

干旱胁迫下冬小麦 (*Triticum aestivum*) 高光谱 特征和生理生态响应

谷艳芳^{1,2}, 丁圣彦^{1,2,*}, 陈海生^{1,2}, 高志英², 邢 倩²

(1. 河南大学生态科学与技术研究所 河南开封 475001; 2. 河南大学生命科学学院 河南开封 475001)

摘要:2006 年于冬小麦 (*Triticum aestivum*) 孕穗期、开花期和灌浆期, 采用 ASD Fieldspec HH 光谱仪测定了不同水分胁迫下冬小麦高光谱反射率、红边参数和对应的冬小麦生理生态参数叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、叶绿素 a + b (Chla + b)、叶片水分含量 (LWC)、叶面积指数 (LAI)。结果表明, 冬小麦生理生态参数随生长发育呈现先上升后下降趋势, Chla、Chlb 和 Chla + b 开花期达最大值; LWC 和 LAI 孕穗期达最大值。随干旱胁迫程度增加, Chla、Chlb 和 Chla + b、LWC 和 LAI 减少。不同水分处理下冬小麦高光谱反射率具有绿色植物特征。用红边一阶微分光谱特征参数分析, 冬小麦孕穗期和开花期红边 (λ_{red}) 位于 728 ~ 730nm, 灌浆期红边 (λ_{red}) 移到 734nm。Chla、Chlb 和 Chla + b 与 $D\lambda_{730} : D\lambda_{702} : D\lambda_{730} : D\lambda_{718}$, LWC 与 $D\lambda_{red} : D\lambda_{718}$ 以及 LAI 与 $D\lambda_{718} : D\lambda_{red} : S_{red}$ 均呈正相关, 相关系数大于 0.5 ($p < 0.05$)。经回归分析, Chl 与 $D\lambda_{730} : D\lambda_{702}$ 、LWC 与 $D\lambda_{red}$ 呈线性关系 ($R^2 = 0.87$), LAI 与 S_{red} 呈二次关系 ($R^2 = 0.68$)。因此, 用冬小麦高光谱特征及红边参数能判断冬小麦生育后期长势和农田水分胁迫程度。

关键词: 冬小麦 (*Triticum aestivum*); 高光谱; 生理生态; 干旱胁迫; 黄淮海平原

文章编号: 1000-0933(2008)06-2690-08 中图分类号: Q142, Q945, Q948, S314, TP79 文献标识码: A

Ecophysiological responses and hyperspectral characteristics of winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress

GU Yan-Fang^{1,2}, DING Sheng-Yan^{1,2,*}, CHEN Hai-Sheng^{1,2}, GAO Zhi-Ying², XING-Qian²

1 Institute of Ecological Science and Technology, Henan University, Kaifeng 475001, China

2 College of Life Science, Henan University, Kaifeng 475001, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2690 ~ 2697.

Abstract: At the booting, flowering, and filling stages, an ASD Fieldspec HandHeld spectrometer was used to measure hyperspectral reflectance, red-edge parameters and their corresponding ecophysiological parameters of the winter wheat (*Triticum aestivum*) under different levels of drought stress. Chlorophyll content peaked at the flowering stage while leaf water content and leaf area index peaked at the booting stage. Chlorophyll content, leaf water content and leaf area index all decreased with increasing levels of drought stress. The first derivative spectra were used to determine the wavelength of the red-edge, the results showed that the red edge was at 728 — 730nm at the booting and flowering stages, then shifted to 734nm at the filling stage. Chlorophyll content was positively correlated with $D\lambda_{730} : D\lambda_{702}$ and $D\lambda_{730} : D\lambda_{718}$; LWC was

基金项目: 国家重大基础研究计划课题(973)资助项目(2005CB211103); 国家自然科学基金资助项目(40671175); 河南省科技攻关资助项目(072102170005)

收稿日期: 2007-03-23; **修订日期:** 2007-11-07

作者简介: 谷艳芳 (1963 ~), 女, 河南开封人, 博士生, 教授, 主要从事生态系统生态学研究. E-mail: guyanfang@henu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syding@henu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by State Key Basic Research and Planning Project (No. 2005CB211103) the National Science Foundation of China (No. 30570301; 40671175) and Key Program of Scientific and Technological Innovations of He'nan Province (No. 072102170005)

Received date: 2007-03-23; **Accepted date:** 2007-11-07

Biography: GU Yan-Fang, Ph. D. candidate, Professor, mainly engaged in ecosystem ecology. E-mail: guyanfang@henu.edu.cn

positively correlated with $D\lambda_{red}$ and $D\lambda_{718}$; LAI was positively correlated with $D\lambda_{718}$, $D\lambda_{red}$, and S_{red} ; correlation coefficients were all greater than 0.5 ($p < 0.05$). Chlorophyll content and $D\lambda_{730}$: $D\lambda_{702}$, LWC and $D\lambda_{red}$ were respectively linearly correlated ($R^2 = 0.87$), while LAI and S_{red} were quadratically correlated ($R^2 = 0.68$).

Key Words: winter wheat (*Triticum aestivum*); hyperspectral; ecophysiological; drought stress; HuangHuaiHai plain

快速准确地预测植物化学成分组成和含量是遥感技术在农林生态学领域应用的重要方面,也是生态学研究的重要课题^[1]。大量研究认为,农作物在可见光区(400 ~ 700nm)、红边区(680 ~ 760nm)和近红外光区(780 ~ 1300nm)的光谱反射率与叶片光合色素的含量、物质含量、地上生物量、叶面指数等有较高相关性^[2~6]。其中,红边区是叶绿素对红光强烈吸收和叶肉强烈反射的分界线,因此,红边一阶微分光谱中红边位置、幅值、曲线特征等与叶绿素、叶面积等有关^[7~9]。Boochs^[10]研究认为与冬小麦(*Triticum aestivum*)叶绿素含量有关的两个峰值在 703 和 735nm,叶绿素的含量与 690nm 和 735nm 幅值比呈负相关;并且冬小麦不同生育期红边位置可横向移动^[9]。Pock^[11]等观察到云杉在环境污染胁迫下,由于针叶叶绿素下降使 λ_{red} 向蓝移 5 nm。Zarco-Tejada^[12]等研究还发现波长 705、722nm 幅值与叶绿素含量和叶绿素荧光有关,光谱参数可在叶片枯黄之前观察到由于胁迫诱导的叶绿素荧光增加。因此,用红边参数特征可以作为非破坏性研究植物受胁迫程度有效途径之一。农作物叶绿素含量、植株水分状况以及叶面积指数是农田干旱程度评价的重要指标,但从冬小麦个体水平上的生理生态特性和群体水平上的高光谱特征综合评价冬小麦不同生育期对于干旱胁迫响应的研究较少。黄河中下游地区是我国小麦主产区之一,该地区全年降雨总量不足且供需错位,干旱常出现在冬小麦拔节以后。及时准确判断冬小麦生育后期长势和农田干旱胁迫程度,是遥感和信息生态学研究的重要课题。本研究用不同水分胁迫下冬小麦高光谱特征与生理生态响应,筛选预测冬小麦水分胁迫程度估算模型,为遥感准确监测冬小麦长势信息、预测干旱胁迫程度和节水灌溉提供科学依据。

1 研究区域概况

本试验在中国科学院封丘农田生态实验站防雨篷下进行。封丘地处黄淮海平原中部,黄河北岸,地理位置在东经 114°14',北纬 34°53' ~ 35°14',平均海拔 67.5 m,年平均降雨量 605 mm,蒸发量 1713 mm,年平均日照时数 2 310 h,无霜期 220 d。种植制度为一年二熟,即冬小麦-玉米或冬小麦-棉花等。该地区无论在气候特征还是生产特征在黄淮海平原均具有代表性。

2 研究方法

2.1 实验设计

冬小麦种植在直径 0.2 m、长 1.0 m 的 PVC 管(与不同水分条件下冬小麦光合产物分配格局及调控机制同步进行)。返青期(2006 年 2 月 24 日)开始水分处理。水分处理设 W_1 充足供水、耕层(0 ~ 40cm)土壤重量含水量 17% ~ 20% (田间土壤最大持水量的 75% ~ 80%)、 W_2 轻度干旱、土壤含水量 13% ~ 17% (田间最大持水量的 60% ~ 65%)、 W_3 严重干旱、土壤重量含水量 10% ~ 13% (田间最大持水量的 40% ~ 45%), W_0 冬小麦返青后不浇水。生育期内每隔 5d 根据当地农田水分蒸发量补充水分,分别在拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和收获期取样、每次每处理取 6 个 PVC 管,管中土壤含水量用烘干法测量(表 1)。

表 1 不同时期 0 ~ 40cm 层土壤重量含水量

Table 1 Soil water content of the 0 ~ 40cm layer at different stages

处理 Treatment	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	收获期 Harvest
W_1	18.02 ± 0.099	19.63 ± 0.102	18.19 ± 0.012	18.16 ± 0.027	16.41 ± 0.084
W_2	16.25 ± 0.084	15.47 ± 0.077	14.68 ± 0.095	15.88 ± 0.097	14.65 ± 0.078
W_3	13.89 ± 0.066	12.44 ± 0.062	11.85 ± 0.064	12.88 ± 0.065	11.76 ± 0.059
W_0	13.08 ± 0.051	11.82 ± 0.067	10.64 ± 0.015	9.60 ± 0.042	8.02 ± 0.096

表中数字为 $\bar{X} \pm S. D.$ Number in table was $\bar{X} \pm S. D.$

2.2 种植与管理

2005 年 10 月 25 日播种,播前该土壤含全氮 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $8.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $232.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。播种时施底肥为尿素 $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷酸二氢铵 $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硫酸二钾 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料一次加入耕层土中、混匀装管,PVC 管埋入地下,上留 10cm 于地上。3 叶期(11 月 15 日)定苗,每管 9 株。冬小麦(*Triticum aestivum*)种植品种选择周麦 18(Zhoumai18)和济麦 20(Jimai20),病虫害防治同大田管理。

2.3 光谱测量方法及特征值提取

采用 ASD FieldSpec HandHeld (Analytical Spectral Device, US) 波段值为 300 ~ 1100 nm,光谱采样间隔 1.6 nm,光谱分辨率 3 nm。分别于 2006 年 4 月 18 日(抽穗期)、5 月 1 日(开花期)、5 月 14 日(灌浆期)选晴朗、无风天气,每天 11:00 ~ 14:00 测冠层光谱反射率。测量时光谱仪视角 8° ,传感器探头垂直向下,距冠层顶垂直高度约 0.7 m,每处理选 6 个观测点,每点记录 10 次数据,取平均值作为该处理的高光谱反射率,测量过程中及时进行标准白板校正。用 ASD ViewSpec Programs 软件读取反射光谱原始数据。

红边(680 ~ 760 nm)参数为红边一阶微分光谱,红边位置、幅值,红边面积。

一阶微分光谱
$$D\lambda_i = \rho(\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}) / 2\Delta\lambda \approx d\rho(\lambda_i) / d\lambda_i$$

式中, i 为光谱通道, λ_i 为各波段的波长, $\Delta\lambda$ 为波长 λ_{i-1} 到 λ_i 的间隔, $\rho(\lambda_i)$ 为波段 λ_i 的反射率, $D\lambda_i$ 为 λ_i 的一阶微分光谱。

红边位置(λ_{red})即红光范围内一阶微分光谱最大值对应的波长;

红边幅值($D\lambda_{\text{red}}$)是红光范围内一阶微分光谱的最大值;

红边面积(S_{red})680 ~ 760 nm 波段一阶微分光谱总合。

2.4 叶绿素含量测量和叶面积指数

叶面积 用 Li-3100(LI-COR Inc., US)叶面积仪测定观测点 30 株冬小麦绿叶总叶面积。

叶绿素含量 测量后选测量点 30 株冬小麦旗叶中间段,配制 1:1(80% 丙酮:90% 酒精)混合液浸提,用 TU-1800 紫外可见分光光度计在 645 nm 和 663 nm 处测定叶绿素浸提液的吸光值,以 Arnon 法修正公式计算叶绿素含量(mg/g)。

叶片含水量 每处理选取旗叶剩余部分称鲜重后, 105°C , 15min 杀青, 70°C , 24 h 烘干计干重。叶片含水量($\text{LWC}\%$) = (鲜重 - 干重) / 鲜重 $\times 100\%$ 。

3 结果

3.1 不同水分处理下冬小麦不同生育期生理参数动态

图 1 显示,叶绿素含量随着发育从拔节期到开花期上升,花后快速下降。 W_1 叶绿素 a + b 含量在 $4.3 \sim 4.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (鲜重),显著高于不同程度干旱处理($p < 0.01$)。两个品种 W_2 、 W_3 、 W_0 处理在开花期比 W_1 处理低 15% ~ 17%、22% ~ 25%、40% ~ 45%,特别是 W_0 处理孕穗期后叶绿素 a、b 和叶绿素 a + b 的量锐减。叶片水分含量在孕穗期达最大值,周麦 18 叶水分含量在 75% ~ 80%,济麦 20 在 72% ~ 76%。干旱胁迫对叶片水分含量影响在灌浆期比较明显。不同品种叶面积指数变化规律一致,拔节期到孕穗期冬小麦生长迅速、绿叶面积剧增,干旱胁迫导致绿叶面积减少。 W_2 比 W_1 下降 22% ~ 25%; W_3 比 W_1 下降 47% ~ 50% ($p < 0.01$),但此期 W_3 、 W_0 差别不大,孕穗期到开花期、灌浆期由于下部叶片和无效分蘖的枯萎叶面积持续下降。

3.2 不同水分处理下冬小麦不同生育期高光谱特征

图 2 显示,不同水分处理下冬小麦孕穗期和开花期原始反射光谱趋势一致,具有一般绿色植物的特征。在 400 ~ 700nm 可见光范围内,有明显的 550nm 处绿峰、680nm 处红光低谷和 780 ~ 1100nm 近红外区的高原区。可见光范围内的峰和谷是由于叶绿素为主的色素强烈吸收红光而相对反射绿光造成的^[13],从 680 ~ 760nm 光谱反射率随波长增加快速增加,从 760nm 开始光谱反射率缓慢增加到 924nm 处,形成一个相对高的反射平台,在 960 ~ 980nm 处出现光谱反射率低谷,反射率在 0.3 ~ 0.6 之间。近红外区反射率的变化与植物叶内部结构,糖、生物量、叶面积等有关^[1,5]。灌浆期光谱反射有较大变化,可见光区绿峰和红光谷不明显,近红

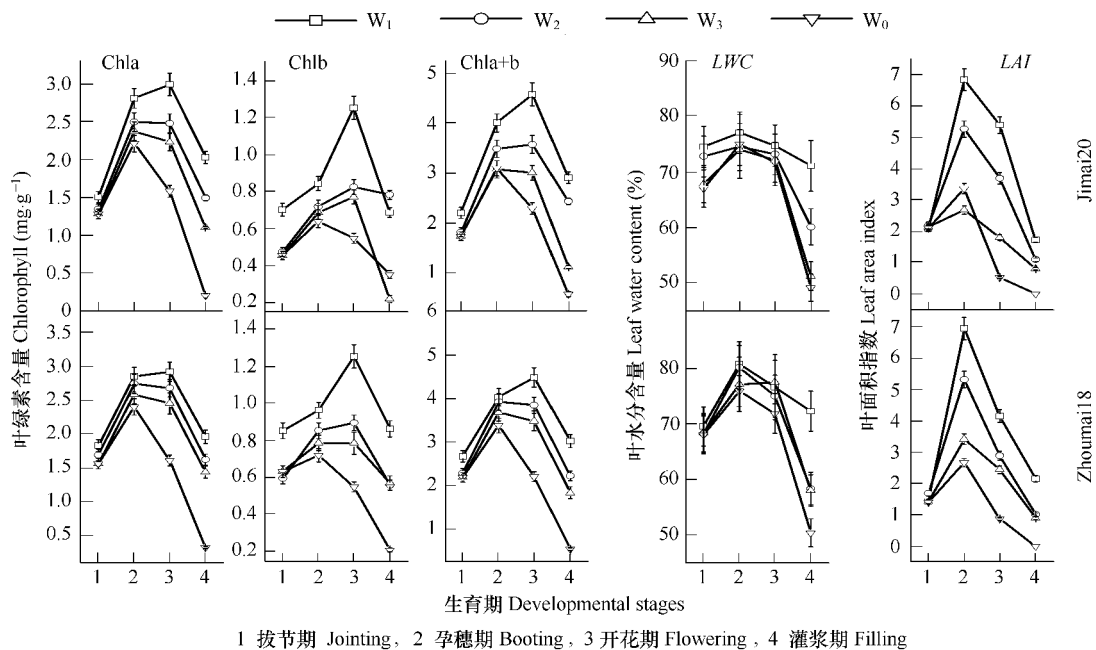


图1 不同生育期冬小麦生理生态参数

Fig. 1 Wheat ecophysiological parameters at different developmental stages

外高原平台下降到约0.3。不同生育期冬小麦光谱反射率对于干旱胁迫的响应不同,可见光区在孕穗期和开花期高光谱反射率随干旱胁迫加重而上降,可见光区光谱反射率变化可能是水分胁迫导致叶面积、叶绿素减少;近红外光区光谱反射率反应不同,开花期近红外区表现为轻度水分胁迫下(W_2)光谱反射率增高,该区光谱反射率受冬小麦叶片可溶性糖含量、蛋白质含量以及细胞结构等影响,适度的水分胁迫冬小麦能通过渗透物质积累、气孔大小调节而从生理上适应干旱。同时还会与测量时冬小麦叶片生理反应如气孔开度变化有关。灌浆期光谱反射率变化,可能是下部叶片不断枯黄、脱落以及光合产物不断向穗部转移等特征,使可见光段反射率绿峰、红谷不明显,叶片结构和物质含量变化则是近红外的反射率下降的主要原因。与其它关于水分胁迫、营养亏缺、土壤氧气亏缺的研究结果相似^[7,14,15]。因此,可见光和红边区参数变化与胁迫诱导的生理变化如叶绿素含量、植物水分含量等有关。

3.3 不同水分处理下冬小麦不同生育期红边一阶微分光谱特征

图3看出,冬小麦抽穗期、开花期和灌浆期冠层红边一阶微分光谱是由主峰和次峰组成。主峰即红边位置在728~734nm处,在702nm和718nm处有次峰。灌浆期由于红边幅值下降,出现702、718、734nm三峰现象,红边位置向长波方向移动4nm。Boochs认为冬小麦全生育期内红边幅值在725~740nm之间变动^[10,16]。同样,Railyan & Korobov^[17]对黑小麦营养生长期研究发现,主峰在725nm、次峰在705nm;Simth^[14]研究小麦红边幅值在735nm、716nm、705nm有次峰。但油菜红边一阶微分光谱呈典型“双峰”状,红边位置在690~720nm之间,水稻整个生育期内红边在695~740nm之间^[8,9,14]。灌浆期红边位置向长波方向发生的位移可能和叶片水分状况、叶面积减少有关。图3还显示随干旱胁迫程度增加,红边一阶微分光谱728~732nm幅值和718nm次峰值下降,这与Zarco-Tejada^[18]等研究温度、湿度胁迫18d后桤木(*Acer negundo*)红边一阶微分光谱响应趋势一致。有研究认为胁迫导致702nm处一阶微分光谱值上升^[14,18]。红边面积随着干旱胁迫程度的增加而减少。因此红边参数变化与胁迫引起植物绿叶面积、叶绿素、水分含量等生理变化有关。

3.4 红边参数与生理参数的回归分析

通过相关分析(表2),Chla、Chlb和Chla+b与 $D\lambda_{730}$ 、 $D\lambda_{702}$ 、 $D\lambda_{730}$ 、 $D\lambda_{718}$ 、 $D\lambda_{718}$ 、 $D\lambda_{702}$ 正相关,相关系数高于0.5($p > 0.05$),叶绿素与 $D\lambda_{702}$ 呈微弱负相关($r = -0.4$);LWC与 $D\lambda_{718}$ 、 $D\lambda_{730}$ 、 S_{red} 相关性显著($r > 0.5$, $p < 0.05$)。LAI和 $D\lambda_{red}$ 及 S_{red} 相关性极显著($r = 0.66$, $p < 0.01$)。

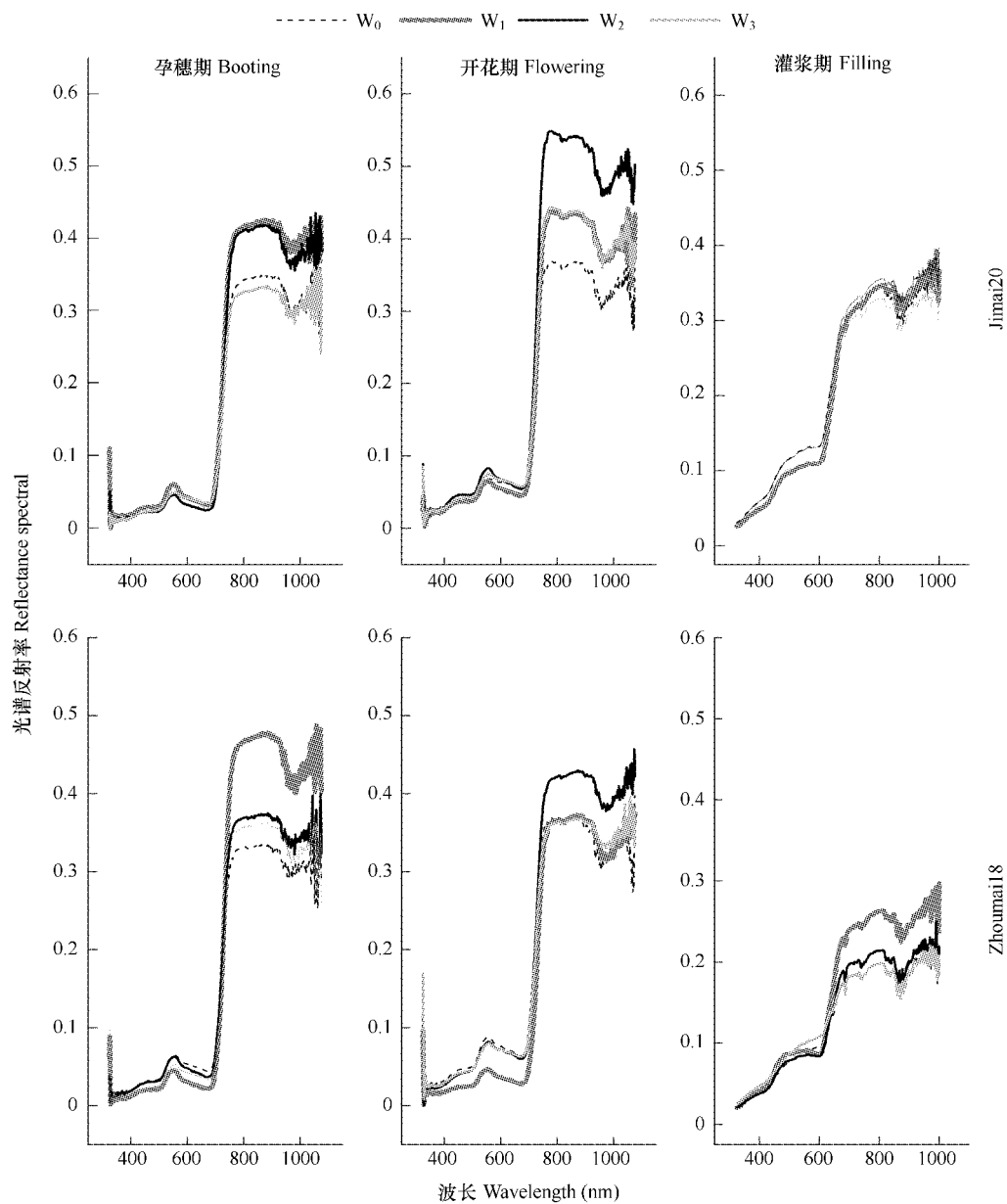


图2 不同水分处理下冬小麦冠层高光谱反射率

Fig. 2 Hyperspectral reflectance of the winter wheat canopy under different water treatments

表2 红边参数与生理参数的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between physiological parameters and red-edge parameters

参数 Parameter	$D\lambda_{702}$	$D\lambda_{718}$	$D\lambda_{730}$	$D\lambda_{730} : D\lambda_{702}$	$D\lambda_{730} : D\lambda_{718}$	$D\lambda_{718} : D\lambda_{702}$	S_{red}
Chla	-0.428	-0.221	0.052	0.597 *	0.547 *	0.526	0.04
Chlb	-0.467	-0.248	0.026	0.658 *	0.547 *	0.591 *	0.022
Chla + b	-0.458	-0.236	0.053	0.652 *	0.579 *	0.576 *	0.042
LWC	0.385	0.511 *	0.597 *	0.265	0.414	0.108	0.543 *
LAI	0.284	0.545 *	0.653 **	0.483	0.501 *	0.386	0.664 **

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

用红边参数与冬小麦生理参数相关系数最大值进行回归分析(图4), Chla、Chlb 和 Chla + b 与比值 $D\lambda_{730} : D\lambda_{702}$ 呈线性关系, 赵春江研究认为红边振幅与叶绿素含量只在抽穗到乳熟为正相关, 与本研究结果一

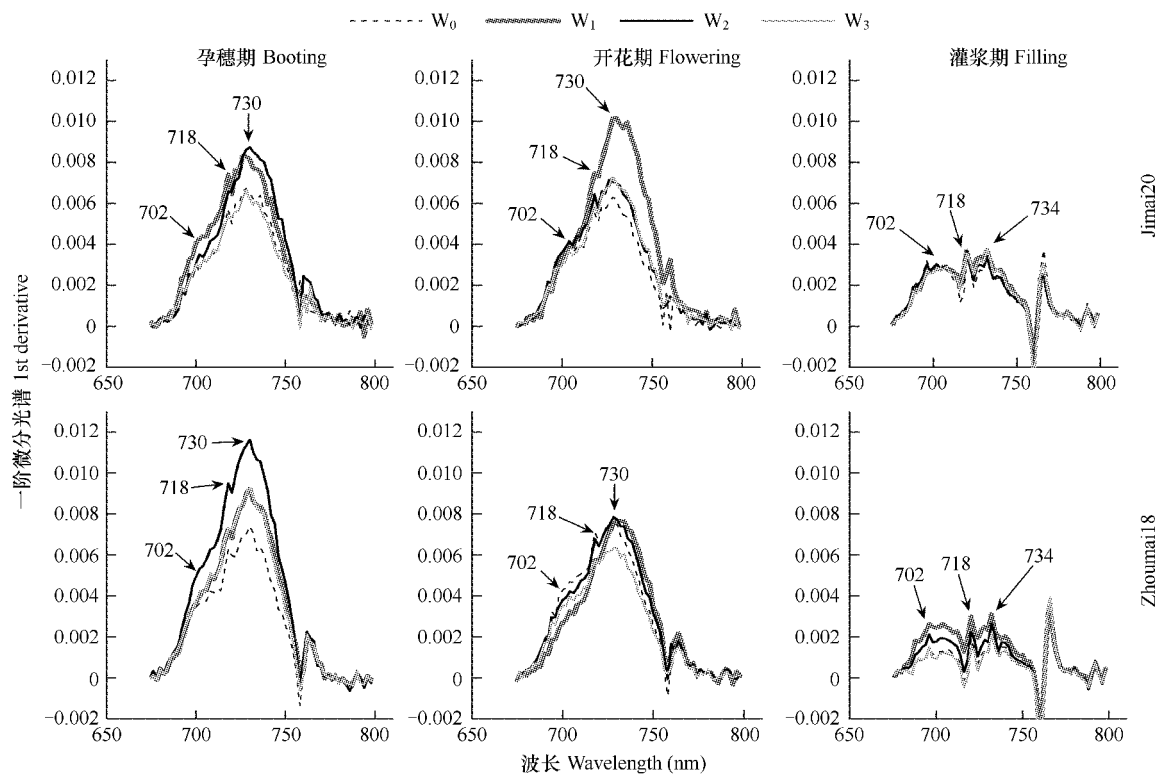


图3 不同水分处理冬小麦冠层一阶微分光谱

Fig. 3 First derivative spectra of the winter wheat canopy under different water treatments

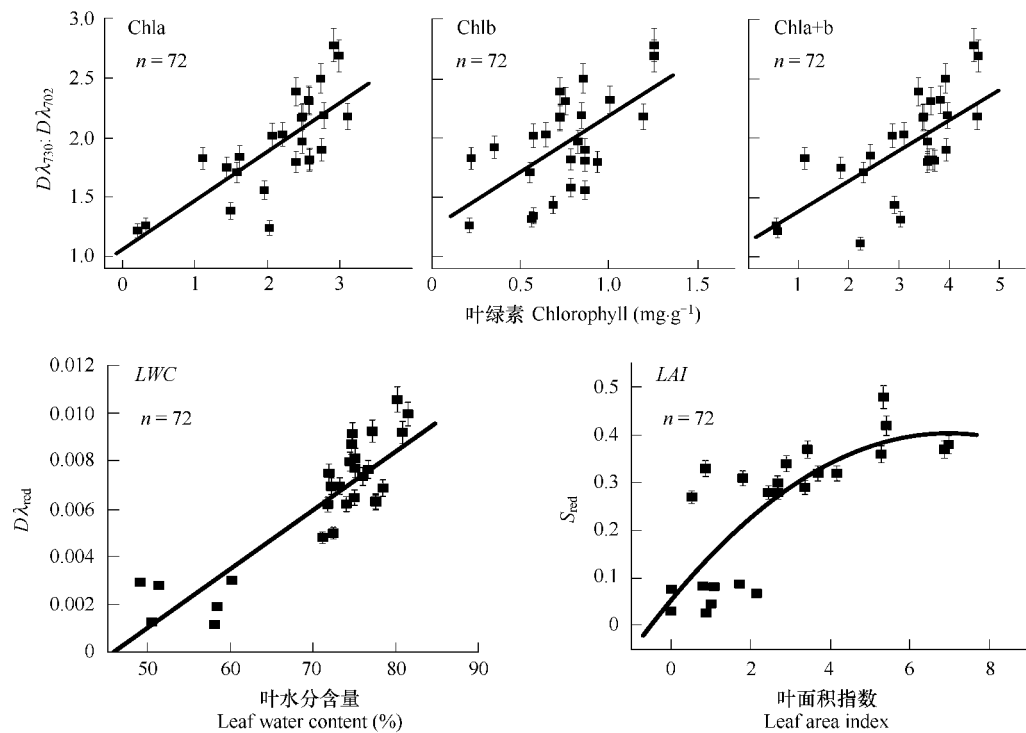


图4 冬小麦生理参数值和红边参数回归

Fig. 4 Regression of physiological and red-edge parameters

致^[16]。而 Boochs 对冬小麦研究认为叶绿素和 $D\lambda_{705}:D\lambda_{735}$ 相关性最强^[10]。 LWC 和 $D\lambda_{red}$ 呈线性关系 ($n = 144, R^2 = 0.87$), LAI 与 S_{red} 呈二次关系 ($n = 72, R^2 = 0.68$), 随 LAI 增加 S_{red} 快速增加, 当 LAI 接近 6 时, S_{red} 趋于稳定。

4 结论

4.1 不同品种冬小麦的反射光谱形状相似, 具有绿色植物反射光谱特征。孕穗期干旱胁迫导致反射光谱率在可见光部分上升、近红外部分下降; 开花期轻度水分胁迫下近红外光区光谱反射率上升。

4.2 冬小麦拔节后叶片 $Chla$ 、 $Chlb$ 和 $Chla + b$, LWC , LAI 随生长变化趋势一致, 先升后降、叶绿素在开花期达最大值; LWC , LAI 在孕穗期最大。叶片叶绿素含量、叶片水分含量和叶面积指数随干旱胁迫呈梯度下降, 在孕穗期和开花期不同水分处理之间叶绿素含量和叶面积指数差异显著。

4.3 不同品种冬小麦红边光谱反射率一阶微分光谱形状相似, 红边位置位于 728 ~ 735 nm, 灌浆期红边幅值下降、位置向长波方向移 4 nm; 干旱胁迫下 $D\lambda_{red}$ 下降。

4.4 叶绿素、叶片水分含量和叶面积指数与红边参数相关性强。 $Chla$ 、 $Chlb$ 和 $Chla + b$ 与 $D\lambda_{703}:D\lambda_{702}$ 呈线性关系, LWC 与 $D\lambda_{730}$ 呈线性关系, LAI 与 S_{red} 呈二次关系。因此, 可以用红边参数来评价冬小麦生育后期干旱胁迫。

References:

- [1] Ding S Y, Li H M, Qian L X. Research advances in remote sensing techniques in estimation of vegetation biochemical material contents. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23 (4): 109 – 117.
- [2] Niemann K O. Remote sensing of forest stand age using airborne spectrometer data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, 61 (9): 1119 – 1127.
- [3] Cheng Y B, Zarco-Tejada P J, Ria o D, *et al.* Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105: 354 – 366.
- [4] Carter G A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany*, 1993, 80(3): 239 – 243.
- [5] Carter G A, Gibula W G, Miller R L. Narrowband reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148: 515 – 522.
- [6] Tang Y L, Huang J F, Wang R C. Change law of hyperspectral data with chlorophyll and carotenoid for rice at different developmental stages. *Chinese Journal Rice Scientia*, 2004, 18(1): 59 – 66.
- [7] Wang X Z, Huang J F, Li Y M, *et al.* The Study on Hyperspectral Remote Sensing Estimation Models about LAI of Rice. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1): 81 – 88.
- [8] Tang Y L, Huang J F, Wang X Z, *et al.* Comparison of the characteristics of hyperspectra and the red edge in rice, corn and cotton. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(1): 29 – 35.
- [9] Hong J F, Wang Y, Wang F M, *et al.* Red edge characteristics and leaf area index estimation model using hyperspectral data for rape. *Transaction of the CSAE*, 2006, 22(8): 22 – 26.
- [10] Boochs F, Kupfer G, Dekter K, *et al.* Shape of the red-edge as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11 (10): 1741 – 1753.
- [11] Rock B N, Hoshizaki T, Miller J R. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24: 109 – 127.
- [12] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Morales A, *et al.* Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 463 – 476.
- [13] Liu Z Y, Huang J F, Wu X H, *et al.* Hyperspectral remote sensing estimation models on vegetation coverage of natural grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 997 – 1002.
- [14] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify nplant stress responses to gas leaks. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92: 207 – 217.

- [15] Feng X W, Chen X, Bao A M, *et al.* Analysis on the cotton physiological change and its hyperspectral response under the water stress conditions. *Arid Land Geography*, 2004,27(2):250—255.
- [16] Zhao C J, Huang W J, Wang J H, *et al.* Studies on the red edge parameters of spectrum in winter wheat under different varieties, fertilizer and water treatments. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002,35(8):980—987.
- [17] Railyan V Y, Korobov R M. Red edge structure of canopy reflectance spectra of tritcale. *Remot Sensing of Environment*, 1993,46:173—182.
- [18] Zarco-Tejada P J, Pushnik J C, Dobrowski S, *et al.* Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effect. *Remote Sensing of Environment*, 2003,84:283—294.

参考文献:

- [1] 丁圣彦,李昊民,钱乐祥.应用遥感技术评价植被生化物质含量的研究进展. *生态学杂志*, 2004,23(4):109~117
- [6] 唐延林,黄敬峰,王人潮.水稻不同发育时期高光谱与叶绿素和类胡萝卜素的变化规律. *中国水稻科学*, 2004,18(1):59~66.
- [7] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等.水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型. *遥感学报*, 2004,8(1)81~88.
- [8] 唐延林,黄敬峰,王秀珍,等.水稻、玉米、棉花的高光谱及其红边特征比较. *中国农业科学*, 2004,37(1):29~35.
- [9] 黄敬峰,王渊,王福民,等.油菜红边特征及其叶面积指数的高光谱估算模型. *农业工程学报*, 2006,22(8):22~26.
- [13] 刘占宇,黄敬峰,吴新宏,等.天然草地植被盖度的高光谱遥感估算模型. *应用生态学报*, 2006,17(6):997~1002.
- [15] 冯先伟,陈曦,包安明,等.水分胁迫条件下棉花生理变化及其高光谱响应分析. *干旱区地理*, 2004,27(2):250~255.
- [16] 赵春江,黄文江,王纪华,等.不同品种、水肥条件下冬小麦光谱红边参数研究. *中国农业科学*, 2002,35(8):980~987.