

崔 晓,陈文彬,柳革命,等. 茶树的作物水分胁迫指数、光合有效辐射强度与光合参数的关系[J]. 江苏农业科学,2022,50(10):140-144.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.10.022

茶树的作物水分胁迫指数、光合有效辐射强度与光合参数的关系

崔 晓¹, 陈文彬², 柳革命¹, 王卫星^{2,3}

(1. 广东白云学院电气与信息工程学院, 广东广州 510450; 2. 华南农业大学电子工程学院/人工智能学院, 广东广州 510642;
3. 广东省农情信息监测工程技术中心, 广东广州 510642)

摘要:构建茶园环境信息监测系统,研究作物水分胁迫指数、光合有效辐射强度等与光合参数的关系,为茶树灌溉管理、长势估计提供参考依据。通过直接灌溉方式,使得 4 个水分池土壤湿度为土壤田间持水量的 90%、80%、70%、65%;利用无线传感器网络,实现对各水分池的冠层温度、空气温湿度、光合有效辐射强度进行测量,并根据 Idso 提出的作物水分胁迫指数经验公式,计算 CWSI 和 CWSI/PAR;利用 SYS-GH30D 光合作用仪测得茶树叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度;研究数据间相关性,基于随机采样一致性进行线性回归分析,并利用决定性系数 r^2 对线性回归分析结果进行评估。通过茶园环境信息监测系统采集环境数据,并计算 CWSI 与 CWSI/PAR。结果显示, P_n 、 T_r 、 G_s 与 CWSI、CWSI/PAR 均呈负相关,CWSI/PAR 较 CWSI 与光合参数更具相关性,能够实现光合参数的估计。CWSI/PAR 能够同步反映茶树 P_n 、 T_r 、 G_s 参数的变化状况。通过对冠层温度、空气温湿度、光合有效辐射强度的测量,实现茶树光合参数的估计,可用于指导茶树的水肥管理。

关键词:茶树;无线传感器网络;作物水分胁迫指数;光合有效辐射强度;光合参数

中图分类号: S571.101 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)10-0140-05

茶树发生干旱胁迫后,叶片往往会发生净光合速率(net photosynthetic rate,简称 P_n)下降、气孔导度(stomatal conductance,简称 G_s)下降、蒸腾速率(transpiration rate,简称 T_r)降低等情况,最终导致作物冠层温度上升、有机物合成速率下降^[1-3],导致产量下降。类似的研究结果亦在冬小麦^[4-5]、草莓^[6]、沙棘^[7]、马铃薯^[8]等作物上有所体现。

作物水分胁迫指数(crop water stress index,简称 CWSI)是基于植物温度的水分状况量化指标。Tanner 就植物温度、蒸腾作用与水分状况做出了定性分析,并提出太阳辐射入射角度对温度测量存在影响^[9]。Idso 等根据作物干旱胁迫的冠层温度响

应,提出 CWSI 经验模型^[10]。由于 CWSI 经验模型具备参数少,方便测量、计算等优点,结合无线传感器网络低空遥感等现代信息技术,被广泛应用于作物水分监测、灌溉决策以及产量估计中^[11-14]。相反,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等参数数值能够较为准确地反映作物的水分及生长状况,但这些参数的测量往往需要复杂的仪器设备,难以应用到实际的大田水分管控中。

针对以上研究现状,本试验对茶树作物水分胁迫指数、光合有效辐射强度(photosynthetically active radiation,简称 PAR)等与光合参数的关系展开研究,为其灌溉管理、长势估计提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验方案

试验地点位于华南农业大学工程学院南楼。试验时间为 2021 年 3 月 16—29 日 15:00—16:30,即英红九号茶树光合作用的第二峰值阶段。试验共选取 12 株平均高度约为 42 cm 的英红九号植株,并分 4 个水分池种植,水分池为面积 15 cm × 27 cm,深度为 0.45 m,4 个水分池土壤湿度为土壤田间持

收稿日期:2021-07-14

基金项目:2021 年广东省级乡村振兴战略专项省级组织实施项目(编号:粤财农[2021]37 号);广东省重点领域研发计划(编号:2019B020214003);广东白云学院校级科研项目(编号:2021BYKY24)。

作者简介:崔 晓(1979—),女,河北晋州人,硕士,讲师,主要从事电子信息及自动化技术应用研究。E-mail:9903108@qq.com。

通信作者:王卫星,博士,教授,主要从事电子信息技术在农业上的应用研究。E-mail:weixing@scau.edu.cn。

水量的 90%、80%、70%、65%。试验数据通过自主设计的茶园环境信息监测系统、SYS - GH30D 光合作用测定仪等仪器设备进行采集。

1.2 茶园环境信息监测系统

茶园环境信息监测系统包括环境信息监测节点、网关等。环境信息监测节点负责采集冠层温度、土壤湿度、空气温湿度、光合有效辐射强度等,并通过 Zigbee 无线通信模块将环境信息传输至网

关。网关主要负责对环境信息采集节点的数据反馈进行接收、整理,并保存至 CSV 文件。

环境信息监测节点包括电源模块、Zigbee 模块、STM32 最小系统以及各路传感器,如 SM2110B 温湿度传感器、RY - GH 光合有效辐射强度传感器、T10S - B - HW 红外温度传感器(图 1)。其中,红外温度传感器用于测量茶树冠层温度,可结合空气温湿度数据,用于计算茶树水分胁迫指数。

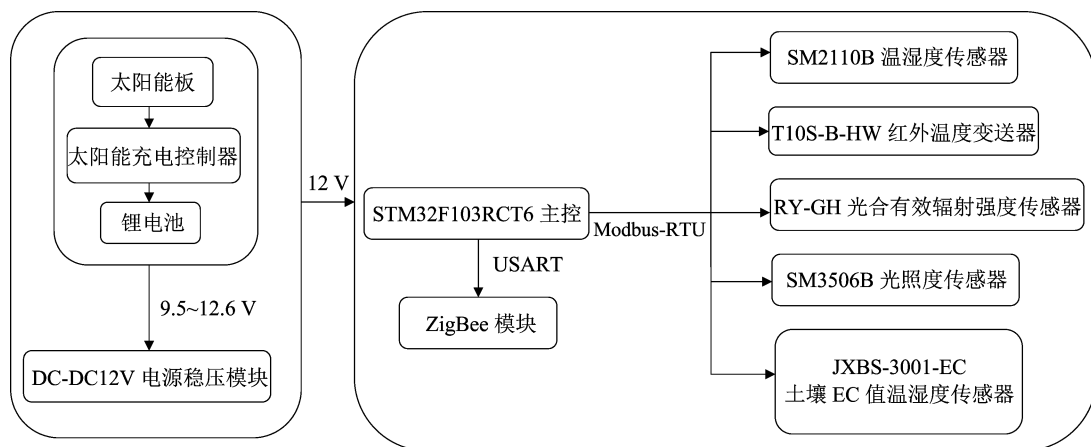


图1 环境信息监测节点硬件系统

1.3 光合参数测量

采用赛亚斯科技有限公司生产的 SYS - GH30D 光合作用测定仪对茶树叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率进行测量。每株茶树取顶端叶片 2 张进行光合参数的测量,其叶面积均大于测量窗口面积(11 cm²)。对每张叶片进行 5 次光合参数测量,并取均值作为该叶片的光合作用情况;同时,取同一水分池叶片光合参数的均值,作为该水分池的茶树光合作用情况。

1.4 作物水分胁迫经验值计算

根据 Idso 提出作物水分胁迫指数经验模型, CWSI 定义为:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{ll}}{(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{ll}} \quad (1)$$

式中: T_c 为冠层温度; T_a 为空气温度; $(T_c - T_a)$ 为冠气温差,即作物冠层表面温度与冠层上方空气温度的差; $(T_c - T_a)_{ll}$ 为冠气温差下限,即作物处于充分灌溉条件下的冠气温差; $(T_c - T_a)_{ul}$ 为冠气温差上限,即作物处于严重水分胁迫下,无蒸腾作用下的冠气温差。

另外,基于作物在充分灌溉的条件下,冠气温差与空气饱和和水汽压(vapor pressure deficit,简称 VPD)差成线性关系,定义水分胁迫下限方程为:

$$(T_c - T_a)_{ll} = A + B \times VPD \quad (2)$$

式中: A 、 B 为线性回归系数。试验通过对充分灌溉条件下茶树的冠层温度以及空气温湿度进行测量,拟合得出 A 为 -0.166 6, B 为 0.474 6。

定义水分胁迫上限方程为:

$$(T_c - T_a)_{ul} = A + B \times VPG \quad (3)$$

式中: A 、 B 与下限方程相同。 VPG 为温度为 T_a 时的空气饱和和水汽压差和温度为 $T_a + A$ 时的空气饱和和水汽压差的差,即:

$$VPG = APD_{T_a} - VPD_{T_a + A} \quad (4)$$

理想情况下,CWSI 处于 0 到 1 之间。作物缺水程度与作物水分胁迫指数呈正相关,可根据 CWSI 的值判断作物的水分胁迫程度。

1.5 基于 RANSAC 迭代的最小二乘线性回归

1.5.1 最小二乘回归

最小二乘法是常用的线性回归解法,通过最小化误差平方,实现函数 $y = f(x)$ 中参数的求解。在本研究数据分析中,定义函数 $y = kx + c$ 为茶树光合参数的估算模型,其中 x 为 CWSI 或 CWSI/PAR, y 为净光合速率等, k 、 c 为未知参数。

根据测量数据,给定坐标为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , \dots , (x_n, y_n) 。定义 y 的残差 $\hat{\epsilon}_i$ 为估计值与观测值的差,公式如下:

$$\hat{\epsilon}_i = y_i - \hat{y}_i. \quad (5)$$

算法目的为求得最小残差和,表示为 $\min \sum \hat{\epsilon}_i$, 则目标函数表示为如下形式:

$$J = \frac{1}{2}(\hat{y} - y)^T(\hat{y} - y). \quad (6)$$

其中, $\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$, $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。

将 $\hat{y}_i = kx_i + \hat{c}$, 代入式(6)得:

$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{X}\theta - y)^T(\mathbf{X}\theta - y). \quad (7)$$

$$\text{其中, } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 & 1 \\ X_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} \hat{k} \\ \hat{c} \end{bmatrix}.$$

目标函数 J 对 θ 求导,并令其等于 0,得:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = \mathbf{X}^T(\mathbf{X}\theta - y) = 0. \quad (8)$$

解得:

$$\theta = \begin{bmatrix} \hat{k} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T. \quad (9)$$

由此,可解得每个估算模型的 k 与 c 的值。

1.5.2 随机采样一致性迭代 随机采样一致性(random sample consensus,简称 RANSAC)是一种概率算法,能够对带有外点数据的数据拟合参数模型的迭代方法。内点指符合模型的测量数据;外点指不符合模型的测量数据,一般为外界随机因素干扰导致的噪点。外点的存在会导致模型质量降低,影响估算结果。RANSAC 能保证一定数量内点的同时,实现对外点进行去除,实现更好的模型拟合效果^[15-17]。

将设定数量的随机数据帧作为内点,利用“1.5.1”节所介绍的最小二乘法进行线性回归。利用此次线性回归结果,划分下次用于回归计算的内点。以此循环,每次完成回归计算并对比当前模型与上一次模型的残差,决定是否终止循环。若当前

残差比上一次小,则继续执行;反之,则终止。软件执行流程如图 2 所示。

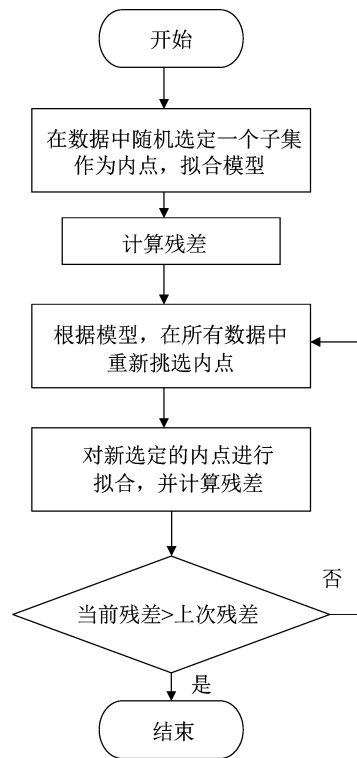


图2 RANSAC 迭代软件执行流程

2 结果与分析

2.1 相关性分析

试验对茶树叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、光合有效辐射强度以及用于计算作物水分胁迫指数经验模型的冠层温度、空气温湿度进行计算以及相关性分析,结果如表 1 所示。其中, T_r 与 PAR 的相关系数为 0.48, PAR 与 CWSI 相关系数为 0.57,体现了光合有效辐射增强、温度上升导致蒸腾作用增强的情况,但同时由于作物关闭气孔抑制水分散失的作用,导致冠层温度上升,水分胁迫指数上升,这与作物水分胁迫方面以及植物光合作用生理方面的理论研究结果^[18-19]相吻合。

表 1 水分胁迫指数、光合有效辐射强度、光合参数的相关系数

项目	相关系数				
	P_n	T_r	G_s	CWSI	PAR
P_n	1.000 000				
T_r	0.520 936	1.000 000			
G_s	0.362 666	0.907 638	1.000 000		
CWSI	0.149 158	0.190 011	-0.075 34	1.000 000	
PAR	0.282 760	0.480 754	0.400 176	0.565 301	1.000 000

考虑 PAR 对 CWSI 的影响,利用 PAR 对 CWSI 进行归一化处理,表示为作物水分胁迫指数光合有效辐射强度的比值,即 $CWSI/PAR$,并作相关性分析如表 2 所示。在部分数据,特别在 G_s 上,相比 CWSI 与 PAR, $CWSI/PAR$ 对光合参数均具有更强的相关性,可用于作进一步的建模分析。

表 2 $CWSI/PAR$ 与其余各参数的相关系数

项目	相关系数				
	P_n	T_r	G_s	CWSI	PAR
$CWSI/PAR$	-0.291 33	-0.477 4	-0.562 73	-0.049 67	-0.727 16

2.2 线性回归分析

分别利用 CWSI、 $CWSI/PAR$ 与 P_n 、 T_r 、 G_s 进行线性回归分析。在数据的处理方法上,分别采用最小二乘法线性回归,以及基于 RANSAC 迭代的最小二乘线性回归 2 种方法进行对比分析。各线性回归结果如图 3 至图 8 所示,其中内点图例表示为“▲”,外点图例表示为“+”,内点数据的拟合结果表示为实线,所有数据的拟合结果表示为虚线。

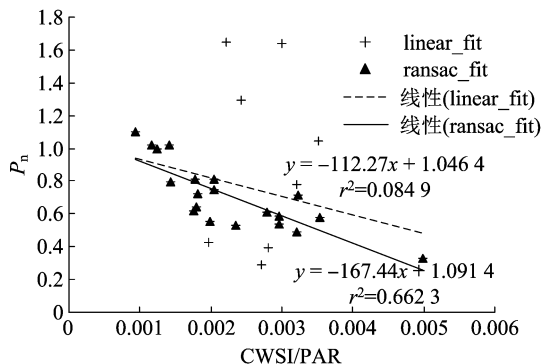


图3 P_n 与 $CWSI/PAR$ 线性分析结果

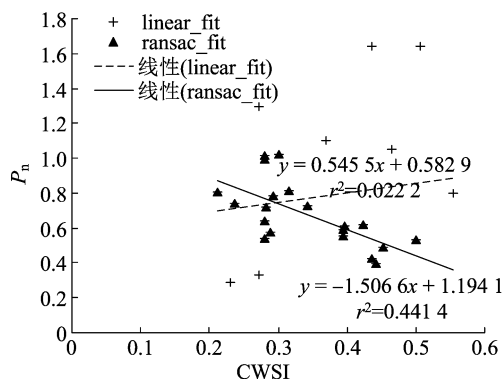


图4 P_n 与 CWSI 线性相关分析结果

通过对比各决定性系数 r^2 可知, RANSAC 迭代的线性回归求解结果均比直接最小二乘求解更优,有效实现了外点数据的去除,且 $CWSI/PAR$ 相比

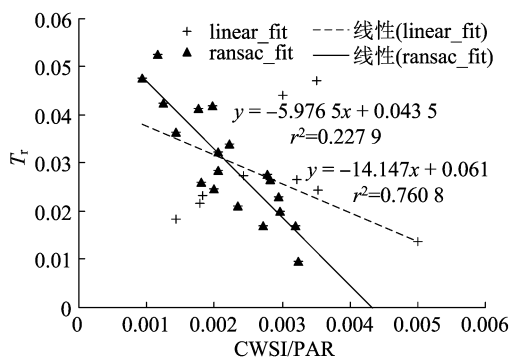


图5 T_r 与 $CWSI/PAR$ 线性分析结果

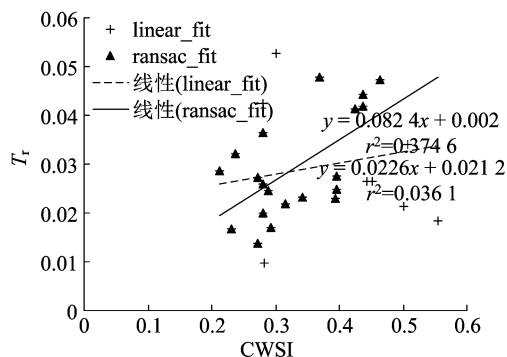


图6 T_r 与 CWSI 线性分析结果

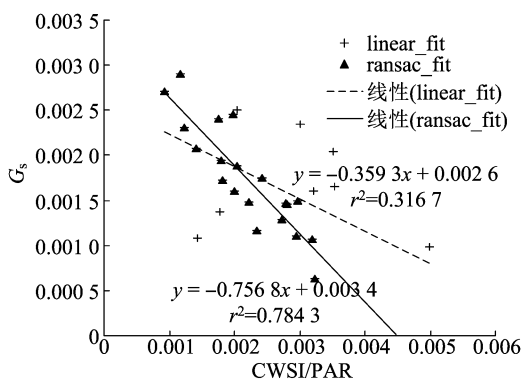


图7 G_s 与 $CWSI/PAR$ 线性分析结果

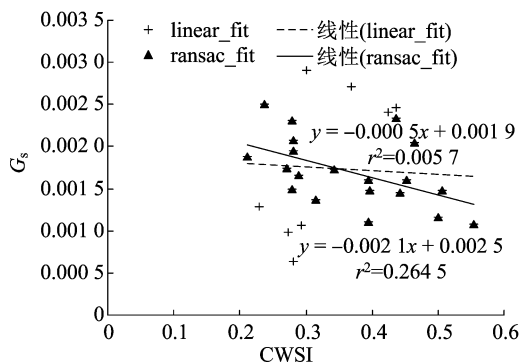


图8 G_s 与 CWSI 线性分析结果

$CWSI$ 对 P_n 、 T_r 、 G_s 均有更好的线性表达,能够实现 P_n 、 T_r 、 G_s 参数的估计。线性回归分析最优结果如表 3 所示。

表 3 线性回归分析最优结果

<i>y</i>	<i>x</i>	拟合结果	<i>r</i> ²
<i>P_n</i>	CWSI/PAR	<i>y</i> = -167.44 <i>x</i> + 1.091 4	0.662 3
<i>T_r</i>	CWSI/PAR	<i>y</i> = -14.147 <i>x</i> + 0.061	0.760 8
<i>G_s</i>	CWSI/PAR	<i>y</i> = -0.359 3 <i>x</i> + 0.002 6	0.784 3

3 讨论与结论

本研究通过无线传感网络对茶树冠层温度、空气温湿度、光合有效辐射强度进行持续采集,结合光合作用测定仪测定的地面数据,对茶树作物水分胁迫指数经验值、光合有效辐射强度以及各个光合参数进行了相关性分析以及线性回归分析。在完成冠层温度、空气温湿度、光合有效辐射强度等参数测量的基础上,结合该分析结果,可实现光合参数估算,达到降低人力成本、提高田间监测效率,实现茶树水分状况、生长状况的检测和估计的目的,为茶园水分管理提供有力的数据支持。

本研究基于相关性分析结果以及光合作用的相关理论知识,提出 PAR 对 CWSI 进行归一化处理的方法,利用 CWSI/PAR 与 *P_n*、*T_r*、*G_s* 进行线性回归分析,并与 CWSI 回归结果进行比较。结果表明,在 RANSAC 迭代的最小二乘回归分析下,CWSI/PAR 更能同步反映 *P_n*、*T_r*、*G_s* 等数值变化。其中,*P_n*、*T_r*、*G_s* 线性回归结果决定性系数 *r*² 分别为 0.662 3、0.784 3、0.760 8。*P_n* 反映的是光合作用产生有机物的量与呼吸作用消耗有机物的量之差。本研究数据分析方法在 *P_n* 的回归分析方面稍逊于 *T_r* 与 *G_s*。这可能与茶树光合作用、呼吸作用所需的有机物含量以及反应条件有关。2 个反应过程复杂,且涉及较多的酶,温度等环境条件会对酶活性产生影响,需要更进一步深入研究。

参考文献:

[1] Shinozaki K, Yamaguchi - Shinozaki K. Gene networks involved in drought stress response and tolerance[J]. Journal of Experimental Botany,2006,58(2):221-227.

[2] 吴伯千,潘根生. 茶树对水分胁迫的生理生化反应[J]. 浙江农

业大学学报,1995,21(5):451-456.

[3] 伍炳华. 茶树水分生理及抗旱性的研究概况与探讨[J]. 茶叶科学简报,1991,32(1):1-5.

[4] 张玉顺,路振广,张明智,等. 冬小麦叶片气体交换参数对水分胁迫的响应[J]. 灌溉排水学报,2020,39(12):32-40.

[5] 孟兆江,孙景生,刘祖贵,等. 调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段光合速率的影响[J]. 麦类作物学报,2011,31(6):1130-1135.

[6] 高凡,郑然,郭家选,等. 不同灌溉模式下草莓对水分胁迫的生理响应研究[J]. 灌溉排水学报,2021,40(1):1-6.

[7] 夏宣宣,吴芹,张光灿,等. 土壤水分对沙棘光合日变化的影响[J]. 山东建筑大学学报,2015,30(5):441-444.

[8] 刘素军,蒙美莲,陈有君,等. 水分胁迫下马铃薯叶片光合特性的变化及其响应机制研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(8):29-38.

[9] Tanner C B. Plant temperatures 1[J]. Agronomy Journal,1963,55(2):210-211.

[10] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J Jr, et al. Normalizing the stress - degree - day parameter for environmental variability [J]. Agricultural Meteorology,1981,24:45-55.

[11] Erdem Y, Arin L, Erdem T, et al. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) [J]. Agricultural Water Management, 2010,98(1):148-156.

[12] Emekli Y, Bastug R, Buyuktas D, et al. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass [J]. Agricultural Water Management,2007,90(3):205-212.

[13] 孙道宗,王卫星,唐劲驰,等. 茶树水分胁迫建模及试验[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(1):65-70,79.

[14] Sun D Z, Jiang S, Wang W X, et al. WSN design and implementation in a tea plantation for drought monitoring [C]// 2010 International Conference on Cyber - Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Huangshan, China. IEEE, 2010:156-159.

[15] 李娜,马一薇,杨洋,等. 利用 RANSAC 算法对建筑物立面进行点云分割[J]. 测绘科学,2011,36(5):144-145,138.

[16] 喜文飞,赵子龙,王绍君,等. 一种改进的无人机影像拼接粗差剔除算法[J]. 测绘通报,2021(2):36-39.

[17] 袁清珂,张振亚,毕庆. 改进 RANSAC 算法在直线拟合中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(1):123-125.

[18] 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.

[19] 童翠芸,王占林,张得芳,等. 土壤水分含量和光照强度对青海云杉光合特性的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2020,41(6):22-26.