应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2015, 52(2): 333−342. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2015.036

地熊蜂蜂群发育性状评价及其饲料花粉配比优化*

盖琴宝** 周志勇 张 红 黄家兴 安建东***

（中国农业科学院蜜蜂研究所，农业部授粉昆虫生物学重点开放实验室，北京 100093）

摘 要 **【目的】** 为了明确熊蜂蜂群发育过程中具有代表性的性状指标及其饲料花粉最优配比。**【方法】** 以山杏 *Armeniaca sibirica* 花粉、山柳 *Salix caprea* 花粉和油菜 *Brassica rapa* 花粉为原料，通过{3,3}混料设计得到 7 种配比的混合花粉，分析不同混合花粉对地熊蜂 *Bombus terrestris* (L.)无王工蜂群的产卵前时间、幼虫拖出数、幼虫总数量、幼虫总重量、蛹总数量、蛹总重量、雄蜂出房时间、出房雄蜂数量和雄蜂出生重 9 个蜂群性状指标的影响，使用主成分分析对蜂群性状指标进行综合评价，并通过混料回归模型预测熊蜂蜂群饲养过程中的最优花粉配比。**【结果】** 地熊蜂无王工蜂群发育过程的 9 个性状指标可以归纳为幼虫发育、蛹发育、成蜂发育、蜂群发育周期 4 类评价因子，其中幼虫总数量、蛹总重量、雄蜂出生重、产卵前时间和雄蜂出房时间是 5 个主要性状指标；以蜂群主要性状指标为评价依据，得出蜂群饲养过程中最优花粉配比：当以油菜花粉单独饲喂蜂群时蜂群产卵前时间短、幼虫总数量最多、蛹总重量最大，当山杏花粉、山柳花粉和油菜花粉以 1∶1.5∶1.5 比例饲喂蜂群时雄蜂出房时间最短，当山柳花粉和油菜花粉以 3∶1 比例饲喂蜂群时雄蜂出生重最大。**【结论】** 明确了地熊蜂无王工蜂群发育过程中的重要性状指标和饲料花粉最优配比，为进一步研究商品化熊蜂群不同发育阶段的营养需求奠定了基础。

关键词 地熊蜂，无王工蜂群，发育指标，主成分分析，混料回归模型，花粉配比

Optimizing supplementary pollen mixtures for bumblebee *Bombus terrestris* colonies based on colony reproductive variables

GAI Qin-Bao** ZHOU Zhi-Yong ZHANG Hong HUANG Jia-Xing AN Jian-Dong***

(Key Laboratory for Insect-Pollinator Biology of the Ministry of Agriculture, Institute of Apicultural Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract **[Objectives]** To measure reproductive variables of bumblebee colonies and optimize supplementary pollen mixtures based on these. **[Methods]** Three types of pollen, apricot (*Armeniaca sibirica*), willow (*Salix caprea*), and oilseed rape (*Brassica rapa*) were mixed following a {3,3} mixture design to obtain seven pollen mixtures. Nine reproductive variables including egg laying delay, larval ejection, total number of larvae, total weight of larvae, total number of pupae, total weight of pupae, duration of the drone stage, total number and birth weight of drones in queen-less micro-colonies of *Bombus terrestris* (L.) were measured and analyzed in colonies provided with the seven different supplementary pollen mixtures. Principal component analysis was used to assess the information provided by each of the nine variables and pollen mixtures were optimized using the mixture regression model. **[Results]** To evaluate the micro-colony development of *B. terrestris* the nine variables can be categorized as either larval development, pupal development, drone development, or developmental cycle, factors (including the total number of larvae, total weight of pupae, birth weight of drones, egg laying delay and duration of the drone stage). Optimized pollen mixtures based on the five representative variables are: 1) oilseed rape pollen for colonies with

* 资助项目 Supported projects：公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203080-4)；中国农业科学院基本科研业务费增量项目(201422021)；中国农业科学院科技创新工程 (CAAS-ASTIP-2015-IA-02)

**第一作者 First author，E-mail：gaiqinbao20082995@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：anjiandong@caas.cn

收稿日期 Received：2015-01-05，接受日期 Accepted：2015-01-28

the shortest egg laying delay, the highest total number of larvae, the greatest total weight of pupae, 2) 1∶1.5∶1.5 combination of apricot∶willow∶oilseed rape pollen for colonies with the shortest drone stage 3) 3∶1 combination of willow∶oilseed rape pollen for colonies with the largest drone birth weight. **[Conclusion]** Reproductive variables of *B. terrestris* micro-colonies can be measured and used to optimize supplementary pollen mixtures. These results should be useful for further research on the nutritional requirements of different developmental phases of bumblebee colonies and for the commercial production of bumblebees.

Key words *Bombus terrestris*, queenless micro-colony, development traits, principal component analysis, mixture regression model, pollen mixtures

熊蜂为膜翅目 Hymenoptera 蜜蜂科 Apidae 熊蜂属 *Bombus* 的总称，该属昆虫全变态发育，历经卵、幼虫、蛹、成蜂 4 个阶段（Beekman *et al.*，2000；安建东等，2006）。熊蜂是众多野生植物和农作物的重要传粉者，在生物多样性保护和农业生产中起着重要作用（Abak *et al.*，1995；Dasgan *et al.*，2004；李继莲等，2006；Serrano *et al.*，2006；安建东等，2007，2010；彭文君等，2009；An *et al.*，2014）。1912 年 Sladen 首次尝试了熊蜂的人工饲养，直到 20 世纪 80 年代德国科学家才突破了地熊蜂 *Bombus terrestris* (L.)的人工周年繁育技术（Röseler，1985）。目前商品化生产的熊蜂群已被推广至世界各地，在各类设施果菜授粉中取得了巨大的经济效益（Velthuis and van Doorn，2006）。

花粉是熊蜂生长发育过程中主要的蛋白质来源，在熊蜂人工繁育过程中，花粉被作为主要饲料加以利用（Vanderplanck *et al.*，2014）。研究发现，不同来源的花粉对熊蜂蜂群的生长繁殖有重要影响。Nicloson 和 Human（2012）发现使用向日葵花粉饲喂熊蜂蜂群幼虫总重量显著低于其他花粉组，蛋氨酸和色氨酸在向日葵花粉中含量不足可能是其营养价值较低的根本原因。Génissel 等（2002）的研究结果表明，饲喂单一蒲公英花粉对地熊蜂无王工蜂群的发育有抑制作用。单一花粉往往存在营养成分不均衡等问题，会影响甚至限制蜂群的正常发育，而将不同植物花粉进行混合后饲喂蜂群，可以在很大程度上弥补单一花粉的不足（Roulston and Cane，2000；Alaux *et al.*，2010；Vanderplanck *et al.*，2014）。Pasquale 等（2013）将 4 种单一花粉混合，发现混合花粉中蛋白质、脂类、抗氧化物的含量均发生了变化。前人研究证明混合花粉可以更好地促进熊蜂蜂群的生长发育，关于不同花粉以何种比例混合可以达到最佳饲喂效果的研究甚少。

选择合适的蜂群性状指标是评价不同花粉对熊蜂蜂群发育影响的前提，国内外多位学者对熊蜂生长过程中众多性状指标进行了研究，其中能较好地反映熊蜂蜂群发育情况的指标包括产卵前时间、幼虫拖出数、幼虫总重量、幼虫平均重量、幼虫总数量、雄蜂出房时间和出房雄蜂数量等（Génissel *et al.*，2002；Tasei and Aupinel，2008；吴杰等，2009），前人研究中所选择的性状指标间存在着不同程度的相关性及差异性，然而如何从众多性状指标中选择具有代表性的性状指标还鲜有报道。

地熊蜂是目前全球范围内应用最广的蜂种，山杏 *Armeniaca sibirica*、山柳 *Salix caprea* 和油菜 *Brassica rapa* 是华北地区多种熊蜂的粉源植物（An *et al.*，2014），其商品化程度较高，在市场上容易获得。熊蜂无王工蜂群具有蜂群容易组织、发育周期短等特点，可以很好地模拟有王群的发育（Tasei and Aupinel，1994；Génissel *et al.*，2002）。因此本文以地熊蜂作为试验蜂种，比较山杏花粉、山柳花粉和油菜花粉的不同组合对地熊蜂无王工蜂群发育的影响，旨在筛选评价熊蜂蜂群发育的主要性状指标，并根据不同的性状指标预测熊蜂蜂群的最优花粉配比，为熊蜂饲养过程中饲料的合理配制和规模化生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　地熊蜂无王工蜂群的组织

试验地熊蜂购于科伯特（北京）农业有限公司。熊蜂无王工蜂群的组织参照 Tasei 和 Aupinel（1994）和 Génissel 等（2002）提出的方法，并加以改进。选择 10 箱群势较为一致的蜂群作为试验蜂群，分别从每群蜂中随机抓取 15 头大小相似的工蜂，将所选的 150 头工蜂置于同一个蜂箱（18 cm×18 cm×18 cm）中混合饲养，1 d 后，随机选取 3 头工蜂组成无王工蜂群，共组织 42 个无王工蜂群，分别置于直径为 6.5 cm 的饲养盒中并编号。42 个无王工蜂群总共分 7 组，分别饲喂 7 种不同配方的饲料花粉，每组 6 个重复，饲养室内温度为 29℃、相对湿度为 65%。

1.2　供试花粉及其配制方法

供试花粉为山杏花粉、山柳花粉和油菜花粉，均为 2013 年西方蜜蜂 *Apis mellifera* L.采集的新鲜花粉，纯度大于 95%，－20℃冰箱中储存。混料设计是研究各试验因子最佳比例的试验设计方法，本试验选取混料设计中的{3,3}单形重心设计（SAS 9.2），共得到 7 种花粉组合（表 1）。

1.3　饲喂处理

每个工蜂群饲喂对应编号的花粉，早上 9:00—10:00 饲喂，50%糖水（w/w，由统一采购的标准蔗糖配制而成）10~15 mL，花粉团 1~2 g，隔一天饲喂一次。待第 1 头雄蜂羽化出房后第 3 天终止对蜂群的饲喂，视作整个实验蜂群的饲养阶段。将整个蜂巢（图 1）解剖并统计相关发育性状指标，进行统计学分析。

1.4　观测指标

产卵前时间：每天上午 10:00 观察工蜂群产卵情况，将组建工蜂群到产第 1 粒卵的时间记作产卵前时间；

幼虫拖出数：每天上午 10:00 记录工蜂群幼虫拖出数量，将每个工蜂群幼虫拖出的总数量记作幼虫拖出数；

幼虫总数量、幼虫总重量、蛹总数量、蛹总重量：饲喂终止后，解剖蜂巢，取出巢房内全部幼虫、蛹，统计每个工蜂群的幼虫总数量和蛹总数量，用电子天平称取每个工蜂群的幼虫总重量和蛹总重量；

雄蜂出房时间：每天 10:00 观察工蜂群，将工蜂群产第 1 粒卵到第 1 头雄蜂羽化出房的时间记作雄蜂出房时间；

表 1　3 种花粉的{3,3}混料设计

Table 1　{3,3} mixture design under combination of the three different pollens

花粉组合 Pollen group	处理 Treatment	花粉混料 Pollen mixture		
		山杏 *Armeniaca sibirica*	山柳 *Salix caprea*	油菜 *Brassica rapa*
1	A	1.0000	0.0000	0.0000
2	S	0.0000	1.0000	0.0000
3	B	0.0000	0.0000	1.0000
4	S−B	0.0000	0.5000	0.5000
5	A−S	0.5000	0.5000	0.0000
6	A−B	0.5000	0.0000	0.5000
7	A−S−B	0.3333	0.3333	0.3333

A：山杏花粉；S：山柳花粉；B：油菜花粉。

A: *A. sibirica*; S: *S. caprea*; B: *B. rapa*.

出房雄蜂数量：每个工蜂群第 1 头雄蜂羽化出房时间为第 1 天，将前 3 d 内累计出房的雄蜂总数量记作出房雄蜂数量；

雄蜂出生重：用电子天平称取每头雄蜂出房时的出生重，取全部雄蜂出生重的中位数记作该工蜂群的雄蜂出生重。

1.5 数据分析

通过计算不同花粉饲喂处理下的工蜂群性状指标的变异系数分析性状指标间的变异性，采用 Pearson 相关系数分析性状指标的相关性，并进行相关系数显著性检验。通过主成分分析，确定评价蜂群发育的主要性状指标，以反映蜂群发育的主要性状指标为因变量建立回归模型，并对回归模型进行显著性检验。利用回归模型进行寻优分析，得出不同性状指标的最优花粉配比。以上数据分析过程均在统计学软件 SAS（9.2）中进行。

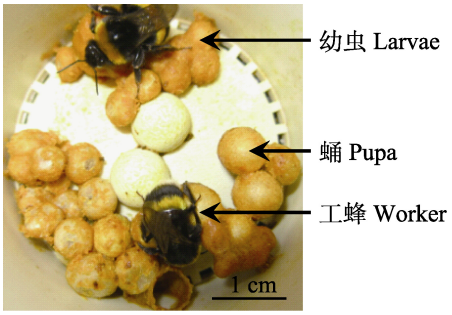

图 1 地熊蜂无王工蜂群蜂巢

Fig. 1 Overview of the nest of *Bombus terrestris* queenless micro-colony

2 结果与分析

2.1 蜂群主要性状指标的确立

2.1.1 蜂群性状指标的变异及相关性分析 对 7 种不同配比的混合花粉饲喂下地熊蜂无王工蜂群的 9 个性状指标进行分析，9 个蜂群性状指标平均变异系数为 45.85%，其中产卵前时间变异系数最大，为 85.30%，雄蜂出房时间变异系数最小，为 7.29%。结果表明，不同花粉饲喂处理之间存在很大差异，蜂群 9 个性状指标在不同花粉饲喂下表现出不同程度多样性。对蜂群性状指标进行相关性分析，结果显示多个指标之间存在显著相关关系。其中产卵前时间与蛹总数量、蛹总重量呈极显著负相关关系，蛹总数量和蛹总重量之间呈极显著正相关关系，幼虫总重量与出房雄蜂数量同样呈极显著正相关关系，各性状指标提供的蜂群状况信息发生重叠，同时各个单项性状指标对反映蜂群发育情况起的作用不同（表 2）。

综合蜂群性状指标的变异系数和相关性分析结果，表明蜂群不同性状之间既有差异性又存在显著相关性，因此有必要用主成分分析法确定各个性状指标对于蜂群发育情况的影响。

2.1.2 蜂群性状指标的主成分分析 通过主成分分析，将具有相关性的 9 个蜂群性状指标重新组合为一组新的综合指标（主成分 1~9，表 3），重新组合得到的 9 个主成分均包含 9 个蜂群性状指标的信息，其中前 5 个主成分包含的蜂群性状指标信息量为 86.79%（表 3），可以用前 5 个主成分代替上述的 9 个性状指标以评价不同花粉饲喂的工蜂群发育状况。根据性状指标的得分矩阵（表 4）可知第 1 主成分以蛹总重量为主，蛹总数量为辅，主要反映了蛹的发育状况，可以把第 1 主成分称为蛹发育因子。决定第 2 主成分的主要是雄蜂出房时间，决定第 3 主成分的主要是产卵前时间，雄蜂出房时间为辅，二者反映的是蜂群发育周期的长短，称为蜂群发育周期因子。第 4 主成分以幼虫总数量为主，幼虫总重量为辅，主要反映幼虫发育状况，称为幼虫发育因子。决定第 5 主成分的主要是以雄蜂出生重为主，雄蜂出房数量为辅，反映了雄蜂的发育状况，称为雄蜂发育因子。这 4 类评价因子中产卵前时间、幼虫总数量、蛹总重量、雄蜂出房时间和雄蜂出生重是 5 个主要性状指标，可较准确的评价不同花粉饲喂的蜂群发育状况。

2.2 不同花粉配比处理的蜂群主要性状指标混料回归分析

2.2.1 混料回归模型的建立 选取主成分分析获得的蜂群 5 个主要性状指标进行回归分析，根据

表 2　7 种不同花粉饲喂地熊蜂无王工蜂群性状指标相关性分析

Table 2　Correlations analysis on developmental traits of *Bombus terrestris* queenless micro-colony among the 7 different pollen mixtures

性状 Trait	产卵前时间（d） Egg laying delay	幼虫拖出数（头） Total number of larval ejection	幼虫总数量（头） Total number of larvae	幼虫总重量（g） Total weight of larvae	蛹总数量（头） Total number of pupa	蛹总重量（g） Total weight of pupa	雄蜂出房时间（d） Duration of drone	出房雄蜂数量（头） Total number of drone	雄蜂出生重（g） Birth weight of drone
产卵前时间（d） Egg laying delay	1								
幼虫拖出（头） Total number of larval ejection	0.07925	1							
幼虫总数（头） Total number of larvae	0.26486	0.13944	1						
幼虫总重量（g） Total weight of larvae	0.04547	0.22742	0.39073	1					
蛹总数量（头） Total number of pupa	- 42944**	- 0.19963	- 0.01917	- 0.20350	1				
蛹总重量（g） Total weight of pupa	- 40486**	- 0.31369	- 0.10352	- 0.30875	0.92449**	1			
雄蜂出房时间（d） Duration of drone	- 0.29055	0.41468**	- 0.28943	- 0.13711	0.07039	- 0.04310	1		
出房雄蜂数量（头） Total number of drone	- 0.15645	0.00275	0.14753	0.47587**	- 0.16182	- 0.28756	- 0.16896	1	
雄蜂出生重（g） Birth weight of drone	- 0.03618	- 0.08400	0.09848	0.38420	- 0.05133	- 0.08174	- 0.21711	0.18069	1

**表示 α<0.01 水平上显著差异（*t*-检验）。

**indicates significant difference at 0.01 level by *t*-test.

表 3　7 种不同花粉饲喂地熊蜂无王工蜂群性状指标主成分分析

Table 3　Principal component analysis on developmental traits of *Bombus terrestris* queenless micro-colony among the 7 different pollen mixtures

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	差值 D-value	贡献率 Contribution (%)	累积贡献率 Cumulative contribution (%)
1	2.6587	0.8937	0.2954	0.2954
2	1.7651	0.3166	0.1916	0.4915
3	1.4485	0.3334	0.1609	0.6525
4	1.1151	0.2916	0.1239	0.7764
5	0.8325	0.3997	0.0915	0.8679
6	0.4238	0.0505	0.0471	0.9150
7	0.3733	0.0286	0.0415	0.9565
8	0.3447	0.2975	0.0383	0.9948
9	0.0472	0.0000	0.0052	1.0000

表 4 7 种不同花粉饲喂地熊蜂无王工蜂群性状指标得分矩阵

Table 4 Score matrix on developmental traits of *Bombus terrestris* queenless micro-colony among the 7 different pollen mixtures

性状 Trait	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
产卵前时间（d） Egg laying delay	0.3110	－0.1378	－0.5506	0.2472	0.1198
幼虫拖出数（头） Total number of larval ejection	0.2051	－0.3710	0.4014	0.4487	0.1317
幼虫总数量（头） Total number of larvae	0.2561	0.2909	－0.0686	0.6647	－0.1566
幼虫总重量（g） Total weight of larvae	0.3874	0.3116	0.3533	0.1456	0.0545
蛹总数量（头） Total number of pupa	－0.4886	0.2985	0.1590	0.3079	－0.0024
蛹总重量（g） Total weight of pupa	－0.5284	0.2902	0.0173	0.2302	0.0315
雄蜂出房时间（d） Duration of drone	－0.1384	－0.4846	0.4849	0.0565	0.1301
出房雄蜂数量（头） Total number of drone	0.2776	0.3060	0.3534	－0.2852	－0.5468
雄蜂出生重（g） Birth weight of drone	0.1773	0.3999	0.1432	－0.2057	0.7899

回归系数的显著性检验（表 5）预测得到回归模型系数，得到以产卵前时间（Y_1）、幼虫总重量（Y_2）、蛹总重量（Y_3）、雄蜂出房时间（Y_4）、雄蜂出生重（Y_5）为因变量，以山杏花粉（X_1）、山柳花粉（X_2）、油菜花粉（X_3）及 3 种花粉的交互项为自变量的回归方程：

$Y_1=4.33X_1+3.14X_2+2.88X_3$；

$Y_2=33.33X_1+40.53X_2+41.86X_3$；

$Y_3=1.00X_1+1.44X_2+1.99X_3$；

$Y_4=29.22X_1+29.72X_2+26.72X_3-12.65X_1X_2-7.65X_2X_3$；

$Y_5=0.16X_1+0.21X_2+0.15X_3+0.28X_2X_3$。

2.2.2 混料回归模型的显著性检验 对回归模型进行显著性检验，结果显示以产卵前时间（F=19.12，P<0.01），幼虫总数量（F=74.90，P<0.01）、蛹总重量（F=64.41，P<0.01）、雄蜂出房时间（F=9.06，P<0.01）、雄蜂出生重（F=177.84，P<0.01）为因变量的 5 个回归方程均达到极显著水平。

幼虫总数量、蛹总重量、雄蜂出生重为因变量的 3 个回归方程决定系数分别为 0.8521、0.8321、0.9493，可以分别解释 85.21%、83.21%、94.93%的试验数据变异性，说明这 3 个回归模型拟合度较高，可以根据幼虫总数量、蛹总重量、雄蜂出生重这 3 个性状指标较为准确地预测蜂群饲养过程中的最优花粉配比。以产卵前时间和雄蜂出房时间为因变量的回归方程决定系数分别为 0.5952、0.4947，说明这两个指标预测最优花粉配比的准确度要低一些，但仍可以从蜂群发育周期的角度上对蜂群饲养过程中的最优花粉配比给出一定的参考。

2.3 蜂群最优花粉配比预测

根据 5 个性状指标——幼虫总数量、蛹总重量、雄蜂出生重、产卵前时间、雄蜂出房时间的回归模型预测蜂群最优花粉配比，对 5 个回归模型分别进行优化得到预测概貌图（图 2）。图 2（A）、2（B）、2（D）中均是单一油菜花粉饲喂时各个指标取得最优值，说明单一油菜花粉是促进幼虫生长的最佳花粉，能最好地保障蛹的发

表 5　7 种不同花粉饲喂地熊蜂无王工蜂群性状指标回归系数显著性检验

Table 5　Test of significance for regression coefficients on developmental traits of *Bombus terrestris* queenless micro-colony among the 7 different pollen mixtures

系数项 Model term	产卵前时间（d） Egg laying delay			幼虫总数量（头） Total number of larvae			蛹总重量（g） Total weight of pupa			雄蜂出生重（g） Birth weight of drone			雄蜂出房时间（d） Duration of drone		
	回归系数 Coefficient estimate	*t* 值 *t* value	*P* 值 *P* value	回归系数 Coefficient estimate	*t* 值 *t* value	*P* 值 *P* value	回归系数 Coefficient estimate	*t* 值 *t* value	*P* 值 *P* value	回归系数 Coefficient estimate	*t* 值 *t* value	*P* 值 *P* value	回归系数 Coefficient estimate	*t* 值 *t* value	*P* 值 *P* value
X_1	2.18	4.33	<0.001	33.33	5.94	<0.001	1.00	4.23	<0.001	0.18	10.95	<0.001	28.81	52.07	<0.001
X_2	1.58	3.14	<0.001	40.53	7.22	<0.001	1.44	7.22	<0.001	0.23	12.41	<0.001	29.75	49.19	<0.001
X_3	1.45	2.88	<0.001	41.86	7.46	<0.001	1.99	7.46	<0.001	0.15	8.11	<0.001	26.31	47.55	<0.001
$X_1 \times X_2$													- 12.43	- 4.474	<0.001
$X_1 \times X_3$															
$X_2 \times X_3$										0.27	2.98	0.005	- 7.43	- 2.67	0.011

X_1：山杏花粉；X_2：山柳花粉；X_3：油菜花粉。

X_1: *A. sibirica*; X_2: *S. caprea*; X_3: *B. rapa.*

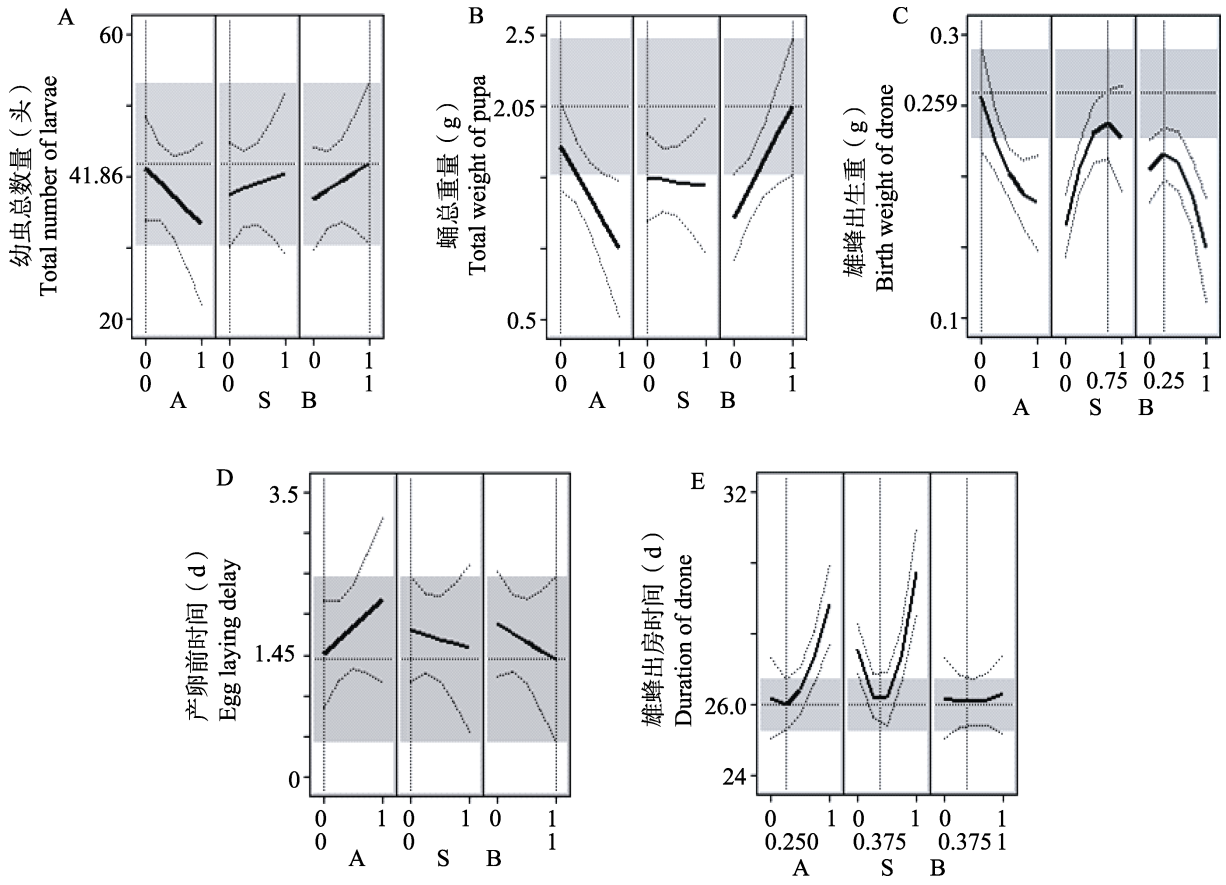

图 2　7 种不同花粉饲喂地熊蜂无王工蜂群性状指标预测概貌图

Fig. 2　Prediction profilers on the developmental traits of *Bombus terrestris* queenless micro-colony among the 7 different pollen mixtures

A：山杏花粉；S：山柳花粉；B：油菜花粉。

A: *A. sibirica*; S: *S. caprea*; B: *B. rapa.*

育，同时是缩短蜂群产卵前时间的最优花粉。图 2（C）表明在山柳花粉：油菜花粉=3：1 时雄蜂出生重取得最大值，说明该花粉配比可以较好的促进雄蜂生长。图 2（E）显示在山杏花粉：山柳花粉：油菜花粉=1：1.5：1.5 时雄蜂出房时间最短，说明该花粉配比是缩短雄蜂出房时间的最优花粉配比。

3　讨论

3.1　蜂群性状指标的选择

在比较不同花粉配方优劣过程中，所选择的蜂群性状指标能否全面、准确地反映蜂群整体情况是决定评价花粉营养是否合理的关键(Rasmont *et al.*，2005；Vanderplanck *et al.*，2014)。前人研究多通过产卵数量、幼虫拖出数、幼虫总数量、幼虫总重量和平均重量、成蜂体长和体重、成蜂死亡率和寿命、雄蜂出房时间、工蜂哺育能力和雄蜂的精子数量等多个指标评价熊蜂蜂群的发育情况。本研究选取涵盖蜂群卵、幼虫、蛹、成蜂 4 个阶段的 9 个性状指标，比较了不同花粉组合对各个指标的影响，结果表明 9 个性状指标间既存在发育多样性又存在密切相关性。通过主成分分析将相关性状指标进行归纳得到 4 类评价因子，分别为幼虫发育因子、蛹发育因子、成蜂发育因子、蜂群发育周期因子，可以从蜂群不同的发育阶段反映出蜂群发育的大部分信息。其对应的 5 个主要性状指标（幼虫总数量、蛹总重量、雄蜂出生重、产卵前时间、雄蜂出房时间）

可以比较全面、客观地评价蜂群发育，并且不同性状之间互不干扰，达到了性状指标的简约化和综合化。

3.2　最优花粉配比的预测

混合花粉在配制过程中氨基酸、饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸以及一些微量元素的种类和比例都会发生变化（Loper and Cohen，1987；Nicolson and Human，2012），不同比例混合的花粉和单一花粉对蜂群发育的影响不同，因此有必要对蜂群生长发育过程中最优花粉配比进行预测。混料设计是研究配料中各个成分最佳配比的统计学方法，其试验次数较少，试验结果可靠，可操作性强（关颖男，1990；Muteki *et al.*，2007；Kayacier *et al.*，2014），而应用混料设计研究熊蜂饲养过程中的最优花粉配比还未见报道。本研究在确定评价蜂群发育的主要性状指标后，通过混料设计建立回归模型，以主要的性状指标为依据对最优花粉配比进行预测。研究发现以蜂群幼虫总数量和蛹总重量两个性状指标预测最优花粉配比时，单一的油菜花粉表现最好，说明油菜花粉对熊蜂幼虫和蛹的发育有较好促进作用；在成蜂阶段，当山柳花粉和油菜花粉比例为 3∶1 时，雄蜂出生重最大，说明该花粉配比最有利于雄蜂的个体发育；蜂群产卵前时间和雄蜂出房时间是影响蜂群发育周期的 2 个主要性状指标，在本研究中，饲喂单一油菜花粉的蜂群产卵前时间最短，以山杏花粉∶油菜花粉∶山柳花粉=1∶1.5∶1.5 比例饲养的蜂群雄蜂出房时间最短，可以在蜂群早期饲喂油菜花粉以缩短产卵前时间，在蜂群产卵之后饲喂山杏、油菜和山柳的混合花粉以缩短雄蜂出房时间，从而有效缩短蜂群发育周期。

本研究发现根据不同性状指标预测得到的蜂群最优花粉配比不同，说明熊蜂蜂群在不同阶段的营养需求不同。为达到不同的饲养效果，可以采用不同配比的花粉进行饲养。本试验仅从宏观角度描述了不同配比的混合花粉对蜂群发育的影响，但混合花粉中对蜂群生长发育等起关键作用的营养成分及作用机制等问题，仍需要通过开展花粉成分分析、不同饲喂处理下的子代雄蜂精子活力、工蜂之间相互抑制产卵等方面进行深入探究。

参考文献 (References)

Abak K, Sari N, Paksoy M, Kaftanoğlu O,Yeninar H, 1995. Efficiency of bumble bees on the yield and quality of eggplant and tomatogrown in unheated glasshouses. *Acta Hortic*., 412: 268−274.

Alux C, Ducloz F, Crauser D, Conte YL, 2010. Diet effects on honeybee immunocompetence. *Biol. Lett*., 6(4)：562−565.

An JD, Huang JX, Williams PH, Wu J, Zhou BF, 2010. Species diversity and colony characteristics of bumblebees in the Hebei region of North China. *Chin. J. Appl. Ecol.,* 21(6): 1542−1550. [安建东, 黄家兴, Williams PH, 吴杰, 周冰峰, 2010. 河北地区物种熊蜂多样性与蜂群繁育特性. 应用生态学报, 21(6): 1542−1550.]

An JD, Huang J, Shao Y, Zhang S, Wang B, Liu X, Wu J, Williams PH, 2014. The bumblebees of North China (Apidae, *Bombus* Latreille). *Zootaxa*, 3830(1): 1−89.

An JD, Peng WJ, Wu J, Guo ZB, Tong YM, Li JL, 2006. Bionomics of *Bombus lucorum* and its application as pollinators. *Chinese Bulltin of Entomology*, 43(1): 94−97. [安建东, 彭文君, 吴杰, 国占宝, 童越敏, 李继莲, 2006. 明亮熊蜂的生物学特性及其授粉应用. 昆虫知识, 43(1): 94−97.]

An JD, Wu J, Peng WJ, Tong YM, Guo ZB, Li JL, 2007. Foraging behavior and pollination ecology of *Bombus hypocrita* L.and *Apis mellifera* L.in greenhouse peach garden. *Chin. J. Appl. Ecol.,* 18(5): 1071−1076. [安建东,吴杰, 彭文君, 童越敏, 国占宝, 李继莲, 2007. 明亮熊蜂和意大利蜜蜂在温室桃园的访花行为和传粉生态学比较. 应用生态学报, 18(5): 1071−1076.]

Beekman M, Srtatum P, Lingeman, R, 2000. Artificial rearing of bumble bees (*Bombus terrestris*) selects against heavy queens. *J. Apicult. Res*., 39(1/2): 61−65.

Dasgan H, özdoğan A, Kaftanoğlu O, Abak K, 2004. Effectiveness of bumblebee pollination in anti-frost heated tomato greenhouses in the Mediterranean basin. *Turk. J. Agric. For*., 28(2): 73−82.

Génissel A, Aupinel P, Bressac C, Tasei JN, Chevrier C, 2002. Influence of pollen origin on performance of *Bombus terrestris* micro-colonies. *Entomol. Exp. Appl.*, 104(2/3): 329−336.

Guan YN, 1990. Mixture Experiment Design. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 52−64.[关颖男, 1990. 混料试验设计. 上海：上海科学技术出版社. 52−64.]

Kayacier A, Yüksel F, Karaman S, 2014. Simplex lattice mixture design approach on physicochemical and sensory properties of wheat chips

enriched with different legume flours: An optimization study based on sensory properties. *LWT−Food Sci. Technol*., 58(2): 639−648.

Li JL, Peng WJ, Wu J, An JD, Guo ZB, Tong YM, Huang JX, 2006. Strawberry pollination by *Bombus hypocrite* and *Apis mellifera* in greenhouses. *Acta Entomol.Sin.*, 49: 342−348. [李继莲, 彭文君, 吴杰, 安建东, 黄家兴, 2006. 明亮熊蜂和意大利蜜蜂为温室草莓的授粉行为比较观察. 昆虫学报, 49: 342−348.]

Loper GM, Cohen AC, 1987. Amino acid content of dandelion pollen, a honey bee (Hymenoptera: Apidae) nutritional evaluation. *J. Econ. Entomol*., 80(1): 14−17.

Muteki K .MacGregor FJ, Ueda T, 2007. Mixture designs and models for the simultaneous selection of ingredients and their ratios. *Chemometr. Intell. Lab*., 86(1): 17−25.

Nicolson SW, Human H, 2012. Chemical composition of the "low quality" pollen of sunflower (*Helianthus annuus*, Asteraceae). *Apidologie*, 44(2): 144−152.

Pasquale DG, Salignon M, Le Conte Y, Belzunces LP, Decourtye A, Kretzschmar A, Suchail S, Brunet JL, Alaux C, 2013. Influence of pollen nutrition on honey bee health: do pollen quality and diversity matter? *PLoS ONE*, 8(8): 1−13.

Peng WJ, Huang JX, Wu J, An JD, 2009. Geographic distribution and bionomics of six bumblebee species in North China. *Chinese Bulltin of Entomology*, 46(1): 115−120. [彭文君, 黄家兴, 吴杰, 安建东, 2009. 华北地区六种熊蜂的地理分布及生态习性. 昆虫知识, 46(1): 115−120.]

Rasmont P, Regali A, Ings TC, Lognay G, Baudart E, 2005. Analysis of pollen and nectar of Arbutus unedo as a food source for *Bombus terrestris* (Hymenoptera: Apidae). *J. Econ. Entomol*., 98(3): 656−663.

Ribeiro M, Duchateau MJ, Velthuis HHW, 1996. Comparison of the effects of two kinds of commercially available pollen on colony development and queen production in the bumblebee *Bombus terrestris* L. (Hymenoptera: Apidae). *Apidologie*, 27(3): 133−144.

Roulston TH, Cane JH, 2000. Pollen nutritional content and digestibility for animals. *Plant Syst. Evol.*, 222(1/4): 187−209.

Röseler PF, 1985. A technique for year-round rearing of *Bombus terrestris* (Apidae, Bombini) colonies in captivity. *Apidologie*, 16(2): 165−170.

Serrano AR, Guerra-Sanz JM, 2006. Quality fruit improvement in sweet pepper culture by bumblebee pollination. *Sci. Hortic.*, 110(2): 160−166.

Sladen FWL, 1912. The Humble-Bee. London: MacMillan Press, 72−123.

Tasei JN, Aupinel P, 1994. Effect of photoperiodic regimes on the oviposition of artificially overwintered *Bombus terrestris* L. queens and the production of sexuals. *J. Apic. Res.*, 33(1): 27−33.

Tasei JN, Aupinel P, 2008. Nutritive value of 15 single pollens and pollen mixes tested on larvae produced by bumblebee workers (*Bombus terrestris,* Hymenoptera: Apidae). *Apidologie*, 39(4): 397−409.

Wu J, Huang JX, An JD, Hu FL, 2009. Effects of different diets on worker colony development of the bumblebee *Bombus hypocrita* Perez (Hymenoptera: Apidae). *Acta Entomol. Sin.*, 52(10): 1115−1121. [吴杰, 黄家兴, 安建东, 胡福良, 2009. 不同饲料对小峰熊蜂工蜂群发育的影响. 昆虫学报, 52(10): 1115−1121.]

Vanderplanck M, Moerman R, Rasmont P, 2014. How does pollen chemistry impact development and feeding behaviour of polylectic bees? *PLoS ONE*, 9(1): 186−209.

Velthuis HHW, van Doorn A, 2006. A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination. *Apidologie*, 37(4): 421−451.