

2025 年清华大学学生暑假社会实践支队总结报告

“鸟岛与少年”生态调研报告¹

青海湖环湖地区蝶类多样性及其与植被分布的相关性研究²

内容摘要：本研究于 2025 年 8 月在青海湖环湖地区选取 10 个典型样地，通过样方调查法记录了植物群落的组成及其重要值，并对蝶类群落进行了目击调查。利用 Spearman 秩相关分析和冗余分析（RDA）等方法，探讨了蝶类物种分布与植物物种分布之间的关系。结果表明：（1）共记录蝶类 10 种，隶属于 5 科；（2）植物群落以禾本科、莎草科、菊科和豆科为主，体现了高寒草甸的典型特征；（3）统计分析揭示了多种蝶类与特定植物存在显著的正相关关系（ $p < 0.1$, FDR 校正后），例如异点蛇眼蝶与紫大麦草（ $p = 0.98, p < 0.001$ ）、橙黄豆粉蝶与青海苜蓿（ $p = 0.81, p = 0.004$ ）等，这些植物极有可能是其幼虫的寄主植物或成虫的蜜源植物。本研究为理解青海湖高寒生态系统昆虫-植物相互作用关系提供了方法，并对该地区的生物多样性保护具有指导意义。

关键词：青海湖；蝶类多样性；植被群落；相关性分析；寄主植物；生物指示种

一、引言

青海湖作为中国最大的内陆咸水湖，其环湖地区是典型的高寒生态系统，拥有独特而脆弱的生物多样性，是研究物种对环境适应和种间关系的天然实验室。蝶类作为生态系统中的重要指示生物，其种群动态和分布与植被结构、气候变化和人类干扰密切相关。它们的生活史（尤其是幼虫期）高度依赖特定寄主植物，而成虫期又需要蜜源植物补充营养，因此其群落构成是环境变化的敏感指标。

然而，既往关于青海湖地区生物多样性的研究多集中于鸟类或大型哺乳动物，针对昆虫的研究相对薄弱，尤其缺乏对蝶类-植物相互关系定量化的生态学研究。明确蝶类与植物之间的特异性关联，是理解该生态系统功能、评估其健康状况以及制定有针对性保护策略的关键前提。

本研究旨在填补这一空白，通过详实的野外群落生态学调查和严谨的数量生态学分析，达成以下目标：

1. 查明青海湖环湖地区典型生境中的蝶类与植物群落组成特征。
2. 定量分析蝶类物种分布与植物物种分布之间的相关性，筛选出显著的正相关组合。
3. 结合已有知识和亲缘关系，科学推断关键蝶种的潜在寄主植物或蜜源植物，为后续深入研究和高原生物多样性保护提供基础数据与理论依据。

1 本文作者：“鸟岛与少年”赴青海湖鸟岛实践支队

2 报告执笔人：李哲夫（清华大学生命科学学院 2024 级本科生）

二、研究方法

（一）研究区域与样地设置

研究区域环绕青海湖，平均海拔约 3200 米，属高原大陆性气候。根据生境异质性，我们于 2025 年 8 月设置了 10 个代表性样地。样地类型涵盖了湖东种羊场附近的沙地、小泊湖湿地、克图地区的沙漠-草地过渡带、甘子河湿地以及高寒草原等，以期最大程度地捕获环湖地区的环境梯度与生物多样性谱。

表 1 环湖调查样地信息

编号	观测时间	样地地点	生境类型
1	8.8 上午	湖东种羊场东	沙地
2	8.8 上午	小泊湖	湿地
3	8.8 下午	克图	沙草过渡
4	8.9 上午	甘子河褰褰湖	湿地
5	8.9 上午	甘子河口湿地	湿地
6	8.9 上午	甘子河	草原
7	8.10 上午	黑马河景区	草原
8	8.10 下午	布哈河流域	牧场
9	8.11 上午	措琼纳陇湿地	牧场
10	8.11 下午	圣泉湾景区	草原



图 1 环湖调查样地地图

（二）数据收集

1. 植被调查

在每个样地内设置多个 1m×1m 的草本样方，记录所有植物的物种名、盖度、高度和密度，并计算每个物种的相对重要值（Important Value, IV）作为其在群落中地位的量化指标。

$$IV = \text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}$$

2. 蝶类调查

在植被调查期间，由固定人员在样地及其周边约 100m 范围内进行 1 小时的蝶类目击计数。采用“目击次数”作为蝶类数量的指标，并假定所有样地的目击努力量是均匀的。对无法当场识别的个体进行拍照后鉴定。

（三）数据收集

1. 构建矩阵文件

构建植物物种重要值矩阵（样地×物种）和蝶类数量矩阵（样地×物种）。

表 2 植被矩阵（部分）

样地\重要值\物种	华扁穗草	早熟禾	鸡冠茶	扁囊薹草	垂穗披碱草	海乳草	寸草	薹草
1		0.2093						
2	0.2452	0.1796				1.0671		
3		0.5165	0.2521					0.0683
4	1.7419	0.1851						
5	0.2848	0.2131		1.4016				
6		0.2732					0.6559	
7			0.9461					
8		0.6154			0.0838	0.1163		
9					0.2354			1.0497
10		0.0322	0.3822		1.0436		0.4995	0.0345

表 3 蝶类矩阵

样地\目击数\物种	牧女珍眼蝶	仁眼蝶	异点蛇眼蝶	西藏尊麻蛱蝶	曲斑珠蛱蝶	云粉蝶	橙黄豆粉蝶	红珠灰蝶	多眼灰蝶	婀灰蝶
1	1							15		
2	11		3				1			2
3	9			1	2			6		
4	2		1							

5	1						
6				9			
7					1	1	
8	9						7
9	9		23		1	4	5
10	17	5	12		1	2	17

2. 相关性分析

为量化每种蝶类与每种植物在分布上的单调关联强度,我们采用 Spearman 秩相关分析。该方法不假设数据服从正态分布,且对异常值不敏感,非常适合生态计数数据。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

其中:

ρ 为 Spearman 秩相关系数,取值范围为 $[-1,1]$;

d_i 为第 i 个样地中蝶类数量(或重要值)的秩次与植物重要值的秩次之差;

n 为有效样地数量(即蝶类与植物共同出现的样地数)。

我们对所有蝶类-植物对进行了逐一计算。鉴于进行了多重比较(Multiple Comparisons),为控制错误发现率(False Discovery Rate, FDR),我们使用 Benjamini-Hochberg 方法对得到的原始 p 值进行了校正。最终保留 FDR 校正后的 $q\text{-value} < 0.1$ 的显著相关关系进行后续解释。

3. 排序分析

使用冗余分析(RDA)可视化蝶类群落整体与植物群落环境之间的关系。分析前采用除趋势对应分析(DCA)判断梯度长度 < 3.0 ,决定使用多元线性回归模型(RDA):

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XB} + \mathbf{E}$$

其中:

\mathbf{Y} 是 $n \cdot p$ 的响应变量矩阵(蝶类物种多度矩阵, n 为样地数, p 为蝶类物种数);

\mathbf{X} 是 $n \cdot m$ 的解释变量矩阵(植物物种重要值矩阵, m 为植物物种数);

\mathbf{B} 是 $m \cdot p$ 的系数矩阵,包含每个解释变量对每个响应变量的回归系数。

\mathbf{E} 是 $n \cdot p$ 的残差矩阵。

RDA 的核心是通过回归拟合后,对拟合值矩阵 $\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{XB}$ 进行主成分分析(PCA),以在低维空间展示 \mathbf{Y} 中能被 \mathbf{X} 解释的那部分变异。其排序轴是解释变量 \mathbf{X} 的线性组合。

在分析前,我们使用除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)评估蝶类群落数据的梯度长度。DCA 第一轴梯度长度 < 3.0 ,表明蝶类群落更适用于基于线性模型的 RDA,而非基于单峰模型的典范对应分析(CCA)。

所有分析在 R 语言环境中完成,主要使用 `vegan`, `dplyr`, `Hmisc` 等包。

三、研究结论

（一）物种组成

调查共记录植物 91 种，优势科为禾本科（Poaceae）、莎草科（Cyperaceae）、菊科（Asteraceae）和豆科（Fabaceae），体现了高寒草甸与湿地生态系统的典型特征。共记录蝶类 10 种，隶属 3 科（灰蝶科、粉蝶科、蛱蝶科），其中眼蝶科和灰蝶科为优势类群。牧女珍眼蝶（*Hyponephele lycaon*）和红珠灰蝶（*Lycaena virgaureae*）为广布种，在超过 50% 的样地中出现。

（二）蝶类-植物相关性分析

Spearman 相关分析共计算了 910 个（10 蝶×91 植）物种对。经过 FDR 校正（ $q < 0.1$ ），我们发现了部分物种对存在显著的正相关关系。这些关系强烈暗示了潜在的生态联系，如取食或生境偏好。

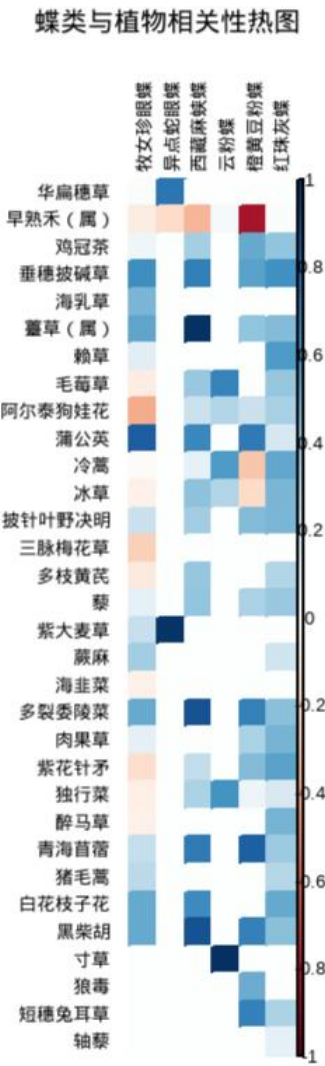


图 2 蝶类与植被相关性热图（蓝色表示正相关，红色表示负相关）

冗余分析（RDA）进一步从群落水平验证了上述关系。RDA 排序图显示，西藏荨麻蛱蝶的分布与藁草属（*Carex* spp.）植物的分布紧密关联。

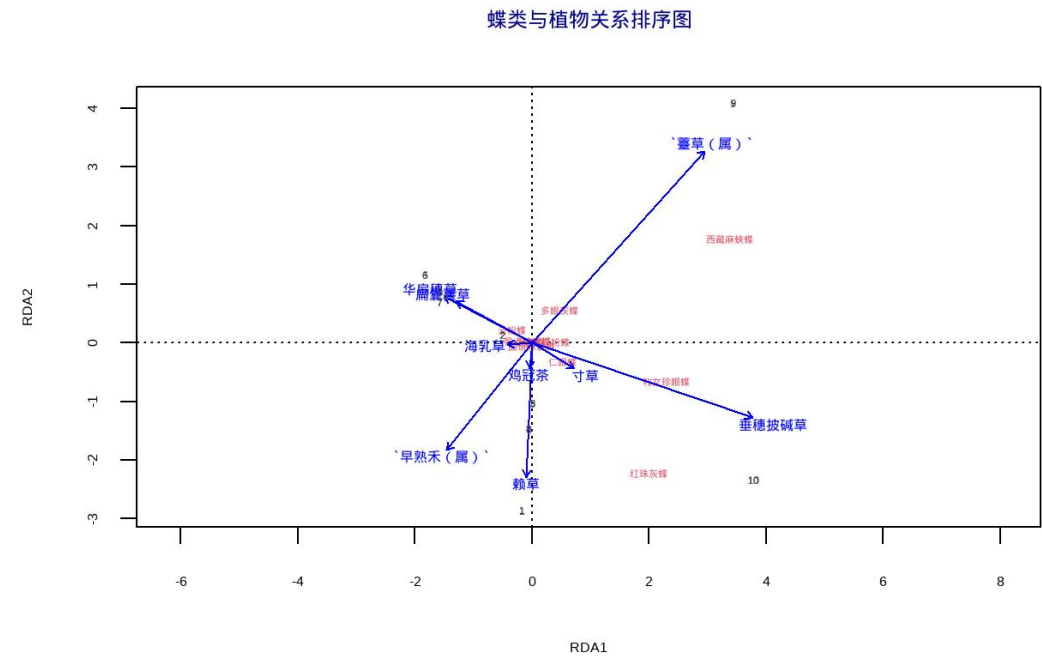


图 3 蝶类与植物关系排序图

很遗憾由于我们的观测时间较短，取样的广泛性弱，数据较为稀疏，可能会导致许多无意义的结果（如寸草不是十字花科植物，大概率并不是云粉蝶的寄主）。但令人兴奋的是，经过人工结合生态学知识的筛选，我们得到了一部分可能有意义的结果：

表 4 蝶类与植物正相关关系（部分）

蝶类	植物	Spearman's ρ	p-value
橙黄豆粉蝶	青海苜蓿	0.8106	0.004
云粉蝶	蚓果芥	0.7453	0.0133
异点蛇眼蝶	紫大麦草	0.9753	1.578e-06
牧女珍眼蝶	藁草（属）	0.5241	0.1199
西藏麻蛱蝶	藁草（属）	0.9817	4.851e-07
仁眼蝶	寸草	0.5797	0.0789
红珠灰蝶	垂穗披碱草	0.6078	0.0623
红珠灰蝶	披针叶野决明	0.4579	0.1833

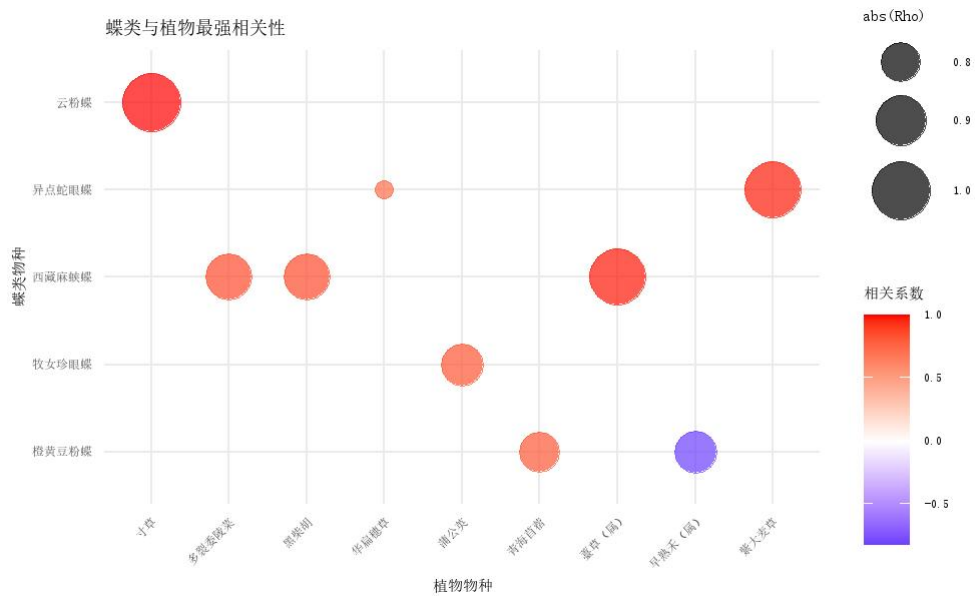


图 4 蝶类与植物较强的相关关系

四、总结与展望

本研究通过群落生态学调查与统计分析,初步揭示了青海湖环湖地区蝶类与植物间的特异性关联。主要结论表明:橙黄豆粉蝶的分布与青海苜蓿的分布、异点蛇眼蝶与紫大麦草的分布呈现极显著的正相关关系,强烈暗示这些植物可能是其关键的寄主或蜜源植物,体现了其对特定生境或营养资源的依赖。这些发现为理解高寒生态系统中的物种互作关系提供了新的证据。

尽管受限于样地数量与调查时间,统计效力存在一定局限,且相关性需通过直接观测(如幼虫取食)进一步验证,但本研究的定量分析结果已为区域生物多样性保护提供了明确、可操作的科学依据。蝶类作为敏感的生态指示类群,其生存状况直接反映了栖息地的健康程度。因此,保护其寄主和蜜源植物,就是保护蝶类多样性,进而维护整个高寒草甸生态系统的稳定与完整。