DOI:10. 19431/j. cnki. 1673-0062. 2022. 01. 004

基于遥感高光谱的铀胁迫下紫竹梅叶片生化指标建模研究

王正庆[1,2,3],肖　策[1],车永飞[4*],李天鹏[5],李　策[1],
丁华栋[1],宋　静[1],贺海洋[1],马　艳[1]

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室,江西 南昌 330013;3. 稀有金属矿产开发与废物地质处置技术湖南省重点实验室,湖南 衡阳 421001;4. 核工业北京地质研究院 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室,北京 100029;5. 枣庄学院 城市与建筑工程学院,山东 枣庄 277160)

摘　要:为揭示铀胁迫下紫竹梅叶片遥感光谱参量对生化指标的指示能力,室内设置了 8 个不同铀浓度的培养液,利用 Pearson 相关系数法、逐步回归分析法等,建立紫竹梅叶片原始光谱、一阶导数、二阶导数等光谱参量与叶片叶绿素、丙二醛、过氧化酶、铀含量等生化指标之间的关系模型。研究结果表明,初、中、晚三个时期的紫竹梅叶片光谱曲线差距不明显,“红谷”“红边”较为突出;通过 Pearson 相关系数法筛选出紫竹梅叶片生化指标与光谱参量的相关性强弱关系,发现生化指标与光谱参量的相关性均属于中度相关;分别建立了叶绿素含量、丙二醛含量、过氧化酶含量、叶片铀含量的逐步回归模型,其中,叶片铀含量估测模型与叶绿素含量估测模型的构建效果较好,R^2 分别为 0. 486、0. 442;过氧化物酶活性、丙二醛含量模型的精度检验效果较好,R^2 分别为 0. 645、0. 580。

关键词:紫竹梅;叶片;高光谱;铀;生化指标
中图分类号:X53　　**文献标志码**:A
文章编号:1673-0062(2022)01-0025-07

Study on Physiological and Biochemical Characteristics of Leaves of Purple Bamboo Plum Under Uranium Stress Based on Remote Sensing Hyperspectral Data

WANG Zhengqing[1,2,3], XIAO Ce[1], CHE Yongfei[4*], LI Tianpeng[5], LI Ce[1], DING Huadong[1], SONG Jing[1], HE Haiyang[1], MA Yan[1]

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang,

---

收稿日期:2021-11-02
基金项目:装备预研重点实验室基金项目(6142A010403);东华理工大学核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(NRE1910);湖南省自然科学基金项目(2020JJ5481)
作者简介:王正庆(1983—),男,讲师,博士,主要从事铀矿地质及地学信息处理方面的研究。E-mail:wzhq20082008@126. com。*通信作者:车永飞(1982—),女,高级工程师,博士,主要从事高光谱遥感方向的研究。E-mail:cheyongfei@163. com

Hunan 421001, China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3. Hunan Key Laboratory of Rare Metal Minerals Exploitation and Geological Disposal of Wastes, Hengyang, Hunan 421001, China; 4. National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology, Beijing Research Institute of Uraniuim Geology, Beijing 100029, China; 5. College of City and Architecture Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang, Shandong 277160, China)

Abstract: In order to reveal the indication ability of remote sensing spectral parameters of purple bamboo plum leaves to biochemical indexes under uranium stress, eight culture solutions with different uranium concentrations were set up indoors. Pearson correlation coefficient method and stepwise regression analysis were used to establish the relationship model between spectral parameters such as original spectrum, first derivative and second derivative of purple bamboo plum leaves and other biochemical indexes such as leaf chlorophyll, malondialdehyde, peroxidase and uranium content. The results showed that there was no obvious difference in the spectral curves of purple bamboo plum leaves in the early, middle and late stages, and the "Red Valley" and "red edge" were more prominent, it is found that the correlations between biochemical indicators and spectral parameters are all medium-level correlations; The correlation between biochemical indexes and spectral parameters of purple bamboo plum leaves was screened by Pearson correlation coefficient method; The stepwise regression models of chlorophyll content, malondialdehyde content, peroxidase content and leaf uranium content were established respectively. The results of leaf uranium content estimation model and chlorophyll content estimation model were better, and R^2 were 0.486 and 0.442 respectively; The accuracy test results of peroxidase activity and malondialdehyde content model were good, R^2 were 0.645 and 0.580 respectively.

key words: purple bamboo plum; leaf; hyperspectral; uranium; biochemical indexes

0　引　言

在植物生长过程中,可能会遭受重金属、水分、大气等非生物因素的胁迫作用[1-3]。目前,在矿产勘查、土壤重金属污染监测领域,利用高光谱遥感技术监测植物吸收成矿元素、重金属元素的相关研究成果丰硕[2-5]。在光谱特征研究方面,如,受重金属污染的植物在 400～900 nm 光谱曲线变化最为显著,同时重金属含量越高,叶绿素最大吸收谷越浅[6-7];某铀尾矿马先蒿在 680 nm 位置红谷变浅,绿峰位置见小吸收谷[8];随镉、铜、锌离子浓度的升高,脐橙新叶、玉米叶及小麦冠层的分蘖期和拔节期光谱反射率稍增高[9-11]。在光谱值与生化参数关系模型研究方面,国外研究者,利用混合人工神经网络、随机森林、支持向量机等机器学习算法建模,估测苹果叶、山葵叶叶绿素含量[12-13];国内的研究者,利用逐步回归分析法建模,估测烤烟、冬小麦、小白菜等的总氮、镉、叶绿素、胡萝卜素含量等[14-17];国内研究者还利用神经元网络、随机森林等机器学习法建模,估测苹果、猕猴桃的含水率、叶绿素含量等[18-19]。由文献调研可见,以铀作为胁迫元素方面研究相对较少,又因紫竹梅易于室内培养,故本文以室内培养紫竹梅为研究对象,旨在研究铀胁迫下的紫竹梅叶片高光谱特征、生化指标,并利用高光谱参数反演生化指标建模,为高光谱遥感植物铀吸附监测提供技术参考。

1　材料与方法

1.1　植物培养设计

本实验在南华大学稀有金属矿产开发与废物地质处置技术湖南省重点实验室进行。实验植物选用处于同一生长期的紫竹梅植株幼苗。实验采用土培方式,培养所用塑料盆规格:16 cm(盆口直径)×12 cm(盆底直径)×13 cm(盆高),控制室温(25±5) ℃,湿度 70%～80%,光照采用蓝红光为

1∶5 的灯带;实验溶液选用改进的 Hoagland's 营养液,根据铀地壳丰度(2.7×10^{-6})、铀矿品位(地浸砂岩铀矿工业品位 100×10^{-6};硬岩铀矿边界品位 300×10^{-6},工业品位 500×10^{-6})及《铀矿冶辐射防护和环境保护规定 GB 23727—2020》中铀废水排放限值 50 mg/L,并考虑植物的耐受性等因素,设置 8 组铀质量浓度:0 mg/L(对照组)(UL0)、0.05 mg/L(UL1)、1 mg/L(UL2)、2 mg/L(UL3)、10 mg/L(UL4)、50 mg/L(UL5)、100 mg/L(UL6)、200 mg/L(UL7),按实验溶液浓度大小顺序,每组设置 3 个平行样,共 24 盆,盆间留足空间,消除边际效应的干扰;经过预实验发现,紫竹梅生长相对较慢,铀胁迫下紫竹梅 7 d 左右才正常生长,故将紫竹梅生长期分为初期、中期及晚期,每期间隔 10 d,初期开始时间设定为正式培养后的第 7 天,分期采样并测定反射率光谱值和叶绿素含量。

1.2　数据测定方法

1.2.1　叶片光谱测定

光谱测量在室内进行,采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec Pro 便携式分光辐射光谱仪测量,波段范围为 350～2 500 nm,采样间隔为 1.4 nm@350～1 000 nm,2 nm@1000～2 500 nm,数据间隔为 1 nm。对于 24 盆样品,测定光谱前需要用内置标准参考白板进行校正,测定时将探测器探头对准叶片表面,这样每个培养液浓度各时期均选择 3 片叶,先每片叶测量 20 条光谱曲线,取平均值,再将 3 片叶的光谱值取平均,作为该时期该浓度下叶片的最终光谱值。叶片光谱测量与叶片采样同步进行。

1.2.2　叶片生理生化指标测定

待反射率光谱测量完毕,随即沿植物梗部将叶片摘下,装入自封塑料袋,并将其放入恒温箱,避免组分流失,同一时期的叶片样品收集完整后,选用北京北分瑞利分析仪器公司生产的 UV-9600 紫外可见光分光光度计测定丙二醛含量、叶绿素含量、过氧化物酶活性,另外选用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定叶片铀含量。

丙二醛含量使用硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid,TBA)法,采用 UV-9600 紫外可见光分光光度计,在波长 450 nm、532 nm、600 nm 下分别测定吸光度。将上述测定的吸光度值利用相关公式计算丙二醛含量,计算公式为:

$$C = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450} \quad (1)$$

式中,A_{450}、A_{532} 及 A_{600} 分别为在 450 nm、532 nm、600 nm 波长下的吸光度;C 为丙二醛物质的量浓度,μmol/L。

叶绿素含量使用乙醇法,采用 UV-9600 紫外可见光分光光度计,在波长 645 nm、663 nm 下分别测定吸光度。将上述测定的吸光度值利用相关公式计算叶绿素含量,计算公式为:

$$C_a = 12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645} \quad (2)$$

$$C_b = 22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663} \quad (3)$$

$$C_{总} = C_a + C_b \quad (4)$$

$$A = C \times V \times N/W \quad (5)$$

式中:A_{645} 及 A_{663} 分别表示在 645 nm、663 nm 波长下的吸光度;C_a 及 C_b 分别为叶绿素 a、b 质量浓度,mg/L;$C_{总}$表示叶绿素总浓度,mg/L;A 为叶绿素含量,mg/g;C 为叶绿素 a 或叶绿素 b 的质量浓度,mg/L;V 表示提取液的体积,mL;N 表示稀释倍数,W 表示样品鲜重,g。

过氧化物酶活性使用愈创木酚法,采用紫外-可见光分光光度计测定,在波长 470 nm 下每隔 30 s 测定一次吸光度。将上述测定的吸光度值利用相关公式计算过氧化物酶活性,计算公式为:

$$U = (\Delta A \times V_1)/(0.01 \times V_2 \times \Delta t \times W) \quad (6)$$

式中:ΔA 为反应阶段的吸光度差;Δt 为 ΔA 反应时间,min,即 0.5 min;V_1 为样品液总体积,mL;V_2 为测定时样品液用量,mL;W 为样品鲜重,g。

叶片样品经烘干、烧灰、消解、过滤等操作后得到待测液,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定叶片铀含量。

1.3　数据处理方法

1.3.1　高光谱数据分析

高光谱数据采集时,因外界环境、仪器噪声等的干扰,难免会对光谱产生影响,出现"毛刺"现象,需要对所获取的光谱进行平滑处理[18]。本实验采用 ViewSpecPro5.6 软件读取 ASD 光谱仪获取的紫竹梅单叶高光谱数据,进行平滑、平均、微分计算等处理,得到原始反射率、一阶微分反射率、二阶微分反射率光谱曲线。本文选用 Pearson 相关系数法对紫竹梅叶片生理生化指标和高光谱曲线进行相关性分析,从而构建逐步回归方程。其中,Pearson 相关系数计算、逐步回归模型构建均采用 MATLAB 软件。

1.3.2　建模方法

皮尔森相关系数(pearson correlation coefficient)作为计算变量之间线性相关性的一种统计量,能够反映两个变量 X 与 Y 之间线性相关

关系密切程度,计算方式见式(7)。Pearson 相关系数一般用 r 表示,r 取值介于 -1 和 $+1$ 之间,当 $r>0$ 时,两个变量呈正相关,即变量 X 随变量 Y 的增大而增大,当 $r<0$ 时,两个变量呈负相关,即变量 X 随变量 Y 的增大而减小。其中,以相关系数绝对值判断两个变量间的相关程度,$|r|\to 1$ 时认为两个变量之间线性关系越强,$|r|\to 0$ 时认为两个变量之间线性关系越弱,其中 $|r|\geq 0.8$ 时可视为高度相关,$0.5\leq |r|<0.8$ 时可视为中度相关,$0.3\leq |r|<0.5$ 时可视为低度相关,$|r|<0.3$ 时可视为不相关[20]。

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2\cdot\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}} \tag{7}$$

式中:n 为样品量;X_i 和 Y_i 为第 i 组两变量数据的实测值;$\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 为两变量数据平均值。

回归分析是一种常见的数学分析方法,可有效建立因变量与自变量之间的联系,当变量不少于2个时,称为多元回归分析。逐步回归分析是多元回归分析的一种,该方法不仅可以较快地获取对因变量影响最大的能通过回归系数检验的自变量子集,而且可以保证回归效果,具有较好的拟合效果[21]。

模型建立后,通过对比决定系数 R^2、均方根误差 RMSE 等参数筛选出最佳模型,其中 R^2 用于判断模型拟合程度,RMSE 用于检验估测模型的可靠程度[22],计算方式为:

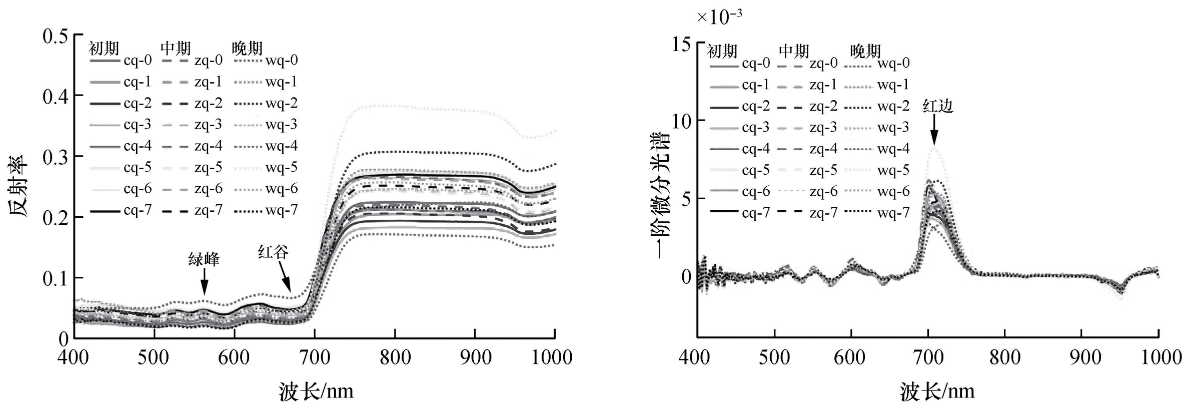
$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-y_i)^2} \tag{8}$$

式中,n 为样本量;y_i 为实验测定叶绿素含量值;$\hat{y}_i$ 为叶绿素含量估测值。

2 结果与分析

2.1 不同铀浓度胁迫下紫竹梅叶片高光谱反射率特征

铀胁迫下紫竹梅初、中、晚三个时期的叶片高光谱反射率大小均小于0.4,在700 nm附近有明显的“红谷”,但大小关系不明显(图1(a))。由铀胁迫下紫竹梅一阶导数叶片高光谱曲线可见,各期紫竹梅叶片一阶导数高光谱曲线相似,在705 nm左右有一个明显的峰值“红边”,但“红边”位置差异稍大(图1(b))。



(a)高光谱曲线　(b)一阶导数高光谱曲线

图1 铀胁迫下紫竹梅叶片高光谱曲线及一阶导数高光谱曲线

Fig. 1 Spectral curve of purple bamboo plum leaves under uranium stress and first derivative spectral curve

2.2 不同铀浓度胁迫下紫竹梅叶片生理生化指标特征

紫竹梅叶片叶绿素含量、丙二醛含量、过氧化物酶活性变化见表1。随铀浓度升高,初期紫竹梅叶片叶绿素含量呈波浪形变化,中期、晚期叶绿素含量总体呈下降趋势,最高值出现在中期质量浓度为0.05 mg/L时,为1.376 mg/g;随铀质量浓度升高,初期紫竹梅叶片丙二醛含量基本呈波浪型变化,仅在200 mg/L时陡增,为1.049 μmol/L,中期、晚期丙二醛含量总体上则呈下降趋势;随铀浓度升高,各期紫竹梅叶片过氧化物酶活性均呈先上升后下降的趋势,初期、中期最高值均出现在质量浓度为2 mg/L时,分别为407.190 g·min、1 066.143 g·min;晚期最高值出现在质量浓度为

0.05 mg/L 时,为 681.184 g·min。分析紫竹梅叶片铀含量变化(表2)可见,当铀质量浓度升高时,初期紫竹梅叶片铀含量呈上升趋势,最高值出现在质量浓度为 100 mg/L 时,为 0.654 mg/L;中期叶片铀含量呈下降趋势,最高值出现在质量浓度为 0.05 mg/L 时,为 0.030 mg/L;晚期叶片铀含量则呈波浪型变化,最高值出现在质量浓度 50 mg/L 时,为 0.110 mg/L。

表1　不同铀浓度铀胁迫下紫竹梅叶片生理生化指标含量变化

Table 1　Changes of physiological and biochemical indexes of purple bamboo plum leaves at different uranium concentrations under uranium stress

样品	处理浓度/($mg\cdot L^{-1}$)	叶绿素含量/($mg\cdot g^{-1}$)			丙二醛含量/($\mu mol\cdot L^{-1}$)			过氧化物酶活性/(g·min)		
		初期	中期	晚期	初期	中期	晚期	初期	中期	晚期
UL0	0	0.733	1.333	0.580	0.630	0.695	0.673	53.992	194.497	19.223
UL1	0.05	0.724	1.376	0.926	0.447	0.561	0.585	26.456	131.390	681.184
UL2	1	0.605	0.683	0.606	0.448	0.607	0.958	13.157	714.760	43.095
UL3	2	0.659	0.893	0.736	0.771	0.430	0.684	407.190	1 066.143	25.941
UL4	10	0.712	0.639	0.744	0.579	0.582	0.597	107.630	66.211	113.115
UL5	50	0.661	0.445	0.354	0.5320	0.635	0.642	67.045	171.857	32.388
UL6	100	0.756	0.564	0.693	0.236	0.054	0.509	57.736	190.580	21.474
UL7	200	0.587	0.479	0.787	1.049	0.518	0.567	150.298	155.037	41.367

表2　不同铀浓度铀胁迫下紫竹梅叶片铀含量变化

Table 2　Changes of Uranium Content in Purple Bamboo Plum leaves under Different Uranium Concentrations under Uranium Stress

样品	处理浓度/(mg/L)	叶片铀含量/($mg\cdot L^{-1}$)		
		初期	中期	晚期
UL0	0	0.027	0.016	0.012
UL1	0.05	0.086	0.030	0.044
UL2	1	0.027	0.024	0.013
UL3	2	0.033	0.019	0.008
UL4	10	0.047	0.017	0.008
UL5	50	0.150	0.022	0.110
UL6	100	0.654	0.009	0.006
UL7	200	0.331	0.009	0.046

2.3　紫竹梅叶片生理生化指标与高光谱参数相关性

紫竹梅叶片相关生理生化指标与各高光谱参数最大相关性见表3。由表3可见,一阶导数、二阶导数与紫竹梅叶片生理生化指标的相关性总体上比原始高光谱高且均通过显著性检验(显著性水平 $p<0.05$)。其中,丙二醛含量与二阶导数 D^2_{617} 相关性较高,相关系数 $r=-0.537$,呈中度负相关;叶绿素含量与一阶导数 D_{654} 相关性较高,相关系数 $r=-0.627$,呈中度负相关;过氧化物酶活性与一阶导数 D_{492} 相关性较高,相关系数 $r=-0.596$,呈中度负相关;叶片铀含量与二阶导数 D^2_{407} 相关性较高,相关系数 $r=-0.553$,呈中度负相关。可见,相关生理生化指标与各高光谱参数最大相关性均为中度负相关。

表3　基于敏感高光谱特征参数与铀胁迫下紫竹梅叶片生理生化指标的最大相关系数

Table 3　Based on the maximum correlation coefficients of sensitive spectral characteristic parameters and the physiological and biochemical indexes of purple bamboo plum leaves under uranium stress

	丙二醛含量	叶绿素含量	过氧化物酶活性	叶片铀含量
原始高光谱(R)	R_{698}	R_{403}	R_{413}	R_{712}
相关系数(r)	0.293	0.181	0.313	0.280
一阶导数(D)	D_{615}	D_{654}	D_{492}	D_{518}
相关系数(r)	0.507①	−0.627②	−0.596②	0.518②
二阶导数(D^2)	D^2_{617}	D^2_{612}	D^2_{971}	D^2_{407}
相关系数(r)	−0.537②	−0.543②	0.440①	−0.553②

①表示通过0.05显著性检验,样本数量 $n=24$。

②表示通过0.01显著性检验样本数量 $n=24$。

2.4　紫竹梅叶片生理生化指标与高光谱参数模型构建及精度检验

以 R、D、D^2 高光谱参数为自变量,以叶片各

生理生化指标为因变量,选取 16 组样本数据构建逐步回归模型(表 4),剔除差异太大的异常数据组,选择剩余 6 ~ 8 组样本作为验证数据(图 2)。由研究结果可见,叶片铀含量估测模型的决定系数 $R^2=0.486$,均方根误差 $R_{MSE}=0.064$,显著性水平 $p=0.013$,该模型 R^2 最大且 R_{MSE} 最小,其次是叶绿素含量估测模型,$R^2=0.442$,$R_{MSE}=0.167$,$p=0.005$,相比之下,丙二醛含量估测模型的 $R^2=0.312$,$R_{MSE}=0.176$,$p=0.025$,精度均低于其他估测模型。从紫竹梅生化参数逐步回归反演模型实测值与预测值关系图可见(图 2),丙二醛含量和过氧化物酶活性验证集的 R^2 较高,分别为 0.580、0.645,叶绿素含量验证集 R^2 最低,为 0.335。

表 4　紫竹梅叶片生理生化指标与高光谱参量的逐步回归模型参数表

Table 4　Parameter table ofstepwise regression model of leaf physiological and biochemical indexes and spectral parameters of purple bamboo plum leaves

生理生化指标	入选参数		模型方程	样品($n=16$)		
				R^2	R_{MSE}	p
丙二醛含量	x_1	D_{617}^2	$y=-10130.200x_1+0.320$	0.312	0.176	0.025
叶绿素含量	x_1	D_{654}	$y=-3796.600x_1+0.428$	0.442	0.167	0.005
过氧化物酶活性	x_1 x_2	R_{413} D_{492}	$y=7125.970\times x_1-852057\times x_2-215.704$	0.413	179.203	0.032
叶片铀含量	x_1 x_2	R_{712} D_{407}^2	$y=1.835\times x_1-460.220\times x_2-0.089$	0.486	0.064	0.013

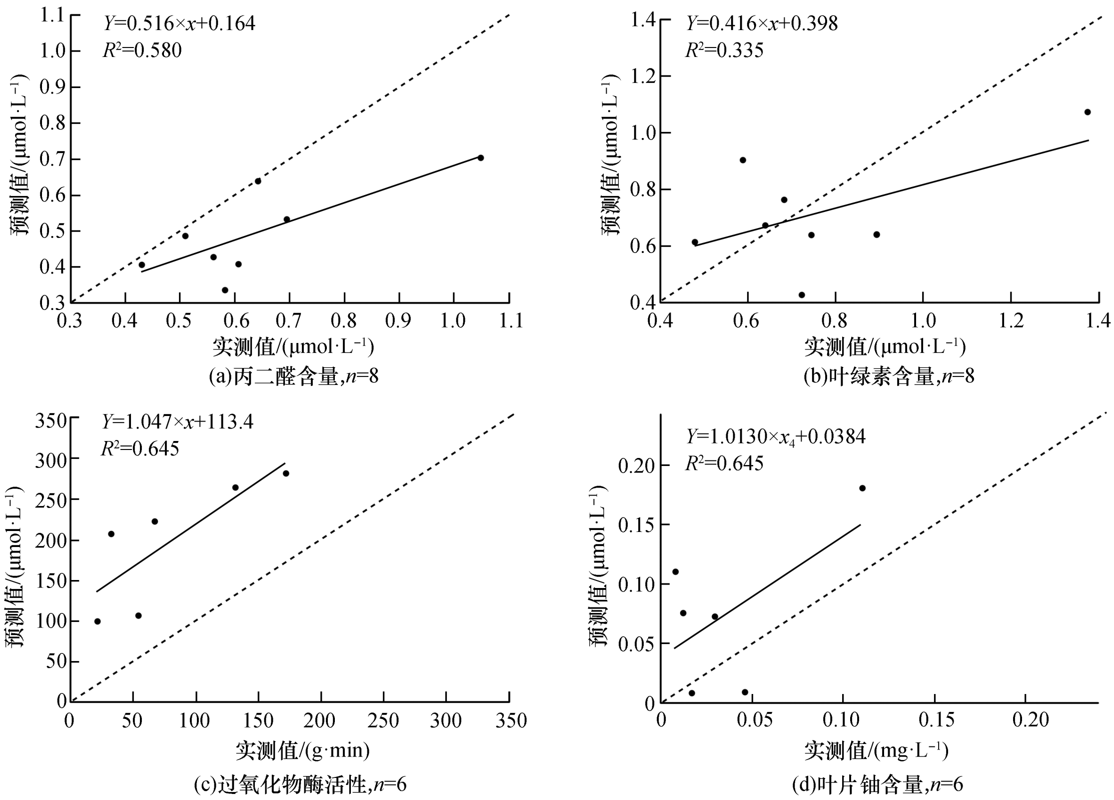


图 2　紫竹梅叶片各生理生化指标逐步回归反演模型实测值与预测值关系图

Fig. 2　Relationship between measured and predicted values of stepwise regression inversion model for physiological and biochemical indexes of purple bamboo plum leaves

3 结　论

本文分析了紫竹梅叶片高光谱数据、相关生化参量特征,构建了基于高光谱数据的生化指标逐步回归估测模型,并进行了模型精度检验,获得结论如下:

1)铀胁迫下紫竹梅叶片初、中、晚3个时期的叶片高光谱反射率均小于0.4,在700 nm附近有明显的“红谷”,但大小关系不明显;各期紫竹梅叶片一阶导数高光谱曲线相似,均在705 nm左右有一个明显的峰值“红边”,但“红边”位置差异稍大。

2)随铀浓度升高,初期紫竹梅叶片叶绿素含量、丙二醛含量呈波浪型变化,中期、晚期总体上则呈下降趋势;随铀浓度升高,各期紫竹梅叶片过氧化物酶活性均呈先上升后下降的趋势;当铀浓度升高时,初期紫竹梅叶片铀含量呈上升趋势,中期叶片铀含量呈下降趋势,晚期叶片铀含量则呈波浪形变化。

3)一阶导数、二阶导数高光谱与紫竹梅叶片生理生化指标的相关性总体上比原始高光谱高,相关生理生化指标与各高光谱参数最大相关性均为中度负相关。

4)以原始高光谱、一阶导数、二阶导数为自变量,以叶片叶绿素含量、丙二醛含量、过氧化物酶活性、铀含量为因变量构建的逐步回归模型中,叶片铀含量估测模型、叶绿素含量估测模型效果较好,R^2 分别为0.486和0.442;模型精度检验中过氧化物酶活性、丙二醛含量模型的拟合效果较好,R^2 分别为0.645和0.580。

参考文献:

[1] 王晓宇,张艳娥,张林生,等.4种非生物胁迫下小麦幼苗表型及可溶性蛋白含量的变化[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):113-117.

[2] 姚天月.铀的富集植物筛选及其对U、Cd的吸收富集特性和生理生化响应研究[D].绵阳:西南科技大学,2016:1-2.

[3] 王平.农作物重金属污染胁迫遥感弱信息增强与计算[D].长春:东北师范大学,2010:1-4.

[4] 谭昌伟,王纪华,黄文江,等.高光谱遥感在植被理化信息提取中的应用动态[J].西北农林科技大学学报,2005,33(5):151-156.

[5] ZHU Y Q,QU Y H,LIU S H. Spectral response of wheat and lettuce to copper pollution[J]. Journal of remote sensing,2014,18(2):335-352.

[6] HOQUE E,HUTZLER P J S. Spectral blue-shift of red edge monitors damage class of beech trees[J]. Remote sensing of environment,1992,39(1):81-84.

[7] SIMS D A,GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species,leaf structures and developmental stages[J]. Remote sensing of environment,2002,81(2):337-354.

[8] 彭玛丽,叶娇珑,何中海,等.基于高光谱数据的铀尾矿植被污染信息分析[J].地理空间信息,2015,13(1):111-114.

[9] 石荣杰,潘贤章,王昌昆,等.污染土壤对脐橙叶片镉含量影响的光谱预测[J].光谱学与光谱分析,2015,35(11):3140-3145.

[10] 郭辉,杨可明,张文文,等.铜铅离子胁迫下玉米污染程度的光谱识别[J].光谱学与光谱分析,2018,38(1):212-217.

[11] 王慧,曾路生,孙永红,等.重金属铜和锌胁迫下的小麦冠层反射光谱特征[J].农业工程学报,2017,33(2):171-176.

[12] RAZIEH P,SAJAD S,MARIO H,et al. Non-destructive estimation of total chlorophyll content of apple fruit based on color feature,spectral data and the most effective wavelengths using hybrid artificial neural network-imperialist competitive algorithm[J]. Plants,2020,9(11):1-14.

[13] REI S,HIROTO Y,HARUMI M,et al. Hyperspectral reflectance sensing for quantifying leaf chlorophyll content in wasabi leaves using spectral pre-processing techniques and machine learning algorithms[J]. Plants,2021,42(4):1311-1329.

[14] 李向阳,刘国顺,杨永锋,等.烤烟叶片高光谱参数与多种生理生化指标关系研究[J].中国农业科学,2007,40(5):987-994.

[15] 冀荣华,郑立华,邓小蕾,等.基于反射光谱的苹果叶片叶绿素和含水率预测模型[J].农业机械学报,2014,45(8):269-275.

[16] 郑东东,李颖,赫晓慧,等.利用不同方法反演冬小麦叶面积指数研究[J].气象与环境科学,2015,38(4):56-60.

[17] 顾艳文,李帅,高伟,等.基于光谱参数对小白菜叶片镉含量的高光谱估算[J].生态学报,2014,45(8):269-275.

[18] 孔维平,毕银丽,李少朋,等.利用高光谱估测干旱胁迫下接菌根菌大豆叶绿素含量[J].农业工程学报,2014,30(12):123-131.

[19] 陈澜,常庆瑞,高一帆,等.猕猴桃叶片叶绿素含量高光谱估算模型研究[J].西北农林科技大学学报,2020,48(6):79-89.

[20] 贾俊平.统计学[M].7版.北京:中国人民大学出版社,2018:238-240.

[21] 刘立祥.线性回归模型中自变量的选择与逐步回归方法[J].统计与决策,2015(21):80-82.

[22] 李宗飞,苏继霞,费聪,等.基于高光谱数据的滴灌甜菜叶绿素含量估算[J].农业资源与环境学报,2020,37(5):761-769.