

黄土高原水蚀风蚀交错区不同类型生物土壤结皮光谱特征

田园盛¹, 张 玥¹, 孙文义^{1,2*}, 穆兴民^{1,2}, 高 鹏^{1,2}, 赵广举^{1,2}

1. 西北农林科技大学土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100

2. 中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100

摘 要 黄土高原水蚀风蚀交错区生物土壤结皮光谱特征的研究, 为基于遥感的区域尺度生物土壤结皮的识别提供了重要的科学价值, 为进一步估算生物土壤结皮在区域水土流失防治中所起的作用提供了重要的技术支持。采用地物光谱测定技术, 在黄土高原水蚀风蚀交错区六道沟小流域对不同覆盖度藻类和不同类型藓类生物土壤结皮以及不同高等植被进行了光谱测定, 并进行定量分析。研究表明, 黄土高原水蚀风蚀交错区藻类生物土壤结皮与土壤具有相似的光谱特征, 光谱曲线没有明显的“峰-谷”。藻类生物土壤结皮光谱特征主要表现为光谱反射率随生物土壤结皮覆盖度增加而降低的变化规律; 其中可见光区, 覆盖度 10%~20%, 30%~40% 及 50%~60% 藻类生物土壤结皮相比于裸地, 反射率归一化均值分别下降了 8.64%, 15.80% 和 23.09%。随藻类结皮覆盖度增加, 680 nm 处吸收特征(叶绿素)越来越明显, 2 200 nm 处吸收谷(次生矿物)越来越小。藓类生物土壤结皮光谱曲线表现出与高等植物相似的特征, 形成绿波段的反射峰和红光波段的吸收谷以及近红外波段的高反射。但在 760~930 nm 区间, 藓类生物土壤结皮的斜率明显大于高等植物, 藓类生物土壤结皮的光谱斜率 $Slope_{(930/760)}$ 是高等植物的 2.5~4.5 倍。黄土高原生物土壤结皮光谱特征的研究可为生物土壤结皮的遥感识别提供一定的理论依据和技术支持。

关键词 生物土壤结皮; 光谱特征; 黄土高原

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)07-2215-06

引 言

生物土壤结皮(biological soil crust)是寒区旱区荒漠生态系统的重要组成部分, 在促进碳氮养循环、提高土壤抗蚀能力、调节生态水文过程等方面具有重要的作用^[1-2]。在寒区旱区生物土壤结皮的适应能力和生态功能引起了生态学、水文学、水土保持学等学科专家的广泛关注^[1-2]。黄土高原自退耕还林还草及封山禁牧实施后, 生物土壤结皮在稀疏植被和林间草地上广泛发育, 为退化裸露土地披上“生物地毯”。组成生物土壤结皮的生物体, 如蓝藻等胞外多糖分泌物能够胶结土壤颗粒物, 增强土壤团聚能力; 地衣和藓类等假根也能固定土壤颗粒, 提高土壤的稳定性, 及抵抗水蚀风蚀的能力^[2]。生物土壤结皮的存在还能够缓解降水对地表土壤的击打, 维持土壤良好的孔隙结构, 保护表层土壤不受侵蚀。生物土壤结皮在黄土高原地区, 尤其是水蚀风蚀交错区, 在增强土壤抗蚀能力和防治水土流失方面得到了国内学

者的普遍认可^[1, 3-4]。然而, 因生物土壤结皮光谱特征和识别能力研究的不足, 生物土壤结皮在基于遥感的区域水土流失评估中所起的作用往往被忽略, 造成寒区旱区等高等植物分布稀少地区土壤侵蚀被高估。

近 30 年来, 国内外学者从光谱特征方面开展了探索性研究, 并提出基于遥感信息提取生物土壤结皮分布特征的方法。Chen 等研究了我国古尔班通古特沙漠南缘地衣结皮的地面光谱特征, 基于生物土壤结皮在绿光和红光波段(600~700 nm)光谱曲线上上升趋势比裸沙和干枯植物平缓, 提出了生物土壤结皮指数(biological soil crust index, BSCI), 并利用 ETM+ 数据进行了研究区结皮盖度信息的提取。Weber 等和 Chamizo 等^[5]在沙漠地区分别研究了以蓝藻和地衣为优势种的生物土壤结皮高光谱特征, 结合包络线去除分析技术发展了新的结皮指数算法, 一定程度上提高了生物土壤结皮类型识别精度, 减少了与其他地物光谱信息的重叠^[5]。目前, 现有的生物土壤结皮指数算法建立在寒区旱区的荒漠地区。本工作以黄土高原水蚀风蚀交错区为研究区, 对不同类型

收稿日期: 2017-12-12, 修订日期: 2018-04-16

基金项目: 国家青年科学基金项目(41501293), 国家重点研发计划项目(2016YFC0402401)资助

作者简介: 田园盛, 1993 年生, 西北农林科技大学水土保持研究所硕士研究生 e-mail: m17791384850@163.com

* 通讯联系人 e-mail: sunwy@ms.iswc.ac.cn

型生物土壤结皮光谱进行测定与特征识别,分析各类型生物土壤结皮光谱特征的差异,为生物土壤结皮的遥感识别研究提供理论依据和技术支持。

1 实验部分

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县以西 14 km 处的六道沟小流域(东经 110°21′—110°23′,北纬 38°46′—38°51′),流域面积 6.89 km²。既属于黄土高原向毛乌素沙漠、森林草原向典型干旱草原过渡地带,又属于水蚀类型向风蚀类型过渡的水蚀风蚀交错带,是典型的生态环境脆弱区。地形地貌特点为典型的盖沙黄土丘陵区。年均降水量 408.5 mm,且多集中在 6—9 月,年均气温 7~9 °C。

研究区主要生物土壤结皮类型为藻类生物土壤结皮和藓类生物土壤结皮。其中,藻类结皮以蓝藻为主;藓类结皮以细叶纽扣藓、土生纽扣藓和银叶针藓为主。高等植物主要有沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)、白刺(*Nitrariatangutorum*)、沙柳(*Salix cheilophylla*)、柠条(*Caraganakorshinskii*)等。

1.2 数据处理

光谱测定用美国 ASD 公司的 Field Spec 4 仪器,波长范围:350~2 500 nm;波长精度:0.5 nm;波长重复性:0.1 nm。光谱测定的环境条件:在晴天中午前后 10:00—14:00 之间进行光谱测定,离地距离为 20~30 cm,风力不超过 5 级。测量时保持与水平面的法线夹角在 ±10°之内,探头定位时必须避免阴影。因生物土壤结皮不同种类的分布面积较小,光谱测定时选用小视角角进行测定,得到纯度较高的生物土壤结皮光谱。高等植被选用叶片夹测定,为高等植被叶片的光谱。光谱测量前,需对标准参考板进行定标校准,得到接近 100%的基线,然后对目标地进行测量。野外测定光谱数据时,每隔 10 min 用白板校正一次,校正时白板放置水平。光谱测定同时采集 GPS 数据,详细记录测点的位置、植被情况并配以野外照相记录。测量人员选择了低反射率的服装和鞋帽。为减少和限制这种随机噪声水平,对反射率曲线进行光滑处理,以消除光谱曲线的抖动、杂乱的水气吸收带以及“台阶”跳跃现象,使光谱曲线光滑、连续。

光谱分析利用了 ASD 光谱仪配套的光谱数据处理软件 ViewSpecPro,数据分析与处理上剔除了异常光谱曲线。由于大气水汽吸收带的影响,野外光谱测定时在 1 400 和 1 900 nm 产生较大的噪声干扰。因此,本实验数据处理上,剔除了 1 350~1 420,1 790~1 930 nm 处形成的两个大的噪声区。

藻类生物土壤结皮覆盖度的计算运用 ENVI5.3 软件,根据照片中藻类的像元数占整个照片的像元数比例得出。藻类生物土壤结皮覆盖率公式如下

$$C_v = \frac{p_1}{p_2}$$

式中: C_v 为藻类生物土壤结皮覆盖率; p_1 为测定区藻类像元数; p_2 为测定区照片总像元数。

为去除光谱测试中存在的一些不确定性,对藻类生物土壤结皮的光谱曲线做最小值归一化;比较高等植被与藓类生物土壤结皮光谱差异时采用比值指数法(光谱斜率)进行分析。

2 结果与讨论

2.1 不同盖度条件下藻类生物土壤结皮光谱特征变化

不同盖度条件下(或不同发育程度)藻类生物土壤结皮的光谱反射率表现出光谱反射率随生物土壤结皮覆盖度增加而降低的变化规律。

藻类生物土壤结皮与裸土具有相似的光谱特征,都不具有高等植物明显的“峰”和“谷”。具体表现为,在可见光区没有蓝、红光的吸收谷和绿色波段的弱反射,以及近红外高反射;藻类结皮和裸土的光谱反射率表现为随波长的增加而增大的变化趋势,其中,可见光区和近红外光区增幅较大。随藻类结皮覆盖度增加,680 nm 处吸收特征(叶绿素)越来越明显。短波红外区,随藻类生物土壤结皮覆盖度增加,光谱反射增幅变缓,2 200 nm 处吸收谷(次生矿物)越来越小(图 1)。

可见光区(380~740 nm),裸土的反射率归一化均值为 3.284;藻类覆盖度为 10%~20%时,反射光谱归一化均值为 3.000,降低了 8.64%;覆盖度为 30%~40%时,其反射光谱归一化均值为 2.765,降低了 15.80%;覆盖度达 50%~60%时,其反射率归一化均值仅为 2.525,降低了 23.09%。近红外区(740~1 300 nm),裸土反射率归一化均值为 6.283;藻类结皮的覆盖率为 10%~20%时,反射光谱归一化均值为 5.415,下降了 13.81%;覆盖度为 20%~30%时,反射光谱归一化均值为 4.860,下降了 22.65%;覆盖度为 50%~60%条件下,其反射率归一化均值为 4.973,降低了 20.84%。短波红外区(1 300~2 500 nm),裸土、藻类结皮覆盖度为 10%~20%,30%~40%和 50%~60%条件下,反射光谱归一化均值分别为 7.583,6.096,5.473 和 5.023。

在可见光区,随波长增加,不同盖度 0,10%~20%,30%~40%和 50%~60%藻类结皮光谱反射率分别增加 4.8,4.0,3.9 和 3.7 倍。近红外光区,随波长增加,藻类结皮光谱反射率呈缓慢增加趋势,四种不同盖度藻类结皮的光谱反射率增幅均在 0.05。短波红外波段,藻类结皮光谱反射率未表现出上升趋势,但在 1 920,2 200 和 2 360 nm 存在三个吸收谷。

藻类生物土壤结皮是植被演替的先锋种,因此,其受到土壤光谱特征的影响较大。不同覆盖度的藻类生物土壤结皮符合线性混合模型(图 2),其在整个光谱区段内、可见光区、近红外区线性相关 R^2 分别为 0.952,0.982 和 0.950。

2.2 不同建群种藓类生物土壤结皮光谱特征

藓类生物土壤结皮光谱特征与藻类结皮显著不同,形成绿波段的反射峰和红光波段的吸收谷以及近红外波段的高反射,显著地表现出绿色高等植物具有的光谱特征(图 3)。

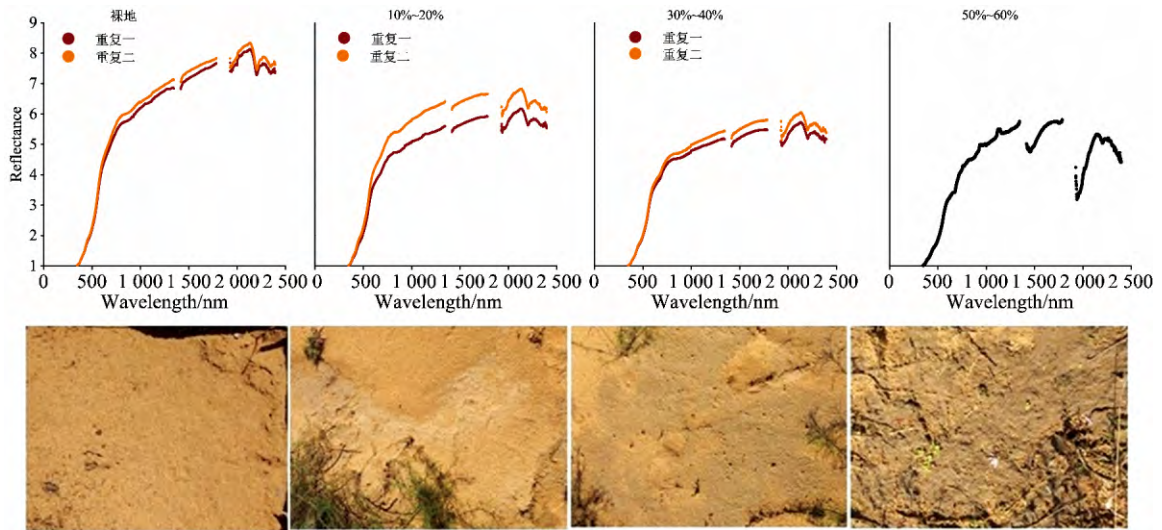


图 1 不同盖度条件下藻类生物土壤结皮归一化光谱特征变化

Fig 1 Changes of normalized spectral features of soil crusts of algae under different covering rates

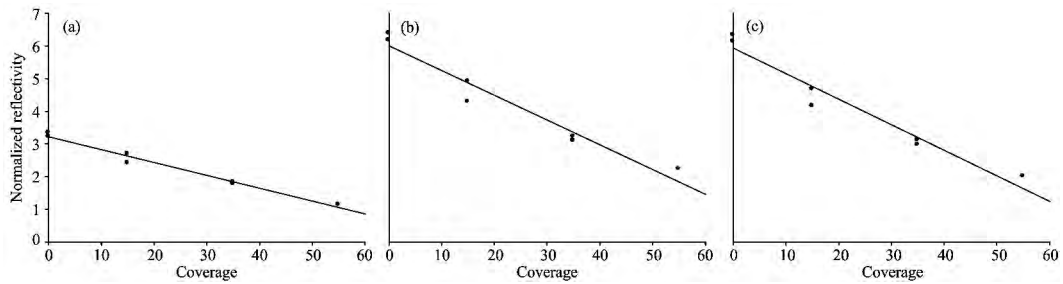


图 2 不同覆盖度藻类生物土壤结皮线性混合模型

(a): 全波段; (b): 可见光区; (c): 近红外区

Fig 2 Linear mixed model of algal bio-soil crust with different coverage

(a): Full band; (b): Visible light; (c): Near infrared

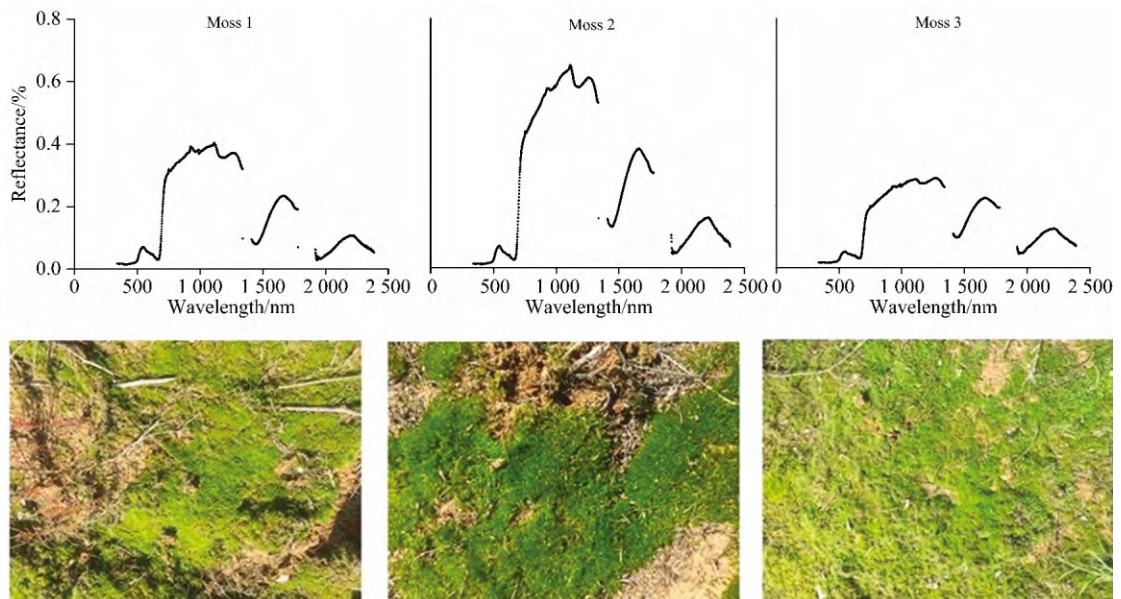


图 3 不同类型藓类生物土壤结皮光谱特征差异

Fig 3 The characteristics differences of Different Types of moss soil crust

在可见光区, 三种藓类生物土壤结皮绿波段呈弱反射特征, 在 550 nm 处, 反射率分别为 0.068, 0.072 和 0.055; 均表现出明显的红边现象, 在 710 nm 处, 反射率急剧增大分别从 0.023, 0.022 和 0.026 增加到 0.353, 0.397 和 0.176, 分别增加了 15.3, 18.0 和 6.8 倍。近红外区, 形成了两个吸收谷, 分别在 970 和 1180 nm 处, 两个吸收谷的反射率分别为 970 nm 处的 0.485, 0.562, 0.251 及 1180 nm 处的 0.487, 0.576, 0.266。三种藓类生物土壤结皮的光谱反射率从 730 nm 处增幅开始变缓, 在 1120 nm 处达到整个光谱曲线的极值, 反射率分别为 0.543, 0.635 和 0.279; 短波红外

区, 存在两个反射峰, 分别在 1670 和 2200 nm, 1670 nm 处的反射率为 0.321, 0.377, 0.219, 2200 nm 处的反射率为 0.138, 0.154 和 0.122, 这两个反射峰的反射率存在较大的差异, 1670 nm 的反射率是 2200 nm 的 2~3 倍。

2.3 藻类和藓类生物土壤结皮以及高等植物光谱特征差异

藻类、藓类生物土壤结皮与高等植物光谱存在着较大的差异; 藻类生物土壤结皮具有与土壤相似的光谱曲线特征, 藓类生物土壤结皮具有与高等植物相似的光谱曲线特征(图 4)。

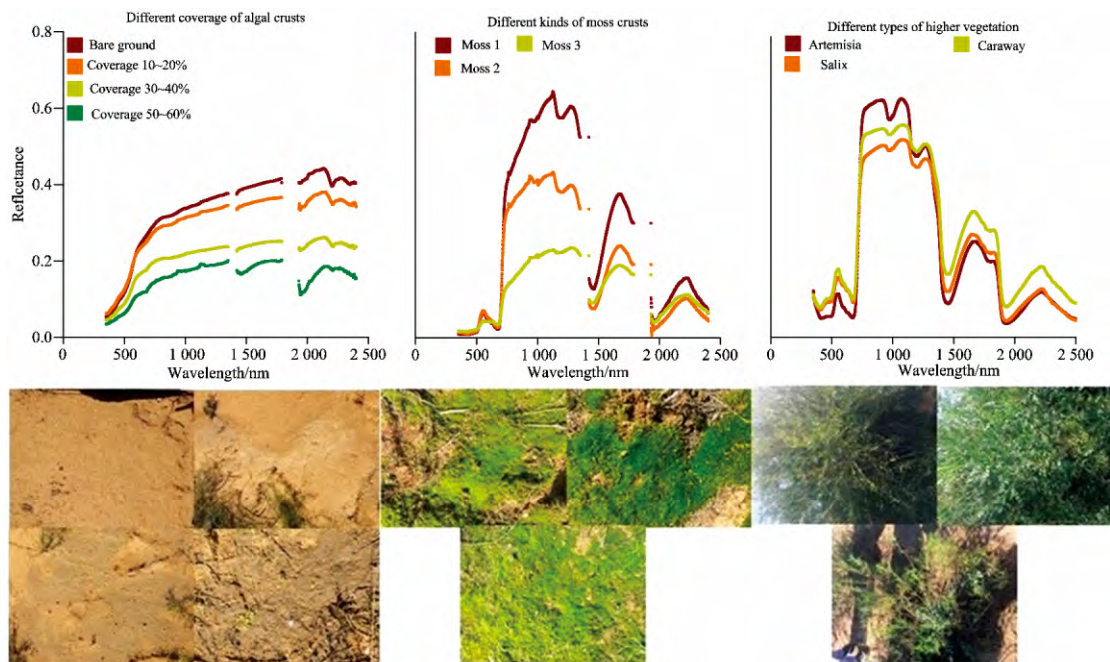


图 4 藻类、藓类和高等植物光谱特征差异

Fig 4 Algae, moss and advanced plant spectral characteristics

可见光区, 藻类生物土壤结皮光谱表现为随波长增大, 反射率逐渐增加规律, 藓类土壤生物结皮和高等植物都表现出绿波段的弱反射和红光波段的吸收谷。

近红外区, 藻类生物土壤结皮光谱表现出随波长增大, 反射率增幅逐渐放缓趋势, 没有明显的“峰-谷”变化。藓类生物土壤结皮和高等植物都表现出明显的“红边”现象, 出现反射“陡坡”, 但在 760~930 nm 区间两者变化有明显差异, 藓类生物土壤结皮曲线的斜率 $Slope(930/760)$ 要远大于高等植物, 藓类生物土壤结皮的斜率是高等植物的 2.5~4.5 倍。藓类生物土壤结皮和高等植物都在 970 和 1180 nm 处呈现出的两个吸收谷; 相比于高等植物, 藓类在 970 nm 处吸收谷不明显。

短波红外区, 藻类在 2140 及 2300 nm 存在两个弱反射峰, 在 2200 nm 处形成吸收谷; 藓类和高等植物光谱反射率则是在 1600 和 2200 nm 处有两个反射峰, 1400 及 1900 nm 处形成两个吸收谷, 高等植物相比于藻类和藓类在 1780 nm 附近形成一弱吸收谷。

藓类生物土壤结皮 $Slope(NIR/Blue)$ 远大于高等植被。

三种藓类生物土壤结皮 $Slope(NIR/Blue)$ 均值为 20.87, 该地区代表性的三种高等植被的 $Slope(NIR/Blue)$ 均值为 5.84。

生物土壤结皮光谱特征受结皮类型、形态特征、环境条件等多种因素的影响, 使得生物土壤结皮算法在其他地区的适用性受到极大的限制。黄土高原地区生物土壤结皮光谱特征的研究是生物土壤结皮指数领域研究的一个重要补充。Rodriguez-Caballero 等^[6]研究发现藻类生物土壤结皮光谱特征与裸露的土壤相似, 在 504 nm 存在吸收谷(类胡萝卜素), 但在土壤反射率中没有观察到特征吸收峰。本研究发现, 随着藻类结皮覆盖度的不断增大, 随藻类生物结皮覆盖度增加, 680 nm 处吸收特征(叶绿素)越来越明显。短波红外区, 光谱反射增幅变缓, 2200 nm 处吸收谷(次生矿物)越来越小。基于不同覆盖度的藻类生物土壤结皮光谱特征的研究较少, 本研究发现藻类生物土壤结皮光谱反射率随覆盖度增加而降低的变化规律。在可见光区, 覆盖度为 10%~20%, 30%~40% 及 50%~60% 藻类生物土壤结皮相比于裸地, 反射率归一化均值下降的比例在 8.64%, 15.80% 和 23.09%; 在近红外光区下降的比例达到 13.81%, 22.65%

和 20.84%；在短波红外光区则下降了 19.61%，27.82% 和 33.76%。

目前研究比较认同藓类生物土壤结皮与高等植物具有相似的光谱曲线特征。O'Neill 对生物土壤结皮叶绿素吸收峰进行了较为细致的研究，指出干湿交替对吸收峰和红外位移有一定的影响。陈晋等和房世波等研究了干湿条件下对生物土壤结皮光谱特征的影响，表明水分条件对光合色素和 NDVI 具有显著的影响。杨光和李庆和^[7]研究了结皮颜色对荒漠藻结皮光谱特征的影响，黑色结皮的红边基本不存在，而绿色结皮红边现象特别明显，表现出绿色植物的光谱特征。这些研究集中在可见-近红外光区，对荒漠地区，特别是植被稀少地区，生物土壤结皮的识别具有一定的价值。本文研究不仅发现藓类生物土壤结皮具有和高等植物相似的光谱曲线特征，还发现两者光谱特征变化上存在的差异性。研究发现，二者都表现出绿波段的反射特征和红光波段的吸收特征，在 680 nm 都表现出绿色植被所共有的光谱反射基本特征。但藓类生物土壤结皮在 760~930 nm 区间斜率要远大于高等植物，在此区间表现为“陡坡”特征，高等植物相对平坦，光谱斜率是高等植物的 2.5 倍。藓类生物土壤结皮与高等植物光谱特征异同原因在于藓类生物土壤结皮作为最早登陆的高等植物，与高等植物具有相似的色素和结构特征，如叶子中存在叶绿素，但与高等植物相比，藓类属喜阴植物，叶子色素含量和内部结构存在较大差异。

现有生物土壤结皮指数算法建立在寒区旱区的荒漠地区，不同区域生物土壤结皮群落中隐花植物种构成与丰富度差异较大，现有的生物土壤结皮指数其应用具有很大的局限

性，且其信息识别以蓝藻和地衣结皮为主。黄土高原地区生物土壤结皮种类构成与丰富度、形态特征、分布特征以及环境条件等与沙漠地区显著不同，基于传统技术手段进行生物土壤结皮识别技术难度较大，且受周围环境背景信息的干扰，在黄土高原地区还没有成功应用的先例。今后将加强生物土壤结皮与高等植物和裸土不同组合条件的混合光谱与单个类型不同丰度光谱之间的研究，从而使基于卫星遥感的生物结皮探测发挥作用。本工作在点位尺度上开展了生物土壤结皮光谱特征的研究，取得生物土壤结皮与环境背景(如裸土、高等植物)光谱的异同特征，这些光谱特征为区域尺度生物土壤结皮指数和算法构建奠定了重要的基础。

3 结 论

采用光谱实测技术，研究黄土高原水蚀风蚀交错区不同生物土壤结皮的光谱特征，取得以下主要成果。

黄土高原水蚀风蚀交错区藻类生物土壤结皮与土壤具有相似的光谱特征。表现为光谱曲线没有明显的“峰-谷”特征。藻类生物土壤结皮光谱反射率随生物土壤结皮覆盖度增加而降低的变化规律，在 680 nm 处吸收特征(叶绿素)越来越明显，2 200 nm 处吸收谷(次生矿物)越来越小。

黄土高原水蚀风蚀交错区藓类生物土壤结皮具有和高等植物相似的光谱特征，如绿波段的弱反射和明显的“红边”现象；但在 760~930 nm 区间光谱反射率斜率要远大于高等植物。

References

- [1] Zhao Y, Qin N, Weber B, et al. *Biodiversity & Conservation*, 2014, 23(7): 1669.
- [2] LI Xin-rong(李新荣). *Eco-Hydrology of Biological Soil Crusts in Desert Regions of China(荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究)*. Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2012. 941.
- [3] Xiao B, Wang H, Fan J, et al. *Ecological Engineering*, 2013, 58(58): 52.
- [4] GAO Li-qian, ZHAO Yun-ge, QIN Ning-qiang(高丽倩, 赵允格, 秦宁强). *Journal Applied Ecology(应用生态学报)*, 2013, 24(1): 105.
- [5] Chamizo S, Stevens A, Cantón Y, et al. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(1): 42.
- [6] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Lazaro R, et al. *Journal of Hydrology*, 2014, 517(1): 815.
- [7] YANG Guang, LI Qing-he(杨光, 李庆和). *Science of Soil and Water Conservation(中国水土保持科学)*, 2014, 12(1): 90.

Spectral Characteristics of Biological Soil Crusts under the Different Types in the Water-Wind Erosion Crisscross Region on the Loess Plateau

TIAN Yuan-sheng¹, ZHANG Yue¹, SUN Wen-yi^{1, 2*}, MU Xing-min^{1, 2}, GAO Peng^{1, 2}, ZHAO Guang-ju^{1, 2}

1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract The study on spectral characteristics of biological soil crust in the water-wind erosion crisscross region in the Loess Plateau has important scientific value for the identification of biological soil crust based on remote sensing technology at regional

scale, also provides important technical support for estimating the effect of biological soil crust on regional soil erosion control. The spectra of higher vegetation as well as the biological soil crust of algae with different coverage and different types of mosses were measured and quantified by Surface Species Spectrometry. The results are as follows, the algal bio-soil crust has similar spectral characteristics with soil in the water-wind erosion crisscross region in the Loess Plateau, and there is no obvious "peak-valley" characteristic in the spectral curve. The reflectivity was reduced by the increasing coverage of the biological soil crust. Compared with the bare area, the spectral reflectance normalized mean of algae biological soil crust decreased 8.64%, 15.80% and 23.09% respectively in the coverage of 10% to 20%, 30% to 40% and 50% to 60% in the visible area. The absorption characteristic at 680 nm (Chlorophyll) became increasingly obvious and the absorption valley at 2200 nm (secondary mineral) became smaller as the coverage of algae biological soil crust increased. The spectral curve of moss biological soil crust showed the reflection peak of the green band, the absorption valley of the red light band and the high reflection of the near infrared band, which is similar with the vegetation. In the range of 760~930 nm, the slope of moss biological soil crust was 2.5 to 4.5 times higher than that of vegetation. The study can provide some theoretical basis and technical support for the identification of biological soil crust.

Keywords Biological soil crusts; Spectral characteristics; Loess Plateau

(Received Dec. 12, 2017; accepted Apr. 16, 2018)

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社