

# 基于 PROSAIL 模型的高寒冬季枯草关键参数阈值率定

梁好<sup>1</sup>, 徐维新<sup>1\*</sup>, 段旭辉<sup>1</sup>, 张娟<sup>2</sup>, 代娜<sup>1</sup>, 肖强智<sup>1</sup>, 王洪玉<sup>1</sup>

1. 成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225
2. 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001

**摘要** 冬季牧草即枯草的存量是生态补偿计算与畜牧生产科学管理的关键基础, 而对青藏高原枯草关键参数认识的不足, 直接限制了高寒冬季枯草监测研究与应用发展。PROSAIL 是一种光学辐射传输模型, 它可以定量描述植被参数与冠层反射率的关系。利用最新版本 PROSAIL 模型, 结合野外实测的枯草光谱及叶面积、叶绿素等 10 个性状参数数据, 模拟生成了 15 000 组潜在的枯草光谱数据序列。通过冬、夏实测枯草与绿草样方的反射光谱特征分析, 揭示了枯草在可见光波段与近红外波段与绿草的显著差异性, 描述了青藏高原冬季枯草在 400~1 300 nm 波段近似线性的独特光谱分布特征。在此基础上, 提出了以红光与绿光波段差值为依据的鲜/枯草光谱区分方法, 并据此实现了 15 000 组模拟光谱中枯草光谱的初级与二级筛选, 建立了枯草模拟光谱数据序列集。该模拟光谱数据序列集与实测光谱在 400~2 500 nm 全波段明显相关, 所有模拟谱线  $R^2$  均在 0.904~0.994 之间, 表明该模型能够很好地模拟高寒冬季枯草的反射率光谱。进一步采用 EFAST 方法, 对枯草模拟光谱数据序列进行全局敏感性分析, 识别出棕色素、类胡萝卜素、花青素、叶片结构、热点 5 个对枯草光谱变化不敏感的参数, 并在此基础上优化枯草敏感参数阈值区间。最终, 以 99% 置信区间为标准、余弦距离为评价函数, OFAT 方式再次运行模型, 界定了枯草敏感的参数阈值: 叶面积指数阈值区间为 0.2~0.89、叶绿素含量为 0~1.29  $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、平均叶倾角为 11°~90°、等效水厚度为 0.000 1~0.005 cm、干物质含量为 0.008~0.05  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。通过对 10 个枯草性状参数及其取值区间的率定, 提出了枯草光谱关键参数数值区间参考表, 为提高对高寒冬季枯草性状特征的科学认识及探究遥感反演应用技术方法提供理论依据与基础数据。

**关键词** 枯草; PROSAIL 模型; 参数阈值; 敏感性分析; 青藏高原

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1144-06

## 引言

青藏高原独特的生态环境与自然气候条件是推动全球变化研究与认识深化的重点区域。其中, 高寒草地是青藏高原最主要的植被覆盖类型以及我国大规模生态环境保护与建设的对象。冬季是草原过度采食与生态破坏的主要时期, 冬季牧草即枯草的存量则是保护生态平衡与畜牧业生产与灾害防御的关键参量。已有工作表明, 枯草是生物量、水分、叶绿素等参数持续协同变化的结果, 对其关键参数的认识具有重要的科学意义与直接的应用需求。然而, 当前国内外对冬季枯草的研究报道极少, 而青藏高原地区冬季枯草监测空白的

现状, 则与枯草性状参数认识的不足有直接关系。

传统草地监测主要依靠人工采样完成, 不仅费时费力, 更难以完成大面积的监测。近年来, 辐射传输模型 PROSAIL 由于可以定量描述色素含量、水分、叶面积指数等性状参数对反射光谱的影响, 而被广泛用于植被反演监测和机理研究中<sup>[1]</sup>。多项研究指出 PROSAIL 模型在现实环境、模型复杂性、准确性和计算时间之间达成了良好的统一<sup>[2-3]</sup>, 使其适用于多视角高光谱数据的分析和反演。Berger 等<sup>[4]</sup>对 1992 年到 2017 年间 281 篇与 PROSAIL 相关的论文分析发现, 利用 PROSAIL 模型针对多种农作物(以小麦、玉米、甜菜为主)、森林及天然植被(草地, 灌木)展开的研究, 均取得了成功应用的同时, 获得并提升了对各类植被反射光谱特征

收稿日期: 2021-04-27, 修订日期: 2021-07-12

基金项目: 青海省科技计划项目(2019-HZ-820), 国家自然科学基金项目(41861049, 41971328), 四川省科技计划重点研发项目(2019YFS0465)资助

作者简介: 梁好, 1996 年生, 成都信息工程大学资源环境学院硕士研究生 e-mail: 3190202006@stu.cuit.edu.cn

\* 通讯作者 e-mail: weixin.xu@cuit.edu.cn

与植被性状参数作用的认识。梁顺林等<sup>[5]</sup>指出准确的参数运行区间是基于 PROSAIL 模型开展相关研究与反演活动的基础。然而, 目前针对衰落期植被参数及其光谱特征的研究鲜有报道, 个别研究仅作为生长期对照组而涉及衰落期<sup>[6-7]</sup>, 缺乏对衰落过程中的各参数变化与机理状态的系统研究。

研究将利用 PROSAIL 模型, 结合实测光谱与性状参数, 通过模拟枯草冠层反射率曲线, 探究 PROSAIL 模型对枯草的适用性, 完成模型敏感性与不确定性分析。在此基础上率定高寒枯草各项性状参数及其取值范围, 最终得到 LAI, LAD 和  $C_m$  等关键参数取值区间参考表。为利用模型对枯草进行研究和反演提供有利的基础数据支撑, 并期望推动对枯草性状参数的认识与理解, 为冬季枯草的遥感监测提供基础与方法支持。

## 1 实验部分

### 1.1 样本

样本采集于青海省海北藏族自治州西海镇中国气象局海北牧业气象试验站。该试验场位于  $100^{\circ}51'33''E$ ,  $36^{\circ}57'33''N$ , 海拔 3 140 m, 地处青藏高原北部青海湖畔, 属典型高寒天然草原。

在该试验场沿南北方向平行设置 5 行 23 个  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$  枯草观测固定样方。在牧草自然衰落并呈完全枯干状态的 2020 年 11 月 27 日进行观测采样。采样时晴朗无风, 枯草反射光谱及性状参数采样时间限定于 9:30—15:30。最终获得反射光谱 230 条, 参数数据 207 条。

### 1.2 数据采集

#### 1.2.1 光谱数据

使用 ASD 公司的 FieldSpec4 便携式地物光谱仪进行枯草反射光谱采集。波长范围为  $350 \sim 2\,500\text{ nm}$ , 在可见光 (VIS) 和近红外 (NIR) 波段采样间隔为 3 nm, 短波红外 (SWIR) 采样间隔为 8 nm, 单次采集时间为 0.2 s, 探头视场角  $\theta$  为  $25^{\circ}$ 。按操作规范预热仪器并进行暗电流测试和参考板校正, 为保证视场范围半径处于样方区内, 观测时将探头高度保持在距地面约 80 cm<sup>[8]</sup> 进行观测。每个样方每次同步采集 10 条冠层反射光谱, 以保证观测数据可靠性与稳定性。

#### 1.2.2 枯草性状参数

使用 KonicaMinolta 公司的 SPAD502 叶绿素仪进行枯草叶绿素含量同步观测。该仪器测量窗口  $2\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ , 精度  $\pm 1.0\text{ SPAD}$ , 采样间隔 2 s, 重现性  $\pm 0.5\text{ SPAD}$  内。测量时每个样方随机选择 3 株枯草, 在枯草的上中下三部分各进行一次测量, 取平均值作为该株枯草的叶绿素相对含量 SPAD 值。

使用直尺测量冠层高度  $L$ 、平均叶片长度  $D$ , 并使用量角器量取叶倾角。随后用剪刀齐根剪下样方中所有牧草并装袋送回实验室。同步记录观测时间、天气等状况。根据式(1)计算得到热点参数  $H_{\text{spot}}$ 。

$$H_{\text{spot}} = \frac{L}{D} \quad (1)$$

使用天平(可读性 0.01 g)测量枯草鲜重。随后将同一样

方的叶片均匀、分散平铺于多张 A3 纸上, 经拍照及后期图像识别, 获取样方叶面积指数(LAI)。随后放入烘箱以  $70^{\circ}\text{C}$  恒温烘干, 烘至重量不再改变时作为该样方干重。鲜重与干重相减得到枯草水分含量。

### 1.3 光谱模拟

#### 1.3.1 PROSAIL 模型

PROSPECT 叶片光学传输模型与 SAIL 冠层双向反射率模型耦合组成 PROSAIL 模型。Féret 等<sup>[9]</sup>指出, 最新推出的 PROSPECT-D 优于之前的版本, 不仅降低了模型预测的不确定性、更好地恢复光合色素, 同时能在可见光范围内以最小的误差模拟真实的叶片光学特性。4SAIL 模型引入了热点效应和土壤的二向反射特征, 提高了模型的数值稳定性和鲁棒性。因此, 本研究采用 PROSPECT-D 与 4SAIL 耦合的 PROSAIL 模型进行枯草光谱模拟。

根据实测枯草性状数据, 同时参考 LOPEX93 数据库与已有关于人工落叶林和冬小麦衰落期的研究成果<sup>[6-7]</sup> 预设了模型运行初值(表 1)。

#### 1.3.2 模型敏感性分析

敏感性分析是定量或定性分析模型参数对模型结果产生的影响程度, 对模型输入参数进行敏感性分析是进行参数率定的前提。本研究采用全局敏感性分析方法 EFAST 法来完成 PROSAIL 输入参数敏感性分析。EFAST 法可以通过方差分解得到各参数的方差贡献比重, 并以敏感性指数值来衡量各参数的敏感性。其优点在于所得敏感性指数充分考虑了参数间耦合作用<sup>[10]</sup>。其计算式为

$$V(Y) = \sum_{i=1}^k V_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} V_{ij} + \dots + V_{1\dots k} \quad (2)$$

式(2)中,  $V(Y)$  为全部参数的总方差,  $k$  为参数个数,  $V_i$  为第  $i$  个参数自身的方差,  $V_{ij}$  为第  $i$  和  $j$  参数耦合作用的方差,  $V_{1\dots k}$  为所有参数耦合作用的方差。

#### 1.3.3 模型不确定性分析

不确定性是模型运行中参数间存在耦合作用无法完成全局最优判断导致的输出结果离散<sup>[11]</sup>。不确定性分析可以识别模型不确定性的来源并量化参数对输出不确定性的贡献。进行不确定性分析有助于提高枯草各参数组间相互作用的认识和枯草衰落机理的理解。

采用全局敏感性指数与局部敏感性指数的差值来量化不确定性<sup>[12]</sup>。如果某个参数与其他参数间存在耦合作用, 造成了模型不确定性, 那么它的全局敏感性指数值会大于局部敏感性指数值。由式(2)知, 两者的差值可写作  $V_{ij} + V_{1\dots k}$ , 即为耦合关系指数, 作为量化参数不确定性的指标。

#### 1.3.4 枯草高敏感性参数率定

枯草反射光谱受不同草品种、倒伏状态、枯黄程度等影响, 在光谱波形相似的情况下反射率绝对值波动较大, 因此选取注重维度差异而不是数值差异的率定函数是必要的。

余弦距离<sup>[13]</sup>又称余弦相似度, 衡量维度间取值方向的一致性, 同时修正了变量间可能存在的度量标准不统一问题。其不同于以距离为测度的欧式距离, 也不同于以单位变化相似程度为依据的相关系数, 在具有时序特性并对趋势(方向)敏感的曲线相似度评价中更有优势。本研究采用余弦

距离为参数率定评价函数。通过对比不同输入参数取值下的模型模拟反射光谱与实测反射光谱间的余弦距离完成关键参数的率定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 枯草光谱模拟结果

#### 2.1.1 光谱数据预处理

对野外实测的固定样方光谱数据,逐一检查每个样方同步观测得到的 10 条光谱,剔除因仪器、吹风等因素引起的明显异常波动数据后,得到枯草原始光谱数据序列,每个样方随机挑选 1 条原始光谱展示于图 1 中。由于 PROSAIL 模型模拟的有效范围为 400~2 500 nm,本研究处理与分析均基于此区间完成。

从图 1 可以看出,枯草光谱在 400 nm 附近差异较小,随着波长的增大,枯草光谱间的反射率差异逐渐变大,并在 1 300 nm 附近达到反射率峰值(0.25~0.46)。从 1 300 nm 开始,光谱反射率差异始终保持在 0.1~0.25 间,各样方曲线分布区间分散,区分度明显。

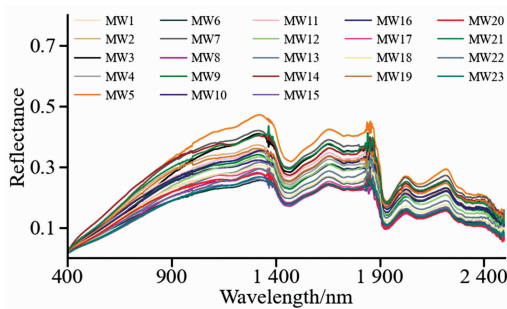


图 1 2020 年 11 月 27 日海北试验场实测枯草原始反射光谱  
Fig. 1 Measured withered grass spectrum (MW) on November 27, 2020 in Haibei

为了更好凸显枯草光谱特征,消除不同光栅间的系统性“跳跃”偏差及个别光纤波动导致的“毛刺”性异常值。利用 ASD 光谱仪附配的 ViewSpecPro 软件进行光谱预处理。完成抛物线修正及同次观测样本的均值合成输出,实现数据校正的同时降低测量随机误差。

#### 2.1.2 模型运行

根据 1.3.1 设定的模型模拟参数初始值,设定了较宽的模型运行参数阈值范围(表 1),以保证模拟结果处于可能的波动范围区间。

其中 LAI, LAD,  $C_w$ ,  $C_m$ ,  $C_{ab}$  和  $H_{spot}$  根据实测数据确定。例如:  $C_m$  实测值在 0.003~0.020 之间,平均值为 0.010,因此设定  $C_m$  参数运行范围为 0.002~0.050。 $C_{br}$ ,  $C_{ar}$ ,  $C_{ant}$ ,  $N$  初值参考文献[6-7]设定, OZA, SZA 和 RAA 由试验点坐标和时间确定。

利用 MATLAB 对 PROSAIL 模型编程运行。根据表 1 参数范围,以蒙特卡洛采样<sup>[14]</sup>方式获得在参数范围内随机分布的 15 000 组参数组合对,模型运行输出得到对应的 15 000 组模拟反射光谱。

表 1 模型运行初值及范围设定

Table 1 Initial value of PROSAIL model

参数	描述	单位	初始值	参数运行范围
LAI	叶面积指数	$\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$	0.96	0.2~2.5
LAD	平均叶倾角	degree	45	0~90
$C_{ab}$	叶绿素	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.63	0~35
$C_{br}$	棕色素	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.53	0~2
$C_{ar}$	类胡萝卜素	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	22	0~30
$C_{ant}$	花青素	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	2.03	0~15
$N$	叶片结构参数	—	1.12	0.7~2.0
$C_w$	等效水厚度	cm	0.000 7	0.000 1~0.005 0
$C_m$	干物质	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.02	0.002~0.050
$H_{spot}$	热点参数	—	0.57	0.01~1.0
OZA	观测天顶角	degree	0	—
SZA	太阳天顶角	degree	61	—
RAA	相对方位角	degree	180	—

注: degree(度)

#### 2.1.3 基于光谱特征的枯草初级筛选

图 2 为试验场夏季(8 月 30 日)绿草和冬季(11 月 27 日)枯草样方经预处理后的平均光谱。从图中可以看出,高寒冬季枯草与绿草光谱在可见光与近红外波段存在着显著差别。绿草光谱表现为典型的绿色植被光谱特征,红光波段(650~680 nm)的吸收谷与近红外波段(760~1 300 nm)的高反射特征清晰。然而,枯草的光谱特征在短波红外波段前则明显不同于绿草,其反射光谱曲线自 400~1 300 nm 基本呈明显的线性增加趋势,绿色植被的蓝光与红光波段的吸收谷特征完全消失,近红外波段较一致的高反射率特征被逐渐增加的线性分布特征代替。反映了牧草干枯、叶绿素流失、叶片内部结构破坏后的独特光谱特征。

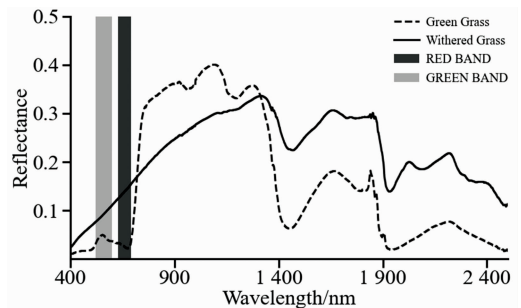


图 2 海北试验场 8 月 30 日和 11 月 27 日样方平均光谱  
Fig. 2 The average spectrum for all samples on August 30 and December 30 respectively in Haibei

由于模型设定的参数阈值范围较宽且输入参数随机组合,PROSAIL 模型生成的 15 000 组模拟光谱序列中,存在着反映绿草特征以及由绿至枯过渡阶段特征甚至“错误”的光谱。因此,需要依据枯草的光谱特征,进行非枯草特征光谱数据的筛选排除。

观察图 2 可以发现,枯草在可见光波段与绿草有显著光谱差异,尤其是红光波段吸收谷的存在与否,可作为绿/枯草区分与判别划界依据。由于绿草红光波段吸收谷与绿光波段小反射峰的存在,绿草绿光波段反射值必定大于红光波

段，而枯草则是红光波段大于绿光。因此，模拟结果中枯草光谱的筛选可通过式(3)判别

$$R_{red} - R_{green} > 0 \tag{3}$$

式(3)中： $R_{red}$ 为红光波段，本研究选取 660 nm 反射率； $R_{green}$ 为绿光波段，选取 560 nm 反射率。

当该式计算值大于 0 时，视该模拟光谱值反映了枯草光谱特征。以此完成 15 000 组模拟数据的初级筛选，并得到枯草相关光谱序列。

### 2.1.4 基于线性拟合的枯草光谱二级筛选

根据图 2 枯草光谱特征，枯草与绿草光谱在 1 300~2 500 nm 波段虽然数值差异较大，但波谱特征相似，难以区分，而在 400~1 300 nm 波段二者间数值与分布特征均有显著差异。

此外，图 1 中 1 300~2 500 nm 波段枯草光谱分布区间分散，最大值与最小值的极值分布区间宽，与非枯草地物光谱区间重叠范围较大。而 400~1 300 nm 波段，枯草的极值分布区间窄而收敛性强，波形特征与其他地物具有显著差异性。同时，该波段处于大气窗口，也不属于水汽的强吸收带，受水汽的影响较小。因此从枯草 400~1 300 nm 波段波形特征出发，进一步区分枯草光谱。

从经过数据预处理后 400~1 300 nm 波段实测枯草反射光谱可以发现(图 3)，这一区间枯草光谱呈准线性分布，波形线性特征显著。对这一区间内实测光谱数据序列的线性拟合结果表明，绝大多数观测样本线性拟合方程的决定系数  $R^2$  达到了 99% 置信区间，所有 23 个观测样本的线性拟合  $R^2$  均通过 95% 置信区间。因此，以 400~1 300 nm 区间模拟光谱数据序列线性拟合方程系数  $R^2 > 0.95$  作为枯草光谱二级筛选的方法与阈值。

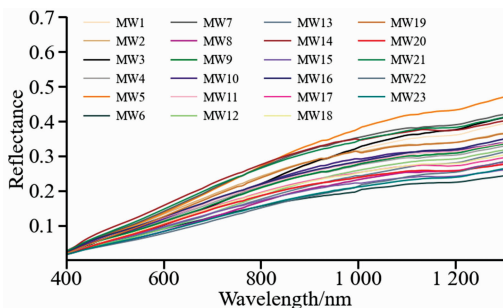


图 3 经预处理的 400~1 300 nm 波段实测枯草光谱  
Fig. 3 The measured spectrum of withered grass from 400 to 1 300 nm after data preprocessing

### 2.1.5 枯草光谱分布区间模拟

根据式(3)及 2.1.4 中提出的线性拟合方法，对 PROSAIL 模拟输出的 15 000 组数据分步进行枯草光谱筛选，最终得到 1 799 条完成两级筛选符合枯草特征的光谱数据序列。挑出这些序列中的最大值与最小值，构建完成 400~2 500 nm 枯草模拟光谱最大值、最小值与实测平均值光谱数据序列(图 4)。

该最大与最小值指示了指定波段枯草反射光谱响应的阈值区间。在 400 nm 处光谱反射率在 0.01~0.02 波动，差距

微小；1 300 nm 处其极值变动区间在 0.24~0.42，阈值变幅 0.18，而在 1 450 nm 水分强吸收谷波动在 0.12~0.27。

从 400~2 500 nm 的全光谱序列变化特征看，模拟光谱与平均实测光谱显著相似。对筛选得到的模拟光谱与平均实测光谱进行拟合评价，其  $R^2$  值在 0.904~0.994 之间，通过了 0.01 显著性水平检验。说明 PROSAIL 模型模拟冬季高寒牧草的效果准确可信，筛选出的模拟光谱及对应参数可用于枯草特征分析。

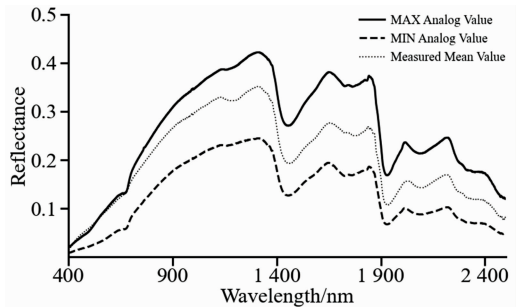


图 4 二级筛选得到的枯草模拟光谱序列极值  
Fig. 4 Maximum and minimum of simulated spectral series of withered grass obtained by two-step identification

### 2.2 模型敏感性分析

采用 EFAST 方法进行全局敏感性分析，将 2.1.2 中的参数输入组合对和产生的模拟光谱结果输入 EFAST 分析得到各输入参数的敏感性指数值。

图 5 为 10 个枯草性状参数在 400~2 500 nm 的全局敏感性指数百分比面积堆叠曲线。从图 5 可以看出：在 VIS 波段(400~700 nm)，LAI, LAD 和  $C_{ab}$  对枯草光谱影响较大。在 NIR 波段(700~1 350 nm)， $C_m$  和 LAD 平均叶倾角影响显著，影响幅度均接近 50%，而在这一波段  $N$  也有持续少量影响，值得注意的是， $C_{brown}$  仅在 700~800 nm 之间有近 40% 的影响。在 SWIR 波段(1 350~2 500 nm)，主要影响因素依次为  $C_m$ , LAI,  $C_w$  及 LAD。其中  $C_m$  除了在两个水分吸收带指数值较低外，其余波段均维持在 50% 左右， $C_w$  则仅对两个典型水分吸收谷(1 450, 1 940 nm)有突出影响，LAD 的影响程度则随波长逐渐变小。

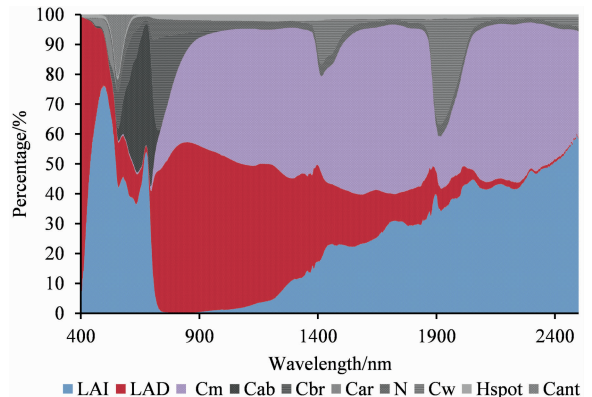


图 5 10 个枯草性状参数敏感性指数百分比面积堆叠图  
Fig. 5 Percentage area stacking of sensitivity index for 10 main characteristic parameters

需要注意的是,虽然枯草内  $C_{ab}$  含量非常低,是枯草低敏感参数,但由于其在牧草衰落过程中具有直接指示意义,在此也将其划入高敏感性参数。

根据以上分析结果,将输入参数分为高敏感性参数(LAI, LAD,  $C_m$ ,  $C_{ab}$ ,  $C_w$ )和低敏感性参数( $C_{br}$ ,  $C_{ar}$ ,  $C_{ant}$ ,  $N$ ,  $H_{spot}$ )。通过优化高敏感性参数的取值范围,获得参数合理阈值区间。由于低敏感性参数对模型输出的影响较小,几乎可以忽略不计,将低敏感性参数的取值固定,取值为筛选出的模拟枯草光谱序列对应的参数平均值。

参照图 4 枯草光谱极值分布范围,基于敏感性分析结

果,分别统计 5 个枯草敏感参数的光谱值区间内数值分布,准确界定其数值分布范围,逼近理想阈值区间的同时,实现了模型初始运行时相对宽泛阈值区间的缩小与优化。

枯草参数敏感性分析优化的结果如表 2 所示。从表 2 与表 1 的对比可以看出, LAI 由 0.2~2.5 变动区间缩小至 0.2~1.5,说明枯草叶面积指数最高阈值界限低于绿色植被的同时,其阈值范围明显偏窄。同样, LAD 的下限阈值由 0 提高到 11,  $C_{ab}$  的阈值范围由 0~35 缩窄聚集至 0.03~25。枯草敏感的 5 个参数阈值区间得到了较精准化的界定,为最终实现枯草参数率定进一步缩小了范围。

表 2 基于敏感性分析优化的 PROSAIL 枯草参数阈值与枯草参数耦合关系指数

Table 2 Threshold and coupling relation index of withered grass characteristic parameters simulated optimized by sensitivity analysis

参数	LAI	LAD	$C_{ab}$	$C_{br}$	$C_{ar}$	$C_{ant}$	$N$	$C_w$	$C_m$	$H_{spot}$
范围	0.2~1.5	11~90	0.03~25	1.3	22	2.03	1.12	0.000 1~0.005	0.002~0.05	0.57
耦合值	166.8	150.8	30.0	30.1	10.6	45.3	42.4	135.8	14.5	15.6

### 2.3 模型不确定性分析

由 1.3.3 可知,耦合关系指数可指示模型各参数间耦合作用的强弱,籍此判断各输出参数随其他参数变化而波动的不确定性。

表 2 指出 LAI, LAD 与  $C_w$  耦合关系指数值均超过了 100,表明这 3 个参数的耦合关系强,其取值易受其他参数的影响。因此,在反演时不能简单地将三者看作独立变量进行分析,需考虑该参数和其他参数的耦合关系带来的不确定性影响。其他 7 个参数的耦合关系指数值较低,表明模型获得的参数的不确定性较小、可靠性高。

### 2.4 枯草关键参数阈值率定

基于表 2 枯草参数阈值范围,对 5 个高敏感性参数再次进行 OFTA<sup>[15]</sup>(one factorata time)局部敏感性分析。即:通过固定模型内所有其他参数取值,以均匀步长对表 2 中该参数阈值区间一一取值,逐一判别单个参数变化对模拟结果的贡献。并以余弦距离作为评价函数,以 99%置信度为标准,对比不同取值下的模拟反射光谱与实测反射光谱间的余弦距离,识别出单个参数与枯草取值方向的一致性程度及数值敏感区间,实现高敏感性参数的进一步率定,结果如表 3 所示。

表 3 枯草关键参数取值区间参考表

Table 3 Reference table for 10 main parameters threshed of withered grass

参数	LAI	LAD	$C_{ab}$	$C_{br}$	$C_{ar}$	$C_{ant}$	$N$	$C_w$	$C_m$	$H_{spot}$
范围	0.2~0.89	11~90	0~1.29	1.3	22	2.03	1.12	0.000 1~0.005	0.008~0.05	0.57

## 3 结论

利用 PROSAIL 辐射传输模型,结合实测光谱与枯草性状参数,进行枯草反射光谱模拟,以余弦距离作为评价函数,率定了 10 个枯草性状参数阈值。模拟结果显示,400~2 500 nm 的全光谱模拟序列与实测光谱  $R^2$  通过了 0.01 显著性水平检验,证实 PROSAIL 模型对高寒冬季枯草具有很好的模拟能力。并依据红光与绿光波段反射率差值和顾及水汽吸收影响下枯草在 400~1 300 nm 的准线性波形特征提出

了一种有效筛选枯草光谱的方法。

通过对模拟结果的两级敏感性分析与不确定分析,筛选出叶面积指数、叶倾角、干物质、等效水厚度、叶绿素含量等 5 个枯草变化高敏感参数,指出了枯草参数不确定性响应程度。进一步,给出了不敏感性参数的推荐数值,界定了枯草敏感的 LAI 的阈值介于 0.2~0.89、LAD 为 11°~90°、 $C_{ab}$  为 0~1.29  $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $C_w$  为 0.000 1~0.005 cm,  $C_m$  为 0.008~0.05  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,完成了高寒枯草参数率定。为提高对高寒冬季枯草的基础认识及遥感反演等研究提供基础数据与依据。

## References

- [1] English Stephen, Lean Peter, Geer Alan. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 251: 107044.
- [2] de Sá Nuno César, Baratchi Mitra, Hauser Leon T, et al. Remote Sensing, 2021, 13(4): 648.
- [3] Zhang Yangyang, Yang Jian, Du Lin. Sensors, 2021, 21(5): 1869.

- [ 4 ] Berger Katja, Atzberger Clement, Danner Martin, et al. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 85.
- [ 5 ] LIANG Shun-lin, BAI Rui, CHEN Xiao-na, et al(梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2020, 24(6): 618.
- [ 6 ] Sinha S K, Padalia H, Dasgupta A, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 86: 102027.
- [ 7 ] Danner Martin, Berger Katja, Woche Matthias, et al. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1150.
- [ 8 ] Mohamad M A. J. *Forestry Res.*, 2018, 29(5): 1395.
- [ 9 ] F  ret J B, Gitelson A A, Noble S D, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193: 204.
- [10] Sun Bo, Pan Wuyang, Wang Zili, et al. *Microelectronics Reliability*, 2015, 55(9-10): 1384.
- [11] HAO Gai-rui, LI Jia-ke, LI Huai-en, et al(郝改瑞, 李家科, 李怀恩, 等). *Journal of Hydroelectric Engineering(水力发电学报)*, 2018, 37(12): 54.
- [12] Gao Lei, Bryan Brett A, Liu Jian, et al. *J. Clean Prod.*, 2017, 162: 1009.
- [13] George Kuruvachan K, Kumar C Santhosh, Sivadas Sunil, et al. *Pattern Recognition Letters*, 2018, 112: 285.
- [14] Mavrotas George, Makryvelios Evangelos. *European Journal of Operational Research*, 2021, 291(2): 794.
- [15] Banu Asfana, Ali Mohammad Yeakub, Rahman Mohamed Abdul, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(9): 4247.

## Threshold Calibration of Key Parameters of Withered Grass Based on PROSAIL Model in Qinghai-Tibet Plateau

LIANG Hao<sup>1</sup>, XU Wei-xin<sup>1\*</sup>, DUAN Xu-hui<sup>1</sup>, ZHANG Juan<sup>2</sup>, DAI Na<sup>1</sup>, XIAO Qiang-zhi<sup>1</sup>, WANG Qi-yu<sup>1</sup>

1. School of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

2. Qinghai Institute of Meteorological Science, Qinghai Meteorological Bureau, Xining 810001, China

**Abstract** Grassland, as an important part of the ecosystem in the Qinghai-Tibet Plateau, plays an ecological indicator role. However, during the non-growing season, it generally didn't monitor or observe alpine grass in winter. It could be a great gap to develop the methods of grassland monitoring and its application in winter. PROSAIL, a physical radiation model, can quantitatively describe the relationship between various vegetation parameters and canopy reflectance spectra. In this study, the latest version of the PROSAIL-D model and ground observed data were applied to explore the thresholds of critical range for 10 parameters of withered grass affected by reflectance spectrum. Based on the reflectance spectrums and the corresponding character's parameters of withered grass that were obtained in the field, 15 000 possible withered grass spectrums were simulated by the PROSAIL model. Compared to the difference of reflectance spectra between withered grass and green grass observed in winter and summer respectively, it is found that a clear difference displayed on visible and near-infrared bands and with a significant linear in 400~1 300 nm spectral range for withered grass in winter in Qinghai-Tibet Plateau. On that basis, we proposed a method to distinguish the withered and green grass using the difference between red and green spectral reflections. It can be considered as a withered grass spectrum while the difference is greater than 0. Furthermore, a dataset of potential withered grass spectrum was established by two-steps identification from 15 000 possible spectrums based on the methods described above. The potential withered grass spectrums are correlated closely to the observed spectrums with a whole range of 400~2 500 nm, and the  $R^2$  of all the simulated spectrum lines was between 0.904 and 0.994. By EFAST method and global sensitivity analysis, the brown pigment, carotenoid, anthocyanin, leaf structure and hot spot were identified as non-sensitive factors that respond to the withered grass spectrum. Finally, PROSAIL model was run again in OFAT (One Factor at a Time) with 99% confidence interval as the criterion and cosine distance as the evaluation function. The parameter threshold intervals of the sensitive factors of withered grass are estimated as: leaf area index of 0.2~0.89, chlorophyll content in 0~1.29  $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , the average leaf angle between  $11^\circ \sim 90^\circ$ , equivalent water thickness from 0.000 1 to 0.005 cm, dry matter content within 0.008~0.05  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ . The results provide some important parameters and further understanding of grass characteristics in winter, and it will strongly promote the application in remote sensing monitoring.

**Keywords** Withered grass; PROSAIL model; Threshold estimate; Sensitivity analysis; Qinghai-Tibet Plateau

\* Corresponding author

(Received Apr. 27, 2021; accepted Jul. 12, 2021)