喷施量为 $0.3\text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ 。设置镁、钼、锌、锰、钙5种微肥分别为A, B, C, D和E，各三个梯度分别为1, 2和3。镁、钼、锌、锰、钙肥分别使用氯化镁、氯化锰、氯化锌、锰酸钠、氯化钙溶于蒸馏水中。镁、钼肥选择浓度为0.1%，0.3%和0.5%，锌肥浓度为0.3%，0.5%和0.7%，锰肥浓度为0.2%，0.4%和0.6%，钙肥浓度为1%，2%和3%，设不施肥对照小区CK。每个处理3次重复，共48个小区，小区面积为 $2 \times 3\text{ m}^2$ ，单株面积为 $25\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ ，2018年9月30日播种，2019年5月10日收获，按大田管理方式进行管理。

## 1.2 数据采集与处理

分别于幼苗期(10月15日)、5~6叶期(11月15日)、蕾薹期(12月15日)和花期(3月15日)时采用美国ASD FieldSpec Pro FR 2500型背挂式野外地物波谱仪进行高光谱测定。幼苗期、5~6叶期、蕾薹期选择从上往下第3片功能

叶，花期取花和功能叶，每小区共随机采集5次重复，取其平均值，作为该处理下的最终光谱曲线。将经过光谱数据采集的叶片，采摘下来用超纯水清洗，用吸湿纸吸去植株表面水分，在烘箱中 $80^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重。采用萧浪涛等主编植物生理实验中乙醇法<sup>[10]</sup>测定叶绿素含量。含油量测定采取残余法(国标GB/T 3554—2008)。

## 1.3 方法

产量性状分析差异分析采用新复极差法(shorest significant ranges, SSR)法，相关性分析采用Excel 2010中Correl函数分析。

# 2 结果与讨论

## 2.1 微肥处理对产量与产量构成要素的影响

不同微肥条件下油菜产量与产量构成要素变化结果见表1。由表1可知，不同微肥改变油菜产量与产油量，对含油量和千粒重影响不显著。施加镁肥时，A3产量和产油量显著高于A1和A2，比对照增加2.2%。施加钼肥时，B3产量和产油量显著高于B1和B2，比对照增加2.0%。施加锌肥时，C3产量显著高于C1和C2，比对照增加1.8%。施加锰肥时，D1产量和产油量显著高于D2和D3，比对照增加1.0%。施加钙肥时，E1产量和产油量显著高于E2和E3比对照增加1.6%。A3, B3, C3, D1和E1条件适用于幼苗期喷施增加产量。

表1 微肥处理对产量与产量构成要素的影响

Table 1 Effect of micro fertilizer treatment on Yield and yield components

肥料种类	含油量/%	千粒重/g	单株产量/kg	单株产油量/kg
CK	$47.2 \pm 2.36\text{ab}$	$3.3 \pm 0.16\text{a}$	$26.2 \pm 1.17\text{a}$	$9.5 \pm 0.47\text{h}$
A1	$38.3 \pm 1.91\text{g}$	$3.6 \pm 0.18\text{a}$	$25.9 \pm 1.09\text{a}$	$10.6 \pm 0.53\text{f}$
A2	$45.1 \pm 2.25\text{ab}$	$3.8 \pm 0.19\text{a}$	$26.3 \pm 1.14\text{a}$	$12.1 \pm 0.61\text{d}$
A3	$40.9 \pm 2.04\text{defg}$	$4.3 \pm 0.21\text{a}$	$26.8 \pm 1.19\text{a}$	$12.7 \pm 0.63\text{c}$
B1	$47.1 \pm 2.35\text{ab}$	$3.5 \pm 0.17\text{a}$	$18.8 \pm 0.94\text{cd}$	$8.9 \pm 0.44\text{i}$
B2	$43.7 \pm 2.18\text{abcd}$	$4.2 \pm 0.21\text{a}$	$26.1 \pm 1.31\text{a}$	$12.7 \pm 0.63\text{c}$
B3	$44.2 \pm 2.21\text{abc}$	$4.5 \pm 0.22\text{a}$	$26.7 \pm 1.46\text{a}$	$16.0 \pm 0.79\text{a}$
C1	$47.4 \pm 2.37\text{a}$	$3.8 \pm 0.19\text{a}$	$17.1 \pm 0.85\text{d}$	$8.1 \pm 0.41\text{j}$
C2	$40.3 \pm 2.01\text{efg}$	$4.4 \pm 0.22\text{a}$	$25.6 \pm 1.28\text{b}$	$10.3 \pm 0.51\text{g}$
C3	$41.4 \pm 2.07\text{cdrf}$	$4.8 \pm 0.24\text{a}$	$26.5 \pm 1.31\text{a}$	$10.8 \pm 0.54\text{f}$
D1	$47.0 \pm 2.35\text{ab}$	$3.8 \pm 0.19\text{a}$	$26.3 \pm 1.36\text{a}$	$13.8 \pm 0.69\text{b}$
D2	$39.3 \pm 1.96\text{fg}$	$3.4 \pm 0.17\text{a}$	$15.7 \pm 0.78\text{d}$	$6.1 \pm 0.31\text{k}$
D3	$42.8 \pm 2.14\text{bcdef}$	$3.9 \pm 0.19\text{a}$	$18.7 \pm 0.93\text{cd}$	$8.1 \pm 0.40\text{j}$
E1	$44.9 \pm 2.24\text{ab}$	$3.7 \pm 0.18\text{a}$	$26.4 \pm 1.31\text{a}$	$11.7 \pm 0.58\text{e}$
E2	$39.9 \pm 1.99\text{fg}$	$3.5 \pm 0.17\text{a}$	$15.8 \pm 0.79\text{d}$	$6.3 \pm 0.31\text{k}$
E3	$43.2 \pm 2.16\text{abcde}$	$4.1 \pm 0.18\text{a}$	$20.4 \pm 1.02\text{c}$	$8.8 \pm 0.44\text{i}$

注：不同小写字母表示同一列间差异达5%显著水平

Note: Different letters in the same column are significantly different at 0.05 level

## 2.2 产量和叶绿素含量的关系

对15种施肥条件的产量和叶绿素含量进行相关性分析结果见表2。由表2可知，蕾薹期时，相同施肥条件下的产量

和叶绿素含量的相关性普遍高于其他生育期。同时A3, B3, C3, D1和E1条件下相关性均高于其他生育期。说明蕾薹期时产量与叶绿素相关性更高。可选择该生育期进行后续分析。

**表 2 不同生育期产量与叶绿素含量的相关性检验结果****Table 2 Correlation test results of yield and chlorophyll in different growth periods**

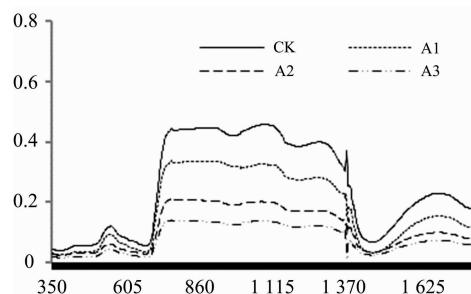
肥料种类	幼苗期	5~6 叶期	蕾薹期	花期(叶片)
对照	0.342	0.187	0.668*	0.307
A1	0.505	0.616*	0.462	0.251
镁 A2	0.278	0.468	0.625*	0.485
A3	0.462	0.408	0.824*	0.661*
B1	0.569	0.474	0.409	0.053
锰 B2	0.048	0.472	0.424	0.418
B3	0.385	0.111	0.845*	0.373
C1	0.607*	0.416	0.902**	0.597
锌 C2	0.716*	0.559	0.474	0.377
C3	0.425	0.659*	0.739*	0.638*
D1	0.356	0.553	0.786*	0.694*
钼 D2	0.335	0.279	0.622*	0.343
D3	0.419	0.435	0.496	0.511
E1	0.186	0.352	0.704*	0.194
钙 E2	0.029	0.243	0.586	0.145
E3	0.069	0.321	0.733*	0.206

注: \*\* 表示通过 0.01 极显著水平, \* 表示通过 0.05 显著水平。

Note: \*\* means passing 0.01 extremely significant level, \* means passing 0.05 significant level.

### 2.3 蕊薹期高光谱特性

采用高光谱测定方法在油菜冠层光谱, 不同叶面肥条件下光谱反射率有明显差异, 如图 1—图 5 所示。整体曲线呈现出绿色植物典型的“两峰三谷”, 与以往报道研究<sup>[13]</sup>一致。波长为 520~600 nm(绿光)处, 存在一个明显的反射峰, 其原因是一小部分绿光被反射, 导致叶片呈绿色。550 nm 附近的绿色吸收峰随叶绿素和产量的相关性变化而变化。

**图 1 蕊薹期镁肥条件下高光谱反射率曲线****Fig. 1 The hyperspectral reflectance curve of magnesium fertilizer at bolting stage**

### 2.4 叶绿素含量和光谱的关系

按照相关报道命名确定的油菜高光谱反射峰的特征波段, “红边”、“绿峰”与叶绿素含量相关性分析见表 3。由表 3 可知, 五种施肥条件下, 叶绿素含量与光谱参数负相关性均超过了 0.8。说明在这些条件下光谱响应较为敏感, 结果可靠。

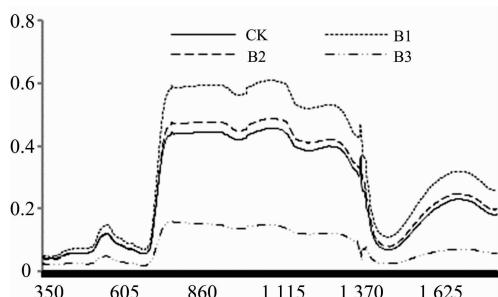
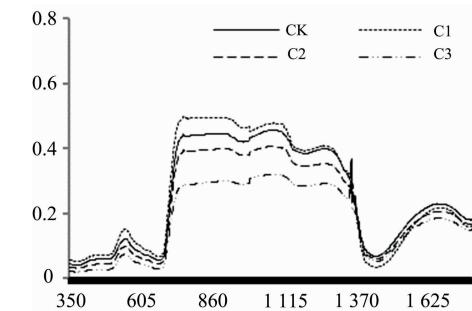
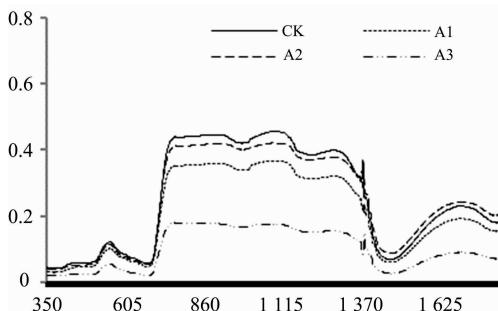
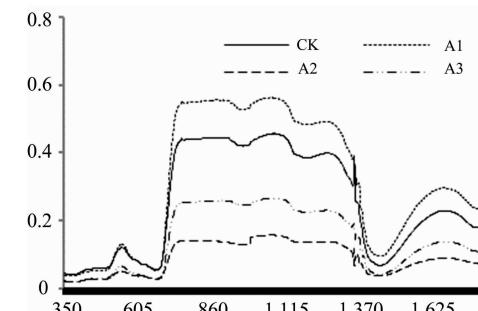
**图 2 蕊薹期钼肥条件下高光谱反射率曲线****Fig. 2 The hyperspectral reflectance curve of molybdenum fertilizer at bolting stage****图 3 蕊薹期锌肥条件下高光谱反射率曲线****Fig. 3 The hyperspectral reflectance curve of zinc fertilizer at bolting stage****图 4 蕊薹期锰肥条件下高光谱反射率曲线****Fig. 4 The hyperspectral reflectance curve of manganese fertilizer at bolting stage****图 5 蕊薹期钙肥条件下高光谱反射率曲线****Fig. 5 The hyperspectral reflectance curve of calcium fertilizer at bolting stage**

表3 蕺薹期叶绿素含量与光谱参数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of chlorophyll content and spectral parameters in bolting stage

肥料种类	红边	绿峰
A3	-0.892*	-0.854*
B3	-0.872*	-0.843*
C3	-0.852*	-0.894*
D1	-0.935**	-0.846*
E1	-0.913**	-0.823*

注: \*\* 表示通过 0.01 极显著水平, \* 表示通过 0.05 显著水平

Note: \*\* means passing 0.01 extremely significant level, \* means passing 0.05 significant level

## 2.5 光谱反射率与产量的关系

5 种条件下油菜“红边”、“绿峰”的峰值与产量进行相关分析结果见表 4。由表 4 可知, 蕺薹期时光谱参数与产量负相关程度均达到 0.6 以上, 产量随着薹期“红边”反射率降低或“绿峰”反射率的增加而增加。这说明薹期叶片进行光

合作用吸收的绿色光越多, 对后期产量的影响作用越大。

对相关系数达到 0.6 以上的光谱参数和产量进行回归模拟结果见表 5 和表 6。由表 5 和表 6 可知, 蕺薹期“红边”、“绿峰”和的回归方程决定系数系数  $R^2$  均在 0.6 以上, 可用于产量的预测。

表4 蕺薹期时光谱参数与产量相关性分析

Table 4 Correlation analysis of time spectrum parameters and yield in bolting stage

肥料种类	红边	绿峰
A3	-0.626*	-0.649*
B3	-0.725*	-0.643*
C3	-0.621*	-0.714*
D1	-0.651*	-0.846*
E1	-0.637*	-0.623*

注: \*\* 表示通过 0.01 极显著水平, \* 表示通过 0.05 显著水平

Note: \*\* means passing 0.01 extremely significant level, \* means passing 0.05 significant level

表5 “红边”与产量相关性拟合模型

Table 5 “Red edge” and yield correlation fitting model

肥料种类	线性函数	指数函数	对数函数	幂函数
A3	$y = -16.328x + 33.216$ , $R^2 = 0.650$	$y = 33.246e^{-0.516x}$ , $R^2 = 0.534$	$y = -1.65\ln(x) + 27.654$ , $R^2 = 0.352$	$y = 27.889x^{-0.052}$ , $R^2 = 0.695$
B3	$y = 1.8203x + 35.388$ , $R^2 = 0.715$	$y = 35.388e^{0.0511x}$ , $R^2 = 0.154$	$y = 0.1808\ln(x) + 36.012$ , $R^2 = 0.211$	$y = 36.014x^{0.0051}$ , $R^2 = 0.621$
C3	$y = 12.801x + 23.316$ , $R^2 = 0.824$	$y = 23.433e^{0.4943x}$ , $R^2 = 0.267$	$y = 2.1934\ln(x) + 29.472$ , $R^2 = 0.537$	$y = 29.726x^{0.0848}$ , $R^2 = 0.757$
D1	$y = -8.4801x + 31.142$ , $R^2 = 0.690$	$y = 31.188e^{-0.29x}$ , $R^2 = 0.557$	$y = -2.161\ln(x) + 25.888$ , $R^2 = 0.584$	$y = 26.068x^{-0.074}$ , $R^2 = 0.782$
E1	$y = 3.6666x + 24.885$ , $R^2 = 0.616$	$y = 24.918e^{0.1396x}$ , $R^2 = 0.512$	$y = 1.2266\ln(x) + 27.499$ , $R^2 = 0.181$	$y = 27.527x^{0.0468}$ , $R^2 = 0.6245$

表6 “绿峰”与产量相关性拟合模型

Table 6 “Green peak” and yield correlation fitting model

肥料种类	线性函数	指数函数	对数函数	幂函数
A3	$y = -32.362x + 33.097$ , $R^2 = 0.666$	$y = 33.121e^{-1.023x}$ , $R^2 = 0.503$	$y = -1.656\ln(x) + 26.366$ , $R^2 = 0.482$	$y = 26.775x^{-0.052}$ , $R^2 = 0.751$
B3	$y = 4.0695x + 35.386$ , $R^2 = 0.601$	$y = 35.387e^{0.1143x}$ , $R^2 = 0.419$	$y = 0.1927\ln(x) + 36.191$ , $R^2 = 0.173$	$y = 36.195x^{0.0054}$ , $R^2 = 0.178$
C3	$y = 28.849x + 23.735$ , $R^2 = 0.613$	$y = 23.826e^{1.1079x}$ , $R^2 = 0.483$	$y = 1.8231\ln(x) + 30.672$ , $R^2 = 0.096$	$y = 31.096x^{0.07}$ , $R^2 = 0.048$
D1	$y = -19.023x + 31.005$ , $R^2 = 0.644$	$y = 31.047e^{-0.651x}$ , $R^2 = 0.516$	$y = -2.094\ln(x) + 24.147$ , $R^2 = 0.268$	$y = 24.557x^{-0.072}$ , $R^2 = 0.331$
E1	$y = 12.447x + 24.586$ , $R^2 = 0.663$	$y = 24.639e^{0.4726x}$ , $R^2 = 0.678$	$y = 1.552\ln(x) + 29.412$ , $R^2 = 0.498$	$y = 29.598x^{0.059}$ , $R^2 = 0.557$

本研究基于光谱变量筛选出来的特征参数将数据随机分为两组, 总样本的 2/3(约 110 株)用于建模, 剩余 1/3(50 株)用于模型验证。验证结果表明, 光谱参数和产量相关系数  $R^2$  为 0.686。50 株单株中, 有 39 株产量大于不施肥的原产量。即用薹期时光谱参数“红边”和“绿峰”与产量相关系数模拟的线性方程  $R^2 \geq 0.6$  时进行肥料筛选, 结果有 78% 的

准确性。

有研究表明, 光谱反射率可以用于预测叶绿素含量进而预测产量<sup>[11]</sup>。龚冀等<sup>[12]</sup>综合油菜角果期和开花期建立的二元估产模型, 可以较为准确地对油菜产量进行估算。李岗涛等<sup>[13]</sup>综合了油菜不同试验年份、地点、种植方式和氮素水平下的油菜冠层光谱反射率、产量及其构成因子, 筛选出了

与角系数相关性较大的特征波段，也构建了较为理想的模型。这些研究为高光谱遥感预测油菜产量提供了理论依据，并减少了高光谱数据处理的工作量。本研究表明，光谱参数、叶绿素和产量两两间相关性均达到显著，与前人研究一致<sup>[9]</sup>，证明光谱参数可通过对预测叶绿素的含量进而预测产量，为优良材料的筛选提供参考。

本研究构建了不同微肥条件下，产量和特征光谱波段之间的联系。结果表明：“红边”、“绿峰”与产量间的线性拟合系数均大于 0.6，说明相关性较高，可用与产量预测。即当“红边”、“绿峰”和产量间线性拟合系数  $R^2 \geq 0.6$  的微肥条件时，可增加产量。本研究中，低浓度镁、锰、锌肥以及高浓度钼、钙肥条件下光谱参数与产量间的相关性较低，其原因可能有以下两点：(1)低浓度叶面肥的局限性。镁、锰、锌肥含量较少，喷施液在叶面迅速干燥，易被雨水或露水淋失，导致叶面吸收养分穿透率低、吸收量少，难以从吸收部位向其他部位转移，需多次喷施。(2)高浓度叶面肥会抑制油菜生长，钼、钙肥含量过高不仅没有起到增产的作用，反而抑制

了生产。研究发现蕾薹期时喷施微肥以提高产量的条件可通过光谱参数快速识别，相关性高，适用于筛选可提高油菜产量的微肥。

### 3 结 论

研究结果表明，施加微肥可以提高油菜产量和蕾薹期时叶绿素的含量，蕾薹期时叶绿素含量与光谱参数 550 和 720 nm 相关性较高，表明蕾薹期光谱参数可用于预测产量进而筛选出能提高油菜产量的微肥，可增加样本量进一步检测相关性并开展后续验证。光谱参数与产量相关分析表明，550 和 720 nm 的反射率与产量之间均呈显著负相关性。综合分析施肥量、光谱参数、产量和叶绿素变化可知，蕾薹时光谱参数 550 和 720 nm 与产量相关系数模拟的线性方程可用微肥的筛选，即线性方程  $R^2 \geq 0.6$  时可以提高产量。本研究结果为筛选油菜微肥和促进油菜产量研究提供了理论基础。

### References

- [1] Selma Cadot, Gilles Bélanger, Noura Ziadi, et al. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 112(66): 417.
- [2] Brent N kaiser, Kate L Gridley, Joanne Ngaire-brady, et al. Annals of Botany, 2005, 96(5): 745.
- [3] DONG Ru-yin, XU Ying-ming, WANG Lin, et al(董如茵, 徐应明, 王 林, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2015, 35(8): 2589.
- [4] Abbasi M Kaleem, Manzoor M. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, 10(5): 961.
- [5] XUE Xin-xin, WU Xiao-ping, WANG Wen-bin, et al(薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等). Soils(土壤), 2019, 51(1): 1.
- [6] Banerjee Arnab, Datta Jayanta-kumar, Mondal Naba-kumar. Frontiers of Agriculture in China, 2010, 4(3): 341.
- [7] Yukiko Sasaji, Akiko Kozaki, Mik Hatano. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1997, 94(20): 11096.
- [8] LIU Lai, ZHANG Wen-jun, WANG Wei-hong, et al(刘 来, 张文君, 王卫红, 等). Chinese Journal of Oil Crop Sciences(中国油料作物学报), 2019, 41(1): 46.
- [9] CHANG Tao, WANG Yue, CHENG Qian, et al(常 涛, 王 悅, 程 潜, 等). Acta Laser Biology Sinica(激光生物学报), 2018, 27 (6): 34.
- [10] XIAO Lang-tao, WANG San-gen(肖浪涛, 王三根). Experimental Techniques of Plant Physiology(植物生理学实验技术). Fourth Edition(第 4 版). Beijing: China Agricultural Press(北京: 中国农业出版社), 2014. 110.
- [11] ZHANG Yong-he, GUO Xiao-chuan, CHU Wu-dao, et al(张永贺, 郭啸川, 褚武道, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2013, 42(3): 798.
- [12] GONG Yan, SHU Ning, WANG Yan, et al(龚 瓯, 舒 宁, 王 燕, 等). Acta Geodaetica et Cartographica Sinica(测绘学报), 2013, 42(1): 101.
- [13] LI Lan-tao, LI Jing, MING Jin, et al(李岚涛, 李 静, 明 金, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2018, 49(2): 156.

# Analysis of the Relationship Between Hyperspectral Reflectance and Yield of Rape Under Different Micro Fertilizer Conditions

CHANG Tao, XIE Xin, GUAN Mei, ZHANG Qiu-ping, ZHANG Zhen-qian\*, GUAN Chun-yun

College of Agriculture, Hunan Agricultural University/Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China

**Abstract** Rape is the largest domestic plant oil source in China. It is necessary to apply appropriate micro fertilizer in field production to improve yield and quality. It is very important to build a model which can quickly screen the micronutrient fertilizer to improve the yield of rape. In this research, the spectral reflectance of high oleic acid rape “FanMing No. 1” in the whole growth period under different micro fertilizer conditions was measured by ground object spectrometer. And chlorophyll content was accurately determined by ethanol extraction method. The correlation between spectral reflectance, chlorophyll content and final yield was analyzed. The yield test showed that the application of micro fertilizer could increase the yield of rape and the content of chlorophyll at the bolting stage. It could increase the yield of a single plant by up to 2%. The correlation analysis of spectral parameters and chlorophyll showed that the correlation between chlorophyll content and spectral parameters was high at 550 and 720 nm, which indicated that the spectral parameters could be used to predict yield and screen out the micro fertilizer which could improve the yield of rape. The correlation analysis of chlorophyll content and yield showed that the correlation between chlorophyll content and yield was high at the bolting stage. The correlation analysis between the spectral parameters and the yield showed that there was a significant negative correlation between the reflectivity of 550 and 720 nm and the yield. The correlation analysis between the spectral parameters and the yield showed that there was a significant negative correlation between the reflectivity of 550 and 720 nm and the yield. Comprehensive analysis of fertilization, spectral parameters, yield and chlorophyll changes showed that the linear equation of the correlation coefficient between the spectral parameters 550 and 720 nm and yield could be used to screen the micro fertilizer, and the linear equation was  $y = -32.362x + 33.097$ ,  $y = 4.0695x + 35.386$ ,  $y = 28.849x + 23.735$ ,  $y = -19.023x + 31.005$ ,  $y = 12.447x + 24.586$ , and  $R^2$  was greater than 0.6. Comprehensive analysis of fertilization, spectral parameters, yield and chlorophyll changes showed that the yield of rape increased when the linear equation  $R^2 \geq 0.6$ , which was stimulated by the spectral parameters 550 and 720 nm and the yield correlation coefficient, was applied. The results show that the spectral parameters of bolting stage can be used to predict the yield and then screen out the micronutrient fertilizer that can improve the yield of rape, which will increase the sample size to further detect the correlation and carry out subsequent verification. In view of the high efficiency of the process with no chemical reagents and destructive sampling of the samples and low cost, the establishment of the model is of great significance for the rapid screening of the formulation of high oleic acid rape micronutrient fertilizer, which provides a theoretical basis for screening the micronutrient fertilizer and promoting the yield of rape.

**Keywords** Microelement fertilizer; Rape; Spectral reflectance; Chlorophyll content; Yield

(Received Nov. 15, 2019; accepted Mar. 15, 2020)

\* Corresponding author