

DOI: 10.5846/stxb201909231992

白雪莲, 乔荣荣, 季树新, 闫志坚, 常学礼, 赵文智. 不同生活型植物非光合部分反射光谱和盖度的关系. 生态学报, 2022, 42(1): 186-195.

Bai X L, Qiao R R, Ji S X, Yan Z J, Chang X L, Zhao W Z. Relationship of reflectance spectral and fractional cover of various non-photosynthetic vegetation. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 186-195.

## 不同生活型植物非光合部分反射光谱和盖度的关系

白雪莲<sup>1, 4</sup>, 乔荣荣<sup>2</sup>, 季树新<sup>2</sup>, 闫志坚<sup>3</sup>, 常学礼<sup>2, \*</sup>, 赵文智<sup>1</sup>

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000

2 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025

3 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010

4 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**非光合植被(Non-photosynthetic Vegetation, NPV)既是陆地生态系统重要组成部分,也是全球 C、N 平衡分析中关键节点,其盖度是判断我国北方沙尘源区风沙活动强弱的重要指征。基于 ASD 光谱仪(Analytical Spectral Devices)所测地面高光谱数据对鄂尔多斯沙地草场不同生活型植物(草本、半灌木和灌木)NPV 光谱特征进行了分析,构建了干枯燃料指数(Dead Fuel Index, DFI)、纤维素吸收指数(Cellulose Absorption Index, CAI)和 NPV 盖度( $f_{NPV}$ )应用模型,并使用 MCD43A4 数据在不同草原区进行了验证。结果表明:(1)草本、半灌木、灌木和总体混合 NPV 光谱反射率具有相似变化趋势,但反射值存在显著差异。(2)DFI 和 CAI、CAI 和  $f_{NPV}$ 、DFI 和  $f_{NPV}$  均呈显著正相关关系( $P < 0.001$ ),DFI 可以代替 CAI 进行  $f_{NPV}$  的估算。(3)不同草原区  $f_{NPV}$  存在异质性,草甸草原、典型草原、沙地草场和荒漠草原分别为 75.95%、50.61%、45.88% 和 32.77%。DFI 在典型草原区估算  $f_{NPV}$  效果最好( $f_{NPV1}$  和  $f_{NPV2}$  平均差值为 3.11%,最小差值为 0.03%)。在草原区进行  $f_{NPV}$  估算时,不可将 NPV 作为均质体处理,还要剔除裸地干扰。

**关键词:**地面高光谱;非光合植被盖度;干枯燃料指数;纤维素吸收指数

## Relationship of reflectance spectral and fractional cover of various non-photosynthetic vegetation

BAI Xuelian<sup>1, 4</sup>, QIAO Rongrong<sup>2</sup>, JI Shuxin<sup>2</sup>, YAN Zhijian<sup>3</sup>, CHANG Xueli<sup>2, \*</sup>, ZHAO Wenzhi<sup>1</sup>

1 Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Network Research, Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 School of resources and environmental engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

3 Grassland research institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Hohhot 010010, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Non-photosynthetic vegetation (NPV) is a vital component of terrestrial ecosystem, as well as a critical hotspot in global carbon and nitrogen studies. In addition, its coverage in the source area of wind-blown sand in northern China indicates the intensity of wind-blown sand activities. As revealed from recently conducted studies, cellulose absorption index (CAI) was highlighted to be capable of more effectively reflecting the fractional cover of non-photosynthetic vegetation ( $f_{NPV}$ ). However, there was no corresponding band (2000—2050 nm, 2080—2130 nm, and 2100—2240 nm) for CAI calculation in the 36 bands of MODIS data. Subsequently, under the introduction of dead fuel index (DFI), it can be

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41271193);内蒙古自治区十三五水利重大专项项目(NSK2017-M2)

**收稿日期:**2019-09-23; **网络出版日期:**2021-08-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlchang@126.com

employed directly to estimate  $f_{\text{NPV}}$ , whereas a question is whether DFI accurately reflect the content of NPV cellulose? Is it necessary to establish the relationship between CAI and DFI to achieve more accurate estimation of  $f_{\text{NPV}}$ ? It has always been neglected by researchers. Therefore, this paper intended to study the distribution of  $f_{\text{NPV}}$  in various grassland, and compared the difference between direct estimation of  $f_{\text{NPV}}$  by DFI and indirect estimation of  $f_{\text{NPV}}$  by CAI, the influence of bare land on the estimation results were analyzed in order to explain the spatial heterogeneity characteristics of  $f_{\text{NPV}}$  in different grasslands. We analyzed the NPV spectral characteristics of different habitats NPV (herb, semi-shrub and shrub) in sandy grassland of Ordos and constructed the application model of DFI, CAI and  $f_{\text{NPV}}$  based on the ground hyper-spectral data measured by analytical spectral devices, and then validated in different grassland areas. The results showed that the NPV reflectance had similar trends of herb, semi-shrub, shrub and mixed NPV. There was a significantly positive correlation between DFI and CAI, CAI and  $f_{\text{NPV}}$ , DFI and  $f_{\text{NPV}}$  at the level of  $P < 0.001$ , and DFI could better reflect the change of  $f_{\text{NPV}}$ . But the  $f_{\text{NPV}}$  value directly calculated by DFI was larger than the  $f_{\text{NPV}}$  that calculated indirectly by CAI, the average overestimation was 3.11% when eliminating bare ground. The difference between two values in typical grassland areas was 0.03%. In addition, the NPV should not be treated as a homogeneous material, and bare ground interference should be eliminated when performing  $f_{\text{NPV}}$  estimation.

**Key Words:** ground hyper-spectral; fractional cover of non-photosynthetic vegetation; dead fuel index; cellulose absorption index

非光合植被(Non-photosynthetic Vegetation, NPV)是陆地生态系统重要组成部分,是衡量地表植被覆盖状况的重要指标之一<sup>[1]</sup>。NPV 主要指枯草、枯叶、枯枝、枯干、作物留茬和凋落物以及植物活体非光合部分等<sup>[2]</sup>,是生态系统中物质循环和能量流动重要环节之一,特别是枯死部分不仅能够增加土壤有机质改善土壤质地,还能够有效减少地表径流和土壤风蚀<sup>[3-5]</sup>,并在草原火灾监测方面起着关键作用<sup>[6-7]</sup>,及时、准确的掌握 NPV 动态对于水土保持、风沙天气的减缓、沙尘源的识别和草原生态系统保护有至关重要的意义。

随着遥感技术提高及易操作、低成本和可周期性重复特点使其被广泛应用到区域植被动态监测<sup>[8-10]</sup>,并应用一些指数来表征农田 NPV 取得了大量结果,如归一化指数(Normalized Difference Index, NDI)、归一化差异衰败指数(Normalized Difference Senescent Vegetation Index, NDSVI)、土壤调整作物茬指数(Soil Adjusted Corn Residue Index, SACRI)和修正土壤调整作物茬指数(MSACRI)等,但是估算误差较大<sup>[11-13]</sup>。与上述研究途径不同,Elvidge(1988)利用机载可见红外成像分光计 2180—2220 nm 和 2310—2380 nm 波段数据计算并提出了纤维素指数概念,同时还发现了灌木分布区反射光谱在 2100 nm 处有明显光谱吸收槽<sup>[14]</sup>。Daughtry 等于 1996 年在此基础上提出了纤维吸收指数(Cellulose Absorption Index, CAI),涉及波段涵盖了 Elvidge 的发现,分别为 2000—2050 nm, 2080—2130 nm 和 2190—2240 nm<sup>[15]</sup>。CAI 提出后,大量的验证与应用研究表明与其他类似指数相比,CAI 可以更好反映非光合植被盖度( $f_{\text{NPV}}$ )<sup>[16-20]</sup>。但是,在 MODIS 数据 36 个波段中,缺少与 CAI 计算所对应波段(2000—2050 nm, 2080—2130 nm 和 2190—2240 nm),因此,如果能在 MODIS 数据中发现与 CAI 计算波长密切相关波段成为 NPV 研究关键。针对这一问题,Cao 等根据 MODIS 波段特征提出 DFI 能很好反映地表枯落物状态,其研究结果在国际遥感杂志(International Journal of Remote Sensing)发表<sup>[18-19]</sup>。此后,相关研究直接将 DFI 应用到  $f_{\text{NPV}}$  估算中<sup>[11, 21-22]</sup>,但是 DFI 是否可以准确反应 NPV 纤维素含量状况? DFI 计算所采用波段与 CAI 反应敏感波长存在偏差的事实如何补偿等这些细节问题一直被忽视。因此,完成 CAI 和 DFI 关系分析是实现  $f_{\text{NPV}}$  更加精确估算的关键。在已有研究中 CAI 和 DFI 的关系是通过构建像元三分法进行间接比较分析<sup>[2, 21, 23-24]</sup>,缺乏对二者之间的直接实验验证。从 NPV 解译方法来看,覆盖度估算主要有非光合植被-裸地(NPV-BS)二分模型、光合植被-非光合植被-裸地(PV-NPV-BS)三分模型和光合植被-非光合植被-裸地-阴影(PV-NPV-BS-Shadow)四分模型等<sup>[2, 9, 21, 23]</sup>。这些方法在理论上较好诠释了地表植被覆盖构成和外界因素对盖度估算影响,但已有研究也明确指出了上述方法存在问题<sup>[25-26]</sup>,如像元三分

和四分模型在植被枯黄期、PV 盖度( $f_{PV}$ )限制(<30%)条件下才能较好估算 $f_{NPV}$ 等。此外,一些相关研究中关注了裸地可能会对 $f_{NPV}$ 提取产生影响,但是在盖度计算中对于是否应该剔除掉裸地值缺少直接的对比分析<sup>[9, 12, 21, 23]</sup>。

从有关大尺度 NPV 研究现状来看<sup>[18—19, 23—24, 26—27]</sup>,目前处在将 NPV 作为一个均质整体分析阶段,对其由 NPV 盖度和不同生活型植物凋落组成等导致空间异质性缺乏考虑<sup>[2, 16, 27—29]</sup>。但是,已有研究表明灌木 $f_{NPV}$ 估算误差高于草本和农作物<sup>[30]</sup>,明显看出木质材料和草本材料存在差异。中国对于 NPV 的研究主要集中于锡林郭勒草原,并把该区看作典型草原,忽略了该区草甸草原和沙地草场异质性以及木质 NPV(灌木、半灌木)和草本 NPV 在光谱反射方面的差异,在一定程度上影响 $f_{NPV}$ 估算精度。另外,现在对于植被盖度较低的荒漠草原 $f_{NPV}$ 研究较薄弱,有必要弄清此类草原 $f_{NPV}$ 分布状况。同时,基于不同生活型植物 NPV 差异导致空间异质性研究相对薄弱<sup>[16]</sup>,尤其是对不同生活型植物 $f_{NPV}$ 、CAI 和 DFI 关系尚不明朗,急需开展此方面更加深入的研究。

因此,本文研究目的为:(1)构建 $f_{NPV}$ 、CAI 和 DFI 的关系,估算不同草原类型 $f_{NPV}$ ,解释不同草原(草场)类型 $f_{NPV}$ 空间异质性特征;(2)对比 DFI 直接估算 $f_{NPV}$ 与 CAI 间接估算 $f_{NPV}$ 差异,弄清 DFI 是否可以代替 CAI 参与 $f_{NPV}$ 估算,提高 $f_{NPV}$ 估算精度;(3)对比剔除裸地前后的估算结果,解释土壤背景值对 $f_{NPV}$ 估算模型和估算结果的影响;(4)为利用非生长季遥感数据识别区域 $f_{NPV}$ 并评估区域土壤风蚀、草地沙化程度识别等提供基础支持。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

地面反射光谱测定在中国农业科学院草原研究所鄂尔多斯沙地试验站完成(图 1),位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗,地处库布齐沙漠东段;地理位置为 110°0'51"E,40°18'53"N;海拔高度为 1040 m。气候特点为冬季寒冷漫长,夏季温暖短促,降水较少;年均温度 6℃,最低气温-32.3℃,最高气温 38.3℃;年降水量 250—350 mm 之间,集中在 7、8 月,属于温带大陆性气候。主要植物种有灌木北沙柳(*Salix psammophila*)和柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.),半灌木油蒿(*Artemisia ordosica*),草本植物黄蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.)、狗尾草(*Setaria viridis*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)和雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)等。根据内蒙古植被类型图和草原实地调查(图 1),案例分析区域分别选择锡林郭勒盟以多年生草本为主的西乌珠穆沁旗草甸草原和以多年生+半灌木为主的阿巴嘎旗典型草原区、以草本和灌木混合为主的鄂尔多斯十大孔兑沙地草场以及以草本、半灌木和灌木混合为主的巴彦淖尔市乌拉特中旗荒漠草原。其中,为最大可能规避异质性产生的干扰,在所选县(旗)域中用 2015 年 LUCC 数据中的草地将典型区选出。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 实验材料

依据沙地草场植物生长型组成特点,分别选择灌木(北沙柳、柠条锦鸡儿)、半灌木(油蒿)和草本(黄蒿、狗尾草、沙蓬)三种类型进行反射光谱测定。

#### 1.2.2 地面反射光谱数据与遥感数据

地面反射光谱数据测定时间为 2019 年 5 月 9 日—13 日,此时可减少 PV 干扰。选用美国 ASD 公司 Field Spec 4 高分辨率光谱仪,波长范围为 350—2500 nm,其中为减小裸地对反射率影响,每种植被光谱测定时采用同一裸地作为背景。测定时,探头垂直向下,视场角为 25°,与实测目标地物距离为 0.67 m,对应地面样本为直径 30 cm 样圆。光谱测定时间为 10—14 时之间,对同一个样圆植物反射光谱测定 5 次,并用相匹配数据处理软件 ViewSpec Pro 导出所测光谱值,对应 MODIS 数据波段 B1(620—670 nm)、B2(841—876 nm)、B6(1628—1652 nm)、B7(2105—2155 nm)和计算 CAI 所需  $R_{2.0}$ (2000—2050 nm)、 $R_{2.1}$ (2080—2130 nm)和  $R_{2.2}$ (2190—2240 nm),计算平均值。为保证光谱测定准确性,每隔 10—15 min 利用标准白板进行校光。测定期

间,光照条件较稳定、风力弱,对光谱反射值干扰极小。

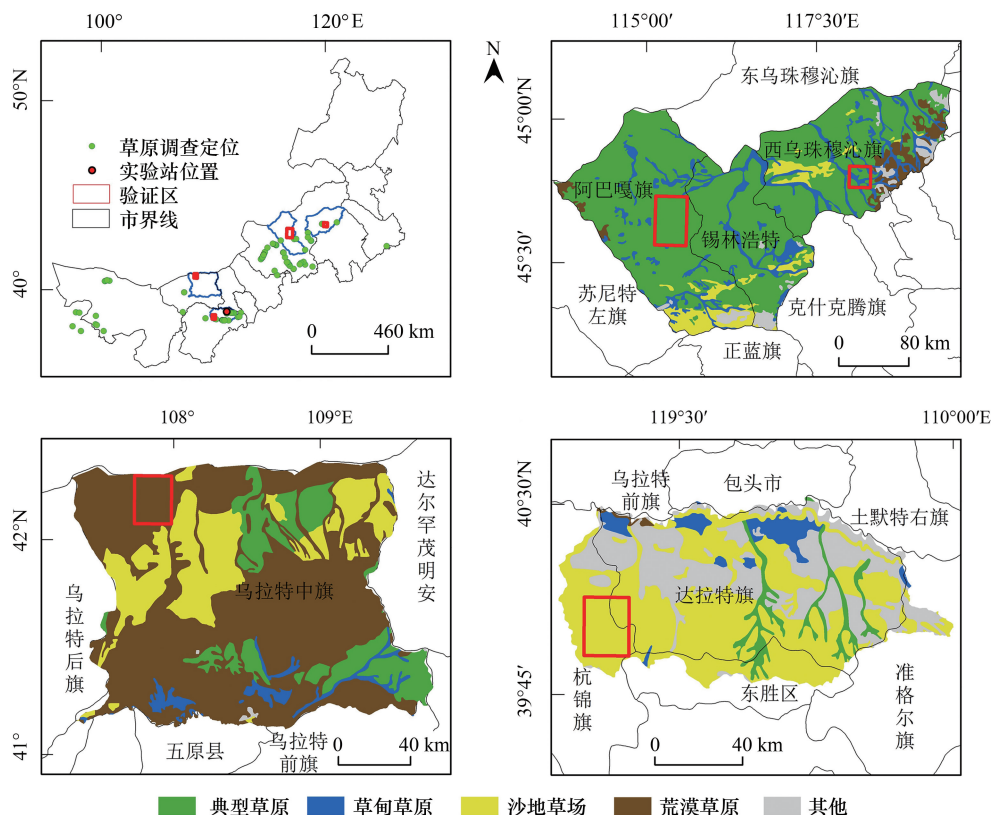


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

选用 MODIS 数据进行典型研究区  $f_{NPV}$  估算,数据来源于 NASA 地表过程数据中心(LP DAAC),下载地址为 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>,数据类型为 MCD43A4,该数据为基于 16 天观测数据生成的日产品数据,已经经过了地形校正、辐射定标和大气校正。在本研究中,选用 2019 年 4 月 15 日数据,原始数据为 HDF 格式,通过 MRT( Modis Reprojection Tool) 进行转换,将 1、2、6 和 7 波段数据由 HDF 格式转换为 TIFF 格式。

### 1.2.3 $f_{NPV}$ 提取

由于传统目视估测植被盖度比照相法精度低,所以植被盖度测定采用相机拍照,然后利用 ENVI 5.3 通过监督分类和目视解译结合方法进行盖度提取。拍照时,挡住阳光减小阴影对盖度解译误差,相机镜头垂直向下位于样圆中心正上方,调整距离样圆高度,保证样圆完全处于相机成像范围内。

### 1.2.4 指数计算与模型构建

本文主要选取 CAI 和 DFI 反应 NPV 变化特征,CAI 计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$CAI = [0.5 \times (R_{2.0} + R_{2.2}) - R_{2.1}] \times 100 \quad (1)$$

式中,对于 ASD 高光谱数据, $R_{2.0}$ 为 2000—2050 nm 波段平均反射率, $R_{2.1}$ 为 2080—2130 nm 波段平均反射率, $R_{2.2}$ 为 2190—2240 nm 波段平均反射率。为了扩大 CAI 值差异性,乘以系数 100。

DFI 计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$DFI = \left(1 - \frac{B_7}{B_6}\right) \times \frac{B_1}{B_2} \times 100 \quad (2)$$

式中, $B_1, B_2, B_6, B_7$ 分别代表 MODIS 第 1、2、6 和 7 波段。为了扩大 DFI 值差异性,乘以系数 100。



依据不同生活型植被构建 7 种模型,分别为草本、半灌木、灌木、草本+半灌木+灌木、草本+半灌木、草本+灌木和半灌木+灌木。

### 1.2.5 光谱特征

在条件控制上,选择  $f_{NPV}$  基本相同时草本、半灌木、灌木和总体 ( $f_{NPV}$  分别为 61.24%、61.52%、60.84% 和 61.08%,最大值和最小值相差仅为 0.68%) 的反射光谱。去除受大气影响严重波段和水汽吸收波段,保留 350—1300、1450—1750 和 2000—2350 nm 波段范围<sup>[31]</sup>,呈现光谱特征曲线(图 2)。

### 1.2.6 $f_{NPV}$ , CAI 和 DFI 关系分析

$f_{NPV}$  和 CAI、CAI 和 DFI、DFI 和  $f_{NPV}$  关系分析采用线性拟合分析和  $P$  值检验法。其中,主要采用决定系数 ( $R^2$ ) 来评估 DFI 和  $f_{NPV}$  拟合程度。显著性检查阈值采用  $P=0.05$  和  $P=0.001$ ,当  $P>0.05$  时不显著,  $0.001<P\leq 0.05$  时为显著,  $P\leq 0.001$  时为极显著。

### 1.2.7 应用案例

实地考察显示不同草原区植被组成结构不同,不同草原类型区  $f_{NPV}$  估算采用各区域优势植被类型所建立模型,故在草甸草原区选用草本模型,典型草原区选用草本和半灌木混合模型,荒漠草原区选用草本、半灌木和灌木混合模型,沙地草场选用草本和灌木混合模型进行区域  $f_{NPV}$  反演。其中,裸地盖度值 ( $f_{BS}$ ) 采用样方遮荫拍照后解译计算,使用遥感数据计算得到的  $f_{NPV}$  值减去  $f_{BS}$  值即为实际  $f_{NPV}$  值。

## 2 结果

### 2.1 不同 NPV 反射光谱特征

在盖度相同情况下(图 2),草本、半灌木、灌木和总体光谱反射率具有相似变化趋势,但是光谱反射率具有差别。350—1300 nm 和 1450—1750 nm 波长范围,草本和灌木 NPV 光谱反射率大于总体,半灌木小于总体。2000—2300 nm 波长范围,不同生活型 NPV 光谱反射率差异较小,但草本 NPV 光谱反射率小于总体,半灌木大于总体。

从不同波段来看(图 2),B1 波段光谱反射率由高到低为草本、灌木、总体和半灌木(20.75%、18.93%、18.49%和 15.78%),灌木和总体光谱反射率差值最小(0.44%);B2 波段由高到低为草本、灌木、总体和半灌木(28.36%、28.33%、26.2%和 21.93%),总体和半灌木光谱反射率差值最大(4.27%);B6 波段由高到低为草本、灌木、总体和半灌木(39.87%、39.58%、38.9%和 37.26%),灌木和总体光谱反射率差值最小(0.58%),总体和半灌木光谱反射率差值最大(1.64%);B7 波段由高到低为半灌木、灌木、总体和草本(36.06%、35.69%、35.57%和 34.95%),灌木和总体光谱反射率差值最小(0.12%),总体和草本光谱反射率差值最大(0.62%)。其中,B1 和 B6 波段草本和半灌木光谱反射率都为最高和最低,B2 波段半灌木光谱反射率最低,;B7 波段草本和半灌木光谱反射率为最低和最高,总体和灌木在 2149 nm 处产生交叉,波长为 2105—2149 nm 时,灌木光谱反射率高于总体,波长为 2149—2155 nm 时,灌木光谱反射率低于总体。在 B1 和 B6 波段易于分辨草本和半灌木,B2 波段最易于区分半灌木与其他生活型植物,在 B7 波段易于区分草本和半灌木以及灌木和总体。

### 2.2 $f_{NPV}$ , CAI 和 DFI 关系

从  $f_{NPV}$ , CAI 和 DFI 分布来看(图 3),  $f_{NPV}$  随着 CAI 和 DFI 的增加在不断增加。DFI 变化在 -9.43—19.48

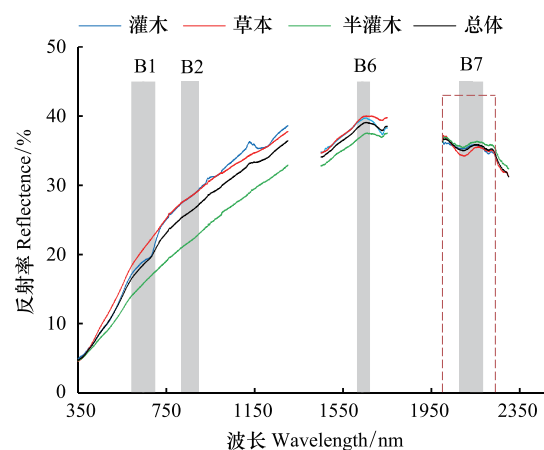


图 2 不同材料关键波段 NPV 反射光谱曲线

Fig.2 The spectral reflectance curves of NPV in key band

灰色柱状为 MODIS 波段波长范围,红色虚线方框为 CAI 计算所需波长范围

之间,平均值为 3.76;CAI 变化在-4.5—3.6 之间,平均值为-0.23。

从 CAI 和 DFI 关系模型来看(表 1),CAI 随着 DFI 的增加呈增加趋势,二者呈极显著正相关( $P<0.001$ )。其中,半灌木变化率最大,为 0.3294;半灌木和灌木混合模型变化率最小,为 0.1816。草本、半灌木和灌木混合模型变化率为 0.2323,草本和半灌木混合模型变化率为 0.2485,草本和灌木混合模型变化率为 0.246。

从 CAI 和  $f_{NPV}$  关系模型来看(表 1), $f_{NPV}$  随着 CAI 的增加呈增加的趋势,二者呈极显著正相关( $P<0.001$ )。其中,半灌木变化率最大,为 21.03;草本模型变化率最小,为 12.82。草本、半灌木和灌木混合模型变化率为 13.64,草本和半灌木混合模型变化率为 13.38,草本和灌木混合模型变化率为 13.14。

从  $f_{NPV1}$  和 DFI 关系来看(表 2),变化率最大和最小的是半灌木和灌木,分别为 6.927 和 2.9678;草本+半灌木+灌木、草本+半灌木和草本+灌木区域的变化率分别为 3.1688、3.3237 和 3.2332。其中, $f_{BS}$  值最大和最小的为半灌木+灌木和草本,分别为 28.1001 和 8.0507;草本+半灌木+灌木、草本+半灌木和草本+灌木区域的  $f_{BS}$  值分别为 21.0085、17.2148 和 17.8186。

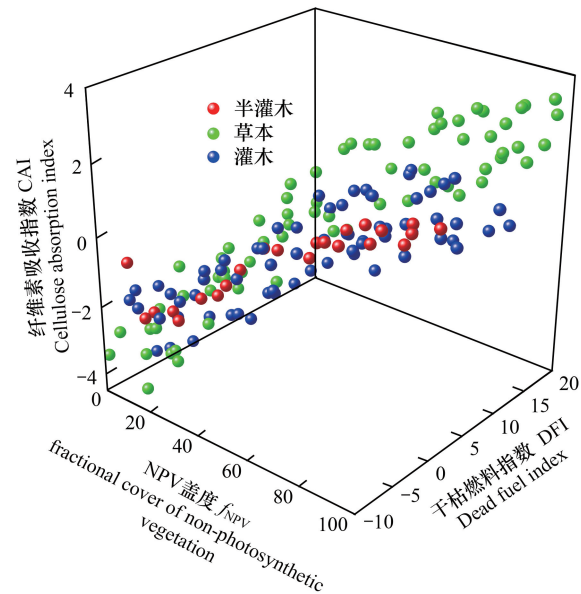


图 3 不同生活型植物  $f_{NPV}$ 、CAI 和 DFI 的 3D 空间图  
Fig.3 Distribution of  $f_{NPV}$ , CAI and DFI in different non-photosynthetic vegetation types

表 1 不同生活型植物与组成的  $f_{NPV}$  和 CAI、CAI 和 DFI 的关系

Table 1 Relational model of $f_{NPV}$ and CAI, CAI and DFI for different non-photosynthetic vegetation types					
植被类型 Vegetation types	n	CAI 和 DFI 关系 Relationship of CAI and DFI	$R^2$	$f_{NPV}$ 和 CAI 关系 Relationship of $f_{NPV}$ and CAI	$R^2$
草本 Herb	70	$CAI = 0.281 \times DFI - 1.5973$	0.9063	$f_{NPV} = 12.821 \times CAI + 44.854$	0.828
半灌木 Semi-shrub	23	$CAI = 0.3294 \times DFI - 0.0869$	0.9189	$f_{NPV} = 21.029 \times CAI + 56.133$	0.8834
灌木 Shrub	68	$CAI = 0.1876 \times DFI - 1.0895$	0.5704	$f_{NPV} = 15.82 \times CAI + 56.476$	0.6953
草本、半灌木、灌木 Herb, semi-shrub, shrub	161	$CAI = 0.2323 \times DFI - 1.1039$	0.7502	$f_{NPV} = 13.641 \times CAI + 50.425$	0.7368
草本、半灌木 Herb, semi-shrub	93	$CAI = 0.2485 \times DFI - 1.0916$	0.8224	$f_{NPV} = 13.375 \times CAI + 46.875$	0.7998
草本、灌木 Herb, shrub	138	$CAI = 0.246 \times DFI - 1.3215$	0.7941	$f_{NPV} = 13.143 \times CAI + 49.837$	0.7342
半灌木、灌木 Semi-shrub, shrub	91	$CAI = 0.1816 \times DFI - 0.8563$	0.5288	$f_{NPV} = 16.865 \times CAI + 56.419$	0.7327

DFI: 干枯燃料指数 Dead fuel index; CAI: 纤维素吸收指数 Cellulose absorption index

表 2 不同生活型植物与组成的  $f_{NPV}$  和 DFI 的关系以及各模型中  $f_{BS}$  值

Table 2 Relational model of $f_{NPV}$ and DFI, and value of $f_{BS}$ for different non-photosynthetic vegetation types				
植被类型 Vegetation types	$f_{NPV1}$ 和 DFI 关系 Relationship of $f_{NPV1}$ and DFI	$f_{BS1}$	$f_{NPV2}$ 和 DFI 关系 Relationship of $f_{NPV2}$ and DFI	$f_{BS2}$
草本 Herb	$f_{NPV1} = 3.6027 \times DFI + 24.375$	8.0507	$f_{NPV2} = 3.8019 \times DFI + 23.153$	5.9261
半灌木 Semi-shrub	$f_{NPV1} = 6.927 \times DFI + 54.306$	22.9187	$f_{NPV2} = 7.3905 \times DFI + 54.716$	21.2288
灌木 Shrub	$f_{NPV1} = 2.9678 \times DFI + 39.2401$	25.7925	$f_{NPV2} = 3.9335 \times DFI + 36.455$	18.6318
草本、半灌木、灌木 Herb, semi-shrub, shrub	$f_{NPV1} = 3.1688 \times DFI + 35.3667$	21.0085	$f_{NPV2} = 3.453 \times DFI + 34.297$	18.651
草本、半灌木 Herb, semi-shrub	$f_{NPV1} = 3.3237 \times DFI + 32.2749$	17.2148	$f_{NPV2} = 3.3254 \times DFI + 32.267$	17.1992
草本、灌木 Herb, shrub	$f_{NPV1} = 3.2332 \times DFI + 32.4685$	17.8186	$f_{NPV2} = 3.6048 \times DFI + 30.787$	14.4532
半灌木、灌木 Semi-shrub, shrub	$f_{NPV1} = 3.0627 \times DFI + 41.9775$	28.1001	$f_{NPV2} = 3.9402 \times DFI + 40.285$	22.4315

$f_{NPV1}$  和  $f_{BS1}$  通过 CAI 和 DFI 关系模型间接计算,  $f_{NPV2}$  和  $f_{BS2}$  通过 DFI 直接计算

从 $f_{NPV2}$ 和 DFI 关系来看(表 2),变化率最大和最小的是半灌木和草本+半灌木,分别为 7.3905 和 3.3245;草本+半灌木+灌木、草本+灌木和草本区域的变化率分别为 3.453、3.9402 和 3.8019。其中, $f_{BS}$  值最大和最小的是半灌木+灌木和草本,为 22.4315 和 5.9261;草本+半灌木+灌木、草本+半灌木和草本+灌木模型的 $f_{BS}$  值分别为 18.651、17.1992 和 14.4532。

### 2.3 不同草原区案例分析

从包含裸地的不同草原区平均 $f_{NPV}$ 来看(表 3,图 4), $f_{NPV1}$  在 4 种草原区平均值为 67.33%, $f_{NPV2}$  在 4 种草原区平均值为 68.47%, $f_{NPV1}$  比 $f_{NPV2}$  小 1.14%。其中,草甸草原区 $f_{NPV}$  最大, $f_{NPV1}$  为 84%, $f_{NPV2}$  为 86.08%,二者相差 2.08%;荒漠草原区 $f_{NPV}$  最小, $f_{NPV1}$  为 53.78%, $f_{NPV2}$  为 54.36%,二者相差 0.58%。典型草原区 $f_{NPV1}$  和 $f_{NPV2}$  差值最小,为 0.01%,沙地草场 $f_{NPV1}$  和 $f_{NPV2}$  差值为 1.91%。

从剔除裸地后的不同草原区平均 $f_{NPV}$ 来看(表 3,图 4), $f_{NPV1}$  在 4 种草原区平均值为 51.3%, $f_{NPV2}$  在 4 种草原区平均值为 54.42%, $f_{NPV1}$  比 $f_{NPV2}$  小 3.11%。其中,草甸草原区 $f_{NPV}$  最大, $f_{NPV1}$  为 75.95%, $f_{NPV2}$  为 80.15%,二者相差 4.2%;荒漠草原区 $f_{NPV}$  最小, $f_{NPV1}$  为 32.77%, $f_{NPV2}$  为 35.71%,二者相差 2.94%。典型草原区 $f_{NPV1}$  和 $f_{NPV2}$  差值最小,为 0.03%,沙地草场 $f_{NPV1}$  和 $f_{NPV2}$  差值最大,为 5.28%。

表 3 不同草原区平均 $f_{NPV}$   
Table 3 Average  $f_{NPV}$  in different grassland areas

草原类型 Grassland types	$f_{NPV1}$		$f_{NPV2}$	
	包含裸地 Included bare land	剔除裸地 Removed bare land	包含裸地 Included bare land	剔除裸地 Removed bare land
草甸草原 Meadow grassland	84%	75.95%	86.08%	80.15%
典型草原 Typical grassland	67.83%	50.61%	67.84%	50.64%
荒漠草原 Desert grassland	53.78%	32.77%	54.36%	35.71%
沙地草场 Sandy grassland	63.7%	45.88%	65.61%	51.16%
均值 Mean	67.33%	51.3%	68.47%	54.42%

### 3 讨论

$f_{PV}$  和 $f_{NPV}$  能较好的反应区域植被生物量和草原植被生长状况,尤其是 $f_{NPV}$  估算对于草原防火和风蚀估算具有重要意义,被广泛应用到风蚀计算中。 $f_{NPV}$  受空间异质性、季节、裸地性质以及提取方法和数据等众多因素影响<sup>[2, 9, 21, 23, 25—26]</sup>。从本文研究来看,植物类型差异、裸地干扰和建立模型方法对 $f_{NPV}$  影响较大。

首先,从 NPV 光谱特征来看,不同生活型 NPV 光谱变化趋势与已有研究结果枯落物变化趋势一致(图 2),这说明光谱变化趋势受植物类型影响微弱<sup>[18, 21, 23, 26]</sup>。但是同样植被盖度条件下,NPV 在不同波长范围表现出一定差异说明不同生活型 NPV 光谱反射率不同(图 2),原因在于不同植物在纤维素吸收方面可能存在差异,尤其是在 2100 nm 附近纤维素与木质素吸收容易受水分影响<sup>[25, 28]</sup>。利用这四个波段光谱反射率差异可以区别草本、半灌木、灌木和总体等不同生活型 NPV。

其次,DFI 和 CAI 呈极显著正相关( $P<0.001$ )关系(图 3,表 2),说明 DFI 在难以获取 CAI 所需的波段时可以代替 CAI 进行植被盖度计算;通过对比 $f_{NPV1}$  和 $f_{NPV2}$ ,二者在典型草原区差异最小(0.01%和 0.03%)(表 4),但在其他区域差异较大,说明直接应用 DFI 计算 $f_{NPV}$  可能受植被类型和空间异质性等因子影响,也说明在典型草原中应用 DFI 直接计算 $f_{NPV}$  受限程度较小。DFI 和 $f_{NPV}$  存在极好线性拟合关系(图 3),呈极显著正相关关系( $P<0.001$ ),这一结果与已有研究结果一致<sup>[18, 24, 27]</sup>。但从草本+半灌木+灌木混合来看,本研究 DFI 和 $f_{NPV2}$  决定系数 $R^2$ (0.65)略小于 Cao 等和 Chai 等决定系数 $R^2$ (0.95 和 0.68)<sup>[19, 27]</sup>。原因是本研究采样区鄂尔多斯沙地与锡林郭勒草原的裸地类型和裸地含水量等自然条件存在异质性,进而导致 NPV 光谱反射率存在差异<sup>[28]</sup>,具体表现在 DFI,本研究 DFI(平均为 3.87%)小于锡林郭勒草原(最小为 3.97%)<sup>[21]</sup>;二是本研究所



选物种包括草本、半灌木和灌木,所选 NPV 比 Cao 等所选草本和灌木更加丰富<sup>[19]</sup>。与 Ren 等对内蒙古荒漠草原 CAI 和  $f_{NPV}$  决定系数  $R^2$  相差较小 ( $R^2 = 0.67$ ,  $n = 155$ )<sup>[11]</sup>,在这种样本数量基本相同情况下,出现  $R^2$  相差较小现象的原因可能是 CAI 和 DFI 高度相关。从具体生活型 NPV 的 DFI 与  $f_{NPV}$  关系来看(表 3),半灌木斜率 (6.927 和 7.3905) 与草本+半灌木+灌木混合模型斜率 (3.1688 和 3.453) 差值最大 (3.7582 和 3.9375),这说明不同植被类型 DFI 与  $f_{NPV}$  关系存在较大差异,也说明半灌木 DFI 和  $f_{NPV}$  关系特征最明显,在遥感监测过程中易于区分。对比  $f_{NPV}$  空间分布来看(图 4),NPV 空间异质性和生活型植物分布比例差异说明草原区不同区域应参考不同拟合模型<sup>[18]</sup>,不可将 NPV 作为均质材料处理。

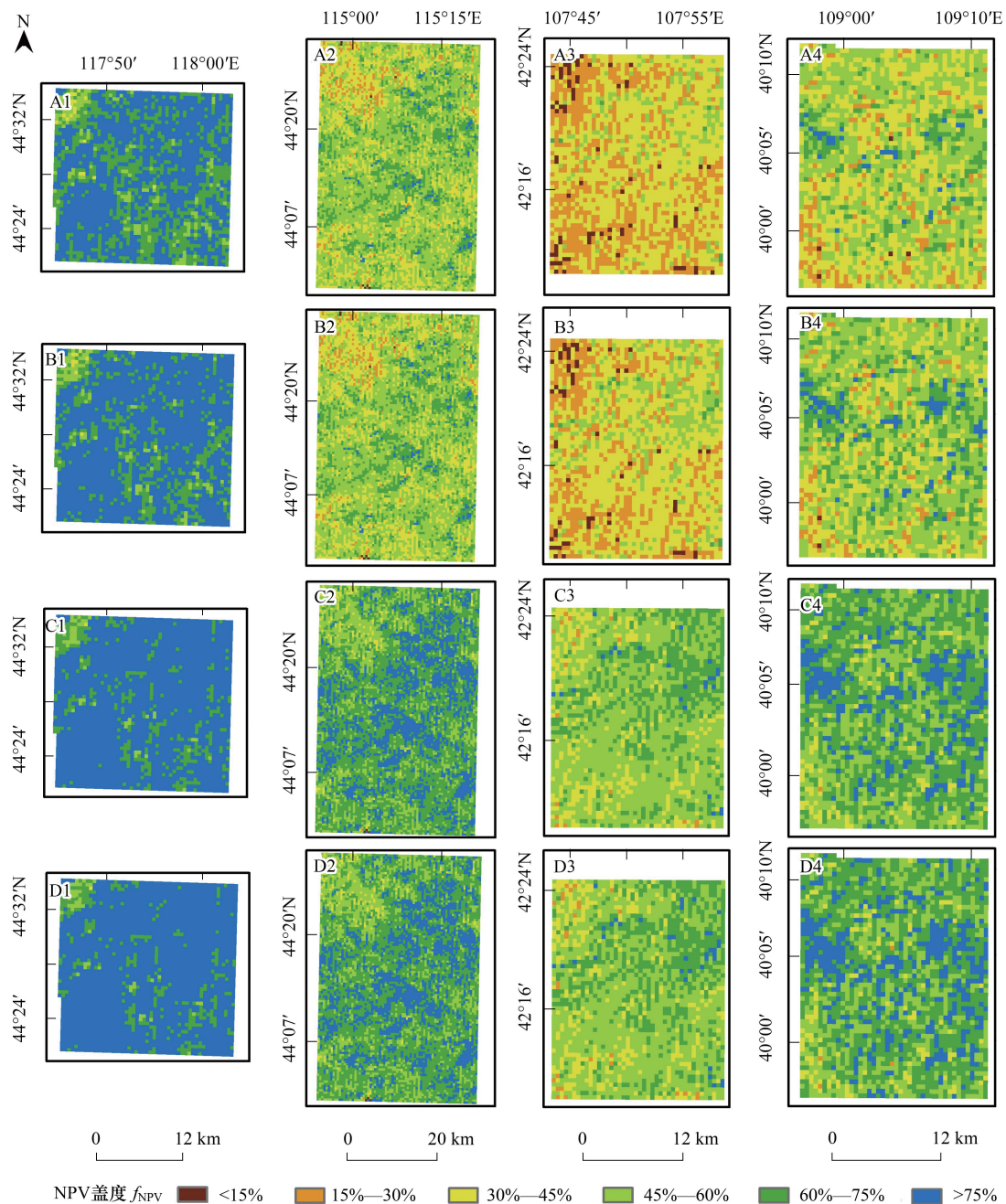


图 4 不同草原类型区  $f_{NPV}$  空间分布

Fig.4 Distribution of  $f_{NPV}$  in different grassland areas

A 为  $f_{NPV1}$  剔除裸地, B 为  $f_{NPV2}$  剔除裸地, C 为  $f_{NPV1}$  包含裸地, D 为  $f_{NPV2}$  包含裸地; 1 为草甸草原, 2 为典型草原, 3 为荒漠草原, 4 为沙地草场



最后,通过对比剔除裸地前后结果说明在一定程度上裸地反射率对 $f_{NPV}$ 估算产生干扰。对比王光镇等应用 NDVI-DFI 三分模型所得西乌珠穆沁旗 4 月 $f_{NPV}$ 高达 77.44%的结果<sup>[26]</sup>,本研究草甸草原区(西乌珠穆沁旗)剔除裸地的 $f_{NPV1}$ 更准确(剔除裸地的 $f_{NPV1}$ 和 $f_{NPV2}$ 为 75.95%和 80.15%,与已有结果仅相差 1.49%和 2.71%;包含裸地 $f_{NPV1}$ 和 $f_{NPV2}$ 为 84%和 86.08%,与已有结果相差 6.56%和 8.64%)。本结果 $f_{NPV1}$ 偏小 1.49%的原因可能是遥感数据选用时间为 4 月 15 日,该时间比 4 月 5 日返青植被多。本结果高于柴国奇等应用 Sentinel-2 数据对锡林郭勒 4 月初 $f_{NPV}$ 为 56%的结果<sup>[32]</sup>,导致这种结果的原因是受草原类型影响,本研究选取草甸草原与柴国奇等选取典型草原枯落物数量差异导致盖度差异。柴国奇<sup>[32]</sup>等结果与本研究典型草原结果(剔除裸地 $f_{NPV1}$ 和 $f_{NPV2}$ 为 50.61%和 50.64%,包含裸地的 $f_{NPV1}$ 和 $f_{NPV2}$ 为 67.83%和 67.84%)相差较小(5.39%和 5.36%,11.83%和 11.84%),这也证实了剔除裸地后的 $f_{NPV}$ 结果更准确。已有研究通过端元值进行盖度提取时<sup>[6-7, 17, 23]</sup>,也充分考虑了裸地的影响,所以在建立模型应用时,裸地是必须考虑的重要影响因子。

#### 4 结论

本文基于实测数据和 MODIS 数据对不同生活型植物 NPV 光谱反射特征进行了分析,构建了不同生活型植物 DFI、CAI 和 $f_{NPV}$ 模型并对不同草原区 $f_{NPV}$ 进行了估算,主要得到以下结论:

(1)草本、半灌木、灌木和总体 NPV 光谱反射率具有相似变化趋势,但反射值存在显著差异,波长范围为 350—1300 nm 和 1450—1750 nm 时,草本和灌木 NPV 光谱反射率大于总体,半灌木小于总体;波长范围为 2000—2300 nm 时,草本 NPV 光谱反射率小于总体,半灌木大于总体。

(2)DFI 和 CAI、CAI 和 $f_{NPV}$ 、DFI 和 $f_{NPV}$ 均呈显著正相关关系( $P<0.001$ ),DFI 可以代替 CAI 进行 $f_{NPV}$ 的估算。

(3)不同草原区 $f_{NPV}$ 存在异质性,草甸草原、典型草原、沙地草场和荒漠草原分别为 75.95%、50.61%、45.88%和 32.77%。DFI 在典型草原区估算 $f_{NPV}$ 效果最好( $f_{NPV1}$ 和 $f_{NPV2}$ 平均差值为 3.11%,最小差值为 0.03%)。

(4)在进行 $f_{NPV}$ 估测时,不同草原区应参考不同关系模型,不可将 NPV 作为均质材料处理,还要剔除裸地干扰。

#### 参考文献 (References):

- [1] Huang W L, Sun G Q, Dubayah R, Cook B, Montesano P, Ni W J, Zhang Z Y. Mapping biomass change after forest disturbance: Applying LiDAR footprint-derived models at key map scales. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 319-332.
- [2] Guerschman J P, Hill M J, Renzullo L J, Barrett D J, Marks A S, Botha E J. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 928-945.
- [3] 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 汪建芳, 肖婧, 李兆松. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性. *生态学报*, 2019, 39(7): 2416-2425.
- [4] Fenner N, Freeman C. Woody litter protects peat carbon stocks during drought. *Nature Climate Change*, 2020, 10(4): 363-369.
- [5] Kurmangozhinov A, Xue W, Li X Y, Zeng F J, Sabit R, Tusun T. High biomass production with abundant leaf litterfall is critical to ameliorating soil quality and productivity in reclaimed sandy desertification land. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110373.
- [6] Kim Y, Yang Z Q, Cohen W B, Pflugmacher D, Lauer C L, Vankat J L. Distinguishing between live and dead standing tree biomass on the North Rim of Grand Canyon National Park, USA using small-footprint lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(11): 2499-2510.
- [7] Newnham G J, Verbesselt J, Grant I F, Anderson S A. Relative greenness index for assessing curing of grassland fuel. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(6): 1456-1463.
- [8] Li X S, Zheng G X, Wang J Y, Ji C C, Sun B, Gao Z H. Comparison of methods for estimating fractional cover of photosynthetic and non-photosynthetic vegetation in the Otindag Sandy Land using GF-1 Wide-Field View data. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 800.
- [9] 姬翠翠, 贾永红, 李晓松, 王金英. 线性/非线性光谱混合模型估算白刺灌丛植被覆盖度. *遥感学报*, 2016, 20(6): 1402-1412.
- [10] Ji C C, Li X S, Wei H D, Li S K. Comparison of different multispectral sensors for photosynthetic and non-photosynthetic vegetation-fraction retrieval. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 115.

- [11] Ren H R, Zhou G S. Estimating senesced biomass of desert steppe in Inner Mongolia using field spectrometric data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 161: 66-71.
- [12] Hill M J, Zhou Q, Sun Q S, Schaaf C B, Southworth B, Mishra N B, Gibbes C, Bunting E, Christiansen T B, Crews K A. Dynamics of the relationship between NDVI and SWIR32 vegetation indices in southern Africa: implications for retrieval of fractional cover from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(6): 1476-1503.
- [13] Li Z Q, Guo X L. Non-photosynthetic vegetation biomass estimation in semiarid Canadian mixed grasslands using ground hyperspectral data, Landsat 8 OLI, and Sentinel-2 images. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(20): 6893-6913.
- [14] Elvidge C D. Examination of the spectral features of vegetation in 1987 AVIRIS data//Proceedings of the 1st AVIRIS Performance Evaluation Workshop. Pasadena: Jet Propulsion Lab., 1988: 97-101.
- [15] Daughtry C S T, McMurtrey J E, Chappelle E W, Hunter W J, Steiner J L. Measuring crop residue cover using remote sensing techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, 54 (1/2): 17-26.
- [16] Nagler P L, Daughtry C S T, Goward S N. Plant litter and soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(2): 207-215.
- [17] Nagler P L, Inoue Y, Glenn E P, Russ A L, Daughtry C S T. Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil - plant litter scenes. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(2/3): 310-325.
- [18] Cao X, Chen J, Matsushita B, Imura H. Developing a MODIS based index to discriminate dead fuel from photosynthetic vegetation and soil background in the Asian steppe area. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(6): 1589-1604.
- [19] Cao X, Cui X H, Yue M, Chen J, Tanikawa H, Ye Y. Evaluation of wildfire propagation susceptibility in grasslands using burned areas and multivariate logistic regression. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(19): 6679-6700.
- [20] Ren H R, Zhang B, Guo X L. Estimation of litter mass in nongrowing seasons in arid grasslands using MODIS satellite data. *European Journal of Remote Sensing*, 2018, 51(1): 222-230.
- [21] 王光镇, 王静璞, 韩柳, 柴国奇, 王周龙. 基于实测光谱模拟 Landsat-8 OLI 数据估算非光合植被覆盖度. *地球信息科学学报*, 2018, 20(11): 1667-1678.
- [22] Chai G Q, Wang J P, Wu M Q, Li G Q, Zhang L, Wang Z L. Mapping the fractional cover of non-photosynthetic vegetation and its spatiotemporal variations in the Xilingol grassland using MODIS imagery (2000-2019). *Geocarto International*, 2020, doi: 10.1080/10106049.2020.1801860.
- [23] 李涛, 李晓松, 李飞. 基于 Hyperion 的锡林郭勒草原光合植被、非光合植被覆盖度估算. *生态学报*, 2015, 35(11): 3643-3652.
- [24] Wang G Z, Wang J P, Zou X Y, Chai G Q, Wu M Q, Wang Z L. Estimating the fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil from MODIS data: assessing the applicability of the NDVI-DFI model in the typical Xilingol grasslands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 76: 154-166.
- [25] Daughtry C S T, Hunt Jr E R, McMurtrey III J E. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(1): 126-134.
- [26] 王光镇, 王静璞, 邹学勇, 王周龙, 宗敏. 基于像元三分模型的锡林郭勒草原光合植被和非光合植被覆盖度估算. *生态学报*, 2017, 37(17): 5722-5731.
- [27] Chai G Q, Wang J P, Wang G Z, Kang L Q, Wu M Q, Wang Z L. Estimating fractional cover of non-photosynthetic vegetation in a typical grassland area of northern China based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) image data. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(23): 8793-8810.
- [28] Daughtry C, Quemada M. Assessing crop residue cover when scene moisture conditions change//Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan: IEEE, 2015: 4652-4655.
- [29] 柴国奇, 王静璞, 王光镇, 韩柳, 王周龙. 基于 MODIS 数据的典型草原非光合植被覆盖度估算. *国土资源遥感*, 2019, 31(3): 234-241.
- [30] Dennison P E, Qi Y, Meerdink S K, Kokaly R F, Thompson D R, Daughtry C S T, Quemada M, Roberts D A, Gader P D, Wetherley E B, Numata I, Roth K L. Comparison of methods for modeling fractional cover using simulated satellite hyperspectral imager spectra. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2072.
- [31] 郑国雄, 李晓松, 张凯选, 王金英. 浑善达克沙地光合/非光合植被及裸土光谱混合机理分析. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(4): 1063-1068.
- [32] 柴国奇, 王静璞, 邹学勇, 王光镇, 韩柳, 王周龙. 基于 Sentinel-2 数据的典型草原光合/非光合植被覆盖度估算. *草业科学*, 2018, 35(12): 2836-2844.