

# 丘陵茶园自动喷药装置设计与试验

邓兴旭<sup>1</sup>, 叶芙蓉<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>, 唐兴隆<sup>2</sup>,  
庞有伦<sup>2</sup>, 林通<sup>1</sup>, 陈宇<sup>1</sup>, 罗书强<sup>1</sup>

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业科学院农业机械研究所, 重庆 401329)

**摘要:**为实现丘陵山区茶园自动化喷药,解决目前丘陵茶园自动化程度低、药液浪费严重和大中型装置无法进入等问题,设计了一种茶园自动喷药装置。根据丘陵山区茶园实际条件,对自动喷药装置的主要零部件进行结构设计及理论分析,装置采用水平方向和 45°角方向喷射的喷药模式,结合超声波测距模块自动对靶,实现喷头与茶树冠表层之间位置的定位,并计算得到喷杆长度为 1.1 m,单侧喷杆上设置 3 个喷头,喷头间距为 0.5 m。喷药控制系统以 STC89C52 作为微控制器,运用 C 语言编程实现对喷杆喷药距离的自动调节和对电机和电磁阀的控制。选取冠层梯度、喷雾高度和行走速度为试验因素,以雾滴沉积密度为性能指标进行正交试验,结果表明:冠层梯度对雾滴沉积密度有极显著影响( $P<0.001$ ),喷雾高度和行走速度对其影响不显著( $P>0.05$ ),对雾滴沉积密度的影响程度从大到小依次为冠层梯度、喷雾高度、行驶速度,不同冠层梯度下各点位雾滴平均沉积密度均大于 26 个·cm<sup>-2</sup>,满足喷幅界定的 20 个·cm<sup>-2</sup>要求。

**关键词:** 茶园; 自动喷药装置; 雾滴沉积密度; 丘陵山区

**中图分类号:** S224.3      **文献标志码:** A

## Design and experiment of automatic spraying device in the tea garden of hilly and mountainous areas

DENG Xingxu<sup>1</sup>, YE Furong<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, TANG Xinglong<sup>2</sup>,  
PANG Youlun<sup>2</sup>, LIN Tong<sup>1</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, LUO Shuqiang<sup>1</sup>

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to design an automatic spraying device for tea garden in hilly and mountainous areas to solve the problems of low automation, serious waste of liquid medicine and inaccessibility of large and medium-sized devices. Based on the actual conditions of tea gardens, the structural design and theoretical analysis of the main parts of the automatic spraying device were carried out. The device adopted a spraying mode of horizontal line and 45° angle direction, combining with the ultrasonic ranging module to automatically target to achieve positioning between the nozzle and the surface layer of the tea crown. The length of the spray bar was calculated to be 1.1 m, and three nozzles were on one side of the spray bar, with a nozzle spacing of 0.5 m. The spraying control system took STC89C52 as the microcontroller and used C language programming to realize the automatic adjustment of the spraying distance of the spray rod, as well as the control of the motor and solenoid valve. Taking canopy gradient, spray height and walking speed as experimental factors, the droplet deposition density was used as the performance index to conduct orthogonal experiments. The results showed that the canopy gradient had a extremely significant effect on droplet deposition density( $P<0.001$ ), but spray height and walking speed had no significant effect on it( $P>0.05$ ). The effect on droplet deposition density was from big to small in order of canopy gra-

收稿日期:2021-08-07

修回日期:2022-07-05

**基金项目:** 重庆市社会民生科技创新专项项目(cstc2016shmszx80007); 重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2019jxj100002)

**作者简介:** 邓兴旭(1997-),男,云南昭通人,硕士研究生,研究方向为农业机械设计。E-mail: dengxingxu3@163.com

**通信作者:** 罗书强(1971-),男,重庆巴南人,博士,副教授,主要从事农业机械数字化设计与智能制造研究。E-mail: luoshuqiang@swu.edu.cn

dients. The average droplet deposition density at each point of different canopy gradients was greater than  $26 \cdot \text{cm}^{-2}$ , meeting the requirements of spray size definition of  $20 \cdot \text{cm}^{-2}$ .

**Keywords:** tea garden; automatic spraying device; droplet deposition density; hilly and mountainous areas

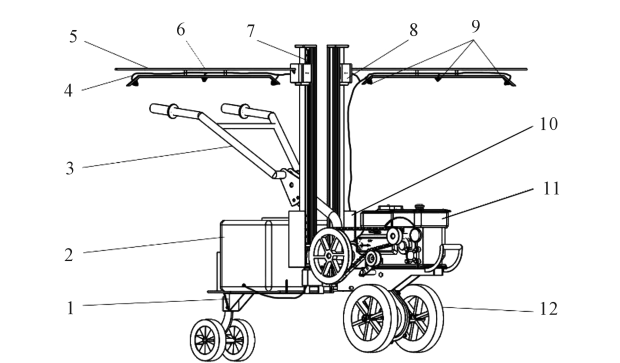
我国西南地区是茶树的原产地,但西南地区的地形以丘陵山区居多,独特的地形限制了对茶园的自动化管理。茶树的病虫害防护在茶树的日常管理中尤为重要。传统的喷杆式喷药装置无法实现高效、精准、低污染的喷药,导致了农药的浪费和土地的污染。Giles、Osterman 等<sup>[1-2]</sup>利用传感器、机器视觉及改良算法等实现了喷雾器的精准对靶。Lešnik、Endalew 等<sup>[3-4]</sup>通过构建 CFD 模型,通过风场分析改善风送装置,提高了喷雾附着效果。但国外研究人员对精准对靶和风送装置的研究主要在大中型拖拉机上开展,而大中型拖拉机无法进入丘陵山区进行作业。杨鹏<sup>[5]</sup>设计了一种外形小、操作方便且雾滴使用率高的果园遥控弥雾机。丁为民等<sup>[6]</sup>通过图像处理技术提取树冠图像面积特征和轮廓特征来获取树冠的体积。曲峰<sup>[7]</sup>提出了一种基于奇异值分解的叶片病害图像背景分割方法,获得了完整的病害叶片区域。王利霞等<sup>[8]</sup>设计了一种具有手动控制、自动控制和试验标定 3 种工作模式的变量喷雾控制系统。马驰等<sup>[9]</sup>设计了一种多方位自动喷药装置,该装置采用超声波模块检测喷药距离来增大药液利用率。赵建柱等<sup>[10]</sup>基于雷达传感技术设计了一种狼毒草对靶喷药装置。我国在喷药领域的研究起步较晚,近几年才逐渐增加,但所研究的复杂机械结构无法适用于丘陵山区。

针对丘陵山区茶园喷药管理,本文研制出自适性自动喷药装置,该装置机械结构紧凑、简单且能进入丘陵山区作业。该装置的控制系統主要由信息采集模块和执行器模块组成,通过软件控制来适应丘陵山区茶园不同地形及茶树形状,完成自动化喷药。

# 1 自动喷药装置结构与工作原理

## 1.1 自动喷药装置结构

根据设计要求,并结合我国丘陵山区茶园建设现状,本文在茶园管理机移动平台上搭建自动喷药系统,由机械结构、喷药回路系统和自动控制系统组成(图 1)。喷药装置的工作原理是由超声波测距模块采集数据,主控芯片对采集的数据进行处理,判断喷头是否在喷药规定范围内,若在规定范围内,驱动电路打开电磁阀,若不在规定范围内,驱动步进电机通过升降装置调节喷杆与茶树冠层距离在设定范围内,再驱动电路打开电磁阀,完成自动喷药。整机主要技术参数如表 1 所示。



1.支撑架;2. 药液箱;3. 扶手架;4. 管道;5. 喷杆;6. 超声波测距模块; 7. 丝杠滑轨;8. 滑块;9. 喷头;10. 步进电机;11. 发动机;12. 行走轮  
1. Support frame;2. Liquid medicine tank;3. Handrail;4. Pipeline; 5. Spray bar;6. Ultrasonic ranging module;7. Screw rails;8. Slider; 9. Spray nozzle;10. Stepper motor;11. Engine;12. Walking wheel

图 1 茶园自动喷药装置结构图

Fig.1 Structure diagram of automatic spraying device in tea garden

表 1 整机主要技术参数

Table 1 Main parameters of the spraying device

| 参数<br>Parameter         | 参数值<br>Value                                                                        |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 动力系统<br>Dynamic system  | 宗申 NH130 2.2kw 汽油发动机<br>Zongshen NH130 2.2kW gasoline engine<br>24V 蓄电池 24V battery |
| 传动系统<br>Drive system    | 总传动比 12<br>Total gear ratio 12                                                      |
| 移动平台<br>Mobile platform | 1330 mm×385 mm×750~950 mm                                                           |

## 1.2 支架设计与喷头布置

据测量,重庆市二圣茶叶有限公司标准化茶园行距茶树集中度最高的高度为 710 mm,茶园茶垄宽度为 1 100~1 400 mm,最小通行间距 300~400 mm。本文根据上述参数,制定合理的喷药方案,以确保自动喷药装置满足茶园环境适应性要求。西南山区茶园分布于云南中北部、西藏东南部、四川省、贵州省和重庆市等地,茶树的主要病虫害是茶小绿叶蝉、茶黑毒蛾及茶炭疽病等,这些茶园害虫栖息比较隐蔽,其低龄幼虫多在茶树中下部的成熟老叶背面啃食叶片<sup>[11]</sup>,一般喷药机械难以覆盖,因此本文采用水平和 45°两种喷药模式相结合进行喷射,使得药剂可喷入成熟老叶背面,以防治病虫害的危害。具体喷药模式如图 2 所示。

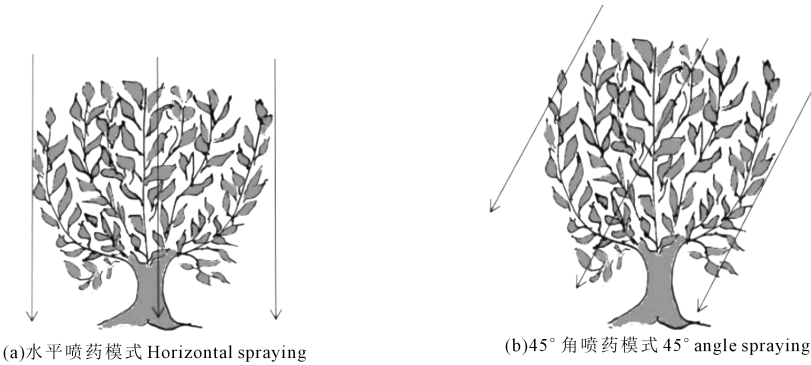


图 2 喷杆喷药模式  
Fig.2 Spray rod spraying mode

据测量值可知茶园茶垄宽度的平均值约为  $L=1\ 200\ \text{mm}$ , 因此本文喷杆长度设为  $1\ 100\ \text{mm}$ 。《NY/T 650~2013 喷雾机作业质量》<sup>[12]</sup> 规定低容量喷雾机施液量应小于  $450\ \text{L} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 故本文选用扇形喷头 VP110-02, 该喷头在车速  $2.78\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的情况下喷洒量设为  $96\ \text{L} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 满足低容量喷雾机要求。

喷头安装需满足约束条件如下:

$$\begin{cases} k_1 f'' \leq 2(f-x) \leq k_2 f'' \\ 0 \leq f'' - f - \left(\frac{L}{2} - x\right) \leq f' \end{cases} \quad (1)$$

$$f = h \cot\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \quad (2)$$

$$f' = h \left( \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha - 90^\circ\right) - \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha - \gamma - 90^\circ\right) \right) \quad (3)$$

$$f'' = h \left( \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha - 90^\circ\right) + \cot\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \right) \quad (4)$$

式中,  $k_1$  为最小重叠系数;  $k_2$  为最大重叠系数;  $x$  为两喷头之间的距离,  $\text{m}$ ;  $L$  为茶垄宽度,  $\text{m}$ ;  $f$  为喷头安装竖直面右侧幅宽,  $\text{m}$ ;  $f'$  为舍弃喷幅,  $\text{m}$ ;  $f''$  为单喷头喷幅,  $\text{m}$ ;  $h$  为喷头到冠层顶面距离,  $\text{m}$ ;  $\alpha$  为喷头与水平面夹角,  $^\circ$ ;  $\beta$  为喷头标定喷雾角,  $^\circ$ ;  $\gamma$  为舍弃的局部喷雾角,  $^\circ$ 。

茶树低容量喷雾时, 扇形喷头 VP110-02 的  $k_1$  为 10%,  $k_2$  为 20%,  $\gamma$  为  $5^\circ \sim 10^\circ$ 。考虑低容量喷雾时雾滴均为细雾, 为减少雾滴飘移, 喷雾高度取  $0.3 \sim 0.5\ \text{m}$ <sup>[13-14]</sup>, 据测量值可知茶园茶垄宽度的平均值约为  $L=1.2\ \text{m}$ 。扇形喷头 VP110-02 的标定喷雾角  $\beta$  为  $110^\circ$ ,  $45^\circ$  角喷射模式中喷头与水平面的倾角  $\alpha$  为  $45^\circ$ 。将  $L=1.2\ \text{m}$ ,  $h=0.3\ \text{m}$ ,  $\gamma=5^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $\beta=110^\circ$  带入上述公式中得  $0.49\ \text{m} \leq x \leq 0.52\ \text{m}$ , 取  $x=0.5\ \text{m}$ , 即两喷头间距为  $0.5\ \text{m}$ 。两喷头之间的距离为  $0.5\ \text{m}$ , 单侧喷杆上共 3 个喷头, 因此设计的喷杆

总长为  $1.1\ \text{m}$ 。为适应茶树不同生长时期的高度, 本文选用电机、丝杠滑轨与喷杆组成可移动喷杆, 可在垂直方向上移动来适应不同高度的茶树。可移动喷杆参数如表 2 所示。

1.3 发动机型号及主动轮参数确定

本文的茶园自动喷药装置是以茶园管理机为喷雾载体, 茶园管理机对茶园可实现耕整、开沟、施肥、覆土、除草和喷药等功能。在上述功能中耕整工作消耗的发动机功率最大, 经计算所得茶园管理机进行耕整作业时所需功率为  $1.83\ \text{kW}$ , 所选发动机功率应大于最大消耗功率, 才可满足其他功能作业的功率消耗, 因此本文选用重庆宗申巴贝锐拖拉机制造有限公司的 NH130 型发动机, 具体参数如表 3 所示。

1.4 喷药回路系统性能参数

本文所选扇形喷头 VP110-02 的最大流量为  $0.4\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$  且使用压力不低于  $0.3\ \text{MPa}$ , 喷药装置共设有 6 个喷头, 因此电动泵的流量不小于  $2.4\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$  且需提供的压力不低于  $0.3\ \text{MPa}$ , 电磁阀使用压力不低于  $0.3\ \text{MPa}$ 。

查阅《农业机械设计手册》<sup>[15]</sup>, 得到估算药箱有效容积公式:

$$\Delta = \frac{3QL}{50v} \quad (5)$$

式中,  $Q$  为常用喷量,  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $v$  为机组平均作业速度,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 扇形喷头 VP110-02 在  $v=8\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  下的常用喷量  $Q=0.4\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 茶园每行茶树垄的距离约为  $20\ \text{m}$ , 设定喷药作业每周期内工作 100 个来回, 则工作 100 个来回的总行程  $L=4\ 000\ \text{m}$ , 即药箱的有效容积为  $\Delta=43\ \text{L}$ 。

为满足喷药流量和压力的要求, 喷药回路系统主要由 24V 蓄电池、DHE-7501 直流电动泵、供药管路、43 L 药箱、CJV23-C12A1 电磁阀及扇形喷头 VP110-02 组成。喷药回路系统主要技术参数如表 4 所示。

表 2 可移动喷杆各部件参数

Table 2 Parameters of various components of movable spray bar

| 名称<br>Title           | 型号<br>Model                 | 尺寸/mm<br>Dimension/mm |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 步进电机<br>Stepper motor | 57 步进电机<br>57 stepper motor | 57×57×56              |
| 丝杠滑轨<br>Screw rails   |                             | 700                   |
| 喷杆<br>Spray bar       |                             | 1100                  |

表 3 NH130 汽油机参数

Table 3 NH130 gasoline engine parameters

| 型号<br>Model | 尺寸(长×宽×高)<br>Dimension (length×<br>width× height)<br>/mm | 标定功率<br>Rated<br>power<br>/kW | 标定转速<br>Rated<br>speed<br>/(r·min <sup>-1</sup> ) | 启动方式<br>Start-up                             | 燃油种类<br>Fuel<br>type |
|-------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|
| NH130       | 333×241<br>×330                                          | 2.2                           | 3 600                                             | 手拉绳式<br>反冲启动<br>Recoil start<br>of hand rope | 汽油<br>Gasoline       |

表 4 喷药回路系统主要技术参数

Table 4 Main technical parameters of spraying circuit system

| 名称<br>Title              | 型号<br>Model    | 工作电压<br>Working<br>voltage | 使用压力<br>Using<br>press<br>/MPa | 最大流量<br>Maximum<br>flow<br>/(L·min <sup>-1</sup> ) | 功率<br>Power<br>/W |
|--------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------|
| 电动泵<br>Electric<br>pump  | DHE-7501       | DC12V                      | 0.5                            | 2.4                                                | 20                |
| 电磁阀<br>Solenoid<br>valve | CJV23-C12A1    | DC12V                      | 0.8                            |                                                    | 5                 |
| 蓄电池<br>Battery           | BT-HSE-5-24/HL | 24V                        |                                |                                                    |                   |
| 喷头<br>Nozzle             | VP110-02       |                            | 0.3                            | 0.4                                                |                   |

1.5 管道流场分析

茶园自动喷药装置喷药回路系统中管路连接如图 3 所示。

本文设计的自动喷药装置采用 VP110-02 型号的扇形喷头,扇形 VP110-02 喷头的最大流量为 0.4 L·min<sup>-1</sup>,装置共有 6 个喷头,在 0.3 MPa 工作压力下双侧总流量  $Q=144\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ,高压管 1 的内径  $d_1=5\text{ mm}$ ,计算可得高压管 1 内流速  $v_1$  为  $2.04\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。25℃下水的运动黏度为  $\nu=0.897\times10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,计算得到高压管 1 内雷诺数  $Re_1$  为  $11371>2300$ ,其运动状态为紊流。

高压管 2 在 0.3 MPa 工作压力下单侧总流量  $Q=72\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ,高压管 2 的内径  $d=8.5\text{ mm}$ ,则高压管 2 内流速  $v_2$  为  $0.35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,计算得到高压管 2 内雷诺数  $Re_2$  为  $3316>2300$ ,其运动状态也为紊流。

在紊流状态下,系统水流机械能损失主要为流

体流动阻力能量损失和局部水流损失,紊流时的摩擦系数沿程摩擦系数  $\lambda$  采用 Blasius. H. 公式得出<sup>[10]</sup>。计算得出高压管 1 的沿程摩擦系数  $\lambda_1$  为 0.03,已知高压管 1 的长度  $l_1=600\text{ mm}$ ,内径  $d_1=5\text{ mm}$ ,其沿程流体流动阻力  $h_{f_1}$  为 0.76 m,则高压管 1 的沿程压强损失为:

$$P_{f_1}=\rho gh_{f_1}=1000\times9.8\times0.76=0.7448\times10^4\text{ Pa}$$

(6)

根据 Blasius.H.公式,计算得出高压管 2 的沿程摩擦系数  $\lambda_2$  为 0.04,已知高压管 2 的长度  $l_2=2\text{ 200 mm}$ ,内径  $d=8.5\text{ mm}$ ,其沿程流体流动阻力  $h_{f_2}$  为 0.06 m,则高压管 2 的沿程压强损失为:

$$P_{f_2}=\rho gh_{f_2}=1000\times9.8\times0.06=612.5\text{ Pa}$$

(7)

已知高压管 2 内径  $d_2=8.5\text{ mm}$ ,三孔喷头接座内径  $d_3=2.5\text{ mm}$ ,三孔喷头接座的内部结构为突缩管结构,所以其局部水头损失系数  $\xi$  为 0.475。 $A_2$  为高压管 2 截面面积, $A_3$  为三孔喷头接座内管截面面积。三孔喷头接座长度为  $l=80\text{ mm}$ ,内径  $d_3=2.5\text{ mm}$ ,其三孔喷头接座的局部水头损失  $h_{f_3}$  为 0.003 m,则三孔喷头接座的局部压强损失为:

$$P_{f_3}=\rho gh_{f_4}=1000\times9.8\times0.003=29.4\text{ Pa}$$

(8)

管道流体流动总压强损失为:

$$P_f=P_{f_1}+2P_{f_2}+2P_{f_3}=0.09\text{ MPa}$$

(9)

综上所述,管道流体流动总压强损失为 0.09 MPa,电动泵的工作压力为 0.5 MPa,因此,喷药系统中的 6 个扇形喷头能获得额定工作压力。

2 控制系统设计

控制系统以 STC89C52 为微控制器。信息采集模块通过速度传感器与超声波传感器对茶园自动喷药装置行走速度和喷杆与茶树之间的距离进行采集。微控制器对采集到的数据进行处理,判断喷杆与茶树之间的距离是否在 300~500 mm 范围内,若在范围内打开继电器 1 驱动电磁阀进行喷药,若不在范围内则打开继电器 2 驱动电机,直至喷杆与茶树之间的距离在 300~500 mm 范围内。主控系统硬件电路如图 4 所示。

3 控制系统软件设计

控制系统软件在 uVision4 开发平台上用 C 语言开发,分为信息采集和处理模块、电磁阀调节器模块和电机控制模块。



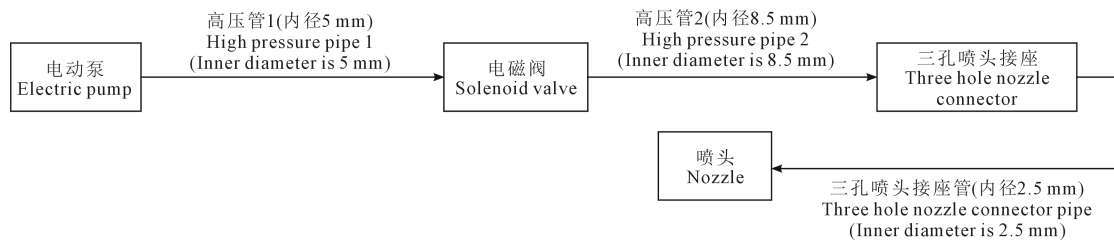


图 3 管道连接示意图

Fig.3 Diagram of pipeline connection

3.1 信息采集和处理

超声波模块的控制端口 Trig 和接收端口 Echo 分别与单片机的外部中断口 P3.2 和 P3.3 连接,通过定时和中断计数的方法获取距离。外部中断判断回波电平,定时器中断用作超声波测距计时。系统时钟为 1/8 晶振,定时器为 12 分频。测量结果的高 8 位与寄存器的低 8 位合成 16 位数据 (distance\_data),据超声波测距原理  $Y_m = (X_s \times 344) / 2$ , 即  $X_s = (2 \times Y_m) / 344 = 0.0058 \times Y_m$ , 从上述关系式中可得到定时器得到的定时时间 ( $\mu s$ ) 除以 580 等于所测距离 (mm), 所以测量距离为:

$(distance\_data \times 12) / 580$

测距程序如下:

```
distance_data = outcomeH;  
distance_data <= 8;  
distance_data = distance_data | outcomeL;  
distance_data * = 12;  
distance_data / = 580;
```

3.2 电机控制

电机控制模块通过控制输出的脉冲频率控制电机转速,改变相应引脚的电位控制电机转动方向。在程序设计中确定电机正反转方向信号,单片机 IO 口 P1^3 输出 0 时为正转,步进电机正转一步,输出为 1 时,步进电机反转一步。根据预设的值控制丝杠滑轨的最大行程。转动轴电机则根据目前的位置(当前计数值)及目标位置(目标计数值),对应调整转动方向,并向该方向转动对应步数。本文选用的步进电机转一步所配套的丝杠行程为 10 mm。

3.3 电磁阀控制

单片机的输出控制口 P1.0、P1.2 分别与电磁阀驱动电路芯片 L298 的 IN1、IN3 端口连接。系统初始化后检测 P1.0 口的状态,超声测距信号传给单片机 P1.0 口,若测量距离在设定范围内,则 P1.0=0,根据单片机信号处理,将 P1.1 与 P1.2 口置 0,电磁阀打开,喷头工作;若测量距离在设定范围外,则

P1.0=1,单片机将 P1.1 与 P1.2 口置 1,电磁阀关闭,喷头停止工作。

4 样机调试与试验

4.1 田间试验

茶园现场试验选择在重庆市北碚区三圣镇青峰茶场,该茶园位于青峰山上,海拔 800~1 040 m,茶园地块小、地势陡且大型机械无法作业,符合丘陵山区茶园特点。田间试验情况如图 5 所示。

4.1.1 试验方案设计 本文采用三因素三水平正交试验对茶园自动喷药装置实际工作情况进行评估,检验不同喷雾高度、行走速度及冠层梯度对喷药质量的影响。该试验的因子水平表如表 5 所示。表 5 中,每个因素 3 个水平数值的选取均符合均匀性要求。

本文以雾滴覆盖率为主要评价指标,以沉积密度作为辅助指标,采用水敏试纸布置在茶树冠层特征点处,对喷药结果进行采集和分析,正交试验方案如表 6 所示。

表 5 因素水平表

Table 5 Factors and levels table

| 水平<br>Level | 因素 Factor               |                                                  |                            |
|-------------|-------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------|
|             | A                       | B                                                | C                          |
|             | 喷雾高度<br>Spray height/cm | 行走速度<br>Walking speed<br>/(m · s <sup>-1</sup> ) | 冠层梯度<br>Canopy<br>gradient |
| 1           | 30                      | 1                                                | 上 Upper                    |
| 2           | 40                      | 2                                                | 中 Middle                   |
| 3           | 50                      | 3                                                | 下 Lower                    |

表 6 正交试验方案

Table 6 Orthogonal test schemes

| 编号 No. | 因子 1 Factor 1 | 因子 2 Factor 2 | 因子 3 Factor 3 |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| 1      | 1             | 1             | 1             |
| 2      | 1             | 2             | 3             |
| 3      | 1             | 3             | 2             |
| 4      | 2             | 1             | 3             |
| 5      | 2             | 2             | 2             |
| 6      | 2             | 3             | 1             |
| 7      | 3             | 1             | 2             |
| 8      | 3             | 2             | 1             |
| 9      | 3             | 3             | 3             |

4.1.2 采样特征点选取 试验过程中,选取冠层参数基本相同的茶行,在茶冠层横截面上每处理采用 5 点取样法,即左右两侧各布置 2 点,中间布置 1 点,如图 6 所示。茶叶冠层梯度分为上、中、下 3 个梯度,如图 7 所示,每个梯度冠层横截面采用五点取样法。其中,将外侧 4 个点的水敏纸置于茶行边缘附近,中间点放置在外侧 4 个点的对角线交点处,5 点取样法中的每个点都在相同的高度上,每个点位都放置一张水敏纸。

4.2 试验数据处理与结果分析

文中选用重庆市六六山下植保高新科技有限责任公司生产制造的水敏试纸进行试验。试纸的尺寸为 30 mm×80 mm,自然色调为淡黄色,雾滴接触水敏纸时即与水敏纸迅速发生反应,反应处由浅紫色逐渐变为深紫色,如图 8a、b 所示。该水敏纸具

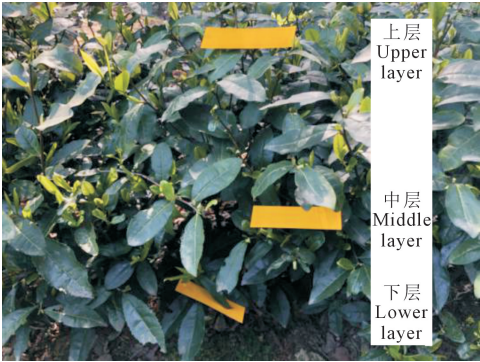
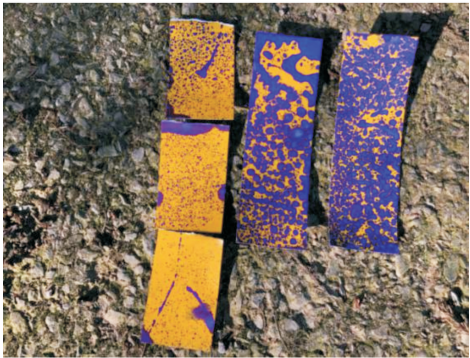


图 7 茶树冠层梯度分布图

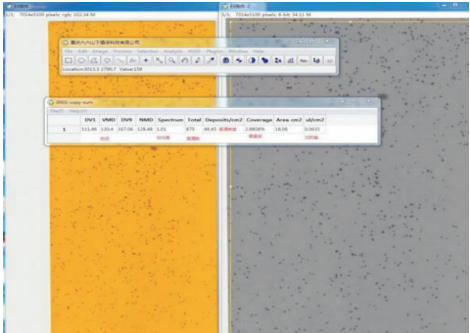
Fig.7 Gradient distribution of tea canopy



(a)茶树上层试验后水敏纸  
Water sensitive paper after upper layer test of the tea tree



(b)不同梯度试验后水敏纸  
Water sensitive paper after different gradient tests



(c)水敏纸检测图样  
Water sensitive paper test pattern

图 8 收集液滴后的水敏纸图像

Fig.8 Image of water-sensitive paper after collecting droplets

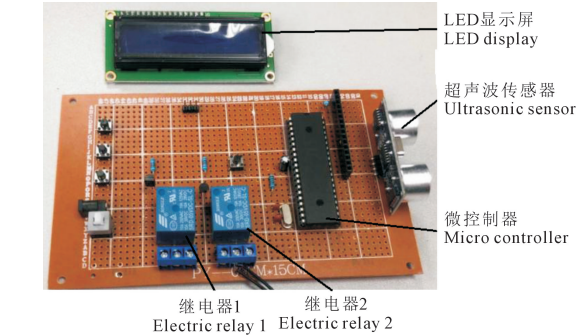


图 4 主控制系统硬件电路

Fig.4 Hardware circuit of main control system



图 5 田间试验  
Fig.5 Field test

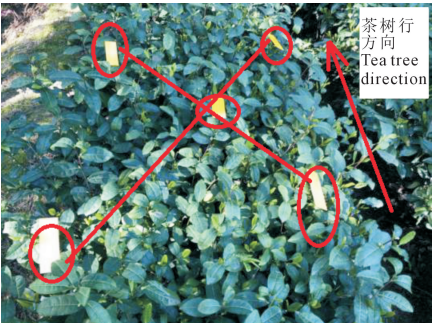


图 6 茶树 5 点采样分布图

Fig.6 5-point sampling distribution of tea tree canopy



有较好的雾滴检测特性,遇水迅速变色。喷雾田间试验完成后,将用于试验的水敏纸干燥,放进有相对应标识的包装袋中。在试验室中,运用扫描机将包装袋的水敏纸一一转化成分辨率为 600×600 的 PNG 文件格式。通过与水敏纸配套的雾滴分析软件(重庆六六山下植保科技有限公司的六六山下雾滴分析软件 V2.0)开展图像处理,如图 8c 所示,测算出雾滴沉积总面积与水敏纸总面积之比,则为雾滴覆盖率。

雾滴沉积密度正交试验所得结果如表 7。从表中可以看出,每个位置的雾滴平均沉积密度均高于 20 个·cm<sup>-2</sup>,满足 JB/T 9782—2014《植保机械通用试验方法》<sup>[16]</sup>对喷雾机雾滴沉积密度的要求。为继续深入探究不同喷雾高度、行走速度和冠层梯度对雾滴沉积密度的影响,本文利用 SPSS 软件进行组间二维方差分析,测试结果如表 8 所示。在主效应检验中,整体模型 *F* 为 4.286, *P* 为 0.020,表明在 *P*<0.05 显著性水平下方差分析模型整体显著。其中冠层梯度 *P*<0.001,而喷雾高度和行走速度的 *P* 值分别为 0.110 和 0.589,表明冠层梯度对雾滴沉积密度有显著性影响,喷雾高度和行走速度对雾滴沉积密度无显著性影响。偏 *Eta* 平方值可以反映因素对效应量的作用大小,根据表 8 中效应量的度量值偏 *Eta* 平方值判断,可以看出冠层梯度的偏 *Eta* 平方值最大且通过了显著性检验,喷雾高度和行走速度偏 *Eta* 平方值均小于冠层梯度的偏 *Eta* 平方值且均未通过显著性检验。由表 8 可得:茶园现场试验中不同因素对雾滴沉积密度的影响程度由大到小依次为冠层梯度、喷雾高度、行走速度。

对不同冠层梯度和喷雾高度下雾滴沉积密度的 LSD 多重比较如表 9 所示,由 *P* 值可得,上部雾滴沉积密度 *P*<0.001,显著多于中、下部雾滴沉积密度,而中、下部 *P*=0.731>0.05,则中、下部冠层梯度的雾滴数量相差不大。导致此现象的原因在于,茶树冠层梯度上部的叶片生长茂盛,将大多数雾滴遮挡在上层,因此造成了上层雾滴沉积密度最大,上部与中下部的雾滴沉积密度出现了显著性差异。茶叶树冠上下重叠,遮拦严重。只有一部分从树冠上部渗透到树冠中部的液滴沉积在中部的叶片上,其余的通过叶片之间的间隙继续渗透到树冠下部。雾滴被上部和中部的叶子层层拦截,使下部的雾滴数量沉积密度最小。与沉积密度最高的上部相比,雾滴在中下部的沉积密度差异相对较小,没有明显差异。

表 7 雾滴沉积密度正交试验结果/(个·cm<sup>-2</sup>)

| Table 7 Orthogonal test results of droplet deposition density/(No. · cm <sup>-2</sup> ) |                                                                           |        |         |         |        |                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|--------|-----------------------------------------------------------|
| 试验序号<br>No.                                                                             | 不同测点雾滴沉积密度<br>Droplet deposition density at<br>different measuring points |        |         |         |        | 雾滴平均层积密度<br>Average stratification<br>density of droplets |
|                                                                                         | 左 1                                                                       | 左 2    | 右 1     | 右 2     | 中间     |                                                           |
|                                                                                         | Left 1                                                                    | Left 2 | Right 1 | Right 2 | Middle |                                                           |
| 1                                                                                       | 101.7                                                                     | 115.9  | 41.6    | 17.3    | 72.7   | 70.1                                                      |
| 2                                                                                       | 163.9                                                                     | 189.2  | 195.6   | 170.8   | 56.9   | 155.3                                                     |
| 3                                                                                       | 148.3                                                                     | 129.5  | 160.9   | 156.6   | 59.5   | 131.0                                                     |
| 4                                                                                       | 58.1                                                                      | 43.0   | 63.1    | 59.4    | 52.5   | 55.2                                                      |
| 5                                                                                       | 112.3                                                                     | 117.1  | 27.0    | 34.3    | 26.4   | 63.4                                                      |
| 6                                                                                       | 111.3                                                                     | 180.3  | 56.6    | 59.2    | 44.5   | 90.3                                                      |
| 7                                                                                       | 102.1                                                                     | 161.4  | 109.2   | 98.3    | 89.6   | 112.3                                                     |
| 8                                                                                       | 197.6                                                                     | 219.3  | 148.6   | 185.4   | 63.5   | 162.9                                                     |
| 9                                                                                       | 68.9                                                                      | 108.6  | 30.3    | 45.0    | 61.1   | 62.8                                                      |

表 8 雾滴沉积密度主体间效应的检验

| Table 8 Inspection of inter-subject effect of droplet deposition density |                    |                |                   |                              |                              |                                                |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|
| 来源<br>Source                                                             | Ⅲ型平方和<br>Type Ⅲ SS | 自由度<br>Freedom | 均方<br>Mean square | <i>F</i> 值<br><i>F</i> value | <i>P</i> 值<br><i>P</i> value | 偏 <i>Eta</i> 平方值<br>Partial <i>Eta</i> squared |
| 校正模型<br>Correction model                                                 | 39121.505          | 16             | 2435.094          | 4.286                        | 0.020                        | 0.886                                          |
| 截距<br>Intercept                                                          | 91817.890          | 1              | 91717.890         | 161.322                      | <0.001                       | 0.943                                          |
| 喷雾高度<br>Spray height                                                     | 3540.670           | 2              | 1760.335          | 3.110                        | 0.110                        | 0.427                                          |
| 行走速度<br>Walking speed                                                    | 1190.956           | 3              | 395.985           | 0.991                        | 0.589                        | 0.197                                          |
| 冠层梯度<br>Canopy gradient                                                  | 29428.905          | 2              | 14614.452         | 25.853                       | <0.001                       | 0.856                                          |
| 空白列<br>Blank column                                                      | 1162.313           | 3              | 386.438           | 0.681                        | 0.588                        | 0.193                                          |
| 误差 Error                                                                 | 4553.266           | 8              | 568.158           |                              |                              |                                                |
| 总计 Total                                                                 | 230878.100         | 25             |                   |                              |                              |                                                |
| 校正总计<br>Total correction                                                 | 43674.771          | 24             |                   |                              |                              |                                                |

从表 9 中列 1 和列 2 的平均值差值可以看出, 喷雾高度为 30 cm 时, 相较喷雾高度 50 cm 雾滴沉积密度最大; 喷雾高度为 40 cm 时, 相较喷雾高度 30 cm 和 50 cm, 其雾滴沉积密度差异不大。可见, 喷雾高度为 50 cm 时雾滴沉积密度最小, 沉积的雾滴随着喷雾高度的增加而递减。主要原因是随着喷雾高度的增加, 雾滴沉积的宽度也增加, 单位面

积液滴数量减少。喷雾高度 ( $h$ ) 与雾滴沉积幅宽 ( $B$ ) 之间的关系为:  $B = 2h \tan \beta / 2$ 。由关系式可以看出, 雾滴沉积幅宽是喷雾高度的 2 倍以上, 因此雾滴沉积幅宽受喷雾高度的影响较大, 喷雾高度为 30 cm 与为 50 cm 时的雾滴数量差异性显著。通过最小显著性差异法多重比较, 可为后续优化样机和提高喷药效率提供理论依据。

表 9 冠层梯度和喷雾高度对雾滴沉积密度的 LSD 多重比较

Table 9 LSD multiple comparisons of canopy gradient and spray height on droplet deposition density

| 项目<br>Item              | 列 1<br>Column 1 | 列 2<br>Column 2 | 平均值差值(列 1-列 2)<br>Mean difference<br>(Column 1- Column 2) | 标准误差<br>Standard<br>error | P 值<br>P value | 下限(95%置信)<br>Lower limit<br>(95% confidence<br>interval) | 上限(95%置信)<br>Upper limit<br>(95% confidence<br>interval) |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 冠层梯度<br>Canopy gradient | 上 Upper         | 中 Middle        | 68.4630                                                   | 10.6682                   | <0.001         | 43.8698                                                  | 93.0662                                                  |
|                         | 上 Upper         | 下 Lower         | 73.9360                                                   | 13.0660                   | 0.001          | 42.8034                                                  | 103.0686                                                 |
|                         | 中 Middle        | 下 Lower         | 4.4720                                                    | 13.0679                   | 0.731          | -25.6586                                                 | 34.6046                                                  |
| 喷雾高度<br>Spray height    | 30 cm           | 40 cm           | 12.7440                                                   | 10.6682                   | 0.256          | -11.8572                                                 | 37.3472                                                  |
|                         | 30 cm           | 50 cm           | 32.4989                                                   | 13.0660                   | 0.028          | 2.3564                                                   | 62.6216                                                  |
|                         | 40 cm           | 50 cm           | 19.7449                                                   | 13.0676                   | 0.159          | -10.3866                                                 | 49.8766                                                  |

5 结 论

本文设计的丘陵山区茶园自动喷药装置, 采用水平和 45°角两种喷药模式同时进行喷射, 使其茶树中下部叶面背部等喷射盲区能被覆盖; 装置使用超声波传感器测距, 通过软件控制实现自动化喷药。通过田间试验得出结论: 茶树不同冠层梯度下各点位雾滴平均沉积密度均大于 26 个 · cm<sup>-2</sup>, 高于 JB/T9782—2014《植保机械通用试验方法》<sup>[16]</sup> 对喷雾机中喷幅界定的 20 个 · cm<sup>-2</sup> 要求, 试验中各喷施参数对雾滴沉积密度的影响程度从大到小依次为冠层梯度、喷雾高度、行驶速度。

参 考 文 献:

[1] GILES D K, SLAUGHTER D C. Precision band spraying with machine-vision guidance and adjustable yaw nozzles[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(1): 29-36.

[2] OSTERMAN A, CODEŠA T, HOCEVAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 175-182.

[3] LEŠNIK M, STAJNKO D, VAJS S. Interactions between spray drift and sprayer travel speed in two different apple orchard training systems[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(9): 3017-3028.

[4] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying-part II: Validation for different sprayer types[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 137-147.

[5] 杨鹏.郁闭型果园遥控弥雾机的研制与试验[D].咸阳:西北农林科技大学,2016.

YANG P. Development and experimental research of canopy type remote orchard mist sprayer[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2016.

[6] 丁为民,赵思琪,赵三琴,等.基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究[J].农业机械学报,2016,47(6):1-10, 20.

DING W M, ZHAO S Q, ZHAO S Q, et al. Measurement methods of fruit tree canopy volume based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 1-10, 20.

[7] 曲峰.果树病害检测与精准喷施方法及关键技术装备研究[D].北京:中国农业大学,2017.

QU F. Study on disease detection and precision spray method of fruit trees and key technical equipment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.

[8] 王利霞,张书慧,马成林,等.基于 ARM 的变量喷药控制系统设计[J].农业工程学报,2010,26(4):113-118.

WANG L X, ZHANG S H, MA C L, et al. Design of variable spraying system based on ARM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 113-118.

[9] 马驰,李光林,李晓东,等.丘陵山地柑橘果园多方位自动喷药装置研制[J].农业工程学报,2019,35(3):31-41.

MA C, LI G L, LI X D, et al. Development of multi-orientation automatic spraying device for citrus orchards in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 31-41.

[10] 赵建柱,宗玉峰,王枫辰,等.雷达识别狼毒草喷药灭除装置[J].农业机械学报,2014,45(S1):68-72.

ZHAO J Z, ZONG Y F, WANG F C, et al. Spraying and removal de-



vice for stellera chamaejasme identified by radar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 68-72.

[11] 杨妮娜,黄大野,万鹏,等.茶树主要害虫研究进展[J].安徽农业科学,2019,47(22):1-3,30.

YANG N N, HUANG D Y, WAN P, et al. Advances in research on major pests in tea[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(22): 1-3, 30.

[12] 中华人民共和国农业部.喷雾机(器)作业质量:NY/T 650-2013[S].北京:中国农业出版社,2014.

Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Operating quality for sprayers:NY/T 650-2013[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.

[13] 王明,王希,何玲,等.植保无人机低空低容量喷雾在茶园的雾滴沉积分布及对茶小绿叶蝉的防治效果[J].植物保护,2019,45(1):62-68,87.

WANG M, WANG X, HE L, et al. Deposition distribution of pesticide droplets over the tea canopy and control efficiency against *Empoasca flavescens* sprayed by unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Plant Protection, 2019, 45(1): 62-68, 87.

[14] 王秀铿,黄仲先,朱树林.机采茶树修剪形状的研究[J].茶叶通讯,1985(1):9-13.

WANG X K, HUANG Z X, ZHU S L. Study on the pruning shape of machine picked tea trees[J]. Journal of Tea Communication, 1985(1): 9-13.

[15] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:639.

Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Agricultural machinery design manual-volume I[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 639.

[16] 中华人民共和国工业和信息化部.植物保护机械 通用试验方法:JB/T 9782-2014[S].北京:机械工业出版社,2014.

Ministry of Industry and Information Technology. Equipment for crop protection-general test methods: JB/T 9782-2014[S]. Beijing: China Machine Press, 2014.

-----

(上接第 267 页)

[14] 周亚龙,杨志斌,王乔林,等.雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J].环境科学,2021,42(4):2003-2015.

ZHOU Y L, YANG Z B, WANG Q L, et al. Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an New District[J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 2003-2015.

[15] 周皎,何欣芮,李瑜,等.基于土壤重金属特征的绿色食品产地环境评价——以重庆(江津)现代农业园区为例[J].中国环境科学,2020,40(7):3070-3078.

ZHOU J, HE X R, LI Y, et al. Evaluation of soil environmental quality in green food production based on spatial distribution of heavy metals-a case study of modern agricultural park in Jiangjin district, Chongqing[J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 3070-3078.

[16] 柴世伟,温琰茂,张云霓,等.广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J].中国环境科学,2003,23(6):592-596.

CHAI S W, WEN Y M, ZHANG Y N, et al. The heavy metal content character of agriculture soil in Guangzhou suburbs[J]. China Environmental Science, 2003, 23(6): 592-596.

[17] 韩志轩,王学求,迟清华,等.珠江三角洲冲积平原土壤重金属元素含量和来源解析[J].中国环境科学,2018,38(9): 3455-3463.

HAN Z X, WANG X Q, CHI Q H, et al. Occurrence and source identification of heavy metals in the alluvial soils of Pearl River Delta region, South China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 3455-3463.

[18] 韩伟,王成文,彭敏,等.川南山区土壤与农作物重金属特征及成因[J].环境科学,2021,42(5):2480-2489.

HAN W, WANG C W, PENG M, et al. Characteristics and origins of heavy metals in soil and crops in mountain area of southern Sichuan[J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2480-2489.

[19] 杜昊霖,王莺,王劲松,等.青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J].环境科学,2021,42(9):4422-4431.

DU H L, WANG Y, WANG J S, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in typical watersheds of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4422-4431.

[20] 贾丽,乔玉辉,陈清,等.我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素[J].农业环境科学学报,2020,39(2):263-274.

JIA L, QIAO Y H, CHEN Q, et al. Characteristics and affecting factors of heavy metals content in greenhouse vegetable soils in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(2): 263-274.