

热成像在荆条灌丛和栓皮栎幼苗体温测定中的应用

王佩舒¹, 刘金萍¹, 陈景玲¹, 王 谦^{1*}, 张劲松², 贾长荣³, 孙 圣²

(1. 河南农业大学 林学院,河南 郑州 450002;2. 中国林业科学院林业研究所,北京 100091;3. 河南省济源市大沟河林场,河南 济源 454683)

摘要:热成像仪能够准确测定物体表面的温度,给农林植物科学研究带来了新的手段。针对热成像仪的特点,为了更好地应用于测定农林植物体温度,将热成像仪应用于荆条灌丛体温和栓皮栎幼苗叶温的测定。结果表明:1)农林植物体温的测量可以使用热成像仪,测定前要确定待测物体的辐射出射率。2)对于栓皮栎幼苗叶温,热成像仪与热电偶测定结果非常一致,说明热成像仪适于叶温测量。3)热成像仪可以测定植物群体冠层内和冠层表面叶片的温度,但不能测定空气温度。气温测量仍需要使用热电偶或热敏电阻等传感器。4)热成像仪可以分析荆条冠层的温度分布等值线,展示群体温度分布特征。既为荆条灌丛对栓皮栎幼苗的保育作用研究提供方法,也为热成像仪在其他农林植物体温测定研究中的应用提供参考。

关键词:热成像仪;出射率;荆条灌丛;栓皮栎;叶温

中图分类号:S718.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)02-0048-09

Application of Thermal Imaging in Measuring Temperature of *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Quercus variabilis* Seedlings

WANG Pei-shu¹, LIU Jin-ping¹, CHEN Jing-ling¹, WANG Qian^{1*}, ZHANG Jin-song²,
JIA Chang-rong³, SUN Sheng²

(1. Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China; 2. Research Institute of Forestry, CFA, Beijing 100091, China;
3. Dagouhe Forest Farm, Jiyuan, Henan 454683, China)

Abstract: Thermal imager can measure surface temperature of matters accurately, it provides a new method for agricultural and forestry research. Temperatures of *Vitex negundo* var. *heterophylla* community and *Quercus variabilis* seedling leaves were measured by thermal imager to provide examples of the application of thermal imaging technique in agriculture and forestry. The results showed 1) before applying thermal imager to measuring temperature of plants, the radiation emission rate of plant organs had to be determined. 2) The result of the temperature measurement of *Q. variabilis* by using thermal couple was quite similar to that by thermal imager, indicating that the later was suitable for measuring leaf temperature of plants. 3) Thermal imager could be used to measure canopy temperature of plant community and leaf surface temperature of the canopy, but the air temperature of the canopy had to be measured by using thermal couple or thermistor temperature instruments. 4) Thermal imager could be used to analyze the isotherm of *V. negundo* var. *heterophylla* community canopy, and to show its temperature distribution feature. The results would provide not only a method of studying nurse effects of *V. negundo* var. *heterophylla* canopy to *Q. variabilis* seedlings, but also a method of measuring other agricultural and forestry plants.

Key words: thermal imager; emission rate; *Vitex negundo* var. *heterophylla* community; *Quercus variabilis*; leaf temperature

收稿日期:2016-07-27 修回日期:2016-09-24

基金项目:国家自然科学基金项目“基于气候空间上限列线的栓皮栎幼苗高温叠加干旱胁迫机制研究”(31370621);国家自然科学基金项目“番茄叶片低温胁迫气象指标的气候空间列线研究”(31071321)。

作者简介:王佩舒,女,在读硕士,研究方向:农林生态。E-mail:15093258404@163.com

*通信作者:王 谦,男,博士,教授,研究方向:森林与环境、水土保持。E-mail:wangqianhau@163.com

热成像仪是通过感应物体发射的红外辐射,来摄取物体的发光图像的仪器。由于物体发射红外线的强度由物体的温度决定,物理学上有严格的数量关系,有普朗克定律、斯忒芬-波尔兹曼定律和位恩位移定律为基础,所以测温精度很高。因为热成像仪感应物体表面每一个像素点成像,每个像素点均与温度有严格的数量关系,因而它既能实现红外辐射温度仪的单点温度测定,又可测定物体表面温度的面分布,测温上有独特的优势。

热成像仪在农林相关科学的研究中应用还很少。但农林领域植物体温研究是需要热成像仪的,如作物旗叶温度、穗部温度等,很适于热成像仪测量。如小麦穗温变化对生长与产量形成的影响^[1-5],杂交试验中授粉袋的使用对小麦穗部温度产生影响^[6]。穗粒数和千粒重与穗温的关系密切^[7],幼穗抗霜冻能力研究也需要测定穗温^[8]。灌浆期小麦干物质积累要求分别测定穗部温度和旗叶温度^[9-10]。玉米果穗温度也很早就有关注^[11]。应对气候暖化人们关注作物冠层温度^[12-14]。施肥影响水稻穗温^[15]、温度影响水稻穗颖花数^[16]和幼穗大小^[17],且在齐穗后影响稻米垩白^[18]。水稻穗部温度高导致小穗不育产量降低^[19]。穗温对水稻开颖和花粉生活力有影响^[20],以及在不同温度下贮穗,有利于杂交试验研究等。冠层温度研究一般使用手持式红外测温仪^[21],而热成像仪只有个别应用^[22]。穗温用热成像仪测定,既可非接触测定,又可实现全穗温度分布测定,比传统单点温度测定有明显的优势。也优于红外线测温仪,因为红外线测温仪测得的是一个感应区域的平均温度。

林业上如用红外温度计测定热带季节雨林群落^[23]和橡胶林植物冠层表面温度^[24]。在森林下垫面小气候研究中^[25-26]冠层表面温度是基础数据。藤本植物生活于林冠不同部位,生长与冠层表面温度有关^[27]。森林小气候研究和CO₂通量观测中用红外传感器测定植物冠层表面温度^[28]。园林上的城市绿地的降温增湿作用研究^[29-31]。这些研究如果用热成像测温将得到更为丰富的试验数据和结果。如对林窗边缘树木表面温度等值线^[32],是温度空间分布研究的实例。说明人们希望了解植物器官表面温度分布场,而非一点或多点温度。

光照对苹果果实表面温度有明显影响,进而影响果实着色^[33-34],但由于传统的测温仪感应部分过大,无法测定苹果果实表面温度,有人用热电偶来测定^[35],苹果果实日灼研究也用热电偶测温^[36-37]。但热电偶的温度测定属于一点或多点的温度测定,而使用热成像仪就有明显的优势。套袋在果树生产上

是常见的病虫害防治措施,有人用照度计和数字温度计测定套袋的光照强度和温度^[38]。果实类蔬菜如番茄、黄瓜、茄子、辣椒等其果实生长和品质形成均与果实体温有关,因而人们进行果实体温与品质关系的研究^[39]。这些对果实辐射和温度的关注更适于用热成像仪监测。

可以看出,热成像仪在农林植物体器官温度测定上有广泛的应用前景,其合理有效的应用将极大地促进相关科学的研究工作的开展。对荆条灌丛、栓皮栎幼苗进行体温测定和分析探索,以便以实例指导热成像仪应用于农林科学的研究和生产实际。

1 材料与方法

1.1 观测植物和观测方法

选择苗圃地2年生栓皮栎幼苗群体进行叶温测定,并与热电偶测温仪测定结果比较,以确定热像仪测定叶温的准确性。这里测定2个高度的叶片,栓皮栎冠层表层和冠下自遮荫叶片。经Yaxin1201冠层分析仪测定,栓皮栎幼苗群体自遮荫叶采样叶片高度以上叶面积系数LAI=1.39,平均叶倾角MTA=42.12,消光系数K=0.8644。另外,我们已研究荆条灌丛的天空开度^[40],及其对栓皮栎幼苗的光合能力有保护作用^[41],现对荆条灌丛和2年生栓皮栎幼苗叶片温度进行测定,以分析荆条灌丛遮荫范围和栓皮栎幼苗温度反应。样本荆条灌丛直径175 cm,高180 cm。

叶温热电偶测定采用Yaxin0232多点热电偶测温仪^[42-45]。热成像仪为美国Flir公司infracam。它有调焦功能,可对0~10 m内的目标物对准焦距,调清图像。所以测定时距离目标物的距离的范围宜在10 m以内。实测发现,对于相同目标点,在0~10 m内测得温度相同。超过10 m图像清晰度下降,不宜用于科学的研究的温度测定。本试验测定的试验数据均在10 m内测得。热成像仪镜头中心点定位可用仪器提供的红色激光点辅助定位。激光点距离镜头中心点约2.5 cm,所以从热成像仪上直读植物体温时,要注意激光点照到物体表面,热成像仪实际测定点(镜头中心)位于激光点下2.5 cm处。

1.2 热成像仪出射率参数确定

不同的物体有不同的长波辐射出射率 ϵ ,变化在0.84~0.99之间。所以用热成像仪测定植物体温度时,必须首先知道待测植物器官的辐射出射率。这需要用热成像仪测定植物体温度时,用准确测定植物体温的仪器同时测定,并以其为基准,确定热成像仪相对于该植物器官的辐射出射率。目前能够准确测定植物体器官体温的仪器主要是热电偶测温

仪。本文用热电偶和热成像仪同时测叶温,确定出射率值。其具体方法如下:

根据斯忒芬-波尔兹曼定律,黑体在某温度 T 下的辐射:

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (1)$$

如果用热电偶测得叶温为 T_c ,叶片出射率为 ϵ , $\epsilon < 1$,则叶片的长波辐射强度为 E_c 。

$$E_c = \epsilon \sigma T_c^4 \quad (2)$$

任选一值 ϵ' ,如默认值 0.98,用热成像仪测得叶温 T_h ,则有叶片的长波辐射强度 E_h 为:

$$E_h = \epsilon' \sigma T_h^4 = 0.98 \sigma T_h^4 \quad (3)$$

由于热成像仪和热电偶同时测得的叶温,所以

$$E_c = E_h \quad (4)$$

即

$$\epsilon \sigma T_c^4 = 0.98 \sigma T_h^4 \quad (5)$$

可得到

$$\epsilon = \epsilon' \left(\frac{T_h}{T_c} \right)^4 = 0.98 \left(\frac{T_h}{T_c} \right)^4 \quad (6)$$

式(6)即为确定出射率的公式。按 $\epsilon' = 0.98$ 测得的叶温数据 T_h 订正为准确值 T_h 公式为:

$$\epsilon \sigma T_h^4 = 0.98 \sigma T_h^4 \quad (7)$$

则

$$T_h = \sqrt[4]{\frac{0.98}{\epsilon}} T \quad (8)$$

表 1 桉皮栎叶片辐射出射率确定

Table 1 Determination of emission rate of *Q. variabilis* seedling leaves

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
t_c	31.2	30.1	31.3	31.6	30.4	31.7	31.3	29.9	29.8	29.6	30.69
T_h	31.1	29.8	31.1	31.8	30.4	31.6	31.1	29.7	29.3	29.4	30.53
ϵ	0.97	0.94	0.96	1.01	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.95	0.96
T_h	31.3	30.0	31.3	32.0	30.6	31.8	31.3	29.9	29.5	29.6	30.69

2.2 桉皮栎幼苗群体温度

2016 年 6 月 19 日对群体内自遮荫叶片和群体表层阳生叶片各采样 10 个,分别用热电偶测温仪和热成像仪进行叶温测定,同时测定与样本叶片同高度的空气温度 t_a (表 2)。由表 2 可以看出,群体内气温与叶温差异很小,平均值为 0.15°C ,所以用热成像仪测定群体内叶温可代表群体温度。热成像仪不能测定气温,群体内叶温与气温接近的特点决定了热成像仪可以测定群体内体温。

群体表层阳生叶片热成像测得叶温与热电偶测得叶温也一致,完全可以用热成像仪测定叶温用于叶温分析;但热成像叶温与热电偶测得的同高度气温相差较大,表 2 中平均值为 1.18°C 。根据测定,该值在太阳辐射强且风速小时还会更大^[46],所以不能用热电偶直接测得的叶温作为桉皮栎群体表层的

1.3 数据和热成像仪图像处理

热成像仪获得的荆条灌丛群体温度分布用 Flir Tools 软件进行图像处理来获得,温度等值线绘制采用 AutoCad2016 软件,单叶温度由热成像仪直接读取。

2 结果与分析

2.1 单叶辐射出射率测定

于 2016 年 6 月 19 日用热电偶和热成像 2 种方法测定栓皮栎顶层叶片叶温,分别用 t_c 、 t_h 表示。其中热成像仪的辐射出射率设为默认值 0.98(表 1)。根据式(6)求得出射率平均为 0.96。 t_c 与订正后的热成像测叶温 t_h 线性回归表明,热成像仪测定叶温与热电偶测定叶温非常接近(图 1)。二者关系系数 0.974,相关系数为 0.987,相关性很大。

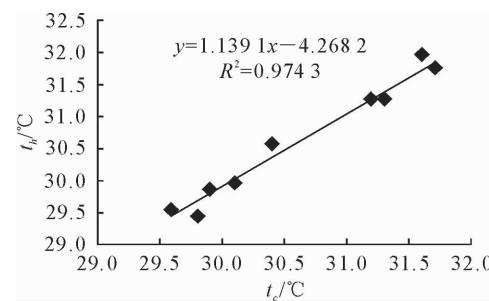


图 1 热像仪和热电偶测定栓皮栎叶温对比

Fig. 1 Comparison of *Q. variabilis* seedling leaf temperature measured by thermal couple and thermal imager

群体温度。即在进行表层叶气温差分析时,叶温可以用热成像仪测定,气温必须用其他传感器测定。

2.3 荆条灌丛定点体温

2016 年 5 月 29 日将多点热电偶测温仪 9 个测点布置于荆条灌丛内(图 2)。采集器设定为每 10 min 自动监测 1 次温度。分析数据时取每正点时刻各测点荆条灌丛体温,分布情况如图 3。由图 3 可以看出,灌丛内部温度低,边缘的 1 号和 9 号点温度较高。13:00—16:00 荆条灌丛内的温度较接近,均维持较高温度;10:00—13:00 为温度持续上升阶段。17:00 荆条体温开始下降。对于这样的灌丛温度测定,同时用热电偶和热成像仪测定灌丛体温,热成像仪观测方向见图 2。于 2016 年 6 月 13 日 10:00—15:00 每正点时观测灌丛的升温过程,其热成像仪测温的温度变化过程如图 4。这与图 3 的结果

表2 栓皮栎幼苗群体阳生叶和自遮荫叶片温测定对比

Table 2 Comparison of *Q. variabilis* seedling temperatures of sunny and self shading leaves

样本号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
群体内	t_a	34.3	33.4	34.4	33.7	32.7	33.6	33	33.5	33.8	31.7
	t_c	33.9	33.3	33.7	32.4	33	32	33.4	31	31.7	31.4
	t_h	33.9	33.5	34.4	32.2	33.4	33.0	32.7	31.7	31.2	31.6
	$t_h - t_c$	0.0	0.2	0.7	-0.2	0.4	1.0	-0.7	0.7	-0.5	0.2
	$t_h - t_a$	-0.4	0.1	0.0	-1.5	0.7	-0.6	-0.3	-1.8	-2.6	-0.1
群体表层	t_a	33.9	33.5	34.4	32.2	34.6	33.7	34	32.5	34.2	34
	t_c	35.4	34.5	36.2	33.2	35.2	35.2	35.6	34.7	36.6	34.5
	t_h	35.6	36.2	35.7	33.2	35.2	35.2	34.2	32.4	36.7	34.6
	$t_h - t_c$	1.7	-0.5	0.0	0.0	0.0	-1.4	-2.3	0.1	0.1	-0.23
	$t_h - t_a$	2.7	1.3	1.0	0.6	1.5	0.2	-0.1	2.5	0.6	1.18

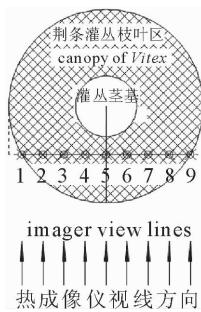


图2 热电偶测定荆条群体温度布点和热像仪视线

Fig. 2 Sensors distribution of thermal couple in *Vitex* and view lines of thermal imager

— 10:00 ----- 11:00 —▲— 12:00 —◇— 13:00
 —△— 14:00 —×— 15:00 —◆— 16:00 —○— 17:00

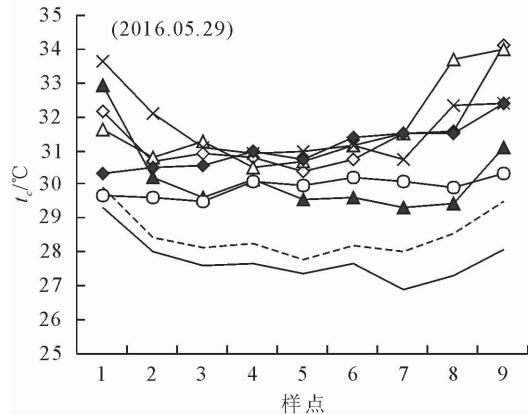


图3 热电偶测荆条灌丛内温度分布

Fig. 3 *Vitex* body temperature distribution measured by thermal couple

规律相似,只是温度的波动略大,这主要是灌丛的均匀性的影响。

将6月13日热成像仪与热电偶测温求差值,并求均值和方差,列于表3。由表3可以看出,10:00—11:00的空气温度上升阶段,热成像仪测定荆条体温时灌丛内部体温测定误差大于边缘。随着时间进入中午高温时段,荆条灌丛边缘的点热成像仪测定的误差较大,原因是荆条灌丛边缘茎叶稀疏,热

成像仪视野里会有背景景物进入,背景景物的温度造成测量误差。2)内部样点误差多为负值,即热成像仪测得了比热电偶更低的温度。这是由于热成像仪沿其视线方向观测荆条灌丛,视线可能通过茎叶间隙穿透荆条灌丛至灌丛中心。而灌丛中心的温度比灌丛外围要低。这一点可以从热成像仪拍摄的测温图片上清晰地观察到,如图5,灌丛温度不均匀,颜色较深的点为温度较低的点。各样点各时刻热电偶和热成像仪测荆条体温点散点图并线性回归(图6)。由图6可见,回归的关系系数在0.718,相关系数0.840 4,相关性较好。但二者的相关系数低于单叶测定的结果,主要原因也是荆条冠层的不均匀性造成的(图5)。

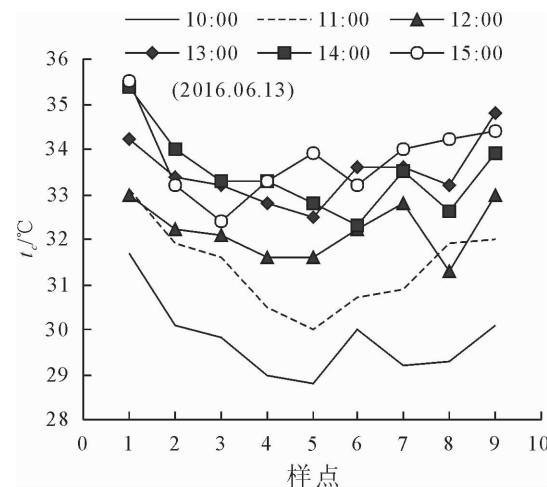


图4 热成像仪测定荆条灌丛体温

Fig. 4 *Vitex* body temperature distribution measured by thermal imager

2.4 荆条灌丛和栓皮栎幼苗温度分布

荆条灌丛对栓皮栎幼苗荫庇作用有效范围由灌丛体温分布决定。用热成像仪同时观测荆条灌丛纵向的温度分布和栓皮栎幼苗的叶片温度,可以识别荆条灌丛的荫庇区域。2016年5月24日上午选择正午太阳辐射最强时用热成像仪拍摄荆条灌丛热成像图

片(图7),右侧为可见光图片。由图7可以看出,荆条灌丛温度由外向内温度降低,位于其下部的栓皮栎幼苗叶温与荆条灌丛外围的体温相近,而位于荆条灌丛内部的栓皮栎幼苗则处于更低的温度下。

对荆条灌丛热成像仪的图片进行界限温度分

表3 不同时间荆条群体热成像仪测温与热电偶测温差异
Table 3 Difference of *Vitex* body temperature measured by thermal couple and thermal imager

时间	样本号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10:00	0.1	-1.3	-0.6	-1.6	-1.3	-0.4	-0.6	-0.1	0.1
11:00	1.1	-0.4	-0.5	-1.4	-1.5	-0.9	0.0	1.4	0.7
12:00	1.0	0.4	0.5	-0.1	-0.1	0.3	1.3	-0.2	1.1
13:00	0.9	0.6	0.4	-0.2	-0.3	0.5	0.9	0.5	1.4
14:00	1.9	0.3	0.0	-0.3	-0.5	-1.4	0.2	-1.4	-0.1
15:00	1.8	-0.6	-1.2	-0.7	0.1	-1.2	-0.1	-0.4	-0.8
均值	1.1	-0.1	-0.2	-0.7	-0.6	-0.5	0.3	0.0	0.4
方差	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.7

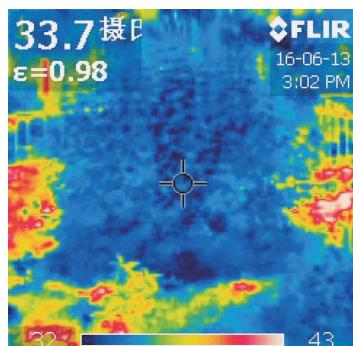


图5 荆条灌丛的热像仪纵向图

Fig. 5 Thermal vision of *Vitex* shrub

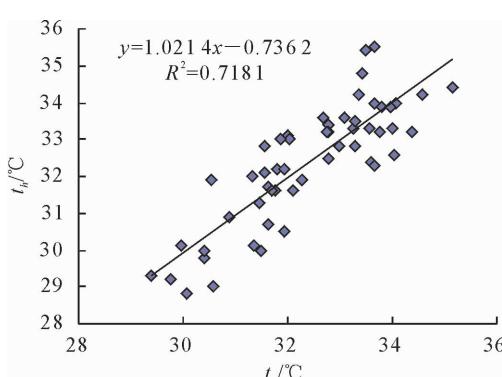


图6 热像仪和热电偶测定荆条灌丛体温回归

Fig. 6 Regression of *Vitex* body temperature measured by thermal couple and imager

栓皮栎幼苗高温干旱胁迫指标为42℃^[47]。从图9可以看出,荆条灌丛外的栓皮栎叶温已接近42℃,这时如果土壤水分缺乏或高温,就会发生高温干旱胁迫。而低于高温胁迫指标的范围在荆条灌丛内部,即要让荆条灌丛在高温时段对栓皮栎幼苗创造适宜温度环境,起到荫庇作用,就要将栓皮栎幼苗

析,取50、46、42、38℃和34℃为温度界限,用Flir公司提供的Tools软件,确定温度低于上述各界限值范围的图片。50℃和32℃处理图片结果如图8,用AutoCAD画出各温度图片的等值线趋势图(图9)。

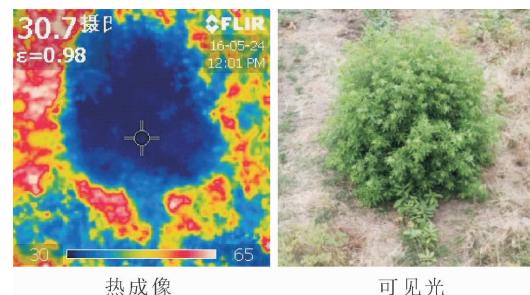


图7 荆条灌丛和栓皮栎幼苗热成像和可见光

Fig. 7 Thermal and visible visions of *Vitex* and *Q. variabilis*

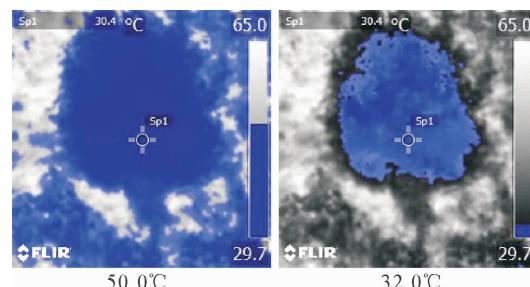


图8 Tools 软件确定的界限温度 50℃ 和 32℃ 热成像

Fig. 8 Thermal vision of limit temperature 50°C and 32°C determined by flir tools software

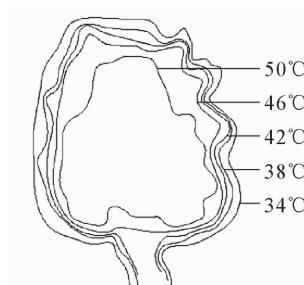


图9 荆条灌丛和栓皮栎幼苗群体温度等值线分布

Fig. 9 Isotherm of *V. negundo* var. *heterophylla* communities and *Q. variabilis* seedlings

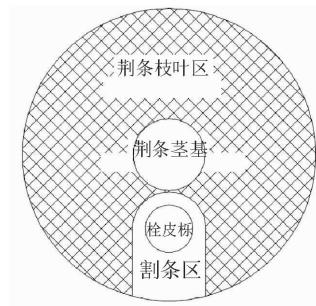


图 10 建议的造林割条工程措施

Fig. 10 Engineering measures suggested to trim *Vitex* branch to shade *Quercus*

播种于荆条灌丛内。由于栓皮栎是乔木树种,其生物学特性是苗期可侧方遮荫,但不喜上方遮荫。所以,可以用工程造林措施,即对荆条灌丛采取割条处理,形成栓皮栎幼苗的生存空间(图 10)。

3 结论与讨论

由于热成像仪测温原理是依据物理学的辐射定律,辐射与温度之间有严格的数据关系,所以热成像仪能进行准确的温度测量。从物理学和气象学来讲,处在绝对 0℃ 的任何物体都有长波辐射,包括自然常温下的农林植物体器官,它们的辐射都是符合物理学辐射定律的,因而可以使用热成像仪进行农林植物体器官的体温测定。另外,由于热成像仪可利用红外辐射成像,实现物体表面全部像素点温度同时测定,这使农林植物体器官温度分布测定和分析成为了现实。这在农林业科学的研究上是很重要的,如文献[33]的果实着色研究等多种需要表面温度分析的问题。

不同植物的辐射特性不同,同种植物不同的体器官辐射特性也不同,如栓皮栎的叶片、茎表面、芽、子叶等。这种辐射特性的不同主要表现在辐射的光质和光量两个方面,光质上是指光谱分布上的不同,其特征已经被用来诊断植物生长、环境胁迫等^[48-51],在生态学上产生了重要的作用。光量上则体现在辐射出射率的不同。热成像仪测定不同植物的体器官温度,其辐射出射率不同,在开始测定前必须先确定辐射出射率。可以先将热成像仪的 ϵ 值先设置为黑认值 0.98,或设定为 1。前者相当于将植物体器官按出射率为 0.98 的灰体看待,后者相当于将植物体器官当成黑体看待。然后根据辐射的斯忒芬-波尔兹曼定律确定待研究植物体器官的辐射出射率,用于后面的测定研究。本研究测定了栓皮栎幼苗叶片的辐射出射率为 0.96,较接近仪器的默认值 0.98,若直接使用仪器给出的默认辐射出射率进行温度测量,产生的误差为 2%。

经辐射出射率订正后,用热成像仪测定栓皮栎幼苗叶片叶温,与同时用热电偶测温仪测定的相应叶片叶温相比较,二者相关系数达 0.987,关系非常密切。热成像仪完全可以用于栓皮栎叶片的叶温测定。由于绿色植物的辐射特性有共性,都是物理学和气象学上的长波辐射,所以热成像仪可以用于各种植物的体器官温度测定。

在植物群体温度测定中,像小麦、水稻等农作物群体,林业上的树木群体,都存在植物体温和植物体周围空气温度的差别问题。用热电偶测温仪观测到了苗圃地播种的栓皮栎实生幼苗群体的温度,也体现出了类似的温度特征。第一种情况是群体内叶温与其周围空气温度基本一致。这种情况下,用热成像仪透过栓皮栎幼苗叶片间隙测定群体内下层叶片叶温可以得到准确的叶片温度。第二种情况是群体表层叶温与周围空气温度相差较大。这种情况下,用热成像仪仍可以准确测定栓皮栎幼苗表层叶片的叶温,但该叶温不能代表同高度的空气温度,尤其是太阳辐射较强、风速较小时。人们非常关注冠气温差,有较多研究^[52-56],将冠气温差用于植物水分诊断在国际上取得了较好进展^[57-61],使冠气温差研究更为重要。热成像仪由于其能够进行表面温度测定的特点,更适于冠气温差研究。但这种研究一定要区分表层叶温、群体内叶温、表层叶片周围气温,尤其是关注叶片温度的叶气温差研究^[62]。由于热成像仪不能直接测定空气温度,所以,叶气温差不为 0 时,气温的测定应该采用像热电偶或热敏电阻等其他温度测定方法的仪器进行测定。

用热成像仪可直接测定荆条灌丛多点体温。与热电偶测得的荆条灌丛温度比较,回归相关系数为 0.840 4,相关性较好。影响热成像仪测定荆条灌丛体温准确性的主要因素是灌丛茎叶密集程度,即冠层的通透性。如果冠层叶面积密度大,热成像仪测定的温度就主要由灌丛表层茎叶温度决定;如果冠层叶面积密度小,灌丛内部的茎叶温度就会产生影响。这是由热成像仪测温的特点决定的。

热成像仪对测量物体表面全部像素温度同时采样测定的特点,决定了它能够进行植物体表面温度等值线分析。荆条灌丛等值线分析表明,越向灌丛内部,群体温度越低。要利用荆条灌丛遮荫保护栓皮栎幼苗免受高温胁迫,应该考虑利用荆条灌丛内部低温区,即对荆条灌丛修剪枝条,构建栓皮栎幼苗保育空间。热成像仪的物体表面温度分析的功能在未来植物体及植物群体温度分布的应用研究中,将会有更多应用,进而促进相关研究的进展。如文献[31]林窗边缘树木表面温度等值线的研究,非常适

于用热成像仪进行温度采集和分析。

本文测定的是低矮的灌丛和栓皮栎幼苗,对于高大乔木,有2种测定方式:对于树冠侧面,可在乔木外围搭支架,登高测定;对于树冠顶部表面,可用无人机携带热成像仪测定。使用无人机测定时,除无人机遥控外,热像仪也要选择无线遥控型,便于在地面上发出触发指令,让热像仪拍摄图像。或选择连续测定型热成像仪,在地面上打开热像仪测定开关,由无人机带到树冠上方测得图像。

参考文献:

- [1] MARGARET A. FORD, I. PEARMAN, GILLIAN N. Thorne. Effects of variation in ear temperature on growth and yield of spring wheat[J]. Ann. Appl. Biol., 1976, 82: 317-333.
- [2] D. KNOPPIK, H. SELINGER, A. ZIEGLER-JONES. Differences between the flag leaf and the ear of a spring wheat cultivar (*Triticum aestivum* cv.) with respect to the CO₂ response of assimilation, respiration and stomatal conductance[J]. Physiol. Plantarum, 1986, 68: 451-457.
- [3] MARGARET RADLEY. Effect of variation in ear temperature on gibberellins content of wheat ears[J]. Ann. Appl. Biol., 1976, 82: 335-340.
- [4] AL-ISSAWI M, RIHAN H Z, EL-SARKASSY N, et al. Frost hardiness expression and characterisation in wheat at ear emergence[J]. J. Agro. Crop. Sci., 2013, 119: 66-74.
- [5] BEATA B, KATALIN J, ATTILA F. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals[J]. Plant, Cell and Environment, 2008, 31: 11-38.
- [6] BALL S T, 周恒. 授粉袋对小麦穗部温度的影响[J]. 麦类作物学报, 1993, 13(4): 25-27, 41.
- [7] 张冬玲. 小麦穗粒数和千粒重的关联分析及冠层温度和叶绿素含量对产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [8] ZHONG X, MEI X, LI Y, et al. Changes in frost resistance of wheat young ears with development during jointing stage[J]. J. Agronomy & Crop Science, 2008, 194: 343-349.
- [9] ARAUS J L, BROWN H R, FEBRERO A, et al. Ear photosynthesis, carbon isotope discrimination and the contribution of respiratory CO₂ to differences in grain mass in durum wheat[J]. Plant, Cell and Environment, 1993, 16: 383-392.
- [10] RUT SANCHEZ-BRAGADO, ABDELHALIM ELAZAB, BANGWEI ZHOU, et al. Contribution of the ear and the flag leaf to grain filling in durum wheat inferred from the carbon isotope signature: genotypic and growing conditions effects[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2014, 56(5): 444-454.
- [11] SETTER T L, FLANNIGAN B A, 于久江. 玉米遮荫和果穗温度处理对糖分与淀粉再分配的反应[J]. 国外农学-杂粮作物, 1987(1): 18-22.
- [12] URSULA M R, MATTHEW H S, DAVOD W D, et al. Canopy warming caused photosynthetic acclimation and reduced seed yield in maize grown at ambient and elevated [CO₂][J]. Global Change Biology, 2015, 21: 4237-4249.
- [13] BERTA S, ANTON R, JOHN R P. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review[J]. Global Change Biology, 2014, 20: 408-417.
- [14] ZHANG X, HALDER J, WHITE R P, et al. Climate change increases risk of fusarium ear blight on wheat in central China [J]. Annals of Applied Biology, 2014, 164: 384-395.
- [15] 张彬, 郑建初, 杨飞, 等. 施肥水平对抽穗期水稻穗部温度的影响及其原因分析[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 191-196.
- ZHANG B, ZHENG J C, YANG F, et al. Effects of fertilization level on panicle temperature at heading stage of rice [J]. Chinese J. Rice Sci., 2007, 21(2): 191-196. (in Chinese)
- [16] 娄伟平, 孙永飞, 张寒, 等. 温度对水稻每穗颖花数的影响[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(2): 101-105.
- LOU W P, SUN Y F, ZHANG H, et al. Effects of temperatures on spikelets per panicle of rice [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2005, 17(2): 101-105. (in Chinese)
- [17] 张效忠, 苏泽胜. 温度对水稻幼穗大小影响的研究[J]. 安徽农业科学, 1998(3): 20-21.
- ZHANG X Z, SU Z S. Effect of temperature on rice panicle size [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 1998(3): 20-21. (in Chinese)
- [18] 贾志宽, 高如嵩, 张嵩午, 等. 水稻齐穗后温度对稻米垩白影响途径研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 1991, 19(3): 27-31, 110.
- JIA Z K, GAO R S, ZHANG S W, et al. Research on the ways of effects of temperature after full heading of rice plants [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Edi., 1991, 19(3): 27-31, 110. (in Chinese)
- [19] TIAN X, T, MATSUI, S, LI, et al. Heat induced floret sterility of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jainghan basin, China [J]. Plant Production Science, 2010, 13(3): 243-251. (in Chinese)
- [20] 王忠, 陆汉超, 顾蕴洁, 等. 贮穗温度对水稻开颖及花粉生活力的影响[J]. 江苏农学院学报, 1993(1): 17-20.
- WANG Z, LU H C, GU Y J, et al. Temperature of ear-storing on flower-opening and pollen viabilities of rice [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1993(1): 17-20. (in Chinese)
- [21] 高继平, 韩亚东, 王晓通, 等. 水稻齐穗期冠层温度分异及其相关性的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 13(4): 399-405.
- GAO J P, HAN Y D, WANG X T, et al. Canopy temperature difference and the related characteristics at heading stage in rice [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 13(4): 399-405. (in Chinese)
- [22] 闫川, 丁艳锋, 王强盛, 等. 穗肥施量对水稻植株形态、群体生态及穗叶温度的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(12): 2176-2183.
- YAN C, DING Y F, WANG Q S, et al. Effect of panicle fertilizer application rate on morphological, ecological characteristics, and organ temperature of rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(12): 2176-2183. (in Chinese)
- [23] 杨振, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林林冠层温度与大气温度特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(5): 845-849.
- YANG Z, ZHANG Y P, YU G R, et al. Characteristics of canopy and air temperature in tropical seasonal rain forests in Xishuangbanna [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(5): 845-849. (in Chinese)

- [24] 马友鑫,张克映,刘玉洪. 云南橡胶林冠面温度的初步研究[J]. 林业科学,1996,32(3):193-198.
MA Y X, ZHANG K Y, LIU Y H. A preliminary study on canopy surface temperature of rubber forest in Yunnan[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32(3): 193-198. (in Chinese)
- [25] 关德新,朱廷曜,金昌杰. 中性温度层结时森林郁闭度与林冠上风速廓线的关系[J]. 北京林业大学学报,1997,29(1):27-31.
GUAN D X, ZHU T Y, JIN C J. The relationship between canopy density of forest and wind speed profile under neutral stratification [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, 29(1): 27-31. (in Chinese)
- [26] 魏丹丹. 基于冠层温度测算栓皮栎人工林空气动力学阻抗的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2012.
- [27] 江浩,周国逸,黄钰辉,等. 南亚热带常绿阔叶林林冠不同部位藤本植物的光合生理特征及其对环境因子的适应[J]. 植物生态学报,2011,35(5):567-576.
JIANG H, ZHOU G Y, HUANG Y H, et al. Photosynthetic characteristics of canopy-dwelling vines in lower subtropical evergreen broadleaved forest and response to environmental factors[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(5): 567-576. (in Chinese)
- [28] 张一平,赵双菊,于贵瑞,等. 西双版纳热带季节雨林干热季林冠上小气候特征 CO₂ 通量的观测[J]. 生态学报,2005,25(10):2540-2549.
ZHANG Y P, ZHAO S J, YU G R, et al. Characteristics of microclimate and CO₂ flux above a tropical seasonal rain forest in dry-hot season of Xishuangbanna, Southwest of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2540-2549. (in Chinese)
- [29] 龙珊,苏欣,王亚楠,等. 城市绿地降温增湿效益研究进展[J]. 森林工程,2016(1):21-24.
LONG S, SU X, WANG Y N, et al. Research progress in cooling and humidifying efficiency of urban green spaces[J]. *Forest Engineering*, 2016(1): 21-24. (in Chinese)
- [30] 曾巧楠,吴学谦,陈志骏,等. 绿化对住宅小区热环境的影响研究进展[J]. 中国园艺文摘,2016(2):67-70.
- [31] 王利鑫,弓弼,申依宁,等. 校园绿地冬季白天小气候效应分析——以西北农林科技大学南校区为例[J]. 西北林学院学报,2016,31(1):292-297,308
WANG L X, GONG B, SHEN Y N, et al. Microclimate effects of campus green space in winter day—a case study of the south campus of Northwest A&F University[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(1): 292-297, 308. (in Chinese)
- [32] 张一平,王进欣,马友鑫,等. 西双版纳热带次生林林冠边缘树表温度的时空分布[J]. 北京林业大学学报,2000,32(3):8-13.
ZHANG Y P, WANG J X, MA Y X, et al. Temporal-spatial characteristics of trunk surface temperature at the edge of canopy gap in tropical secondary forest of Xishuangbanna in dry season[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 32(3): 8-13. (in Chinese)
- [33] 李英丽. 苹果果实对高温、强光胁迫的反应及其抗性机理研究[D]. 石家庄:河北农业大学,2003.
- [34] 孙志鸿. 苹果树冠微气候与果实品质关系研究[D]. 北京:中国农业科学院,2005.
- [35] 张建光,刘玉芳,孙建设,等. 光照强度对苹果果实表面温度变化的影响[J]. 生态学报,2004,24(6):1306-1310.
ZHANG J G, LIU Y F, SUN J S, et al. Effect of solar radiation on fruit surface temperature in apples[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1306-1310. (in Chinese)
- [36] 张建光,刘玉芳,孙建设,等. 苹果果实日灼人工诱导技术及阈值温度研究[J]. 园艺学报,2003,30(4):446-448.
ZHANG J G, LIU Y F, SUN J S, et al. Studies on artificial induction and threshold temperatures of apple fruit sunburn [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(4): 446-448. (in Chinese)
- [37] 张建光. 苹果(*Malus domestica* Borkh.)果实日灼原因、机理及预防[D]. 石家庄:河北农业大学,2005.
- [38] 邸葆,张建光,孙建设. 不同袋型、光照强度和温度对苹果果实表皮细胞膜特性的影响[J]. 中国农学通报,2011(6):161-165.
DI B, ZHANG J G, SUN J S. Effect of fruit bags, illumination intensity and temperature on membrane integrity in apple peel tissues[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011(6): 161-165. (in Chinese)
- [39] 白鹏威. 结果期不同温度和光照处理对番茄品质的影响[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2010.
- [40] 陈景玲,张冬,王谦,等. 荆条孤立冠层天空开度与太阳辐射透射率关系研究[J]. 西北林学院学报,2014,29(5):19-25.
CHEN J L, ZHANG D, WANG Q, et al. Solar radiation transmittance of isolated vervain family canopy using canopy analyzer[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(5): 19-25. (in Chinese)
- [41] 陈景玲,王静,王谦,等. 基于叶绿素荧光的荆条灌丛对栓皮栎幼苗庇荫效应研究[J]. 西北林学院学报,2014,29(4):46-53.
CHEN J L, WANG J, WANG Q, et al. Patronage effect of vervain family to *Quercus variabilis* saplings based on leaf chlorophyll fluorescence[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(4): 46-53. (in Chinese)
- [42] 陈景玲,王谦,朱秀红,等. 番茄叶片和果实热容量的热平衡测定方法[J]. 农业工程学报,2012,28(2):279-283.
CHEN J L, WANG Q, ZHU X H, et al. Specific heat of tomato leaf and fruit with heat balance method[J]. *Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 279-283. (in Chinese)
- [43] 陈景玲,朱秀红,王谦,等. 番茄果实与空气中对流换热研究[J]. 华北农学报,2012,27(6):229-232.
CHEN J L, ZHU X H, WANG Q, et al. Study on the heat convection between tomato fruitage and air [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(6): 229-232. (in Chinese)
- [44] 王佩舒,赵薇,陈景玲,等. 高温胁迫对冬小麦旗叶伤害的叶绿素荧光指标初探[J]. 河南农业大学学报,2016,50(1):25-32.
WANG P S, ZHAO W, CHEN J L, et al. Study on the index of chlorophyll fluorescence for the flag leaf of winter wheat suffering from high temperature stress [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2016, 50(1): 25-32. (in Chinese)
- [45] 陈景玲,王谦,吴明作,等. 静风条件下植物叶片热物性参数的研究[J]. 河南农业大学学报,2014,48(4):445-448.
CHEN J L, WANG Q, WU M Z, et al. Study on the physical properties of plant leaf on the condition of static wind[J].

- Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48(4): 445-448. (in Chinese)
- [46] 王佩舒,王威红,陈景玲,等.栓皮栎幼苗叶气温差随太阳辐射和风速变化的列线研究[J].中国农业气象,2016,37(2):213-221.
- WANG P S, WANG W H, CHEN J L, et al. Series lines on change of leaf temperature difference of *Quercus variabilis* with solar radiation and wind speed[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(2): 213-221. (in Chinese)
- [47] 陈景玲,宋晓明,王谦,等.基于叶绿素荧光参数的栓皮栎叶片PSⅡ失活高温指标[J].中国农业气象,2013,34(5):563-568.
- CHEN J L, SONG X M, WANG Q, et al. High temperature index of PSII inactivation according to chlorophyll fluorescence of *Quercus variabilis* leaves [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(5): 563-568. (in Chinese)
- [48] 刘克,赵文吉,郭道宇,等.野鸭湖典型湿地植物光谱特征[J].生态学报,2010,30(21):5853-5861.
- LIU K, ZHAO W J, GUO X Y, et al. Spectral bands of typical wetland vegetation in the Wild Duck Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(21): 5853-5861. (in Chinese)
- [49] 张翼然,宫兆宁,赵文吉.水分环境梯度下野鸭湖湿地典型植物光谱特征分析[J].光谱学与光谱分析,2012,32(3):743-748.
- ZHANG Y R, GONG Z N, ZHAO W J, et al. Typical plant spectral characteristics analysis in Wild Duck Lake along water environment gradient [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(3): 743-748. (in Chinese)
- [50] 马超飞,马建文,韩秀珍.微量元素在植物光谱中的响应机理研究[J].遥感学报,2001,5(5):334-339.
- MA C F, MA J W, HAN X Z. Mechanism analysis of leaf spectrum response resulted from trace elements [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(5): 334-339. (in Chinese)
- [51] 靳瑰丽,何龙,安沙舟,等.退化伊犁绢蒿荒漠草地特征植物光谱特征[J].草业科学,2014,31(10):1848-1858.
- JIN G L, HE L, AN S Z, et al. Spectral features of eight desert range plants on degradation *Seriphidium transiliense* desert grassland [J]. Pratacultural Science, 2014, 31(10): 1848-1858. (in Chinese)
- [52] 王卫星,宋淑然,许利霞,等.基于冠层温度的夏玉米水分胁迫理论模型的初步研究[J].农业工程学报,2006,22(5):194-196.
- WANG W X, SONG S R, XU L X, et al. Theoretical model of the crop water stress index for monitoring summer maize water stress based on canopy surface temperature[J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 194-196. (in Chinese)
- [53] 崔晓,许利霞,袁国富,等.基于冠层温度的夏玉米水分胁迫指
数模型的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(8):22-24.
- CUI X, XU L X, YUAN G F, et al. Crop water stress index model for monitoring summer maize water stress based on canopy surface temperature [J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 22-24. (in Chinese)
- [54] 袁国富,唐登银,罗毅,等.基于冠层温度的作物缺水研究进展[J].地球科学进展,2001,16(1):49-54.
- YUAN G F, TANG D Y, LUO Y, et al. Advances in canopy-temperature-based crop water stress research[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 49-54. (in Chinese)
- [55] 袁国富,罗毅,孙晓敏,等.作物冠层表面温度诊断冬小麦水分胁迫的试验研究[J].农业工程学报,2002,18(6):13-17.
- YUAN G F, LUO Y, SUN X M, et al. Winter wheat water stress detection based on canopy surface temperature [J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 13-17. (in Chinese)
- [56] 俞龙,王卫星,崔晓,等.基于冠层温度的夏玉米旱情指数理论模型和经验模型的比较[J].华南农业大学学报,2007,28(3):110-112.
- YU L, WANG W X, CUI X, et al. Comparisons between the empirical and theoretical models based on canopy temperature for monitoring water stress of summer Maize[J]. Journal of South China Agricultural University, 2007, 28(3): 110-112. (in Chinese)
- [57] TESTI L, GOLDHAMER D A, INIESTA F, et al. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees[J]. Irrigation Science, 2008, 26 (5): 395-405.
- [58] PAYERO J O, IRMAK S. Variable upper and lower crop water stress index baselines for corn and soybean[J]. Irrigation Science, 2006, 25(1): 21-32.
- [59] ERDEM T, ORTA A H, ERDEM Y, et al. Crop water stress index for potato under furrow and drip irrigation systems[J]. Potato Research, 2005, 48(1): 49-58.
- [60] ATTILA Y, HOWELL T A, DUSDK D A, et al. Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn[J]. Irrigation Science, 1999, 18(4): 171-180.
- [61] JENSEN H E, SVENDSEN H, JENSEN S E, et al. Canopy-air temperature of crops grown under different irrigation regimes in a temperate humid climate[J]. Irrigation Science, 1990, 11(3): 181-188.
- [62] 王丽明,邱国玉,张清涛,等.作物缺水指数新方法的验证[J].中国农业气象,2005,26(4):229-232.
- WANG L M, QIU G Y, ZHANG Q T, et al. Experimental validation of a new method to evaluate crop water stress index (CWSI) [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26 (4): 229-232. (in Chinese)