

基于物联网与低空遥感的农业病虫害监测技术研究

高德民¹, 史东旭¹, 薛卫², 胡滨^{2*}

(1. 南京林业大学信息科学技术学院, 南京 210037; 2. 南京农业大学人工智能学院, 南京 210095)

摘要:随着信息化技术的发展,物联网技术和以无人机为代表的低空遥感技术被广泛应用于生产实践和环境监测等领域。在现代农业病虫害监测中,物联网和低空遥感技术可以分别从地面微观和空中宏观角度监测农作物病虫害情况以及分析其致病环境因素。农场通常位于远离基础设施的偏远地区,农业物联网应用面临能量供应受限问题。无人机收集农场病虫害信息具有灵活度高、成本低以及可以保证数据及时性等优势,但无人机面临滞空时间短、电池更换频繁等问题。本文通过建立一种光照模型,实现太阳能板与太阳光之间夹角自动调整,使得太阳能电池板始终确保与太阳光线垂直,有效提高太阳能的利用率。在无人机应用方面,通过调整无人机机翼在航拍时与农场风向之间的角度,可以使得无人机充分利用农场风能,减少能量消耗,延长飞行时间,用以满足农场病虫害监测需求。另外,结合无人机监测结果与物联网获取的农场环境信息进行分析,可得出农场病虫害的发生与环境之间的关系,研究分析病虫害发病环境机理。

关键词:农业物联网;病虫害;太阳能供电;无人机遥感

中图分类号:S431

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2021)01-0108-06

Research on Agricultural Disease and Pest Monitoring Technology Based on Internet of Things and Low Altitude Remote Sensing

GAO Demin¹, SHI Dongxu¹, XUE Wei², HU Bin^{2*}

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037; 2. Artificial Intelligence Institute, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: With the development of information technology, the Internet of Things(IoT) technology and low altitude remote sensing technology represented by drones have been widely used in fields such as production practice and environmental monitoring. In modern agricultural pest monitoring, the IoT and low altitude remote sensing technology can monitor crop pests and diseases from the ground microscopic and aerial macroscopic perspectives, and analyze their pathogenic environmental factors. Farms are usually located in remote areas far away from infrastructure, and agricultural IoT applications face limited energy supply. UAVs collect information on farm diseases and insect pests, which have the advantages of high flexibility, low cost, and timeliness of data. However, UAVs face problems such as short stagnation time and frequent battery replacement. By establishing a lighting model, the article realizes the automatic adjustment of the angle between the solar panel and the sunlight, so that the solar panel is always perpendicular to the sun's rays, and effectively improves the utilization of solar energy. In terms of drone applications, by adjusting the angle between the drone's wings and the wind direction of the farm during aerial photography, the drone can make full use of farm wind energy, reduce energy consumption, and extend flight time to meet the needs of farm pest monitoring. In addition, by analyzing the results of drone monitoring and farm environmental information obtained by the IoT, the relationship between the occurrence of plant diseases and insect pests and the environment can be obtained, and the environmental mechanism of disease and insect pests can be studied and analyzed.

Key words: Agricultural Internet of Things; Pests and diseases; Solar power; UAV remote sensing

收稿日期:2019-02-25

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0800204);国家自然科学基金面上项目(31670554);江苏省自然科学基金面上项目(BK20161527)

作者简介:高德民(1980-),男,副教授,博士,研究方向:无线传感器网络技术和农林物联网技术。

通讯作者:胡滨,男,博士,副教授,E-mail: hubin@njau.edu.cn

随着人口增长和社会的发展,预计到2050年世界粮食需求将增加一倍^[1],但是由于水位下降、气候变化和可耕种土地减少以及病虫害等原因,实现粮食增产的难度极大。病虫害一直是制约粮食增产的重要因素之一^[2-3],对农业造成巨大经济损失。根据联合国粮农组织统计,全球因为农作物病虫害的发生,每年会减少产量10%~16%。在我国,病虫害每年大约造成4000万吨粮食的损失^[4]。卫星遥感覆盖面积较大,适合大范围的灾害监测。但卫星遥感技术容易受天气影响且空间分辨率较低,难以满足对特定区域进行病虫害监测的需求^[5]。利用无人机低空遥感技术可实时监测到农场中病虫害发生情况,具有灵活度高、成本低和风险小等特性,可以满足农场病虫害监测要求^[6],使病虫害监测走向标准化、数据化和规范化^[7]。低空遥感技术在现代农场中已经有一定的应用^[8],但在偏远大型农场应用中,由于自身携带设备的重量与电池容量等原因,还可能存在着滞空时间短、电池更换频繁等问题,从而影响农业低空遥感技术的推广应用。

病虫害的发生与农作物生长环境变化有密切关系^[9],物联网技术的应用为实时监测农作物生长环境提供了便利条件。但是由于一些偏远农场通常远离基础设施,能量供应受限,一直制约农业物联网技术的发展。当前,以太阳光电为代表的能量采集型物联网技术被逐渐应用到农业领域^[10]。但在目前采用的光伏发电系统中,多以固定式太阳能板为主^[11],由于太阳能转化率与太阳能板和太阳光间夹角有关^[12],随着光线角度变化,太阳能转化率随之变动,当太阳能板与太阳光垂直时,太阳能转化率最高。有效提升太阳能获取率直接影响农业物联网技术的推广应用。

本研究针对太阳能利用率及无人机飞行时间较短问题进行了优化设计,以满足监测农场病虫害发生情况的需求,在了解农场病虫害发生情况后,结合物联网技术获取到的农场信息进行分析,即可得出病虫害发生机理,方便后面的病虫害防治工作。

1 现代农业物联网平台

为了使物联网和大数据驱动技术在病虫害监测上得以应用,我们研发出了一种现代农业物联网平台。由于农作物病虫害的发生与农场环境息息相关^[13],如农作物病虫害的产生和流行对温度范围有一定要求,降雨和湿度等因素会使病菌的

繁殖和扩散更加迅速^[14],风不仅会影响孢子的传播和扩散,还可能增加农作物染病的概率,有些病虫害的发生还与光照有关。所以,本系统中物联网的主要作用就是采集环境信息以及对农场环境的监测。现代农业物联网平台的应用场合大多在户外的偏远农场,主要由能源供应、IoT基站、网关设计、云端、APP等组成。本文设计出一种基于实际情况的智能太阳能供电系统来保证平台的能量供应。IoT基站主要由TVWS、Lora传感器连接模块以及基站控制器组成,负责接收来自传感器的数据并将其传输到网关。网关主要由传感器接口、本地计算部分等组成,负责提供服务并将数据进行整理分析,还可与云端进行数据交互,系统还提供了APP接口,方便农户进行管理。本文主要研究能量供应与无人机。

2 能量供应

系统采用太阳能发电的方式。但太阳能的采集容易受天气的影响^[15],在系统中加入了Open Weather API^[16]接口,系统可以通过上述接口获取天气预报,并决定后面几天的系统工作状态。为了提高系统对太阳能的利用效率,还模仿向日葵的生活习性,加入了一种基于太阳能光照角度感知和自动旋转对准装置,使太阳能板可以随着太阳的运动而旋转,从而保证太阳能电池板与太阳始终保持垂直关系,进而提高对太阳能的利用率^[17]。

2.1 太阳能光照角度感知自动旋转对准装置

太阳能光照角度感知自动旋转对准装置是由自制太阳追踪器、高度角轴、减速器、两个电机、上层底座,横向转轴以及底座组成。为了满足无论太阳偏转到任何角度都可以保持与太阳垂直的要求,设备中的转向部分必须满足东西向和南北向的自由转动。同时还应尽量满足低廉、可靠性高、结构简洁的原则。通过对目前多种太阳能采集装置的机械结构进行对比,加以改进,最终设计出太阳能追踪装置(图1)。此装置在东西向和南北向都有很大的旋转空间,并且结构简单,耗材较少,符合功能需求。

2.2 设备装置介绍

减速装置选择:选择了具有反向自锁功能,且输入轴与输出轴不在同一轴线也不在同一平面的蜗轮蜗杆减速器^[18]。

驱动电机:选取将脉冲电信号转换成相应的角位移或直线位移的步进电机作为驱动电机^[19]。

自制太阳追踪器:追踪器的形状为半球形,为了使阳光照射进去,在顶部的最中心位置留有一个正方形的小孔,追踪器每隔几分钟会对照射到设备底部的阳光进行检测。在设备的底部,放置着3×3排列的同样大小和规格的1至9号光敏电阻(从左到右依次编号),最中心位置的5号电阻大小与顶部孔的大小相同,且方位面平行。图1(c)为设备放大后的剖面图。图中虚线框表示太阳通过设备顶部孔照射进来的情况。当虚线框与5号光敏电阻重合时,设备与阳光垂直。若阳光偏移到图中位置时,系统会通过所有光敏电阻传回的信号判断出设备不处于与太阳垂直的状态(5号电阻传回的信息量比垂直照射时传回的信号量少,且2,3,6号本不应该有电信号出现的电阻也传回了信号),将接收到的信息通过放大器传送到控制器,然后通过中心控制器对自制太阳追踪器进行调整,可重新使虚线框与中心重合(只有5号电阻传回信号且信息量与垂直照射时相同),保证设备与太阳垂直。

2.3 控制策略

当太阳处于A位置时,透过小孔照射进来的阳光刚好与5号电阻重合,此时,设备与太阳光垂直。随着时间的推移,太阳运动到B位置,在图1

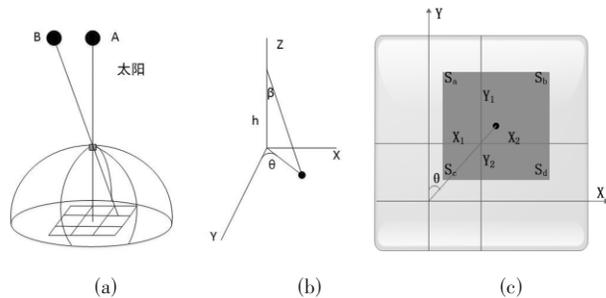


图1 追踪原理示意装置

(a)中可以看到照射进来的阳光已经偏离5号光敏电阻,为了使设备重新保持与太阳垂直,需要对设备的角度进行调整。将此时设备底部剖面图放大,即为图1(c)。当发生如图1(b)所示的偏移时,以设备中心为坐标原点,建立图1(b)所示的坐标轴。图中每个小正方形的边长为M,则每个小正方形的面积 $S = M^2$,设图1(c)中正方形所在位置的四条边分别为 X_1, X_2, Y_1, Y_2 。则正方形的中心坐标A为 (X_2, Y_1) 。

图1(c)中正方形的四个小面积分别为 $S_a = X_1Y_1, S_b = X_2Y_1, S_c = X_1Y_2, S_d = X_2Y_2$ 。系统底座是由光敏电阻组成,在系统中,每个小面积的值可以根据阳光照射后光敏电阻返回的信息量的

情况得到,每个小面积的信息量分别表示为 X_a, X_b, X_c, X_d 。所以可以得到如下关系 $X_a = S_a/S, X_b = S_b/S, X_c = S_c/S, X_d = S_d/S$,由于虚框也为正方形,所以可知 $X_1 + X_2 = Y_1 + Y_2 = M$,由上述条件可得:

$$X_2 = \frac{(S_a + S_d)M}{S} \dots\dots\dots(1)$$

$$Y_1 = \frac{(S_a + S_b)M}{S} \dots\dots\dots(2)$$

则由公式(1)(2)可得:

$$\theta = \arctan \frac{X_2}{Y_1} \dots\dots\dots(3)$$

将上述图形投射到三维坐标中,如图1(c)所示,图中圆点即为图1中A点,h为底部距装置顶点的距离,则:

$$\tan\beta = \frac{\sqrt{X_2^2 + Y_1^2}}{h} \dots\dots\dots(4)$$

由公式(4)可得:

$$\beta = \arctan \frac{\sqrt{(\frac{(S_b + S_d)M}{S})^2 + (\frac{(S_a + S_b)M}{S})^2}}{h} \dots\dots\dots(5)$$

为使装置保持与太阳垂直,可将设备先向X轴方向移动 θ 角度,然后向远离Z轴方向移动 β 角度即可保证设备重新与太阳垂直。为了节约能源,夜间应将追踪器的起始方向调整回来后静止不动。白天或夜晚可以通过时间来判断。阴天为散射光线,对追踪器不利。在阴天时,追踪器不经常转动。追踪器正常调整位置时有一个合理的时间段,超过该时间段仍不能调整到位则为阴天,追踪器应过一段时间后再尝试调整位置。

2.4 测试分析

压差式太阳追踪器可利用容器内介质的压力差使得装置慢慢调整回与太阳光垂直的状态^[20]。该追踪器装置结构简单,但只限于单轴式追踪器,精度较低。而本文提出的太阳能自动追踪装置具有双自由度,平动结构和升降结构共同作用实现追踪器对太阳的定位追踪,且整个装置采用不透明半圆形外壳,使光敏电阻在测量过程中不受周围环境中的光线影响,提高了测量精度。

对安装太阳光照角度感知自动旋转对准装置、压差式太阳追踪器装置以及固定式太阳能板的能量获取功率进行实时对比,以正南放置的固定式太阳能板为基础,测试长江流域3月中旬日出日落时间范围内最优能量获取功率,绘制成曲线图(图2)。由图2可知,11点至14点30分左

右,太阳光与固定式太阳能板间的入射角接近 0° ,能量获取功率最大;安装太阳光照角度感知自动旋转对准装置可使能量获取功率在9点左右提前达到峰值,且可使一天内能量获取功率提升

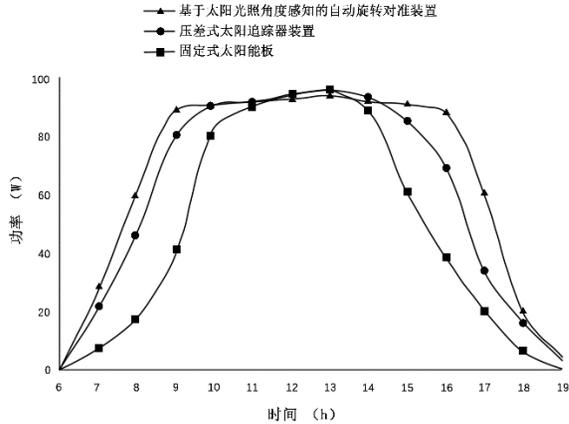


图2 三种装置的能量获取功率对比

38%左右。

3 无人机

系统中加入无人机的主要作用就是对农场的病虫害情况进行监测,利用低空遥感技术,通过对农作物反射回来的光谱进行分析,来确定农作物是否有病虫害发生。

3.1 无人机路径规划

无人机航拍之前,首先要进行飞行路径的规划。按照事先策划好的路径点,从一个路径点飞往下一个路径点。这些路径点的规划是由无人机的飞行高度、相机的视场和所需的图像质量等因素决定的,结合凸包算法,满足航拍时可以拍摄到整个农场的要求。在选取好无人机飞行路径点的情况下,对无人机的飞行路径进行规划。可以以不同的路径点作为起点,结合最短路径算法,规划出多条飞行路径。考虑农场多年气象情况,特别是风速与风向等因素,选取一条顺风比例最大的路径,保证最大限度地利用风能。而且在飞行过程中,对无人机的速度也进行了调整,以便节省无人机能量,延长飞行时间。

3.2 无人机速度规划

无人机在农场进行航拍时,为方便说明,只探讨其中一个路径点。在不考虑农场风的情况下,若无人机的飞行速度为 V_w ,飞行的路程为 S ,则无人机完成这段路程的时间为:

$$t = \frac{S}{V_w} \dots\dots\dots(6)$$

户外的大型农场通常都是开放的空间,会有

许多风能。当无人机在这种环境中飞行时,若不能对风能加以利用会造成不必要的能源浪费。当农场的风速与无人机的飞行路径呈现出一定夹角时,若想保持无人机在这段路径中的飞行时间不变,则可以调整无人机的飞行速度,包括大小及

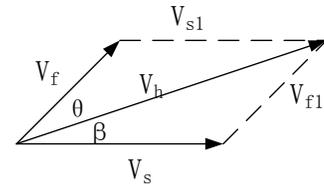


图3 无人机速度与风速示意图

其方向,如图3所示。

其中 V_f 为农场的风速, V_h 为无人机的飞行速度与农场的风速合成之后的速度,其大小和方向与 V_w 均相同,而 V_s 为无人机的实际飞行速度, θ 为 V_f 与 V_h 之间的夹角, β 为 V_s 与 V_h 之间的夹角。无人机上装有接收来自地面风向传感器与风速传感器信息的装置, V_f 是可以得到的,因为 $V_h = V_w$,所以 V_h 也已知,只需要得到 V_s 及 β 即可。由于向量 V_h 是由 V_f 和 V_s 合成得到的,图3所示的图形为平行四边形,那么 $V_s = V_{s1}$, $V_f = V_{f1}$ 。由余弦定理可知:

$$V_{s1}^2 = V_f^2 + V_h^2 - 2V_fV_h \cos \theta \dots\dots\dots(7)$$

由公式(7)可得:

$$V_s = V_{s1} = \sqrt{V_f^2 + V_h^2 - 2V_fV_h \cos \theta} \dots\dots\dots(8)$$

同样也可由余弦定理得知:

$$\cos \beta = \frac{V_h^2 + V_s^2 - V_f^2}{2V_hV_s} \dots\dots\dots(9)$$

由公式(9)可得:

$$\beta = \arccos \frac{V_h^2 + V_s^2 - V_f^2}{2V_hV_s} \dots\dots\dots(10)$$

由上述信息可得无人机实际飞行中速度大小及方向。若想节省无人机飞行时所耗能量,则需要 $V_s < V_w$,又因为 $V_w = V_h$,即 $V_s < V_h$,则需满足:

$$V_s < V_h \dots\dots\dots(11)$$

$$\Rightarrow V_s^2 < V_h^2 \dots\dots\dots(12)$$

$$\Rightarrow V_f < 2V_h \cos \theta \dots\dots\dots(13)$$

虽然农场风速不受人控制,但风速与飞行路径中的夹角以及无人机的速度可调控,可结合当地农场中风的情况设计出具体路径。

3.3 病虫害分析

通过遥感技术对农田病虫害监测可以分为间接监测和直接监测两类^[21]。直接监测是通过植物的反射光谱对农作物进行监测^[22],间接监测则是

通过对农作物周围的环境进行分析^[23],得出农作物发病虫害的概率。以导致农作物发病的害虫为例,一般情况下,在适宜的温度范围内,大多数害虫的生长速率随着温度的升高而加快,温度的升高导致害虫的生长周期缩短,反之则延长^[24]。

对无人机航拍的图片进行分析可知农作物发生病虫害情况,以图4为例,农作物受病害胁迫,图片中越黄表示发病越严重,越绿表示发病越轻。通过农田中的传感器对此时农作物周围综合环境进行分析可知,温度17℃,相对湿度68%,风速2.3 m/s,光照强度554 W/m²。经过多次实验,综合上述因素可得,若农作物生长在上述环境或较为接近的环境中农作物有较高概率发病。

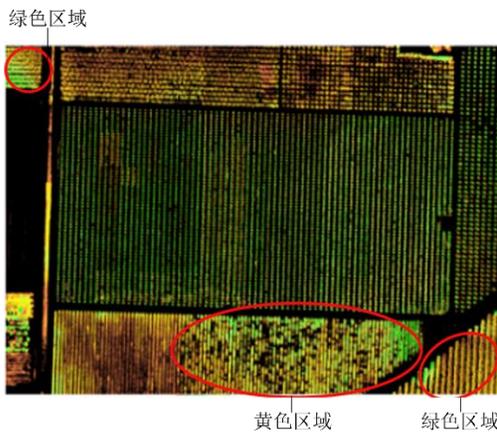


图4 病虫害监测低空遥感图像

4 病虫害与农场环境的关系

以小麦白粉病为例,针对小麦生长的关键时期,即从播种到成熟的这段时间,对影响小麦白粉病的主要环境因素进行分析,如温度和降雨量,分析结果如图5和图6所示。小麦发病程度

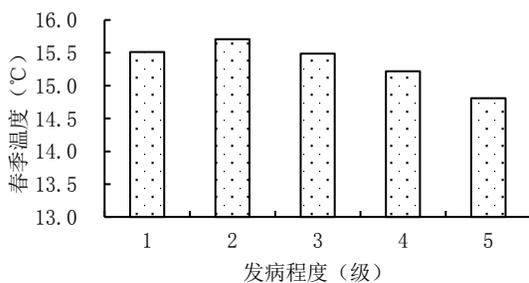


图5 春季温度对小麦发病程度影响

是指植株或器官等受害程度,0级表示植株健康,1级表示有发病症状但不明显,2级表示叶子或秸秆上出现明显发病症状,但发病区域所占面积不超过50%,3级表示叶子或秸秆上出现明显发病症状,且发病区域超过50%,4级表示受害已达全

株,5级表示已开始发生腐烂现象。

从图5和图6可以看出,在小麦生长的关键时期,随着气温的降低,小麦发病程度显著增加,而且随着降雨量的增加,小麦的总体发病程度也会增加。在气温偏低且降水偏高时,环境不利于小麦生长,小麦长势偏弱,容易被病虫害侵入。

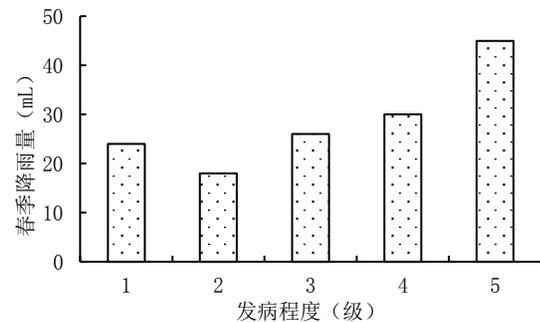


图6 春季降雨量对小麦发病程度影响

5 结论及未来规划

本文的主要工作包括以下几个方面,当为偏远农场中物联网技术提供能量时,加入了太阳能光照角度感知自动旋转对准装置,提高了太阳能的利用率,延长了传感器的使用时间,保证传感器采集到的数据实时有效。规划无人机飞行路线,调整无人机的飞行速度,充分利用农场风能,延长无人机的滞空时间,用以满足对户外大型农场进行病虫害低空遥感需求。无人机低空遥感技术和物联网技术分别从宏观和微观两个角度对农场病虫害情况进行监测,通过对无人机和传感器获取的大量数据进行分析,得出病虫害发生与农场环境间的具体关系。

参考文献:

- [1] United Nations General Assembly. Food Production Must Double by 2050 to Meet Demand from Worlds Growing Population, Innovative Strategies Needed to Combat Hunger, Experts Tell Second Committee[EB/OL]. [2009-10-01]. <http://www.un.org/press/en/2009/gaef3242.doc.htm>.
- [2] 张伟,李洪来,王显,等.吉林省花生苗期病虫害发生概况初报[J].东北农业科学,2016,41(6):75-78.
- [3] 路杨,佟雨航,隋丽,等.恶臭白色真菌在植物病虫害生物防治中的研究进展[J].东北农业科学,2014,39(6):37-42.
- [4] 中国新闻.病虫害每年造成粮食损失4千万吨[EB/OL]. [2017-02-11]. <http://news.cctv.com/2017/02/11/ARTIPy3JB0k-Tuecw4r9IP7JF170211.shtml>.
- [5] 郑二功,田迎芳,陈涛.基于深度学习的无人机影像玉米倒伏区域提取[J].河南农业科学,2018,47(8):155-160.

[6] 郭 锈. 浅析3S技术在精准农业中的应用及发展前景[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 41-43.

[7] 周 勇, 江 帆. 旋翼无人机的农业低空高光谱遥感技术分析[J]. 农业开发与装备, 2020(11): 20-21.

[8] Huang Y, Reddy K N, Fletcher R S, et al. UAV Low-Altitude Remote Sensing for Precision Weed Management [J]. Weed Technology, 2018, 32(1): 2-6.

[9] Collier R H. Pest and Disease Prediction Models [J]. Encyclopedia of Applied Plant Sciences, 2017, 3: 120-123.

[10] 胡春华, 李萍萍, 金成磊, 等. 基于自适应差分进化算法拟合圆的树干胸径测量方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 183-188.

[11] 张 屹, 胡 盘, 刘成恒. 基于GPS定位的太阳能板自动追光系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(1): 214-218.

[12] 刘国忠, 范忠瑶, 牟 娟, 等. 不同安装倾角对光伏电站发电量的影响研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(12): 2973-2978.

[13] 石绍玲, 许晓明, 郭婧芝. 农作物病虫害气象环境影响因子分析[J]. 农业与技术, 2016, 36(19): 124-126.

[14] 李 卓, 金恭玺, 郎 宁, 等. 温湿度与光照对葡萄霜霉病菌孢子囊萌发及存活的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(11): 2090-2097.

[15] 赵鹏程, 张福全, 杨绪兵, 等. 基于可视化的森林火灾监测节点优化部署策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(1): 30-35.

[16] Current weather and forecast. OpenWeatherMap, OpenWeather API[EB/OL]. [2018-10-01]. <http://openweathermap.org/>.

[17] 王士涛, 沈 毅, 李彩霞, 等. 基于人工智能的太阳跟踪系统架构[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 299-304.

[18] 孙金圳, 郭 涛. 蜗轮蜗杆减速机的应用与维护探讨[J]. 南方农机, 2019, 50(3): 48.

[19] 陈茂添, 王文华, 吴伟娜. 步进电机智能控制系统的设计与实现[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 112-114.

[20] 葛海浪, 臧 勇, 唐友亮, 等. 太阳能自动跟踪系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(6): 222-225.

[21] 高迎娟, 崔金平, 吕春雷, 等. 通化玉米黏虫发生程度气象等级预报方法[J]. 东北农业科学, 2018, 43(3): 35-38.

[22] 杨菲菲, 李世娟, 刘升平, 等. 作物环境胁迫高光谱遥感监测研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(4): 85-93.

[23] 徐春阳, 高玉军. 气候变化对农作物病虫害发生发展趋势的影响[J]. 农业与技术, 2018, 38(1): 136-137.

[24] 陈 悦, 赵 莹, 孙于森. 北苍术立枯病原鉴定及药剂优选[J]. 东北农业科学, 2020, 45(6): 89-94, 105.

(责任编辑:刘洪霞)



(上接第88页)

[3] 王 静, 赵密珍, 于红梅, 等. 低温胁迫下草莓花半致死温度的研究[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(2): 255-258.

[4] 万清林. 草莓抗寒特性分析[J]. 北方园艺, 1990(8): 4-7.

[5] 金昌叶, 郑亚杰. 草莓安全越冬试验报告[J]. 吉林农业科学, 1991, 16(3): 68-70.

[6] 朱根海, 刘祖祺, 朱培仁. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究[J]. 南京农业大学学报, 1986(3): 11-16.

[7] 张 敏, 蔡瑞国, 贾秀领, 等. 小麦抗寒机制的研究进展[J]. 东北农业科学, 2016, 41(4): 37-42.

[8] 张 勇, 汤浩茹, 罗 娅, 等. 低温锻炼对草莓组培苗抗寒性及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 325-329.

[9] 杨凤翔, 金 芳, 颜 霞. 不同草莓品种抗寒性综合评价[J]. 果树学报, 2010, 27(3): 368-372.

[10] 陈善娜, 梁 斌, 张蜀君, 等. 云南高原水稻幼苗的抗冷性与其活性氧清除系统的关系[J]. 云南植物研究, 1995, 17(4): 452-458.

[11] 牛锦凤, 王振平, 李 国, 等. 几种方法测定鲜食葡萄枝条抗寒性的比较[J]. 果树学报, 2006, 23(1): 31-34.

[12] 李轶冰, 杨顺强, 任广鑫, 等. 低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1341-1347.

[13] 张 耿, 高洪文, 王 赞, 等. 偃麦草属植物苗期耐盐性指标筛选及综合评价[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 55-61.

[14] 常琳琳, 董 静, 钟传飞, 等. 中国育成草莓品种的谱系分析[J]. 果树学报, 2018, 35(2): 158-167.

[15] 雷家军, 代汉萍, 谭昌华, 等. 中国草莓属(*Fragaria*)植物的分类研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 1-5.

[16] 侯福林. 植物生理学实验教程(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 33-34.

[17] 陈建勋. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 117-127.

[18] 魏秀清, 许 玲, 章希娟, 等. 莲雾对低温胁迫的生理响应及抗寒性分析[J]. 果树学报, 2016, 33(1): 73-80.

[19] 张晓旭, 叶景学, 侯 杰, 等. 夜间低温对樱桃番茄叶片氧化活性的影响[J]. 东北农业科学, 2017, 42(2): 39-43.

[20] Smiroff N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation[J]. New Phytologist, 1993, 125(1): 27-58.

[21] 何西凤, 杨途熙, 魏安智, 等. 自然越冬过程中花椒抗寒性生理指标的变化[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 67-69.

[22] 蒋明义, 郭绍川, 张学明. 氧化胁迫下稻苗体内积累的脯氨酸的抗氧化作用[J]. 植物生理学报, 1997(4): 347-352.

[23] 罗军武, 唐和平, 黄意欢, 等. 茶树不同抗寒性品种间保护酶类活性的差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(2): 94-96.

(责任编辑:王 昱)