

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.021

引用格式:魏思宇,马琴,梁咏亮,等.艾箭蚁对贺兰山东麓斑籽麻黄种子散布的影响[J].草地学报,2026,34(2):592—600

WEI Si-yu, MA Qin, LIANG Yong-liang, et al. Effects of *Cataglyphis aenescens* on Seeds Dispersal of *Ephedra rhytidosperma* at the Eastern Foot of Helan Mountain[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (2):592—600

艾箭蚁对贺兰山东麓斑籽麻黄种子散布的影响

魏思宇^{1,2,3,4}, 马琴^{1,2,3,4}, 梁咏亮^{5,6}, 徐皓⁷, 金廷文⁷, 娜荷芽⁷,
马志祥⁷, 李小伟^{1,2,3,4*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏大学农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学西北土地退化与生态
恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 5. 宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局, 宁夏 银川 750021;
6. 贺兰山森林生态系统宁夏野外科学观测研究站, 宁夏 银川 750021; 7. 内蒙古贺兰山国家级自然保护区,
内蒙古 阿拉善左旗 750300)

摘要:蚂蚁参与的种子扩散是荒漠生态系统植物种群更新的关键环节,解析其互作机制对濒危物种保育具有重要价值。本研究以贺兰山特有植物斑籽麻黄(*Ephedra rhytidosperma*)为对象,通过野外行为观测(3天连续跟踪记录)和控制实验(假种皮去除处理,10,20和30粒·m⁻²密度梯度),结合室内分析,揭示艾箭蚁(*Cataglyphis aenescens*)在该物种种子传播中的作用机制。结果表明:艾箭蚁搬运种子的高峰出现在上午10:00—11:00,平均搬运距离为4.0 m;假种皮因其具有较高的营养成分成为影响斑籽麻黄种子被搬运的关键因素,艾箭蚁对三种不同类型目标的搬运数量表现为完整种子>假种皮>去除假种皮种子,且假种皮去除后搬运效率也下降;艾箭蚁对不同密度种子的搬运表现出双向调控,高密度种子更容易吸引蚂蚁,但移出率较低。本研究揭示了艾箭蚁介导下斑籽麻黄种子扩散的营养互惠机制,为荒漠生态系统中濒危植物种群恢复提供了重要的科学依据。

关键词:斑籽麻黄;蚁播;假种皮;种子密度

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0592-09

Effects of *Cataglyphis aenescens* on Seeds Dispersal of *Ephedra rhytidosperma* at the Eastern Foot of Helan Mountain

WEI Si-yu^{1,2,3,4}, MA Qin^{1,2,3,4}, LIANG Yong-liang^{5,6}, XU Hao⁷, JIN Ting-wen⁷,
NA He-ya⁷, MA Zhi-xiang⁷, LI Xiao-wei^{1,2,3,4*}

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 4. Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 5. Ningxia Helan Mountain National Nature Reserve Administration, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 6. Helan Mountain forest ecosystem Ningxia field scientific observation and research station, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 7. Inner Mongolia Helan Mountain National Nature Reserve, Alxa Left Banner, Inner Mongolia 750300, China)

Abstract: Seeds diffusion involving ants is a key link in the renewal of plant populations in desert ecosystems. Analyzing the interaction mechanisms between ants and plants is of great value for the conservation of endangered species. This study focused on *Ephedra rhytidosperma*, a plant species endemic to the Helan Mountains.

收稿日期:2025-03-18;修回日期:2025-04-23

基金项目:贺兰山东麓珍稀濒危植物斑籽麻黄保护生物学研究项目(2022);宁夏贺兰山植被调查项目(2025);内蒙古贺兰山国家级自然保护区科学考察项目(2023);宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01);2022年中央财政林草生态保护资金贺兰山雪豹廊道调查项目(D6400000141009056_1)资助

作者简介:魏思宇(2001-),女,汉族,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事草地生态、资源与环境研究,E-mail:2879277093@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:lxwbq@126.com

Through field behavior observations (continuous tracking and recording for 3 days), controlled experiments (removal treatment of aril, density gradients of 10, 20 and 30 individuals·m⁻²) and combined with laboratory analysis, this study revealed the mechanism of action of *Cataglyphis aenescens* in the seeds dispersal of this species. The results showed that the peak of seeds transportation by *Cataglyphis aenescens* occurs from 10:00 to 11:00 in the morning, with an average transportation distance of 4.0 meters. The aril, due to its high nutritional content, has become a key factor affecting the transportation of *Ephedra rhytidosperma* seeds. The transportation quantity of *Cataglyphis aenescens* for the three different types of targets is as follows: intact seeds > aril > seeds with aril removed, and the transportation efficiency also decreases after aril removal. *Cataglyphis aenescens* shows bidirectional regulation in the transportation of seeds of different densities. High-density seeds are more likely to attract ants, but the removal rate is lower. This study revealed the nutritional reciprocity mechanism of *Ephedra rhytidosperma* seeds diffusion mediated by *Cataglyphis aenescens*, providing an important scientific basis for the recovery of endangered plant populations in desert ecosystems.

Key words: *Ephedra rhytidosperma*; Ant propagation; Aril; Seed density

种子传播是重要的生态过程,显著影响植物种群生长、群落结构和生态系统的恢复能力^[1-2]。蚂蚁在陆地植物种群扩散与传播过程中发挥着关键作用,与植物形成典型的互利共生关系^[3]。这种关系不仅促进了植物种子的远距离散布,有助于植物占据更广阔的生态位,还对植物的生存空间格局和物种多样性产生了积极影响。蚁巢内部特有的环境条件为种子提供了理想的生长空间。在蚁穴的潮湿、温暖环境中,种子得以吸收足够的水分和养分,进而促进了种子的萌发,帮助种子顺利定殖。这一过程不仅有利于种子的繁衍,也揭示了蚂蚁与植物之间微妙而重要的生态关系^[4]。蚂蚁搬运效率是衡量其与植物间互利共生关系强度的关键指标^[5]。有研究表明,蚂蚁搬运行为和效率能够影响种子的散布距离以及种子散布后的位置,进而影响植物幼苗的空间分布格局^[6-7]。而且,蚂蚁搬运效率还与蚁播植物种类、生境、可利用食物资源以及气候条件等因素密切相关。在干旱荒漠区,蚂蚁通过取食假种皮中的糖分、水分、蛋白质和脂肪等成分获得能量,这一行为直接影响着植被群落结构和生态功能^[8]。此外,蚁播植物的密度也会显著影响蚂蚁的搬运行为。Hughes等^[9]研究表明,高密度的种子聚集可以促进种子的二次传播,而De Biseau等^[10]发现高密度的种子更易吸引蚂蚁搬运^[11]。

为了利用蚂蚁传播,种子植物进化出了独特的组织结构,如蚁播植物种子的不同组织发育而来的假种皮(Aril)、油质体(Elaiosome)等结构^[12-13]。假种皮是种子植物适应环境而发展出来的一类特殊的种皮附属物,具有重要的生物学研究价值^[14],其内含物质与种子的传播机制密切相关,这类种子由于其假种皮的特性,易于被蚂蚁采集并进行搬运^[15-16]。有研究发现,仿栗(*Sloanea hemsleyana*)假

种皮中含有的油类物质,是吸引蚁类的关键成分^[17]。此外,小檗科鲜黄连属(*Plagiorhegma*)植物的假种皮中糖分含量较高,其种子同样依赖蚂蚁进行散布^[15,18]。假种皮的存在为蚂蚁搬运种子提供了便利^[13],另外蚂蚁不易咬住光滑且坚硬的种皮,减少了蚂蚁对种子的采食^[19]。

斑籽麻黄(*Ephedra rhytidosperma*)作为贺兰山特有的国家二级重点保护植物,强大的“T”型根系使其具有抗贫瘠、抗旱、抗寒等生物学特性,其发达的根系网络可深入土壤,显著提升土壤抗侵蚀能力,有效遏制水土流失,是贺兰山东麓洪积扇和浅山区的强旱生树种^[20],对维持该区荒漠生态系统多样性和生态平衡具有重要作用。近年来,斑籽麻黄种群数量锐减,群落逐渐退化。其主要原因是斑籽麻黄实生更新苗数量稀少,以萌生为主,分布区域狭窄,且种群性别以雄性为主,这些因素致使斑籽麻黄自然更新困难,严重影响种群的规模 and 分布^[21]。在野外调查的过程中,我们发现斑籽麻黄种子成熟后,蚂蚁喜欢啃食饱满多汁的假种皮,会将种子搬运进巢穴或者丢弃在中间或更远的地方。蚂蚁在罂粟科紫堇属(*Corydalis*)^[22-24]、大戟科铁苋菜属(*Acalypha*)^[22]、百合科猪牙花属(*Erythronium*)^[25]等植物的种子传播过程中起着重要作用,然而,关于其在麻黄属(*Ephedra*)植物种子传播中的作用未见报道。我们假设蚂蚁这一行为会影响斑籽麻黄种子的传播距离、效率和数量。由此,本文通过研究斑籽麻黄群落中蚂蚁的觅食、行为以及分析二者的互惠关系,试图揭示:(1)蚂蚁传播距离、处理效率及搬运种子数量的时间动态特征;(2)影响蚂蚁搬运斑籽麻黄种子的主要因素。本研究结果可为国家重点保护植物斑籽麻黄种群恢复和保育提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏贺兰山东麓的洪积扇区域(105°20′32″~106°41′15″E, 38°27′02″~38°30′09″N), 该区域属于干旱大陆性气候, 全年干旱少雨, 寒暑变化强烈, 日照强, 无霜期短。年均温 8.5℃, 年均降雨量 200~400 mm, 年平均蒸发量 2000 mm 以上, 年日照时数 3040 h。该地区土壤类型为山体灰钙土, 生长着耐旱的斑茅、短花针茅(*Stipa breviflora*)、刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、中亚细柄茅(*Ptilagrostis pelli-otii*)、蒙古扁桃(*Prunus mongolica*)等灌丛植被^[21]。

1.2 研究方法

1.2.1 蚂蚁的种类鉴定、搬运距离与搬运效率测定 在洪积扇区域内选择蚁巢分布较多的斑茅群落, 每个群落内随机设置 3 个 30 m×30 m 的样方, 每个样方内随机选择 3 株生长状况一致、冠幅相近且彼此之间距离大于 3 m 的斑茅雌株。从成熟的斑茅植株中采集 10 粒新鲜种子, 置于标记植株周围 1~10 cm 范围内。其中放置种子的条件与种子掉落的自然环境条件一致。在放置的种子被蚂蚁移走后, 立即将种子数量补充到 10 粒。分别于 8:00—16:00 连续观察 3 天, 用跟踪法测量种子的搬运距离, 并标记种子被放置的位置。从其原始位置移除超过 1 cm 的种子被认为是搬运过的种子^[26]。捕获参与种子传播的所有蚂蚁, 并带回实验室进行物种鉴定。本试验捕捉到 1 种蚂蚁搬运斑茅种子, 由宁夏大学农学院辛明副教授采用形态学特征比对的方法进行鉴定。通过仔细观察蚂蚁的体型大小、触角节数、胸部形态以及腹部特征等, 与现有膜翅目(Hymenoptera)蚁科(Formicidae)箭蚁属(*Cataglyphis*)物种的形态学资料进行比对, 最终鉴定该蚂蚁为艾箭蚁(*Cataglyphis aenescens*)。

蚂蚁搬运效率=搬运种子的数量/搬运种子的持续时间^[26]。

1.2.2 不同处理对蚂蚁搬运的影响 (1)假种皮去除对斑茅种子传播的影响。在样方内随机采集进入种子扩散期的 5 株斑茅的成熟种子。每个植株共收集 10 粒成熟种子。其中 5 粒种子去除假种皮, 另外 5 粒种子保持完整, 将这 10 粒种子放置在取样植物周围。同时, 将剥离的假种皮也放

置在取样植物周围。记录 8:00—16:00 蚂蚁搬运种子和假种皮的数量。

(2)种子密度对斑茅种子传播的影响。在样方内随机采集种子成熟、即将进入种子扩散期的 5 株斑茅的种子。这些采样植物之间的距离超过 3 m。设定三种种子密度处理: 10 粒·m⁻²、20 粒·m⁻² 和 30 粒·m⁻²。将每个处理的种子放置在取样的个体周围, 放置种子的环境与种子掉落的自然环境一致。从 8:00 至 16:00 每隔 1 h 记录移除的种子的数量并及时补充种子。

移除率=移除的种子数量/放置的种子总数^[26]。

(3)假种皮营养成分测定。假种皮含水率(Water content)采用烘干法测定; 可溶性蛋白质(Soluble protein)含量采用考马斯亮蓝法测定; 粗脂肪(Crude fat)含量采用脂肪提取仪测定; 可溶性糖(Soluble sugar)含量采用蒽酮法测定^[27-28]。

1.3 数据统计与分析

本研究采用 Excel 2017 和 SPSS 21.0 进行数据存储和初步处理。利用单因素方差分析(One-way ANOVA)揭示 3 种种子处理下蚂蚁传播距离和传播数量的差异, 以及不同种子密度处理对种子扩散差异的影响, 并在 $\alpha=0.05$ 水平上进行 LSD 多重比较, 以检验不同处理下的差异显著性。采用 Origin 2023 作图。

2 结果与分析

2.1 搬运斑茅种子的蚂蚁类别和其搬运行为

艾箭蚁在上午和下午各有一个活动高峰。负责搬运种子的工蚁存在明显的体型分化, 分为大工蚁(体长 5.3~8.7 mm)和小工蚁(体长 4.0~6.0 mm)(图 1, 图 2)。艾箭蚁会搬运和啃食种子(图 3), 当它们发现食物后, 搬运速度较快, 并且会选择最近的路线返回蚁巢。观察发现, 搬运斑茅种子的蚂蚁表现出以下四种行为: (1)当一只蚂蚁单独发现种子后, 返回蚁巢并释放信息素或通过其他方式召集巢内成员共同搬运种子; (2)多只蚂蚁协同寻找种子, 当发现种子时, 两只蚂蚁或多只蚂蚁共同搬运一颗种子; (3)蚂蚁独自搜索并搬运种子; (4)蚂蚁发现种子后不进行搬运, 而是原地啃食种子后丢弃。



图1 大工蚁形态图

Fig. 1 Morphological diagram of large worker ants



图2 小工蚁形态图

Fig. 2 Morphological diagram of small worker ants



图3 艾箭蚁的种子携带和啃食行为

Fig. 3 Seed-carrying and gnawing behavior of

Cataglyphis aenescens

注:a为艾箭蚁在斑籽麻黄上啃食假种皮;b为艾箭蚁啃食掉落的斑籽麻黄种子假种皮;c为艾箭蚁搬运斑籽麻黄种子;d为斑籽麻黄种子假种皮

Note:a is *Cataglyphis aenescens* gnawing on the arils of *Ephedra rhytidospema*; b is *Cataglyphis aenescens* gnawing on the arils of fallen *Ephedra rhytidospema* seeds; c is *Cataglyphis aenescens* carry *Ephedra rhytidospema* seeds; d is seed arils of *Ephedra rhytidospema*

2.2 蚂蚁传播距离、处理效率和种子数量

艾箭蚁的日搬运活动规律如图4所示。通过连续3天的观察,发现艾箭蚁的日搬运高峰出现在10:00—11:00,而搬运低峰则出现在12:00—14:00。当中午气温超过25℃时,艾箭蚁的搬运活动明显减少。上午的搬运高峰出现时间与当日温

度密切相关。在6月8日和6月9日,早晨温度较高,搬运高峰出现在10:00左右;而在6月10日,日出较晚,早晨温度低于20℃,搬运高峰则推迟至11:00。此外,观察还发现,在15:00之后,随着温度逐渐降低,艾箭蚁的搬运活动逐渐变得活跃。

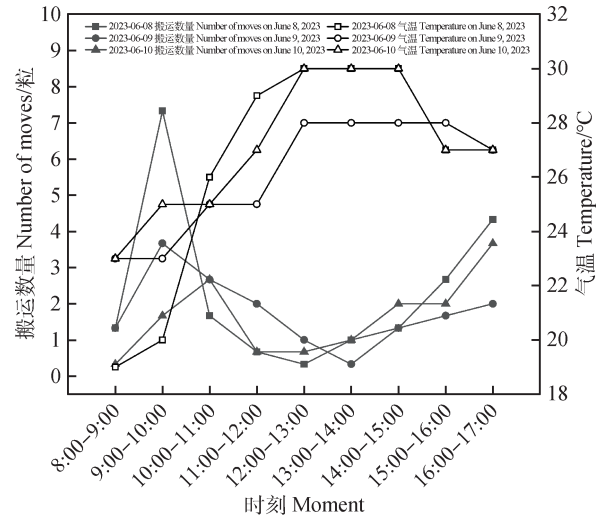


图4 艾箭蚁的日搬运活动

Fig. 4 The daily transportation activity of *Cataglyphis aenescens*

由图5可知,艾箭蚁对斑籽麻黄种子的搬运效率和搬运距离没有显著差异性。由图5a可知,三天测得的蚂蚁搬运平均距离分别为4.3 m,3.7 m和4.2 m,艾箭蚁对斑籽麻黄种子的平均搬运距离为4.1 m,搬运距离较远。由图5b可知,三天测得的蚂蚁搬运平均效率分别为2.3 粒·h⁻¹、1.8 粒·h⁻¹和1.7 粒·h⁻¹,艾箭蚁对斑籽麻黄种子的平均搬运效率为1.9 粒·h⁻¹,搬运效率总体不高。表明在一定时期内蚂蚁搬运处于一个稳定的状态,但其搬运效率不高。

2.3 种子假种皮去除对蚂蚁搬运的影响

由表1可知,斑籽麻黄假种皮含水率为71.0%、可溶性蛋白含量为44.5 mg·g⁻¹、可溶性糖含量为257.5 mg·g⁻¹、粗脂肪含量为23.4 mg·g⁻¹。总体来说,斑籽麻黄假种皮的养分含量较高,此外艾箭蚁喜爱取食水果和腐烂水果汁液等含糖量高的食物,因此,斑籽麻黄假种皮具有吸引蚂蚁进行搬运的条件。

为了验证斑籽麻黄的假种皮是否是吸引艾箭蚁搬运的关键,本研究将斑籽麻黄种子分为完整种子、假种皮和去除假种皮的种子。艾箭蚁对三种不同类型的目标搬运的数量总体具有显著差异($P <$

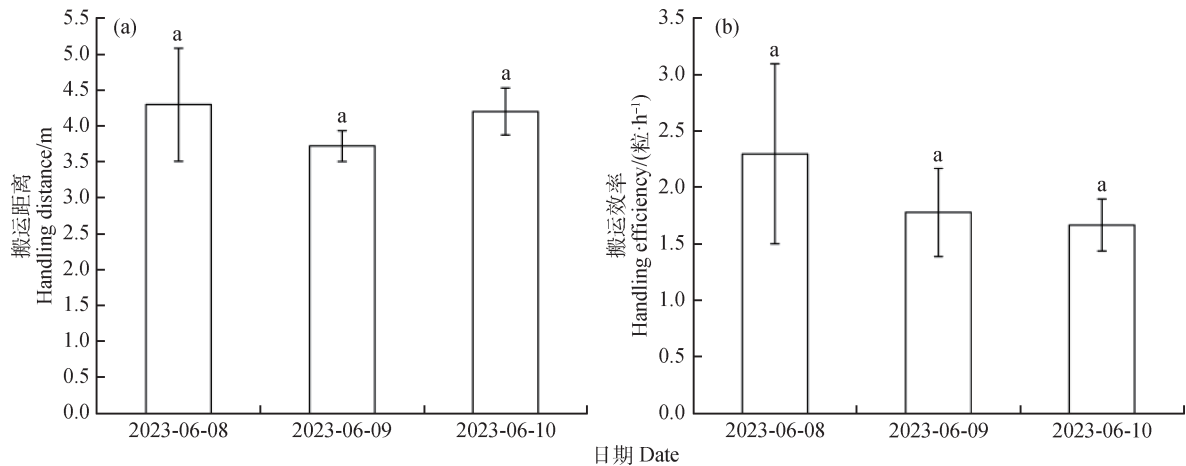


图 5 艾箭蚁的搬运距离和搬运效率

Fig. 5 Carrying distance and efficiency of *Cataglyphis aenescens*

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$), the same as below

表 1 斑籽麻黄假种皮养分含量

Table 1 Nutrient content of aril of *Ephedra rhytidospema*

	含水率 Water content/%	可溶性蛋白 Soluble proteins/(mg·g ⁻¹)	可溶性糖 Soluble sugars/(mg·g ⁻¹)	粗脂肪 Crude fat/(mg·g ⁻¹)
假种皮 Aril	71.0±2.0	44.5±17.9	257.5±8.7	23.4±0.5

0.01),搬运数量表现为完整种子>假种皮>去除假种皮种子(图 6a),分别为 15.3 粒、11.7 粒和 2.7 粒。艾箭蚁对三种不同类型的目标搬运效率差异

不显著(图 6b),其主要搬运的是具有假种皮的完整种子(1.7 粒·h⁻¹)和假种皮(1.5 粒·h⁻¹),而对去除假种皮的种子搬运较少(0.6 粒·h⁻¹)。

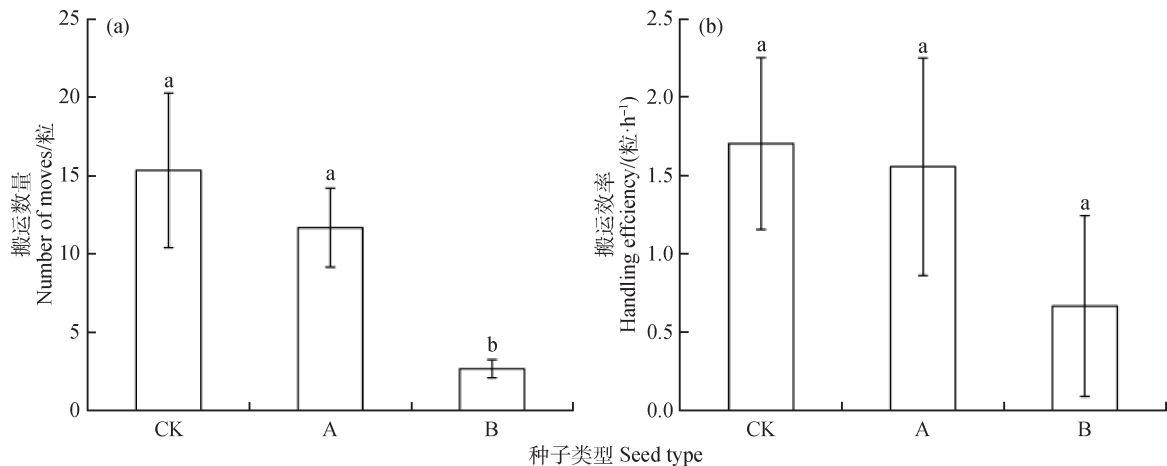


图 6 假种皮去除对蚂蚁搬运的影响

Fig. 6 Effect of aril removal on ant handling

注:CK 表示完整种子;A 表示假种皮;B 表示去除假种皮种子

Note: CK stands for complete seed; A stands for arils; B stands for remove the arils seeds

2.4 种子密度对蚂蚁搬运行为的影响

艾箭蚁对三种不同密度种子的搬运数量总体差异不显著,搬运数量表现为 30 粒·m⁻²>20 粒·m⁻²>10 粒·m⁻²,分别为 28.7 粒、25.7 粒和 21.3 粒(图 7a)。艾箭蚁对三种不同密度的种子移除率差异显

著($P < 0.01$),移除率表现为 10 粒·m⁻²>20 粒·m⁻²>30 粒·m⁻²,分别为 23.7%、14.3% 和 10.6%(图 7b)。当种子密度为 10 粒·m⁻²时,搬运数量最低,但移出率最高,种子密度为 30 粒·m⁻²时,搬运数量最高,但移出率最低。

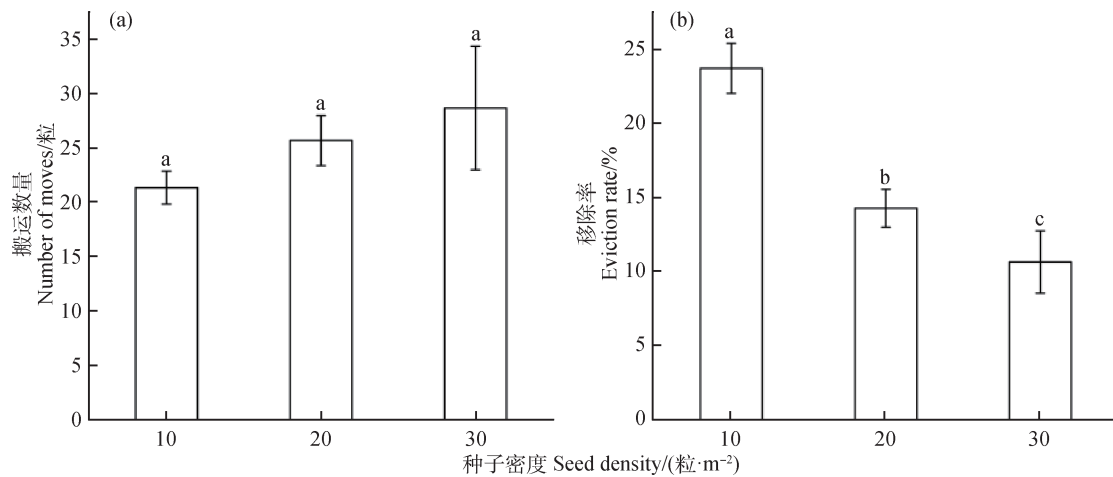


图7 不同种子密度对蚂蚁搬运的影响

Fig. 7 Effect of different seed densities on ant transport

3 讨论

3.1 蚂蚁搬运斑籽麻黄种子的行为模式及其影响因素

蚂蚁几乎参与所有陆地植物群落的扩散传播^[1],这种传播效应是自然界普遍存在的互利共生现象之一^[29]。在本研究中,我们观察到散布斑籽麻黄种子的蚂蚁只有一种,即艾箭蚁。艾箭蚁在搬运种子时表现出四种不同的行为模式:单独蚂蚁发现种子后返回巢穴召集同伴,几只蚂蚁共同搬运一颗种子,蚂蚁独自搜索和搬运种子以及蚂蚁原地啃食种子后丢弃。艾箭蚁在搬运过程中的社会合作和个体决策多样性反映了其社会行为和决策过程可能受到食物资源可获得性、环境条件以及自身生理状态等多种因素的影响^[30]。研究结果表明,艾箭蚁的搬运活动受到温度的显著影响,随着气温的升高,蚂蚁的搬运活动减少,而当气温降低时,搬运活动则逐渐变得活跃。这可能与蚂蚁的生理代谢和活动能力有关,高温可能增加了蚂蚁的水分蒸发,从而限制了它们的活动能力^[31]。此外,搬运高峰的出现时间与当日的温度变化也有关,这进一步证实了环境因素对蚂蚁行为的影响^[32]。在对艾箭蚁搬运斑籽麻黄种子的效率和距离的观察中,我们发现其搬运效率和距离没有显著差异。这可能表明,在资源充足时,蚂蚁倾向于搬运活动,而不是优化搬运效率,导致其在一定时期内搬运活动相对稳定但总体效率不高^[6]。

本次研究重点聚焦于蚂蚁搬运种子的行为模式及影响因素,未对研究区艾箭蚁种群密度等情况展开调查。后续研究中,将采用标准化的样方调查

法,系统记录艾箭蚁的分布位置与数量,科学计算种群密度。我们推测,艾箭蚁种群密度可能会影响斑籽麻黄种子的散布范围和数量。较高的种群密度可能意味着更多的蚂蚁参与种子搬运,从而增加种子的散布范围;而较低的种群密度则可能限制种子的有效传播。此外,种群密度还可能影响蚂蚁个体之间的合作模式,进而对种子搬运效率和距离产生间接影响。这一分析将有助于更全面地理解艾箭蚁在斑籽麻黄种子散布过程中的作用,也为未来进一步研究蚂蚁与植物的相互关系提供了重要的参考方向。

3.2 假种皮在种子扩散中的作用

蚂蚁通过搬运植物种子帮助植物散布,而植物为了适应这种传播方式进化出了具有吸引力的特征,例如蚁播植物种子上的假种皮通常含有丰富的营养成分^[30]。本研究对斑籽麻黄种子的假种皮养分含量进行了测定,发现其中含有丰富的可溶性糖、可溶性蛋白和粗脂肪,这些成分能为蚂蚁提供丰富的能量和营养。这不仅提高了蚂蚁搬运种子的积极性,还可能对蚂蚁的生存和繁殖产生影响。此外,假种皮较高的含水量为蚂蚁提供了额外的水分补给,在干旱荒漠地区,这种水分来源对蚂蚁来说尤为重要。研究发现,艾箭蚁更倾向于搬运具有假种皮的完整种子,而不是去除假种皮的种子。这表明假种皮可能是吸引蚂蚁搬运的关键因素,同时也可能是蚂蚁获取营养的重要来源^[33]。假种皮的营养成分影响着蚂蚁搬运种子的效率和数量,这表明假种皮不仅是蚂蚁搬运行为的诱因,而且是影响种子传播距离和成功率的关键因素之一,这与多项

研究结果相互印证^[14-18]。如 Henao-Gallego 等^[34]通过给种子添加含有营养成分的人造假种皮来观察蚂蚁对种子的搬运和啃食现象,研究发现带有假种皮的种子被蚂蚁搬运的效率是未处理种子的两倍,这表明人造假种皮有效地增强了蚂蚁对种子的关注度及其搬运行为。

在自然选择的过程中,假种皮的存在可能对斑茅种子麻黄种子的适应性及其传播效率产生了积极影响。蚂蚁搬运种子的行为有助于种子远离母株,从而减少同种个体间的竞争,同时提升了种子在新环境中的存活概率^[35]。进一步研究假种皮的化学成分及其对蚂蚁行为的具体影响,可以揭示更多关于蚂蚁与植物间共生关系的细节。例如,假种皮的化学成分可能对蚂蚁具有吸引作用,促使蚂蚁更频繁地搬运这些种子^[36]。某些特定的化学信号可能使得蚂蚁更倾向于搬运带有假种皮的种子,而忽略那些没有假种皮的种子^[37]。这种选择性搬运行为可能对植物的遗传多样性和生态位分化产生深远的影响。

3.3 种子密度对蚂蚁搬运的影响

研究发现^[10],种子聚集程度越高,越容易被蚂蚁发现,种子被搬运数量就越多,而种子移出率较低^[33]。本研究通过设置 10 粒·m⁻²、20 粒·m⁻² 和 30 粒·m⁻² 三种种子密度,观察到蚂蚁搬运种子数量表现为 30 粒·m⁻² > 20 粒·m⁻² > 10 粒·m⁻²,而种子移出率则呈现相反趋势,这与王赛^[25]对猪牙花 (*Erythronium japonicum*) 种子被蚂蚁搬运的研究结果相一致,Ohkawara 等^[38]对同种植物的研究也证实了这一点。这可能是因为更高程度的种子聚集可能会给蚂蚁带来更高的视觉或化学线索^[13],更容易吸引蚂蚁。但由于种子散布过程中蚂蚁数量较少,在高密度种群中种子较多时容易饱和,因此导致种子移出率下降,而在低密度下蚂蚁没有饱和反而搬运较快^[39]。此外,种子密度对蚂蚁搬运行为的影响还可能与蚂蚁的搬运策略有关。依据“最优觅食理论”,动物在觅食过程中会通过权衡能量收益与消耗实现净收益最大化。在高密度的种子环境中,蚂蚁为降低能量损耗,可能采取“选择性搬运”策略,优先搬运那些更容易携带的种子,而忽略其他种子,进而导致种子移出率的降低;相反,在低密度环境中,蚂蚁可能采取“全面搬运”策略,尽可能搬运所有可搬运的种子,从而提高种子的移出率。这种

策略的差异可能与蚂蚁的觅食效率和能量消耗有关。在高密度下,蚂蚁可能更倾向于减少搬运次数以节省能量,而在低密度下,为了获取更多食物,蚂蚁可能增加搬运次数。因此,种子密度与蚂蚁搬运行为之间的复杂关系,涉及蚂蚁的觅食行为、能量效率以及环境因素的综合作用。

4 结论

艾箭蚁是斑茅种子麻黄种子的主要传播者,其活动呈现出显著的时间节律性与行为特征。这一传播行为受斑茅种子假种皮特殊营养成分驱动,有效促进种子扩散和种群遗传多样性的维持。种子密度对蚂蚁传播行为存在双向调控作用,高密度种子吸引蚂蚁但移出率低,揭示出密度依赖的种子传播机制。植物种子的化学信号与环境资源分布共同塑造了动物传播者的行为策略,这种基于能量权衡的种间互作模式可能普遍存在于荒漠生态系统中,为理解动植物协同进化及生态系统功能维持机制提供了新的理论依据。

参考文献

- [1] WANG B, IVES A R. Tree-to-tree variation in seed size and its consequences for seed dispersal versus predation by rodents [J]. *Oecologia*, 2017, 183(3): 751-762
- [2] BUONO C M, QUARTUCCIA G I, SMISKO W R, et al. Uncovering how behavioral variation underlying mutualist partner quality is partitioned within a species complex of keystone seed-dispersing ants [J]. *Insectes Sociaux*, 2022, 69 (2): 247-260
- [3] GOVE A D, MAJER J D, DUNN R R. A keystone ant species promotes seed dispersal in a “diffuse” mutualism [J]. *Oecologia*, 2007, 153(3): 687-697
- [4] 柯丽君. 蚂蚁对川东紫堇和地锦苗种子散布的影响研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2012: 29-30
KE L J. The effect of ants on the seed dispersal of *Corydalis acuminata* Franch. and *Corydalis shearerii* S. Moore [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2012: 29-30
- [5] NESS J H, MORIN D F, GILADI I. Uncommon specialization in a mutualism between a temperate herbaceous plant guild and an ant: are *Aphaenogaster* ants keystone mutualists? [J]. *Oikos*, 2009, 118(12): 1793-1804
- [6] 祝艳, 王东. 蚂蚁觅食与搬运行为对阜平黄堇和小花黄堇种子散布的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4938-4942
ZHU Y, WANG D. Seed dispersal of *Corydalis wilfordii* and *C. Racemosa* (Papaveraceae): effect of ant foraging and behavior and seed characteristics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (17): 4938-4942

- [7] 陈帆, 陈进, 刘志秋, 等. 蚂蚁对澜沧舞花姜种子散布及种苗空间分布格局的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 210-217
CHEN F, CHEN J, LIU Z Q, et al. The role of ants in seed dispersal of *Globba lancangensis* and the spatial distribution of its seedlings [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 210-217
- [8] 刘任涛. 干旱半干旱区蚂蚁的生态功能综述[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 213-221
LIU R T. Ecological function of ants and its implication for ecological restoration of semiarid and arid ecosystems[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 213-221
- [9] HUGHES L, WESTOBY M. Removal rates of seeds adapted for dispersal by ants[J]. Ecology, 1990, 71(1): 138-148
- [10] DE BISEAU J C, PASTEELS J M. Regulated food recruitment through individual behavior of scouts in the ant, *Myrmica sabuleti* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. Journal of Insect Behavior, 1994, 7(6): 767-777
- [11] GORB E, GORB S. Effects of seed aggregation on the removal rates of elaiosome-bearing *Chelidonium majus* and *Viola odorata* seeds carried by *Formica polyctena* ants [J]. Ecological Research, 2000, 15(2): 187-192
- [12] LENGUEL S, GOVE A D, LATIMER A M, et al. Convergent evolution of seed dispersal by ants, and phylogeny and biogeography in flowering plants: A global survey [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2010, 12(1): 43-55
- [13] 宋玲玲. 蚂蚁在4种紫堇属(*Corydalis* DC.)植物种子散布中的作用初步研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2017: 1-6
SONG L L. The role of dispersing ants in seed dispersal of 4 *Corydalis* species [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2017: 1-6
- [14] 陈霞, 杜凡. 种子植物假种皮研究综述[J]. 西南林学院学报, 2008, 28(1): 34-38
CHEN X, DU F. Advances in study on aril of Spermatophyte [J]. Journal of Southwest Forestry College, 2008, 28(1): 34-38
- [15] 马绍宾, 李德铎. 高等植物的散布与进化 I. 散布体类型、数量、寿命及散布机制[J]. 云南植物研究, 2002, 24(5): 569-582
MA S B, LI D Z. Dispersal and evolution in higher plants I. Diaspores, their quantity and life span as well as dispersal mechanisms [J]. Acta Botanica Yunnanica, 2002, 24(5): 569-582
- [16] 鲁长虎. 蚁对植物种子的传播作用[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 64-66
LU C H. Effect of ants on seed dispersal [J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(2): 64-66
- [17] 薛瑞娟, 陈高, 黄圣卓, 等. 仿栗油脂体化学组成及其与种子传播者关系的初步研究[J]. 植物分类与资源学报, 2012, 34(5): 483-486
XUE R J, CHEN G, HUANG S Z, et al. Preliminary study of chemical composition of the elaiosome of *Sloanea hemsleyana* (lto) and its ecological function to attract dispersal agent [J]. Plant Diversity and Resources, 2012, 34(5): 483-486
- [18] BERG R Y. Dispersal ecology of *Vancouveria* (Berberidaceae) [J]. American Journal of Botany, 1972, 59(2): 109-122
- [19] RODGERSON L. Mechanical defense in seeds adapted for ant dispersal [J]. Ecology, 1998, 79(5): 1669
- [20] 师斌, 窦建德, 黄维, 等. 宁夏贺兰山斑籽麻黄荒漠群落特征[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 362-367
SHI B, DOU J D, HUANG W, et al. Community characteristics of *Ephedra rhytidisperma* in Helan Mountain of Ningxia, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(3): 362-367
- [21] 赵玲, 杨博, 刘万弟, 等. 宁夏贺兰山斑籽麻黄种群的性比及雌雄空间格局[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 10297-10304
ZHAO L, YANG B, LIU W D, et al. Sex ratio and spatial pattern of *Ephedra rhytidisperma* in Helan Mountain of Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10297-10304
- [22] 韩翠芳. 蚂蚁对两种蚁播植物种子散布及其影响因素的初步研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2021: 8
HAN C F. Study on ant-mediated seed dispersal of two myrmecochorous plants and its influencing factors [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2021: 8
- [23] 祝艳. 蚂蚁对紫堇属等植物种子传播的研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2017: 1-7
ZHU Y. Study on ant-mediated seed dispersal of some *Corydalis* species and other myrmecochorous plants [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2017: 1-7
- [24] 王雪. 早春蚁播植物开花结果物候与蚂蚁季节性活动的关系研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2013: 1-10
WANG X. The study on the relationship between the flowering and fruting phenologies of spring ephemeral *Corydalis* plants and the seasonal activity of ants [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2013: 1-10
- [25] 王赛. 东北林下早春短命植物猪牙花有性繁殖生态学研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2021: 1-7
WANG S. Study on sexual reproduction ecology of understory early spring ephemeral *Erythronium japonicum* in Northeast [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2021: 1-7
- [26] WANG S, DU Y Q, ZHANG D, et al. Seed dispersal mechanism of *Erythronium japonicum* in Northeast China [J]. Acta Oecologica, 2022, 114: 103821
- [27] 龙晓凤, 耿彦飞. 10种类茶植物的营养成分及抗氧化活性分析[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(20): 158-164
LONG X F, GENG Y F. Analysis of nutritional composition and antioxidant activity of 10 non-*camellia* tea plants [J]. Food Research and Development, 2024, 45(20): 158-164
- [28] 赵秋玲, 张晶, 王大伟, 等. 不同种群锐齿槲栎种子形态特征与营养成分变异分析[J]. 西部林业科学, 2024, 53(5): 8-15
ZHAO Q L, ZHANG J, WANG D W, et al. Seed morphological characteristics and nutrient content variation in different populations of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* Maxim [J]. Journal of West China Forestry Science, 2024, 53(5): 8-15
- [29] 江谱娟, 王东. 其它可利用食物对小花宽瓣黄堇(*Corydalis*

- giraldii* Fedde)种子散布的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5797-5803
- JIANG P J, WANG D. Effect of alternative food resources on the seed dispersal of an ant-dispersed plant *Corydalis giraldii* Fedde (Papaveraceae) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (17): 5797-5803
- [30] 张智英, 李玉辉, 赵志模. 蚂蚁与蚁运植物的互惠共生关系[J]. 动物学研究, 2002, 23(5): 437-443
- ZHANG Z Y, LI Y H, ZHAO Z M. Mutualism between ants and myrmecochores [J]. Zoological Research, 2002, 23 (5): 437-443
- [31] IBARRA F G, JOUQUET P, BOTTINELLI N, et al. Experimental evidence that increased surface temperature affects bioturbation by ants[J]. Journal of Animal Ecology, 2024, 93(3): 319-332
- [32] 张智英, 曹敏, 杨效东, 等. 舞草种子的蚂蚁传播[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1847-1853
- ZHANG Z Y, CAO M, YANG X D, et al. *Codariocalyx moturius* seed removed by ants in Xishuangbanna [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1847-1853
- [33] BARROSO Á, AMOR F, CERDÁ X, et al. Dispersal of non-myrmecochorous plants by a “keystone disperser” ant in a Mediterranean habitat reveals asymmetric interdependence [J]. Insectes Sociaux, 2013, 60(1): 75-86
- [34] HENAO-GALLEGO N, ESCOBAR-RAMÍREZ S, CALLE Z, et al. An artificial aril designed to induce seed hauling by ants for ecological rehabilitation purposes[J]. Restoration Ecology, 2012, 20(5): 555-560
- [35] CAMARGO P H S A, MARTINS M M, FEITOSA R M, et al. Bird and ant synergy increases the seed dispersal effectiveness of an ornithochoric shrub [J]. Oecologia, 2016, 181(2): 507-518
- [36] FISCHER R C, RICHTER A, HADACEK F, et al. Chemical differences between seeds and elaiosomes indicate an adaptation to nutritional needs of ants [J]. Oecologia, 2008, 155(3): 539-547
- [37] KONEČNÁ M, MOOS M, ZAHRADNÍČKOVÁ H, et al. Tasty rewards for ants: differences in elaiosome and seed metabolite profiles are consistent across species and reflect taxonomic relatedness[J]. Oecologia, 2018, 188(3): 753-764
- [38] OHKAWARA K, HIGASHI S, OHARA M. Effects of ants, ground beetles and the seed-fall patterns on myrmecochory of *Erythronium japonicum* Decne. (Liliaceae) [J]. Oecologia, 1996, 106(4): 500-506
- [39] SMITH B H, FORMAN P D, BOYD A E. Spatial patterns of seed dispersal and predation of two myrmecochorous forest herbs[J]. Ecology, 1989, 70(6): 1649-1656

(责任编辑 闵芝智)