

半干旱采煤塌陷不同应力区典型植物高光谱特征分析

王丽^{1,2}, 雷少刚^{1*}, 卞正富¹, 王凯², 彭建^{2,3}, 吴见²

1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116

2. 滁州学院地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000

3. 湖南师范大学旅游学院, 湖南 长沙 410081

摘要 利用高光谱反演、监测植被生长状况的基础是光谱特征识别。以半干旱采煤塌陷区为样地, 利用 Field Spec 3 地物光谱仪与 SPAD-502 叶绿素仪同步采集采煤地表塌陷形成的不同应力区(非采区、中性区、拉伸区、压缩区)典型植物叶片光谱反射率与叶绿素含量(SPAD 值), 分析典型植物相同应力区 SPAD 值升高其光谱特征的变化, 对比不同应力区典型植物 SPAD 值较高与较低时光谱特征的差异, 并借助 Matlab 软件深入研究不同应力区典型植物 SPAD 值与差值指数、归一化指数的相关关系。结果表明: (1) 不同应力区同种植物光谱曲线随着 SPAD 值不同变化规律相异, 可见光波段区分明显, 其余波段受应力影响的区域样本 SPAD 值不同, 反射率比非采区波动更为剧烈与无序。可见光波段, 糙隐子草、柠条、杨树、油蒿 SPAD 值低的样本光谱曲线绿峰缺失, SPAD 值升高, 绿峰出现但位置红移, SPAD 值高于 30 时, 为典型植被光谱曲线, 油松样本 SPAD 值越高反射峰值越小; 受应力影响的区域 SPAD 值低的样本谷、峰、边特征参数缺失更多, 光谱变化规律不强。(2) 400~700 nm 波段, 不同应力区糙隐子草、油蒿、油松、柠条样本 SPAD 值较低组反射率显著高于较高组, 杨树样本相反; 780~1350 nm 波段, 拉伸区的糙隐子草、非采区的油蒿和柠条、压缩区的油松和杨树样本 SPAD 值较高组与较低组的反射率差异小; 相较于非采区, 受应力影响的糙隐子草、油蒿、柠条样本在所测波段 SPAD 值较高组与较低组的同波段反射率差值显著减小。(3) 受应力影响的区域样本 SPAD 值与光谱指数相关性较之非采区在某些波段大面积增强。与非采区相比, 中性区的油蒿、油松、柠条、杨树样本 SPAD 值与光谱指数的最大相关系数值均增大, 糙隐子草相反; 非采区植物 SPAD 值与 NDVI 最大相关系数均高于 DI, 波段组合多位于近红外, 受应力影响区域的样本最大相关系数多数位于可见光波段。本研究为矿区不同应力区典型植物高光谱波段识别与植物健康状态监测、矿区生态环境精准治理提供了理论支撑。

关键词 采煤塌陷; 不同应力区; SPAD 值; 光谱差异

中图分类号: S718.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0216-07

引言

随着经济的发展, 煤矿资源作为重要能量、原料的来源开采强度增大, 由此导致的矿区地表沉陷、生态环境破坏问题引起了极大的关注^[1-2], 我国半干旱地区由于气候、土壤环境的特殊性, 采空区上方地面塌陷引起的生态问题尤为突出^[3]。采空区地面塌陷对土壤物理性质产生较大影响, 造成土壤含水量降低、风沙区天然孔隙度增大、土壤容重降低、

土壤物理性粘粒含量减少^[4-6]等, 而土壤的物理性质直接影响地面植物的生长, 地表塌陷不同应力对植物造成不同程度损伤, 从而使地面水土更容易流失^[7]。目前已有的研究较多关注采空区地面塌陷对土壤、水资源等环境的负面影响^[8-9], 采空区地表植物的恢复途径探讨^[10]等方面, 为矿区生态环境修复奠定了前期基础。然而, 地表塌陷产生的不同应力对植物的影响并未有深入研究; 如何监测塌陷区植物生长状况的研究也很缺乏。叶绿素含量是植物健康与否的重要表征, 遥感高光谱技术已运用到农作物、树种叶片等植物叶绿素含

收稿日期: 2018-06-23, 修订日期: 2018-09-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501107), 国家科技基础性工作专项项目(2014FY110800), 安徽省教育厅高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0434), 安徽省自然科学基金项目(1808085QC72)资助

作者简介: 王丽, 女, 1978年生, 中国矿业大学环境与测绘学院博士研究生 e-mail: 185162401@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: lsgang@126.com

量的监测中^[11]。因此对塌陷地表不同应力区典型植物的叶绿素和高光谱特征进行研究有利于采空区植物叶绿素含量反演与监测时高光谱波段提取。

以中国西部神府-东胜特大煤田典型矿区大柳塔矿为样地,探讨不同应力区典型植物叶绿素含量变化时的光谱特征,同时横向比较同一植物在不同应力区叶绿素含量较一致时高光谱的差异,并深入分析不同植物叶绿素与光谱指数的相关关系,以为矿区植物健康状况监测及生态环境治理拓展新途径。

1 实验部分

1.1 研究区域概况

神府-东胜矿区地跨陕、蒙、晋三省,属半干旱大陆性季风气候。研究样地大柳塔矿位于神府-东胜煤田腹地,是风沙地貌向黄土丘陵地貌的过渡带,植被类型为暖温带典型草原区,原生代表群系为针茅草原。矿区煤炭资源具有埋藏浅,基岩薄,煤层厚的特点,以大采高一次采全高综合机械化采煤为主要采煤方法,工作面长度多大于 200 m,显著增加了开采造成的地表稳定下沉区的面积和范围,对上覆岩层与地表的扰动比一般采煤工作面剧烈,因此对植物影响也更为显著。

1.2 数据采集

为了解采煤对地表植物的影响,在非采区设置对照组(control check, CK),依据采煤塌陷机理,在地表采煤塌陷不同应力区:中性区(neutral zone, NZ)、拉伸区(drawing zone, DZ)、压缩区(compression zone, CZ),选择典型植物

糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*, CS)、油蒿(*Artemisia ordosica*, AO)、油松(Chinese pine, CP)、柠条(*Caragana microphylla*, CM)、杨树(*Populus tremula*, PT)健康、成熟叶片,采用美国 ASD 生产的 FieldSpec 3(Hi-Res)高性能地物光谱仪与 SPAD-502 叶绿素仪同步测量四个样区植物叶片光谱与叶绿素含量,每个样区每种植物测量叶片 50 片。光谱波长范围 350~2 500 nm。测量选择风力小于 3 级的晴朗天气进行,时间为 11:00—14:00,测量人员身着深色服装,传感器探头垂直向下,测量前用白板光谱标定,并定时进行系统优化,每个样本重复测量 10 次。同时用叶绿素仪对该样本不同位置测量 5 次。

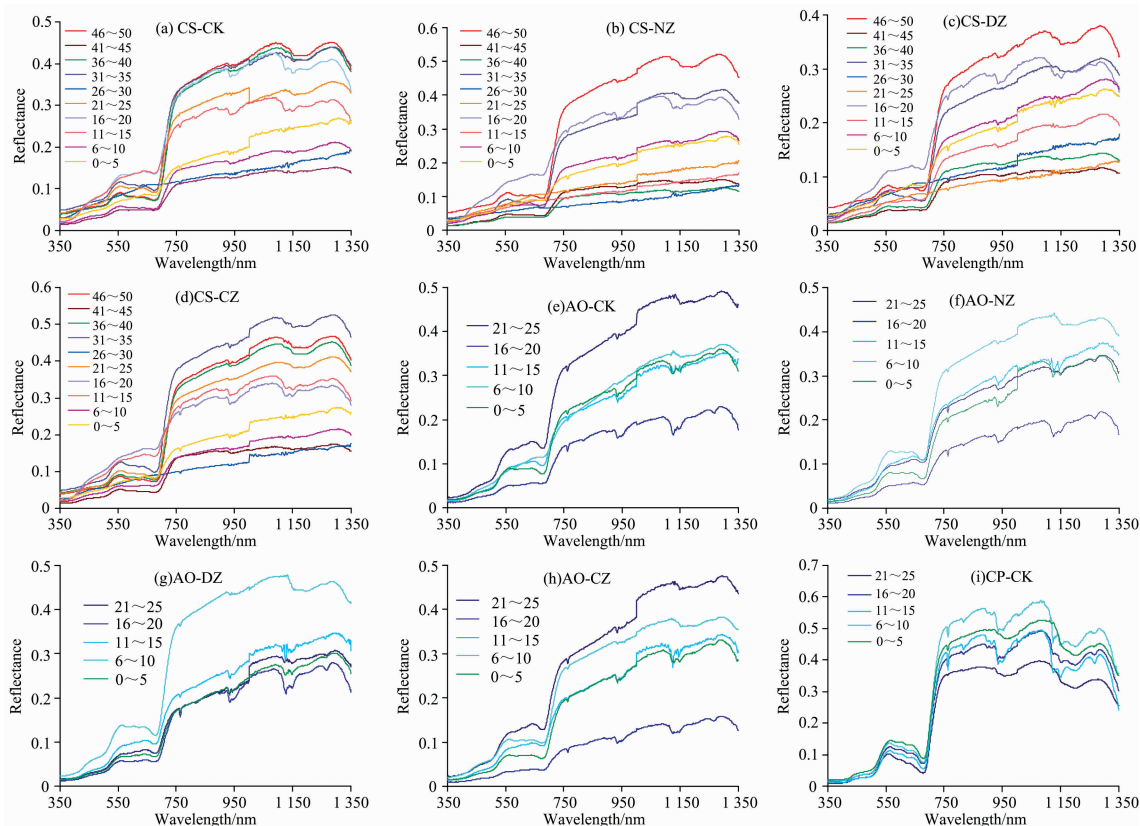
1.3 数据处理

将每种植物叶片 10 次测量的光谱数据及五次测量的 SPAD 值取均值作为该样本的光谱反射率与叶绿素含量,为减少噪声干扰,选取 350~1 350 nm 波段进行光谱分析。将预处理过的数据导入 Excel 与 Matlab12a 软件中进行计算与分析。

2 结果与讨论

2.1 相同塌陷应力区典型植物不同叶绿素含量光谱差异分析

将所测植物样本按 SPAD 值大小以 5 为单位进行划分,同一单位样本所对应的光谱反射率取均值,获得在塌陷应力作用下五种植物样本不同叶绿素含量的光谱变化曲线(图 1),油蒿与油松样本 SPAD 值范围为 0~25,其余植物为 0~50。



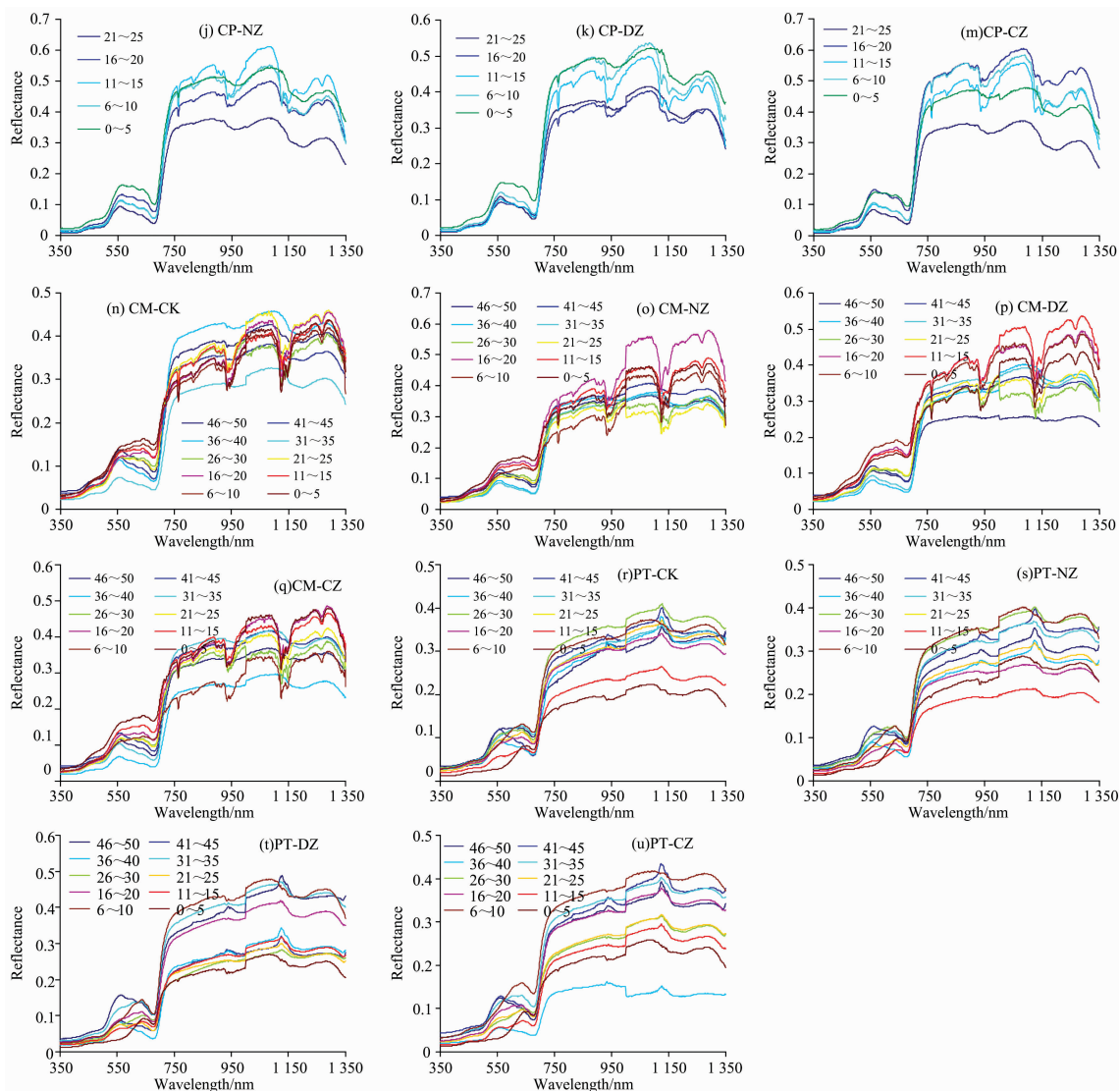


图 1 四个样区植物不同叶绿素含量光谱变化曲线

Fig. 1 Original spectra of vegetables with different SPAD values in four mining disturbance zones

由图 1 可知，塌陷不同应力区 SPAD 值不同，同种植物光谱变化规律相异。可见光波段，随着 SPAD 值升高，非采区样本光谱曲线变化规律较强，压缩区、中性区、拉伸区样本规律性较弱；780~1 350 nm 波段，相较于非采区，压缩区不同单位 SPAD 值样本反射率分异更大，而拉伸区与中性区光谱曲线更为密集。

可见光波段，非采区与压缩区、中性区与拉伸区糙隐子草样本 SPAD 值不同光谱曲线变化规律分别相似，SPAD 值低于 30 的样本，特征参数有不同程度缺失，中性区最明显；其余波段，受应力影响的样本 SPAD 值不同反射率与非采区差异较大。非采区与压缩区、拉伸区与中性区油蒿样本在可见光波段 SPAD 值不同反射率变化规律分别相近；所测波段反射率最高的非采区、压缩区油蒿样本 SPAD 值为 20~25，拉伸区、中性区为 6~10。可见光波段，非采区不同单位 SPAD 值油松样本光谱曲线规律性强，总体上 SPAD 值越低绿峰峰值越高，受应力影响的样本 SPAD 值不同，规律不明

显；780~1 350 nm 波段，非采区 SPAD 值较高的样本反射率较低，受应力影响区域样本反射率与非采区差异大。非采区柠条在可见光波段 SPAD 值小于 20 的样本 SPAD 值越低反射率越高且绿峰缺失，SPAD 值为 21~30 时绿峰宽度增加并红移，SPAD 值高于 31 时 SPAD 值越高反射率越高，受应力影响的样本，随着 SPAD 值变化光谱特征不明显；其余波段，不同应力区 SPAD 值低于 30 的样本光谱曲线变化剧烈。可见光波段，SPAD 值为 0~35 的杨树样本，峰值均在 632 nm 左右，但不同区域光谱密度与反射率高低情况不同；780~1 350 nm 波段，SPAD 值不同，不同样区反射率高低差异较大。

2.2 典型植物不同应力区叶绿素高低组光谱曲线变化差异分析

为进一步识别不同应力区典型植物相同水平叶绿素含量的光谱特征，根据所测 5 种植物的 SPAD 值范围分为 SPAD 值较高组 (High, H) 与较低组 (Low, L)。所测植物 SPAD 值

在 0~50 之间时, 0~25 为 L, 26~50 为 H; SPAD 值范围为 0~25 时, 0~10 为 L, 11~25 为 H。将归属于各组下的植物

样本反射率取均值, 制成典型植物塌陷不同应力区 SPAD 值高、低组光谱曲线变化图(图 2)。

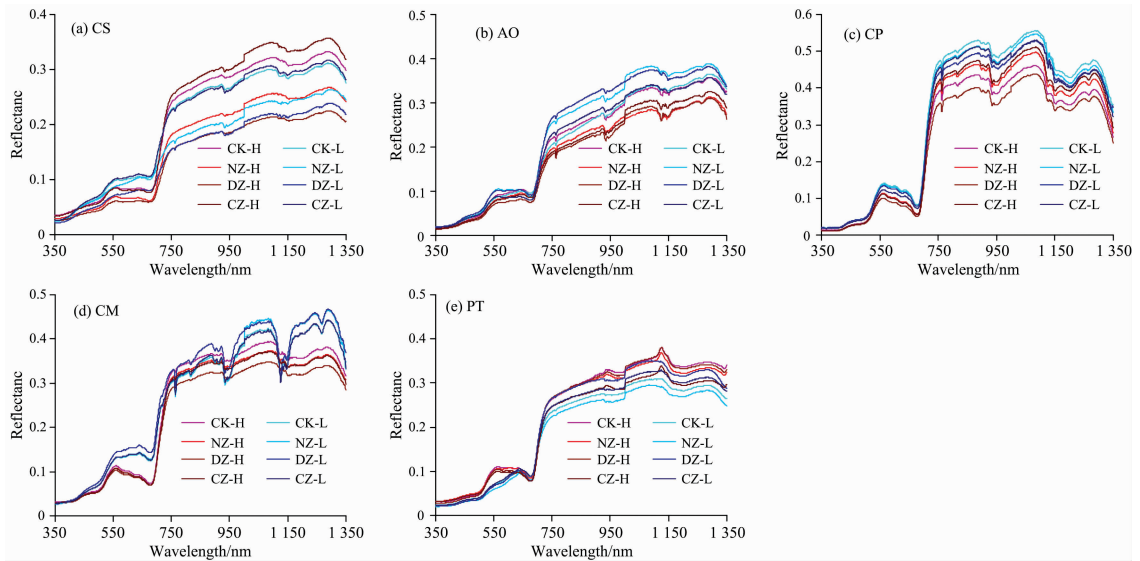


图 2 不同应力区植物 SPAD 值高、低组光谱曲线变化

Fig. 2 The spectral difference between SPAD high values and low values of various vegetables in different mining disturbance zones

从总体上来看, 350~700 nm 波段, 四个样区糙隐子草、油蒿、油松、柠条样本 SPAD 值较高组反射率显著低于较低组, 杨树变化相反; 700~1 350 nm 波段, 糙隐子草、柠条样本 SPAD 值较高组反射率显著高于较低组, 其余样本相反。在整个所测波段, 相较于非采区, 受应力影响的糙隐子草、油蒿、柠条样本 SPAD 值较高组与较低组的同波段反射率差值增大, 油松、杨树样本差值减小。700~1 350 nm 波段, 拉伸区的糙隐子草、非采区的油蒿和柠条、压缩区的油松和杨树样本 SPAD 值高、低不同时反射率差异小, 光谱曲线几近重叠。

420~720 nm 波段, 四个区域糙隐子草样本反射率最高与最低的分别为 CZ-L 与 DZ-H; 720~1 350 nm 波段, CZ-H 与 DZ-H 反射率分别最高与最低; CZ-H 与 CZ-L 的同波段反射率差值较 CK 显著增大, 其余缩小。油蒿样本 CK-H 与 CK-L 反射率在整个所测波段接近, 受应力影响样区区分明显, DZ-H 与 DZ-L 反射率差异最大。整个所测波段, 不同样区油松样本 CK-L 反射率最高, DZ-H 反射率最低; 而 NZ-H 与 NZ-L、CZ-H 与 CZ-L 同波段反射率差值较非采区明显缩小。SPAD 值较高的柠条样本光谱曲线在 350~720 nm 波段聚集; 720~1 350 nm 波段, SPAD 值较低样本组光谱曲线波动大。350~720 nm 波段, 不同样区杨树叶片样本 SPAD 值较高组显著高于较低组; 其余波段, CZ-H 与 CZ-L 反射率极为接近; 相较于非采区, DZ-H 与 DZ-L、CZ-H 与 CZ-L 同波段反射率差距缩小。

2.3 塌陷不同应力区典型植物 SPAD 值与光谱指数相关分析

为识别不同应力区监测植被 SPAD 值的特征波段, 选取

典型光谱指数差值指数(任意两波段的差值, DI)、归一化指数(任意两波段的之差与任意两波段之和的比值, NDVI), 利用 MATLAB 软件对样本 SPAD 值与典型光谱指数进行相关分析, 制成相关系数矩阵图(图 3, 限于篇幅关系, 只显示监测植被 SPAD 值与 NDVI 指数的相关系数矩阵图, DI 指数略), 红、黄为正相关, 青、蓝为负相关。

由计算结果可知, 糙隐子草非采区样本 SPAD 值与 DI、NDVI 最大相关系数均位于 1 140 和 1 127 nm 波段, 值为 0.95 和 0.962; 压缩区 SPAD 值与 NDVI 最大相关系数值增强到 0.969, 波段为 744 和 746 nm; 拉伸区与中性区 SPAD 值与 DI 相关系数值均高于与 NDVI, 特征波段位于近红外。非采区的油蒿样本 SPAD 值与 NDVI 相关系数值最大, 为 0.877, 波段为 1 069 和 1 054 nm; 受应力影响的样本 SPAD 值与 DI、NDVI 最大相关系数均提高, 其中拉伸区 SPAD 值与 NDVI 在 489 和 492 nm 波段处相关系数值最大, 达 0.937。非采区的油松 SPAD 值与 NDVI 在 1 046 和 1 020 nm 波段处相关系数最大, 为 0.931; 受应力影响区域样本 SPAD 值与 DI 最大相关系数均高于非采区, 压缩区相关系数值在 1 088 和 1 059 nm 波段最高, 达 0.959。不同样区的柠条 SPAD 值与 NDVI 的最大相关系数均大于 DI, 受应力影响的样本最大相关系数值均高于非采区; 压缩区样本 SPAD 值与 NDVI 的最大相关系数值最高, 为 0.993, 在 465 和 450 nm 波段。压缩区杨树样本 SPAD 值与 DNVI 相关性最大波段在 400 和 424 nm 处, 其余区域样本光谱指数特征波段均位于 1 000~1 350 nm, 中性区 SPAD 值与 DI 在 1 033 和 1 106 nm 处相关系数值最大, 达 0.992。

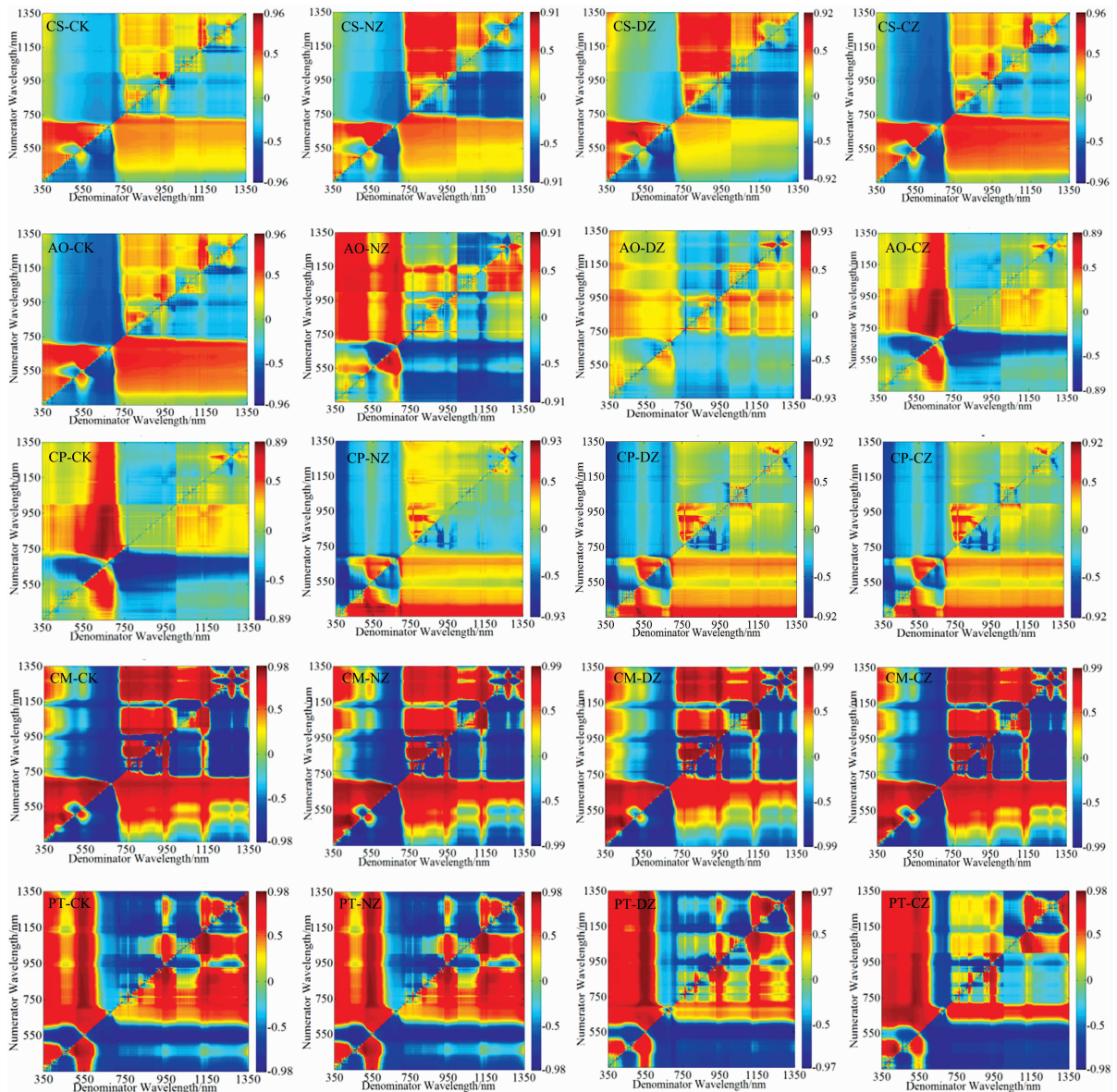


图 3 不同应力区典型植物叶片 SPAD 值与 NDVI 指数相关系数矩阵

Fig. 3 Correlation matrix of relationship between the typical vegetation leaves SPAD values and NDVI index in different mining disturbance zones

3 结论

(1) 采空区上方地表塌陷不同应力区植物 SPAD 值不同光谱变化规律相异, 可见光波段差异较大, 其余波段受应力影响区域样本 SPAD 值不同光谱曲线变化更为剧烈。非采区糙隐子草、柠条、杨树、油蒿 SPAD 值非常低的样本绿峰缺失, 随着 SPAD 值升高, 绿峰出现但位置红移, 当 SPAD 值在 30 以上时, 蓝谷、绿峰、红谷、红边光谱特征明显, 油松样本 SPAD 值越高绿峰峰值越小; 受应力影响的 SPAD 值低的样本谷、峰、边特征值缺失更多, 光谱特征无序。

(2) 从总体上来看, 相较于非采区, 受应力影响区域的样本 SPAD 值较高组与较低组的光谱反射率差值被放大或

者缩小。400~700 nm 波段, 四个区域的杨树样本 SPAD 值较高组的反射率显著高于较低组, 糙隐子、油蒿、油松、柠条样本变化趋势正好相反, 其余波段, 糙隐子草与杨树样本 SPAD 值较高组的反射率高于较低组, 其余植物变化趋势相反; 受应力影响的糙隐子草、油蒿、柠条样本 SPAD 值较高组与较低组的光谱曲线差异较非采区显著减小; 其余样本增大。

(3) 受应力影响的区域植物 SPAD 值与光谱指数相关性较之非采区在某些波段大面积增强, 最大相关系数及特征波段在不同样区不一致。相对于非采区, 中性区的油蒿、油松、柠条、杨树样本 SPAD 值与光谱指数的最大相关系数值均增大, 而糙隐子草样本降低; 最大相关系数所在特征波段非采区样本集中在近红外波段, 而受应力影响的杨树与柠条样本

特征波段在近红外波段, 糙隐子草、油松、油蒿样本特征波段多位于可见光波段。

未能深入分析矿区不同应力区植物光谱与土壤、生长时长等因素的关系, 以及植物健康受矿区环境的胁迫程度。后续研究应进一步细化研究方案, 扩大对样本生长环境及生理

特征的监测, 揭示矿区植物光谱特征变化的深层机理, 针对不同应力区的植物分别构建光谱反演模型, 为大面积、长期监测矿区地表植物健康状况, 精准治理矿区生态环境提供理论基础与技术支持。

References

- [1] Dong S, Samsonov S, Yin H, et al. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(9): 5523.
- [2] Marschalko M, Bednárík M, Yilmaz I, et al. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2012, 71(1): 105.
- [3] LEI Shao-gang, BIAN Zheng-fu(雷少刚, 卞正富). *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 2014, 34(11): 2837.
- [4] QIE Chen-long, BIAN Zheng-fu, YANG De-jun, et al(郗晨龙, 卞正富, 杨德军, 等). *Journal of China Coal Society(煤炭学报)*, 2015, 40(6): 1448.
- [5] TAI Xiao-li, HU Zhen-qi, CHEN Chao(台晓丽, 胡振琪, 陈超). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2016, 32(15): 225.
- [6] Sun Q, Zhang J X, Zhang Q, et al. *Energies*, 2017, 10(6): 786.
- [7] FAN Li-min, MA Xiong-de, LI Yong-hong, et al(范立民, 马雄德, 李永红, 等). *Journal of China Coal Society(煤炭学报)*, 2017, 42(2): 282.
- [8] Fan G, Zhang D. *Mine Water & the Environment*, 2015, 34(1): 95.
- [9] Bian Z F, Miao X X, Lei S G, et al. *Science*, 2012, 337(609S): 703
- [10] Hu Z, Fu Y, Xiao W, et al. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2015, 29(4): 15.
- [11] PENG Jian, XU Fei-xiong, DENG Kai, et al(彭建, 徐飞雄, 邓凯, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(6): 1839.

Hyperspectral Features of Typical Plants in Different Mining Disturbance Zones Caused by Coal Mining Collapse in Semi-Arid Areas

WANG Li^{1,2}, LEI Shao-gang^{1*}, BIAN Zheng-fu¹, WANG Kai², PENG Jian^{2,3}, WU Jian²

1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. Geography Information and Tourism College, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China

3. Tourism College, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract The use of hyperspectral technology to invert and monitor vegetation is based on the identification of its spectral characteristics. The spectral reflectance and the SPAD values of leaves of typical plants, collected in different mining disturbance zones of Coal mining subsidence areas in semi-arid regions, were simultaneous measured by Field Spec 3 spectrometer and the SPAD-502 chlorophyll meter to explore the spectral characteristics of the plants in the same zone with the SPAD values changing and the spectral differences of typical plants in different mining disturbance zones when the SPAD values was in the same interval. Furthermore, the correlations between SPAD values of leaves of typical plants and the spectral index were analyzed by using Matlab software. The results showed that the spectral characteristics of the same plant species in different mining disturbance zones were distinct with the SPAD values changing, and the spectral curves of different sample zones were clearly distinguished in visible band. In visible band, the green peak of spectral curves of *Cleistogenes squarrosa*, *Artemisia ordosica*, *Caragana microphylla* and *Populus tremula* in the non-mining zone were absent when the SPAD values was very low, and it appeared with the increase of SPAD value, but the position was red-shifted, when the SPAD value was above 30, the spectral features of the blue valley, green peak, red valley and red edge were obvious, and the higher the SPAD value of leaves of Chinese pine, the lower the spectral reflectance, while no rule was observed in the other zones. In addition, the spectral reflectance of samples with lower SPAD values of *Cleistogenes squarrosa*, *Artemisia ordosica*, Chinese pine and *Caragana microphylla* in the different mining disturbance zones was significantly higher than that of the samples with higher SPAD values from 400 to 700 nm band in general, but the trend of leaves of *Populus tremula* was just the opposite. The reflectance of the higher and lower groups of SPAD values of *Cleistogenes squarrosa* in the drawing zone, *Artemisia ordosica* and *Caragana microphylla* in the non-mining zone, and Chinese pine and *Populus tremula* in the compression zone were similar. Compared with the non-mining zone, the differences between the

reflectance of the higher and lower groups of SPAD values of the *Cleistogenes squarrosa*, *Artemisia ordosica*, and *Caragana microphylla* in the mining disturbance zones significantly reduced. Moreover, the correlation between the SPAD value and the spectral index of the samples in the mining disturbance zones was enhanced in some bands than that in non-mining zone. The maximum correlation coefficient values between the SPAD value and the spectral index of *Artemisia ordosica*, Chinese pine, *Caragana microphylla* and *Populus tremula* had become larger in neutral zone than that in the non-mining zone, while that of *Cleistogenes squarrosa* was just opposite. At the same time, the maximum correlation coefficient between SPAD value and NDVI in non-mining zone was higher than that of DI, and the band combinations were mostly in the near infrared, but in the other zones, the band combinations were mostly in visible band. The results of this study provided theoretical support for identifying the differences in the spectral characteristics of typical plants in different mining disturbance zones, further monitoring the health status of plants and accurately controlling the ecological environment in mining area.

Keywords Mining subsidence; Mining disturbance zone; SPAD value; Spectral differences

(Received Jun. 23, 2018; accepted Sep. 6, 2018)

* Corresponding author