

# 蝗虫灾害光电诱导捕集治理研究进展及应用前景分析

王立新<sup>1</sup> 周强<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学 机械工程学院, 石家庄 050018;

2. 中国农业大学 工学院, 北京 100083)

**摘要** 灾害蝗虫的光电诱导捕集治理技术是基于蝗虫群体对光源的趋向效应, 设置波谱光源与机械机构分别作为灾害蝗虫趋向行为的导向控制因素和诱集蝗虫的收集捕获因素, 以此实现致灾蝗虫的有效捕集治理。蝗虫光电诱导趋向行为试验研究证实了短波谱光源的趋光诱导敏感性与趋光增效因素的控制措施, 据此研制的光电诱导蝗虫滑移捕集机实现了致灾蝗虫的诱集; 仿生研制的滑移捕集滑板能够有效抑制蝗虫附着系统的附着功能并促使诱集蝗虫高效滑移至捕集机的收集装置。灾害蝗虫的光电诱导滑移捕集治理能够抑制喷施化学农药防治导致的生态环境污染问题, 还可实现捕获蝗虫的资源化利用, 具有良好的应用前景。

**关键词** 蝗虫灾害; 光电诱导捕集; 趋光特性; 表面结构仿生

**中图分类号** S 433.2; TP 391.9

**文章编号** 1007-4333(2014)05-0203-08

**文献标志码** A

## Progress and prospect of photoelectric inducing-trapping control locust plague

WANG Li-xin<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The technology of photoelectric inducing-trapping locust plague is mainly based on the property of locust phototaxis. It depends on both light source and corresponding mechanical structures which act as the control factor for inducing direction and capturing locust plague. The experimental results confirmed that the light sources with short spectrum obviously inspired high phototaxis, as well as drastically strengthened locust's phototaxis behaviors. Based on locust's phototaxis, the machine of photoelectric inducing-trapping plague locust was designed and manufactured to realize the inducing collection of plague locust. The biomimetic designed slippery trapping plate successfully reduced the attaching ability of locust attachment system and caused the gathered locust to efficiently slide into the machine. Photoelectric inducing-trapping plague locust could avoid ecological environment pollution from utilizing pesticide, and achieve the resource utilization of the captured locust as well. It therefore possesses a comprehensive prospect in the aspect of physical agriculture.

**Key words** locust plague; photoelectric inducing-trapping; phototaxis property; surface structure biomimetic

农业生产过程中对于蝗虫灾害的防治, 应用最为广泛的是喷施农药, 在快速、高效杀死致灾蝗虫保障农业生产的同时, 由于有机毒素在农产品及环境中的残留而威胁人类健康并导致生态环境的严重污染。随着人们健康意识的不断增强, 致灾蝗虫防治

新方法和新技术的研究已经得到积极开展<sup>[1-3]</sup>。光电诱导滑移捕集技术基于灾害蝗虫群体对光源的趋向特性, 设置可见光源和机械装置实现对灾害蝗虫的引诱与滑移捕集, 能够抑制喷施农药防治产生的毒素残留和环境污染等弊端, 还可实现捕集蝗虫的

收稿日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51205107)

第一作者: 王立新, 讲师, 博士, 主要从事机械仿生研究, E-mail: ck\_021@tom.com

资源化利用。确定能够致使蝗虫产生较为有效趋光行为的波谱光源,研制促使诱集蝗虫产生良好滑移功能的捕集滑板是获取灾害蝗虫光电诱导滑移捕集技术高效应用和推广的2个关键因素。针对这2个方面的科学问题,众多学者开展了大量的试验研究及理论分析工作。笔者主要综述蝗虫对波谱光源的趋向选择效应、光电诱导滑移捕集技术和滑移捕集滑板仿生研制等方面的最新研究进展并指出有待深入探讨的问题,并分析光电诱导捕集治理灾害蝗虫技术的应用前景。

## 1 灾害蝗虫光电诱导滑移捕集技术

### 1.1 蝗虫对波谱光源的趋向选择行为

绝大多数具有复眼结构的昆虫依靠其视觉器官的感光细胞对不同波谱范围的光刺激做出反应,这种反应在微观上表现为生物光电效应的产生与生理电位在视觉神经和脑部神经中的传导;在宏观上表现为昆虫对刺激光源的趋向行为<sup>[4]</sup>。趋光特性是具有复眼结构的夜行昆虫经长期自然进化形成的对生存环境高度适应的重要生理特征,所谓“飞蛾扑火”正是对蛾类昆虫趋光行为的形象总结。对于昆虫趋光特性的理论阐述,目前较为普遍的是光干扰假说和光定向假说。光干扰假说认为特定波谱的光源干扰了昆虫的正常飞行,使昆虫无法返回亮度较低的暗区,而导致趋光行为的产生;光定向假说则认为夜行昆虫把刺激光源当成定向参照物,并以螺旋式轨迹飞向刺激光源,以致产生趋光行为<sup>[5]</sup>。

对于蝗虫的趋光特性,鲜有明确的理论阐释,但波谱光源、频闪光源和组合光源等刺激作用下蝗虫的趋向选择效应已有普遍研究,以期获取致使蝗虫群体产生良好趋向效应的光源特性参数。亚洲小车蝗群体夜间远距离迁飞现象表明灾害蝗虫对光源具有明显的趋向行为,迁飞时间多集中在夜间,而且城市灯光越强烈趋向行为越明显<sup>[6]</sup>。不同波谱和光强的光源刺激作用下,蝗虫趋向选择行为研究结果表明:一定时间暗适应的蝗虫对不同波谱的单色光及白光表现出不同程度的趋向反应。对紫光、蓝光和绿光等波段的光源刺激表现出较强的趋向性,对红光和橙光等波段的光源刺激表现出较弱的趋向性;对短波长的复合光趋向性较为明显,对长短波长的复合光趋向性较弱;对具有一定闪烁频率的光源刺激表现出较为明显的选择性,且趋向刺激源的运动速度明显高于稳定光源;在光照强度较低的偏振光

源刺激下,蝗虫亦表现出较好的方向选择性。光电刺激源运动时,蝗虫受到光源和视觉图像的双重作用,依据复眼成像的探测功能而表现出良好的方向选择趋向性,并且趋向运动光源的速度明显增加<sup>[7-9]</sup>。在蝗虫对刺激光源的趋向运动过程中,视觉系统的单眼背部细胞能够调控蝗虫的活动阈值及朝向刺激源的运动速度,并且能够发挥方向定位的作用<sup>[10]</sup>,单眼背部细胞的这种功能因刺激光源的光强度及波谱范围的不同而呈现出显著差异<sup>[11]</sup>。

蝗虫趋光选择最佳光谱优选研究结果证实了在相同光照度条件下,蝗虫对紫色(405 nm)LED灯光源的内在趋光反应率明显强于绿紫蓝(520 nm + 465 nm + 405 nm)组合LED灯光源;蝗虫对不同光谱光源的趋光反应存在最高趋光光照度值和最低灵敏光照度值,蝗虫趋光效应受到刺激光源的光谱范围和光照度影响,不同的光谱范围和光照度能够导致蝗虫产生不同程度的趋光行为<sup>[12]</sup>;相同光照度下蝗虫对紫色LED灯光源的趋向效应明显强于绿蓝紫组合LED灯光源;不同光照度下蝗虫优先趋向于光照度较强的刺激光源,并且当绿蓝紫组合LED灯光源的光照度10倍于紫色LED灯光源时蝗虫表现出较强的趋向效应,结果预示运用LED紫光、绿紫蓝光发光光谱和光照度参数的合理调控,可满足夜间蝗虫趋光行为激发诱导的要求<sup>[13]</sup>。进一步研究表明发光间隔为30 ms的频闪紫色LED灯光源对蝗虫的趋光增效较为有效;相对于频闪光源、周期交变光源和恒定光源,发光周期为640 ms的余弦交变紫色LED灯光源能使蝗虫产生较强的趋光响应;在敏感光谱耐光照阈值上,特定周期的频闪光源与余弦交变光源的合理组合能够提高蝗虫的趋光增效范围<sup>[14]</sup>。

为提高灾害蝗虫对诱导光源的趋向效应及获取蝗虫趋光增益的调控参数,偏振光、温度、声音、振动和机械刺激等因素已被耦合于诱导光源。研究发现偏振光的光照度是决定蝗虫趋光响应敏感性的关键因素,蓝光偏振光光照度对蝗虫趋光响应敏感临界点的差别程度是影响其趋光定向响应选择差异的原因<sup>[15]</sup>。蝗虫昼行夜伏的生物行为规律及栖息环境夜间温度的降低是决定蝗虫对刺激光源趋向效应的外在因素,蝗虫生存环境温度的降低抑制了虫体的生理活性。热源与光源的调控耦合能够增强诱导区域内蝗虫的趋光行为,以65℃热源调控耦合紫色LED诱导光源可使诱导区域内蝗虫的趋光增益作用达到最佳<sup>[16]</sup>。蝗虫栖息环境夜间温度的降低使

蝗虫产生了趋光惰性,有效的振动、声音和机械等刺激能够激发蝗虫的活性,促使趋光效应的提高。蝗虫对光振耦合和光谱光源趋向响应的对比试验证实光场波谱能量与振动能量的耦合对蝗虫趋光产生了推拉驱动的互动协同激发效应,强化了蝗虫趋光效应的增益增效程度;光场机制对蝗虫的趋光诱导起主导作用,振动调控机制起驱动激发及增益增效作用并决定蝗虫趋光响应活性初始激发的程度;振动频率为 50 Hz、振动时间为 400 ms 且振动间歇停止时间为 1 s 的循环振动模式与紫色 LED 灯光源耦合可获取相对最佳的蝗虫趋光响应强度和增效程度<sup>[17-18]</sup>。蝗虫在诱导光源与机械刺激作用下的运动方向和运动敏感性测试结果表明运动图像、碰触刺激、光源图像和光源碰触等因素刺激作用下蝗虫的趋光运动行为表现出明显差异,机械刺激可有效提高蝗虫趋光运动敏感性,诱导光源可使蝗虫趋光运动具有明显的方向性,诱导光源与机械刺激的合理调控耦合可显著增强蝗虫的趋光效应<sup>[19]</sup>。

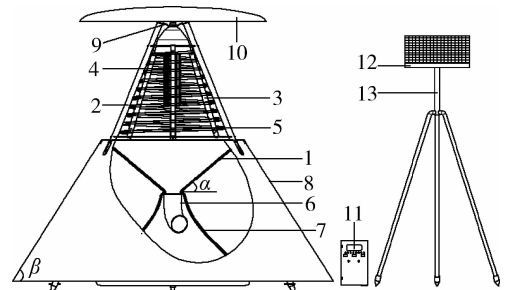
明确使蝗虫产生高效趋光效应的诱导光源及其调控耦合因素参数是获取灾害蝗虫光电诱导捕集治理的关键。现阶段对蝗虫趋光效应研究仅局限于实验室条件下对蝗虫个体样本的统计性测试,鲜有针对蝗虫群体趋光行为的研究报道。后续研究需在蝗虫灾害爆发区域或模拟蝗虫灾害爆发情况下的群体蝗虫为研究对象,测试蝗虫群体对波谱、光照度不同的诱导光源及机械刺激因素的趋向效应差异,以便确定促使蝗虫群体产生较高诱导效率的诱导光源及机械刺激的设计参数。

## 1.2 光电诱导蝗虫滑移捕集机研制

目前鲜有针对蝗虫趋光特性的明确理论阐释,但灾害蝗虫对于光源的趋向行为已是不可争议的事实,基于灾害蝗虫趋光行为的光电诱导滑移捕集技术已被提出。该技术设置诱导光源作为灾害蝗虫趋向行为控制的诱导因素,设置捕集滑板及附属机械机构作为诱导光源区域聚集蝗虫的滑移捕获因素,从而实现了对灾害蝗虫的无害化捕集治理。

光电诱导蝗虫滑移捕集技术的关键是使灾害蝗虫产生较为高效趋光行为的诱导光源与促使诱导光源区域聚集蝗虫产生较高滑移效率的捕集滑板,围绕这 2 个关键问题,多种光电诱导蝗虫滑移捕集机已被研制。最早公开的捕集机设置可见光光源作为诱导光源,设置土木或混凝土结构的薄板作为使诱集蝗虫产生滑移行为的滑板,该捕集机能够实现对

灾害蝗虫的诱导捕集,但所设置的捕集滑板并不能使蝗虫产生较高的滑移效率,因此降低了捕集机的捕集效率<sup>[20]</sup>。基于提高捕集效率的需求,光电诱导蝗虫捕集机的后续研制主要集中在诱导光源与捕集滑板的 2 个方面。针对蝗虫喜温趋热特性及栖息环境夜间温度降低的情况,除了设置白光、色光和偏振光光源等作为诱导光源外,还设置红外光源作为灾害蝗虫对温度趋向的控制因素,捕集机内部设置多层具有特定倾斜角度的褶形滑板<sup>[21-22]</sup>,该捕集机可进行大范围的荒田和草原致灾蝗虫的诱导捕集,但多层褶形滑板的存在导致机体结构庞大,仅适用于对蝗虫成虫的诱导捕集,限制了对不具备飞行能力和跳跃能力较差的蝗虫幼虫的诱导捕集。为了同时兼顾对灾害蝗虫成虫及幼虫的诱导捕集,提高捕集机的光电诱导和滑移效率,一种捕捉效率更高的光电诱导蝗虫滑移捕集机已被研制<sup>[23]</sup>。该捕集机(图 1)设置能够显著激发灾害蝗虫趋光效应的复合频谱诱导光源及红外 LED 灯光源,在诱导光源的外侧布控用于电晕诱集蝗虫的高压静电网,设置锥形漏斗状的金属制滑板及弯管状防逃逸机构分别实现诱集蝗虫的滑移与防逃逸,捕集机的箱体外壁为能够致使灾害蝗虫幼虫轻易攀爬至诱导光源处且具有特定倾斜角度的粗糙不锈钢板,能够实现对灾害蝗虫成虫及幼虫的高效诱导捕集。



1. 捕集滑板; 2. 支撑机构; 3. 复合光诱导光源; 4. 红外 LED 灯光源; 5. 高压静电网; 6. 防蝗虫逃逸机构; 7. 集蝗袋; 8. 捕集机箱体; 9. 支撑机构连接环; 10. 捕集机防护罩; 11. 蓄电池及控制组件; 12. 太阳能电池板; 13. 三脚架。

1, Trapping plate; 2, Supporting mechanism; 3, Compound inducing light source; 4, Infrared LED light source; 5, High-voltage electrostatic grid; 6, Locust escape-forbidding mechanism; 7, Locust collecting bag; 8, Frame of locust trapping machine; 9, Adapter ring of supporting mechanism; 10, Protection cup of trapping machine; 11, Battery and control unit; 12, Solar panel; 13, Tripod assembly.

图 1 光电诱导蝗虫滑移捕集机整体结构

Fig. 1 General structure of photoelectric inducing-trapping plague locust machine

对于光电诱导滑移捕集机的优化研制,一方面需要继续以灾害蝗虫对波谱光源趋向选择效应为理论指导,明确诱导光源的最佳设计参数,以此提高诱导光源对灾害蝗虫的诱导效率;另一方面需要研制具有特殊表面结构的捕集滑板,以便较好抑制蝗虫附着系统的附着功能,提高诱集蝗虫在捕集滑板的滑移率;同时需要在蝗虫灾害爆发区域试验验证捕集机的性能,优化捕集机整体结构参数,提高捕集机对灾害蝗虫的捕集效率。

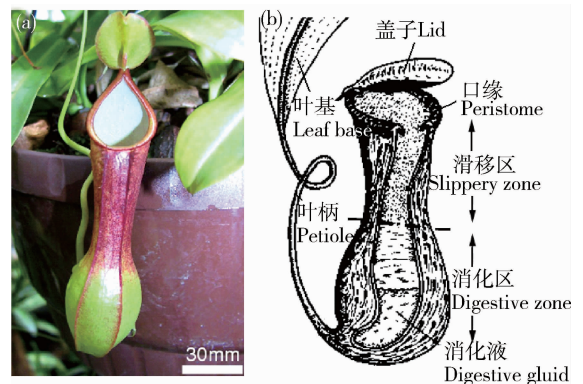
## 2 蝗虫滑移捕集滑板仿生研制

在数百万年的自然进化过程中,蝗虫附着系统形成了具有坚硬末端的爪和柔性表皮或刚毛结构的爪垫,能够在绝大多数接触物表面产生机械锁合与柔性接触 2 种附着方式,实现自如行走或稳固停留<sup>[24]</sup>。因此研制具有良好滑移功能的捕集滑板,使蝗虫附着系统形成的机械锁合和柔性接触双重作用同时降到最低,是保证光电诱导蝗虫滑移捕集机具有良好捕集效率的关键。对于蝗虫在滑移捕集滑板表面滑移行为的研究已经开展,研究发现不同材料的捕集滑板对蝗虫的滑移摩擦效果不同,滑板表面粗糙度相近时蝗虫的滑移摩擦行为主要受滑板材料与蝗虫附着系统爪垫间分子作用的影响<sup>[25]</sup>。蝗虫在镀锌铁板、PVC 板和普通玻璃板表面的滑移效应测试结果表明蝗虫的滑移效应均随倾斜角的增加而增强,倾斜角度确定时镀锌铁板具有最佳滑移效应,镀锌铁板更适合用作光电诱导滑移捕集机的捕集滑板;蝗虫的滑移效应不但受到虫体重力和滑板倾斜角的影响,还因蝗虫附着系统与附着物表面形成的机械锁合和柔性接触双重作用而受到接触物表面粗糙度和硬度的影响<sup>[26-27]</sup>。对于捕集滑板的研制,已从最初现有材料的比较选择发展到现今运用仿生工程理论设计特殊表面结构,以期提高诱集蝗虫在滑板表面的滑移效率。

### 2.1 捕集滑板仿生原型

食虫性植物猪笼草(*Nepenthes*)依靠位于叶片末端的叶笼实现对昆虫的引诱与捕集,并能将其消化成生长需要的氮、磷和钙等营养元素,引起学者的广泛研究<sup>[28-29]</sup>。一般说来,猪笼草的叶笼(图 2)由叶片状盖子、瓶口形口缘、滑移区和消化区构成<sup>[30]</sup>。不同的表面结构决定了叶笼各部分在捕食昆虫并将其消化成可供吸收的营养元素过程中所发挥的作用存在差异。盖子能够保护叶笼内部免受雨水、灰尘

及其他污染物的污染,还可减少消化区消化液的蒸发;口缘因能够分泌芳香性气味和花蜜状物质而起到引诱猎物的作用;滑移区表面具有致密的蜡质晶体和月骨体,能够致使绝大多数昆虫的附着系统降低甚至完全丧失正常的附着功能而表现出良好的滑移功能,促使被口缘引诱的昆虫滑移至消化区;消化区依靠储蓄的消化液能将捕获猎物分解消化成营养元素<sup>[31-32]</sup>。滑移区因表面特殊结构而对昆虫表现出的良好滑移功能为蝗虫滑移捕集滑板的研制提供了绝佳灵感,逐渐成为叶笼滑移区研究的新方向<sup>[33]</sup>。基于仿生工程学角度开展叶笼滑移区表面结构、物理性质及对昆虫附着系统的影响等研究,是为蝗虫捕集滑板的仿生研制奠定理论与技术基础的关键。



(a)猪笼草叶笼;(b)叶笼结构。

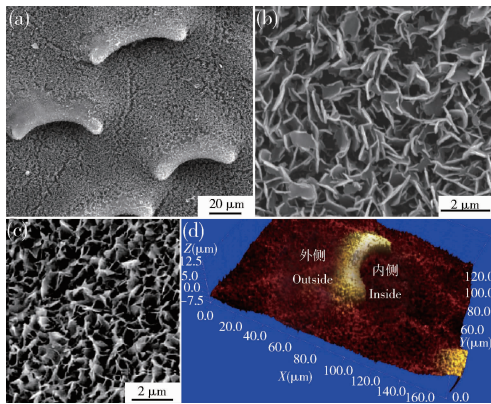
(a) pitchers of *Nepenthes alata*; (b) Structures of the pitchers.

图 2 猪笼草叶笼及结构示意图

Fig. 2 Structures of *Nepenthes* pitchers

叶笼滑移区位于口缘与消化区之间,依靠表面特殊结构抑制昆虫附着系统的附着功能,在捕集昆虫过程中发挥至关重要的作用。国内外众多学者从表面形貌学、结构组成、分子生物学和试验动物学等方面开展了对滑移区表面形貌、结构组成、物理性质、对昆虫的捕食规律、反附着机理等方面的研究。Gorb 等<sup>[34]</sup>观察了叶笼滑移区表面形貌结构,发现滑移区表面覆盖着两端向下弯曲的月骨体与形状不规则、排列致密、杂乱无序的蜡质晶体层(图 3(a)),蜡质晶体层又可分为形貌、结构均不相同的顶层(图 3(b))与底层(图 3(c))。Riedel 等<sup>[35]</sup>对叶笼滑移区形貌结构进行了比较研究,指出不同种属猪笼草的滑移区呈现几乎相同的表面形貌,均由月骨体和蜡质层构成;Scholz 等<sup>[36]</sup>对叶笼滑移区表面纵向结构进行了研究,发现滑移区表面覆盖着厚度约为

3  $\mu\text{m}$  的蜡质晶体层。国内学者<sup>[37]</sup>利用三微白光干涉表面形貌仪观测了月骨体及其周边的三微形貌,发现月骨体外侧高度变化比较缓慢而形成斜坡,内侧则近乎垂直变化而形成断崖(图 3(d));月骨体周边的形貌呈现纳米尺度的波浪起伏(图 3(d))。对 4 种猪笼草叶笼滑移区的表面结构参数进行了测算,发现不同种属猪笼草的叶笼滑移区蜡质晶体和月骨体的结构参数存在差别,直接导致了滑移区表面粗糙度的不同。猪笼草不同生长阶段的叶笼滑移区表面形貌结构参数差异及变化规律尚未涉及,有待开展相关研究工作;同时需要综合研究更多种属猪笼草叶笼滑移区的结构参数差异,以及这些差异与表面粗糙度、各向异性间的关系。研究工作有助于全面揭示滑移区对昆虫附着系统的影响规律,同时能为蝗虫滑移捕集滑板的仿生研制提供更加全面的设计参数信息。



(a) 月骨体与蜡质晶体层; (b) 顶层蜡质晶体; (c) 底层蜡质晶体; (d) 月骨体三微形貌。(a) Lunule cells and wax crystals; (b) Upper wax crystals; (c) Lower wax crystals; (d) 3 dimension morphology of lunule cells.

图 3 猪笼草叶笼滑移区表面微结构

Fig. 3 Surface microstructures of *Nepenthes* pitchers

对叶笼滑移区蜡质晶体的成分研究表明,顶层和底层蜡质晶体主要由乙醛和初级醇等化合物组成,各成分在 2 层蜡质晶体中的含量存在显著差异<sup>[34-35]</sup>。Gorb 等<sup>[34, 38]</sup>测定叶笼滑移区表面的接触角约为  $165^\circ$ ,表面张力约为  $3 \text{ mN/m}$ ,较高的接触角与较小的表面张力表明滑移区表面具有超疏水性;微纳压痕揭示了滑移区顶层蜡质晶体具有相对较低的硬度。对滑移区表面物理性质的研究有助于揭示滑移区对昆虫附着系统的影响机理,最终可为蝗虫捕集滑板的仿生研制提供理论基础,但目前已见报道的研究仅针对同种属猪笼草的滑移区,其成果对

普遍性揭示滑移区的减附机理产生了局限,因此后续研究工作需关注不同种属猪笼草叶笼滑移区的硬度、接触角等物理特性信息。

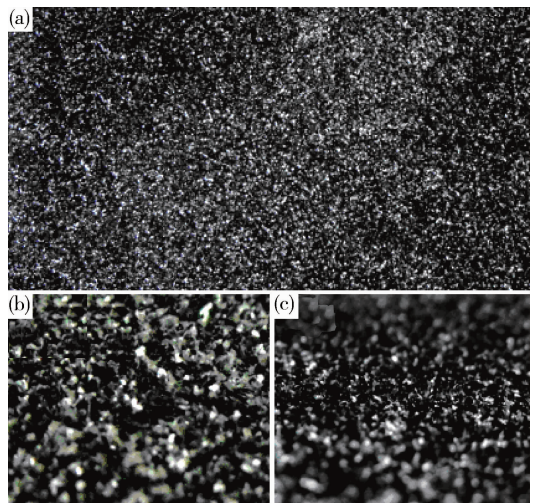
叶笼滑移区对昆虫附着系统的滑移功能表现规律及减附机理是仿生制备蝗虫滑移捕集滑板的关键因素。滑移区滑移功能的产生主要通过其表面结构的蜡质晶体和月骨体对昆虫附着系统的爪和爪垫正常附着功能的限制来实现的,众多学者对此开展了广泛的研究。Gaume 等<sup>[39]</sup>研究了苍蝇在叶笼滑移区的滑移行为,由于具有各项异性结构的蜡质晶体层及月骨体的存在,具有良好附着能力的苍蝇不能在滑移区表面行走及起飞。Gorb 等<sup>[34]</sup>观察了甲虫在叶笼滑移区的爬行行为,并测试了附着力,发现滑移区顶层蜡质晶体易造成对爪垫的污染,导致黏附作用的急剧下降;底层蜡质晶体能够减少爪垫的接触面积,进一步降低黏附作用。Scholz 等<sup>[36]</sup>观察了竹节虫、蚂蚁在叶笼滑移区的爬行行为并测试了摩擦力,对行走后的昆虫附着系统、滑移区表面进行了扫描电镜观察,发现在滑移区爬行后的蚂蚁、竹节虫的爪垫未见明显的蜡质晶体,滑移区表层蜡质晶体也未见与底层分离;指出滑移区表面粗糙度是导致昆虫附着能力降低的主因。Scholz 等<sup>[36]</sup>的研究结论有悖于 Gorb 等<sup>[34]</sup>提出的污染假说,原因有待进一步研究揭示。国内学者<sup>[37, 40]</sup>测试了蝗虫在 4 种猪笼草叶笼滑移区的摩擦力,证实滑移区能够显著降低蝗虫的摩擦力,并且不同种属猪笼草的滑移区对摩擦力的降低程度存在差异;指出滑移区表面结构参数差异是造成蝗虫附着功能降低程度的主要原因。滑移区对昆虫附着系统影响规律的研究虽已开展,但未形成明确、普适的结论,仍需要继续开展大量的研究工作,尤其是在同时考虑滑移区的蜡质晶体、月骨体和昆虫附着系统的爪、爪垫等双重二元结构相互影响前提下,综合揭示滑移区对昆虫附着系统的减附机理,为蝗虫滑移捕集滑板的仿生制备提供关键理论基础。

## 2.2 捕集滑板仿生设计与制备

许多植物表面因具有特殊结构而表现出自清洁、超疏水等功能,国内外众多学者广泛开展该功能与表面结构关系、表面结构仿生制备等方面的研究,以期解决工程应用中的问题<sup>[41-42]</sup>。Koch 等<sup>[43]</sup>采用脱蜡铸造技术,以小麦叶片蜡质晶体的主要成分为原料,仿生制备出具有微纳尺度几何参数的小麦叶片表面结构。Gorb 等<sup>[44]</sup>采用牙蜡铸造技术与两步

铸型法,以 Spurr 树脂为原料,制备了植物叶片表面微形貌结构;Gorb 等<sup>[45]</sup>随后用相似的方法制备了除去蜡质晶体后的滑移区表面结构。Koch 等<sup>[43]</sup>和 Gorb 等<sup>[45]</sup>的研究为滑移区表面结构的仿生制备奠定了工程技术基础,但仍需进一步提高对原型表面微结构精确复制及获取的能力。

国内学者以猪笼草叶笼滑移区为原型,基于滑移区结构与功能仿生设计了蝗虫滑移捕集滑板表面结构(图 4)<sup>[46-47]</sup>,制定了“金属基板+粘合剂+石墨”的捕集滑板制备思路,以具有良好润滑和滑移性能的鳞片状石墨替代滑移区蜡质晶体,采用高压静电吸附法在普通金属板上初步制得蝗虫滑移捕集滑板(图 5)<sup>[48]</sup>。对仿生制备的捕集滑板进行了功效测试,结果表明蝗虫在捕集滑板上产生的最大附着力与在滑移区表面的最大附着力之比介于 0.94~1.05;仿生制备的捕集滑板以 32° 倾斜角安装于光电诱导蝗虫滑移捕集机时,对诱集蝗虫的滑移率可达 82.4%<sup>[48]</sup>。仿生制备的滑移捕集滑板虽能对蝗虫表现出较好的滑移功能,但受到石墨与基板结合强度低的影响,造成石墨脱落,导致该捕集滑板不宜重复使用;石墨脱落后暴露于基板的粘合剂造成蝗虫附着能力的增强,降低了滑移功效。因此,若要获取具有良好滑移功能及持久耐用的蝗虫滑移捕集滑板,仍需开展大量的仿生研究工作。即在已有研究基础上以滑移区对昆虫附着系统的影响机理为理论基础,从仿生工程学的角度出发,同时兼顾结构仿生



(a) 总体形貌; (b) 局部形貌俯视; (c) 局部形貌侧视。  
(a) General morphology; (b) Specific morphology, vertical view; (c) Specific morphology, lateral view.

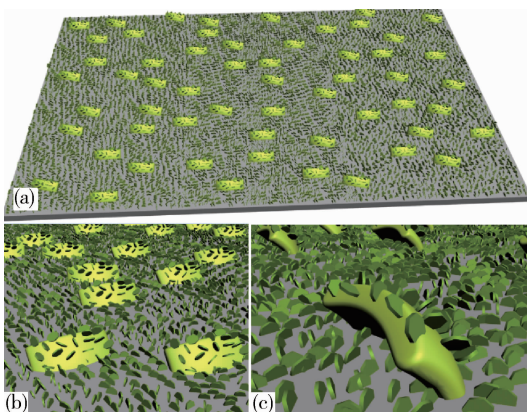
图 5 仿生制备蝗虫滑移捕集滑板形貌

Fig. 5 Surface topography of biomimetic manufactured locust slippery trapping plate

和功能仿生,一方面利用脱蜡铸造技术或微纳电火花加工技术制备具有与滑移区表面微结构类似形貌的基板;另一方面采用可与基板结合更加紧密的纳米-微米尺度的鳞片状石墨作为蜡质晶体取代物。

### 3 应用前景分析与总结

蝗虫灾害能够给农业生产带来致命性破坏,对于蝗虫灾害的防治需要结合蝗虫生理特性,寻求一种能够克服因喷施化学农药而产生的毒素残留、生态环境污染等问题的新型技术。光电诱导滑移捕集技术基于灾害蝗虫对光源的趋向行为,设置诱导光源、滑移捕集滑板及附属机构实现对灾害蝗虫的诱集与捕集,可避免喷施农药产生的弊端,还可实现捕集蝗虫的资源化利用。该技术实现灾害蝗虫无害化诱集治理的同时,还可用于对飞蛾、蚁类等其他致灾农业昆虫的捕集治理,在农林畜牧业生产领域具有广阔的应用前景,能够推动物理农业、生态农业与有机农业的发展。蝗虫对频谱光源趋向选择效应理论研究的深入,利于明确使灾害蝗虫产生较高趋光效率的诱导光源设计参数;蝗虫滑移捕集滑板的仿生研制能够确定致使诱集蝗虫产生较高滑移效率的捕集滑板的设计参数及制备工艺,有益于光电诱导蝗虫滑移捕集治理技术的成熟完善,从而推动该项技术在农林畜牧业领域的大规模推广与应用。



(a) 滑板总体形貌; (b) 滑板局部形貌; (c) 滑板月骨体形貌。  
(a) General morphology of the plate; (b) Specific morphology of the plate; (c) Morphology of the designed lunate cells.

图 4 蝗虫滑移捕集滑板仿生设计结构

Fig. 4 Surface structure of biomimetic designed locust slippery trapping plate

## 参 考 文 献

- [1] 徐瑞清,周强,王书茂.蝗虫灾害机械化捕集治理技术发展[J].农业机械学报,2005,36(11):165-168
- [2] 周强,郑永军,杜文亮,等.探索物理植保新领域提供绿色农业新技术[J].农业工程,2012,2(S1):16-19
- [3] 王立新,周强.蝗虫灾害物理防治发展及应用前景探讨[J].安徽农业科学,2008,36(21):9146-9148
- [4] 周强,徐瑞清,程小桐.昆虫生物光电效应与虫害治理应用[J].现代生物医学进展,2006,6(4):70-72
- [5] 靖湘峰,雷朝亮.昆虫趋光性及其机理的研究进展[J].昆虫知识,2004,41(3):198-203
- [6] 蒋湘,买买提明,张龙.夜间迁飞的亚洲小车蝗[J].草地学报,2003,11(1):75-77
- [7] 牛虎力,周强.光电诱导作用下蝗虫光谱选择行为的研究[J].现代生物医学进展,2009,9(13):2456-2459
- [8] 牛虎力,周强.光电诱导作用下蝗虫光谱和光强反应行为研究[J].现代生物医学进展,2009,9(3):466-469
- [9] 牛虎力.光电诱导蝗虫聚集效应与光机电耦合捕蝗技术研究[D].北京:中国农业大学,2009
- [10] Charles Barry, Rudolf Jander. Photoinhibitory function of the dorsal ocelli in the phototactic reaction of the migratory locust *Locusta migratoria* [J]. Nature, 1968, 217(5129): 675-677
- [11] Michiyo Kinoshita, Keram Pfeiffer, Uwe Homberg. Spectral properties of identified polarized-light sensitive interneurons in the brain of the desert locust *Schistocerca gregaria* [J]. The Journal of Experimental Biology, 2007, 210(8): 1350-1361
- [12] 刘启航,周强,牛虎力.蝗虫对光谱光照特性趋光反应的对比及数学模型[J].农业工程学报,2011,27(8):252-256
- [13] 刘启航,周强.诱导光源光照梯度对蝗虫趋光响应的影响[J].农业机械学报,2011,42(10):105-109
- [14] 刘启航,周强.频闪光源和交变光源对蝗虫趋光响应的试验[J].江苏大学学报:自然科学版,2011,32(3):260-265
- [15] 刘启航,周强.蝗虫对蓝光偏振光和非偏振光的定向响应对比[J].农业机械学报,2011,42(12):116-120
- [16] 刘启航,周强.光温耦合调控对蝗虫趋光增益效应的试验研究[J].中国农业大学学报,2011,16(4):52-58
- [17] 刘启航,吴迪,周强.光振耦合对蝗虫趋光响应驱动增效效应的影响及测定[J].农业工程学报,2012,28(18):169-176
- [18] 刘启航,周强.光声振耦合对蝗虫趋光响应的激发效应[J].农业机械学报,2011,43(11):197-202
- [19] 牛虎力,王立新,周强.光源与机械刺激下蝗虫的运动行为[J].农业工程学报,2013,29(2):148-152
- [20] 周强.光电诱导蝗虫捕集机[P].中国专利,200310113391. X, 2003-11-18
- [21] 周强,徐瑞清,杨柳.一种光电诱导蝗虫捕集机[P].中国专利,200410096643. 7,2004-12-06
- [22] 周强,徐瑞清,杨柳.自供电的光电诱导蝗虫捕集机[P].中国专利,200420116184. X,2004-12-06
- [23] 王立新,高雅妍.一种捕捉效率更高的光电诱导蝗虫捕集机[P].中国专利,201310214300. 5,2013-6-3
- [24] Wang Li-xin, Zhou Qiang, Xu Shu-yan. Role of claws and pads in locust *Locusta migratoria manilensis* attaching to substrates [J]. Chin Sci Bull, 2011, 56: 789-795
- [25] 周强,牛虎力.滑板材料因素与蝗虫滑移摩擦行为的关系研究[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(S):81-83
- [26] 王立新,周强,程小桐.蝗虫在滑板表面滑移效应的测试[J].江苏大学学报:自然科学版,2009,30(3):232-235
- [27] Wang Li-xin, Zhou Qiang, Xu Shu-yan, et al. Investigation of the sliding friction behaviors of locust on slippery plates [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(24): 4549-4554
- [28] Ellison A M, Gotelli N J. Energetics and the evolution of carnivorous plants; Darwin's most wonderful plants in the world [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(1): 19-42
- [29] Lijin C, Jonathan Moran, Charles C. Trap geometry in three giant montane pitcher plant species from Borneo is a function of tree shrew body size [J]. New Phytologist, 2010, 186(2): 461-470
- [30] Gaume L, Gorb S, Rowe N. Function of epidermal surfaces in the trapping efficiency of *Nepenthes alata* pitchers [J]. New Phytologist, 2002, 156(3): 479-489
- [31] Bohn H F, Federle W. Insect aquaplaning; *Nepenthes* pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface [J]. Proceedings of the National Academy Sciences USA, 2004, 101(39): 14138-14143
- [32] Ellison A M. Nutrient limitation and stoichiometry of carnivorous plants [J]. Plant Biology, 2006, 8(6): 740-747
- [33] Wang Li-xin, Zhou Qiang, Zheng Yong-jun, et al. Composite structure and properties of pitcher surface of carnivorous plant *Nepenthes* and its influence on insect attachment system [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(12): 1657-1664
- [34] Gorb E, Hass K, Henrich A, et al. Composite structure of the crystalline epicuticular wax layer of the slippery zone in the pitchers of the carnivorous plant *Nepenthes alata* and its effect on insect attachment [J]. The Journal of Experimental Biology, 2005, 208(24): 4651-4662
- [35] Riedel M, Eichner A, Meimberg H, et al. Chemical composition of epicuticular wax crystals on the slippery zone in pitchers of five *Nepenthes* species and hybrids [J]. Planta, 2007, 225(6): 1517-1534
- [36] Scholz I, Buckins M, Dolge L, et al. Slippery surfaces of pitcher plants; *Nepenthes* wax crystals minimize insect attachment via microscopic surface roughness [J]. The Journal of Experimental Biology, 2010, 213(7): 1115-1125
- [37] Wang Li-xin, Zhou Qiang. Friction force of locust *Locusta migratoria manilensis* (Orthoptera, Locustidae) on slippery zones surface of pitchers from four *Nepenthes* species [J]. Tribology Letters, 2011, 44(3): 345-353
- [38] Gorb E V, Gorb S N. Physicochemical properties of functional surface in pitchers of the carnivorous plant *Nepenthes alata* blanco (Nepenthaceae) [J]. Plant Biology, 2006, 8(6): 841-848

- [39] Gaume L, Perret P, Gorb E. How do plant waxes cause flies to slide? Experimental tests of wax-based trapping mechanisms in three pitfall carnivorous plants [J]. *Arthropod Structure & Development*, 2004, 33(1): 103-111
- [40] Wang Li-xin, Zhou Qiang. Numerical characterization of surface structures of slippery zone in *Nepenthes alata* pitchers and its mechanism of reducing locust's attachment force [J]. *Advances in Natural Science*, 2010, 3(2): 152-160
- [41] Koch K, Bhushan B, Barthlott W. Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics [J]. *Progress in Materials Science*, 2009, 54(2): 137-178
- [42] Yan Y, Gao N, Barthlott W. Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, 169(2): 80-105
- [43] Koch K, Dommise A, Barthlott W, et al. The use of plant waxes as templates for micro- and nanopatterning of surfaces [J]. *Acta Biomaterialia*, 2007, 3(6): 905-909
- [44] Gorb S N. Visualisation of native surfaces by two-step molding [J]. *Microscopy Today*, 2007, 15(2): 44-46
- [45] Gorb E V, Gorb S N. The effect of surface anisotropy in the slippery zone of *Nepenthes alata* pitchers on beetle attachment [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2011, 2(1): 302-310
- [46] 周强, 周荣伟, 王立新, 等. 仿生光滑表面显微结构计算机仿真与设计[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 201-204
- [47] 王立新, 周强, 刘启航. 猪笼草叶笼滑移区表面结构参数表征与蝗虫捕集滑板仿生设计[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 233-235
- [48] 王立新, 周强. 基于猪笼草叶笼滑移区仿生的蝗虫滑移捕集滑板功效测试[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(5): 222-225

责任编辑: 王燕华