

DOI: 10.5846/stxb201901110095

袁小康,周广胜,王秋玲,何奇瑾.不同灌溉量夏玉米叶绿素含量的高光谱特征及其反演.生态学报,2021,41(2):543-552.

Yuan X K, Zhou G S, Wang Q L, He Q J. Hyperspectral characteristics of chlorophyll content in summer maize under different water irrigation conditions and its inversion. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 543-552.

# 不同灌溉量夏玉米叶绿素含量的高光谱特征及其反演

袁小康<sup>1,2,5</sup>, 周广胜<sup>2,3,\*</sup>, 王秋玲<sup>2</sup>, 何奇瑾<sup>4</sup>

1 湖南省气象科学研究所, 长沙 410118

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预警协同创新中心, 南京 210044

4 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

5 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118

**摘要:**植物叶绿素含量直接影响其光合作用,并与植物的光谱特征密切相关。以夏玉米为研究对象,采用人工控水方法研究了夏玉米七叶期不同灌溉量下冠层叶绿素含量特征及其与光谱特征之间的关系。结果表明:灌溉量越少,夏玉米叶片叶绿素含量越低,冠层光谱反射率越高,绿峰位置“红移”,而红边位置“蓝移”。叶绿素含量与光谱特征参数、植被光谱指数之间存在极显著相关关系,据此建立了冠层叶绿素含量高光谱估算模型,且基于植被指数模型较基于单一光谱特征参数模型模拟效果更好。研究结果可为夏玉米叶绿素含量的快速无损测定以及夏玉米干旱监测提供依据。

**关键词:**夏玉米;不同灌溉量;叶绿素含量;高光谱特征;反演模型

## Hyperspectral characteristics of chlorophyll content in summer maize under different water irrigation conditions and its inversion

YUAN Xiaokang<sup>1,2,5</sup>, ZHOU Guangsheng<sup>2,3,\*</sup>, WANG Qiuling<sup>2</sup>, HE Qijin<sup>4</sup>

1 Hunan Research Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410118, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3 Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

4 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

5 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410118, China

**Abstract:** Plant chlorophyll content directly affects its photosynthesis and is closely related to the spectral characteristics of plants. In this study, summer maize was used as the research object, and the characteristics of chlorophyll content and its spectral characteristics under different water irrigations of summer maize at seven-leaf stage were studied by the water control method. The results showed that with the decrease of water irrigation, the chlorophyll content of the summer maize canopy leaves decreased and the spectral reflectance of the canopy increased. At the same time, the green peak position was “red shifted”, but the red edge position was “blue shifted”. There was a significant relationship of chlorophyll content with spectral characteristic parameters and vegetation spectral index. Based on these relationships, several hyperspectral inversion models of canopy chlorophyll content were established. The model validations indicated that canopy chlorophyll content was simulated better by vegetation index than single spectral characteristic parameter. The results provide the basis

**基金项目:**国家重点专项项目(2016YFD0300106);国家自然科学基金项(41501047,31661143028,41571175)

**收稿日期:**2019-01-11; **修订日期:**2020-02-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhousg@cma.gov.cn

for rapid non-destructive determination of chlorophyll content in summer maize and drought monitoring of summer maize production.

**Key Words:** summer maize; different irrigations; chlorophyll content; hyperspectral characteristics; inverse model

叶绿素含量多寡对植物光合作用能力具有指示作用<sup>[1]</sup>,快速、准确地测量植物叶片的叶绿素含量在生态学、农学及林学等领域均具有重要的应用价值。研究表明,植物光谱特征与叶绿素含量关系密切<sup>[2-6]</sup>;体现在叶绿素变化敏感波段或者由此衍生的敏感指数与叶绿素含量关系方面<sup>[7-8]</sup>,或一阶微分光谱与叶绿素含量关系方面<sup>[9-10]</sup>,或光谱特征参数(如红边位置、蓝边位置等)与叶绿素含量关系方面<sup>[11-14]</sup>。

干旱胁迫下小麦<sup>[15]</sup>、草坪草<sup>[16-17]</sup>、大豆<sup>[18]</sup>、烤烟<sup>[19]</sup>、雷竹<sup>[20]</sup>、白术<sup>[21]</sup>等的叶片叶绿素含量与光谱特征显著相关,并由此建立叶绿素含量光谱估算模型,而干旱胁迫下玉米叶片光谱响应特征及其与叶绿素含量的关系鲜见报道。干旱是影响我国北方夏玉米生长发育、产量和品质的主要因素之一<sup>[22-24]</sup>。弄清玉米叶绿素含量对干旱胁迫的高光谱响应,并据此建立叶绿素含量反演模型,对大田玉米生长状况的诊断及精确管理具有重要意义。为此,本研究基于夏玉米七叶期开始的多个水分灌溉模拟实验,分析不同灌溉量下夏玉米冠层光谱特征及其叶绿素含量的变化规律,根据多个生育期的光谱和叶绿素含量数据,建立统一的建立基于高光谱特征的夏玉米冠层叶绿素含量反演模型,为实际生产过程中夏玉米叶绿素含量动态监测提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点

本研究在中国气象科学研究院固城生态与农业气象试验站的水分试验场进行。该站位于河北省定兴县固城镇(39°08'N,115°40'E,海拔 15.2m),属温带大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温 13.6℃,年降水量 494mm,其中夏季降水量占 70%,7 月份降水量最多(约 150mm)。试验场设有大型电动遮雨棚,占地 750m<sup>2</sup>,共设 42 个试验小区,小区面积 8m<sup>2</sup>(4m×2m),小区之间筑有 3m 深混凝土隔离墙,避免水分水平交换。试验场土壤类型为砂壤土,含有机碳 13.67g/kg,全氮 0.87g/kg,有效磷 25.76mg/kg,有效钾 118.55 mg/kg,pH 值 8.1,平均土壤容重 1.37g/cm<sup>3</sup>,0—30cm 平均田间持水量为 21.23%<sup>[25]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验于 2013 年 6—10 月开展,供试夏玉米品种为郑单 958,由固城生态与农业气象试验站提供。6 月 27 日进行播种,10 月 8 日收获。小区玉米行距为 50cm,株距为 30cm,每小区 52 株玉米。播种前一次性施磷酸二铵 300kg/hm<sup>2</sup>。苗期各小区适当灌溉,土壤水分保持在保持在适宜水平(田间持水量的 70%左右),保证苗齐、苗壮<sup>[26]</sup>。于 2013 年 7 月 24 日(七叶期)按照当地 7 月份多年平均降水量的 53%、40%、17%、10%,即按照 80、60、25mm 和 15mm 进行一次性灌溉,形成 4 个初始土壤水分梯度(处理 2—5),此后不再灌溉,并在全生育期用大型电动遮雨棚遮挡自然降水;同时以自然降水(不灌水,未用遮雨棚遮挡)作为处理 1(表 1)。每个处理设 3 个重复小区,不同处理的小区随机排列。定期用烘干称重法测定土壤含水量,每个小区在两行玉米中间选取 1 个取样点,用土钻钻取 10、20、30、40 cm 和 50 cm 深土样,取 5 个土层土壤相对湿度的平均值作为该小区的土壤相对湿度。

### 1.3 光谱的采集与预处理

本试验采用美国 ASD 公司的 Field Spec Pro3 光谱仪采集玉米光谱反射率数据,其测量的波长范围为 350—2500 nm。去除受外界噪声影响较大的波 1301—2500 nm,取 350—1300 nm。这一波段包括了遥感常用的可见光和近红外波段,可满足本研究分析需要。试验选择晴朗无云或少云的天气,于 10:00—12:00,分别在拔节期(8 月 8 日、8 月 18 日)、抽雄期(8 月 25 日)、乳熟期(9 月 5 日、9 月 20 日)和成熟期(10 月 8 日)测定夏玉米冠层光谱反射率。测定时光谱仪探头垂直向下,距玉米冠层顶部垂直高度约 70 cm,为消除外界干

扰以保证精度,对每个样品同时采集 20 条光谱曲线,取平均后作为该样品的代表性光谱曲线,测量时及时进行标准白板校正。

表 1 夏玉米七叶期不同灌溉量处理方式

Table 1 The different water irrigation conditions on summer maize in seven-leaf stage

| 处理<br>Treatment | 处理前土壤湿度<br>Soil moisture before the experiment | 试验处理方式<br>Treatments of the experiment |
|-----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|
| T1              | 定期钻土测定土壤湿度,并计算浇水量,使土壤相对湿度保持在田间持水量的 70%左右       | 自然降水,未用遮雨棚挡雨                           |
| T2              | 定期钻土测定土壤湿度,并计算浇水量,使土壤相对湿度保持在田间持水量的 70%左右       | 七叶期一次性灌水 80mm,此后不再浇水,并用遮雨棚挡雨           |
| T3              | 定期钻土测定土壤湿度,并计算浇水量,使土壤相对湿度保持在田间持水量的 70%左右       | 七叶期一次性灌水 60mm,此后不再浇水,并用遮雨棚挡雨           |
| T4              | 定期钻土测定土壤湿度,并计算浇水量,使土壤相对湿度保持在田间持水量的 70%左右       | 七叶期一次性灌水 25mm,此后不再浇水,并用遮雨棚挡雨           |
| T5              | 定期钻土测定土壤湿度,并计算浇水量,使土壤相对湿度保持在田间持水量的 70%左右       | 七叶期一次性灌水 15mm,此后不再浇水,并用遮雨棚挡雨           |

#### 1.4 叶绿素含量的测定

测量光谱的同时,采用对植物无破坏性的 SPAD-502 叶绿素仪测定玉米叶绿素 SPAD 值,在光谱仪探头所能辐射的范围内,选取不同方向的玉米叶片各 3 个,每个叶片随机选取 10 个点测定其 SPAD,最终取 3 个叶片的平均值代表该玉米叶片叶绿素含量。

#### 1.5 光谱参数

本研究选取原始光谱、光谱一阶微分以及应用较广泛的基于光谱位置、光谱面积及基于植被指数等高光谱参数,作为估算玉米叶片叶绿素的参数。采用公式(1)对原始光谱数据进行一阶微分计算:

$$R' = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{(\lambda_{i+1} - \lambda_i) + (\lambda_i - \lambda_{i-1})} = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中, $R_i$ :第  $i$  nm 处光谱反射率; $R'$ : $R_i$ 的一阶微分; $\lambda_i$ :第  $i$  个通道的波长。

#### 1.6 模型检验

用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)对预测模型进行精度检验,计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{y}_i - y_i|}{y_i} \quad (3)$$

式中, $\bar{y}_i$ 、 $y_i$ 分别为估计值和实测值, $n$  为样本个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水量下土壤相对湿度变化

不同灌水量处理下土壤相对湿度变化如图 1 所示,T1(自然降水)处理土壤相对湿度在整个试验过程中均最大,且保持在 70%以上,说明 T1 处理下玉米未受水分胁迫。T2、T3、T4 和 T5 在灌水处理前土壤相对湿度都非常接近,经不同程度灌水后,土壤相对湿度立即增大(处理后 5d),然后逐渐降低。在整个试验过程中,T2、T3、T4 和 T5 处理的土壤相对湿度大小均与灌水量多少一致,即灌水多,土壤湿度大,说明灌水处理效果良好。

### 2.2 不同灌水量下夏玉米叶片叶绿素含量变化

表 2 是夏玉米叶片叶绿素含量对水分胁迫的响应。从拔节期到成熟期,夏玉米叶片叶绿素含量均随水分

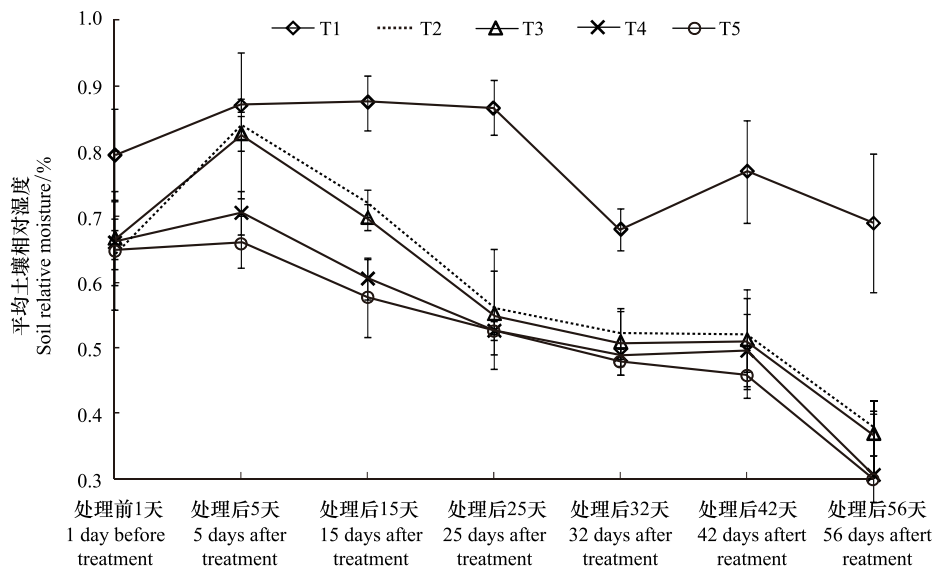


图1 不同灌水量处理下土壤相对湿度变化

Fig.1 Changes of soil relative moisture under different water irrigation treatments

胁迫程度的增大而降低,处理 2、3、4、5 的叶绿素含量与处理 1 差异显著。随生育期的推进,各处理下玉米叶片叶绿素含量呈现先增加后减少的趋势。

表 2 不同灌水量处理下夏玉米叶片叶绿素含量

Table 2 Chlorophyll content of summer maize under different water irrigation treatments

|                      | 处理 Treatment |             |             |             |              |
|----------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
|                      | T1           | T2          | T3          | T4          | T5           |
| 拔节期 Jointing stage   | 40.50±2.22a  | 34.53±1.75b | 34.67±1.45b | 35.50±1.41b | 33.90±2.29b  |
| 抽雄期 Tasseling stage  | 43.71±1.10a  | 36.01±2.78b | 35.40±2.22b | 34.63±2.11b | 32.23±1.45b  |
| 乳熟期 Milk stage       | 41.58±1.31a  | 35.43±2.22b | 35.70±2.73b | 32.01±2.44b | 33.67±2.01 b |
| 成熟期 Maturation stage | 25.08±3.42a  | 23.22±3.00b | 20.31±2.56b | 17.49±2.74c | 15.25±2.85c  |

不同小写字母表示差异显著性通过 0.05 水平检验

2.3 不同灌水量下夏玉米冠层原始光谱变化

由图 2 知,夏玉米在拔节期、抽雄期和乳熟期的光谱反射率体现了绿色植物的光谱特征:在可见光波段存在明显的“绿峰”、“红谷”,即在 550nm 附近(绿光波段)存在一个反射峰,在 680nm 附近(红光波段)存在一个反射谷<sup>[27]</sup>。而在成熟期,“红谷”明显,而“绿峰”不明显。各处理下夏玉米冠层反射光谱率随波长的变化趋势保持一致,即在可见光波段,不同灌水处理下夏玉米冠层反射率低且差别小,在近红外反射平台(750—1300nm),反射率数值陡增,形成一个反射率较高的平台。

不同灌水量处理对夏玉米冠层光谱反射率大小有明显的影响。从拔节期到成熟期,光谱反射率均体现一个规律:在可见光大部分波段(400—680 nm)及红外波段,光谱反射率在不同处理间呈现明显差异,随着水分胁迫程度加重,光谱反射率随之增加。在 680—750 nm 波段,光谱反射率急剧增大,但不同处理间光谱反射率差异较小。从拔节期到乳熟期,随玉米生育期的推进,光谱反射率大小随生育期推进逐渐减少。但进入成熟期后,光谱反射率略微增大。不同水分胁迫处理对夏玉米冠层反射光谱“绿峰”位置也有影响,随水分胁迫程度的增加,“绿峰”位置“红移”,即绿峰位置向红光波段偏移。如在拔节期,处理 1 的绿峰位置为 550nm,而处理 2、处理 3、处理 4 和处理 5 的绿峰位置分别是 554、556、557nm 和 559nm,与处理 1 相比,处理 2 到处理 5 的

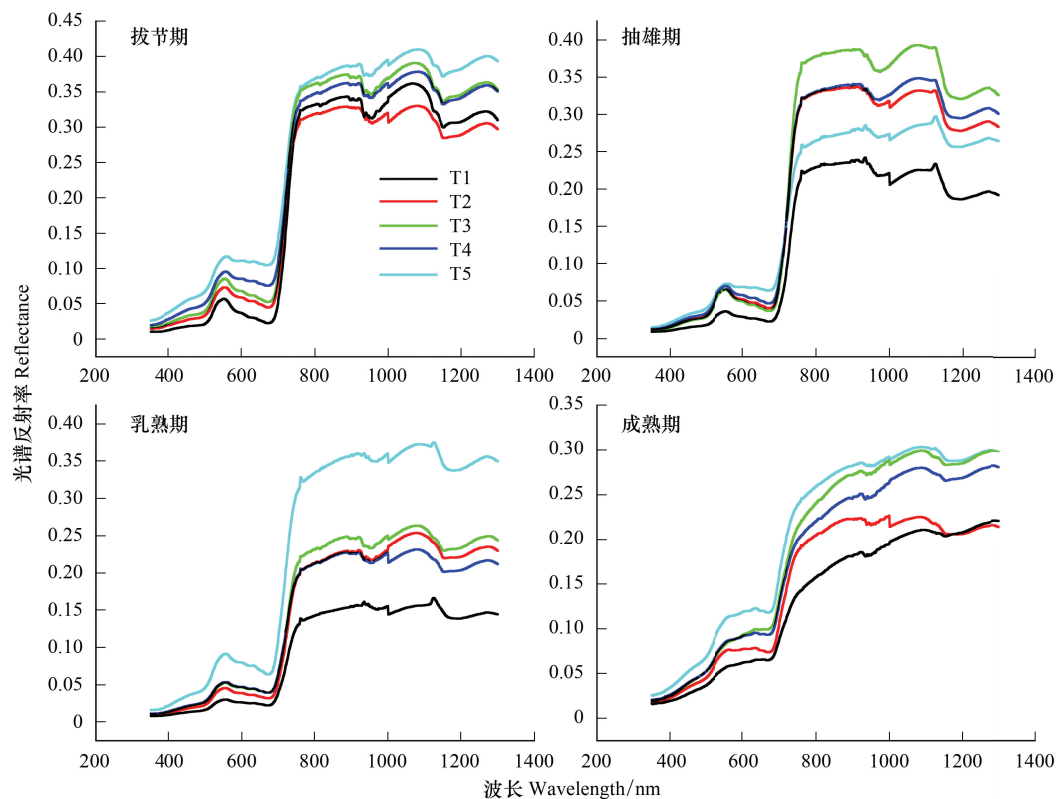


图2 不同灌水量处理下夏玉米在不同生育期光谱反射率

Fig.2 Spectra of summer maize canopy at different developmental stages under different water irrigation treatments

“绿峰”位置均向红光波段偏移。

#### 2.4 不同灌水量下夏玉米冠层不同生育期红边特征变化

图3是不同灌水量下夏玉米冠层一阶微分光谱(以拔节期为例)。由图3知,不同处理下夏玉米冠层一阶微分光谱均明显体现出“三边”特征。“三边”指的是蓝边(490—530 nm)、黄边(560—640 nm)和红边(680—760 nm)。“三边”是植物光谱的典型特征,可以反映植物的生长状况,其中“红边”是绿色植物光谱最明显的特征之一。从图3可以看出,480—550nm和680—716nm波段光谱一阶微分值随水分胁迫程度增加而增加。

描述“三边”特征的参数主要有三边位置、三边面积。从表3可以看出,除成熟期外,水分胁迫处理下夏玉米红边位置“蓝移”(向短波方向移动)。除拔节期外,红边面积呈现随水分胁迫程度增大而增大的趋势。随生育期的推进,红边位置和红边面积呈现先增加后减小的趋势:从拔节期到抽雄期,各处理下红边位置和红边面积均增加;从抽雄期到成熟期,它们随生育期推进而减少。

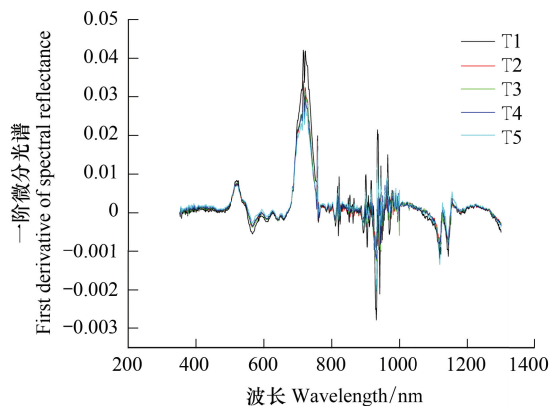


图3 拔节期不同灌水量处理下夏玉米冠层一阶微分光谱

Fig.3 First derivative of spectral reflectance of summer maize leaves under different water irrigation treatments

表 3 不同灌水量处理下夏玉米一阶微分光谱“红边”特征变化

| Table 3 Temporal variations of red edge parameters of summer maize canopy spectra at different stages |                             |                       |                        |                   |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|
| 处理<br>Treatment                                                                                       | 红边参数<br>Red edge parameters | 拔节期<br>Jointing stage | 抽雄期<br>Tasseling stage | 乳熟期<br>Milk stage | 成熟期<br>Maturation stage |
| T1                                                                                                    | 红边位置                        | 725                   | 730                    | 725               | 700                     |
|                                                                                                       | 红边面积                        | 0.149                 | 0.098                  | 0.056             | 0.038                   |
| T2                                                                                                    | 红边位置                        | 719                   | 724                    | 719               | 700                     |
|                                                                                                       | 红边面积                        | 0.132                 | 0.138                  | 0.083             | 0.059                   |
| T3                                                                                                    | 红边位置                        | 719                   | 724                    | 719               | 700                     |
|                                                                                                       | 红边面积                        | 0.086                 | 0.162                  | 0.089             | 0.059                   |
| T4                                                                                                    | 红边位置                        | 719                   | 724                    | 719               | 696                     |
|                                                                                                       | 红边面积                        | 0.074                 | 0.134                  | 0.081             | 0.054                   |
| T5                                                                                                    | 红边位置                        | 719                   | 719                    | 719               | 700                     |
|                                                                                                       | 红边面积                        | 0.069                 | 0.094                  | 0.127             | 0.062                   |

2.5 夏玉米冠层光谱特征参数与叶绿素含量相关性分析

计算各生育期不同处理下所测夏玉米冠层光谱反射率和与之对应叶绿素含量相关系数,按照波长从小到大顺序绘成相关系数随波长变化曲线(图 4)。由图 4 知,可见光范围内,光谱反射率与叶绿素含量呈的显著负相关关系( $P<0.01$ ),其中在 685nm 处相关系数绝对值达到最大( $r=-0.689$ )。同样,可以计算出各生育期不同处理下光谱一阶微分与叶绿素含量的相关系数,结果显示在 459nm 处相关系数绝对值达到最大( $r=-0.832$ )。

光谱特征参数的定义及其与叶绿素含量的相关系数由表 4 所示,夏玉米叶片叶绿素含量与绿峰反射率、红谷反射率、绿峰面积、红谷面积、黄边幅值和黄边面积之间呈极显著负相关关系( $P<0.01$  或  $P<0.001$ ),而与红边幅值、红边面积之间呈极显著正相关关系( $P<0.001$ )。

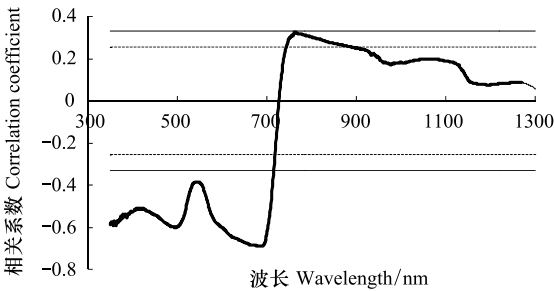


图 4 夏玉米叶片叶绿素含量与光谱反射率相关系数 ( $n=60$ )

Fig.4 The correlation coefficient between summer maize canopy reflectance and chlorophyll content

相关系数为正时,虚线、实线以上波段分别通过 0.05、0.01 水平显著性检验;相关系数为负时,虚线、实线以下波段分别通过 0.05、0.01 水平显著性检验

表 4 反射光谱特征参数的定义及其与叶绿素含量的相关系数

| Table 4 The spectral reflectance characteristic parameters and its correlation coefficient with chlorophyll content |            |                             |                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 参数<br>Variable                                                                                                      | 名称<br>Name | 定义<br>Definition            | 相关系数<br>Correlation coefficient |
| $R_g$                                                                                                               | 绿峰反射率      | 波长在 510—560 nm 内最大光谱反射率     | -0.395 *                        |
| $R_r$                                                                                                               | 红谷反射率      | 波长在 650—690 nm 内最大光谱反射率     | -0.684 **                       |
| $SR_g$                                                                                                              | 绿峰面积       | 波长在 510—560 nm 内原始光谱反射率总和   | -0.434 **                       |
| $SR_r$                                                                                                              | 红谷面积       | 波长在 650—690 nm 内原始光谱反射率总和   | -0.683 **                       |
| $D_b$                                                                                                               | 蓝边幅值       | 波长在 490—530nm 内光谱反射率一阶导数最大值 | 0.226                           |
| $D_y$                                                                                                               | 黄边幅值       | 波长在 560—640nm 内光谱反射率一阶导数最大值 | -0.609 **                       |
| $D_r$                                                                                                               | 红边幅值       | 波长在 680—760nm 内光谱反射率一阶导数最大值 | 0.580 **                        |
| $SD_b$                                                                                                              | 蓝边面积       | 波长在 490—530nm 内光谱反射率一阶导数总和  | -0.010                          |
| $SD_y$                                                                                                              | 黄边面积       | 波长在 560—640nm 内光谱反射率一阶导数总和  | -0.697 **                       |
| $SD_r$                                                                                                              | 红边面积       | 波长在 680—760nm 内光谱反射率一阶导数总和  | 0.549 **                        |

\*, \*\* 分别表示通过 0.01、0.001 水平显著性检验

## 2.6 植被光谱指数与叶绿素含量相关性分析

选取目前广泛采用的植被光谱指数与叶绿素含量进行相关分析后,得到相关系数如表 5。由表 5 所示,夏玉米叶片叶绿素含量与归一化植被指数、绿色归一化植被指数、红边归一化植被指数及其他植被指数(黄边面积与红边面积的比值)都呈极显著正相关关系( $P<0.001$ )。

## 2.7 夏玉米叶片叶绿素含量估算模型的构建与检验

选取与叶绿素含量相关系数较大的光谱特征参数和植被光谱指数,用拔节期、抽雄期、乳熟期和成熟期 4 次测定数据( $n=60$ )来构建夏玉米叶片叶绿素含量高光谱估算模型,用在拔节期和乳熟期测定的另外 2 次数据( $n=30$ )检验模型效果,结果如表 6。蓝边面积与红边面积的比值模型和蓝边面积与红边面积的归一化模型的决定系数较大, RMSE 和 RE 较小,因此模拟效果较好;绿色归一化植被指数模型和 NDVI 模型的决定系数次之, RMSE、RE 也较小,模拟效果也较好; $DR_{459}$  模型虽然决定系数较大,但是 RMSE 和 RE 也很大,模拟效果相对较差。

表 5 植被光谱指数的定义及其与叶绿素含量的相关系数

Table 5 The vegetation index and its correlation coefficient with chlorophyll content

| 参数<br>Variable            | 名称<br>Name                 | 定义<br>Definition                      | 相关系数<br>Correlation coefficient |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| NDVI                      | 归一化植被指数 <sup>[28-29]</sup> | $(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$ | 0.805 **                        |
| GNDVI                     | 绿色归一化植被指数 <sup>[30]</sup>  | $(R_{750}-R_{550})/(R_{750}+R_{550})$ | 0.812 **                        |
| $ND_{705}$                | 红边归一化植被指数 <sup>[6]</sup>   | $(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$ | 0.808 **                        |
| $R_g/R_r$                 | 其它植被指数 <sup>[31]</sup>     | 绿峰反射率与红谷反射率的比值                        | 0.622 **                        |
| $(R_g-R_r)/(R_g+R_r)$     |                            | 绿峰反射率与红谷反射率的归一化值                      | 0.691 **                        |
| $SR_g/SR_r$               |                            | 绿峰面积与红谷面积的比值                          | 0.635 **                        |
| $(SR_g-SR_r)/(SR_g+SR_r)$ |                            | 绿峰面积与红谷面积的归一化值                        | 0.693 **                        |
| $SD_b/SD_r$               |                            | 蓝边面积与红边面积的比值                          | 0.798 **                        |
| $(SD_b-SD_r)/(SD_b+SD_r)$ |                            | 蓝边面积与红边面积的归一化值                        | 0.855 **                        |
| $SD_y/SD_r$               |                            | 黄边面积与红边面积的比值                          | -0.030                          |
| $(SD_y-SD_r)/(SD_y+SD_r)$ |                            | 黄边面积与红边面积的归一化值                        | 0.739 **                        |

\*\* 表示通过 0.001 水平显著性检验

表 6 夏玉米叶片叶绿素含量估算模型验证

Table 6 Validation of summer maize leaf chlorophyll content estimation model

| 变量<br>Variable                          | 预测模型<br>Prediction model  | $R^2$ | 均方根误差 RMSE | 相对误差 RE/% |
|-----------------------------------------|---------------------------|-------|------------|-----------|
| $R_{685}$                               | $y = -182.02x + 43.4$     | 0.475 | 5.36       | 18.8      |
| $DR_{459}$                              | $y = -124442x + 40.639$   | 0.693 | 7.90       | 25.5      |
| $(R_{1082}-R_{671})/(R_{1082}+R_{671})$ | $y = 48.43x - 0.6821$     | 0.649 | 5.36       | 15.3      |
| $R_{800}/R_{680}$                       | $y = 10.96\ln(x) + 14.52$ | 0.583 | 5.86       | 16.8      |
| $(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$   | $y = 40.392x + 6.319$     | 0.648 | 5.12       | 14.5      |
| $(R_{750}-R_{550})/(R_{750}+R_{550})$   | $y = 66.097x - 4.397$     | 0.660 | 5.15       | 14.5      |
| $SD_b/SD_r$                             | $y = 2.566x + 11.57$      | 0.636 | 4.33       | 11.7      |
| $(SD_b-SD_r)/(SD_b+SD_r)$               | $y = 93.705x - 39.038$    | 0.730 | 4.79       | 13.4      |

## 3 讨论

### 3.1 水分胁迫对夏玉米叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是绿色叶片吸收、转化光能的主要物质,其含量多少直接决定了植物光合同行能力以及物质积累的多少。便携式叶绿素仪 SPAD-502 能够及时迅速地获取表征叶绿素含量的 SPAD 值,不会破坏植被本身,

也不容易受到时间、光照、天气等因素的限制,因此可用 SPAD 值代替传统方法测得叶绿素含量<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,随着干旱胁迫程度的增大,夏玉米叶片叶绿素含量逐渐降低,与张仁和<sup>[33]</sup>、李芬等<sup>[34]</sup>、宋贺等<sup>[35]</sup>对玉米干旱研究结果一致。原因是水分胁迫影响植物正常生理机能,妨碍叶片叶绿素的生物合成,并促进已有叶绿素的加速分解,导致植物叶片中的叶绿素含量降低<sup>[36]</sup>。从拔节期到抽雄期,随生育期的推进,各处理下玉米叶片叶绿素含量均增加;而从抽雄期到乳熟期,再到成熟期,各处理下玉米叶片叶绿素含量逐渐减少。这与前人在冬小麦<sup>[15]</sup>、烤烟<sup>[37]</sup>对干旱的响应研究结果一致。原因是玉米在营养生长阶段,长势旺盛,叶片扩展,叶绿素含量增加;而从乳熟期开始,玉米进入生殖生长阶段,叶片开始发黄、脱落,逐渐衰老,叶绿素含量逐渐降低。因此,叶绿素是一个重要的表征植物生长状况的指标,它与植物的发育阶段具有较好的相关性,可以视作发育阶段(特别是衰老阶段)的指示器<sup>[38]</sup>。

### 3.2 水分胁迫对夏玉米冠层光谱特征的影响

水分胁迫处理影响夏玉米冠层的反射光谱特征。从拔节期到成熟期,均体现一个规律:随着水分胁迫程度加重,玉米冠层光谱反射率随之降低,与雷竹<sup>[20]</sup>、白术<sup>[21]</sup>、小麦<sup>[15]</sup>、大豆<sup>[18]</sup>光谱反射率对干旱的响应一致。原因是受水分胁迫越重,叶片光合作用越弱,对光的吸收能力越弱,因而反射越强,光谱反射率越大。从拔节期到乳熟期,随生育期的推进,各处理下夏玉米冠层光谱反射率随生育期推进而逐渐减少,但进入成熟期略微增大,与高雨茜<sup>[31]</sup>对玉米的研究结果一致,原因可能是不同生育期夏玉米的冠层结构以及叶片的成分不同,随生育期发生了变化。尤其是玉米进入成熟期后,叶绿素含量明显下降,对光的吸收减少,因而光谱反射率增大。植物的光谱反射率会因生育期或养分、水分等因素而存在明显差别<sup>[31]</sup>。

本研究结果表明,水分胁迫下夏玉米冠层绿峰位置向长波方向偏移(“红移”),而红边位置向短波方向偏移(“蓝移”)。李苑溪<sup>[39]</sup>指出,铜胁迫下玉米叶片光谱红边位置向短波方向移动。有研究<sup>[31]</sup>指出,当植物生长状况良好、叶绿素含量高时,绿峰位置“蓝移”,绿峰反射率减小,而红边位置“红移”;而当植物受到病虫害、物候变化或营养不良等因素的影响时,绿色植物会出现“失绿”现象,绿峰位置“红移”,绿峰反射率增大,红边位置“蓝移”。因此,绿峰位置和红边位置对植物生长状况具有重要的指示意义。本研究结果表明:随生育期的推进,红边位置和红边面积呈现先增大后减小的趋势,原因是从拔节期到抽雄期,玉米植株生长速度加快,叶片覆盖度也相应增加,红光的吸收增强,红边位置向长波方向移动(“红移”);进入抽雄期后,玉米进入生殖生长阶段,叶面覆盖度逐渐减小,红光的吸收也逐渐减弱,红边位置向短波方向移动。

### 3.3 基于光谱的叶绿素含量反演模型

作物冠层光谱反射率在可见光波段受到叶绿素、类胡萝卜素等植被色素和叶面覆盖度的影响,在近红外波段主要受到冠层结构、植株的纤维素与蛋白质、地上生物量等因素的影响<sup>[40]</sup>。因此,通过光谱反射率来反演叶绿素这样的农学参数,完全可行<sup>[41]</sup>。本研究发现,可见光波段夏玉米光谱反射率与叶绿素含量呈现显著的负相关关系,与易秋香<sup>[8]</sup>、解飞<sup>[12]</sup>等对玉米光谱反射率的研究结果一致。本研究表明,夏玉米在波长 685nm 处光谱反射率与叶绿素含量相关系数最大,与 Horler<sup>[42]</sup>、易秋香等<sup>[8]</sup>研究结果一致。Horler 等<sup>[42]</sup>指出波长 700nm 左右光谱反射率对叶绿素有良好的相关性和预测性。易秋香等<sup>[8]</sup>研究指出,玉米在 713 nm 左右光谱反射率与叶绿素相关系数最大。

本研究结果表明,一阶微分光谱与叶绿素的相关性高于原始光谱与叶绿素相关性,与大多数学者<sup>[9-11]</sup>一致,原因可能是一阶微分光谱能一定程度上消除或减弱大气、土壤背景和测量高度等因素对光谱的影响。植被光谱指数也被国内外学者用来反演叶绿素含量。本研究用常用的光谱植被指数来反演夏玉米叶片叶绿素含量,结果表明蓝边面积与红边面积的比值模型、蓝边面积与红边面积的归一化模型模拟效果最好。通过两个光谱波段构建的植被指数模型比基于单一波段构建的反演模型效果好,原因可能是植被指数可以消除各种干扰,成为提取植被生化组分信息的重要手段<sup>[28]</sup>。

## 4 结论

(1)水分胁迫降低夏玉米叶绿素含量。灌溉量越少,水分胁迫越严重,夏玉米叶片叶绿素含量越低。随

生育期的推进,各处理下玉米叶片叶绿素含量呈现先增加后减少的趋势。

(2)在可见光波段,夏玉米冠层光谱反射率存在明显的“绿峰”、“红谷”。水分胁迫使夏玉米冠层光谱反射率增高,使绿峰位置“红移”,而红边位置发生“蓝移”。随生育期的推进,光谱反射率大小随生育期推进逐渐减少。但进入成熟期后,光谱反射率略微增大。

(3)夏玉米叶片叶绿素含量与原始光谱、光谱特征参数和植被光谱指数之间存在极显著相关关系。据此建立基于光谱的夏玉米叶绿素含量反演模型,并用独立数据检验发现,蓝边面积与红边面积的比值模型、蓝边面积与红边面积的归一化模型模拟效果最好。

**致谢:**中国气象科学研究院固城生态与农业气象试验站对试验给予支持,试验实施与数据获取得到了麻雪艳、王敏政、周怀林、张利、李柏贞、张峰和石耀辉等的帮助,特此致谢。

#### 参考文献(References):

- [1] Richardson A D, Duigan S P, Berlyn G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, 2002, 153(1): 185-194.
- [2] 方慧,宋海燕,曹芳,何勇,裴正军. 油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(9): 1731-1734.
- [3] 杜华强,葛宏立,范文义,金伟,周宇峰,李进. 马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(11): 3033-3037.
- [4] 武旭梅,常庆瑞,落莉莉,由明明. 水稻冠层叶绿素含量高光谱估算模型. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 238-243.
- [5] 刘伟东,项月琴,郑兰芬,童庆禧,吴长山. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析. *遥感学报*, 2000, 4(4): 279-283.
- [6] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 337-354.
- [7] 宋开山,张柏,李方,段洪涛,王宗明. 玉米叶绿素含量的高光谱估算模型研究. *作物学报*, 2005, 31(8): 1095-1097.
- [8] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,钱翌. 玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究. *科技通报*, 2007, 23(1): 83-87, 105-105.
- [9] 王宏博,冯锐,纪瑞鹏,武晋雯,于文颖,张玉书. 干旱胁迫下春玉米拔节-吐丝期高光谱特征. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3358-3362.
- [10] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, de Colstoun E B, McMurtrey III J E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239.
- [11] 武倩雯,熊黑钢,王凯龙,王莉峰,靳彦华. 干旱区玉米抽穗期叶绿素含量高光谱最佳模型选择. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(2): 81-86.
- [12] 解飞,齐雁冰,常庆瑞. 关中地区夏玉米抽穗期叶绿素含量的高光谱估算. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 176-180.
- [13] 武倩雯,熊黑钢,靳彦华,王莉峰,王凯龙. 基于多个高光谱参数的玉米叶片叶绿素含量估测模型. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(1): 201-205.
- [14] 解文武. 基于高光谱的微生物作用下玉米叶片叶绿素含量估算研究. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2018, 3(2): 31-37.
- [15] 谷艳芳,丁圣彦,陈海生,高志英,邢倩. 干旱胁迫下冬小麦(*Triticum aestivum*)高光谱特征和生理生态响应. *生态学报*, 2008, 28(6): 2690-2697.
- [16] 龙光强,陈功,郭滨,张文,王建伟. 干旱胁迫下马蹄金草坪反射光谱研究. *云南农业大学学报*, 2008, 23(4): 468-473.
- [17] 赵志军,单贵莲,段新慧,姜华,任健,陈功,初晓辉. 干旱胁迫对3种冷季型草坪草光谱反射率及生理特征的影响. *草原与草坪*, 2016, 36(6): 23-29.
- [18] 孔维平,毕银丽,李少朋,陈书琳,冯颜博,余海洋. 利用高光谱估测干旱胁迫下接菌根菌大豆叶绿素含量. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 123-131.
- [19] 李梦竹,刘国顺,贾方方. 干旱胁迫下旺长期烤烟冠层叶绿素密度的高光谱估测. *中国烟草科学*, 2017, 38(1): 23-28.
- [20] 张伟,王鑫梅,潘庆梅,谢锦忠,张劲松,孟平. 干旱胁迫下雷竹叶片叶绿素的高光谱响应特征及含量估算. *生态学报*, 2018, 38(18): 6677-6684.
- [21] 徐琳煜,刘守赞,白岩,张汝民,丁恒,吴学谦,郑炳松. 白术叶片对干旱胁迫的光谱特征响应. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 719-727.
- [22] 刘树堂,东先旺,孙朝辉,魏志刚,王伟华. 水分胁迫对夏玉米生长发育和产量形成的影响. *莱阳农学院学报*, 2003, 20(2): 98-100.
- [23] 白莉萍,隋方功,孙朝晖,葛达达,吕银燕,周广胜. 土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响. *生态学报*, 2004, 24(7): 1556-1560.

- [24] 白向历, 孙世贤, 杨国航, 刘明, 张振平, 齐华. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响. 玉米科学, 2009, 17(2): 60-63.
- [25] Fang S B, Su H, Liu W, Tan K Y, Ren S X. Infrared warming reduced winter wheat yields and some physiological parameters, which were mitigated by irrigation and worsened by delayed sowing. PLoS One, 2013, 8(7): e67518.
- [26] 麻雪艳, 周广胜. 夏玉米叶片气体交换参数对干旱过程的响应. 生态学报, 2018, 38(7): 2372-2383.
- [27] 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏, 董永平, 王福民, 刘朋涛. 天然草地植被覆盖度的高光谱遥感估算模型. 应用生态学报, 2006, 17(6): 999-1002.
- [28] Rouse J W, Hass R H, Schell J A, Deering D W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS//Proceedings of the 3rd Earth Resource Satellite-1 Symposium. Greenbelt: NASA Special Publication, 1974: 309-309.
- [29] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [30] Gitelson A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. spectral features and relation to chlorophyll Estimation. Journal of Plant Physiology, 1994, 143(3): 286-292.
- [31] 高雨茜. 夏玉米叶绿素、叶面积指数高光谱估测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 23-26.
- [32] Hawkins T S, Gardiner E S, Comer G S. Modeling the relationship between extractable chlorophyll and SPAD-502 readings for endangered plant species research. Journal for Nature Conservation, 2009, 17(2): 123-127.
- [33] 张仁和, 马国胜, 柴海, 张兴华, 路海东, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米苗期叶绿素荧光参数的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 170-176.
- [34] 李芬, 康志钰, 邢吉敏, 孔繁军, 吴鹏. 水分胁迫对玉米杂交种叶绿素含量的影响. 云南农业大学学报, 2014, 29(1): 32-36.
- [35] 宋贺, 蒋延玲, 许振柱, 周广胜. 玉米光合生理参数对全生育期干旱与拔节后干旱过程的响应. 生态学报, 2019, 39(7): 2405-2415.
- [36] 王忠. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 121-185.
- [37] 熊江波, 周紫燕, 叶清, 刘齐元, 肖金香. 干旱胁迫对云烟 87 不同生育期叶绿素含量影响的研究. 江西农业学报, 2013, 25(2): 95-97.
- [38] Minoha Co. Ltd. Chlorophyll SPAD-02 Instruction Manual. Tokyo: Radiometric Instruments Operations, 1989.
- [39] 李苑溪, 陈锡云, 罗达, 李波莹, 王姝人, 张力玮. 铜胁迫下玉米叶片反射光谱的红边位置变化及其与叶绿素的关系. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 546-551.
- [40] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R, Richardson A J. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity. Applied Optics, 1970, 9(3): 545-552.
- [41] Card D H, Peterson D L, Matson P A, Aber J D. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and nearinfrared reflectance spectroscopy. Remote Sensing of Environment, 1998, 26(2): 123-147.
- [42] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273-288.