苜蓿切叶蜂筑巢活动的气象特征及其授粉效力评价*

段 盼[1, 2**] 朱猛蒙[3**] 侯 丽[1] 赵紫华[2***] 王宪辉[1***]

（1. 中国科学院动物研究所，动物多样性保护与有害动物防控全国重点实验室，北京 100101；
2. 中国农业大学植物保护学院植物生物安全系，农业农村部植物检疫性有害生物监测防控重点实验室，北京 100193；3. 宁夏农林科学院植物保护研究所，银川 750002）

摘 要 **【目的】** 苜蓿切叶蜂 *Megachile rotundata* 是全球应用最广的传粉昆虫之一，为明确其筑巢规律和影响筑巢活动的主要气象因子，并评估其在现有巢室释放密度下对苜蓿种子的增产效应。**【方法】** 采用巢板和纸吸管两种诱蜂法，观测了授粉期内雌蜂筑巢量的动态变化情况，并通过样方测产和单位面积种子产量分级法，评价了蜂房外东北 40°、东南 130°、西南 220°和西北 310°在 0-140 m 内的增产效果。**【结果】** 6 月初放蜂后 1-2 周内筑巢活动缓慢，中旬到达高峰期后持续约 2 周，6 月底以后筑巢活动逐渐减缓，雌蜂更喜好在东或东南方位的巢板上筑巢，在东 90°-西 260°范围内，筑巢量与方位角极显著负相关（$P < 0.001$）。通过筑巢量与 7 个常见气象指标的相关性分析发现，平均温度、最高温度、昼长与筑巢量显著正相关（$P < 0.05$），是影响雌蜂筑巢活动的关键气象因子。此外，在单个蜂房释放 3-4 万巢室的现有密度下，成虫羽化率为 61%，有效授粉范围为 40 m（约 0.50 hm^2），较自然授粉增产 1.94-3.58 倍，蜂群密度为 3.60-4.80 万头/hm^2，主要朝西南方位扩散。**【结论】** 东-东南方位是诱集雌蜂筑巢最佳的巢板悬挂方位，平均温度 24 ℃、最高温度 32 ℃、昼长>14.86 h 可作为筛选扩繁地的参考环境信息，且现有巢室释放密度的授粉效力仍不足，需增加蜂群投入满足制种需求。

关键词 切叶蜂；封口巢孔；巢板方位；温度；昼长；种子产量

Meteorological factors affecting the nesting activity of the alfalfa leafcutting bee *Megachile rotundata* and an evaluation of its pollination efficacy on alfalfa seed yield

DUAN Pan[1, 2**] ZHU Meng-Meng[3**] HOU Li[1] ZHAO Zi-Hua[2***] WANG Xian-Hui[1***]

(1. State Key Laboratory of Animal Biodiversity Conservation and Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Surveillance and Management for Plant Quarantine Pests, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Department of Plant Biosecurity, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract **[Aim]** The alfalfa leafcutting bee (*Megachile rotundata*) is one of the most widely used managed pollinators worldwide. This study aimed to clarify the nesting habits of female bees and identify the key meteorological factors affecting their nesting activity, and evaluate the efficacy of *M. rotundata* in increasing alfalfa seed yield under the current cell release density. **[Methods]** Two bee-trapping methods (nesting boards and paper straws) were used to monitor the dynamic changes in the number of sealed holes constructed by female bees during the pollination period. The impact on seed yield was assessed

*资助项目 Supported projects：宁夏回族自治区重点研发计划（2022BBF02028）；动物多样性保护与有害动物防控全国重点实验室开放研究基金资助项目（IPM2408）

**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：duapand@126.com；mn1979108@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：zhzhao@cau.edu.cn；wangxh@ioz.ac.cn

收稿日期 Received：2024-08-13；接受日期 Accepted：2025-12-16

within the range of 0-140 m in four directions outside the bee domicile (northeast 40°, southeast 130°, southwest 220°, and northwest 310°) using the quadrat yield measurement method and the classification method of seed yield per unit area. **[Results]** Our results indicated that the nesting activity was slow in the first 2 weeks after bee release in early June, peaked in mid-June and remained at a high level for approximately two weeks, then gradually declined after late June. Female bees showed a clear preference for nesting boards oriented toward the east or southeast. Within the azimuth range of 90° east to 260° west, the number of sealed holes exhibited a highly significant negative correlation with azimuth angle ($P < 0.001$). Correlation analysis between the number of sealed holes and seven common meteorological variables indicated that mean temperature, maximum temperature and daylength were significantly positively correlated with the number of sealed holes ($P < 0.05$), identifying them as key meteorological factors affecting the nesting activity of female bees. Additionally, under the current release density of 30 000-40 000 cells per bee domicile, the adult emergence rate was 61%, the effective pollination range was within 40 m of the bee domicile (covering approximately 0.50 hm^2), resulting in a 1.94-3.58-fold increase in alfalfa seed yield compared with natural pollination. The corresponding effective bee density was 36 000-48 000 bees per hectare, with dispersal mainly toward the southwest. **[Conclusion]** Our findings suggested that the east-southeast direction is optimal for hanging nesting boards to attract female *M. rotundata*. Environmental conditions including a mean temperature of 24 ℃, a maximum temperature of 32 ℃ and a daylength longer than 14.86 h can serve as reference indices for selecting brood-production sites. Moreover, pollination efficiency under the current cell release density remains insufficient, and increasing bee input is required to meet the demands of alfalfa seed production.

Key words leafcutter bee; sealed holes; nest board orientation; temperature; daylength; seed yield

紫花苜蓿 *Medicago sativa* 是世界上最重要的饲料作物之一，具有异花授粉和近交衰退等特性，其种子生产高度依赖传粉媒介，花器官中龙骨瓣高度闭合，必须借助蜂类等传粉昆虫实现弹花，并通过持续的访花活动才能完成授粉（黄利春等，2014）。中国是全球第二大苜蓿种植国，2017 年种植面积达 470 万 hm^2，但苜蓿制种自给率严重不足，80%以上种子依赖进口（谢华玲等，2021）。主要原因是我国苜蓿制种过程中严重缺乏高效的授粉蜂，尤其在规模化制种田，授粉不均匀、种子单产低等问题普遍存在，依赖授粉效率低或成本较高的商品蜂种、丰度不足的自然蜂种还远不足以满足制种需求（宋卓琴等，2017）。

苜蓿切叶蜂 *Megachile rotundata*（膜翅目 Hymenoptera 切叶蜂科 Megachilidae）是世界上应用最广的苜蓿授粉蜂，能使苜蓿种子产量提高 3 倍以上，并显著改善种子品质（Delaplane，2021）。其原产于亚洲西南部和欧洲东南部，20 世纪 30-40 年代被偶然引种至美国，60 年代引入加拿大，由于具有独特的授粉功效，以及成虫发生与苜蓿开花同步、群居筑巢和筑巢材料易提供等特性，经过北美苜蓿制种者长期驯化和管理，成功实现了商品化扩繁（Pitts-Singer and Cane，2011）。随后被澳大利亚、新西兰和阿根廷等畜牧业发达国家引进，为全球各地的苜蓿制种产业提供优质的授粉服务，产生了巨大的经济效益（Osterman *et al.*，2021；Renzi *et al.*，2022）。我国自 1988 年开始引入商品种群为苜蓿和大豆不育系授粉，在北京、吉林、内蒙古和黑龙江等地多次开展田间授粉试验，建立了自主的释放、回收和种蜂保存体系，但由于夏季二代蜂发生率高、天敌发生严重等问题，至今未能实现规模商品化应用（刘晨曦等，2004；李建平等，2005）。

蜂类在田间的活动受到温度、湿度、光照和降雨等气象因素的调控。研究表明，意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 觅食距离与温度和光照强度正相关，与相对湿度、降雨和风速负相关（Ngo *et al.*，2021），苜蓿上净切叶蜂 *M. abluta*、细切叶蜂 *M. spissula* 的访花数量也呈现类似规律（Wang *et al.*，2009）。而苜蓿切叶蜂的访花、觅食和筑巢活动直接决定了授粉效率和繁育量，这些活动受到温度、太阳辐射、湿度、降雨等气象因子的综合调控，且存在明显的阈值效应（Lerer *et al.*，1982；Richards，1996）。然而，目前我国仍缺乏

对影响其筑巢活动关键气象参数的研究，在选择扩繁地时可供参考的气象资料十分有限。

本研究调查苜蓿切叶蜂雌蜂在授粉期的筑巢量动态变化情况，并对可能影响其筑巢活动的7个气象变量进行主成分分析和相关性分析，以期明确雌蜂的筑巢规律和影响筑巢活动的主要气象因子。此外，为进一步评价现有释放巢室密度对苜蓿种子的增产效果，对不同方位和距离范围内苜蓿单位面积种子产量进行调查，可为进一步优化田间释放和应用技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

苜蓿切叶蜂筑巢规律调查试验在宁夏回族自治区平罗县宁夏千叶青农业科技发展有限公司的苜蓿繁种基地（38°59′N，106°31′E，海拔1 100 m，试验地1）开展，试验地1由纵横交错的灌溉渠或排水沟划分为多块面积较为均一苜蓿种子田，单块种子田面积为2.13-3.47 hm^2，紫花苜蓿品种为中苜四号，2020年建植，穴播，宽窄行分别为1.0 m和0.5 m，种子播量1.13 kg/hm^2。

授粉效果调查试验在宁夏农林科学院植物保护研究所位于内蒙古自治区鄂尔多斯市鄂托克旗的苜蓿切叶蜂扩繁基地（39°03′N，107°17′E，海拔1 180 m，试验地2）开展，紫花苜蓿品种为中苜三号，2017年建植，条播，种子播量5.25 kg/hm^2。

1.2 试验材料

苜蓿切叶蜂：2021和2023年释放的成蜂分别由2020和2022年夏季从上述试验地回收的巢室孵育后发生，释放量为3-4万巢室/蜂房。5月4-5日在宁夏农林科学院植物保护研究所人工孵蜂室对低温保存的巢室进行孵育，5月30-31日释放到各试验地的苜蓿种子田。孵育环境设置为温度29-30 ℃，相对湿度50%-60%，黑暗条件。

蜂房及巢板：采用宁夏农林科学院植物保护研究所提供的蜂房和巢板供苜蓿切叶蜂栖息和筑巢。每块巢板孔数为30孔×120孔。

纸吸管：外径6 mm，内径5.7 mm，颜色为浅米黄色。购自东莞市康润新材料有限公司，自主加工为长7.5-7.8 cm的纸吸管使用。

1.3 苜蓿切叶蜂雌蜂筑巢量动态规律调查

采用巢板诱蜂法和纸吸管诱蜂法分别观测雌蜂筑巢规律。

巢板诱蜂法：此方法为总体观测法，直接观测蜂房内所有巢板上的封口巢孔数。2021年在试验地1选取3块面积大于2.67 hm^2、苜蓿长势一致的苜蓿种子田，第一茬草收割后在每块种子田中央安置1个蜂房，蜂房口朝向东南130°，沿蜂房内壁悬挂巢板8块，悬挂高度约1.6 m，经方位测定依次为东90°、东110°、东南150°、南160°、南180°、南190°、西南230°和西260°（方位角四舍五入后取整）（图1：A）。放蜂后每2 d调查1次上述蜂房各巢板上已封口的巢孔数量，作为筑巢量指标。

纸吸管诱蜂法：此方法为样方观测法，抽样观测雌蜂在主要筑巢区域的封口巢孔数。2023年在试验地1取5块苜蓿种子田开展试验，地块选取、蜂房安置和巢板悬挂的方法同巢板诱蜂法。基于2021年巢板诱蜂法的结果，选取东110°、东南150°、南160°方位的3块巢板，巢板分为上、中、下3个区域，在每个区域的中央选取4个5孔×5孔的区域（图1：B），每孔插入1根空纸吸管，每块巢板插入300根空纸吸管，放蜂后每日回收统计封口的纸吸管，并补插新纸吸管，直至放蜂结束。

根据累计筑巢量占比将整个筑巢期划分为筑巢早期、筑巢高峰期和筑巢后期3个时期，具体为将每次调查的封口巢孔数占整个筑巢期封口巢孔总数的比例设为N，N<25%的时间段定义为筑巢早期，25%≤N≤75%的时间段为筑巢高峰期，75%<N≤100%的时间段为筑巢后期。

1.4 影响苜蓿切叶蜂雌蜂筑巢活动的主要气象因子分析

对1.3节苜蓿切叶蜂筑巢量与对应时间段内的平均气温、最高气温、最低气温、空气平均相对湿度、降雨量、昼长和平均2 min风速7个气

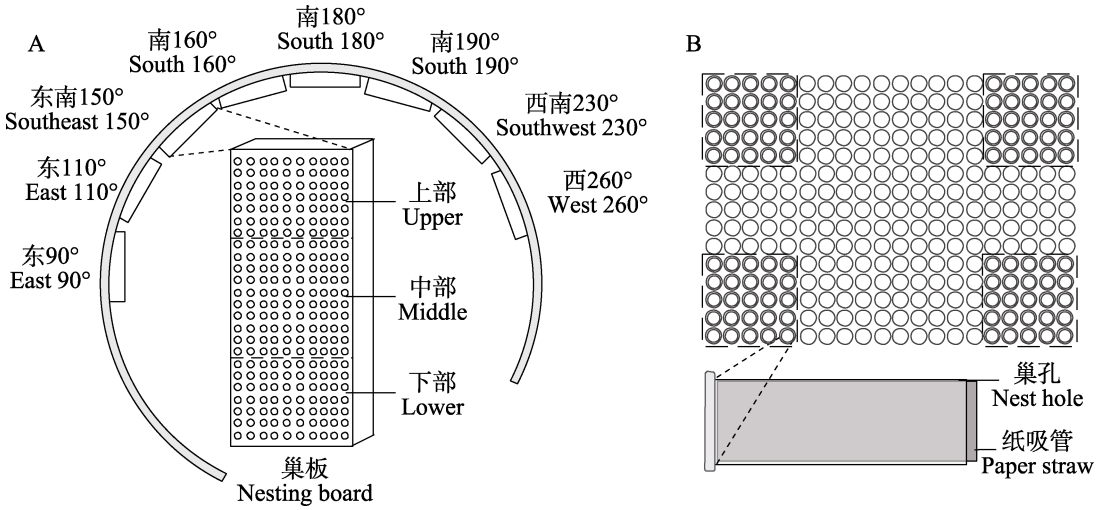


图 1　巢板安放（A）及纸吸管嵌套（B）示意图

Fig. 1　Schematic diagrams of nest board placement (A) and paper straw insertion (B)

象变量进行相关性分析。并对 7 个气象变量进行主成分分析，得到各个主成分的特征值和方差贡献率，并绘制载荷与样本点的主成分图，比较筛选出主成分中贡献率较高的环境气象因子。气象数据来源于宁夏回族自治区石嘴山市气象局。

1.5　现有释放密度下成虫羽化情况及授粉效果

2021 年在试验地 2 选取一块种植面积约 10 hm^2 的方形苜蓿地安置蜂房，蜂房口朝向东南 130°，巢室释放 10 d 后随机抽取 100 粒，统计成虫羽化情况，重复 4 次。以蜂房口朝向方位为基准，调查苜蓿切叶蜂在蜂房口前后及两侧共 4 个方位（东北 40°、东南 130°、西南 220°和西北 310°）不同距离处的种子产量。种子产量调查方法：在各方位距离蜂房 0、20、40、60、80、100、120 和 140 m 处收割 1 块矩形区域（2 m×1 m，长与苜蓿种植行平行）内的苜蓿植株，重复 3 次。并在试验地 2 内离放蜂试验地超过 200 m 的区域，随机收割同样大小矩形区域的苜蓿植株作为自然授粉对照，重复 3 次。脱荚晾干后测产，计算单位面积种子产量。

由于苜蓿种子单产从样方尺度转换到大田尺度存在空间异质性、取样误差等，因此参照张青文等（1999）的种子产量等级划分方法，评价现有释放密度下苜蓿切叶蜂在不同方位各距离处的授粉效果。具体为将种子产量 Y 划分为低效（15 $g·m^{-2} \leqslant Y < 30\ g·m^{-2}$）、中效（$30\ g·m^{-2} \leqslant Y < 50\ g·m^{-2}$）和高效（$Y \geqslant 50\ g·m^{-2}$）3 个等级，其中低效等级产量为 > 300 $kg·hm^{-2}$（相当于我国苜蓿切叶蜂授粉的平均产量水平），中效等级为 > 600 $kg·hm^{-2}$（相当于美国、加拿大等国家一般水平），高效等级为 > 1 000 $kg·hm^{-2}$（相当于美国、加拿大等国家高产水平）。同时，对 4 个方位所有种子产量数据进行梯度为 5 $g·m^{-2}$ 的分级，利用不同种子产量等级出现的频数评估苜蓿切叶蜂的飞行扩散情况。

1.6　数据分析

试验数据采用 Excel 2021 进行统计；使用 SPSS 26.0 软件进行独立样本 *t* 检验（$P < 0.05$）和单因素 ANOVA 方差分析（Tukey's HSD 法，$P < 0.05$），使用 Origin 2021 进行 Pearson 相关性分析、主成分分析及绘图。

2　结果与分析

2.1　苜蓿切叶蜂雌蜂筑巢量动态变化规律

采用巢板诱蜂法观测，释放苜蓿切叶蜂 3 d 后巢板上开始出现封口情况，之后筑巢量逐渐增加，在筑巢期间共有 2 个明显高峰，依次为 6 月 11 日和 6 月 27 日（图 2：A）。结合累计筑巢量占比曲线可知，筑巢早期为 6 月 1-9 日，每 2 d

平均筑巢量低于 137.0 孔；筑巢高峰期为 6 月 9-27 日，每 2 d 平均筑巢量为 92.0-324.7 孔；筑巢后期为 6 月 27 日-7 月 3 日，每 2 d 平均筑巢量为 96.7-118.7 孔（图 2：A）。

采用纸吸管诱蜂法观测，释放苜蓿切叶蜂 6 d 后回收到封口的纸吸管，之后波动式递增，在 6 月 25 日出现高峰后开始波动式递减（图 2：B）。结合累计筑巢量占比曲线可知，筑巢早期为 5 月 30 日-6 月 12 日，日平均筑巢量低于 34.8 孔；筑巢高峰期为 6 月 13 日-29 日，日平均筑巢量为 22.2-55.8 孔；筑巢后期为 6 月 30 日-7 月 10 日，日平均筑巢量为 3.8-38.2 孔（图 2：B）。

苜蓿切叶蜂在东 90°-西 260°不同朝向巢板上的筑巢量存在差异，雌蜂更喜好在东或东南方位的巢板上筑巢，其中东 90°和东南 150°巢板上的筑巢量显著高于其他 6 个方位（$F_{7,128}$ = 24.04，P < 0.01）（图 2：C）。在东 90°-西 260°范围内，筑巢量与巢板朝向方位角具有极显著的负相关关系（r = - 0.44，P < 0.001）（图 2：D）。

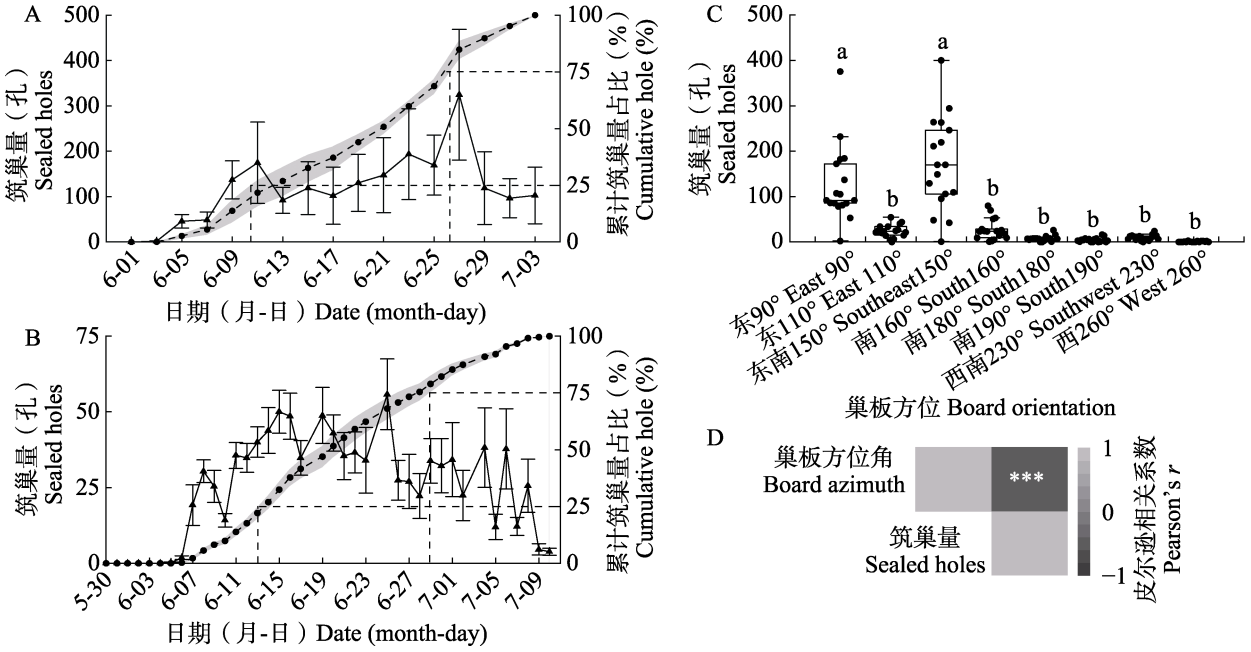


图 2　苜蓿切叶蜂雌蜂筑巢量动态曲线及巢板朝向喜好

Fig. 2　Dynamic curves of the number of sealed holes of female *Megachile rotundata* and the preference for nesting board orientations

A. 巢板诱蜂法观测的雌蜂筑巢量；B. 纸吸管诱蜂法观测的雌蜂筑巢量；C. 不同方位巢板上的筑巢量；D. 方位角与筑巢量的相关性。不同小写字母表示不同朝向巢板上的筑巢量差异显著（P < 0.05，Tukey's HSD 法）。星号表示筑巢量和巢板朝向方位角有显著相关关系（* P <0.05，** P <0.01，*** P < 0.001，Pearson 相关性分析）。

A. Number of sealed holes observed using the nesting board method; B. Number of sealed holes observed using the paper straw method; C. Number of sealed holes on nesting boards with different orientations; D. Correlation between azimuth and the number of sealed holes. Different lowercase letters indicate significant differences between orientations (P < 0.05, Tukey's HSD test). Asterisks indicate highly significant correlation between the number of sealed holes and the board azimuth angle (* P < 0.05, ** P < 0.01, and *** P < 0.001, Pearson correlation analysis).

2.2　影响苜蓿切叶蜂雌蜂筑巢活动的气象因子

雌蜂的筑巢活动主要受温度及昼长影响（图 3）。其中，平均温度（巢板诱蜂法和纸吸管诱蜂法对应的相关系数 r 分别为 0.54 和 0.39，P < 0.05）、最高温度（巢板诱蜂法和纸吸管诱蜂法对应的相关系数 r 分别为 0.57 和 0.46，P < 0.05）与筑巢量有显著正相关关系，昼长与筑巢量有极显著正相关关系（巢板诱蜂法和纸吸管诱蜂法对应的相关系数 r 分别为 0.64 和 0.75，P < 0.01）。

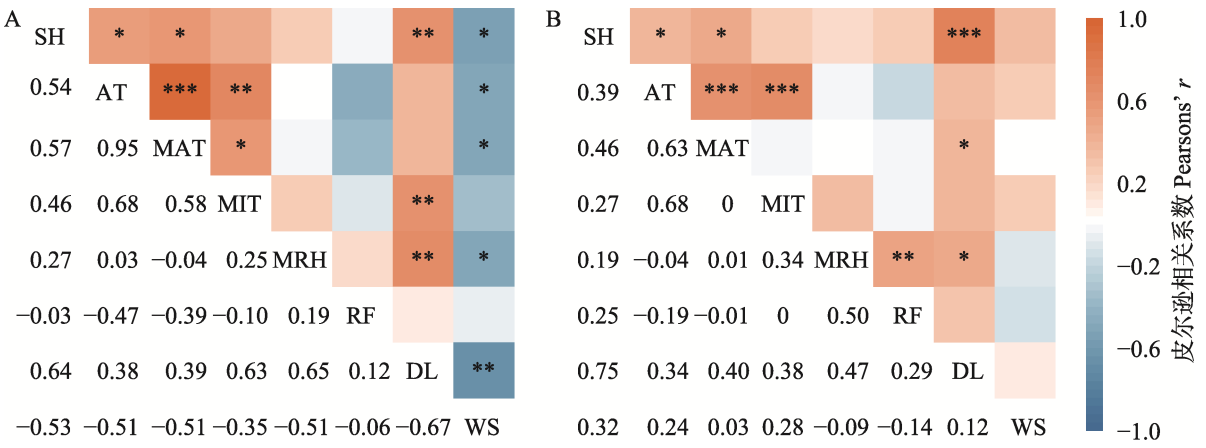


图 3　苜蓿切叶蜂雌蜂筑巢量与 7 个气象变量的相关性分析

Fig. 3　Correlation analysis between the number of sealed holes of female *Megachile rotundata* and seven meteorological variables

A. 巢板诱蜂法观测得到的筑巢量与气象因子的相关性；B. 纸吸管诱蜂法观测得到的筑巢量与气象因子的相关性。SH：筑巢量；AT：平均气温；MAT：最高气温；MIT：最低气温；MRH：空气平均相对湿度；RF：降雨量；DL：昼长；WS：平均 2 min 风速。下图同。星号表示筑巢量与气象变量有显著相关关系（* P <0.05，** P <0.01，*** P <0.001，Pearson 相关性分析）。

A. Correlation between sealed holes and meteorological factors using the nesting board method; B. Correlation between sealed holes and meteorological factors using the paper straw method; SH: Sealed holes; AT: Mean temperature; MAT: Maximum temperature; MIT: Minimum temperature; MRH: Mean relative humidity; RF: Rainfall; DL: Daylength; WS: Mean 2 min wind speed. The same below. Asterisks indicate significant correlations between the number of sealed holes and meteorological variables (* P < 0.05, ** P < 0.01, and *** P < 0.001, Pearson correlation analysis).

对 7 个气象变量主成分分析可知，巢板诱蜂法对应气象因子的前 2 个主成分的特征值均大于 1，累积贡献率为 76.03%，其中主成分 1 的方差贡献率为 49.47%，主要由平均温度（载荷为 0.47）、最高温度（0.45）等环境变量决定，主成分 2 的方差贡献率为 26.56%，主要由空气相对湿度（0.55）、降雨量（0.53）等决定（表 1，图 4：A）。纸吸管诱蜂法对应气象因子的前 3 个主成

表 1　各主成分的特征值和方差贡献率

Table 1　Eigenvalues and contribution rate of principal components

气象变量 Meteorological variable	巢板诱蜂法 Nesting board method		纸吸管诱蜂法 Paper straw method		
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3
平均气温 Mean temperature	0.46	- 0.34	0.52	- 0.36	- 0.10
最高气温 Maximum temperature	0.45	- 0.33	0.37	- 0.19	- 0.68
最低气温 Minimum temperature	0.43	- 0.02	0.48	- 0.06	0.49
空气平均相对湿度 Mean relative humidity	0.23	0.55	0.29	0.57	0.14
降雨量 Rainfall	- 0.13	0.53	0.10	0.61	- 0.07
昼长 Daylength	0.42	0.37	0.48	0.24	- 0.13
平均 2 min 风速 Mean 2 min wind speed	- 0.41	- 0.25	0.20	- 0.29	0.49
特征值 Eigenvalue	3.46	1.86	2.43	1.77	1.14
贡献率（%）Contribution rate (%)	49.47	26.56	34.75	25.23	16.32
累积贡献率（%）Accumulative contribution rate (%)	49.47	76.03	34.75	59.98	76.30

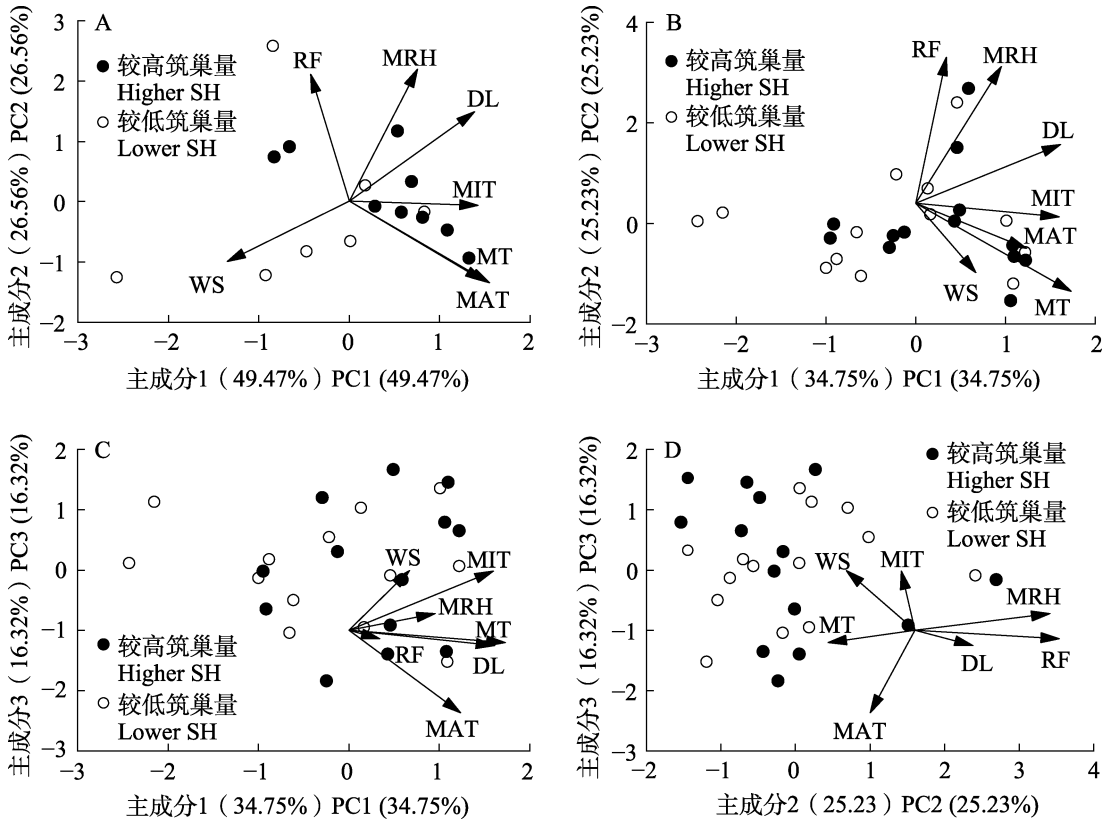


图 4　7 个气象变量的主成分分析

Fig. 4　Principal component analysis of the seven meteorological variables

A. 巢板诱蜂法主成分 1 和主成分 2 载荷图；B. 纸吸管诱蜂法主成分 1 和主成分 2 载荷图；C. 纸吸管诱蜂法主成分 1 和主成分 3 载荷图；D. 纸吸管诱蜂法主成分 2 和主成分 3 载荷图。

A. Loadings plot of PC1 and PC2 for the nesting board method; B. Loadings plot of PC1 and PC2 for the paper straw method; C. Loadings plot of PC1 and PC3 for the paper straw method; D. Loadings plot of PC2 and PC3 for the paper straw method.

分的特征值大于 1，累积贡献率为 76.30%。其中主成分 1 的方差贡献率为 34.75%，主要由平均温度（载荷为 0.52）、昼长（0.48）等环境变量决定，主成分 2 的方差贡献率为 25.23%，主要由降雨量（0.61）、空气相对湿度（0.57）等决定，主成分 3 的方差贡献率为 16.32%，主要由最高温度（ - 0.68）、平均 2 min 风速（0.49）等决定（表 1，图 4：B-D）。考虑到雌蜂筑巢早期和后期的活动可能受自身状态不佳所影响，排除早期和后期筑巢量低的时间段，将剩余时间段按筑巢量排序分为较高和较低筑巢量组，其中较高组的数据点聚集较紧密，表现出一定相关性，而较低组的数据点更分散，说明其气象变量差异较大（图 4：A-D）。此外，较高组的平均温度、最高温度、昼长分别为 23.75- 24.16 ℃、31.75-32.11 ℃、14.86-14.88 h，而较低组分别为 22.79-23.67 ℃、30.57-31.27 ℃、14.82-14.84 h，这表明雌蜂对气象因子的变化十分敏感，微弱的气象差异能显著影响筑巢活动的进程。

2.3　现有释放密度下成虫羽化情况及授粉效果

本研究在单个蜂房释放 3-4 万个巢室，61.00%的巢室能正常羽化（1.83-2.44 万头）。损失的巢室中 30.25%为死亡子代（其中幼虫、蛹和成虫分别占 5.50%、21.75%和 3.00%），5.50%为花粉球，3.25%发现天敌为害（图 5）。

苜蓿切叶蜂对蜂房 140 m 范围内的苜蓿均有不同程度的增产效果，总体上种子产量随距离的增加而降低（图 6：A-D）。在东南 130°、西

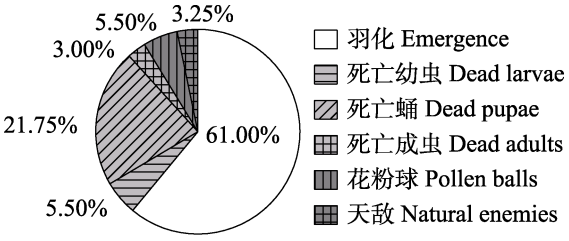


图 5　苜蓿切叶蜂巢室中羽化及损失情况

Fig. 5　Adult emergence and loss status in *Megachile rotundata* cells

南 220°和西北 310°的 40 m 范围内能明显增产，平均种子产量为 16.39-30.35 g·m^{-2}，显著高于自然授粉单产 8.47 g·m^{-2}（$P < 0.05$），增产 1.94-3.58 倍，达到国内应用苜蓿切叶蜂授粉增产平均水平（15.00-30.00 g·m^{-2}）。此外，在各个方位 60-80 m 范围内的授粉效果不均一、不稳定，高于自然授粉单产但低于国内应用苜蓿切叶蜂的平均水平。因此，单个蜂房并释放 3-4 万巢室的有效授粉范围为 40 m（约 0.50 hm^2），结合羽化率可知，有效授粉范围内的苜蓿切叶蜂种群密度为 3.60-4.80 万头/hm^2。同时，本研究有效授粉范围内的种子单产未达到美国、加拿大等国家的中效和高效增产水平（30.00 g·m^{-2}以上），说明现有释放密度下的授粉效力仍明显不足。

通过对 4 个方位调查得到的所有种子产量数据进行 5.00 g·m^{-2} 梯度分级及频数分布分析可知，本研究苜蓿切叶蜂在蜂房外主要飞行扩散方位为西南方位，其次为西北、东北和东南方位（图 7）。

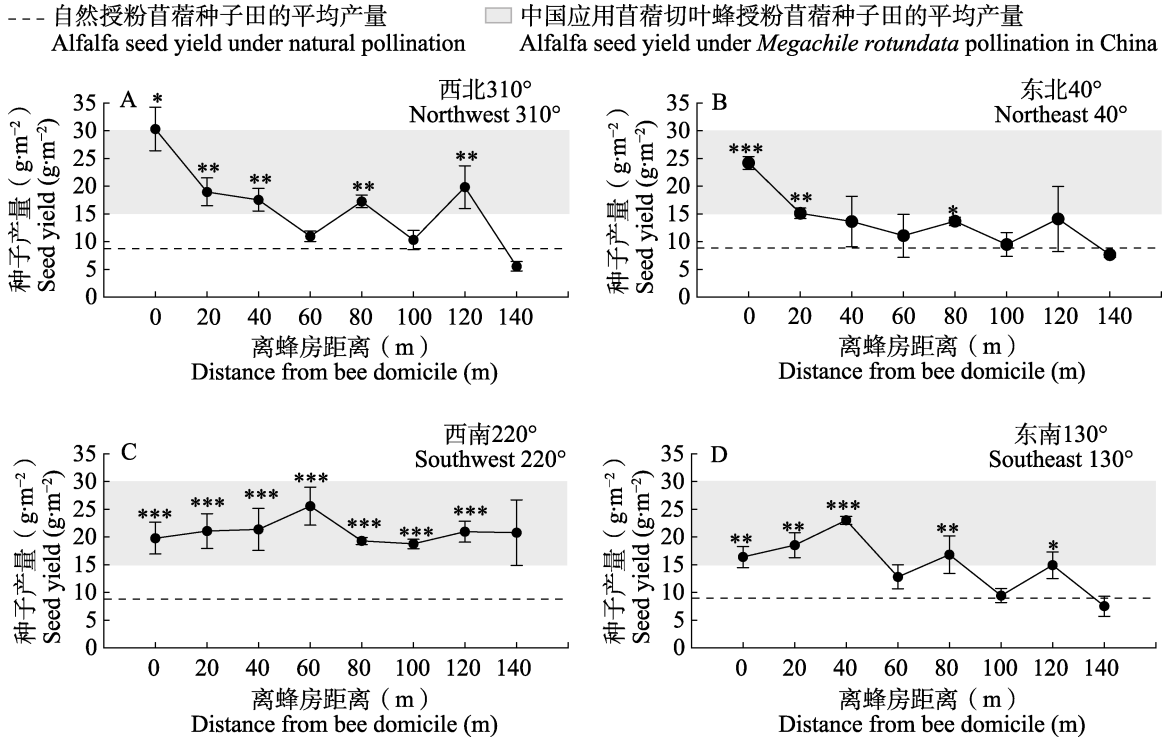


图 6　苜蓿切叶蜂蜂房外不同方位及距离处苜蓿种子产量

Fig. 6　Alfalfa seed yield at different orientations and distances from the *Megachile rotundata* domicile

A. 西北 310°不同距离处的苜蓿种子产量；B. 东北 40°不同距离处的苜蓿种子产量；
C. 西南 220°不同距离处的苜蓿种子产量；D. 东南 130°不同距离处的苜蓿种子产量。
星号表示蜂房外不同距离或方位处的苜蓿种子产量显著高于自然授粉种子产量
（* $P < 0.05$，** $P < 0.01$，*** $P < 0.001$，Student's t 检验）。

A. Alfalfa seed yield at different distances along the northwest (310°) direction; B. Alfalfa seed yield at different distances along the northeast (40°) direction; C. Alfalfa seed yield at different distances along the southwest (220°) direction; D. Alfalfa seed yield at different distances along the southeast (130°) direction. Asterisk indicates that alfalfa seed yield at different distances or orientations outside bee domicile are significantly higher than that from natural pollination (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, Student's t-test).

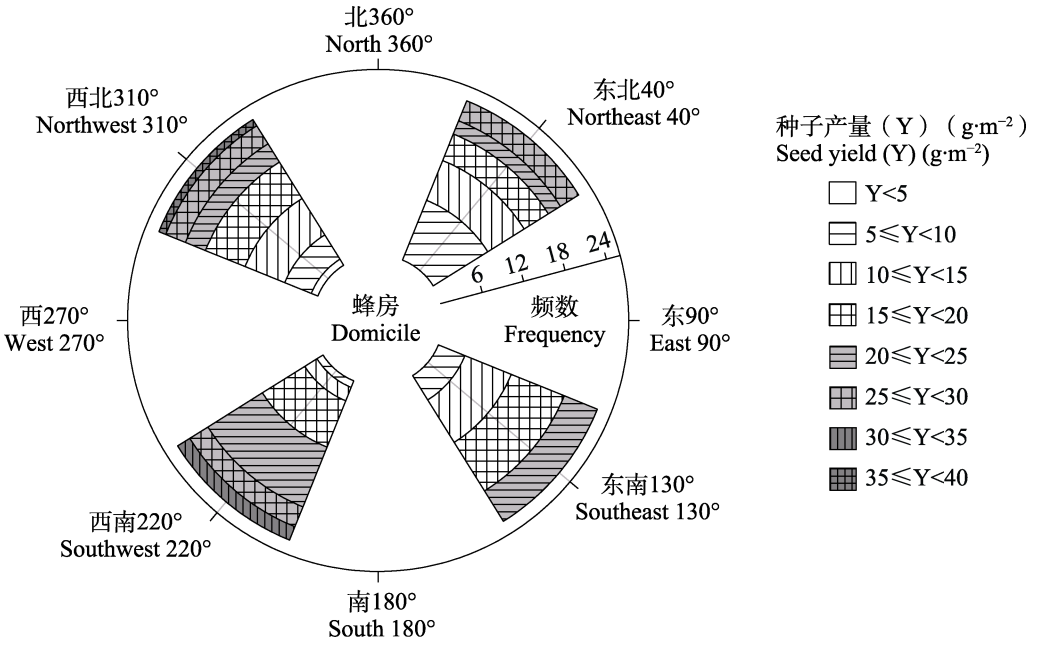


图 7　基于种子产量频数分布的苜蓿切叶蜂飞行扩散情况

Fig. 7　Flight dispersal of *Megachile rotundata* based on seed yield frequency distribution

3　结论与讨论

本研究发现雌蜂在 6 月份放蜂初期的一周内筑巢迟缓，可能与其卵母细胞未发育成熟有关，有研究表明雌蜂卵巢在完成交配并在田间摄入充足营养后才能发育完全（Richards，1994），这导致筑巢前期后代产出量不足。6 月中旬进入高峰期后持续约 2 周，此后筑巢活动逐渐减缓，这一时期与苜蓿盛花期和结荚早中期高度重叠，田间灌溉、病虫害防治等农事操作应尽量减少，若必须进行则需安排在夜间，避免对其筑巢与授粉活动造成干扰。Wilson 等（2020）报道雌蜂喜好温度较低且朝向北方位的巢板筑巢，与本研究雌蜂更喜好在东-东南方位巢板上筑巢的结果存在差异，这可能是由于遮阳装置差异导致的，该研究采用的遮阳装置下向阳的东南向巢板遮光效果不足、背阴的西北向巢板遮光性更强，而本试验自主设计的蜂房整体遮光性能较好，东-东南向巢板可在清晨优先接受太阳照射，且午间不会受到太阳直射，既能快速满足雌蜂出巢活动所需的温度阈值（21 ℃以上）（Pitts-Singer and Cane，2011），又可避免温度过高对筑巢活动造成不利影响。本研究发现筑巢量与平均温度和最高温度有显著正相关关系，这与 Szabo and Smith（1972）及 Richards（1996）的研究结论一致，但极端高温环境下（最高温度达 44 ℃）雌蜂筑巢量呈负相关关系（Rossi *et al.*，2010），且超过 38 ℃显著增加低龄幼虫死亡率（Pitts-Singer and James，2008），因此，放蜂前需深入分析释放地历年气温，避免在极端天气出现频率高的地区大规模应用。

本研究采用产量分级方法评估发现，当前释放密度下苜蓿切叶蜂种子单产在自然授粉水平和国内应用苜蓿切叶蜂增产平均水平区间内，尚未达到美国和加拿大应用苜蓿切叶蜂增产水平，单个蜂房释放 3-4 万巢室的羽化率为 61%，有效授粉距离为 40 m（增产 1.94-3.58 倍），蜂群密度为 3.60-4.80 万头/hm^2，而美国、加拿大、阿根廷等苜蓿种子主产国应用苜蓿切叶蜂后能显著增产 3 倍以上（Pitts-Singer and Cane，2011；Renzi *et al.*，2022）。造成这一差距的主要原因是本研究的蜂群羽化率和释放密度不足，美国蜂群羽化率约 60%但释放密度为 10-15 万头/hm^2，加拿大蜂群羽化率在 80%以上且释放密度为 5.0-7.5 万头/hm^2（Pitts-Singer and James，2005；Pitts-Singer

and Cane，2011）。因此，可在此基础上进一步明确有效巢室占比、巢室释放密度及种子单产三者间的关系，科学合理地调整蜂群释放方法和蜂量。此外，不同地理来源的巢室中健康子代的比例、蜂死亡情况、天敌为害情况、花粉球占比以及雌雄性比存在较大差异，过度释放可能造成蜂群竞争花资源，反而不利于苜蓿切叶蜂的扩繁（Bosch and Kemp，2005；Pitts-Singer and James，2005）。因此，每年释放前、释放后及回收下一代巢室后，需分来源、分批次对不同地理种群的成虫羽化情况和子代健康程度进行检测，通过建立全周期监测体系来综合评估各地巢室释放及回收情况，分地区细化释放流程，进一步完善我国的苜蓿切叶蜂释放应用技术。

商品化蜂种、野生蜂综合管理和协同应用是未来进一步提升苜蓿授粉效益的核心方向（Garibaldi *et al.*，2017；Haedo *et al.*，2022）。除苜蓿切叶蜂能为苜蓿高效授粉外，西方蜜蜂 *Apis mellifera*、熊蜂属 *Bombus* 和壁蜂属 *Osmia* 的蜂种也具备一定的授粉潜力（Cane，2002；郭媛等，2017；Brunet *et al.*，2019）。在推广应用苜蓿切叶蜂过程中，可系统开展优势野生蜂种诱集、筛选和繁育工作，加强对本地蜂种的保护和利用，综合管理苜蓿授粉蜂资源，加快促进苜蓿制种产业发展。

参考文献 (References)

Bosch J, Kemp WP, 2005. Alfalfa leafcutting bee population dynamics, flower availability, and pollination rates in two Oregon alfalfa fields. *Journal of Economic Entomology*, 98(4): 1077–1086.

Brunet J, Zhao Y, Clayton MK, 2019. Linking the foraging behavior of three bee species to pollen dispersal and gene flow. *PLoS ONE*, 14(2): e0212561.

Cane JH, 2002. Pollinating bees (Hymenoptera: Apiformes) of US alfalfa compared for rates of pod and seed set. *Journal of Economic Entomology*, 95(1): 22–27.

Delaplane KS, 2021. Crop pollination by bees. Volume 1: Evolution, ecology, conservation, and management. Wallingford: CABI.

Garibaldi LA, Requier F, Rollin O, Andersson GK, 2017. Towards an integrated species and habitat management of crop pollination. *Current Opinion in Insect Science*, 21: 105–114.

Guo Y, Song ZQ, Zhang XF, Song HL, Wu WQ, Shao YQ, 2017. Comparison of pollinating effects for the alfalfa between *Apis mellifera* L. and *Bombus terrestris* L. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 1008–1014. [郭媛, 宋卓琴, 张旭凤, 宋怀磊, 武文卿, 邵有全, 2017. 西方蜜蜂和地熊蜂为紫花苜蓿授粉效果比较. 应用昆虫学报, 54(6): 1008–1014.]

Haedo JP, Martínez LC, Graffigna S, Marrero HJ, Torretta JP, 2022. Managed and wild bees contribute to alfalfa (*Medicago sativa*) pollination. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 324: 107711.

Huang LC, Jin L, Li J, Zhang XQ, Yang Y, Wang XJ, 2014. Floral morphology and its relationship with pollination systems in Papilionoideae. *Acta Ecologica Sinica*, 34(19): 5360–5368. [黄利春, 金樑, 李晶, 张晓强, 杨阳, 王晓娟, 2014. 蝶形花亚科植物花部适应机制与传粉系统. 生态学报, 34(19): 5360–5368.]

Lerer H, Bailey WG, Mills PF, Pankiw P, 1982. Pollination activity of *Megachile rotundata* (Hymenoptera: Apoidae). *Environmental Entomology*, 11(5): 997–1000.

Li JP, Yang GH, Li MH, Qu WL, Bi LC, Hou YL, 2005. A review of studies and application of alfalfa leaf-cutting bee in China. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 30(3): 9–11, 32. [李建平, 杨桂华, 李茂海, 曲文丽, 毕良臣, 侯云龙, 2005. 中国苜蓿切叶蜂的研究和应用. 吉林农业科学, 30(3): 9–11, 32.]

Liu CX, Qin YC, Chen HY, Song DL, 2004. Advance on the study of *Megachile rotundata* and its application in China. *Entomological Knowledge*, 41(6): 519–522. [刘晨曦, 秦玉川, 陈红印, 宋敦伦, 2004. 苜蓿切叶蜂在我国的研究与应用现状. 昆虫知识, 41(6): 519–522.]

Ngo TN, Rustia DJA, Yang EC, Lin TT, 2021. Automated monitoring and analyses of honey bee pollen foraging behavior using a deep learning-based imaging system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187: 106239.

Osterman J, Aizen MA, Biesmeijer JC, Bosch J, Howlett BG, Inouye DW, Jung C, Martins DJ, Medel R, Pauw A, Seymour CL, Paxton RJ, 2021. Global trends in the number and diversity of managed pollinator species. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 322: 107653.

Pitts-Singer TL, James RR, 2005. Emergence success and sex ratio of commercial alfalfa leafcutting bees from the United States and Canada. *Journal of Economic Entomology*, 98(6): 1785–1790.

Pitts-Singer TL, James RR, 2008. Do weather conditions correlate with findings in failed, provision-filled nest cells of *Megachile rotundata* (Hymenoptera: Megachilidae) in western North America? *Journal of Economic Entomology*, 101(3): 674–685.

Pitts-Singer TL, Cane JH, 2011. The alfalfa leafcutting bee,

Megachile rotundata: The world's most intensively managed solitary bee. *Annual Review of Entomology*, 56: 221–237.

Renzi JP, Coito C, Reinoso O, Quintana M, García F, Cantamutto MA, 2022. *Megachile rotundata* (Fab.) as a potential agro-environmental conservation strategy for alfalfa seed production in Argentina. *Journal of Applied Entomology*, 146(1/2): 44–55.

Richards KW, 1994. Ovarian development in the alfalfa leafcutter bee, *Megachile rotundata*. *Journal of Apicultural Research*, 33(4): 199–203.

Richards KW, 1996. Effect of environment and equipment on productivity of alfalfa leafcutter bees (Hymenoptera: Megachilidae) in Southern Alberta, Canada. *The Canadian Entomologist*, 128(1): 47–56.

Rossi BH, Nonacs P, Pitts-Singer TL, 2010. Sexual harassment by males reduces female fecundity in the alfalfa leafcutting bee, *Megachile rotundata*. *Animal Behaviour*, 79(1): 165–171.

Song ZQ, Guo Y, Gao L, Song HL, Zhang XF, Wu WQ, 2017. Study on pollinating behavior and effect of different bees for alfalfa. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 45(11): 1856–1858. [宋卓琴, 郭媛, 高磊, 宋怀磊, 张旭凤, 武文卿, 2017. 不同蜂种为紫花苜蓿授粉的行为与效果研究. 山西农业科学, 45(11): 1856–1858.]

Szabo TI, Smith MV, 1972. The influence of light intensity and temperature on the activity of the alfalfa leaf-cutter bee *Megachile rotundata* under field conditions. *Journal of Apicultural Research*, 11(3): 157–165.

Wang XJ, Liu HP, Li XX, Song Y, Chen L, Jin L, 2009. Correlations between environmental factors and wild bee behavior on alfalfa (*Medicago sativa*) in northwestern China. *Environmental Entomology*, 38(5): 1480–1484.

Wilson ES, Murphy CE, Rinehart JP, Yocum G, Bowsher JH, 2020. Microclimate temperatures impact nesting preference in *Megachile rotundata* (Hymenoptera: Megachilidae). *Environmental Entomology*, 49(2): 296–303.

Xie HL, Yang YP, Dong Y, Wang T, 2021. Analysis on international development trends of alfalfa. *Chinese Bulletin of Botany*, 56(6): 740–750. [谢华玲, 杨艳萍, 董瑜, 王台, 2021. 苜蓿国际发展态势分析. 植物学报, 56(6): 740–750.]

Zhang QW, Zhang WW, Cai QN, Chen HM, 1999. Dispersal behavior of alfalfa leafcutter bees of pollination and its effect of increasing alfalfa seed production. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10(5): 606–608. [张青文, 张巍巍, 蔡青年, 陈合明, 1999. 苜蓿切叶蜂授粉扩散行为及苜蓿种子增产效应的研究. 应用生态学报, 10(5): 606–608.]