

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2021.50467

邓璐希, 唐莎莎, 邹婷婷, 杨聪, 吕森涛, 尚书禾, 汪小凡. 无人机影像用于监测湿地植物群落开花覆盖度[J]. 植物科学学报, 2021, 39(5): 467-475

Deng LX, Tang SS, Zou TT, Yang C, Lü ST, Shang SH, Wang XF. Application of UAV images in monitoring flowering coverage and insect visiting activities in wetland plant communities[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(5): 467-475

# 无人机影像用于监测湿地植物群落开花覆盖度 与昆虫访花活动

邓璐希, 唐莎莎, 邹婷婷, 杨聪, 吕森涛, 尚书禾, 汪小凡\*

(武汉大学生命科学学院, 武汉 430072)

**摘要:** 在群落水平的传粉生态学研究, 使用传统的调查方法对大尺度样地进行定量分析存在一定的局限性, 无人机遥感技术可能为此提供一种解决方案。为探讨无人机影像数据应用于群落水平传粉生物学的可行性, 本研究以神农架大九湖亚高山湿地草本植物群落为对象, 利用消费级无人机获取 4 个面积在 1600 ~ 3000 m<sup>2</sup> 的样地, 在不同季节的可见光影像数据, 借助 ContextCapture 软件拼接影像, 采用支持向量机 (SVM) 的分类方法计算不同颜色花的开花覆盖度, 并对 16 个 2 m × 2 m 样方中访花昆虫的活动进行了实地调查。数据分析结果显示: (1) 无人机影像中不同颜色的开花覆盖度与传粉者数量显著相关, 并呈指数关系; (2) 随着无人机飞行高度的增加, 开花覆盖度的观测值呈减小趋势; (3) 不同样地中, 单位开花面积上的传粉者数量差异不显著。本研究还探讨了通过无人机影像计算开花覆盖度从而监测研究区域的开花季相动态和估算传粉者数量的可行性。

**关键词:** 无人机可见光影像; 湿地群落; 开花覆盖度; 访花昆虫; 神农架大九湖

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2021)05-0467-09

## Application of UAV images in monitoring flowering coverage and insect visiting activities in wetland plant communities

Deng Lu-Xi, Tang Sha-Sha, Zou Ting-Ting, Yang Cong, Lü Sen-Tao,  
Shang Shu-He, Wang Xiao-Fan\*

(College of Life Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In studies on pollination ecology at the community level, the use of traditional survey methods for quantitative analysis of large-scale sample plots has certain technical limitations. Here, we explored the feasibility of applying unmanned aerial vehicle (UAV) image data to study pollination biology at the herbaceous plant community level in a subalpine wetland of Shennongjia Dajiuahu. The support vector machine (SVM) classification method was used to calculate flowering coverage of different-colored flowers based on UAV visible light images of four sites (1600 ~ 3000 m<sup>2</sup>) across different seasons, which were then combined using ContextCapture software. Combined with field surveys of flower-visiting insect activity within 16 quadrats (2 m × 2 m each), the results showed that: (1) Flowering coverage of different-colored flowers in the UAV images was significantly correlated with number of pollinators, showing an exponential relationship. (2) The observed value of flowering coverage showed a

收稿日期: 2021-03-10, 修回日期: 2021-04-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31970250); 国家标本平台教学标本子平台项目(<http://mnh.scu.edu.cn>)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (31970250) and Teaching Specimens Sub-platform of China (<http://mnh.scu.edu.cn>)。

作者简介: 邓璐希(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物交配系统与进化生态学(E-mail: 2018202040002@whu.edu.cn)。

\* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: wangxf@whu.edu.cn)。

decreasing trend with the increase in UAV flight altitude. (3) In the different sample plots, the number of pollinators within a unit flowering area showed no significant differences. We also explored the feasibility of calculating flowering coverage through UAV images to monitor flowering season dynamics in the study area and estimate the number of pollinators.

**Key words:** UAV visible light image; Wetland community; Flowering coverage; Flower-visiting insect; Shennongjia Dajiuhu

自然生态系统中的开花植物大部分需要动物作为传粉媒介, 在长期的进化过程中, 植物和昆虫形成了牢固的共存关系<sup>[1]</sup>。在植物群落中, 花的颜色对植物吸引传粉者起重要作用, 并可能影响传粉者与植物之间的相互作用<sup>[2]</sup>, 野生开花植物的数量、类群及花期与传粉者的访问频度密切相关<sup>[3]</sup>。在传粉生物学中, 传粉网络的构建和研究, 需要监测植物和传粉者之间的相互作用<sup>[4]</sup>。从群落水平研究植物与传粉者以及植物与植物之间的互作关系, 有利于阐明传粉者与植物之间的关系以及探讨传粉者在群落中的作用, 也是目前一个重要的研究趋势<sup>[5, 6]</sup>。然而, 随着研究区域和监测尺度的扩大, 在群落水平的传粉生态学研究, 通常需要长时间尺度和多空间尺度的工作, 人力与财力的消耗也随之增加<sup>[7]</sup>。同时, 传统群落传粉生态学研究也存在明显的局限性, 如调查者在选择样地或样方时具有较强的主观性, 野外复杂环境中存在着许多人力所不能及的区域等。

卫星和遥感技术能够提供大范围连续的空间和时间信息, 极大地提高了对地表检测的效率<sup>[8]</sup>。因此, 遥感技术在群落水平的传粉生态学研究具有广阔的应用前景。许多生态系统可以通过卫星遥感数据监测, 但无人机 (UAV) 具有更高的分辨率, 更低的运营成本, 以及更加灵活机动等优势, 且能够获取特定植被结构 (如植物的花)<sup>[9-12]</sup>。目前, 无人机拍摄的影像已成功用于区分不同入侵物种的花, 确定入侵植物的爆发地点<sup>[13, 14]</sup>。Christin 等<sup>[10]</sup>将花的密度与花蜜生产联系起来, 利用无人机提供的开花表面积和体积建立模型, 估计花朵数量以及所能提供的花蜜量。在研究传粉者的丰富度方面, Xavier 等<sup>[12]</sup>计算了无人机图像上的开花面积, 预测了传粉者的数量, 为增加农业景观多样性方法提供了依据。遥感工具已被广泛应用于绘制植被结构图、测量和监测生物多样性以及评估生境适宜性等领域<sup>[15-17]</sup>, 并进一步拓展到了野生动物监

测、病虫害监测、入侵或受威胁物种的分布等领域的监测<sup>[18-20]</sup>。然而, 与生态学其他领域相比, 将遥感数据用于传粉昆虫监测的研究较少, 且仅集中于害虫及其对农作物或森林的影响方面<sup>[21, 22]</sup>。将遥感技术应用于研究自然群落中植物的花与传粉者之间关系的案例还很少。

杜巍等<sup>[6]</sup>对神农架地区典型草本植物群落中昆虫访花活动进行了较为深入的研究。在此基础上, 本文选择神农架大九湖亚高山湿地为研究地点, 拟对包含实地调查不宜涉足斑块的草本植物群落样地采用无人机系统获取低空可见光影像, 结合访花昆虫活动的实地样方调查, 对无人机影像中提取的植物群落开花信息与地面实测数据进行分析, 旨在探讨不同尺度上开花覆盖度与访花者的关系, 并对不同物种组成和不同季相植物群落中访花昆虫的数量和类群进行初步预测。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域和样地设置

神农架大九湖国家湿地公园 (109°56' ~ 110°11'E, 31°34' ~ 31°33'N) 平均海拔 1700 m, 为亚高山沼泽型湿地, 属于亚高山寒温带潮湿气候<sup>[23]</sup>。年平均气温 7.2℃, 降水量 1528.3 mm。研究区域四周高山环绕, 盆地中央分布着沼泽、草甸, 6-8 月份开花的优势草本植物有湖北老鹳草 (*Geranium rosthornii* R. Knuth)、扭旋马先蒿 (*Pedicularis torta* Maxim.)、湖北旋覆花 (*Inula hupehensis* (Ling) Ling)、黄腺香青 (*Anaphalis aureopunctata* Lingelsh. et Borza)、光叶粉花绣线菊 (*Spiraea japonica* var. *fortunei* (Planch.) Rehd.)、一年蓬 (*Erigeron annuus* (L.) Pers.) 等。

本研究选择大九湖国家湿地公园内 4 个样地进行调查, 样地分布于湿地周围, 大小在 1600 ~ 3000 m<sup>2</sup> 之间。每个样地内放置 4 个 2 m × 2 m 的铝制样方框。

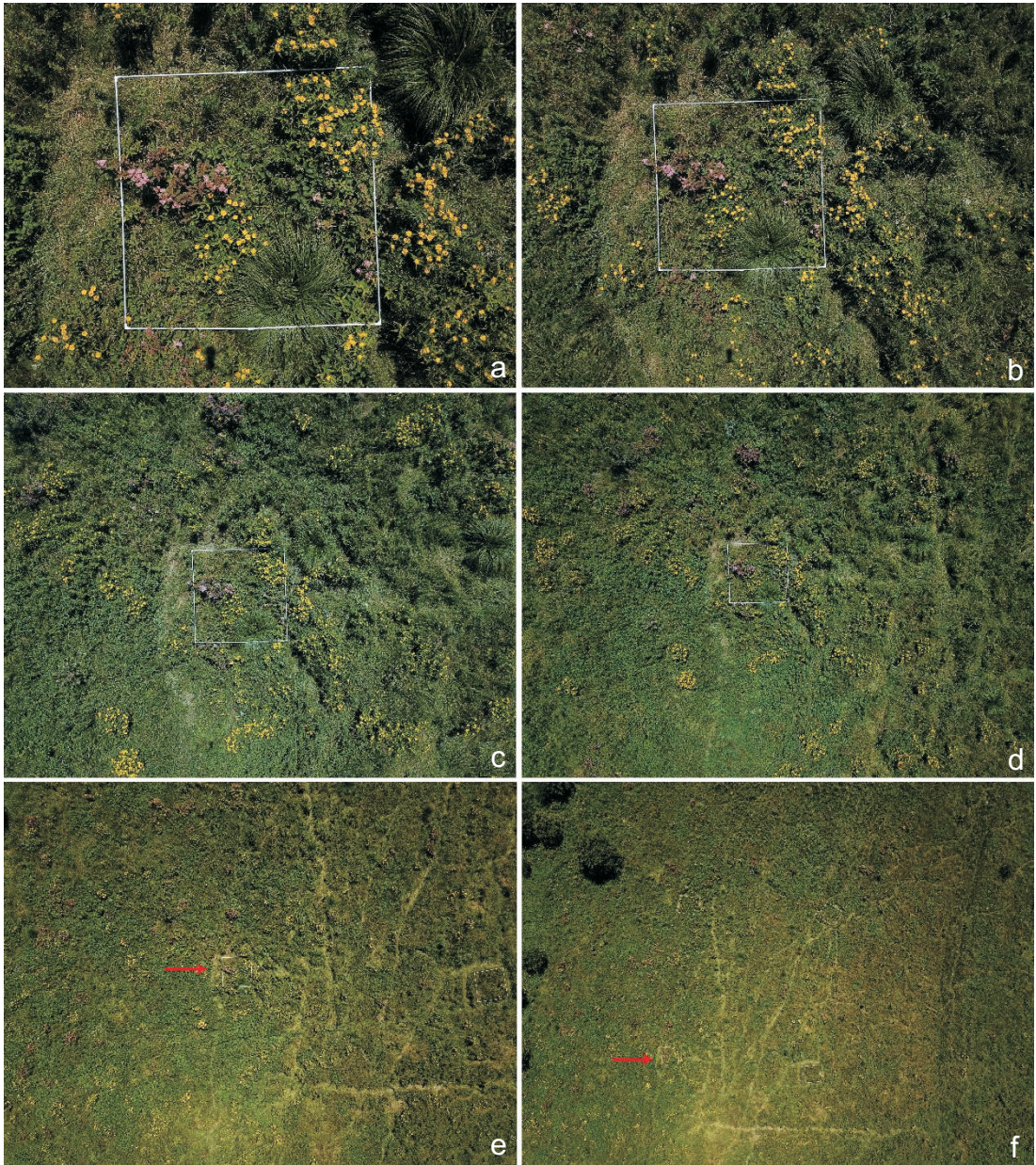


1.2 无人机图像采集

采用大疆无人机 ( DJI MAVIC PRO ) 获取研究区域图像，无人机搭载的相机中影像传感器是 1/2.3 英寸 CMOS，有效像素为 1235 万。拍摄时镜头垂直向下，所得图像具有红、绿、蓝 3 个波段信息，图像大小为 4000 像元 × 3000 像元。无人机影像拍摄时间为 2020 年 6 – 8 月的月底，每日的 9 : 00 – 16 : 00，选择晴朗无风或微风的天气进行。由于本研究中关注使用有限的无人机影像数

据与野外测量的生态数据的关系，所以对获取的影像没有进行严格的辐射定标<sup>[12]</sup>。

样地影像采集：于 15 m 高度处获取草甸连续的可见光影像数据，采用 DJI GS pro 地面站规划无人机飞行航线，设定航向重叠率为 75%，旁向重叠率为 80%，间隔时间为 1 s 的等时间间隔拍摄。对每个样地上的样方框拍摄 5、10、15、20、30、50 m 高度的单幅影像，下文将样方框对应的 5 ~ 50 m 高度影像范围称为一个样块(图 1：a ~ f)。



a ~ f 分别为 5、10、15、20、30 和 50 m 高度的无人机影像。红色箭头所指为样方框。  
a – f represent 5, 10, 15, 20, 30, and 50 m UAV images, respectively. Red arrow indicates quadrat.

图 1 不同飞行高度无人机影像  
Fig. 1 UAV images at different flying heights



1.3 植物群落和访花昆虫实地调查

在对每个样地进行无人机拍摄的同一天内，调查和记录样地开花植物物种与开花数量<sup>[24]</sup>，测量花部直径以计算单位视觉面积，采集样地内的开花植物样本并利用光谱仪 (FLAME-S-UV-VIS) 进行光谱测量。凭证标本存放于武汉大学植物标本馆(WH)。

在当天的 9：00 – 16：00 进行定时观察样地中的访花昆虫，每个样方监测 15 min，记录每一种开花植物的访花昆虫数量、类群和来访次数。凡接触过花的生殖器官的昆虫均被认为是访花昆虫，在观察记录后采集待鉴定的昆虫标本。

1.4 数据处理

利用 ENVI 5.1 软件对无人机影像中的信息进行分类处理，采用基于支持向量机(SVM)的监督分类方法来生成黄花、白花、紫花以及非花区域的分类图。计算图像中每种颜色的视觉盖度、开花覆盖度和开花面积，公式如下<sup>[22]</sup>：

开花覆盖度  $C = \frac{N_{\text{开花像素}}}{N_{\text{总像素}}} \times 100\%$ ;

视觉盖度  $C' = (\text{单位视觉面积} \times \text{开花数量}) / \text{样方面积}$ ;

开花面积  $S = \text{开花覆盖度} \times \text{面积}$ ;

式中  $N_{\text{开花像素}}$  和  $N_{\text{总像素}}$  表示分类图中开花像素数和无人机影像中的像素总数，视觉盖度  $C'$  为人的实地视觉观测盖度。

在样方分析中，将样方正上方影像裁剪到与样

方框相同的边界后进行分类(图 2)。样地分析中，首先采用 ContextCapture 软件对获取的影像进行拼接，生成正射影像后再进行分类。对不同高度的单幅样块影像则直接进行分类分析。

所有数据均采用 SAS 9.4 软件进行统计分析，采用 Origin 8.0 软件作图；无人机影像分析采用 ENVI 5.3、ArgMap10.2 和 ContextCapture 4.4.9 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 群落中花的颜色

获取的地物光谱数据在噪声剔除和平滑处理后得到了可见光波长范围内的光谱反射率曲线(图 3)。据此，将湖北老鹳草、红车轴草 (*Trifolium pratense* L.) 的花等定义为紫色花，将湖北旋覆花、贯叶连翘 (*Hypericum perforatum* L.) 等的花定义为黄色花，将黄腺香青、一年蓬等的花定义为白色花。

2.2 基于无人机影像分析的开花覆盖度及其月度变化

选取 5 个开花样块分别进行监督分类，计算单幅图像的开花覆盖度。结果显示，随着高度的增加，拍摄范围的扩大，开花覆盖度有不同程度的下降(图 4)。样块 1 与样块 4 实地的开花呈簇状分布，随着高度的增加，其开花覆盖度呈下降趋势；样块 2 在 20 ~ 30 m 的高度有小幅度增加，随后



a：无人机单幅影像；b：裁剪后的样方框；c：分类结果图。黄色代表黄花，紫色代表紫花，黑色代表非花区域。  
a: UAV image; b: Quadrat image; c: Classification image. Yellow represents yellow flowers, purple represents purple flowers, black represents non-flowering area.

图 2 样方影像分类  
Fig. 2 Image classification diagram

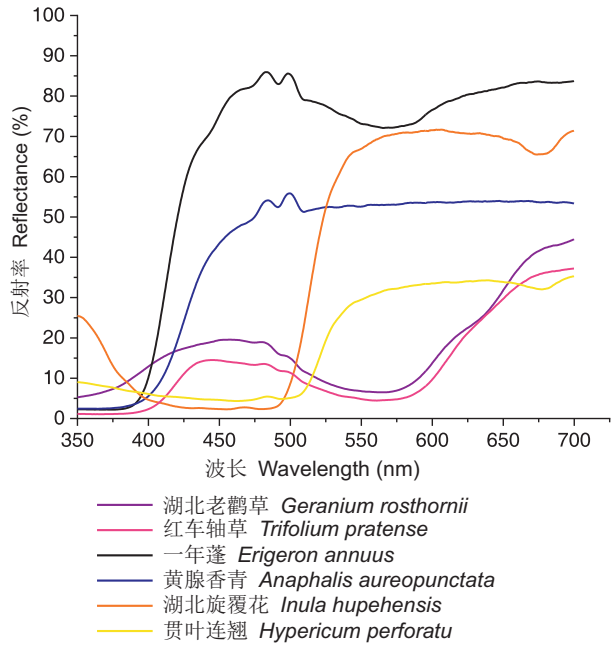


图3 6种主要开花植物花朵光谱曲线  
Fig. 3 Flower spectrum curves of six main flowering plants

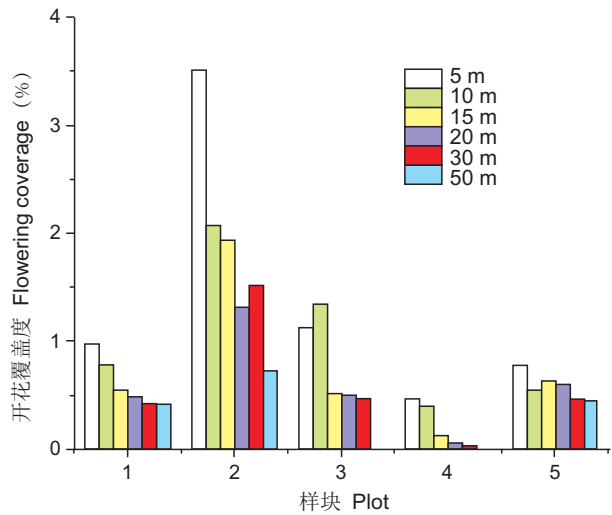


图4 不同飞行高度的单幅无人机影像开花覆盖度的变化  
Fig. 4 Changes in flowering coverage of UAV images at different heights

减小；样块3在升高到10 m高度后开花覆盖度先下降后保持平稳；样块5由于其开花植物分布比较均匀且密集，开花覆盖度下降幅度较小。其中样块3和样块4由于花朵较小，上升到50 m高度后无人机影像难以辨认开花情况，开花覆盖度为0。

计算每个样地的样方框内开花的视觉盖度以及样方框内不同高度的影像开花覆盖度，建立线性关系(图5)，0 m高度处为人的视觉盖度。随着高度

的升高，影像开花覆盖度呈线性减少。样地1、2、4的斜率大致相同，样地3随着高度的增加，开花覆盖度的下降趋势较为平缓。样地3的优势开花植物为香青，香青的视觉单位面积较小，花序排列紧密，分布均匀，于30 m高度拍摄的影像中其颜色白色仍然可分辨，相对来说变化较小。根据斜率修正15 m高度的视觉盖度(表1)：样地1~4的视觉盖度在15 m高度的估计值分别为5.52%、7.37%、13.12%和4.69%；无人机在15 m高度拍摄样地1~4的整体开花覆盖度为：4.32%、5.66%、12.48%和3.57%。总体来说，视觉盖度与开花覆盖度相比偏大。

在不同月度对4个样地进行了拍摄，拼接影像后计算整个样地的开花覆盖度(图6)，6~8月大九湖4块样地总体开花覆盖度呈先增大后减小的趋势。6月开花最少，总开花覆盖度仅为0.46%，7月达到盛花期，覆盖度为6.80%，8月有所下降，覆盖度为5.16%。而不同的样地在不同月份均有所变化，样地1在7月份开花覆盖度达到最大，样地2的开花覆盖度在7月和8月较稳定，样地3的开花覆盖率在8月达到最大，样地4的开花覆盖率在7月达到最大。

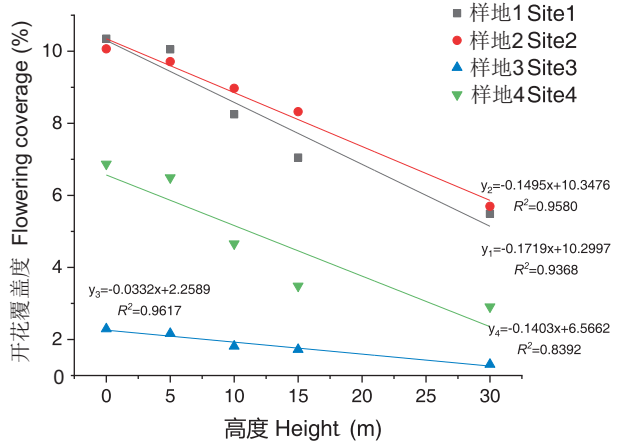


图5 不同样地开花覆盖度随高度的变化趋势  
Fig. 5 Flowering coverage trend with height in different sites

2.3 基于无人机影像分析的开花与访花昆虫的关系

如图7所示，根据颜色分类统计开花覆盖度(N = 33)，结果显示其与访花昆虫数量之间存在显著相关性(P < 0.01)，并且与昆虫数量呈幂指相关(R<sup>2</sup> = 0.678)，随着开花面积的增大，昆虫数量增多。根据样方框的面积(2 m × 2 m)，结合样方

表 1 研究区域开花覆盖度及访花昆虫数量预测  
Table 1 Flowering coverage and prediction of number of visiting insects in study area

样地 Site	样地面积 Area (m <sup>2</sup> )	视觉盖度 C (%)	15 m 影像开花覆盖度 C' (%)	修正的视觉盖度 C* (%)	访花昆虫数量预测值 N
1	2540	10.3483	4.3232	5.5194	1093
2	1720	10.0671	5.6568	7.3744	1110
3	2672	2.2939	12.4801	13.1158	5557
4	2151	6.8705	3.5723	4.6890	704

注：C，视觉盖度；C'，15 m 影像开花覆盖率；C\*，15 m 高度处的修正视觉盖度；N，访花昆虫数量。  
Notes: C, Visual coverage; C', Flowering coverage at 15 m; C\*, Corrected visual coverage at 15 m; N, Number of visitor insects.

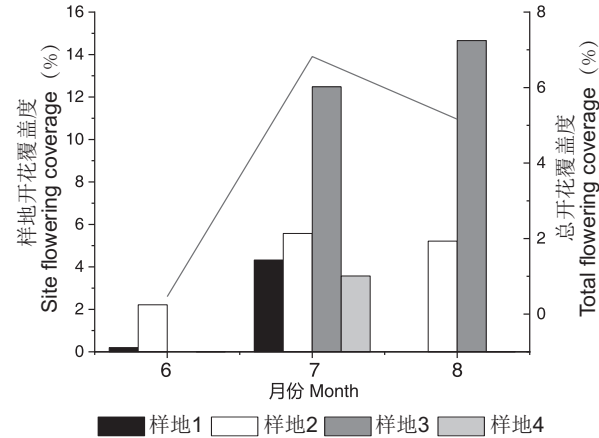


图 6 开花覆盖度的季相变化  
Fig. 6 Seasonal changes in flowering coverage

内的开花覆盖度计算出开花面积(根据 1.4 中公式)，分析单位面积上的昆虫数量与不同开花颜色的差异性，结果发现不同颜色的花在单位开花面积的昆虫数量上并无差异。

结合实地调查的数据统计分析(图 8)，紫色花(N = 12)的访花昆虫数量最少，不同颜色的花在访花昆虫数量上有显著差异(P = 0.037)，其中紫色花与黄色花(N = 10)的访花昆虫数量有显著差

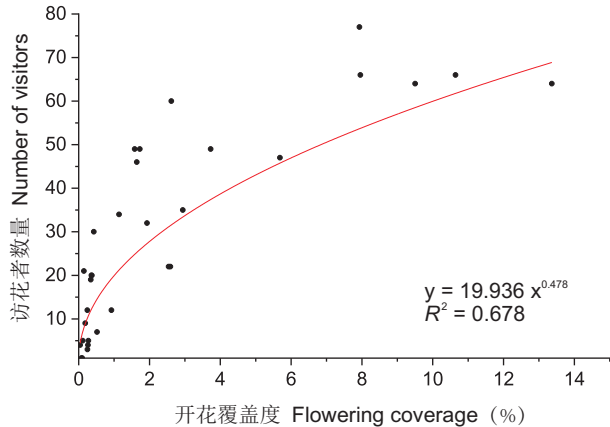
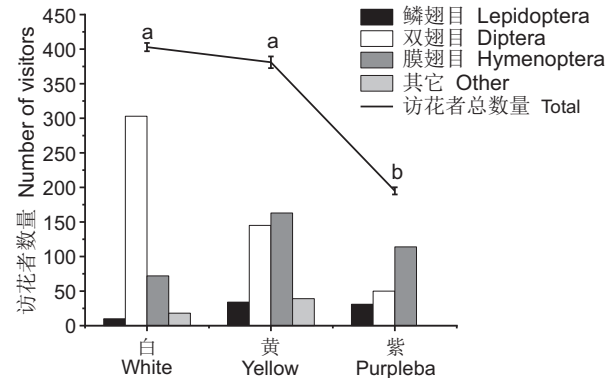


图 7 无人机影像中开花覆盖度与访花者的关系  
Fig. 7 Relationship between flowering coverage and visitors



不同小写字母代表在  $P < 0.05$  水平上差异显著。  
Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  level.

图 8 草本群落的不同开花颜色与访花者功能群的关系  
Fig. 8 Relationship between different flowering colors of herbaceous community and functional groups of visitors

异( $P = 0.023$ )，紫色花与白色花( $N = 11$ )的访花昆虫数量有显著差异( $P = 0.029$ )，黄色花与白色花的访花昆虫数量没有差异( $P = 0.877$ )。将观察记录的访花昆虫分为 4 个功能群，分别为双翅目、鳞翅目、膜翅目及其他，其中双翅目昆虫访问白花的数量最多，共 303 只，访问紫色花数量最多的昆虫类群为膜翅目，共 113 只。

2.4 研究区域访花者数量预测

结合 2.2 中单位面积上的昆虫数量在颜色之间无差异性的结果，以 7 月盛花期为例，根据线性拟合曲线公式(图 7)，结合样地面积推测本研究样地访花者数量公式：

$$N = \frac{19.936C^{0.478}}{4} \times S;$$

式中  $N$  为访花者数量， $C$  为开花覆盖度(%)， $S$  为开花面积( $m^2$ )。

各样地中访花者数量的预测结果见表 1。结合前文中不同颜色花的主要访花者分析可以推测，在 7 月时，样地 1 和样地 4 的优势花色为黄色，则其



访花者功能群主要为双翅目、鳞翅目和膜翅目等; 样地2和样地3的优势花色为白色, 则其访花者功能群主要为双翅目。

### 3 讨论

本研究探讨了将无人机可见光影像应用于群落水平传粉生态研究的可行性, 利用影像数据处理计算出样地的开花覆盖度, 结合实地调查数据分析开花覆盖度与访花昆虫之间的关系, 得出如下主要结论: (1) 随着无人机飞行高度的增加, 尽管开花覆盖度的观测值呈下降趋势, 但无人机影像能够监测较大范围的开花季相变化; (2) 无人机可见光影像可以实现对野外开放的花的初步分类, 能够计算出开花面积及覆盖度; (3) 在本研究的不同样地中, 不同颜色花的单位开花面积访花昆虫数量并无明显差异, 但不同颜色的开花覆盖度与传粉者数量显著相关, 根据无人机影像数据可以对大面积的草本植物群落进行访花昆虫数量及主要类群进行预测。

在处理无人机拍摄的开花影像时, 本研究使用的监督分类的支持向量机的分类方法对图像分类时达到了中到高等精度, Kappa 系数大于 0.93。此方法可以估算较大区域的开花覆盖度或开花面积, 并间接估算传粉者数量和主要类群, 但无法获取其他花部特征, 如花冠特征、花冠长度及花粉量等。消费级无人机在 15 m 以下的飞行高度拍摄的 RGB 影像中可以区分黄、白、紫 3 色, 但超过 15 m 后紫色与白色花朵较难区分, 部分较小的花朵在影像中甚至不可见。随着无人机高度的升高和覆盖面积的扩大, 其拍摄的物种多样性随之增加, 但部分花部较小的花会被背景色淹没, 消费级无人机影像存在局限性, Horton 等<sup>[25]</sup>用无人机拍摄多光谱影像能更精确地检测果树的开花, 利用搭载多光谱相机的无人机获取群落中开花状况的数据, 可能是一条更有效的途径。此外, 根据不同样地开花覆盖度随高度变化趋势的线性关系, 矫正的视觉盖度总体偏大。这是由于在开展野外研究时, 研究人员往往会选择开花较为集中的区域进行调查, 或因自然条件的限制, 无法掌握研究区的整体开花情况, 造成调查结果与实际情况存在一定的偏差。

由于每种植物花期的不同, 同一群落中花的颜色、数量、空间分布等特征会呈现一定的季相变化

规律。神农架大九湖亚高山湿地群落中各种植物的花期多集中于夏季, 但总体来说本研究采用无人机能够观测到开花季相动态。例如, 在样地1中, 6月份为湖北老鹳草盛花期, 紫色花的覆盖度仅为 0.198%; 7月为湖北旋覆花的盛花期, 黄色花呈簇状分布均匀; 8月主要开花物种为箭叶蓼 (*Polygonum sieboldii* Meisn), 花色为白色, 视觉单位面积小 ( $59.14 \text{ mm}^2$ ), 在 15 m 高度开花覆盖度观测值为 0, 同一样地在不同的季节影像上能够反应颜色和面积变化。目前, 诸如 NDVI (归一化植被指数) 和 EVI (增强植被指数) 之类的遥感指标已经广泛应用于监测植物的物候动态<sup>[26]</sup>, 这类传统方法无法获得开花的信号。Chen 等<sup>[22]</sup>提出的增强的开花指数 (EBI) 仅需可见光测量就可以计算, 用于监测果园的开花动态以及访花者与果树产量的关系。监测开花强度比较直观, 但该方法需要分别计算不同的开花颜色来调整指数, 在复杂的野外条件下, 物种不像果园那么单一, 存在较多的颜色干扰因素, 如黄色花与枯黄的植物叶片容易混淆。

群落中花越多越能吸引昆虫访问, 尤其是存在颜色、大小、气味各异的花时会增强对访花者的吸引作用<sup>[6]</sup>。本研究实地调查结果显示黄色花对双翅目、膜翅目、鳞翅目等均有吸引, 白色花主要吸引双翅目, 紫色花主要吸引膜翅目, 该结果与杜巍等<sup>[6]</sup>对神农架典型草本群落访花昆虫行为的研究结果一致。本研究在探讨开花覆盖度与访花昆虫的关系时, 对颜色进行了分类, 结果显示单位开花面积上的昆虫数量在颜色之间并无明显差异, 叠加效果主要来源于开花面积, 因而可以利用无人机影像分析开花面积来预测访花昆虫数量, 结合实地观察的传粉者种类, 对该区域可以确定主要传粉者类群, 获得的数据可用于评估传粉类群宏观变动的趋势。生物多样性和生态系统的健康得益于许多不同的植物和动物的存在, 他们是生态系统生物群落的一部分<sup>[20]</sup>。在复杂的传粉网络中, 该技术提供了一种研究动、植物宏观关系的基础。

将遥感技术应用于群落水平的传粉生态研究能够减轻野外调查的工作量, 也能够提供更为客观的数据, 本研究也说明了无人机遥感影像数据用于传粉生态领域的可行性。除了在一定程度上解决某些研究地点的不可达性导致的自然条件限制之外, 无人机的取样面积较之传统的样方法可能增加两个

数量级,有效避免了样方或样线选择时的人为影响。但无人机遥感技术的应用也有一定的局限性,正如本研究结果所示,开花覆盖度的观测值随着无人机飞行高度上升而下降,逐渐偏离地面观测结果,需要利用数学方法加以修正。另一方面,群落的空间结构和植物器官的立体分布也为使用遥感技术准确捕获花的信息带来困难。但无论如何,传粉生物学已经由描述的、静态的研究发展到定量、动态的研究<sup>[27]</sup>,需要更多的新方法和新技术的支持。随着无人机及其他遥感技术的发展和进步,其在传粉生物学等领域中将会得到更加广泛的应用。

### 参考文献:

- [1] Ollerton J, Rouquette J, Breeze TD. Insect pollinators boost the market price of culturally important crops: holly, mistletoe and the spirit of Christmas[J]. *Journal of Pollination Ecology*, 2016, 19: 93–97.
- [2] McEwen JR, Vamori JC. Floral colour versus phylogeny in structuring subalpine flowering communities[J]. *Proc Biol Sci*, 2010, 277(1696): 2957–2965.
- [3] Tuell JK, Fiedler AK, Landis D, & Isaacs R. Visitation by wild and managed bees (Hymenoptera: Apoidea) to Eastern U. S. native plants for use in conservation programs[J]. *Environ Entomol*, 2008, 37: 707–718.
- [4] Sletvold N. The context dependence of pollinator-mediated selection in natural populations[J]. *Int J Plant Sci*, 2019, 180(9): 934–943.
- [5] 方强, 黄双全. 群落水平上传粉生态学的研究进展[J]. *科学通报*, 2014, 59(6): 449–458.  
Fang Q, Huang SQ. Progress in pollination ecology at the community level[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(6): 449–458.
- [6] 杜巍, 王红侠, 汪小凡. 神农架地区典型草本群落中的昆虫访花行为比较[J]. *生物多样性*, 2007, 15(6): 666–672.  
Du W, Wang HX, Wang XF. Insect visitors and their behaviors in the typical herbaceous plant communities of the Shennongjia mountains[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(6): 666–672.
- [7] 童泽宇, 徐环李, 黄双全. 探讨监测传粉者的方法[J]. *生物多样性*, 2018, 26(5): 433–444.  
Tong ZY, Xu HL, Huang SQ. Examining methodologies of pollinator detection in the field[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(5): 433–444.
- [8] Chen B, Huang B, Xu B. Multi-source remotely sensed data fusion for improving land cover classification[J]. *Isprs J Photogramm Remote Sens*, 2017, 124: 27–39.
- [9] Landmann T, Piiroinen R, Makori DM, Abdel-Rahman EM, Makau S, Raina SK. Application of hyperspectral remote sensing for flower mapping in African savannas[J]. *Remote Sens Environ*, 2015, 166: 50–60.
- [10] Christin C, Dirk L, Marieke MT, Peter B, Hans P. *Robinia pseudoacacia* L. flower analyzed by using unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. *Remote Sens (basel)*, 2017, 9(11): 1091.
- [11] Lino ACL, Sanches J, Dias-Tagliacozzo GM, Fabbro IMD, Nascimento TS. Flower classification supported by digital imaging techniques[J]. *Journal of Information Technology in Agriculture*, 2011, 1(4): 1–6.
- [12] Xavier SS, Coffin AW, Olson DM, Dawn MO, Jason MS. Remotely estimating beneficial arthropod populations: Implications of a low-cost small unmanned aerial system[J]. *Remote Sens (basel)*, 2018, 10(9): 1485.
- [13] Müllerová J, Bartaloš T, Brůna J, Petr Dvořák, Michaela Vitková. Unmanned aircraft in nature conservation: an example from plant invasions[J]. *Int J Remote Sens*, 2017, 38(8–10): 2177–2198.
- [14] 孙中宇, 荆文龙, 乔曦, 杨龙. 基于无人机遥感的盛花期薇甘菊爆发点识别与监测[J]. *热带地理*, 2019, 39(4): 482–491.  
Sun ZY, Jing WL, Qiao X, Yang L. Identification and monitoring of blooming *Mikania micrantha* outbreak points based on UAV remote sensing[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(4): 482–491.
- [15] 冯家莉, 刘凯, 朱远辉, 李勇, 柳林, 蒙琳. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用[J]. *热带地理*, 2015, 35(1): 35–42.  
Feng JL, Liu K, Zhu YH, Li Y, Liu L, Meng L. Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring[J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(1): 35–42.
- [16] Kaneko K, Nohara S. Review of effective vegetation mapping using the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) method[J]. *Journal of Geographic Information System*, 2014, 6(6): 733–742.
- [17] Getzin S, Wiegand K, Schöning I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles[J]. *Methods Ecol Evol*, 2012, 3(2): 397–404.
- [18] Gonzalez LF, Montes GA, Puig E, Johnson S, Mengersen K, Gaston KJ. Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation[J]. *Sensors*, 2016, 16: 1–18.
- [19] Yang J, Li B. New perspectives and techniques are needed to advance invasion science[J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(12): 1255–1256.
- [20] Galbraith SM, Vierling LA, Bosque-Pérez NA. Remote sensing and ecosystem services: Current status and future opportunities for the study of bees and pollination-related services[J]. *Curr For Rep*, 2015, 1(4): 261–274.



- [21] 胡健波, 张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 20–30.  
Hu JB, Zhang J. Unmanned aerial vehicle remote sensing in ecology: Advances and prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 20–30.
- [22] Chen B, Jin Y, Brown PH. An enhanced bloom index for quantifying floral phenology using multi-scale remote sensing observations[J]. *Isprs J Photogramm Remote Sens*, 2019, 156: 108–120.
- [23] 周文昌, 史玉虎, 潘磊, 崔鸿侠, 张志麟, 杨敬元. 神农架林区大九湖湿地生态系统服务价值评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 208–213.  
Zhou WC, Shi YH, Pan L, Cui HX, Zhang ZL, Yang JY. Evaluation of ecosystem services value of Dajiuhu wetland in Shennongjia forest region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 208–213.
- [24] Williams NM, Ward KL, Pope N, Isaacs R, Wilson J, *et al.* Native wildflower plantings support wild bee abundance and diversity in agricultural landscapes across the United States[J]. *Ecol Appl*, 2015, 25(8): 2119–2131.
- [25] Horton R, Cano E, Bulanon D, Fallahi E. Peach flower monitoring using aerial multispectral imaging[J]. *Journal of Imaging*, 2017, 3(1): 2.
- [26] Shen M, Chen J, Zhu X, Tang Y, Chen X. Do flowers affect biomass estimate accuracy from NDVI and EVI? [J]. *Int J Remote Sens*, 2010, 31(7/8): 2139–2149.
- [27] 黄双全, 郭友好. 传粉生物学的研究进展[J]. 科学通报, 2000, 45(3): 225–237.  
Huang SQ, Guo YH. Research progress of pollination biology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 225–237.

(责任编辑: 李惠英)