

文章编号:1001-7380(2020)01-0006-05

美国白蛾直升飞机防治中的 雾滴分析及其对防治效果的影响

刘云鹏,徐丽丽,解春霞,郑华英,高 悦

(江苏省林业科学研究院,江苏 南京 211153)

摘要:飞机防治是美国白蛾防控的最主要措施之一。为进一步明确飞行参数对林间雾滴密度分布和对美国白蛾幼虫防控效果的影响,该文通过检测、比较不同飞行方案下林间雾滴密度及雾滴穿透力等数据,发现航速和高度对林间喷幅、雾滴穿透力、雾滴密度、雾滴均匀度均产生显著影响。方案2(航速150 km/h,飞行高度40—45 m),地面喷幅宽度为59.35 m,高于方案1(航速120 km/h,飞行高度30—35 m)的地面喷幅宽度。飞行方案2的雾滴穿透性也相对较好,顶层、中层、下层雾滴密度相对均匀;而方案1不同高度雾滴密度差异相对较为显著,树冠顶层(高度11—12 m)雾滴密度较多,最高雾滴密度可达 $9.8/\text{cm}^2$,随高度降低,雾滴密度下降明显,到底层叶片位置(高度3 m)时,雾滴密度仅为 $2.07/\text{cm}^2$,下降了78.9%。观测试验表明,林间雾滴密度应高于 $5.093/\text{cm}^2$,防控效果才能确保达到90%。

关键词:美国白蛾;飞机防治;雾滴密度;累计死亡率;直升飞机;航速

中图分类号:S763.306.7;S763.42;S767

文献标志码:A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2020.01.002

Study on droplets and effect in controlling *Hyphantria cunea* by aerial spraying of helicopter

Liu Yunpeng, Xu Lili, Xie Chunxia, Zheng Huaying, Gao Yue

(Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China)

Abstract: This paper deals with such a main control measure for *Hyphantria cunea* as spraying pesticide by plane. In order to further clarify the influence of flight parameters on droplet distribution and control effect, the density and penetration of fog droplets under different flight parameters were tested and compared. The results showed that the flight speed and height had significant effects on the spray width and the penetration, density and uniformity of droplets. Plan 2 (speed 150 km/h, height 40—45 m) had a ground spray width of 59.35 m, higher than that of Plan 1 (speed 120 km/h, height 30—35 m); The droplet penetration of Plan 2 was also relatively good, with the droplet density of the top layer, middle layer and lower layer relatively uniform. However, the droplet density at different heights in Plan 1 was quite different, as droplet density was higher at 11—12 m, reaching $9.8/\text{cm}^2$, and with the decrease of height, the droplet density decreased obviously, but when reaching the bottom layer (3 m), the droplet density was only $2.07/\text{cm}^2$, decreased 78.9%. The control effect test suggested that droplet density should be higher than $5.093/\text{cm}^2$ to ensure the control effect of over 90%.

Key words: *Hyphantria cunea*; Aerial control; Droplet density; Cumulative mortality; Helicopter; Flight speed

美国白蛾(*Hyphantria cunea* Drury)是重要的世界性检疫害虫^[1-3]。1979年首次从朝鲜传入我国辽宁丹东市,至国家林业局2018年第2号公告显示,

美国白蛾已在我国陕西、辽宁、江苏、河南和安徽等11个省(市)的572个县区发生,给这些省市的城市绿化、药用植物及其他林木造成了严重的危害,酿

收稿日期:2019-11-13;修回日期:2019-12-15

基金项目:江苏省重点研发计划(现代农业)项目“重大检疫性害虫美国白蛾生物防控技术研究与示范”(BE2016393)

作者简介:刘云鹏(1978-),男,安徽宿州人,副研究员,博士。研究方向为森林病虫害防治。E-mail:lypsq@yahoo.com.cn。

成了重大损失,因此又被称为“森林无烟的火灾”。该虫是典型的多食性害虫,寄主范围极为广泛,在我国其寄主超过300种,涉及植物49个科,其中白蜡槭(*Acer negundo* L.)和桑(*Morus alba* L.)受害最为严重。美国白蛾已成为严重侵害我国果树、林木、农作物和野生植物的重大检疫性害虫,严重威胁和干扰了林业经济发展和人居环境安全^[4-5]。江苏省自2010年美国白蛾发生以来,危害面积迅速扩大,危害程度逐年加重。2018年全省美国白蛾发生面积约8.207万hm²,占全省主要林业有害生物发生总面积的54.4%。目前已突破长江,疫区范围涉及连云港、徐州、盐城、宿迁、淮安、扬州、泰州、南京等8个省辖市51个县区611个乡镇。因此,如果不能及时有效地遏制美国白蛾的扩散危害,将对本省城市绿化和森林资源造成严重威胁,其经济、生态、社会负面效应不可估量。

飞机防治具有速度快、效率高、持续效果好、能在短时间内迅速降低虫口密度等优势,又可有效解决因树木高大、防治设备落后、防治力量不足导致的防治效率低等难题^[6-7],已成为美国白蛾防控的最主要措施之一。仅2018年,江苏省美国白蛾飞机防治面积就达26.667万hm²。然而,也由于飞行速度、飞行高度、林间郁闭度等因素的影响,飞机防治效果差异显著。目前国内有关飞机防治的研究,尤其是有人直升机施药的研究,大多还集中在施药后的防治效果方面^[8-10],对于喷施雾滴分布和穿透力等研究仍较少。为了进一步明确飞行作业参数对林间雾滴分布及防控效果的影响,本文通过不同飞行方案对林间雾滴密度的影响进行了分析,并结合饲养试验,明确了确保防治效果所需的雾滴密度,以期今后的飞机防治作业提供参考。

1 试验地及天气概况

试验地选择在江苏省沭阳县新沭河防护林带。试验区内海拔10—20 m,主要树种为8年生69杨(Clone 69/55, *Populus deltoides*)和72杨(Clone 72/58, *P. deltoides*)的人工防护林,株行距5 m×8 m,林地郁闭度0.85—0.90,杨树胸径15—20 cm,树高12—15 m,林冠层枝下高10 m左右。该林区总面积200 hm²左右,为美国白蛾常发区,有虫株率在15%—20%。气象情况:试验于2017年6月7日进行,当日天气多云,气温18—27℃,

相对湿度60%,风力2—3级。

2 材料与方法

2.1 飞行参数设置

试验机型:采用目前美国白蛾飞机防治中经常使用的AS350 B3e(小松鼠)型直升机(固定翼+静电吸附喷头;载药量:400—450 kg/架次;每架次加入沉降剂尿素16 kg)。

飞行参数设定:采取2种飞行方案进行飞防:方案1,航速120 km/h,飞行高度30—35 m;方案2,航速150 km/h,飞行高度40—45 m。

2.2 供试药剂

Bt悬浮剂,毒力效价为8 000 IU/μL(扬州绿源生物化工有限公司生产);25%灭幼脉(安阳市瑞泽农药有限公司生产)。

试验施药设为Bt+灭幼脉混剂,用药量为(375+375) g/hm²。

2.3 雾滴分布测定

地面喷幅检测:在直升机施药前,选择郁闭度较低、相对空旷的地带,在垂直飞行方向的地面上预先放置一排水敏试纸(Syngenta, 76 mm×26 mm)。试纸间隔50 cm,总宽度100 m。在直升机施药后,迅速检查水敏试纸变色情况,并结合周边地面和草木上药剂雾滴痕迹,测量直升机喷雾宽幅。重复3组,统计平均值。

林间雾滴分布监测:利用水敏试纸观测雾滴分布情况。在试验林带内,选择垂直航线下3行杨树作为标准株,每行6株,株距8 m,株高13—15 m。在鱼竿上串上一系列纸板,并将水敏试纸水平固定在纸板上,纸板高度分别设置为3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 m,再将鱼竿固定在每株标准木主干上,模拟林间杨树叶片。飞机施药后迅速取回水敏试纸,进行雾滴数量及分布情况检测,并通过扫描仪获取水敏试纸雾滴沉积痕迹图像(分辨率1 200 dpi),使用iDAS PRO软件处理图像计算雾滴沉积关键参数。

2.4 不同雾滴密度对防治效果的影响试验

采用室内“饲喂法”^[11-12]测定防治效果。供试叶片采集:飞机喷雾后,在试验区内采集具不同雾滴密度的杨树叶片,并按叶片上雾滴密度少、中、多初分成3组(组1:0—3点/cm²;组2:6—9点/cm²;组3:9—12点/cm²),供毒力测定使用。供试昆虫:

采集未防治区杨树上的美国白蛾 3—4 龄幼虫,新鲜杨树叶片饲养备用。

毒力测定方法:将上述 3 组叶片晾干后,每组取 20 片雾滴均匀的叶片,每片剪出 4 cm×4 cm 的正方形,统计其上雾滴数量,计算平均雾滴密度。将上述剪出的 3 组叶片分别放入 20 cm×15 cm×12 cm 的养虫盒中,每组放入美国白蛾 3—4 龄幼虫 40—50 头,以新鲜杨树叶片做对照,每个处理重复 3 次;随后每 12 h 调查统计 1 次幼虫死亡数量,计算累计死亡率。

累计死亡率(%)=死亡虫数/总处理虫数×100

2.5 统计分析方法

本文所有数据均采用 Excel 和 DPS 数据处理系统进行处理。

表 1 不同飞防航行方案对喷药宽幅的影响

飞行方案	实测宽幅 1	实测宽幅 2	实测宽幅 3	宽幅实测 4	平均值	
方案 1 (S:120 km/h,H:30—35 m)	44.4	46.6	45.5	50.5	45.53±2.59	a
方案 2 (S:150 km/h,H:40—45 m)	64.2	60.1	58.8	56.5	59.35±3.20	b

注:平均值后不同小写字母表示在 P<0.05 水平上存在显著性差异。

3.2 飞行速度与高度对雾滴穿透力的影响

按本文“林间雾滴分布监测”的试验方案,收集设置在飞机航道截面上放置的水敏试纸,对不同位置的雾滴密度检测发现,2 种飞行方案下,雾滴密度均整体呈中心区域高,并逐渐向 2 侧降低的趋势(如图 1)。其中方案 1 喷幅中心区域雾滴密度最高,约为 5.17 点/cm²,而喷幅外侧雾滴密度快速减少,最低仅为 0.13 点/cm²,;方案 2 喷幅中心区域和 2 侧的雾滴密度则相对较为均匀,其中中心点雾滴密度为 2.4 点/cm²,喷幅外侧雾滴密度也呈逐渐降低趋势,但相对幅度不大,最低处为 1.45 点/cm²。这表明,飞行速度不仅影响有效喷雾宽度,对雾滴的分布也有一定影响。相对较高的飞行速度可以提高林间气流对雾滴扰动,增强雾滴在喷幅内的分散效果,使喷幅范围内的雾滴密度分布相对较为均匀。

美国白蛾以危害高大落叶乔木为主,飞机防治过程中雾滴能否穿透树冠层,直接关系到飞机防治的效果。本文对不同飞行方案下的雾滴穿透力进

3 结果与分析

3.1 飞行速度与高度对地面喷雾宽幅的影响

此次试验使用同一机型,按 2 种飞行速度和高度方案进行喷雾防治。通过对地面及叶片雾滴实测喷幅宽度发现,航速、飞行高度和地面喷幅宽度之间有直接关系:方案 1 地面喷幅宽度为 45.53 m,而方案 2 地面喷幅宽度为 59.35 m(见表 1)。方案 2 的地面喷幅明显优于方案 1(F=25.048 7,P=0.015 6),其主要原因在于 2 个方案中固定翼直升机的药剂喷头角度是固定的,随着直升机高度的增加,喷幅也会变宽。同时,速度提升后,飞机向下及对林间的气流扰动增强,这对喷雾宽幅也产生正向影响。因此,在实际生产应用中应根据实际作业宽度对航速和飞行高度进行合理的调整,避免过度施药或喷洒宽幅不够,以降低成本,提高防治效率。

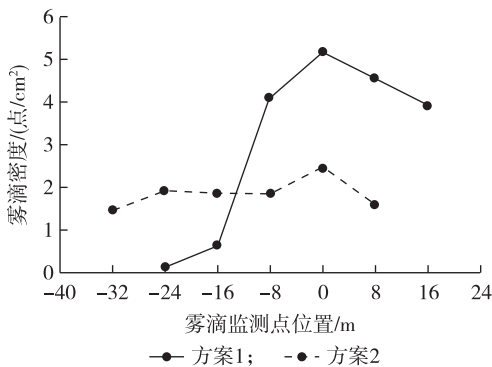


图 1 不同飞行条件下施药喷幅及雾滴密度测定

行了分析,结果显示(如图 2),在不同飞行方案下,雾滴密度均呈现顶部(11 m 以上)稍低,次顶部(11 m)最高,随后自上而下地逐步降低,这主要是雾滴穿透树冠层量逐步减少所致。顶部偏低,则主要是由于顶部气流大,检测试纸或叶面不能保持水平状态,减少了施药面积所致。

不同飞行方案对雾滴穿透力的影响,存在一定差异。飞行方案 1 中,不同飞行高度雾滴密度差异

相对较大,距地面 11—12 m 高度雾滴密度较大,最高雾滴密度可达 9.8 点/cm²,随高度降低,雾滴密度下降明显,8 m 处雾滴密度为 3.43 点/cm²,下降了 65%,到底层叶片位置(距地面 3 m)时,雾滴密度仅为 2.07 点/cm²,下降了 78.9%,表明此飞行方案下雾滴穿透力下降明显。飞行方案 2 中,雾滴穿透性也相对较好,顶层、中层、下层雾滴密度相对均匀(见图 2)。这是由于飞机高速飞行时的下压气流更加有力,促进了雾滴在林层间的扩散。但就总体雾滴密度而言,方案 2 各监测点平均雾滴密度显著低于方案 1 ($F=82.206\ 7, P=0.000\ 2$),可见单位时间施药量固定的情况下,飞机速度越快,单位面积上的雾滴密度就会越少。因此,建议实际生产中,高速飞行施药时应相应调节喷头,加大瞬时喷药量,以保障林间雾滴密度达到防治要求。

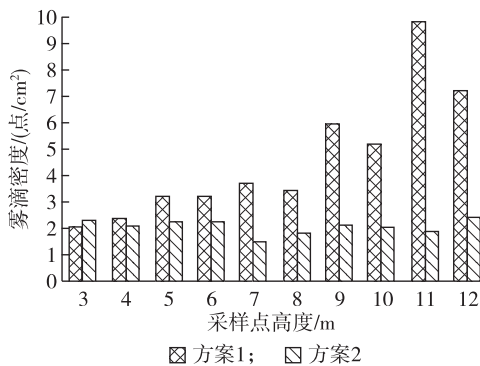


图 2 不同飞行条件下雾滴穿透性测定

3.3 飞行速度与高度对雾滴质量的影响

以不同飞行方案喷雾中间点的雾滴监测结果为样品,利用 iDAS PRO 软件处理图像计算雾滴沉积关键参数。结果显示(见图 3):方案 1 采样面积 143.79 cm²,雾滴体积中值直径 322 μm,数量中值直径 60 μm,雾滴谱宽度指数 4.78,地面喷施率 0.24 L/hm²,雾滴覆盖密度 2.2 点/cm²,样品间变异系数 27.3%。飞行方案 2 采样面积 134.70 cm²,雾滴体积中值直径 287 μm,数量中值直径 44 μm,雾滴谱宽度指数 7.32,地面喷施率 7.87 L/hm²,雾滴覆盖密度 60.7 点/cm²,样品间变异系数 79.2%。从上述方案 1,2 的雾滴检测数据可以看出,方案 2 的雾滴体积中值直径和数量中值直径相对较低,表明其雾滴分布相对较为均匀;方案 2 雾滴谱宽度、地面喷施率和雾滴覆盖度则相对较高,表明其单位面积内的施药量和雾滴均匀程度相对较高。即飞行方案 2 的雾滴穿透性更好,从上至下在各层的分布

更加均匀;雾滴密度更高,雾滴大小更加均匀。飞行方案 1 杨树顶部雾滴密度较高,但穿透性不够,下层雾滴密度则偏低。



图 3 不同飞行方案下雾滴分布典型图示

3.4 不同雾滴密度对防治效果的影响

利用飞机防治后采集的林间不同雾滴密度的杨树叶片,进行室内防治效果观测试验发现,随着叶片上雾滴密度的增加,其防治效果(见表 2)也逐渐增强。48 h 后雾滴密度小(1.66 点/cm²)的处理组累计死亡率仅为 64.28%,低于雾滴密度中等(4.32 点/cm²)和较大(10.67 点/cm²)的处理组。60 h 后雾滴密度大和雾滴密度中等的处理组美国白蛾幼虫已全部死亡,而雾滴密度小的处理组累计死亡率也仅达到 79.41%。从上述统计数据可以看出,飞机防治中雾滴密度对后期防治效果具有显著影响,只有雾滴密度达到一定量,才能对美国白蛾幼虫起到有效的防治作用。

表 2 不同雾滴密度对防治效果(累计死亡率)的影响 %

平均雾滴密度 /(点/cm ²)	飞机防治后不同时间/h				
	12	24	36	48	60
10.67±1.25	0	14.91±2.28	75.43±8.58	96.49±12.22	100±0
4.32±1.10	0	6.61±1.57	66.11±5.70	93.38±8.42	100±0
1.66±1.32	0	6.12±2.44	40.81±6.32	64.28±5.71	79.41±8.17
对照	0	0	0	0	2.74±1.09

以雾滴密度为变量,以 48 h 累计死亡率为指标进行回归分析,结果(见图 4)表明,获得雾滴密度与累计死亡率回归方程 $y=14.204\ln x+64.488$,拟合度 $R^2=0.979\ 4$ 。依据回归方程,要达到 50%的防控效果需要的雾滴密度为 2.067 点/cm²,超过 90%的防控效果平均雾滴密度应高于 5.093 点/cm²。因

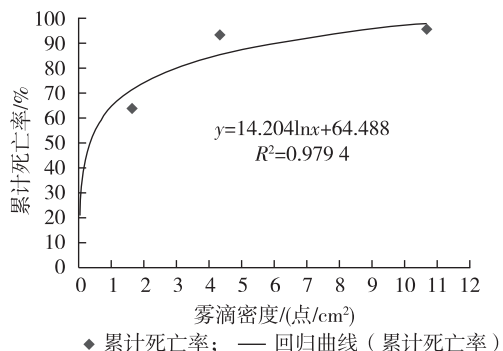


图 4 不同雾滴密度对防治效果影响的回归分析

此,在飞机防治过程中,应关注林间雾滴密度的监测,以避免雾滴密度过低达不到防控效果要求,或过高造成资源浪费和环境污染。

4 结论

飞机防治已经成为美国白蛾防控的最主要手段之一,但受空中飞行速度、高度与气流的影响,航空喷施更易产生农药飘移、雾滴穿透力不足、雾滴密度偏低等现象^[13],严重影响防治效果。不同于其他学者预设固定地面采样点进行监测分析的方法,本文设计了在基于 AS350 B3e(小松鼠)型直升机不同飞行速度和高度的防治方案下,对整个航道截面进行水敏试纸检测,对航道截面内雾滴密度的分布进行了分析。同时结合药后饲毒试验,对不同雾滴密度的防控效果进行了比较,得出以下结论:

(1)航速和飞行高度对地面喷幅宽度有直接影响。随着直升机高度的增加,喷幅也会变宽,而速度的提升,其向下和对林间的气流扰动增强,对喷雾宽幅也有正向影响。其中在航速 150 km/h、飞行高度 40—45 m 时,其地面喷幅宽度相对较宽,为 59.35 m。

(2)在不同飞行方案条件下雾滴密度均呈现顶部(12 m 以上)稍低,次顶部(9—12 m)最高,随后自上而下的逐步降低,下部最低的趋势。这主要是雾滴穿透树冠层量逐步减少所致。

(3)从雾滴穿透性、雾滴密度和雾滴均匀度等方面考量,飞行方案 2 在上述指标上表现都相对较好,而飞行方案 1 则杨树顶部雾滴密度较高,但穿透性不够,下层雾滴密度则偏低。这主要是高速飞行状态下,下洗风场力度更大,林间雾滴扰动更强,使雾滴分布更加均匀。

(4)从飞机防治后不同雾滴密度叶片的室内饲

养试验发现,不同雾滴密度对防治效果具有显著影响,只有雾滴密度达到一定值时才能对美国白蛾幼虫起到有效的防治作用。通过统计分析认为,要达到 50% 的防控效果需要的雾滴密度为 2.067 点/cm²,而 90% 以上的防控效果要求平均雾滴密度应高于 5.093 点/cm²。

5 讨论

对付美国白蛾,飞机防治可以发挥非常重要的作用。然而,由于大多数防治区域存在零星漏防树木,尤其是村(居)、高压线、高大建筑物及养殖场附近等区域漏防树木较多,如果喷洒质量不高,防治效果就会打折扣。为使防治取得预期的成效,一方面要准确把握虫情的发生发展动态,另一方面要确保喷洒到位和喷洒质量检测到位。此外,要结合飞机机型,设置合适的飞行速度和飞行高度,以达到减少环境污染,有效提高农药利用率的目的^[14-15]。本文对 AS350B3e 直升机在不同航速和飞行高度参数下,林间雾滴密度分布情况和防治效果进行了分析,对有人直升飞机防治作业参数设计具有一定的借鉴参考意义。但受实际作业环境及作业架次的限制,本文只是主要针对 2 种飞行速度和高度开展试验研究,飞行速度、沉降剂等其他因素并未进行全面分析,在今后的研究中应进一步考察,以得到更加准确的直升机喷施雾滴分布、漂移规律及特性,为减少雾滴飘移提供参考。

参考文献:

- [1] 赵铁珍.美国白蛾入侵对我国的危害分析与损失评估研究[D].北京:北京林业大学,2005.
- [2] 张向欣,王正军.外来入侵种美国白蛾的研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(1):215-219.
- [3] 张振彦.世界性检疫害虫—美国白蛾的发生与防治[J].中国林副特产,2012(1):62-63.
- [4] 于艳华,徐辉筠,庄波.美国白蛾在苏北地区发生规律及防治方法的研究[J].安徽林业科技,2017,43(2):14-18.
- [5] 林晓,邱立新,曲涛,等.美国白蛾发生现状与治理策略探讨[J].中国森林病虫,2016,35(5):41-42.
- [6] 龚艳,傅锡敏.现代农业中的航空施药技术[J].农业装备技术,2008,34(6):26-29.
- [7] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等.中国航空施药技术研究进展与展望[J].农业机械学报,2014,45(10):53-59.
- [8] 廖娟,臧英,周志艳,等.作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):38-46.

(下转第 45 页)

倍^[17-19]。周跃等^[14]在研究云南松垂直根的土壤增强作用时发现,根系的存在可提高土体抗剪强度达 7 183%,并指出植物的垂直根系可以把浅层根际土层锚固到深层土体上,侧根的作用强度与侧根的密度成正比。吴钦孝^[5]也认为,根系对土体抗剪强度的影响因素是根表面积和根系抗拉力,土壤移动会增加土体间的摩擦力,植物根系因不易被拉断,而使根表面与土体间摩擦力得到充分发挥,对土体产生较大的固持力,从而使土壤保持稳定。

为了更深入研究植物根系抗剪力在水土保持中的作用机制,今后应从以下几方面进一步研究:

(1)建立土壤抗剪切强度模型,并从土层构造、根系生长以及根系力学、根系固土机制等方面深入研究;(2)土壤抗侵蚀和抗剪切力的影响因素是土壤理化性质和生物多因子综合作用的结果,应进一步研究土壤动物和微生物的耦合作用及其作用机理;(3)开拓并深化根际效应的研究。受植物根系的影响,距根系 1—5 mm 范围内的微土区域被大量的细菌、真菌和原生动物所包围,它是水分、养分和微生物以及根系分泌物生理作用区域。可以预测,树木根际在农田林网、防护林水土保持中的作用研究,将开拓一个崭新的研究领域。

参考文献:

- [1] 潘义国,丁贵杰,彭云,等.关于植物根系在土壤抗侵蚀和抗剪切中的作用研究进展[J].贵州林业科技,2007,35(2):10-13.
- [2] 雷洁,张国明,刘连友.土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(4):486-492.
- [3] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37.
- [4] 张金池,臧廷亮,曾锋.岩质海岸防护林树木根系对土壤抗

冲性的强化效应[J].南京林业大学学报,2001,25(1):9-12.

- [5] 吴钦孝.森林保持水土机理及功能调控技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [6] 陈士银,黄月琼,吴雪彪.湿地松林根系对土壤抗侵蚀能力影响的研究[J].西南农业大学学报,2000,22(5):468-471.
- [7] REUBENS B, POESEN J, DANJON F, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review[J]. Trees, 2007, 21(4):385-402.
- [8] GYSSELS G, POESEN J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J].Earth Surface Processes and Landforms,2003,28(4):371-384.
- [9] DOCKER B B, HUBBLE T C T. Quantifying root reinforcement of river bank soils by four Australian tree species [J]. Geomorphology, 2008, 100(3):401-418.
- [10] 张超.宁杭高速公路边坡五种灌木根系防护效备研究[D].南京:南京林业大学,2011.
- [11] 徐宗恒,黄丽苹,杨正辉,等.不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):54-59,66.
- [12] 刘惠江.热带雨林树种根系固土力学性能与现场剪切试验研究[D].海口:海南大学,2016.
- [13] 翟明普.北京西山地区油松元宝枫混交林根系研究[J].北京林业学院学报,1982(1):1-11.
- [14] 周跃,李宏伟,徐强.云南松幼树垂直根的土壤增强作用[J].水土保持学报,2000,14(5):100-105.
- [15] 赵丽兵,张宝贵,苏志珠.草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究[J].中国生态农业学报,2008,16(3):718-722.
- [16] 姜志强,孙树林,程龙飞.根系固土作用及植物护坡稳定性分析[J].勘察科学技术.2005(4):12-14.
- [17] 程洪,赵建民,颜涛.非饱和沙粒植草后抗剪强度与粘聚力增强试验研究[J].南昌工程学院学报,2017,36(6):31-36.
- [18] 郝彤琦,谢小妍,洪添胜.滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度的试验研究[J].华南农业大学学报,2000,21(4):78-80.
- [19] 周云艳,陈建平,杨倩,等.植物根系固土护坡效应的原位测定[J].北京林业大学学报,2010,32(6):66-70.

(上接第10页)

- [9] HOFFMANN W C, KIRK I W. Spray deposition and drift from two "medium" nozzles [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1):5-11. [10] HUANG Y, ZHAN W, FRITZ B K, et al. Optimizing selection of controllable variables to minimize downwind drift from aerially applied sprays [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 28(3):307-314.
- [11] 段彦丽,陶万强,曲良建,等. HcNPV 和 Bt 复配对美国白蛾的致病性[J].中国生物防治,2008(3):233-238.

- [12] 徐明,刘冬梅,徐福元,等. Bt 与灭幼脲混剂对美国白蛾第 2,3 代幼虫的联合毒力及防治效果[J].林业科学,2013,49(12):171-174.
- [13] 刘永生,赵丽波.影响农业航空喷洒质量的主要因素[J].现代化农业,2006,326(9):44-45.
- [14] 贾刚,夏剑萍,田玲,等.美国白蛾飞防作业质量控制技术探讨[J].湖北林业科技,2019,48(1):37-38.
- [15] 赵永军,杨龙,梅爱华,等.错时飞防美国白蛾技术研究与应用[J].中国森林病虫,2012,31(6):32-35.