

# 无人机遥感调查黄河源玛多县岩羊数量及分布

郭兴健<sup>1,2</sup>, 邵全琴<sup>1,2</sup>, 杨帆<sup>1,2</sup>, 李愈哲<sup>1</sup>, 汪阳春<sup>3</sup>, 王东亮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 101407; 3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:** 本研究于2017年利用无人机航拍调查对黄河源玛多县县域内的岩羊种群数量进行了估算, 并对其分布规律进行了研究。无人机航拍共获取影像23784张, 有效面积326.6 km<sup>2</sup>, 通过目视解译, 获取样带内的岩羊种群数量为203只, 种群密度为0.6215只/km<sup>2</sup>。通过推算, 得到玛多县岩羊种群数量为8968只。对玛多县岩羊分布位置与环境因子的分析结果显示: 岩羊偏好于选择海拔为4100~4200 m、距公路大于3 km、距悬崖峭壁200 m以内的区域活动。本研究利用无人机航拍样带调查估算黄河源玛多县岩羊种群数量与密度, 并结合ArcGIS软件对其生境进行分析, 将3S技术与野生动物调查相结合, 为青藏高原地区大型野生动物相关研究提供了新思路。

**关键词:** 地理信息系统; 种群数量估算; 无人机遥感; 岩羊; 黄河源玛多县

岩羊 (*Pseudois nayaur*) 被世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature Resources, IUCN) 收录为无危 (Least Concern, LC) 物种<sup>[1]</sup>, 在我国重点保护野生动物名录中, 被列为国家二级保护动物。岩羊是中国数量最多的有蹄类之一, 也是青藏高原主要的偶蹄类动物, 对维持青藏高原的生态系统稳定性与物种多样性具有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前, 对岩羊或其他野生大型食草动物种群数量、生态学特征、生境选择与习性等的研究工作大多采用样线法。Achyuty等<sup>[3]</sup>和Aryal等<sup>[4]</sup>采用样线法对尼泊尔巴格隆地区以及野马区和马南区的岩羊数量进行了调查, 王小明等<sup>[5]</sup>、刘振生等<sup>[6]</sup>利用样线法对贺兰山东坡 (宁夏贺兰山国家级自然保护区) 和西坡 (内蒙古贺兰山国家级自然保护区) 境内岩羊种群数量与分布进行了调查, 初红军等<sup>[7]</sup>利用截线取样法对卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴 (*Equus hemionus*) 和鹅喉羚 (*Gazella subgutturosa*) 种群数量进行了估算, 骆颖等<sup>[8]</sup>利用直接观察法对贺兰山自然保护区内的岩羊与马鹿 (*Cervus elaphus*) 的生境选择差异进行了研究, 张明春等<sup>[9]</sup>利用样线法对贺兰山自然保护区内马鹿的分布与集群特征进行了研究。随着地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 技术的发展, 利用GIS对野生动物生境进行研究逐渐成为热点<sup>[10]</sup>。Phillips等<sup>[11]</sup>与Brotons等<sup>[12]</sup>利用栖息地适宜性模型, 与GIS技术结合, 分别研究了加泰罗尼亚地区与北美地区鸟类的生

收稿日期: 2018-11-06; 修订日期: 2019-01-30

基金项目: 青海省重大科技专项 (2015-SF-A4-1); 国家自然科学基金项目 (41571504); 国家重点研发计划 (2017YFC 0506501)

作者简介: 郭兴健 (1994-), 男, 辽宁抚顺人, 博士研究生, 研究方向为地理信息系统应用。

E-mail: guoxj.15b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 邵全琴 (1962-), 女, 江苏武进人, 博士, 研究员, 研究方向为GIS应用、陆地生态系统综合监测与评估指标体系构建、区域环境变化探测与模拟等。E-mail: shaoqq@igsnrr.ac.cn

境适宜性。

无论对野生动物种群数量与密度的研究还是结合 GIS 技术对野生动物生境的研究, 获取动物分布点最常用的方法均为样线法。而在研究中利用样线法获取可靠的动物分布点或密度估计必须满足三个最重要的假设: (1) 调查样线在研究区内是随机布设的; (2) 在观察者对观察目标到中线的距离进行测量时, 观察目标不会有影响观测结果的移动; (3) 可以准确测得观察目标到中线的距离<sup>[13-15]</sup>。在野外调查中, 受环境、地形等客观因素影响, 很难完全达到上述三点假设。除此之外, 完成全部样线调查之前调查目标在家域范围内移动造成的重复计数、动物群之间的相互遮挡、动物对调查人员的逃逸行为等都会对调查结果的准确性产生影响。

近年来, 随着科学技术的不断发展, 新观研技术与新仪器设备不断应用到野生动物数量调查研究中, 使得调查技术朝着更加经济、快速、有效和精确的方向发展。无人机具有体积小、质量轻、噪音小、对监测对象干扰小、操作简单、灵活性高、作业周期短等特点<sup>[16-17]</sup>, 可以在短时间内完成较大面积的野生动物调查任务, 对观察对象几乎没有影响且可以准确地记录每一个动物出现点。虽然无人机起降点受到道路通达性的限制, 但是在样带内部可以完全不受地形与环境的影响。本研究利用无人机航拍样带调查估算黄河源玛多县岩羊种群数量与密度, 并结合 ArcGIS 软件对其生境进行分析, 将 3S 技术与野生动物调查相结合, 为青藏高原地区大型野生动物相关研究提供了新思路。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

玛多县隶属果洛藏族自治州, 位于青海省南部, 巴颜喀拉山北麓, 地处黄河源区, 境内河流密集, 水资源丰富, 素有“千湖之县”之称。全县共有大小湖泊 4077 个, 其中扎陵湖、鄂陵湖为黄河源头, 同时为青海省最大的淡水湖。其地理位置介于  $96^{\circ}50' \sim 99^{\circ}20'E$ 、 $33^{\circ}50' \sim 35^{\circ}40'N$ , 县域面积  $25300 \text{ km}^2$ , 南北宽约  $207 \text{ km}$ , 东西长约  $228 \text{ km}$ 。海拔介于  $3902 \sim 5243 \text{ m}$ , 地形起伏不大, 相对平坦, 西南高、东北低, 植被类型主要以草地为主。为了保护三江源地区生态系统的完整性与原始性, 我国于 2016 年建立了三江源国家公园, 其中黄河源园区位于玛多县境内。

### 1.2 无人机调查

本研究采用无人机航拍调查, 根据玛多县县域范围内高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) + 杂类草 (*Subordinate grass*) 草地型、高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) + 紫花针茅 (*Stipa purpurea*) 草地型、禾叶风毛菊 (*Grassleaf saussurea*) 草地型、紫花针茅 (*Stipa purpurea*) + 杂类草 (*Subordinate grass*) 草地型、藏嵩草 (*Kobresia humilis*) + 苔草 (*Carex thibetica*) 草地型、藏嵩草 (*Kobresia humilis*) 草地型、高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 草地型、赖草 (*Legmus Hochst*) 草地型与紫花针茅 (*Stipa purpurea*) 草地型等 9 种草地类型的面积, 采用系统抽样的方法, 同时使调查样带内包含的土地覆被类型、海拔高度等各个环境因子的信息尽可能丰富并考虑无人机起降点可达性的条件下, 共布设了 14 条调查样带。实际调查过程中由于受无人机起降场地、起降点通达性等因素的影响, 无人机实际调查样带如图 1 所示。

2017 年 4 月 9 日至 18 日, 在玛多县展开无人机航拍调查, 完成了 14 条样带的航拍工

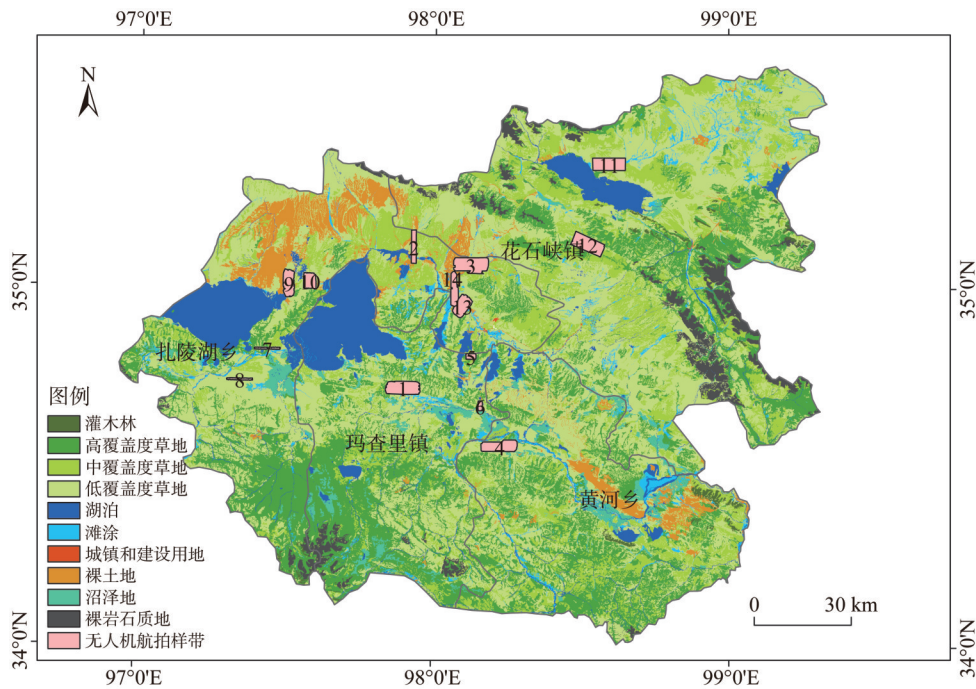


图1 玛多县无人机调查飞行样带

Fig. 1 UAV flight path over Maduo county

作，为使航拍数据包含岩羊的影子信息便于辅助解译，航拍时间均选择在7:00-11:00之间。航拍由两款无人机共同完成：第一款为中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所自主研发的电动固定翼无人机；第二款为深圳飞马机器人科技有限公司F1000电动固定翼无人机。为了避免野生动物在家域范围内移动给航拍解译工作造成重复判读的影响，每条样带均由单一架次拍摄完成。

无人机野外航拍调查共获得23784张影像，有效拍摄面积356 km<sup>2</sup>，有效利用面积326.6 km<sup>2</sup>，符合国家林业局发布的“全国陆生野生动物资源调查与监测技术规范”中抽样强度“草原区不低于2.0%，草甸区不低于1.0%”的规定。航拍相片实际分辨率为4~7 cm，平均分辨率为5 cm，可以清晰地识别岩羊个体（图2）。具体无人机系统及影像参数见表1、表2。

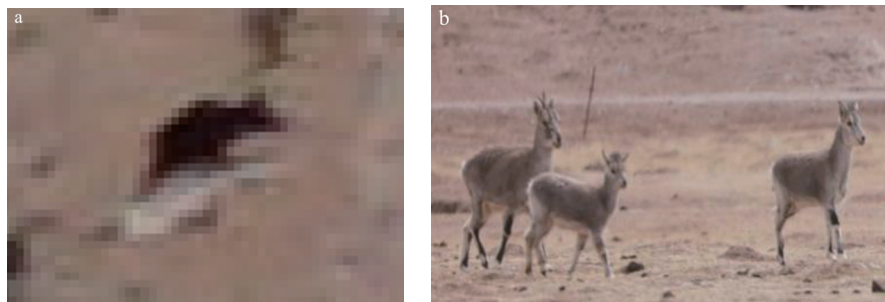


图2 无人机航拍岩羊个体（左）与地面拍摄岩羊外观形态（右）

Fig. 2 Blue sheep individual photographed by UAV (left) and on the ground (right)

表1 无人机系统参数  
Table 1 UAV system parameters

| 参数     | 电动固定翼无人机              | 飞马F1000固定翼无人机 |
|--------|-----------------------|---------------|
| 翼展     | 1.6 m                 | 1.6 m         |
| 有效载荷   | 0.5 kg                | 1.0 kg        |
| 最大起飞重量 | 3 kg                  | 3 kg          |
| 发动机    | 电动                    | 电动            |
| 续航时间   | 90 min                | 60 min        |
| 飞行速度   | 72 km/h               | 60 km/h       |
| 相机型号   | ILCE-5100             | ILCE-5100     |
| 集成相机数量 | 2个（两个相机夹角130°，重叠度50%） |               |
| 焦距     | 30 mm                 | 30 mm         |
| 大小     | 6000×4000 像素          | 6000×4000 像素  |

获取的无人机影像采用两台高性能工作站进行拼接，并使用五台电脑进行人工目视解译工作。影像拼接使用Pix4Dmapper、飞马智拼图与LiMapper软件，目视解译工作使用ArcGIS软件。

1.3 种群密度与数量估算方法

种群密度计算采用Jolly方法2，该方法广泛应用于轻型飞行器样带调查的数据分析，具体公式如下：

$$\hat{R} = \frac{\sum_1^n y_i}{\sum_1^n z_i} \tag{1}$$

式中： $\hat{R}$ 是样带区域调查目标的种群密度； $y_i$ 是样带内的动物数量； $z_i$ 是样带面积； $n$ 是样带数量。

玛多县全县岩羊的种群数量通过调查样带内草地类型与全县域内各草地类型的面积关系推算得到，计算方法如下：

$$P = \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{A_i} \times P_i \tag{2}$$

式中： $P$ 为估算的玛多县全县岩羊种群数量； $m$ 为航拍调查分层抽样层数，即草地类型数量； $a_i$ 为第*i*种草地类型在样带内的面积； $A_i$ 为第*i*种草地类型在全县内的面积； $P_i$ 为调查样带内第*i*种草地类型上的岩羊数量。

通过草地类型进行玛多县种群数量估算，扣除了非植被类型区域（如裸石石砾地、水体、冰川、城镇、高速和国道道路等）的面积，考虑了人类干扰对岩羊分布的影响，避免岩羊种群数量的过高估计。

1.4 无人机航拍同步地面调查

岩羊生活在地势陡峭的区域，与无人机同步的地面调查难以开展。本研究从无人机遥感数据中同时解译了另一种与岩羊体型相似的大型野生食草动物——藏野驴（*Equus*

表2 无人机影像参数  
Table 2 UAV image parameters

| 参数      | 参数值                   |
|---------|-----------------------|
| 设定航高    | 250 m                 |
| 拍摄架次    | 14次                   |
| 照片数量    | 23784个                |
| 飞行覆盖总面积 | 350 km <sup>2</sup>   |
| 有效利用面积  | 326.6 km <sup>2</sup> |
| 设定分辨率   | 0.05 m                |



kiang), 通过与无人机调查同步对藏野驴的地面调查数据检验无人机遥感解译精度, 从侧面对岩羊的解译精度进行验证。

地面调查采用直接计数法, 在无人机航拍样带范围内同步进行, 使用GPS手持机、HCIYET HT-1500A测距仪和罗盘对藏野驴进行测量, 并记录以下变量: 集群大小、地理坐标、到调查路线的距离与角度、调查时间、路线长度。为了减少距离对观察造成的误差, 本次调查只记录调查路径两侧500 m以内的范围。

1.5 环境因子数据

居民地、水源地与公路数据均来自2015年2 m分辨率的高分遥感影像解译得到的玛多县土地利用数据, 由青海省生态环境遥感中心提供; 30 m×30 m分辨率地面数字高程模型(DEM)数据来自ASTER GDEM; 坡度数据由DEM数据在ArcGIS软件中通过3×3窗口计算得到; 悬崖峭壁分布数据由遥感影像结合DEM数据解译得到; 草地类型数据来自于中国1:100万植被类型数据集; 30 m×30 m分辨率的植被覆盖度数据由TM影像解译的NDVI数据计算得到, 由中国测绘科学研究院提供。

2 结果分析

2.1 调查样带岩羊种群数量

2.1.1 玛多县调查样带中岩羊数量与种群规模

采用目视解译的方式, 根据颜色、色调、纹理、大小、形状、图案跟阴影七个要素对岩羊个体进行识别和计数。14条样带中有两条发现岩羊个体(11号、12号), 共发现岩羊个体203只, 样带内密度为0.6215只/km<sup>2</sup>(表3)。

共见岩羊12群, 平均每群17只。其中, 未见单个体群, 规模2~10只的共6群, 占总群数的50%, 占总头只数的15.27%; 11~20只的共3群, 占总群数的25%, 占总头只数的25.62%; 21~50只的共2群, 占总群数的16.67%, 占总头只数的27.47%; 50只以上的共1群, 占总头只数的27.59%(表3)。

2.1.2 岩羊无人机调查解译精度验证

本研究通过与无人机调查同步对藏野驴的地面调查数据检验无人机遥感解译精度, 从侧面对岩羊的解译精度进行验证。

2017年4月9日、15日、16日的地面调查路线在无人机样带覆盖范围内同步进行。其中, 4月9日的地面同步调查与无人机调查时间差小于1小时, 地面调查发现三群藏野驴分别为31只、51只、30只, 总计112只; 无人机调查发现三群藏野驴, 分别为28只、48只、31只, 共计107只。两者之间的差异较小, 无人机调查结果相比地面调查结果偏差为-9.68%、-5.88%和+3.33%。整体无人机调查结果相比地面调查偏差为-4.46%(图3)。

4月15-16日的地面同步调查与无人机调查时间差小于1小时, 但地

表3 2017年玛多县无人机调查样带岩羊种群规模统计  
Table 3 Population size of blue sheep in transects surveyed by UAV in Maduo county in 2017

| 种群规模/只 | 岩羊         |             |
|--------|------------|-------------|
|        | 群数/群       | 头只数/只       |
| 1      | 0 (0)      | 0 (0)       |
| 2~10   | 6 (50%)    | 31 (15.27%) |
| 11~20  | 3 (25%)    | 52 (25.62%) |
| 21~50  | 2 (16.67%) | 64 (27.47%) |
| ≥51    | 1 (8.33%)  | 56 (31.53%) |
| 共计     | 12 (100%)  | 203 (100%)  |

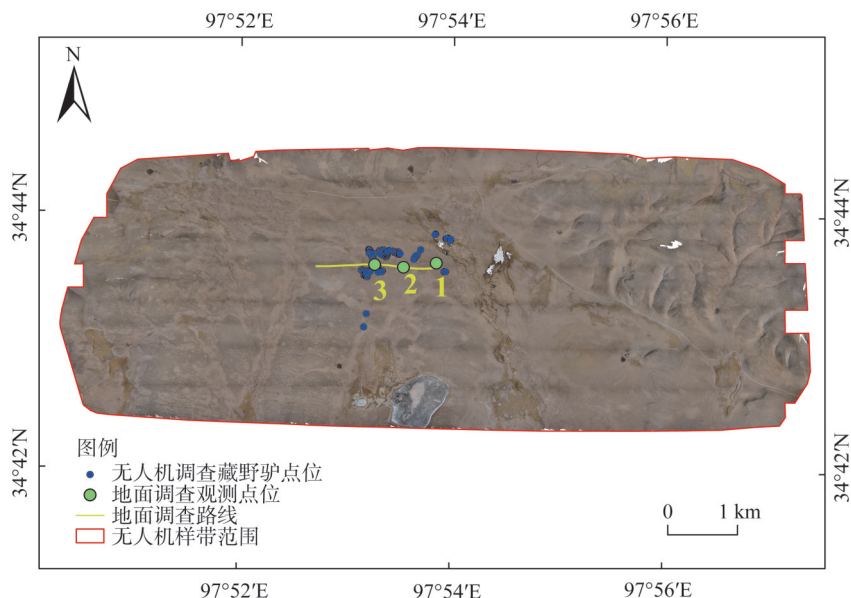


图3 2017年4月9日无人机调查样带与地面同步调查路线

Fig. 3 Ground survey transect and aerial survey transect on April 9th, 2017

面和无人机调查均未发现动物, 无人机调查结果与地面调查结果一致。

## 2.2 玛多县岩羊种群数量估算

基于无人机样带调查结果, 在紫花针茅草地型、高山嵩草草地型与紫花针茅+杂类草草地型中发现了岩羊分布, 根据玛多县县域这三种草地类型与样带内的面积比例, 推算玛多县全县岩羊种群数量约为8968只。

## 2.3 玛多县岩羊对环境因子的选择性

为了进一步揭示距农村居民点距离、距公路距离、距水源距离、植被盖度、坡度、海拔高度与植被类型等环境因子对岩羊栖息地选择的影响, 了解岩羊的生态习性与行为特点, 采用Vanderloeg和Scavia的选择系数  $W_i$  和选择指数  $E_i$  来反映岩羊选择生境时对上述环境因子的偏好或回避<sup>[18]</sup>, 其计算方法如下:

$$W_i = \frac{(r_i/p_i)}{\sum (r_i/p_i)} \quad (3)$$

$$E_i = \frac{(W_i - 1/n)}{(W_i + 1/n)} \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为选择系数;  $E_i$  为选择指数;  $i$  指某一环境因子特征;  $r_i$  为岩羊选择的具有  $i$  特征的样方数;  $p_i$  指样带内具有  $i$  特征的总样方数;  $n$  指某一环境因子特征的等级数 ( $n=1, 2, \dots, n$ );  $E_i$  介于  $[-1, 1]$ , 当  $E_i=1$  表示特别偏好,  $E_i=-1$  为不选择,  $E_i < -0.1$  表示负选择,  $E_i > 0.1$  表示正选择,  $E_i=0$  为随机选择,  $-0.1 \leq E_i \leq 0.1$  为几乎随机选择。

传统方法是在研究区内的调查样带中随机选取样方, 对样方内的环境因子数据进行采集, 本研究在ArcGIS里将各类环境因子数据各自生成成为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  栅格数据, 将每一个象元看做  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  的样方, 所有14条样带中相当于总共356468个调查样方。与传统方法相比, 本研究不需要在样带中再次选取样方, 避免二次随机取样造成的误差。

根据岩羊分布点的位置信息，203只岩羊共计分布在44个样方中，据计算 $W_i$ 与 $E_i$ 的结果如表4。

通过缓冲区分析计算岩羊分布样方距农村居民点、公路、水源地和悬崖峭壁的距离

表4 岩羊对环境因子的选择性

Table 4 Selectivity of blue sheep for environmental factors

| 项目          | 因子           | 调查样方数/个 | 岩羊选择样方数/个 | $W_i$ | $E_i$ | 选择性 |
|-------------|--------------|---------|-----------|-------|-------|-----|
| 距农村居民点距离/km | ≤1           | 47191   | 18        | 0.71  | 0.36  | PS  |
|             | 1~2          | 167257  | 23        | 0.25  | -0.13 | NS  |
|             | > 2          | 142020  | 3         | 0.04  | -0.79 | NS  |
| 距公路距离/km    | ≤1           | 31711   | 1         | 0.14  | -0.40 | NS  |
|             | 1~3          | 64448   | 2         | 0.14  | -0.41 | NS  |
|             | > 3          | 260309  | 41        | 0.72  | 0.36  | PS  |
| 距水源距离/km    | ≤1           | 293799  | 21        | 0.16  | -0.35 | NS  |
|             | 1~3          | 61738   | 23        | 0.84  | 0.43  | PS  |
|             | > 3          | 931     | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 0≤FC<0.2     | 72385   | 18        | 0.61  | 0.51  | PS  |
| 植被盖度        | 0.2≤FC<0.4   | 187117  | 24        | 0.31  | 0.22  | PS  |
|             | 0.4≤FC<0.6   | 63090   | 2         | 0.08  | -0.44 | NS  |
|             | 0.6≤FC<0.8   | 20482   | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 0.8≤FC<1     | 13394   | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
| 坡度/°        | ≤2（微斜）       | 62821   | 1         | 0.05  | -0.72 | NS  |
|             | 2~5（缓斜）      | 133274  | 5         | 0.13  | -0.44 | NS  |
|             | > 5（斜坡）      | 160373  | 38        | 0.82  | 0.42  | PS  |
|             | 4000~4100    | 5153    | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
| 海拔高度/m      | 4100~4200    | 37232   | 18        | 0.77  | 0.59  | PS  |
|             | 4200~4300    | 216678  | 23        | 0.17  | -0.08 | RS  |
|             | 4300~4400    | 84660   | 3         | 0.06  | -0.56 | NS  |
|             | 4400~4500    | 12745   | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
| 距悬崖峭壁距离/m   | ≤100         | 25150   | 19        | 0.52  | 0.22  | PS  |
|             | 100~200      | 24752   | 17        | 0.47  | 0.17  | PS  |
|             | > 200        | 306566  | 4         | 0.02  | -0.86 | NS  |
| 植被类型        | 高山嵩草+杂类草草地型  | 35662   | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 高山嵩草+紫花针茅草地型 | 13013   | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 禾叶风毛菊草地型     | 3949    | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 紫花针茅+杂类草草地型  | 140067  | 29        | 0.35  | 0.52  | PS  |
|             | 藏嵩草+苔草草地型    | 10754   | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 藏嵩草草地型       | 2504    | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 高山嵩草草地型      | 36975   | 13        | 0.60  | 0.69  | PS  |
|             | 赖草草地型        | 32279   | 0         | 0     | -1.00 | NOS |
|             | 紫花针茅草地型      | 81265   | 2         | 0.04  | -0.45 | NS  |

注：PS 为正选择（positive selection），NS 为负选择（negative selection），RS 为随机选择（random selection），NOS 为不选择（no selection）。

离, 结果表明: 对于农村居民点, 岩羊偏好于选择相距小于1 km的区域 ( $E_i=0.36$ ), 较少选择距农村居民点距离大于1 km的区域; 就公路而言, 岩羊偏好于选择距公路距离大于3 km的区域 ( $E_i=0.36$ ), 较少选择距公路距离小于1 km以及介于1~3 km的区域 ( $E_i=-0.40$ 、 $-0.41$ ); 对于距水源地距离, 岩羊偏好于选择距水源距离介于1~3 km的区域 ( $E_i=0.43$ ), 较少选择距水源距离小于1 km的区域 ( $E_i=-0.35$ ), 不选择距水源距离大于3 km的区域 ( $E_i=-1.00$ ); 对于距悬崖峭壁的距离, 岩羊偏好于选择距悬崖峭壁100 m以内以及100~200 m的区域 ( $E_i=0.22$ 、 $0.17$ ), 较少选择距悬崖峭壁200 m以上的区域 ( $E_i=-0.86$ )。

就植被覆盖度而言, 岩羊主要分布在植被覆盖度小于0.6范围内, 但在0.4~0.6区间内  $E_i$  值较低 ( $E_i=-0.44$ ); 在0~0.2、0.2~0.4区间内岩羊  $E_i$  值较高 (分别为0.51和0.22), 表明岩羊有一定偏好选择此类生境; 在大于0.6的植被覆盖度区间内没有观察到岩羊的活动 ( $E_i=-1.00$ )。

就坡度与海拔高度而言, 坡度方面岩羊偏好于选择大于 $5^\circ$  ( $E_i=0.42$ ) 的区域, 该坡度范围内出现的数量占总体的87.19%; 较少选择坡度小于 $2^\circ$ 的区域 ( $E_i=-0.72$ ) 以及介于 $2^\circ$ ~ $5^\circ$ 的区域 ( $E_i=-0.44$ )。海拔高度方面, 岩羊偏好分布在4100~4200 m的范围内 ( $E_i=0.59$ ), 在4200~4300 m范围内没有表现出明显的选择偏好 ( $E_i=-0.08$ ), 较少选择海拔为4300~4400 m的区域 ( $E_i=-0.56$ ), 在4000~4100 m与4400~4500 m范围内未发现岩羊分布 ( $E_i=-1.00$ )。

样带内共有9种植被类型, 岩羊对紫花针茅+杂类草草地型和高山嵩草草地型均有明显的偏好 ( $E_i$  分别为0.52和0.69)。在紫花针茅草地型上, 岩羊表现为负选择 ( $E_i=-0.45$ )。在其他草地型上没有观察到岩羊分布 ( $E_i=-1.00$ )。

综合来看, 岩羊偏好于选择距农村居民点距离小于1 km、距公路距离大于3 km、水源地距离介于1~3 km之间、距悬崖峭壁200 m以内、植被覆盖度为0~0.4、坡度大于 $5^\circ$ 、海拔位于4100~4200 m之间、草地类型为紫花针茅+杂类草草地型和高山嵩草草地型的区域活动。

## 2.4 岩羊栖息地环境因子的主成分分析

由于岩羊栖息地的环境因子互相之间可能存在着相关关系, 为了辨别对岩羊选择栖息地产生主要影响的环境因子, 更加准确地描述岩羊对栖息地环境的选择偏好, 利用SPSS 22.0对岩羊栖息地, 即44个有岩羊分布的样方处的地形因子(海拔高度、坡度、距悬崖峭壁距离)、食物因子(植被盖度、植被类型)、水因子(距水源地距离)和人类扰动因子(距农村居民点距离、距公路距离)等环境因子进行因子分析。

结果如表5所示, 第一、第二、第三主成分对总方差的贡献率分别为40.302%、20.827%、14.697%, 三个主成分累计可以解释总方差的75.826%。第一主成分中因子载荷系数绝对值最大的为海拔高度, 因子载荷系数为0.943, 海拔高度作为岩羊选择栖息地的主要环境因子是可信的, 这与岩羊栖息于山地的生态习性相吻合; 第二主成分中因子载荷系数绝对值最大的为距公路距离, 因子载荷系数为-0.781, 距公路距离作为岩羊选择栖息地的主要环境因子是可信的, 表明岩羊对人为干扰的回避行为; 第三主成分中因子载荷系数绝对值最大的为距悬崖峭壁距离, 因子载荷系数为0.915, 距悬崖峭壁距离作



为岩羊选择栖息地的主要环境因子是可信的，与岩羊选择悬崖峭壁作为栖息地的生态习性相吻合。

综上所述，海拔高度、距公路距离与距悬崖峭壁距离是影响岩羊选择栖息地的主要环境因子，距水源地距离、距农村居民点距离、植被类型、植被盖度与坡度对岩羊的影响相对较弱，岩羊对距水源地距离、距农村居民点距离、植被类型、植被盖度与坡度所表现出来的选择性可能受到与上述主要环境因子之间相关性的影响，在岩羊栖息地选择过程中不足以代表岩羊对环境因子的选择偏好。

| 表5 岩羊栖息地环境因子主成分分析结果   |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|
| Table 5 Principal component analysis results of environmental factors in blue sheep habitat |        |        |        |
| 环境因子  | 主成分    |        |        |
|   | 1      | 2      | 3      |
| 海拔高度  | 0.943  | 0.144  | -0.152 |
| 距水源地距离  | 0.841  | -0.398 | -0.032 |
| 距农村居民点距离  | 0.768  | 0.159  | 0.203  |
| 植被类型  | -0.629 | 0.541  | 0.336  |
| 距公路距离   | -0.484 | -0.781 | -0.119 |
| 植被盖度  | 0.486  | 0.525  | 0.015  |
| 坡度  | -0.415 | 0.519  | -0.382 |
| 距悬崖峭壁距离   | 0.003  | -0.118 | 0.915  |
| 特征值   | 3.224  | 1.666  | 1.176  |
| 贡献率/%   | 40.302 | 20.827 | 14.697 |
| 贡献率累计值/%  | 46.060 | 61.129 | 75.826 |

3 结论与讨论

3.1 结论

利用无人机航拍调查的方法，对玛多县县域内岩羊的种群数量及其分布规律进行了研究，结果表明：

（1）调查样带内共有岩羊 203 只，种群密度为0.6215 只/km<sup>2</sup>，通过估算玛多县全县岩羊种群数量为 8968 只。

（2）通过对选择系数和选择指数的计算，结合主成分分析的结果，认为玛多县岩羊偏好于选择海拔为4100~4200 m、距公路大于3 km、距悬崖峭壁200 m以内的区域活动。

3.2 讨论

本研究采用了无人机作为调查手段，通过无人机航拍样带调查估算了玛多县岩羊种群数量。与传统的地面样带调查方法相比，弥补了其效率低、成本高、调查目标相互遮挡、调查路线受到地面状况限制、调查结果难以重复验证等缺点，更加易于满足野生动物种群数量长时间序列动态监测的需求。无人机航拍野生动物调查方法适用于研究区域难以从地面到达、调查对象对人类扰动敏感或调查对象具有较强侵略性的研究<sup>[19]</sup>。但同时，无人机航拍调查是自上而下的调查方法，要求调查区域开阔，无树木遮挡情况，避免地势过大起伏，在青藏高原地区通过该方法进行大型野生动物调查尤为合适，可以建立长时间序列的大型野生动物种群数量监测数据库，为三江源国家公园的建设与保护成效评估提供数据支持。

研究团队在正式开展调查前曾于2016年夏季进行了试拍工作，得到的影响分辨率为15~18.5 cm，无法准确识别岩羊个体。2017年冬春季无人机航拍影像分辨率为4~7 cm，岩羊个体可清晰识别。因此在利用无人机进行大型野生动物调查时，建议设计航拍影响分辨率不低于7 cm。因为玛多县以高寒草原和高寒草甸为主，地面地物单一，可用于影像拼接的特征点少，今后研究中可以在地面人工布设控制点以提高影像拼接精度。本研究采用目视解译方式进行图像识别，根据大型食草动物的色调、颜色、纹理、阴影、大

小、形状、图案等判别动物种类,今后应建立遥感影像解译标志库,并利用深度学习等方法进行无人机影像大型野生动物信息自动提取,以提高影像解译工作效率。此外,采用续航能力更强的无人机进行调查,增加调查样带覆盖面积,是提高调查结果准确率的有效途径。本研究样带面积占玛多县全县面积的比例不足2%,抽样强度较小,导致岩羊种群密度估计标准误差较大,提高抽样比率可以有效提高调查结果的准确度。

对玛多县岩羊对环境因子的选择进行分析,结果显示其偏好于选择海拔为4100~4200 m的区域,这与贺兰山岩羊多分布在海拔1801~2000 m的区域<sup>[20]</sup>,以及岩羊在喜马拉雅山的最适生境处在海拔4400~5000 m高度的结果不尽相同<sup>[2]</sup>。造成这种差异的原因可能是不同地区岩羊的生存资源随海拔高度的分布规律不同。Oli<sup>[21]</sup>对贺兰山岩羊冬季卧息地的选择研究认为其选择人为干扰距离小于500 m的区域,本研究中将人为干扰因子分为距农村居民点距离与距公路距离,玛多县岩羊偏好选择距农村居民点小于1 km区域的结果与Oli<sup>[21]</sup>相同。这可能是因为岩羊喜爱裸岩及悬崖的生境,在悬崖上快速奔跑攀爬的能力是其躲避危险的主要手段,岩羊在选择栖息地优先选择悬崖峭壁区域,峭壁周围是否存在农村居民点对其影响不大,主成分分析结果也佐证了这一点。

本研究仅对玛多县岩羊的种群数量及生境选择偏好进行研究,若通过无人机调查同时获取家畜数量与分布规律,则可以通过分析岩羊及家畜在生态位上的重叠情况了解玛多县畜牧业对岩羊保护的影响,从而为玛多县岩羊保护措施的实施提供更加准确的支持。

## 参考文献(References):

- [1] Red List of Threatened Species (IUCN), 2011.
- [2] SCHALLER G B. Mountain monarchs. Wild Sheep and Goats of the Himalaya. Chicago: University of Chicago Press, 1977: 425.
- [3] ACHYUT A, GASTAUER S, MENZEL S, et al. Estimation of blue sheep population parameters in the Dhorpatan Hunting Reserve, Nepal. International Journal of Biodiversity and Conservation, 2010, 2(3): 51-55.
- [4] ARYAL A, BRUNTON D, WEIHONG J I, et al. Blue sheep in the Annapurna Conservation Area, Nepal: Habitat use, population biomass and their contribution to the carrying capacity of snow leopards. Integrative Zoology, 2014, 9(1): 34-45.
- [5] 王小明, 李明, 唐绍祥, 等. 春季岩羊种群生态学特征的初步研究. 兽类学报, 1998, 18(1): 27-33. [WANG X M, LI M, TANG S X, et al. A preliminary study of some characters of blue sheep population ecology in spring. Acta Theriologica Sinica, 1998, 18(1): 27-33.]
- [6] 刘振生, 王小明, 李志刚, 等. 贺兰山岩羊的数量与分布. 动物学杂志, 2007, 42(3): 1-8. [LIU Z S, WANG X M, LI Z G, et al. Distribution and abundance of blue sheep in Helan Mountains, China. Chinese Journal of Zoology, 2007, 42(3): 1-8.]
- [7] 初红军, 蒋志刚, 葛炎, 等. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴和鹅喉羚种群密度和数量. 生物多样性, 2009, 17(4): 414-422. [CHU H J, JIANG Z G, GE Y, et al. Population densities and number of khulan and goitred gazelle in Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve. Biodiversity Science, 2009, 17(4): 414-422.]
- [8] 骆颖, 张明明, 刘振生, 等. 贺兰山同域分布岩羊和马鹿发情季节的生境选择差异. 生态学报, 2010, 30(14): 3744-3751. [LUO Y, ZHANG M M, LIU Z S, et al. Habitat selection of sympatric blue sheep (*Pseudois nayaur*) and red deer

- (*Cervus elaphus alxaicus*) during rutting periods in the Helan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3744-3751.]
- [9] 张明春, 李志刚, 胡天华, 等. 宁夏贺兰山国家级自然保护区马鹿分布及集群特征的初步研究. *兽类学报*, 2012, 32(4): 318-324. [ZHANG M C, LI Z G, HU T H, et al. Distribution and group size of red deer (*Cervus elaphus*) in Ningxia Helan Mountain National Nature Reserve, China. *Acta Theriologica Sinica*, 2012, 32(4): 318-324.]
- [10] WARD D F. Modelling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biological Invasions*, 2007, 9(6): 723-735.
- [11] PHILLIPS S J, SCHAPIRE R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *International Conference on Machine Learning. ACM*, 2004: 83.
- [12] BROTONS L, THUILLER W, ARAÚJO M B, et al. Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography*, 2004, 27(4): 437-448.
- [13] ANDERSON D R, LAAKE J L, CRAIN B R, et al. Guidelines for line transect sampling of biological populations. *Journal of Wildlife Management*, 1979, 43(1): 70-78.
- [14] BURNHAM K P, ANDERSON D R, LAAKE J L. Estimation of density from line transect sampling of biological populations. *Wildlife Monographs*, 1980, 62(2): 7-202.
- [15] SCHWEDER T. Advanced distance sampling: Estimating abundance of biological populations. *Publications of the American Statistical Association*, 2007, 102(478): 763-764.
- [16] RANGO A, LALIBERTE A, STEELE C, et al. Using unmanned aerial vehicles for rangelands: Current applications and future potentials. *Environmental Practice*, 2006, 8(3): 159-168.
- [17] RANGO A, LALIBERTE A, HERRICK J E, et al. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2009, 3(1): 11-5.
- [18] VANDERPLOEG H A, SCAVIA D. Calculation and use of selectivity coefficients of feeding: Zooplankton grazing. *Ecological Modelling*, 1979, 7(2): 135-149.
- [19] CHABOT D, BIRD D M. Wildlife research and management methods in the 21<sup>st</sup> century: Where do. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2015, 3(4): 137-155.
- [20] 王小明, 刘志霄, 徐宏发, 等. 贺兰山岩羊种群生态及保护. *生物多样性*, 1998, 6(1): 1-5. [WANG X M, LIU Z X, XU H F, et al. The blue sheep population ecology and its conservation in Helan Mountain, China. *Chinese Biodiversity*, 1998, 6(1): 1-5.]
- [21] OLI M K. Seasonal patterns in habitat use of blue sheep *Pseudois nayaur* (Artiodactyla, Bovidae) in Nepal. *Mammalia*, 1996, 60(2): 187-193.

## Using UAV remote sensing for a population census of blue sheep (*Pseudois nayaur*) in Maduo county, source region of the Yellow River

GUO Xing-jian<sup>1,2</sup>, SHAO Quan-qin<sup>1,2</sup>, YANG Fan<sup>1,2</sup>, LI Yu-zhe<sup>1</sup>,  
WANG Yang-chun<sup>3</sup>, WANG Dong-liang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In this study, Maduo county, the source region of the Yellow River, was selected as the research area. In 2017, UAV aerial survey was used to estimate the population of the blue sheep (*Pseudois nayaur*) and its distribution. The effective area of aerial surveys was 326.6 km<sup>2</sup>, and 23784 images were acquired. The population in the survey transect was 203, which was identified visually on computer monitors by human observers, and the density was 0.6215/km<sup>2</sup>. A total of 12 groups of blue sheep were found in the transects, of which 6 groups had a cluster size of 2-10, accounting for 50% of the total. Estimation of population of blue sheep in Maduo county was 8968, which was based on the relationship of different types of grassland area between transects and the whole county. In this way, the area of non-vegetation types (such as bare stone gravel, water bodies, glaciers, towns, high-speed and national roads) is deducted, and the influence of human disturbance is considered. This avoided overestimation of the blue sheep population. The relationship between the distribution density of blue sheep and ecological factors of habitat was analyzed. Results show that blue sheep preferred an area within 1 km from rural settlements, 3 km away from roads, 1-3 km from water sources, within 200 m from the cliff and with an elevation of 4100-4200 m, vegetation coverage of 0-0.4, slope over 5°, vegetation type of *Stipa purpurea* + *Subordinate* grass and *Kobresia pygmaea*. The environmental factors of the blue sheep habitat may have a correlation with each other, in order to identify the environmental factors that have a major impact on the choice of habitat, and describe the preference more accurately, principal component analysis was carried out. The results showed that altitude, distance from the road and distance from the cliff were the main environmental factors affecting the choice of habitat of blue sheep. In this study, a UAV aerial sampling survey was conducted to estimate the population and density of the blue sheep in the study county. Aided by ArcGIS, the habitat was analyzed. The combination of 3S technology and wildlife surveys provides a new idea for the research on wildlife in the Tibetan Plateau.

**Keywords:** Geographic Information System; population census; UAV remote sensing; blue sheep; Maduo county