

青海湖鸟岛地区灯诱捕获 夜蛾科昆虫多样性调查

“鸟岛与少年”2024年清华大学赴青海湖鸟岛实践支队

医学院 韩昊洋

生命科学学院 金禹宏

生命科学学院 刘坤达

1 背景

1.1 青海湖鸟岛生态概况

青海湖位于我国青海省东北部、青藏高原东北部、西宁市西北部、刚察县南部，距西宁市 136 公里，介于东经 $99^{\circ}36'$ ~ $100^{\circ}16'$ ，北纬 $36^{\circ}32'$ ~ $37^{\circ}15'$ 之间，是我国最大的咸水湖，由祁连山的大通山、日月山和青海南山之间的断层陷落形成，面积约为 4583 平方千米，湖面海拔 3195 米，最深处可达 32.8 米。青海湖西岸地区地势较为平坦，海拔高度在 3200 米至 3600 米之间。整体上，西岸呈现出一种由山脉向湖盆过渡的地貌特征。青海湖西岸的湖水主要来源于周边地区的河流、地下水和降水。西岸地区的河流主要有布哈河、泉湾河等，这些河流为青海湖提供了丰富的水源。

青海湖是重要的生态系统，对周边地区的生态环境具有重要意义。湖区的湿地环境为许多候鸟提供了栖息和繁殖地。此外，青海湖还富含丰富的物种资源，如湟鱼等，对保护当地生物多样性具有积极作用。

青海湖地区属高原大陆性气候，气候寒冷干燥，昼夜温差大。受冬季风影响小，气温年较差小。这种气候条件对于一些适应寒冷环境的动植物提供了生存条件。植被类型丰富，包括草原、荒漠、湿地、灌丛、森林等。其中，草原是该地区主要的植被类型，主要属于高原草甸草原和亚高山草甸草原。草原植被以矮生、耐寒、适应性强的植物为主。

青海湖鸟岛位于青海湖的西北隅，包括东西两个岛屿，即海西山（蛋岛）和海西皮。该地区地势平坦，气候温和，三面环水，环境幽静，为鸟类提供了理想的栖息地，昆虫分布相对较密。

1.2 夜蛾科昆虫简介

夜蛾科是鳞翅目中最大且最具有多样性的家族之一，已描述的种类超过 35,000 种。这些物种具有显著的生物学特征和生态作用，使其成为生态系统和昆虫学研究的重要组成部分。

夜蛾在多种栖息地中广泛分布，从热带雨林和温带森林到干旱沙漠和高海拔地区，几乎遍布全球，除了南极洲外，其他大陆均有其身影，它们的适应能力使其在不同生态位中顽强生存。许多夜蛾是夜行性动物，通常在夜间觅食和交配，尽管也有少数种类在白天活动。

夜蛾科的幼虫通常是贪婪的植食者，取食大量植物，可能对作物和花园造成显著破坏；少数种类则是肉食性，捕食其他鳞翅目的幼虫。幼虫成熟后进入蛹期，并在此期间发生变态，最终转变为成虫。化蛹的过程可以在多种基质中进行，包括土壤、凋落叶或保护性的蚕茧中。

成虫从蛹中脱颖而出后，准备繁殖。它们在交配和产卵过程中展现出一系列行为，有些物种会利用信息素来吸引配偶。交配后，雌性会产卵，这些卵最终孵化为下一代幼虫，完成生活史。

在夜蛾成虫的特征中，触须、下唇须、足和翅膀是重要的种类鉴别依据。本次鉴定主要集中在翅膀特征上。夜蛾科的翅脉型相似，其中前翅中室下部发出四条翅脉：M2、M3、Cu1 和 Cu2，形成四叉型（Quadrifine），而后翅则可分为四叉型和中室下部发出 M3，Cu1，Cu2 的三叉型（Trifine）（如图 1A 所示）。

夜蛾的前翅纹路在种类鉴定中具有重要意义，主要分为 5 条纵纹：基线（basal line）、内横线（antemedial line）、外横线（postmedial line）、亚缘线（subterminal line）及缘线（terminal line），以及两个圆斑：肾形纹（reniform stigma）和环形纹（orbicular stigma）（如图 1B 所示）。不同类群之间，这些斑纹的形态差异较为显著。

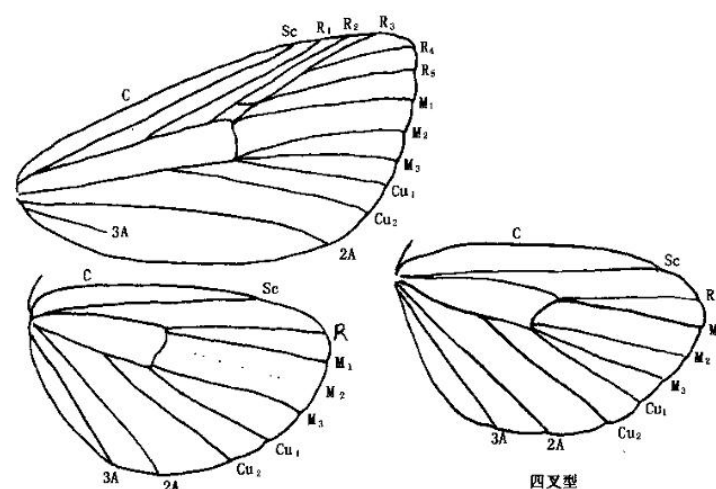


图 1A 成虫翅脉，引自参考文献 2

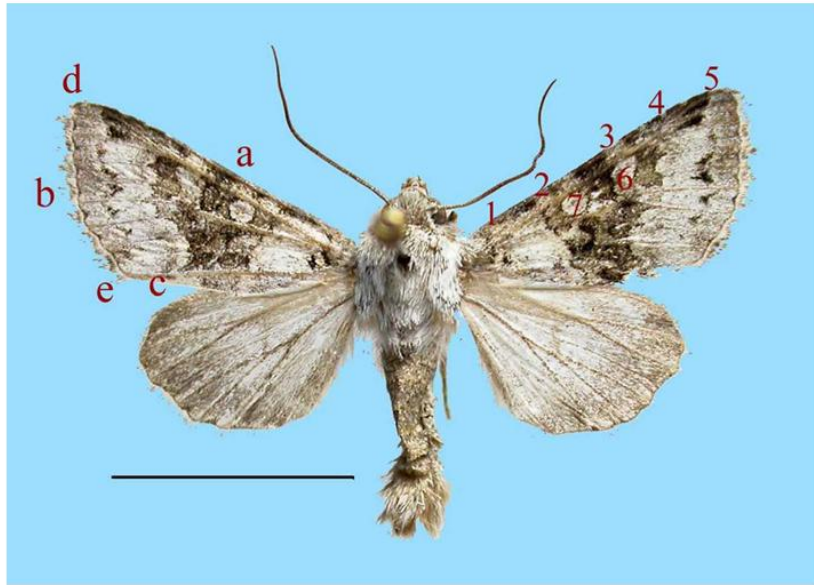


图 1B 成虫外部形态 两色延夜蛾 *Hecatera bicolorata* (Hufnagel, 1766)

a. 前缘(costal margin); b. 外缘(outer margin); c. 后缘(inner margin); d. 顶角(spex); e. 臀角(anal angle);

1. 基线(basal line); 2. 内横线(antemedial line); 3. 外横线(postmedial line); 4. 亚缘线(subterminal line);

5. 终缘(terminal line); 6. 肾形纹(reniform stigma); 7. 环形纹(orbicular stigma).

引自参考文献 5

1. 3. 课题研究背景

青藏高原的水热条件总体较差，生物量承载能力较低。根据《中国动物志》，该地区各种鳞翅目昆虫的丰度显著低于东部地区，而夜蛾科在此区域占据一定优势。然而，关于青海湖地区的资料相对缺乏，地理上较为接近的研究是马琪和权阳于 2012 年发表的《青海大学校园夜蛾科昆虫主要种类及消长规律分析》。该研究共记录了 9 科 53 种夜蛾科昆虫。由于青海大学附近的水热条件优于鸟岛，并且该研究是全年的综合性统计，而我们的调查仅为时间断面调查，因此推测我们的记录物种数量和多样性将显著低于该研究。

此外，一些对本研究具有重要参考价值的系统性文献还包括朱弘复等编著的《中国动物志夜蛾卷》和石河子大学冯博涛等的《新疆夜蛾分类研究》。

2 研究方法

2. 1. 灯诱捕获昆虫

灯诱，即灯光诱捕，是一种利用昆虫的正光性来收集昆虫样本的方法，本次实验采用白炽灯吸引昆虫，利用相机、手机等设备记录鳞翅目夜蛾科昆虫，同时制作昆虫标本。本次实

验选择鸟岛宾馆附近的较开阔地带（楼顶、院中）进行灯诱，在太阳完全落山至午夜时分进行诱捕，期间定时检查收集情况，记录数据并收集昆虫标本。

本次调查一共进行 5 次灯诱，分别是：

8 月 7 日，宾馆楼顶；阴转小雨，气温 10℃—19℃；

8 月 14 日，宾馆小院；小雨，气温 4℃—18℃；

8 月 16 日，宾馆小院；多云转小，气温 3℃—17℃；

8 月 17 日，宾馆楼顶；多云转晴，气温 3℃—17℃；

8 月 18 日，宾馆楼顶。晴，气温 6℃—19℃。

其中，8 月 7 日到 8 月 16 日的数据为鉴种的原始数据，8 月 18 日的数据为多样性统计的原始数据。

2.2. 标本制作

针对鳞翅目昆虫，我们采用展翅制作的方法，首先将昆虫固定于展翅板上，然后用透明薄纸（如硫酸纸）覆盖翅面，沿翅缘用昆虫针固定，注意昆虫针的选择和使用，以及标本的整姿，确保翅膀展开平整，触角和腿部位置自然，最后将固定好的标本放置在通风干燥处，经过一段时间（通常需要一周或更长时间）晾干，待标本完全干燥后，加上标签，记录采集时间、地点和采集人等信息。

受限于当地条件，下图展示了我们使用塑料袋暂时替代硫酸纸进行展翅的过程，效果基本与硫酸纸一致。



图 2 标本制作过程展示

2.3 物种鉴定

本次调查在物种鉴定方面遇到了一些困难。由于缺乏体视镜等关键仪器，队员的专业知识也相对有限，我们难以观察到生殖器等关键特征，因此无法使用《中国动物志》的检索表进行查询。

青海地区缺乏本地夜蛾图鉴，我们主要依赖于中国其他地区的图志，如《北京灯下蛾类图谱》，进行物种遍历。我们根据发现的未知样本前翅纹路与已知物种的相似性，反推其属或亚科，然后在该分类层次下进行进一步的遍历。然而，这种方法在效率、准确性和可重复性方面都存在明显不足。

在我们鉴定的物种中，有一半得到了@刘大鸭蛋的帮助。前辈给予了我们严谨的查证和真诚的建议，在此特别表示感谢。

2.4 频度统计

在前几次预实验中，我们收集了标本并进行了物种鉴定，编制了初步的物种图鉴。随后，在正式统计实验中，我们依照物种图鉴识别灯诱器周围的夜蛾，并统计每个物种的出现频度。

该实验计划的主要挑战在于估算所需进行的预实验次数。为了确保统计的顺利进行，我们需要尽可能避免在频度统计期间发现无法识别的新记录种。

根据种-面积曲线（图 1），随着样本数量的增加，曲线的斜率即记录新种的速度会逐渐下降，并最终接近于 0。我们进行多次灯诱的过程可以视作在植物群落中扩大记录的面积。因此，理论上只要预实验中新种的发现逐渐停止，物种图鉴就可以认为已经相对完善，从而可以开始频度统计。

根据实际情况（图 3），在第 4 次灯诱时，我们的物种图鉴已经较为完善，因此我们在第 5 次灯诱中进行了频度统计。

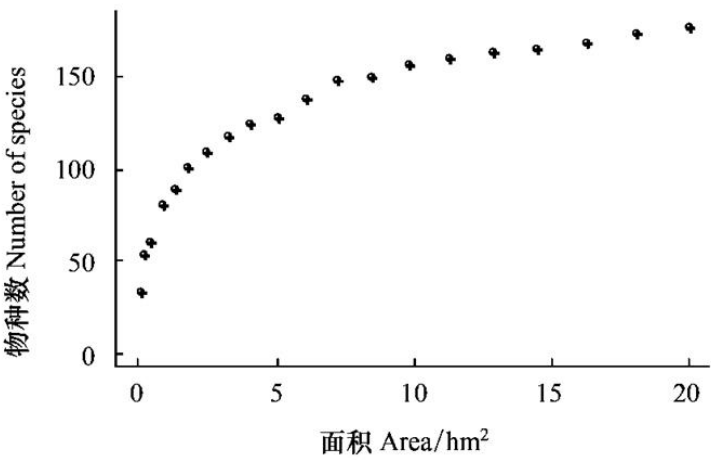


图 3 种-面积曲线

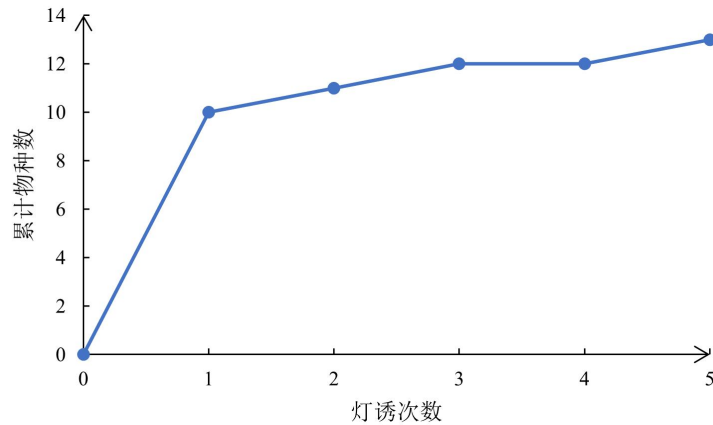


图 4 累计夜蛾物种数-灯诱次数曲线

2.5 多样性指数

以捕获的鳞翅目夜蛾科昆虫粗略分类（分类未定具体种）估算样地多样性指数。使用下列公式进行估算：

2.5.1 辛普森多样性指数

辛普森多样性指数的数学含义是在一个无限大小的群落中，随机抽取两个个体属于同一物种的概率。公式表示为：

$$\begin{aligned} \text{辛普森指数 (D)} &= \text{随机取样的两个个体属于不同种的概率} \\ &= 1 - \text{随机取样的两个个体属于同种的概率} \end{aligned}$$

即：

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 = 1 - \sum_{i=1}^S (N_i/N)^2$$

N_i ——种 i 的个体数

N ——群落中全部物种的个体数

S ——物种数目

P_i ——种 i 的个体数占群落中总个体的比例

辛普森指数的值范围从 0 到 1，值越接近 1，表示群落的多样性越高，物种分布越均匀；值越接近 0，表示群落的多样性越低，可能由少数物种主导。

2.5.2 香农-威纳指数

香农-威纳指数 (H) 是用来描述种的个体出现的紊乱和不确定性，理论值范围从 0 到无穷大，但在实际应用中，值通常在 1 到 4 之间。较低的值（接近 0）表明群落中存在一个或少数几个非常丰富的物种，即多样性较低，较高的值（接近 4 或更高）表明群落中物种丰

富度较高且分布相对均匀。

公式表示为：

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

S——物种数目

P_i——种 i 的个体数占群落中总个体的比例

3 调研成果

3.1 物种图鉴

我们根据前四次灯诱的记录，将出现过的所有物种分为常见种和偶见种：常见种为 4 次灯诱中全部出现的物种，以数字编号；偶见种是 4 次灯诱中没有全部出现的物种，以字母编号。（图 5）

已发现的物种分属于 6 个亚科，物种数本身并没有很强的集中趋势。（图 6）

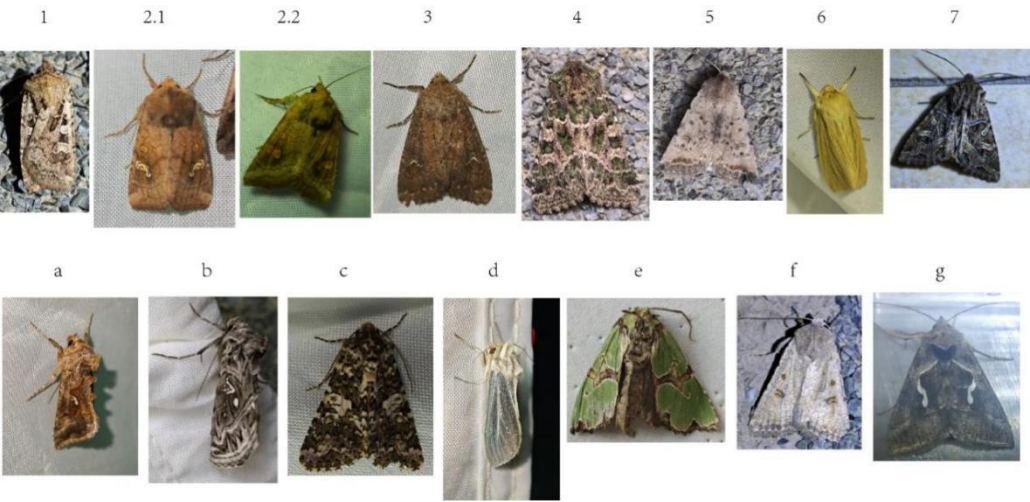


图 5 鸟岛灯下夜蛾图鉴

1. *Euxoa ochrogaster* 岛切夜蛾；2.1. *Amphipoea burrowsi* 波兔夜蛾；
2.2. *Amphipoea asiatica* 亚兔夜蛾；3. *Apamea lateritia* 荒秀夜蛾；4. 未定种 4；
5. *Caradrina clavipalpis* 穗逸夜蛾；6. *Mythimna pallens* 白脉黑点夜蛾；7. 未定种 7；
a. *Autographa bureatica* 博丫纹夜蛾；b. *Panchrysia ornate* 银艳钩夜蛾；
c. *Hadena dealbata* 齿斑盗夜蛾；d. *Argyromata splendida* 银装冬夜蛾；
e. *Staurophora celsia* 干纹夜蛾；f. *Caradrina montana* 蒙逸夜蛾；
g. *Macdunnoughia confusa* 瘦银锭夜蛾

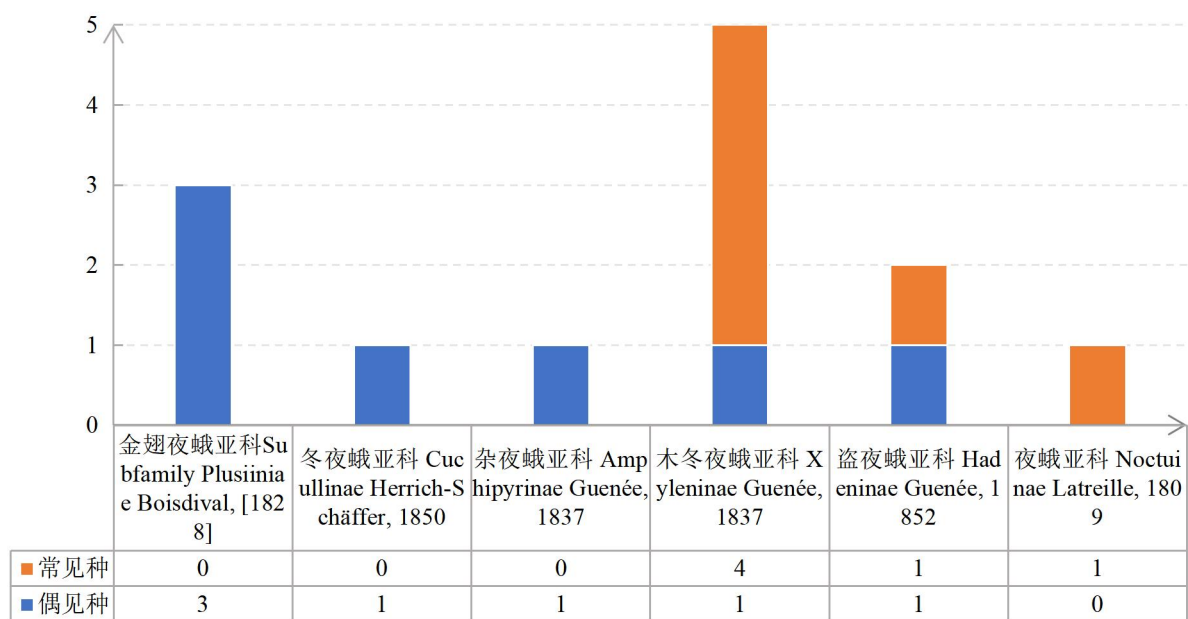


图 6 夜蛾科各个亚科物种数统计

蓝色代表偶见种，橙色代表常见种

3.2 多样性分析

根据计算，灯幕区域的辛普森指数为 0.34295，地面区域的辛普森指数为 $D=0.64573$ 。总体的辛普森指数为 $D=0.45776$ ；灯幕区域的香农-威纳指数为 0.66696，地面区域的香农-威纳指数为 $H=1.51558$ ，总体的香农-威纳指数为 $H=1.08334$ 。

两组数据均表明这两个群落的多样性处于中等水平。这意味着群落中虽然存在一定数量的物种，但某些物种的丰度可能远高于其他物种。显然，灯幕区域的物种丰富度不及地面区域。可以看到，物种 1（岛切夜蛾）在灯幕区域和地面区域均占据主导地位。

表 1 灯幕和地面的夜蛾科各物种数量统计

采集区域	1	2	3	4	5	6	7	a	b	c	d	e	f	g	总计
灯幕	59	10	4	1											74
地面	21	5	2	2	1	1	2					2		1	37
总计	80	15	6	3	1	1	2	0	0	0	0	2	0	1	111

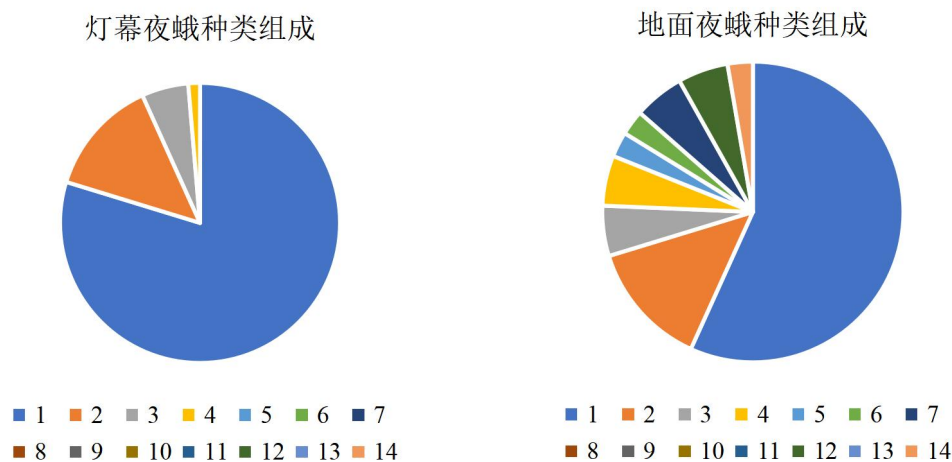


图7 灯幕和地面的夜蛾科物种组成

4 总结

本次研究系统地收集了鸟岛宾馆 8 月期间灯下夜蛾科昆虫的物种频度数据,并通过灯诱次数-累计物种数曲线(见图 3)进行预测。结果显示,在该时期,灯诱能够捕获的夜蛾种类约为 20 种。考虑到夜蛾科是当地灯下最常见的昆虫,这一发现在一定程度上反映了该地区生态脆弱以及昆虫多样性较低的问题。

对比灯幕和地面的辛普森指数以及香农-威纳指数,可以发现绝对单一优势种的存在对生物多样性的评估有显著影响。灯幕中岛切夜蛾的占比约为 79.7%,而地面上则为约 56.8%。因此,地面的夜蛾科昆虫多样性明显高于灯幕。这一结果直观地反映了单一优势种对生物多样性的负面影响。

根据《北京灯下夜蛾图谱》,在本次收集的 12 种已鉴定夜蛾中,9 种在北京也有分布。这表明,对于夜蛾科昆虫而言,它们在高原的适应性更多体现在广布种的宽生态阈,而非特有种的高原特化。鸟岛的驻地海拔约为 3300 米,我们推测特有种的比例可能会随着海拔的升高而逐渐增加。

根据《青海大学校园夜蛾科昆虫主要种类及消长规律分析》,青海大学校园内全年分布的夜蛾大约有 9 个亚科、53 种,远超过我们在鸟岛统计到的 6 个亚科、13 种。这可能与许多夜蛾种类的季节性活动有关。例如,根据马琪等人的研究,警纹地老虎(*Agrotis exclamationis* Linnaeus)主要在 7 月活动,因此在我们的 8 月份调查中不易捕获。因此,我

们估计鸟岛周边全年可以捕获的夜蛾种类将远远超过 20 种，但不会超过 50 种，因为青海大学的海拔为 2300 米，低于鸟岛约 1000 米，水热条件在较低海拔处能够支持更多的物种。

本次研究最大的不足是除了第一次灯诱以外夜蛾科昆虫数量过少，没能采集到足够数量的样本。关于这个问题，我们提出三个假说，仅供参考。

1. 季节的更替：高原的夏季相对短暂，第一次和第二次灯诱之间间隔 7 天，但气候可能已经发生了明显改变。最直接的证据是，在第一次灯诱中完全没有发现石蛾，而在第二次灯诱中发现了 2 只，第五次则有 41 只石蛾。石蛾的数量从未出现到爆发的变化，充分说明了夜蛾数量快速下降所需的时间是足够的。

2. 气温下降：灯诱时间均在夜间，此时气温通常处于一天中的最低点。第一次灯诱时的温度显著高于后续灯诱的温度。这可能为地面夜蛾多样性较高提供了另一种解释：我们的灯光持续开启二至四个小时，只有在夜间低温下仍能保持活跃的蛾子才能被吸引到灯幕上，而在低温下无法长时间活动的蛾子则会落地。如果岛切夜蛾恰好具有较强的耐寒能力，那么上述现象就可以合理解释。这也包括了它为何成为灯下的绝对优势种，可能并不是因为其基数大，而是因为它在低温下的活动能力更强，从而在我们的统计中出现得更为频繁。

3. 第一次灯诱时捕获的夜蛾科昆虫数量过多，导致周围夜蛾科昆虫种群数量急剧下降。然而，这种说法的可能性不大。根据《中国动物志》，夜蛾成虫的寿命大约为 4 至 20 天，因此在第一次采集后的一周内，我们捕获的成虫中有一半是第一次采集后羽化的。因此，第一次采集造成的影响无法解释第二次灯诱开始时收集数量的剧烈下降。

因此，我们的结论更倾向于前两者的结合：即鸟岛驻地的夜间低温对灯诱的捕获效果有显著影响，同时当地夏季短暂，物候变化迅速。这一思考为后续考察提供了新的思路：在为期两周的实践期间，可以尝试对某些物种进行物候记录，以期在时间尺度上获得一些有趣的结论。

参考文献

- [1] 陈一心.中国经济昆虫志，夜蛾科（四）[M].北京:科学出版社.1985.
- [2] 陈一心.中国动物志，第十六卷：夜蛾科[M].北京:科学出版社.1999.
- [3] 丁建云,张建华.北京灯下蛾类图谱.北京:中国农业出版社.2016.
- [4] 马琪,权阳.青海大学校园夜蛾科昆虫主要种类及消长规律分[J].青海大学学报（自然科学版）,2012
- [5] 冯博涛.新疆夜蛾科（Noctuidae）分类学研究[D].石河子大学,2019.
- [6] Fibiger, M. and J. D. Lafontaine. A review of higher classification of the Noctuoidea（Lepidoptera） with

special reference to the Holarctic Fauna. Esperiana, 2005, 11: 7- 92