

小浪底水利枢纽土栖白蚁分飞试验

严军¹, 宋康杰¹, 徐海帆¹, 雷宏军¹, 蔡勤学²

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 黄河水利水电开发集团有限公司, 河南 济源 459017)

摘要:白蚁分飞是其种群扩散的重要途径, 但土栖白蚁的分飞条件和分飞距离等定量规律尚不明确, 而这些定量规律对小浪底水利枢纽的白蚁防控至关重要。为明确大坝区域内土栖白蚁的分飞条件与分飞距离, 2019年5月9日至6月20日开展了现场试验。分析表明: 分飞时间多在4月下旬至6月下旬的傍晚18时至晚上20时四十分左右, 分飞需温度 $\geq 24^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $\geq 45\%$, 较低的风速适合土栖白蚁的分飞繁殖, 持续60分钟以上的中到大雨是土栖白蚁成熟巢分飞的关键条件; 大坝北岸2个成熟巢的有翅成虫分飞距离为30~1370m。该试验成果可为小浪底水利枢纽土栖白蚁的综合防治提供理论依据。

关键词:小浪底水利枢纽; 土栖白蚁; 分飞条件; 分飞距离

Split-flight test of soil-dwelling termites in Xiaolangdi Water Conservancy Center

YAN Jun¹, SONG Kangjie¹, XU Haifan¹, LEI Hongjun¹, CAI Qinxue²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, 450046, China;

2. Yellow River Water Conservancy and Hydropower Development Corporation, Jiyuan, 459017, China)

Abstract: Termite splitting is an important pathway for termite population expansion, but quantitative laws such as the splitting conditions and splitting distance of soil-dwelling termites, which are crucial for termite prevention and control in Xiaolangdi Water Conservancy Center, are not clear. To clarify the splitting flight conditions and splitting distance of soil-dwelling termites in the dam area of Xiaolangdi Water Conservancy Center, field experiments were carried out from May 9 to June 20, 2019. The analysis showed that: the split-flying time was mostly around 6:00 pm to 8:40 pm from late April to late June, the temperature $\geq 24^{\circ}\text{C}$ and humidity $\geq 45\%$ were needed for the split-flying, the lower wind speed was suitable for the split-flying and reproduction of soil-dwelling termites, and the duration of moderate to the heavy rain of more than 60 minutes was the key condition for the split-flying of the mature nests of the soil-dwelling termites, and the distance of the split-flying of winged adults from two mature nests at the north bank of the dam was 30 ~ 1370 m. The test results can provide a theoretical basis for the integrated control of soil-dwelling termites in Xiaolangdi Water Conservancy Center.

Keywords: Xiaolangdi Water Conservancy Center; soil-inhabiting termite; splitting conditions; splitting distance

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U2243220); 华北水利水电大学水利工程学科水利工程创新型科技团队培育项目 (No. CXTDPY-9)。

作者简介: 严军 (1971—) 男, 教授, 博士, 从事水力学及河流动力学方面的研究。E-mail: yanjun@ncwu.edu.cn。

通信作者: 宋康杰 (1999—) 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学方面的研究。E-mail: songkjie@163.com。

“千里之堤，溃于蚁穴”。堤坝白蚁是造成我国土石堤坝决堤垮坝的重要原因之一：2007年，广东水利部门调研发现，我国南方省份建成超过15年的河堤和水库坝中，有90%~100%受到白蚁侵害，约20%的堤坝因白蚁修筑蚁道穿堤导致渗漏^[1]；2016年汛期，安徽沿江圩区遭受重大洪涝灾害，部分堤防段出现了多处跌窝、渗漏等严重险情，其中圩区堤防跌窝主要由白蚁打孔筑巢引起^[2]；2015年和2020年洪水期间，滁河支流堤防发生管漏、渗漏、塌方、滑坡等险情131处，其中80%的险情与白蚁危害有关^[3]。土栖白蚁在堤坝内部修筑巢穴和蚁道，导致渗漏、塌窝等险情，严重时甚至引发堤坝垮塌，对水利工程安全运行造成重大隐患。近年来，随着全球变暖的加剧，白蚁分布范围逐渐北移，造成北方多地水库、水坝发生险情，如河南省平顶山市的白龟山水库、郟县孟沟水库，安徽定远县岗王水库等。因此，加强和规范白蚁防治已成为一项刻不容缓、关系水利工程安危的重要工作^[4]。

小浪底水利枢纽位于河南省济源市与洛阳市孟津区之间，上距三门峡大坝130km，下距西霞院水库16km，地处黄河中游豫晋峡谷出口处，该枢纽控制流域面积69.4万km²，占黄河总流域面积的92.2%，是治理开发黄河的关键性工程，具有极高的战略地位和重要的经济效益。其周边白蚁主要为黑翅土白蚁和圆唇散白蚁，其中黑翅土白蚁属于土栖性白蚁，对河堤和水库的危害最为严重，是坝区防控的重点对象。小浪底枢纽位于北纬34.9°，主坝为壤土斜心墙堆石坝，该区域气候温湿、山峦起伏、丛林茂密，为土栖白蚁生存提供了必需的土壤、水源和食料，适宜其繁衍和扩散^[5]。面对广泛的白蚁防控区以及防治上的重重困难和挑战，对小浪底坝区实施有效的白蚁防治措施显得尤为迫切与关键。

自十八大以来，习近平总书记基于对未来发展的总体考量，对全面开展水利工程白蚁等害堤动物防治工作方案作出了重要批示。2023年4月16日，水利部发布了《关于做好水利工程白蚁等害堤动物隐患应急整治工作的通知》和《关于印发〈贯彻落实习近平总书记重要批示 全面开展水利工程白蚁等害堤动物防治工作方案〉通知》。水利部部长李国英于4月17日至19日赴湖北省长江干支流堤防和河北省卫运河堤防对害堤动物进行实地调研^[6]。5月29日，水利部党组书记、部长李国英主持召开部务会议，强调需从水利工程白蚁隐患防治全链条出发，健全完善制度规范标准定额，强化白蚁习性规律基

础研究，攻克白蚁防治关键技术，积极研发运用新装备，全面提升水利工程白蚁隐患防治能力和水平。

分飞传播是白蚁种群扩散迁移的主要途径，因此，深入了解白蚁分飞规律能够有效防范白蚁入侵堤坝。已有研究对白蚁分飞条件进行了深入探讨，如：李功春等^[7]通过监测武汉市黑胸散白蚁分飞，发现当4月份的最低气温在15℃以上、最高气温在25℃以上、气压在1010 hPa以下、空气相对湿度在80%以上时，有利于黑胸散白蚁有翅成虫分飞；方艳莹等^[8]收集整理宁波城区白蚁灭治记录，分析得出在日平均气温为17~21℃、平均气压为1010~1016 hPa时有利于散白蚁分飞，风速与白蚁分飞频率有弱相关性，相对湿度、日照和降水对白蚁分飞影响较小；于仲吾等^[9]通过观察记录得到黑翅土白蚁最佳分飞期在4~6月份温度高（日均气温22℃）、湿度大（水汽压22 hPa）、气压低（1004 hPa）、微风（2.5m/s以下）的傍晚。以上多数研究集中于对房屋和树木造成严重危害的散白蚁，而对堤坝造成危害的土栖性白蚁的分飞条件研究相对不足。此外，对土栖白蚁分飞距离的研究也有所进行，如：张贞华和郇培尧^[10]利用放射性同位素碘-131研究黑翅土白蚁活动规律，发现其巢群活动范围最大可达69750cm²；石锦祥等^[11]认为海南土白蚁有翅成虫飞行高度为10~30m、移动距离为50~400m；潘柏康^[12]发现土栖白蚁有翅成虫的移动距离128~600m。以上研究地区多为南方，对于北方地区土栖白蚁分飞条件与分飞距离等定量规律尚不明确。

小浪底枢纽位于我国白蚁分布的北区，当地气候、植被条件、堤坝表面和周边环境与广州等南方地区存在显著差异。因此，有必要在小浪底水利枢纽开展现场试验，以观察和收集当地土栖白蚁分飞数据，明确土栖白蚁分飞条件与分飞距离等定量规律，为小浪底水利枢纽大坝白蚁防控提供基础数据，同时也为白蚁防治管理和决策提供科学依据。

1 试验设计

现场试验借鉴昆虫迁飞荧光喷漆标记-释放-回收确认的经典方法^[13-14]。采用示踪法^[15]测定土白蚁分飞距离，并监测白蚁分飞期间的温度、湿度、风向和风速等环境参数。在分飞期，对土栖白蚁进行实地观测，当有翅成虫出窝大量聚集时，对其翅膀进行荧光喷漆标记，并利用GPS技术精确记录分飞孔和成虫翅膀收集点位置。通过对带有标记的成虫翅膀进行分析，确定其最远分飞距离。土栖白蚁分飞试验的具体流程如图1所示。



图 1 土栖白蚁分飞试验流程图

1) 试验仪器

试验仪器有佳明高精度 GPS 面积测量仪(见图 2)和蔡司 Axioplan 2 imaging MOT (见图 3)。佳明高精度 GPS 面积测量仪用于记录每个收集点的位置, 蔡司 Axioplan 2 imaging MOT 用于室内检测成虫翅膀是否具有荧光标记。



图 2 佳明高精度 GPS 面积测量仪

2) 搜寻分飞孔

根据以往的研究经验^[16-18], 白蚁分飞孔通常位于巢穴的外围且离主巢较近, 由工蚁负责开掘和维护, 连接巢穴内部与外部环境。这些分飞孔的存在使有翅成虫能够在适宜的条件下顺利完成分飞行为。本试验自 4 月起在小浪底水利枢纽大坝、生活区以及黄河堤坝等试验场地, 系统搜寻白蚁分飞孔

并用带有红色油漆标记的竹签进行标记, 如果条件许可, 至少标记 10 巢以上。



图 3 蔡司 Axioplan 2 imaging MOT

3) 定位标记

在前期调查中, 研究人员已在小浪底大坝周边巡查获得 4 处疑似土栖白蚁主巢。评估上述 4 处疑似土栖白蚁主巢在本年度是否存在分飞现象, 结果表明, 这 4 处主巢不适合用于分飞试验。主要原因如下: 小浪底地区连续 1 个月未降雨, 导致土栖白蚁几乎无活动迹象; 其次, 这 4 个巢穴均位于山窝中、周边植被茂密, 不利于进行灯诱试验的设计。从 2019 年 5 月 9 日至 5 月 19 日, 调查过程中另行发现了其他 4 处土栖白蚁分飞孔痕迹, 疑似主巢并对巢位进行了标记。

4) 选定分飞试验地点

2019 年 5 月 12 日, 研究团队在黄河小浪底水利枢纽以南北坝头为中心、直径 1km 范围内开展了黑翅土白蚁群体的调查。截至 5 月底, 调查共发现 6 处黑翅土白蚁分飞孔群, 具体位置如下: 大坝北岸的武警二中队五支队营房餐厅前后(点 1, 112°367' E, 34°939' N), 大坝北岸的桐树岭村渔具店(点 2, 112°368' E, 34°941' N), 小卖部前后的水泥地(点 3, 112°369' E, 34°944' N), 大坝下游公园景区内高处的 55 号诱集灯下(点 4, 112°400' E, 34°921' N)、大坝南岸山坡林地(点 5, 112°367' E, 34°916' N)、大坝南岸云顶山山崖(点 6, 112°367' E, 34°914' N)。由于大坝北岸武警营房餐厅和桐树岭村渔具店两处土白蚁分飞孔附近视野开阔, 无树木遮挡且附近光源可控, 因此选定为试验研究地点。

5) 监测气候

在试验场地设置小型气候监测仪, 用于观察大气、土壤温度和湿度变化, 并按常规气象监测要求记录各种气候数据。同时, 收集小浪底水利枢纽区

域历史气候资料，并与此前发表的土栖白蚁（黑翅土白蚁）分飞气候条件进行拟合，确定巢群出飞的大致日期。在现场密切关注分飞孔中白蚁有翅成虫活动情况，判断当天是否会进行出飞。

6) 成虫标定

通过进一步完善 Forchler^[13]的标记方法，本试验采用微量荧光标记技术对成虫翅膀进行标记，并使用荧光显微镜检测标记情况，以分析土栖白蚁分飞距离，为防控土栖白蚁分飞提供理论基础。为防止各巢的有翅成虫相互混淆，对各分飞孔采用不同颜色的荧光喷漆。荧光喷漆标记操作简单、染色和探测方便、具有持久的标记信号，对有翅成虫的生存率和飞行能力无明显影响，但在使用荧光喷漆时应注意喷漆的使用距离和喷漆的使用量，避免使用不当造成标记不均匀和质量过重^[19]。本试验从距有大量有翅成虫汇集的分飞孔约 60 厘米高、30 厘米远的角度进行手动喷荧光漆，每次喷涂持续一秒钟，每个分飞孔重复喷洒三次，以确保荧光漆附着在成虫翅膀上。具体操作中，桐树岭村渔具店处使用黄色荧光喷漆，武警营房餐厅处使用红色荧光喷漆。

7) 成虫回收

在 2019 年 6 月 5 日分飞孔处有翅成虫分飞后和次日，分别在试验场的诱集灯下收集黑翅土白蚁脱落的翅膀，每个收集点在 1m×1m 的范围内收集所有白蚁翅膀。在 1m²上使用 GPS 面积测量仪记录每个翅膀收集点位置至分飞孔的距离，并启用佳明高精度 GPS 面积测量仪的平均计算功能对各收集点进行 10 次定位，以提高测量精度。将收集到的成虫翅膀在 27℃抽湿条件下干燥 48 小时，并利用蔡司 Axioplan 2 imaging MOT 检测每片翅膀是否具有荧光标记^[14]，随后统计数量并分析数据。

2 结果分析

2.1 分飞位置和时间

有效标记并适合用于分飞试验观察的两处待飞分飞孔分别为：分飞孔 1---①桐树岭村渔具店处，与小浪底大坝北端直线距离 1200m(见图 4：112°368' E, 34°941' N)；分飞孔 2---②武警营房餐厅处，与小浪底大坝北端直线距离 915m(见图 4：112°367' E, 34°939' N)。上述两处待飞分飞孔与小

浪底大坝北端终点正好处于一直线上，分飞孔 2 位于分飞孔 1 与小浪底大坝北端终点之间。

两处分飞孔内的有翅成虫群体于 2019 年 6 月 5 日傍晚大量分飞。具体时间如下：桐树岭村渔具店处分飞孔内的有翅成虫于 17:40 左右开始飞出，18:00 少量飞出，18:30 开始大量飞出，19:55 停止飞出；武警营房餐厅处分飞孔内的有翅成虫于 19:15 开始飞出，19:30 大量飞出，20:10 左右停止飞出。

2.2 分飞条件

小浪底水利枢纽白蚁分飞试验于 2019 年 5 月 16 日开始，持续至 2019 年 6 月 20 日。监测期间，记录到土栖白蚁分别于 2019 年 6 月 5 日和 2019 年 6 月 20 日进行了大规模和小规模分飞。

2019 年 6 月 5 日，大气条件为阴天、5 级西北风。当日 13 点至 15 点间，大雨逐渐转为小雨并间歇性持续。傍晚时分，桐树岭村和武警营房处的分飞孔开放，分别于 17:40 和 19:15 开始分飞，分飞时段大气温度为 24℃，湿度为 69%，东南风 1 级，风速为 0.3m/s。2019 年 6 月 20 日，天气从 15 点开始出现中雨转小雨，时断时续，至 20 点转为小雨，期间土栖白蚁进行了一次小规模分飞。该时段大气温度为 26℃，湿度为 73%，东南风 1 级，风速为 0.3m~1.5m /s。此外，2019 年 4 月 24 日大雨并伴有冰雹的天气条件下，土栖白蚁曾进行大规模分飞，引起村民的注意。2020 年的分飞监测记录显示，小浪底水利枢纽区域的土栖白蚁分飞均为小规模。观测表明，充足的降雨、适宜的湿度和较低的风速有利于有翅成虫的分飞。在本次试验期间，至少 3 次记录到小雨或者有零星小雨时，待飞主巢中工蚁打开分飞孔进行观察，或少量有翅成虫试探性飞出，但终因条件不合适而停止分飞并封闭分飞孔。

综合 2019 至 2020 年的土栖白蚁分飞观察记录，土栖白蚁分飞条件为：分飞时间多在 4 月下旬至 6 月下旬的傍晚 18 时至晚上 20 时 40 分左右；分飞需要温度≥24℃、湿度≥45%；较低的风速适合土栖白蚁的分飞繁殖；持续 60 分钟以上的中到大雨是土栖白蚁成熟巢分飞的关键条件。这些结论与前人的观察和记录一致(周竹云 1977^[20]；王治国等 1982^[21]；刘源智等 1985^[22]；石锦祥等 1987^[11]；张锁洪等 1996^[23]；顿耀银等 2004^[24])。

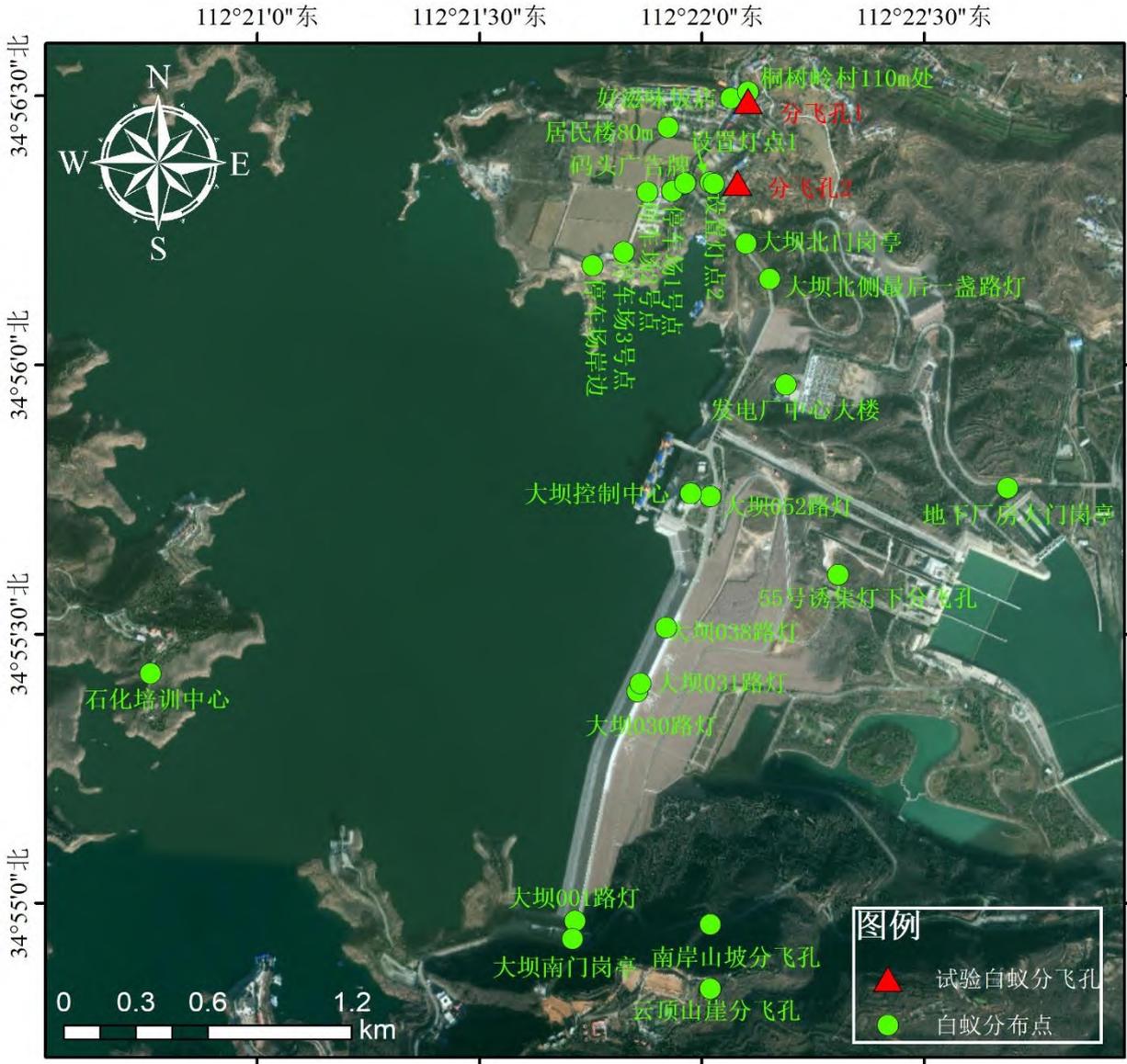


图 4 土栖白蚁分布范围及各采集点分布图

2.3 分飞距离

经过 6 月 5 日晚间 3 小时及次日早间 4 小时的收集工作,在 24 个收集点共计收集到成虫 669 只,翅膀 2615 只,其中带标记的翅膀 16 只(红色标记 2 只,黄色标记 14 只)。24 个收集点中有 4 处检测到荧光标记。相关数据见表 1、表 2。

对所收集的翅膀进行荧光检测,并结合 GPS 记录的距离数据,结果显示小浪底水利枢纽大坝区域内黑翅土白蚁群体的分飞距离为 30~1370m。

通过以特定分飞孔为原点,测定有翅成虫在大坝各标段内的数量,有助于揭示其分布特征并识别高密度区域,从而制定针对性的防治措施。本试验以大坝北端标记的分飞孔为原点,结合各收集点有

翅成虫数量与其距离的关系,绘制大坝不同标段内有翅成虫数量图(见图 5、图 6)。

图 5 中,横坐标表示以分飞孔 1 为原点,收集的有翅成虫位置距原点的距离,这些有翅成虫来源于大坝周边多个同时分飞的黑翅土白蚁主巢;纵坐标表示收集点的有翅成虫数量。图 6 中,横坐标表示以分飞孔 2 为原点,收集的有翅成虫位置距原点的距离,这些有翅成虫同样来源于周边多个同时分飞的黑翅土白蚁主巢;纵坐标表示收集点处的有翅成虫数量。由图 5、图 6 可见,大坝中段土栖白蚁成虫数量最多,占总收集成虫数量的 43%左右,集中落在距两处分飞孔原点的 1135m 到 2060m 之间。

表 1 小浪底水利枢纽大坝区域黑翅土白蚁收集数量记录表(2019)

采集地	时间	成虫数量/只	翅膀数量/只	带标记翅膀数量/只
武警营房内设置灯点 1	2019.6.5	2	8	0
武警宿舍楼 (1)	2019.6.5	13	42	0
武警大门岗亭	2019.6.5	28	119	2 (红)
武警营房内设置灯点 2	2019.6.5	15	47	0
武警宿舍楼 (2)	2019.6.5	20	47	0
桐树岭码头广告牌	2019.6.5	2	8	0
停车场 1 号点	2019.6.5	11	128	0
停车场 2 号点	2019.6.5	9	63	0
停车场 3 号点	2019.6.5	9	85	0
桐树岭村凉亭 (110m)	2019.6.5	3	206	4 (黄)
桐树岭好滋味饭店 (80m)	2019.6.5	6	89	4 (黄)
停车场岸边	2019.6.5	1	4	0
大坝北门岗亭	2019.6.5	33	112	0
大坝北侧最后一盏路灯	2019.6.5	23	64	4 (黄)
大坝 052 路灯	2019.6.5	3	61	2 (黄)
大坝控制中心大楼	2019.6.5	60	184	0
大坝 031 路灯	2019.6.5	95	121	0
大坝 038 路灯	2019.6.5	32	87	0
大坝 001 路灯	2019.6.5	68	195	0
大坝南门岗亭	2019.6.5	58	184	0
黄河母亲像	2019.6.6	0	125	0
发电厂中心大楼	2019.6.6	19	224	0
地下厂房大门岗亭	2019.6.6	3	29	0
停车场 2 号点	2019.6.6	58	227	0
大坝 030 路灯	2019.6.6	98	156	0
总计		669	2615	16

表 2 小浪底水利枢纽大坝区域收集点与分飞孔距离记录表(2019)

采集地	时间	距武警营房内餐厅的分	距桐树岭村渔具店前的分飞
		飞孔距离/m	孔距离/m
武警营房内设置灯点 1	2019.6.5	52.5	—
武警宿舍楼 (1)	2019.6.5	60	—
武警大门岗亭	2019.6.5	116.5	—
武警营房内设置灯点 2	2019.6.5	68.5	—
武警宿舍楼 (2)	2019.6.5	41	—
桐树岭码头广告牌	2019.6.5	177.5	379
停车场 1 号点	2019.6.5	227.5	395
停车场 2 号点	2019.6.5	303.5	421
停车场 3 号点	2019.6.5	456	633
停车场岸边	2019.6.5	741	741
大坝北门岗亭	2019.6.5	225	480
大坝北侧最后一盏路灯	2019.6.5	437.5	688
大坝 052 路灯	2019.6.5	1115	1370
大坝控制中心大楼	2019.6.5	1135	1390
大坝 038 路灯	2019.6.5	1390	1650
大坝 031 路灯	2019.6.5	1760	2010
大坝 030 路灯	2019.6.6	1800	2060
大坝 001 路灯	2019.6.5	2655	2910
大坝南门岗亭	2019.6.5	2685	2940
地下厂房大门岗亭	2019.6.6	1420	1600
发电厂中心大楼	2019.6.6	721	859
桐树岭村好滋味饭店	2019.6.6	—	30
桐树岭村凉亭	2019.6.6	—	252

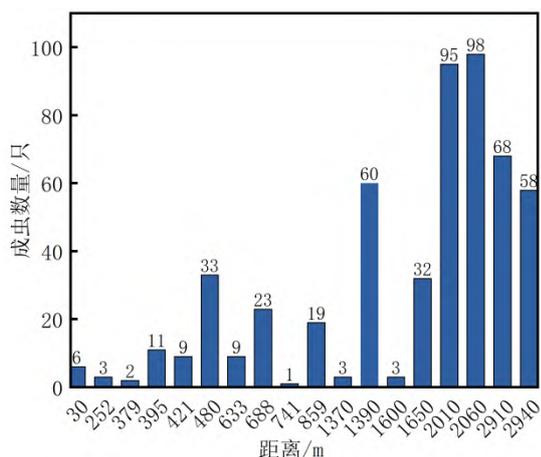


图5 大坝不同标段收集的有翅成虫数量
(2019-06-05, 21时)

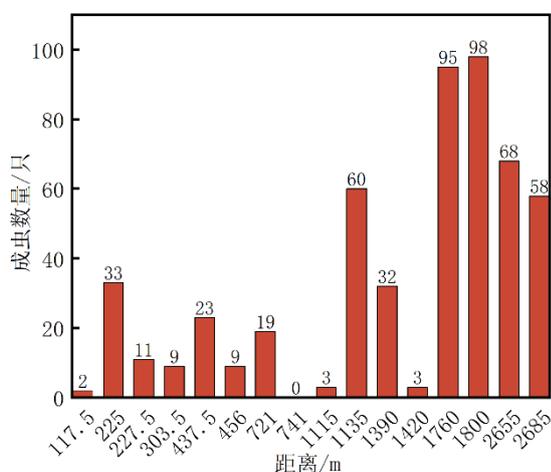


图6 大坝不同标段收集的有翅成虫数量
(2019-06-20, 21时)

3 讨论

3.1 出现大量有翅成虫的原因

1) 适宜的自然条件

黄河小浪底水利枢纽位于北纬 34.90°，正处于我国土白蚁分布的北部边界。该区域地理位置特殊、气候温湿、坝区植被茂密，为白蚁的生存和繁衍提供了基本条件。随着气候变暖，白蚁危害范围逐步由南向北扩大。2005年，山西省垣曲县 11 个乡镇均发现白蚁，其中小浪底枢纽管理区距重灾古城镇直线距离不足 50 公里。小浪底坝区周边土壤、植被等自然条件非常适合土栖白蚁营巢，且周边有丰富的蚁源，因此有翅成虫大量出现。

2) 前期防治遗留

尽管小浪底水利枢纽大坝及周边环境中土栖白蚁经历了几次灭治，取得一定成效^[25]，但由于灭治难度较大，部分白蚁未能彻底清除。遗留的白蚁

可在适宜的条件下建立新巢穴，待繁殖季节巢穴中仍有大量有翅成虫等待分飞。

3.2 大坝中央有翅成虫的来源

1) 大坝南段山坡上的云顶山崖成熟巢

在石砌长城下方不足 100m 和 200m 处，分别标记有成熟的白蚁巢穴（图中南岸山坡分飞孔和云顶山崖分飞孔）。这两处巢穴悬于公路上方、武警岗亭之上，土栖白蚁分飞时，有翅成虫多数在东南风的作用下滑翔降落于大坝中间部分，仅少量垂直降落于岗亭的大灯和大坝南段的路灯下。由此推测，大坝中央部分的有翅成虫最大可能来自此处。

2) 大坝背水坡监测点

该处有标记、用遮阳网保护的成熟分飞孔（图中 55 号诱集灯下分飞孔），此处离大坝中央位置的直线距离最短。2019 年 6 月 7 日检查该分飞孔，发现大量有翅成虫的翅膀，表明 2019 年 6 月 5 日经历了分飞过程，推测此处为大坝中央有翅成虫第二个来源，此处的白蚁巢已经被灭杀。

3) 大坝迎水坡对面“石化培训中心”成熟巢

大坝迎水坡对面的“石化培训中心”距近坝端 1200m，远坝端 1700m。2019 年 6 月 7 日在该中心游泳池周边发现大量有翅成虫活体，表明 2019 年 6 月 5 日该地亦出现分飞现象。理论上，在风力作用下有翅成虫完全有可能飞抵大坝上，因此推测大坝中央有翅成虫的第三个来源为此处。鉴于此，建议将该中心纳入小浪底大坝土栖白蚁防治范围。

3.3 影响分飞因素

白蚁通过分飞逐次渐进的侵染建筑物，从而对核心建筑物构成重大安全隐患。通过本试验确定白蚁分飞规律，有助于更有效地阻止白蚁种群扩散，减少其对建筑物的危害。白蚁分飞受多种因素影响，包括气象条件、种群密度、蚁巢结构以及蚁群年龄等^[26]。其中，气象条件是影响其分飞的主要外界因素，并具有显著的地区差异性。本研究基于试验条件，仅从气象条件角度确定土栖白蚁分飞规律。研究方法和结果对小浪底水利枢纽白蚁综合防治具有一定的实践指导意义。然而，本研究仍存在诸多不足之处，如气象因子选取不够广泛，时间序列较短等，需在后续的实践应用中进一步改进和完善。

4 结论与建议

在黄河小浪底水利枢纽进行的白蚁分飞试验，通过改进的昆虫迁飞荧光标记方法，检测土栖白蚁分飞距离，并监测分飞时的温度、湿度、风向和风速。结论如下：

1) 分飞条件

小浪底大坝区域内黑翅土白蚁的分飞气象条件为:分飞时间多在4月下旬到6月下旬傍晚18时至晚上20时四十分左右;温度 $\geq 24^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $\geq 45\%$;较低的风速适合土栖白蚁的分飞繁殖;持续60分钟以上的中到大雨是土栖白蚁成熟巢分飞的关键条件。

2) 分飞距离

在较低风速条件下,小浪底水利枢纽大坝周边土栖白蚁有翅成虫的分飞距离为30~1370m。

鉴于堤坝白蚁防治的复杂性和长期性。为实现小浪底坝区高效、准确的白蚁防控,建议如下:

1) 强化白蚁习性规律基础研究

深入研究白蚁习性有助于了解其行为和生态特征,为制定有效的防治措施提供科学依据。本次试验确定了小浪底坝区土栖白蚁的分飞条件和分飞距离,但由于白蚁分飞的复杂性和差异性,建议加强对土栖白蚁分飞的持续观测,并开展关于其食性、活动规律和繁殖习性等方面的进一步研究。

2) 综合防治

土栖白蚁对堤坝的危害隐蔽性极强,易造成严重损失,因此必须加强白蚁防治工作。鉴于小浪底枢纽的重要性,建议采取综合防治,即预防、灭治和监控并重,由短期防治转向长期防治,控制土栖白蚁的种群数量以确保枢纽安全。

参 考 文 献

- [1] 张颂声,詹玉海,钟平生,等.东江惠州段江北大堤白蚁治理效果初报[J].生物灾害科学,2012,35(02):198-204.
- [2] 呼志鹏,甘宗平,于敏.安徽沿江圩区堤防跌窝险情成因分析及处理措施[J].浙江水利水电学院学报,2021,33(01):38-41.
- [3] 刘向阳,郎金慧,杜浩,肖承宏.安徽滁州市堤坝白蚁防治现状与技术探讨[J].中国水利,2023(15):40-44.
- [4] 屈章彬,蔡勤学,张树田,等.土石坝白蚁综合防控技术在黄河小浪底水利枢纽中的应用实践[J].地基处理,2021,8(4):355-360.
- [5] 屈章彬,石磊,陈立云,等.水库大坝白蚁危害调查分析[J].河南水利与南水北调,2019,48(3):79-81.
- [6] 周泰来.水利部12年后普查水库堤防白蚁[J].财新周刊,2023.
- [7] 李功春,叶平,毛学冬.武汉市白蚁分飞期蚁害监测分析[J].湖北植保,2023,(05):43-46.
- [8] 方艳莹,陈海洪,中华羽,鲍晗澍,周红.宁波市散白蚁分飞高峰日分析及预测[J].中华卫生杀虫药械,2022,28(06):540-544.
- [9] 于仲吾,尹连荣,徐峰.白蚁危害林木的气象条件分析[J].气象,2002(03):56-57+65.
- [10] 张贞华,酆培尧.利用放射性同位素碘 ^{131}I 对黑翅土白蚁(*Odontotermes formosanus*(Shiraki))分飞活动规律初步研究[J].林业科学,1982(04):428-434.
- [11] 石锦祥,李栋,张鉴发,等.海南土白蚁的羽化与分群期观察[J].昆虫知识,1987(06):337-343.
- [12] 潘柏康.堤坝白蚁分飞距离的观察分析.见:广东省白蚁学会.白蚁研究[M].广东经济出版社.1999,146-150.
- [13] Forschler B T, Evans G M. Argentine Ant (Hymenoptera: Formicidae) Foraging Activity Response to Selected Containerized Baits[J]. Journal of Entomological Science, 1994, 29(2):209-214.
- [14] 胡剑.黑翅土白蚁扩散范围及感光性研究[D].中国科学院华南植物研究所,2007.
- [15] 欧阳建家,薛祖培.泉州市白蚁分飞与气象因子的关系[J].华东昆虫学报,1994(02):89-93.
- [16] 夏金保.用查找分群孔方法清除水库大坝的土栖白蚁巢穴[J].昆虫知识,1995(02):108-109.
- [17] 王建国,吴德龙,赵凤霞.黄翅大白蚁露天活动的观察[J].白蚁科技,1999(03):26-28.
- [18] 汪智.堤坝内黑翅土白蚁巢穴位置的确定[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2008,8(04):48-50.
- [19] 王晓磊.秦岭华山松大小蠹种群密度和空间分布的研究[D].西北农林科技大学.2010.
- [20] 周竹云.白蚁防治研究的几点体会[J].林业科技,1977(21):43-47.
- [21] 王治国,李东升.黑胸散白蚁(*Reticulitermes chinensis* Snyder)分飞规律的研究[J].河南省科学院学报,1982,(01):92-97.
- [22] 刘源智,唐国清,潘演征,等.黑翅土白蚁生殖级幼蚁龄期划分及幼蚁发育与有翅成虫分飞的观察[J].昆虫学报,1985(01):111-114.
- [23] 张锁洪,管殿胜,罗新志,等.浅谈黑翅土白蚁的分飞规律[J].江苏水利科技,1996(03):36-38.
- [24] 顿耀银,何云,陈立志,等.黑翅土白蚁有翅成虫分飞首日预测[J].中国水利,2004(19):54-55.
- [25] 张东升,谢宝丰.小浪底工程白蚁防控措施及初步成效[J].人民黄河,2012,34(12):109-111.

- [26] 林冬春, 夏诚, 冯爱, 等. 苏州市区黄胸散白蚁分飞高峰与气象因子的关系探讨 [J]. 安徽农学通报, 2020, 26(17):113-116.