



•综述•

中国陆生脊椎动物野外调查的发展现状与文献分析

吴政浩^{ID 1,2,3}, 丁志锋^{ID 2}, 周智鑫^{ID 2}, 梁健超^{ID 2}, 王卓婷^{2,4}, 章亚宁^{ID 2,5}, 胡一鸣^{ID 2*}, 胡慧建^{2*}

1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 广东省科学院动物研究所, 广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东省野生动物保护与利用公共实验室, 广州 510260; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 5. 中国计量大学生命科学学院, 杭州 310018

摘要: 新中国成立以来, 我国已开展了大量陆生脊椎动物的本底调查和多样性研究项目, 取得了一系列成果, 并有学者针对兽类、鸟类和两栖爬行类的野外调查监测进行了总结和展望, 但尚缺乏对所有陆生脊椎动物类群的调查历史和现状的分析及基于文献收集的研究, 特别是对调查方法和技术手段的对比与总结。因此, 本文通过文献收集的方法, 基于中国知网、Web of Science核心合集和以图书检索为主的读秀学术搜索, 以“兽类”“鸟类”“爬行类”“两栖类”“动物资源”“调查”“监测”“新种”“新记录”和“物种多样性”作为检索词, 检索并筛选了与兽类、鸟类、爬行类及两栖类陆生脊椎动物调查相关的文献资料共3,504篇, 对陆生脊椎动物调查的研究文献在全国各省级行政区、生物多样性热点地区的分布, 及其运用的调查方法和技术手段进行了系统的分析和比较。结果表明: 相较兽类和两栖爬行类的调查, 我国鸟类多样性的调查最多, 发表文献占有所有文献的70.26%。四川、云南的陆生脊椎动物调查最多, 分别发表285篇、260篇文献。分布于我国的4个全球生物多样性热点地区的调查强度存在显著差异, 印缅生物多样性热点地区和中国西南山地的研究文献较多, 分别为348篇、324篇文献; 中亚山地、喜马拉雅山地的研究文献较少, 分别为71篇、66篇文献。陆生脊椎动物调查方法主要采用样线法、样点法、样方法和直接计数法, 或将上述几种方法综合应用, 样线法在所有场景(如: 高山冻原、农田、城市等)中应用频率最高; 技术手段以直接观察法、采集法、红外相机陷阱法为主, 其中直接观察法在所有场景(如城市、湿地、草原等)中应用频率最高。当前, 我国陆生脊椎动物调查已取得很多新进展, 包括新兴物种采集和物种识别技术的发展(如无人机技术在大型兽类和集群水鸟上的应用、卫星追踪在迁徙鸟类上的应用等)、大数据时代下调查方法的改善和数据管理的提升等。未来我国的陆生脊椎动物调查, 应拓宽新兴物种采集方法和识别技术的应用范围, 进一步关注和发掘脊椎动物的新调查技术, 以大数据为基础完善种群数据分析与调查管理体系, 并朝着面向大众、服务社会的方向发展, 以引起全社会对生物多样性保护的重视。本文以整体的视角概述了陆生脊椎动物各类群调查的情况, 评估了不同地区调查强度的差异, 并在调查方法和技术手段方面作了总结和展望, 可为未来国内陆生脊椎动物野外调查工作的总体方向、调查侧重、方法运用等方面提供一定的参考。

关键词: 陆生脊椎动物; 野外调查; 调查方法; 技术手段; 生物多样性热点地区

吴政浩, 丁志锋, 周智鑫, 梁健超, 王卓婷, 章亚宁, 胡一鸣, 胡慧建 (2023) 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, 31, 22363. doi: 10.17520/biods.2022363.

Wu ZH, Ding ZF, Zhou ZX, Liang JC, Wang ZT, Zhang YN, Hu YM, Hu HJ (2023) Development status and document analysis: A review on terrestrial vertebrate field surveys in China. Biodiversity Science, 31, 22363. doi: 10.17520/biods.2022363.

Development status and document analysis: A review on terrestrial vertebrate field surveys in China

Zhenghao Wu^{ID 1,2,3}, Zhifeng Ding^{ID 2}, Zhixin Zhou^{ID 2}, Jianchao Liang^{ID 2}, Zhuoting Wang^{2,4}, Yaning Zhang^{ID 2,5}, Yiming Hu^{ID 2*}, Huijian Hu^{2*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650

2 Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangdong Public Laboratory of Wild Animal

收稿日期: 2022-06-30; 接受日期: 2022-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(31901109)、中国博士后科学基金(2021M700891)、广东省林业科技创新项目(2018KJCX037)、广东省科技计划项目(2019B121202004)、广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110744)和第四纪冰期旋回对南岭生物多样性影响调查研究项目(2021GJGY001)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: yiming1226@126.com; 13570909977@139.com

<https://www.biodiversity-science.net>

Conservation and Utilization, Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510260

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642

5 College of Life Sciences, China Jiliang University, Hangzhou 310018

ABSTRACT

Aim: To understand the history and contemporary status of terrestrial vertebrate diversity surveys in China by analyzing the existing problems and suggesting the corresponding solutions.

Method: We searched publications on terrestrial vertebrate field surveys from CNKI Database, Web of Science Core Collection Database and Duxiu Scholar Database with “mammals” “avian” “birds” “reptilians” “amphibians” “survey” “monitor” “new species” “new records” “animal resources” and “species diversity” as keywords. We reviewed the surveys on the terrestrial vertebrates since 1949 in China. We analyzed and compared the distribution of surveys among provinces and biodiversity hotspots, as well as the survey methods and techniques used.

Review Results: Compared with the surveys of mammals, amphibians and reptiles in China, surveys of birds appeared most (70.26% of all publications considered). The terrestrial vertebrate field surveys in Sichuan Province (285 publications) and Yunnan Province (260 publications) were more extensive in coverage than those in other regions. The number of surveys was different in the four biodiversity hotspots. The Indo-Burma hotspot (348 publications) and “Mountains of Southwest China” (324 publications) had more publications, and “Mountains of Central Asia” (71 publications) and “Himalaya” (66 publications) had fewer publications. The common methods on terrestrial vertebrate diversity surveys were: the line transect method, the point sampling method, the quadrat sampling method and the direct count method. The line transect method was the most frequently used in all the application scenarios (e.g., alpine tundra, farmland, city, etc.). Observation, capture, and camera traps were the most widely used sampling techniques. The observation sampling technique was the most frequently used in all application scenarios (e.g., city, wetland, grassland, etc.). At present, terrestrial vertebrate field surveys have made a lot of progress, including the development of new species data collection methods and identification techniques (e.g. unmanned aerial vehicle (UAV) technology in the search of large mammals and mixed-waterbirds, satellite tracking technology in the search of migratory birds, etc.), and the improvement of survey methods and data management in the era of “big data”, among others.

Going Forward: In the future, we should broaden the application of new species data collection methods and identification techniques, and explore new techniques for terrestrial vertebrate surveys. Furthermore, we should improve the population data analysis and the survey management system based on “big data” which is prevalent. Lastly, in addition to developing biodiversity protection measures, the results of terrestrial vertebrate surveys should be oriented to the public, and in doing this, the general public shall gain interest in biodiversity protection.

Key words: terrestrial vertebrate; field survey; survey method; technique; biodiversity hotspot

生物多样性是自然生态系统的重要属性,是人类生存的重要物质基础(马克平和钱迎倩, 1998)。中国的物种多样性丰富,是全球12个“巨大多样性国家”之一(Hilton-Taylor, 2000)。全球的36个生物多样性热点地区(biodiversity hotspot)中,在中国境内有分布的共4个,分别为中国西南山地(Mountains of Southwest China, 包括云南西部、四川西部、西藏东部、甘肃南部和贵州西部)、喜马拉雅山地(Himalaya, 部分位于我国西藏南部)、印缅生物多样性热点地区(The Indo-Burma hotspot, 部分位于我国海南岛、云南南部、广西南部、广东南部、香港和澳门)以及中亚山地(Mountains of Central Asia, 部分位于我国新疆天山山脉和帕米尔高原)(Marchese, 2015)。

陆生脊椎动物是生物多样性的的重要组成部分,

许多物种还具有重要的社会和研究价值。我国现有陆生脊椎动物3,133种,包括686种兽类、1,445种鸟类、475种爬行类和527种两栖类(蒋志刚等, 2021; 魏辅文等, 2021)。然而,全球变化的加剧、社会经济的不断发展以及人为活动的扩张所导致的野生动物栖息地丧失与破碎化、自然资源的过度利用、环境污染等,使陆生脊椎动物多样性受到了强烈影响(魏辅文等, 2014)。根据IUCN发布的《全球受威胁物种红色名录》,全世界共有超过41,000个物种正面临着不同程度的灭绝风险,其中包括27%的兽类、13%的鸟类、21%的爬行类和41%的两栖类(IUCN, 2022)。我国科学家对分布于中国的陆生脊椎动物进行了评估,结果发现约有25.9%的兽类、10.0%的鸟类、30.5%的爬行类以及37.3%的两栖类为生存受威胁物种(蒋志刚等, 2021)。因此,及时准

确地掌握动物种群的动态变化、完善濒危物种评估体系, 基于所掌握的情况采取就地保护或迁地保护等措施, 对于缓解物种灭绝风险具有重要意义。

新中国成立以来, 随着国民经济的发展, 我国已开展了大量陆生脊椎动物的本底调查和多样性研究项目, 取得了一系列成果, 并逐步向物种多样性的长期监测推进。近年来, 许多学者在前人研究成果的基础上对我国陆生脊椎动物各类群(兽类、鸟类、两栖爬行类)的调查工作进行了分析和展望, 如肖治术等(2017)在总结了国内外兽类监测研究的基础上, 提出了我国陆生兽类多样性监测网的规划; 崔鹏等(2013)对我国鸟类监测的现状、产生的问题及相应的对策展开了探讨, 提出了政府引导、多方参与的国家鸟类监测网络的建议; 李成等(2017)在结合国内外两栖爬行动物监测计划以及我国已有工作的基础上, 提出并展望了我国生物多样性关键地区两栖爬行动物监测与研究计划及其发展前景。然而, 由于先前的研究尚没有基于文献收集的方法同时对我国兽类、鸟类、爬行类和两栖类四个类群的陆生脊椎动物的调查历史和现状进行系统而全面的分析, 因此缺乏以整体的视角了解当前我国陆生脊椎动物调查工作中存在的问题, 对未来的调查工作方案的制订和物种多样性保护措施的完善将产生一定的影响。

基于此, 作者基于中国知网(<https://www.cnki.net/>)、Web of Science核心合集(<https://www.webof-science.com/>)和以图书检索为主的读秀学术搜索(<https://www.duxiu.com/>), 以兽类(mammal)、鸟类(avian or bird)、爬行类(reptilian)、两栖类(amphibian)、调查(survey)、监测(monitor)、新种(new species)、新记录(new records)、动物资源(animal resources)和物种多样性(species diversity)等为主题关键词进行了文献检索, 时间跨度为1949年10月1日至2020年12月31日, 文献类型限定于期刊、学位论文、会议论文摘要及专著4种类型。根据上述关键词, 共获取了7,322篇文献。随后对检索结果进行筛选, 仅留下得以系统开展陆生脊椎动物调查工作的, 并且其调查结果能反映当地物种的组成、分布等的代表性文献; 另外, 如有多篇文献使用同一次野外调查数据的, 仅记录为1次调查。最终我们共得到3,504篇文献, 包括涉及陆生脊椎动物调查工作

的调查报告2,215篇, 新种、新记录的报道823篇, 以及各省区动物志、保护区科考报告为主的专著466部(附录1)。本文以文献分析为主要方法, 总结了新中国成立以来陆生脊椎动物的调查情况, 分析了陆生脊椎动物调查在全国的分布、使用的调查方法及采取的主要技术手段, 对未来的调查工作提出了建议, 并进行了展望。

1 新中国成立后我国陆生脊椎动物调查概况

新中国成立后, 随着国民经济的迅速恢复, 我国陆生脊椎动物的调查研究得以继续开展。20世纪50年代初期, 中国科学院便组织了多次大规模、长时间以及多学科的动植物综合考察, 如对云南南部(1955–1959年)、南水北调地区(1957–1960年)、横断山脉(1958–1980年)、西藏南部(1959–1977年)等地的综合考察。此外, 各省林业部门、各高校研究团队也在局部地区开展了相应的调查(郑作新, 1997)。新中国的兽类调查始于1953年, 在时任中国科学院院长郭沫若的号召下, 中国科学院动物研究所脊椎动物学专家寿振黄先生带领团队于1953–1957年先后在大小兴安岭、长白山及内蒙古东部开展了兽类调查, 并于1958年完成由中国人撰写的第一部兽类专著及第一部兽类地方志《东北兽类调查报告》, 共记录兽类77种。鸟类调查始于1955年, 与苏联合作在云南南部大围山一带开展, 此后, 中国科学院先后组织在西南山地多地区开展鸟类调查, 涵盖四川、云南、西藏等多个省级行政区。爬行类和两栖类的调查在1958年兴起, 多为各地高校或研究机构开展的地方性调查, 如《海南岛爬行纲动物的调查报告》(李致勳, 1958)、《西双版纳两栖纲及爬行纲动物初步调查》(黄祝坚, 1958)等、《河南省两栖动物和爬行动物目录(包括新纪录21种)》(周家兴和单元勋, 1961)、《湖南南岳山无尾两栖类的初步研究》(沈猷慧, 1965)等。

20世纪80年代以后, 我国政府高度重视生物多样性保护, 并开展了一系列卓有成效的工作。1988年, 第七届全国人大常委会第四次会议通过了《中华人民共和国野生动物保护法》, 规定每隔10年要开展一次全国野生动物资源调查。随后, 中华人民共和国林业部(今国家林业和草原局)于1995–2003年启动了全国第一次陆生野生动物资源调查, 这是

我国开展的第一次全国性、大规模、以数量调查为主要目的和特点的系统调查工作,采用了常规调查与专项调查相结合的调查体系,基本查清了252个珍稀濒危脊椎动物物种的资源情况(马福和张建龙, 2009)。自2009年起,国家林业局(今国家林业和草原局)又组织开展了第二次全国陆生野生动物资源调查,在第一次调查的基础上改进了调查体系,由“野生种群及栖息地调查”和“野生动物驯养、繁殖、利用调查”两大体系组成。“野生种群及栖息地调查”又分为专项调查、同步调查和常规调查三个独立的调查体系。2010年,国务院第126次常务会议审议并原则通过了《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030年)》,提到开展生物多样性调查、评估与监测是生物多样性保护的优先领域之一,随后,各级政府机构,尤其是负责生物多样性保护的林业和环保部门联合相关科研机构陆续开展了生物多样性本底调查。如华南濒危动物研究所(今广东省科学院动物研究所)于2010年率先在广东省各地开展系统性的地级市陆生野生动物资源本底调查,并出版相关专著(胡慧建, 2010; 胡慧建等, 2019a, b, 2020, 2022)。环境保护部南京环境科学研究所(今生态环境部南京环境科学研究所)于2010–2011年组织开展了对生物多样性保护优先区域中的云南、贵州、广西三省(区) 26县(市、区)的县域生物多样性综合调查与评估试点示范研究,为之后开展生物多样性保护工作提供了权威的本底资料(薛达元等, 2015; 武建勇等, 2016)。2019年,中国环境科学研究院面向全国相关科研单位公开征集“生物多样性调查与评估”项目协作课题,包括全国生物多样性状况评估专题、重点物种和生物遗传资源调查与评估专题、重点区域(辉河国家级自然保护区、阿鲁科尔沁国家级自然保护区等)生物多样性观测专题、生物多样性保护优先区域(京津冀太行山、横断山南段、武陵山、秦岭等)生物多样性调查、观测与评估专题等,为我国实施野生动物的保护以及自然保护区的建设提供了重要的科学依据。

除政府部门的努力外,非政府组织、民间自然保护组织等也积极参与了陆生脊椎动物的调查工作。如世界自然基金会(World Wide Fund For Nature, WWF)自1980年始在国内开展大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)及其栖息地的保护工作以来,已先后

完成了3次全国大熊猫及其栖息地调查,此外还开展了野生虎(*Panthera tigris*)、长江江豚(*Neophocaena asiaeorientalis*)、雪豹(*Panthera uncia*)等濒危旗舰物种的监测等。成立于2007年的山水自然保护中心目前已开展了三江源生物多样性快速调查、云南及藏东南生物多样性调查等陆生脊椎动物的相关调查工作。非政府组织、民间自然保护组织等的加入不但能为政府部门、自然保护地等完善物种本底数据,且能够通过公众宣传、公众引导等方式唤起社会的保护意识,推动生物多样性得到切实保护。

陆生脊椎动物物种名录是进行陆生脊椎动物多样性研究、保护、利用以及管理的重要依据,同时也是动物资源调查的重要成果之一。随着陆生脊椎动物调查工作在各地的陆续开展,物种名录的编目工作也如火如荼。自1979年《中国动物志·鸟纲》问世以来,《中国动物志》中关于陆生脊椎动物的编目不断完善,目前已出版了22卷,包括兽纲3卷、鸟纲13卷、爬行纲3卷、两栖纲3卷。此外,中国科学院生物多样性委员会于2008年发布了《中国生物物种名录》(CoL China),以光盘和网站数据库的方式为用户提供信息服务,且每年更新一次最新的物种名录,使得物种编目工作信息化、实时化、普及化。近年来,随着分子生物学的快速发展和分类学研究方法的不断完善,陆生脊椎动物物种编目工作在分类阶元、物种界定等方面更加细致。如近年来有关陆生脊椎动物的3个代表性名录(《中国兽类名录(2021版)》(魏辅文等, 2021)、《中国两栖、爬行动物更新名录》(王凯等, 2020)和《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》(郑光美, 2017))中均重新评价了各类群之间的演化关系,在目、科、属等分类阶元上作了进一步的合并与拆分。

2 我国陆生脊椎动物调查的文献分析

2.1 陆生脊椎动物野外调查相关研究发文量

根据本研究的收集和筛选,1949–2020年间,共得到兽类文献1,105篇,占有文献总数的31.54%;鸟类文献2,462篇,占有文献总数的70.26%,两栖爬行类文献1,009篇,占有文献总数的28.80%(图1)。我国陆生脊椎动物调查的发文量在不同时间段、不同陆生脊椎动物类群之间的增长趋势均有差异(图2)。新中国成立初期(1949–1977年),在中国科学

院组织的大规模动植物综合考察的推动下,各陆生脊椎动物类群的调查文献开始出现,平均每年发文量为 6.79 ± 6.68 篇,其中鸟类调查发文量最多,1949–1977年共发文84篇。

1978年改革开放以来,各陆生脊椎动物类群的发文量均逐步上升,至21世纪初,总体文献数量由1978年的9篇/年增长至2000年的72篇/年,仍以鸟类调查为主(由1978年的6篇/年增长至2000年的50篇/年)。到了2010年,鸟类调查的文献出现大量增长,以接近翻倍的速度由2009年的51篇/年骤升至91篇/

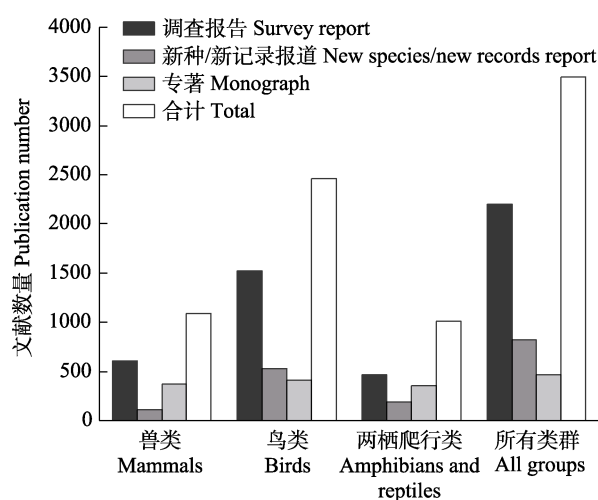


图1 陆生脊椎动物不同类群的调查文献数量
Fig. 1 The number of publications on different groups of terrestrial vertebrate surveys

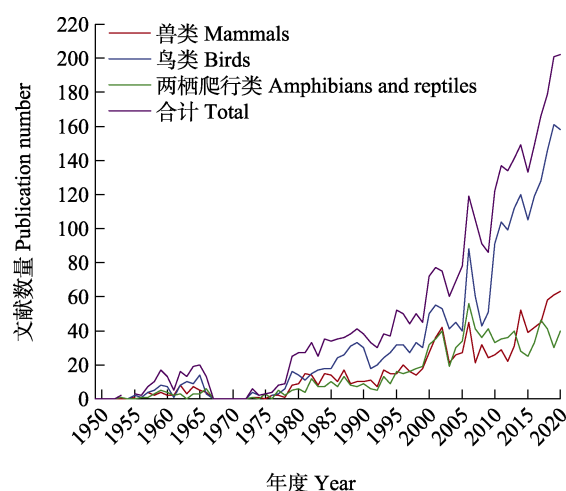


图2 新中国成立以来陆生脊椎动物调查的年发文量
Fig. 2 The number of publications published annually on terrestrial vertebrate surveys since the establishment of People's Republic of China

年,增长率为78.43%,此后呈波动增长趋势,2010–2020年发文量平均增长率 $6.06\% \pm 9.34\%$,2019年的发文量最多(161篇)。相比之下,2010年后兽类和两栖爬行类的发文量仍远少于鸟类发文量,且同样处于波动增长趋势:兽类的年发文量增长率较快但波动较大,2010–2020年发文量平均增长率 $12.07\% \pm 26.81\%$,其中2014年发文量出现了一次大增长(由2013年的31篇/年增长至2014年的52篇/年,增长率67.74%),2020年发文量最多(63篇);两栖爬行类调查的年发文量增长较慢,增长率 $4.63\% \pm 24.71\%$,2017年发文量最多(46篇)。

经济发展与生物多样性保护和陆生脊椎动物调查的发展息息相关。以陆生脊椎动物调查的年发文量与人均国内生产总值(人均GDP)为变量进行线性回归分析,结果表明:从新中国成立到改革开放前(1949–1977年),我国的人均GDP较低,并不能很好地反映陆生脊椎动物调查的发展趋势(图3a, $R^2 = 0.0064$);改革开放以后(1978–2020年),随着我国国民经济的显著增长,陆生脊椎动物调查的文献量和人均GDP呈显著正相关(图3b, $R^2 = 0.9446$),说明良好的经济增长是陆生脊椎动物调查及相关研究快速发展的基础。

2.2 陆生脊椎动物调查在全国的分布情况

2.2.1 新中国成立后各省级行政区调查情况

陆生脊椎动物总体的调查(图4a, 附录2)主要集中在西南和华南地区。文献数量位列前五的省级行政区分别为四川(285篇)、云南(260篇)、陕西(176篇)、内蒙古(161篇)和贵州(156篇);文献数量位列后五的省级行政区分别为宁夏(62篇)、山西(62篇)、海南(57篇)、上海(53篇)和天津(40篇)。另外,港澳台地区的文献数量较少(兽类:香港3篇、澳门3篇、台湾4篇;鸟类:香港7篇、澳门6篇、台湾3篇;两栖爬行类:香港4篇、澳门4篇、台湾4篇),因而未纳入统计。

兽类调查(图4b)文献数量最多的省级行政区为四川和云南,均发表112篇文献,其余省级行政区发表的有关兽类调查文献数量均为70篇及以下,有13个省级行政区的文献数量仅在30篇及以下。31个省级行政区平均发表文献数量为 36.58 ± 24.83 篇。

鸟类调查(图4c)文献数量最多的省级行政区为四川(175篇),排第二位的是云南(148篇),此外,文

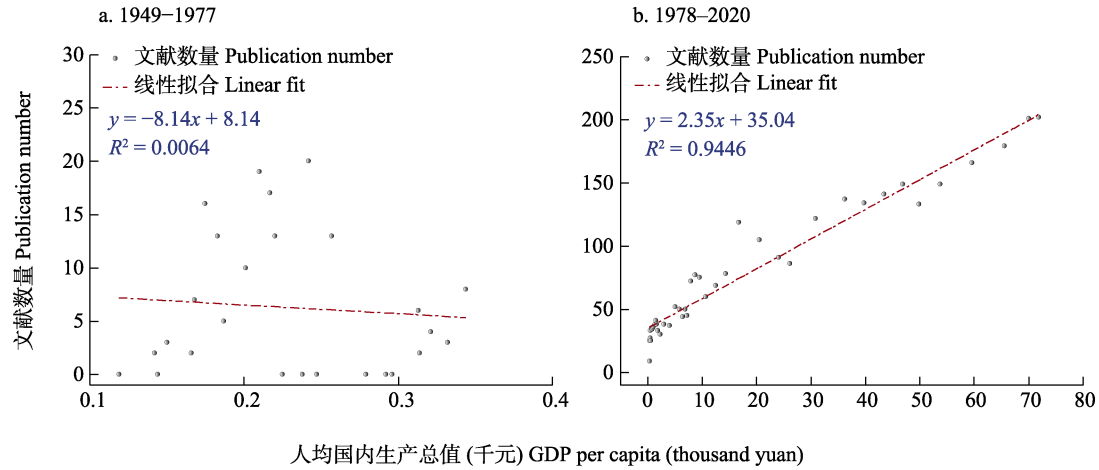


图3 1949–1977年(a)和1978–2020年(b)陆生脊椎动物调查的年发量与人均国内生产总值的线性回归分析。图中每个点代表某年发表的文献数量所对应的当年的人均国内生产总值, 人均国内生产总值数据来源于国家统计局。

Fig. 3 Linear regression analysis of annual publications on terrestrial vertebrate surveys and gross domestic product (GDP) per capita from 1949–1977 (a) and 1978–2020 (b). Each point in the graph indicates the GDP per capita for a given year in relation to the publication number in that year. GDP per capita data was from the National Bureau of Statistics.

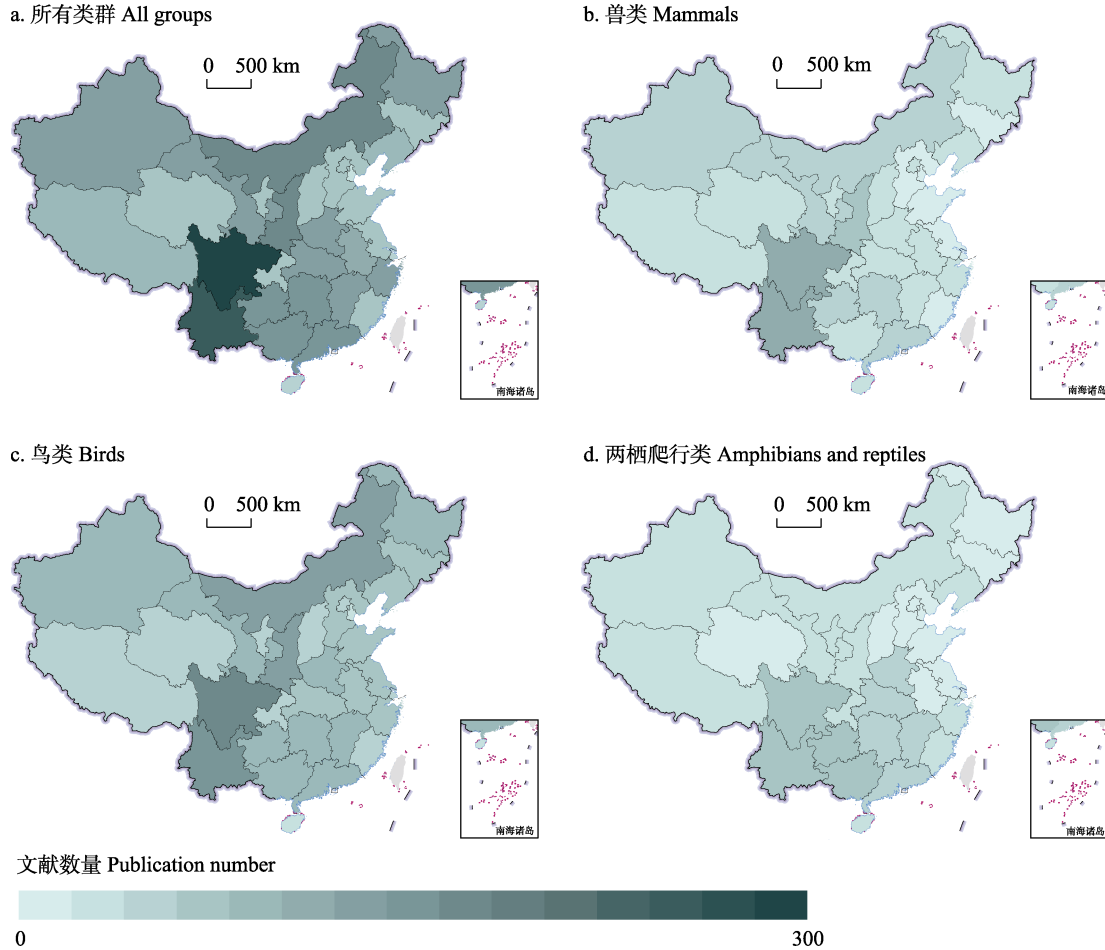


图4 陆生脊椎动物的调查文献数量在全国的分布(港澳台地区因数据量少而未纳入统计)。各省级行政区不同陆生脊椎动物类群的文献数量见附录2。

Fig. 4 The distribution of publications on terrestrial vertebrate surveys in China. Hong Kong, Macao and Taiwan were not included in the statistics due to the small amount of data. The number of publications on different terrestrial vertebrate groups in each provincial region is shown in Appendix 2.

献数量达到100篇及以上的还有内蒙古(135篇)、陕西(129篇)和广西(100篇)。鸟类在全国的大部分区域研究较多, 31个省级行政区平均发表文献数量为 78.96 ± 33.75 篇, 共有26个省级行政区的鸟类调查文献数量在50篇及以上。

两栖爬行类调查(图4d)的文献主要集中在南方地区。各省级行政区文献数量最多的为云南(78篇)。此外, 文献数量达到50篇及以上的还有贵州(76篇)、四川(66篇)、广西(65篇)、湖南(58篇)和广东(52篇), 均为南方山地或丘陵地区。17个省级行政区的文献数量仅在30篇及以下。31个省级行政区平均发表文献数量为 32.71 ± 20.07 篇。

2.2.2 新中国成立后我国生物多样性热点地区调查情况

陆生脊椎动物调查在生物多样性热点地区侧重较多, 在中国境内有分布的4个全球生物多样性热点地区共发表文献757篇, 占全部文献的21.60%(图5, 附录1)。不同热点地区调查的侧重有所差异: 印缅生物多样性热点地区发表陆生脊椎动物相关文献最多, 共348篇, 包括兽类126篇、鸟类202篇和两栖爬行类135篇; 文献量紧随其后的是中国西南山地热点地区, 共发表324篇文献, 包括兽类143篇、鸟类186篇、两栖爬行类87篇, 其中兽类文章多于印缅生物多样性热点地区。

相较上述两个生物多样性热点地区, 同样在我国境内有分布的中亚山地和喜马拉雅山地热点地

区发表的文献数量相对较少。中亚山地热点地区共发表文献71篇, 包括兽类24篇、鸟类52篇以及两栖爬行类11篇; 4个生物多样性热点地区文献发表数量最少的为喜马拉雅山地, 共66篇, 包括兽类31篇、鸟类35篇以及两栖爬行类15篇。

2.3 陆生脊椎动物调查方法与技术手段分析

2.3.1 调查方法

早期的动物调查多采用绝对数量调查方法, 即尽可能多地对动物种群数量进行记录, 缺乏统计学水平上的系统性研究, 且其往往搭配对动物造成较大干扰的技术手段(如哄赶法等)。随着种群生态学的发展, 人们有了更多的定量方法来研究种群的规模大小或时空尺度上的变化规律。目前, 国内的陆生脊椎动物调查方法以相对数量调查方法为主, 主要分为以下4种: 样线法(line transect method)、样点法(point sampling method)、样方法(quadrat sampling method)以及直接计数法(direct count method)。在涉及详细介绍陆生脊椎动物调查工作的2,215篇调查报告中(附录1), 调查方法明确的文献有1,624篇, 未知调查方法的文献有591篇。本章节以调查方法明确的1,624篇文献数据为基础进行分析。

陆生脊椎动物总体调查(图6a)采用的调查方法主要为样线法, 占有调查方法的47.23%; 其次为样线法、样点法相结合的方法(19.09%)以及样点法(13.98%); 大部分陆生脊椎动物的调查采用了样线法、样点法及两者相结合的方法(80.30%)。兽类调查(图6b)主要采用样点法, 占有调查方法的41.48%, 其中大多数调查以使用红外相机陷阱法为技术手段, 调查对象主要为林下大中型兽类; 此外, 39.01%的调查采用了样线法, 调查对象同样为大中型兽类; 8.89%的调查采用了样方法, 调查对象主要为非飞行小型哺乳动物, 辅以铗日法、笼捕法等捕捉方法; 3.95%的调查采用了样线法、样方法结合的方法; 4.94%的调查采用了样线法、样点法结合的方法。鸟类调查主要采用样线法(图6c), 占有调查方法的45.55%; 22.61%的调查采用了样线法、样点法相结合的方法, 在样线中添加的样点主要为视野开阔的高地、林分郁闭度高, 容易形成“鸟浪”的点位, 或通过走访调查、文献收集确定的鸟类活动频率高的点位; 11.84%的调查采用了样点法, 使用的生境主要为难以划定样线的复杂山地; 5.31%的调查采

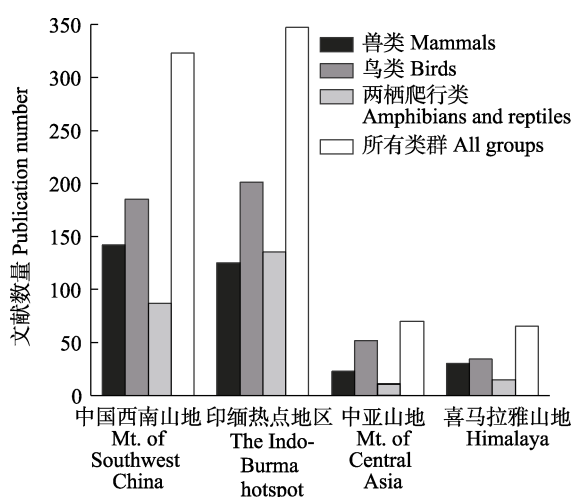


图5 生物多样性热点地区的陆生脊椎动物调查发文数量
Fig.5 The number of publications on terrestrial vertebrate surveys in biodiversity hotspots

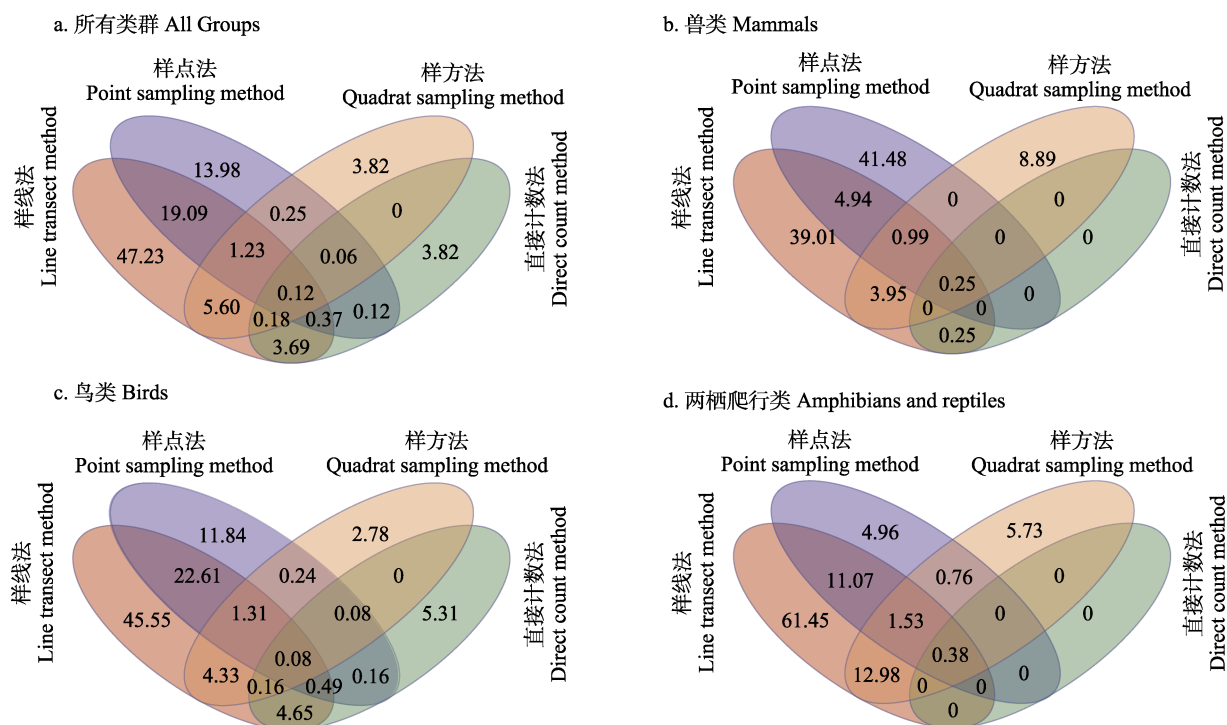


图6 陆生脊椎动物调查所使用的调查方法的比例(单位: %)。不同颜色椭圆重叠的区域代表同时使用了相应调查方法。
Fig. 6 Proportion of methods for terrestrial vertebrate surveys (%). The overlapping areas of different colored ellipses indicate the simultaneous use of corresponding survey methods.

用了直接计数法, 主要为生活在开阔生境中的集群鸟类(如迁徙鸟类、湿地水鸟等)的调查。两栖爬行类调查(图6d)主要采用样线法, 占有调查方法的61.45%, 但和兽类、鸟类不同的是, 两栖类夜晚活跃度高, 且喜好潮湿环境, 因此调查时间多安排在夜间, 并且在划定样线时重点考虑溪流、池塘等近水源处(因此也称“水线法”); 12.98%的调查采用了样线法、样方法结合的方法; 11.07%的调查采用了样线法、样点法结合的方法, 其样点主要设置在两栖类和蛇类易出没的池塘、沼泽、稻田处; 5.73%的调查采用了样方法, 主要为两栖类的调查, 多辅以围栏陷阱的手段进行采集。

受地形、气候、植被和人为干扰等影响, 在不同的场景中所使用的调查方法有所差异。为探究不同调查方法在不同场景中的应用频率, 作者以不同陆生脊椎动物的主要栖息地类型为依据, 划为北方森林、南方森林、湿地、草原、草甸、荒漠、高山冻原、农田共8个应用场景。另外, 自建设部(今住房和城乡建设部) 2002年颁布《关于加强城市生物多样性保护工作的通知》以来, 城市生物多样性的保护愈发受到关注(干靛, 2018)。城市生态系统由于

其特定的异质景观单元、较大的人为干扰程度等而具有一定特殊性(吴人韦, 1999)。本文所搜集到的调查文献中有485篇的调查地点涵盖城市, 故在上述8个应用场景的基础上添加“城市”这一场景来开展分析。结果表明(图7, 附录1): 样线法在所有场景中的应用频率最高, 其中在高山冻原中样线法的应用频率较其他应用场景高(70.00%), 其次为农田(64.73%)和城市(64.73%); 样点法在所有场景中的应用频率均排行第二, 占比介于20%–30%之间; 样方法在除湿地外的其他场景中应用频率排行第三; 直接计数法在湿地场景的应用频率排行第三, 且相较其他应用场景, 湿地中直接计数法的应用频率最高(8.97%), 而在含有高山冻原的场景中, 直接计数法的应用频率为0。

2.3.2 技术手段

在陆生脊椎动物调查中, 调查方法需要与合适的观测和数据采集技术手段相结合。本文所提到的技术手段是指实际调查当中能够直接获得原始数据的方式。在涉及详细介绍陆生脊椎动物调查工作的2,215篇调查报告中(附录1), 明确提到技术手段的有1,921篇, 未知技术手段的文献有294篇。本章

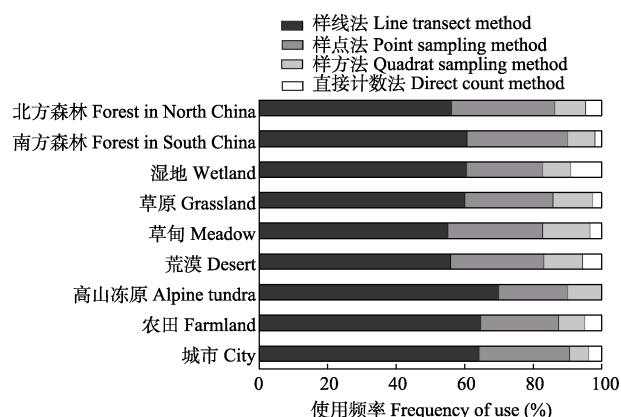


图7 陆生脊椎动物的调查方法在不同场景中的应用情况, 使用百分比堆积条形图表示不同方法在不同场景中的使用频率。

Fig. 7 Application of methods in terrestrial vertebrate surveys in different scenarios. The percentage stack bar charts are used to show the frequency of different methods used in different application scenarios.

节以技术手段明确的1,921篇文献数据为基础进行分析, 涉及的技术手段包括直接观察法、采集法、红外相机陷阱法、环志法、人工庇护所法、鸣声回放法、灯光招引法、回声定位法、无人机调查法等。作者以搜集到的所有文献中采用次数超过50次的技术手段作为常见技术手段, 并据此进行比较分析。结果共筛选出3种手段(图8), 分别为: (1)直接观察法(observation): 即利用双筒、单筒望远镜以及长焦相机等观察、拍摄(主要运用于远距离或难以接近的个体)或直接使用肉眼观察(主要运用于近距离或容易接近的个体), 同时辅以鸣声识别、痕迹观察等形式对动物进行记录。该手段的优点是设备需求少、投资成本低、适用于大部分生境、获得实验数据较快。(2)采集法(capture): 指以采集到动物实体为主要目的的手段, 包括标本采集法、笼捕法、网捕法、铗日法、围栏陷阱法等。该手段的优点是能够获得动物实体, 以便进行后期的鉴定、测量及细化研究, 调查数据具有较高的准确性。(3)红外相机陷阱法(camera trap): 即红外触发相机陷阱技术(infrared-triggered camera-trapping), 是指利用红外感应设备在无人操作的情况下自动拍摄出现的野生动物照片及动态影像, 因其装置隐蔽和能够持续工作的特点而成为陆生脊椎动物野外调查的重要手段之一(李晟等, 2014)。

陆生脊椎动物调查常用的技术手段比例各异

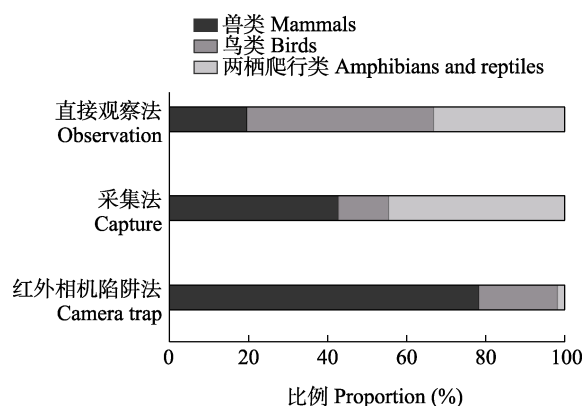


图8 陆生脊椎动物调查的常用技术手段。本统计数据使用每种技术手段的文献占对应脊椎动物类群文献总数的百分比, 以排除各脊椎动物类群文献数量差异上带来的影响。

Fig. 8 Common techniques for terrestrial vertebrate surveys. The statistical data was obtained from the publications, and calculated by the proportion of each technique used in every vertebrate group. It aimed to minimize the influence caused by the different amounts of publications in different vertebrate groups.

(图8), 这些差异与不同类群的生活史以及习性相关。例如, 兽类(特别是森林生态系统中的大中型兽类)一般难以在野外被调查人员直接观察到, 其调查采用红外相机陷阱法的比例最高, 占兽类调查总数的35.20%, 远高于鸟类(8.84%)和两栖爬行类(0.85%)。鸟类大多于清晨或黄昏出现活动高峰, 且其善于鸣叫的特性使调查人员可通过其鸣声进行识别, 其调查采用直接观察法的比例最高, 占鸟类调查总数的83.04%; 其次是两栖爬行类调查, 占其总数的58.36%; 兽类调查采用直接观察法的数量占其调查总数的34.58%。两栖爬行类的物种个体通常较小, 且活动范围相对较窄, 容易捕捉, 其调查采用采集法的比例最高(50.14%); 其次为兽类调查(48.03%), 大部分是针对啮齿目、兔形目等小型兽类, 使用铗日法、笼捕法等采集物种; 鸟类调查采用采集法的比例较少, 仅14.35%。发表于21世纪前的陆生脊椎动物调查的文献中, 有87.50%的兽类调查、64.49%的鸟类调查和93.24%的两栖爬行类调查均涉及采集法, 占比均达50%以上。

同样地, 以北方森林、南方森林、湿地、草原、草甸、荒漠、高山冻原、农田和城市作为应用场景划分依据, 探究3种常见技术手段在不同应用场景的应用频率。结果表明(图9, 附录1): 直接观察法在所有场景中应用频率最高, 其中在城市中的应用频

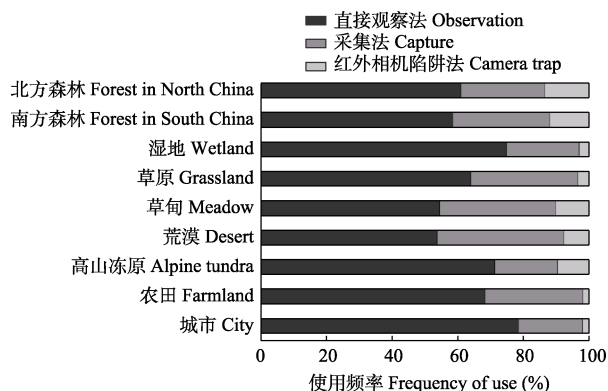


图9 陆生脊椎动物调查的常用技术手段在不同场景中的应用情况，使用百分比堆积条形图表示不同技术手段在不同场景中的使用频率。

Fig. 9 Application of common techniques in terrestrial vertebrate surveys in different scenarios. The percentage stack bar chart is used to show the frequency of different techniques used in different application scenarios.

率较其他应用场景都高(78.59%)，其次为湿地(74.92%)；采集法在所有场景中的应用频率排行第二，其中在荒漠(38.46%)、草甸(35.33%)和草原(32.50%)中的应用频率较其他场景高；红外相机陷阱法在所有场景中的应用频率均最低，但在森林(北方森林13.53%、南方森林11.92%)、草甸(10.09%)中的应用频率较其他场景高。

图10为改革开放以来不同陆生脊椎动物类群的调查所采用的3种常见技术手段随时间的变化趋势(1978年之前的文献量较少，故不纳入统计)。结果表明：(1)随着时间的推移，各类群调查采用采集法的比例减少，采用直接观察法的比例增多；(2)自1996年马世来和Harris (1996)首次采用红外相机技术在云南高黎贡山地区开展野生动物拍照实验后，国内陆续出现有关红外相机监测的报道，但直到2014年，红外相机陷阱法的使用比例才得以大幅增长(2014年所有陆生脊椎动物类群采用红外相机陷阱法的文献占比20.95%，兽类调查采用红外相机陷阱法的文献占比58.82%)；(3) 2014年以后，红外相机陷阱法在各脊椎动物类群调查中所使用的比例均有所增加，兽类采用红外相机陷阱法的比例大于直接观察法和采集法(2014–2020年兽类调查采用红外相机陷阱法的文献平均占比 $54.93\% \pm 17.35\%$)；但鸟类、两栖爬行类仍以直接观察法为主(2014–2020年鸟类调查采用直接观察法的文献平均占比 $80.13\% \pm 6.16\%$ ，两栖爬行类调查采用直接观察法

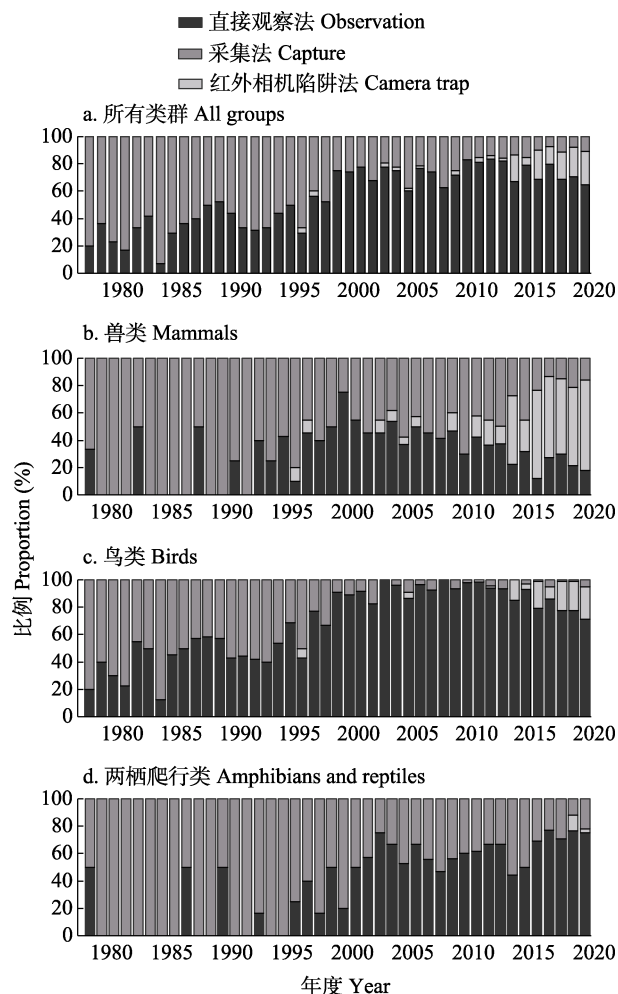


图10 改革开放以来陆生脊椎动物调查的常用技术手段随年份的变化，本统计数据使用每种技术手段占对应年度发表的文献总数的百分比，以排除不同年度文献数量差异上带来的影响。

Fig. 10 Common techniques for terrestrial vertebrate surveys changed with the year since the reform and opening-up. The statistical data was obtained from the publications, and calculated by the proportion of each technique used in every year. It aimed to minimize the influence caused by the different amounts of publications in different years.

的文献平均占比为 $62.48\% \pm 22.42\%$ 。

除上述3种常见技术手段外，还有许多便捷的陆生脊椎动物调查的技术手段，但受到时间、空间、特定物种的限制，这些技术手段的使用频率较低。如鸟类调查中，有利用鸣声回放的手段对森林下层的鸟类进行调查^①、利用灯光招引法的手段开展夜间调查(吴冉昕等, 2020)；在蝙蝠调查中，有采用回

① 李肇天 (2012) 桂西南喀斯特地区鸟类多样性和分布格局的研究. 硕士学位论文, 广西大学, 南宁.

声定位叫声的手段^①, 利用仪器录制蝙蝠用于定位的超声波, 再根据声音波形区分蝙蝠种类。诸如上述类似的技术手段虽然不常用, 但在特定环境下对于提高调查效率颇有帮助。此外, 大部分调查在正式开始之前会采取访问调查的形式, 走访当地的林业部门、居民点、农贸市场等, 初步了解所研究区域的动物分布和数量、毛皮的市场交易情况(尤以2004年前为主)、受威胁情况等, 可作为动物调查的一种辅助手段。

2.4 基于陆生脊椎动物调查的文献分析结果讨论

在新中国成立以来的任何阶段, 鸟类调查的文献数量均较兽类和两栖爬行类多, 且自2010年以来, 鸟类调查的文献数量飞速上升(图2), 这可能是由于以下几方面原因: (1)鸟类在陆生脊椎动物中种类最多; (2)相较于其他陆生脊椎动物, 鸟类大多白天活动, 活动时间长, 活动范围广, 在开展调查时难度较小; (3)观鸟活动的兴起以及诸如中国观鸟记录中心、“eBird”等公众科学平台的建设, 使鸟类数据“易获取、易统计”; (4)鸟类具有对人类用地适应性强等特点, 使其更为公众熟悉, 而兽类、两栖类因其种类少、大部分不栖息于人居环境、部分具有攻击性或毒性(如大型兽类、毒蛇等), 使其接触几率变低。因此, 相关单位(如林业局、动物园、学校等)对兽类、两栖爬行类动物的科学普及十分重要。此外, 兽类和两栖爬行类的调查也可效仿构建公众数据平台并宣传普及, 使更多人参与到物种数据获取与完善的环节中。

分布于我国的4个全球生物多样性热点地区的调查强度存在差异(图5), 印缅生物多样性热点地区和中国西南山地研究较多, 分别发表348篇、324篇文献; 中亚山地、喜马拉雅山地的研究相对较少, 分别发表71篇、66篇文献。印缅生物多样性热点地区在中国领土内多个区域有分布, 且现居住人口超过1亿, 城市化程度高, 因而面临更严峻的保护形势(张洋和林广思, 2015); 同时, 较多的人口所带来的较高的受关注度、多个省级行政区相关单位的工作以及较为发达的经济使该地区的陆生脊椎动物调查拥有更多的资源投入, 这也可能是该地区文献数量较多的原因之一。中国西南山地是唯一完全分

布在我国境内的生物多样性热点地区, 以横断山脉为主, 面积仅占中国陆地面积约10%, 却拥有中国50%的鸟类和哺乳动物, 因而吸引了大批学者和研究团队开展工作。中亚山地在我国仅分布于新疆天山山脉和帕米尔高原地区, 涵盖面积较小, 发表的文献数量较少。喜马拉雅山地热点地区有33%分布在我国西藏南部, 但该地区的文献数量却位列最后, 这可能是因为喜马拉雅山地的气候较为恶劣, 地形较为复杂等, 导致该地区开展的陆生脊椎动物调查需要投入更多的人力、物力和财力。喜马拉雅山地是世界上海拔最高的山地, 特殊的气候、狭长的沟谷地貌和多样的生境孕育着丰富而又独特的生物多样性(张荣祖, 2011), 因此, 加强对喜马拉雅山地陆生脊椎动物多样性的研究尤为必要。近10年来, 我国关于喜马拉雅山地的研究发展较快, 各类群陆生野生动物调查工作的相关专著陆续出版(王斌等, 2014; 胡慧建等, 2016; Hu et al, 2019)。此外, 已有研究揭示了珠穆朗玛峰国家级自然保护区兽类、鸟类和两栖爬行类的多样性、区系及垂直分布特征(李晶晶等, 2013; 潘虎君等, 2013; 王斌等, 2013; 胡一鸣等, 2014), 并以保护区内吉隆沟、勒布沟等沟谷为例, 试图探究各类物种海拔分布模式的内在驱动机制(Pan et al, 2016; Hu et al, 2017, 2018)。另外, 近几年我国喜马拉雅山地区的陆生脊椎动物的研究开始从物种丰富度拓展到其他领域, 如多度-分布幅关系(Hu et al, 2021)、谱系与功能多样性(Ding et al, 2021)、环境污染物与生物群落的关系等(Ma et al, 2021)。

在调查方法上, 20世纪80-90年代调查使用的样线法和样点法, 并没有按照一定的取样原则对研究区域系统地布设条带或点位, 缺乏统计学上的抽样思维, 所获得的物种丰富度及多度往往只是绝对数量。20世纪90年代后, 我国的相关研究更注重调查数据的科学使用, 许多研究开始以随机取样、系统取样或分层取样等原则来布设样线、样点和样方。随后, 经过改进的样线法、样点法和样方法渐渐成为陆生脊椎动物调查中最普遍的方法, 这些方法都是基于“样本估计总体”的思想, 抽样更加充分。国家林业局于2011年制定的《陆生野生动物资源调查方案》中规定: 常规调查的抽样方法, 即把各调查地理单元划分为有规则的正方形样区, 在样

① 彭乐 (2019) 广东和澳门蝙蝠物种多样性及犬蝠取食的果实糖类分析. 硕士学位论文, 吉首大学, 湖南吉首.

区内按照规定的抽样强度进行随机抽样,抽取并布设样线、样方、样点等调查样地(郜二虎等, 2014)。相对固定的调查方法对陆生脊椎动物调查的发展有利。不同地区的调查往往由不同单位的研究团队参与,且大部分为长期监测。虽然不同调查项目的参与单位、调查地区、调查时间均有差异,但使用统一的抽样规程,就使得各个项目的数据有一致的抽样标准,使不同地区、不同时间段的数据得以在同一范式下整合研究,有助于不同地区的调查成果的对比以及大范围的调查成果的产出。

在技术手段上,随着时间的推移,各类群调查采用采集法的比例减少,采用直接观察法的比例增多(图10)。早期的陆生脊椎动物调查均以获取地方性的动物资源、探索当地动物区系为主要目的,对物种的特征和分布等很少有先前的资料得以参考。在早期的动物资源调查中大规模使用采集法,更有利于后期的物种鉴定以确保调查数据的可靠性。此外,将捕获的物种制作标本后保存可为之后的调查提供资料支撑。然而,随着国家重点保护动物名录、濒危物种红色名录的完善和野生动物保护相关的法律法规的建立,2000年以后的动物调查,尤其是鸟类和兽类调查,更多地避免了采集标本的方式,而通过使用直接观察法、红外相机陷阱法等对物种数据进行采集。

3 我国陆生脊椎动物调查的发展与展望

3.1 新兴物种数据采集和识别技术的发展

随着科技的不断发展,新兴物种数据采集技术、识别技术应运而生,进一步提升了陆生脊椎动物调查的效率和质量。现将部分典型的运用实例介绍如下:

(1)无人机技术在大型兽类、大型集群鸟类数量调查上的应用。无人机技术是更适合特定范围内的高精度时空数据即时获取的低空遥感平台,具有操作灵活、场景适应性强、覆盖面全、分辨率高、获取数据信息更丰富等特点(张何欣, 2020),其在陆生脊椎动物调查方面具有很强的技术优势,能够弥补许多传统调查方法所遗留的问题。目前,国内已有团队利用无人机对大型兽类、集群的大型鸟类的种群开展调查。如He等(2020)将无人机和热成像技术结合,对秦岭山区川金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)

开展种群分布的调查工作,搭载热成像相机的无人机可以获取种群的位置信息和种群规模信息,提升了在陡峭崎岖的山地林区条件下物种数据采集的能力。高大中等(2021)使用搭载可见光相机的无人机对西洞庭湖4个水鸟集群分布区域的水鸟进行了监测并记录鸟类受惊扰情况,结果表明无人机调查对水鸟的惊扰程度较弱,证明了小型无人机对湿地大中型水鸟进行快速监测的可行性。

(2)野生动物追踪技术在迁徙鸟类、兽类上的应用。近10年来,我国在迁徙鸟类研究方面取得了较大进展,其关键在于国产野生动物卫星追踪产品研发的突破。例如,基于野生动物卫星关键技术的卫星追踪器已被广泛应用于各类鸟类迁徙研究,如苍鹰(*Accipiter gentilis*) (王兴周和石爱健, 2021)、豆雁(*Anser fabalis*) (曹开强等, 2020)、中杓鹬(*Numenius phaeopus*) (曹文华等, 2019)等的卫星追踪。野生动物卫星追踪技术同样被运用于大型兽类调查当中,如Li等(2022)为重新引入东洞庭湖保护区的麋鹿(*Elaphurus davidianus*)佩戴卫星追踪器,对其再野化(rewilding)初期的栖息地季节变化开展研究。但野生动物追踪技术的实现往往受到研究区位置与范围、研究对象等的影响,例如,兽类相比鸟类的活动区域较为固定,如在无人区、偏僻山区等无信号覆盖的地区开展其物种追踪,易产生数据无法及时获取的问题。近年来,随着北斗卫星网络的完善,更加精确的定位系统使得卫星追踪器不再受到信号覆盖的限制,有助于未来野生动物追踪技术对兽类调查的发展。

(3)种群数量快速调查与分析方法在两栖类中的应用。目前,两栖爬行类的调查主要采用样线法、直接观察法与围栏陷阱法,但由于两栖动物存在着分布不集中、种群数量随时间波动显著、物种受气候影响较大等问题,使得上述调查方法需要消耗较大的人力和物力。熊姗等(2019)提出了一种利用繁殖点调查法与被动集成应答器(passive integrated transponder, PIT)标记重捕法相结合的种群评估方法。繁殖点调查法利用两栖动物集群繁殖的习性,避免了种群数量波动的缺陷;PIT标记对两栖动物个体的负面影响较小。基于PIT的标记重捕法与繁殖点调查法的结合得以在短期内获得较为准确的两栖动物繁殖种群数量。

(4)新兴物种识别技术。目前,对生物多样性调查的物种鉴定与识别方面正不断朝着快速化和人工智能方向发展。在微观方面,已有学者研究出高通量条形码技术流程“生物多样性汤”(biodiversity soup),可快速识别生物样本中的分类群,从DNA层面上得以对生物多样性进行快速监测,更为高效地获取高精度地面生物多样性数据(Yang et al, 2021)。在人工智能方面,目前已有技术能够将野外调查所获取到的声音、图像以及动态影像快速识别,大大增强了野外调查物种的鉴定效率。如在鸟类调查中,已有识别系统能够实时获取环境中鸟类的鸣声片段,并通过算法识别结合录制日期,分析得出录音片段所属的鸟类种类以及识别的可信度(刘丰等, 2017);此外,已出现新型的红外相机动物图像识别训练集最佳组合的构建方法(罗名步等, 2021),搭载该技术的红外相机除拥有基础红外相机所能够实现的红外触发捕捉动物照片外,还能够实时完成动物图片及动态影像的智能识别,并回传后台,以免去以往红外相机拍摄记录后另需人为筛选及辨别物种的繁琐步骤,提高了工作效率。

综上,目前出现的新兴物种数据采集和识别技术虽在一定程度上促进了陆生脊椎动物调查的发展,但现有的新兴技术大部分局限于大型兽类、集群鸟类等小部分类群的调查监测,而绝大部分陆生脊椎动物体积较小(如雀形目鸟类、非飞行小型哺乳动物、两栖爬行类等),对这些类群动物的调查仍基本采用传统的调查方法和技术手段,依旧需要消耗大量人力。因此,关注并发掘新兴的调查方法与技术手段,尤其是针对小体积动物类群的方法与手段,依然是陆生脊椎动物调查发展的重要目标。目前,全国大部分地区均已完成区域生物多样性本底调查,对相应地区的物种区系均有一定的经验基础,未来对小体积动物类群的物种调查可参考先前的物种分布和种群数量等数据,在符合抽样标准的情况下进一步简化样线样点的布设以减少工作量。此外,结合各物种自身特点,改进已有的技术手段,尽量节约人力。如雀形目鸟类善于鸣叫,因此可对鸣声识别技术作进一步改进,研制专业的鸟类鸣声自动录音及自动识别设备,放置在鸟类出现频率较高的样点,效仿红外相机的工作方式,智能录制、存储鸟类鸣声并实时识别鸟种、回传系统等。

除需要发掘更为先进的调查手段以外,还需要尝试拓宽已有的新兴技术的应用范围。如近年来,红外相机技术的使用率虽逐年提高(图10),但由于受到传统红外相机设备的捕获率低、分辨率低、功能少等的限制,仍然仅局限于对大型兽类和林下雉类等大体积物种开展调查。未来,随着上述物种识别技术、红外相机智能化技术的不断发展,具有高捕获率、高分辨率、搭载实时影像和声音识别的红外相机系统有望拓宽其能够调查的陆生脊椎动物的范围。如针对冬季集群的迁徙型冬候鸟、固定水域抱对的两栖类等脊椎动物类群,均可于固定点位建设观测场站,利用改进的红外相机等技术进行物种智能化监测和识别,以代替之前所使用的样点法、直接计数法等,大量减少人力物力。

3.2 大数据时代下陆生脊椎动物调查的发展

步入21世纪,信息技术和物联网的飞速发展,使得全球数据呈爆发式增长的大数据(Big Data)时代随之到来(张健, 2017)。大数据时代有助于获得高质量的生物多样性数据,弥补种群数量、时空动态、物种进化史、功能性状、物种与环境之间以及种间相互作用等方面的空缺(Hortal et al, 2015)。现对大数据时代下陆生脊椎动物调查在不同方面的进展及未来方向进行阐述。

3.2.1 公众科学的发展

在大数据时代,陆生脊椎动物多样性的野外数据收集不但可以由生态工作者完成,由非专业人士所提供的公众科学(citizen science)数据也在众多生态学研究得到了重视,可作为野外工作数据的补充(张健等, 2013)。国内陆生脊椎动物的公众科学平台以鸟类为主,例如由中国观鸟组织联合行动平台(朱雀会)管理运营的“中国观鸟记录中心”(http://www.birdreport.cn)自2002年起便开始组织观鸟爱好者观测并记录鸟类数据,每份观测记录都涵盖了观测地点、观测日期、鸟种及数量、照片和音频等信息。自2015年始,中国观鸟记录中心每年发布中国鸟类观测年报,通过多样性分布格局等可视化制图,来直观地展现我国鸟类的分布情况。然而,公众科学数据仍存在分类偏差、时空偏差、监测努力不均衡等问题(Strimas-Mackey et al, 2020),这需要我们对于数据的筛选与整合、平台的开发与优化、公众的宣传与培训等方面投入更多的努力,以帮助

公众科学数据良性发展。

3.2.2 物种监测分析和管理体系的优化

在大数据时代,人为调查、红外相机、遥感信息及公众科学等多样的陆生脊椎动物调查相关数据广泛积累。然而,如何有效地集成、利用这些分散的数据,并结合新兴技术手段、管理手段等,形成系统化、信息化、智能化的自然资源管理体系,是大数据时代陆生脊椎动物调查的发展重点。2019年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》中,强调应充分发挥地面生态系统、环境、气象、水文水资源、水土保持、海洋等监测站点和卫星遥感的作用,建设各级各类自然保护地“天空地一体化”监测网络体系。在此背景下,越来越多的林业部门、各级自然保护地等单位已经开始致力于结合采集、识别技术和人工智能技术等手段提升陆生脊椎动物调查的数据分析、指挥部署等能力。例如,广东省车八岭国家级自然保护区已搭建起生物多样性综合监测信息服务平台(束祖飞等, 2021),在采集手段上集成优化了红外相机、卫星遥感等现代监测技术,克服了传统“点”尺度监测技术的局限性;在后台分析上实现了数据的智能处理,可快速获得种群分布、数量与动态、栖息地质量等重要指标,使物种调查结果从简单的物种发现和描述信息拓展为规范化、动态化的种群评估信息。此外,系统化的物种监测离不开高效的管理模式,胡慧建等(2019c)研发了一套基于物联网的远程生物调查指挥系统,可将调查人员、物理设备和野生动物物种等信息完整映射到智能监测平台中,并搭配物种智能识别技术,实现了实地调查和信息采集的空天地智能一体化指挥和管理,帮助相关单位决策层在很大程度上摆脱对专业人员的依赖,使其在野生动物保护管理中能够即时指挥、即时获取、即时决策。未来,在新一代的生物多样性资源分析技术以及整体决策平台的优化与推广下,陆生脊椎动物的物种监测、数据分析、保护工作将更具广度和深度。

3.2.3 调查工作及成果向社会的普及

如今,得益于以大数据为基础的动物调查数据平台的构建以及政府部门和民间自然保护组织的公益宣传,人们愈发关注与理解野生动物的保护以及其中的意义。对陆生脊椎动物进行观察和记录已

经不再局限于专业的科考人员,而是成为了许多民众的户外爱好,不仅丰富了民众的生活,而且其获得的动物数据在大数据平台的支持下实时上传,从而进一步完善生物多样性数据库;动物调查的成果不再只为从事林业工作的相关部门提供数据,而是通过科普性读物、网络媒体等形式传播,以通俗易懂的形式让科学知识走向大众。如《中国兽类图鉴》(刘少英等, 2019)、《中国鸟类观察手册》(刘阳和陈水华, 2021)、《中国两栖动物图鉴(野外版)》(费梁, 2020)、《中国蛇类图鉴》(黄松, 2021)等陆生脊椎动物相关成果的出版,可供研究人员、爱好者等阅读和收藏,对陆生脊椎动物的科普、保护发挥了积极作用。此外,各地保护区、森林公园、动物园、自然组织等纷纷开展观鸟节、自然导赏、科普讲堂等活动,进一步激发了公众对自然的关注,提高了公众对野生动物的保护意识。

3.2.4 自然保护地之间实现数据共享的展望

在大数据的背景下,越来越多的自然保护地建立起了集人工调查、红外相机网格化监测、数据管理为一体的数据管理平台,但不同单位之间仍缺乏合作、数据相对独立,为大尺度的研究工作带来困难。此前,中国林业科学研究院搭建了中国自然保护区标本资源共享平台(<http://www.papc.cn/>),收集了3,381个保护区的名录并搭建了红外相机数据库、物种名录、标本库、地理信息库等,但仍存在物种名录不完善、红外相机影像稀少、保护区数据未及时更新等问题。

未来的自然保护地数据管理结构可在上述平台的基础上进一步升级优化,构建自然保护地信息共享平台,由国家公园牵头,自然保护区、自然公园共同参与,做到信息实时更新、实时共享,并能够整合不同自然保护地的科研监测数据,对其进行分类、筛选、规范化处理。在数据展示方面,可以地图为载体,加入各保护地旗舰物种、国家级保护物种等珍稀物种的位点展示、红外相机网格展示等,突出显示优先保护区域,从而提升数据的可视化。

4 结语

自新中国成立以来,随着国家对生态文明建设的日益重视,我国陆生脊椎动物调查已经取得了一系列成果,包括摸清了大部分地区的物种本底,开

展了一系列生态恢复和多样性保护工作等, 为我国自然保护区体系的建立提供了可靠的数据。展望未来, 陆生脊椎动物的调查应重视以下内容: 在技术手段上, 应关注新型的物种采集、识别等技术手段, 提升野外数据获取的效率; 在调查精度上, 应从粗放到精细化再到精准化, 并继续扩大调查区域; 在数据应用和管理方面, 应朝着动态监测的方向发展, 实现全局化、全域化、全物种化的管理, 从了解到当地“有什么”物种到当地的物种“如何变化”, 并且揭示其变化背后的机制; 从社会方面, 应进一步引导公众参与, 让民众了解到陆生脊椎动物的概况, 树立公民的生物多样性保护意识。

ORCID

吴政浩  <https://orcid.org/0009-0001-4342-831X>
丁志锋  <https://orcid.org/0000-0001-6631-5046>
周智鑫  <https://orcid.org/0000-0002-4055-9672>
梁健超  <https://orcid.org/0000-0001-9311-0150>
章亚宁  <https://orcid.org/0009-0007-7172-1162>
胡一鸣  <https://orcid.org/0000-0002-0947-9594>

参考文献

- Cao KQ, Li YK, Wang Q, Zhou XH, Zhong YF, Miao LJ (2020) Spring migration routes and activity characteristics of populations of *Anser fabalis* wintering in Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*, 32, 496–505. (in Chinese with English abstract) [曹开强, 李言阔, 王强, 周学红, 钟毅峰, 缪泸君 (2020) 鄱阳湖湿地豆雁(*Anser fabalis*)越冬种群的春季迁徙路线及其活动特征. *湖泊科学*, 32, 496–505.]
- Cao WH, Ke WJ, Kuang FL, Leung KS, Hassell C, Maglio G, Minton C, Li YT, Ma ZJ (2019) Tracking the migration of whimbrels along the East Asian-Australasian flyway. *Chinese Journal of Zoology*, 54, 775–783. (in Chinese with English abstract) [曹文华, 柯婉娟, 邝粉良, 梁嘉善, Chris Hassell, Grace Maglio, Clive Minton, 李永涛, 马志军 (2019) 东亚-澳大利西亚候鸟迁飞区中杓鹬的迁徙追踪. *动物学杂志*, 54, 775–783.]
- Cui P, Xu HG, Ding H, Wu J, Cao MC, Chen L (2013) Status quo, problems and countermeasures of bird monitoring in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 29, 403–408. (in Chinese with English abstract) [崔鹏, 徐海根, 丁晖, 吴军, 曹铭昌, 陈炼 (2013) 我国鸟类监测的现状、问题与对策. *生态与农村环境学报*, 29, 403–408.]
- Ding ZF, Hu HJ, Cadotte MW, Liang JC, Hu YM, Si XF (2021) Elevational patterns of bird functional and phylogenetic structure in the central Himalaya. *Ecography*, 44, 1403–1417.
- Fei L (2020) *Atlas of Amphibians in China (Field Edition)*. Henan Science and Technology Press, Zhengzhou. (in Chinese) [费梁 (2020) *中国两栖动物图鉴(野外版)*. 河南科学技术出版社, 郑州.]
- Gan J (2018) Built environment factors affecting urban biodiversity and planning optimization approaches. *Urban Planning International*, 33(4), 67–73. (in Chinese with English abstract) [干靓 (2018) 城市建成环境对生物多样性的影响要素与优化路径. *国际城市规划*, 33(4), 67–73.]
- Gao DZ, Lin H, Lin LL, Cui GF (2021) The feasibility of wetland waterfowl monitoring method based on UAV remote sensing. *Chinese Journal of Zoology*, 56, 100–110. (in Chinese with English abstract) [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. *动物学杂志*, 56, 100–110.]
- Gao EH, Wang ZC, Wang WS, Chen DF, Ma GQ, Tang XP (2014) Technical plan for the second national survey of terrestrial wildlife in China. *Chinese Journal of Wildlife*, 35, 238–240. (in Chinese with English abstract) [郇二虎, 王志臣, 王维胜, 陈涤非, 马国青, 唐小平 (2014) 全国第二次陆生野生动物资源调查总体思路. *野生动物学报*, 35, 238–240.]
- He G, Yang HT, Pan RL, Sun YW, Zheng PB, Wang JH, Jin XL, Zhang JJ, Li BG, Guo ST (2020) Using unmanned aerial vehicles with thermal-image acquisition cameras for animal surveys: A case study on the Sichuan snub-nosed monkey in the Qinling Mountains. *Integrative Zoology*, 15, 79–86.
- Hilton-Taylor C (2000) 2000 IUCN Red List of Threatened Species. IUCN, Gland, Switzerland.
- Hortal J, de Bello F, Diniz JAF, Lewinsohn TM, Lobo JM, Ladle RJ (2015) Seven shortfalls that beset large-scale knowledge of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46, 523–549.
- Hu HJ (2010) *Terrestrial Animal Resources in Guangzhou*. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [胡慧建 (2010) *广州市陆生野生动物资源*. 广东科技出版社, 广州.]
- Hu HJ, Jin K, Tian Y (2016) *Species Diversity of Terrestrial Animals in Mt. Qomolangma National Nature Reserve*. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [胡慧建, 金崑, 田园 (2016) *珠穆朗玛峰国家级自然保护区陆生野生动物*. 广东科技出版社, 广州.]
- Hu HJ, Jin K, Tian Y (2019) *Wildlife Species of the Qomolangma National Nature Reserve*. Royal Collins Publishing Group Inc., Quebec.
- Hu HJ, Zhang CL, Zhang L, Hu CH, Qin HG (2019a) *Resources of Terrestrial Wild Vertebrates in Guangdong Province (Dongguan)*. Nanfang Daily Press, Guangzhou. (in Chinese) [胡慧建, 张春兰, 张亮, 胡焯海, 覃何贵 (2019a) *广东省陆生脊椎动物资源: 东莞篇*. 南方日报出版社, 广州.]
- Hu HJ, Zhang L, Zhang CL, Zhou H (2019b) *Resources of Terrestrial Wild Vertebrates in Guangdong Province (Shaoguan)*. Nanfang Daily Press, Guangzhou. (in Chinese)

- [胡慧建, 张亮, 张春兰, 周宏 (2019b) 广东省陆生野生脊椎动物资源: 韶关篇. 南方日报出版社, 广州.]
- Hu HJ, Zhou ZX, Tang XS, Xu SZ, Zhong YS (2019c) A remote biological survey command system based on the Internet of Things. 201911311210.1, China. 2019-12-18. (in Chinese) [胡慧建, 周智鑫, 汤兴水, 许石柱, 钟耀森 (2019c) 一种基于物联网的远程生物调查指挥系统. 201911311210.1, 中国. 2019-12-18.]
- Hu HJ, Zhang CL, Zhang L, Liu YS (2020) Resources of Terrestrial Wild Vertebrates in Guangdong Province (Qingyuan). Nanfang Daily Press, Guangzhou. (in Chinese) [胡慧建, 张春兰, 张亮, 刘耀森 (2020) 广东省陆生野生脊椎动物资源: 清远篇. 南方日报出版社, 广州.]
- Hu HJ, Wu ZW, Pan HJ, Liang JC (2022) The Terrestrial Animal Resources in Maoming (Birds and Mammals). Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [胡慧建, 吴振文, 潘虎君, 梁健超 (2022) 茂名陆生野生动物资源: 鸟兽篇. 广东科技出版社, 广州.]
- Hu YM, Yao ZJ, Huang ZW, Tian Y, Li HB, Pu Q, Yang DD, Hu HJ (2014) Mammalian fauna and its vertical changes in Mt. Qomolangma National Nature Reserve, Tibet, China. *Acta Theriologica Sinica*, 34, 28–37. (in Chinese with English abstract) [胡一鸣, 姚志军, 黄志文, 田园, 李海滨, 普琼, 杨道德, 胡慧建 (2014) 西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区哺乳动物区系及其垂直变化. 兽类学报, 34, 28–37.]
- Hu YM, Jin K, Huang ZW, Ding ZF, Liang JC, Pan XY, Hu HJ, Jiang ZG (2017) Elevational patterns of non-volant small mammal species richness in Gyirong Valley, Central Himalaya: Evaluating multiple spatial and environmental drivers. *Journal of Biogeography*, 44, 2764–2777.
- Hu YM, Ding ZF, Jiang ZG, Quan Q, Guo KJ, Tian LQ, Hu HJ, Gibson L (2018) Birds in the Himalayas: What drives beta diversity patterns along an elevational gradient? *Ecology and Evolution*, 8, 11704–11716.
- Hu YM, Scheffers B, Pan XY, Hu HJ, Zhou ZX, Liang D, Cheng WD, Wen ZX, Gibson L (2021) Positive abundance–elevational range size relationship weakened from temperate to subtropical ecosystems. *Journal of Animal Ecology*, 90, 2623–2636.
- Huang S (2021) Sinoophis. The Straits Publishing & Distributing Group, Fuzhou. (in Chinese) [黄松 (2021) 中国蛇类图鉴. 海峡出版发行集团, 福州.]
- Huang ZJ (1958) Preliminary investigation on amphibians and reptiles in Xishuangbanna. *Bulletin of Biology*, (10), 6–13, 49. (in Chinese) [黄祝坚 (1958) 西双版纳两栖纲及爬行纲动物初步调查. 生物学通报, (10), 6–13, 49.]
- IUCN (2022) IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org>. (accessed on 2022-09-04)
- Jiang ZG, Wu Y, Liu SY, Jiang XL, Zhou KY, Hu HJ (2021) China's Red List of Biodiversity•Vertebrates (Vol. 1): Mammals (I). Science Press, Beijing. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 吴毅, 刘少英, 蒋学龙, 周开亚, 胡慧建 (2021) 中国生物多样性红色名录•脊椎动物(第一卷): 哺乳动物(上册). 科学出版社, 北京.]
- Li C, Xie F, Che J, Jiang JP (2017) Monitoring and research of amphibians and reptiles diversity in key areas of China. *Biodiversity Science*, 25, 246–254. (in Chinese with English abstract) [李成, 谢锋, 车静, 江建平 (2017) 中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究. 生物多样性, 25, 246–254.]
- Li JJ, Han LX, Cao HF, Tian Y, Peng BY, Wang B, Hu HJ (2013) The fauna and vertical distribution of birds in Mount Qomolangma National Nature Reserve. *Zoological Research*, 34, 531–548. (in Chinese with English abstract) [李晶晶, 韩联宪, 曹宏芬, 田园, 彭波涌, 王斌, 胡慧建 (2013) 珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类区系及其垂直分布特征. 动物学研究, 34, 531–548.]
- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014) Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: Review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685–695. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014) 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, 22, 685–695.]
- Li Y, Wang HY, Jiang ZG, Song YC, Yang DD, Li L (2022) Seasonal differences of the Milu's home range at the early rewilding stage in Dongting Lake area, China. *Global Ecology and Conservation*, 35, e02057.
- Li ZX (1958) Survey report on reptiles in Hainan Island. *Chinese Journal of Zoology*, 2, 234–239. (in Chinese) [李致勳 (1958) 海南岛爬行纲动物的调查报告. 动物学杂志, 2, 234–239.]
- Liu F, Li S, Shen XL (2017) A bird voice recognition method aided to study the phenomenon of birds in the breeding season. 201710583313.8, China. 2017-07-18. (in Chinese) [刘丰, 李晟, 申小莉 (2017) 一种辅助鸟类繁殖期的物候研究的鸟类声音识别方法. 201710583313.8, 中国. 2017-07-18.]
- Liu SY, Wu Y, Li S (2019) Handbook of the Mammals of China, 2nd edn. The Straits Publishing & Distributing Group, Fuzhou. (in Chinese) [刘少英, 吴毅, 李晟 (2019) 中国兽类图鉴(第二版). 海峡出版发行集团, 福州.]
- Liu Y, Chen SH (2021) The CNG Field Guide to the Birds of China. Hunan Science and Technology Press, Changsha. (in Chinese) [刘阳, 陈水华 (2021) 中国鸟类观察手册. 湖南科学技术出版社, 长沙.]
- Luo MB, Yang F, Hu HJ, Zhuang KJ, Xiao HL, Zhao S, Fang ZT (2021) A method for constructing the best combination of infrared camera animal image recognition training set. 202110614474.5, China. 2021-06-02. (in Chinese) [罗名步, 杨帆, 胡慧建, 庄凯金, 肖洪浪, 赵顺, 方钟涛 (2021) 一种红外相机动物图像识别训练集最佳组合的构建方法. 202110614474.5, 中国. 2021-06-02.]
- Ma F, Zhang JL (2009) Survey on Key Terrestrial Wildlife Resources in China. China Forestry Publishing House,

- Beijing. (in Chinese) [马福, 张建龙 (2009) 中国重点陆生野生动物资源调查. 中国林业出版社, 北京.]
- Ma KP, Qian YQ (1998) Biodiversity conservation and its research progress. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 4, 95–99. (in Chinese with English abstract) [马克平, 钱迎倩 (1998) 生物多样性保护及其研究进展. *应用与环境生物学报*, 4, 95–99.]
- Ma SL, Harris RB (1996) Use of remote camera systems to document wildlife species presence in forested areas of Yunnan. *Zoological Research*, 17, 360–370. (in Chinese) [马世来, Harris RB (1996) 自动感应照像系统在野生动物调查中的应用. *动物学研究*, 17, 360–370.]
- Ma YJ, Shang LH, Hu HJ, Zhang W, Chen LH, Zhou ZX, Singh PB, Hu YM (2021) Mercury distribution in the East Himalayas: Elevational patterns in soils and non-volant small mammals. *Environmental Pollution*, 288, 117752.
- Marchese C (2015) Biodiversity hotspots: A shortcut for a more complicated concept. *Global Ecology and Conservation*, 3, 297–309.
- Pan HJ, Yang DD, Qin HH, Zhang L, Jiang K, Hu HJ (2013) Herpetofauna of Mount Qomolangma National Nature Reserve in Tibet, China. *Biodiversity Science*, 21, 610–615. (in Chinese with English abstract) [潘虎君, 杨道德, 覃海华, 张亮, 蒋珂, 胡慧建 (2013) 珠穆朗玛峰国家级自然保护区两栖爬行动物多样性及区系. *生物多样性*, 21, 610–615.]
- Pan XY, Ding ZF, Hu YM, Liang JC, Wu YJ, Si XF, Guo MF, Hu HJ, Jin K (2016) Elevational pattern of bird species richness and its causes along a central Himalaya gradient, China. *PeerJ*, 4, e2636.
- Shen YH (1965) A preliminary study on Anura in Nanyue Mountain, Hunan Province. *Chinese Journal of Zoology*, (2), 76–79. (in Chinese) [沈猷慧 (1965) 湖南南岳山无尾两栖类的初步研究. *动物学杂志*, (2), 76–79.]
- Shu ZF, He WT, Li J, Zhang YM, Piao YC, Luo Z (2021) A comprehensive monitoring information service platform for biodiversity at Guangdong Chebaling National Nature Reserve. *Frontiers of Data & Computing*, 3, 127–141. (in Chinese with English abstract) [束祖飞, 何文通, 李健, 张应明, 朴英超, 罗泽 (2021) 广东车八岭国家级自然保护区生物多样性综合监测信息服务平台. *数据与计算发展前沿*, 3, 127–141.]
- Strimas-Mackey M, Hochachka WM, Ruiz-Gutierrez V, Robinson OJ, Miller ET, Auer T, Kelling S, Fink D, Johnston A (2020) Best Practices for Using eBird Data. Version 1.0. <https://cornelllabofornithology.github.io/ebird-best-practices>. (accessed on 2021-06-12)
- Wang B, Peng BY, Li JJ, Pu Q, Hu HJ, Ma JZ (2013) Avifaunal community structure and species diversity in the Mt. Qomolangma National Nature Reserve, Tibet, China. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 3056–3064. (in Chinese with English abstract) [王斌, 彭波涌, 李晶晶, 普琼, 胡慧建, 马建章 (2013) 西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类群落结构与多样性. *生态学报*, 33, 3056–3064.]
- Wang B, Hu HJ, Li JJ (2014) Birds of The Qomolangma National Nature Reserve. Hunan Normal University Press, Changsha. (in Chinese) [王斌, 胡慧建, 李晶晶 (2014) 珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类. 湖南师范大学出版社, 长沙.]
- Wang K, Ren JL, Chen HM, Lyu ZT, Guo XG, Jiang K, Chen JM, Li JT, Guo P, Wang YY, Che J (2020) The updated checklists of amphibians and reptiles of China. *Biodiversity Science*, 28, 189–218. (in Chinese with English abstract) [王凯, 任金龙, 陈宏满, 吕植桐, 郭宪光, 蒋珂, 陈进民, 李家堂, 郭鹏, 王英永, 车静 (2020) 中国两栖、爬行动物更新名录. *生物多样性*, 28, 189–218.]
- Wang XZ, Shi AJ (2021) Satellite tracking on the migration of *Accipiter gentilis*. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 51(6), 30–36. (in Chinese with English abstract) [王兴周, 石爱健 (2021) 卫星追踪苍鹰迁徙研究. *山东林业科技*, 51(6), 30–36.]
- Wei FW, Nie YG, Miao HX, Lu H, Hu YB (2014) Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms. *Chinese Science Bulletin*, 59, 430–437. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 路浩, 胡义波 (2014) 生物多样性丧失机制研究进展. *科学通报*, 59, 430–437.]
- Wei FW, Yang QS, Wu Y, Jiang XL, Liu SY, Li BG, Yang G, Li M, Zhou J, Li S, Hu YB, Ge DY, Li S, Yu WH, Chen BY, Zhang ZJ, Zhou CQ, Wu SB, Zhang L, Chen ZZ, Chen SD, Deng HQ, Jiang TL, Zhang LB, Shi HY, Lu XL, Li Q, Liu Z, Cui YQ, Li YC (2021) Catalogue of mammals in China (2021). *Acta Theriologica Sinica*, 41, 487–501. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 蒋学龙, 刘少英, 李保国, 杨光, 李明, 周江, 李松, 胡义波, 葛德燕, 李晟, 余文华, 陈炳耀, 张泽钧, 周材权, 吴诗宝, 张立, 陈中正, 陈顺德, 邓怀庆, 江廷磊, 张礼标, 石红艳, 卢学理, 李权, 刘铸, 崔雅倩, 李玉春 (2021) 中国兽类名录(2021版). *兽类学报*, 41, 487–501.]
- Wu JY, Peng H, Jiang XL, Xue DY, Du F, Han LX, Yang ZL, Shui YM, Liu PG, Yang XJ, Jiang WG, Wang YH, Zhao FW, Dai R (2016) An inventory of county-level biodiversity in Northwest Yunnan. *Biodiversity Science*, 24, 1414–1420. (in Chinese with English abstract) [武建勇, 彭华, 蒋学龙, 薛达元, 杜凡, 韩联宪, 杨祝良, 税玉民, 刘培贵, 杨晓君, 江望高, 王跃华, 赵富伟, 戴蓉 (2016) 滇西北县域生物多样性本底调查与评估. *生物多样性*, 24, 1414–1420.]
- Wu RW (1999) On strategy of urban biodiversity. *Urban Planning Forum*, (1), 18–20, 46. (in Chinese with English abstract) [吴人韦 (1999) 城市生物多样性策略. *城市规划学刊*, (1), 18–20, 46.]
- Wu RX, Yu TL, Feng CZ, Ma YJ, Zhang G (2020) Diversity of migratory birds in Jiawan Mountain, Guangxi, China. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 38, 140–148. (in Chinese with English abstract)

- [吴冉昕, 庾太林, 冯昌章, 马昱君, 张刚 (2020) 广西九万山迁徙鸟类多样性. 广西师范大学学报(自然科学版), 38, 140–148.]
- Xiao ZS, Li XY, Xiang ZF, Li M, Jiang XL, Zhang LB (2017) Overview of the Mammal Diversity Observation Network of Sino BON. *Biodiversity Science*, 25, 237–245. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李学友, 向左甫, 李明, 蒋学龙, 张礼标 (2017) 中国兽类多样性监测网的建设规划与进展. 生物多样性, 25, 237–245.]
- Xiong S, Zhang HJ, Li C (2019) A method for rapid survey and analysis in estimating amphibian population. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 35, 809–816. (in Chinese with English abstract) [熊珊, 张海江, 李成 (2019) 两栖类种群数量的快速调查与分析方法. 生态与农村环境学报, 35, 809–816.]
- Xue DY, Wu JY, Zhao FW, Dai R (2015) Evaluation demonstration study on inventory of county-level biodiversity. *China Science and Technology Achievements*, 16(13), 30–31. (in Chinese) [薛达元, 武建勇, 赵富伟, 戴蓉 (2015) 县域生物多样性本底调查与评估示范研究. 中国科技成果, 16(13), 30–31.]
- Yang CY, Bohmann K, Wang XY, Cai W, Wales N, Ding ZL, Gopalakrishnan S, Yu DW (2021) Biodiversity Soup II: A bulk-sample metabarcoding pipeline emphasizing error reduction. *Methods in Ecology and Evolution*, 12, 1252–1264.
- Zhang HX (2020) Preliminary study on the application of UAV remote sensing technology in natural reserve resources investigation. *Journal of Green Science and Technology*, (19), 109–110, 113. (in Chinese with English abstract) [张何欣 (2020) 无人机遥感技术在自然保护区资源调查中的应用初探. 绿色科技, (19), 109–110, 113.]
- Zhang J, Chen SB, Chen B, Du YJ, Huang XL, Pan XB, Zhang Q (2013) Citizen science: Integrating scientific research, ecological conservation and public participation. *Biodiversity Science*, 21, 738–749. (in Chinese with English abstract) [张健, 陈圣宾, 陈彬, 杜彦君, 黄晓磊, 潘绪斌, 张强 (2013) 公众科学: 整合科学研究、生态保护和公众参与. 生物多样性, 21, 738–749.]
- Zhang J (2017) Biodiversity science and macroecology in the era of big data. *Biodiversity Science*, 25, 355–363. (in Chinese with English abstract) [张健 (2017) 大数据时代的生物多样性科学与宏生态学. 生物多样性, 25, 355–363.]
- Zhang RZ (2011) *Zoogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (2011) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]
- Zhang Y, Lin GS (2015) An introduction and analysis of biodiversity conservation in Indo-Burma Biodiversity Hotspot. *Landscape Architecture*, (6), 16–24. (in Chinese with English abstract) [张洋, 林广思 (2015) 印缅生态热点地区(中国区)生物多样性保护现状与分析. 风景园林, (6), 16–24.]
- Zheng GM (2017) *A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China*, 3rd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2017) 中国鸟类分类与分布名录(第三版). 科学出版社, 北京.]
- Zheng ZX (1997) *Fauna Sinica•Aves* (Vol. 1). Science Press, Beijing. (in Chinese with English abstract) [郑作新 (1997) 中国动物志•鸟纲(第一卷). 科学出版社, 北京.]
- Zhou JX, Shan YX (1961) Catalogue of amphibians and reptiles in Henan Province (including 21 new records). *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*, (2), 38–44. (in Chinese) [周家兴, 单元勋 (1961) 河南省两栖动物和爬行动物目录(包括新纪录21种). 河南师范大学学报(自然科学版), (2), 38–44.]

(责任编辑: 李晟 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 陆生脊椎动物调查的文献信息

Appendix 1 Information on terrestrial vertebrate survey publications

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022363-1.xlsx>

附录2 各省级行政区(港澳台未纳入统计)不同类群陆生脊椎动物调查文献数量

Appendix 2 Number of publications on different groups of terrestrial vertebrate survey in each province. Hong Kong, Macao and Taiwan were not included in the statistics.

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022363-2.xlsx>