

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.007

水分胁迫下菜苔叶绿素分布演化的高光谱分析及 预警研究

王沛芳^{1,2}, 赵少欣^{1,2}, 饶磊³, 杨铮^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究叶片叶绿素受水分胁迫的演变趋势, 精确反映水分胁迫程度与叶绿素含量分布之间的关系, 以南京市大棚菜苔为研究对象, 采用高光谱成像技术获取水分胁迫过程中叶片叶绿素分布的时空变化特征, 系统分析了水分胁迫对菜苔叶绿素分布演化和退化过程的影响规律, 并提出了水分胁迫的敏感指标——叶绿素含量退化趋势指数(D_e)。结果表明: 与可见光图像的绿度分析相比, 高光谱影像可快速准确地获取植株叶绿素含量的分布及变化特征, 可对水分胁迫下植株叶绿素的退化演变特征及规律进行精准分析; 随着水分胁迫程度的加剧, 叶片逐渐黄化衰老, 叶绿素出现叶边缘向叶芯逐渐衰减的趋势; D_e 对菜苔植株的水分胁迫具有较好的敏感性和准确性, 可用于作物水分胁迫的精准预警及缺水阶段评估。

关键词: 水分胁迫; 叶绿素; 高光谱成像技术; 分布演化; 预警信号

中图分类号: S634.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0058-07

Hyperspectral analysis and early warning research on distribution evolution of chlorophyll in Chinese cabbage under water stress

WANG Peifang^{1,2}, ZHAO Shaoxin^{1,2}, RAO Lei³, YANG Zheng^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the evolutionary trend of leaf chlorophyll under water stress and accurately characterize the relationship between water stress intensity and chlorophyll content distribution, Chinese cabbage cultivated in greenhouses of Nanjing City was taken as the research object. Hyperspectral imaging technology was employed to obtain the spatiotemporal variation characteristics of the leaf chlorophyll distribution during the water stress process. The influence patterns of water stress on the distribution evolution and degradation process of chlorophyll in Chinese cabbage were systematically analyzed, and a sensitive indicator for water stress, namely the chlorophyll content degradation trend index (D_e), was proposed. The results show that compared with the greenness analysis of visible light images, hyperspectral images can rapidly and accurately capture the distribution and variation characteristics of plants' chlorophyll content, enabling precise analysis of the degradation and evolution characteristics and regularity of plants' chlorophyll under water stress. As water stress intensifies, leaves gradually turn yellow and senesce, and chlorophyll exhibits a gradual attenuation trend from the leaf edge to the leaf center; D_e shows good sensitivity and accuracy to water stress in Chinese cabbage plants, and it can be used for precise early warning of crops' water stress and assessment of water shortage stages.

Key words: water stress; chlorophyll; hyperspectral imaging technology; distribution evolution; early warning signal

基金项目: 国家基金委创新研究群体项目(51421006)

作者简介: 王沛芳(1973—), 女, 教授, 博士, 主要从事农田灌排系统生态工程研究。E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

引用本文: 王沛芳, 赵少欣, 饶磊, 等. 水分胁迫下菜苔叶绿素分布演化的高光谱分析及预警研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 58-64.

WANG Peifang, ZHAO Shaoxin, RAO Lei, et al. Hyperspectral analysis and early warning research on distribution evolution of chlorophyll in Chinese cabbage under water stress[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 58-64.

水分胁迫下植物的光合作用会受到抑制,造成叶绿素的合成效率降低,分解速率增加,最终表现为叶片衰老变黄,甚至个体植株死亡^[1-2]。植物叶绿素含量变化与植物缺水状态有着极大的相关性^[3-5],对叶绿素含量及分布的动态监测有助于防范水分胁迫的发生。传统的叶绿素含量测定通常采用化学萃取法,可获取样品的平均叶绿素含量,虽具有检测精度高的优点,但检测效率较低。手持式叶绿素测量仪能够通过测量叶面对特定波段的吸收率计算叶绿素相对含量,实现对叶绿素的无损快速检测^[6-7]。然而,该方法检测测试随机性大,较难开展大区域植物的叶绿素动态分布状态的实时监测。高光谱成像通过获取对象在特定波段的反射影像可间接反映植物内叶绿素的含量及分布^[8-10],从而进行水分胁迫^[11]、病虫害^[12]胁迫分析等,具有高效和准确的优点,成为近年来农业智慧化发展的热点技术。另一方面,近地拍摄虽然检测效率较低,但能获得更高的图像精度和光谱准确度,并能较好地降低田间环境、植株形态、光照不均等因素的影响^[13],精准获取植物叶绿素分布状态及动态变化规律,最终实现对农作物健康的准确评估,是高光谱技术在农业领域的研究热点。

本文对水分胁迫条件下菜苔的生长过程进行了高光谱分析,采用伪彩合成手段和色域分离算法实现作物与环境的物相分离,采用特征波段反演算法获得植物叶绿素的叶面分布及动态演化过程,并进一步分析水分胁迫对菜苔叶绿素分布演化的影响规律,获得植物受水分胁迫的敏感指标,以实现植物水分胁迫预警的准确评估。

1 试验材料与方法

1.1 材料

试验对象选用“秋苔 1 号”菜苔,在南京市溧水区蔬菜大棚内进行(图 1)。菜苔于 9 月下旬育苗,10 月中旬定植,定植生长 30 d 后开展试验,共进行 14 d。试验期间大棚内气温为 18.0~27.5℃,相对湿度范围为 30%~50%,平均种植间距为 20 cm。试验中将种植区域分为水分胁迫组和正常养护对照组。试验过程中,水分胁迫组不浇水,对照组保持正常灌溉(每日滴灌水量为 225 cm³/hm²)。



图 1 试验大棚

Fig. 1 Experimental greenhouse

1.2 装置与方法

a. 光谱图像及数据获取。SPECIM IQ 高光谱成像系统参数设置:摄像头分辨率为 512 像素×512 像素,光谱范围 400~1 000 nm,分辨率为 3 nm,采用垂直地面拍摄方式,拍摄高度为 0.6 m。为保持拍摄环境稳定,减少光照度对测试光谱反射率数据的影响,每天在 12:00—13:00 采集光谱图像,拍摄前进行白板校正,并同步记录现场环境的温湿度、光照强度及土壤含水率等参数。

b. 叶绿素测定。随机采集植株不同叶位的叶片,每个植株取 6~8 片。叶样的叶绿素含量采用分光光度法进行分析。每个样本去除叶柄后捣碎,称取 0.2000 g 放入 15 ml 的无水乙醇和丙酮(体积比为 2:1)的混合液中,避光保存 48 h。提取上清液分别在 645 nm 和 663 nm 处测定吸光度值,具体测量和计算方法按照国家标准方法进行^[14-15]。

1.3 物相分离及提取

为了消除视场内环境因素的干扰,采用多通道合并伪彩图的方法,基于色域提取及多点滤波法,将视场中的植物主体与周围土壤环境分离。本文测试了多组波段组合,对比结果表明采用 548.55、675.73、738.50 nm 3 个波段合成伪彩图处理效果最好,处理流程如图 2 所示(图中 λ 为光谱波长)。

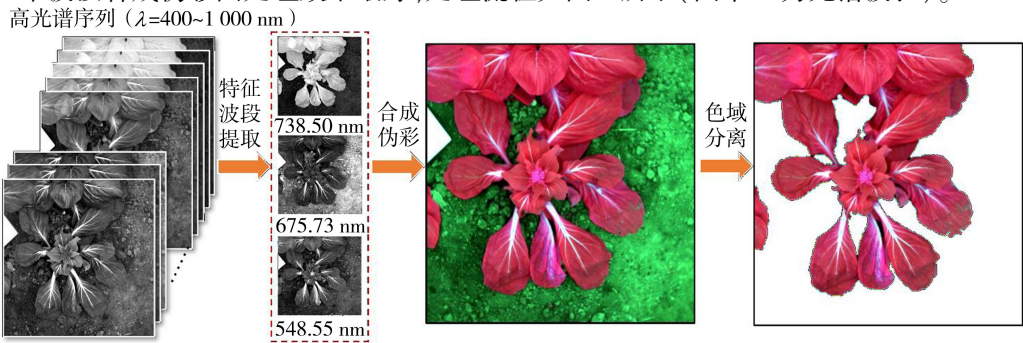


图 2 物相分离及提取原理

Fig. 2 Principles of phase separation and extraction

1.4 叶绿素分布的光谱反演

本文采用多种特征波段提取方法,获取叶绿素含量的特征波段,并建立偏最小二乘(PLSR)回归模型,使用决定系数、均方根误差、相对预测偏差择优选出最佳反演模型为 SFLA-PLSR 模型,该模型的精度较高,训练集决定系数(R_c^2)和预测集决定系数(R_p^2)分别为 0.9196 和 0.8706,训练集和预测集的均方根误差较低,分别为 0.2494 mg/g 和 0.2062 mg/g,模型具有较好的稳定性和预测性。以高光谱图像作为输入数据源,使用 RF-PLSR 模型对植株的叶绿素含量进行数字映射,获得每个像素点的叶绿素含量,结合伪彩图处理技术绘制叶绿素含量分布图。叶绿素含量分布图的获取实现了叶绿素含量的可视化分析,可以有效获取植株叶片叶绿素含量的动态分布规律,实现对植株水分胁迫状态进行精准诊断。

1.5 数据统计与分析

为了综合表达叶片局部叶绿素演变的分布特征及变化速率,进一步将叶面区域离散为叶边、叶中和叶芯 3 个区域,并对各区域的叶绿素衰减率进行加权平均,获取归一化的叶绿素退化趋势指数:

$$D_e = \alpha \sum_{i=1}^m (\psi_{A_i}/m) + \beta \sum_{j=1}^n (\psi_{B_j}/n) + \gamma \sum_{k=1}^l (\psi_{C_k}/l)$$

(1)

其中 $\psi = |(c_p - c_q)/(p - q)|$

式中: D_e 为叶绿素含量退化趋势指数; m 、 n 、 l 分别为叶边、叶中和叶芯内采样点个数; α 、 β 、 γ 分别为叶边、叶中、叶芯视场区域的权重系数, $\alpha + \beta + \gamma = 1$; ψ_{A_i} 、 ψ_{B_j} 、 ψ_{C_k} 分别为叶边、叶中和叶芯内叶绿素含量衰减率; c_p 、 c_q 为局部叶绿素含量; p 、 q 为检测时间。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫下菜苔的叶绿素分布演变

在水分胁迫下,菜苔叶片中的叶绿素呈现不均匀退化规律。为获得精准的叶绿素含量变化状况,采用可见光相机和光谱仪连续获取了 10d 内的叶片光学、叶绿素质量比分布及叶绿素质量比等级分布,如图 3 所示(图中 D1 代表第 1 天,下同)。

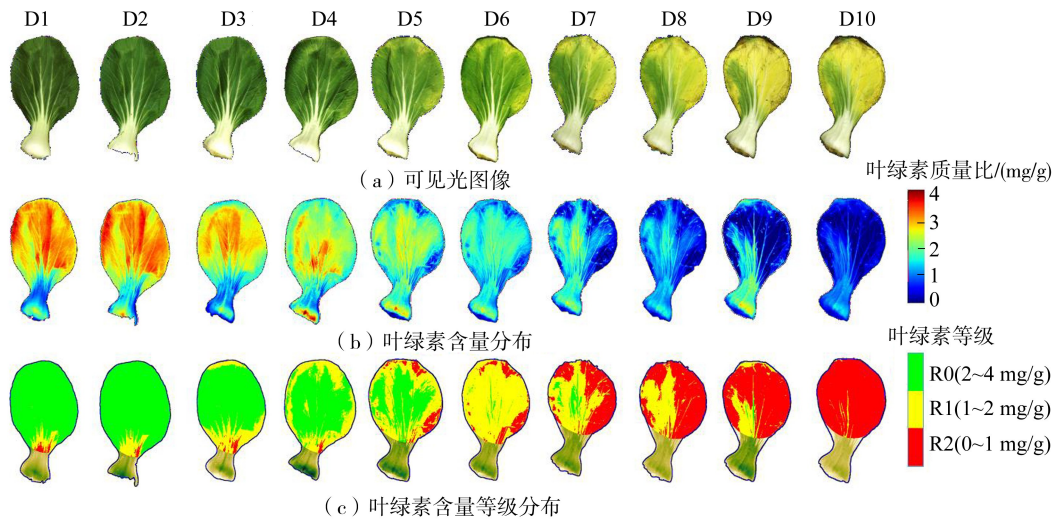


图 3 水分胁迫下叶片叶绿素演变过程

Fig. 3 Evolution of leaf chlorophyll under water stress

由图 3 可知,随着水分胁迫程度的加剧,叶片逐渐黄化衰老,叶绿素含量逐渐衰减且退化程度愈发显著,叶片整体呈现不均匀的分布退化规律,表明水分胁迫对叶片不同部位的影响存在一定的差异性。通常水分胁迫影响具有一定的滞后性^[4]。在水分胁迫前 4 天,叶片可见光图像并没有显著差异,但前 4 天的叶绿素含量分布及等级分布有明显区别。随着胁迫程度的加剧,叶绿素出现叶边缘向叶芯逐渐衰减的趋势,且叶绿素含量等级 R0 分布占比逐渐减少,R1 分布占比随之增加,退化程度逐渐加剧。水分胁迫下叶片叶绿素的分布退化规律解释了叶片脱水后叶边缘率先黄化的特征,符合绿色植株的生理特性^[16]。叶片叶绿素可视化分析方法较人眼观测更为精确敏感,能够实现对植株水分胁迫状态的早期诊断^[17]。鉴于水分胁迫下叶绿素退

化呈现不均匀分布,为进一步提高水分胁迫诊断的准确性,本文对叶片叶绿素退化趋势展开分析,旨在更为精准地把握叶绿素退化的叶片分布规律。

2.2 水分胁迫下菜苔叶绿素退化趋势

基于叶片叶绿素呈现不均匀的分布退化规律,采用横纵轴切线及特征区域划分方法对叶面叶绿素退化趋势进行分析,结果如图 4 所示。随着胁迫程度的加剧,叶左边和叶右边的叶绿素含量较叶脉处退化较快,且叶顶部叶绿素含量在第 3 天就出现明显的下降,叶片横向先出现叶边缘叶绿素退化趋势,纵向出现叶顶部向叶芯的叶绿素退化趋势,与叶绿素叶面分布分析结果一致,但该方法可以实现叶绿素分布量化动态分析。

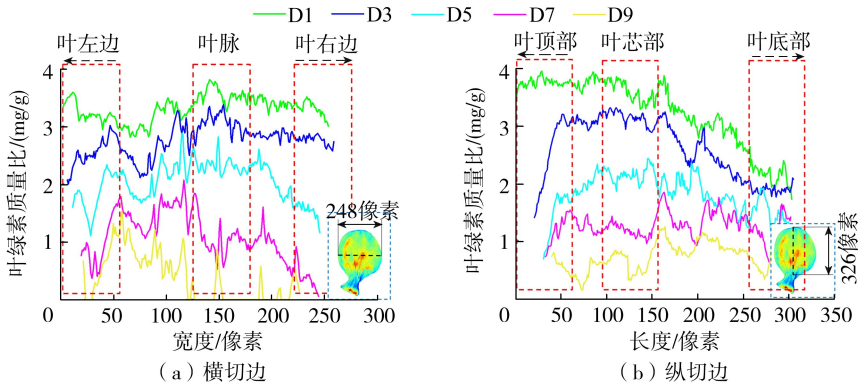


图 4 水分胁迫下叶片横纵截面叶绿素质量比分布

Fig. 4 Chlorophyll content distribution in leaf cross and longitudinal sections under water stress

为精准表达叶面不同区域叶绿素退化特征,进一步将叶面划分为 A(叶边)、B(叶中)、C(叶芯)3 个特征区域,并在各个特征内选取若干个采样点进行叶绿素含量分析,叶片特征区域划分如图 5 所示。

基于高光谱分析技术,利用 SFLA-PLSR 模型获取特征区域的叶绿素含量,计算 A、B、C 视场特征区域的平均叶绿素含量衰减率,并代入式(1)计算 D_e 。基于叶边叶绿素率先衰减的退化规律,为提高 D_e 的敏感性,根据测试结果对式(1)中 α 、 β 、 γ 分别赋值为 0.769、0.154、0.077。在此基础上进一步分析水分胁迫条件下叶绿素含量变化、退化趋势及胁迫程度,结果如图 6 所示。

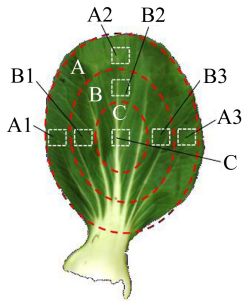


图 5 叶片特征区域划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of leaf characteristic region division

由图 6 可知,在水分胁迫前期第 1 天和第 2 天内,7 个特征区域的叶绿素含量仍处于较高水平,此时 D_e 较小,且 R0 等级分布占比大于 80%,符合正常状态。在第 3~5 天期间,R0 等级分布占比开始显著下降,同时 R1 等级的分布占比迅速上升,叶片处于轻度水分胁迫状态。特征区域 A2 的叶绿素含量急剧减少,且衰减速率较快,导致 D_e 迅速上升,表明 D_e 在叶片受轻度胁迫时即可迅速响应,因此 D_e 可以作为叶片水分胁迫的预警信号。在 5~7 d 期间,R1 等

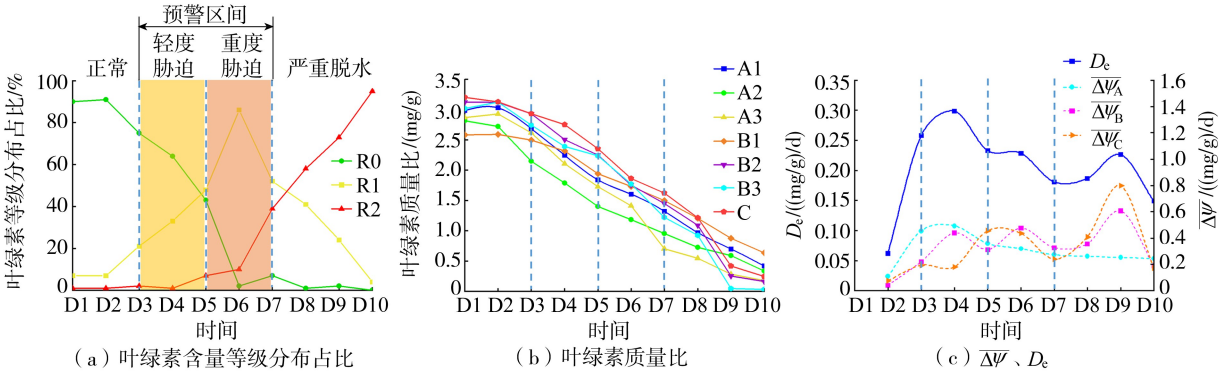


图 6 水分胁迫下叶片叶绿素含量变化

Fig. 6 Changes in leaf chlorophyll content under water stress

级分布占比出现拐点,且 R2 等级分布占比迅速上升, D_e 开始下降,表明叶片处于显著缺水胁迫状态。7~10 d 期间, D_e 虽然出现上升拐点,但是该时期的叶绿素含量处于较低水平,表明叶片处于严重缺水状态。第 9 天的拐点是叶中 B 和叶芯 C 内特征区域的平均叶绿素含量衰减率较高所致,该拐点不能指示叶片开始受到胁迫。综上, D_e 用于指示水分胁迫程度时,应结合叶绿素含量变化曲线、等级分布占比变化曲线进行全面分析。

2.3 菜苔植株水分胁迫全过程分析

基于水分胁迫下叶面叶绿素含量分布结果,采用 D_e 作为预警信号,对菜苔植株进行水分胁迫全过程分析,并依据 D_e 提出水分胁迫的预警区间,进行水分胁迫准确预警。植株叶绿素含量分布及叶绿素含量等级分布如图 7 所示。由图 7 可知,在水分胁迫的第 13 天可见光相机拍摄的叶片颜色才出现肉眼可分辨的变化,而叶绿素含量分布及叶绿素含量等级分布在第 7 天就出现较明显的改变,第 11 天的叶绿素含量分布变化已较为显著,叶绿素含量降低显著,蓝色区域逐渐增加。

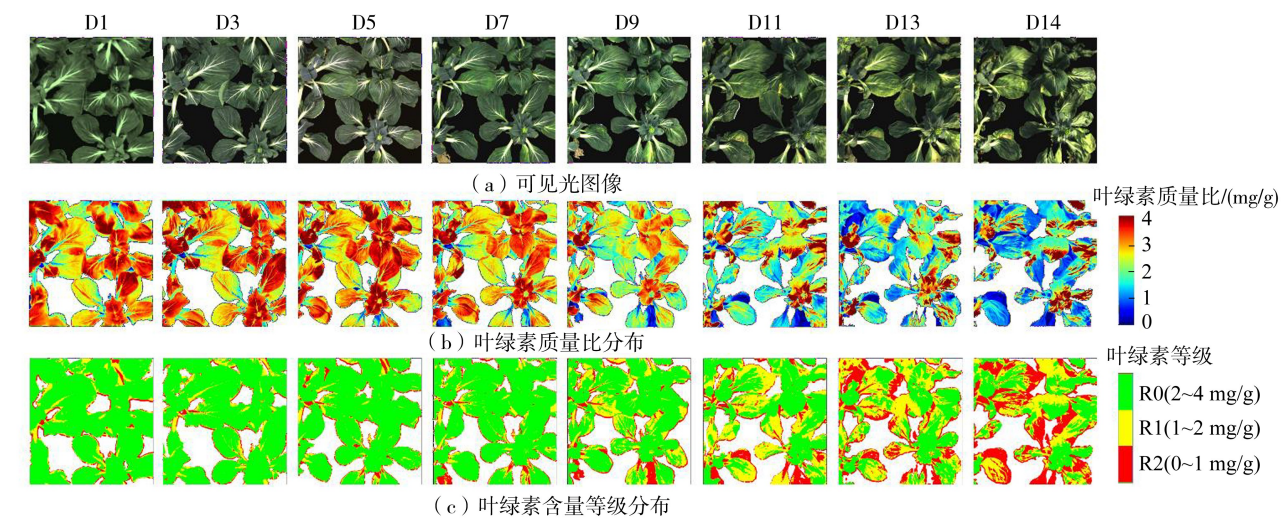


图 7 水分胁迫下菜苔植株变化
Fig. 7 Changes in Chinese cabbage plants under water stress

结合叶绿素含量、叶绿素含量等级分布占比的变化诊断植株的水分胁迫程度,并进行预警区间的划分,结果如图 8 所示。自起始日开始土壤体积含水率不断下降,对菜苔的生长产生了持续胁迫作用。图 8(b) 中对叶绿素质量比数据有效性的验证结果显示,实测值与计算值贴合度良好,且二者变化趋势大体一致,验证了后续基于叶绿素含量变化分析胁迫响应的可靠性。水分胁迫第 2~5 天期间,土壤体积含水率为 20.6%~16.4%, D_e 开始急剧升高,且叶绿素含量出现短期上升趋势,该阶段代表了植物对水分胁迫的初期应激响应。植株在受到水分胁迫时,短期内会出现叶绿素含量增加的现象^[17-19],但此时植株处于非正常状态,植物在轻度胁迫下会启动生理调节机制,调控内源性物质(如氨基酸和抗氧化物质)的合成,保护叶绿体结构免受活性氧损伤,维持自身叶绿素的合成,以增强光合作用效率^[20-21]。水分胁迫第 5~7 天时土壤体积含水率

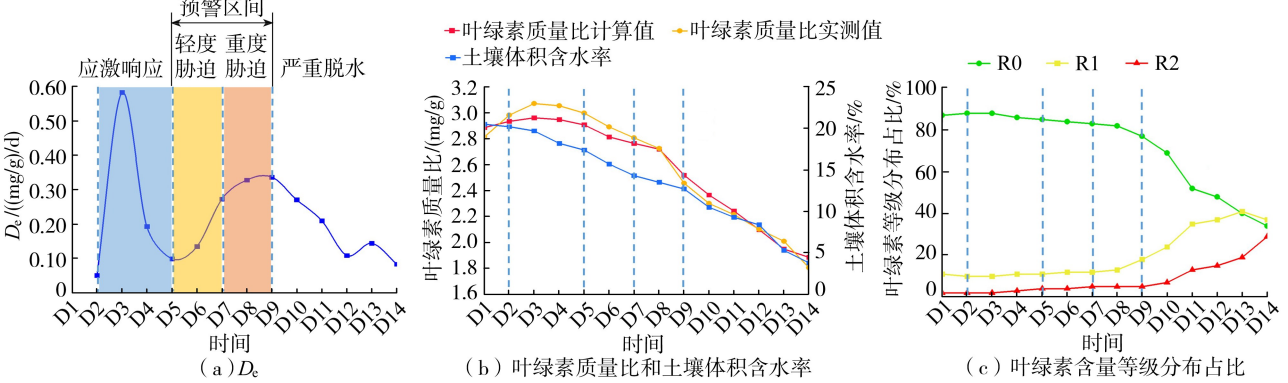


图 8 水分胁迫下菜苔植株叶绿素含量变化
Fig. 8 Changes in chlorophyll content of Chinese cabbage plants under water stress

降低至 16.4%~14.3%,叶绿素含量开始下降,同时 D_e 迅速上升,表明此阶段内植株叶绿素含量衰减速率变化较快,植株处于轻度水分胁迫状态。随着胁迫程度的加剧,第 7~9 天时土壤体积含水率进一步降低至 14.3%~12.6%, D_e 呈现缓慢上升并达到最大拐点,衰减速率达到临界值,植物进入重度胁迫阶段。水分胁迫 9~14 d 期间,土壤体积含水率由 12.6%降低至 4.8%, D_e 到达临界点后开始下降,且叶绿素含量降至较低水平,此时为严重缺水阶段。由此可见,长期水分胁迫会导致植株的叶绿素含量下降,生长受阻,最终导致植株枯萎死亡。基于 D_e 的变化趋势进行胁迫预警区间的划分,符合植株水分胁迫下的叶绿素含量响应的生理特性^[15]。

未受胁迫菜苔植株采用与水分胁迫条件下一致的 D_e 计算方法,分析其动态变化趋势,并结合叶绿素含量及等级分布占比变化进一步分析,结果如图 9 所示。未受胁迫条件下菜苔植株 D_e 值始终稳定在 0.1 (mg/g)/d 以下,显著低于水分胁迫处理组;植株叶绿素含量等级分布占比呈动态变化,无明显单向衰减或激增趋势。从环境条件看,未受胁迫植株生长环境的土壤体积含水率呈小幅波动,始终保持在 20.0%~21.0%的适宜范围内,稳定的水分供给使植株叶绿素含量保持较高水平且呈良性动态波动,未出现水分胁迫下的显著下降或异常上升现象,进一步印证水分条件对植株叶绿素代谢及 D_e 变化的关键调控作用。这一结果表明, D_e 能够对田间植株水分胁迫程度有效预警,为田间作物健康状态及精细化管理决策提供支持。与此同时,与可见光图像的绿度分析相比,高光谱影像可快速准确地获取植株叶绿素含量的分布及变化特征,可对水分胁迫下植株叶绿素的退化演变特征及规律进行精准分析。

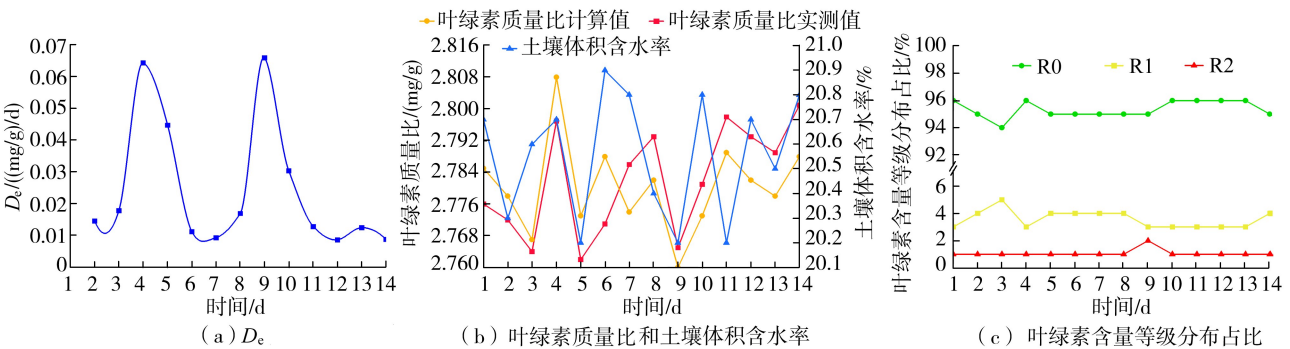


图 9 未受胁迫菜苔植株叶绿素含量变化

Fig. 9 Changes in chlorophyll content of unstressed Chinese cabbage plants

3 结 论

- a. 与可见光图像的绿度分析相比,高光谱影像可快速准确地获取植株叶绿素含量分布及变化特征,可对水分胁迫下植株叶绿素的退化演变特征及规律进行精准分析,获取植株的健康状态。
- b. 通过对植株叶面叶绿素演变过程的分区离散分析,可综合表达植株叶片上叶绿素局部退化速度和退化区域分布特点,可更为准确地反映植株所处的水分胁迫状态。
- c. D_e 出现稳定升高趋势时,表明植株开始处于轻度水分胁迫,当 D_e 达到峰值时表明植株已处于严重水分胁迫状态。 D_e 变化规律与叶片叶绿素横向和纵向切线叶绿素含量变化具有很高的-致性,表明 D_e 对菜苔植株的水分胁迫具有较好的敏感性和准确性,可用于作物水分胁迫的精准预警及缺水阶段评估。

参考文献:

[1] RONAY I,EPHRATH J E,EIZENBERG H,et al. Hyperspectral reflectance and indices for characterizing the dynamics of crop-weed competition for water[J]. Remote Sensing,2021,13(3):513.

[2] YANG Yucun,NAN Rui,MI Tongxi,et al. Rapid and nondestructive evaluation of wheat chlorophyll under drought stress using hyperspectral imaging[J]. International Journal of Molecular Sciences,2023,24(6):5825.

[3] XIE Yongkai,FENG Meichen,WANG Chao,et al. Hyperspectral monitor on chlorophyll density in winter wheat under water stress [J]. Agronomy Journal,2020,112(5):3667-3676.

[4] WANG Na,CLEVERS J G P W,WIENEKE S,et al. Potential of UAV-based sun-induced chlorophyll fluorescence to detect water stress in sugar beet[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2022,323:109033.

[5] 丁继辉,俞双恩,于智恒,等. 农田水位调控下水稻净光合速率日变化规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),

2011,39(1):104-108. (DING Jihui, YU Shuang'en, YU Zhiheng, et al. Experimental study on variation rules of diurnal net photosynthetic rate of paddy rice under water level control in farmland[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011,39(1):104-108. (in Chinese))

[6] YUE Zilong,ZHANG Qilin,ZHU Xingzhou,et al. Chlorophyll content estimation of *Ginkgo* seedlings based on deep learning and hyperspectral imagery[J]. Forests,2024,15(11):2010.

[7] ZHANG Huichun,GE Yufeng,XIE Xinyan,et al. High throughput analysis of leaf chlorophyll content in sorghum using RGB, hyperspectral,and fluorescence imaging and sensor fusion[J]. Plant Methods,2022,18(1):60.

[8] 马春艳,王艺琳,翟丽婷,等. 冬小麦不同叶位叶片的叶绿素含量高光谱估算模型[J]. 农业机械学报,2022,53(6):217-225. (MA Chunyan,WANG Yilin,ZHAI Liting, et al. Hyperspectral estimation model of chlorophyll content in different leaf positions of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 217-225. (in Chinese))

[9] 黄华,李茂亿,陈吟晖,等. 基于 PLSR 的珠江口城市河流水质高光谱反演[J]. 水资源保护,2021,37(5):36-42. (HUANG Hua,LI Maoyi,CHEN Yinhui, et al. Water quality retrieval by hyperspectral for city rivers in Pearl River Estuary based on partial least squares regression[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):36-42. (in Chinese))

[10] 周婷,汪炎,邹俊,等. 基于 PCA 和 SVM 的遥感影像水体提取方法及验证[J]. 水资源保护,2023,39(2):180-189. (ZHOU Ting,WANG Yan,ZOU Jun, et al. PCA and SVM-based algorithm of water area extraction from remote sensing images and its verification[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):180-189. (in Chinese))

[11] MIETTINEN I,ZHANG Chao,ALONSO L,et al. Hyperspectral imaging reveals differential carotenoid and chlorophyll temporal dynamics and spatial patterns in scots pine under water stress[J]. Plant,Cell & Environment,2025,48(2):1535-1554.

[12] PRAPROTNIK E,VONČINA A,ŽIGON P,et al. Early detection of wireworm (Coleoptera:Elateridae) infestation and drought stress in maize using hyperspectral imaging[J]. Agronomy,2023,13(1):178.

[13] 张晓东,毛罕平. 油菜氮素光谱定量分析中水分胁迫与光照影响及修正[J]. 农业机械学报,2009,40(2):164-169. (ZHANG Xiaodong,MAO Hanping. Effect and correction of water stress and lighting factor on rape nitrogen content spectral analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(2):164-169. (in Chinese))

[14] 王芳东. 红壤地区油茶和水稻叶绿素、全氮含量高光谱特征研究[D]. 南昌:江西农业大学,2022.

[15] 赵建贵,王国梁,张宇,等. 番茄苗期叶位色素含量高光谱检测及可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析,2024,44(2):386-391. (ZHAO Jianguai,WANG Guoliang,ZHANG Yu, et al. Hyperspectral detection and visualization of pigment content in different positions of tomato leaf at seedling stage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2024,44(2):386-391. (in Chinese))

[16] 张慧春,张萌,边黎明,等. 基于 YOLO v5 的植物叶绿素含量估测与可视化技术[J]. 农业机械学报,2022,53(4):313-321. (ZHANG Huichun,ZHANG Meng, BIAN Liming, et al. Estimation and visualization of chlorophyll content in plant based on YOLO v5[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):313-321. (in Chinese))

[17] 张淋淋,孙海,于红霞,等. 水分胁迫对西洋参叶片生理生化指标的影响[J]. 吉林农业大学学报,2020,42(4):403-408. (ZHANG Linlin,SUN Hai,YU Hongxia, et al. Effects of water stress on physiological and biochemical indexes of panax quinquefolius leaves[J]. Journal of Jilin Agricultural University,2020,42(4):403-408. (in Chinese))

[18] 张红萍,李明达. 水分胁迫后复水对豌豆叶片叶绿素含量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(2):177-181. (ZHANG Hongping,LI Mingda. Effects of water stress and rewating on chlorophyll content in pea leaves[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2016,34(2):177-181. (in Chinese))

[19] 郝树荣,郭相平,王为木,等. 水稻拔节期水分胁迫及复水对叶片叶绿体色素的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006,34(4):397-400. (HAO Shurong,GUO Xiangping,WANG Weimu, et al. Effects of water stress and rewating at shooting stage of rice on chlorophyll pigments in leaves[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006,34(4):397-400. (in Chinese))

[20] 孙廪,邓荟芬,刘海林,等. 干旱胁迫对苕麻苗期理化指标的影响[J]. 草地学报,2016,24(3):577-580. (SUN Ao,DENG Huifen,LIU Hailin, et al. The effects of drought stress on physicochemical index of the seedling-stage ramie[J]. Acta Agrestia Sinica,2016,24(3):577-580. (in Chinese))

[21] 陈雨森,王浩,孙祎洋,等. 水分胁迫及复水对黄芩生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(6):52-60. (CHEN Yusen,WANG Hao,SUN Yiyang, et al. Effects of water stress and rehydration on physiological characteristics of *Scutellaria baicalensis* Georgi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2024,42(6):52-60. (in Chinese))