

唐普传, 张美娜, 孙传亮, 等. 逐日平台搭载作物生长信息传感器效果检验与评估[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1541-1549.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.06.012

逐日平台搭载作物生长信息传感器效果检验与评估

唐普传^{1,2}, 张美娜^{1,2}, 孙传亮², 吴 茜², 曹 静², 梁万杰², 张伟欣^{1,2}, 葛道阔²,
曹宏鑫², 刘乃森³, 张文宇^{1,2}, 王 潇^{2,4}, 李百明^{1,2}, 吴金恺^{1,2}, 吉书雯³, 朱星月³

(1. 江苏大学农业工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业信息研究所/农业数字孪生联合实验室/种质资源创新与信息化利用联合实验室, 江苏 南京 210014; 3. 淮阴师范学院/江苏省区域现代农业与环境保护协同创新中心/江苏省环洪泽湖生态农业生物技术重点实验室/江苏省洪泽湖蓝藻预警与生态修复工程研究中心, 江苏 淮安 223300; 4. 南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031)

摘要: 为验证逐日平台追踪太阳的准确性及其消除太阳高度对作物生长信息传感器影响的效果, 从而解决被动光源作物生长信息监测仪器因太阳高度角变化导致反射率测量误差波动大、有效采样窗口期短等问题, 在课题组前期被动光源作物生长信息传感器和逐日平台研制的基础上, 通过逐日准确性试验、标准反射率以及作物冠层反射率检测对比试验, 对逐日平台搭载作物生长信息传感器的实际效果进行了检验与评估。结果显示, 逐日平台水平方向追踪太阳的平均偏离角度为 0.592°, 竖直方向追踪太阳的平均偏离角度为 0.470°; 当作物生长信息传感器直接测量 10%、20%、40%、60% 标准反射率灰度板和作物冠层反射率时, 在 8:00–17:00 时间段内因受太阳高度角影响, 传感器测量的反射率波动幅度达 60.00% 以上, 仅中午前后 (11:00–13:00) 测量的反射率较为准确; 当使用逐日平台搭载作物生长信息传感器测量相同对象时, 8:00–17:00 时间段内测得反射率均较为准确, 反射率波动幅度在 2.53% 以内。试验结果表明, 使用逐日平台能显著提升被动光源作物生长信息传感器测量的准确性, 延长作物生长信息传感器日工作时间 1 倍以上。

关键词: 逐日平台; 太阳高度角; 作物生长信息传感器; 智能传感器; 作物监测

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)06-1541-09

Test and evaluation of the solar tracking platform effect for crop growth information sensors

TANG Pu-chuan^{1,2}, ZHANG Mei-na^{1,2}, SUN Chuan-liang², WU Qian², CAO Jing², LIANG Wan-jie²,
ZHANG Wei-xin^{1,2}, GE Dao-kuo², CAO Hong-xin², LIU Nai-sen³, ZHANG Wen-yu^{1,2}, WANG Xiao^{2,4},
LI Bai-ming^{1,2}, WU Jin-kai^{1,2}, JI Shu-wen³, ZHU Xing-yue³

收稿日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31871522、32201664、31601223);
国家重点研发计划项目 (2016YFD0300604、2017YFD030-
0409); 江苏省自然科学基金项目 (BK20200277); 江苏省
农业科技自主创新基金项目 [CX(20)3073]; 江苏省重点
研发计划项目 (BE2020409、BE2022351); 江苏省高等学校
自然科学研究重大项目 (18KJA180002); 江苏省农业科
学院科学仪器开放共享自主研究课题 [GX(21)1002]

作者简介: 唐普传 (1996–), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事
智能传感器研制工作。 (E-mail) puchuanTang@163.com

通讯作者: 刘乃森, (Tel) 0517-83526661; (E-mail) boomzip@163.
com. 张文宇, (Tel) 025-84391622; (E-mail) research@
wwery.cn

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang
212013, China; 2. Institute of Agricultural Information/YuanQi-IAI Joint
Laboratory for Agricultural Digital Twin/IGRB-IAI Joint Laboratory of
Germplasm Resources Innovation & Information Utilization, Jiangsu Acad-
emy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Huaiyin Normal
University/Jiangsu Collaborative Innovation Center of Regional Modern
Agriculture & Environmental Protection/Jiangsu Key Laboratory of Eco-
Agricultural Biotechnology Around Hongze Lake/Jiangsu Engineering Re-
search Center for Cyanophytes Forecast and Ecological Restoration of
Hongze Lake, Huai'an 223300, China; 4. College of Engineering, Nan-
jing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: The solar tracking platform had been de-

veloped by our team to solve the problems that the fluctuation of reflectance measurement error was large and the sampling window period was short for the passive light source crop growth information sensors, due to the change of solar elevation. To verify the sun tracking accuracy of the solar tracking platform and its effect on eliminating the influence of solar elevation on crop growth information sensors, the performance of the platform was evaluated through the sun tracking accuracy test, standard reflectance detection comparison, and crop reflectance measurement verification, based on the passive light source crop growth information sensor our group had already developed. The results indicated that the average deviation angle for tracking the sun in the horizontal direction of the platform was 0.592° , and the average deviation angle of the sun tracking in the vertical direction was 0.470° . Affected by the solar elevation, amplitude of the reflectance measured directly by crop growth information sensors from 10%, 20%, 40% and 60% reflectance standards and crop canopy during 8:00–17:00, was more than 60.00%, and only the reflectance measured around noon (11:00–13:00) was more accurate. However, the reflectance from 8:00 to 17:00 was more accurate, and the reflectance fluctuation was within 2.53%, when the same object was measured using the crop growth information sensor carried by the platform. These results suggest that the use of the solar tracking platform can enhance the sampling accuracy of the passive light source crop growth information sensors, and prolong the daily working time of the sensor by more than one time.

Key words: solar tracking platform; solar altitude angle; crop growth information sensor; smart sensor; crop monitoring

作物生长信息快速无损监测是实现作物生长定量诊断与动态调控的前提,是农业生产精确定量、减肥减药、提质增效的技术保障和必要手段^[1-2]。近年来,迫切的生产需求推动了作物光谱监测相关仪器快速发展,基于无人机、机器人等^[3-4]技术,光谱成像、叶绿素荧光成像等多种高新技术的智能化、小型化、集成化作物生长监测仪器被广泛研制^[5-7]。然而,鉴于成本低、适应性强等特性,定制光谱波段的便携式作物生长监测仪器^[8-9]仍是生产应用的主流。

根据光源不同,基于光谱的作物生长监测仪器可分为主动光源和被动光源两类^[10-11]。主动光源一般为 LED 灯、卤钨灯等^[12-13],其强度、光质等与自然光存在一定差异,且易发生光衰,或能耗和发热量较大。被动光源作物生长监测仪器以太阳为光源^[14-15],通过测量并计算入射太阳辐射和作物反射辐射的比值得到反射率,进而反演作物生长信息。这类设备成本较低且光源强劲,能获取更完整的光谱信息。然而,由于被动光源作物生长信息传感器感光面存在一定程度的镜面反射,太阳高度角变化会影响光线入射角度和透射强度。由菲涅尔定律可知,当太阳高度角较低时,入射辐射传感器将反射更多的阳光,进入传感器的光能减少,进而导致反射率测量误差波动较大,影响作物监测的准确性。为降低太阳高度角的影响,试验人员通常在正午前后进行作物反射率测量,这种方式虽然可有效提升采样精度,但同时也大大缩短了传感器有效工作时间,且工作时段往往温度较高,测量环境较为恶劣。许多

设备通过白板校准的方式降低太阳高度角影响,如使用 ASD 光谱仪时,间隔约 5~10 min 需用白板校准 1 次。该方式能有效降低太阳高度角的影响,但校准较为耗时、繁琐,且田间环境下白板表面不易保持洁净,引入了新的干扰因素,也会降低测量准确性。也有学者分别从硬件和算法等方面开展攻关,如美国 METER 公司研制的 SRS-PRI 光化学反射指数测量仪^[16],通过手动调节上端生长传感器,改变太阳光的入射角度,使其感光面大致向阳,进而降低太阳高度角的影响。Li 等^[17]研究了作物冠层结构和观测时间对反射率测量的影响,针对不同的地理位置和季节,使用不同地观测角度,进而降低太阳高度角的影响。倪军等^[18]使用余弦校正器建立对日传感器光学标定方程,将测量时间范围拓宽到 10:30–15:00,最大相对误差可控制在 3% 以内。上述研究一定程度上降低了入射光角度对反射率测量的影响,但仍未能完全解决太阳高度角变化导致被动光源作物监测设备采样误差较大、有效工作时间短的问题。

通过自动追踪太阳使入射辐射传感器始终正对太阳是解决上述问题的有效方法。笔者团队借鉴国内外太阳能领域逐日方法^[19-24],通过简化硬件设计、优化逐日算法,设计了一种简单、便携、快速响应的光电式双轴逐日平台^[25]。本研究通过设计逐日试验、标准反射率灰度板和作物冠层反射率检测试验,检验平台的逐日精度,评估逐日平台延长作物生长信息传感器有效工作时间和提高作物反射率测量

精度的效果。

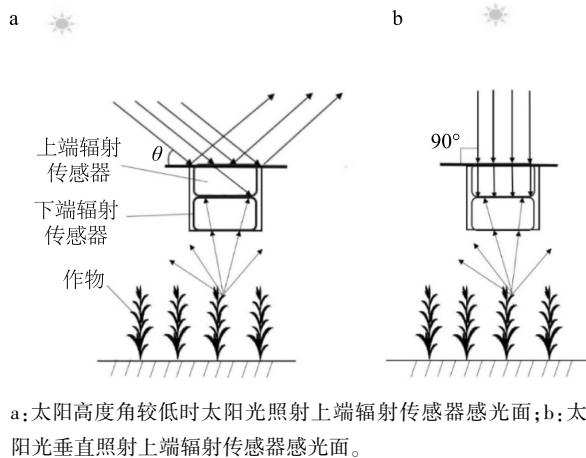
1 材料和方法

1.1 逐日平台消除太阳高度角影响反射率测量的原理

被动光源作物生长监测仪器通常由上下端辐射传感器组成(图1)。其中,上端辐射传感器测量入射太阳辐射强度,下端辐射传感器测量作物反射辐射强度,并由公式(1)计算作物反射率。由于作物冠层可近似为朗伯面,因此下端辐射传感器测量的作物反射辐射相对稳定,不受太阳高度角影响。而当太阳高度角较低时(图1a),上端辐射传感器感光面镜面反射增多,透射进入传感器的辐射变少,导致较大的反射率测量误差。仅当太阳光垂直照射上端辐射传感器感光面时(图1b),测量的入射辐射最为接近真实值。因此,笔者团队前期研制了逐日平台,通过保持上端辐射传感器感光面始终正对太阳,消除太阳高度角对反射率测量的影响。

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ρ 表示作物特定波段的光谱反射率, E_i 表示作物反射辐射能量, E_r 表示入射太阳辐射能量。



a: 太阳高度角较低时太阳光照射上端辐射传感器感光面;b: 太阳光垂直照射上端辐射传感器感光面。

图1 太阳高度角对作物反射率测量的影响示意图

Fig.1 Schematic diagram for the effect of solar altitude angle on crop reflectance measurement

1.2 逐日平台和光谱传感器

1.2.1 逐日平台介绍 团队前期自主研发的逐日平台如图2所示。该平台采用光电式双轴逐日,通过检测空间不同方位的光照度,使用构建的逐日运动控制算法^[26]计算装置水平方向和竖直方向偏离

太阳的角度,实现快速、准确的太阳追踪。逐日平台主要包括双轴驱动系统、天空光采集系统和作物生长信息传感器搭载平台三部分。双轴驱动系统在水平和竖直方向调整天空光采集系统的位姿,进而使其顶面正对太阳。天空光采集系统的外形设计为正四棱台结构,其内腔安装光电传感器以测量不同方向的太阳辐射;底部安装控制系统电路板,通过内置Wi-Fi模块接收客户端的指令。作物生长传感器搭载模块可拆卸、替换,以固定不同外形的多种作物生长信息传感器且使其感光面与逐日平台顶面平行。

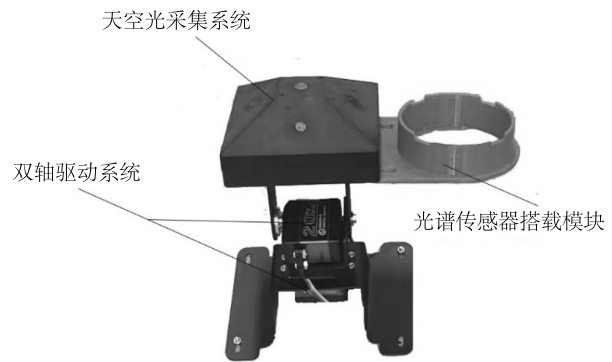


图2 逐日平台示意图

Fig.2 Schematic diagram of the solar tracking platform

1.2.2 作物生长信息传感器介绍 本研究使用江苏省农业科学院与淮阴师范学院联合研发的作物生长信息传感器^[27](图3)测量作物冠层光谱反射率,测量的波段为710 nm和870 nm。使用伸缩杆将其置于作物冠层上方,待设备稳定后,通过手机App发送采集命令即可进行反射率测量。该传感器具有自平衡(传感器的中轴线始终保持在竖直方向)、简单、便携、抗杂散光干扰和无线通信等特点。



a: 入射辐射传感器;b: 反射辐射传感器。

图3 一种可保持自平衡的作物生长信息传感器

Fig.3 Crop growth information sensor capable of maintaining self-balance

1.3 试验方法

为验证逐日平台的性能及使用效果,分别进行逐日准确性试验、标准反射率灰度板检测对比试验和作物反射率检测对比试验。试验于 2021 年在江苏省农业科学院本部试验农场($118^{\circ}52'1''\text{E}$, $32^{\circ}2'17''\text{N}$),选择晴朗无云无风或微风天气,8:00–17:00 时间段内进行。

1.3.1 逐日准确性试验 试验利用反向验证法比较逐日平台水平方向和竖直方向的逐日准确性。首先,通过客户端发送指令控制双轴驱动系统调整水平和竖直方向逐步正对太阳,并将正对太阳时的逐日姿态作为初始位置。然后,水平方向和竖直方向以 4° 为步距调整逐日平台使其偏离太阳,并记录偏离角度。每次调整完毕后,客户端立即发送逐日指令使逐日平台自动追踪太阳,并记录自动回调的角度。最后,通过对比偏离角度和

回调角度验证逐日准确性,并根据逐日平台发出与完成自动逐日指令的时间点计算耗时。每个偏离角度重复测量 3 次。

1.3.2 标准反射率灰度板检测对比试验 本试验以标准反射率灰度板为检测对象,一是直接使用作物生长信息传感器测量反射率(图 4a),二是使用逐日平台搭载上端辐射传感器使其正对太阳测量反射率(图 4b)。标准灰度板反射率分别为 10%、20%、40% 和 60%,基本涵盖待测作物反射率范围。试验时,下端辐射传感器感光面和标准反射率灰度板上表面距离约 20 cm。通过比较不同时间点作物生长信息传感器直接测量反射率和逐日平台搭载上端辐射传感器测量反射率,检验使用逐日平台测量反射率时消除太阳高度影响的效果。每小时测定 1 次,每次测定 3 次重复。



a: 不使用逐日平台; b: 使用逐日平台。

图 4 测量标准反射率灰度板试验场景

Fig.4 Experimental scene of measuring the reflectivity by reflectance standards

1.3.3 作物反射率检测对比试验 本试验以油菜幼苗为检测对象,直接使用作物生长信息传感器测量油菜幼苗反射率以及逐日平台搭载作物生长信息传感器的上端辐射传感器测量油菜幼苗反射率,进而验证逐日平台的实际使用效果,试验时每小时测定 1 次,每次测定 3 次重复。首先,直接使用作物生长信息传感器测量油菜反射率(图 5a);然后,取下上端辐射传感器放置在逐日平台的搭载台上,保持作物生长信息传感器下端辐射传感器采样姿态不变,再次测量油菜反射率(图 5b)。交替采样耗时约 1~2 min,在此期间太阳高度角和方向角变化较小,光照度和太阳位置变化可忽略不计。

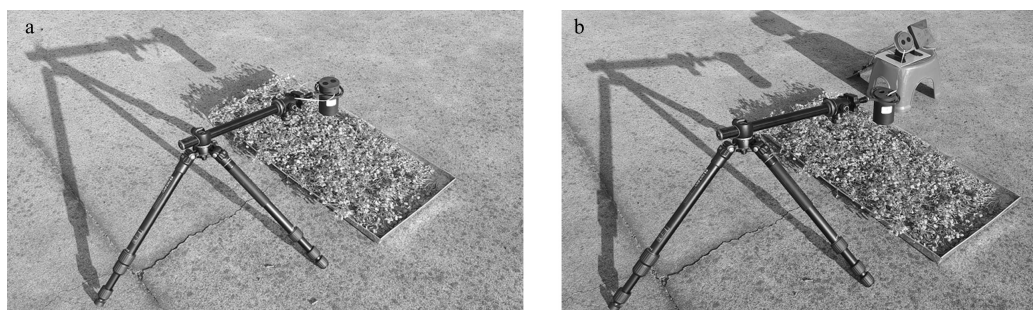
2 结果与分析

2.1 逐日平台逐日准确性与效率

逐日平台水平和竖直方向实际偏离角度和自动回调角度的关系如图 6 所示。结果显示,水平方向逐日平均绝对误差为 0.592° ,相关系数为 0.991;竖直方向逐日平均绝对误差为 0.470° ,相关系数为 0.994。根据指令发出和逐日执行完毕的时间间隔,计算逐日总耗时为 3~5 s。结果表明逐日平台能够快速、准确地使上端辐射传感器感光面正对太阳。影响逐日耗时的主要因素:一是逐日开始时水平和竖直方向偏离太阳角度的大小,偏离太阳的角度越大,驱动部分耗时越长;二是当天空光光照度变化较

快时(如多云天气),逐日平台自动增益放大电路会智能调整光电转化倍数(光弱时,增大放大倍数;光

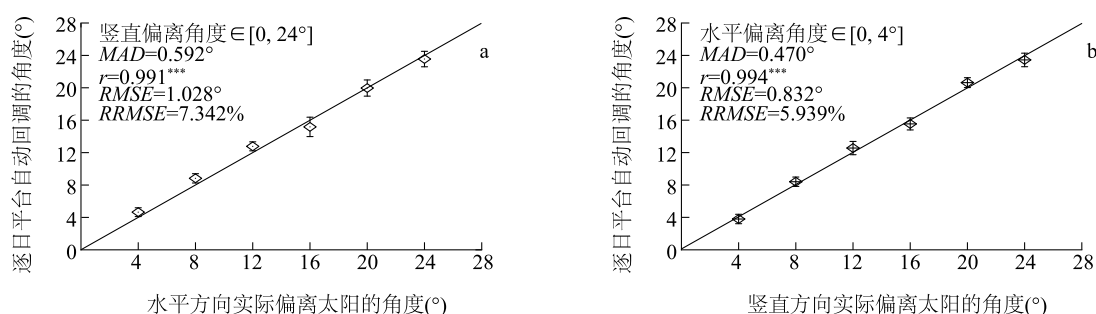
强时,降低放大倍数),这一特性提升了信噪比,保证了测量准确性,但也略微增加了耗时。



a:不使用逐日平台;b:使用逐日平台。

图5 测量油菜反射率试验场景

Fig.5 Experimental scene of measuring rapeseed reflectivity



a:水平方向;b:竖直方向。MAD:平均绝对误差;r:相关系数;RMSE:均方根误差;RRMSE:相对均方根误差。

图6 逐日平台水平和竖直方向实际偏离太阳角度和自动回调角度1:1图

Fig.6 The 1:1 diagram between the actual deviation from sun and automatic callback angle in horizontal and vertical directions for the solar tracking platform

2.2 标准反射率灰度板测量情况对比分析

作物生长信息传感器测量标准灰度板 710 nm 波段反射率对比试验结果如表 1 所示。结果表明,在8:00–17:00时间段内,作物生长信息传感器直接测量标准灰度板反射率随时间呈“U”字型变化(图7),绝对误差在0.31%至62.10%变化,标准差在15.75%至23.70%变化;在11:00–13:00时间段内,反射率绝对误差在0.15%至3.46%变化,波动幅度为3.31%;在10:00–11:00、13:00–14:00时间段内,反射率测量绝对误差在0.31%至10.27%变化;其他时间段,测量反射率绝对误差可达60.00%以上。而使用逐日装置后,整个8:00–17:00时段内,反射率随时间无明显“U”型变化,绝对误差在0.06%至2.53%变化,绝对误差幅度为2.47%,标准差在0.56%至1.77%变化。相比之下,使用逐日装置后,在8:00–17:00内,作物生长信息传感器测量标准灰

度板 710 nm 波段反射率绝对误差由 62.10%降至 2.53%以内,标准差由 15.75%~23.70%降至 0.56%~1.77%。

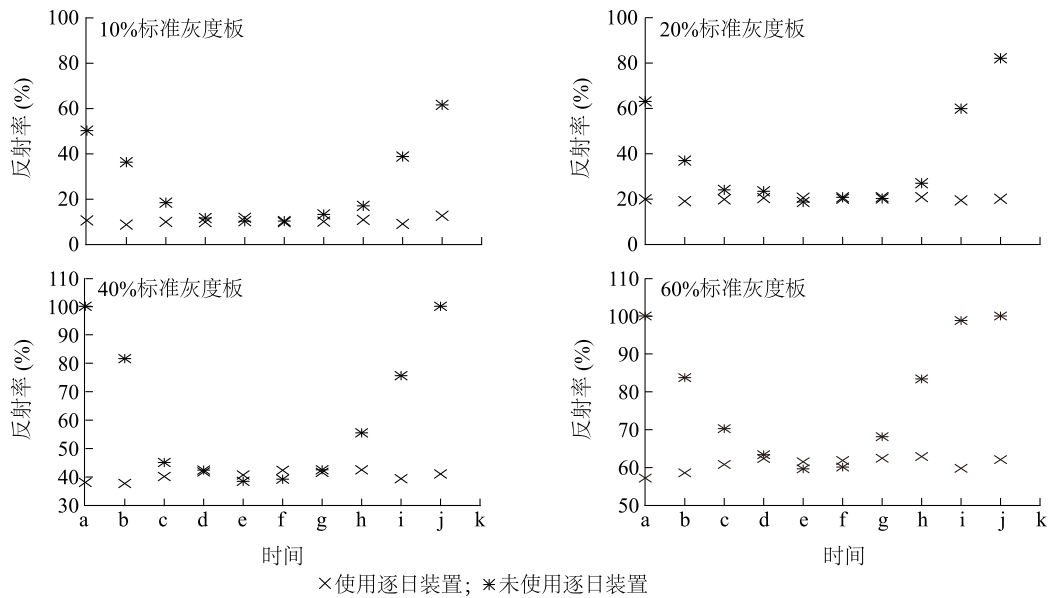
作物生长信息传感器测量标准灰度板 870 nm 波段反射率对比试验结果如表 2、图 8 所示。在8:00–17:00时间段内,作物生长信息传感器直接测量标准灰度板反射率绝对误差在0.13%至69.14%变化,标准差在17.10%至25.88%变化;在11:00–13:00时间段内,反射率绝对误差在0.13%至4.00%变化,波动幅度为3.87%;在10:00–11:00、13:00–14:00时间段内,测量反射率绝对误差在1.18%至13.88%变化;其他时间段,测量反射率绝对误差可达65.00%以上。而使用逐日装置搭载作物生长信息传感器测量标准灰度板反射率,在8:00–17:00内,反射率绝对误差仅在0.02%至2.27%变化,绝对误差波动幅度为2.25%,标准差在0.60%至1.75%变化。使用逐日装置后,在

8:00–17:00,作物生长信息传感器测量标准灰度板 标准差由17. 10%~25. 88%降至0. 60%~1. 75%。
870 nm 波段反射率绝对误差由 69. 14%降至 2. 27%,

表 1 标准灰度板 710 nm 波段反射率测量结果

Table 1 Measured reflectance of reflectance standards at 710 nm

标准灰度板 反射率(%)	测量方式	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	标准差 (%)
10	逐日	10.65	8.81	9.77	9.94	11.84	9.920	10.15	10.91	9.120	12.71	1.13
	未逐日	50.26	36.35	18.50	11.73	10.31	10.37	13.32	17.10	38.84	61.63	17.64
20	逐日	19.94	19.10	19.90	20.50	20.62	20.19	20.90	20.88	19.46	20.17	0.56
	未逐日	63.09	37.02	24.10	23.46	18.75	20.81	20.30	26.99	59.91	82.10	21.35
40	逐日	38.10	37.74	40.20	41.79	40.72	42.37	41.65	42.53	39.41	41.09	1.60
	未逐日	100.00	81.62	45.13	42.44	38.49	39.24	42.55	55.53	75.61	100.00	23.70
60	逐日	57.22	58.61	60.83	62.38	61.53	61.88	62.47	62.92	59.81	62.10	1.77
	未逐日	100.00	83.74	70.27	63.40	59.67	60.15	68.15	83.40	98.80	100.00	15.75



a:8:00;b:9:00;c:10:00;d:11:00;e:12:00;f:13:00;g:14:00;h:15:00;i:16:00;j:17:00;k:18:00。

图 7 使用和未使用逐日平台情况下 710 nm 波段反射率日变化

Fig.7 Daily variation of reflectance at 710 nm band with and without the solar tracking platform

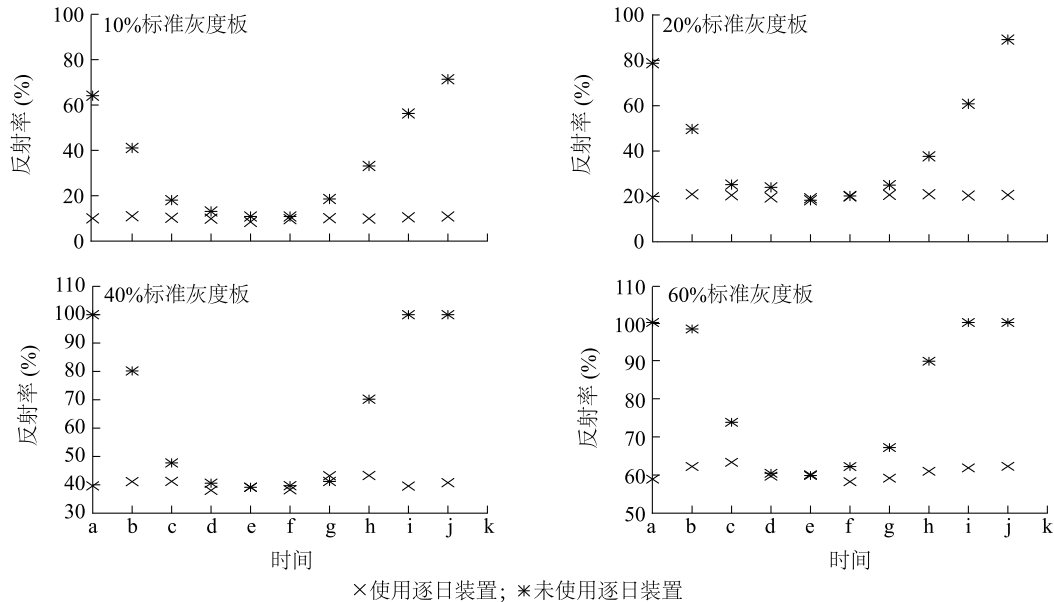
表 2 标准灰度板 870 nm 波段反射率测量结果

Table 2 Measured reflectance of reflectance standards at 870 nm

标准灰度板 反射率(%)	测量方式	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	标准差 (%)
10	逐日	10.02	10.98	10.28	9.900	8.450	9.700	10.13	9.920	10.50	10.85	0.67
	未逐日	64.12	41.06	18.05	13.08	10.85	10.85	18.59	33.11	56.27	71.37	22.02
20	逐日	19.60	20.96	20.52	19.55	19.22	19.98	20.70	20.98	20.37	20.65	0.60
	未逐日	78.71	49.73	25.20	24.00	18.33	20.21	24.97	37.67	60.83	89.14	24.34
40	逐日	39.61	41.13	41.20	38.05	39.14	38.26	43.20	43.28	39.55	40.76	1.75
	未逐日	100.00	80.17	47.73	40.57	39.12	39.69	41.18	70.19	100.00	100.00	25.88
60	逐日	58.92	62.24	63.33	59.70	60.09	58.25	59.18	60.98	61.87	62.27	1.61
	未逐日	100.00	98.30	73.83	60.46	59.87	62.22	67.21	89.85	100.00	100.00	17.10

综上所述,作物生长信息传感器测量标准灰度板反射率对比试验结果表明,作物生长信息传感器直接测量标准灰度板反射率,仅在11:00–13:00时间段内,反射率采样误差较小,其他时间段绝对误差

可达 60.00%;而使用逐日装置后,在8:00–17:00时间段内,710 nm 和 870 nm 波段反射率绝对误差波动幅度降至 2.53%以内,作物生长信息传感器测量反射率的稳定性和准确性显著提高。



a:8:00;b:9:00;c:10:00;d:11:00;e:12:00;f:13:00;g:14:00;h:15:00;i:16:00;j:17:00;k:18:00。

图8 使用和未使用逐日平台情况下 870 nm 波段反射率日变化

Fig.8 Daily variation of reflectance at 870 nm band with and without the solar tracking platform

2.3 使用逐日装置后油菜反射率变化对比分析

使用和未使用逐日装置的情况下作物生长信息传感器测量油菜反射率对比试验结果如表 3 所示,日反射率变化趋势如图 9 所示。其中,作物生长信息传感器直接测量油菜冠层反射率在8:00–17:00时间段内,710 nm 波段反射率在29.64%至84.90%变化,波动幅度为 55.26%,标准差为 19.96%;870 nm 波段反射率在50.02%至100.00%变化(100.00%表示反射率测量达到饱和),波动幅度为 49.98%,标准差为

18.83%;仅在10:00–14:00时间段内采样值较为稳定,710 nm 波段反射率在29.64%至37.81%变化,波动幅度为 8.17%;870 nm 波段反射率在50.02%至56.55%变化,波动幅度为 6.53%。而作物生长信息传感器使用逐日装置后,在整个8:00–17:00时段内,710 nm 波段反射率为 27.80%~29.76%,波动幅度为 1.96%,标准差为 0.53%;870 nm 波段反射率为 45.41%~50.13%,波动幅度为 4.72%,标准差为 1.55%。

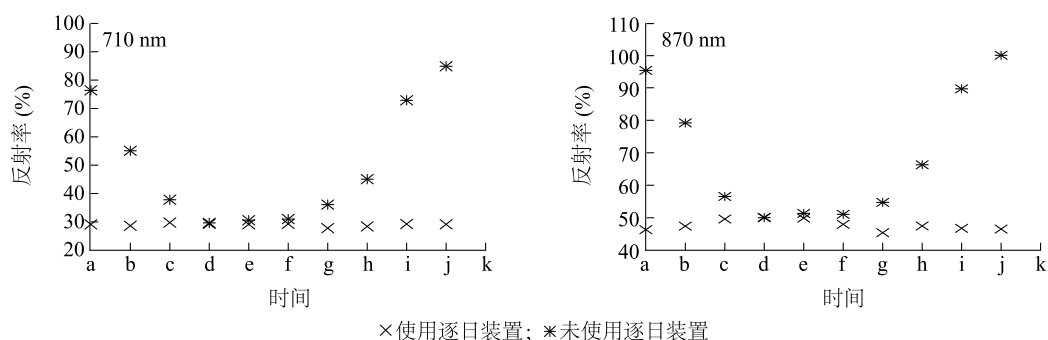
表3 油菜冠层 710 nm 和 870 nm 波段反射率测量结果

Table 3 Rapeseed canopy reflectance at 710 nm and 870 nm

测量波段 (nm)	测量方式	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	标准差 (%)
710	逐日	29.13	28.64	29.76	29.33	29.17	29.31	27.80	28.41	29.26	29.14	0.53
	未逐日	76.39	55.10	37.81	29.64	30.59	31.01	36.09	45.07	72.88	84.90	19.96
870	逐日	46.34	47.41	49.62	50.13	49.89	47.97	45.41	46.53	46.75	46.52	1.55
	未逐日	95.34	79.20	56.55	50.02	51.34	51.07	54.72	66.30	89.67	100.00	18.83

结果表明,作物生长信息传感器使用逐日装置测量油菜冠层反射率稳定性和准确性显著提升,延长传感器日采样时间 1 倍以上。其中,在8:00–

17:00时间段内,作物生长信息传感器使用逐日装置后,710 nm 波段波动幅度由 55.26% 以上降至 1.96%,标准差由 19.96%降至 0.53%;870 nm 波段



a:8:00;b:9:00;c:10:00;d:11:00;e:12:00;f:13:00;g:14:00;h:15:00;i:16:00;j:17:00;k:18:00。

图9 油菜冠层光谱反射率日变化

Fig.9 Daily variation of spectral reflectance for rapeseed canopy

波动幅度由 49.98% 以上降至 4.72%，标准差由 18.83% 降至 1.55%。

3 讨论

作物反射率测量越准确,其生长定量诊断和动态调控就越精准。现有的被动光源作物生长监测设备,因光学元件属性限制,一般仅在正午前后太阳高度角变化较小时具有较高的稳定性,严重限制了作物生长监测设备的使用效率。为降低太阳高度对测量的影响,科研人员一般选择 10:00–14:00 或 11:00–13:00 测量作物光谱反射率,该时段采样窗口期短,尤其夏日温度较高,户外采样难度较大。也有学者采取数学和物理等^[16-17]不同方式的辅助手段,在一定程度上提升了作物反射率测量的准确性,但稳定性和持续性均有待提升。使上端辐射传感器的感光面始终正对太阳,保持入射角为 0° 是较为理想的解决方案。

逐日设备应用于作物生长监测领域尚未见报道。目前常用的 2 种太阳位置追踪方式中,视日运行轨迹追踪方式理论上逐日精度较高^[28-29],但需根据时间、地理信息等计算太阳实时位置,对系统初始方位、安装精度和使用环境要求较高,导致硬件结构较为复杂,实际使用中逐日算法精度稳定性较差。光电追踪方式虽因感光元件受空间杂散光影响,理论上逐日算法精度较视日运行轨迹追踪方式偏低,但其对设备安装初始方位无严格要求,逐日算法无需额外输入变量,成本低且装置简单、便携,田间适用性更强。针对基于被动光源的便携式作物生长信息监测设备需在田间频繁移动观测的特性,本研究采用更为高效的光电式双轴追踪方式,通过天空光

采集装置密封设计以及构建精确高效的逐日算法,实现田间环境下快速、准确的太阳位置追踪。

试验结果显示,本研究使用的逐日平台能显著提升作物生长信息传感器反射率测量准确性,大幅降低全天时间内作物反射率测量波动,为被动光源作物生长监测设备提供了一种有效提高测量准确性和稳定性的解决方案。此外,根据试验观测,有直射光存在时,逐日平台搭载被动光源生长监测仪器均可有效进行作物光谱反射率测量,日采样和测量时间较目前常用的仅正午前后测量时间延长了 1 倍以上,有利于获取充足的样本数据,极大地提高作物生长信息传感器的使用效率。此外,本研究验证的逐日平台也可搭载其他作物生长信息传感器,具有较好的扩展性。

4 结论

本研究结果表明,逐日平台追踪太阳的平均偏离角度小于 1°,追踪太阳准确性高,响应时间为 3~5 s,满足作物生长信息传感器采样的实际应用需求。使用逐日平台后,8:00–17:00 内,作物生长信息传感器测量 710 nm 和 870 nm 波段作物反射率的波动幅度分别由 55.26%、49.98% 降至 1.96%、4.72%,标准差由 19.96%、18.83% 降至 0.53%、1.55%,显著降低了太阳高度角变化对作物冠层反射率测量的影响,提升了采样准确性和稳定性。相比于现有被动光源作物生长信息传感器通常在 10:00–14:00 测量作物冠层反射率,使用逐日平台后,延长了传感器日有效工作时间 1 倍以上,设备使用率得到显著提升。

参考文献:

- [1] 曹卫星,姚霞,程涛,等. 作物生长监测技术的研究与应用

- [C]. 杭州:2019年中国作物学会学术年会, 2019.
- [2] 吴琼,朱大洲,王成,等. 农作物苗期长势无损监测技术研究进展[J]. 农业工程, 2011, 1(4): 19-25.
- [3] 徐天成,吴敏,贺冬仙,等. 机器视觉在农业工程中的应用[J]. 农业工程, 2021, 11(8): 40-48.
- [4] 张乐春. 基于无人机光谱分析的农田监测系统应用[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 222-225.
- [5] 何勇,彭继宇,刘飞,等. 基于光谱和成像技术的作物养分生理信息快速检测研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 174-189.
- [6] 杨迎康,饶正华,李淑慧. 农业现场快速检测仪器的研究与应用[J]. 农业工程, 2020, 10(2): 21-25.
- [7] 王凡,赵春江,徐波,等. 便携式茶鲜叶品质光谱检测装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 273-280.
- [8] 杨建宁,张井超,朱艳,等. 便携式作物生长监测诊断仪性能试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 208-212.
- [9] 梅晨阳,徐红春,赵建宜. 基于OPM的便携式光谱仪的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2020, 28(20): 35-38.
- [10] PICHON P, BARBET A, BLENGINO D, et al. High-radiance light sources with LED-pumped luminescent concentrators applied to pump Nd:YAG passively Q-switched laser[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 96: 7-12.
- [11] FAHEY T, PHAM H, GARDI A, et al. Active and passive electro-optical sensors for health assessment in food crops[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 21(1): 171.
- [12] 孙红,邢子正,张智勇,等. 基于RED-NIR的主动光源叶绿素含量检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 175-181.
- [13] 舒韵涛,吴海云,卫勇,等. 面向近红外光谱速测的卤钨灯光源控制系统设计[J]. 农业开发与装备, 2021(3): 38-39.
- [14] 李修华,李民赞,崔笛,等. 基于双波段作物长势分析仪的东北水稻长势监测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 206-210.
- [15] NI J, ZHANG J, WU R, et al. Development of an apparatus for crop-growth monitoring and diagnosis[J]. Sensors, 2018, 18(9): 3129.
- [16] RYU J H, DOHYEOK O H, CHO J. Simple method for extracting the seasonal signals of photochemical reflectance index and normalized difference vegetation index measured using a spectral reflectance sensor[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(7): 1969-1986.
- [17] LI D, CHEN J M, ZHANG X, et al. Improved estimation of leaf chlorophyll content of row crops from canopy reflectance spectra through minimizing canopy structural effects and optimizing off-noon observation time[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 248: 111985.
- [18] 倪军,姚霞,田永超,等. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 150-156.
- [19] 陈冲,姜春宝,耿晓明. 大型光伏电站太阳自动追踪系统的设计及应用[J]. 自动化仪表, 2020, 41(10): 102-105.
- [20] SATUÉ M G, CASTAO F, ORTEGA M G, et al. Comparison of control strategies for HCPV sun tracking[J]. European Journal of Control, 2021, 62: 165-170.
- [21] MOHAMMAD N, KARIM T. The Design and implementation of hybrid automatic solar tracking system[J]. International Journal of Electrical & Power Engineering, 2012, 6(3): 111-117.
- [22] MIRDANIES M, SAPUTRA R P. Dual-axis solar tracking system: A combined astronomical estimation and visual feedback[C] // 2016 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, Piscataway, N. J: IEEE Computer Society, 2016: 88-94.
- [23] 赵永鑫,黄韬,陈卫,等. 基于单片机的光伏追日系统设计[J]. 现代电子技术, 2021, 44(6): 125-128.
- [24] 韦永兰,马海宁,张学栋. 基于PLC的追日控制系统设计与效率分析[J]. 控制工程, 2016, 23(5): 773-776.
- [25] 刘乃森,唐普传,刘福霞,等. 一种承载作物生长信息传感器的逐日装置: CN202210011758.X[P]. 2022-01-07.
- [26] 张文宇,唐普传,刘乃森,等. 一种逐日装置的运动控制方法: CN202210019106.0[P]. 2022-01-10.
- [27] 刘乃森,张文宇,刘福霞,等. 一种可保持自平衡的作物生长信息传感器: CN202110919880.2[P]. 2021-11-12.
- [28] 张瑜,路博. 一种高精度的太阳跟踪方法[J]. 可再生能源, 2012, 30(2): 103-106.
- [29] ROBINSON J, SMALE D, POLLARD D, et al. Solar tracker with optical feedback and continuous rotation[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(11): 5855-5871.

(责任编辑:张震林)