

# 采用果园喷雾施药机械施药时农药有效沉积率的计算方法

张鹏九, 高越\*, 刘中芳, 赵劲宇, 杨静, 樊建斌, 范仁俊\*

(山西农业大学 植物保护学院 (山西省农业科学院 植物保护研究所)/  
农业有害生物综合治理山西省重点实验室, 太原 030031)

**摘要:** 针对传统农药沉积率测算方法无法精确反映果园中农药实际利用率的问题, 提出一种结合果树冠层特征与叶面沉积量直接测算农药药液在果树靶标上有效沉积率的方法, 以期建立一种适用于不同栽种模式的果园通用农药沉积率计算方法。首先采用传统方法计算采用风送式自走喷雾机喷雾后农药在乔化稀植型果园的地面流失率, 将其结果与采用果树冠层特征与叶面沉积量相结合的方法计算的有效沉积率进行比较, 再通过计算采用风送式自走喷雾机喷雾后农药在矮砧密植型果园的有效沉积率以及采用担架柱塞泵式喷雾机和植保无人飞机喷雾后农药的有效沉积率, 验证本研究所提出的将果树冠层特征与叶面沉积量相结合计算农药有效沉积率方法的准确性及适用性。结果表明: 基于叶面沉积量结合果树冠层特征方法计算得到的农药有效沉积率与采用传统方法计算得到的农药地面流失率结果基本一致, 均能体现施药机械的农药利用率, 但比较而言, 本研究所提出的方法在果园植保机械喷雾施药有效利用率的影响因素方面考虑更全面, 兼顾了叶面沉积量和果树冠层结构的影响, 且对于不同栽种模式下的果园更具适用性。将果树冠层特征与叶面沉积量相结合进行果园农药有效沉积率的计算, 可以更加真实地反映出果园农药的实际利用情况, 同时通过将果树冠层结构量化为叶面积指数、冠层阴影面积等指标, 可以为不同栽种模式下的果园选择适宜的植保机械, 结合地面流失率的测量, 计算出果园农药的飘移量, 从而通过调整喷雾角度、雾滴大小、喷雾流量等参数, 实现对植保机械的优化, 达到精准施药的目的。

**关键词:** 果园喷雾; 植保机械; 有效沉积率; 地面流失率; 冠层特征; 叶面沉积量; 农药利用率  
中图分类号: S482; S49 文献标志码: A 文章编号: 1008-7303(2020)02-0277-08

## Method for calculation of pesticide deposition rate using spraying machinery in the orchard

ZHANG Pengjiu, GAO Yue\*, LIU Zhongfang, ZHAO Jinyu,  
YANG Jing, FAN Jianbin, FAN Renjun\*

(College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University (Institute of Plant Protection, Shanxi Academy of Agricultural Sciences)/  
Shanxi Key Laboratory of Integrated Pest Management in Agriculture, Taiyuan 030031, China)

收稿日期: 2019-11-26; 录用日期: 2020-01-10.

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD020030502); 山西省青年基金 (201801D221316); 山西省重点研发计划 (2015-TN-03-09); 青海省科技合作专项 (2017-HZ-815).

作者简介: 张鹏九, 男, 助理研究员, 主要研究方向为农药高效利用与制剂加工, **E-mail:** mss\_1105@163.com; \*高越, 通信作者 (Author for correspondence), 男, 副研究员, 主要从事农药高效利用与制剂加工工作, **E-mail:** gaoyue1207@sina.com; \*范仁俊, 共同通信作者 (Co-author for correspondence), 男, 研究员, 主要从事植物保护工作, **E-mail:** rjfan@163.com

**Abstract:** A new method was developed to measure the pesticide deposition rate on fruit trees using canopy characteristics of fruit trees and leaf deposition. This new method has provided a general calculation method for the pesticide deposition rate in orchards with different planting patterns, which could solve the imprecise problem of traditional measuring methods for actual utilization rate of pesticides in orchards. The ground loss rate of an orchard atomizing sprayer in an orchard with sparse cultivation of vigorous stock was calculated. To prove the applicability of this new method, the value of the ground loss rate was compared with the pesticide deposition rate calculated by the method developed in this work. And this method was also verified by calculating the pesticide deposition rate in an orchard with low anvil dense planting and the pesticide deposition rate of the traditional stretcher plunger pump sprayer and the emerging plant protection UAV. The evaluation results of the ground loss rate was basically consistent with that of the pesticide deposition rate proposed by this paper. Those two methods both can be used for the evaluation of the pesticide utilization efficiency of a plant protection equipment. Of note, the method developed in this study is more comprehensive in terms of influencing factors about the pesticide utilization efficiency of a plant protection equipment. The influences of leaf deposition and canopy structure of trees were also considered. Moreover, this method is more suitable for orchards with different planting patterns. The pesticide deposition rate was calculated by using canopy characteristics of fruit trees and leaf deposition, which could reflect the actual utilization efficiencies of pesticides in orchard. Meanwhile, the canopy structure of orchard was quantified into "leaf area index", "canopy shadow area" and other indicators, which could be used to select suitable plant protection equipments for orchards with different planting patterns. Moreover, the outer drift of pesticides could also be calculated by using the measurement of ground loss rate, which could be used to optimize the plant protection equipment and achieve accurate spraying by adjusting spray angle, droplet size, spraying flow and other parameters.

**Keywords:** spray in orchard; plant protection equipment; pesticide deposition rate; ground loss rate; canopy structure; leaf deposition; pesticide utilization efficiency

农药喷雾法是目前国内外防治病虫害的主要方式, 每年有数以亿吨计的农药药液喷洒在农作物上<sup>[1]</sup>。2001—2014年中国农药使用量快速上升, 由2001年的127.50万t/年迅速增至2014年的180.70万t/年, 年均增长率高达3%, 是世界平均水平的2.5倍<sup>[2-3]</sup>。然而, 中国的平均农药利用率仅为20%~30%<sup>[4-7]</sup>, 大量农药流失进入环境, 对环境造成危害。随着对农药负面影响重视程度的加深, 中国政府先后出台了多项政策, 将农业面源污染列为农业生态环境整治的重点<sup>[8-9]</sup>。提高农药利用率、降低农药使用量是农药应用研究中亟需解决的迫切问题。

农药利用率是指单位面积内沉积在靶标上的农药量占所使用农药总量的比例, 即农药沉积率, 一般意义上是将整个作物视为靶标, 农药沉积在作物上的部分, 认定为有效量, 见公式(1)。

$$P/\% = n/N \times 100 \quad (1)$$

公式中:  $P$ 为农药沉积率,  $n$ 为沉积在靶标作物表面的农药剂量,  $N$ 为农药投放量。在公式(1)中, 对一般大田作物而言, 可通过采集整株作物淋洗后的药液量计算单株药液量, 再根据单位面积内作物数量计算单位面积内靶标作物的 $n$ 值<sup>[6, 10-11]</sup>; 但对果树而言, 因其具有特有的冠层结构, 尤其是对于大型乔化果树, 单棵果树无法进行整体采样测算 $n$ 值。因此, 采用果园植保机械施药时农药有效沉积率多通过地面流失率来评价<sup>[6, 12-13]</sup>, 如袁会珠等采用地面流失率衡量了担架式喷雾机在桃园中的农药沉积效果<sup>[12]</sup>。然而, 需要指出的是, 果园内果树间距近, 郁闭严重, 且随着施药机械自动化水平的提升, 风送式自走喷雾机<sup>[14-15]</sup>、果园植保无人飞机等被大量使用, 导致药液的飘散距离扩大, 很难在限定范围内测量地面流失率<sup>[16-17]</sup>; 同时, 空气中药液的蒸发、飘移也是农药

流失的主要途径<sup>[18-19]</sup>, 这些均导致地面流失率无法精确测算。

本研究针对上述问题, 以指示剂诱惑红为特征指示剂, 试图将果树冠层特征与叶面沉积量相结合, 提出一种直接计算药液在果树靶标上有效沉积量的方法, 并与传统测量地面流失率的方法进行对比, 以期建立一种针对不同品种、不同栽种模式下果园中计算农药有效沉积率的通用方法, 为测算果园中的农药利用率、评价果园植保机械施药时的农药利用率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在山西省晋中市东阳镇山西省农业科学院试验基地进行, 供试果树品种为富士苹果, 树龄 7 年。栽种模式 1: 乔化稀植型, 树高 4.5~5.0 m, 株距 5.0 m, 喷雾时温度 25 °C, 相对湿度 65%。栽种模式 2: 矮砧密植型, 树高 3.0~3.5 m, 株距 1.5 m, 喷雾时温度 28 °C, 相对湿度 70%。

### 1.2 试验药剂及仪器

食品染色剂诱惑红(上海笛柏生物科技有限公司), 配制成质量浓度为 0.5 g/L 的药液, 备用。

LAI-2000 植物冠层扫描仪(美国 LI-COR Biosciences 公司); CFX96 荧光定量 PCR 仪(美国 Bio-Rad Laboratories 公司); 3WG-8 风送式自走履带喷雾机(江苏南通广益机电有限公司); 3WZ-120 型担架柱塞泵式机动喷雾机(上海苏农泵业有限公司); TY5A-10 四旋翼 8 喷头植保无人机(天翼合创科技发展有限公司)。

### 1.3 试验方法

采用风送式自走喷雾机, 以同列 4 棵树为 1 个试验小区, 选取 3 列为试验对象, 在树冠两侧以固定的行进速度喷施诱惑红药液, 并在树干两侧由内向外布设 23 cm × 15 cm 的塑料布, 按照距离树干位置布置 10 个取样点, 每个取样点相距 50 cm, 每个样点重复 3 次, 用以采集地面流失药液(图 1)<sup>[11]</sup>。

1.3.1 采样 于树冠东、西、南、北、上、下两层取样。每层分内膛和外膛, 共 16 个取样点, 每个取样点取叶片 15 枚, 重复取样 3 次(图 1)。

将收集、采集的塑料布和叶片, 用 50 mL 清水振荡洗涤 10 min。用荧光定量 PCR 仪测定洗涤液中诱惑红的质量浓度, 波长 501 nm; 利用扫描

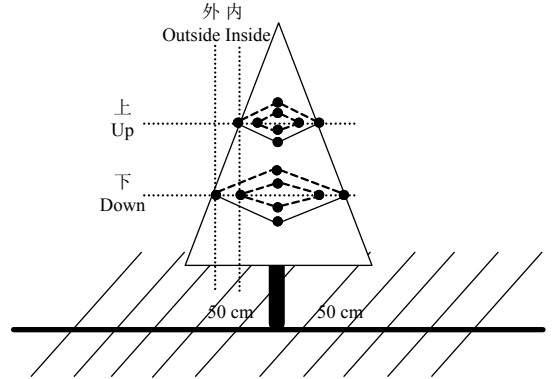


图 1 苹果园测定叶片沉积量与地面流失量采样示意图

Fig. 1 Sampling method for the determination of leaf deposition and ground loss amount in apple orchard

仪和 ImageJ 软件测定苹果叶片的面积。

1.3.2 冠层地面投影面积测定 假设所要测量的小区内 4 棵树为同一冠层, 选取小区列最外侧距离为长, 单株最外侧距离为宽, 圈定一矩形为冠层阴影面积。

1.3.3 叶面积指数的测定 于喷雾前采用鱼眼影像技术测量植被冠层结构参数。使用植物冠层扫描仪, 选择仪器自带的 90 冠遮盖帽, 对冠层阴影区采取“1 上 4 下”采样方式(1 上指空中没有任何冠层阻拦的背景遮光值, 4 下指冠层阴影区域内随机选取 4 个点的遮光数值)。仪器自动计算其叶面积指数<sup>[19-20]</sup>。重复 3 次, 取平均值。

1.3.4 验证试验 采用风送式自走喷雾机在矮砧密植果园进行喷雾和采用果园常用担架柱塞泵式机动喷雾机装配喷枪进行人工喷雾(压力: 2.0 MPa, 2.5 MPa; 喷片孔径 1.0 mm), 以 4 株树为 1 个小区, 以每株树平均喷施 3 L 药液量计算, 将 12 L 药液预先配制于药桶内, 喷完为止; 植保无人机喷雾(距离树顶 1 m、飞行速度 1 m/s、流量 2.3 L/min), 采样和布点方式同上。

### 1.4 数据处理及计算方法

1.4.1 地面流失率计算 根据实验室测定的洗涤液中诱惑红的质量浓度、洗涤液体积和取样面积, 按公式(2)计算喷雾后诱惑红在地面不同部位的沉积量。根据地面沉积量与喷雾小区诱惑红的喷洒量, 按公式(3)计算喷雾药液的地面流失率。

$$p_1 = \frac{\rho \times V \times 10}{S_1} \quad (2)$$

$$\eta_1 / \% = \frac{p_1 \times S_2}{m} \times 100 \quad (3)$$

式中： $p_1$ —诱惑红地面沉积量， $\text{mg}/\text{m}^2$ ； $\rho$ —洗涤液中诱惑红的质量浓度， $\mu\text{g}/\text{mL}$ ； $V$ —洗涤液体积， $\text{mL}$ ； $S_1$ —取样面积， $\text{cm}^2$ ； $\eta_1$ —地面流失率，%； $S_2$ —小区面积， $\text{m}^2$ ； $m$ —小区内诱惑红投放量， $\text{mg}$ 。

1.4.2 有效沉积率计算 根据实验室测定的洗涤液中诱惑红的质量浓度、洗涤单位面积内诱惑红的质量浓度，按公式(4)计算喷雾后诱惑红在果树冠层中叶片上的平均沉积量，根据该平均沉积量与冠层的总叶面积，计算全树叶片上诱惑红的沉积量；按公式(5)计算总叶面积；再结合喷雾小区诱惑红的喷洒量，按公式(6)计算喷雾药液在叶片上的有效沉积率。其中叶面积指数为总叶面积与冠层地面积的比值<sup>[21-22]</sup>。

$$p_2 = \frac{\rho \times V \times 10}{S_3} \quad (4)$$

$$S_4 = LS_5 \quad (5)$$

$$\eta_2/\% = \frac{p_2 \times S_4}{m} \times 100 \quad (6)$$

式中： $p_2$ —叶片上诱惑红沉积量， $\text{mg}/\text{m}^2$ ； $\rho$ —洗涤液中诱惑红的质量浓度， $\mu\text{g}/\text{mL}$ ； $V$ —洗涤液体积， $\text{mL}$ ； $S_3$ —叶片面积， $\text{cm}^2$ ； $S_4$ —总叶面积， $\text{m}^2$ ； $L$ —叶面积指数； $S_5$ —冠层投影面积， $\text{m}^2$ ；

$\eta_2$ —有效沉积率，%； $m$ —小区内诱惑红投放量 $\text{mg}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 风送式自走喷雾机在乔化稀植型果园喷雾后诱惑红地面流失率与有效沉积率

2.1.1 地面流失率 采用风送式自走喷雾机进行果园喷雾，表1是在2种孔径喷头、3种喷雾压力下喷雾时诱惑红雾滴在地面的流失率。从中可以看出，地面流失率随喷雾压力的增加而减小。在相同喷雾压力下，除2.0 MPa时两种孔径的地面流失率基本一致外，在其他喷雾压力下，喷头孔径为0.75 mm的地面流失率均小于孔径为1 mm的。以上试验结果表明，随着喷雾压力的增加，在提高施药量的同时，地面流失率也在不断降低。究其原因可能是：当喷雾压力较小时，雾滴粒径大，风送式喷雾机的辅助气流对雾滴输送能力弱，雾滴无法有效接触果树冠层，大多落在地面；随着喷雾压力的提高，雾滴粒径减小，加之风送式喷雾机的辅助气流对小雾滴的输送能力增强，提高了农药雾滴在果树冠层中的穿透性，药液与果树冠层充分接触，雾滴飘散距离进一步增大，地面塑料布上收集的雾滴也会相应减小。

表1 采用风送式自走喷雾机在乔化稀植型果园喷施诱惑红的地面流失率与有效沉积率

Table 1 Ground loss rate and deposition rate of allura red using air-blast sprayer in the orchard with sparse cultivation of vigorous stock

喷头孔径 Aperture diameter/mm	喷雾压力 Spray pressure/MPa	喷雾量 Spray quantity/ (L/min)	地面沉积量 Ground deposition/ ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	叶面沉积量 Leaf deposition/ ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	总叶面积 Total leaf area/ $\text{m}^2$	地面流失率 Ground loss rate/%	有效沉积率 Deposition rate/%
1.0	2.0	5.2	14.60 ± 2.11	8.10 ± 1.21	62.62 ± 2.69	50	16
	2.5	6.3	10.74 ± 1.34	12.64 ± 3.07		31	20
	3.0	7.2	7.32 ± 1.91	16.13 ± 3.57		18	22
0.75	2.0	2.4	6.77 ± 3.47	4.74 ± 0.88		51	20
	2.5	2.8	4.22 ± 2.44	7.56 ± 1.74		27	27
	3.0	3.4	2.86 ± 1.10	10.28 ± 3.65		15	30

2.1.2 有效沉积率 经测量，该果园的叶面积指数为1.58~1.70。从试验结果(表1)可以看出，药液有效沉积率的变化规律与地面流失率一致，即随喷雾压力的减小，有效沉积率下降。在相同喷雾压力下，喷头孔径为0.75 mm的有效沉积率高于孔径为1.0 mm的。此外，叶面沉积量随施药量的增加而增加。孔径为1.0 mm的喷头在3.0 MPa喷雾压力下的施药量最高，为7.2 L/min，所对应的叶面沉积量也最多，为16.13  $\text{mg}/\text{m}^2$ 。其原因可

能是：苹果叶片属于亲水型<sup>[23]</sup>，喷雾机所喷洒的药液在叶面的沉积量远小于苹果叶片的最大稳定持留量<sup>[24-25]</sup>，因此叶面沉积量随喷雾量的提高而提高。喷雾压力越大，有效沉积率越高，源于喷雾压力增加可以提高喷雾机的喷幅，增强雾滴穿透性，可以使药液更容易附着在树体冠层的叶片上。地面流失率和有效沉积率均可反映施药机械在不同条件下施药的农药利用率，且评价结果基本一致，即地面流失率越高，有效沉积率越低，

则农药利用率越低, 反之亦然。然而, 当深入分析地面流失率或有效沉积率与农药利用率之间的关系时会发现, 采用施药机械喷雾时, 药液在地面的流失量与叶片沉积量之和仅占总施药量的40%~71%。也就是说, 至少有近三分之一的药液既未沉积在叶面上, 也未落在地面上(或者说未落在规划的区域面积上), 而是飘散到空中或规划区域外的地方, 通常称之为飘移量。从表1数据可以看出: 随着喷雾压力的增大, 在有效沉积率提高和地面流失率降低的同时, 二者之和却在不断减小, 由此可以推断出飘移量在不断增加。以孔径为1.0 mm的喷头为例, 当有效沉积率最高时二者之和仅占总施药液量的40%。因此, 采用地面流失率来评价农药利用率, 只能说明在规划区域内流失在地面的农药占总施药量的比例, 而农药有效沉积率和不可忽略的飘移量均无法衡量。加入果树冠层参数既可直接计算农药有效沉积率, 同时也能反映出果园中采用植保机械喷雾施药时药液有效利用率的影响因素为叶面沉积量和果树冠层结构(即果树栽种模式)。对于低容量喷雾条件下的果园喷雾施药, 尤其像苹果树叶片具亲水

性, 叶面沉积量会随喷药量的增加而不断增加, 因此影响农药利用率的关键因素在于果树冠层结构和植保机械的喷雾方式。以此次试验果园为例, 苹果树树龄为7年, 且栽种模式为乔化稀植型, 果树树叶密度(叶面积指数)较低, 导致总叶面积低, 使落在靶标上的总沉积量低。同时, 由于果园中株距较大, 风送式自走喷雾机在行进到两树之间时仍在喷药, 增加了无效喷药量。以上两种原因叠加, 导致农药有效沉积率最高不足30%。

## 2.2 风送式自走喷雾机在矮砧密植型果园喷雾后的农药有效沉积率

根据2.1节中的结论, 选取7年生矮砧密植型标准化苹果园, 直接对风送式自走喷雾机的农药有效沉积率进行测定, 结果见表2。从中可以看出, 在矮砧密植型果园中, 由于株距小, 其叶面积指数达到2.40~2.53, 较乔化稀植型果园高, 有效沉积率在孔径为1 mm和0.75 mm的喷头下分别为31%和41%。因此在矮砧密植型果园中使用该型号风送式自走喷雾机, 农药有效沉积率远高于乔化稀植型果园。

表2 采用风送式自走喷雾机在矮砧密植型果园中施药的有效沉积率

Table 2 Deposition rate using air-blast sprayer in the orchard with low anvil dense planting

喷头孔径 Aperture diameter/mm	喷雾压力 Spray pressure/MPa	喷雾量 Spray quantity/(L/min)	叶面沉积量 Leaf deposition/(mg/m <sup>2</sup> )	总叶面积 Total leaf area/m <sup>2</sup>	有效沉积率 Deposition rate/%
1.0	3.0	7.2	11.48 ± 3.41	121.38 ± 2.14	31
0.75	3.0	3.4	7.32 ± 3.04		41

注: 试验小区为单列20 m长(13棵树)

Note: The experimental plot is 20 m in a single row (13 trees)

## 2.3 其他植保机械在果园喷雾后的农药有效沉积率

根据2.1节中的结论, 测定了采用担架柱塞泵式喷雾机施药的有效沉积率, 结果见表3; 采用植保无人飞机施药的测定结果见表4。

从表3中数据可看出, 在相同孔径下, 保持每株树平均喷药量3.0 L, 喷雾压力在2.0 MPa

下诱惑红的有效沉积率高于喷雾压力在2.5 MPa下的有效沉积率。其原因可能是, 在相同施药液量下, 喷雾压力为2.0 MPa下的施药时间长于2.5 MPa下的施药时间, 因此在2.0 MPa喷雾压力下果树叶片上沉积的药液更加均匀。另外, 与2.1节中风送式自走喷雾机比较可以看出, 在相同栽种模式及相同冠层参数的乔化稀植型果园中,

表3 采用担架柱塞泵式喷雾机在果园中施药的有效沉积率

Table 3 Deposition rate using plunger pump motor sprayer in the orchard

喷头孔径 Aperture diameter/mm	喷雾压力 Spray pressure/MPa	喷雾量 Total quantity/(L/tree)	叶面沉积量 Leaf deposition/(mg/m <sup>2</sup> )	总叶面积 Total leaf area/m <sup>2</sup>	有效沉积率 Deposition rate/%
1.0	2.5	3	26.33 ± 8.15	62.62 ± 2.69	29
1.0	2.0	3	30.85 ± 7.26		34

注: 试验在2.1节中同一乔化稀植果园中进行。

Note: The orchard with sparse cultivation of vigorous stock is the same as that mentioned in 2.1

采用担架柱塞泵式喷雾机施药的最大有效沉积率高于风送式自走喷雾机的最大有效沉积率。其原因主要源于两种施药方式的流失途径不同,担架柱塞泵式喷雾机属于大容量人工手持喷雾,具有良好的人工定向性,树与树之间的无效喷雾可以避免,主要流失途径是单一叶片的着药量超过叶片最大持留量,从而导致药液流失;不过,虽然担架柱塞泵式喷雾机的有效沉积率高于风送式自走喷雾机的有效沉积率,但前者喷药量是后者的

1.3~3.0 倍。

表 4 为采用果园新兴喷药方式——植保无人飞机施药的有效沉积率计算结果。从表中数据可看出,在两种栽种模式下的苹果园中,植保无人飞机的有效沉积率变化规律与风送式自走喷雾机的基本一致,但矮砧密植型果园的有效沉积率为 40%,远高于乔化稀植型果园的 26%。二者的主要流失途径也基本一致,均为两树间的无效喷药量。

表 4 采用植保无人飞机在果园中施药的有效沉积率

Table 4 Deposition rate using plant protection UAV in the orchard

果园栽种模式 Orchard model	飞行速度 Flight speed/ (m/s)	飞行高度(距树顶高度) Flight height(Height from top of tree)/m	喷雾量 Spray quantity/(L/min)	叶面沉积量 Leaf deposition/(mg/m <sup>2</sup> )	总叶面积 Total leaf area/m <sup>2</sup>	有效沉积率 Deposition rate/%
乔化稀植 The vigorous stock orchard	1	1	2.3	3.23 ± 2.01	62.62 ± 2.69	26
矮砧密植 The semi-dwarf orchard	1	1	2.3	2.51 ± 1.37	121.38 ± 2.14	40

### 3 结论与讨论

本研究结果表明,通过叶面沉积量、果树冠层参数(叶面积指数、冠层阴影面积)的测定可以计算果树的农药沉积率,与计算地面流失率方法相比,此计算方法可以真实地反映出果园中农药的实际利用情况。同时,通过将果园果树冠层结构量化为叶面积指数、冠层阴影面积等指标,可以选择果园在不同栽种模式下所适宜施药的植保机械。此外,通过结合地面流失率的测量,还可计算出果园农药的飘移量,从而调整喷雾机械的喷雾角度、雾滴大小和喷雾流量等参数。虽然此次试验研究对象仅为苹果园,但与其冠层结构相似的桃、梨、枣等乔化果园均可使用此方法计算农药沉积率。

需要指出的是,本研究的重点是果园中农药有效沉积率的计算方法,未对喷雾机以及 2.3 节中其他常用果园植保机械的具体参数进行详细讨论,而是重点讨论了果园冠层结构对农药沉积率的影响。笔者所提出的方法适用于果园中使用的大部分植保喷雾机械,尤其是低容量和超低容量的喷雾机械,如喷雾机和植保无人飞机,这两种喷雾方式喷出的雾滴粒径小、喷雾范围大,相较于人工手持控制的担架柱塞泵式喷雾机,很难划定出喷雾小区范围,因此采用传统的测量地面流失率的方法,很难准确地反映出农药的实际利用率。

从 3 种植保机械的有效沉积率测试结果可以看出,使用风送式自走喷雾机和植保无人飞机等机械化植保机械,在条件适合的果园中喷雾施药其有效沉积率均可达到 35%~40%,高于人工手持控制的担架柱塞泵式喷雾机。值得一提的是,在 Vercruyssen 等<sup>[25]</sup>对风送式自走喷雾机在半矮化密植型苹果园中施药时农药利用率的研究中,通过扩大地面采样范围,设定飘移边界,测定了苹果花后叶面积指数在 4.3 时的地面流失率、飘移率和有效沉积率分别为 29%、23% 和 48%,本文结果与其基本吻合。需要说明的是,相较于笔者提出的方法,虽然 Vercruyssen 等的工作量过于庞大,但对于评估农药飘移对环境污染、相邻田块作物药害等风险有着重要意义。本研究方法主要是为测定农药有效沉积率提供一种快速而准确的方法。当然,为进一步验证本方法的有效性,还需使用 Vercruyssen 等的方法在同一果园进行进一步验证。

从药液使用量方面看,即使是在乔化稀植型果园中,人工担架柱塞泵式喷雾机的药液使用量依然是风送式自走喷雾机的 1.3~3.0 倍,是植保无人飞机的 15 倍,因此无论从提高农药有效沉积率的角度,还是节省药液量的角度来说,淘汰传统的人工担架柱塞泵式喷雾机,对提高农药有效利用率,减少农药使用量都具有重要意义。对风送式自走喷雾机和植保无人飞机而言,通过对机械进行合理改进,仍可用于乔化稀植型果园,如将

红外探测器加装于机械上,使其根据靶标作物的种植特点进行可变量喷雾,即冠层密时喷雾量大,冠层稀时喷雾量小甚至不喷雾<sup>[26-28]</sup>,如此农药有效沉积率仍有提升空间。

农药有效沉积率的大小只是评价一种植保机械是否适用的指标之一,若对植保机械进行完整、系统的评价,除需测定农药有效沉积率外,还应考虑其雾滴的覆盖率、沉积分布、所适应的场景、防治对象发生部位以及最终防治效果等方面<sup>[11, 29-32]</sup>。如采用雾滴沉积分布和沉积量作为分析指标,用以改善植保无人飞机在特定施药场景下的施药效果<sup>[33-34]</sup>。顾中言等<sup>[10]</sup>在研究防治水稻褐飞虱的杀虫剂利用率时,将害虫为害部位与植保机械喷洒后的农药沉积分布相结合,得出了针对褐飞虱的农药利用率,并以此为基础对植保机械提出了改进措施,从而提高了防治褐飞虱的农药利用率。本研究的重点是果园农药有效沉积率的计算,因此未考虑其他因素,在今后工作中,笔者将以本文提出的农药有效沉积率计算方法为基础,进一步系统研究其他因素。

需要指出的是,不同栽种模式下果树冠层范围的确定略有不同。对非郁闭型果园,果树冠层阴影面积应为单列果树冠层最外侧滴水线所围成的地面面积;而对郁闭型果园,应将整个果园面积视为冠层阴影面积。在测定农药利用率时,需要全园喷洒。另外,本文的计算方法对应的有效沉积量,主要是针对沉积在叶片上的药液量,并未将沉积在树干上的药液纳入计算范围,即仅限于花后叶片面积基本不变时;而对于春季果园,即花蕾期前或冬季清园时期的果树,由于叶片较小甚至没有,因此落在树干上的药液量不可忽略,在测量靶标单位面积上的沉积量时,应在树干上铺设塑料布,用以收集测量树干上药液的沉积量。

## 参考文献 (References):

[1] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. *植物保护*, 2015, 41(6): 9-16.  
YUAN H Z, WANG G B. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. *Plant Prot*, 2015, 41(6): 9-16.

[2] 王佳新, 李媛, 王秀东, 等. 中国农药使用现状及展望[J]. *农业展望*, 2017, 13(2): 56-60.  
WANG J X, LI Y, WANG X D, et al. Status quo of pesticide use in China and its outlook[J]. *Agric Outlook*, 2017, 13(2): 56-60.

[3] 陈晓明, 王程龙, 薄瑞. 中国农药使用现状及对策建议[J]. *农药科学与管理*, 2016, 37(2): 4-8.  
CHEN X M, WANG C L, BO R. Current situation of Chinese pesticide application and policy suggestions[J]. *Pestic Sci Admin*, 2016, 37(2): 4-8.

[4] 程玲, 薛光山, 刘永杰, 等. 蔬菜病虫害防治中农药减量增效的影响因素及改进措施[J]. *农学学报*, 2018, 8(2): 11-14, 34.  
CHENG L, XUE G S, LIU Y J, et al. Influencing factors and improving measures of pesticide decrement and synergism in vegetable pest control[J]. *J Agric*, 2018, 8(2): 11-14, 34.

[5] 张鹏九, 高越, 史高川, 等. 不同药械对高效氟氯氰菊酯水乳剂防治苹果桃小食心虫的影响[J]. *果树学报*, 2016, 33(7): 850-856.  
ZHANG P J, GAO Y, SHI G C, et al. Effect of different pesticide sprayers on *beta*-cyfluthrin EW for controlling the peach fruit moth (*Carposina niponensis* Walsingham) in orchard[J]. *J Fruit Sci*, 2016, 33(7): 850-856.

[6] 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. *植物保护*, 2011, 37(5): 14-20.  
YUAN H Z, YANG D B, YAN X J, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. *Plant Prot*, 2011, 37(5): 14-20.

[7] 农业农村部. 我国农药化肥利用率30%左右有待提高[EB/OL]. [2015-04-14]. <http://politics.people.com.cn/n/2015/0414/c1001-26843054.html>.  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China's pesticide fertilizer utilization rate of about 30% to be improved"[EB/OL]. [2015-04-14]. <http://politics.people.com.cn/n/2015/0414/c1001-26843054.html>

[8] 崔艳智, 高阳, 赵桂慎. 农田面源污染差别化生态补偿研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1232-1241.  
CUI Y Z, GAO Y, ZHAO G S. Progress of differentiated ecological compensation policies related to agricultural non-point source pollution[J]. *J Agro - Environ Sci*, 2017, 36(7): 1232-1241.

[9] 农业农村部. 化肥农药利用率稳步提高提前三年实现零增长目标[DB/OL]. [2017-12-21]. [http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201712/t20171227\\_6128571.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201712/t20171227_6128571.htm).  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. The utilization rate of fertilizers and pesticides was steadily increased and three years in advance to achieve the goal of zero growth[DB/OL]. [2017-12-21]. [http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201712/t20171227\\_6128571.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201712/t20171227_6128571.htm).

[10] 顾中言, 徐广春, 徐德进. 杀虫剂防治水稻褐飞虱的有效利用率分析[J]. *农药学报*, 2018, 20(6): 704-714.  
GU Z Y, XU G C, XU D J. Analysis of pesticide efficiency of insecticides against brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2018, 20(6): 704-714.

[11] EBERT T A, DOWNER R A. A different look at experiments on pesticide distribution[J]. *Crop Prot*, 2006, 25(4): 299-309.

[12] 袁会珠, 王忠群, 孙瑞红, 等. 喷雾部件及喷雾助剂对担架式喷雾机在桃园喷雾中的雾滴沉积分布的影响[J]. *植物保护*, 2010, 36(1): 106-109.  
YUAN H Z, WANG Z Q, SUN R H, et al. Influences of nozzle type and spray adjuvant on the distribution of spray droplets with stretcher mounted sprayer in peach orchards[J]. *Plant Prot*, 2010, 36(1): 106-109.

[13] 庾琴, 封云涛, 张润祥, 等. 喷雾压力与施药量对农药在苹果叶片沉积量的影响[J]. *农药*, 2012, 51(11): 844-845, 854.  
YU Q, FENG Y T, ZHANG R X, et al. Influence of pressure and spray volume on deposition of pesticides on apple leaves[J].

- Agrochemicals, 2012, 51(11): 844-845, 854.
- [14] 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民, 等. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化, 2009, 30(6): 10-13, 17.  
FU X M, LV X L, DING W M, et al. Present state and technical requirement about orchard plant protection machinery in China[J]. Chin Agric Mech, 2009, 30(6): 10-13, 17.
- [15] 周举国. 北京市果园植保机械应用现状[J]. 农业工程, 2017, 7(3): 9-11.  
ZHOU J G. Application status of orchard plant protection machinery in Beijing City[J]. Agric Eng, 2017, 7(3): 9-11.
- [16] 兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 等. 中国植保无人机发展形势及问题分析[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 217-225.  
LAN Y B, CHEN S D, DENG J Z, et al. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China[J]. J South China Agric Univ, 2019, 40(5): 217-225.
- [17] 林正平, 洪峰, 刘鹤, 等. 浅析影响植保无人机作业效果的主要因素[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(4): 70-72, 85.  
LIN Z P, HONG F, LIU H, et al. Major influencing factors on efficiency of plant protection UAV[J]. China Plant Prot, 2019, 39(4): 70-72, 85.
- [18] 周召路, 曹冲, 曹立冬, 等. 不同类型界面液滴蒸发特性与农药利用效果研究进展[J]. 农药学报, 2017, 19(1): 9-17.  
ZHOU Z L, CAO C, CAO L D, et al. Research advances of droplet evaporation on different interfaces and the efficiency of pesticide utilization[J]. Chin J Pestic Sci, 2017, 19(1): 9-17.
- [19] 王宝琦, 刘志理, 戚玉娇, 等. 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1956-1964.  
WANG B Q, LIU Z L, QI Y J, et al. Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation[J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(8): 1956-1964.
- [20] BROECKX L S, VERLINDEN M S, BERHONGARAY G, et al. The effect of a dry spring on seasonal carbon allocation and vegetation dynamics in a poplar bioenergy[J]. GCB Bioenergy, 2014, 6(5): 473-487.
- [21] PEARSE G D, WATT M S, MORGENROTH J. Comparison of optical LAI measurements under diffuse and clear skies after correcting for scattered radiation[J]. Agric For Meteorol, 2016, 221: 61-70.
- [22] KOBAYASHI H, RYU Y, BALDOCCHI D D, et al. On the correct estimation of gap fraction: How to remove scattered radiation in gap fraction measurements?[J]. Agric For Meteorol, 2013, 174-175: 170-183.
- [23] 张鹏九, 刘中芳, 史高川, 等. 苹果叶片近轴面(正面)润湿性的时空分布研究[J]. 果树学报, 2018, 35(5): 557-564.  
ZHANG P J, LIU Z F, SHI G C, et al. A study of the spatiotemporal wettability of the adaxial surface of apple leaves[J]. J Fruit Sci, 2018, 35(5): 557-564.
- [24] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. 变量喷施技术及其雾化特性评价方法综述[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(3): 94-102.  
DENG W, DING W M, HE X K. Technologies and evaluation methodology of variable spray[J]. J China Agric Univ, 2009, 14(3): 94-102.
- [25] VERCRUYSSE F, STEURBAUT W, DRIEGHE S, et al. Off target ground deposits from spraying a semi-dwarf orchard[J]. Crop Prot, 1999, 18(9): 565-570.
- [26] 李丽, 宋坚利, 何雄奎. 农作物喷雾靶标自动探测器设计与应用[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 54-56, 63.  
LI L, SONG J L, HE X K. Design and application of crop automatic target detection device[J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2010, 41(7): 54-56, 63.
- [27] HE X K, ZENG A J, LIU Y J, et al. Precision orchard sprayer based on automatically infrared target detecting and electrostatic spraying techniques[J]. Int J Agric Bio Eng, 2011, 4(1): 35-40.
- [28] LI L L, HE X K, SONG J L, et al. Design and experiment of variable rate orchard sprayer based on laser scanning sensor[J]. Int J Agric Biol Eng, 2018, 11(1): 101-108.
- [29] FOQUÉ D, PIETERS J G, NUYTENS D. Effect of spray angle and spray volume on deposition of a medium droplet spray with air support in ivy pot plants[J]. Pest Manag Sci, 2014, 70(3): 427-439.
- [30] 徐德进, 顾中言, 徐广春, 等. 药液表面张力与喷雾方法对雾滴在水稻植株上沉积的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(2): 213-218.  
XU D J, GU Z Y, XU G C, et al. Effects of solution surface tension and spray methods on deposition of droplets on rice plants[J]. Chin J Rice Sci, 2011, 25(2): 213-218.
- [31] 袁会珠, 齐淑华, 杨代斌. 药液在作物叶片的流失点和最大稳定持留量研究[J]. 农药学报, 2000, 2(4): 66-71.  
YUAN H Z, QI S H, YANG D B. Study on the point of run-off and the maximum retention of spray liquid on crop leaves[J]. Chin J Pestic Sci, 2000, 2(4): 66-71.
- [32] 何勇, 肖舒装, 方慧, 等. 植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 113-124.  
HE Y, XIAO S P, FANG H, et al. Development situation and spraying decision of spray nozzle for plant protection UAV[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2018, 34(13): 113-124.
- [33] 王昌陵, 宋坚利, 何雄奎, 等. 植保无人机飞行参数对施药雾滴沉积分布特性的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 109-116.  
WANG C L, SONG J L, HE X K, et al. Effect of flight parameters on distribution characteristics of pesticide spraying droplets deposition of plant-protection unmanned aerial vehicle[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2017, 33(23): 109-116.
- [34] WANG S L, SONG J L, HE X K, et al. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China[J]. Int J Agric Biol Eng, 2017, 10(4): 22-31.

(责任编辑: 曲来娥)