

# 玉米苗期干旱胁迫对关键生育期的光谱特征影响分析

冯锐<sup>1,2</sup>, 武晋雯<sup>1,2</sup>, 王宏博<sup>1,2</sup>, 胡伟<sup>3</sup>, 张玉书<sup>1,2</sup>, 于文颖<sup>1,2</sup>, 纪瑞鹏<sup>1,2</sup>, 林毅<sup>4</sup>

1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166
2. 辽宁省农业气象灾害重点实验室, 辽宁 沈阳 110166
3. 辽宁省人工影响天气办公室, 辽宁 沈阳 110166
4. 辽宁省气象服务中心, 辽宁 沈阳 110166

**摘要** 植被的光谱特征是监测植被生长发育状态、健康状况的基础, 探索玉米苗期干旱胁迫后的关键发育期光谱特征变化, 不仅为植被光谱数据库的建设提供理论数据, 也为植被水分胁迫高光谱识别提供理论依据。以辽宁西部锦州生态与农业气象站大型农田土壤水分控制场为研究区, 对玉米苗期、拔节期、抽雄期和乳熟期4个发育期进行苗期干旱胁迫小区和水分适宜小区光谱观测, 通过分析原始光谱、一阶导数光谱、光谱参数和水分敏感植被指数, 对比苗期干旱胁迫光谱与同期对照的光谱特征差异性。结果表明: (1) 对于原始光谱来说, 玉米在苗期受到干旱胁迫后, 与同期水分适宜的玉米光谱特征有较为明显区别, 在可见光波段和短波红外波段反射率均高于同期对照反射率, 近红外波段明显低于同期对照反射率, 拔节期差异性最为显著, 达到了5%左右, 随着作物的生长, 差异性逐渐减弱。(2) 4个发育期玉米一阶导数光谱在可见光波段均出现双峰, 红光位置峰值在抽雄期达到最大; 苗期干旱胁迫一阶导数光谱的红光位置峰值均低于同期对照, 拔节期差异明显, 在0.003左右, 乳熟期差别明显减小, 可区分性减弱。(3) 苗期胁迫玉米光谱参数与同期对照相比, 从苗期到乳熟期, 红边位置存在“蓝移”—“红移”—“蓝移”的现象, 绿峰位置均存在向长波方向移动的现象; 在抽雄期和乳熟期, 蓝边位置、蓝边幅值、黄边位置和黄边幅值两者差异不明显; 在三边面积中, 红边面积均低于同期对照, 黄边面积均高于对照, 两者的蓝边面积无明显差异。(4) 在8个水分敏感植被指数中, NDWI和NDWI<sub>2</sub>的差异性指数在玉米四个关键发育期均达到50%以上, 可区分性明显。该研究旨在为植物水分胁迫光谱库提供基础数据, 为作物干旱识别的谱段选择及高光波段设置提供基础依据。

**关键词** 玉米苗期; 干旱; 光谱差异

**中图分类号:** S513 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)07-2222-07

## 引言

玉米作为我国种植面积最大的作物, 在国家粮食安全和国民经济中占据着越来越重要的地位。而干旱作为我国的主要自然灾害之一, 对玉米的产量影响非常严重, 每年有40%以上的玉米遭受不同程度干旱灾害, 造成的产量损失在20%~30%之间<sup>[1]</sup>。

地物光谱特征是进行下垫面地物识别、地表信息定量反演的基础<sup>[2]</sup>, 已有研究表明, 当作物受到干旱胁迫时, 在可见光、近红外和短波红外波段均会发生变化, 但不同作物或相同作物的不同发育期受到干旱胁迫时, 其光谱的敏感波段

也存在着较大的差异<sup>[3-4]</sup>, 因此, 可以利用数理方法在作物光谱反射率、光谱一阶微分值和“红边”等光谱参数与作物土壤含水量、叶片水分含量等指标之间建立关系, 定量化分析作物光谱变化特征<sup>[5-6]</sup>。由于具有物理含义, 越来越多的植被指数也被应用到作物光谱干旱识别中<sup>[7]</sup>, 如归一化植被指数、一阶微分植被指数<sup>[8]</sup>和红边归一化植被指数<sup>[9]</sup>等。

目前, 利用地面光谱数据进行干旱监测及其参数化反演研究开展很多, 但是前期作物干旱对整个发育进程光谱状况的影响研究还不多见, 因此, 通过分析苗期干旱胁迫复水与水分适宜玉米的关键生育期光谱参数的异同点, 找到苗期干旱胁迫后光谱变化特征, 为干旱光谱监测的谱段选择、高光波段设置提供基础依据, 对防灾减灾和粮食安全也具有非

收稿日期: 2019-03-18, 修订日期: 2019-07-24

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2018SYIAEZD1), 辽宁省农业攻关及产业化项目(2017210001), 国家自然科学基金项目(31771672)资助

作者简介: 冯锐, 女, 1972年生, 中国气象局沈阳大气环境研究所高级工程师(研究员级) e-mail: fengrui\_k@126.com

常重要的意义。

# 1 实验部分

## 1.1 试验设计

试验在锦州生态与农业气象站大型农田土壤水分控制场进行, 气象站位于东经 121. 12°E, 北纬 41. 13°N(图 1), 海拔

70. 2 m, 占地约 3 hm<sup>2</sup>, 年平均降水量 562 mm, 年平均气温 10 °C, 属于暖温带半湿润气候。在玉米苗期进行水分控制, 水分胁迫小区的四周和底部与外部环境土壤隔离, 对照小区的四周与外部土壤隔离, 底部可进行交换, 水分控制场装有可移动、透明棚顶的大棚, 可以阻隔自然降水, 但保持自然光照。水分胁迫小区和对照小区均有 3 个重复。

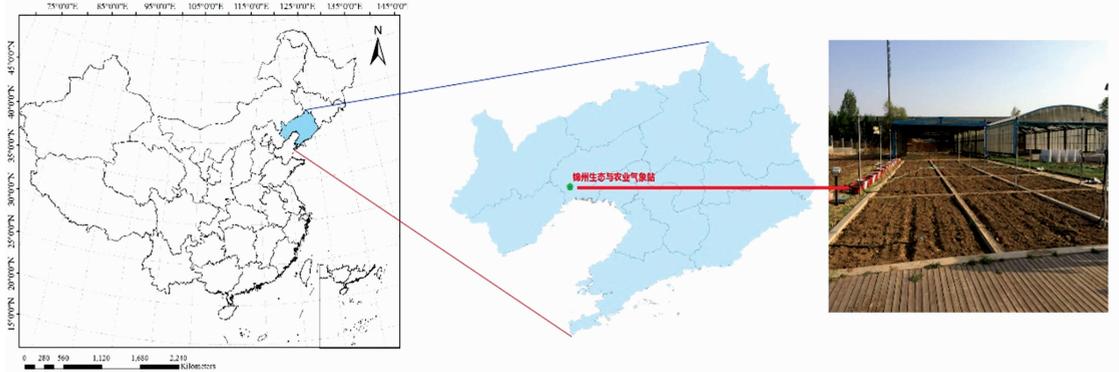


图 1 试验区位置图

Fig. 1 Location of test site

在玉米进入三叶期, 进行 3 个试验小区的自然降水阻隔和人为补水, 保持试验小区 0~60 cm 农田土壤相对湿度在 45%左右(中度干旱), 持续到苗期结束将土壤湿度复水至 75%, 此后, 3 个试验小区的土壤水分相对湿度控制在 75%左右; 对照组 3 个小区, 全生育期保持适宜土壤湿度, 土壤水分相对湿度控制在 75%左右。在苗期、拔节期、抽雄期和乳熟期 4 个发育期进行苗期干旱胁迫小区和水分适宜对照小区(control, CK)光谱测量。在 2011 年—2018 年对玉米 4 个关键生育时期进行 20 次光谱观测。

玉米试验品种为丹玉 39, 每年 4 月 30 日左右播种, 6 月 2 日左右追肥一次, 6 个小区的田间管理保持一致。

## 1.2 光谱测定

光谱观测采用美国 ASD FieldSpec Pro 光谱仪, 测量光谱波段为 350~2 500 nm, 光谱采样间隔为 1.4 nm(350~1 050 nm)和 2 nm(1 050~2 500 nm)。光谱测量时选择晴朗, 无风或者风速小的天气, 在 10:00—14:00 点之间。根据玉米种植株距计算, 观测时将光谱仪探头垂直向下, 置于作物冠层 130 cm 左右上方。光谱测量前和测量期间, 均需利用白板进行光谱标定, 一般测量期间每隔 15 分钟或者天气状况变化明显时进行一次白板光谱标定。每个采样点分为植株上方、两株植株之间、两行植株之间 3 个位置采集光谱, 每次重复采集 10 次, 取均值作为此采样点的光谱值, 每个小区采样三次, 作为此小区的光谱值, 当玉米不能全覆盖时, 加测土壤光谱。

## 1.3 数据处理

由于光谱仪不同波段在能量响应上存在着差异、背景信息的影响等多方面因素, 光谱曲线会出现一些噪声, 为消除这些噪声带来的影响, 将观测光谱原始数据进行平均处理和

一阶导数计算, 基于光谱位置和面积等特征选择多个光谱参数<sup>[3]</sup>(见表 1), 选择对水分敏感的多个植被指数<sup>[3, 7]</sup>(见表 2), 进行光谱差异性分析。

原始数据: 采用静态平均法, 将同一观测点的 3 个重复观测数据平均得到一条观测曲线。

表 1 光谱特征参数表

Table 1 Spectral feature parameters

特征参数	描述
蓝边位置( $\lambda_b$ )	波长 490~530 nm, 一阶导数光谱最大值对应的波长
蓝边幅值( $D_b$ )	波长 490~530 nm, 一阶导数光谱最大值
蓝边面积( $SD_b$ )	波长 490~530 nm, 一阶导数光谱的积分
黄边位置( $\lambda_y$ )	波长 560~640 nm, 一阶导数光谱最大值对应的波长
黄边幅值( $D_y$ )	波长 560~640 nm, 一阶导数光谱最大值
黄边面积( $SD_y$ )	波长 560~640 nm, 一阶导数光谱的积分
红边位置( $\lambda_r$ )	波长 680~760 nm, 一阶导数光谱最大值对应的波长
红边幅值( $D_r$ )	波长 680~760 nm, 一阶导数光谱最大值
红边面积( $SD_r$ )	波长 680~760 nm, 一阶导数光谱的积分
绿峰位置( $\lambda_g$ )	波长 510~560 nm, 原始光谱的最大光谱反射率对应的波长
绿峰反射率( $\rho_{eg}$ )	波长 510~560 nm, 原始光谱的最大光谱反射率
绿峰面积( $SD_g$ )	波长 510~560 nm, 原始光谱包围的面积
红谷位置( $\lambda_o$ )	波长 650~690 nm, 原始光谱的最小光谱反射率对应的波长
红谷反射率( $\rho_r$ )	波长 650~690 nm, 原始光谱的最小光谱反射率

表 2 植被指数表  
Table 2 Vegetation index

植被指数	描述
归一化植被指数 normalized difference vegetation index (NDVI)	$NDVI = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$
水分指数 water index (WI)	$WI = R_{970} / R_{900}$
水分胁迫指数 moisture stress index (MSI)	$MSI = R_{1599} / R_{819}$
归一化水体指数 normalized difference water index (NDWI)	$NDWI = (R_{857} - R_{1241}) / (R_{857} + R_{1241})$
归一化水分指数-1 normalized water index-1 (NWI-1)	$NWI-1 = (R_{970} - R_{900}) / (R_{970} + R_{900})$
归一化水分指数-2 normalized water index-2 (NWI-2)	$NWI-2 = (R_{970} - R_{850}) / (R_{970} + R_{850})$
归一化差异红外指数 normalized difference infrared index (NDII)	$NDII = (R_{819} - R_{1649}) / (R_{819} + R_{1649})$
归一化红边植被指数 normalized difference red edge vegetation index (ND705)	$ND705 = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$

光谱一阶导数: 可消除光谱中的部分线性背景噪声<sup>[10]</sup>, 公式为:

$$F'(\lambda) = [F(\lambda + \Delta\lambda) - F(\lambda - \Delta\lambda)] / 2\Delta\lambda \quad (1)$$

式(1)中,  $F'(\lambda)$  为波长  $\lambda$  一阶导数光谱,  $\lambda$  为波长,  $\Delta\lambda$  为波长间隔。

植被指数差异性指数: 用于描述干旱胁迫与对照的植被指数差异特征, 公式为

$$DI = \frac{|VI_{\text{stress}} - VI_{\text{ck}}|}{VI_{\text{ck}}} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中,  $DI$  为差异性指数,  $VI_{\text{stress}}$  为干旱胁迫植被指数,  $VI_{\text{ck}}$  为对照植被指数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 玉米关键发育期光谱对苗期干旱胁迫的响应

将苗期干旱胁迫和全生育期水分适宜两种情况下观测的光谱, 在苗期、拔节期、抽雄期和乳熟期分别统计平均, 得到四个关键发育期的光谱变化曲线(图2)。由图2中可以看

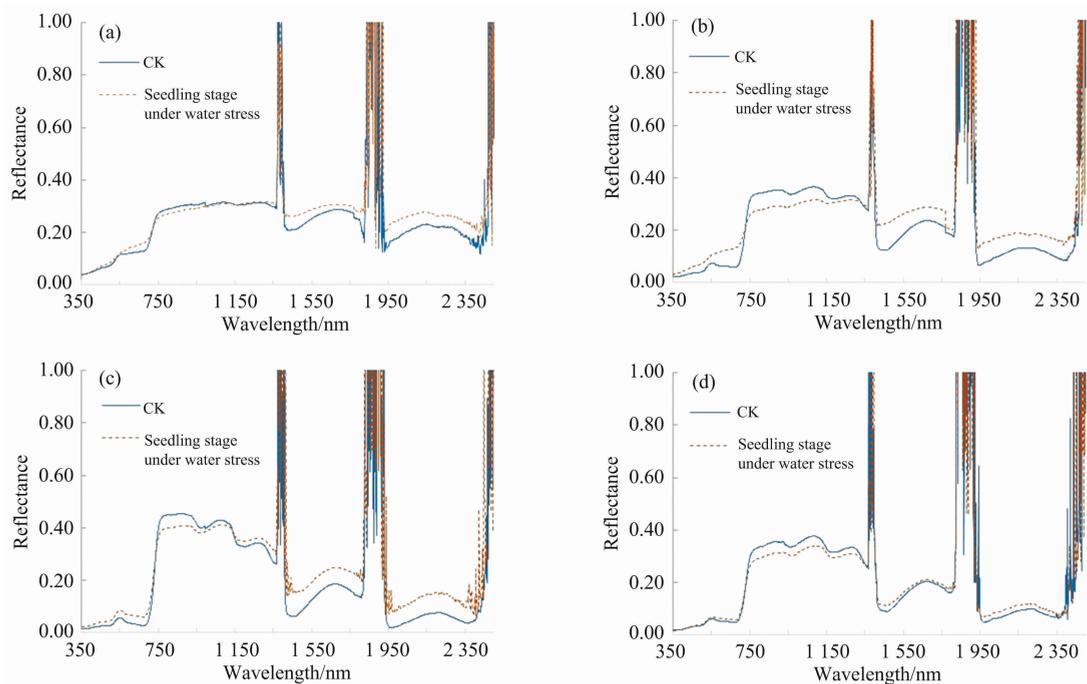


图 2 不同发育期苗期干旱胁迫和对照玉米光谱曲线图

(a): 苗期; (b): 拔节期; (c): 抽雄期; (d): 乳熟期

Fig. 2 Reflectance of the maize canopy seeding stage under drought stress and CK at different developmental stages

(a): Seedling stage; (b): Jointing stage; (c): Tasseling stage; (d): Milk stage

出,玉米在苗期受到水分胁迫后,与水分适宜的玉米光谱特征差异明显,存在着可见光波段和短波红外波段反射率高于同期对照反射率,近红外波段明显低于同期对照反射率的现象,尤其是拔节期,差异性最为显著,达到了5%左右,随着作物的生长,差异性逐渐减弱。

如图2(a)所示,玉米苗期,作物对土地不能完全覆盖,因此在可见光波段,水分适宜的玉米光谱的蓝谷和红谷特征较弱,受到水分胁迫后,蓝谷和红谷特征更为不明显,基本是一条缓慢抬升的曲线状态,这与玉米受到水分胁迫后,叶绿素含量下降,反射增强有关。

如图2(b)所示,玉米拔节期,水分适宜的玉米光谱具有典型的绿色植被光谱特征,在685~750 nm之间,反射率迅速抬升,出现陡坡;苗期干旱胁迫玉米拔节期的水分条件已恢复至适宜状态,但由于前期干旱影响,仍存在可见光波段高反射率,近红外波段低反射率现象,尤其是近红外波段,前期干旱胁迫引起植株形态、生理结构以及生化物质发生变化,叶片相对含水量下降,细胞间隙变化,导致光谱反射率下降明显。

如图2(c)和(d)所示,随着作物生长,后期的补偿效应

显现,苗期干旱胁迫光谱与同期对照光谱特征一致,仅存在数值上差别,到乳熟期,数值差别明显缩小,可见光区差别不到1%,短波红外区的差值在1.5%左右,近红外区稍高,差别在3%左右,光谱曲线几乎重合。图2(c)中,不论是苗期干旱胁迫光谱还是同期对照光谱在近红外波段反射率均有大幅增加,这是由于玉米生长到抽雄期,叶片成熟,细胞间隙缝加大,叶片内散射次数增加引起反射率增加。

光谱一阶导数计算可以消除数据背景、噪声和大气辐射等对目标光谱的影响。图3看出,导数光谱突出了玉米冠层光谱中的反射峰、谷和一些特征位置,苗期、拔节期和乳熟期玉米一阶导数光谱在可见光波段均出现双峰,即蓝光(528 nm附近)和红光(730 nm附近)位置出现峰值,红光位置峰值较高,在抽雄期达到最大。苗期干旱胁迫一阶导数光谱的红光位置峰值均低于同期对照,尤其是在拔节期差异明显,可能因为苗期干旱胁迫导致的玉米植株叶绿素、叶片含水量等生理变化,在拔节期的补偿作用还没有显现,到乳熟期,由于此时玉米的叶片开始发黄,细胞间隙加大,苗期干旱胁迫一阶导数光谱的红光位置峰值与同期对照的差别明显减小,可区分性减弱。

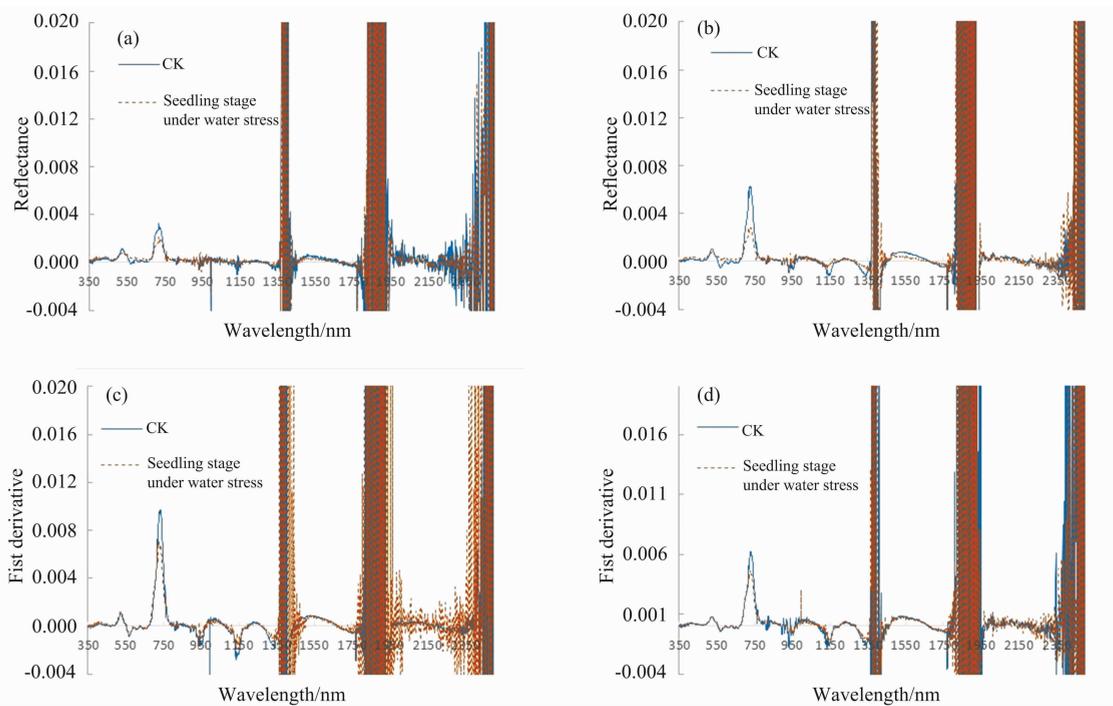


图3 不同发育期苗期干旱胁迫和对照玉米一阶导数光谱曲线图

(a): 苗期; (b): 拔节期; (c): 抽雄期; (d): 乳熟期

Fig. 3 First derivative of the maize canopy seeding stage under drought stress and CK at different developmental stages

(a): Seedling stage; (b): Jointing stage; (c): Tasseling stage; (d): Milk stage

## 2.2 玉米关键发育期光谱参数对苗期干旱胁迫的响应

红边、黄边、蓝边、绿峰和红谷等光谱参数是绿色植物明显的特征参数,这些参数与植物的叶绿素含量、生物量、冠层结构与盖度、叶片含水量和发育期等因素均有相关性,每个因素的改变都会引起光谱参数的位置、幅值和面积的改变。“红边”是绿色植物特有的光谱特征,如图4(a)所示,对

照玉米冠层反射光谱红边位置在718~735 nm之间,苗期时,红边位置在718 nm,随着发育进程推进,植株的叶绿素含量增高、冠层密度增大,红边位置向长波方向移动,在抽雄期达到735 nm,进入乳熟期,红边位置向短波方向移动,在整个发育进程内,存在着先“红移”后“蓝移”的现象。在苗期,玉米受到干旱胁迫影响红边位置向短波方向移动;在拔

节期, 此时的苗期胁迫玉米的土壤含水量在恢复适宜过程中, 红边位置与同期对照相比, 向长波方向移动; 在抽雄期和乳熟期, 虽然此时的苗期胁迫玉米的土壤含水量在适宜状态, 但是其红边位置依然存在着向短波方向移动的现象。在整个发育期内, 苗期胁迫玉米的红边幅值均低于同期对照值。

如图 4(b) 所示, 在苗期, 玉米受到干旱胁迫影响蓝边位置向长波方向明显移动, 蓝边幅值明显降低; 在拔节期, 依然存在着蓝边位置向长波方向移动和蓝边幅值降低现象, 但差异缩小; 在抽雄期和乳熟期, 苗期胁迫玉米的蓝边位置和蓝边幅值与同期对照相比, 没有明显差异。如图 4(c) 所示, 在苗期和拔节期, 苗期胁迫玉米的黄边位置向短波方向明显移动, 黄边幅值明显升高; 在抽雄期和乳熟期, 苗期胁迫玉米的黄边位置和黄边幅值与同期对照相比, 差异不明显。如图 4(d) 所示, 从苗期到乳熟期, 苗期胁迫玉米和对照的红谷

位置均持续向长波方向移动, 从 650 nm 移动到 670 nm 附近, 除在拔节期两者的红谷位置差别明显, 其余发育期的红谷位置相差 2 nm 以内; 苗期胁迫玉米的红谷反射率均高于同期对照, 拔节期尤为明显, 差别在 8% 左右, 随后逐渐缩小, 到乳熟期相差不到 1%。如图 4(e) 所示, 苗期胁迫玉米的绿峰位置与对照相比, 向长波方向移动, 尤其是拔节期, 相差 5 nm, 区分明显; 苗期胁迫玉米的绿峰反射率均高于同期对照, 在拔节期和抽雄期差别在 3% 左右, 苗期和乳熟期差别不到 1%。如图 4(f) 所示, 苗期胁迫玉米与同期对照的三边面积变化各不相同, 苗期胁迫玉米的红边面积均低于同期对照, 差值在 0.05~0.14 之间, 区分明显; 苗期胁迫玉米的黄边面积均高于对照, 发育前期差值较大, 后期差异不明显; 苗期胁迫玉米的蓝边面积与对照相比, 两者的区分性不大。

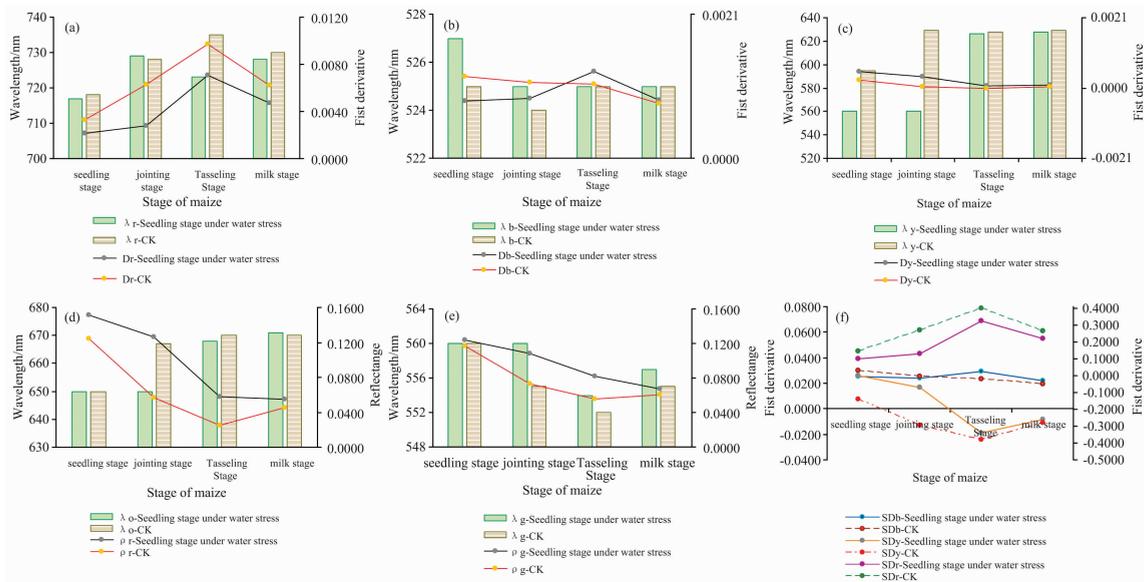


图 4 苗期干旱胁迫和对照玉米光谱参数变化图

(a): 红边位置和幅值; (b): 蓝边位置和幅值; (c): 黄边位置和幅值; (d): 红谷位置和反射率; (e): 绿峰位置和反射率; (f): 三边面积

Fig. 4 Spectra parameters of the maize canopy seeding stage under drought stress and CK at different developmental stages

(a): Red edge and red edge amplitude; (b): Blue edge and blue edge amplitude; (c): Yellow edge and yellow edge amplitude; (d): Red valley and reflectance; (e): Green peak and reflectance; (f): Area of red edge, yellow edge and blue edge

### 2.3 玉米关键发育期植被指数对苗期干旱胁迫的响应

植被指数可以有效减少环境背景对植物光谱的影响和单波段的散射效应<sup>[5, 11]</sup>, 选取 8 个植被指数, 进行苗期干旱胁迫和对照的不同关键发育期植被指数的差异性指数计算(图 5)。如图 5 所示, 在不同关键发育期, WI 的苗期干旱胁迫和对照差异性指数均在 5% 以内, 基本无差异; NDVI, MSI 和 ND705 的差异性指数在 10%~50% 左右, 具有一定的可区分性; NDWI 和 NDW-2 的差异性指数均在 50% 以上, 可区分性明显。NDW-1 和 NDII 的差异性指数变化区间较大, 尤其是 NDII 的差异性指数在苗期达到了 477%, 而在乳熟期仅为 31%。

## 3 结论

(1) 玉米在苗期受到水分胁迫后, 其原始光谱与同期水分适宜的玉米冠层光谱相比, 存在着可见光波段和短波红外波段反射率增大、近红外波段反射率降低的现象, 尤其是拔节期, 差异性最为显著, 平均值达到了 5% 左右, 随着作物的生长, 差异性逐渐减弱, 乳熟期的可见光波段反射率差别已不到 1%。

(2) 在苗期、拔节期、抽雄期和乳熟期, 苗期干旱胁迫玉米和同期对照的一阶导数光谱在可见光波段均出现双峰, 即

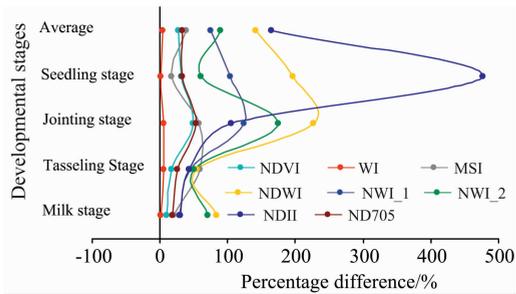


图 5 苗期干旱胁迫和对照玉米植被指数的差异性指数图

Fig. 5 Difference index of the maize canopy vegetation index between seedling stage under drought stress and CK at different developmental stages

蓝光(528 nm 附近)和红光(730 nm 附近)位置出现峰值,红光位置峰值在抽雄期达到最大;苗期干旱胁迫一阶导数光谱的红光位置峰值均低于同期对照,尤其是在拔节期差异明显,在 0.003 左右,到乳熟期,差别明显减小,仅为 0.001,可区分性减弱。

(3)“红边”作为绿色植物特有的光谱特征,从苗期到乳

熟期,苗期胁迫玉米与同期对照玉米对比明显,苗期胁迫玉米红边位置存在“蓝移”—“红移”—“蓝移”的现象,红边面积和红边幅值均低于同期对照;苗期胁迫玉米绿峰位置与同期对照相比,均存在向长波方向移动的现象;苗期胁迫玉米黄边面积均高于对照,但两者的蓝边面积无明显差异规律。

(4)玉米在苗期受水分胁迫后,蓝边位置向长波方向移动,蓝边幅值降低,黄边位置向短波方向移动,黄边幅值明显升高;在抽雄期和乳熟期,苗期胁迫玉米与同期对照相比,蓝边幅值、蓝边面积、黄边位置和黄边幅值差异均不明显。

(5)多个苗期干旱胁迫和对照的植被指数在不同关键发育期表现各不相同,其中 WI 的差异性指数均在 5% 以内,基本无差异;NDWI 和 NDW-2 的差异性指数均在 50% 以上,可区分性明显。

受试验条件所限,仅开展了中度干旱(土壤相对湿度 45% 左右)的玉米光谱特征分析,后续研究应针对玉米受到轻、中、重不同程度干旱灾害,设计更为详细的研究方案,结合作物生理指标,同时与卫星数据相结合,为大面积、快速开展作物干旱定量反演提供理论依据和基础数据。

## References

- [ 1 ] QI Wei, ZHANG Ji-wang, WANG Kong-jun, et al(齐 伟,张吉旺,王空军,等). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2010, 21(1): 48.
- [ 2 ] FENG Rui, ZHANG Yu-shu, WU Jin-wen, et al(冯 锐,张玉书,武晋雯,等). Journal of Catastrophology(灾害学), 2019, 34(1): 162.
- [ 3 ] ZHANG Wei, WANG Xin-mei, PAN Qing-mei, et al(张 玮,王鑫梅,潘庆梅,等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2018, 38(18): 6677.
- [ 4 ] LIN Yi, LI Qian, WANG Hong-bo, et al(林 毅,李 倩,王宏博,等). Chinese Journal of Ecology (生态学杂志), 2016, 35(5): 1323.
- [ 5 ] Feng Rui, Zhang Yushu, Yu Wenying, et al. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33: 301.
- [ 6 ] ZHAO Jun-fang, FANG Shi-bo, GUO Jian-ping, et al(赵俊芳,房世波,郭建平,等). Remote Sensing For Land & Resources(国土资源遥感), 2013, 25(3): 153.
- [ 7 ] ZHANG Feng, ZHOU Guang-sheng(张 峰,周广胜). Chinese Journal of Plant Ecology(植物生态学报), 2018, 42(5): 517.
- [ 8 ] Yi Qiuxiang, Wang Fumin, Bao Anming. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33: 67.
- [ 9 ] Zhang Feng, Zhou Guangsheng. Remote Sensing, 2015, 7: 15203.
- [ 10 ] CHENG Di, LIU Yong-mei, LI Jing-zhong, et al(程 迪,刘咏梅,李京忠,等). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2015, 26(8): 2307.
- [ 11 ] ZHANG Jia-hua, XU Yun, YAO Feng-mei, et al(张佳华,许 云,姚凤梅,等). SCIENTIA SINICA: Technologica(中国科学:技术科学), 2010, 40(10): 1121.

# Influence of Drought Stress on Maize in the Seedling Stage on Spectral Characteristics at the Critical Developmental Stage

FENG Rui<sup>1,2</sup>, WU Jin-wen<sup>1,2</sup>, WANG Hong-bo<sup>1,2</sup>, HU Wei<sup>3</sup>, ZHANG Yu-shu<sup>1,2</sup>, YU Wen-ying<sup>1,2</sup>, JI Rui-peng<sup>1,2</sup>, LIN Yi<sup>1</sup>

1. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China

2. Key Laboratory of Agrometeorological Disasters, Liaoning Province, Shenyang 110166, China

3. Weather Modification Office of Liaoning Province, Shenyang 110166, China

4. Liaoning Province Public Meteorological Service Center, Shenyang 110166, China

**Abstract** The spectral characteristics of vegetation can be used to monitor their growth and development. Additionally, exploring the changes in spectral characteristics of maize throughout its developmental period following water stress during the seedling stage provides theoretical data for building vegetation spectral databases, as well as a basis for the hyperspectral identification of vegetation water stress. Using the large-scale farmland soil moisture control field of Jinzhou Ecological and Agricultural Meteorological Station in western Liaoning as the research area, an ASD FieldSpec Pro spectrometer was used to spectrally observe maize at the seedling, jointing, tasseling and milk stages in the seedling water stress and water-suitability control areas. The differences in the spectral characteristics of the water stressed seedlings and those of the controls were identified based on the original spectrum, the first derivative spectrum and multiple spectral parameters. The results were as follows: (1) The characteristics of the original spectrum of maize subjected to drought stress in the seedling stage are significantly different from those of maize that receives suitable water in the same stage. Specifically, the reflectance in the visible or short-wave infrared band was higher than that of control maize at the same stage, while that of the near-infrared band was significantly lower than that of control maize, especially at the jointing stage, the difference was about 5%; however, these differences gradually decreased with crop growth. (2) The first derivative spectra of maize at the seedling, jointing, tasseling and milk stages revealed double peaks in the visible bands, and the peak of the red light position reached the highest level at the tasseling stage. The peaks of the red light position for the first derivative spectrum of maize from seedlings subjected to water stress were lower than those of control maize, and the differences were significant, especially in the jointing stage, when the difference was about 0.003. In the milk stage, the peaks of red were significantly reduced relative to the concurrent control maize and the distinguishability was weakened. (3) Comparison of the spectral parameters of maize under seedling water stress with those of control maize revealed that the red edge position undergoes a blue shift-red shift-blue shift from the seedling stage to the milk stage, while the green peak position undergoes a shift in the long-wave direction. However, the difference between the blue edge position and blue edge amplitude and the yellow edge position and yellow edge amplitude was not significant at the tasseling and milk stages, the red edge area is lower than that of the control, and the yellow edge area is higher than that of the control. (4) Among the eight water-sensitive vegetation indices, the difference index of NDWI and NDW-2 reached more than 50% in the four Critical developmental stages of maize, and the distinguishability was enhanced. Overall, this study provides basic data that can be useful for plant water stress spectral libraries and a basis for selecting spectral bands and setting hyperspectral bands for identification of crop drought.

**Keywords** The seedling stage of maize; Drought; Spectral difference

(Received Mar. 18, 2019; accepted Jul. 24, 2019)