

罗青青, 黄铁成, 陈蜀江等. 基于光谱反射率的塞威氏苹果虫害等级量化测评[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 798-803.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.04.007

基于光谱反射率的塞威氏苹果虫害等级量化测评

罗青青^{1,2}, 黄铁成^{1,2,3}, 陈蜀江^{1,2}, 陈孟禹⁴, 贾翔^{1,2}, 朱选⁵, 来风兵^{1,2}, 武红敢⁶, 赵文霞⁷, 李春蕾⁷, 姚艳霞⁷

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830054; 2.乌鲁木齐空间遥感应用研究所,新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830054; 3.北京林业大学精准林业重点实验室,北京 100083; 4.苏州科技大学外国语学院,江苏 苏州 215000; 5.莫纳什大学,墨尔本 3800; 6.中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091; 7.国家林业局森林保护学重点实验室,中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,北京 100091)

摘要: 利用光谱技术分析了小吉丁虫危害不同等级的塞威氏苹果的反射光谱特征,并用光谱数据针对塞威氏苹果树的虫害进行量化分析。用新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州巩留县野果林实测 60 条不同虫害等级的塞威氏苹果高光谱数据,分析健康、轻度、中度、重度 4 个虫害等级光谱反射率及一阶微分光谱特征,建立了红边参数,并在 6 个检验参数的基础上,构建了虫害等级的检测模型,并用验证组数据对模型进行精度检验。结果表明:(1)健康状态下的塞威氏苹果光谱反射率较受虫害塞威氏苹果光谱反射率高,受害程度越严重,反射率越低。(2)受虫害塞威氏苹果光谱特征表现为“绿峰”红移;“红边位置”蓝移,尤其是受重度虫害的极为明显;近红外反射峰向短波方向移动。(3)红边比值植被指数 (*RERVI*)、红边斜率 (*RES*)、红边差值植被指数 (*REDVI*)、红边面积 (*REA*) 这 4 个参数与虫害等级呈极显著相关关系,红边归一化植被指数 (*RENDVI*) 及红边位置 (*REP*) 与虫害等级相关性不强。(4)以 *RERVI*、*RES*、*REDVI*、*REA* 这 4 个参数为自变量构成的多元回归模型的检测精度与准确度均为 0.7 以上。因此,通过相关参数及模型可以有效检测小吉丁虫害等级。

关键词: 小吉丁虫; 虫害等级; 塞威氏苹果; 反射率光谱; 量化测评

中图分类号: S432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)04-0798-06

Quantitative evaluation on pest damage levels of *Malus sieversii* based on spectral reflectance

LUO Qing-qing^{1,2}, HUANG Tie-cheng^{1,2,3}, CHEN Shu-jiang^{1,2}, CHEN Meng-yu⁴, JIA Xiang^{1,2}, ZHU Xuan⁵, LAI Feng-bing^{1,2}, WU Hong-gan⁶, ZHAO Wen-xia⁷, LI Chun-lei⁷, YAO Yan-xia⁷

(1.School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2.Urumqi Institute of Space Remote Sensing Applications, Urumqi 830054, China; 3.Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4.School of Foreign Languages, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China; 5.Monash University, Melbourne 3800, Australia; 6.Reacher Institute of Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 7.Key Laboratory of Forest Protection of the State Forestry Administration Research, Institute of Forest Ecology Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

收稿日期:2019-03-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0501503)

作者简介:罗青青(1994-),女,山东招远人,硕士研究生,研究方向为资源环境遥感,(E-mail)415225595@qq.com

通讯作者:陈蜀江,(E-mail)2358223957@qq.com

Abstract: The spectral reflectance characteristics of *Malus sieversii* were analyzed by spectral techniques under different levels of damage by *Agrilus mali Matsumura*, and the spectral data were used to conduct a quantitative analysis on the insect pests of *Malus sieversii* trees. The 60 *Malus sieversii* hyperspectral data with

different pest damage levels in the wild fruit forest of Gongliu County, Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region were used to analyze the spectral reflectance and first-order derivative spectral characteristics of insect pests that were divided into four levels-healthy, mild, moderate and severe, and create red edge parameters. A detection model of pest damage levels was constructed on the basis of six test parameters, and the accuracy of model was tested by the data of verification group. The results showed that the spectral reflectance of *Malus sieversii* under healthy condition was higher than that of *Malus sieversii* damaged by pests, and the more serious the damage was, the lower the reflectivity was. The spectral characteristics of *Malus sieversii* destroyed by pests were that “green peak” position showed red shift, and “red edge position” showed blue shift, especially for the severity level of pests; the near-infrared reflection peaks moved towards the short waves. The red edge ratio vegetation index (*RERVI*), red edge slope (*RES*), red edgedifference vegetation index (*REDVI*) and red edge area (*REA*) were significantly correlated with the pest damage levels, but the correlation between red edge normalized difference vegetation index (*RENDVI*) and red edge position (*REP*) and pest levels was not strong. The detection precision and accuracy of multiple regression model composed of *RERVI*, *RES*, *REDVI* and *REA* as independent variables were above 0.7. Therefore, the pest damage levels of *Agrilus mali Matsumura* can be effectively detected through the establishment of relevant parameters and models.

Key words: *Agrilus mali Matsumura*; pest damage level; *Malus sieversii*; spectral reflectance; quantitative evaluation

伊犁河谷位于新疆西部天山地区,是天山野果林重要组成部分。野果林中的新疆野苹果(*Malus sieversii*),也称为塞威氏苹果,作为特殊的孑遗植物也是中国的独特物种^[1-2],仅仅散布在新疆伊犁周边。而该物种也是当代人工种植苹果的祖先,为中国经济果树资源中仅有的一个天然基因库,同时也是全球野苹果基因库的关键构成之一^[3-5]。

然而自 1993 年苹果小吉丁虫(*Agrilus mali Matsumura*.)出现于新疆之后,这一虫害快速发展,暴发成灾。据新疆伊犁州林业部门调查,2011 年其实际发生的面积约 3 867 hm²,达到了野果林整体面积的 40%。由于苹果小吉丁虫在树枝皮下蛀食危害,生活隐蔽,很难发现,只有在危害造成树枝枯死后才能发现^[6-9]。该虫害已对塞威氏苹果林构成了严重威胁。

苹果小吉丁虫,属鞘翅目吉丁科,以苹果树为主要寄主,主要取食韧皮部和木质部,造成树木枝干枝条枯萎死亡,是一种钻蛀类害虫。虫害表现为显著的周期与累积性,与之伴生的害虫类别较为复杂。寄主皮层枯死、变黑、凹陷是小吉丁虫为害时的直观表现,外观形态的改变导致植物的生理效应发生异常,枝叶枯萎凋零,绿叶量减少,对应的光合效率有所下降^[10-11],养分吸收、运输以及转化等有所衰退,相对于健康状态的植株而言,受害植物的光谱特征存在一定差异,其中主要区别为特定波段的反射率变动^[12]。实现小吉丁虫害的高效检测,并有针对性

地对塞威氏苹果林虫害灾害进行防控预警,是拯救新疆野果林的关键问题。所以,光谱分析逐渐成为当前推进病虫害检测的重要方式,也可以为相关病虫害的遥感监测提供理论以及技术支持^[13-16]。

随着高光谱遥感技术的不断发展,使用高光谱数据针对农作物以及森林开展虫害控制的研究较多,但对小吉丁虫危害塞威氏苹果的研究相对偏少。本研究利用各种虫害级别的塞威氏苹果测定高光谱数据,运用光谱分析探讨光谱特征,选定反映虫害级别的检测数据,对小吉丁虫害等级进行反演,并利用高光谱数据对虫害开展高效测评,为运用机载、星载高(超)光谱传感器实现该虫害的监测提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为新疆伊犁巩留县境东南部山区,位于天山南脉那拉提山北部,地理坐标为 82°47′~82°51′E、42°11′~42°11′N。由于当地山脉高大,形成了独有的小气候区,并且冬季存在着逆温层。年均气温 5℃左右,无霜期约 140 d,年降水量 300~700 mm。冬暖夏凉,无霜期短,降水充沛。

1.2 数据获取及处理

1.2.1 数据的获取 2017 年 7 月,于巩留县境东南部山区测定塞威氏苹果光谱数据,用 FieldSpec® 3 便携式地物波谱仪采集地面光谱数据,光谱区间是

350~2 500 nm,分辨率为3 nm,间隔为1.4 nm;1 000~2 500 nm波段可实现10 nm的分辨率,间隔为2.0 nm^[17-18]。选择无风晴朗天气,探头和冠层高度是1.2 m,进行垂直向下测定,所支持的视场范围是0.5 m,实际的视场角参数为25°。随样本容量的不断增加,实测光谱曲线有接近稳定及平滑的特征,具备较强的代表性。在分析过程中,每10个光谱为采样光谱,各个观测点记录10个光谱,排除存在显著误差的参数之后选定其均值进行计算。测定过程中需要确保白板的实际高度和植被保持一致,同时观测前、后需要进行白板校正。由于水汽的影响导致数据中有较多噪声,所以在运用过程中去除了干扰显著的波段1 350~1 416 nm、1 796~1 970 nm和2 470~2 500 nm^[18]。除此之外,地物光谱仪运行过程中各类噪声也会导致偏差,所以本研究使用移动平均法实现后续的平滑。通过试验,选定7个波长的均值为滤波之后的光谱值,公式为: $\bar{R}_i = (R_{i-3} + R_{i-2} + R_{i-1} + R_i + R_{i+1} + R_{i+2} + R_{i+3}) / 7$

共测得有效光谱数据60条。通过枯枝率判定虫害发生等级,枯枝率与虫害等级的对应关系是:0~10.0%为健康(或基本健康),10.1%~20.0%为轻度,20.1%~50.0%为中度,大于50%为重度(表1)。若是前一年度的虫害等级和本年度的预测信息基本一致,那么判定为这一等级2年之间未产生变化。因为小吉丁虫主要是危害皮层,再加上越冬期间皮层变化较少,因此实地调查获得的光谱参数依旧可以有效地反映各种虫害等级下塞威氏苹果光谱特征。综上所述,最终筛选获得健康光谱20条、轻度虫害光谱15条、中度虫害光谱10条以及重度虫害光谱15条,采用均值为各个级别的光谱特性。

表1 塞威士苹果树虫害分级与分级标准

Table 1 Pest damage levels and classification standard for *Malus sieversii*

危害等级	代表值	分级标准
健康	1	没有受害,或仅有几个枯死的枝条,叶片呈绿色
轻度	2	冠层顶部有多个枯死的枝条,细小枝条没有叶片生长,叶片颜色异常
中度	3	接近半数冠层枯死,叶片颜色异常
重度	4	超过半数冠层枯死,枝干少叶无叶,整株枯死,枝干无叶

1.2.2 数据处理 地面实测光谱曲线使用波谱仪

自带的ViewSpec pro软件完成处理操作,导入相关参考白板值与塞威氏苹果光谱信息,计算反射率;利用SPSS、Excel等软件进行相关分析。对原始曲线进行一阶微分分析,公式: $\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda$ 。式中, λ_i 为实际波段*i*的波长值, $\rho'(\lambda_i)$ 为 λ_i 的对应光谱微分值, $2\Delta\lambda$ 为对应的波长 λ_{i-1} 至 λ_{i+1} 的差值。

2 结果与分析

2.1 不同虫害程度塞威氏苹果树的反射光谱特征

从图1可见,在可见光波段350~700 nm,不同受害等级的塞威氏苹果树反射率较低,除健康和轻度受害塞威氏苹果树光谱反射率超过0.1外,其余均低于0.1。在500~553 nm,健康、轻度、中度、重度受害塞威氏苹果树的光谱反射率逐渐升高。健康塞威氏苹果树光谱反射率在547 nm处达到最大值,随后降低。轻度受害塞威氏苹果树的光谱反射率在555~670 nm逐渐降低。中度、重度受害塞威氏苹果树光谱反射率在546~670 nm均逐渐降低。在波段550 nm附近健康塞威氏苹果树的反射率明显高于受害塞威氏苹果树的反射率,这是因为550 nm附近反射率小峰是绿色植物光谱所具备的普遍特性,同时也为叶绿素的重要响应特性,小吉丁虫危害造成塞威氏苹果树叶绿素含量降低,导致峰值下降。不同受害等级塞威氏苹果光谱反射率在672~758 nm均有较为快速的提升,主要因为该区域在高光谱分析之中被称为“植物红边”,对于植物高光谱分析有极为关键的作用。在近红外波段(800~1 300 nm)是一个较为平缓但反射率较高的区域,这与叶片的内部构造有关。受到小吉丁虫危害后,塞威氏苹果叶片内部构造受到一定的损伤,导致其反射面减小,造成反射率下降,受害级别越高,叶片内部构造受损越严重,反射率下降越多。由此可以看出近红外波段能反映大量植物信息,对受害塞威氏苹果反射率波段的检测提供了一定的依据。在1 300~2 450 nm波长,由于受叶片内细胞液、水分等的控制,反射率开始急速下降,但健康塞威氏苹果树反射率明显高于受害塞威氏苹果树反射率,反射率大小顺序为健康>轻度>中度>重度,并在1 450 nm和1 900 nm附近出现明显的反射率低谷。

为了更好地分析各个受害级别的光谱特征差异,选定具有代表性的波长,利用单因素方差分析,

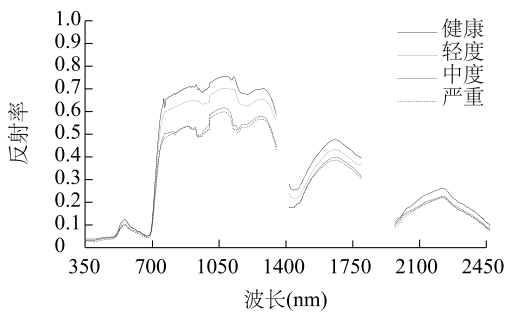


图1 不同虫害程度的塞威氏苹果树反射率
Fig.1 Reflectance of *Malus sieversii* trees with different pest damage levels

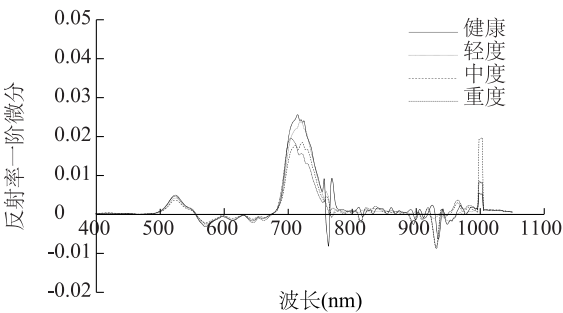


图2 不同虫害程度的塞威氏苹果树反射率一阶微分
Fig.2 Reflectance first derivative curves of *Malus sieversii* trees with different pest damage levels

定量地反映出不同受害程度下塞威氏苹果树的反射率差异信息。分析结果表明,550 nm 处及其附近:健康与轻度受害塞威氏苹果树达到极显著差异,健康与重度受害塞威氏苹果树存在显著差异,轻度与中度、重度差异不明显,中度与重度存在显著差异;在 680 nm 处及其附近:健康、轻度、中度、重度受害 4 个程度均存在极显著差异;在 810 nm 处及其附近:健康与轻度、中度间存在极显著差异,与重度存在显著差异,轻度与中度、重度差异不明显,中度与重度存在显著差异。综上所述,各种受害程度的反射率有着明显的区别,健康>轻>中>重度。而且在对应的“绿峰”、“红谷”和相关的近红外波段,各种受害状况的塞威氏苹果存在显著区别。

2.2 不同受害程度塞威氏苹果树反射光谱一阶微分特征

光谱一阶微分可以有效地抑制土壤背景对植被光谱的影响,并能消除一些通过大气效应以及光照、地形、云层等构成的影响,更为理想地反映植物的核心特性。对光谱反射率曲线进行一阶微分分析(图2),结果显示相关波段“峰”、“谷”位置存在变动。

综合图2和表2可知,在520~573 nm处,健康塞威氏苹果树反射光谱参数的斜率相对于受害塞威氏苹果树更高,其中的“绿峰”位置从565~569 nm区间上升至569~573 nm,呈现明显的“红移”现象;在680~750 nm区间内有红边。在703~720 nm,健康塞威氏苹果树与轻、中、重度受害塞威氏苹果树的顶点存在着红边位置向左偏移的特征,说明其“红边”位置随着小吉丁虫害程度的加重而依次发生“蓝移”,尤其是重度受害时“蓝移”现象非常明显,已移至700~703 nm处。这是因为小吉丁虫危害塞

威氏苹果树时,由于塞威氏苹果树皮粗糙,便于成虫附着、撕咬及在树皮缝隙中产卵,幼虫啃食皮层及韧皮部,对树皮枝干造成严重损伤,造成叶绿素含量急剧下降,引起“蓝移”。近红外反射峰位置从887~892 nm移动至895~899 nm,即向短波方向移动。

表2 不同虫害程度的塞威氏苹果树典型反射波段“峰”、“谷”变化
Table 2 Reflectance peak and absorption valley band changes of *Malus sieversii* trees with different pest damage levels

受害等级	绿峰位置 (nm)	红谷位置 (nm)	红边位置 (nm)	近红外位置 (nm)
健康	565~569	682~686	717~720	895~899
轻度	566~570	675~679	713~716	892~896
中度	567~571	683~689	710~713	888~893
重度	569~573	681~685	700~703	887~892

2.3 小吉丁虫害检测参数与模型

由以上分析可知,“绿峰”、“红谷”、红边以及近红外位置可以作为判断小吉丁虫害的有效波段。选择可反映不同受害程度塞威氏苹果树光谱特征差异的6个参数,作为虫害级别模型的自变量。6个参数为红边位置(REP)、红边斜率(RES)、红边面积(REA)、红边差值植被指数($REDVI$)、红边比值植被指数($RERVI$)、红边归一化植被指数($RENDVI$),计算公式为: $REP=\lambda(\max\rho'_{680\sim750})$, REP 是红边680~750 nm区间之中光谱最高数值的对应波长参数。 $RES=\max\rho'_{680\sim750}$, RES 是红边680~750 nm区间之中光谱最高数值。 $REA=\sum_{i=680}^{750}\rho'i$, REA 是红边680~750 nm区间之中光谱的总和。 $REDVI=\rho_{750}-\rho_{680}$, $RERVI=\frac{\rho_{750}}{\rho_{680}}$, $RENDVI=\frac{\rho_{750}-\rho_{680}}{\rho_{750}+\rho_{680}}$ 。

在 60 条光谱曲线中,通过随机的方式选定 35 条为建模组,其他 25 条为验证组。研究 6 个参数和

虫害级别之间的关系,设定虚拟变量,健康为 1,轻度为 2,中度为 3,重度为 4。分析结果见图 3。

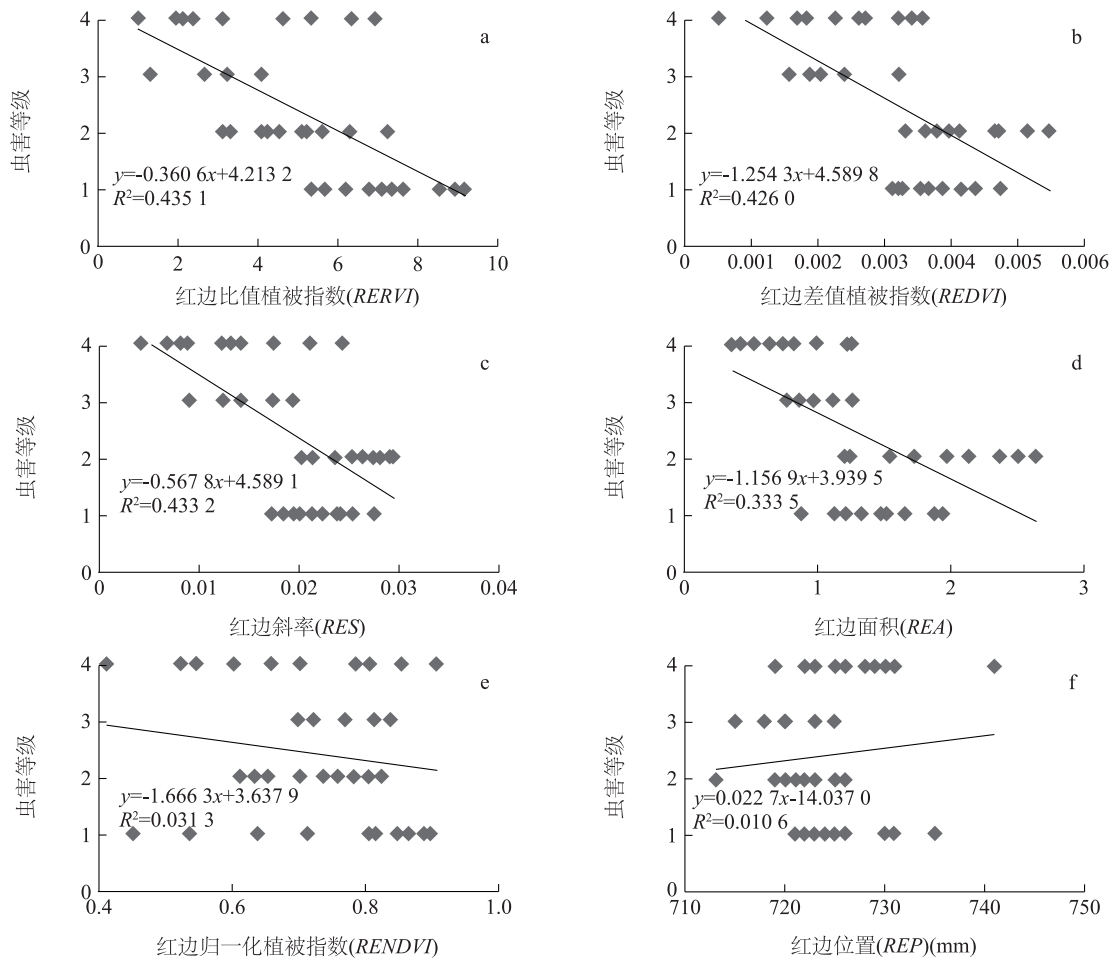


图 3 6 个检测参数与塞威氏苹果树虫害等级的相关关系

Fig.3 Correlation between six detecting parameters and pest damage levels of *Malus sieversii* trees

相关分析结果表明 REP 、 RES 、 REA 、 $REDVI$ 、 $RERVI$ 及 $RENDVI$ 这 6 个参数中除了 REP 与虫害等级呈正相关外,其余参数与塞威氏苹果虫害等级均呈负相关,但其中 $RENDVI$ 、 REP 与虫害等级的关联性较低,剩余 4 个参数与虫害之间的相关性极显著。这主要是因为虫害造成塞威氏苹果树皮层枯死,变黑,凹陷,养分不能顺利输送至枝叶,导致光谱反射率红边斜率降低。

采用多元线性回归方法,建立高光谱红边特征参数与虫害等级的多元回归模型。除去相关性不大的 $RENDVI$ 和 REP 这 2 种参数,用剩下的 4 种参数建立回归方程。在建立方程的过程中,依次引入按照相关性大小排序的自变量,从而得到由 4 个相关性较高的参数拟合而成的回归方程。

结果(表 3)表明,多元线性回归模型明显优于一元线性回归模型。多元回归模型的决定系数为 0.6644,显著高于一元回归模型;多元回归模型 $RMSE$ 值(0.5124)显著低于一元回归模型;多元回归模型的估算精度为 0.7941,显著高于一元回归模型;估测值与实测值的相关性达到 0.8132,与实际虫害等级极为接近。除此之外,还用准确率对模型予以检验:估测等级与实际等级相差区间为 $[0 \sim 0.5]$ 时,为符合,计为 1.0;相差区间为 $(0.5 \sim 1.0]$ 时,为基本符合,计为 0.8;相差区间为 $(1.0 \sim 1.5]$ 时,为稍微符合,计为 0.7;差值 1.5 级以上时,为不符合,计为 0。用验证组的符合率均值作为准确率,模型 a~e 的准确率依次为 0.7146、0.7543、0.7727、0.7489、0.8324。

表3 塞威士苹果树虫害监测模型

Table 3 Detecting models of pest damage levels of *Malus sieversii* trees

模型类型	模型	模型表达式	R^2	RMSE	估算精度
一元回归模型	a	$PL = -0.360\ 6RERVI + 4.213\ 2$	0.435 1	0.634 2	0.601 7
	b	$PL = -1.254\ 3REDVI + 4.593\ 8$	0.426 0	0.612 4	0.602 1
	c	$PL = -0.567\ 8RES + 4.458\ 9$	0.403 2	0.651 7	0.527 8
	d	$PL = -1.156\ 9REA + 3.939\ 5$	0.333 5	0.600 4	0.597 8
多元回归模型	e	$PL = 5.435\ 6 - 0.269\ 6RERVI - 86.369\ 0 REDVI - 32.958\ 89 RES - 0.576\ 3REA$	0.664 4	0.512 4	0.794 1

$RERVI$:红边比值植被指数; $REDVI$:红边差值植被指数; RES :红边斜率; REA :红边面积。

3 讨论

小吉丁虫啃食与寄生塞威士苹果树树皮,造成枝干树皮坏死,营养无法输送到叶片,使得叶片的形态及内部结构发生变化,叶绿素含量降低,从而改变了叶片和树木冠层的光学特征。不同受害程度的塞威士苹果树光谱特征呈现出不同变化,受害程度越大反射率越大。不同受害程度的塞威士苹果树反射率一阶微分在“绿峰”、“红谷”及近红外位置表现出差异,“绿峰”位置“红移”,红边位置“蓝移”,近红外反射峰位置向短波方向移动。4个参数与塞威士苹果树受害等级呈显著相关。可以用模型 $PL = 5.435\ 6 - 0.269\ 6RERVI - 86.369\ 0 REDVI - 32.958\ 89 RES - 0.576\ 3REA$ 估测塞威士苹果树的虫害等级。

塞威士苹果在伊犁河谷分布广泛,其生长过程中更是要经历多个时期,而本研究是在特定的空间尺度及时间条件下进行的,这对虫害监测效果有一定的影响。要实现小吉丁虫害的精准监测,还需要考虑人为活动、气候、放牧等众多因素。在未来研究中,将利用遥感技术在较大的空间尺度监测果树虫害,同时将塞威士苹果生长时期信息与光谱的波段信息相结合,进一步提升虫害监测的准确率。

参考文献:

- [1] 喻 闻,李宁辉.伊犁地区野果林恢复的非市场价值评估[J].农业经济问题,2007(S1):180-186.
- [2] 宋益学.新疆野苹果的管理现状和保护措施[J].新疆林业,2006(6):34-35.
- [3] 李飞飞,崔大方,廖文波.中国新疆野苹果[*Malus sieversii* (Ldb.) Roem.]种群地理分布格局及其遗传关系研究[J].干旱

区地理,2011,34(6):926-932.

- [4] 李利平,海 鹰,安尼瓦尔·买买提,等.新疆伊犁地区野果林的群落特征及保护[J].干旱区研究,2011,28(1):60-66.
- [5] 安兴林,周 英.新疆伊犁区域野果林资源保护及合理开发利用[J].江苏林业科技,2009,36(4):35-37.
- [6] 刘忠权,陈卫民,许 正,等.新疆天山西部野苹果林分布与苹果小吉丁虫危害现状研究[J].北方园艺,2014(17):121-124.
- [7] 王春晓,赵健桐,隋建中,等.新疆发生苹果小吉丁虫[J].新疆农业科学,1995(5):225-226.
- [8] 刘 华,臧润国,丁 易.天山西部新疆野苹果种群特征[J].林业科学,2010,46(11):1-7.
- [9] 羊海军,崔大方,许 正.中国天山野果林种子植物组成及资源状况分析[J].植物资源与环境学报,2003,12(2):39-45.
- [10] 张凤娟,陈凤新,徐东生,等.植物组织结构与抗虫性的关系(综述)[J].河北科技师范学院学报,2006,20(2):71-76.
- [11] 梅 闯,闫 鹏,艾沙江·买买提,等.新疆野苹果(*Malus sieversii*)受苹果小吉丁虫危害程度与树皮厚度、径阶的关系[J].中国农业科技导报,2016,18(4):24-30.
- [12] 林 卉,梁亮,张连蓬,等.基于支持向量机回归算法的小麦叶面积指数高光谱遥感反演[J].农业工程学报,2013,29(11):139-146.
- [13] 冷小梅,谭 峰,才巧玲,等.基于拉曼光谱的稻瘟病诊断[J].江苏农业学报,2018,34(2):276-280.
- [14] 许章华,刘 健,余坤勇,等.松毛虫危害马尾松光谱特征分析与等级检测[J].光谱学与光谱分析,2013,33(2):428-433.
- [15] 邢东兴,常庆瑞.基于光谱反射率的果树虫害级别量化测评——以红富士苹果树黄叶虫害、红蜘蛛虫害为例[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(11):143-148.
- [16] 范泽华,张楠楠,喻彩丽,等.基于近红外光谱的骏枣病虫害与风沙损伤检测[J].江苏农业科学,2018,46(2):154-157.
- [17] 林文鹏,李厚增,黄敬峰,等.上海城市植被光谱反射特征分析[J].光谱学与光谱分析,2010,30(11):3111-3114.
- [18] 邹佳秀,贾 翔,黄铁成,等.天山北坡野果混生植被花期冠层光谱特征研究[J].云南大学学报(自然科学版),2018,40(4):726-733.

(责任编辑:张震林)