

煤炭矿区植被冠层光谱土地复垦敏感性分析

赵恒谦^{1,2}, 张文博², 朱孝鑫², 毕银丽^{2*}, 李瑶³, 赵学胜², 金倩⁴

1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学), 北京 100083
2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
3. Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA
4. 河北省地质实验测试中心, 河北 保定 071051

摘要 煤矿区土地复垦及复垦监测工作, 对于我国土地利用和生态环境治理具有重要意义。微生物复垦技术能够促进植物吸收利用矿质养分和水分, 增强土壤肥力, 对矿区生态恢复具有显著作用。监测和评价土地复垦效应对植物生长影响的传统方法, 通常采用野外采集植物和土壤样本并进行室内分析, 但这些方法不仅破坏植物根系原状土壤, 造成植株损伤, 而且耗费人力、物力, 时效性差。高光谱遥感技术具有数据获取速度快、信息量大、精度高且无须离体破坏植株等优点, 对于土地复垦监测有非常大的潜力。目前, 土地复垦效应遥感监测相关研究仍以观测盆栽大豆、玉米等作物的叶片光谱分析为主。实际上, 卫星遥感数据观测到的是冠层光谱, 并非叶片光谱, 但目前还没有通过植被冠层光谱对矿区土地复垦进行监测的研究成果出现。植被冠层光谱不仅受到叶片光谱的影响, 还受到植株长势、下垫面等其他因素的影响, 光谱特征变化更为复杂。矿区植被冠层光谱特征对于土地复垦效应的敏感度分析, 是对矿区植被理化参量进行定量反演的基础, 也是限制高光谱技术应用于大面积土地复垦监测的主要瓶颈。于煤炭矿区土地复垦实验基地开展野外冠层光谱观测实验, 获取了接菌组 and 对照组野外植株冠层光谱数据, 并从光谱波形变化和光谱特征参量变化两方面综合分析了植被冠层光谱对土地复垦的敏感性。冠层光谱波形方面, 分别采用标准差和光谱敏感度作为组内和组间光谱波形差异的有效指标; 冠层光谱特征参量方面, 选取了植被红边、黄边、蓝边、绿峰、红谷等典型光谱特征, 计算获取其位置、斜率、面积等特征参量, 并通过描述性统计和单因素方差分析研究了这些冠层光谱特征参量对土地复垦效应的敏感性, 挑选出矿区土地复垦监测的有效特征参量。研究表明, 接菌组和对照组冠层光谱的主要波形变化趋势一致, 但接菌组植株的生长状况更稳定, 不同植株之间差异较小, 且绿峰和红谷两个特征更突出。这说明土地复垦能够减少植株间冠层光谱差异, 增强植被典型光谱特征, 而绿峰和红谷对土地复垦有较高的光谱敏感度。光谱特征参量方面, 绿峰、红谷、红边波长在土地复垦作用下显著向长波方向移动, 而此前叶片光谱研究中对土地复垦较敏感的红边、蓝边斜率变化并不显著。这说明, 野外植被冠层光谱分析结果与实验室植被叶片光谱分析的结果并不完全一致, 这可能和植被类型、生长周期、土壤背景光谱干扰等因素相关。在采用卫星或航拍遥感数据进行矿区植被环境监测时, 所获取的都是植被冠层光谱, 因此本研究所得到的结论具有更强的参考意义和实际应用价值。

关键词 高光谱; 土地复垦; 煤炭矿区; 植被冠层; 敏感性分析

中图分类号: P575.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1858-06

引言

煤炭矿区土地复垦工程是对开采所破坏的土地进行恢复

和综合整治, 恢复其国民经济价值, 达到可供利用状态并改善周围环境所进行的综合工程^[1]。加强煤矿区土地复垦及复垦监测工作, 对于我国土地利用和生态环境治理具有重要意义^[2]。矿区土地复垦可以分为工程复垦和生物复垦两个阶

收稿日期: 2018-04-19, 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701488), 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM16KFC02), 首都科技领军人才(Z18110006318021), 北京市大学生科学研究与创业行动计划项目(C201702693)资助

作者简介: 赵恒谦, 1986年生, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院副教授 e-mail: zhaohq@cumtb.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: byl@cumtb.edu.cn

段,其中生物复垦是利用生物措施恢复土壤肥力与生物生产能力的活动,是实现废弃土地农业复垦的关键环节。然而,矿区待复垦土地通常面临着肥力低、土壤结构不良、压实现象严重等问题,微生物多样性程度较低,不利于矿区植被的恢复^[3]。微生物复垦技术能够促进植物吸收利用矿质养分和水分,提高作物抗逆性和抗病性,改良土壤结构,增强土壤肥力,提高苗木移栽成活率,促进植被恢复,对矿区生态恢复具有显著作用^[4-5]。

监测和评价土地复垦效应对植物生长影响的传统方法,通常采用野外采集植物和土壤样本并进行室内分析,但这些方法不仅破坏植物根系原状土壤,造成植株损伤,而且耗费人力、物力,时效性差。如何低耗、高效、实时、无损地获取矿区土地复垦植被的长势和土壤理化性状信息已成为指导矿区土地复垦工作、评价土地复垦技术在矿区生态环境恢复中的作用所面临的一个重要问题^[6]。高光谱遥感技术具有数据获取速度快、信息量大、精度高且无须离体破坏植株等优点,逐渐成为目前评价微生物复垦效应的研究热点^[5-7]。这些研究主要通过观测盆栽大豆、玉米等作物的接菌组及对照组的叶片光谱,分析菌根效应的敏感波段,并利用敏感波段光谱参量对作物叶片中叶绿素、氮元素等理化参量进行反演。研究表明,接菌组和对照组在叶片光谱特征上有较明显差异,而通过植被叶片光谱特征参量反演理化参量具有较高的精度。植被叶片光谱主要受色素含量和叶片内部组织结构的影响,因素相对比较少^[8]。相比而言,植被冠层光谱特征变化更为复杂,一方面受到叶片光谱的影响,另一方面还受到植株长势、下垫面等其他因素的影响^[9]。目前还没有通过植被冠层光谱对矿区土地复垦进行监测的研究成果出现。矿区植被冠层光谱特征对于土地复垦效应的敏感度分析,是对矿区植被理化参量进行定量反演的基础,也是限制高光谱技术应用于大面积土地复垦监测的主要瓶颈。

因此,本研究在陕北神东矿区土地复垦实验基地开展一系列野外冠层光谱观测实验,以当地典型植被野樱桃作为研究对象,分析了植被冠层光谱对土地复垦在波形和光谱特征参量方面的敏感性。

1 实验部分

1.1 试验区概况与数据获取

神东矿区位于晋、陕、蒙三省区接壤地区,地处黄土高原丘陵区和毛乌素沙地的过渡地带,是黄河中上游风蚀沙化和水土流失最为严重的地区之一,生态环境十分脆弱。神东矿区塌陷地微生物复垦关键技术开发与示范试验基地建于大柳塔东山塌陷区沙地沟壑区三道梁上,属典型的干旱半干旱大陆性季风气候。试验区土壤最大饱和持水量 16.7%, pH 8.60,土壤肥力较低,保水性较差^[10]。试验野樱桃于 2012 年栽植,种植间距为 1 m×2 m,设接种(M)与对照(CK)两种不同处理;接菌组菌剂随植苗一起接入,每株 20 g;浇水达土壤最大饱和持水量,以后每周浇水 1 次,1 个月后免水分自然管理,并在接菌组和对照组各随机选择 10 株进行标记,用于本次实验观测。

2016 年 10 月,选择晴好无风的午间时分(上午 10 点 30 至下午 1 点 30)使用 SVC 地面光谱仪在神东矿区复垦试验基地进行冠层光谱观测。实验人员使用光纤进行垂直观测,并对每株样本选取不同位置测得 5 条光谱,对其取平均获得每株样本的冠层光谱。由于研究所使用的植被光谱特征集中在可见近红外波段,因此仅使用 0.35~1 μm 波段范围内的光谱数据。

1.2 冠层光谱波形变化分析

通过对接菌组 and 对照组 10 株样本的光谱波形的对比,可以对微生物复垦对冠层光谱波形的影响进行总体分析。为了分析接菌组和对照组各自内部样本之间的光谱波形变化,选取标准差作为评价指标,如式(1)

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [R_i(\lambda) - \bar{R}(\lambda)]^2} \quad (1)$$

其中,STD 是标准差, n 是样本个数, $R_i(\lambda)$ 是第 i 个样本在波长 λ 处的反射率, $\bar{R}(\lambda)$ 是所有样本在波长 λ 处反射率的平均值。根据式(1),可以分别计算并绘制接菌组和对照组的标准差曲线。

为了进一步分析不同波段光谱受微生物复垦的影响,需要计算两组 10 株样本的平均光谱,并选取光谱敏感度作为接菌组和对照组光谱波形差异的指标,如式(2)

$$S(\lambda) = \frac{|R_M(\lambda) - R_{CK}(\lambda)|}{R_{CK}(\lambda)} \quad (2)$$

其中, λ 是波段中心波长, $S(\lambda)$ 是波长 λ 处的光谱敏感度, $R_M(\lambda)$ 和 $R_{CK}(\lambda)$ 分别是接菌组和对照组在波长 λ 处的光谱反射率平均值。根据式(2),可以计算并绘制相应波长范围内的光谱敏感度曲线。光谱敏感度取值越高,说明在该波段处接菌组和对照组的波形差异越大,即在该波段处微生物复垦的影响越大。

1.3 冠层光谱特征参量变化分析

植被冠层反射率的主要光谱特征有红边、黄边、蓝边、绿峰、红谷等(如图 1 所示)。基于这些光谱特征提取以下参量进行统计分析:

红边(red edge, RE)参数:红边位置(RE wavelength, RE-W)是指植被红边范围(约 680~760 nm)一阶微分光谱的最大值所对应的波长,红边斜率(RE slope, RE-S)是红边位置对应的一阶微分光谱取值,红边面积(RE area, RE-A)是指红边范围内反射率光谱对波长的积分值。

黄边(yellow edge, YE)参数:黄边位置(YE wavelength, YE-W)是指植被黄边范围(约 635~670 nm)一阶微分光谱的最大值所对应的波长,黄边斜率(YE slope, YE-S)是黄边位置对应的一阶微分光谱取值,黄边面积(YE area, YE-A)是指黄边范围内反射率光谱对波长的积分值。

蓝边(blue edge, BE)参数:蓝边位置(BE wavelength, BE-W)是指植被蓝边范围(约 510~570 nm)一阶微分光谱的最大值所对应的波长,蓝边斜率(BE slope, BE-S)是蓝边位置对应的一阶微分光谱取值,蓝边面积(BE area, BE-A)是指蓝边范围内反射率光谱对波长的积分值。

绿峰(green peak, GP)参数:绿峰位置(GP wavelength, GP-W)是指植被绿峰范围(约 550~650 nm)反射率的最大值

对应的波长。

红谷(red valley, RV)参数:红谷位置(RV wavelength, RV-W)是指植被红谷范围(约 650~690 nm)反射率的最小值对应的波长。

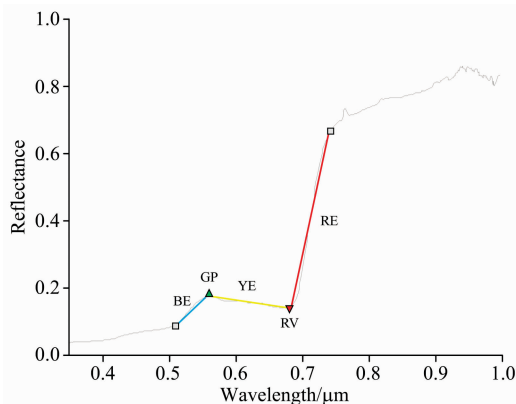


图 1 植被冠层光谱特征参数

Fig. 1 Spectral feature parameters of vegetation canopy

为更直观地表现接菌组和对照组差异,本研究将采用表格对两组冠层光谱特征参量进行描述性统计,包含均值、标准差等统计量,对特征参量的变化趋势进行对比。

1.4 冠层光谱特征参量变化敏感性分析

在上一节的基础上,需要选取对土地复垦影响最为敏感的冠层光谱特征参量,作为将来大面积高光谱土地复垦监测的有效指标。通过 SPSS20.0 版统计分析软件^[11],采用单因素方差分析方法,对植被冠层光谱特征参量进行敏感性分析。通常来讲,单因素方差分析被用来研究一个控制变量的不同水平是否对观测变量产生了显著影响。在本研究中可以以冠层光谱特征参量作为观测变量,分析土地复垦这一控制变量是否对其有显著影响,从而选取矿区土地复垦监测的有效参量。

2 结果与讨论

2.1 冠层光谱波形变化分析

煤炭矿区野樱桃接菌组和对照组冠层光谱的主要波形变化趋势一致,从可见光到近红外都有明显的绿峰、红谷、红边、近红外高反射平台等特征(如图 2 所示)。但是,两组在一些特征的细节上又有所不同。例如,对照组的绿峰中心波长并不一致,而接菌组绿峰中心波长很一致,且反射率值也很接近;对照组各个样本之间近红外高反射平台的反射率值差异更大,而接菌组在该波段的反射率值分布更均匀,且波形更相近。

从冠层光谱标准差曲线来看,两组植被的曲线变化都和植被整体波形变化相一致,即标准差大小和反射率值大小有非常强的相关性(如图 3 所示)。值得注意的是,接菌组冠层光谱标准差曲线整体都低于对照组曲线,这说明接菌组植株的生长状况更稳定,不同植株之间差异较小,这和从图 2 分析得到的结论相一致。

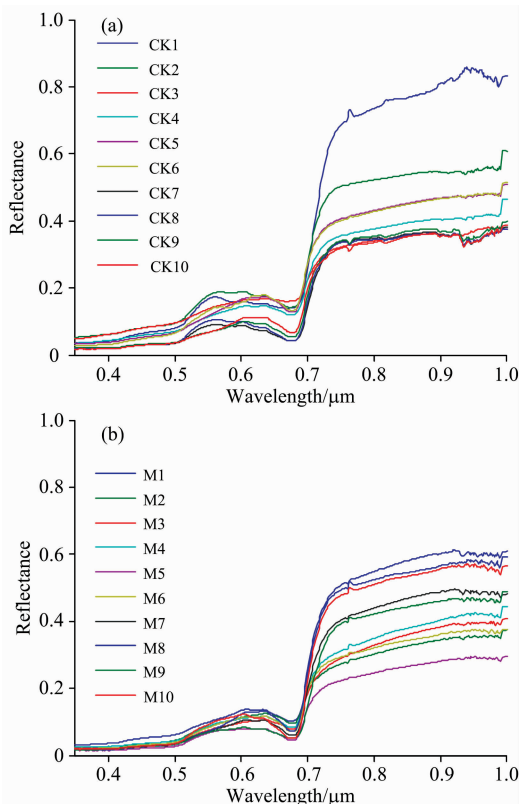


图 2 矿区野樱桃冠层光谱

(a): CK; (b): M

Fig. 2 Canopy spectra of wild cherry in coal mining area

(a): CK; (b): M

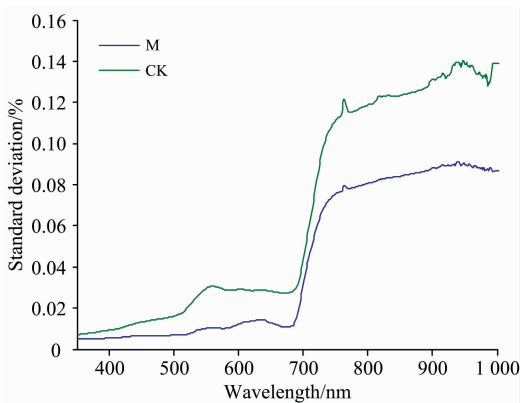


图 3 矿区植被冠层光谱标准差曲线

Fig. 3 Standard deviation curves of vegetation canopy spectra in coal mining area

从接菌组和对照组的平均冠层光谱来看,接菌组在 350~700 nm 波段反射率要低于对照组,在 700~1 000 nm 波段要高于对照组;就具体特征来看,接菌组绿峰中心波长向长波方向移动,红谷反射率更低,近红外高反射平台更高(如图 4 所示)。这说明接菌组平均光谱在高反射率和低反射率波段区间的差别更大,植被典型光谱特征更突出,这和植

被叶绿素含量直接相关，是植被健康程度的体现^[12]。在光谱敏感度曲线上，在绿峰和红谷波段有两个高峰，这说明在这两个波段范围内接菌组和对照组的组间差异最大，这和之前对于叶片光谱敏感度曲线的分析结果相一致^[5]。

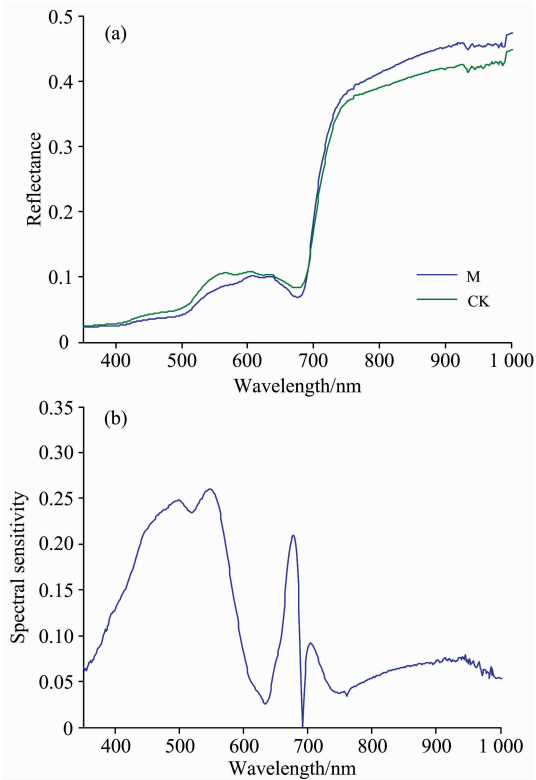


图 4 矿区植被接菌组和对照组冠层平均光谱 (a) 和两组间光谱敏感度曲线 (b)

Fig. 4 Average spectra of vegetation canopy in coal mining area (a) and spectral sensitivity between CK and M groups (b)

2.2 冠层光谱特征参量变化分析

对冠层光谱特征参量进行描述性统计分析，结果如表 1 所示。可以看到，M 组绿峰和红谷中心波长与 CK 组相比向长波方向移动，与上一小节结果相一致；黄边和红边的中心波长也向长波方向移动，而蓝边中心波长则向短波方向移动；从光谱特征的面积和斜率来看，三边的面积和斜率变化规律保持一致，其中红边和黄边均有所增加，而蓝边变化趋势相反。总体来看，冠层光谱特征参量变化趋势与之前叶片光谱的结果相一致。值得指出的是，在此前叶片光谱研究中，红边、红谷、绿峰中心波长在接菌组和对照组无明显差别，而本研究中发现这些特征参量都有较明显红移现象。此外，三边面积和斜率变化趋势完全一致，说明两者有极强的相关性，不需要同时使用。考虑到斜率计算更简便且容易推广到多光谱数据使用，是更理想的光谱特征参量。

2.3 冠层光谱特征参量变化敏感性分析

对野樱桃冠层光谱特征做单因素方差分析，结果如表 2 所示。以显著性 (p) 取值小于 0.05 为标准，绿峰、红谷、红

表 1 矿区植被冠层光谱特征参量描述性统计分析结果
Table 1 Descriptive statistical results of vegetation canopy spectral feature parameters in coal mining area

| | | Mean | STD | | | Mean | STD |
|-------|-------|-----------|-------------|-------|-------|-----------|-------------|
| GP_W | CK | 603.860 0 | 2.623 48 | BE_W | CK | 523.480 0 | 2.623 31 |
| | M | 607.430 0 | 3.190 98 | | M | 522.500 0 | 5.762 91 |
| | Total | 605.645 0 | 3.381 91 | | Total | 522.990 0 | 4.386 81 |
| RV_W | CK | 673.160 0 | 1.334 33 | BE_S | CK | 0.001 95 | 9.000 656 7 |
| | M | 675.59 0 | 0.992 70 | | M | 0.001 492 | 0.000 389 1 |
| | Total | 674.375 0 | 1.692 36 | | Total | 0.001 726 | 0.000 577 4 |
| RE_W | CK | 699.440 0 | 2.455 92 | RE_A | CK | 0.385 055 | 0.128 043 8 |
| | M | 697.160 0 | 1.666 13 | | M | 0.422 892 | 0.094 400 9 |
| | Total | 698.300 0 | 2.353 72 | | Total | 0.403 973 | 0.111 194 2 |
| RE_SC | K | 0.010 074 | 0.002 781 3 | YE_AC | K | 0.019 416 | 0.008 255 1 |
| | M | 0.012 143 | 0.002 607 6 | | M | 0.029 922 | 0.007 794 8 |
| | Total | 0.011 108 | 0.002 830 5 | | Total | 0.024 669 | 0.009 492 6 |
| YE_W | CK | 644.280 0 | 3.190 19 | BE_A | CK | 0.045 462 | 0.013 007 4 |
| | M | 643.850 0 | 0.953 65 | | M | 0.039 043 | 0.006 626 8 |
| | Total | 644.065 0 | 2.302 24 | | Total | 0.042 253 | 0.010 572 9 |
| YE_S | CK | 0.000 925 | 0.000 365 3 | | | | |
| | M | 0.001 363 | 0.000 316 1 | | | | |
| | Total | 0.001 144 | 0.000 401 3 | | | | |

边的中心波长都显著向长波移动，而蓝边、黄边的中心波长移动方向并不显著；斜率和面积参数来看，只有黄边的斜率和面积呈显著增加趋势，而红边、蓝边的参量变化规律不明显。此前的研究中，三边的斜率变化是土地复垦光谱响应的重要指标^[13]，而本研究中仅黄边斜率变化显著。与此同时，绿峰、红谷、红边中心波长在之前的研究中并没有明显变化，而在本研究中有了显著的红移现象。这说明，野外植被冠层光谱分析结果与实验室植被叶片光谱分析的结果并不完全一致，这可能和植被类型、生长周期、土壤背景光谱干扰等因素相关。在采用卫星或航拍遥感数据进行矿区植被环境监测时，所获取的都是植被冠层光谱，因此本研究所得到的结论具有更强的参考意义和实际应用价值。

3 结 论

矿区野外植被冠层光谱对土地复垦的敏感度分析，是植被理化参量定量反演的基础，也是高光谱应用于大面积菌根效应监测的重要前提。对煤炭矿区野外植被冠层光谱进行观测，分析了接菌组和对照组在波形和光谱特征参量变化上的差异。波形方面，接菌组不同植株间冠层光谱差异更小，光谱特征更明显，其中绿峰和红谷对土地复垦有较高的敏感度。光谱特征参量方面，绿峰、红谷、红边波长在接菌组和对照组间有显著差异，且在土地复垦作用下均向长波方向移动，可作为矿区植被土地复垦监测的有效指标。然而，野外植被冠层光谱影响因素较叶片光谱相比更为复杂，需要继续深入开展野外冠层光谱实验，分析植被类型、土壤、生长周期等因素的影响以及由此导致植被理化参量的变化，对其机理展开深入分析，将成为下一阶段的研究工作。

表 2 矿区植被冠层光谱参量单因素方差分析结果

Table 2 ANOVA results of vegetation canopy spectral parameters in coal mining area

| | | Sum of Squares | <i>F</i> | <i>p</i> | | | Sum of Squares | <i>F</i> | <i>p</i> |
|------|--------|----------------|----------|----------|------|--------|----------------|----------|----------|
| GP_W | Factor | 63.725 | 7.468 | 0.014 | BE_W | Factor | 4.802 | 0.240 | 0.630 |
| | Error | 153.585 | | | | Error | 360.836 | | |
| | Total | 217.310 | | | | Total | 365.638 | | |
| RV_W | Factor | 29.524 | 21.35 | 0.000 | BE_S | Factor | 0.000 | 3.743 | 0.069 |
| | Error | 24.893 | | | | Error | 0.000 | | |
| | Total | 54.417 | | | | Total | 0.000 | | |
| RE_W | Factor | 25.992 | 5.902 | 0.026 | RE_A | Factor | 0.007 | 0.566 | 0.462 |
| | Error | 79.268 | | | | Error | 0.228 | | |
| | Total | 105.260 | | | | Total | 0.235 | | |
| RE_S | Factor | 0.000 | 2.945 | 0.103 | YE_A | Factor | 0.001 | 8.563 | 0.009 |
| | Error | 0.000 | | | | Error | 0.001 | | |
| | Total | 0.000 | | | | Total | 0.002 | | |
| YE_W | Factor | 0.924 | 0.167 | 0.688 | BE_A | Factor | 0.000 | 1.933 | 0.181 |
| | Error | 99.781 | | | | Error | 0.002 | | |
| | Total | 100.706 | | | | Total | 0.002 | | |
| YE_S | Factor | 0.000 | 8.221 | 0.010 | | | | | |
| | Error | 0.000 | | | | | | | |
| | Total | 0.000 | | | | | | | |

References

- [1] Xiao W, Hu Z, Fu Y. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(2): 177.
- [2] Chen L, Tian Y, Stehouwer R, et al. Fuel, 2013, 105(1): 258.
- [3] Nkngolo K K, Michael P, Theriault G, et al. Water Air & Soil Pollution, 2016, 227(4): 1.
- [4] DU Shan-zhou, BI Yin-li, WU Wang-yan, et al(杜善周, 毕银丽, 吴王燕, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2008, 24(4): 113.
- [5] CHEN Shu-lin, BI Yin-li, QI Li-shuai, et al(陈书琳, 毕银丽, 齐礼帅, 等). Journal of China University of Mining & Technology(中国矿业大学学报), 2015, 44(1): 170.
- [6] CHEN Shu-lin, BI Yin-li(陈书琳, 毕银丽). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2014, 26(3): 16.
- [7] KONG Wei-ping, BI Yin-li, LI Shao-peng, et al(孔维平, 毕银丽, 李少朋, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014, 30(12): 123.
- [8] Sanches I D A, Filho C R S, Kokaly R F. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2014, 97: 111.
- [9] Zhang F, John R, Zhou G, et al. Remote Sensing, 2014, 6(3): 2239.
- [10] YUE Hui, BI Yin-li, LIU Ying(岳辉, 毕银丽, 刘英). Science & Technology Review(科技导报), 2012, 30(24): 35.
- [11] George D, Mallery P. Computer Software, 2003, (100): 357.
- [12] LI Shao-ping, WU Zheng-fang, ZHAO Yun-sheng(李少平, 吴正方, 赵云升). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2016, 35(5): 584.
- [13] BI Yin-li, SUN Jiang-tao, Zhakypbek YPYSZHAN, et al(毕银丽, 孙江涛, Zhakypbek YPYSZHAN, 等). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 2016, 41(5): 1227.

Analysis on Susceptibility of Vegetation Canopy Spectra in Coal Mining Area to Land Reclamation

ZHAO Heng-qian^{1,2}, ZHANG Wen-bo², ZHU Xiao-xin², BI Yin-li^{2*}, LI Yao³, ZHAO Xue-sheng², JIN Qian⁴

1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining (China University of Mining and Technology), Beijing 100083, China

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

3. Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA

4. Hebei Research Center for Geoanalysis, Baoding 071051, China

Abstract The land reclamation and its monitoring in coal mining area is of great significance to land use and ecological environment governance in China. The Microbial Reclamation Technology can promote the plant's absorption and utilization for mineral nutrient and water, and strengthen the soil fertility, having a significant effect on ecological restoration of mining area. The traditional method for monitoring the land reclamation on plant growth is usually collecting plant and soil samples in the field for indoor analysis. But this method not only destroys rhizosphere soil, causing damages to plants, but also consumes large quantity of manpower, material resources, and time. The hyperspectral remote sensing technology has the advantages of fast data acquisition, large information, high precision and nondestructive for plants, having great potential for land reclamation monitoring. At present, the research on the monitoring of land reclamation through remote sensing still stays at the laboratory level of observing the leaf spectra of potted soybean, corn and other crops. In fact, the observation of satellite remote sensing data is the canopy spectra, not the leaf spectra, but now there is no research result on the monitoring of land reclamation in the mining area based on vegetation canopy spectra. The vegetation canopy spectrum is not only affected by the leaf spectrum, but also influenced by other factors such as plant growth condition and underlying surface, and the spectral change is more complicated. Analysis on susceptibility of vegetation canopy spectra in coal mining area to land reclamation is the basis of the quantitative inversion for the physical and chemical parameters of vegetation, and the main bottlenecks of the hyperspectral technology to be applied in large area reclamation monitoring. This research performs field experiment on vegetation canopy spectral observation in the land reclamation basement of coal mining area, obtains the wild plant canopy spectral data of reclamation group and the control group, and comprehensively analyses the spectral susceptibility of vegetation canopy spectra to land reclamation, from the aspects of spectral waveform and spectral feature parameters. In terms of the spectral waveform of canopy, standard deviation and spectral sensitivity are used as effective indicators for the difference of spectral waveform within each group and between two groups. As for the canopy spectral feature parameters, we selected the red edge, yellow edge, blue edge, red valley and green mountain as typical spectral features, calculated their parameters (such as wavelength position, slope and area), and performed descriptive statistical analysis and one-way ANOVA to investigate the canopy spectral feature parameters' sensitivity to the effect of land reclamation. Results showed that the canopy spectral waveform trend of the reclamation group is similar with that of the control group, but the plants in the reclamation group have smaller spectral difference, and their vegetation typical features, such as green peak and red valley, are more prominent. This indicated that land reclamation can reduce the canopy spectral difference between plants and strengthen the typical vegetation spectral features, while green peak and red valley are the most sensible spectral features to land reclamation effect. In terms of the specific canopy spectral feature parameters, the wavelengths of green peak, red valley and red edge tend to shift to longer wavelength significantly under the function of land reclamation, but the slope of red edge and blue edge, which are sensitive to land reclamation changes in previous studies on leaf spectra, are not significant any more in this research. This showed that the analysis results based on vegetation canopy spectra in the field are not in consistent with previous laboratory analysis results of leaf spectra, which may be caused by vegetation types, growth cycle, the interference of soil background, etc. When monitoring the vegetation environment in mining area based on satellite or aerial remote sensing, the data obtained are canopy spectra, not leaf spectra. Therefore, the conclusions of this research have strong reference value for future practical applications.

Keywords Hyperspectral remote sensing; Land reclamation; Coal mining area; Vegetation canopy; Susceptibility analysis

* Corresponding author

(Received Apr. 19, 2018; accepted Oct. 20, 2018)