



红外热成像监测云南松切梢小蠹虫害：针叶尺度观测

王景旭 黄华国* 林起楠 王 冰 黄 侃

北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

摘 要 为寻求基于红外热成像技术监测云南松切梢小蠹(*Tomicus yunnanensis*)危害的可行性, 该研究以不同受害程度的云南松(*Pinus yunnanensis*)针叶为研究对象, 利用红外热成像仪观测受云南松切梢小蠹危害的云南松针叶温度的日变化规律, 并通过不同受害程度针叶的叶绿素含量、叶片含水量以及净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)等生理生化因子来分析解释针叶温度的变化。结果表明: (1)云南松针叶内叶绿素和水分含量随受害时间增加逐渐降低, 叶绿素含量下降速率比含水量下降速率快; (2)叶片的 P_n 、 G_s 及 T_r 随受害程度增加而降低, 针叶温度与大气温度的温差(ΔT_{l-a})则随受害程度增加而变大; (3)不同程度受害针叶温度与健康针叶的温差(ΔT)在14:00–15:00之间达到最大, 轻度、中度和重度受害针叶 ΔT 分别可达0.6、0.7、2.5 °C; (4)不同程度受害针叶的 G_s 、叶片含水量与 ΔT 呈较强的负相关关系。针叶受害后叶片内部水分失衡引起叶温变化, 利用红外热辐射对于温度变化的敏感性, 可通过红外热成像技术精确探测针叶温度的变化, 从而检测到云南松遭受云南松切梢小蠹危害的程度。

关键词 红外热成像; 针叶温度; 气孔导度; 叶片含水量; 虫害监测

王景旭, 黄华国, 林起楠, 王冰, 黄侃 (2019). 红外热成像监测云南松切梢小蠹虫害: 针叶尺度观测. 植物生态学报, 43, 959–968. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0180

Shoot beetle damage to *Pinus yunnanensis* monitored by infrared thermal imaging at needle scale

WANG Jing-Xu, HUANG Hua-Guo*, LIN Qi-Nan, WANG Bing, and HUANG Kan

Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims To explore the feasibility of thermal infrared technology for monitoring the shoot beetle damage to Yunnan pine (*Pinus yunnanensis*), the relationship between temperature and biochemical and/or physiological factors of healthy and damaged shoots of Yunnan pine was analyzed.

Methods The temperatures were extracted with the software FLIR-TOOLS from the thermal images of damaged shoots. The temperature differences between damaged shoots and healthy shoots (ΔT) in the same thermal image were analyzed. The relationships between ΔT and physiological and biochemical parameters were used to clarify the mechanism that caused needle temperature increase with infested duration.

Important findings Results indicated: (1) The chlorophyll and water content of damaged shoots decreased with the infested duration, and the chlorophyll content decreased faster than water content; (2) The net photosynthetic rate (P_n), stomata conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) also decreased with infested duration, and the temperature difference between needle and atmosphere (ΔT_{l-a}) increased with infested duration; (3) ΔT reached the maximum at 14:00 to 15:00; the temperature differences of lightly-infested, mid-infested and heavily-infested needles reached 0.6, 0.7 and 2.5 °C, respectively; (4) A strong negative correlation was found between ΔT and G_s , water content. Our study concluded that the water imbalance of damaged needles caused needle temperature changes. Therefore, thermal infrared technology could be applied to monitor shoot beetle damage of Yunnan pine at different stages.

Key words thermal infrared; needle temperature; stomata conductance; leaf water content; pest monitoring

收稿日期Received: 2019-07-15 接受日期Accepted: 2019-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571332)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41571332).

* 通信作者Corresponding author (huangguo_huang@bjfu.edu.cn)

Wang JX, Huang HG, Lin QN, Wang B, Huang K (2019). Shoot beetle damage to *Pinus yunnanensis* monitored by infrared thermal imaging at needle scale. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 959–968. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0180

利用热像仪的红外热成像技术将物体的红外热辐射转换为可视图像,可以在不损坏目标对象的情况下检测其表面温度。目前,较为先进的热成像仪可以探测到目标对象小于0.01 °C的温差,对其温度变化也异常灵敏,因此应用领域也越来越广泛。由于热成像仪的无损测温的特点,其在农业领域主要应用于农作物的水分(Tanner, 1963; 张文忠等, 2007; 程麒等, 2012; 赵田欣等, 2012)和病害(Chaerle *et al.*, 1999; Stoll *et al.*, 2008; Oerke *et al.*, 2011; Berdugo *et al.*, 2012)监测、作物灌溉以及抗旱特性的筛选(刘亚等, 2009)等方面。朱圣盼(2007)利用可见光采集系统、红外热图像采集系统和多光谱图像采集系统对番茄(*Solanum lycopersicum*)叶片的早期病害进行初步监测,发现在叶片出现人眼可见的病症之前,健康叶片与受害叶片之间温度差异在0.5–1.3 °C之间。在林业领域中,热红外遥感大多用于森林火灾监测(何诚等, 2018)、地表温度反演(黄妙芬等, 2006)和林地水分监测(樊磊, 2017)等方面。Scherrer等(2011)结合机载热红外图像的温度数据、树干液流以及土壤水势数据分析了6种阔叶树种对干旱的敏感性,并指出浓密树冠温度与大气的温差为4.5–5 K,而稀疏树冠的温差在–0.4–0.1 K之间,并且在旱季随着叶片温度的升高,植物液流和蒸腾作用都会下降20%–35%。然而,至今为止采用红外热成像技术监测森林病虫害方面的研究还相对较少,尤其是对于针叶树种。

以往的研究表明,在森林虫害爆发后期阶段,即红色攻击和灰色攻击阶段,利用遥感数据进行监测比较容易,而对于早期森林虫害,即绿色攻击阶段的监测较为困难(Markus & Clement, 2014)。在红色攻击阶段,光学遥感利用叶片光谱信息的变化对健康林分和受害林分进行分类,精度较高(Skakun *et al.*, 2003; Coops *et al.*, 2006; Wulder *et al.*, 2006)。在绿色攻击阶段,叶片光谱变化较小,仅从树冠外表上无法分辨出是否受害。目前已有的研究通过遥感数据提取水分、温度等相关的植被指数尝试对绿色攻击阶段进行研究(Springsin *et al.*, 2011; Netherer *et al.*, 2015)。Markus 和 Clement (2014)利用WorldView-2对受害云杉(*Picea abies*)和健康云杉进

行分类判别,并在地面分别选取了1 200株参考树进行精度验证,包括健康树、处于绿色攻击阶段的树木及死树。结果发现对于这三类的总体判别精度在70%左右,死树的判别精度几乎达到100%,但是健康树和处于绿色攻击阶段的树木较易混淆,精度在60%–70%之间。国内外对于森林虫害监测的研究大多采用分辨率较高的光学遥感数据,通过光谱之间的差异来判别健康林分和受害林分。虽然光学遥感提供了大面积虫害监测的可能性,但是对绿色攻击阶段的监测精度不高,而热红外遥感的潜力则尚未挖掘。

云南松切梢小蠹(*Tomicus yunnanensis*)属于钻蛀型害虫,由针叶枝梢中上部或底部蛀入髓心,直接破坏树干向针叶的水分运输通道。随着钻蛀时间延长,受害针叶会缺乏水分而枯死。云南松(*Pinus yunnanensis*)在害虫侵入的早期阶段,虽然枝叶变化从外表无法识别,但由于水分及营养传输受阻,叶片气孔会发生异常开闭,进而影响叶片的蒸腾作用造成叶片温度失调。而利用热红外技术可以监测受害叶片的温度变化,这就使得利用热红外波段探测早期虫害成为可能。

本文对云南松针叶受小蠹侵入后叶绿素和光谱随时间的变化,划分不同受害阶段(健康、轻度受害、中度受害、重度受害)(Lin *et al.*, 2018),利用FLIR-T420红外热成像仪观测不同受害阶段针叶温度的日变化规律,并研究不同受害阶段针叶的生理生化因子与叶片温度之间的关系,寻求红外热成像技术监测云南松小蠹虫害的可行性。

1 材料和方法

1.1 研究区域和样地

本研究试验地位于云南省祥云县普淜镇天峰山(25.23°–25.48° N, 100.80°–101.05° E),海拔为1 720–2 570 m。该区属北亚热带高原季风型中温带气候,干湿季节分明,降水集中,光照集中且充足。该区年平均气温14.2 °C,年降水量783.7 mm,常年主要风向为西南风。该地区于2010年以来连续遭遇干旱气候,尤其是2012年最为严重。连续的干旱气候引起钻蛀性小蠹虫为主的害虫大量爆发,据不完全统计,

受害虫侵害的云南松人工林面积比重达50%。由于虫害与干旱气候的原因, 该地区人工松林质量水平较低(Yu *et al.*, 2018)。为详细了解和监测小蠹虫害, 设置了34个云南松样地, 包括11个健康样地和23个受害样地(图1), 分别代表不同受害程度的林分。样地中林分结构的测量数据见表1 (测量目标的胸径(DBH) > 4 cm)。

1.2 观测试验设计

在天峰山选取刚刚受小蠹侵入的一年生云南松针叶梢, 观测其随受害时间发展的不同表征现象, 进而划分不同受害阶段。然后在受害样地中选取不同受害阶段针叶梢(图2)作为研究对象, 并对受害针叶梢的生理生化参数如气孔导度(G_s)、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、叶绿素含量(CCL)、水分含量(WCL)等进行测量, 具体参数见表2。

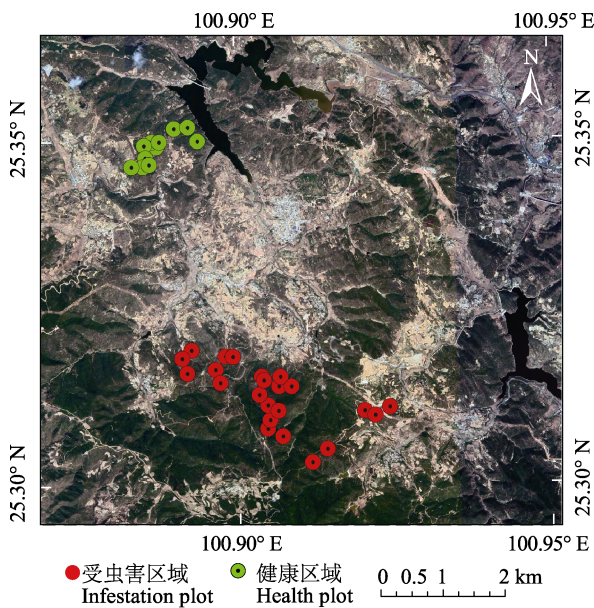


图1 云南松样地位置。
Fig. 1 Location of the plots of *Pinus yunnanensis* in Southwestern China.

表1 各样地林分结构参数统计($n = 34$)
Table 1 Statistics for the forest structural parameters of plots ($n = 34$)

参数 Parameter	平均值 Mean		标准偏差 SD		最大值 Max		最小值 Min		变化范围 Range	
	HP	DP	HP	DP	HP	DP	HP	DP	HP	DP
冠幅 Crown diameter (m)	2.5	2.3	0.27	0.22	5.5	5.3	0.5	0.5	5.0	4.8
树高 Stand average height (m)	4.68	5.07	1.5	1.0	11	12	1	1	10	11
林冠郁闭度 Canopy closure (%)	28	32	8.9	6.8	42	44	15	20	27	24
立木度 Stem density (hm^{-2})	990	1 342	404	556	2 022	2 644	500	556	1 522	2 088
叶面积指数 Leaf area index ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	0.78	0.83	0.37	0.29	1.86	1.61	0.43	0.37	1.43	1.24

Max, 最大值; Min, 最小值; SD, 标准偏差; HP, 健康样地; DP, 受害样地。
Max, maximum; Min, minimum; SD, standard deviation; HP, healthy plots; DP, damaged plots.

1.2.1 针叶光谱及生化参数随时间变化的测量

在健康针叶梢受小蠹危害后, 以7天为间隔测量针叶光谱、叶绿素含量和含水量。光谱测量采用AvaSpec-EDU-VIS (350–850 nm, 分辨率2.9 nm) (Avantes, Apeldoorn, the Netherlands)和AvaSpec-NIR1.7 (900–1 750 nm, 分辨率2.0–5.0 nm)(Avantes, Apeldoorn, the Netherlands)两个光谱仪联合互补观测, 即可获得350–1 750 nm的光谱数据。采集叶片光谱时将同一类型的叶片平铺置于观测用的卡槽中, 共5层, 每层平均40个针叶, 然后将光纤探头置于叶片上方, 每次观测重复5次, 取平均值作为最终光谱值。

CCL 采用 CCM-300 叶绿素仪 (Opti-Science, Houston, USA)进行测量, 在不同位置测量5次取平均值作为叶片的叶绿素含量相对值。采用烘箱对采集的针叶烘干称质量, 并与烘干前的鲜质量相减来获取叶片水分含量, 不同类型针叶各取15组重复, 每个重复取10个叶片进行烘干, 取平均值作为不同受害叶片的水分含量。

1.2.2 不同受害程度针叶温度及生理因子的获取

采用FLIR-T420热像仪(FLIR Systems, Portland, USA)拍摄不同受害阶段针叶梢的热红外图像来提取叶片温度。T420分辨率为 320×240 像素, 其波长范围为7.5–13 μm , 测量温度范围在–20–120 $^{\circ}\text{C}$ 。由于T420分辨率较低, 因此采用近距离观测, 观测距离为1 m。由于缺乏不同受害叶片的发射率, 因此所有发射率均设置为0.99, 其余参数采用热像仪默认参数。热红外拍摄时间范围为9:30–16:00, 间隔1 h拍摄一次。通过FLIR Tools中的线性提取工具, 沿针叶方向提取叶片温度(图2)。

叶片生理因子参数利用LI-6400 (LI-COR, Lincoln, USA)进行测量。由于LI-6400仪器较重及野外电量限制, 测量时剪下针叶梢后在地面测量, 测量时间范围为9:30–16:00, 观测间隔为2 h。每次测量重

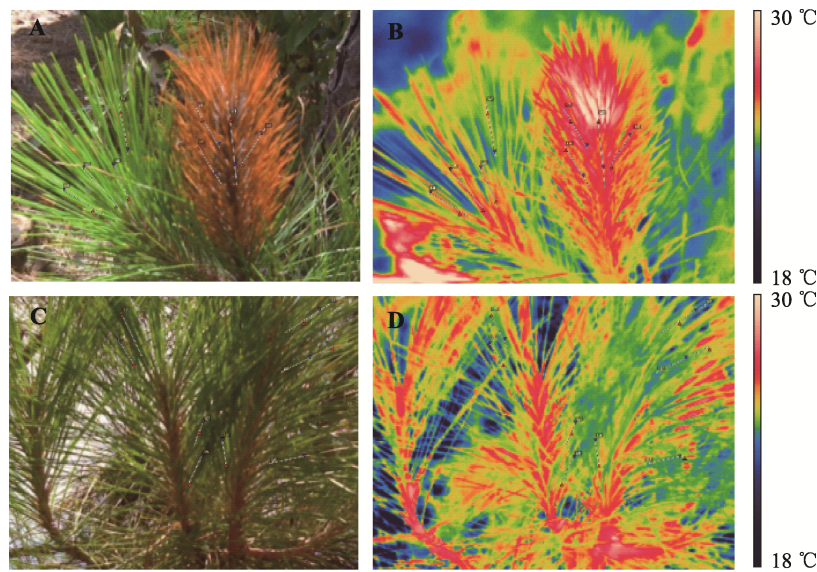


图2 利用FLIR Tools提取云南松针叶温度。**A**, 重度受害针叶梢和健康梢的可见光图像。**B**, 重度受害针叶梢和健康梢的热红外图像。**C**, 轻度受害针叶梢和健康梢的可见光图像。**D**, 轻度受害针叶梢和健康梢的热红外图像。
Fig. 2 Utilizing FLIR Tools to extract the temperature of the needles of *Pinus yunnanensis*. **A**, Visible image to show heavily-infested and healthy shoots. **B**, Thermal infrared image to show heavily-infested and healthy shoots. **C**, Visible image to show lightly-infested and healthy shoots. **D**, Thermal infrared image to show lightly-infested and healthy shoots.

表2 试验测量参数、仪器、测量间隔及用途

Table 2 Parameters, instruments, measurement intervals of the observation and their purposes

测量参数 Measured parameter	缩写 Abbreviation	测量方法 Measured method	测量间隔时间 Measured interval times	用途 Purpose
光谱反射率 Spectral reflectance	<i>Ref</i>	光谱仪联合互补观测 AvaSpec-EDU-VIS和 AvaSpec-NIR1.7	7 d	评估光谱对受害程度的响应 Assess the spectral response to the damaged degrees
叶绿素含量 Chlorophyll content of leaf	<i>CCL</i>	CCM-300	7 d	解释光谱变化并划分不同受害阶段 Interpret spectral changes and divide into the damaged stages
叶片含水量 Water content of leaf	<i>WCL</i>	烘干 Oven drying	7 d	分析不同受害阶段叶片含水量与叶片温度的关系 Analyze the relationship between leaf water content and leaf temperature at different damaged stages
叶片温度 Leaf temperature	<i>T_{leaf}</i>	FLIR T420	1 h	分析不同受害阶段叶片温度日变化 Analyze diurnal changes of leaf temperature at different damaged stages
气孔导度 Stomata conductance	<i>G_s</i>	LI-6400	2 h	解释不同受害阶段叶片温度的变化 Explain leaf temperature changes at different damaged stages
净光合速率 Net photosynthetic rate	<i>P_n</i>			
蒸腾速率 Transpiration rate	<i>T_r</i>			
叶片与大气温差 Temperature difference between leaf and atmosphere	ΔT_{l-a}			

复10次, 取平均值作为最终数据。

1.3 数据分析

在获取不同受害程度针叶的光谱、温度和生理生化参数之后, 以受害程度为自变量, 不同观测参数为因变量对不同受害程度针叶的变化进行分析。

首先通过建立归一化植被指数(*NDVI*)和归一化水分指数(*NDWI*)来探究光谱对受害针叶的*CCL*和*WCL*随时间的变化的响应, 并分析不同受害程度下

叶片的植被指数与叶绿素和水含量之间的相关性。

$$NDVI = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705}) \quad (1)$$

$$NDWI = (R_{850} - R_{1240}) / (R_{850} + R_{1240}) \quad (2)$$

式中, *R*₇₅₀、*R*₇₀₅、*R*₈₅₀、*R*₁₂₄₀分别为750、705、850和1 240 nm的反射率

其次, 为减小叶片外部环境的影响, 以同一幅热红外图像中受害针叶与健康针叶的温差(ΔT)来反映不同受害阶段针叶的温度变化。因此拍摄的针叶

梢热红外图像中同时包含健康和受害枝梢(图2), 便于提取相同时刻和相同环境下的 ΔT 。以 ΔT 来衡量受害叶片温度的变化情况。根据 ΔT 和生理因子的日变化分析, 找出不同受害阶段叶片之间的差异, 以及不同时间段的差异大小。并通过不同受害阶段叶片各生理因子参数的不同来解释与 ΔT 之间的相关关系, 对 ΔT 的差异进行分析解释。

$$\Delta T = T_{\text{damage}} - T_{\text{health}} \quad (3)$$

式中, T_{damage} 为受害针叶温度, T_{health} 为健康针叶温度。

2 结果和分析

2.1 受害针叶的叶绿素和水分时序变化

随着切梢小蠹的侵入, 蛀孔上方叶片的水分和营养元素传输受阻, 伴随着受害时间不断延长, 叶片中CCL持续减少并分解, WCL也会逐渐降低, 但CCL下降更为迅速(图3)。随着叶片受害程度增大, 叶片气孔逐渐丧失功能, 外部环境中的水分会扩散进入叶片内部, 因此受害程度越大的叶片, 含水量差异也较大。

图4中, 可见光范围内叶绿素吸收形成的波谷

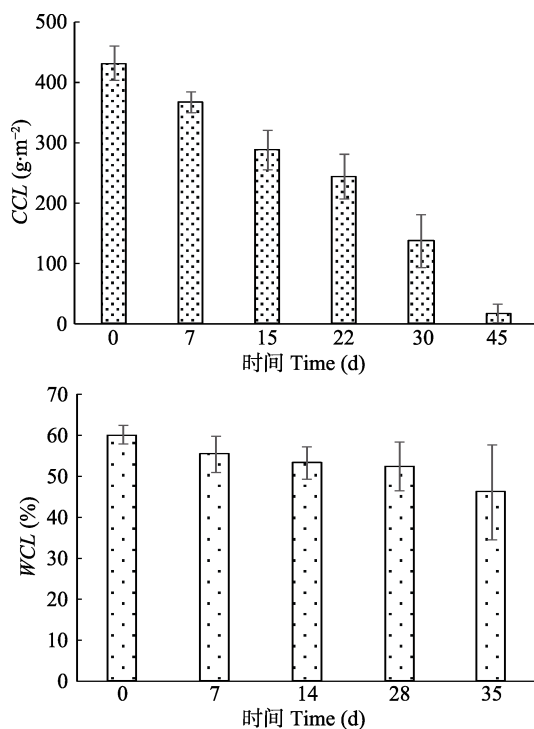


图3 云南松受害针叶随受害时间增长叶绿素含量(CCL)及水分含量(WCL)变化(平均值±标准偏差)。

Fig. 3 Chlorophyll content (CCL) and water content (WCL) (mean ± SD) of damaged needles of *Pinus yunnanensis* changed with duration.

在650 nm左右, 水分吸收带在1 200 nm和1 450 nm左右(Seelig *et al.*, 2008)。受害后15–22天, 叶片叶绿素虽然下降明显, 但叶片光谱在可见光范围内变化不明显, 叶片仍呈现绿色; 在受害后30天阶段叶片叶绿素含量减少, 叶片逐渐向红色转变, 红光波段的反射率逐渐增加; 45天后为重度受害, 随着叶绿素分解, 含量逐渐为0, 叶片呈现红色。本文按照叶片受害时间长短的光谱差异, 将受害后15–22天划分为轻度受害阶段, 22–45天为中度受害阶段, 45天后为重度受害阶段(图5)。

图6可以看出NDVI和NDWI与CCL和WCL具有较强的相关性, 均呈负相关关系。NDVI和NDWI均

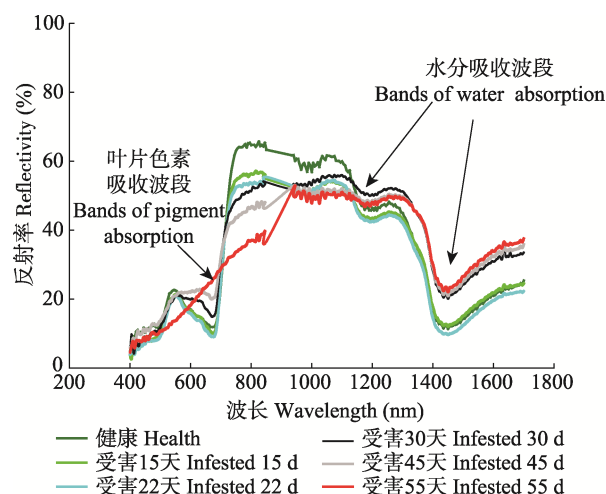


图4 不同受害程度云南松针叶光谱曲线变化。

Fig. 4 Spectral curves of needles of *Pinus yunnanensis* changed with damaged duration.

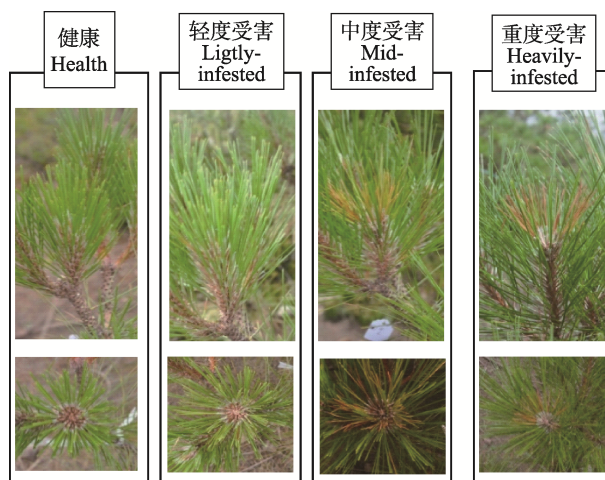


图5 云南松不同受害阶段针叶的可见光图像。上排为侧视图, 下排为对应的俯视图。

Fig. 5 Visible images to show damaged shoots at different stages of *Pinus yunnanensis*. The top images are side view; the bottom images are top view.

会随着受害程度的增大而降低。通常采用遥感手段对CCL和WCL进行大范围反演时可选取NDVI和NDWI来对二者进行快速估算,来评估植被的健康状态。

2.2 不同受害阶段针叶生理因子的变化

对受害云南松划分不同受害阶段后,测量不同阶段针叶的生理因子并作分析。随着受害后针叶中

CCL和WCL减少,不同受害阶段针叶的各生理指标均发生不同的变化(图7)。 P_n 随受害程度增大而不断降低,健康叶片的 P_n 值最大。伴随着侵入时间的延长,针叶缺少合成叶绿素所需的营养物质及水分,CCL不断下降,造成 P_n 不断降低,直至停止。重度受害针叶的 P_n 为负值说明叶片光合作用已经停止,仅进行呼吸作用。 G_s 与 T_r 均随着受害程度的不断加深

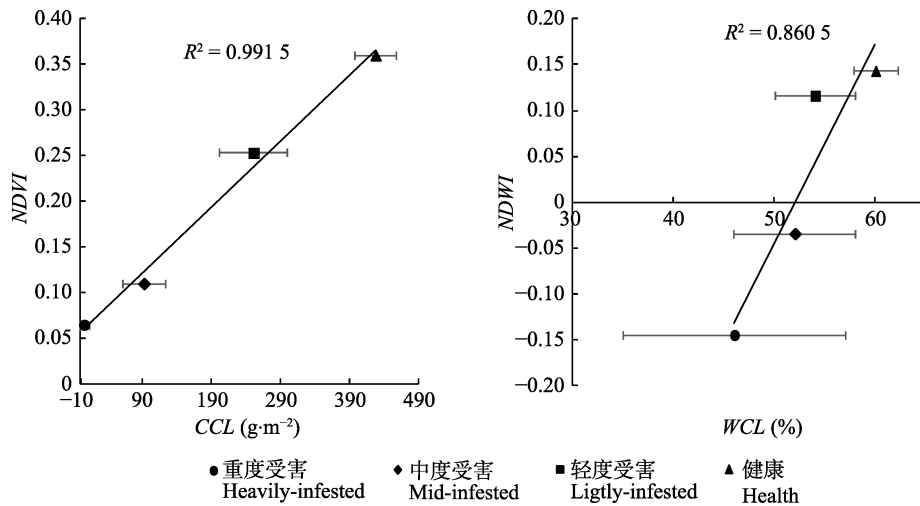


图6 云南松针叶的归一化植被指数(NDVI)和归一化水指数(NDWI)分别与叶片叶绿素含量(CCL)和叶片含水量(WCL)的相关关系。误差棒代表标准偏差。

Fig. 6 Correlation of normalized difference vegetation index (NDVI) with leaf chlorophyll content (CCL) and the correlation of normalized difference water index (NDWI) and leaf water content (WCL) of *Pinus yunnanensis*. Error bar indicates standard deviation.

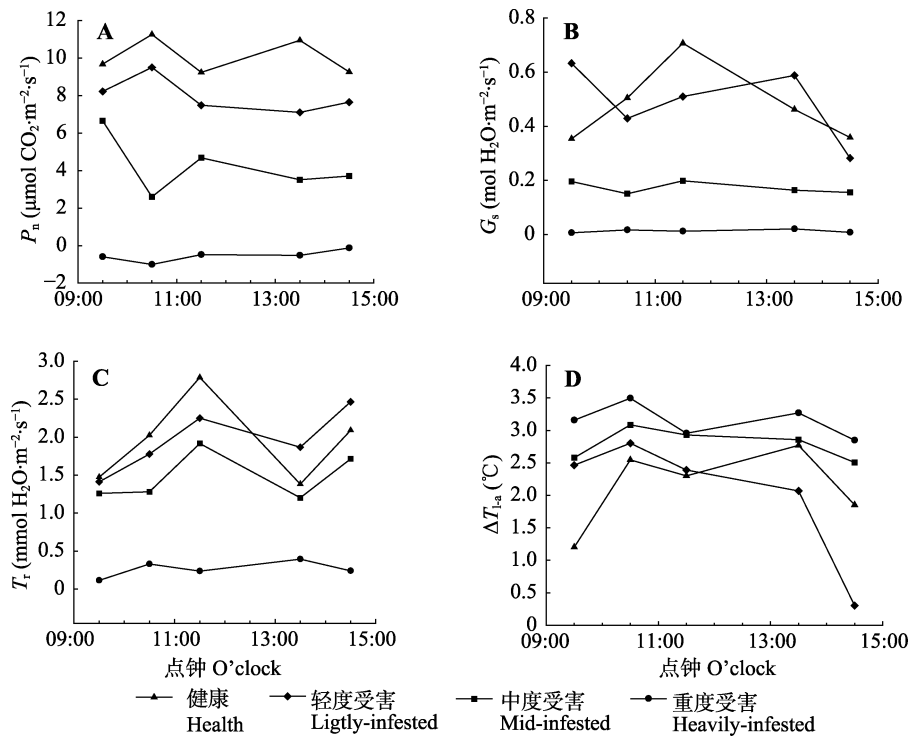


图7 不同受害阶段云南松针叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)以及叶片与大气温差(ΔT_{l-a})的日变化规律。

Fig. 7 Daily changes of net photosynthetic rate (P_n), stomata conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and temperature differences between leaf and atmosphere (ΔT_{l-a}) of damaged needles of *Pinus yunnanensis* at different stages.

而逐渐降低。轻度受害针叶的 G_s 与健康叶片的 G_s 变化不同,说明轻度受害针叶的气孔细胞并未死亡,仍可进行生理活动。随着受害加深,叶片水分逐渐减少,气孔细胞也逐渐死亡,造成 G_s 不断下降。由于 G_s 的下降,受害叶片的 T_r 也随之降低。图7D中,重度受害针叶温度与大气的温差 ΔT_{l-a} 最大,而健康叶片由于蒸腾作用反而温差较小。

2.3 不同受害阶段针叶与健康叶片温差日变化

如图8所示,受害针叶的温度均比健康叶片的温度要高, ΔT 与受害程度呈正相关关系,重度受害针叶的 ΔT 最大。轻度受害叶片的 ΔT 在13:00之前变化较小,在15:00左右达到最大。中度受害和重度受害针叶的 ΔT 在10:00至12:30之间随着健康针叶温度升高逐渐变小,随后变大。三组不同受害叶片的 ΔT 均在14:20左右达到最大值,比较适合对不同阶段受害针叶进行监测。轻度受害叶片与健康针叶的 ΔT 最小,约为0.6 °C,重度受害叶片的 ΔT 最大,接近2.5 °C,中度受害叶片的温差次之,约为0.7 °C。

不同受害阶段针叶的 G_s 和WCL均与 ΔT 有很好的负相关关系(图9)。随着 G_s 和WCL不断变小, ΔT 不断增大。由于以健康针叶作为参考目标,故将其温差 ΔT 设为0 °C。健康和轻度受害阶段的 G_s 变化较大,而随着受害程度的加深,气孔细胞接近死亡,同一类型叶片之间的 G_s 差异也越小。而对于WCL则相反,同一类型叶片之间的含水量随受害程度增加,其差异越大。

3 讨论和结论

为证明红外热成像技术监测云南松切梢小蠹虫害的可行性,通过对不同受害阶段针叶的CCL、WCL、 P_n 、 G_s 和 T_r 等生理生化因子的监测来分析针叶光谱和温度的变化。云南松针叶受害后,CCL比WCL下降更为迅速。轻度受害阶段针叶的光谱变化不明显,在中度受害阶段叶片才逐渐变色,直至重度阶段的红色叶片。

针叶中水分及养分的传输由于受害而下降,导致叶片水分供给不足,而叶片气孔细胞的开闭对叶片内水分含量又比较敏感(Zarco-Tejada *et al.*, 2012),气孔细胞随着受害程度加深逐渐失水并丧失调节功能,因此 G_s 随受害程度增大而下降。这也导致了叶片用于调节表面温度的 T_r 下降,蒸腾作用作为调节叶片温度的主要手段,其变化对于叶片温度会产生

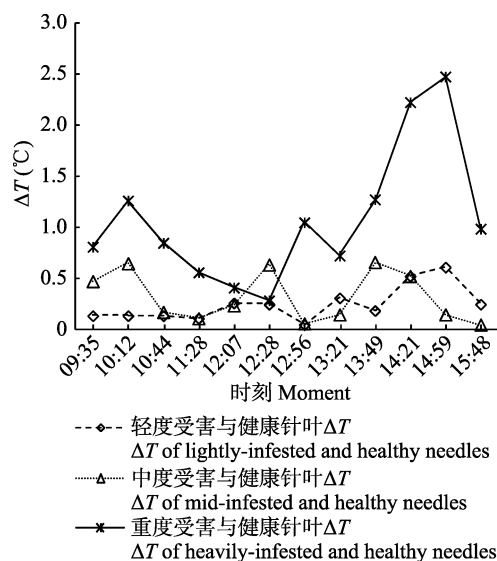


图8 不同受害阶段云南松针叶的温差(ΔT)日变化曲线。
Fig. 8 The diurnal changes of temperature differences between damaged shoots and healthy shoots (ΔT) of damaged needles of *Pinus yunnanensis* at different stages.

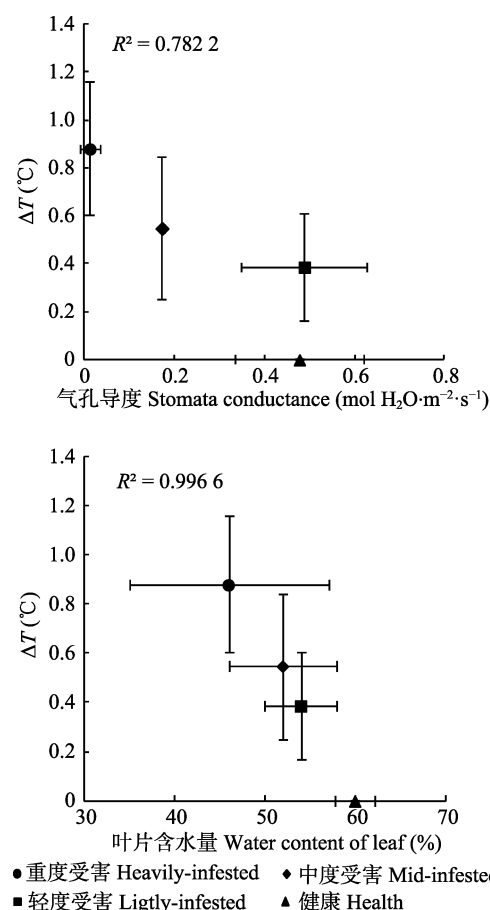


图9 不同受害阶段云南松针叶温差(ΔT)与气孔导度及叶片含水量的相关性分析。误差棒代表标准偏差。
Fig. 9 Correlation analysis between temperature difference (ΔT) and stomata conductance, and water content of damaged needles at different stages in *Pinus yunnanensis*. Error bar indicates standard deviation.

直接的影响,造成针叶表面温度升高(Sandholt *et al.*, 2002)。轻度受害针叶处于受害初期,叶片内水分还能维持叶片生理活动,气孔细胞也能够通过蒸腾作用保持叶片与大气之间的温度平衡。但是由于叶片内部水分的异常,轻度受害针叶气孔会发生不正常的开闭,对叶片温度造成影响。

植物叶片的水分平衡失调不仅仅受虫害胁迫,非生物胁迫(如干旱)也会造成植物水分的变化。干旱条件使得植物可吸收的水分减少,导致气穴的产生和水分运输的限制,叶片温度升高(Choat, 2013; Bouche *et al.*, 2014)。与虫害胁迫相比,二者对植被水分平衡的影响原理不同。干旱会使得整株树的叶片均处于水分失衡的状态,而切梢小蠹仅破坏了单个针叶梢的水分运输,健康叶片的水分仍能够通过土壤的水势差及蒸腾拉力传输至叶片,因此以健康叶片温度与受害叶片温度的温差(ΔT_s)可作为监测虫害的指标。

对不同受害阶段针叶的 ΔT 及生理生化参数的日变化监测表明, ΔT 在14:20左右达到最大,受害阶段叶片温度也比健康叶片高出约0.6 °C,而重度受害阶段的 ΔT 最高已达到2 °C。 ΔT 与WCL和 G_s 均呈负相关关系,且与WCL的相关性较强。针叶内部的水分亏缺会迅速地反映为叶片气孔关闭和蒸腾速率的下降,进而造成叶片温度不断升高(Jones, 1998)。叶片 T_r 的下降会使得叶片表面水分蒸散降低,导致温差的存在。随着受害程度的不断加深, ΔT 逐渐增大。

叶片的 G_s 和 T_r 等生理因子的变化对于光谱的影响较小,受害叶片光谱的改变是由叶片内部的色素来主导,利用光谱来反演叶片叶绿素的研究较为成熟,有较高的精度(Gitelson & Merzlyak, 1996)。 G_s 和 T_r 等生理因子则对叶片温度的影响较大,因此多数研究都采用热红外技术作为估算作物蒸散和气孔导度的方法(Blonquist Jr *et al.*, 2009; Jones & Vaughan, 2010)。

目前利用遥感对森林虫害监测大多为可见光和近红外波段遥感数据,其通过对森林反射光谱的变化来对森林状态进行判断(Lausch *et al.*, 2013; Abdullah *et al.*, 2018)。这些方法可以对受害表现明显的虫害中后期森林进行监测和估算,但对于早期阶段监测受限(Marx, 2010; Näsi *et al.*, 2015)。在森林受胁迫早期,森林的水分亏缺还没有达到植物生理的极限值,森林冠层的形态状况和光谱特征都还未发

生改变,但是会引起植被水分的变化,从而导致植被冠层温度的异常。通过对森林冠层温度数据的分析处理,热红外遥感可以对森林虫害进行监测,并有潜力发现森林遭受的早期健康危害。热红外遥感通过温度的变化对虫害胁迫进行监测,但不能对类似的虫害加以区分。在未来的研究中,多源遥感数据的配合使用,可以获取更丰富的胁迫信息,用于虫害胁迫的监测。

虽然本文对热红外监测云南松小蠹虫害进行了论证,但仅在针叶尺度上以云南松单个针叶梢为研究对象,未能论证在更大尺度上采用热红外技术监测虫害的可行性。并且在获取叶片各生理生化参数时由于人数及仪器的限制,各参数未能同步及时采样,今后需进一步完善单叶尺度上的数据采集,以及在冠层尺度和景观尺度上开展热红外技术对于森林虫害的监测。

参考文献

- Abdullah H, Darvishzadeh R, Skidmore AK, Groen TA, Heurich M (2018). European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 199–209.
- Berdugo C, Hillnhütter C, Sikaro R, Oerke EC (2012). A resistance bioassay for *Rhizoctonia* root and crown rot and damping-off caused by the anastomosis groups AG 2-2IIIB and AG 4 in sugar beet. *Journal of Agricultural Science and Technology*, (A2), 294–302.
- Blonquist Jr JM, Norman JM, Bugbee B (2009). Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1931–1945.
- Bouche PS, Larter M, Domec JC, Burlett R, Gasson P, Jansen S, Delzon S (2014). A broad survey of hydraulic and mechanical safety in the xylem of conifers. *Journal of Experimental Botany*, 65, 4419–4431.
- Chaerle L, van Caeneghem W, Messens E, Lambers H, van Montagu M, van der Straeten D (1999). Presymptomatic visualization of plant-virus interactions by thermography. *Nature Biotechnology*, 17, 813–816.
- Cheng Q, Huang CY, Wang DW, Xiao LJ (2012). Correlation between cotton canopy CWSI and photosynthesis characteristics based on infrared thermography. *Cotton Science*, 24, 341–347. [程麒, 黄春燕, 王登伟, 肖莉娟 (2012). 基于红外热图像的棉花冠层水分胁迫指数与光合特性的关系. *棉花学报*, 24, 341–347.]
- Choat B (2013). Predicting thresholds of drought-induced mortality in woody plant species. *Tree Physiology*, 33,

- 669–671.
- Coops NC, Johnson M, Wulder MA, White JC (2006). Assessment of QuickBird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation. *Remote Sensing of Environment*, 103, 67–80.
- Fan L (2017). *Multi-source Data Estimating Soil Moisture and Its Application on Forest Fire Risk Assessment*. PhD dissertation, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing. [樊磊 (2017). 基于多源数据的土壤水分估算及森林火灾风险评估应用. 博士学位论文, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京.]
- Gitelson AA, Merzlyak MN (1996). Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 148, 494–500.
- He C, Liu KZ, Shu LF, Hong XF, Zhang SY (2018). The diagnostic methods for resurgences of smoldering fire in the forests by infrared thermal imaging. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 38, 326–332. [何诚, 刘柯珍, 舒立福, 洪霞芳, 张思玉 (2018). 基于红外热成像的林地余火死灰复燃点诊断方法研究. 光谱学与光谱分析, 38, 326–332.]
- Huang MF, Xing XF, Wang PJ, Wang CZ (2006). Comparison between three different methods of retrieving surface temperature from Landsat TM thermal infrared band. *Arid Land Geography*, 29, 132–137. [黄妙芬, 邢旭峰, 王培娟, 王昌佐 (2006). 利用LANDSAT/TM热红外通道反演地表温度的三种方法比较. 干旱区地理, 29, 132–137.]
- Jones HG (1998). Stomatal control of photosynthesis and transpiration. *Journal of Experimental Botany*, 49, 387–398.
- Jones HG, Vaughan RA (2010). *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford University Press, New York.
- Lausch A, Heurich M, Gordalla D, Dobner HJ, Gwilym-Margianto S, Salbach C (2013). Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales. *Forest Ecology and Management*, 308, 76–89.
- Lin QN, Huang HG, Yu LF, Wang JX (2018). Detection of shoot beetle stress on Yunnan pine forest using a coupled LIBERTY2-INFORM simulation. *Remote Sensing*, 10, 1133. DOI: 10.3390/rs10071133.
- Liu Y, Ding JQ, Su BQD, Liao DQ, Zhao JR, Li JS (2009). Identification of maize drought-tolerance at seeding stage based on leaf temperature using infrared thermography. *Scientia Agricultura Sinica*, 42, 2192–2201. [刘亚, 丁俊强, 苏巴钱德, 廖登群, 赵久然, 李建生 (2009). 基于远红外热成像的叶温变化与玉米苗期耐旱性的研究. 中国农业科学, 42, 192–201.]
- Markus I, Clement A (2014). Early detection of bark beetle infestation in norway spruce (*Picea abies* L.) using WorldView-2 Data. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5, 351–367.
- Marx A (2010). Detection and classification of bark beetle infestation in pure Norway spruce stands with multi-temporal RapidEye imagery and data mining techniques. *Photogrammetrie-Fernerkundung Geoinformation*, 2010, 243–252.
- Näsi R, Honkavaara E, Lyytikäinen-Saarenmaa P, Blomqvist M, Litkey P, Hakala T, Viljanen N, Kantola T, Tanhuanpää T, Holopainen M (2015). Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sensing*, 7, 15467–15493.
- Netherer S, Matthews B, Katzensteiner K, Blackwell E, Henschke P, Hietz P, Pennerstorfer J, Rosner S, Kikuta S, Schume H, Schopf A (2015). Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytologist*, 205, 1128–1141.
- Oerke EC, Fröhling P, Steiner U (2011). Thermographic assessment of scab disease on apple leaves. *Precision Agriculture*, 12, 699–715.
- Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213–224.
- Scherrer D, Bader MKF, Körner C (2011). Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1632–1640.
- Seelig HD, Hoehn A, Stodieck LS, Klaus DM, Adams WW, Emery WJ (2008). The assessment of leaf water content using leaf reflectance ratios in the visible, near-, and short-wave-infrared. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3701–3713.
- Skakun RS, Wulder MA, Franklin SE (2003). Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. *Remote Sensing of Environment*, 86, 433–443.
- Sprintsin M, Chen JM, Czurylowicz P (2011). Combining land surface temperature and shortwave infrared reflectance for early detection of mountain pine beetle infestations in western Canada. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1), 053566. DOI: 10.1117/1.3662866.
- Stoll M, Schultz HR, Baecker G, Berkelmann-Loehnertz B (2008). Early pathogen detection under different water status and the assessment of spray application in vineyards through the use of thermal imagery. *Precision Agriculture*, 9, 407–417.
- Tanner CB (1963). Plant temperatures. *Agronomy Journal*, 55, 210–211.
- Wulder MA, White JC, Bentz B, Alvarez MF, Coops NC (2006). Estimating the probability of mountain pine beetle

- red-attack damage. *Remote Sensing of Environment*, 101, 150–166.
- Yu LF, Huang JX, Zong SX, Huang HG, Luo YQ (2018). Detecting shoot beetle damage on Yunnan pine using landsat time-series data. *Forests*, 9, 39. DOI: 10.3390/f9010039.
- Zarco-Tejada PJ, González-Dugo V, Berni JAJ (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322–337.
- Zhang WZ, Han YD, Du HJ, Huang RD, Chen WF (2007). Relationship between canopy temperature and soil water content, yield components at flowering stage in rice. *Chinese Journal Rice Science*, 21, 99–102. [张文忠, 韩亚东, 杜宏娟, 黄瑞东, 陈温福 (2007). 水稻开花期冠层温度与土壤水分及产量结构的关系. *中国水稻科学*, 21, 99–102.]
- Zhao TX, Guo B, An XM, Zhang WJ (2012). The study of stomatal conductance estimation of *Populus deltoids* Bartr. × *Populus ussuriensis* Kom. by infrared thermography. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28, 65–70. [赵田欣, 郭斌, 安新民, 张文杰 (2012). 美洲黑杨与大青杨杂种叶片气孔导度的红外热像测量方法研究. *中国农学通报*, 28, 65–70.]
- Zhu SP (2007). *Research on detection Methods of Plant Disease Using Computer Vision*. Master degree dissertation, Zhejiang University, Hangzhou. [朱圣盼 (2007). 基于计算机视觉技术的植物病害检测方法的研究. 硕士学位论文, 浙江大学, 杭州.]

责任编辑: 曹 敏 实习编辑: 赵 航