

基于光谱特征的棉花苗期耐涝性鉴定

冯晓冰¹, 潘锐¹, 胡爱兵², 张文英¹

(¹ 长江大学农学院 / 作物抗逆技术研究中心, 湖北荆州 434025; ² 湖北省荆州农业科学院, 荆州 434000)

摘要: 耐涝性是一个复杂农艺性状, 采用传统方法大规模鉴定难度大。高光谱成像在作物表型检测方面具有无损、高效的优点, 可望实现作物耐涝性的快速鉴定。本研究以 27 个陆地棉品种为供试材料, 测定低氧胁迫与正常供氧条件下的株高、茎粗、叶面积、总根长, 利用便携式光谱仪获取光谱图像, 分析涝渍特征曲线并提取与色素、水分及氮素相关的 6 个光谱特征指数, 采用主成分、逐步回归、系统聚类、相关性等多元分析方法, 构建了基于光谱特征的棉花苗期耐涝性鉴定模型。利用主成分分析将 10 个耐涝单项指标简化为 4 个主成分。根据主成分贡献率和权重, 将 4 个主成分简化为耐涝综合评价系数 D 值。逐步回归分析建立 D 值与 10 个单项指标耐涝性系数最优线性回归方程: $D=0.161+0.220 SD+0.068 LA+0.358 PSSRa+0.404 I1+0.292 NDSI$ ($R^2=0.9849$, 式中 SD 为茎粗, LA 为叶面积, PSSRa 为色素比值指数 a, I1 为红外指数 1, NDSI 为归一化差值胁迫指数)。聚类分析将 27 份供试材料耐涝性划分为 4 个等级, 即强耐涝、耐涝、中等耐涝、涝渍敏感。相关性分析结果显示, 茎粗与色素比值指数 a、色素比值指数 b、植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数、红外指数 1 极显著正相关, 与归一化差值水指数相关性差异不显著; 总根长与色素比值指数 a、植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数呈显著负相关, 与归一化差值水指数、红外指数 1 相关性差异不显著; 叶面积和株高均与其余 9 个单项指标相关性差异不显著。利用高光谱成像技术为鉴定、评价棉花耐涝性提供了新方法。

关键词: 陆地棉; 耐涝性; 光谱特征; 种质资源鉴定

Identification of Cotton Seedling Waterlogging Tolerance Based on Spectral Imaging Technology

FENG Xiao-bing¹, PAN Rui¹, HU Ai-bing², ZHANG Wen-ying¹

(¹ School of Agriculture, Yangtze University/Research Center of Crop Stresses Resistance Technologies, Hubei Jingzhou 434025;
² Jingzhou Academy of Agricultural Science, Jingzhou 434000)

Abstract: Waterlogging seriously affects the yield and quality of cotton, whereas the waterlogging tolerance as a complex agronomic trait is difficult for quantification on a large scale using traditional methods. Seeking an efficient method for identifying cotton genotypes showing waterlogging tolerance might guarantee cotton breeding for quality and yield. Hyperspectral technology is a nondestructive and efficient method for crop detection can quickly identify cotton seedlings showing waterlogging resistance. In this study, the plant height, stem diameter, leaf area, and total root length of 27 cotton varieties were measured under hypoxia stress or normal oxygen conditions. Portable spectrometer was used to obtain its spectral image, analyze the waterlogging characteristic curve and extract six spectral indexes related to pigment, moisture and nitrogen. Multivariate analysis methods such as principal component analysis, stepwise regression, systematic clustering, and correlation analysis were adopted to construct a cotton seedling waterlogging tolerance identification model based on hyperspectral images. Principal component analysis showed that 10 individual indicators of waterlogging tolerance might be simplified into four principal components, which were further simplified into the D value of the comprehensive evaluation coefficient of waterlogging tolerance by considering the contribution rate and weight of the principal component and the normalized feature vector. Stepwise

收稿日期: 2021-09-14 修回日期: 2021-09-21 网络出版日期: 2021-10-13

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210914003>

第一作者研究方向为作物非生物逆境, E-mail: 18211700975@163.com

通信作者: 张文英, 研究方向为作物非生物逆境, E-mail: wyzhang@yangtzeu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0100403)

Foundation project: National Key Research and Development Programs (2018YFD0100403)

regression analysis was performed to establish the optimal linear regression equation of D value and 10 single index waterlogging tolerance coefficients: $D=0.161+0.220 SD+0.068 LA+0.358 PSSRa +0.404 I1+0.292 NDSI$ ($R^2=0.9849$, SD: stem diameter, LA: leaf area, PSSRa: pigment specific simple ratio a, I1: infrared index 1, NDSI: normalized different stress index). Cluster analysis of 27 cotton genotypes suggested four grades of waterlogging tolerance, including extreme waterlogging tolerance, waterlogging tolerance, medium waterlogging tolerance, and waterlogging sensitivity. The correlation analysis showed that stem diameter was significantly positively correlated with pigment ratio index a, pigment ratio index b, plant nitrogen spectral index, normalized difference stress index, and infrared index 1, but had no significant correlation with normalized difference water index. The total root length was significantly negatively correlated with pigment ratio index a, plant nitrogen spectral index, and normalized difference stress index, but had no significant difference with normalized difference water index and infrared index 1. There were no significant correlations between leaf area and plant height and the other 9 individual indicators. Collectively, this study highlighted the hyperspectral imaging technology as a useful method to identify the waterlogging tolerance of cotton.

Key words: *Gossypium hirsutum* L.; waterlogging tolerance; spectral signature; germplasm resource evaluation

棉花是世界上重要的纤维作物和经济作物, 2019年中国的棉花种植面积占国内农作物总播种面积的2.01%, 产量达588.9万t^[1-2]。近年来随着全球气候变暖, 涝渍灾害频发。在长江中下游区域, 梅雨季节强降雨易导致棉花发生严重涝渍, 显著降低棉花的产量和品质^[3-4]。

涝渍对植物的主要危害是次生胁迫, 包括低氧、营养缺乏、还原性物质及其他有毒有害物质等, 其中产生最早、最直接、危害最大的是低氧胁迫^[5]。涝渍引起的根系缺氧, 抑制机体有氧呼吸, 有机物合成受阻, 严重影响植株正常生长发育。已有研究表明, 不同棉花品种在苗期耐涝性上存在差异^[6]。在棉花生长早期对棉花耐涝性进行快速鉴定, 筛选鉴定耐涝棉花种质资源, 对缓解棉花涝渍危害, 保持其产量和品质有着重要意义。

目前棉花种质资源的鉴定多基于农艺性状^[7-8]。杜雄明等^[9]将表型与分子技术相结合, 利用SSR分子标记等技术, 对国内外收集到的棉花种质进行鉴定。传统鉴定方法费时费力, 测定指标繁多, 工作量大, 难以开展大批量快速鉴定。而高光谱成像技术, 在作物检测方面具有高效、绿色、无损的特点, 具有传统表型性状采集不可比拟的优势。

目前高光谱成像技术的应用主要集中在作物识别^[9]、叶绿素估算^[10]、病虫害检测^[11]、谷物品质无损检测^[12]等方面。此外, 高光谱成像技术在植物非生物逆境耐性研究中也广泛报道。张小敏等^[13]建立基于高光谱成像技术的多特征融合温度胁迫Fisher判别模型; 谢传奇等^[14]通过识别叶片色差辅助鉴定耐高温胁迫番茄植株; Pandey等^[15]建立水分、大量及微量元素的预测模型; Simko等^[16]将高

光谱技术应用于生菜冻害、高温、盐胁迫研究。在涝渍耐性研究方面, 李燕丽等^[17]建立涝渍胁迫下基于高光谱特征参数的小麦叶绿素含量灾损估算模型。在棉花中, 徐道青等^[10]构建了淹水胁迫下叶片叶绿素含量的高光谱模型。但目前还无基于高光谱特征进行棉花苗期耐涝性种质鉴定的报道。

本研究通过对27个耐涝性不同的棉花品种进行低氧处理, 提取作物逆境相关光谱特征指数, 结合表型参数, 分析不同耐涝性棉花品种的差异特征, 鉴定其耐涝性并构建棉花苗期耐涝性鉴定优化模型, 为棉花耐涝性的早期鉴定提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

27个陆地棉品种由中国棉花中期库提供(分别为望18、PM1、A2、早19、Z11、Z23、Cx094、A6、华中97-5088、Z13、Z21、中2369、B6、早38、PD5300、早36、华中91217、A1、鄂荆55173、T11-40、苏22、PM1、鲁29、陆92-6、太湖9501、早22、Z12, 下文依次分别用G1~G27代称)。试验在长江大学农学院低氧胁迫工作站完成。

1.2 试验方法

27个供试品种在育苗盘生长至二叶期后, 选取长势一致植株, 分别放置在装有200L霍格兰德营养液的水箱(180cm×80cm×80cm)中(pH 6.0 ± 0.1), 用空气泵通空气(每2h通气10min, 持续2d)预培养2d至苗正常生长。本试验采用随机区组设计, 每个水箱各3个品种, 每个品种各30株, 共90株, 设低氧组与对照组, 3次重复。其中低氧试验组水箱通氮气(自动溶氧仪控制水中含氧量为

2.0 mg/L), 对照组水箱通空气保持正常供氧。处理 8 d 后, 用 Field Spec 4 Wide-Res Field Spectrum radiometer 便携式地物光谱仪 (Analytica Spectra Devices, 美国) 测量倒三叶叶片的光谱, 测量范围为 350~2500 nm, 光谱分辨率 3 nm@700 nm, 每个叶片测量 3 次。同时, 用直尺测量株高 (PL, plant height)、茎粗 (SD, stem diameter), 用相机 (SONY DSLP-A350) 拍照并用 Image J 软件测量叶面积 (LA, leaf area), 用 WinRhizo Scanner 根系扫描仪 (Regent, 加拿大) 测量总根长 (RL, total root length)。

1.3 统计分析

1.3.1 数据整理 用 ViewSpecPro 软件对光谱数据进行预处理, 分别导入每个处理的全部光谱曲线, 检查并去除与整体偏差较大的曲线, 保留能代表整体水平的光谱曲线并用 Statistic 求出平均曲线, 导出至 Excel 2007 分析。采用 DPS v14.4 数据处理系统软件进行主成分分析、逐步回归分析、系统聚类分析和相关性分析。

1.3.2 光谱指数和耐涝渍系数计算 色素相关光谱指数^[18]: $PSSRa=R800/R680$, $PSSRb=R800/R700$, 其中, $PSSRa$ 为色素比值指数 a, 代表叶绿素 a 的含量; $PSSRb$ 为色素比值指数 b, 代表叶绿素 b 的含量; R800、R680、R700 分别指光谱仪在 800 nm、680 nm、700 nm 波长下的测定值。

水分相关光谱指数^[19]: $NDWI=(R860-R1240)/(R860+R1240)$, $I1=(R820-R1600)/(R820+R1600)$, 其中, $NDWI$ 为归一化差值水指数, 代表植物冠层水含量; $I1$ 为红外指数 1, 代表与水分吸收相关光谱值; R860、R1240、R820、R1600 分别指光谱仪在 860 nm、1240 nm、820 nm、1600 nm 波长下的测定值。

氮素相关光谱指数^[20]: $PNSI=[(R757-R917)-(R645-R680)]/[(R757-R917)+(R645-R680)]$, $NDSI=(R714-R554)/(R714+R554)$, 其中, $PNSI$ 为植物氮光谱指数, 代表植物氮含量; $NDSI$ 为归一化差值胁迫指数, 代表氮含量相关胁迫指数; R757、R917、R645、R714、R554 分别指光谱仪在 757 nm、917 nm、645 nm、714 nm、554 nm 波长下的测定值。

单项指标耐涝渍系数: 单项指标耐涝渍系数 = HY/CK ^[21], 其中, HY 、 CK 分别指 27 个棉花品种在低氧胁迫处理和正常供氧处理下的 4 个生长指标 (株高、茎粗、叶面积、总根长) 值和根据 1.3.2 中公式计算得到的 6 个光谱指标 (色素比值指数 a、色素比值指数 b、归一化差值水指数、红外指数 1、植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数) 值。

1.3.3 主成分分析 对 27 个棉花品种在低氧胁迫与

对照条件下的株高、茎粗、叶面积、总根长 4 个生长指标和色素比值指数 a、色素比值指数 b、归一化差值水指数、红外指数 1、植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数等 6 个光谱指数共 10 个单项指标基于其单项指标耐涝渍系数进行主成分分析。按照累积贡献率 $\geq 80\%$ 标准提取主成分。根据 27 个棉花品种 10 个单项指标耐涝渍系数及主成分分析提取到的主成分贡献率和规格化特征向量计算得到耐涝渍综合评价系数 D 值。使用 R 语言对主成分分析结果进行可视化。

1.3.4 逐步回归分析 为分析各指标与品种耐涝性之间的关系, 筛选出耐涝性评价关键指标, 建立可用于棉花苗期耐涝性鉴定的数学模型, 以 27 个棉花品种单项指标的耐涝渍系数为自变量, 耐涝渍综合评价系数 D 值为因变量, 进行逐步回归分析。回归方程中的所有解释变量对因变量 D 值联合的影响程度用决定系数 R^2 表示, $R^2 = \text{回归离差平方和} / \text{总离差平方和}$, 其数值等于相关系数 R 的平方。

1.3.5 聚类分析 为全面评价各供试棉花材料的耐涝性, 根据低氧胁迫下棉花品种的 4 个生长指标和 6 个光谱指数的表现, 利用耐涝渍综合评价系数 D 值, 采用最长距离法对 27 个棉花品种进行系统聚类分析。

1.3.6 相关性分析 将低氧胁迫下棉花不同品种的茎粗、叶面积、总根长、株高等生长指标与色素、水分、氮素等光谱指标进行皮尔逊线性相关性分析, 获得皮尔逊相关性系数。使用 R 语言对相关性分析结果进行可视化。

2 结果与分析

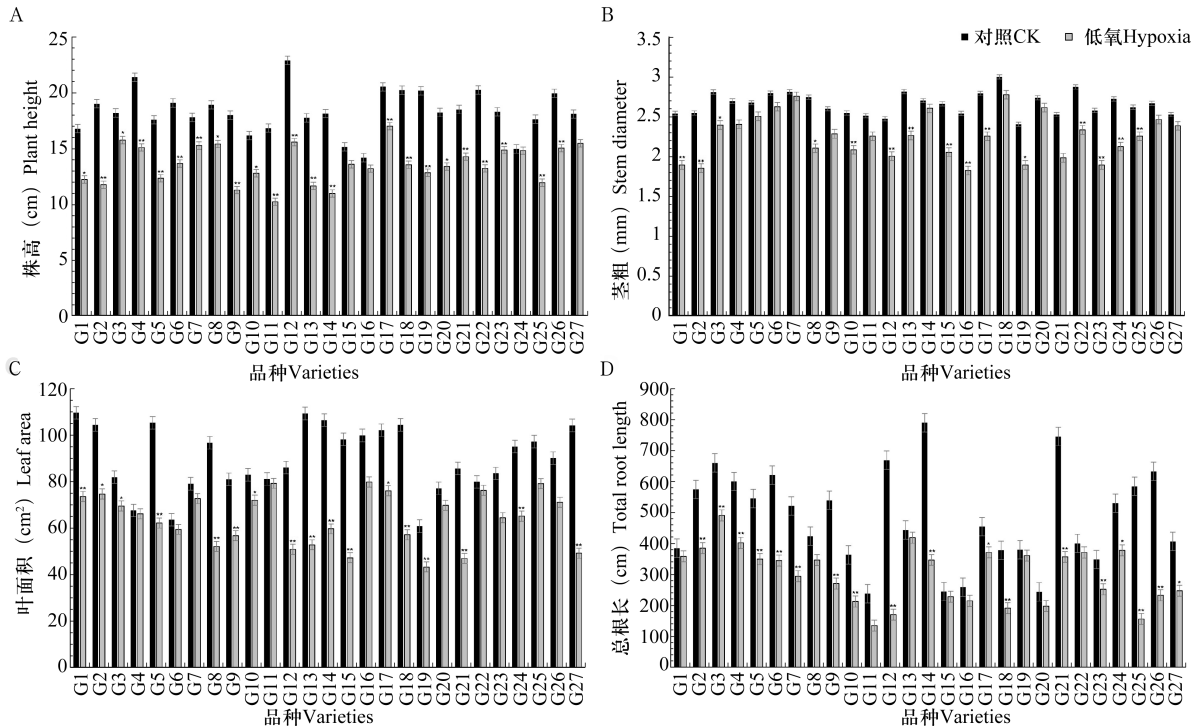
2.1 低氧胁迫下棉花形态变化

低氧胁迫处理 8 d 后, 27 个棉花品种的株高、茎粗、叶面积、总根长均低于正常供氧的植株 (图 1)。其中, 对照组的平均株高、茎粗、叶面积和总根长分别为 18.3 cm、2.66 mm、90.15 cm²、480.6 cm, 低氧处理组则分别为 13.6 cm、2.25 mm、64.03 cm²、299.4 cm, 低氧胁迫造成棉花幼苗平均株高、茎粗、叶面积和总根长分别降低 25.8%、15.4%、29.0% 和 37.7%, 差异极显著 ($P < 0.01$)。这表明低氧胁迫显著抑制棉花幼苗的生长。

此外, 27 个棉花品种间在低氧胁迫处理后株高、茎粗、叶面积和总根长等指标中也存在显著的差异。从株高来看, 其中 G14、G11 和 G2 三个品种降低较为显著, 分别降低 39.6%、39.3% 和 38.2%, 而 G24、G16 和 G15 品种株高降低幅度较小, 分别为 1.0%、6.9% 和 10.4%。从茎粗来看, G16、G2 和 G23 三个

品种降低较为显著,达到 28.2%、27.2% 和 26.5%,而 G20、G14 和 G7 下降仅为 4.5%、3.6% 和 2.0%。叶面积下降较显著的是 G27、G15 和 G13,分别降低 52.7%、51.9% 和 51.6%,而 G4、G11 和 G22 则下降较少,分别降低 2.1%、2.3% 和 4.6%。总根长下降较多的 3 个品种依次为 G12 降低 74.6%、G25 降低

73.2%、G26 降低 63.2%,下降较少的 3 个品种依次为 G19 降低 4.9%、G13 降低 5.7%、G15 降低 6.7%。分析可知,从低氧胁迫对 27 个棉花品种的平均株高、茎粗、叶面积和总根长来看,总根长的生长遭受抑制最严重,抑制率高达 37.7%,低氧胁迫显著抑制棉花苗期总根长的生长,且不同基因型间存在差异。



* 代表在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, ** 代表在 $P < 0.01$ 水平上差异显著,下同

*represents significant difference at $P < 0.05$ level, **represents significant difference at $P < 0.01$ level, the same as below

图 1 27 个棉花品种苗期低氧胁迫 8 d 和正常供氧生长指标变化

Fig. 1 Changes in growth indexes of 27 cotton cultivars at seedling stage under hypoxia stress for 8 days and normal oxygen supply

2.2 低氧胁迫对棉花光谱指数的影响

2.2.1 低氧胁迫下棉花光谱特征 低氧胁迫 8 d 和正常供氧棉花叶片高光谱特征曲线显示(图 2),在 480~500 nm 波段和 680~780 nm 波段共有 2 个低谷,是由叶绿素强烈吸光产生。对照处理植株叶片这 2 个低谷的图像均明显低于低氧胁迫处理的植株,即低氧胁迫处理后,棉花叶片在可见光区段内吸收光的能力降低。在 1450~1500 nm 和 1950~2000 nm 处共有 2 个吸收谷,由叶片的细胞液和细胞膜吸收水分形成。含水量增加时,光谱反射率降低。在这 2 个水分吸收波谷位置,低氧胁迫植株的叶片反射率均高于对照植株,表明低氧胁迫处理后,棉花叶片的含水量降低。因此,棉花叶片的叶绿素吸收波段 380~780 nm 和水分吸收波段 1450~2000 nm 是棉花遭受低氧胁迫的特征区间,可以作为评价棉花耐涝性的重要参考指标。

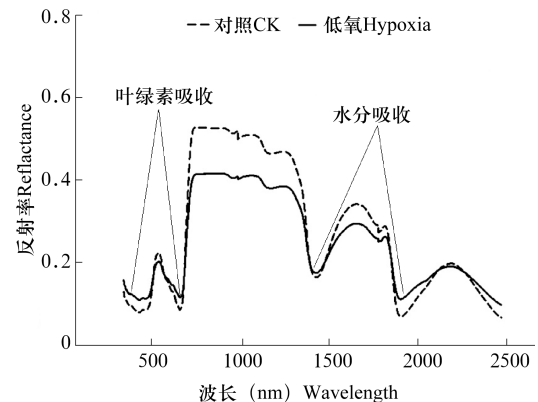
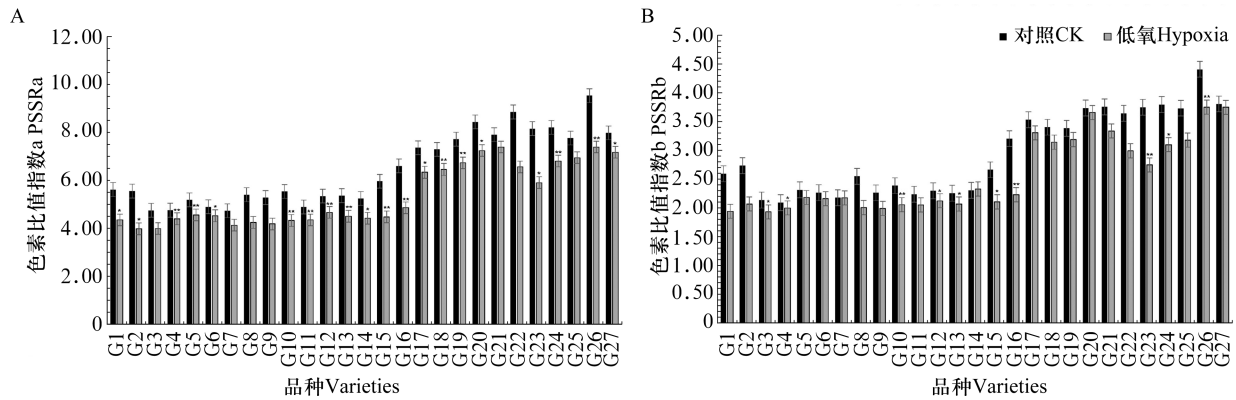


图 2 低氧胁迫 8 d 和正常供氧棉花叶片高光谱特征曲线
Fig. 2 Hyperspectral characteristic curve of cotton leaves under hypoxia stress for 8 days and normal oxygen supply

2.2.2 低氧胁迫对色素相关光谱指数的影响 低氧处理后 27 个棉花品种的色素比值指数 a 和色素比值指数 b 与对照相比平均分别降低 16.7% 和 12.4%,低氧胁迫

迫降低了棉花叶片的色素含量且不同棉花品种的色素含量变化是有差异的。从色素比值指数 a 指数来看, G2、G23、G16 三个品种色素含量下降较为显著, 分别达到 28.4%、27.6% 和 26.4%, 而 G21、G6 和 G4 下降幅度最小, 仅为 6.4%、7.6% 和 7.6%。从色素比值指数 b

指数来看, G16、G23 和 G1 三个品种下降较显著, 分别为 30.4%、26.7% 和 25.2%, 而 G27、G7 和 G14 三个品种与对照相比无显著变化(图 3)。以上分析可以看出, 低氧胁迫对不同品种的棉花幼苗色素含量的抑制作用存在差异, 这可能造成不同品种棉花耐涝性的差别。



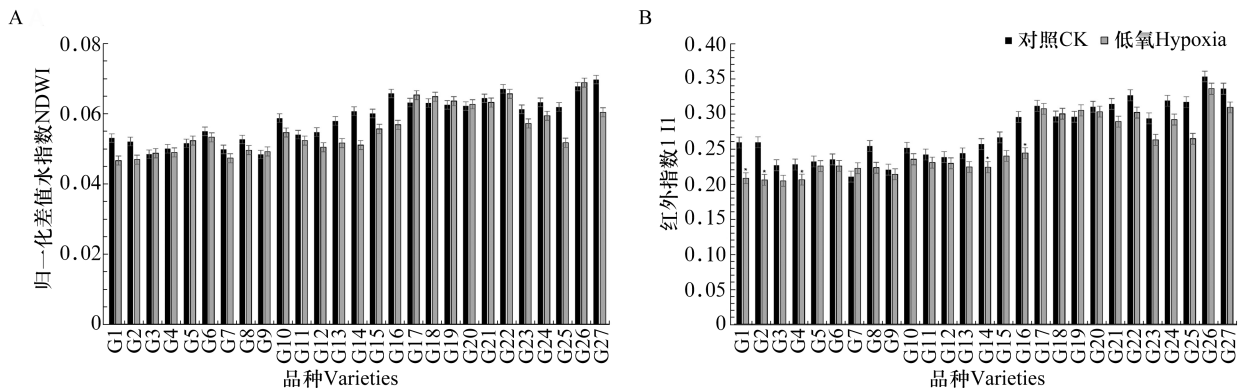
PSSRa: Pigment specific simple ratio a, PSSRb: Pigment specific simple ratio b, the same as below

图 3 27 个棉花品种苗期低氧胁迫 8 d 和正常供氧色素相关光谱指数变化

Fig. 3 Changes of spectral index of 27 cotton varieties under hypoxia stress for 8 days and normal oxygen supply at seedling stage

2.2.3 低氧胁迫对水分相关光谱指数的影响 低氧处理后 27 个棉花品种的归一化差值水指数和红外指数 1 相对于对照平均分别降低 5.1% 和 7.3%。低氧胁迫降低了棉花叶片的水分含量, 不同棉花品种的水分含量变化存在差异。从归一化差值水指数来看, G25、G14 和 G16 三个品种水分含量下降较为显著, 分别达到 16.5%、15.9% 和 13.6%, 而 G4、G22 和 G21 三个品种下降幅度较小, 仅为 2.1%、2.1% 和 1.9%, G3、G20 和 G5 三个品种与对照相比无显著变化, 变化范围仅为 0.6%、0.8% 和 1.4%, 从侧面显示了这 3 个品种具有较高水分保持能力,

受低氧胁迫影响较小。G17、G18 和 G19 三个品种有小幅度的上升, 分别为 3.3%、2.9% 和 1.7%, 这可能是品种间差异或测量误差造成的。从红外指数 1 来看, G2、G1 和 G16 三个品种下降最显著, 分别为 20.7%、19.7% 和 17.4%, 而 G17、G20 和 G5 三个品种下降幅度最小, 仅为 1.3%、2.3%、2.8%。G7、G19 和 G18 三个品种有小幅上升, 分别为 5.7%、3.1%、1.3%(图 4)。以上结果显示, 低氧胁迫下不同品种的棉花幼苗对水分含量的保持存在较大的差异, 水分含量可作为评价不同品种棉花耐涝性的标准之一。



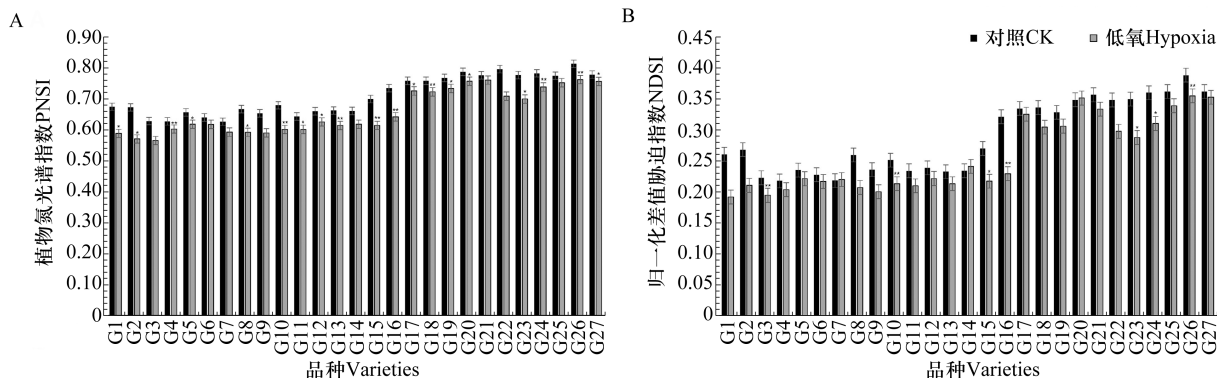
NDWI: Normalized different water index, I1: Infrared index 1, the same as below

图 4 27 个棉花品种苗期低氧胁迫 8 d 和正常供水水分相关光谱指数变化

Fig. 4 Changes of 27 cotton cultivars at seedling stage under hypoxia stress for 8 d and normal oxygen water related spectral indices

2.2.4 低氧胁迫对氮素相关光谱指数的影响 低氧处理后 27 个棉花品种的植物氮光谱指数和归一化差值胁迫指数平均为 0.658 和 0.258, 与对照相比分别降低了 7.2% 和 10.7%。在本研究中, 低氧胁迫降低了棉花叶片的氮素含量, 不同棉花品种的氮素含量变化存在一定差异。G7、G20 和 G27 三个品种的植物氮光谱指数和归一化差值胁迫指数与对照相比均差异不显著。从植物氮光谱指数来看, G2、G1

和 G16 三个品种氮素含量下降幅度较大, 分别达到 15.1%、12.8% 和 12.5%, 而 G25、G27 和 G21 下降幅度较小, 仅为 2.9%、2.8% 和 2.0%。从归一化差值胁迫指数来看, G16、G1 和 G2 三个品种下降较为显著, 分别为 28.6%、26.4% 和 21.5% (图 5)。结果表明, 低氧胁迫对不同品种的棉花幼苗氮素含量的抑制效果不同, 不同品种之间存在显著差异。这可能造成不同品种棉花涝渍抵抗力的差别。



PNSI: Plant nitrogen spectral index, NDSI: Normalized different stress index, the same as below

图 5 27 个棉花品种苗期低氧胁迫 8 d 和正常供氧氮素相关光谱指数变化

Fig. 5 Changes of 27 cotton varieties under hypoxia stress for 8 d at seedling stage and normal oxygen and nitrogen supply

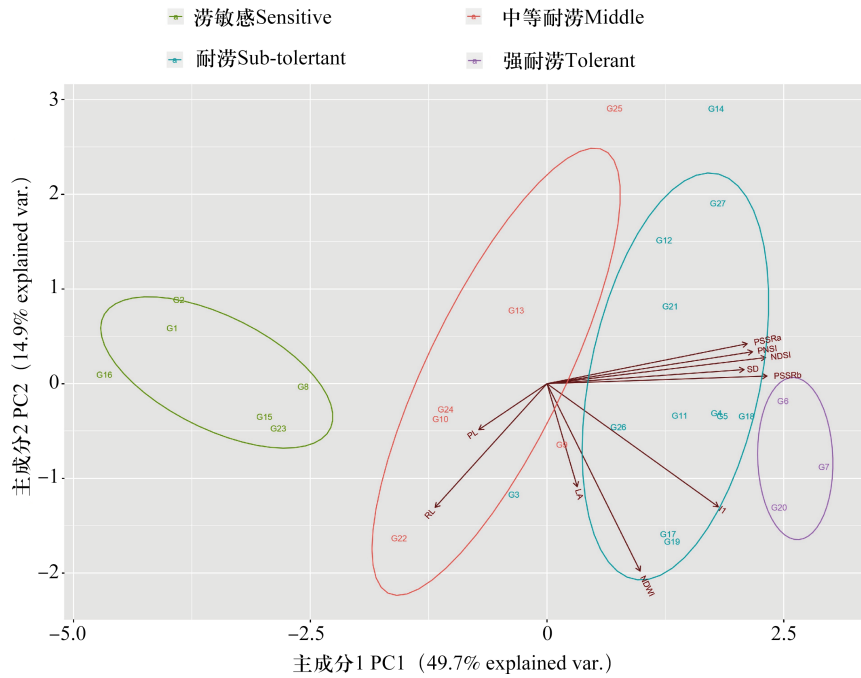
2.3 光谱指数筛选

2.3.1 主成分分析 棉花耐涝性是一个复杂的综合性状, 依靠单一的指标难以直接精确的鉴定不同品种棉花的耐涝性。利用主成分分析可将多个指标浓缩为少数几个综合的指标^[22]。基于 27 个棉花品种 10 个单项指标耐涝系数, 进行主成分分析。结果显示前 4 个主成分的贡献率分别为 49.73%、14.89%、11.01% 和 8.53%, 包含了总体 84.16% 的信息, 表明这 4 个主成分可反映 10 个单项指标的绝大多数信息, 可将原来的 10 个单项指标精简为 4 个综合的指标。使用 R 语言对前 2 个主成分分析结果进行可视化 (图 6), 27 个棉花品种按照耐涝性聚为 4 类, 第一类强耐涝品种: G7、G20、G6 共 3 个; 第二类耐涝品种: G4、G17、G18、G5、G27、G11、G19、G26、G21、G14、G12、G3 共 12 个; 第三类中等耐涝品种: G25、G9、G24、G10、G13、G22 共 6 个; 第四类涝敏感品种: G1、G8、G15、G2、G16、G23 共 6 个, 不同耐涝种类间的差异较大。色素比值指数 b 在主成分 1 上对强耐涝品种贡献最大, 色素比值指数 a、植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数、茎粗、红外指数 1 等指标在主成分 1 上对耐涝品种的贡献较大, 而叶面积、归一化差值水指数在主成分 2 上对耐涝品种的贡献较大。株高在主成分 1 上对中等耐涝

品种贡献较大, 总根长在主成分 1 和主成分 2 上对中等耐涝品种贡献相当。无相关指标对涝渍敏感品种有贡献。

2.3.2 逐步回归分析 通过逐步回归分析建立最优回归方程: $D=0.161+0.220 SD+0.068 LA+0.358 PSSRa+0.404 I1+0.292 NDSI$, 决定系数 $R^2=0.9849$, $P=0.0001$ 。由方程可知: 10 个单项指标中的茎粗、叶面积、色素比值指数 a、红外指数 1、归一化差值胁迫指数可解释 D 值 98.49% 的变异, 是影响 D 值的关键指标。利用回归分析建立的模型, 可准确完成对 D 值的预测, 实现棉花苗期耐涝性的综合评价。

2.3.3 系统聚类分析 根据 27 个棉花品种 10 个单项指标耐涝系数以及主成分分析得到的 4 个主成分的贡献率和规格化特征向量, 可计算得到耐涝综合评价指标 D 值, 并将其排序。其中, 品种 G7 的 D 值最大, 表明其耐涝性最强; 品种 G2 的 D 值最小, 表明其耐涝性最弱。对耐涝综合评价指标 D 值进行聚类分析, 在相对距离为 0.11 时可将 27 个供试品种按耐涝性分为 4 类: 第 I 类强耐涝品种 3 个, 分别为 G7、G20、G6; 第 II 类耐涝品种 12 个, 分别为 G4、G17、G18、G5、G27、G11、G19、G26、G21、G14、G12、G3; 第 III 类中等耐涝品种 6 个, 分别为 G25、G9、G24、G10、G13、G22; 第 IV 类涝敏感



从原点出发的箭头指向及箭头末端的单项指标坐标位点分别代表 10 个单项指标对 2 个主成分及不同耐涝性品种的贡献,特征较相近的品种聚集在一起,外围的圆圈为拟合的范围

The arrow pointing from the origin and the individual index coordinate points at the end of the arrow represent the contribution of 10 individual indexes to the two principal components and different waterlogging tolerance varieties, varieties with similar characteristics are clustered together, and the outer circle is the fitting range

图 6 27 个棉花品种与 10 个苗期耐涝性相关单项指标主成分分析

Fig. 6 The principal component analysis of 27 cotton varieties and 10 individual indexes related to waterlogging tolerance at seedling stage

型品种 6 个,分别为 G1、G8、G15、G2、G16、G23(图 7)。本聚类结果与前两个主成分进行的主成分分析结果完全一致。说明主成分 3、4 解释变异不大,前两个主成分包含的信息即可满足综合耐涝性评价。

2.4 光谱鉴定与单项指标鉴定的相关性

27 个棉花品种的 10 个单项指标相关性结果显示(图 8)。茎粗与总根长显著负相关,与色素比值指数 a、色素比值指数 b、植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数以及红外指数 1 极显著正相关,与归一化差值水指数相关性差异不显著。叶面积与其余 9 个单项指标相关性差异不显著。总根长与色素比值指数 a、植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数呈显著负相关,与归一化差值水指数、红外指数 1 相关性差异不显著。株高与其余 9 个单项指标相关性差异不显著。2 个色素相关指数色素比值指数 a、色素比值指数 b 分别与 2 个氮素相关指数植物氮光谱指数、归一化差值胁迫指数均极显著正相关,其中色素比值指数 b 和归一化差值胁迫指数的相关系数高达 0.93,色素比值指数 a 和色素比值指数 b 分别与红外指数 1 呈显著和极显著正相关。红外指数 1 与

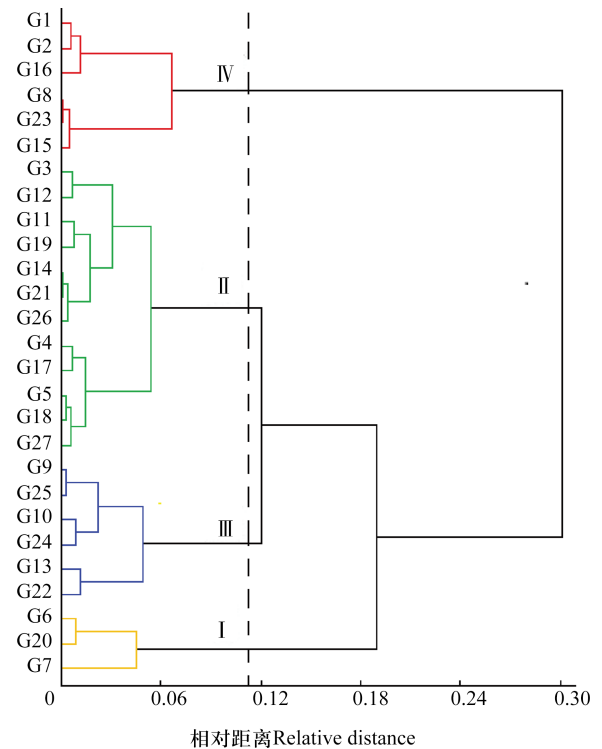
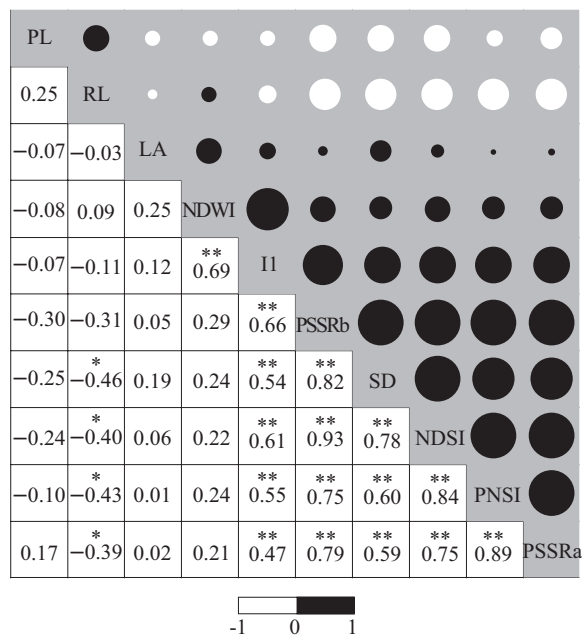


图 7 27 个棉花品种苗期耐涝性聚类分析

Fig. 7 The cluster analysis of waterlogging tolerance of 27 cotton varieties at seedling stage

氮素相关指数显著正相关。归一化差值水指数仅与红外指数 1 极显著正相关。色素比值指数 a 与色素比值指数 b、植物氮光谱指数与归一化差值胁迫指数之间呈极显著正相关。结果表明:色素、水分、氮素相关光谱指数作为鉴定棉花耐涝性指标具有可靠性,且各个指标之间相互影响。



右上部分黑色代表正相关,白色代表负相关。圆圈的大小代表相关性强弱,圆圈越大相关性越强,圆圈越小相关性越弱。左下的数字代表详细的相关性数值

In the upper right part of the figure, black represents positive correlation, and white represents negative correlation. The size of the circle represents the strength of the correlation. The larger the circle, the stronger the correlation, and the smaller the circle, the weaker the correlation. The numbers on the bottom left represent detailed correlation values

图 8 27 个棉花品种苗期耐涝性光谱鉴定与单项指标鉴定相关性

Fig. 8 Correlation of spectral identification and single index identification of 27 cotton varieties at seedling stage

3 讨论

低氧是涝渍胁迫的次生胁迫中最主要、最直接的影响因素。本研究利用低氧胁迫系统,精确地控制根际含氧量,相对前人的涝渍胁迫试验,试验控制更严密。耐涝性是一个复杂的综合性状,本研究选择具有代表性的株高、茎粗、总根长、叶面积 4 个表型性状和代表色素、水分、氮素的 6 个高光谱指数的耐涝性系数作为耐涝性鉴定指标,耐涝性系数消除了种间固有差异,更能体现种质耐涝性水平。

涝渍对棉花的影响可分为地上和地下两部分,

其中根系是最早且是最直接受到胁迫影响的器官部位。本试验中,低氧胁迫下不同棉花品种株高、茎粗、总根长、叶面积均受到不同程度的抑制。与对照相比,部分棉花品种其植株生长受抑制较为严重,耐涝性较弱,而部分品种下降幅度极小,耐涝性强。由本试验中低氧前后水分相关光谱指数归一化差值水指数数值变化可知,涝渍胁迫下植株叶片失水严重。而水是光合作用的参与者,脱水会直接抑制光合作用。前人研究表明涝渍胁迫下涝渍敏感型棉花光合系统 II (PSII, photosynthetic system II) 胞间 CO₂ 浓度和最大光化学效率显著下降,非光化学猝灭增加,净光合作用显著降低^[22]。由此可知,涝渍通过抑制光合作用影响植株地上部分的生长。而植株地下部分生长受抑制,其原因可能是本试验低氧处理 8 d 时间较长,耐性强的品种形态结构已经发生了适应性变化,产生通气组织、不定根等结构,促进氧气向根际渗透,缓解根系缺氧损伤^[23]。耐涝性差的品种,不能及时排除根系在无氧条件下产生的乙醇、乙醛等物质,破坏了植株体内活性氧代谢系统的平衡,导致根系坏死,总根长减少。

邓来飞等^[24]研究表明在水分胁迫下梭梭的色素相关波段光谱曲线高于对照,这与本研究中 27 个棉花品种的色素相关指数色素比值指数 a、色素比值指数 b 在低氧条件下出现下降趋势结果一致,表明低氧胁迫抑制叶片光合色素合成。光合色素是光合作用的必要物质,光合色素的减少直接影响光合作用有机物的合成。Pan 等^[22]基于高光谱图像的色素含量分析显示,低氧胁迫下涝渍敏感型棉花叶片的色素含量下降。主要是由于涝渍胁迫破坏植物体内代谢平衡,造成叶绿体质膜氧化受损,光合色素合成减少。可见色素含量可作为低氧胁迫下棉花耐涝性评价的一个重要指标。

Fang 等^[25]创建了一种基于光谱相似性水分指数的叶片含水量光谱指标,为水分估测光谱模型的建立提供了理论支撑。目前 Yang 等^[26]也建立了基于高光谱的涝渍胁迫下冬小麦水分估测模型。本研究中,低氧胁迫下涝渍敏感型棉花水分相关指数归一化差值水指数值显著下降,可能是由于涝渍胁迫造成根系缺氧,延缓根系生长并降低根系水分传导率,从而导致叶片失水^[27]。水分含量可作为低氧胁迫下棉花耐涝性评价的一个重要指标。

目前已建立较多氮素相关光谱指标估测模型,如杨海波等^[28]利用光谱指数归一化差分植被指数 (NDVI, normalized difference vegetation index) 估测

马铃薯植株不同生育时期氮素浓度, 构建了基于时间序列归一化光谱指数时间序列归一化差分植被指数 (TNDVI, time series normalized difference vegetation index) 的线性氮素估测模型。马岩川等^[29]选取归一化差值胁迫指数作为最优光谱指数, 建立棉花冠层含氮量高光谱监测模型。Men 等^[30]实验结果表明, 涝渍胁迫下施加氮肥, 可增加油菜干物质和氮素的积累, 同时也增加了叶片叶绿素含量, 超氧化物歧化酶 (SOD, superoxide dismutase)、过氧化氢酶 (CAT, catalase) 和过氧化物酶 (POD, peroxidase) 活性显著增强, 叶片和根部丙二醛 (MDA, malondialdehyde) 含量下降。由此可见, 氮肥可有效缓解涝渍对植株生长的抑制, 减轻涝渍危害。而氮素是氮肥主要成分, 氮素水平可在一定程度上反映植株生长状态。本研究中, 耐涝性棉花品种氮素相关光谱指数在涝渍胁迫下下降幅度小, 且氮素光谱指数植物氮光谱指数及归一化差值胁迫指数与传统耐涝性指标茎粗极显著相关。氮素含量可作为低氧胁迫下棉花耐涝性评价的一个重要指标。

本课题组前期基于表型、生理、SSR 分子标记技术从国家棉花种质中期库征集到的 263 份陆地棉种质材料中鉴定出 17 份耐涝、17 份涝敏感共计 34 份材料^[6,31]。本试验选用的 27 份种质材料均来自这 34 份材料, 且本次基于光谱特征的棉花苗期耐涝性鉴定结果与前期根据供试材料的选育和种植区域特点进行的评估鉴定结果基本相等, 其中包含了极端耐涝品种 G20 和 3 份极端涝渍敏感品种 G1、G2 和 G8, 因此本试验 27 份供试材料在涝渍方面具有一定的代表性。本试验构建的基于高光谱的棉花苗期耐涝性鉴定优化模型在鉴定时间和工作量上均有较大的优势, 且利用该模型对供试材料的评估和分类结果与前期“双套盆”法鉴定结果相关性较高^[31]。

本研究结合 6 个光谱特征指标与 4 个传统鉴定指标, 鉴定了 27 个棉花品种并将其分为 4 个不同耐涝等级。构建了基于高光谱图像的棉花苗期耐涝性鉴定优化模型, 为棉花耐涝性的早期鉴定以及棉花耐涝资源的筛选与鉴定提供重要参考, 同时也为优质种质资源的鉴定提供新的方法。

参考文献

- [1] 喻树迅, 范术丽, 王寒涛, 魏恒玲, 庞朝友. 中国棉花高产育种研究进展. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3465-3476
Yu S X, Fan S L, Wang H T, Wei H L, Pang C Y. Advances in cotton breeding for high yield in China. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(18): 3465-3476
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2020: 383-387
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2020: 383-387
- [3] Zhang Y J, Liu G Y, Dong H Z, Li C D. Waterlogging stress in cotton: Damage, adaptability, alleviation strategies, and mechanisms. The Crop Journal, 2021, 9(2): 257-270
- [4] Najeeb U, Bange M P, Tan D K Y, Atwell B J. Consequences of waterlogging in cotton and opportunities for mitigation of yield losses. Annals of Botany Plants, 2015, 7(4): 55-68
- [5] Ahmed F, Rafii M Y, Ismail M R, Juraimi A S, Rahim H A, Asfaliza R, Latif M A. Waterlogging tolerance of crops: Breeding, mechanism of tolerance, molecular approaches, and future prospects. BioMed Research International, 2012, 2013(1): 963525
- [6] 杨婷, 贞平, 汪媛媛, 李晓龙, 张文英. 棉花耐涝相关种质资源遗传多样性分析. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 889-894
Yang T, Yun P, Wang Y Y, Li X L, Zhang W Y. Genetic diversity analysis of waterlogging related accessions in upland cotton. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 889-894
- [7] 王天友, 王有武, 曹新川, 刘春艳, 秦宁, 何良荣. 新疆陆地棉种质资源表型性状遗传多样性分析. 种子, 2020, 39(4): 5-11
Wang T Y, Wang Y W, Cao X C, Liu C Y, Qin N, He L R. Genetic diversity analysis based on phenotypic traits of upland cotton germplasms in southern xinjiang region. Seed, 2020, 39(4): 5-11
- [8] 代攀虹, 孙君灵, 贾银华, 杜雄明, 王溢. 利用表型数据构建陆地棉核心种质. 植物遗传资源学报, 2016, 17(6): 961-968
Dai P H, Sun J L, Jia Y H, Du X M, Wang M. The core germplasm of upland cotton was constructed by phenotypic data. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(6): 961-968
- [9] 杜雄明, 刘方, 王坤波, 贾银华, 周忠丽, 何守朴, 龚文芳, 潘兆娥, 王立如, 耿晓丽, 庞保印. 棉花种质资源收集鉴定与创新利用. 棉花学报, 2017, 29(S1): 51-61
Du X M, Liu F, Wang K B, Jia Y H, Zhou Z H, He S P, Gong W F, Pan Z E, Wang L R, Geng X L, Pang B Y. Collection, identification and innovative utilization of cotton germplasm resources. Journal of Cotton Research, 2017, 29(S1): 51-61
- [10] 徐道青, 刘小玲, 王维, 陈敏, 阚画春, 李常凤, 郑曙峰. 淹水胁迫下棉花叶片高光谱特征及叶绿素含量估算模型. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3289-3296
Xu D Q, Liu X L, Wang W, Chen M, Kan H C, Li C F, Zheng S F. Hyperspectral characteristics and chlorophyll content estimation model of cotton leaves under waterlogging stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3289-3296
- [11] 张凝, 杨贵军, 赵春江, 张竞成, 杨小冬, 潘瑜春, 黄文江, 徐波, 李明, 朱西存, 李振海. 作物病虫害高光谱遥感进展与展望. 遥感学报, 2021, 25(1): 403-422
Zhang N, Yang G J, Zhao C J, Zhang J C, Yang X D, Pan Y C, Huang W J, Xu B, Li M, Zhu X C, Li Z H. Progress and prospect of hyperspectral remote sensing for crop diseases and insect pests. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 403-422
- [12] 吴永清, 李明, 张波, 张影全, 郭波莉. 高光谱成像技术在谷物品质检测中的应用进展. 中国粮油学报, 2021, 36(5): 165-

- 173
Wu Y Q, Li M, Zhang B, Zhang Y Q, Guo B L. Progress in application of hyperspectral imaging in grain quality detection. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(5): 165-173
- [13] 张小敏, 张延宁, 姜海益, 王怡田, 林洋洋, 饶秀勤. 基于高光谱成像技术的油菜苗期温度胁迫检测方法. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 232-241, 276
Zhang X M, Zhang Y N, Jiang H Y, Wang Y T, Lin Y Y, Rao X Q. Detection method of temperature stress in rapeseed seedling stage based on hyperspectral imaging. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 232-241, 276
- [14] 谢传奇, 邵咏妮, 高俊峰, 何勇. 高光谱成像技术检测高温障碍胁迫下番茄叶片色差的研究. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(12): 3431-3435
Xie C Q, Shao Y N, Gao J F, He Y. Study on detection of chromatic aberration of tomato leaves under heat barrier stress by hyperspectral imaging. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(12): 3431-3435
- [15] Pandey P, Ge Y F, Stoerger V, Schnable J C. High throughput in vivo analysis of plant leaf chemical properties using hyperspectral imaging. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1348
- [16] Simko I, Hayes R J, Furbank R T. Non-destructive phenotyping of lettuce plants in early stages of development with optical sensors. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1985
- [17] 李燕丽, 熊勤学, 卢碧林, 李继福, 李磊, 田广丽. 渍害胁迫下小麦 SPAD 的高光谱监测方法研究. *灌溉排水学报*, 2020, 39(12): 41-48
Li Y L, Xiong Q X, Lu B L, Li J F, Li L, Tian G L. Hyperspectral monitoring method of wheat SPAD under waterlogging stress. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(12): 41-48
- [18] Zarco Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, Noland T L, Sampson P H. Vegetation stress detection through chlorophyll a + b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(5): 1433-1441
- [19] 王强, 易秋香, 包安明, 赵金. 棉花冠层水分含量估算的高光谱指数研究. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(2): 507-512
Wang Q, Yi Q X, Bao A M, Zhao J. Hyperspectral index for estimation of cotton canopy moisture content. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(2): 507-512
- [20] 周丽丽, 冯汉字, 阎忠敏, 刘克, 周顺利. 玉米叶片氮含量的高光谱估算及其品种差异. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 195-199
Zhou L L, Feng H Y, Yan Z M, Liu K, Zhou S L. Hyperspectral diagnosis of leaf N concentration of maize and variety difference. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 195-199
- [21] 耿雷跃, 马小定, 崔迪, 张启星, 韩冰, 韩龙植. 水稻全生育期耐盐性鉴定评价方法研究. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(2): 267-275
Geng L Y, Ma X D, Cui D, Zhang Q X, Han B, Han L Z. Study on identification and evaluation method of salt tolerance in whole growth period of rice. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(2): 267-275
- [22] Pan R, Jiang W, Wang Q, Xu L, Shabala S, Zhang W Y. Differential response of growth and photosynthesis in diverse cotton genotypes under hypoxia stress. *Photosynthetica*, 2019, 57(3): 772-779
- [23] Zhang Y J, Chen Y Z, Lu H Q, Kong X Q, Dai J L, Li Z H, Dong H Z. Growth, lint yield and changes in physiological attributes of cotton under temporal waterlogging. *Field Crops Research*, 2016, 194: 83-93
- [24] 邓来飞, 张飞, 张海威, 张贤龙, 袁婕. 水胁迫下典型盐生植被梭梭光谱特征分析. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(1): 210-215
Deng L F, Zhang F, Zhang H W, Zhang X L, Yuan J. Spectral characteristics of halophytic vegetation *Haloxyylon ammodendron* under water stress. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(1): 210-215
- [25] Fang M H, Ju W M, Zhan W F, Cheng T, Qiu F, Wang J. A new spectral similarity water index for the estimation of leaf water content from hyperspectral data of leaves. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 13-27
- [26] Yang F F, Liu T, Wang Q Y, Du M Z, Yang T L, Liu D Z, Li S J, Liu S P. Rapid determination of leaf water content for monitoring waterlogging in winter wheat based on hyperspectral parameters. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(10): 2613-2626
- [27] Celedonio R P D S, Abeledo L G, Mantese A I, Miralles D J. Differential root and shoot biomass recovery in wheat and barley with transient waterlogging during preflowering. *Plant and Soil*, 2017, 417: 1-18
- [28] 杨海波, 张加康, 杨柳, 贾禹泽, 刘楠, 李斐. 品种和生育时期对冠层光谱指数 (NDVI) 估测马铃薯植株氮素浓度的影响. *作物学报*, 2020, 46(6): 950-959
Yang H B, Zhang J K, Yang L, Jia Y Z, Liu N, Li F. Effect of variety and growth period on NDVI estimation of nitrogen concentration in potato plants. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(6): 950-959
- [29] 马岩川, 刘浩, 陈智芳, 张凯, 王景雷, 孙景生. 不同水分条件下棉花冠层含氮量高光谱监测研究. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 35-41
Ma Y C, Liu H, Chen Z F, Zhang K, Wang J L, Sun J S. Hyperspectral monitoring of nitrogen content in cotton canopy under different water conditions. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 35-41
- [30] Men S G, Chen H L, Chen S H, Zheng S H, Shen X S, Wang C T, Yang Z P, Liu D H. Effects of supplemental nitrogen application on physiological characteristics, dry matter and nitrogen accumulation of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) under waterlogging stress. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 10201
- [31] 负平, 杨婷, 李晓龙, 张文英. 陆地棉耐涝相关性状主成分及聚类分析. *湖北农业科学*, 2015, 54(22): 5520-5524
Yun P, Yang T, Li X L, Zhang W Y. Principal component analysis and cluster analysis of related traits of waterlogging tolerance in upland cotton. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(22): 5520-5524