

文章编号: 2097-096X(2025)02-0112-09

水利工程白蚁防治药剂现状和发展方向

王伟^{1,2,3}, 邓刚^{1,2,3}, 张茵琪^{1,2,3}, 严俊^{1,2,3}, 裴东东^{1,2,3}, 李维朝^{1,2,3}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院 水利部水工程建设与安全重点实验室, 北京 100038;

3. 中国水利水电科学研究院 水利部白蚁防治重点实验室, 北京 100038)

摘要: 白蚁是主要的害堤动物之一, 给堤坝工程的正常运行带来了巨大的安全隐患。本文介绍了水利工程白蚁预防和灭治措施对药物的需求, 分析了各防治措施使用的化学药剂有效成分和剂型特点, 总结了生物药剂研发现状和发展方向。施用白蚁防治药剂是开展水利工程白蚁预防和灭治的重要途径, 亟需研发适用于监测-灭杀一体法的高耐久性饵剂和粉剂, 并扩大生物药剂有效成分获取渠道。

关键词: 水利工程; 白蚁防治; 化学药剂; 生物药剂; 有效成分; 剂型

中图分类号: TV47

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240201

1 研究背景

白蚁危害对象多、范围广, 造成的经济损失巨大, 被国际昆虫生理生态研究中心列为世界五大害虫(即须舌蝇、蜚、蚊子、黏虫和白蚁)之一^[1-2]。在我国, 黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanus*、黄翅大白蚁 *Macrotermes barneyi* 和海南土白蚁 *Odontotermes hainanensis* 等土栖白蚁给堤坝工程带来了巨大的安全隐患。我国现有水库大坝 9.8 万座, 其中 89.9% 为土石坝; 5 级以上堤防 33.1 万 km, 其中 98.1% 为土质结构^[3]。白蚁在土石坝和土质堤防内筑巢修道, 破坏堤坝结构的完整性, 极易诱发散浸、漏洞和跌窝等险情, 甚至导致垮坝和崩堤事故^[4-7], 产生的危害具有隐蔽性、反复性、长期性和严重性等特点^[8], 亟需采取措施切实开展防治。

白蚁预防和灭治是水利工程白蚁防治的重要内容, 主要的实施途径包括化学、生物和物理等^[9-10]。化学途径充分利用化学药剂驱避或毒杀白蚁, 具有成本低、见效快等优点, 在国内外白蚁防治中应用最广, 但大范围使用化学药剂存在威胁人类生命健康和破坏生态环境的显著缺点^[11-12]。生物途径利用天然产物、微生物或微生物代谢物控制白蚁种群或减轻其危害程度, 虽总体仍处于研究和探索阶段, 但因对人类安全和对环境友好的特点备受青睐^[13]。物理途径主要通过改变物理环境阻隔白蚁入侵, 往往成本高、施工易受限、效果有限。

本文聚焦水利工程白蚁防治药剂, 介绍了水利工程白蚁预防和灭治措施对药物的需求, 分析了各防治措施使用的化学药剂有效成分和剂型特点, 总结了生物药剂研发现状和发展方向, 可为水利工程白蚁防治药剂的研发应用提供借鉴。

2 水利工程白蚁防治措施药剂需求

2.1 白蚁预防措施 水利工程的白蚁预防主要是采取物理、化学等途径, 阻断白蚁的来源, 将白蚁阻

收稿日期: 2024-10-10; 网络首发时间: 2024-11-14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241112.1828.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3005501); 水利技术示范项目(SF-202406); 中国水科院基本科研业务费项目(GE0145B052024, GE0145B032021)

作者简介: 王伟(1990-), 博士, 工程师, 主要从事土工构筑物性能评估和堤坝白蚁防治方面研究。E-mail: wangw@iwhr.com

通信作者: 邓刚(1979-), 博士, 正高级工程师, 主要从事土的工程力学特性和土工数值模拟、堤坝白蚁防治等方面研究。E-mail: dggang@iwhr.com

隔在坝体之外，从而避免在堤坝内部形成巢穴系统。堤坝中白蚁的来源主要包括^[2,14-15]：

- (1) 兴建堤坝时，未彻底清除坝基内的白蚁群体，导致蚁害逐渐向坝体内部迁移；
- (2) 堤坝周边山体、丛林中的白蚁种群通过筑巢、修道逐渐向坝体内部蔓延；
- (3) 蚁源区白蚁群体的有翅成虫飞落到堤坝表面，经脱翅、配对后，在堤坝内部建立新的群体（堤坝白蚁的主要来源）；
- (4) 新建、改建、扩建和除险加固工程从土料场取土的过程中携带少量白蚁至堤坝。

白蚁预防中使用药物的环节集中在化学途经，即构筑各种形式的药土屏障^[11,16-17]，例如，在堤坝与山体结合处设置药土隔蚁墙；在堤坝与可能的蚁源区之间梅花状钻孔灌浆，形成药土防蚁带；在堤坝背水坡表面连续铺设药土防蚁层或防蚁薄膜，避免有翅成虫配对入土营建蚁巢。药土屏障利用药剂的胃毒、触杀、驱避、拒食等功能快速灭杀、驱赶白蚁，从而达到预防白蚁群体侵入堤坝的目的。

2.2 白蚁灭治措施 水利工程的白蚁灭治是指利用白蚁防治药剂的胃毒、触杀、熏蒸、生长调节等功能杀灭堤坝内单个或整巢白蚁，从而终止堤坝内部巢穴系统的发展（有的方法无法消除堤坝内部的巢穴系统）。涉及用药的灭治措施主要包括^[11,16,18]：

- (1) 饵剂诱杀。将饵剂投放至白蚁经常活动的区域，诱使白蚁取食并将药剂带回蚁巢，通过交哺等习性灭杀白蚁。
- (2) 喷粉灭杀。将药粉直接喷施在活体白蚁身上，白蚁沾染药剂后回到蚁巢，通过相互舔吮等习性杀灭白蚁。
- (3) 药物灌浆灭杀。将白蚁药剂与泥浆混合后灌入蚁巢，充填蚁巢并灭杀白蚁。
- (4) 药物烟熏灭杀。将白蚁药剂引燃产生烟雾后灌入蚁巢灭杀白蚁。
- (5) 监测-灭杀一体。监测白蚁活动的同时，对发现的白蚁喷施药粉或诱使白蚁携带有毒饵剂回到蚁巢，实现白蚁的同步灭杀。

2.3 白蚁防治药剂 白蚁防治药剂具有很强的专业性，不同防治途径对应不同的药物使用方法（即施药方式），可能包括涂抹、拌土、灌浆、喷粉、喷雾、毒饵、熏蒸、烟雾等^[11]；不同的使用场景对药剂的形式（即剂型）也有不同要求。防治中采用的药物均结合施用形式而配制为一定形式，即药剂，由有效成分（即药物或原药）和助剂构成。其中，有效成分指药剂中发挥主要效力的成分；助剂指药剂加工或使用过程中用于改善原药理化性质的辅助物质。

用在白蚁防治中的药剂主要包括化学药剂和生物药剂。根据《中华人民共和国农药管理条例》有关规定，白蚁防治药剂也属于“农药”管理范畴，实行农药登记、生产许可、经营许可制度。当前（截至2024年9月30日），根据上述规定在中国农药信息网（<http://www.icama.org.cn/zwb/dataCenter>）公示的、以白蚁为防治对象的农药登记证书共98份，包含17种有效成分、15种剂型和3个毒性等级，见图1。这些药剂除个别生物药剂（如依维菌素）外，绝大部分为化学药剂。

3 水利工程白蚁防治化学药剂

3.1 有效成分划分 按照有效成分，白蚁防治化学药剂可划分为^[10-11,19-20]：

- (1) 无机物，如三氧化二砷（俗称砒霜）、亚硝酸钠、硼酸锌、四水八硼酸二钠等。
- (2) 有机氯类，如灭蚁灵、氯丹、滴滴涕等（上世纪很长一段时间内，灭蚁灵和氯丹曾广泛用于我国白蚁预防和灭治，它们均属于持久性有机污染物，自我国签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》之后逐渐退出市场）。
- (3) 有机磷类，如毒死蜱、辛硫磷、三唑磷等。
- (4) 有机氟类，如氟虫胺、氟蚁腓等。
- (5) 拟除虫菊酯类，如联苯菊酯、氯菊酯、氯氰菊酯、顺式氯氰菊酯、氰戊菊酯、胺菊酯、右旋苯醚氰菊酯等。
- (6) 氯化烟碱类（即新烟碱类），如吡虫啉、噻虫嗪、噻虫胺、烯啶虫胺、氯啶虫胺等。

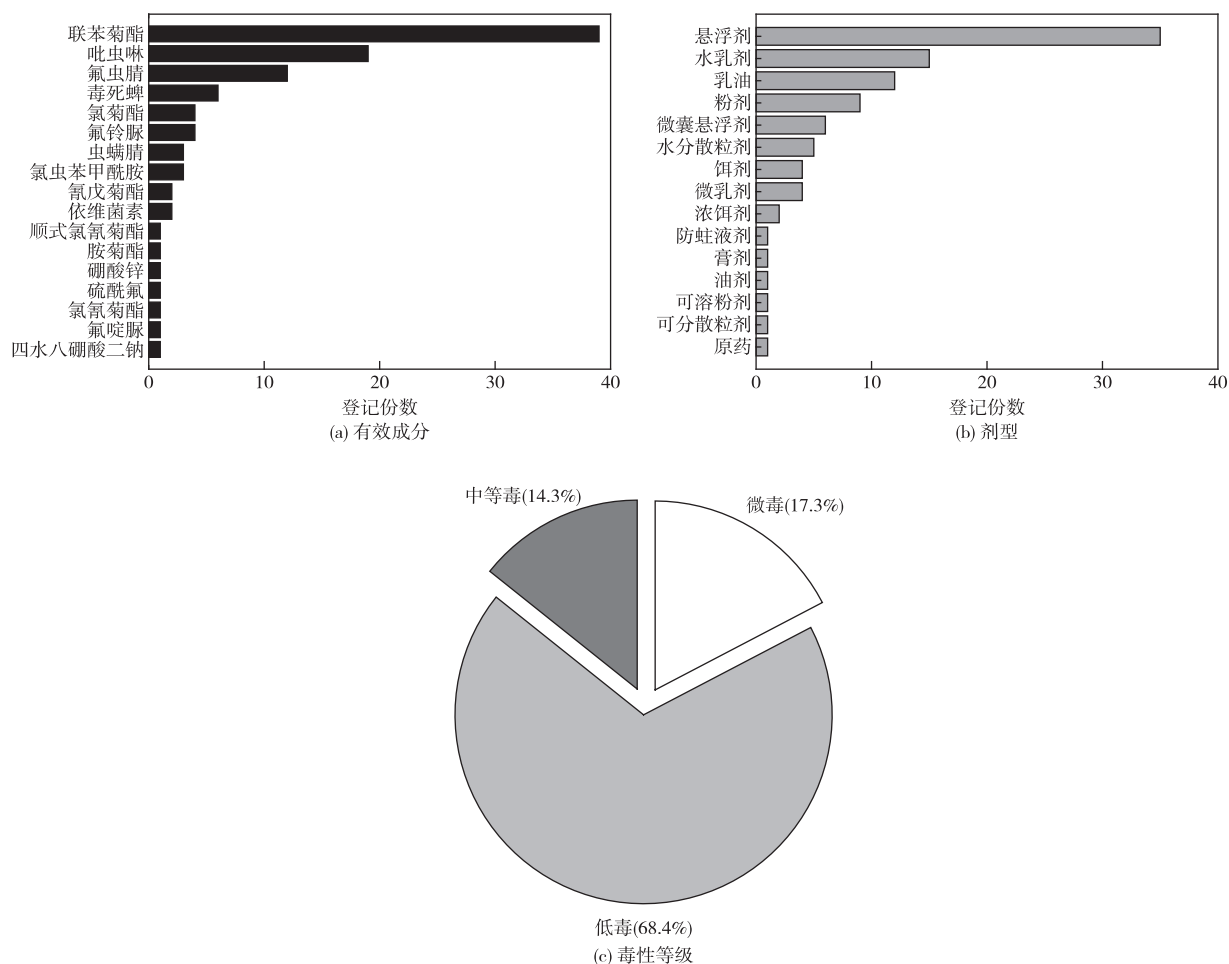


图 1 我国白蚁防治药剂登记情况
Fig.1 Registration status of termiticides in China

- (7) 吡咯类，如虫螨腈、溴虫腈等。
- (8) 吡啶类，如氟虫腈等。
- (9) 苯甲酰胺类(即生长调节剂)，如氟铃脲、氟啶脲、除虫脲等。
- (10) 苯甲酰胺类，如氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺等。
- (11) 氨基甲酸酯类，如仲丁威、克百威等。

2023 年 6 月 13 日，水利部印发的《水利工程白蚁防治工作指导意见》中明确提出，水利工程白蚁防治基本原则之一为“科技赋能、绿色安全”^[21]。遵循“绿色安全”的防治原则，所有白蚁防治药剂应首先满足以下性能需求：(1)低毒，即对人类、其他动植物等非靶标生物毒性较低；(2)低风险，即药剂环境风险较低，对空气、地表水、地下水和土壤污染较小。

用于药土屏障措施的药物一般要求：(1)对土栖白蚁驱避性好，或对土栖白蚁毒性强、药效快(即击倒速度快)；(2)持效期较长，即在施药后能较长时间保持药效。目前，国内采用的药物主要包括有机磷类(如毒死蜱、辛硫磷等)和拟除虫菊酯类(如联苯菊酯、氯氰菊酯、氰戊菊酯、氯菊酯等)。其中，有机磷类药物对人体的神经系统和肝脏代谢系统有严重损害作用；拟除虫菊酯类药物对鱼类和水生无脊椎动物有很大的毒性。由于药土屏障用药量大、施药范围广，使用上述药物难以满足低毒、低风险的需求。因此，水利工程中应尽量避免采用药土屏障，尝试使用和改良物理屏障。

用于药物灌浆法和药物烟熏法的药物应具有对土栖白蚁毒性强、药效快的特点。国内用于灌浆法的药物主要包括有机磷类(如毒死蜱)、拟除虫菊酯类(如联苯菊酯)、氯化烟碱类(如吡虫啉)和吡啶类(如氟虫腈)；用于烟熏法的药物主要包括拟除虫菊酯类(如氯氰菊酯、胺菊酯、右旋苯醚氰菊酯

等)和氯化烟碱类(如吡虫啉、噻虫胺等)。同样,由于用药量大,药物灌浆法存在与药土屏障措施相似的局限性。此外,烟熏法产生的烟尘会危害人类生命健康、污染空气,要求施药人员必须经过严格的技术培训,应用须谨慎。

用于饵剂诱杀法、喷粉法和监测-灭杀一体法的药物应具有如下性能:(1)对土栖白蚁无驱避性;(2)对土栖白蚁毒性弱、药效慢;(3)药物传递性好,即药物可较好地通过交哺、相互舔吮和食尸等白蚁生活习性在白蚁个体间传递;(4)持效期较长。目前,国内用于饵剂诱杀法的药物主要包括苯甲酰脲类(如氟铃脲、氟啶脲等)、吡啶类(如氟虫腈)和氯化烟碱类(如吡虫啉),其中应用最广泛的是苯甲酰脲类药物,能够抑制昆虫和其他节肢动物几丁质的合成,使其因无法完成蜕皮而死亡。一方面,苯甲酰脲类药物对于哺乳动物、鸟类和鱼类等脊椎动物(不用蜕皮)基本无毒;另一方面,苯甲酰脲类药物也存在杀灭整巢白蚁周期长、清巢能力较弱等问题。国内用于喷粉法和监测-灭杀一体法的药物主要包括拟除虫菊酯类(如氯氰菊酯)、吡啶类(如氟虫腈)和吡咯类(如虫螨腈),其中应用最广泛的是氟虫腈。该药物在浓度较低时具有较好的传递性,但因其对水生生物毒性较高而被限制使用。总的说来,饵剂诱杀法、喷粉法和监测-灭杀一体法用药量较少、施药范围精准可控,灭治白蚁过程对人类生命健康和生态环境的危害较小,是更为适合的方法。

3.2 剂型划分 剂型指将原药和助剂按一定比例调配后制成的药剂形态,白蚁防治药剂主要有乳油、悬浮剂、水乳剂、微乳剂、饵剂、粉剂、水分散粒剂、微囊悬浮剂、烟剂等剂型^[10-11,19]。

用于药土屏障法和药物灌浆法的剂型主要是乳油和悬浮剂,也包括水乳剂、微乳剂、水分散粒剂、微囊悬浮剂等。按照施药时药剂的分散状态,以上剂型又可分为两类,油珠悬浮于水中的悬乳液,包括乳油、水乳剂和微乳剂;固体颗粒悬浮于水中的悬浮液,包括悬浮剂、水分散粒剂和微囊悬浮剂。悬乳液的优点是渗透性良好的乳液使得药剂与土壤混合更充分、均匀;缺点包括,生产过程使用了大量的有机溶剂导致成本较高,在土壤中移动能力良好使得药剂容易在淋溶作用下污染深层土壤和地下水,施药过程中异味较重等。悬浮液的优点包括以水为连续相使得药剂浓度可以很高、在土壤中较差的移动能力使得药剂更加环保、微囊悬浮剂可通过缓慢释放药剂而延长持效期等;缺点是药剂颗粒较大导致其在土壤中的移动能力较差,不利于均匀施药。

用于药物烟熏法的剂型是烟剂。烟剂点燃后,有效成分以烟状分散悬浮于空气中,因此,烟剂类药剂的有效成分应耐高温、易挥发。从特性上看,拟除虫菊酯类药物比较适合制成烟剂。但是,我国已登记的白蚁防治药剂中尚不包含烟剂,主要原因是烟剂使用量太小。

用于诱杀法的剂型是饵剂。饵剂常由原药、饵料、防腐成分等组成,其中,饵料是对白蚁具有较好引诱力和适口性的纤维质材料,如纤维素粉末、松木木屑、构树木屑等。诱杀法须将饵剂投放至白蚁经常活动的区域,由于这些区域通常较为潮湿,为延缓饵剂在潮湿环境下的发霉、腐败,避免失去对白蚁的引诱力和适口性,通常须在饵剂中添加防腐成分。然而,防腐成分可能会引起白蚁拒食饵剂。因此,平衡药剂适口性与防腐变需求之间的矛盾成为饵剂研发面临的关键难题。

用于喷粉法的剂型是粉剂。粉剂由原药、填料、助剂等组成,制作过程中会产生大量粉尘,对环境污染较大,因此其登记受到国家严格控制。粉剂的填料多为高岭土、滑石粉等蓬松度较低的材料,存储过程中易受潮结块,导致无法顺利喷粉而失去灭杀功能。粉剂须直接喷施于活体白蚁身上才能达到灭杀蚁群的效果,且应遵循“多点少施”的喷施原则^[22],因此采用喷粉法灭治的前提是现场能够较容易地发现活体白蚁。

用于监测-灭杀一体法的剂型包括饵剂和粉剂。该方法将监测装置与饵剂(或粉剂)配合使用从而达到同时监测白蚁活动、灭杀白蚁群体的效果。监测-灭杀一体装置须长时间埋设在野外环境,饵剂霉变和粉剂结块问题,是其有效性的关键制约。此外,目前剂型为饵剂和粉剂的药剂登记数量均较少(共16种),且其有效成分为氟铃脲、氟啶脲、吡虫啉和氟虫腈等,存在单巢施药量大或灭杀效果不理想等问题。因此,亟需研发对白蚁驱避性弱、毒性弱、药效慢、持效期较长、传递性好、保质期长、对环境和非靶标生物安全友好的饵剂和粉剂。监测-灭杀一体法集成了蚁情监测与白蚁灭治功能,相较于传统诱杀法和喷粉法具有显著优势,是今后白蚁灭治措施的发展方向。为确保白蚁监测与灭治

的实时同步进行, 监测-灭杀一体装置内部须长期存储饵剂或粉剂, 这对饵剂和粉剂的耐久性提出较高要求。

4 水利工程白蚁防治生物药剂

4.1 研发现状 现有生物药剂一般利用植物、细菌、真菌、线虫、病毒和抗生素等预防或灭治白蚁^[13,23-25]。

利用植物的白蚁防治药剂相关研究包括: 将一些中草药植物, 如枫杨、博落回、曼陀罗、醉鱼草等, 制成烟剂熏杀黑翅土白蚁^[26]; 将特定植物的提取物制成白蚁防治药剂, 可达到驱避、毒杀或改变取食行为等效果^[27]。

利用细菌的白蚁防治药剂相关研究相对较少。近年来的报道包括: 苏云金芽孢杆菌、黏质沙雷氏菌和铜绿假单胞杆菌可在一个月內彻底杀灭多个白蚁种群的工蚁^[28]; 从蚁巢中分离出的、对鸡枞菌有强抑制性的伯克霍尔德菌, 能够显著抑制鸡枞菌的生长, 使黑翅土白蚁群体因缺失食物来源而无法正存续^[29]。

利用真菌的白蚁防治药剂相关研究较多。已发现对白蚁具有致病作用的真菌不少于 20 种, 金龟子绿僵菌是其中的代表, 效果、经济性和安全性较为理想。此外, RNA 干扰抑制剂能够显著降低白蚁抗菌活性, 进而提升感染金龟子绿僵菌白蚁的死亡率^[13]。

利用线虫的白蚁防治药剂相关研究不多。1916 年, 研究者首次在台湾乳白蚁 *Coptotermes formosanus* 头部发现对白蚁有致病作用的线虫^[25]。室内试验表明, 斯氏线虫属和异小杆属的一些品系对黑翅土白蚁具有很好的控制作用。然而, 线虫制剂药效慢、使用复杂, 白蚁防治效果往往仅限于室内试验^[30]。

利用病毒的白蚁防治药剂相关研究较少, 局限于个别病毒的室内试验, 尚未开展野外试验。制约病毒类防治技术发展的主要原因是病毒本身容易受环境温湿度影响、病毒繁殖容易受活体宿主的限制及研发成本高等^[25]。

特别的, 利用抗生素的白蚁防治药剂研究发现, 一些通过微生物发酵获得的抗生素(如大环内酯类药物依维菌素和阿维菌素)对白蚁具有良好的触杀效果。其中, 有效成分为依维菌素的白蚁防治药剂是已取得登记的唯一生物药剂。需要注意的是, 依维菌素在野外的有效浓度往往远高于室内试验^[31]。

4.2 发展方向 白蚁防治化学药剂对人、动物和植物的危害不容忽视, 且存在污染环境的风险; 生物药剂具有对病虫害选择性强、对人畜毒性低以及自然降解速度快等特点。既有生物药剂研究还主要局限在实验室内, 缺乏合理的验证实验; 另一方面, 在持效期和药效方面存在一定局限性, 亟需按照“绿色安全”防治原则, 研发高效、绿色、安全的生物药剂。

致病微生物(如细菌、真菌、线虫、病毒等)杀灭白蚁的效果对环境因素(如温度、湿度、二氧化碳浓度、酸碱度、光照等)十分敏感。例如, 白蚁巢内二氧化碳浓度较高时, 对绿僵菌的生长具有抑制作用^[13]。室内实验室的环境状态相对恒定, 与野外实际情况存在很大差异, 而现有生物药剂研究普遍停留在室内试验阶段。因此, 在与野外环境相近的条件下开展试验, 是研发实用性良好的生物药剂的先决条件之一。

生物药剂在持效期和药效方面常存在一定局限性。持效期方面, 生物药剂的稳定性容易受外界条件的影响, 导致生物药剂的持效期往往比化学药剂短。例如, 阿维菌素暴露在自然环境中数小时内就会完全光解或被土壤中的微生物分解, 药效消失^[32]。药效方面, 白蚁是一种社会性昆虫, 能够利用行为免疫和生理免疫共同抵御致病微生物的侵染, 使得微生物药剂的药效显著降低。例如, 在绿僵菌的试验中, 用致死浓度的孢子悬浮液处理具有不同个体数量的白蚁群体时, 白蚁群体存活率随着其个体数量的增加而上升^[33]。延长持效期、提高药效, 是生物药剂研发中面临的两个难题。避免长期单一用药^[32]、改进剂型^[34]等是延长药剂持效期的可选解决方案。

从中草药和植物提取物中筛选出的白蚁防治药剂属于天然杀虫剂, 具有环境友好、易降解、低残留等特点^[35-36]。相较于利用白蚁致病微生物研制白蚁防治药剂, 直接筛选天然药剂可能是获得白蚁防

治药剂的另一条重要途径。

5 结语

本文介绍了水利工程中涉及用药的白蚁预防和灭治措施，分析了现有化学药剂有效成分和剂型在各措施中的适用性，调研了生物药剂的研发现状和发展方向。

目前我国农药登记中的既有药剂与“科技赋能、绿色安全”的要求还有一定距离。

既有白蚁防治化学药剂主要包括虫螨腈、氟铃脲、氟啶脲、氯虫苯甲酰胺等，部分药剂存在难以灭巢、适口性差等问题，部分药剂在露天环境下易发霉腐败、受潮结块，导致药效丧失，同时，也不易与现有监测设备等做到较好协同工作。需要更好适应饮用水水源和水生生物保护要求，研发满足高效、低毒、低残留、环境友好等要求的化学药剂，亟需突破适用于监测-杀灭一体法的高耐久性饵剂和粉剂。

既有白蚁防治生物药剂主要以依维菌素为代表，杀灭效果对环境要求高，现场稳定性、持效期较实验室环境有一定距离。需要更好满足白蚁喜食、持效性和传递性好，对水体和土壤环境以及水生生物安全友好等要求，加快研发并试用新型生物药剂，亟需扩大有效成分获取来源，开展合理的验证实验，突破现有生物药剂在持效期和药效方面的局限性。

参 考 文 献：

- [1] 李栋. 堤坝白蚁[M]. 成都：四川科学技术出版社，1989. (LI Dong. Termites in Embankments and Dams [M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 1989. (in Chinese))
- [2] 严国璋，李俊辉. 堤坝白蚁及其防治[M]. 武汉：湖北科学技术出版社，2001. (YAN Guozhang, LI Junhui. Termites in Embankments and Dams and Their Prevention and Control[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [3] 李国英. 水利工程白蚁等害堤动物危害及防治调研报告[J]. 中国水利，2023(15)：1-5. (LI Guoying. Research report on the harm and prevention of termites and other pests to embankments in hydraulic engineering[J]. China Water Resources, 2023(15)：1-5. (in Chinese))
- [4] 温续余，张雨豪，季祥. 《水利工程白蚁防治技术指南(试行)》解读[J]. 中国水利，2023(15)：9-12. (WEN Xuyu, ZHANG Yuhao, JI Xiang. An interpretation of technical guidelines for termite prevention and control of water structures (Trial)[J]. China Water Resources, 2023(15)：6-8. (in Chinese))
- [5] 邓刚，李维朝，张茵琪，等. 堤坝白蚁巢穴探测技术的现状和展望[J]. 中国水利，2023(15)：13-18. (DENG Gang, LI Weichao, ZHANG Yinqi, et al. Current state and prospects of detection technology for termite nests in embankments and dams[J]. China Water Resources, 2023(15)：13-18. (in Chinese))
- [6] 姚秋玲，丁留谦，刘昌军，等. 堤基管涌破坏特性研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2014，12(4)：349-357. (YAO Qiuling, DING Liuqian, LIU Changjun, et al. Overview on the research of the mechanism of backward erosion piping in dike foundations[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4)：349-357. (in Chinese))
- [7] 黄立群，冉海林，跑热干. 土坝在设计和运行中防治白蚁危害的研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2015，13(4)：290-294. (HUANG Liqun, RAN Hailin, PAO Regan. Research of preventing termite damage during design and operation of the earth dam[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(4)：290-294. (in Chinese))
- [8] 苏忠辉，叶乃虎，庞立强. 广东省水利工程白蚁防治技术与策略研究[J]. 中国水利，2023(15)：23-26. (SU Zhonghui, YE Naihu, PANG Liqiang. Research on termite prevention techniques and strategies for water structures in Guangdong Province[J]. China Water Resources, 2023(15)：23-26. (in Chinese))
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 白蚁防治工程基本术语标准：GB/T 50768[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Develop-

- ment of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for basic terminology of termite control project: GB/T 50768[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [10] 李培光, 隋贺, 刘继东, 等. 我国白蚁防治农药登记现状及展望[J]. 中华卫生杀虫药械, 2022, 28(2): 188-190. (LI Peiguang, SUI He, LIU Jidong, et al. Current situation and prospect of pesticide registration for termite control in China[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2022, 28(2): 188-190. (in Chinese))
- [11] 陈振耀, 姚达长. 水利白蚁防治[M]. 广州: 中山大学出版社, 2011. (CHEN Zhenyao, YAO Dachang. Termite Control on Water Resources[M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 2011. (in Chinese))
- [12] 马巍, 李必琼, 杨凡, 等. 抚仙湖北岸生态调蓄带工程入湖污染物减排效益核算[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(2): 129-137, 148. (MA Wei, LI Biqiong, YANG Fan, et al. Estimation of the benefit of reducing pollutants into lake for the ecological storage zone project in the north shore of Fuxian Lake Basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(2): 129-137, 148. (in Chinese))
- [13] 黄求应, 李刚华, 刘龙, 等. 堤坝白蚁习性规律及其生物防治技术研究进展[J]. 中国水利, 2023(15): 54-59, 53. (HUANG Qiuying, LI Ganghua, LIU Long, et al. Advances in rules of living habits and technologies of biological control on termites in dams and embankments[J]. China Water Resources, 2023(15): 54-59, 53. (in Chinese))
- [14] 帅移海, 蔡新辉. 土坝白蚁来源及防治对策[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 183-184. (SHUAI Yihai, CAI Xinhui. Research on source and prevention countermeasures of termite for earth dams[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 183-184. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国水利部. 水利工程白蚁防治技术指南(试行)[S]. 北京: 中华人民共和国水利部办公厅, 2023. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical guidelines for termite control of water resources projects(Trial version)[S]. Beijing: General Office of the Ministry of Water Resources, 2023. (in Chinese))
- [16] 莫建初. 堤坝白蚁防治技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. (MO Jianchu. Techniques for Termite Control in Embankments and Dams[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese))
- [17] 刘向阳. 堤坝白蚁防治技术探讨[J]. 中华卫生杀虫药械, 2011, 17(3): 237-240. (LIU Xiangyang. Discussion on techniques for termite control in embankments and dams[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2011, 17(3): 237-240. (in Chinese))
- [18] 李为众, 熊强, 刘超华, 等. 我国白蚁监测控制技术的现状与展望[J]. 中华卫生杀虫药械, 2015, 21(5): 520-522. (LI Weizhong, XIONG Qiang, LIU Chaohua, et al. Current situation and prospect of termite monitoring and control technology in China[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2015, 21(5): 520-522. (in Chinese))
- [19] 尹红, 宋晓钢, 莫建初. 我国白蚁防治药剂应用现状及发展趋势探讨[J]. 中华卫生杀虫药械, 2013, 19(3): 182-186. (YIN Hong, SONG Xiaogang, MO Jianchu. Investigation of the present status of the usage and development trend of termiticides in China[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2013, 19(3): 182-186. (in Chinese))
- [20] 杨志兰, 金纯哲, 贾正平, 等. 白蚁化学防治药剂的研究进展[J]. 中华卫生杀虫药械, 2023, 29(1): 79-82. (YANG Zhilan, JIN Chunzhe, JIA Zhengping, et al. Research advances on chemicals in termite control[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2023, 29(1): 79-82. (in Chinese))
- [21] 张文洁. 全面推动水利工程白蚁防治工作向制度化、专业化、常态化转变——《水利工程白蚁防治工作指导意见》解读[J]. 中国水利, 2023(15): 6-8. (ZHANG Wenjie. Comprehensively promoting institutionalization, professionalization, and normalization of termite prevention and control of water structures——an interpretation of guiding opinions on termite prevention and control of water structures[J]. China Water Resources, 2023(15): 6-8. (in Chinese))
- [22] 何芳婵, 史新伟, 吕正勋. 堤坝白蚁防治技术应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2019. (HE Fangchan, SHI Xinwei, LÜ Zhengxun. Application of Termite Control Technology in Embankments and Dams[M]. Zheng-

- zhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2019. (in Chinese))
- [23] 张向辉, 彭心赋, 左伟东, 等. 我国白蚁生物防治研究进展[J]. 中华卫生杀虫药械, 2008(4): 297-299. (ZHANG Xianghui, PENG Xinfu, ZUO Weidong, et al. Research progress on biological control of termites in China[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2008(4): 297-299. (in Chinese))
 - [24] 刘军, 王世伟, 赵凯, 等. 白蚁的生物防治现状与研究进展[J]. 微生物学杂志, 2010, 30(2): 91-94. (LIU Jun, WANG Shiwei, ZHAO Kai, et al. Status quo and advances in bio-controlling termites[J]. Journal of Microbiology, 2010, 30(2): 91-94. (in Chinese))
 - [25] 徐冬, 宋晓钢, 阮冠华. 白蚁生物防治发展现状分析[J]. 中华卫生杀虫药械, 2013, 19(3): 244-246. (XU Dong, SONG Xiaogang, RUAN Guanhua. Current research progress in bio-control against termites[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2013, 19(3): 244-246. (in Chinese))
 - [26] 梁修山, 徐光宇, 章立新. 常见六种农药植物自制烟剂熏杀黑翅土白蚁的试验研究[J]. 白蚁科技, 1999(3): 11-12. (LIANG Xiushan, XU Guangyu, ZHANG Lixin. Experimental study on fumigation of *Odontotermes formosanus* with self-made smoke agents from six common pesticide plants[J]. Termite Science and Technology, 1999(3): 11-12. (in Chinese))
 - [27] 刘炳荣, 钟俊鸿, 宗元. 植物提取液防治白蚁的研究进展[J]. 林业实用技术, 2008(6): 25-27. (LIU Bingrong, ZHONG Junhong, ZONG Yuan. Research progress on the control of termites with plant extracts[J]. Practical Forestry Technology, 2008(6): 25-27. (in Chinese))
 - [28] CULLINEY T W, GRACE J K. Prospects for the biological control of subterranean termites (Isoptera: rhinotermitidae), with special reference to *Coptotermes formosanus*[J]. Bulletin of Entomological Research, 2000, 90(1): 9-21.
 - [29] 莫建初, 周琪欢, 朱娅宁, 等. 一种伯克霍尔德菌及其在黑翅土白蚁生物防治中的应用: 中国, 202210030478.3[P]. 2023-03-24. (MO Jianchu, ZHOU Qihuan, ZHU Yaning, et al. A kind of *Burkholderia* and its application in biological control of *Odontotermes formosanus*: 202210030478.3[P]. Zhejiang Province, 2023-03-24. (in Chinese))
 - [30] 陈志谊. 微生物农药在植物病虫害防治中的应用及发展策略[J]. 江苏农业科学, 2001(4): 39-42. (CHEN Zhiyi. Application and development strategies of microbial pesticides in plant pest control[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2001(4): 39-42. (in Chinese))
 - [31] 林雁, 郭红, 张悦, 等. 阿维菌素类似物对白蚁生物防治研究概述[J]. 中华卫生杀虫药械, 2012, 18(6): 465-470. (LIN Yan, GUO Hong, ZHANG Yue, et al. Advance and summaries in abamectin analogues and termites biological control research[J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 2012, 18(6): 465-470. (in Chinese))
 - [32] 韩林. 阿维菌素及其在果树害虫防治中的应用[J]. 山西果树, 2007(1): 39-40. (HAN Lin. Avermectin and its application in pest control of fruit trees[J]. Shanxi Fruits, 2007(1): 39-40. (in Chinese))
 - [33] 张秋. 绿僵菌毒素的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30): 15077-15079. (ZHANG Qiu. Research progress of *metarhizium anisopliae destruxin*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(30): 15077-15079. (in Chinese))
 - [34] 肖丽娜, 高成龙, 黄华毅, 等. 我国蚂蚁和白蚁防治农药登记现状与展望[J]. 农药科学与管理, 2024, 45(3): 1-6. (XIAO Lina, GAO Chenglong, HUANG Huayi, et al. Current status and prospects of registered pesticide for ant and termite management in China[J]. Pesticide Science & Administration, 2024, 45(3): 1-6. (in Chinese))
 - [35] 伊可儿, 林捷, 叶功富, 等. 树木提取液对白蚁的忌避活性初探[J]. 中国生态农业学报, 2005(2): 56-58. (YI Keer, LIN Jie, YE Gongfu, et al. A primary study on the repellent activities of tree extracting solution against white ants[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005(2): 56-58. (in Chinese))
 - [36] 刘树民, 罗明媚, 杜心懿, 等. 细辛挥发油对桫欏散白蚁毒效作用[J]. 中药材, 2006(6): 539-541. (LIU Shumin, LUO Mingmei, DU Xinyi, et al. Toxic effects of *Asarum* volatile oil on *Reticulitermes speratus* in northern habitats[J]. Journal of Traditional Chinese Medicinal Materials, 2006(6): 539-541. (in Chinese))

Current state and prospect of termiticides in hydraulic engineering

WANG Wei^{1,2,3}, DENG Gang^{1,2,3}, ZHANG Yinqi^{1,2,3}, YAN Jun^{1,2,3},
PEI Dongdong^{1,2,3}, LI Weichao^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Key Laboratory of Construction and Safety of Water Engineering of Ministry of Water Resources, China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Key Laboratory of Termite Control of Ministry of Water Resources, China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Termite is one of the main insect pests damaging dykes, and it poses significant safety hazards to the normal operation of embankments and dams. In this study, termiticide application measures for termite prevention and elimination in hydraulic engineering were systematically introduced. The performance characteristics of active ingredient and dosage form of chemical termiticides for these measures were then fully analyzed. Finally, the current state and prospect of biological termiticides were briefly discussed. Given the fact that applying termiticides is one of the most important ways of performing termite prevention and elimination in hydraulic engineering, further research and development of bait- and dust-type termiticides with relatively high durability are needed for monitoring-killing methods, and the channel for obtaining active ingredients of biological termiticides should be expanded.

Keywords: hydraulic engineering; termite control; chemical termiticide; biological termiticide; active ingredient; dosage form

(责任编辑: 祁 伟)

(上接第 111 页)

Laboratory experimental study on passive acoustic wave detection technology of subterranean termite nests

CHENG Senhao^{1,2,3}, DENG Gang^{1,2,3}, HOU Weiya^{1,2,3}, ZHANG Yanyi^{1,2,3},
ZHANG Yinqi^{1,2,3}, LI Weichao^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Key Laboratory of Construction and Safety of Water Engineering of Ministry of Water Resources, China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Key Laboratory of Termite Control of Ministry of Water Resources, China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Termite nesting in embankments poses a significant threat to dam safety. Finding accurate nest location is a critical prerequisite for effective mitigation. In a laboratory setting, pulse signals emitted by the nests of *Macrotermes barneyi* and *Odontotermes formosanus* were collected, with pre-attenuation signal amplitudes of 0.075 m/s² and 0.015 m/s², respectively. The pulses exhibited distinct intervals, with each lasting approximately 0.01 s, allowing for recognition through programming. Four sensors were arranged non-collinearly around the nest, capturing pulse signals between 100 Hz and 1000 Hz. By marking the identical peaks in the signals collected by different sensors and using the time differences of signal arrival at each sensor, the nest location can be determined with an error margin smaller than the nest diameter. Following the approach of the laboratory experiment, multiple sensors can be deployed near termite nests in embankments. By measuring the vibration signals from the termite nests, it is expected that accurate nest location can be achieved.

Keywords: subterranean termite; termite nest; acoustic wave pulse; detection and positioning; laboratory experiment

(责任编辑: 祁 伟)