DOI: 10.20103/j.stxb.202410082426
郑霏,吕来新,吕泓学,师杰,李瑞,杨世丽,刘丙万.基于红外相机监测黑龙江凉水国家级自然保护区兽类多样性及其变化.生态学报,2025,45(11):5289-5296.
Zheng F, Lü L X, Lü H X, Shi J, Li R, Yang S L, Liu B W.The research on the mammal diversity and its dynamic based on camera-trapping in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve.Acta Ecologica Sinica,2025,45(11):5289-5296.

基于红外相机监测黑龙江凉水国家级自然保护区兽类多样性及其变化

郑　霏[1],吕来新[2],吕泓学[2],师　杰[1],李　瑞[1],杨世丽[1],刘丙万[1,*]
1 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨　150040
2 东北林业大学黑龙江凉水国家级自然保护区管理局,伊春　153106

摘要:兽类作为生态系统重要组成部分,是生物多样性保护管理与评价的关键指示类群。黑龙江凉水国家级自然保护区是野生兽类的重要栖息地之一,为掌握该地区兽类多样性现状及变化趋势,2018 年 1 月至 2021 年 12 月、2022 年 4 月至 2023 年 12 月,在黑龙江凉水国家级自然保护区利用红外相机对兽类多样性及其变化进行了研究,总计 50405 个相机有效工作日, 5981 张独立有效照片。研究发现:1)黑龙江凉水国家级自然保护区兽类共 15 个物种,隶属 5 目 10 科,其中国家一级重点保护兽类 1 种,为紫貂(*Martes zibellina*),国家二级重点保护兽类 4 种,为黄喉貂(*M. flavigula*)、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、猞猁(*Lynx lynx*)和黑熊(*Ursus thibetanus*)。2)黑龙江凉水国家级自然保护区相对多度前五的兽类依次为狍(*Capriolus pygargus*)(7.694)、野猪(*Sus scrofa*)(1.458)、亚洲狗獾(*Meles leucurus*)(0.809)、北松鼠(*Sciurus vulgari*)(0.650)、紫貂(0.564)。3)红背䶄(*Myodes rutilus*)和黑线姬鼠(*Apodemus agrarius*)仅在 2022 年出现,猞猁则在 2023 年时隔多年被记录。4)通过 EstimateS9.1 估算,实际监测的兽类物种数在约为全部兽类物种的 75%—83.33%。5)凉水国家级自然保护区物种数呈上升趋势,2022 年监测到的物种数最高,为 14 种。年多样性指数起伏波动大(0.833—1.394),没有显著差异($\chi^2=7.496$,$df=5$,$P>0.05$)。均匀度指数年际间存在显著差异呈下降趋势($\chi^2=11.525$,$df=5$,$P<0.05$)。2021 年的多样性指数和均匀度指数均为最低值,分别为 0.833 和 0.428。物种本底数据的调查是开展生物多样性保护管理与评价工作的基础,研究通过了解黑龙江凉水国家级自然保护区内兽类多样性现状及其年际间变化,可以为黑龙江凉水国家级自然保护区制定合理有效的兽类多样性保护管理对策提供参考,同时为保护珍稀兽类及其栖息地提供科学依据。

关键词:黑龙江凉水国家级自然保护区;兽类多样性;红外相机

The research on the mammal diversity and its dynamic based on camera-trapping in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve

ZHENG Fei[1], LÜ Laixin[2], LÜ Hongxue[2], SHI Jie[1], LI Rui[1], YANG Shili[1], LIU Bingwan[1,*]
1 *College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin* 150040, *China*
2 *Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve Authority, Northeast Forestry University, Yichun* 153106, *China*

Abstract: As a crucial component of ecosystems, mammals serve as a key taxa indicator for biodiversity conservation management and assessment. Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve is a critical habitat for wild mammals. To investigate the current status and temporal trend of mammal diversity in the region, from January 2018 to December 2021 and from April 2022 to December 2023, camera trapping was employed to track changes in mammal diversity in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve and 50405 capture dates and 5981 effective photographs were collected. The

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2572022DS11)
收稿日期:2024-10-08;　　**网络出版日期**:2025-04-07
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liubw1@sina.com

results are as following: 1. A total of 15 mammal species were recorded, belonging to 10 families and 5 orders. The sable (*Martes zibellina*) is classified as category I state key protected wild animal, and four species were classified as category II state key protected wild animals, including the yellow-throated marten (*M. flavigula*), leopard cat (*Prionailurus bengalensis*), Eurasian lynx (*Lynx lynx*), and Asian black bear (*Ursus thibetanus*). 2. The five most populous species in Liangshui National Nature Reserve were the roe deer (*Capriolus pygargus*) at 7.694, wild boar (*Sus scrofa*) at 1.458, Asian badger (*Meles leucurus*) at 0.809, Eurasian red squirrel (*Sciurus vulgaris*) at 0.650, and sable at 0.564. 3.The northern red-backed vole (*Myodes rutilus*) and striped field mouse (*Apodemus agrarius*) were only detected in 2022, while the Eurasian lynx was recorded in 2023 again after several years. 4. According to EstimateS9.1, the number of species actually monitored constituted an estimated 75% to 83.33% of the total mammal species. 5. There was an increasing trend in the number of species with the highest number being 14 species in 2022. The annual diversity index showed great fluctuations ranging from 0.833 to 1.394 without significantly interannual differences ($\chi^2 = 7.496$, $df = 5$, $P > 0.05$). However, the evenness index showed significant interannual differences with a decreasing trend ($\chi^2 = 11.525$, $df = 5$, $P < 0.05$). The lowest values for both the diversity index and the evenness index were observed in 2021, at 0.833 and 0.428, respectively. Surveying species diversity data serves as the foundation for biodiversity conservation management and assessment efforts. The research elucidates the current status and interannual variations of mammalian diversity in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve, provides reasonable suggestions on the effective conservation and management of mammal diversity and a scientific foundation for conserving rare mammals and their habitats.

Key Words: Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve; mammalian biodiversity; camera trapping

野生动物是生态系统重要组成部分。保护野生动物、维持生态平衡,关系到人类的生存和发展。保护生物多样性、确保自然生态系统安全稳定是保护区的重要功能[1]。兽类对于栖息地变化敏感度高,且物种数量多、分布广泛易于观察,是生物多样性保护管理与评价的关键指示类群[2]。兽类传统调查方法有直接调查法、样线(点、方)法等,这类方法需要依靠大量的人力财力和时间。红外相机相较于传统方法具有可全天监测、成本低、干扰小、非损伤等优点,因此已成为兽类多样性和种群密度监测的常规方法[3—5]。王秀磊等在阿尔金山保护区利用红外相机掌握了保护区野生动物的基本情况,为创建昆仑山国家公园提供了基础数据[6]。李生强等利用红外相机评估了青藏高原猫科动物的种群现状并提出了保护建议[7]。张清浩等在内乡宝天曼保护区利用红外相机监测,首次记录到逃逸圈养猕猴的活动情况[8]。利用红外相机研究兽类多样性有助于更好的评估兽类现状,为保护珍惜兽类及其栖息地提供科学依据。

近年来,黑龙江凉水国家级自然保护区的研究对象多为鸟类、昆虫和红松林等,对于兽类多样性的研究较少[9—14]。自黑龙江凉水国家级自然保护区建立起,共记录有 6 目 16 科 44 种兽类,其中被列为国家重点保护野生动物有 9 种,包括紫貂(*Martes zibellina*)、黄喉貂(*M. flavigula*)、棕熊(*Ursus arctos*)、黑熊(*U. thibetanus*)、猞猁(*Lynx lynx*)、水獭(*Lutra lutra*)、马鹿(*Cervus elaphus*)、原麝(*Moschus moschiferus*)和喜马拉雅斑羚(*Naemorhedus goral*)。2013—2015 年只监测到 4 目 7 科 11 种兽类[15]。为了掌握黑龙江凉水国家级自然保护区兽类多样性现状及变化趋势,对 2018 年 1 月至 2023 年 12 月的红外相机监测结果进行了分析,该研究将有利于黑龙江凉水国家级自然保护区制定更合理有效的兽类多样性管理对策。

1 研究地概况

黑龙江凉水国家级自然保护区位于东经 128°47′8″—128°57′19″,北纬 47°6′49″—47°16′10″,地处小兴安岭山脉东南端到达里带岭支脉东坡,总面积 12133 hm^2。该保护区为温带大陆性季风气候,四季分明,植被变化明显。保护区境内峰峦起伏,群山环抱、沟壑纵横,形成了较复杂的山区地形。区内物种丰富,植被多样,主要林分为红松(*Pinus koraiensis*)林、云杉(*Picea asperata*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林、山杨(*Populus davidiana*)林等。

2　研究方法

2.1　相机布设

以黑龙江凉水国家级自然保护区管理局为界,通过 ArcGIS 软件在管理局的北部和南部共设置 18 个 1 km×1 km 的监测网格,北方设 12 块网格样地,南方设 6 块网格样地,在每个交点预设红外相机布设位点,共 32 个位点(图 1)。在预设点为圆心 20 m 范围内选择实际相机布设位点,考虑视野开阔,地面灌木草较少,避开阳光直射的位点,把相机稳定的固定在树干上,距离地面 60—100 cm,通过 GPS 仪获取实际位点经纬度。在每个位点放置 2 台红外相机,两台相机处于相互对面位置,相隔 10 m 左右,调整相机时间并设置为 3 连拍加 15 s 录像,拍照时间设置为全天,灵敏度选择高。每 3 个月左右收取 1 次数据,同时检查相机性能、更换储存卡、适当调整相机位点等。

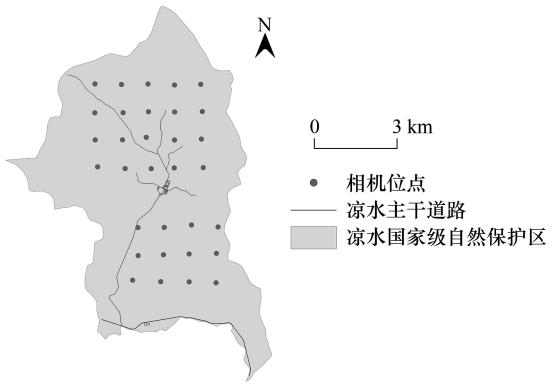

图 1　2018—2023 年黑龙江凉水国家级自然保护区红外相机位点

Fig.1　Distribution of camera traps in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve from 2018 to 2023

2.2　数据分析

将红外相机拍摄照片按年月分别统计,记录所拍照片的日期、时间、物种、数量等,对相同相机位点及相近时间拍摄的同种兽类个体进行识别,独立有效照片的确定标准为同一相机位点含同种个体的相邻有效照片间隔时间至少为 30 min[16]。参照《中国兽类分类与分布》[17]和《中国兽类野外手册》[18]对红外相机拍摄的兽类物种进行识别并分类,参考《国家重点保护野生动物名录》[19]、世界自然保护联盟(IUCN) 濒危物种红色名录[20]和《中国生物多样性红色名录—脊椎动物卷(2020)》[21]对物种保护级别和濒危等级进行确定。

相对多度指数 (Relative abundance index,RAI) : $RAI=\frac{A_i}{T}\times 100$,将各物种出现的独立有效照片数与相机有效工作日总数的百分比作为各物种的相对多度。式中,A_i表示第 i($i=1,2,3,4\cdots,15$)类物种出现的独立照片数,T 表示总有效相机工作日。

位点占有率(Site occupancy, SO) : SO=(拍摄到目标物种的相机位点数 / 相机位点总数) × 100%,通过目标物种被拍到的相机位点数占所有正常工作的位点数的比例来计算每个物种的位点占有率(SO)。

Shannon-Wiener 指数(H') : $H'=\sum_{i=1}^{s} P_i \ln P_i$ ($i=1,2,3,\cdots\cdots,S$),式中, S 为监测到的总物种数,P_i为第 i 种兽类独立照片数占总独立照片数的比例代替[22]。

均匀度指数(J')[23] : $J'=\frac{H'}{\ln(S)}$

利用 EstimateS 9.1 进行物种与独立有效照片数拟合的稀疏化,在抽样充分的前提下,利用 ACE(基于多度的物种估计量)、ICE(基于盖度的物种估计量)的估计方法进行物种丰富度估计,推算黑龙江凉水国家级自然保护区内现存兽类物种数量。

分别计算每年每个位点拍摄的兽类物种数、独立有效记录数、相对多度和多样性指数,采用 k 个独立样本的非参数检验 Kruskal-Wallis H test 分析比较不同年份间兽类多样性差异。所有数据统计分析在 SPSS 26.0 上完成。

3　结果与分析

3.1　兽类物种组成

2018 年 1 月至 2021 年 12 月、2022 年 4 月至 2023 年 12 月,总计 50405 个相机有效工作日,获 5981 张独

立有效照片。共发现 15 种兽类,隶属 5 目 10 科,分别为食肉目 3 科 8 种,偶蹄目 2 科 2 种,劳亚食虫目 1 科 1 种,兔形目 1 科 1 种,啮齿目 3 科 4 种。其中国家一级重点保护动物为紫貂;国家二级重点保护动物黄喉貂、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、猞猁、黑熊。被中国生物多样性红色名录列为濒危(EN)等级的有猞猁;列为易危(VU)等级的有黄喉貂、紫貂、豹猫、黑熊;列为近危(NT)等级的有亚洲狗獾(*Meles leucurus*)、狍(*Capriolus pygargus*)、北松鼠(*Sciurus vulgari*);其余 7 个物种被列为无危(LC)等级。黄鼬(*Mustela sibirica*)、亚洲狗獾、狍、东北刺猬(*Erinaceus amurensis*)、东北兔(*Lepus mandshuricus*)、北松鼠、花鼠(*Tamias sibiricus*)是有重要生态、科学、社会价值的陆生野生动物,俗称国家三有保护动物(表 1)。相对多度前五的兽类依次为狍(7.694)、野猪(*Sus scrofa*)(1.458)、亚洲狗獾(0.809)、北松鼠(0.650)、紫貂(0.565)。位点占有率前五的兽类依次为紫貂(100%)、狍(100%)、野猪(100%)、亚洲狗獾(90.630%)、北松鼠(90.630%),其余兽类的位点占有率均低于 50%。

表 1 黑龙江凉水国家级自然保护区物种名录及保护等级

Table 1 Mammals recorded from camera traps and protection level in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve

物种 Species	独立有效照片数 No. of independent effective photo	位点占有率 Site occupancy/%	相对多度指数 Relative abundance index	保护级别 Protection level	中国生物多样性红色名录 Redlist of China's Biodiversity
一 食肉目 Carnivora					
(一)鼬科 Mustelida					
1.黄喉貂 *Martes flavigula*	23	34.375	0.047	二级	VU
2.黄鼬 *Mustela sibirica*	9	15.635	0.018		LC
3.紫貂 *Martes zibellina*	285	100	0.565	一级	VU
4.亚洲狗獾 *Meles leucurus*	412	90.625	0.817		NT
(二)猫科 Felidae					
5.豹猫 *Prionailurus bengalensis*	9	6.250	0.018	二级	VU
6.猞猁 *Lynx lynx*	1	3.125	0.002	二级	EN
(三)熊科 Ursidae					
7.黑熊 *Ursus thibetanus*	14	40.625	0.028	二级	VU
二 鲸偶蹄目 Cetartiodctla					
(四)鹿科 Cervida					
8.狍 *Capriolus pygargus*	3903	100	7.743		NT
(五)猪科 Suidae					
9.野猪 *Sus scrofa*	742	100	1.472		LC
三 劳亚食虫目 Eulipotyphla					
(六)猬科 Erinaceidae					
10.东北刺猬 *Erinaceus amurensis*	15	6.250	0.030		LC
四 兔形目 Lagomorpha					
(七)兔科 Leporidae					
11.东北兔 *Lepus mandshuricus*	185	21.875	0.367		LC
五 啮齿目 Rodentia					
(八)松鼠科 Sciuridae					
12.北松鼠 *Sciurus vulgari*	323	90.625	0.650		NT
13.花鼠 *Tamias sibiricus*	58	37.500	0.115		LC
(九)仓鼠科 Cricetidae					
14.红背鼠平 *Myodes rutilus*	1	3.125	0.002		LC
(十)鼠科 Muridae					
15.黑线姬鼠 *Apodemus agrarius Pallas*	1	3.125	0.002		LC

LC: 无危 Least concern; NT: 近危 Near threatened; VU:易危 Vulnerable; EN:濒危 Endangered

3.2　相机取样量分析

黑龙江凉水国家级自然保护区兽类物种数在拍摄600 张独立有效照片前快速增长,之后上升平缓,说明取样量充分(图 2)。通过 EstimateS 9.1 获得凉水兽类 ACE 值为 19.331,ICE 值为 17.712,两种方法对保护区目标兽类丰富度估计为 20 种和 18 种。凉水实际检测到的兽类种数为 15 种,约为估计全部物种的75.000%—83.333%。

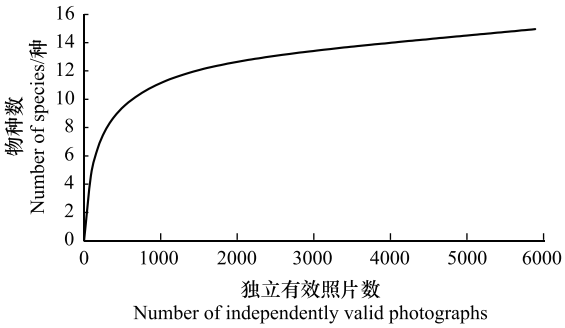

图 2　兽类物种与独立有效照片数所拟合的稀疏化曲线

Fig.2　Rarefaction curves for estimating species diversity of mammals with increased number of independent effective photos

3.3　兽类多样性年际间变化

黑龙江凉水国家级自然保护区物种组成存在年际变化,各物种的相对多度指数(RAI)也存在差异,但狍、紫貂、野猪和亚洲狗獾的相对多度一直靠前(图 3)。狍的相对多度逐年上升,是黑龙江凉水国家级自然保护区的优势种。紫貂、狗獾、狍、野猪、北松鼠和东北兔每年都能被红外相机拍摄到。豹猫在 2019、2022、2023 年均记录到,黑熊和东北刺猬在 2020、2021、2022 年记录到,相对多度较低。红背䶄(*Myodes rutilus*)和黑线姬鼠(*Apodemus agrarius*)仅在 2022 年被拍摄到一次,猞猁在 2023 年被拍摄到一次。

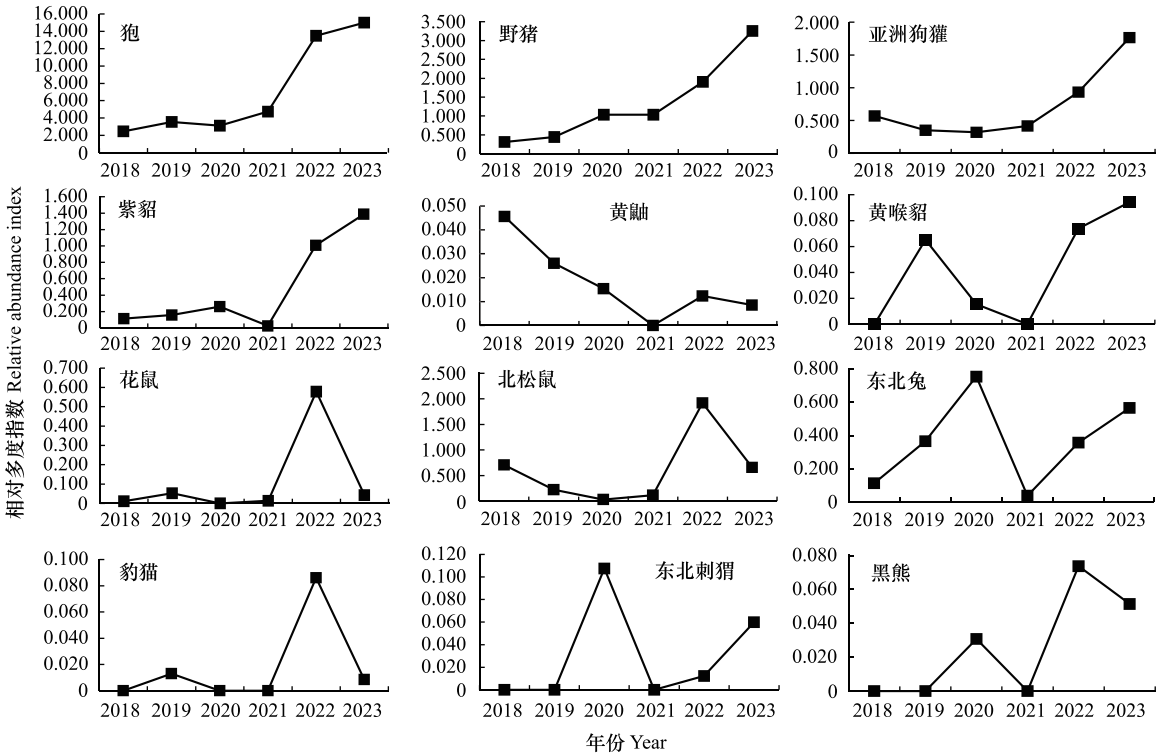

图 3　2018—2023 年黑龙江凉水国家级自然保护区物种相对多度指数(RAI)变化

Fig.3　Relative abundance index (RAI) in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve from 2018 to 2023

不同年份的兽类物种数和独立有效照片数存在显著差异(χ^2 = 51.335—72.724, df = 5, P<0.01),均匀度指数均存在差异(χ^2 = 11.525, df = 5, P = 0.042),多样性指数无显著差异(χ^2 = 7.496, df = 5, P = 0.186)。2022 年拍摄到的兽类物种数最多,2023 年独立有效照片数量最多。2021 年至 2023 年物种均匀度相似,为低值。均匀度指数逐年下降变得平缓。多样性指数起伏波动大,2022 至 2023 年数值相似。

对比黑龙江凉水国家级自然保护区兽类多样性指数的年间变化,多样性指数和均匀度指数变动趋势略有不同。多样性指数起伏较大,从 2018 年至 2019 年呈下降趋势,在 2020 年上升,在 2021 年达到谷值(H' = 0.833),2022 年开始回升。均匀度指数起伏较为平缓,整体呈下降趋势,在 2021 年达到谷值(J' = 0.428),2022 年开始回升(图 4)。

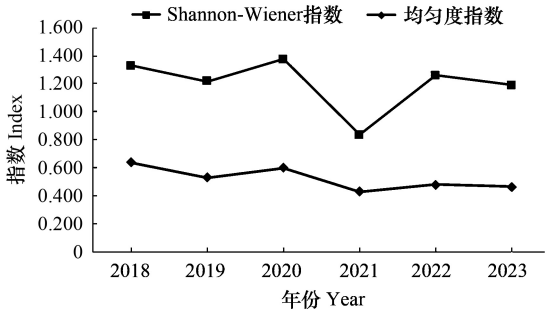

图 4 2018—2023 年黑龙江凉水国家级自然保护区兽类多样性指数年度变化

Fig.4 Annual change of rodent diversity index in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve from 2018 to 2023

4 讨论

大中型兽类群落可以作为评估森林类型保护地的管理成效的指示类群[24]。基于红外相机监测数据,兽类物种累积曲线趋于平缓,表明黑龙江凉水国家级自然保护区物种已被基本记录。然而,数据结果显示物种均匀度逐年下降,反映出种群数量变化和分布的不均匀性。狍的相对多度(RAI = 7.743)显著高于其他物种,以植物为主的杂食动物占据了物种组成的主导地位。兽类物种及其数量随年份相对增多,大中型捕食者如黑熊、豹猫、猞猁等也曾出现在黑龙江凉水国家级自然保护区,推测其可能仅为路过。狍始终为保护区内的优势种,其次是野猪、狗獾。2018—2021 年狍的相对多度范围为 2.466—4.749,但在 2022 年和 2023 年分别剧增至超过 13 和接近 15。同样,野猪和亚洲狗獾的相对多度呈现上升趋势,在 2023 年分别达到 3.235 和 1.726。说明狍、野猪和亚洲狗獾的数量在近年大幅增加。除猞猁、红背䶄和黑线姬鼠外,其他物种的相对多度没有太大变化。黑龙江凉水国家级自然保护区的管理水平不断提高,尤其是游客干扰的有效减少,为大中型兽类提供了更适宜的栖息地。随着栖息条件的改善,狍、野猪和亚洲狗獾繁殖力强,数量快速增加,占据优势地位,导致均匀度逐年下降。在未来的保护区管理中,应进一步关注群落结构的优化,以维持更高的生物多样性和生态系统稳定性。

本次监测与 2013—2015 年研究的黑龙江凉水国家级自然保护区兽类多样性物种结构组成上有明显不同[15],将 2013—2015 年研究称为前研究。前研究中啮齿目动物独立有效照片数占全部兽类的 80.761%,而在本次研究中有蹄类动物独立有效照片数最高,占 77.663%,其次是食肉目动物占 12.589%,而啮齿目动物只占 6.501%。从有效照片数量上分析,狍、野猪和亚洲狗獾数量大幅增加,大中型食肉动物例如黑熊和猞猁出现,而啮齿目动物数量相差不大。其中原因可能有:(1)人为干扰减少。在 2016 年之前,黑龙江凉水国家级自然保护区作为一个旅游景区对外开放,在核心区之中修有栈道和休闲区,供游客游览活动。此外,每年 9 月至 10 月中旬,保护区进行打松子活动。但与之前开展旅游相比,黑龙江凉水国家级自然保护区的人为干扰明显减少。(2)监测样地范围变大。2013—2015 年研究为红松林样地,范围为 9 hm^2,而本研究覆盖了凉水大部分区域,范围超过 18 hm^2,包含不同的植被结构和生境类型,如红松林、针阔混交林、针叶林、阔叶林、灌丛和沼泽等。既有从未采伐过的原始林、经火烧或皆伐后发生的次生林等森林的各个自然演替阶段,也有包括红松、云杉、落叶松、樟子松等人工纯林及不同混交方式的人工混交林。生境异质性高对兽类多样性具有积极作用,满足不同类型物种的需求,使得监测到的物种增多[25—26]。(3)红外相机在物种识别种的局限性。红外相机多用于林下大中型兽类及其个体识别,对于小型兽类识别有存在难度[27]。本研究中有多张小型兽类照片除北松鼠和花鼠外无法准确识别。对啮齿目等小型哺乳动物,需多以铗日法、笼捕法等捕捉方法进行辅助调查[4,28]。

在本次调查中,黑熊、豹猫、黄喉貂、猞猁有效照片数占比都不足 0.5%,说明这些物种在保护区的数量稀少。豹猫多次在同一位点被拍摄到,推测可能为同一个体。在进行红外相机数据维护过程中,多次发现被啃食的狍等动物尸体,说明黑龙江凉水国家级自然保护区中可能存在以狍等食草动物为食的大型捕食者。黑熊

是以植物为主的杂食性动物[29—30],而豹猫和黄喉貂、紫貂都以小型哺乳动物为主的杂食性动物[31—34],虽然上述捕食者有可能成功捕食成年狍,但也不排除在狍因其他原因死后,其尸体被以上捕食者进行啃食的可能性。复杂的食物网对生态系统生产力等功能有提高作用[35—36],物种间的相互作用也是影响生物多样性的重要因素[37]。现保护区内现有简单的食物网,保护区应对拍摄率低的大中型兽类捕食者开展专项调查研究,并采取合理有效的保护措施,构建更加复杂和稳定的食物网。通过加强物种间的相互作用,最终提升保护区的生态系统功能与生物多样性保护成效。

野猪是本次研究中占第二相对多度的兽类物种,被红外相机捕捉到的行为多为以采食为目的的行为活动。由于野猪集群行为较多,多次被拍摄到大群体活动,被野猪采食拱土过的土地都一片狼藉,主要集中于地势平坦的低洼地区。有研究表明,小种群野猪采食时翻动土地也可能改变森林景观[38],后续研究应注重野猪及其行为对凉水生物多样性造成的具体影响。

综上,黑龙江凉水国家级自然保护区应加强兽类监测,保持保护区内完整的森林生态系统,提高生境异质性和维持生物间的相互作用,逐步构建复杂的食物网结构,提高兽类多样性。

参考文献(References):

[1] 呼延佼奇, 肖静, 于博威, 徐卫华. 我国自然保护区功能分区研究进展. 生态学报, 2014, 34(22): 6391-6396.

[2] Morrison J C, Sechrest W, Dinerstein E, Wilcove D S, Lamoreux J F. Persistence of large mammal faunas as indicators of global human impacts. Journal of Mammalogy, 2007, 88(6): 1363-1380.

[3] Silveira L, Jácomo A T A, Diniz-Filho J A F. Camera trap, line transect census and track surveys: a comparative evaluation. Biological Conservation, 2003, 114(3): 351-355.

[4] 谢文华, 杨锡福, 李俊年, 陶双伦, 肖治术. 八大公山自然保护区地栖性小兽多样性初步研究. 生物多样性, 2014, 22(2): 216-222.

[5] 肖文宏, 李学友, 权锐昌, 连新明. 中国兽类多样性监测与研究网络建设: 十年回顾与展望. 生物多样性, 2023, 31(12): 169-185.

[6] 王秀磊, 徐俊泉, 张圣发, 李欢, 李佳. 基于红外相机技术的阿尔金山保护区祁曼塔格山兽类和鸟类多样性监测的初步研究. 干旱区地理, 2024, 47(10): 1662-1673.

[7] 李生强, 李叶, 向阳, 周丽, 王红, 白玛德西, 登沙. 青藏高原东部大中型兽类多样性及时空分布格局. 四川林业科技, 2024, 45(2): 48-62.

[8] 张清浩, 姚松, 徐恺, 刘统, 肖文宏, 白兵勇, 黄小群, 肖治术. 基于红外相机技术对河南内乡宝天曼国家级自然保护区鸟兽多样性的调查. 兽类学报, 2023, 43(2): 206-214.

[9] 许玲霞, 许林, 王广鑫, 宗诚. 黑龙江凉水国家级自然保护区花尾榛鸡冬季卧栖地选择. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2449-2454.

[10] 于美辰, 陈俊达, 司雨蕙, 魏爽, 荆媛, 戎可. 阔叶红松林中黑啄木鸟的取食生境偏好. 野生动物学报, 2024, 45(2): 328-337.

[11] 顾伟, 马玲, 刘哲强, 焦玥, 王利东, 张琛. 凉水自然保护区不同林型地表甲虫物种多样性. 东北林业大学学报, 2014, 42(1): 131-135.

[12] 顾伟, 马玲, 刘哲强, 焦玥, 王利东, 张琛, 孙虎, 孙美欧. 小兴安岭凉水自然保护区蝶类多样性. 生态学报, 2015, 35(22): 7387-7396.

[13] 王文杰, 杜红居, 肖路, 张建宇, 仲召亮, 周伟, 张波, 王洪元. 凉水自然保护区 3 种森林类型的植物组成和林分结构特征. 林业科学, 2019, 55(9): 166-176.

[14] 李武赫, 董利虎, 李凤日. 凉水自然保护区阔叶红松林冠下 4 个主要树种更新幼树树高生长模型. 东北林业大学学报, 2021, 49(3): 1-8.

[15] 包欣欣, 刘丙万. 黑龙江凉水和丰林保护区鸟类和兽类多样性. 生态学报, 2018, 38(2): 502-510.

[16] Liu X H, Wu P F, Songer M, Cai Q, He X B, Zhu Y, Shao X M. Monitoring wildlife abundance and diversity with infra-red camera traps in Guanyinshan Nature Reserve of Shaanxi Province, China. Ecological Indicators, 2013, 33: 121-128.

[17] 魏辅文. 中国兽类分类与分布. 北京: 科学出版社, 2022.

[18] Andrew T. Smith, 解焱. 中国兽类野外手册. 长沙: 湖南教育出版社, 2009.

[19] 国家林业和草原局, 农业农村部. 国家重点保护野生动物名录. (2021-02-05) [2024-03-17]. http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html.

[20] IUCN. 2024. The IUCN red list of threatened species. (2024-07-29) [2024-8-20]. https://www.iucnredlist.org.

[21] 生态环境部, 中国科学院. 中国生物多样性红色名录-脊椎动物卷(2020). (2023-05-18) [2024-03-17]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/W020230522536559098623.pdf.

[22] Shannon C E. A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.

[23] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13: 131-144.

[24] 李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云. 红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, 2014, 22(6): 685-695.

[25] 李俊生, 宋延龄, 徐存宝, 曾治高, 宋影. 小兴安岭林区不同生境梯度中小型哺乳动物生物多样性. 生态学报, 2003, 23(6): 1037-1047.

[26] Piña T E N, Carvalho W D, Rosalino L M C, Hilário R R. Drivers of mammal richness, diversity and occurrence in heterogeneous landscapes composed by plantation forests and natural environments. Forest Ecology and Management, 2019, 449: 117467.

[27] 吴政浩, 丁志锋, 周智鑫, 梁健超, 王卓婷, 章亚宁, 胡一鸣, 胡慧建. 中国陆生脊椎动物野外调查的发展现状与文献分析. 生物多样性, 2023, 31(3): 198-215.

[28] Krebs C J, Boonstra R, Gilbert S, Reid D, Kenney A J, Hofer E J. Density estimation for small mammals from livetrapping grids: rodents in northern Canada. Journal of Mammalogy, 2011, 92(5): 974-981.

[29] 王文, 马建章, 余辉亮, 胡立清. 小兴安岭地区黑熊的食性分析. 兽类学报, 2008, 28(1): 7-13.

[30] Ali A, Zhou Z X, Waseem M, Khan M F, Ali I, Asad M, Qashqaei A T. An assessment of food habits and altitudinal distribution of the Asiatic black bear (Ursus thibetanus) in the Western Himalayas, Pakistan. Journal of Natural History, 2017, 51(11/12): 689-701.

[31] Silmi M, Putra K, Amran A, Huda M, Fanani A F, Galdikas B M, Anggara S P, Traeholt C. Activity and ranging behavior of leopard cats (Prionailurus bengalensis) in an oil palm landscape. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 651939.

[32] Choi M B, Woo D, Choi T Y. Composition of the insect diet in feces of yellow-throated marten, Martes flavigula, in Jirisan National Park, South Korea. Journal of Ecology and Environment, 2015, 38(3): 389-395.

[33] 朱博伟, 王彬, 冉江洪, 李波, 黄蜂, 李晓清, 古晓东. 黄喉貂日活动节律及食性的季节变化. 兽类学报, 2019, 39(1): 52-61.

[34] 包新康, 马建章, 张迎梅. 大兴安岭紫貂食物组成分析. 兽类学报, 2003, 23(3): 203-207.

[35] Schneider F D, Brose U, Rall B C, Guill C. Animal diversity and ecosystem functioning in dynamic food webs. Nature Communications, 2016, 7: 12718.

[36] Maureaud A, Andersen K H, Zhang L, Lindegren M. Trait-based food web model reveals the underlying mechanisms of biodiversity-ecosystem functioning relationships. The Journal of Animal Ecology, 2020, 89(6): 1497-1510.

[37] Valiente-Banuet A, Aizen M A, Alcántara J M, Arroyo J, Cocucci A, Galetti M, García M B, García D, Gómez J M, Jordano P, Medel R, Navarro L, Obeso J R, Oviedo R, Ramírez N, Rey P J, Traveset A, Verdú M, Zamora R. Beyond species loss: the extinction of ecological interactions in a changing world. Functional Ecology, 2015, 29(3): 299-307.

[38] Gray S M, Roloff G J, Kramer D B, Etter D R, Vercauteren K C, Montgomery R A. Effects of wild pig disturbance on forest vegetation and soils. The Journal of Wildlife Management, 2020, 84(4): 739-748.