

排土场 AM 接种与种植模式对沙打旺叶绿素光谱估算的影响*

余长超¹, 解琳琳^{2,3}, 王建国⁴, 毕银丽^{2,3}, 孙郡庆⁴, 李梦琪³, 黄月军¹

(1. 国能北电胜利能源有限公司, 内蒙古 锡林浩特市 026000;

2. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054;

3. 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发国家重点实验室, 北京 100083;

4. 国能新疆托克逊能源有限责任公司, 新疆 吐鲁番市 838100)

摘要: 为了快速、无损监测植物叶绿素含量, 通过设定两种不同的微生物复垦处理(接种和对照), 并选取 6 种草本植物(沙打旺、紫花苜蓿、羊草、冰草、老芒麦、无芒雀麦)按 4 种豆禾混播比例(1:1, 1:2, 1:3, 2:1)进行试验, 分别测定试验小区内沙打旺的叶绿素含量及光谱反射率。采用原始光谱、原始光谱倒数的对数及一阶微分 3 种指标, 结合 BP 神经网络回归、支持向量机(SVM)回归、随机森林(RF)回归 3 种建模方法, 针对不同处理下的植物光谱特征曲线建立模型。结果表明: 接种处理提高了叶绿素含量, 在不同混播比例下, 叶绿素的含量也各有差异; 与原始光谱曲线相比, 其倒数的对数、一阶微分建模在精度上有不同程度的提升, 其中一阶微分的建模精度最佳; 在微生物复垦条件下, RF 回归模型精度最高; 在不同种植比例条件下, 豆禾 1:2 和 1:3 区域使用 BP 神经网络回归建立的模型精度高, 而 1:1 和 2:1 区域的光谱样本则更适合采用 RF 回归方法。

关键词: 排土场复垦; 沙打旺; 丛枝菌根真菌; 叶绿素含量; 高光谱技术

中图分类号: X171.4; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-2763(2025)10-0182-08

Effects of AM Inoculation and Planting Patterns on Chlorophyll Spectrum Estimation of Astragalus Adsurgens in Mining Waste Dump

SHE Changchao¹, XIE Linlin^{2,3}, WANG Jianguo⁴, BI Yinli^{2,3}, SUN Junqing⁴, LI Mengqi³, HUANG Yuejun¹

(1. CHN Energy Beidian Shengli Energy Co., Ltd., Xilin hot, Inner Mongolia 026000, China;

2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources,

China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

4. CHN Energy Xinjiang Toksun Energy Co., Ltd., Turpan, Xinjiang 838100, China)

Abstract: In order to monitor the chlorophyll content of plants quickly and non-destructively, two different microbial reclamation treatments (inoculation group and control group) were set up, and six herbaceous plants (*Astragalus adsurgens*, *Medicago sativa*, *Leymus chinensis*, *Agropyron cristatum*, *Elymus sibiricus*, *Bromus inermis*) were selected according to four kinds of mixed sowing ratios (1:1, 1:2, 1:3, 2:1). The chlorophyll content and spectral reflectance of *Astragalus adsurgens* in the test area were measured respectively. Using the original spectrum, the logarithm of the reciprocal of the original spectrum, and the first-order differential, combined with three modeling methods of BP neural network regression, support vector machine (SVM) regression, and random forest (RF) regression, models were established for plant spectral characteristic curves under different treatments. The results show that the inoculation treatment increases the chlorophyll content, and the chlorophyll content is also different under different mixed sowing ratios. Compared with the original spectral curve, the modeling accuracy of the reciprocal logarithm and first order differential of original spectral is improved to varying degrees, and the modeling accuracy of FDR is the best. Under the condition of microbial reclamation, the RF regression model has the highest accuracy. Under the conditions of different planting ratios, the model established by BP neural network regression in the 1:2 and 1:3 regions of legumes has high accuracy, while the spectral samples in the 1:1 and 2:1 regions

* 收稿日期: 2024-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC050106); 国家自然科学基金项目(52404186)

作者简介: 余长超(1985—), 男, 河南安阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事露天煤矿技术管理工作。E-mail: 413979729@126.com

通信作者: 毕银丽(1971—), 女, 陕西米脂人, 博士, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事矿区地质环境治理、生态修复与土地复垦等方面的工作。E-mail: ylb88@126.com

are more suitable for using RF regression method.

Key words: Reclamation of mining waste dump, Astragalus adsurgens, Arbuscular mycorrhizal fungi, Chlorophyll content, Hyperspectral technology

0 引言

近年来,微生物复垦技术已成为应用于矿区生态治理的一种低成本、高效率的方法^[1]。丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhiza, AM)真菌作为一种自然界普遍存在的微生物,与植物共生形成丛枝结构后,能够增大植物根系及根系表面积,对植物吸收养分有积极的提升作用^[2],可提高苗木移栽成活率,促进植被恢复^[3]。植被恢复是矿区生态修复治理的关键问题,豆科和禾本科植物在草原生态系统中具有重要意义,合理地搭配豆禾种植比例不仅可以降低植物间资源竞争,还可以改善种间关系^[4]。

叶绿素是绿色植物体内一种重要的色素,其含量的多少能够直观地体现植物生长状况和与外界交换能量的能力。传统测量叶绿素的方法费时费力,监测效率不高。随着这些年遥感技术的发展,运用高光谱技术对叶绿素含量进行无损、快速的监测逐渐走入了人们的视野。沙打旺在内蒙古地区是一种常见的优势物种,然而在现有的研究当中却鲜有对其进行高光谱研究。

国内利用高光谱技术对植物叶绿素含量的研究已有很多,杨峰等^[5]通过研究光谱预处理对大豆叶绿素反演的影响,得出微分处理能大幅度提升模型预测精度的结论。陈书琳等^[6]通过建立接菌大豆和对照组的叶绿素光谱反演模型,证明了采用高光谱技术监测并评价菌根效应的影响是可行的。然而,目前国内利用高光谱技术监测混播比例对植物叶绿素的影响却比较少见。本文以沙打旺为研究对象,采用原始光谱、原始光谱倒数的对数及一阶微分 3 类指标,结合 BP 神经网络、支持向量机回归、随机森林回归 3 种建模方法,针对微生物复垦及草禾不同混播比例条件下的植物光谱特征曲线建立模型,为利用高光谱技术监测植物生长状况奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验样地位于内蒙古锡林浩特市北郊的北电胜利露天矿区排土场,地势较为开阔平坦。该矿区的年降雨量为 284.9 mm,年平均气温为 0~3℃,降雨

集中在 7 月至 9 月这 3 个月份,7 月气温最高,而且昼夜温差大,属于典型的半干旱大陆季风气候。

1.2 样品采集及测定

示范区共采用 6 种草本植物,设置了 4 种不同的配比组合。所用草本植物包括豆科植物沙打旺和紫花苜蓿,以及禾本科植物羊草、冰草、老芒麦、无芒雀麦。4 种不同配比为豆科与禾本科植物的比例分别为 1:1、1:2、1:3、2:1。本试验选取小区内沙打旺为研究对象,分别在对照区(CK)和接菌区(AM)的 4 种不同种植比例(共 8 个小区,见图 1)中均匀随机选取 30 株植物,每株于上、中、下 3 个部位各选取 1 片叶子,采用 SVC HR-1024i 型全波段地物光谱仪采集叶片光谱反射率信息,光谱仪波长范围为 350~2 500 nm。为减少环境对光谱测量的干扰,每隔 0.5 h 进行一次白板校正。每片叶子采集 3 次光谱数据,取其平均值作为原始数据。采用 SPAD-502 型便携式叶绿素仪测量叶片的叶绿素含量,每片叶子同样测量 3 次并取平均值。

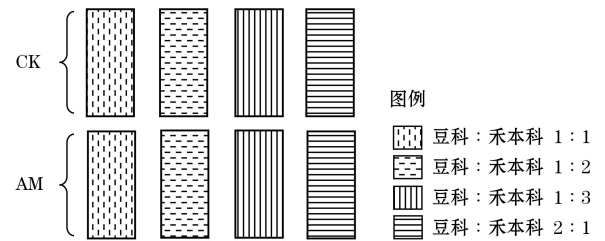


图 1 样地分布示意

Fig.1 Sample plot distribution diagram

1.3 训练集与测试集的样本划分

光谱样本共采集 240 条,剔除异常值,剩余 238 条。对样本按照训练集:测试集为 3:1 的比例进行划分(见表 1)。

表 1 谱样本划分

Table 1 Spectral sample division

处理	总样本数量/条	训练集样本数量/条	测试集样本数量/条
CK	118	88	30
AM	120	90	30
豆科:禾本科 1:1	59	44	15
豆科:禾本科 1:2	60	45	15
豆科:禾本科 1:3	60	45	15
豆科:禾本科 2:1	59	44	15

1.4 光谱指标提取

去除每条光谱样本噪声影响较大的边缘波段 350~400 nm 和 2 400~2 500 nm, 本研究选择 400~2 400 nm 范围内的光谱进行处理与分析。光谱采集过程中, 由于测试环境、仪器本身、测试背景等条件限制, 所获光谱曲线仍存在噪声, 需对光谱进行预处理。使用 ENVI 5.3 对光谱曲线进行平滑去噪处理和重采样。

在沙打旺原始光谱反射率 (Original Spectral Reflectance, R) 的基础上, 计算其倒数的对数 (Inverse-log Reflectance, LR) 和一阶微分 (First Order Differential Reflectance, FDR)。LR 处理可有效减弱因光照变化引起的光谱波动, 而 FDR 可抑制背景噪声, 并提升光谱敏感度。LR 和 FDR 两项指标均通过 ENVI 5.3 软件计算获得。

1.5 光谱模型方法

1.5.1 BP 神经网络回归

BP (Back Propagation, BP) 神经网络是一种误差反向传播神经网络, 通常包含 3 层或 3 层以上的网络层次, 每层由若干个神经元组成。BP 神经网络是一种有效的多层神经网络学习方法, 能学习和存储大量的输入-输出模式映射关系, 擅长处理非线性问题, 且无需建立具体的数学模型^[7]。本研究以全波段的光谱参数作为输入, 叶绿素含量作为输出, 利用 Matlab 2014 软件建立 BP 神经网络模型。

1.5.2 支持向量机回归

支持向量机回归 (Support Vector Regression, SVR) 通过预设的非线性映射将输入向量映射到高维特征空间 (Hilbert 空间), 并在该空间进行线性回归, 从而实现对原始空间的非线性回归^[8]。SVR 不依赖于传统的推导方法, 简化了通常的回归问题。本研究同样使用 Matlab 2014 软件建立 SVR 模型。

1.5.3 随机森林回归

随机森林回归 (Random Forest Regression, RF) 模型由多棵相互独立的回归树构成, 其最终输出结果由森林中的所有决策树共同决定。RF 能够降低数据噪声、特征共线性等因素对结果的干扰, 从而显著提高模型的稳定性^[9]。本研究使用 Matlab 2014 软件建立模型。

1.5.4 模型评价

模型的预测精度采用决定系数 R^2 、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 和相对分析误差 (Relative Percent Deviation, RPD) 3 个参数进行评价。 R^2 表征模型的稳定性, 其值越接近 1, 模型

越稳定; RMSE 用来评估模型的预测效果, 其值越小表明模型的预测能力强; RPD 为测试集标准差与 RMSE 的比值, 用来判断模型的预测能力。 $RPD < 1.4$ 表示该模型预测能力较差; $1.4 \leq RPD < 2.0$ 表示该模型有较好的预测能力; $RPD \geq 2.0$ 表示模型有极好的预测能力^[10]。

2 结果与分析

2.1 不同处理下沙打旺叶绿素描述性统计

尽管野外环境复杂, 影响因素较多, 但是接种 AM 真菌后的叶绿素值仍显著高于 CK, 其最小值为 52.1, 最高可达 79.4 (见表 2)。这表明接种 AM 真菌有效促进了植物叶绿素含量的积累, 这一效应在沙打旺的光谱特征曲线上也得到了体现。接菌组与对照组的沙打旺光谱曲线具有类似的形状及变化规律 (如图 2 所示)。在可见光范围内, 随着波长的增加, 光谱在 540 nm 附近出现一个反射峰 (绿峰)。随后光谱急剧上升, 在中红外波段, 受植被水分的影响, 在 1 400 nm、1 900 nm 附近分别形成两个吸收谷。尽管两种处理的光谱曲线走势类似, 但整体来看, CK 的光谱反射率高于 AM 的。这是由于接菌植株的叶绿素含量更高, 对光的吸收能力强所致。

表 2 接种 AM 菌根对 SPAD 的影响

Table 2 Effect of AM mycorrhizal inoculation on SPAD

处理	最大值	最小值	均值	变异系数/%
CK	65.6	45.2	52.4±5.1b	9.7
AM	79.4	52.1	65.1±4.7a	7.2

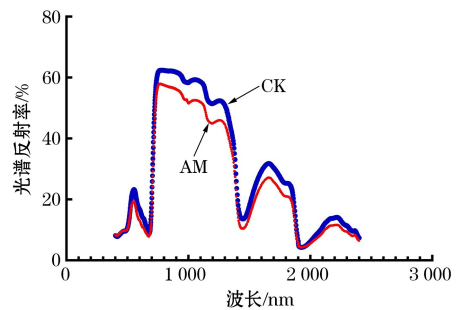


图 2 接种 AM 真菌后沙打旺原始光谱曲线变化

Fig.2 Changes of the original spectral curve of Astragalus adsurgens after inoculation with AM fungi

经过双因素方差分析, 不同处理对沙打旺叶绿素的含量虽然无显著差异, 但从表 3 可以看出, 1:2 条件下的植物叶片叶绿素相对含量 (Soil and Plant Analyzer Development, SPAD 值) 最高。这说明了豆科与禾本科植物的种植比例不同, 也会为植物生

长产生促进或抑制作用。由不同种植比例下原始光谱曲线(见图 3)可知,不同比例下沙打旺的原始光谱变化也呈现出与接菌曲线相似的变化规律,分别在 540 nm、1 400 nm、1 900 nm 附近出现一个反射峰和两个吸收谷。其中,1:3 的光谱特征曲线最高,2:1、1:1 的曲线次之,1:2 的曲线最低。分析其原因可能是在 1:2 的比例下,豆科植物和禾本科植物相互之间的促进作用更强,使沙打旺的发育情况较好,叶绿素含量多,对光的吸收能力强。

表 3 不同种植比例对 SPAD 值的影响

Table 3 Effects of different planting ratios on SPAD value

处理	最大值	最小值	均值	变异系数/%
豆科:禾本科 1:1	79.4	44.2	59.2±8.7a	16.3
豆科:禾本科 1:2	75.9	47.4	61.1±9.1a	15.0
豆科:禾本科 1:3	78.1	46.7	57.7±8.5a	14.7
豆科:禾本科 2:1	77.9	44.6	58.1±9.5a	16.3

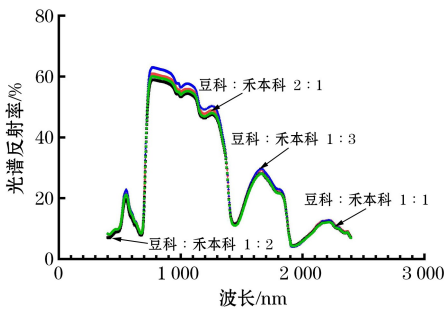


图 3 不同种植比例下原始光谱曲线

Fig.3 Original spectral curves under different planting ratios

2.2 接菌条件下沙打旺叶绿素的高光谱反演

建立对照和接菌两种情况下的叶绿素含量反演模型。接种 AM 菌根叶绿素含量反演精度对比情况见表 4。由表 4 可知,在 CK 处理下建立的反演模型测试集的 R^2 最高达到了 0.854,该模型的 $RMSE = 0.981$, $RPD = 2.543$,表明模型有极好的预测能力;在 AM 处理下的 R^2 最高为 0.892, $RMSE = 1.071$,

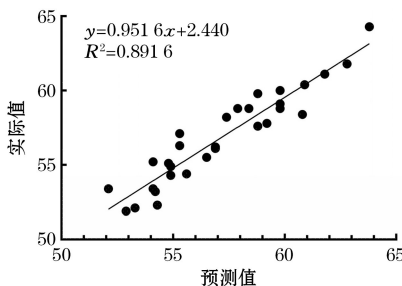
$RPD = 2.911$,模型同样对叶绿素含量表现出极好的预测能力。图 4 为上述两个模型中的预测值与实测值的对比结果。

在对照区,共采用了 3 种建模方法和 3 种光谱指标,建立了 9 个模型。在这些模型当中,同一处理同一种建模方法下,基于原始光谱曲线所建模型的精度均要低于其余两个指标。而在不同的建模方法之间,基于相同的光谱指标时,RF 的整体建模精度都要高于 BP 和 SVR。综合比较,采用 RF 回归对 FDR 指标建模精度更高。而对于接菌区所建立的 9 个模型也呈现出和对照区类似的规律,使用 RF 回归对 FDR 指标建模的精度最高。从整体上来说,CK 的建模精度要低于 AM,这说明在 AM 处理下的光谱特征曲线具有更好的反演效果。

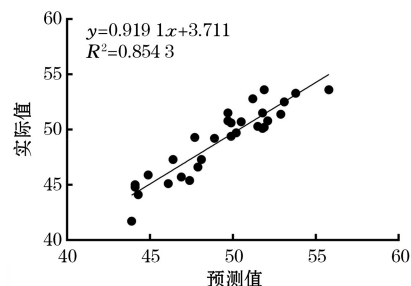
表 4 接种 AM 菌根叶绿素含量反演精度对比

Table 4 Comparison of inversion accuracy of AM mycorrhizal chlorophyll content

处理	光谱模型方法	光谱指标	训练集		测试集		
			R^2	RMSE	R^2	RMSE	RPD
CK	BP	R	0.571	2.124	0.583	1.924	1.412
		LR	0.705	1.782	0.689	1.609	1.759
		FDR	0.817	1.634	0.806	1.167	2.167
	SVR	R	0.606	1.343	0.611	1.778	1.565
		LR	0.769	1.672	0.764	1.336	2.033
		FDR	0.835	1.014	0.822	1.226	2.391
	RF	R	0.698	1.577	0.654	1.641	1.517
		LR	0.777	1.197	0.784	1.083	2.180
		FDR	0.881	0.981	0.854	1.252	2.543
AM	BP	R	0.614	2.835	0.594	2.328	1.504
		LR	0.745	1.382	0.728	1.816	1.891
		FDR	0.814	1.413	0.825	1.305	2.377
	SVR	R	0.678	1.890	0.644	2.200	1.599
		LR	0.790	1.469	0.770	1.479	2.075
		FDR	0.837	1.222	0.831	1.228	2.262
	RF	R	0.698	1.485	0.687	1.891	1.798
		LR	0.779	1.538	0.786	1.569	2.183
		FDR	0.924	1.029	0.892	1.071	2.911



(a) AM 最佳反演模型结果



(b) CK 最佳反演模型结果

图 4 接菌条件下叶绿素反演结果

Fig.4 Chlorophyll retrieval results under the condition of microbial reclamation

2.3 豆禾不同混播比例下沙打旺叶绿素的高光谱反演

对不同混播比例下的植物光谱进行建模,得到反演精度对比结果见表5。在1:3比例下,采用BP神经网络方法对FDR所建模型的反演精度最高,训练集 $R^2 = 0.890$;其测试集的 $R^2 = 0.899$, $RMSE = 1.843$, $RPD = 2.652$,表明该模型对叶绿素含量具有良好的预测能力。在1:2比例条件下,反演精度最好的模型同样为基于BP神经网络方法对FDR所建立的模型,测试集 $R^2 = 0.856$, $RMSE = 1.141$, $RPD = 2.706$ 。而在1:1和2:1条件下,反演精度最好的模型均为使用RF回归对FDR建立的模型,其测试集的 R^2 、 $RMSE$ 、 RPD 分别为0.842, 2.570, 2.189和0.850, 2.276, 2.410。将1:1、1:2、1:3、2:1四种处理下的最佳反演模型得到的预测值和实际测得的真实值进行对比,得到的结果如图5所示。

表5 不同混播比例下叶绿素含量反演精度对比

Table 5 Comparison of inversion accuracy of chlorophyll content under different mixed sowing ratios

不同混播比例	光谱模型方法	光谱指标	训练集		测试集		
			R^2	RMSE	R^2	RMSE	RPD
豆科:禾本科 1:1	BP	R	0.700	3.851	0.733	4.156	1.545
		LR	0.779	3.630	0.776	3.505	2.012
		FDR	0.832	2.956	0.806	2.491	2.249
	SVR	R	0.784	3.194	0.702	3.082	1.756
		LR	0.653	3.888	0.674	3.560	1.665
		FDR	0.766	2.649	0.703	2.697	1.862
	RF	R	0.797	2.359	0.768	2.564	2.103
		LR	0.855	3.095	0.837	3.114	1.944
		FDR	0.864	2.262	0.842	2.570	2.189

续表

不同混播比例	光谱模型方法	光谱指标	训练集		测试集			
			R^2	RMSE	R^2	RMSE	RPD	
豆科:禾本科 1:2	BP	R	0.699	1.882	0.690	2.316	1.839	
		LR	0.777	2.034	0.708	2.227	1.839	
		FDR	0.862	1.551	0.856	1.141	2.706	
	SVR	R	0.681	2.815	0.660	3.057	1.487	
		LR	0.703	2.798	0.689	2.336	1.790	
		FDR	0.753	1.705	0.727	1.932	1.958	
	RF	R	0.738	2.497	0.718	2.136	1.878	
		LR	0.740	2.651	0.719	2.823	1.550	
		FDR	0.821	1.359	0.847	1.710	2.504	
	豆科:禾本科 1:3	BP	R	0.795	2.149	0.758	2.196	1.897
			LR	0.805	2.134	0.814	2.475	2.098
			FDR	0.890	1.637	0.899	1.843	2.652
SVR		R	0.625	2.927	0.619	3.273	1.548	
		LR	0.725	2.983	0.734	2.906	1.693	
		FDR	0.733	3.231	0.716	3.625	1.799	
RF		R	0.871	2.664	0.848	3.004	2.404	
		LR	0.793	3.230	0.745	3.061	1.948	
		FDR	0.781	2.192	0.786	2.652	1.928	
豆科:禾本科 2:1		BP	R	0.775	2.659	0.721	3.049	1.924
			LR	0.832	2.008	0.801	2.200	2.210
			FDR	0.848	2.227	0.811	2.007	2.360
	SVR	R	0.717	2.767	0.702	3.077	1.845	
		LR	0.745	2.685	0.747	2.635	1.987	
		FDR	0.766	2.327	0.747	2.884	1.763	
	RF	R	0.797	2.320	0.788	2.646	2.221	
		LR	0.855	2.724	0.832	2.182	2.262	
		FDR	0.870	1.961	0.850	2.276	2.410	

指标FDR相比于R、LR具有更高的精度。在同一处理、同一方法下,测试集中除去1:3比例下使用SVR方法对FDR所建立的模型精度小于LR,使用RF方法对FDR所建立的模型精度小于R,其余基于指标FDR所建立的模型精度均更高。与RF、BP神经网络两种方法相比,使用SVR所建立的反演模型精度较差, R^2 均未超过0.750。

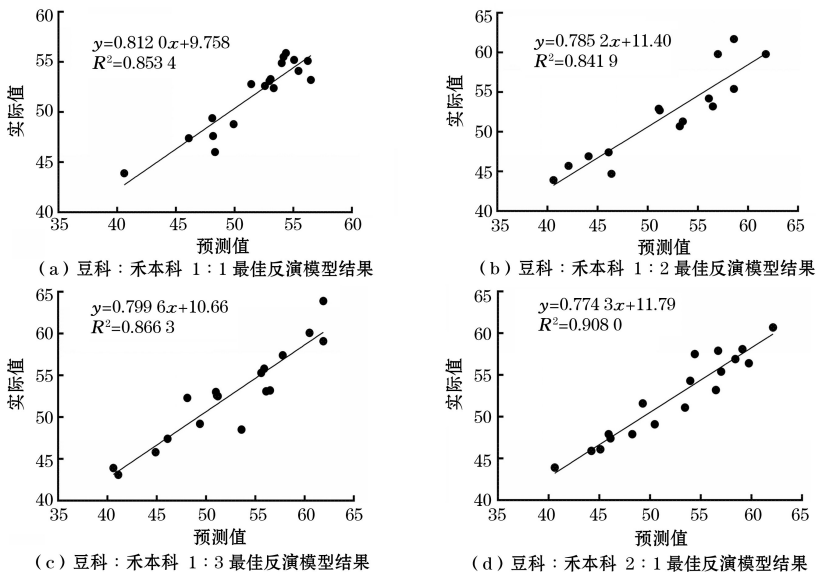


图5 不同混播比例下叶绿素反演结果

Fig.5 Chlorophyll inversion results under different mixed sowing ratios

3 讨论

已有大量的研究证明接种 AM 真菌能够提高植物叶绿素含量并促进植物生长^[1,11-12]。也有试验表明,豆禾的不同种植比例对植物生长也有影响^[4,13]。目前已有学者将微生物复垦作用和高光谱技术结合起来^[14-16],但关于豆禾不同种植比例对植物光谱影响的研究较为缺乏。沙打旺作为常见的牧草植物,根系发达、入土深,是许多学者研究的热点^[17]。然而从高光谱技术的角度上,却很少有人涉及。本文从估测叶绿素含量入手,探究了在微生物复垦及不同种植比例对沙打旺光谱曲线的影响。

对光谱进行变换处理,可减少外界因素对光谱信息的干扰,目前已有大量学者对植物的光谱特征曲线做了不同的变换处理,得到了比只使用原始光谱曲线进行预测目标变量更好的精度。本文在对 R、LR、FDR 3 种光谱变换指标进行建模分析时,发现 FDR 建立的模型精度要优于其余两种指标,这与于雷等^[16]在对土壤有机质含量进行光谱估算时得到的结论一致。

回归分析旨在估计目标变量与光谱响应之间的特定关系,常用的方法主要有逐步多元线性回归^[18-19]、偏最小二乘回归^[20-21]、BP 神经网络回归^[22-23]、支持向量机回归^[24-25]、随机森林回归^[15,21]等。本文采用 BP 神经网络回归、支持向量机回归(SVR)、随机森林回归(RF)对沙打旺叶绿素含量进行估算,发现微生物复垦条件下建立的对照区和接菌区的反演模型,使用 RF 方法的精度最好。这与 SUN Jinhua 等^[15]对玉米进行光谱反演时得到的结论有所不同,分析其原因可能是玉米和沙打旺属不同科的植物,其光谱曲线存在差异,进而导致叶绿素反演建模的表现不一致。这一推测还需进一步采用其他种类的豆科植物进行验证。在不同种植比例条件下,1:1 和 2:1 小区使用 RF 方法建模精度最好,1:2 和 1:3 小区中使用 BP 神经网络回归建模精度比较高。

无论在何种处理下反演得到的模型,其测试集的 R^2 均小于 0.9,部分模型 R^2 甚至在 0.5~0.6 区间。分析其原因可能是野外不可控的因素较多,导致光谱信息采集不完整,加之在建立不同比例的模型时,用到的样本数量有限,影响了精度。因此,如何降低野外环境的干扰,提高模型精度,是后续需重点研究的问题。此外,如何将本研究中得到的光谱

反演模型运用到其他试验中,以预测叶绿素含量,仍需大量试验数据支持与进一步验证。

4 结论

(1) 接种 AM 真菌提高了叶绿素含量,使得沙打旺在对照和接菌两种不同处理下的光谱表现出明显差异。尽管不同种植比例对叶绿素含量未造成显著性差异,但 1:2 比例对叶绿素含量的提升作用更明显。

(2) 对原始光谱曲线(R)求倒数之对数(LR)和一阶微分(FDR)是两种常见的光谱变换处理方法。与 R 相比,LR、FDR 在不同程度上提高了建模精度,其中 FDR 的建模精度是 3 种光谱指标中最好的。

(3) 在微生物复垦条件下,对照区和接菌区采用 RF 回归建立的模型精度最高,训练集的 R^2 分别达到了 0.854, 0.892。而在不同种植比例条件下,1:2 小区和 1:3 小区的样本使用 BP 神经网络回归建立的模型精度高, R^2 分别是 0.856, 0.899; 1:1 小区和 2:1 小区的光谱样本则使用 RF 回归建立的模型精度最好, R^2 分别是 0.842, 0.850。

参考文献(References):

- [1] 毕银丽,解琳琳.丛枝菌根真菌与深色有隔内生真菌生态修复功能与作用[J].微生物学报,2021,61(1):58-67.
BI Yinli, XIE Linlin. Functions of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes in ecological restoration [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(1): 58-67.
- [2] 王浩,方燕,刘润进,等.丛枝菌根中养分转运、代谢、利用与调控研究的最新进展[J].植物生理学报,2018,54(11): 1645-1658.
WANG Hao, FANG Yan, LIU RunJin, et al. Recent advances in the studies of nutrient transportation, metabolism, utilization and regulation in arbuscular mycorrhizas[J]. Plant Physiology Journal, 2018, 54(11): 1645-1658.
- [3] 毕银丽,吴福勇,武玉坤.丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用[J].生态学报,2005(8):2068-2073.
BI Yinli, WU Fuyong, WU Yukun. Application of arbuscular mycorrhizas in ecological restoration of areas affected by coal mining in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(8):2068-2073.
- [4] 张永亮,于铁峰,郝凤,等.施肥与混播比例对豆禾混播牧草产量及氮磷钾利用效率的影响[J].草业学报,2020,29(11): 91-101.
ZHANG Yongliang, YU Tiefeng, HAO Feng, et al. Effects of fertilization and legume-grass ratio on forage yield and NPK utilization efficiency [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 91-101.

- [5] 杨峰,张勇,谌俊旭,等.高光谱数据预处理对大豆叶绿素密度反演的作用[J].遥感信息,2017,32(4):64-69.
YANG Feng, ZHANG Yong, CHEN Junxu, et al. Effects of hyperspectral data pretreatment on model inversion of soybean chlorophyll density [J]. Remote Sensing Information,2017,32(4):64-69.
- [6] 陈书琳,毕银丽,齐礼帅,等.接种菌根大豆叶绿素含量差异的光谱特征分析[J].中国农业大学学报,2014,19(2):125-130.
CHEN Shulin, BI Yinli, QI Lishuai, et al. Hyperspectral characteristics and estimation for chlorophyll content of soybean inoculated with AMF [J]. Journal of China Agricultural University,2014,19(2):125-130.
- [7] 龚云丽,胡晶晶,宋子恒,等.接种 AM 真菌对东部草原矿区不同配比黑黏土的玉米光谱反演[J].煤炭学报,2019,44(12):3797-3806.
GONG Yunli, HU Jingjing, SONG Ziheng, et al. Spectral inversion of maize with different ratios of black clay in the eastern mining area by inoculation with AM fungi [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(12):3797-3806.
- [8] 郗欣,齐雁冰,刘姣姣,等.基于室内高光谱数据的多种类型土壤有机质估算模型比较[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):109-116+124.
QIE Xin, QI Yanbing, LIU Jiaojiao, et al. Comparison of multiple estimation models of soil organic matter based on laboratory hyperspectral reflectance in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 109-116+124.
- [9] 傅邦杰,牛瑞卿,王春胜.丹江口库区土壤镍含量高光谱反演方法[J].遥感信息,2021,36(3):44-49.
FU Bangjie, NIU Ruiqing, WANG Chunsheng. Soil nickel metal content estimation based on hyper-spectrum in Danjiangkou reservoir area [J]. Remote Sensing Information,2021,36(3):44-49.
- [10] ROSSEL R A V, MCGLYNN R N, MCBRATNEY A B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. Geoderma, 2006,137(1/2):70-82.
- [11] 苗春光,杨惠惠,毕银丽,等.丛枝菌根真菌与沙棘对露天矿排土场的联合改良效应[J].煤田地质与勘探,2021,49(2):202-206.
MIAO Chunguang, YANG Huihui, BI Yinli, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and Hippophae rhamnoides on the improvement of the dump of open-pit coal mine in the eastern grassland[J]. Coal Geology & Exploration,2021,49(2):202-206.
- [12] 陈书琳.微生物复垦中植物及土壤理化参数的高光谱反演研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
CHEN Shulin. Hyperspectral inversion of physical and chemical parameters of plants reclaimed with microorganism and its soil [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing,2014.
- [13] 尚志,解琳琳,胡钦程,等.露天矿排土场不同草本种植模式和接种 AMF 对植被生长和土壤改良的作用[J].现代农业科技,2021(9):168-172.
SHANG Zhi, XIE Linlin, HU Qincheng, et al. Effects of different herbage planting patterns and AMF inoculation treatments on vegetation growth and soil improvement in opencast coal mine dump [J]. Modern Agricultural Science and Technology,2021(9):168-172.
- [14] 毕银丽,龚云丽,杨惠惠.微生物复垦区接菌沙棘叶绿素含量光谱估测[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):190-196.
BI Yinli, GONG Yunli, YANG Huihui. Spectrum evaluation on chlorophyll content of Hippophae rhamnoides inoculated fungi in microbial reclamation areas [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2021,50(1):190-196.
- [15] SUN Jinhua, YANG Liu, YANG Xitian, et al. Using spectral reflectance to estimate the leaf chlorophyll content of maize inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under water stress [J]. Frontiers in Plant Science,2021(12):646173.
- [16] 于雷,洪永胜,耿雷,等.基于偏最小二乘回归的土壤有机质含量高光谱估算[J].农业工程学报,2015,31(14):103-109.
YU Lei, HONG Yongsheng, GENG Lei, et al. Hyperspectral estimation of soil organic matter content based on partial least squares regression [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 103-109.
- [17] 齐宝林,高阳,于洪柱,等.不同栽培模式下沙打旺对松嫩盐碱退化草甸改良效果[J].北方园艺,2019(23):80-85.
QI Baolin, GAO Yang, YU Hongzhu, et al. Effect of Astragalus adsurgens under different cultivation patterns on improving songnen degraded meadow [J]. Northern Horticulture,2019(23):80-85.
- [18] 龚云丽,毕银丽,胡晶晶,等.接种 AM 真菌对玉米生长的影响及叶片全氮含量的高光谱估测[J].环境工程,2020,38(5):210-214.
GONG Yunli, BI Yinli, HU Jingjing, et al. Effect of inoculation with AM fungi on maize growth and hyperspectral estimation of total nitrogen content in maize leaves [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(5): 210-214.
- [19] 纪童,王波,王占军,等.草坪草叶绿素高光谱估测模型的建立及 Pb²⁺胁迫下的反演研究[J].草地学报,2020,28(3):675-683.
JI Tong, WANG Bo, WANG Zhanjun, et al. Hyperspectral-based estimation on the chlorophyll content of turfgrass [J]. Acta Agrestia Sinica,2020,28(3):675-683.

- [20] 褚武道,陈文惠,艾金泉,等.基于偏最小二乘法的樟树叶片叶绿素含量高光谱估算[J].福建师范大学学报(自然科学版),2014,30(1):65-70+90.
CHU Wudao, CHEN Wenhui, AI Jinqian, et al. Hyperspectral estimation of camphor tree leaf chlorophyll content based on partial least squares regression[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2014, 30(1): 65-70+90.
- [21] 肖志云,徐新宇.基于偏最小二乘与随机森林的土壤盐含量反演研究[J].安徽农业科学,2021,49(8):10-15+25.
XIAO Zhiyun, XU Xinyu. Research on inversion of soil salt content based on partial least squares combined with random forest[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(8): 10-15+25.
- [22] 郭云开,许敏,张晓炯,等.结合 PRO-4SAIL 和 BP 神经网络的叶绿素含量高光谱反演[J].测绘通报,2020(3):21-24.
GUO Yunkai, XU Min, ZHANG Xiaojiong, et al. Chlorophyll hyperspectral inversion with PRO-4SAIL and BP neural networks[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(3): 21-24.
- [23] 刘文雅,潘洁.基于神经网络的马尾松叶绿素含量高光谱估算模型[J].应用生态学报,2017,28(4):1128-1136.
LIU Wenya, PAN Jie. A hyperspectral assessment model for leaf chlorophyll content of Pinus massoniana based on neural network[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1128-1136.
- [24] 国佳欣,朱青,赵小敏,等.不同土地利用类型下土壤有机碳含量的高光谱反演[J].应用生态学报,2020,31(3):863-871.
GUO Jiaxin, ZHU Qing, ZHAO Xiaomin, et al. Hyperspectral inversion of soil organic carbon content under different land use types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 863-871.
- [25] 张娟娟,席磊,杨向阳,等.砂姜黑土有机质含量高光谱估测模型构建[J].农业工程学报,2020,36(17):135-141.
ZHANG Juanjuan, XI Lei, YANG Xiangyang, et al. Construction of hyperspectral estimation model for organic matter content in Shajiang black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17): 135-141.