

鸟类多样性野外调查方法

Bird Diversity Field Survey Methods

董哲含¹, 斯幸峰², 何兴成¹, 张尚明玉¹, 成宇文¹, 吴永杰^{1,*}

¹四川大学生命科学学院, 生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都; ²华东师范大学生态与环境科学学院, 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 上海

通讯作者邮箱: wuyongjie@scu.edu.cn

引用格式: 董哲含, 斯幸峰, 何兴成, 张尚明玉, 成宇文, 吴永杰. (2021). 鸟类多样性野外调查方法. *Bio-101* e1010648. Doi: 10.21769/BioProtoc.1010648.

How to cite: Dong, Z.H., Si, X.F., He, X.C., Zhang, S.M.Y., Cheng, Y.W. and Wu, Y.J. (2020). Bird Diversity Field Survey Methods. *Bio-101* e1010648. Doi: 10.21769/BioProtoc.1010648. (in Chinese).

摘要: 随着生态环境和生物多样性保护理念的普及, 社会各界对生物多样性的保护和管理越来越重视。但生物多样性本底状况不清, 动态趋势不明对我们有效的开展生物多样性保护和管理工作的提出了巨大挑战。如何快速地获取生物多样性的数据和评估生物多样性的分布格局是当前生物多样性保护和管理中的重要科学问题。鸟类作为生态系统的重要组成部分, 在生态营养级中处于中高层, 在环境稳定、生态平衡等方面都具有重要作用。鸟类对环境变化非常敏感, 其种群数量与群落结构被认为是衡量生态系统状态的重要指标, 可作为环境变化的指示物种。为此, 我们对鸟类多样性的调查方法进行一个简要的介绍。通过样线法、样点法、红外相机调查法、无人机调查法、声音监测法等, 对森林、湿地、草原等不同生境的鸟类进行快速调查以迅速掌握一个地区鸟类多样性的分布情况。

关键词: 鸟类多样性调查, 样线法, 样点法, 红外相机调查法, 声音监测法

实验步骤

鸟类多样性调查应按照调查对象的习性和生活环境的不同而选择合适的调查方法。为此, 我们制定了森林鸟类、湿地鸟类、草原鸟类的调查方法。在湿地鸟类调查中, 一

一般采用分区直数法。在草原鸟类调查中，一般采用样线法和样点法。在森林鸟类调查中，一般采用样线法、样点法、红外相机调查法和近期快速发展起来的声监测法。除此之外，森林调查还需要调查人员提前熟悉相关鸟类的鸣声，因为森林调查视线常常被树林遮挡。由于不同的调查方法在研究目的、地点选择、时间长短、调查对象上有所不同，所以结合调查的目的和实际情况，选择合适的调查方法是顺利开展研究的重要保障。鸟类多样性调查的主要目的是迅速掌握一个地区鸟类多样性的分布情况。因此，需要对一个地区主要生境的鸟类进行快速调查，以便掌握本地区的鸟类多样性状况。这要求调查样线或者样方要尽可能涵盖不同的生境，不同样方的调查强度要接近，但一些鸟类丰富的地区，可以适当考虑提高调查的强度。而如果是针对某个类群或者某个物种进行种群数量和分布的专项调查，则需要对其主要分布的生境进行全覆盖的调查。

1. 样线法

样线法是沿着预设路线进行不间断记录两侧一定距离范围内发现的鸟类，适用于快速的调查某个地区的鸟类物种多样性 (Anderson, 1993)，具有调查范围大、调查效率高、方便开展等优点，在一些地势平坦和开阔的山谷和山脊便于运用。其缺点是不适用在一些地势陡峭的山区开展。

1.1 假设条件

- 1) 记录鸟类时，在样线上或在样线附近的鸟类都被记录到：对于把样线宽度划分成几个区带的分组数据模型，第一组区带内的所有鸟未被遗漏。
- 2) 鸟类并不因观察者的存在而进出调查样带；且调查者不会引起鸟类在区带间的移动。
- 3) 所有的鸟类个体未被重复记录；所有被发现的鸟类个体是相互独立的。鸟类个体被观察到的概率不受其大小的影响，否则必须使用因目标大小引起误差的校正方法 (Richard, 2002)。
- 4) 鸟类个体与样线的垂直距离测量准确。
- 5) 所有的鸟类能被正确鉴别。
- 6) 每次的鸟类调查是独立的。
- 7) 样线是随机或者至少是客观选定的。

1.2 野外工作

尽管不同类型的样线法在截取调查面积时，截线的确定方式存在差异，但各种样线法的野外调查过程却基本相同。其主要野外工作包含以下几个方面：

1) 选择调查样线

调查样地确定后，尽可能随机地在样地内确定其调查样线是决定该方法能否成功的重要因素。当然，调查样线的选择取决于研究的目的和样地的可进入性。一般而言，调查样线的选择有以下几种方式：

- a. 以一条可穿越整个样地的自然道路或小道为调查样线。但这种方式可能会受到道路两侧次生林和地理成因的影响，使穿越区域对于整个调查样地而言不具有典型性和代表性。
- b. 将一条长调查样线分成总长度相同的若干短调查样线，并随机地布设在调查样地内。这种方式能较真实地代表整个调查样地内的鸟类状况，并且能对样地内鸟类种群相对密度进行较准确估算，是最理想的调查样线方式。缺点是会增加调查者在样线转移间所用的时间。
- c. 分层随机选择调查样线，即将一条长调查样线分成总长度相同的若干短调查样线，同时将调查样地进行地理上的分层，如可分成边缘层和核心栖息地层等，或者根据调查样地的地形地貌进行分层。然后，按比例随机地将短调查样线布设在各层。如下图，就是根据海拔进行分层，再在各海拔随机布设样线的(图 1)。

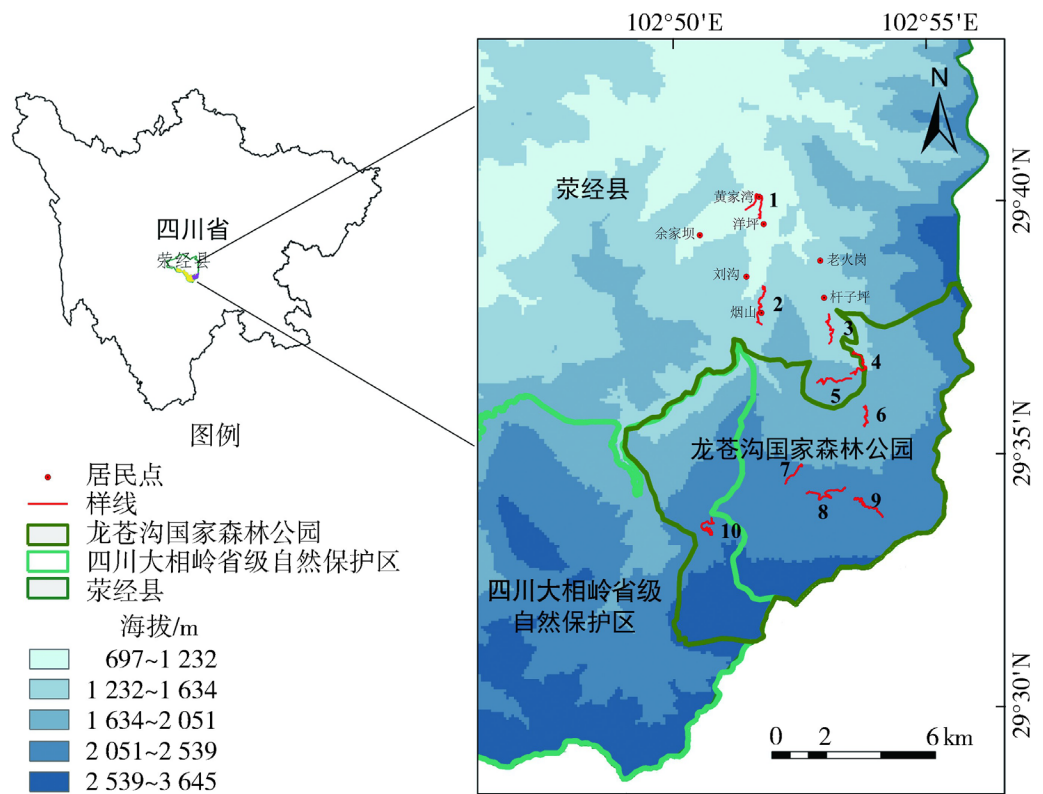


图 1. 分层随机调查样线的分布(引自王燕, 2021)

- d. 系统选择调查样线，即在调查样地内系统地等距离间隔平行布设若干调查样线。下图就是在内蒙古汉马国家自然保护区所选定的调查区域内通过 GIS 布设的 10 条长约 4 km 的样线。平行样线之间的间隔距离相等(图 2)。这种调查方式同样会受到地形和栖息地可进入性的影响，还会增加样地的调查强度。当然，这种选择方式可以与分层随机选择相结合，即在层内进行系统选择样线，并随机选择样线的起点。

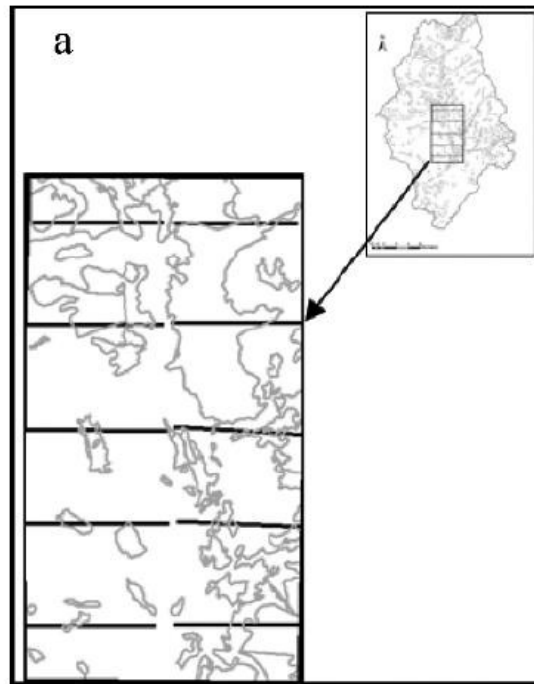


图 2.系统选择调查样线的分布(引自刘辉, 2015)

调查样线长度的确定应根据所研究的问题视当地情况而定。一般来说长调查样线施行能达到调查强度要求往往较为困难，理想的处理方式是将长调查样线划分为若干短调查样线。短调查样线间可以是连续的，也可以是不连续的。当然，从统计学的角度看，最好是将长调查样线分为不连续和相互独立的短调查样线。最理想的短调查样线应为直线，在具体操作难以做到时，亦可以利用自然小道或采用两者相结合的办法。在进行不连续的短样线调查时，两条短样线间必须保持有足够的间隔距离。在开阔栖息地通常为 250~500 m，而在郁闭栖息地则以 150~200 m 为宜。

理想的样线宽度应选择在所有的鸟都能被发现的范围内。在森林环境中一般是每边 25 m，而在开阔栖息地却每边在 50~100 m 左右 (郑光美, 1995)。而将样线法用于水鸟的调查，可设置在 500 m 左右 (周雯慧 等, 2018)。

2) 重复次数与行走速度

为了能更接近真实记录鸟类数量和分布情况，需要对每一条样线进行多次调查。在鸟类监测中，繁殖季节通常要进行至少 2 次调查。如果调查结果需达

到研究地内所有鸟类的 75%以上，最少的重复次数应在 5 次左右。物种累积曲线有助于分析调查是否充分，物种累积曲线越趋于平缓，表明调查越充分。

调查者在调查样线的行走速度应依据鸟类存在的数量和记录它们的困难程度而定。在开阔栖息地，行走速度以 2 km/h 左右为宜；而在较茂密的区域，以 1 km/h 左右的行走速度进行调查较为适合。

3) 记录鸟类

一般情况下，野外调查应 2 个人一起开展，1 人主要负责鸟类调查，1 人主要负责记录或拍照。在人手不够的情况下，1 个也可以借助录音笔等工具开展野外调查。调查者在调查样线上行走的同时，需记录在特定宽度内听到或看到的所有鸟类个体，以及测出鸟类个体距调查样线的垂直距离。行进中的观察者只有在记录时才能停下来。在调查的过程中遇到例如金翅雀等集群的鸟类，应记录集群中心距离到样线的距离。在繁殖期的时候，听到或者看到一只雄鸟或者一只雌鸟，应记录一对。或者看到一窝卵或者雏鸟的时候也应该记录一对(周雯慧等, 2018)。根据研究的需要，在进行样线法调查时，还可记录其他的一些相关信息，比如借助手机定位工具，如两步路、户外助手、奥维地图等记录样线和轨迹。

4) 测定距离

调查鸟类个体至调查样线的距离是进行样线法调查的重要步骤，有距离范围和实际距离两种类型。

距离范围的确定是将调查样线两侧距离分出区带，如<25 m 和>25 m 两个区带，或 0~10 m、10~20 m 和 20~30 m 三个区带等，然后确定鸟类个体所在的区带。实际距离的测定则是指测出鸟类个体至调查样线的实际垂直距离。确定距离区带往往比测定实际距离更为简便，且可以用多种探测函数模型来估计种群密度，如例如傅立叶级数 (Burnham *et al.*, 1980) 及半正态函数 (Buckland *et al.*, 1993)。因此，确定距离区带的方法已成为样线法中较为常用的鸟类距离测定方法。一般而言，距离区段划分越多越窄，得出的鸟类发现函数模型就越准确，但野外距离估计的难度就会变得越大。实际距离测定类似于距离区段窄到一定程度后的距离范围的确定，所以就鸟类发现函数模型的准确性

而言，实际距离测定准确性更高。在野外调查过程中，调查者一般可以通过以下方法判断和测定鸟类距离：

- a. 通过调查者目测，但调查者的目测距离能力须经训练和定期检验。
- b. 发现鸟类个体之后，记住该个体的位置，当调查者走到与该个体垂直相对的位置后用测距仪测出鸟类个体的距离。
- c. 与标图法相结合，发现鸟类个体后，先在调查图上标出位置，然后再从图上量出鸟类个体至调查样线的垂直距离。

注意：鸟类个体的位置在实际观察中是不断变化的，样线法规定以调查者第一次发现该个体的位置为准进行测定。

1.3 种群密度计算

采用样线法进行鸟类调查，得到鸟类种类、数量和鸟类个体至调查样线距离等数据后，就可按以下公式计算出调查样地内每一种调查鸟类的种群密度：

$$D = N/2LW$$

D：鸟类密度； N：野外调查所记录的鸟类数量； L：样线长度； W：单侧截线宽度。

1.4 样线法的主要类型

样线法存在着许多不同的类型，各类型的假设条件和野外工作过程是一样的，只是其用于计算种群密度的面积截取方式存在差异，即截线确定方式各异。

1) 固定距离样线法

这种方法是观测者沿调查样线行走，记录一定距离（截线）内所看和听到的鸟类，将此调查样线的长度和截线宽度相乘即可得出调查面积。

截线宽度（W）为调查样线宽度。理想的样线宽度是选择在所有的鸟都能被发现的范围内。在森林类型的栖息地中，一般样线单侧宽度以 25 m 为宜，而在开阔的栖息地中 50 m 左右较为适合。使用高倍的单筒望远镜在开阔栖息地，或者是利用飞机和船只进行样线法调查时，应根据实际情况增加样线的宽度。

2) 条带样线法

条带样线法可以看作是固定距离样线法增加到两个以上区带的变形，能划分出的区带越多越好。通过区带划分的距离范围测定观测者到鸟类个体的距离。

截线宽度 (W) 通过各区带内所记录的鸟类数量和区带距离得出鸟类发现函数模型, 然后再从发现函数模型中求出截线宽度。因此, 区带划得越多, 通过调查数据得到的鸟类发现函数模型就越准确。

在多区带条带样线法中, 其区带宽度往往是可变的, 即在调查样线附近设置较窄的区带, 而距调查样线较远的区带较宽, 例如, 0~5 m, 5~10 m, 10~15 m, 15~20 m, 20~30 m, 30~40 m, 40~60 m, 60~100 m, 100~200 m, >200 m 等。

该调查方法应至少将记录到的鸟类分到 2~3 个区带中才能用粗略地估计出鸟类发现函数模型。所以为了得到鸟类种群密度的合理估算, 在两区带法中, 内侧区带内应至少包含所有观察鸟类的 50%, 并以此为原则确定内侧区带的宽度。

3) 可变距离样线法

可变距离样线法是一种最为常用的样线法。可变距离样线法是对所有在样线调查时观察到的鸟类个体至调查距离样线的实际垂直距离进行测定, 以获得每种鸟类的发现函数模型, 然后依据该模型确定截线宽度。通过该方法获得的截线宽度存在鸟种间的差异, 需用不同的截线宽度估算不同种类的种群密度。这种方法获得的鸟类发现函数模型更为准确, 进而使鸟类绝对种群密度进行可信估算成为可能。

截线宽度(W)可变距离样线法是根据鸟类的发现率与发现距离之间的发现函数模型来确定截线宽度, 并用此截线宽度获得有效面积分别对每种鸟类种群的密度进行估算。

1.5 对样线法的评价

样线法适宜于在广阔的、郁闭度低和较均质的栖息地和区域内进行鸟类调查, 适宜于调查活动性强、个体较大或较显眼、易受惊的种类, 适宜于在种群密度和物种丰富度较低的情况下使用, 以及在可进入性较好的栖息地内使用, 并可较好地用于鸟类与栖息地关系的研究。对所有的样线调查方法而言, 其前提条件和样线的布设的要求是一致的, 主要区别在于调查的内容以及相应的密度计算方法上的不同。无距离样线法不能计算出种群密度, 而固定距离样线法需要经验地估计样线的宽度, 通过条带计数法来计算密度。显然, 对于生物学特性不是很清楚的鸟类进行数量调查时, 不

合理地估计样线的宽度将会造成很大的误差。可变距离样线法通过鸟类个体距样线距离的实际观测值，逐步提高密度计算的精确性。

实际上，距离取样法是对所有涉及到个体距样线距离的种群密度计算方法的总结和标准化，并且通过相应的 **DISTANCE** 软件(<http://distancesampling.org/>)进行分析。**DISTANCE** 软件通过均匀分布、半正态分布、风险率分布这 3 种分布函数对每种鸟类的数据建模拟合，每个关键函数再用余弦、简单多项式、厄密多项式进行级数展开，然后筛选最佳函数模型(张小伟 等, 2020)。同时，**DISTANCE** 分析也能够得到一些与密度相关的参量，如遇见率、有效宽度、发现概率等等，而其它方法不可能或很难得到这些数据。因此，如果能够获得鸟类个体距样线的垂直距离，并且满足运算条件，距离取样法和相应的 **DISTANCE** 软件分析，无疑将优于其它的方法，得出的结果也更为准确。

样线法的逐步完善正是为了提高测定鸟类个体到到样线的距离的准确性，从而提高种群密度估计的准确性，但这一点与野外实际调查的可行性存在着利弊的权衡。比如，如果获得部分样线的个体距样线距离，则可以先通过 **DISTANCE** 软件分析，得出有效宽度，再以此作为经验估计样线宽度的参照依据，显然比单纯的固定距离样线法误差要小(许龙, 2003)。有效宽度可以使用 **Distance** 软件通过 $g(x)$ 计算出，指的是调查时在这样样线单侧宽度内未被发现的鸟类数量等于样带外被发现的鸟类数量(陈道剑, 2019)。根据部分样线个体求得的有效宽度，求出有效宽度平均值，作为估计样线宽度的参照依据。由于有效宽度与鸟的体长发现概率成正相关，所以在选取部分个体求有效宽度的时候尽量选取不同体长的鸟和不同发现概率的鸟。

2. 样点法

样点法是沿着预设样线进行有规则间断，并在每个断点上进行一定时间的持续记录。它既可以估算每种鸟的相对丰富度，又可以估算每种鸟的绝对密度，较适于在较大面积范围内开展鸟类数量调查，以及鸟类与栖息地间关系的研究。在样点法调查时，调查者沿着调查样线行走到达预先设定的样点后，定点定时地记录在一定半径范围内或所有看到和听到的鸟类个体。

2.1 假设条件

样点法是一种特殊的样线法，即观察者的行走速度为零时的样线法。因此，样点法与样线法的各种假设条件非常相似：

- 1) 在样点上的鸟类是 100%可发现的,即在样点上的鸟类在调查时未被遗漏。
- 2) 鸟类不会接近或避开观察者在被观测者发现以前鸟类不会移动。
- 3) 所有鸟类的行为是相互独立的。
- 4) 鸟类的行为不受栖息地和实验设计等因素的影响。
- 5) 鸟类个体至样点中心的距离能被准确测定。
- 6) 每次的鸟类调查是独立的。
- 7) 所有的鸟类能被正确鉴别。

2.2 野外工作

尽管样点法存在着不同的类型,但各种样点法的野外调查过程基本相同。

1) 确定样点

调查样地内的样点可通过系统选择或随机选择的方法进行确定,在一个包含有多种栖息地类型的大调查样地内也可以与分层取样相结合的方式选择调查样点。两个样点间的距离应大到同一个体不被重复记录的程度,以保证调查记录独立性。一般情况下,固定半径样点法的样点间的距离应在 100 m 以上,而可变半径样点法的样点间隔距离应在 200 m 左右。不过,样点间隔距离还与调查地点的栖息地类型有关。如在郁闭度较高的栖息地内可采用相对较短的样点间距离,而在开阔栖息地内其样点间距离则应相对较大。

在栖息地斑块中布设样点时,存在一些近栖息地边缘的样点,由于可能在这些样点内记录到些生活在邻近栖息地内的鸟类,所以应该用半圆形样地进行调查,即只记录出现在栖息地边缘内侧一半样地内的鸟类。当然,在具体调查工作中还需要视研究目的而定。

2) 样点数量

最少样点数量的确定与研究目的、尺度、物种的丰富度、生境等因素密切相关。要有效地估计大多数鸟类的密度需 20 个以上的样点,且样点调查区域内样本间差异越大,需要样点数就越大(吴飞等, 2008)。有文章表明鸟类的丰富度与所需最少样点数量呈反比 (Thompson, 1995)。根据样点数量和样点间隔距离的要求,要在一个较小的调查区域内布设足够数量的样点是非常困难的。因此,样点法不适用于在较小调查区域内进行鸟类数量调查,亦不能有效地用于估算小种群的密度,而应采用其他的调查方法。

3) 统计持续时间与重复调查

在每一个样点内的统计持续时间应能发现该样地内所有鸟类个体的。一般以 5~10 min 的持续时间为最佳。当然，在不同的栖息地类型最佳持续时间各异。例如，在大部分温带地区栖息地内，5 min 左右的持续时间可能是最好的 (Fuller and Langslow, 1984)，而在鸟类非常丰富或难以发现的栖息地内 (如热带森林) 则需较长的持续时间 (Bibby *et al.*, 2000)。鸟类的活动性在繁殖季的不同时期存在差异，鸟类个体的发现率亦会不同，所以每个样点一般应至少进行 2 次独立的调查，且重复调查应有一定的时间间隔。一般而言，在具体分析某种鸟类密度时，可使用同一样点多次调查记录结果的鸟类数量最大值进行密度估算。

4) 记录鸟类

调查者到达调查样点位置后，应在规定的持续时间内，按不同样点法在调查半径范围，记录所有看到或听到的鸟类个体。如果在规定时间所记录的鸟类种类不清，在统计时间过后仍可进行观察以确定其种类。同时，调查者应尽可能多地记录鸟类的相关信息。由于不能准确测定飞行中鸟类的距离，以及容易过高估算运动进入样地的鸟类个体的种群密度，因此在调查过程中应特别注意将飞行和运动进入样地的鸟类个体分开记录。

5) 测定距离

与样线法相同，样点法调查中的重要步骤是判断看到和听到的鸟类个体是否处于样点中心一定半径的范围内。在满足上述样点法假设条件的前提下，通过对发现的鸟类个体距离的测定，调查者就可用样点法估算鸟类的种群密度。而 Distance 软件的发展使以前非常复杂的数据分析过程变得简便、快速和有效。

鸟类个体至样点中心的距离有两种类型，即距离范围和实际距离。距离范围的测定是指确定发现鸟类个体是否在一定的半径范围之内，或在一定半径距离的区带范围内。实际距离是指测出鸟类个体至样点中心的直线距离。在野外调查过程中，调查者一般可以通过目测和借助激光测距仪等测定鸟类距离。对于因活动而改变位置的鸟类，则以调查者一开始发现该个体的位置为准。

2.3 种群密度计算

在得到鸟类种类、数量和鸟类个体至样点中心的距离等数据后，可按下列公式计算出调查样地内每一种鸟的种群密度：

$$D=N/3.14r^2$$

D：鸟类密度；**N**：每个样点野外调查所记录的鸟类数量；**r**：样点半径。

不同类型的样点法的样点半径确定方法各异。如果每个点的调查地是独立的，对多点调查就可以求出具统计学意义的平均值。

2.4 样点法的主要类型

样点法可以分成固定半径样点法、区带样点法和可变半径样点法等类型。

1) 固定半径样点法

固定半径样点法是记录以观测者为圆心的一定半径范围内所有鸟类个体，然后用鸟类统计数和样点总面积来计算鸟类密度的数量统计方法。

样点半径 (**r**)：所选择的样点半径应该保证在该半径范围内所有的鸟都能被发现，也没有鸟类个体因观察者的存在而飞进飞出该样地。半径过大，鸟类个体被遗漏的可能性就越大；半径过小，鸟类在被发现前因为观测者干扰而飞出的可能性增大。一般在森林中样点半径为 25 m，开阔地带为 50 m。

2) 区带样点法

在采用样点法进行野外调查时，先将调查样点按照一定半径划分出不同半径范围的区带，然后确定所发现鸟类个体所在的区带。就获得的精确鸟类发现函数模型而言，能划分出的区带越多越好，但目前以划分 2~3 个区带的样点法较为常用。

样点半径 (**r**)：两区带样点法中，一般可将鸟类个体距离归到 0~**r** 和 >**r** 两个区带。Gregory 认为区带样点法至少要划出 0~30 m 和 >30 m 两个区带，如果能划出 0~30 m、30~100 m 和 >100 m 三个区带则更佳 (Gregory *et al.*, 2004)。当然，区带半径还受栖息地类型的影响，在森林类型的栖息地内第一区带以 30 m 为宜，而在较开阔的栖息地内则以 50 m 为宜，对于宽阔水面水鸟的调查以 500-1000 m 为宜。通过野外调查获得每一鸟类个体在区带中的位置后，进一步采用 Distance 软件可以得到样线半径和鸟类发现函数模型 (例如：半正态分布函数模型)。

3) 可变半径样点法

可变半径样点法是适用于开展一种鸟类或少数几种鸟类数量调查和种群密度估算的样点法，不太适于在鸟类种类丰富、数量密度高的区域进行数量调查。可变半径样点法的具体方法和固定半径样点法基本相同。不过其样点间的距离更长，以保证所有样点的独立性，一般其间隔距离应在 200 m 左右。

样线半径 (r): 可变半径样点法需确定每一发现的鸟类个体与样点中心的距离，以获得每种鸟类的发现函数模型，然后依据该模型确定样点半径，并用此半径获得的有效面积对每种鸟类的种群密度进行估算。

4) 对样点法的评价

样点法亦是种简便易行、能在全年任何季节进行调查的鸟类调查方法。它可以用于大多数鸟类的密度估计，甚至包括一些稀有种。该方法较适于在比较茂密的栖息地和种群密度及种类丰富度高的区域开展鸟类调查。由于该方法可使调查者有更多的时间去观察鸟类，并消除了调查者行走速度的影响，这不仅可增加鸟类的发现率，而且还较适于调查隐藏性较好、胆怯和具备躲避性的鸟类，也同样适于在某些特殊地区(如多岩地带等环境)开展鸟类数量调查。相比于样线法，样点法所获数据能更确切地反映栖息地参数和鸟类之间的关系。由于该方法在调查期间每个样点的统计时间固定，使得每一栖息地内的鸟类统计时间极易标准化，从而更适合于比较研究。与样线法比较，样点统计更具独立性，其平均密度值更具统计学意义。当然，该方法也存在许多不足：

- a. 固定半径样点法假设其统计数据只代表栖息在该固定半径范围内的鸟类数量。但是鸟类是运动的，在调查期间鸟类可以从一个不知距离的地方进入调查地，且每种鸟活动的有效面积都不相同。因此，采用固定半径样点法不可能对鸟类密度进行非常精确的估计。
- b. 区带样点法和可变半径样点法是基于鸟类发现函数模型确定样线半径的样点法，而此过程又涉及较为复杂的数学计算过程，因此，在没有发展出简单而有效的计算机模型分析软件之前，该方法在鸟类学研究中的推广使用受到了较大的限制。当然，由于 **Distance** 软件的产生与发展，样线法也成为普遍使用的鸟类数量调查方法。即便如此，较常用的 2~3 区带的区带样点法亦因区带数较少而较难获得拟合度较好的鸟类发现函数模型，这可能使鸟类数量密度估算产生相对较大的误差；而可变半

径样点法则要求调查者对鸟类个体的实际距离进行准确的测定，这就增加了野外工作的难度，特别是在鸟类种类丰富、种群密度高的区域，要在规定的样点调查时间内完成鸟类记录和距离测定是比较困难的，因而不太适于在种类丰富、种群密度高的区域开展鸟类数量调查与监测，特别是森林茂密的物种丰富的区域。

- c. 鸟类对观察者存在的反应各不相同导致样点法会造成鸟类密度的过高或过低估计。和其他方法相比，使用样点法调查时会因调查者在某一点所花的时间较长，而增加同一个体被重复记录的可能性。
- d. 由于圆面积与半径大小间的指数关系，使得该方法的密度估计对样点半径的选择非常敏感，极易造成较大的误差。因此，样点法距离估计误差所造成的鸟类密度估计误差程度远大于样线法。

3. 标图法

标图法是以地图法研究鸟类数量方法的一种。在繁殖季节，许多鸟类可以通过鸣唱、炫耀、巡飞和斗争等行为获得其所需的领域。而拥有领域的鸟类个体需要保卫领域，往往只在领域附近活动。如果能通过在一定面积范围内的多次观察，并能将观察到的鸟类个体标绘在已知比例的调查样地方格地图上，那么就有可能通过辨识这些位点和标记来确定鸟类的繁殖领域。进一步将繁殖领域作为一种计数单位，估算样地内鸟类种群的绝对数量，这就是标图法。但这种方法的使用必须具备很多的假设条件，而每个假设都会对该结果产生影响，同时，标图法的使用还受到环境条件的限制，具有局限性。这种方法被较少的使用，在这里只做简单介绍。

3.1 假设条件

- 1) 繁殖期间鸟类都具领域性，而且领域拥有者总在其领域内活动。
- 2) 鸟类是成对的，每一领域内具两个鸟类个体。
- 3) 不同种鸟类以及同种鸟类的不同个体都具有相同的发现率，样地内所有的鸟类个体均能被发现、正确鉴别和标图。
- 4) 调查结果不受统计的持续时间、观察者行走速度和人数的影响，亦不受栖息地植被的结构等因素的影响。
- 5) 除了该方法对研究地有最小面积要求之外，面积因素对其结果没有影响。

3.2 鸟种编码与记录符号

从理论上讲，对于某种鸟的调查可出现类似于图 3A 所示的理想结果。但实际上这种理想状态是很少发生的，人们往往会得到类似于图 3B 的结果，其中有些位点群非常难以确定。因此，在记录鸟类的位点时，还需使用一些便于野外记录和有助于勾勒出领域 (位点群) 的鸟种编码和辅助符号来记录更多的附加信息。

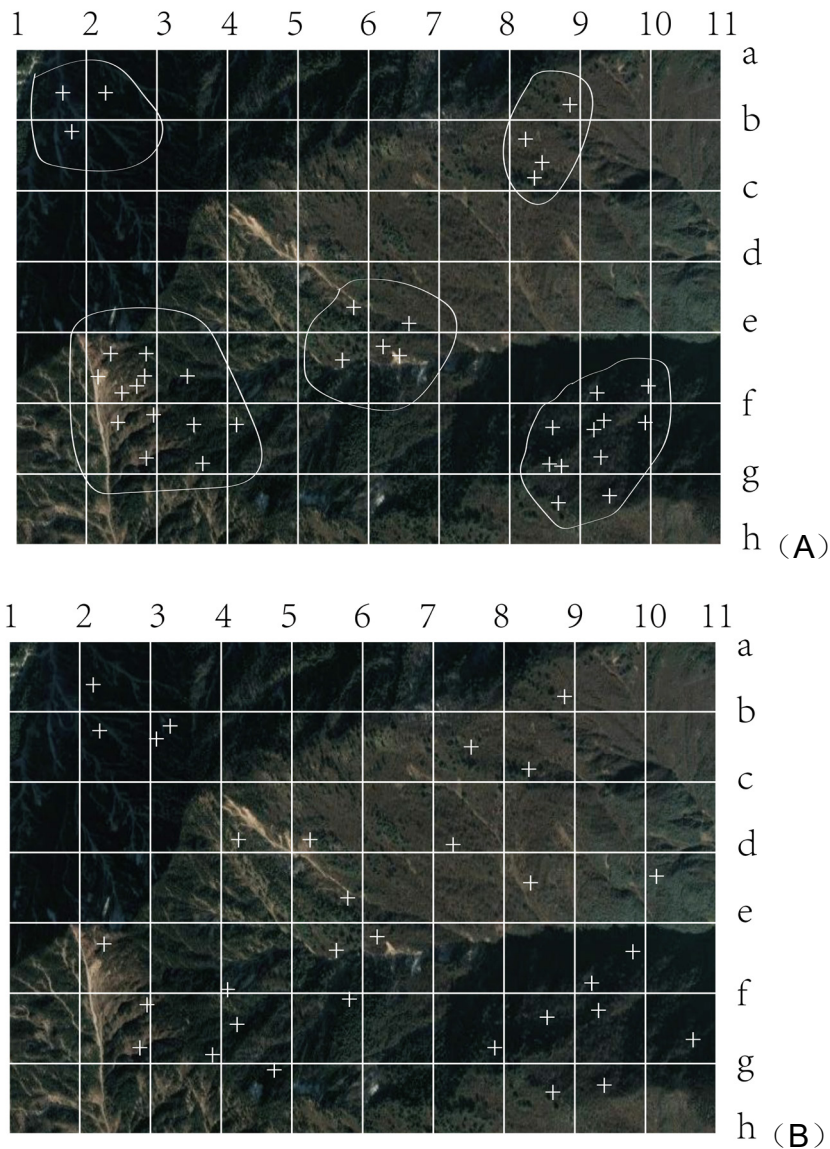


图 3. 单一物种标图法位点模式图

3.3 位点群确定和种群密度计算

野外调查结束后，应将所有包含鸟类位点等相关信息的调查图按每种一张转化为种类图，然后对种类图分种进行叠加。

在种类图上圈出领域或位点群之后，按以下公式计算出调查样地每种鸟类的种群密度：

$$D=CN/S$$

D: 鸟类密度 (ind. ·hm⁻²); C: 位点群数;

N: 每一位点群内平均个体数; S:样地面积。

4. 分区直接计数法

根据地形、地貌或生境类型对整个观测区域进行分区，逐一统计各个分区中的鸟类种类和数量，得出观测区域内鸟类总种数和个体数量(图 4)。调查时间可以选择一天当中的某一时间段，具体根据鸟类活动的稳定状况和天气情况确定。每次在观测点上观测 20-25 min，每次计数重复 3 次，取最大值作为该次计数的结果。然后观测的时间段内，再进行两次计数，每次重复 3 次。即每个调查日共进行 3 次计数，取最大值作为该调查日的最终结果(陈佳萍，2021)。

该方法适用于较小面积的草原或者湿地，主要应用于水鸟或其他集群鸟类的观测。在使用分区直数法的时候可以使用（表 1）来记录观测数据。

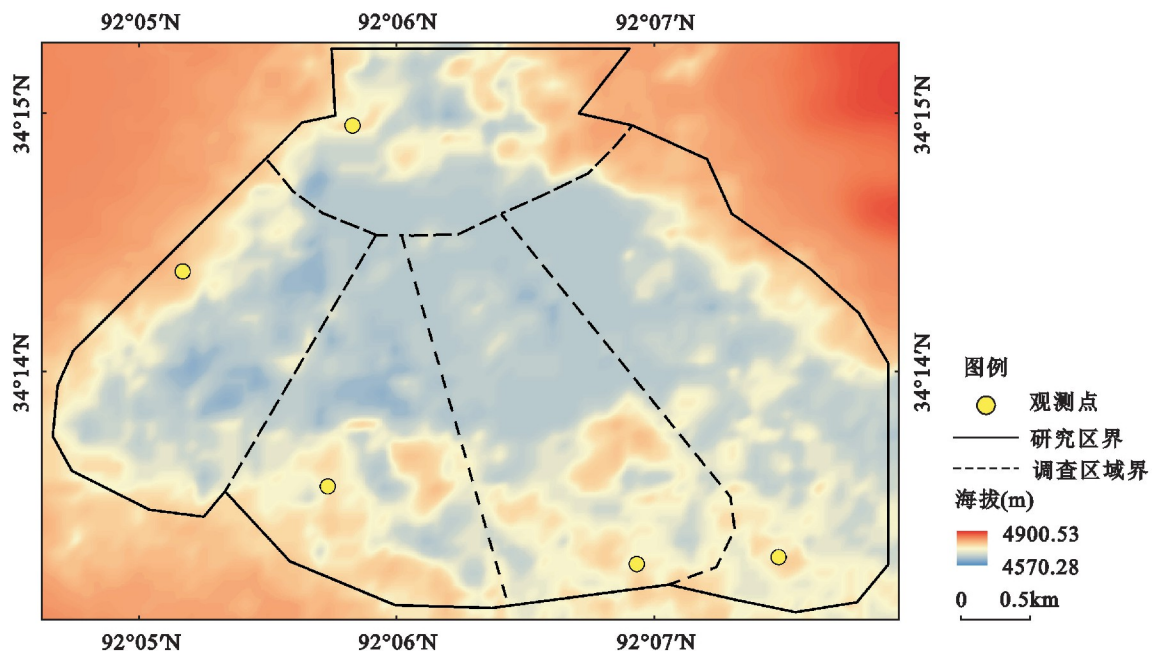


图 4. 分区直数法示意图(引自陈佳萍，2021)

表 1. 分区直数法记录表

日期		天气		温度	
观测者		记录者		样点编号	
地点				海拔	
经度		纬度		开始时间	
生境类型				结束时间	
人为干扰活动类型			人为干扰活动强度		
潮汐状况			备注		
总物种数			总个体数		
物种名	数量	实体、活 动、痕迹	海拔	经纬度	生境

5. 红外相机调查法

红外相机技术是红外触发相机陷阱技术的简称，该技术是指使用红外感应设备在无人在场操作的情况下，自动拍摄野生动物的静态照片或动态影像的技术与方法 (Cutler and Swann, 1999)。红外相机能够在野外 24 h 不间断地持续工作，不易受天气和地形等环境因子的影响，可以节省资金和人力，减少对动物的干扰等优点，红外相机对于地面及林下层活动的森林大中型鸟类以及夜行性和行为隐蔽鸟类的调查优势也比较明显 (O'Connell *et al.*, 2010; 李晟等, 2014; 肖治术等, 2014)，在我国生物多样性监测与野生动物研究中得到了广泛应用。近十年来，红外相机技术在我国鸟类多样性监测和区域性编目工作中具有重要的作用，可以提供高精度、高质量和大量鸟类物种分布数据。

5.1 野外工作

1) 红外相机的安装前工作

在安装红外相机前，应调查鸟类的活动区域和日常活动样线。尽量将相机安置在动物经常出没的通道上或其活动痕迹密集处。水源附近是动物活动较为

频繁的地方，而其他的如取食点、求偶场、倒木、林间道路等也是鸟类经常活动的地点，应优先考虑。

2) 红外相机的安放位置

红外相机可以安放于树干、树桩或者岩石处。相机架设位置一般距离地面 0.3-1.5 m，架设方向尽量不朝东方太阳直射处。相机镜头与地面大致平行，略向下倾斜，一般与鸟类活动路径呈锐角夹角，并清理相机前的空间，减少对照片成像质量的干扰(余建平, 2019)。



图 5. 红外相机的安放

3) 在调查区域内布设红外相机

可以借助地理信息系统 (ArcGIS 10.1, ESRI Inc., Redlands, CA, USA), 把所要调查的区域划分为相同间距的网格, 常用的有 5 km×5 km 的网格和 1 km×1 km 的网格, 当然也可以根据所调查区域的面积设为其他单位长度。作为放置红外相机调查位点的地理参照。可以在每个网格内放置 2 个位点, 2 个位

点应至少相距 1 km。不过在实地放置红外相机过程中，可能会受到地形、地貌、道路可达性等因素限制，部分网格放置红外相机位点的数量可以根据野外实际情况做相应的调整。

在对大相岭自然保护区鸟兽红外相机监测的调查中，研究者就是通过 GIS 软件将保护区划分为若干个 2 km×2 km 的公里网格，每个网格作为一个调查样方。在实际架设过程中，由于地形因素的影响，将其中 4 个样方按照 1 km×1 km 的公里网格划分成 16 个样方。红外相机的架设按照 1 台/公里网格的标准进行，位点选择在野生动物经常活动的地点(图 6)。

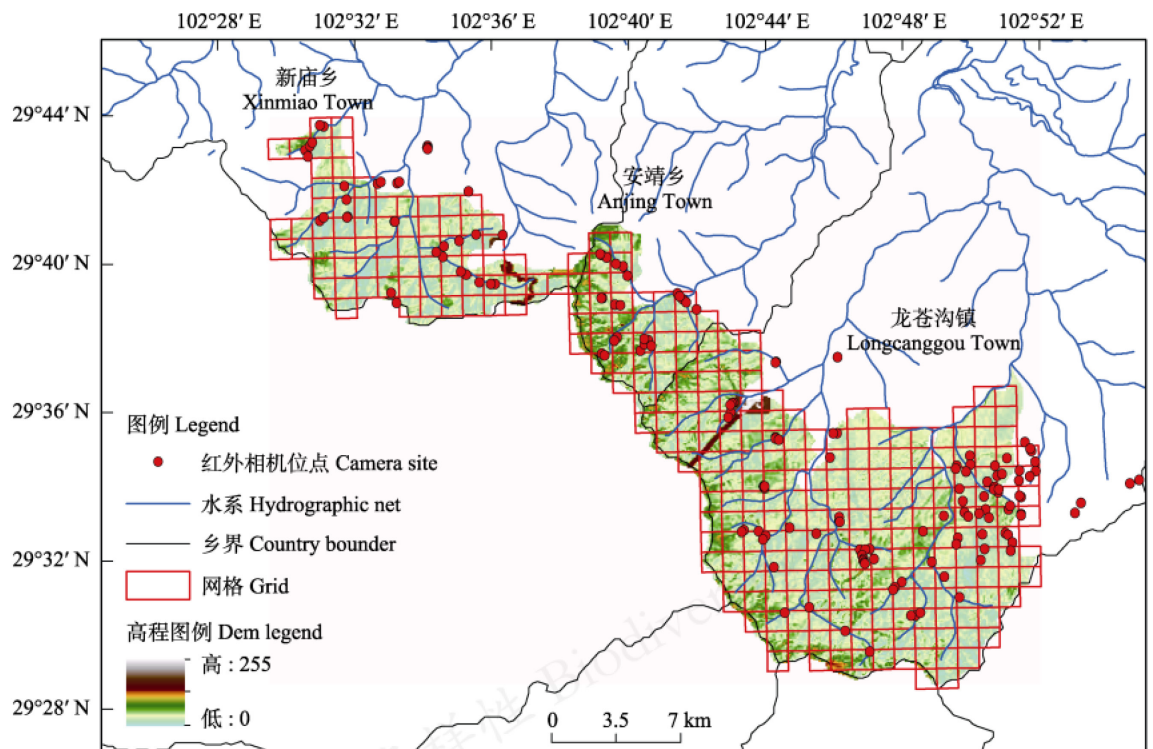


图 6. 大相岭自然保护区红外相机布设位点 (引自刘鹏, 2020)

4) 红外相机拍摄模式设置

红外相机设置可采用“拍照+视频”模式，连续 2 次拍照间隔时间为 2 min，采用 24 h 监测 (李晟, 2014)。详细的拍摄模式设置参见视频“红外相机设置的操作步骤” (Video 1)。

5.2 数据分析

可以将野外记录与照片鉴定结果录入到相应的数据库中进行管理，并对鸟类的物种进行分类。

将单个位点上 30 min 内拍摄到的同一物种的多张照片和视频合并记为该物种的一次有效探测。在统计各物种有效探测数的基础上，计算相对多度。

红外相机拍摄率 (Capture rate) 作为物种相对多度指 (Relative abundance index, RAI), RAI 公式计算如下:

$$RAI = (N * 100) / T$$

N 为拍摄到的野生动物独立有效照片数量，T 为总有效相机工作日。每台红外相机以该位点放置日期和最后一张野外工作照片(可能是工作人员或空拍照片) 的日期间隔为有效相机工作日。



Video 1. 红外相机的设置的操作步骤

5.3 应用及缺点

- 1) 物种识别鉴定困难: 红外相机记录到的鸟类物种数较多、但是体积较小, 对红外相机判读人员来说其物种识别与鉴定更为困难, 需要更高的物种分类技能与经验。要注意很多鸟类具有明显的雌雄二性差异, 并且繁殖期与非繁殖期间、成体与亚成体间存在羽色的转换, 这些因素都给物种识别和鉴定带来困难。

- 2) 设备图像分辨率受限：红外相机记录到的鸟类大多体型较小且运动速率较快，但是相机拍设的照片或视频往往分辨率和清晰度有限，同时反应速度和快门速度不够快，不能清晰地呈现出所拍摄鸟类可供鉴别的外形特征细节。
- 3) 易受风吹草动触发相机，导致拍摄大量无效照片，耗费电池和内存。

综上所述，红外相机法可以作为辅助调查手段，在野外展开鸟类多样性调查的时候作为补充手段进行使用。这种方法在野外观测大中型且活动较为隐蔽的地栖鸟类具有优势。

6. 无人机调查法

6.1 航空调查概述

鸟类调查，除了通过光学仪器使用单、双筒望远镜或瞄准镜，通过样线法、样点法来对地面鸟类进行调查之外，还可以应用无人机 (UAV) 进行航空鸟类调查。过去，航空调查技术尚未完全成熟，往往要进行地面核实调查，来验证航空调查的准确性，同时补充航空调查中的遗漏数量和高空无法解决的问题(Abd-Elrahman *et al.*, 2005)。随着航空技术的不断改进和提高，通过航拍无人机对湿地鸟类数量、种类等进行调查。

航空调查主要是通过无人驾驶飞机 (UAV)，它是一种以无线电遥控或由自身程序控制为主的不载人飞机。无人机可以分为旋翼无人机和固定翼无人机。对于固定翼无人机在气动设计良好的状态下，多载油可以持续飞行数小时，甚至可以达到 30 h 的续航时间，但对起飞条件和场地有较高的要求，野外调查中难以运用。相比之下，多旋翼无人机续航时间相对短些，不适合长时间续航飞行，但起飞条件和场地要求较低，具有更高的灵活性和可行性。无人机的类型有很多种，比如测绘无人机、微型无人机、预警无人机、航拍无人机等，随着经济的发展和社会的进步，航拍无人机的应用领域也越来越广泛。低空飞行的高分辨率 (<10 cm /像素) 无人机能达到地面调查类似的精度。根据航空调查的目的及高空可识别程度，划分重点航调物种和一般航调物种。对重点调查物种的统计要做到：种类、个体数量、分布位置 (GPS 定位)、巢址 (GPS 定位)，并用 GIS 系统软件绘出繁殖数量分布图；而对于一般航调种类只要记录其种类和数量及大致位置而不要求 GPS 定位。近些年来，航空调查应用

越来越广泛，越来越多的人使用小型无人机系统 (UAV) 对鸟类进行调查 (Jones *et al.*, 2006; Watts *et al.*, 2010; Chabot *et al.*, 2012)。

以利用小型无人机监测西洞庭湖水鸟为例(高大中, 2021), 展示了水鸟调查的样方选取、无人机在样方内的航线规划、图片合成效果、对图片的目视解译(图 7 和图 8)。样区面积以及边长的规划应在单块电池电量耗尽之前完成。将无人机在样区航线上拍摄的多张遥感影像拼合成一张完整样区图像, 再对图像信息进行解读。在水鸟研究的初步工作中, 目测解译是目前对遥感信息最直接的解读方法(黄娟琴, 2005)。可以根据鸟类的体长对应为不同数量的像素点, 以及色彩、纹理、阴影等, 将获取的鸟类图像分类整理建立分类标注表和分类标注图(表 2)。再对合成图片内的鸟类进行分类和数量的统计。

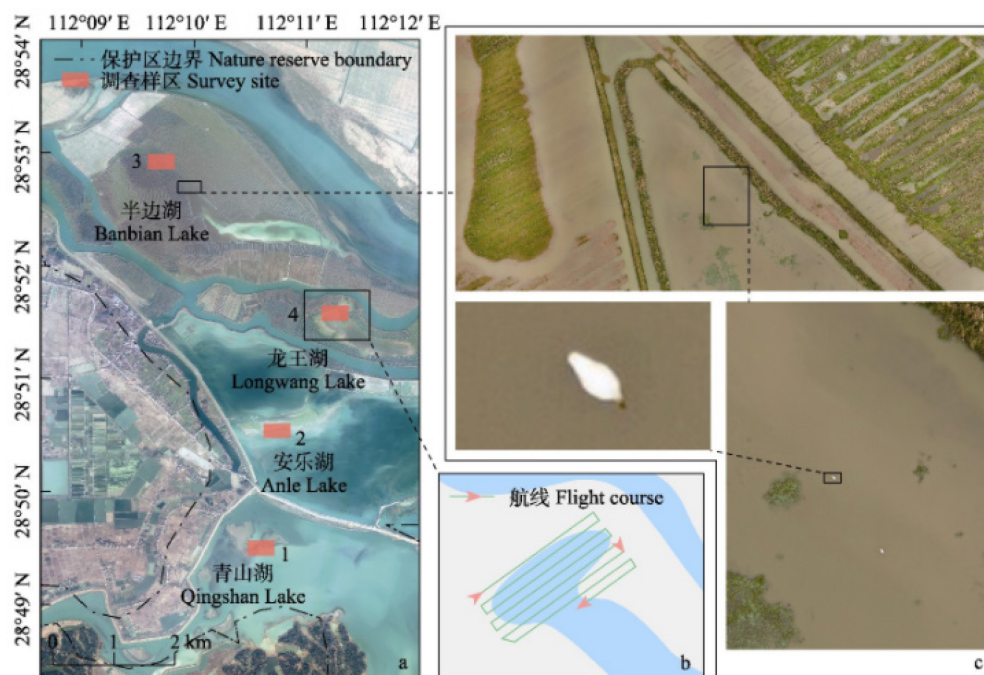


图 7. 样地位置、航线规划、图片合成效果图(引自高大中, 2021)。a.样区位置示意图; b.数据采集航线规划示意图; c.合成影像、原始图片、图像内的鸟类个体。

表 2: 鸟类图像分类标注表(引自高大中, 2021)

物种 Species	大小 Size (cm) ± 15 cm	类别 Classification	色彩及纹理特征 Color and texture features	分布特征 Distribution characteristics
苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>	90	大型鸟 Big-sized	体灰色, 脖颈部白色, 喙淡黄色, 成体及脖颈部细长, 长宽比约 3 : 1, 航片内个体长度约 75 像素 The body is grey, the neck is white, the beak is yellowish, the adult and the neck are long and slender, the aspect ratio is about 3 : 1, the individual length in the plane is about 75 pixels	独立, 不集群 Independently distributed, not clustered
大白鹭 <i>A. alba</i>	90	大型鸟 Big-sized	体纯白色, 喙淡黄色, 脖颈细长, 长宽比约 2 : 1, 航片内个体长度约 75 像素 The body is pure white, the beak is light yellow, the neck is long and slender, the length-width ratio is about 2 : 1, the individual length in the plane is about 75 pixels	集小群或独立 Set small group distribution or independent distribution
小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	110	大型鸟 Big-sized	体纯白或浅灰色, 较粗壮, 喙深黄色或黑色, 长宽比约 3 : 2, 航片内个体长度约 130 像素 The body is pure white or light gray, thicker, the beak is deep yellow or black, the aspect ratio is about 3 : 2, the individual length in the plane is about 130 pixels	集小群 Set small group distribution
凤头麦鸡 <i>Vanellus vanellus</i>	32	小型鸟 Small-sized	体绿色, 有金属光泽, 头部发白, 长宽比约 2 : 1, 航片内个体长度约 30 像素 The body is green, with metallic luster, the head is white, the aspect ratio is about 2 : 1, and the individual length in the film is about 30 pixels	较为疏松的小群 Relatively loose distribution of small groups
绿翅鸭或罗纹鸭 <i>Anas crecca</i> or <i>Mareca falcata</i>	40	中型鸟 Medium-sized	体棕黑色, 嘴部黑色, 颈短, 体呈粗纺锤形, 长宽比约 3 : 2, 航片内个体长度约 35 像素 The body is dark brown, the mouth is black, the neck is short, the body is thick and fusiform, the aspect ratio is about 3 : 2, the individual length in the plane is about 35 pixels	集大群分布 Set large group distribution



图 8. 鸟类图像人工解译标注图 (引自高大中, 2021)

6.2 航空调查方法的优缺点

1) 优点

- a. 调查过程快, 根据飞机的性能和续航能力, 可以长时间在空中拍摄影像, 调查所覆盖的面积是用其他方法调查的几倍, 甚至几十倍;
- b. 调查范围广, 特别适合湿地、悬崖陡坡等通达情况较差的鸟类调查。调查内容涉及水鸟的种类、数量和分布, 鸟类分布与湿地类型的关系等。

2) 缺点

- a. 水鸟种类识别难，由于航空调查时，飞机飞行速度较快，鸟类识别难度大，即使飞机悬空定点，也会因机身抖动较大，不易识别；
- b. 飞机发动噪声较大，会惊飞觅食或栖息的水鸟；
- c. 航空调查所花费的资金相对较高，包括维护、租金、电池、机师费用等。

6.3 航空调查注意事项

航空调查是否能准确地查清大面积范围内鸟类数量是值得商榷的，尽管调查范围和速度较快，但物种鉴定和识别目前还是比较耗费人力和困难。应用航空调查方法研究湿地鸟类时，要注意在调查过程中调查时间和日期、航线设计、航机选择、飞行高度等参数的确定，这些都将影响航空调查的质量和精度；在航空调查过程中要进行全程摄像，以提高航空调查的调查精度，以免在某一段的飞行距离是空白记录。此外，需多携带一些备用电池，以便及时更换电池。在高原飞行时，电池的性能还受温度和海拔的影响而降低，更需要注意电池的续航能力。

7. 声音监测法

7.1 声音监测法概述

声音监测法是继红外相机调查法后，另外一种无入侵性的鸟类调查方法，又称为被动声音监测 (passive acoustic monitoring)。近些年，国际上有关声音监测的方法快速发展，预期在近十年内会在鸟类调查方法中逐渐普及(Browning, 2017; Burivalova, 2019)。

声音监测法是依靠录音设备 **Soundscape** **AudioMoth** (图 9, <https://www.openacousticdevices.info/>) 或 **Handy Recorder**(图 10, <https://zoomcorp.com/en/us/handheld-recorders/h1n-handly-recorder/>) 对鸟类鸣叫声进行录制，从而对录制的鸣叫声进行多样性分析 (Hill, 2018)。常规的方法是对所录制的鸟类鸣叫声进行识别，从而得知特定时间段内(比如鸟类鸣叫高峰的晨昏时间)不同鸟类的组成情况，从而达到鸟类调查的目的。另外一种方式是不对录音进行物种识别，而是直接采用声景多样性指数(soundscap e diversity) 代替传统的鸟类多样性，对特定地区的鸟类资源进行快速评估(Gasc, 2013; Rajan, 2019; Dan and Sueur, 2020; Pérez - Granados,

2021)。除此之外将一个地区发生生物的群落结构信息和其他空间信息相结合，可以描述和探索生物地理学的相关性 (Lomolino, 2015)。



图 9. AudioMoth 录音设备和在加上保护套后在野外的安放



图 10. Handy Recorder 录音设备

7.2 声音搜集前必须考虑的问题

首先，需要调查所想研究的物种是否会发出声音，声音的特点是怎么样的，以及它是否可以被录音设备监测到，该物种所处的环境是否适合录音监测。其次，需要考虑对如何收集的数据进行分析，例如，应选用何种设备和技术对监测数据进行分析。如果不事先设计好声音分析的方法，则花费巨大资源采集到的信息将无法发挥作用 (Browning, 2017)。

7.3 声音数据采集方法

声音监测法主要利用自动录音机采集音频数据。自动录音机利用声学传感器采集环境中的声信号，然后将声波转化为电信号，再通过脉冲编码调制法将电信号量化，

转化为数字信号储存到存储介质中。自动录音机可按照用户设定的日程，在固定的时间自动进行声音的采集。

自动录音设备通常被布设在野外调查点，按照预先设定的启动时间和录音时长录制声音。需要根据研究对象有针对性地选择录音位点，比如以森林鸟类为研究对象时，可将录音设备布设在离地约 1.5 m 的树干上，并回避环境声音（如湍急溪流声、录音设备周围树枝摇摆的声音）的干扰。建议在采集录音的同时记录调查日的天气状况，可在后期数据处理时，根据需要识别和去除带有较大环境背景噪声（如雨声、风声）的录音，从源头上削弱噪声对后续音频数据分析处理的影响（赵莹，2020）。

随着技术的进步现在也开发了，例如 **Animal Sound Identifier (ASI)** 等工具，可以在野外对物种发声进行自动野外记录分类。且 ASI 具有比 monitor R 更高的查全率和准确率，可以在嘈杂的背景环境中高效记录物种的发声（Ovaskainen, 2018）。

7.4 数据分析处理方法

声波在最终被转换为数字信号之后，一般以时间-幅值图和声谱图的形式呈现。在声谱图中，横坐标表示时间，纵坐标表示频率，不同颜色深度表示振幅大小。声谱图能够清晰地反映频率、振幅随时间的变化关系，是声音调查分析中的重要手段（赵莹，2020）。下图是印第安纳州中部的湿地 15 分钟录音的声谱图（Pijanowski, 2011）。通过对声谱图的解读，记录出从一个景观中发出的生物、地球物理和人类活动的声音的集合，这些声音随着时间和空间的变化反应了重要的生态系统和人类活动。

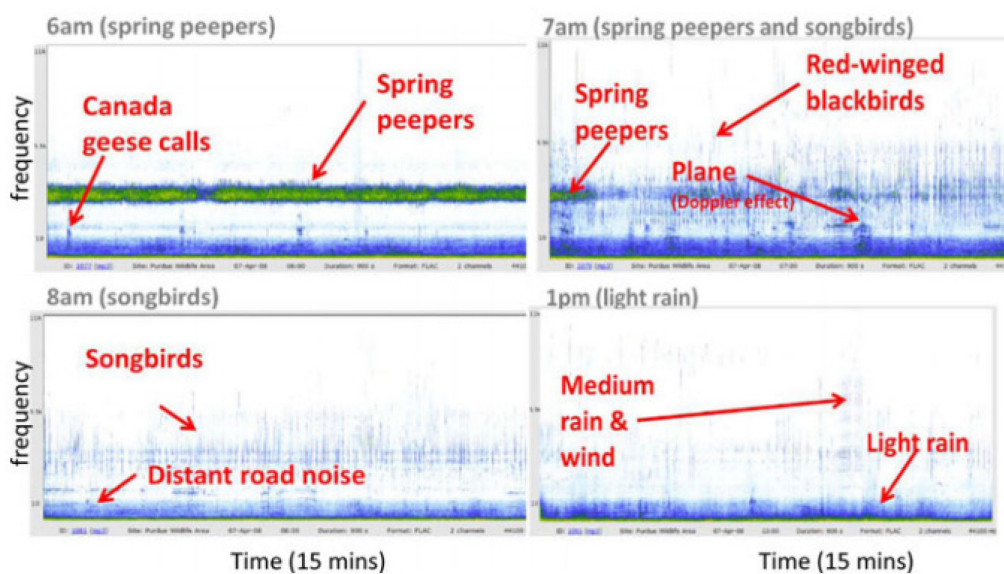


图 11. 在印第安纳中部湿地环境中的声谱图(引自 Pijanowski, 2011)

录音数据的处理,传统方法是手动扫描声谱图,人为判读录音中的目标声音。虽然随着技术的发展, *Kaleidoscope*、*ARBIMON II*、*Raven* 等嵌入基于机器学习算法的自动识别技术,能够极大地减少扫描音频数据集所用的时间,快速检测出发声物种,但是自动识别结果的准确性假阳性和假阴性比例较高。

另一种方法是声景生态学方法,关注的重点通常不是录音里的物种,而是用于录音数据的音频频域和时域的特征。这些特征可以使用声景指数(即声学指标)来描述。声学指标可以分为两大类:

- 1) α 声学指标:用于评估声景或动物群落的声音多样性或复杂性;图 12 是将 20 个录音设备放置在间隔 100 米 4×5 网格中,计算每个点的记录的鸟类声学复杂性指数。声学复杂性指数用于量化频谱复杂性,将声学复杂性(y 轴)的三维地图绘制在整个景观(x 轴和 z 轴)上。声景图反映出这片毛榉次生林中鸟类声音在空间和时间上的关系,进一步反映出鸟类在不同时间利用这片森林特定资源的情况(Pijanowski *et al.*, 2011)。
- 2) β 声学指标:用于评估不同动物群落间或同一群落不同时段间的声音多样性的差异。Buxton 等统计了用于不同目的的 60 余种声学指标。这些指标大部分可在 R 语言环境中(比如软件包 *tuneR*、*seewave*, *soundecology*) 实现分析。

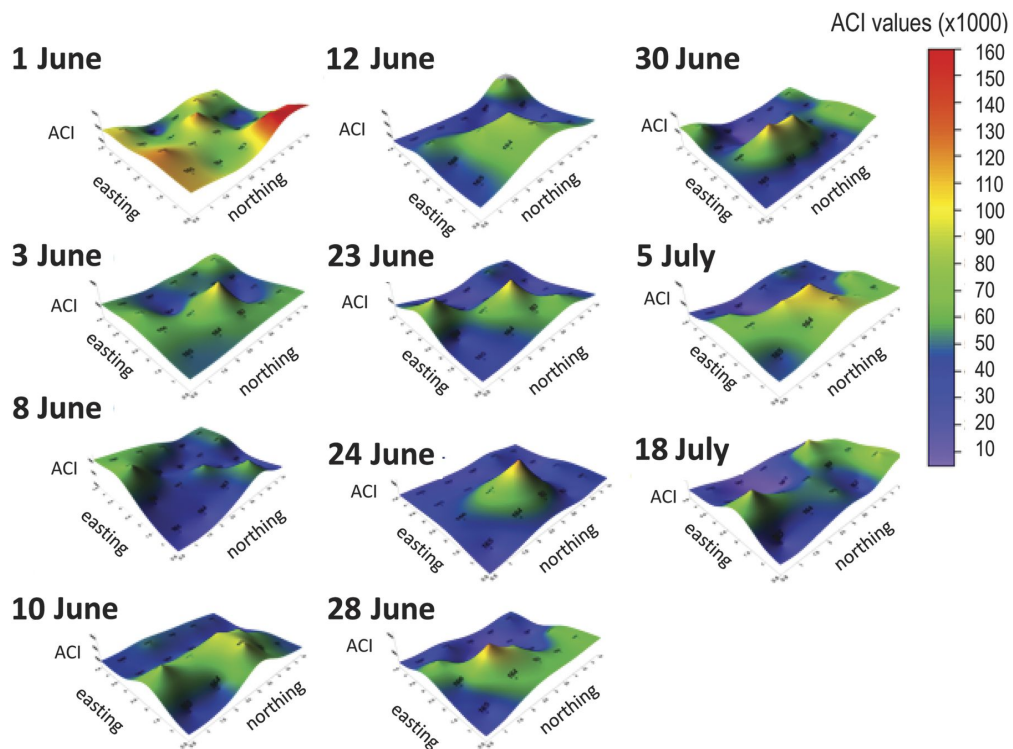


图 12. 毛榉次生林中鸟类声学研究的声景图(引自 Bryan, 2011)

7.5 声音监测法的优点

相较于传统的基于多样性测量的繁琐方法，声音监测具有简单、易重复和操作自动化等优势，可以记录几百米外动物的叫声 (Rajan, 2019)。群落声多样性 (Community Acoustic diversity, CAD) 在许多情况下可能比其他指标更容易测量。随着物种丰富度的增加，声学多样性可能会增加。对群落声多样性的分析可以在一定程度上揭示鸟类系统发育的多样性和鸟类群落的功能多样性 (Gasc, 2013)。而且近年来电池寿命的延长、内存介质容量的增大等技术上的进步，提高了录音设备的野外工作时长，满足了声景生态学大尺度、长时期、自动化的声学监测需求。

7.6 声音监测法的缺点

声音监测法也有自身的不足，比如受到监测时常和存储的限制，需要大量的精力识别音频中的物种。但是随着深度学习能力的不断提高，音频中的物种识别以后不会成为障碍 (Ovaskainen, 2018)。不过与传统的样线法或样点法结合，将是目前比较可行的调查手段 (Doser, 2021)。

对上述鸟类调查方法的评价

开展鸟类资源的调查和监测工作，了解种群数量、群落组成和变化趋势，是制定鸟类保护对策以及评价保护策略有效性的重要依据。选择合适的调查方法是开展资源调查和监测工作的基础。本文对样线法、样点法、标图法、分区直接计数法、红外相机调查法、无人机调查法和声音监测法这7种鸟类调查方法进行了简要的介绍。

目前大部分对于鸟类的调查研究是在森林、草地、湖面、湿地上开展的。首先应依据调查区域的生境对调查方法进行选择。对于森林中的鸟类可以选择样线法、样点法、标图法、红外相机调查法和声音监测法。其中样线法和样点法是最常采用的鸟类调查方法。与其他鸟类调查方法相比，在对相同面积的区域进行调查时，样线法和样点法所花费的调查时间较少(蔡音亭, 2010)。分析样线法和样点法所获得的长期调查资料也可以了解鸟类种群数量的变化趋势(Verner, 1985)。样线法适宜于在广阔的、郁闭度低和较均质的栖息地和区域内进行鸟类调查，适宜于调查活动性强、个体较大或较显眼、易受惊的种类，且在种群密度和物种丰富度较低的情况下使用，以及在可进入性较好的栖息地内使用，并可较好地用于鸟类与栖息地关系的研究。样点法较适于在比较茂密的栖息地和种群密度及种类丰富度高的区域开展鸟类调查。由于该方法可使调查者有更多的时间去观察鸟类，并消除了调查者行走速度的影响，这不仅可增加鸟类的发现率，而且还使该方法较适于调查隐藏性较好、胆怯和具备躲避性的鸟类也同样适于在某些特殊地区(如多岩地带等环境)开展鸟类数量调查。

标图法虽然能准确获得调查样地内的鸟类的种群数量和密度，是一种准确度高、信息丰富的鸟类数量调查方法。但这种方法非常耗时、费钱且效率低。标图法不宜在大尺度范围进行鸟类数量调查。如果使用标图法也应该将其与寻巢、无线电遥测、雾网等方法结合使用(郑光美, 2017)。

目前红外相机法和声音监测法可以作为森林鸟类调查的有效补充调查方法。红外相机对鸟类的干扰性小，并且可以在不同天气下、全天任何时段持续对鸟类的监测，可以拍摄到隐藏性高和易受惊的鸟类，尤其对林下活动的鸟类的观测有突出作用，获取的影像资料还便于存档检索。红外相机拍摄到的数据在“标记-重捕”模型的理论框架下，能够对鸟类的种群大小和密度进行估算，但这需要研究者通过照片辨别出同种鸟类的不同个体(李晟, 2014)。虽然红外相机法在调查鸟类多样性时候也有自己的突出优势，但相对于样线法和样点法在同一片区域进行调查的时候，记录到的物种数量是远远低于样线法和样点法的(张倩雯, 2018)。红外相机拍摄到的鸟类的数量和鸟类的身体大小呈正相

关，也就是红外相机在拍摄体型较小的鸟的时候不占优势。声音监测法是最近几年新起的鸟类调查方法。既可以通过对音频的解读直接分析出鸣叫的鸟类物种，也可以运用声景学的方法通过声景多样性分析方法直接分析该地区鸟类物种多样性。在郁闭度高的森林里声音监测法很好的解决了视野被遮挡无法观测到鸟类的问题，但是由于很多分析技术和方法现在尚未成熟，所以对所收集信息的后处理过程可能较为复杂。

在调查水鸟和草原鸟类的时候，可以选择样线法、分区直数法和无人机调查法。样线法可以选择步行调查或者乘船调查，优点同上面介绍样线法调查森林鸟类。步行调查的时候适用于在水岸边、湖滩上进行。缺点是当水面较为广阔的时候，样线法覆盖的调查区域面积范围较小，可能会遗漏远离湖岸边的鸟。并且在水岸的部分地区行走较为困难，在调查时需要注意安全。乘船调查虽然可以到达步行无法到达的水域，但是船只行驶可能会使调查的鸟类受惊，所以在乘船调查时尽量不要离鸟类太近。

分区直数法可以对整个调查区域的鸟类进行较详细的统计，但是要注意分区的区域界线，不要造成区域重复计数，或者有区域未覆盖的情况。

无人机成本低、易于携带、操作简单、飞行稳定，能精确遵循预定路线进行调查，同时可携带包括各种形式的遥感设备进行多种数据采集。当无人机在水面上方一定高度的时候，几乎不会对观测的鸟类产生影响，可以对调查区域的物种进行较好的监测，还能减轻长时间使用光学仪器所造成的视觉疲劳，克服传统野外调查方法周期长、时效差、难以大面积覆盖等缺点，从数据采集和处理等多方面推动鸟类多样性研究，提供强有力的技术支撑。但无人机调查现在所面临的问题是无人机续航时间短，很难一次性完成大面积长飞行样线的调查。而且无人机在工作的过程中，容易受到风力因素的影响，比如在调查的过程中被迫降低飞行高度，或者强制返航(郭庆华, 2016)。为了减少对拍摄对象的影响，无人机往往需要在距离地面一定高度进行拍摄。受到像素的限制，往往得到的拍摄对象是较为模糊的影像，需要通过实际情况进行解读，外形相似的物种可能无法得到准确辨认。

总之，每种鸟类调查方法都有不同的调查效果，且有各自的优势和特点。因此如果想要对调查区域的鸟类多样性进行充分彻底的调查，仅用单一的调查方法是不够的，必须结合多种调查方法、用多种手段和技术才能达到较理想的效果。

致谢

本文得到“第二界青藏高原科学考察与研究”国家自然科学基金项目(STEP No.2019QZKK0501)的支持。感谢中国科学院昆明动物研究所吴飞和西南林业大学罗旭对本文提出的宝贵意见和建议。

参考文献

1. 蔡音亭,干晓静,马志军.(2010).[鸟类调查的样线法和样点法比较:以崇明东滩春季盐沼鸟类调查为例](#)[J].*生物多样性* 18(01):44-49.
2. 陈道剑.(2019).[广东省森林鸟类的样线有效宽度与分布格局](#)[D].广西师范大学.
3. 陈佳萍,王东,吴彤,赛青高娃,杨欣,连新明.(2021).[青海省长江源区班德湖鸟类群落多样性研究](#)[J].*湿地科学* 19(02): 232-238.
4. 李晟,王大军,肖治术,李欣海,王天明,冯利民,王云.(2014).[外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景](#). *生物多样性* 22(06): 685-695.
5. 刘鹏,付明霞,齐敦武,宋心强,韦伟,杨琬婧,陈玉祥,周延山,刘家斌,马锐,余吉,杨洪,陈鹏,侯蓉.(2020).[用红外相机监测四川大相岭自然保护区鸟兽物种多样性](#)[J].*生物多样性* 28(07):905-912.
6. 高大中,林海,林乐乐,崔国发.(2021).[利用小型无人机监测西洞庭湖水鸟的可行性探讨](#)[J].*动物学杂志* 56(01): 100-110.
7. 黄娟琴. (2005).[杭州市区湿地资源遥感调查与监测研究](#)[D]. 浙江大学.
8. 郭庆华,吴芳芳,胡天宇.(2016).[无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望](#) [J].*生物多样性* 11:1267-1268.
9. 刘辉,姜广顺,李惠.(2015).[北方冬季有蹄类动物 4 种数量调查方法的比较](#)[J].*生态学报* 35(09): 3076-3086.
10. 王燕,何兴成,张尚明玉,张怡田,何倩芸,王贝爻,王彬,宋心强,付明霞,朱敏,吴永杰.(2021).[四川荥经大相岭繁殖期鸟类多样性与群落结构](#)[J]. *四川动物* 40(03): 344-360.
11. 吴飞,杨晓君.[样点法在森林鸟类调查中的运用](#)[J].(2008).*生态学杂志* 27(12): 2240-2244.
12. 许龙,张正旺,丁长青.(2003).[样线法在鸟类数量调查中的运用](#).*生态学杂志* (05): 127-130.

13. 肖治术,李欣海,王学志,周岐海,权锐昌,申小莉,李晟.(2014).[探讨我国森林野生动物红外相机监测规范](#). *生物多样性* 22(06):704-711.
14. 余建平,王江月,肖慧芸,陈小南,陈声文,李晟,申小莉.(2019).[利用红外相机公里网格调查钱江源国家公园的兽类及鸟类多样性](#). *生物多样性* 27(12):1339-1344.
15. 张小伟,何欢,王柯.(2020).[可变距离样线法在浙闽沿海丘陵单元森林鸟类调查中的应用](#). *华东森林经理* 34(02):31-34.
16. 周雯慧,朱京海,刘合鑫,刘冬焯,问鼎.(2018).[湿地鸟类调查方法概述](#). *野生动物* 039(003):588-593.
17. 赵莹,申小莉,李晟,张雁云,彭任华,马克平.(2020).[声景生态学研究进展和展望](#). *生物多样性* 28(7): 806.
18. 郑光美. (1995). [鸟类学](#). 北京:北京师范大学出版社 498-512.
19. 张倩雯,龚粤宁,宋相金,王新财,杨昌腾,束祖飞,邹发生.[红外相机技术与其他几种森林鸟类多样性调查方法的比较](#)[J]. *生物多样性*,2018,26(03):229-237.
20. Abd-Elrahman, A., Pearlstine, L. and Percival, F. (2005). [Development of pattern recognition algorithm for automatic bird detection from unmanned aerial vehicle imagery](#). *Surveying and Land Information Science* 65(1): 37-45.
21. Anderson, D.R., Burnham, K.P. and Laake, J.L. (1993). [Distance sampling: estimating abundance of biological populations](#). *Chapman & Hall, London, United Kingdom*.
22. Bibby, C.J., Burgess, N.D., Hill, D.A., Hillis, D. M. and Mustoe, S. (2000). [Bird census techniques](#). *Elsevier*.
23. Browning, E., Gibb, R., Glover-Kapfer, P. and Jones, K. E. (2017). [Passive acoustic monitoring in ecology and conservation](#). *WWF Conservation Technology Series* 1(2).
24. Buckland, S.T., Anderson, D.R., Burnham, K.P. and Laake, J.L. (1993). Distance sampling: estimating abundance of biological populations. *London: Chapman & Hall* 446.
25. Burivalova, Z., Game, E.T., Butler, R.A. (2019). [The sound of a tropical forest](#). *Science* 363(6422): 28-29.

26. Burnham, K.P., Anderson, D.R. and Laake, J.L. (1980). [Estimation of density from line transect sampling of biological populations.](#) *Wildlife Monographs* 72: 1-202.
27. Chabot, D. and Bird, D.M. (2012). [Evaluation of an off-the-shelf unmanned aircraft system for surveying flocks of geese.](#) *Waterbirds* 35(1): 170-174.
28. Cutler, T.L. and Swann, D.E. (1999). [Using remote photography in wildlife ecology: a review.](#) *Wildlife Society Bulletin* 571-581.
29. Doser, J.W., Finley, A.O., Weed, A.S. and Zipkin, E.F. (2021). [Integrating automated acoustic vocalization data and point count surveys for estimation of bird abundance.](#) *Methods in Ecology and Evolution* 00: 1– 10.
30. Fuller, R.J. and Langslow, D.R. (1984). [Estimating numbers of birds by point counts: how long should counts last?](#) *Bird study* 31(3): 195-202.
31. Gasc, A., Sueur, J., Jiguet, F., Devictor, V., Grandcolas, P., Burrow, C., Depraetere, M. and Pavoine, S. (2013). [Assessing biodiversity with sound: Do acoustic diversity indices reflect phylogenetic and functional diversities of bird communities?](#) *Ecological Indicators* 25: 279-287.
32. Hill, A.P., Prince, P., Covarrubias, E.P., Doncaster, C.P., Snaddon, J.L. and Rogers, A. (2018). [AudioMoth: Evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and the environment.](#) *Methods in Ecology and Evolution* 9(5): 1199-1211.
33. Jones, G., Pearlstine, L. and Percival, H. (2006). [An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research.](#) *Wildlife Society Bulletin* 34(3): 750-758.
34. Lomolino, M.V., Pijanowski, B.C., Gasc, A. (2015). [The silence of biogeography.](#) *Journal of Biogeography* 42(7): 1187-1196.
35. O'Connell, A. F., Nichols, J. D. and Karanth, K. U. (2010). [Camera traps in animal ecology: methods and analyses.](#) *Springer Science & Business Media.*
36. Ovaskainen, O., Moliterno de Camargo, U. and Somervuo, P. (2018). [Animal Sound Identifier \(ASI\): software for automated identification of vocal animals.](#) *Ecology letters* 21(8): 1244-1254.

37. Pérez-Granados, C. and Traba, J. (2021). [Estimating bird density using passive acoustic monitoring: a review of methods and suggestions for further research.](#) *Ibis*.
38. Pijanowski, B.C., Villanueva-Rivera, L.J., Dumyahn, S.L., Almo, F., Krause, B. L., Napolitano, B.M., Gage, S.H. and Nadia, P. (2011). [Soundscape ecology: The science of sound in the landscape.](#) *BioScience* 61(3): 203–216.
39. Rajan, S.C., Athira, K., Jaishanker, R., Sooraj, N.P. and Sarojkumar, V. (2019). [Rapid assessment of biodiversity using acoustic indices.](#) *Biodiversity and Conservation* 28(8): 2371-2383.
40. Richard, B.H. and Kenneth, P.B. (2002). [关于使用样线法估计种群密度.](#) *动物学报* 06: 812-818.
41. Dan, S., and Sueur, J. (2020). [Ecoacoustics: acoustic sensing for biodiversity monitoring at scale.](#) *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 6(3): 217-219.
42. Thompson, F. R. and Schwalbach, M. J. (1995). [Analysis of sample size, counting time, and plot size from an avian point count survey on Hoosier National Forest, Indiana.](#) In: Ralph C.J., Sauer J.R. and Droegbie S. (eds), *Monitoring Bird Populations by Point Counts* Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-149. USDA Forest Serv. Pac. Southwest Res. Sta., Albany, California, USA, pp. 45-48.
43. Watts, A.C., Perry, J.H., Smith, S.E., Burgess, M.A., Wilkinson, B.E., Szantoi, Z., Ifju, P.G. and Percival, H.F. (2010). [Small unmanned aircraft systems for low-altitude aerial surveys.](#) *Journal of Wildlife Management* 74(7): 1614-1619.
44. Pijanowski B C, Farina A, Gage S H, *et al.* (2011). [What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science.](#) *Landscape ecology* 26(9): 1213-1232.
45. Vener, J. and Ritter, L.V. (1985). [A comparison of transects and point counts in oak-pine woodlands of California.](#) *The Condor* 87(1): 47-68.