

参赛队员姓名：黄一帆

中学：山东师范大学附属中学

省份：山东省

国家/地区：中国

指导教师姓名：冯翠

论文题目：探究蚂蚁基于视觉的巢间识别能力

2020 S.-T. Yao High School Science Award

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员： 黄一帆 指导老师： 冯翠

2020年 9月 10日

探究蚂蚁基于视觉的巢间识别能力

摘要

巢间识别能力是社会性昆虫区分同巢与异巢，同种与不同种个体的能力。蚁科 *Formicidae* 物种（俗称蚂蚁）被普遍认为依赖嗅觉进行巢间识别。有研究表明，蚂蚁也可能在某些程度上通过视觉识别同巢群的个体。我们通过以下实验研究蚂蚁的视觉识别能力：实验一研究野蛮收获蚁巢群是否能识别并接受被染色的同伴；实验二研究野蛮收获蚁巢群是否可以保持新习得的工蚁视觉特征；实验三研究老工蚁和幼蚁视觉识别能力的差异；实验四研究野蛮收获蚁工蚁是否能依据自己在镜中的成像习得同巢个体的新视觉特征。实验结果证明野蛮收获蚁的工蚁具有使用视觉识别同伴的能力，并且可以以同伴的嗅觉特征为依据接受其新的视觉特征。这一视觉识别机制可能存在某些识别关键点，比如唇基及额基。巢群可以将新习得的视觉特征记忆至少 3 天。幼蚁并不具备这种精细识别能力，而这种能力很可能是后天习得的。总之，我们的研究表明野蛮收获蚁具有基于视觉的巢间识别能力，而且具有后天的学习和记忆能力。这和传统观念认为的蚂蚁仅依靠嗅觉进行巢间识别以及仅依靠与生俱来的本能行动不同。我们的研究为之后关于蚂蚁基于视觉的巢间识别能力研究提供了参考。

关键词：野蛮收获蚁，巢间识别，视觉，学习

目录

1.研究背景.....	5
1.1 蚂蚁的巢间识别能力.....	5
1.2 蚂蚁的认知与学习能力.....	5
1.3 蚂蚁的视觉能力.....	6
1.4 研究目的.....	6
2.材料和方法.....	7
2.1 野蛮收获蚁.....	7
2.2 饲养环境.....	7
2.3 实验仪器与材料.....	8
2.4 实验设计.....	9
2.4.1 预实验.....	9
2.4.2 实验一：基于颜色与部位的视觉巢间识别.....	11
2.4.3 实验二：巢群对同巢个体新视觉特征的记忆能力.....	12
2.4.4 实验三：新老工蚁的视觉辨识能力对比.....	12
2.4.5 实验四：观察工蚁能否基于镜中的自我成像习得新视觉特征，从而接受同巢同伴的同一特征.....	13
3.实验结果.....	15
3.1 实验一结果.....	15
3.2 实验二结果.....	20
3.3 实验三结果.....	22
3.4 实验四结果.....	23
4.讨论.....	25
5.参考文献.....	27
6.致谢.....	28

2020 S.-T. Yau High School Science Award

1.研究背景

1.1 蚂蚁的巢间识别能力

巢间识别能力使得社会性昆虫有能力区分同巢与异巢，同种与不同种的个体，从而增强巢群内的凝聚力，避免不属于巢群的生物抢夺资源^[1]。蚁科 *Formicidae* 物种（俗称蚂蚁）被普遍认为依赖嗅觉，尤其是通过对比表皮上的碳氢化合物成分与属于巢群的碳氢化合物模板来进行巢间识别^[2]。然而有的研究表明，蚂蚁也可能在某些程度上通过视觉识别同巢群的个体。破茧不久的 *Myrmica sabuleti* 幼蚁会向其破茧时所看到的物体移动，即使那个物体已经被洗去了气味^[3]。而 *M. sabuleti*, *M. rubra* 与 *M. ruginodis* 三个物种的个体会对被人为改变了外观的同巢个体展现出更强的攻击性^[4]而与蚁科同属于胡蜂总科的纸蜂 *Polistes fuscatus* 更是可以看懂通过“脸色”看出同巢的某些个体是不是“好欺负”的^[5]。目前对于蚁科的视觉巢间识别能力缺乏系统的研究，对于视觉识别能力和嗅觉识别能力，以及与认知和学习能力的关系缺乏研究。

1.2 蚂蚁的认知与学习能力

许多人认为昆虫与其他的无脊椎动物只能依据与生俱来的本能活动，然而科学家已经证明昆虫，尤其是蚂蚁等真社会性昆虫拥有极强的认知与学习能力。事实上，*Myrmica sabuleti* 基于嗅觉的巢间识别能力，对于巢穴入口的视觉识别能力，甚至对同伴信息素的反应能力都是后天习得的^[6]。蚂蚁还可以解决简单的问题^[7]与使用工具^[8]。最为惊人的是，红蚁属 *Myrmica* 中的三个种通过了很多脊椎动物，甚至灵长类动物都无法通过的

镜子测试^[4]（在镜子中看到身上的颜料点后尝试去清理自己身体的对应部位而不是将镜子中的成像当成另一个个体）。

1.3 蚂蚁的视觉能力

在设计试验前，需要对蚂蚁的视觉能力有一个全面的认知。*Myrmica sabuleti* 在强光（10000lux）下对黄光与蓝光最为敏感，绿光次之，对红光略微敏感。而在弱光（600lux）下对绿光和紫外线最为敏感，黄光与绿光次之，对红光失去敏感性^[9]。蚂蚁也有较好的形状识别能力^[10,11]。

1.4 研究目的

研究蚁科是否具有基于视觉的巢间识别能力，是否能够通过视觉识别同伴。探索视觉识别能力与嗅觉识别能力、学习认知能力的关系。

2.材料和方法

2.1 野蛮收获蚁

野蛮收获蚁 *Messor barbarus* 是在国内被饲养地最广泛的一种蚂蚁。因其饲养简单，易于获得，被用于本次研究。本次研究选取了两个由一只蚁后，100 余只工，兵蚁以及若干卵，幼虫和裸蛹组成的群落（见图1）。



图1 野蛮收获蚁

2.2 饲养环境

本次研究使用的两个野蛮收获蚁巢群被分别饲养在 30*30*15cm 的亚克力盒与堵水试管构成的人工装置中（见图2图3）。亚克力盒四周涂滑石粉以防止蚂蚁逃脱。堵水试管使用 15*150mm 的玻璃试管，医用棉球以及 5ml 纯净水制作。堵水试管被放置在与亚克力盒一边平行的 5cm 处并且使用曲别针固定位置。试管上方置有一 15*5cm 的锡箔纸以防止蚁群收到过度光照。实验期间蚁群使用种子与冰糖饲养。非实验时，饲养装置受到

自然光照。饲养装置的温度保持在 24-27℃，湿度保持在 50-55%。实验时，饲养装置被置于 2600-2700lux 的人工光源下。



图 2 巢群 1

图 3 巢群 2

2.3 实验仪器与材料

实验使用的仪器与材料有：放大镜，弯头镊，剪刀，35*55mm 镜子，200ml 离心管，半透明圆柱形塑料盒（直径 65mm 高 45mm），牙医用双头探针，丙烯颜料（美邦祈富牌，793 黑色，453 钴蓝，120 中黄），滑石粉，酒精，清水，摄像机，台灯，Zootracer 动物轨迹追踪软件。

2.4 实验设计

2.4.1 预实验

预实验的目的是：①测试实验用蚁即野蛮收获蚁可以（至少部分地）通过视觉辨认同伴。②分别制定野蛮收获蚁的幼蚁和老工蚁个体对其他个体的“敌意等级”量化标准。实验步骤如下：

预实验 1 步骤：

步骤 1：使用弯头镊轻敲试管，取最先出巢探查的十只老工蚁（由于幼蚁不会主动出巢，可以确定出巢探查的工蚁为老工蚁。关于幼蚁的敌意等级测试见预实验二）。

步骤 2：将这些工蚁分别放置在另外的堵水试管中单独饲养。

步骤 3：待挑出的工蚁稳定（不再大幅度移动）后，随机使用弯头镊镊出一只同巢工蚁放入离心管内待用。

步骤 4：一只手使用弯头镊固定工蚁，另一只手使用双头探针将其头部（唇基及额基）染色。

步骤 5：将染色后的工蚁放回巢穴，观察其同伴对其的反应。

步骤 6：将一只异巢工蚁放入巢穴，观察其反应。

预实验 1 结果：

老工蚁对于被染色的其他同巢个体反应等级如下：①无敌意，包括无视和触角接触（三次以下）。工蚁对同巢且未经染色的其他工蚁会产生这些反应。②有敌意，包括使用触角反复探测（三次以上），张开大额，向前猛扑，在使用触角探测后迅速逃离。部分工蚁对经过染色的同巢工蚁以及部分异巢工蚁会有这种反应。③明显敌意，包括使用颚尝试拖走其它工

蚁。工蚁对经过染色的同巢工蚁以及异巢工蚁会有这种反应。④强敌意，特指使用大颚进行可致命的撕咬。工蚁仅仅对异巢工蚁会有这种反应。

（本敌意等级分类法方法基于 Cammaerts 对敌意等级(Aggressive level)的三级式分类法，又以预实验的结果为基础增加了第四个等级，以及对前三的等级所对应的的具体行为进行了微调）。

预实验 2:

考虑到幼蚁（破茧两周以内，体色呈黄色而不是黑色）与老工蚁的行为方式并不一致，设计了预实验二以为其确定一个敌意等级分类系统。步骤如下：

步骤 1: 拿起试管，将双头探针伸入试管中。此时巢群处于混乱状态并且幼蚁会和老工蚁一起顺着探针向上爬，取数只幼蚁放入圆形塑料盒。

步骤 2: 等待五分钟使这些工蚁脱离混乱状态（不再快速移动）。

步骤 3: 放入一只同巢工蚁，观察其反应。

步骤 4: 三分钟后取出同巢工蚁并放入一只异巢工蚁，观察其反应。

步骤 5: 将所有工蚁放回原装置。

预实验 2 结果:

幼蚁对于被染色的其他同巢个体反应等级如下：①无敌意，包括无视和触角接触（三次以下）。幼蚁对同巢的其他工蚁会产生这种反应。②有敌意，包括迅速逃跑。值得注意的是幼蚁不会摆出威胁性动作（如张开大颚）或主动攻击。③反击，幼蚁只有在被攻击时才会产生攻击性行为。

2.4.2 实验一：基于颜色与部位的视觉巢间识别

实验分别使用不同的染料（清水，黑色染料，蓝色染料，黄色染料）对工蚁的不同部位（头部-唇基及额基，胸部-包括前胸背板到结节的部位，腹部背侧）进行染色标记，观察同巢其他工蚁对染色工蚁的反应。具体实验分组见表 1。

步骤 1：在巢群 1 中使用弯头镊轻敲试管壁三下，引诱工蚁出巢探查情况。

步骤 2：使用弯头镊捕捉工蚁并放入离心管内待用。

步骤 2：使用双头探针沾取染料并将工蚁染色。清水组与黑色组为对照组以防止其他工蚁对被染色的工蚁产生攻击性的原因为乙烯的气味或其他因素。

步骤 4：将染色后的工蚁放入离心管，等待 3 分钟使染料干燥。

步骤 5：使用弯头镊将工蚁放回饲养装置并观察 15min，以 5min 为单位记录其与其他工蚁接触的次数与每次接触时其他工蚁表现出的敌意等级。

步骤 6：在巢群 2 内重复试验。为避免实验顺序对结果产生影响，两个巢群使用相反的实验顺序。

使用不同的染料与染色工蚁不同部位的情况下，在同一巢群中共计实验 12 次，两个巢群共计 24 次。具体设置见表 1：

实验分组 \ 处理方法	部位	染料
1	头部	清水

1	头部	黑色
1	头部	蓝色
1	头部	黄色
2	胸部	清水
2	胸部	黑色
2	胸部	蓝色
2	胸部	黄色
3	腹部背侧	清水
3	腹部背侧	黑色
3	腹部背侧	蓝色
3	腹部背侧	黄色

表 1: 实验一分组

实验一分 3 天进行，每天进行 1 组。每次实验后更换离心管，清洗弯头镊与双头探针。巢群 1 的实验顺序为 1, 2, 3; 巢群 2 的实验顺序为 3, 2, 1。

2.4.3 实验二：巢群对同巢个体新视觉特征的记忆能力

在实验一的头部，蓝色组结束后 1h, 3h, 1d, 3d 后重复这一组的实验。

2.4.4 实验三：新老工蚁的视觉辨识能力对比

步骤 1: 使用弯头镊轻敲试管，取最先出巢探查的六只工蚁，放入离心管中备用。

步骤 2: 拿起试管，将双头探针伸入试管中。此时巢群处于混乱状态并且幼蚁会和老工蚁一起顺着探针向上爬，取六只幼蚁放入另一离心管内。

步骤 3: 将试管归位。

步骤 4: 分别将新，老工蚁取一只染色（头部，蓝色）并分别放入另外两个离心管中等待三分钟使染料干燥。

步骤 5：将老工蚁组中的一只染色工蚁与另外五只工蚁为一组，放入圆柱形塑料盒中观察五分钟并记录视频。

步骤 6：在幼蚁组中重复步骤 5。

步骤 7：观看视频并分别记录未染色个体对染色个体的敌意等级。为防止记录错误，使用 zootracer 软件记录每只工蚁的行动轨迹。

2.4.5 实验四：观察工蚁能否基于镜中的自我成像习得新视觉特征，从而接受同巢同伴的同一特征

步骤 1：使用弯头镊轻敲试管，取最先出巢探查的六只工蚁，放入离心管中备用。

步骤 2：取出一只工蚁，将其头部染成蓝色后放入装有一面竖着的镜子的圆柱形塑料盒中（装置见图 4），等待 5min。

步骤 3：将其和另一只染色工蚁与另一只未染色工蚁放入没有镜子的塑料盒中，观察其敌意等级，持续 5min。

步骤 4：重复实验三次。

实验四设置三个对照组，即掠过步骤 2。

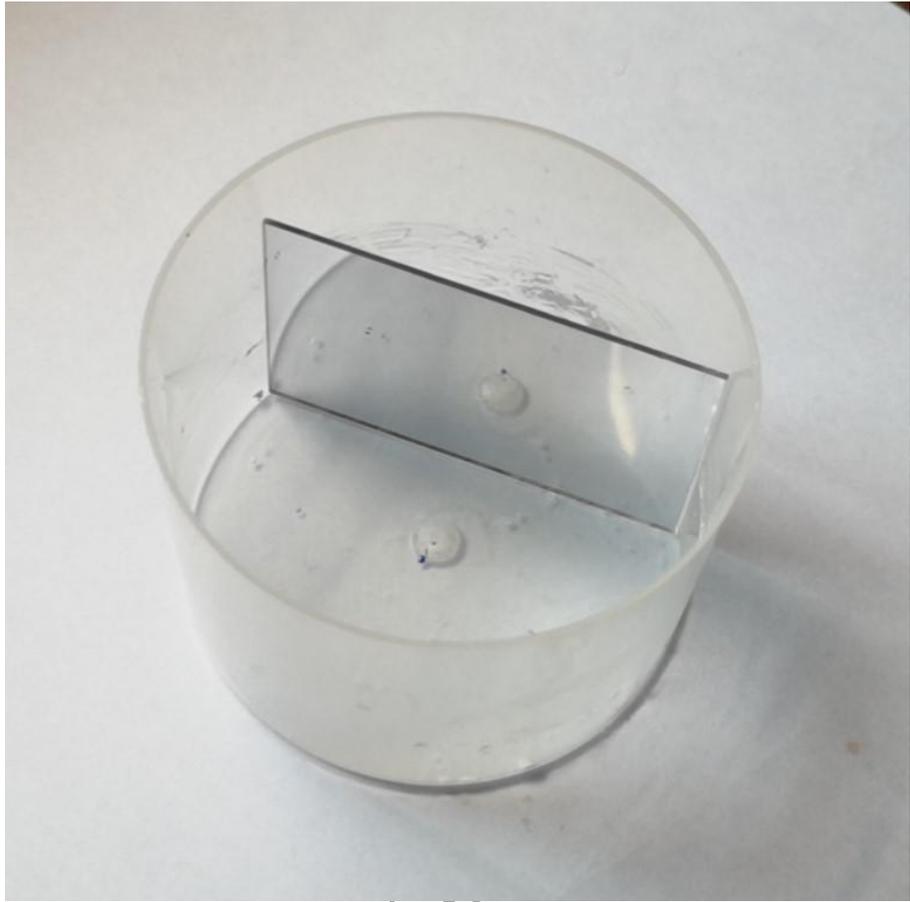


图4 实验4 装置

2020 S.-T. Yau High School

ward

3.实验结果

3.1 实验一结果

两个巢群中同巢工蚁对被染色工蚁的敌意指数见表 2，短时间内敌意指数随时间变化趋势见图 5-10：

染色方案	时间	巢群 1 敌意指数*	巢群 2 敌意指数*
头部, 清水	0-5min	0.09	0
头部, 清水	5-10min	0	0
头部, 清水	10-15min	0	0
头部, 黑色	0-5min	0.12	0.07
头部, 黑色	5-10min	0	0
头部, 黑色	10-15min	0	0
头部, 蓝色	0-5min	0.55	0.73
头部, 蓝色	5-10min	0.19	0.25
头部, 蓝色	10-15min	0.13	0.14
头部, 黄色	0-5min	0.7	0.89
头部, 黄色	5-10min	0.53	0.27
头部, 黄色	10-15min	0.38	0.14
胸部, 清水	0-5min	0	0
胸部, 清水	5-10min	0	0
胸部, 清水	10-15min	0	0
胸部, 黑色	0-5min	0.38	0
胸部, 黑色	5-10min	0	0
胸部, 黑色	10-15min	0	0
胸部, 蓝色	0-5min	0.73	0.4
胸部, 蓝色	5-10min	0.4	0
胸部, 蓝色	10-15min	0	0
胸部, 黄色	0-5min	0.75	0.71
胸部, 黄色	5-10min	0.38	0.29
胸部, 黄色	10-15min	0.25	0.2
腹部, 清水	0-5min	0	0
腹部, 清水	5-10min	0	0
腹部, 清水	10-15min	0	0
腹部, 黑色	0-5min	0.25	0.12
腹部, 黑色	5-10min	0	0
腹部, 黑色	10-15min	0	0
腹部, 蓝色	0-5min	0.2	0.25
腹部, 蓝色	5-10min	0.16	0
腹部, 蓝色	10-15min	0	0

腹部, 黄色	0-5min	1	0.44
腹部, 黄色	5-10min	0	0.4
腹部, 黄色	10-15min	0	0

表 2: 实验一敌意指数

*: 敌意等级: 0: 无敌意 1: 有敌意 2: 明显敌意 3: 强敌意

$$\text{敌意指数} = \frac{\text{五分钟内等级次数} \times 1 + \text{五分钟内等级}2\text{次数} \times 2 + \text{五分钟内等级}3\text{次数} \times 3}{\text{五分钟内总接触次数}}$$

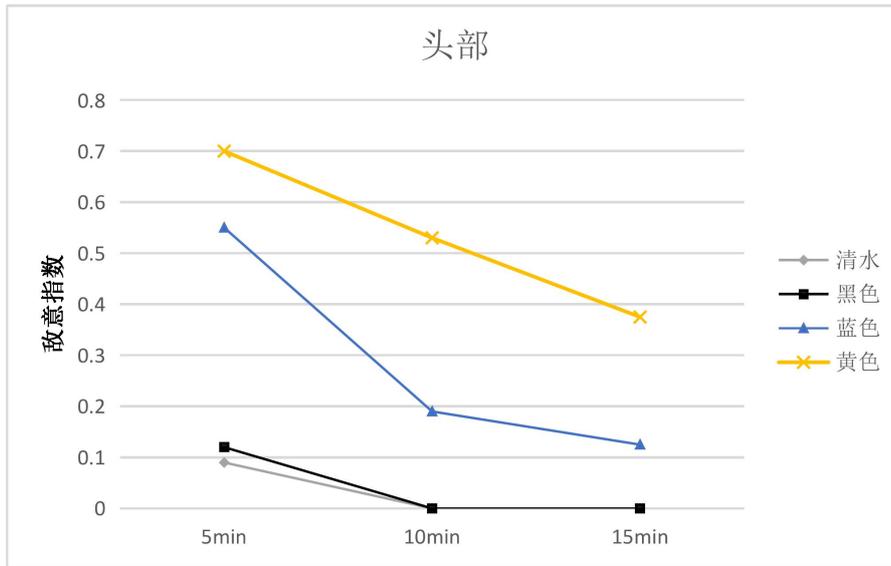


图 5 实验一巢群 1 敌意指数变化 (头部)

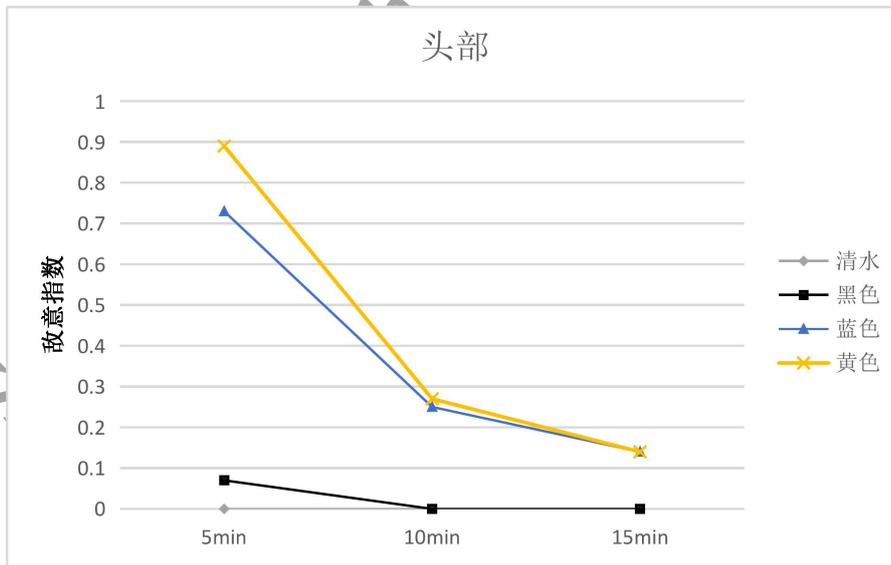


图 6 实验一巢群 2 敌意指数变化 (头部)

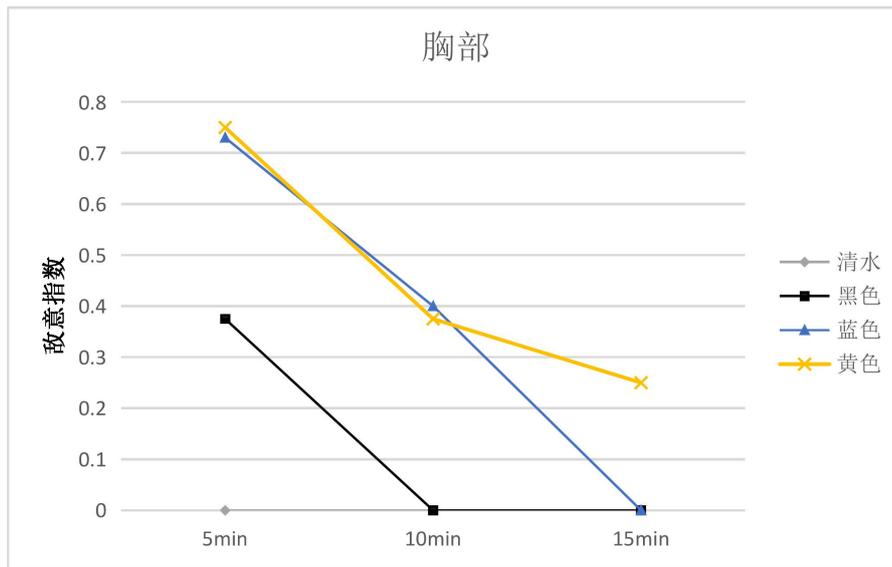


图7 实验一巢群1 敌意指数变化（胸部）

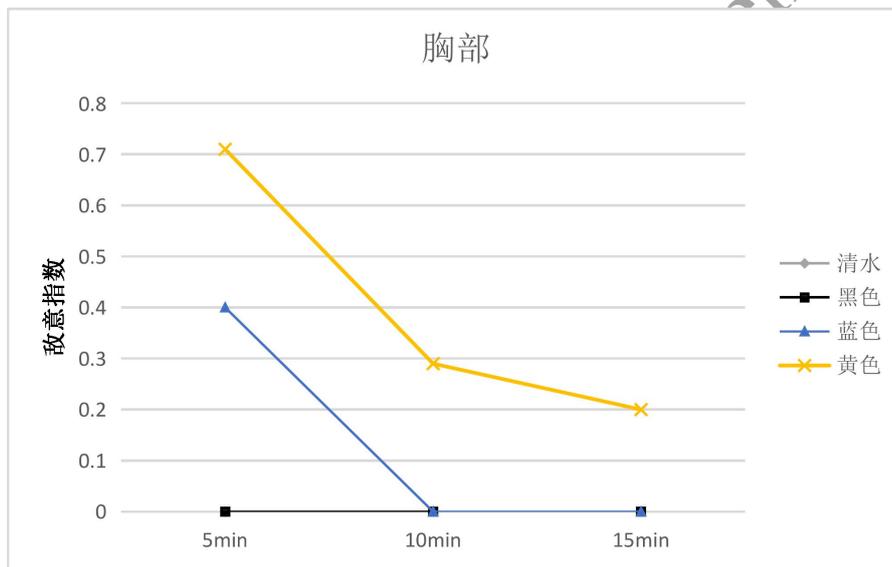


图8 实验一巢群2 敌意指数变化（胸部）

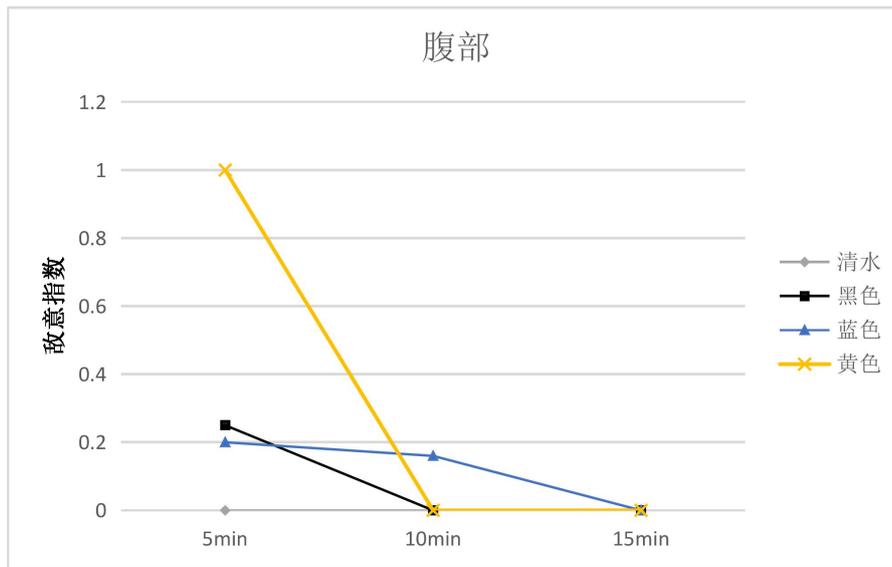


图9 实验一巢群1 敌意指数变化（腹部）

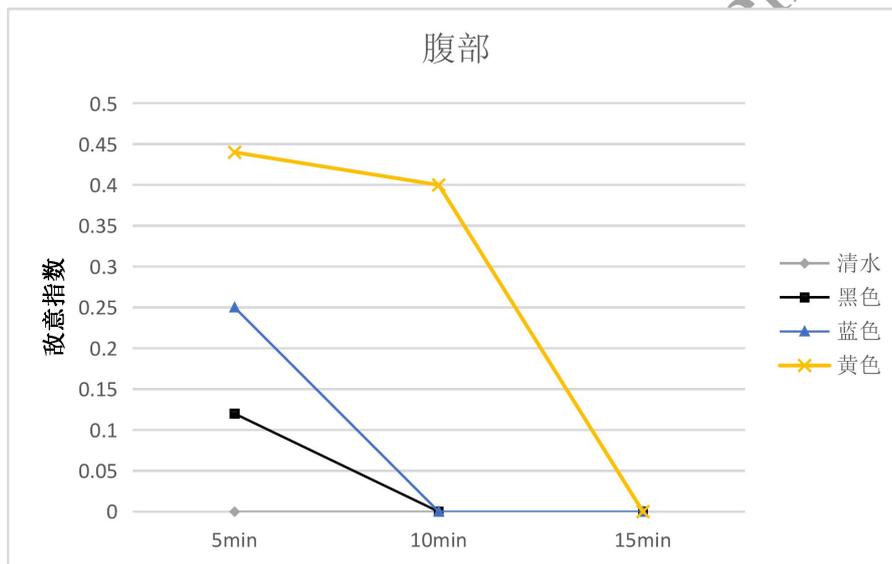


图10 实验一巢群2 敌意指数变化（腹部）

实验一还观察到如下现象：

1. 同巢工蚁在看到被染成黄色的工蚁后会在较远的距离（50-100mm）做出反应并向前探查，而对做了其他处理的工蚁不会。
2. 在被染黄色或蓝色的工蚁被正式接受前，会有许多同巢其他工蚁围绕在其身边反复探测气味（见图12图13）。
3. 只有在被染色的工蚁染色的部位暴露在其他工蚁的视野之内时，其他工蚁才会表现出敌意行为（见图11）。

4. 其他工蚁只有在使用触角探测了被染黑色的工蚁被染色的部位后才会表现出敌意行为，而且这种敌意行为仅限于逃跑。没有其他工蚁对被染黑色的工蚁表现出威胁或攻击性行为。这和它们对突然出现在领地内的其他物体（种子，镊子，棉絮）的反应一致，推测是因为其他工蚁在使用触角探测被染黑的部位时未能探测到碳氢化合物，遂将其当做其他物体。

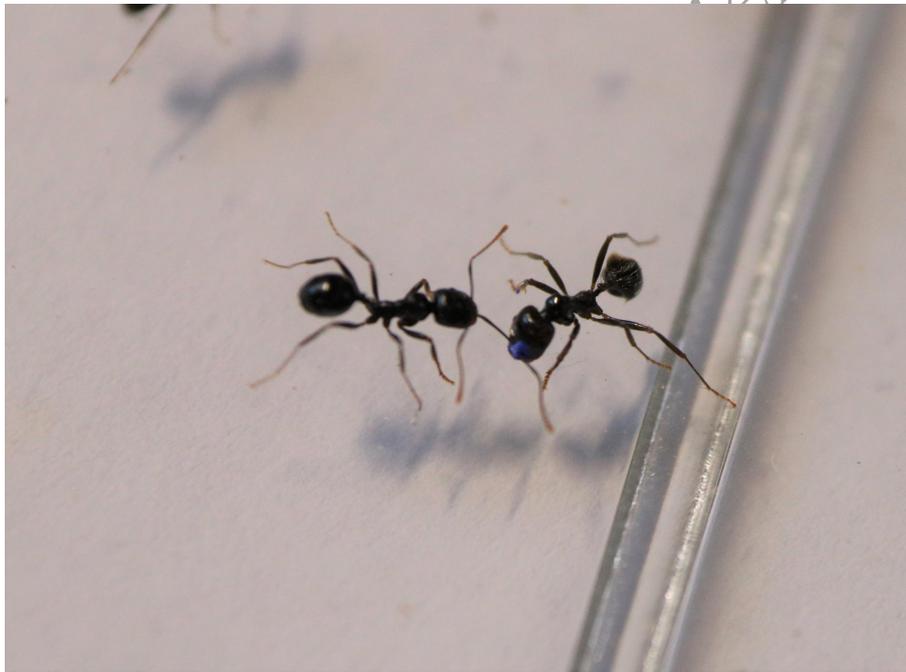


图 11 被攻击的工蚁



图 12 被染色的工蚁被同巢工蚁探测气味



图 13 被染色的工蚁被同巢工蚁探测气味

3.2 实验二结果

两个巢群中同巢工蚁在不同时间内对被染色工蚁的敌意指数变化见表

3，敌意指数随时间变化趋势见图 14：

开始时间	时间	敌意指数 (巢群 1)	敌意指数 (巢群 2)
1h 后	0-10min	0.21	0.16
3h 后	0-10min	0.2	0.11
1d 后	0-10min	0.32	0.29
3d 后	0-10min	0.24	0.25

表 3: 实验二敌意指数

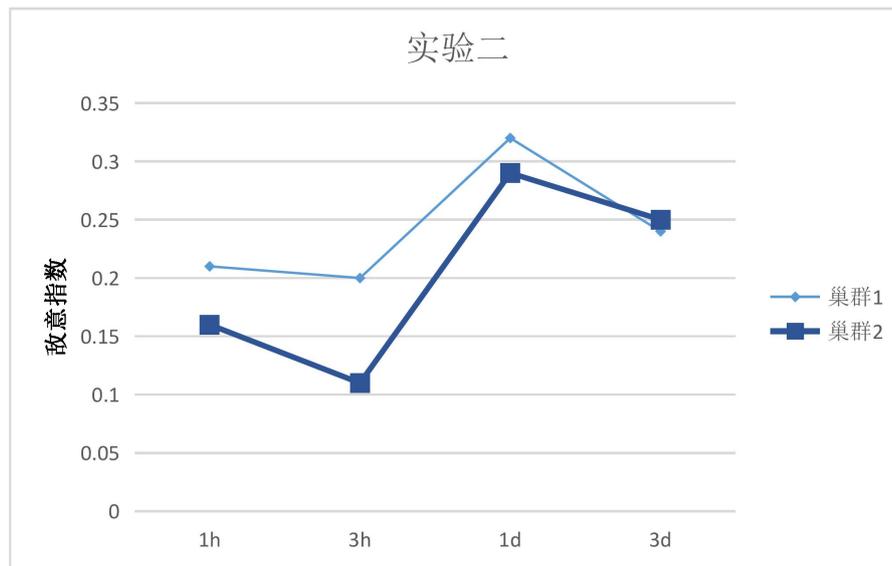


图 14: 实验二敌意指数变化

实验二还观察到以下现象:

1. 仅观察到一次敌意等级 2 级的反应 (拖动触角), 并且这一反应仅持续了 5 秒左右。(实验一中的拖动触角持续时间一般在 20sec-3min)。
2. 被染色的工蚁都在 5min 内被巢群所接受 (被允许进入试管) 并回归正常生活而不会像实验一中的那样被反复探测气味 (见图 15)。



图 15 实验二中很快被巢群接受的工蚁恢复正常生活

3.3 实验三结果

老工蚁组和幼蚁组对被染色的工蚁敌意等级见表 4 及图 16:

实验组	敌意等级	次数 (前)*	次数 (后)*
老工蚁组	0	5	6
	1	4	1
	2	1	0
	3	0	0
幼蚁组	0	23	4
	1	1	0
	2	0	0
	3	0	0

表 4: 老工蚁组和幼蚁组的敌意等级

*: 前指从前方接近的工蚁, 后指从后方接近的工蚁。

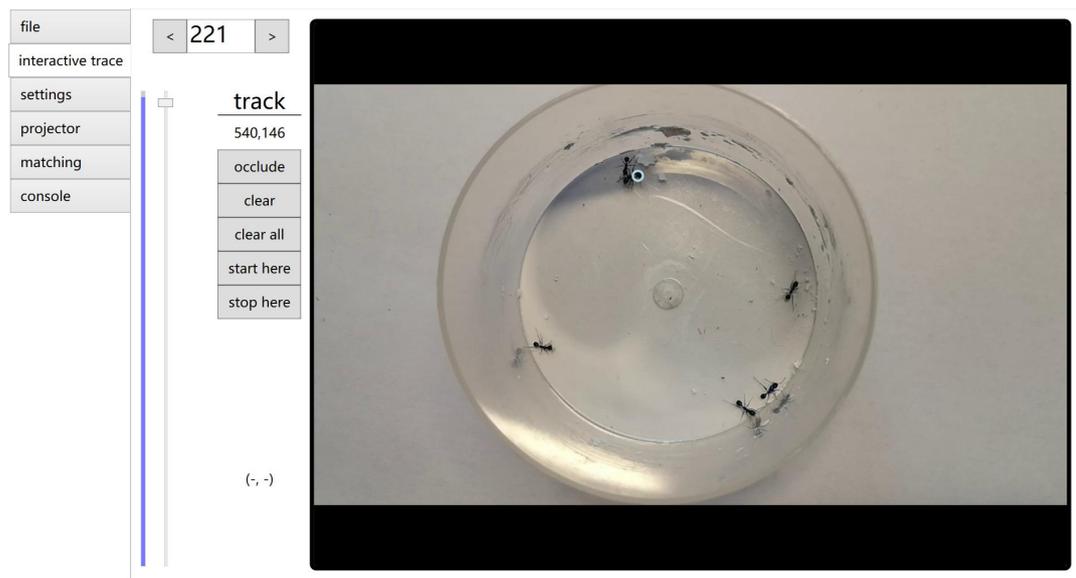


图 16 实验 3 视频截图

3.4 实验四结果

被放置在镜前过的工蚁（实验组）与未被放置在镜前过的工蚁（对照组）对染色工蚁敌意等级见表 5:

实验组	敌意等级	次数（对未染色工蚁）	次数（对染色工蚁）
1	0	4	5
	1	0	1
	2	0	0
	3	0	0
2	0	7	6
	1	2	2
	2	0	0
	3	0	0
3	0	9	5
	1	0	2
	2	0	0
	3	0	0
4（对照）	0	7	3
	1	1	1
	2	0	0
	3	0	0
5（对照）	0	6	4
	1	0	1
	2	0	0
	3	0	0
6（对照）	0	8	6
	1	0	2

	2	0	0
	3	0	0

表 5: 实验组与对照组的敌意等级

2020 S.-T. Yau High School Science Award

4.讨论

实验一表明，野蛮收获蚁的工蚁具有使用视觉识别同伴的能力，并且可以以同伴的嗅觉特征为依据接受其新的视觉特征。这一过程所需的时间在 5-15min，并且巢群至少在第三天时还可以直接接受具有新视觉特征的工蚁，这说明巢群可以基于视觉学习和识别工蚁的新视觉特征，并在较长时间内保持这一记忆。同巢工蚁对于被染成黄色的同伴最为敏感，其次是蓝色。头部和胸部被染色都会导致其敌意指数大幅度上升，而腹部染色并不会产生太大的影响，这意味着野蛮收获蚁工蚁在使用视觉识别其同伴的过程中可能存在某些识别的“关键点”。此外，实验一中“头部，蓝色”组工蚁被接纳后，巢群依然会对第一次出现的“头部，黄色”组工蚁与“胸部，蓝色”组工蚁表现出很强的敌意。这说明巢群并非只是简单的以某种颜色的出现或者某一部位的颜色不一致作为视觉判断的基础，而可以是精准地地识别出“某一部位具有某一颜色”这一具体的视觉特征。根据如上结果，推测野蛮收获蚁巢群接受工蚁的新视觉特征可能存在以下过程机制：①同巢工蚁首先通过视觉对“关键点”视觉特征的精确测定判断染色工蚁与同巢工蚁不同②同巢工蚁再进行嗅觉判断，发现其气味属于巢群③由于视觉特征（不属于巢群）与嗅觉特征（属于巢群）不一致，遂反复对其进行气味测定以进一步确认是否属于巢群④在反复比对气味特征，确认其属于巢群后将其接纳，并将其具有的新视觉特征纳入属于巢群的工蚁视觉特征模板⑤因“某一部位被染成某种颜色”这一特征已被巢群接纳，此后具有这样特征的工蚁将直接或很快被巢群接受。传统观念认为，昆虫等无脊椎动物所有的行为方式都是依据与生俱来的本能。我的实验表明这种

传统观念可能是不正确的。在实验三中，老工蚁组对头部标记了蓝点的同伴产生了明显的敌意，而幼蚁组对于染色与未染色的同伴并无不同的反应。这可能意味着老工蚁对同伴进行视觉识别的能力并非与生居来，而是在后天阶段获得的。这说明了蚂蚁的认知与学习能力远比传统观念认为的强大与复杂。相比于传统观念所认为的，蚂蚁习得各项技能的过程可能更接近高等动物，如幼蚁对同巢工蚁的视觉识别能力的后天获得与婴儿在三个月大时才会逐渐开始获得人脸识别能力的过程十分相似。此前有研究证明破茧不久的 *Myrmica sabuleti* 幼蚁会向其破茧时所看到的物体移动，即使那个物体已经被洗去了气味^[3]。推测相比于老工蚁，幼蚁可能缺乏对同伴不同颜色与不同部位的视觉特征的精细识别能力或对同巢工蚁视觉特征的精确模板，而这些能力的具体获得机制还需进一步研究。在实验四中，被放置在镜前过的染色工蚁与未被放置在镜前过的未染色工蚁对同巢的染色工蚁反应并无明显差异。推测可能是因为其对镜中个体的认知以及对比嗅觉特征这一必要过程的缺失有关。具体原因还需进一步研究。

可能是受到“蚂蚁依据嗅觉识别同伴”这一传统观念的影响，国内外关于蚂蚁基于视觉的巢间识别能力十分缺乏。从材料的选取到实验的设置，本次实验的研究方法几乎全部是从零开始摸索。希望这一研究能对其他人产生一些启发和提供一些借鉴。目前还需要进一步研究以探究蚂蚁这一能力的行为学与神经科学机制，如幼蚁对同巢工蚁外形“模板”的形成机制以及巢群对工蚁新视觉特征的记忆机制。

受到条件限制，本次实验仅选取了野蛮收获蚁一个物种，并且仅在两个巢群中重复了实验，实验结果的普适性尚需进一步验证。

5.参考文献

- [1]CROZIER, R.H.,PAMILO,etc.Evolution of social insect colonies: Sex allocation and kin selection[J].Oxford University Press,1996:320
- [2]Sara Diana Leonhardt, Florian Menzel, Volker Nehring,etc.Ecology and Evolution of Communication in Social Insects[J].Cell,2016,164(6):1277-1287.
- [3]Marie-Claire Cammaerts, Geoffrey Gosset.Ontogenesis of visual and olfactory kin recognition, in the ant *Myrmica sabuleti* (Hymenoptera: Formicidae)[J].Annales de la Société entomologique de France (N.S.),2014,50(3-4):358-366.
- [4]MC Cammaerts Tricot, R Cammaerts.ARE ANTS(HYMENOPTERA,FORMICIDAE)CAPABLE OF SELF RECOGNITION?[J].Journal of Science,2015,5(7):521-532.
- [5]Elizabeth A. Tibbetts.Visual signals of individual identity in the wasp *Polistes fuscatus*[J].Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences,2002,269(1499):1423-1428.
- [6]MC Cammaerts, R Cammaerts.The Acquisition of Cognitive Abilities by Ants: A Study on Three *Myrmica* Species[J].Advanced Studies in Biology,2015,7(7):335-348.
- [7]Cammaerts Tricot, Marie-Claire.Ants' Ability in Solving Simple Problems[J].International Journal of Biology,2017,9(3):26-37.
- [8]Cammaerts Tricot, Marie-Claire.Can *Myrmica rubra* ants use tools or learn to use them?[J].International Journal of Biology,2018,10(1).
- [9]Cammaerts Tricot, Marie-Claire.Colour vision in the ant *Myrmica sabuleti* MEINERT, 1861 (Hymenoptera : Formicidae)[J].Myrmecological News,2007,10:41-50.
- [10]Cammaerts Tricot, Marie-Claire.The visual perception of the ant *Myrmica ruginodis* (Hymenoptera: Formicidae)[J].Biologia,2012,67(6):1165-1174.
- [11]MC Cammaerts.Some characteristics of the visual perception of the ant *Myrmica sabuleti*[J].Physiological Entomology,2004,29(5):472-482.
- [12]Fernando Esponda, Deborah M. Gordon.Distributed nestmate recognition in ants[J].Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,2015,282(1806):20142838.
- [13]Shelby J. STURGIS, Deborah M. GORDON.Nestmate recognition in ants (Hymenoptera: Formicidae): a review[J].Myrmecological News,2012,16:101-110.

6.致谢

感谢老师对我的支持和帮助，感谢父母一直以来对我在生物学方面的兴趣，以及饲养与研究蚂蚁的资助与支持，感谢丘成桐奖给我一个深入探索自己兴趣的机会。

2020 S.-T. Yau High School Science Award