



研究论文 ORIGINAL PAPERS

脉冲式太阳能电围栏在
亚洲象食物源基地应用成效研究施旖奇^{1#}, 付淮毓^{1#}, 蒋桂莲², 沈庆仲², 王 聪^{3*}, 陈明勇^{1*}

- (1. 云南大学/亚洲象云南省野外科学观测研究站/云南亚洲象教育部野外科学观测研究站, 昆明 650500;
2. 云南西双版纳国家级自然保护区生态旅游管理所/西双版纳州亚洲象保护协会, 景洪 666100;
3. 中国绿化基金会, 北京 100714)

稿件运行过程

收稿日期: 2025-08-06

修回日期: 2025-09-09



关键词: 亚洲象;

脉冲式太阳能电围栏;

食物源基地;

西双版纳

Keywords: Asian elephant (*Elephas maximus*);

Pulsed solar energy fence;

Food source base;

Xishuangbanna

中图分类号: Q958.118; Q959.845

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2026)-02-0174-12

DOI: 10.12375/ysdwxb.202508008

摘 要

为保护亚洲象食物源基地新种植的食物源植物幼苗在生长初期免受象群损害,本研究于2022年7月—2023年5月在云南西双版纳国家级自然保护区勐养子保护区关坪亚洲象食物源基地,开展脉冲式太阳能电围栏防护试验。通过分析25台红外相机记录的亚洲象(*Elephas maximus*)造访影像数据,并结合随机抽样法测量电围栏内外小果野蕉(*Musa acuminata*)和象草(*Pennisetum purpureum*)的生长与受损情况,评估电围栏防护效果。结果表明:(1)脉冲式太阳能电围栏显著提升了管控区内植物的生长量和增长率,并有效降低了亚洲象对幼苗的采食率;(2)监测期间记录到亚洲象造访48次,电围栏成功阻挡45次,防护成功率达93.75%;(3)从4314条亚洲象影像数据(含照片和视频)中识别出造访亚洲象48头,以家庭单元为主,独象均为成年雄象。研究表明,脉冲式太阳能电围栏在亚洲象食物源基地建设中具有良好的防护作用,可有效促进食物源植物生长,但其设计与布设需结合亚洲象行为习性和地形特点进一步优化,本文据此给出了相应的改进建议。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFF1305001);国家自然科学基金面上项目(32271592);云南省科学技术厅科技人才与平台计划项目(202205AM340038);国家林业和草原局项目(护动物函[2021]135号);中国绿化基金会2022年“拯救濒危亚洲象行动”亚洲象食物源基地建设成效调查与评价项目(中绿基实施[2022]48号);中国绿化基金会2024年“拯救濒危亚洲象行动”关坪亚洲象食物源基地建设实验研究项目(中绿基实施[2024]91号)

第一作者简介: 施旖奇(1995—),女,博士研究生;主要从事动物生态学研究。E-mail: 22024227101@stu.ynu.edu.cn

共同第一作者: 施旖奇; 付淮毓

*** 通信作者:** 王聪, E-mail: wangcong@cglf.org.cn; 陈明勇, E-mail: mychen1108@ynu.edu.cn

Research on the Application Effect of Pulsed Solar Energy Fence in Asian Elephant Food Source Base

SHI Yiqi^{1#}, FU Weiyu^{1#}, JIANG Guilian²,
SHEN Qingzhong², WANG Cong^{3*}, CHEN Mingyong^{1*}

(1. Yunnan University/Asian Elephant Yunnan Field Scientific Observation and Research Station/Yunnan Asian Elephant Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Education, Kunming 650500, China;

2. Ecotourism Institute of Xishuangbanna National Nature Reserve/Xishuangbanna Prefecture Asian Elephant Conservation Association, Jinghong 666100, China;

3. China Green Foundation, Beijing 100714, China)

Abstract: In order to protect the seedlings newly planted in the Asian Elephant Food Source Base and their early growth stage from the damage by the elephant herd during the initial growth stage, a pulsed solar energy fence protective experiment was carried out from July 2022 to May 2023 in Guanping Asian Elephant Food Source Base of Mengyang Sub-Reserve of Xishuangbanna National Nature Reserve, Yunnan Province. The image data of Asian elephants (*Elephas maximus*) were collected by 25 camera traps, and the growth status of *Musa acuminata* and *Pennisetum purpureum* inside and outside the fence was measured by random sampling method, and the protective effect of the electric fence was evaluated. The results showed that: (1) The pulsed solar energy fence significantly increased the plant growth quantity and growth rate in the protected area, and effectively reduced the foraging rate of Asian elephants on the seedling; (2) During the monitoring period, Asian elephants 48 visited times, and electric fences successfully blocked 45 times, with a protection success rate of 93.75%; (3) From the 4 314 Asian elephant images (including photos and videos), 48 visiting Asian elephants were identified, mainly in family units, and all the solitary elephants were adult males. The research illustrated that the pulsed solar energy fence has a good protective effect in the construction of Asian Elephant Food Source Base, which can effectively promote the growth of food-borne plants. However, its design and layout need to be further optimized in combination with the behavioral habits and topographical characteristics of Asian elephants. The corresponding improvement suggestions were given in the paper.

亚洲象(*Elephas maximus*)被世界自然保护联盟(IUCN)评估为濒危(EN)物种,被《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)列为附录 I 物种^[1],在我国被列为国家一级重点保护野生动物^[2],其保护对于维持生态平衡与生物多样性具有至关重要的意义。然而,由于栖息地破碎化(甚至丧失)加剧,亚洲象频繁进入村寨、农田取食农作物,致使人-象接触率不断增加,这种冲突问题已成为全球象类分布区共同面临的严峻挑战^[3]。在众多缓解冲突的策略中,电围栏因其阻隔的有效性,被广泛视为一项长期解决方案^[4-5]。早期研究多聚焦于电围栏在短期阻隔象群、降低农作物损失方面的成效,而近年来的研

究更加重视电围栏的长期管理与维护、象群的行为适应与跨越围栏策略,以及新技术应用所带来的伦理与动物福利问题。不当的电围栏设计或管理可能使其本身成为威胁,如 Kalam *et al.*^[6]在印度阿萨姆邦的研究表明,致命性围栏电击已成为当地亚洲象死亡的重要原因之一,凸显了电围栏架设与用电环节规范和安全标准缺失的严重后果。同时,亚洲象展现出了卓越的学习和适应能力,Ranjeewa *et al.*^[7]在斯里兰卡乌达瓦拉维国家公园(Udawalawe National Park)的研究发现,成年雄象是突破电围栏的主要群体,能够通过推倒立柱、踩踏电线等多种方式突破电围栏。针对“破围象”问题,肯尼亚学者曾尝

试采用“去牙”管理措施,通过外科手术切除成年雄象2/3的象牙(保留部分以保护神经),剥夺其破坏围栏的关键工具,从而有效降低象群对围栏的破坏能力,但此方法对象取食行为等的负面影响尚需进一步研究和探讨^[8]。近年来,随着研究人员对电围栏在缓解人-象冲突中作用认知的不断深化,研究视角逐渐从单一的工程效能评估转向寻求技术、生态与社会维度的综合治理模式。实践证明,电围栏并非孤立运行的工程设施,如Fernando *et al.*^[9]在乌达瓦拉维国家公园的研究显示,周边居民和游客在防象电围栏附近长期投喂象群的行为,给当地带来了显著的旅游相关经济收益,但该电围栏无法有效阻隔象群,且政府部门与社区未形成相关协作,围栏的维护和管理仍处于被动应对状态。在印度,Kamdar *et al.*^[10]进一步指出,电围栏的效果不仅依赖于投资和技术,还取决于社区及森林管理部门在电围栏方面的参与度,若忽视社会机制,仅依赖工程措施往往难以维持长期运行。近年来的研究普遍认为,电围栏的可持续作用需要工程措施管理与栖息地修复、生态廊道建设、社区参与和补偿机制形成“组合拳”^[11-13]。Cabral de Mel *et al.*^[14-17]的系列研究表明,“厌恶型地理围栏”(aversive geofencing devices, AGDs)可通过在亚洲象颈部佩戴无线电项圈发出的声音预警与轻度电刺激,引导亚洲象规避特定区域,减少对常规电围栏等实体屏障的依赖,展现出较强的行为塑造潜力,已成为一个在技术层面新兴的探索方向。然而,这些试验目前多限于圈养个体,且对动物福利及伦理仍存在较大分歧。

在我国的亚洲象保护实践中,脉冲式太阳能电围栏在西双版纳等地已有应用历史,并被证实能在短期内有效保护群众和农作物^[18-19]。同时,建设食物源基地以主动引导象群缓解冲突,已成为一项重要的栖息地管理措施^[20-21]。在亚洲象食物源基地建设,新种植的植物幼苗往往就被亚洲象取食、踩踏或拔出玩耍然后丢弃,导致基地生态供给功能延迟甚至失效,极大影响了这一策略的长期成效。因此,在亚洲象食物源基地建设和管理过程中,如何进行科学管理以保护幼苗成长又成为一个新的研究课题。文献检索结果表明,针对脉冲式太阳能电围栏在亚洲象食物源基地幼苗防护中的专项应用研究,鲜有报道。

2022年7月—2023年5月,依托云南亚洲象教

育部野外科学观测研究站和亚洲象云南省野外科学观测研究站,本研究在云南西双版纳国家级自然保护区勐养子保护区关坪亚洲象食物源基地,采用脉冲式太阳能电围栏开展食物源基地作物保护试验,探讨脉冲式太阳能电围栏在亚洲象食物源基地建设和管理中应用的成效,以期为未来亚洲象国家公园建设和管理提供科学依据。

1 研究区概况

云南西双版纳国家级自然保护区勐养子保护区是我国野生亚洲象的主要栖息地,这一区域长期稳定地分布着百头以上的野生亚洲象^[22-23]。本研究于关坪亚洲象食物源基地开展,该基地位于勐养子保护区东、西两片区的接合部(22°13'21"N, 100°53'42"E;海拔840 m),是多个亚洲象群在片区之间进行季节性迁移与循环取食的重要通道(图1)。为探究亚洲象对作物的采食情况,云南西双版纳国家级自然保护区管护局自2005年起在关坪建设食物源基地,总面积约20 hm²。自食物源基地建设以来,相关管理部门就开始在关坪亚洲象食物源基地与周边村寨中同步种植玉米(*Zea mays*)、甘蔗(*Saccharum officinarum*)、小果野蕉(*Musa acuminata*)和象草(*Pennisetum purpureum*)等亚洲象喜食作物,以维持其吸引力^[20]。

2 研究方法

2.1 脉冲式太阳能电围栏工作原理及技术参数

脉冲式太阳能电围栏系统主要由太阳能电池板、控制器、蓄电池、高压脉冲发生器和围栏线组成。工作原理:太阳能经电池板转化为电能并储存于蓄电池中,电能经控制器调节后输入高压脉冲发生器,再以高压脉冲形式输送至围栏线。当动物接触围栏线时,电流经其身体流入大地,形成瞬时闭合回路,从而产生电击刺激^[24]。该系统输出电压峰值较高(约12 kV),但脉冲电流强度低(<10 A)、持续时间极短(≤0.1 s),不会对亚洲象、其他野生动物、人员及家畜家禽造成实质性伤害,同时能有效促使动物建立条件反射,避免再次接触围栏^[25]。设备工作环境要求:温度-25~50℃,相对湿度≤95%。

2.2 试验设计

脉冲式太阳能电围栏主机安放于关坪亚洲象食物源基地的二楼阳台,可有效避免亚洲象对核心设

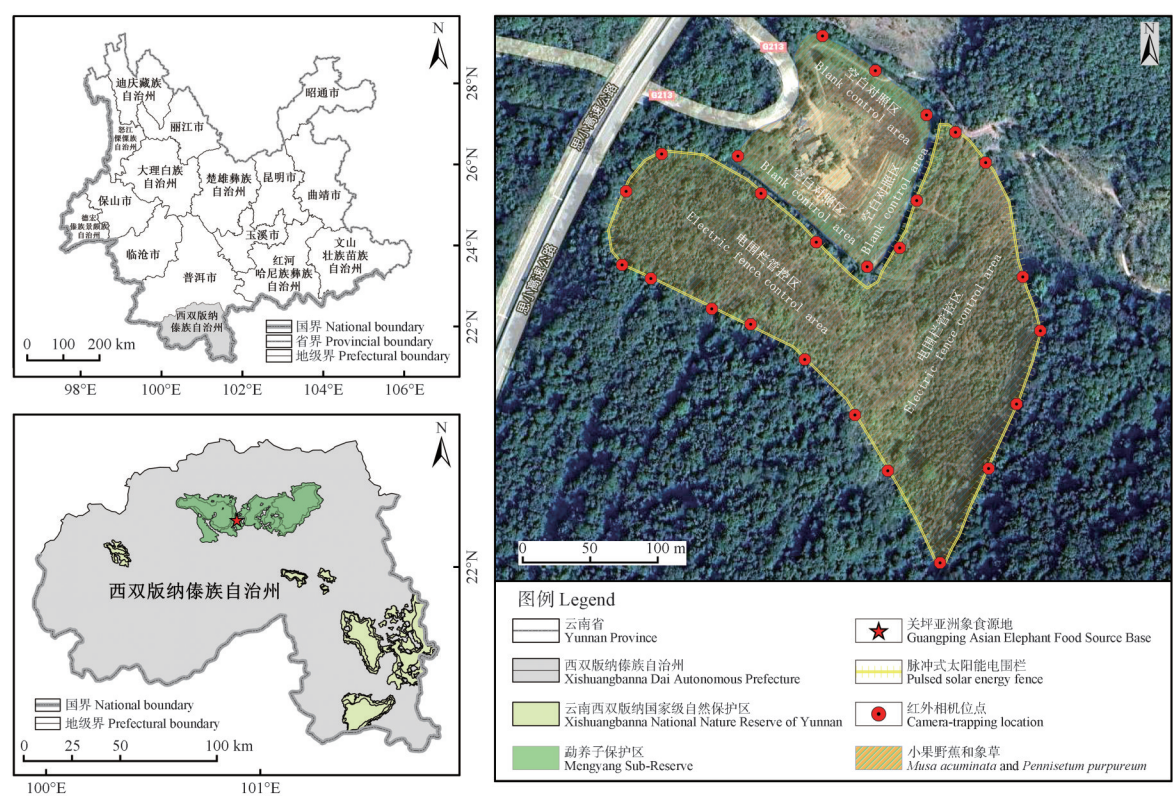


图1 云南西双版纳国家级自然保护区关坪亚洲象食物源基地位置与试验布设

Figure 1 Location and experimental design of Guanping Asian Elephant Food Source Base in Yunnan Xishuangbanna National Nature Reserve

备的破坏。主机系统的安装与调试由设备供应商的专业工程技术人员完成,以确保设备正常工作,并便于后续的维护与管理。本研究首次采用“F”型接线桩,主立柱采用规格为边长4 cm×4 cm、厚度1.2 mm、长度2.5 m的镀锌角钢,两根支架用规格为边长3 cm×3 cm、厚度1.2 mm、长度60 cm的镀锌角钢,在支架两端各打一直径6 mm的圆孔,靠近立柱的圆孔用于连接支架与主立柱,另一端圆孔用于安装穿越导线的绝缘装置,上、下支架间距为1 m。为便于

安装,主立柱底部切割为45°斜角,安装时将其插入地下50 cm深,主立柱安装在电围栏内侧,两根支架向外延伸采用常规牧场的拉线方法,即导线直接通过接线桩上的绝缘体,导线与接线桩之间保持绝缘,未对接线桩进行额外的通电防护(图2)。选择关坪亚洲象食物源基地中面积为4.00 hm²(约60亩)的区域作为试验区,将其划分为电围栏管控区(2.87 hm²,约43亩)和空白对照区(1.13 hm²,约17亩)。在电围栏管控区四周搭建一个周长约1.26 km的脉冲式

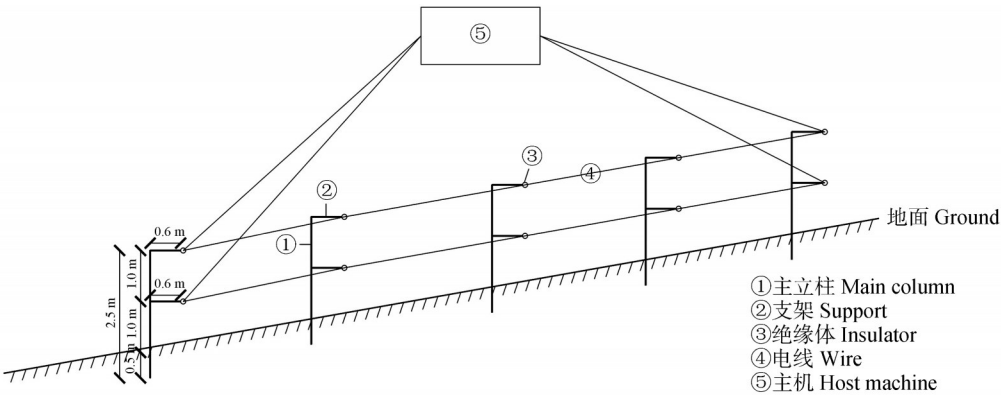


图2 脉冲式太阳能电围栏布设与安装布局

Figure 2 Layout and installation of pulsed solar energy fence

太阳能电围栏(图 1),用于保护新种植的食物植物,防止其在幼苗期及生长过程中遭受亚洲象的采食或踩踏;对照区则种植与围栏内完全相同的亚洲象喜食植物,但不采取任何防护措施,允许野生亚洲象自由进入取食。在围栏建成后,安排专人每周进行巡护,定期检测围栏线电压并及时清理周边杂草,以避免电压衰减影响防护效果。研究人员采用样方法定期调查记录对照区内植物的生长及亚洲象的采食情况,以此作为评估电围栏防护效果的对比基准。

2.3 数据采集方法

(1)亚洲象行为观测。采用无人机和数码相机对到访食物源基地的亚洲象进行影像拍摄记录。同时,在预先设计的标准化记录表中,记录每次亚洲象的到访日期、个体数量、到达与离开时间、是否进入电围栏管控区或空白对照区及具体的采食植物情况等信息。

(2)红外相机自动监测。在研究区内布设 25 台红外相机,24 h 不间断记录亚洲象到访时间、种群数量及种群结构等信息。相机参数设为:拍照+录像模式、图片分辨率 20 MP、视频时长 30 s、连拍 3 张、触发间隔为 1 s、灵敏度低。为避免人畜活动损毁设备,相机安装高度为 4~5 m。每月进行一次例行维护,检查电池电量和存储卡容量,并清除镜头前的树叶、枝条等遮挡物。数据定期回收,按相机编号和回

收日期分别建档储存。

(3)防护效果指示物种遴选。为量化评估防护效果,选择小果野蕉和象草作为指示物种进行系统监测。遴选依据如下:首先,已有多项研究证实二者为亚洲象的重要食源植物^[26-27],且本研究前期调查也显示,两种植物均属亚洲象高偏好取食物种;其次,小果野蕉水分含量较高、象草生物量大,可持续为亚洲象提供水分和能量;再次,两种植物均适应热带气候,生长速率快、易于管护,适宜在我国亚洲象分布区大面积推广。此外,小果野蕉兼具经济价值,象草可用于家畜饲草,均具备生态与社会双重效益,便于后续在亚洲象栖息地保护与合作共建中推广。

(4)植物生长参数抽样调查。分别于 2022 年 7—8 月(植株定植初期)和 2022 年 12 月(定植 4 个月后)两个时段,采用简单随机抽样法^[28],对电围栏内外的试验植株进行生长指标监测。单次抽样比例不低于总定植株数的 30%,满足统计学抽样要求。测量指标包括株高、最大叶长,同步记录植株是否存在亚洲象采食痕迹。根据测量结果,计算平均株高、平均最大叶长、增长量及平均增长率,以表征植株生长状况。

2.4 数据处理与分析方法

(1)亚洲象年龄组划分。参考陈明勇等^[18]对亚洲象年龄的判断方法,将身高作为亚洲象年龄划分指标,具体划分标准见表 1。

表 1 亚洲象年龄组划分标准

Table 1 Criteria for the age division of Asian elephants

类别 Category	描述 Description
成体 Adult	15 岁以上的个体,为群体中体型最高的部分
亚成体 Subadult	5~15 岁的个体,其身高明显低于成年象,但高于幼体
幼体 Juvenile	5 岁以下的个体,为群体中最年幼的个体,其身高通常不高于成年雌象前腿基部

(2)亚洲象个体识别。参考袁志强等^[29]建立的基于耳、门齿、背、尾、疤痕及面部骨骼等多特征的个体识别方法,再结合杨子诚等^[30]细化的形态学方法进行个体识别。整理红外相机数据,筛选出包含亚洲象的全部照片和视频备用。根据亚洲象面部、耳部和尾部等多部位的稳定特征(图 3)进行辨识,对每个拍摄事件中的个体进行初筛。采用“拍摄矩阵”法对同一或不同事件中出现的个体进行两两比较,标注为“相同”“不同”或“无法比较”。最终审核拍摄矩

阵,排查不一致的判断,结合前期研究人员的识别情况,获得个体识别结果。

(3)红外相机数据处理。采用 Bio-Photo(v2.1)软件对红外相机获取的照片或视频进行处理,通过程序自动提取每份照片或视频文件的拍摄日期、时间信息,并生成包含此类信息的数据表。在此基础上,进行人工物种鉴定,确认每台红外相机所记录到的亚洲象个体。在数据处理中,将单台红外相机在野外持续工作 24 h 定义为一个捕获日(trap-day)^[30],



a. 门齿; b. 智慧瘤; c. 耳部; d. 尾部; e. 面部骨骼; f. 无长门齿。

a. Tusk; b. Frontal boss; c. Ear; d. Tail; e. Facial bone; f. Without long incisors.

图3 用于亚洲象个体识别的主要形态特征

Figure 3 Main features of individual recognition of Asian elephants

无论当日是否拍摄到有效物种,均计入总捕获日。

(4)电围栏防护有效性分析。使用Eklund *et al.*^[31]提出的损害相对风险比指数(relative risk, RR)来评估电围栏的有效性,计算公式为

$$R_R = (A/N_t)/(B/N_e)。(1)$$

式中: A 为管控区(电围栏内)受损作物株数; B 为对照区(电围栏外)受损作物株数; N_t 为管控区作物总样本量; N_e 为对照区作物总样本量。当 $R_R < 1$ 时,表明干预措施(电围栏)有效,且值越小有效性越高; $R_R = 0$ ($A = 0$) 时为完全有效; $R_R \geq 1$ 则表示

干预无效。

(5)统计学显著性检验。为比较电围栏内外植物生长量的差异,对两次植物随机抽样调查得到的数据进行统计分析。首先使用单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验对数据进行正态性检验,若符合正态分布,则采用独立样本 t 检验分析组间差异显著性,若不符合正态分布,则选择多个独立样本非参数检验进行分析。所有统计分析均在 SPSS 25.0 软件中完成,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

3 结果

3.1 红外相机监测数据

25 台相机累计总捕获日为 1 674 d,共采集到影像数据(照片和视频)39 416 条,其中亚洲象影像数据 4 314 条,占总数据量的 10.94%,其余影像记录包括人

类活动(9 090 条,23.06%)、其他野生动物(1 130 条,2.87%)及家畜(主要是牛和狗,269 份,0.68%)等。单台红外相机最高记录为 806 条,亚洲象拍摄率(单台相机拍摄的亚洲象影像数占其拍摄影像总数的比例)达 37%。在记录到的亚洲象影像数据中,群象活动影像占亚洲象总影像数据的 90.03%(3 884 条);独象活动影像占 9.97%(430 条)。

3.2 造访亚洲象的种群结构

监测期内共识别出 48 头曾造访关坪食物源基地的亚洲象个体。种群结构分析显示,家庭群是主要的造访单元,共记录 3 个群体,单群个体数为 13~15 头,均由成年雌象及其后代组成,共计包含成年雌象 18 头、亚成年雄象 10 头、亚成年雌象 5 头及幼象 9 头,未发现成年雄象活动于家庭群中(表 2)。独象共记录 6 头,经识别全部为成年雄象。

表2 关坪食物源基地造访亚洲象独象与象群的种群结构及识别特征
Table 2 Population structure and identification features of visiting herds and individuals of Asian elephants in Guanping Food Source Base

造访类群 Visiting group	个体数/头 No. of individuals	种群结构 Population structure	关键识别特征 Key identification features
象群 1 Elephant herd 1	14	8 成体(♀)+3 亚成体(♂)+3 幼体	1. 一头成年雌象,左右门齿突出但牙体较细,左牙高于右牙 2. 一头成年雌象,右门齿缺失,左门齿突出,两耳耳廓上缘向前翻卷 3. 一头成年雌象,背部具有多个肿块 4. 一头幼象右前肢短缺,无法着地
象群 2 Elephant herd 2	13	6 成体(♀)+3 亚成体(2♂,1♀)+4 幼体	1. 一头老年雌象,口、颊及四肢有多个肿块,尾毛浓密且两侧相连,两耳耳廓上缘向前翻卷 2. 一头怀孕成年雌象,鼻具白斑,尾毛浓密且两侧相连
象群 3 Elephant herd 3	15	4 成体(♀)+9 亚成体(5♂,4♀)+2 幼体	1. 一头成年雌象,门齿突出但较短,左耳向前翻卷,右耳耳廓上缘向后翻折 2. 一头成年雌象,右前肢中部有一明显肿块,两耳耳廓上缘向后翻折,尾部内外侧尾毛均稀疏且不相连
独象 1 Solitary 1	1	成体(♂)	左耳耳廓上缘向前翻卷,象牙微弯,尾毛浓密、尖端较平、两侧尾毛相连,背部平缓
独象 2 Solitary 2	1	成体(♂)	两耳耳廓上缘向后翻折,尾毛浓密且外侧有一撮突出,象牙长且向上弯曲
独象 3 Solitary 3	1	成体(♂)	尾端无毛,右牙前端弯曲,左耳向前翻卷,头顶两块隆起明显,年龄 45~50 岁
独象 4 Solitary 4	1	成体(♂)	象牙极长(右牙上弯,左牙平直),两耳向后翻卷,头顶两块隆起明显,无鼻突,尾毛浓密
独象 5 Solitary 5	1	成体(♂)	左右象牙对称且向上弯曲,尾毛浓密且相连,两耳耳廓上缘向前翻卷
独象 6 Solitary 6	1	成体(♂)	象牙微弯,右耳耳廓上缘向前翻卷,内侧尾毛细长且相连

3.3 造访亚洲象类群特征

监测数据显示,自脉冲式太阳能电围栏布设以来,关坪食物源基地共记录到野生亚洲象造访48次(图4,表2),其中群象造访28次,独象造访20次。年度统计显示,2022年造访33次(群象17次,独象16次),2023年造访15次(群象11次,独象4次)。独象与群象的月度造访节律存在明显差异:独象在2022年9月形成造访高峰(10次),群象则在2022年10月及2023年3—4月保持高频造访,反映出不同社会类群对食物源基地的利用策略存在差异(图5)。

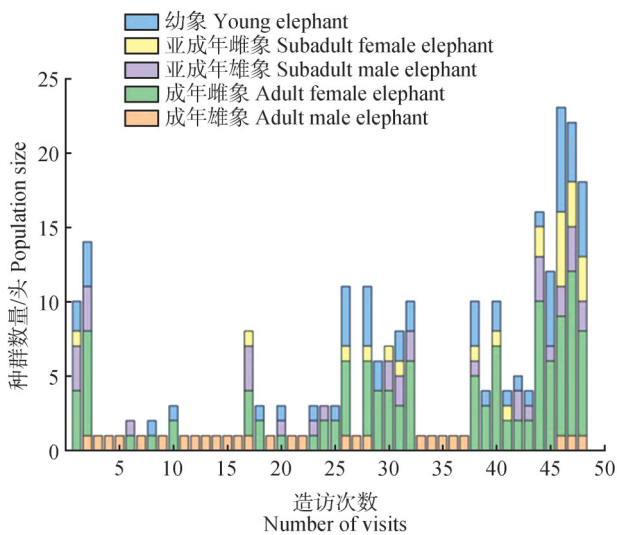


图4 造访关坪食物源基地的各亚洲象种群结构

Figure 4 Population structure of Asian elephants visiting Guanping Food Source Base

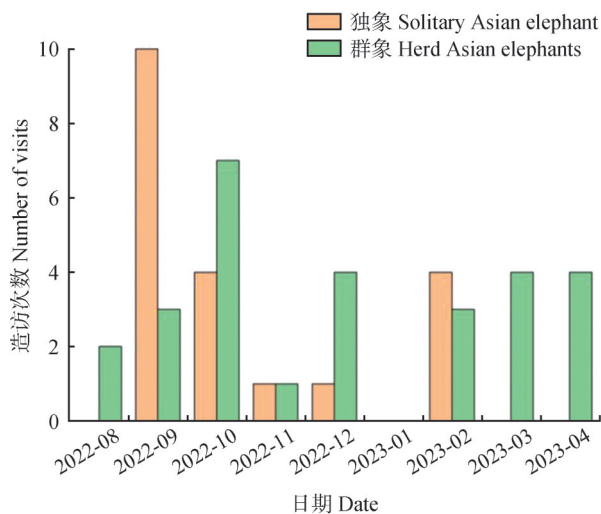


图5 关坪食物源基地亚洲象独象与群象的月造访频次

Figure 5 Monthly visit frequency of solitary and herd Asian elephants in Guanping Food Source Base

3.4 造访时间分布

亚洲象(群象和独象)造访关坪食物源基地的活动时间呈离散式分布,全天均有记录。活动节律分析揭示,亚洲象活动时间存在显著不均衡性,存在3个相对活跃时段:夜间22:00—03:00为全天活动最频繁时段,峰值出现在22:00—23:00(达419条);次高峰为04:00—07:00;午后活跃期14:00—17:00,峰值出现在16:00—17:00(304条)。此外,在07:00—12:00及13:00—14:00为全天活动稀少时段,其中07:00—08:00几乎无亚洲象造访记录,但12:00—13:00存在一个短暂午间活跃窗口(图6)。亚洲象活动时间分布格局反映出亚洲象在食物源基地的取食与活动行为,既包含典型的夜间/晨昏活动偏好,也存在午间短暂取食的特征,同时与周边社区人类农事活动时间形成部分错峰,有助于降低人、象相遇风险。

3.5 食源植物生长、被采食情况及电围栏防护成效

研究期间监测到亚洲象造访食物源基地共48次,其中电围栏成功阻挡45次,防护成功率达93.75%;仅3次亚洲象突破电围栏进入管控区取食。电围栏管控区内共种植亚洲象食源植物(象草+小果野蕉)8760株,抽样测量2628株(抽样比例30%),其中被亚洲象取食609株,占抽样总数的23.17%;对照区共种植食源植物2200株,抽样测量660株,其中被亚洲象取食411株,占抽样总数的62.27%,可见对照区植物被采食比例显著高于管控区(表3)。

电围栏管控区及对照区种植的象草和小果野蕉均于2022年7—8月同期种植,但对照区用地类型为建设用地,种植后进行了人工浇水、施肥等干预措施;而管控区属于自然保护区范围,种植的食源植物未进行人工浇水、施肥,完全自然生长。由表4可见,种植初期(第一次测量),管控区象草的平均株高(43.27 cm)和平均最大叶长(14.88 cm)均极显著低于对照区(平均株高52.53 cm、平均最大叶长17.34 cm),小果野蕉的平均株高(69.05 cm)和平均最大叶长(19.00 cm)也均极显著低于对照区(平均株高81.50 cm、平均最大叶长48.67 cm)。根据两次植物测量结果可知,管控区内两种植物的生长指标增长率均极显著高于对照区。其中,管控区象草平均株高增长率、平均最大叶长增长率分别是对照区的2.44、3.14倍;管控区小果野蕉平均株高增长率、平均最大叶长增长率分别是对照区的2.78、10.25倍。

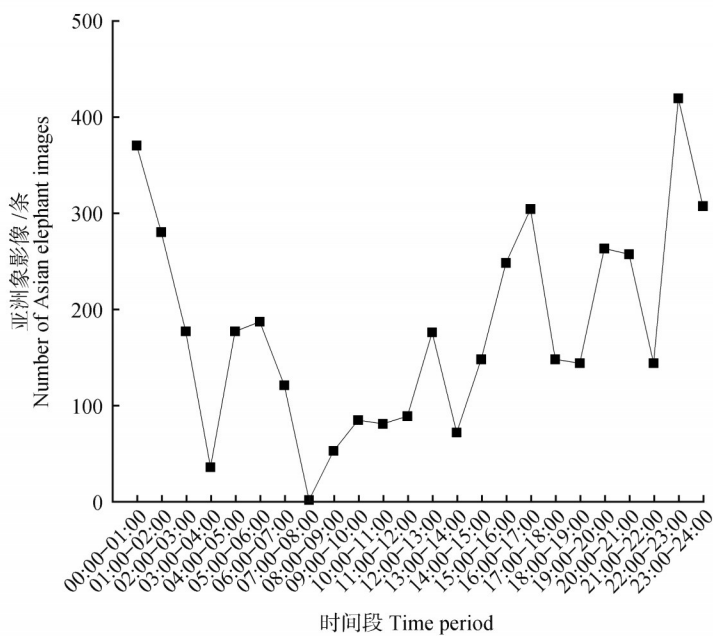


图6 亚洲象造访关坪食物源基地的时间分布
Figure 6 Time distribution of Asian elephants visiting Guangping Food Source Base

表3 电围栏内、外象草与小果野蕉种植、抽样及被亚洲象采食情况

Table 3 Planting, sampling and feeding of <i>Pennisetum purpureum</i> and <i>Musa acuminata</i> by Asian elephants inside and outside the energy fence					
调查区域 Survey area	植物种类 Plant species	种植株数 Total planted	测量株数 Total measured	取食株数 Plants consumed	采食率/% Feeding rate
电围栏内(管控区) Inside fence (controlled area)	象草 <i>Pennisetum purpureum</i>	8 000	2 400	586	24. 42
	小果野蕉 <i>Musa acuminata</i>	760	228	23	10. 09
	合计 Total	8 760	2 628	609	23. 17
电围栏外(对照区) Outside fence (control area)	象草 <i>Pennisetum purpureum</i>	2 000	600	403	67. 17
	小果野蕉 <i>Musa acuminata</i>	200	60	8	13. 33
	合计 Total	2 200	660	411	62. 27

注：抽样测量比例为30%。
Note: Sampling measurement proportion was 30%.

尽管管控区植物初始生长基础弱于对照区,但在电围栏的有效防护下,其生长速率大幅提升,且被采食比例显著降低。损害相对风险比结果显示: $R_r = 0.37 < 1$,表明管控区内食源植物被亚洲象采食的相对风险仅为对照区的37%,证明电围栏能有效保护新种植的亚洲象食源植物幼苗,为食源植物快速生长提供了保障。

4 讨论与结论

建设亚洲象食物源基地是缓解人-象冲突的重

要栖息地管理策略,其核心是根据亚洲象的生态需求和取食习性,在保护区实验区及周边种植其喜食植物,以引导保护区外的亚洲象返回区内活动,达到减少冲突发生的目的^[20]。我国目前正在推进以国家公园为主体的自然保护地体系建设,亚洲象国家公园已被列为全国49个拟建国家公园之一,其主要建设目的是强化以亚洲象及其栖息地为核心的自然保护地,其中食物源基地的建设可以巩固亚洲象及其栖息地保护成果,复壮亚洲象野外种群^[32],并通过栖息地生态系统恢复,提升栖息地质量,引导亚洲象稳

表4 电围栏内、外象草与小果野蕉生长量及增长率

Table 4 Growth and increase rate of *Pennisetum purpureum* and *Musa acuminata* inside and outside the energy fence

植物种类 Plant species	调查区域 Survey area	株高 Plant height				最大叶长 Maximum leaf length			
		第一次测量/cm	第二次测量/cm	增长量/cm	增长率/%	第一次测量/cm	第二次测量/cm	增长量/cm	增长率/%
		First measurement	Second measurement	Increase	Rate of increase	First measurement	Second measurement	Increase	Rate of increase
象草 <i>Pennisetum purpureum</i>	电围栏内(管控区) Inside fence (controlled area)	43.27 ± 4.97	185.26 ± 5.06	141.99 ± 7.09	328.15 ± 53.29	14.88 ± 3.05	76.65 ± 3.06	61.77 ± 4.31	415.12 ± 134.87
	电围栏外(对照区) Outside fence (control area)	52.53 ± 4.91	123.24 ± 5.10	70.71 ± 7.30	134.61 ± 25.58	17.34 ± 3.07	40.27 ± 2.92	22.93 ± 4.14	132.24 ± 52.25
	<i>t</i>	-40.92	268.29	218.85	130.80	-17.65	262.63	199.20	86.21
	<i>P</i>	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
小果野蕉 <i>Musa acuminata</i>	电围栏内(管控区) Inside fence (controlled area)	69.05 ± 4.84	79.33 ± 4.89	10.28 ± 7.23	14.89 ± 11.58	19.00 ± 3.17	33.33 ± 3.18	14.33 ± 4.33	75.42 ± 37.79
	电围栏外(对照区) Outside fence (control area)	81.50 ± 5.67	85.87 ± 4.54	4.37 ± 6.80	5.36 ± 8.47	48.67 ± 2.95	52.25 ± 3.18	3.58 ± 3.95	7.36 ± 8.19
	<i>t</i>	-17.09	-9.34	5.70	7.28	-65.47	-41.05	17.40	26.84
	<i>P</i>	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

注：表中数据为平均值±标准差。

Note: The data in the table represents the mean ± SD.

定在天然栖息地内生存与繁衍^[33]。

本研究通过对比电围栏内外食源植物的生长与被采食情况,发现电围栏内种植的食源植物被亚洲象采食损害率明显降低,植物生长速率大幅提升,相对风险比($R_r = 0.37$)进一步证实脉冲式太阳能电围栏对食物源基地内植物早期生长具有良好保护效果。

尽管防护成效显著,研究期间仍记录到3次象群突破电围栏进入食物源基地取食的情况。突破方式主要为成年雄象利用长牙挑起围栏线并向后拉拽致其断裂,或推倒主立柱后直接跨越进入,这与斯里兰卡象群通过推倒电围栏立柱、利用象牙抬起电线等方式跨越围栏的研究结果^[7]一致,反映出亚洲象具有较强的学习和适应能力,单一物理隔离难以完全阻止其进入电围栏内。因此,未来电围栏的设计与布设需进一步结合亚洲象行为特征进行优化,例如研发加强型主立柱、改进支架结构(如“E”型支架)、调整围栏线间距或层数等,推动技术迭代与复合应用,进一步提升电围栏的防护成效;也可借鉴国外厌恶型地理围栏(AGDs)的理念^[14-17],探索将脉冲式太阳能电围栏与声音预警、轻微电击等技术结合,

构建多层次防御体系。

肯尼亚^[8]和印度^[10]的研究证明了电围栏措施能有效防止农作物受损,但其长期成效还依赖于持续的管理和社区参与,维护管理不足则会削弱防护效果^[11]。本研究在试验期间安排了专人巡查与设备维护,保障了系统的稳定运行,这也提示在今后推广使用过程中,须建立长效管理机制,并鼓励社区参与安装与维护,以提升电围栏的可持续性。

综上,脉冲式太阳能电围栏在亚洲象食物源基地建设中具有有良好的防护效果,为人-象和谐共存提供了新的技术路径,也是保护生物学在栖息地管理中的实践创新。今后应进一步加强科研机构、保护管理部门及社区之间的合作,在深入研究亚洲象行为学与生态需求的基础上,在工程技术、管理模式和社会参与等层面形成更为完善的技术体系,不断提升人-象冲突防范的综合成效。

参考文献:

- [1] 谭爱军,余玲江.我国亚洲象的分布与保护[J].防护林科技,2015(5):89-91.
TAN A J, YU L J. Distribution and protection of Asian elephants in China [J]. Protection Forest Science and Technology, 2015

- (5): 89–91.
- [2] 国家重点保护野生动物名录 (2021年2月1日修订)[J]. 野生动物学报, 2021, 42(2): 605–640.
List of Nationally Protected Wild Animals (Revised on February 1, 2021)[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2021, 42(2): 605–640.
- [3] 何馨成. 西双版纳社区居民对亚洲象肇事与保护的认知研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
HE Q C. The cognition of community inhabitants to Asian elephant trouble and conservation in Xishuangbanna, southwest China[D]. Kunming: Yunnan University, 2010.
- [4] HOARE R. Options for the control of elephants in conflict with people[J]. Pachyderm, 1995, 19: 54–63.
- [5] THOULESS C R, SAKWA J. Shocking elephants: Fences and crop raiders in Laikipia District, Kenya[J]. Biological Conservation, 1995, 72(1): 99–107.
- [6] KALAM T, KUMAR BAISHYA H K, SMITH D. Lethal fence electrocution: A major threat to Asian elephants in Assam, India[J]. Tropical Conservation Science, 2018, 11: 1–8.
- [7] RANJEEWA A D G, THOMAS R J, WEERAKOON D K, *et al.* How did the elephant cross the fence? Electric fence crossing by elephants in Udawalawe, Sri Lanka[J]. Animal Conservation, 2025, 28(2): 197–207.
- [8] MUTINDA M, CHENG G, GAKUYA F, *et al.* Detusking fence-breaker elephants as an approach in human-elephant conflict mitigation[J]. PLoS One, 2014, 9(3): e91749.
- [9] FERNANDO P, EKANAYAKA S K K, PASTORINI J. The elephant at the fence: Almsman, panhandler, friend or foe? [J]. European Journal of Wildlife Research, 2020, 66(6): 97.
- [10] KAMDAR A, BAISHYA H K, NAGENDRA H, *et al.* Human-elephant conflict mitigation as a public good: What determines fence maintenance? [J]. Ecology and Society, 2022, 27(3): 24.
- [11] VAN EDEN M, ELLIS E, BRUYERE B L. The influence of human-elephant conflict on electric fence management and perception among different rural communities in Laikipia County, Kenya[J]. Human Dimensions of Wildlife, 2016, 21(4): 283–296.
- [12] KOCHPRAPA P, SAVINI C, NGOPRASERT D, *et al.* Mitigating human-elephant conflict in Southeast Asia[J]. Tropical Natural History, 2024, 24: 70–83.
- [13] SAHA S, SOREN R. Human-elephant conflict: Understanding multidimensional perspectives through a systematic review[J]. Journal for Nature Conservation, 2024, 79: 126586.
- [14] CABRAL DE MEL S J, SENEWEERA S, DE MEL R K, *et al.* Current and future approaches to mitigate conflict between humans and Asian elephants: The potential use of aversive geofencing devices[J]. Animals, 2022, 12(21): 2965.
- [15] CABRAL DE MEL S J, SENEWEERA S, DE MEL R K, *et al.* Welfare impacts associated with using aversive geofencing devices on captive Asian elephants[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2023, 265: 105991.
- [16] CABRAL DE MEL S J, SENEWEERA S, DANGOLLA A, *et al.* Attitudes towards the potential use of aversive geofencing devices to manage wild elephant movement[J]. Animals, 2023, 13(16): 2657.
- [17] CABRAL DE MEL S J, SENEWEERA S, DE MEL R K, *et al.* Virtual fencing of captive Asian elephants fitted with an aversive geofencing device to manage their movement[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2023, 258: 105822.
- [18] 陈明勇, 吴兆录, 董永华, 等. 中国亚洲象研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 78–80.
CHEN M Y, WU Z L, DONG Y H, *et al.* Research on Asian elephant in China[M]. Beijing: Science Press, 2006: 78–80.
- [19] 赵建伟, 杨云中, 何顺强. 西双版纳自然保护区周边社区综合治理[J]. 林业调查规划, 2006, 31(增刊): 244–247.
ZHAO J W, YANG Y Z, HE S Q. Comprehensive management of surrounding communities in Xishuangbanna Nature Reserve[J]. Forest Inventory and Planning, 2006, 31(Suppl.): 244–247.
- [20] 郭贤明, 何馨成, 王兰新, 等. 西双版纳亚洲象食物源基地对缓解人象冲突的效应[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3133–3137.
GUO X M, HE Q C, WANG L X, *et al.* Effects of Asian elephant food source base on the mitigation of human-elephant conflict in Xishuangbanna of Yunnan Province, southwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3133–3137.
- [21] 则得, 杨帆, 王斌, 等. 西双版纳亚洲象食物源基地利用状态研究[J]. 绿色科技, 2020, 22(20): 24–26.
ZE D, YANG F, WANG B, *et al.* A study on the utilization of the food source base of Asian elephants in Xishuangbanna[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020, 22(20): 24–26.
- [22] 杨正斌, 陈明勇, 董永华, 等. 西双版纳国家级自然保护区勐养子保护区亚洲象生境现状分析[J]. 林业调查规划, 2006, 31(3): 49–52.
YANG Z B, CHEN M Y, DONG Y H, *et al.* Analysis on Asian elephants' habitat situation in Mengyang Sub-Reserve of Xishuangbanna National Nature Reserve[J]. Forest Inventory and Planning, 2006, 31(3): 49–52.
- [23] 牙茜霞, 任惠泽, 董孝斌, 等. 基于土地利用变化与生态系统服务供需的中国野生亚洲象时空迁移特征分析[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1426–1436.
YA X J, REN H Z, DONG X B, *et al.* Spatio-temporal migration characteristics of wild Chinese Asian elephants based on land use change and ecosystem service supply and demand[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1426–1436.
- [24] 贺淹才. 草原·电围栏·畜牧业[J]. 农村实用工程技术(农业工程), 1987, 7(4): 26–27.
HE Y C. Grassland, electric fence and animal husbandry[J]. Rural Practical Engineering Technology (Agricultural Engineer-

- ing), 1987, 7(4): 26–27.
- [25] 张跃, 谢建, 吕逢源, 等. 太阳能电围栏[J]. 太阳能, 2002(3): 18.
- ZHANG Y, XIE J, LÜ F Y, *et al.* Solar electric fence [J]. Solar Energy, 2002(3): 18.
- [26] ABDULLAH-FAUZI N A F, KARUPPANNAN K V, MOHD-RADZI N H S, *et al.* Determining the dietary preferences of wild Asian elephants (*Elephas maximus*) in Taman Negara National Park, Malaysia based on sex and age using trnL DNA metabarcoding analysis[J]. Zoological Studies, 2022, 61: e60.
- [27] MOHD-RADZI N H S, KARUPPANNAN K V, ABDULLAH-FAUZI N A F, *et al.* Determining the diet of wild Asian elephants (*Elephas maximus*) at human-elephant conflict areas in Peninsular Malaysia using DNA metabarcoding[J]. Biodiversity Data Journal, 2022, 10: e89752.
- [28] 刘大杰, 刘春. GIS数字产品质量抽样检验方案探讨[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 348–352;361.
- LIU D J, LIU C. Study on sampling inspection schemes to digital products in GIS[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(4): 348–352;361.
- [29] 袁志强, 张立. 西双版纳三岔河地区野生亚洲象的个体识别、种群数量和活动特点[J]. 兽类学报, 2006, 26(4): 359–367.
- YUAN Z Q, ZHANG L. Population and activity characteristic of wild Asian elephants in the Wild Elephant Valley, Xishuangbanna National Nature Reserve, Yunnan, China[J]. Acta Theriologica Sinica, 2006, 26(4): 359–367.
- [30] 杨子诚, 陈颖, 李俊松, 等. 基于红外相机技术对亚洲象个体识别和种群数量的评估[J]. 兽类学报, 2018, 38(1): 18–27.
- YANG Z C, CHEN Y, LI J S, *et al.* Individual identification and population size assessment for Asian elephant based on camera-trapping techniques[J]. Acta Theriologica Sinica, 2018, 38(1): 18–27.
- [31] EKLUND A, LÓPEZ-BAO J V, TOURANI M, *et al.* Limited evidence on the effectiveness of interventions to reduce livestock predation by large carnivores[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 2097.
- [32] 陈飞, 唐芳林, 王丹彤, 等. 亚洲象国家公园探索与思考[J]. 林业建设, 2019, 37(6): 23–29.
- CHEN F, TANG F L, WANG D T, *et al.* Research on Asian Elephant National Park[J]. Forestry Construction, 2019, 37(6): 23–29.
- [33] 张璐. 野象迁徙到国家公园设立, 生物多样性该如何保护[J]. 环境与生活, 2022(4): 33–39.
- ZHANG L. How to protect biodiversity when wild elephants migrate to national parks? [J]. Green Living, 2022(4): 33–39.