

葛丽娟,王小平,王清涛,等. PROSAIL模型在半干旱区春小麦不同干旱胁迫条件下的适用性分析[J]. 干旱气象,2017,35(6):926-933, [GE Lijuan, WANG Xiaoping, WANG Qingtao, et al. Applicability of PROSAIL Model to Spring Wheat in Semi-arid Region of the Loess Plateau Under Different Drought Stress[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(6):926-933], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-06-0926

PROSAIL模型在半干旱区春小麦不同干旱胁迫条件下的适用性分析

葛丽娟¹,王小平²,王清涛¹,党虹¹,赵传燕³

- (1. 兰州大学生命科学学院,草地农业生态系统国家重点实验室,甘肃 兰州 730000;
2. 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020;
3. 兰州大学草地农业科技学院,草地农业生态系统国家重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:监测半干旱区作物的旱情对合理灌溉有重要意义。本文以黄土高原半干旱雨养农业区春小麦为研究对象,以模型模拟光谱对输入参数的响应、模型输入参数与干旱程度的关系以及不同旱情下光谱模拟精度为切入点,探讨基于 PROSAIL 模型反演参数指征春小麦旱情的可行性。结果表明:春小麦冠层光谱对于 PROSAIL 模型主要输入参数具有不同的光谱响应区间,其中叶绿素含量 Cab 的光谱响应区间为 476 ~ 730 nm,叶面积指数 LAI 的主要响应区间为 400 ~ 750 nm,800 ~ 1 000 nm 和 1 330 ~ 2 500 nm,等效水厚度 EWT 的响应区间在 1 874 ~ 1 891 nm,干物质含量 LMA 的主要响应区间在 2 331 ~ 2 356 nm。PROSAIL 模型的输入参数与干旱程度有显著相关性。模型模拟的半干旱区春小麦冠层光谱的误差在 1 400 nm 前后差异显著,在 1 400 nm 之前模拟误差为 11.5%,1 400 nm 之后模拟误差为 69%,总体误差约 30%。模型对于等效水厚度和干物质含量的解释不够充分是导致模拟误差的主要原因之一。以 PROSAIL 模型反演参数监测黄土高原半干旱区春小麦旱情值得商榷。

关键词: PROSAIL 模型;春小麦;旱情;生理参数;适用性

文章编号:1006-7639(2017)06-0926-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-06-0926

中图分类号:S127

文献标志码:A

引言

我国半干旱区分布辽阔,包括内蒙古高原的中部和东部、黄土高原和青藏高原大部^[1]。在半干旱区,雨养农业是主要生产方式,春小麦是其主要粮食作物之一^[2]。在春小麦生长季内降雨稀少,水分胁迫是影响其生长发育的重要因素^[3]。因此,在半干旱区春小麦生长过程中,监测干旱程度,及时掌握水分胁迫状况,对合理灌溉有重要意义。作物的干旱程度能够在光谱反射率中有所表现,这为高光谱监测作物旱情提供了理论基础^[4]。目前,能够反映作物干旱胁迫的指标主要有植被指数和植被叶片的生理参数^[5],其中叶片生理参数是最直观反映作物旱情的指标,且随着作物干旱程度的变化而变化^[6-7]。

实地测量是获取作物生理参数最常用的方法,但此种方法费时费力且难以在大区域尺度上推广,使得遥感定量反演成为目前大面积监测作物干旱的最有效手段。其中,以植被冠层光谱反射率为媒介反演植被的生理生态参数是常用的方法。植被冠层光谱反射率可以通过仪器测量获得,也可以通过辐射传输模型模拟获得。尽管辐射传输模型模拟的光谱反射率在精度上略有损失,但其优势在于可通过易测的植被理化参数获得冠层的反射率,且输出的反射率不受噪音干扰。在众多的辐射传输模型中,PROSAIL 模型因其较强的稳定性和可移植性而被广泛应用于植被生理生态参数的反演^[8]。

目前,基于辐射传输模型反演植被生理生态参数最常见的方法为查表法(look-up table, LUT)和

收稿日期:2017-06-22;改回日期:2017-09-01

基金项目:国家自然科学基金(41571051,41201370)和干旱气象科学研究基金(IAM201608)共同资助

作者简介:葛丽娟,女,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事遥感干旱监测。E-mail:gab12710@126.com。

通信作者:王小平, E-mail: xiaopinwang@163.com。

基于光谱指数建模, LUT法的关键是建立光谱反射率曲线与生理生态参数一一对应关系的数据库, 而光谱指数建模的关键则在于准确获取光谱指数, 这两种方法都需要通过模型模拟获取冠层光谱反射率。不同植被基于PROSAIL模型反演生理参数具有不同的精度, 误差主要来源于3个方面: 病态反演、测量误差以及模型本身的模拟精度^[9-12]。目前关于病态反演问题的解决主要是通过先验知识来避免, 测量误差主要通过多次测量取均值来解决, 而对于通过修正模型来提高反演精度的研究还较为鲜见。本文以黄土高原半干旱地区春小麦为研究对象, 通过灌溉遮雨的手段控制春小麦干旱程度, 主要从模型输入参数与干旱程度的相关性、冠层光谱对输入参数的响应程度以及光谱模拟精度三方面, 探讨PROSAIL模型监测春小麦旱情的适用性, 为半干旱区春小麦的旱情监测提供技术支持。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于中国气象局兰州干旱气象研究所的定西干旱气象与生态环境试验基地(104°37'E、35°35'N, 海拔1 896.7 m), 位于陇中黄土高原西部。该地区属于大陆性季风气候, 空气干燥, 降水稀少且年际变化大, 年平均降水量386 mm, 主要集中在5—10月, 年均气温6.7℃, 年太阳总辐射5 924 MJ·m⁻², 年日照时数2 433 h, 无霜期年平均为140 d。土壤为黄绵土, 碱性, 中等肥力, 土层深度30~150 m。主要粮食作物为春小麦和玉米, 占播种面积的75%。

1.2 试验设计与参数测定

试验于2015年进行, 选用的春小麦品种为新定西24号, 试验设5个水分处理, 即水分充足(土壤相对湿度大于60%)、轻度水分胁迫(土壤相对湿度为50%~60%)、中度水分胁迫(土壤相对湿度为40%~50%)、重度水分胁迫(土壤相对湿度小于40%)以及大田实际情况, 每个处理设6个重复, 共30块试验地。土壤相对湿度用土壤质量含水量除以田间持水量表示, 其中土壤质量含水量以土钻法获得; 田间持水量以田间小区灌水法测定。每块试验小区面积为3 m×3 m, 为保证出苗齐全, 播种时浇灌相同水量。

每10 d左右测量1次作物的冠层光谱和理化参数。主要理化参数有: 叶绿素含量(chlorophyll a and b contents, Cab)、叶面积指数(leaf area index, LAI)、叶片干物质含量(leaf mass per area, LMA)、等效水厚度(equivalent water thickness, EWT)。冠层

光谱的测量采用美国ASD (Analytical Pectral Device)公司的Field Spec Pro FR2500便携式光谱仪, 波段范围为350~2 500 nm。观测选择在晴朗无风无云天气下10:00—14:00(北京时, 下同)进行, 在距离地面1.0 m位置, 采用25°视场, 传感器探头垂直向下测量春小麦的冠层光谱, 每个小区内选取5个固定点, 每个固定点记录3次光谱曲线, 以固定点的平均值作为该小区的光谱反射值。叶绿素含量的测定使用叶绿素含量分析仪SPAD502, 每个小区选择5株测定叶片的相对叶绿素含量(SPAD), 以平均值作为该小区的SPAD值, 并参考文献[13]进行叶片绝对叶绿素含量Cab(μg·cm⁻²)的计算, 公式如下:

$$\text{Cab} = 0.11 \text{ SPAD}^{1.5925} \quad (1)$$

LAI的测定使用LI-COR的植物冠层分析仪LAI2000, 每个小区每次测量7次, 以7次平均值作为该小区的LAI值。

每个小区选取冠层上方的叶片20片, 测量叶片的长度、最大宽度和鲜重, 之后将叶片放入烘箱, 在105℃下杀青, 30 min后将温度调至70℃, 烘12 h, 进行第一次称重, 此后每小时称重1次, 前后两次重量差小于5‰时, 停止称重, 最后一次重量记为叶片样品干重。以叶片的干重与总面积之比计算叶片的干物质含量。叶片等效水厚度EWT(g·cm⁻²)的计算方法如下:

$$\text{EWT} = \frac{W_f - W_d}{0.777l \times d} \quad (2)$$

其中: W_f 为叶片鲜重(g); W_d 为叶片干重(g); l 为叶片长度(cm); d 为叶片最大宽度(cm)。

冠层水平的等效水厚度EWT_c被定义为叶片等效水厚度与叶面积指数的乘积, 其表达式:

$$\text{EWT}_c = \text{EWT} \times \text{LAI} \quad (3)$$

1.3 PROSAIL冠层辐射传输模型

PROSAIL冠层辐射传输模型由叶片光学模型(PROSPECT)和冠层模型(SAIL)耦合而成。PROSPECT模型是由JACQUEMOUD等^[14]提出, 是基于ALLEN平板模型改进而用于模拟叶片反射率的模型, 以叶片的生理生态参数(主要是叶绿素含量、EWT、干物质含量)和结构参数为输入变量。SAIL模型是VERHOEF^[15]提出的, 该模型将冠层视为平面, 通过输入LAI、叶倾角、叶反射率等参数模拟植被冠层反射率。PROSAIL模型将PROSPECT模型的输出结果作为SAIL模型的输入变量, 从而得到植被冠层的光谱反射率, 其中输出的光谱范围为400~2 500 nm^[16-17]。本文使用的模型由PROS-

PECT-5 叶片模型和 4SAIL 模型耦合而成,在 MATLAB7.0 下运行,PROSAIL 模型的输入参数及其范围见表 1。然后,分别以每个参数的最小变化单位为步长,参数范围为运算区间,运用单因素变量分析法的思想,计算冠层光谱对生理参数变化的主要响应区间及光谱值的变化量。

表 1 PROSAIL 模型的输入参数及取值范围

Tab.1 Input parameters and their value ranges for PROSAIL model

| 输入参数 | 参数范围 | 最小变化单位 |
|---|---------------|--------|
| 叶绿素含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 40 ~ 60 | 1 |
| 等效水厚度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 0.004 ~ 0.016 | 0.01 |
| 干物质含量/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 0.002 ~ 0.014 | 0.001 |
| 叶面积指数 | 0 ~ 3 | 0.01 |
| 土壤亮度 | 0.1 | |
| 类胡萝卜素/ $(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 0 | |
| 褐色素/ $(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 0 | |
| 叶片结构 | 1.5 | |
| 平均叶倾角/ $(^\circ)$ | 45 | |
| 热点 | 0.2 | |
| 天空光反射比 | 0.7 | |
| 太阳天顶角/ $(^\circ)$ | 30 | |
| 观测天顶角/ $(^\circ)$ | 0 | |
| 相对方位角/ $(^\circ)$ | 0 | |

1.4 数据处理

选取叶绿素含量、等效水厚度、干物质含量及叶面积指数为主要研究参数,以春小麦生育期为界限,计算这些参数的平均值。其中,Cab、EWT、LMA 以及 LAI 等参数以实测平均值作为模型输入值,土壤亮度、平均叶倾角、叶片结构、褐色素以及类胡萝卜素等参数是根据实际情况取常数作为模型输入值,而热点、天空光反射比等参数则是根据前人研究取常数作为输入值^[17-19](常数见表 1),运用模型获得模拟的春小麦冠层光谱反射率。同时,对实测光谱进行平均,获得不同干旱条件下不同生育期春小麦的实测冠层光谱反射率曲线。实测光谱在 1 370 ~ 1 400 nm、1 830 ~ 1 930 nm 以及 2 400 ~ 2 500 nm 位置存在噪音,对噪音进行删除处理。对比不同水分胁迫下抽穗期和自然状态下春小麦拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆期的实测光谱和模拟光谱,计算实测光谱与模拟光谱的误差 B :

$$B = \frac{M - E}{M} \times 100\% \quad (4)$$

式中: M 为实测光谱值; E 为模拟光谱值。

2 结果与分析

2.1 冠层光谱对输入参数变化的响应

表 2 列出半干旱区春小麦冠层光谱对输入参数变化的响应。可看出,在 476 ~ 730 nm 范围内,引起春小麦光谱反射率变化的主要参数是叶绿素含量;在 1 100 ~ 2 500 nm 近红外和中红外波段引起光谱反射率变化的主要参数为 EWT、LMA、LAI,对应的主要响应区间分别在 1 880 nm、2 340 nm、2 500 nm 左右。476 ~ 730 nm 是可见光波段,在此波段内植被的光谱主要受叶片色素支配,在各种色素中叶绿素的含量最高,作用最重要。色素在红、蓝波段具有强烈的吸收作用^[20],因此叶绿素含量变化必然引起光谱反射率变化。在 740 ~ 1 300 nm,植被冠层吸收能量降低,反射率急剧增加,这是叶片的多重反射和细胞结构共同作用的结果^[20],同种植被细胞结构差异不明显,所以 LAI 是这一波段光谱变化的主要因素。在 1 300 ~ 2 500 nm,植被的光谱主要受含水总量控制^[20],等效水厚度和干物质含量均与叶片含水量息息相关,因此这 2 个参数是引起这一区间光谱变化的主要因素。总之,随着植被的生长发育以及干旱程度的变化,植被的生理参数也相应地产生一定的变化,进而导致植被的光谱反射率发生变化,且在主要响应区间内,生理参数每变化 1 个单位,PROSAIL 模型输出的光谱反射率均发生 1% ~ 5% 的变化。在实际情况中,因干旱程度导致的生理生态参数的差异远大于最小变化单位,这种差异能够在光谱中反映出来。

表 2 半干旱区春小麦冠层光谱对输入参数变化的响应

Tab.2 Response of spring wheat canopy reflectance to input parameters change in semi-arid region

| 输入参数 | 光谱响应区间/nm | 光谱反射率变化/% |
|------|---------------|-----------|
| Cab | 476 ~ 730 | 1 |
| LAI | 400 ~ 750 | 1 ~ 2 |
| | 800 ~ 1 000 | 1 ~ 2 |
| | 1 330 ~ 2 500 | 1 ~ 2 |
| EWT | 1 100 ~ 2 500 | 1 ~ 5 |
| LMA | 800 ~ 2 500 | 1 ~ 3 |

2.2 模型输入参数在不同干旱程度下的变化

表 3 是半干旱区春小麦生理生态参数与土壤相对湿度的相关性。可以看出,春小麦不同生育期 PROSAIL 模型的主要输入参数与土壤相对湿度均具有显著负相关性(通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验),相

关系数基本在 -0.9 左右,特别是灌浆期春小麦对水分变化最为敏感,各参数与土壤相对湿度的负相关系数高达 -0.97 以上。土壤相对湿度是指征干旱程度的一个重要指标,因此生理生态参数与干旱程度亦具有显著相关性。

表 3 半干旱区不同生育期春小麦生理生态参数与土壤相对湿度的相关性
Tab.3 Correlation between the observed eco-physiological parameters of spring wheat and relative moisture of soil at different growth stages in semi-arid region

| 参数 | 拔节期 | 孕穗期 | 抽穗期 | 开花期 | 灌浆期 | 成熟期 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Cab | -0.997 ** | -0.911 ** | -0.975 ** | -0.951 ** | -0.972 ** | -0.853 ** |
| LAI | -0.910 ** | -0.876 ** | -0.858 ** | -0.861 ** | -0.999 ** | -0.901 ** |
| EWT | -0.961 ** | -0.916 ** | -0.973 ** | -0.959 ** | -0.998 ** | -0.893 ** |
| LMA | -0.936 ** | -0.873 ** | -0.867 ** | -0.999 ** | -0.984 ** | -0.791 |

注: ** 表示在 0.01 的水平上显著

图 1 为半干旱区春小麦不同生育期干旱程度与 PROSAIL 模型输入参数的关系,其中不早即水分充足,轻旱、中旱、重旱分别表示轻度、中度、重度水分胁迫,自然表示大田实测。由图 1 看出,随着干旱程度的加剧,春小麦叶绿素含量逐渐减小,其中孕穗、抽穗、开花 3 个时期,叶绿素含量减小幅度不明显,而拔节、灌浆期的叶绿素含量

随着干旱程度的增加减幅明显,尤其是灌浆期的叶绿素含量减少高达 $10 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以上[图 1(a)];不同生育期内,春小麦叶面积指数随着干旱程度的加剧而减小,减少幅度大致相等[图 1(b)];随着干旱程度的加剧,春小麦叶片等效水厚度逐渐减小,其中在拔节期、抽穗期和灌浆期,等效水厚度的变化较明显,差异达 $0.004 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ [图 1(c)];与等效水厚

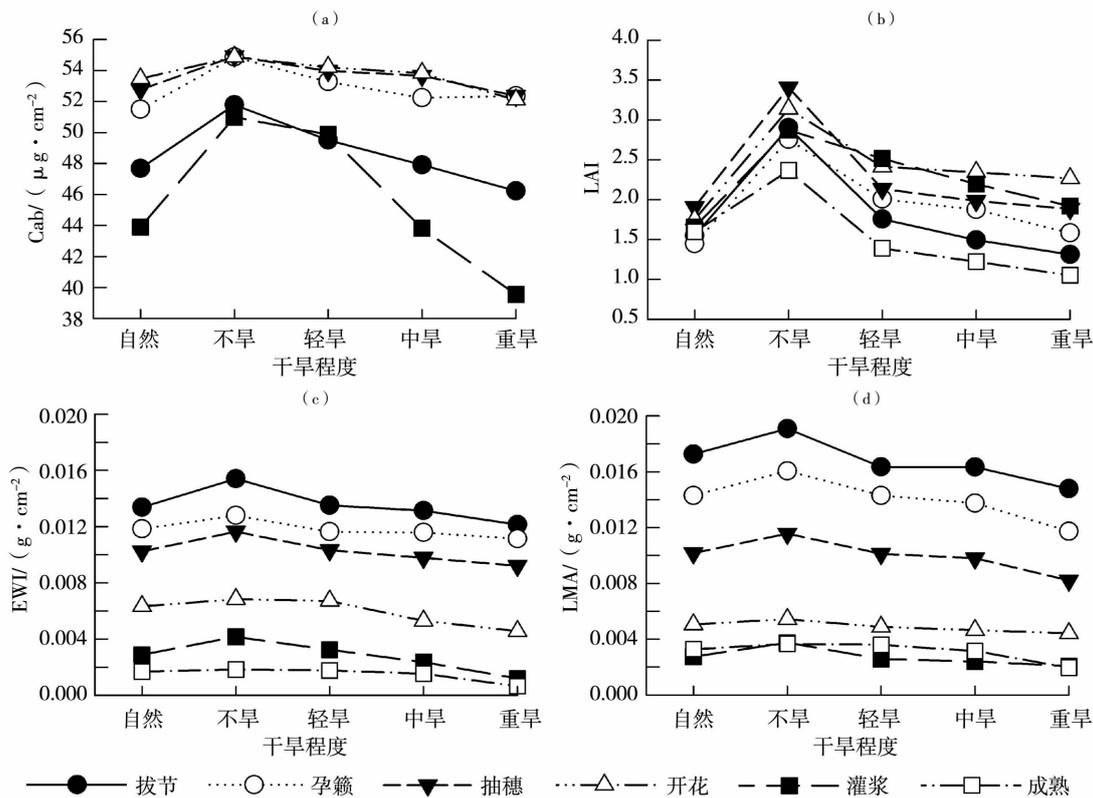


图 1 不同生育期春小麦主要输入参数与干旱程度的关系

Fig.1 Relationships between main input parameters of spring wheat and drought stress degrees

度相似,干物质含量随干旱程度的加剧而减小,干物质含量的变化在拔节期和抽穗期较为明显,达 $0.004 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ [图 1(d)]. 综上所述,随着干旱程度的加剧,春小麦各项生理参数值都出现或多或少的减少,可能原因是植被水分摄入的不充分妨碍了作物的生长发育,从而导致叶绿素含量减小,光合能力减弱,植被干物质的累积能力减弱。

2.3 不同干旱程度下光谱模拟与观测对比

为了对比春小麦冠层的实测光谱反射率与 PROSAIL 模型模拟光谱的反射率,随机选取若干点做散点图(图 2)。从图 2 可看出,在 1 400 nm 之前,实测值与模拟值的对应点基本分布在 1:1 线附近,说明模型模拟效果较好;而 1 400 nm 之后,模拟值与实测值的一部分对应点分布在 1:1 线附近,而另一部分对应点距 1:1 线较远,误差较大,说明 PROSAIL 模型模拟在这一波段范围内存在一定的误差。

图 3 是春小麦抽穗期不同旱情状况下实测光谱与模拟光谱的对比。从曲线形状和拐点位置对比发现,实测光谱与拟合光谱较为相似。从波段反射率值来看,在不旱和轻旱情况下,模拟值大于实测值,模拟误差较大;在中旱和重旱情况下,模拟值略小于实测值,模拟误差较小。从光谱实测值与模拟值的

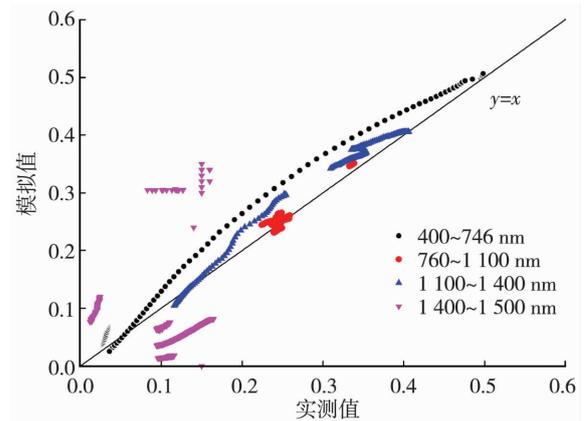


图 2 春小麦冠层光谱实测值与模拟值对比
Fig. 2 Comparison between the measured and simulated reflectance of spring wheat canopy

误差(表 4)看出,不同波段实测值与模拟值的误差随着干旱程度的增强其变化略有差异,但总体上不旱和轻旱状态下模拟值与实测值的误差较大,平均误差达 86%,明显高于中旱和重旱状态下的误差。从不同波段来看,1 400 ~ 2 500 nm 光谱模拟值与观测值的误差随着干旱程度的增强而减小,而 400 ~ 1 400 nm,二者的误差随着干旱程度的增强先持续减小后略有增加。

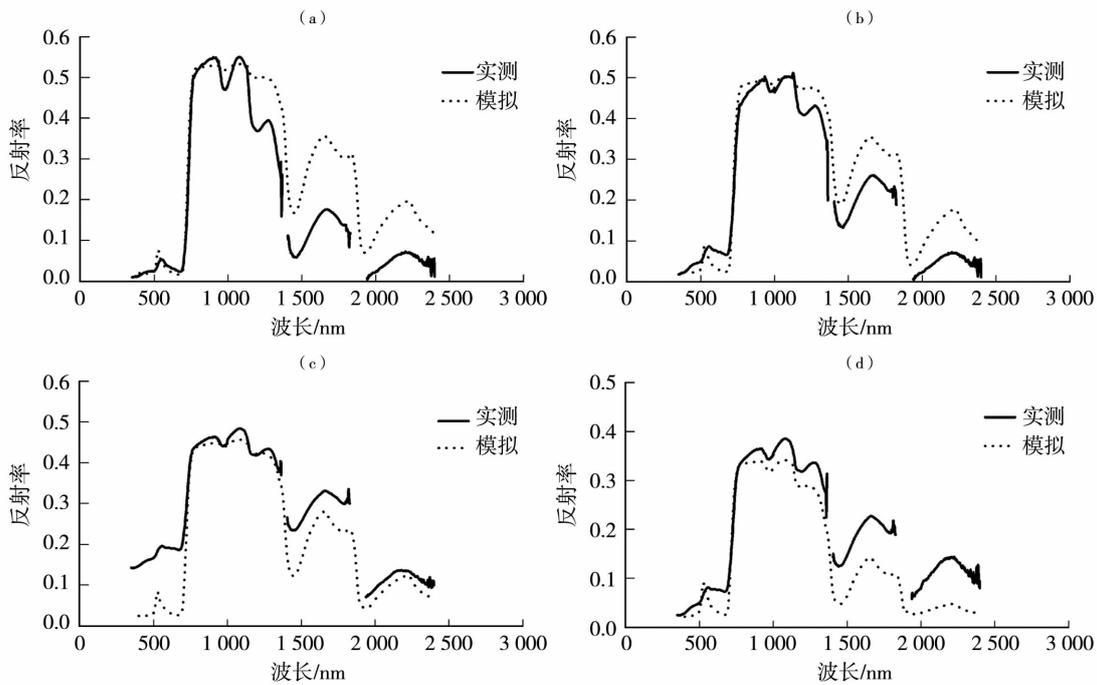


图 3 不同旱情状况下春小麦抽穗期实测光谱与模拟光谱的对比
(a)不旱;(b)轻旱;(c)中旱;(d)重旱

Fig. 3 Comparison between the measured and simulated reflectance of spring wheat at heading stage under different drought degrees
(a) no drought, (b) slight drought, (c) moderate drought, (d) severe drought

表 4 不同旱情下春小麦抽穗期
光谱实测值与模拟值的误差

Tab. 4 Errors of the measured and estimated
reflectance of spring wheat at heading stage
under different drought degrees

| 波段/nm | 水分处理 | | | | 未经水分处理 |
|---------------|------|-----|----|----|--------|
| | 不旱 | 轻旱 | 中旱 | 重旱 | 大田实测 |
| | 单位:% | | | | |
| 400 ~ 1 400 | 20 | 10 | 7 | 12 | 10 |
| 1 400 ~ 2 500 | 164 | 157 | 58 | 25 | 50 |
| 400 ~ 2 500 | 88 | 85 | 26 | 38 | 33 |

图 4 为大田内不同生育期春小麦冠层实测光谱与模拟光谱的对比情况。可看出,在拔节期和孕穗期模拟值略大于实测值;在抽穗期和开花期模拟值略小于实测值;而在灌浆期 1 000 nm 以前模拟值大于实测值,1 000 nm 以后模拟值小于实测值,尤其 1 400 nm 以后二者差异显著,模型模拟误差大。结合表 5 看出,光谱模拟值与实测值的误差随着春小麦的发育而逐渐增大,拔节期和孕穗期模拟值与实测值的误差最小,总体误差约为 15%,明显低于抽穗(33%)、开花(38%)和孕穗期(48%)。此外,1 400 nm 以后模拟值与实测值的误差($\sigma \geq 16%$)明显高于 1 400 nm 以前($\sigma \leq 15%$)。

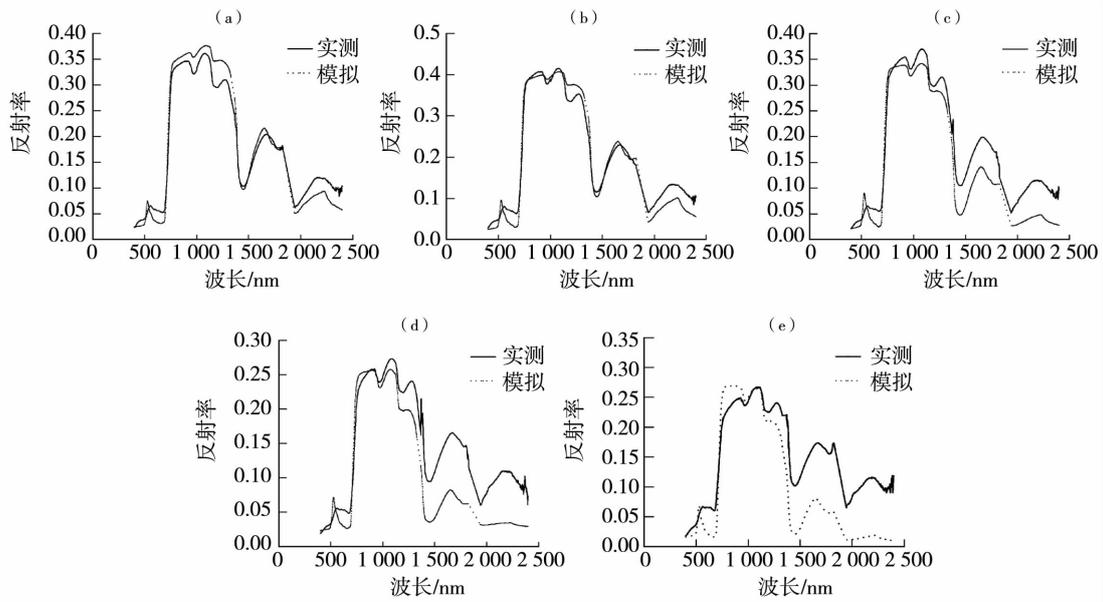


图 4 大田内春小麦冠层各生育期实测光谱与模拟光谱的对比
(a) 拔节期; (b) 孕穗期; (c) 抽穗期; (d) 开花期; (e) 灌浆期

Fig. 4 Comparison between the measured and estimated reflectance of spring
wheat canopy at different growth stages under the field condition

(a) jointing stage, (b) booting stage, (c) heading stage, (d) flowering stage, (e) filling stage

表 5 大田实际情况下各生育期春小麦冠层
光谱实测值与模拟值的误差

Tab. 5 Errors of the measured and estimated
reflectance of spring wheat canopy at different
growth stages under the field condition

| 波段/nm | 单位:% | | | | |
|---------------|------|----|----|----|----|
| | 拔节 | 孕穗 | 抽穗 | 开花 | 灌浆 |
| 400 ~ 1 400 | 8 | 7 | 10 | 14 | 15 |
| 1 400 ~ 2 500 | 16 | 18 | 50 | 61 | 75 |
| 400 ~ 2 500 | 15 | 16 | 33 | 38 | 48 |

综上所述,PROSAIL 模型对于中旱和重旱条件下春小麦拔节期和孕穗期的模拟效果最好,对中旱和重旱状态下的抽穗、开花、灌浆期的模拟效果次之,而对不旱和轻旱状态下整个生育期光谱的模拟效果最差。此外还发现,春小麦光谱的误差在 1 400 nm 前后出现明显差异,1 400 nm 之前,平均误差为 11.5%,而 1 400 nm 之后,平均误差为 69%。模型模拟的误差主要来自 1 400 nm 波段之后,这一范围的光谱反射率主要受 EWT 及 LMA 的影响,这 2 个参数主要反映了植被冠层含水量的变化,因此模型对于植被含水量情况的反映可能存在一定的缺陷。

另一方面,模型的模拟误差可能来自于2个方面:一是实测参数的测量误差,实地中处理样地内的春小麦长势存在一定的差异,因此在实地测量中由于测量位置的选取不同会有误差;二是模型对等效水厚度等描述植被冠层水分的参数解释度不够,尽管 PROSAIL模型对于植被具有普适性,但每种植被都有其自身的特性,因此在模拟过程中会产生误差。

3 讨论

PROSAIL 模型对于半干旱区春小麦冠层反射率光谱的模拟具有一定的误差,其中在 400~1 400 nm 波段范围的光谱反射率模拟误差均在 10% 左右,叶绿素含量和 LAI 的变化是引起该波段范围内模拟的冠层光谱变化的主要原因。研究表明,在 400~760 nm 波段内,叶绿素含量对冠层反射率变化的贡献达 80% 以上^[17]。因此,以未经修正的 PROSAIL 模型反演叶绿素含量具有一定的可靠性。董晶晶等^[21]基于 PROSAIL 模型对农田作物叶绿素含量进行反演时,得到估测的叶绿素含量与实测值之间 $R^2 = 0.76$ 。DARVISHZADEH 等^[12]基于 PROSAIL 模型对草地冠层叶绿素含量进行反演时,得出估算值与实测值的 $R^2 = 0.7$,标准均方根误差为 18%。上述研究均有效地支撑了本文研究结果。然而,吕杰^[22]指出,传统的作物模型反演技术不能满足精准农业的需求,并将遗传算法与 PROSAIL 模型结合,将 R^2 提高到 0.9。这说明针对不同的研究目的需要考虑不同的反演精度。

与其他参数不同,LAI 在模拟的冠层光谱区间内有多个响应区间,当 LAI < 3 时,在 800~1 200 nm 波段的冠层光谱反射率主要由 LAI 引起^[18]。纵观半干旱区春小麦的整个生育期,其冠层 LAI 指数基本都在 3 以下,因此,800~1 200 nm 波段的光谱反射率能够很好解释 LAI 的变化,因此以未经修正的 PROSAIL 模型反演 LAI 有一定的可靠性。李淑敏等^[23]研究指出,PROSAIL 物理模型反演冬小麦叶面积指数是可行的,且在空间上具有稳定性。杨贵军等^[24]基于 PROSAIL 模型反演的春小麦 LAI 与观测值的平均绝对误差为 0.213, R^2 为 0.86,与本文研究结果一致。然而,苏伟等^[25]在研究 PROSAIL 模型反演玉米 LAI 时指出,LAI 的实测值与模拟值相关性较好,但反演值偏低,模拟精度只有 26%,需要引入玉米叶倾角来修正模型,可能原因是研究的物种不同。

模型模拟的误差主要来自 1 400 nm 以后波段的反射率模拟,这一波段的反射率主要响应等效水

厚度、干物质含量以及 LAI 的变化。PROSAIL 模型参数敏感性的研究表明,等效水厚度和干物质含量对 1 400 nm 以后波段的冠层光谱反射率变化具有主要贡献^[19]。因此,以未经修正的 PROSAIL 模型反演半干旱区春小麦的等效水厚度、干物质含量是不可靠的。程志庆等^[11]对杨树叶片干物质含量进行反演时,指出叶片的干物质含量受多种因素影响,如果要获得高精度的反演结果,需要将更多因素引入到模型中。而 CLEVERS 等^[26]在应用 PROSAIL 模型反演草地冠层等效水厚度时获得了较高的反演精度,这可能与研究对象或区域干旱程度不同有关。

4 结论

通过对模型输入参数与干旱程度的相关性、模型模拟光谱对输入参数的响应以及不同旱情下光谱模拟精度的研究,探讨 PROSAIL 模型对半干旱区春小麦旱情监测的适用性。主要结论如下:

(1)模型的主要输入参数与春小麦的干旱程度具有显著相关性,主要输入参数在光谱反射区间上有各自不同的响应区间;

(2)模型的模拟精度在 1 400 nm 前后有明显差异,在 1 400 nm 之后模拟精度明显降低;

(3)模型对于等效水厚度和干物质含量的解释存在误差,其原因主要是 2 个参数的测量误差以及模型本身的模拟误差。

小麦的干旱情况不是单一参数能够完全描述的,需要综合考虑多个参数,因此直接将 PROSAIL 模型用于监测春小麦旱情是值得商榷的。在今后的工作中,减小测量误差的同时还需对模型进行修正,尤其是增强模型对等效水厚度以及干物质含量的解释,使其更适合小麦的模拟。

参考文献:

- [1] 李军媛,徐维新,程志刚,等. 1982—2006 年中国半干旱、干旱区气候与植被覆盖的时空变化[J]. 生态环境学报,2012,21(2): 268-272.
- [2] 张凯,王润元,王鹤龄,等. CO₂ 浓度升高对半干旱区春小麦生长发育及产量影响的试验研究[J]. 干旱气象,2017,35(2):306-312.
- [3] 李文龙,许静,李自珍. 干旱期灌溉与施肥对半干旱区春小麦产量及其水分利用效率的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(3):76-82.
- [4] 郭锐,王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇[J]. 干旱气象,2015,33(1):1-18.
- [5] WANG X P, ZHAO C Y, GUO N, et al. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in Loess Plateau semiarid regions[J]. Spectroscopy Letters,

- 2015, 48(7):492-498.
- [6] 王树凤,孙海菁,陈益泰,等. 模拟干旱胁迫下弗吉尼亚栎苗木叶片相关生理参数的分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(6):6-10.
- [7] 李丽杰,顾万荣,张倩,等. 外源亚精胺对干旱胁迫下玉米幼苗叶片生理及根系特征参数的影响[J]. 农药学学报, 2015, 17(3):291-299.
- [8] HE L I, CHEN Z, JIANG Z, et al. Comparative analysis of GF-1, HJ-1, and Landsat-8 data for estimating the leaf area index of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(2):266-285.
- [9] DUAN S B, LI Z L, WU H, et al. Inversion of the PROSAIL model to estimate leaf area index of maize, potato, and sunflower fields from unmanned aerial vehicle hyperspectral data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26:12-20.
- [10] 刘天凤. 基于PROSAIL模型的干旱半干旱地区LAI遥感反演建模[D]. 兰州:兰州大学, 2015.
- [11] 程志庆,张劲松,孟平,等. 基于高光谱数据的杨树叶片干物质含量的估算[J]. 中国农业气象, 2017, 38(1):52-60.
- [12] DARVISHZADEH R, SKIDMORE A, SCHLERF M, et al. Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in a heterogeneous grassland[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5):2592-2604.
- [13] 薛香,吴玉娥. 小麦叶片叶绿素含量测定及其与SPAD值的关系[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(11):2701-2702.
- [14] JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2):75-91.
- [15] VERHOEF W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling; the SAIL model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16(2):125-141.
- [16] 施俊怡. 基于PROSAIL模型与遥感结合提取水稻种植分布[C]//第32届中国气象学会年会, 2015.
- [17] 马建威,黄诗峰,李纪人,等. 改进Sobol算法支持下的PROSAIL模型参数全局敏感性分析[J]. 测绘通报, 2016(3):33-35.
- [18] 肖艳芳,周德民,宫辉力,等. 冠层反射光谱对植被理化参数的全局敏感性分析[J]. 遥感学报, 2015, 19(3):368-374.
- [19] 王李娟,牛铮. PROSAIL模型的参数敏感性研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2):219-233.
- [20] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2013:47-49.
- [21] 董晶晶,王力,牛铮. 植被冠层水平叶绿素含量的高光谱估测[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(11):3003-3006.
- [22] 吕杰. 基于机器学习和辐射传输模型的农作物叶绿素含量高光谱反演模型[D]. 北京:中国地质大学, 2012.
- [23] 李淑敏,李红,孙丹峰,等. PROSAIL冠层光谱模型遥感反演区域叶面积指数[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10):2725-2729.
- [24] 杨贵军,赵春江,邢著荣,等. 基于PROBA/CHRIS遥感数据和PROSAIL模型的春小麦LAI反演[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):88-94.
- [25] 苏伟,郭皓,赵冬玲,等. 基于优化PROSAIL叶倾角分布函数的玉米LAI反演方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3):234-241.
- [26] CLEVERS J G P W, KOOISTRA L, SCHAEPMAN M E. Estimating canopy water content using hyperspectral remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(2):119-125.

Applicability of PROSAIL Model to Spring Wheat in Semi-arid Region of the Loess Plateau Under Different Drought Stress

GE Lijuan¹, WANG Xiaoping², WANG Qingtao¹, DANG Hong¹, ZHAO Chuanyan³

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 3. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: It is important to monitor the drought degree of crop for reasonable irrigation. In the study, taking spring wheat in semi-arid region of the Loess Plateau as research object, the feasibility of monitoring drought of spring wheat based on the retrieved parameters of PROSAIL model was probed by analyzing the response of model simulated spectral reflectance to input parameters, the relationships between input parameters of model and drought degrees as well as spectrum simulation accuracy under different drought stress. The results show that each input parameter of PROSAIL model had a different response range to canopy spectra reflectance of spring wheat. The spectra response range of chlorophyll a and b content (Cab) was 476-730 nm, for leaf area index (LAI) they were 400-750 nm, 800-1 000 nm and 1 330-2 500 nm, and for equivalent water thickness (EWT) and leaf mass per area (LMA) they were 1 874-1 891 nm and 2 331-2 356 nm, respectively. The correlation between input parameters of PROSAIL model and crop drought degree was significant. The deviations between the measured and estimated canopy spectra reflectance of spring wheat were significantly different in different bands. The deviations between them for the bands less than 1 400 nm were about 11.5%, while for the band greater than 1 400 nm they were about 69%, and the overall deviation was about 30%. The explanation of PROSAIL model to EWT and LMA wasn't sufficient, which was a main cause to form the deviation. It was debatable to monitor the drought of crop by using the retrieved parameters of PROSAIL model. Therefore, the increase of the explanatory ability of PROSAIL model to EWT and LMA is necessary.

Key words: PROSAIL model; spring wheat; drought degrees; physiological parameters; applicability