•研究报告•

青藏高原有蹄类动物多样性和 特有性：演化与保护

蒋志刚^{1,2*} 李立立^{1,2,3} 胡一鸣^{1,2} 胡慧建⁴
李春旺^{1,2} 平晓鸽^{1,2} 罗振华⁵

1 (中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学重点实验室, 北京 100101)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303)

4 (广东省生物资源应用研究所, 广州 510260)

5 (华中师范大学生命科学学院, 武汉 430079)

摘要：青藏高原是地球上一个独特的自然地理单元，具有丰富的生境类型和生物种类，是生物多样性与全球环境变化领域的热点研究区域。青藏高原发育着独特的动物区系，尤其是有蹄类动物，如藏羚(*Pantholops hodgsonii*)、野牦牛(*Bos mutus*)、藏原羚(*Procapra picticaudata*)、普氏原羚(*P. przewalskii*)、白唇鹿(*Przewalskium albirostris*)等青藏高原特有动物。在本文中，我们探讨了如下问题：青藏高原有多少种有蹄类动物？有多少种特有蹄类动物？其分布格局如何？生存状况如何？保护现状如何？我们首先确定了青藏高原动物地理区的地理边界。发现青藏高原有28种有蹄类，其中10种是青藏高原特有种。青藏高原有蹄类种数占中国有蹄类的42%，单位面积上的有蹄类物种密度比中国现生有蹄类物种平均密度高62%。特有种比例高达36%。然而，青藏高原有蹄类物种分布不均匀，其丰富度呈东部高西部低格局，而高原特有蹄类则分布于高原腹地。青藏高原有蹄类动物生存受威胁比例高，其中71%为受威胁物种，54%被列入濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)附录I或附录II。野外调查发现大额牛(*Bos frontalis*)已经野外灭绝，目前仅在高黎贡山有人工养殖的群体。青藏高原有蹄类物种红色名录指数从1998–2015年呈现持续下降趋势，全球气候变化将加剧这一趋势。青藏高原有蹄类受威胁局面仍在继续，物种生存状况持续恶化。虽然经过40年的自然保护区建设，但一些青藏高原有蹄类的重要种群与栖息地并没有被自然保护区和新建的三江源国家公园所覆盖。因此，在开发青藏高原、实现人类社会经济发展目标的同时，应尽量保存高原野生动物种群与生境，实现青藏高原草地生态系统的可持续利用与生物多样性保护的双赢目标。

关键词：青藏高原；演化；区系；全球变化；多样性；特有性；泛第三极；一带一路

Diversity and endemism of ungulates on the Qinghai-Tibetan Plateau: Evolution and conservation

Zhigang Jiang^{1,2*}, Lili Li^{1,2,3}, Yiming Hu^{1,2}, Huijian Hu⁴, Chunwang Li^{1,2}, Xiaoge Ping^{1,2}, Zhenhua Luo⁵

1 Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

4 Guangdong Institute of Applied Biological Resources, Guangzhou 510260

5 School of Life Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079

Abstract: The Qinghai-Tibetan Plateau is a unique physical geographical unit, rich in habitat types and species, and a hot spot in biodiversity and global environmental change research. Unique fauna evolves on the Qinghai-Tibetan Plateau. Among these wild animals are the endemic hoofed animals which possess unique

收稿日期: 2017-12-04; 接受日期: 2018-02-07

基金项目: 科技基础性专项(2013FY110300)和环境部生物多样性专项

* 通讯作者 Author for correspondence. jiangzg@ioz.ac.cn

characteristics, such as Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*), wild yak (*Bos mutus*), Tibetan gazelle (*Procapra picticaudata*), Przewalski's gazelle (*P. przewalskii*), and white-lipped deer (*Przewalskium albirostris*). In this study, we explored the following questions: How many ungulate species are there on the Qinghai-Tibetan Plateau? How many endemic ungulate species are there? What is the distribution pattern of these species? What is the status of their survival? What is their conservation status? We firstly identified the geographic boundaries of the Qinghai-Tibetan Plateau. On the plateau, there are 28 ungulate species, 10 of which are endemic to the plateau. The ungulates of the Qinghai-Tibetan Plateau account for 42% of China's extant ungulate species whereas the density of the hoofed species per unit area on the plateau is 62% higher than that of the whole country. However, the distribution of ungulate species on the Qinghai-Tibetan Plateau is uneven, and shows a pattern with low species density in the western region but high species density in the eastern part of the plateau, in contrast to the high species density of the endemic ungulates in the hinterland of the plateau. However, the ratio of threatened ungulates on the Qinghai-Tibetan Plateau is high, among them, 71% of the ungulates are threatened species, 54% are included in CITES Appendix I or II. The Red List Index of ungulate species on the Qinghai-Tibetan Plateau has continued to decline from 1998 to 2015, and this trend is compounded and worsened by the trend of global change, indicating that the living status of ungulates on the plateau is continuously deteriorating. Through four decades of conservation in the country, some important populations and habitats of the ungulates on the plateau are not protected by nature reserves and the newly established the Three-River-Source National Park. Therefore, to achieve the win-win goal of human social, and economic development and nature conservation on the plateau, we should manage the grassland ecosystems sustainably, save wildlife populations and habitats, and protect biodiversity on the plateau.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; evolution; fauna, global change; diversity; endemism; Pan Third Pole, One-Belt-One-Road

从第三纪开始, 青藏高原经过多次隆升, 形成了一个南起喜马拉雅山脉, 北至昆仑山、阿尔金山和祁连山, 东起横断山脉、龙门山, 西至帕米尔高原和喀喇昆仑山脉的辽阔高原。它是地球上最年轻、面积最大、海拔最高的高原, 与南极、北极一道被称为地球的“第三极”。青藏高原, 包括祁连山和柴达木盆地在内, 在中国境内的面积约为257万平方公里, 平均海拔4,000 m (张钺锂等, 2002)。

青藏高原腹地具有典型的高寒气候, 既有终年积雪的冰峰冰川, 也有面积辽阔的永久冻土区。高原东部横断山区具有干热河谷气候, 而喜马拉雅山脉南坡的峡谷则是亚热带暖湿气候。青藏高原可划为藏北高原、藏南谷地、柴达木盆地、祁连山地、青海高原和川藏高山峡谷区等地理区, 亚洲多条大江大河发源于此, 故青藏高原也被称为“亚洲水塔”。巨大的海拔高差、丰富多样的气候, 构成了多样的生境, 为各种高原物种创造了生态位。

作为地球上一个独特的自然地理单元, 青藏高原孕育了丰富的野生动植物资源(张荣祖, 1979, 1997; Wang et al, 2015; 刘杰等, 2017)。青藏高原的隆升改变了大气环流, 改变了地球大气圈与水圈,

对周边地区和欧亚大陆的气候和水文产生了深刻影响。青藏高原的气候变化影响着高原生物多样性保护和社会经济的发展。青藏高原特有有蹄类动物是高原动物区系的代表, 是高原动物最具特色的部分。藏羚(*Pantholops hodgsonii*)、野牦牛(*Bos mutus*)等受威胁有蹄类物种为世人所瞩目。因此, 青藏高原是生物多样性与全球环境变化领域的热点研究区域。在本文中, 我们研究了青藏高原有蹄类物种多样性分布格局与保护现状。重点关注以下问题: 青藏高原有多少种有蹄类? 有多少种特有有蹄类? 其分布格局如何? 生存状况如何? 保护现状如何? 探究上述问题可以为青藏高原的生物多样性保护、社会经济可持续发展、国家公园的建设和“一带一路”建设提供背景资料。

1 研究方法

长期以来, 不同学科对青藏高原的理解不一样, 即使是相同学科的专家也对青藏高原有不同理解(张钺锂等, 2002)。于是, 作为研究的第一步, 需要首先确定青藏高原的边界范围, 我们采用了张钺锂等(2002)依据地貌单元完整性原则划定的青藏高原边界。

从1999年起,我们在喜马拉雅南坡和横断山区进行了多次野外考察。喜马拉雅山脉南坡和横断山脉地形切割深、海拔落差大,高山峡谷成为来自印度洋暖湿气流北上的通道,为多种有蹄类创造了生境。喜马拉雅山东段南坡是古北界与东洋界的过渡带,东洋界与古北界物种在横断山脉的分野也由于多条平行高山峡谷的存在而变得复杂(李晶晶等, 2013; 潘虎君等, 2013; 胡一鸣等, 2014)。该地区东洋界与古北界过渡带的宽度与纬度、地形地貌有关。张镜铨等(2002)指出自泸水-丽江一线以北的高黎贡山、怒山和玉龙山之间、澜沧江与金沙江之间的云岭南段山地明显展宽,除老君山等少数高峰海拔超过4,000 m外,其他地区海拔较低,故青藏高原界线向北凸至维西县北面。于是,我们依据海拔4,000 m以上山顶面(高山)成片分布的最南缘位置确定了青藏高原在横断山三江并流段的界线。He等(2017)、郜二虎等(2017)也将横断山地区的青藏高原动物区定为海拔3,500–4,000 m以上区域。于是,在横断山三江并流地区和西至中国尼泊尔边境西段的喜马拉雅山东段南坡(包括藏南地区)按照4,000 m高程线划定了青藏高原东南缘边界,而在高原内部由于地势起伏,高原东部边缘和柴达木盆地的海拔不到4,000 m,这些地区依照青藏高原地貌单元完整性划定了高原的边界(图1)。根据测算,藏南地

区海拔高于4,000 m的面积有11,258 km², 约占藏南面积的13.9%。因此,西藏自治区并不全在青藏高原区内(图1)。

我们从《中国哺乳动物多样性及地理分布》(蒋志刚等, 2015 b)中提取了青藏高原有蹄类物种和青藏高原的特有有蹄类物种进行编目,并收集了截止到2017年12月31日在学术期刊上发表的中国哺乳动物野外考察论文,根据*Handbook of the Mammals of the World, Vol. 2, Hoofed Mammals* (Wilson & Mittermeier, 2012)、《中国哺乳动物种与亚种分类名录与分布大全》(王应祥, 2003)、*Mammal Species of the World: A Taxonomic and Geographic Reference* (3rd edn) (Wilson & Reeder, 2005)、*IUCN Red List of Threatened Species* (IUCN, 2017)、《中国哺乳动物彩色图鉴》(潘清华等, 2007)、《中国兽类野外手册》(Andrew和解焱, 2009)和《中国哺乳动物分布》(张荣祖, 1997)、《西藏哺乳类》(冯祚建等, 1986)、《中国动物图谱: 兽类》(夏武平, 1964)、《中国哺乳动物多样性》(蒋志刚等, 2015a)、《中国哺乳动物多样性(第2版)》(蒋志刚等, 2017)以及有关国家级自然保护区的本底考察报告对该编目进行了校对,并参考*IUCN Redlist of Threatened Species 2017* (www.iucnredlist.org)、*Bovids of the World* (Castell, 2016)对可能在青藏高原有分布的喜马拉雅鬣羚(*Capricornis*

图1 青藏高原每2,500 km²面积上有蹄类物种的分布密度

Fig. 1 Ungulate species density per 2,500 km² area on the Qinghai-Tibetan Plateau

thar) (Duckworth & MacKinnon, 2008)、中华斑羚 (*Naemorhedus griseus*) (Duckworth et al, 2008)、喜马拉雅斑羚 (*N. goral*)、小鹿 (*Muntiacus reevesi*)、贡山麂 (*M. gongshanensis*)、叶麂 (*M. putaoensis*)、赤麂 (*M. vaginalis*) 以及羚牛属 (*Budorcas*) 有蹄类, 依照是否达到海拔分布上限 4,000 m 或是否在图 1 标示的青藏高原区范围内之标准进行了甄别筛选。

综合利用青藏高原有蹄类的潜在空间分布数据, 包括蒋志刚等 (2015a)、IUCN 红色名录 2017 (www.iucnredlist.org)、全球生物多样性信息库 (www.gbif.org)、中国知网的中国硕博士论文库 (<http://kns.cnki.net>), 结合利用了本研究团队在青藏高原长达 36 年的野外研究获得的有蹄类分布数据, 包括第一作者蒋志刚 20 世纪 80 年代初在海北祁连山南坡的考察, 1995 年对青海孟达、青海湖流域的考察, 2000 年对三江并流自然遗产地提名地的考察, 2001 年对王朗、九寨沟、黄龙的考察, 2002–2006 年对龙溪虹口国家级自然保护区的考察, 2003 年对芒康红拉山、类乌齐西藏马鹿自然保护区、察隅慈八沟等自然保护区的考察, 2003 年对珠峰国家级自然保护区和雅鲁藏布江河谷的考察, 2004 年、2013 年、2016 年对可可西里有蹄类的考察, 2005 年对帕米尔高原、祁连山南坡肃南县的考察, 2006 年对昆仑山东段的考察, 2009 年对卧龙国家级自然保护区的考察, 2010 年后对三江源地区的多次考察, 2013 年对四川雅江、祁连山东段山丹县的考察, 2014 年对墨脱、林芝工布江达的考察, 2015 年对柴达木盆地的考察, 2016 年在高黎贡山进行的白肢野牛 (*Bos gaurus*) 和大额牛 (*B. frontalis*) 考察, 2017 年对祁连山的考察以及团队成员从 1994 年起在青海、四川白玉和珠峰南坡开展的高原有蹄类如普氏原羚 (*Procapra przewalskii*)、藏羚、藏野驴 (*Equus kiang*)、藏原羚 (*Procapra picticaudata*)、白唇鹿 (*Przewalskium albirostris*) 等高原有蹄类的考察、系统监测或定位研究结果, 对青藏高原有蹄类分布区进行了校正。制作了青藏高原有蹄类物种分布区图层, 将分布区图层转换为 50 km × 50 km 的栅格, 进行物种数叠加, 对青藏高原有蹄类分布格局进行了分析。

红色名录指数可指示一个类群濒危程度随着时间的变化趋势。综合汪松 (1998)、汪松和解焱 (2004) 和蒋志刚等 (2016b) 的红色名录评估结果计算

了中国青藏高原有蹄类动物的红色名录指数。红色名录指数的计算方法 (Bubb et al, 2009) 如下:

$$RLI_t = 1 - \frac{\sum W_{c(t,s)}}{W_{EX} \cdot N}$$

其中, RLI_t 为时间 t 时的红色名录指数; $W_{c(t,s)}$ 是时间 t 时, 物种 s 的濒危状态 c 的权重; W_{EX} 是“灭绝”(Extinct) 的权重; N 是该次红色名录评估中除了“数据缺乏”(Data Deficient) 和在第一次评估中被评定为“灭绝”(Extinct) 以外的评估物种数目。

我们利用灭绝–风险法 (Extinction-Risk Method) 对红色名录的每一个种的濒危状态进行加权, “无危”(Least Concern) 的权重为 0, “近危”(Near Threatened) 的权重为 0.0005, “易危”(Vulnerable) 的权重为 0.005, “濒危”(Endangered) 的权重为 0.05, “极度濒危”(Critically Endangered) 的权重为 0.5, “灭绝”(Extinct)、“野生灭绝”(Extinct in the Wild) 或“区域灭绝”(Regionally Extinct) 的权重均为 1 (Bubb et al, 2009)。

利用环境保护部南京环境科学研究所提供的国家级自然保护区数据与青藏高原有蹄类动物潜在分布区进行了叠加分析, 以期发现青藏高原有蹄类动物高密度分布区的保护空缺。

2 研究结果

2.1 青藏高原有蹄类现状

依照是否达到海拔分布上限 4,000 m 的标准, 确定喜马拉雅山脉东段与横断山三江并流地区的有蹄类是否为青藏高原有蹄类 (表 1)。贡山羚牛 (*B. taxicolor*) 在夏季到达海拔 3,500 m 以上地区活动, 其一年内大部分时间在 3,500 m 以下生境活动 (赵小飞, 2013)^①, 故贡山羚牛为生活在高原边缘的动物。四川羚牛 (*B. tibetanus*) 在岷山、邛崃山的分布上限也达 4,000 m, 同样为生活在高原边缘的动物。根据赤斑羚 (*N. baileyi*) 的分布海拔范围为 2,000–4,500 m (Duckworth & MacKinnon, 2008; Castell, 2016), 故将其列为青藏高原有蹄类之一。小鹿在川西的龙溪–虹口、卧龙等自然保护区中有分布, 也将其列为青藏高原有蹄类之一。Schaller 和 Rabinowitz (2004) 报

^① 赵小飞 (2013) 高黎贡山羚牛分布与保护现状研究. 青海师范大学硕士学位论文, 西宁。

表1 中国青藏高原有蹄类动物

Table 1 Ungulate species on the Qinghai-Tibetan Plateau

物种 Species		红色名录等级 Red List categories ¹			国家重点保护 野生动物级别 NKPWA ²	CITES附录 CITES Appendix	特有种 ³ Endemic species	分布海拔范围 Elevational range (m)
		1995	2004	2015				
野牦牛	<i>Bos mutus</i>	VU	VU	VU	I	I	E	4,000–5,500
不丹羚牛	<i>Budorcas whitei</i>	EN	CR	VU	I	II		1,000–4,000
贡山羚牛 ⁴	<i>B. taxicolor</i>			VU	I ³	II		1,760–4,100
四川羚牛 ⁴	<i>B. tibetanus</i>	EN	EN	VU	I ³	II	E	1,000–4,000
白唇鹿	<i>Przewalskium albirostris</i>	EN	EN	EN	I		E	3,500–5,200
西藏马鹿	<i>Cervus wallichii</i>	EN	VU	EN	II		E	3,500–5,000
梅花鹿	<i>C. hortulorum</i>	EN	EN	CR	I			100–5,000
水鹿	<i>C. equinus</i>	VU	VU	NT	II			2,000–4,000
毛冠鹿	<i>Elaphodus cephalophus</i>	VU	VU	VU				300–2,600
藏野驴	<i>Equus kiang</i>	VU	EN	NT	I	II	E	3,800–5,100
鹅喉羚	<i>Gazella yarkandensis</i>	VU	EN	VU	II			2,600–4,000
林麝	<i>Moschus berezovskii</i>	EN	EN	CR	I	II		1,600–4,000
高山麝	<i>M. chrysogaster</i>	EN	EN	CR	I	II	E	3,300–5,200
喜马拉雅麝	<i>M. leucogaster</i>			EN	I	II		2,500–4,000
黑麝	<i>M. fuscus</i>	VU	EN	CR	I	II		3,000–4,200
中华鬣羚	<i>Capricornis milneedwardsii</i>	VU	VU	VU	II	I		2,000–4,200
西藏盘羊	<i>Ovis hodgsoni</i>	EN	EN	NT	II	I	E	3,500–5,000
帕米尔盘羊	<i>O. polii</i>			VU	II	II		1,500–5,500
藏羚	<i>Pantholops hodgsonii</i>	EN	EN	NT	I	I	E	3,250–5,500
藏原羚	<i>Procapra picticaudata</i>	VU	VU	NT	II		E	5,000–5,750
普氏原羚	<i>P. przewalskii</i>	EN	CR	CR	I		E	3,100–4,800
岩羊	<i>Pseudois nayaur</i>	VU	VU	LC	II	III		2,400–6,000
野猪	<i>Sus scrofa</i>	LC	LC	LC				800–3,500
小鹿	<i>Muntiacus reevesi</i>	VU	VU	VU				50–3,500
贡山麂	<i>M. gongshanensis</i>	EN	EN	CR				900–3,000
北山羊	<i>Capra sibirica</i>	EN	EN	NT	I	III		2,000–5,000
塔尔羊	<i>Hemitragus jemlahicus</i>	EN	EN	CR	I			3,000–4,000
赤斑羚	<i>Naemorhedus baileyi</i>	NT	EN	EN	I	I		2,000–4,500

1 红色名录等级: LC: 无危; VU: 易危; EN: 濒危; CR: 极危

Red List categories: LC, Least Concern; VU, Vulnerable; EN, Endangered; CR, Critically Endangered.

2 NKPWA, National Key Protected Wild Animals. I, Category I; II, Category II.

3 青藏高原特有种 Endemic to Qinghai-Tibetan Plateau

4 四川羚牛(*Budorcas tibetanus*)在2004年和2015年红色名录评级中均未被作为独立物种进行评估,但是,羚牛(*B. taxicolor*)作为整体在1998年、2005年和2015年被评估过,此外,四川羚牛也在2015年的评估中被包括在其他羚牛亚种中被评估过,故将其他被评估过的羚牛亚种的红色名录等级视为四川羚牛的评估等级,并将羚牛的国家重点保护级别、CITES附录等级视为不丹羚牛和贡山羚牛的国家重点保护级别、CITES附录等级。

Sichuan takin (*Budorcas tibetanus*) was not evaluated as an independent species in 1998, 2004 and 2015 National Red List Assessments, but takin (*B. taxicolor*) was assessed as a whole, additionally, the Sichuan takin was included in the other takins subspecies and was evaluated, therefore, we used the red list categories of other evaluated takin subspecies as that of Sichuan takin, we also used the NKPWA category and CITES Appendix of takin as that of the Bhutan takins and Gongshan takin.

道贡山鹿在从排龙到易贡(30°07' N, 95°02' E)的河谷以及墨脱、察隅(29°56' N, 94°48' E)有发现, 也将其列为青藏高原有蹄类。

喜马拉雅鬣羚、中华斑羚、喜马拉雅斑羚一般

分布在海拔3,000 m以下。喜马拉雅斑羚在日喀则境内喜马拉雅山南坡吉隆沟海拔3,500 m以下地区有分布, 在巴基斯坦旁遮普邦也在3,500 m左右地区活动, 故本文没有将喜马拉雅鬣羚、喜马拉雅斑羚

和中华斑羚列为青藏高原有蹄类。此外, 叶麂和赤麂多分布在3,000 m以下, 故也没有将其列入。同理, 也没有将分布在藏南地区海拔4,000 m以下的有蹄类列入。

2016年, 我们在高黎贡山调查了大额牛。大额牛亦称独龙牛。在考察中没有发现野生大额牛, 大额牛已在野外灭绝。现在高黎贡山的大额牛已经成为被人类驯化的野生动物, 被放牧于高山牧场。20世纪80年代初期, 怒江州养殖存栏77头大额牛。1986年以来, 怒江州农业部门加大了对大额牛的保种选育工作, 逐步扩大了饲养, 将原仅存于独龙江的大额牛引种到怒江流域贡山、福贡及泸水境内。截至2012年, 怒江州全州共有大额牛养殖户37户, 存栏达3,726头。

青藏高原有28种有蹄类动物(表1), 占中国有蹄类动物的42%, 其中, 藏羚、藏原羚、普氏原羚、野牦牛、西藏盘羊(*Ovis hodgsoni*)、帕米尔盘羊(马可波罗盘羊) (*O. polii*)、喜马拉雅麝(白腹麝) (*Moschus leucogaster*)、西藏马鹿(*Cervus wallichii*)、四川羚牛和藏野驴等10种为青藏高原特有种。这些有蹄类动物中, 有适应开阔高原夷平面、洪积扇、湖周盆地生境的藏野驴、藏羚、野牦牛、白唇鹿、藏原羚、普氏原羚; 有适应高寒荒漠生境的鹅喉羚(*Gazella yarkandensis*); 有适应高山悬崖生境的塔

尔羊(*Hemitragus jemlahicus*)、岩羊(*Pseudois nayaur*)、西藏盘羊和帕米尔盘羊等; 有适应森林灌丛生境的不丹羚牛(*B. whitei*)、贡山羚牛、四川羚牛、高山麝(*M. chrysogaster*)、林麝(*Moschus berezovskii*)、黑麝(*M. fuscus*)、喜马拉雅麝(白腹麝)、西藏马鹿、白唇鹿和喜马拉雅鬣羚等。

青藏高原有蹄类物种分布密度大致是东部高、西部低, 以昆仑山脉东段、巴颜喀拉山和横断山脉最高, 祁连山脉和喜马拉雅山脉东段次之, 羌北高原、可可西里和三江源地区第三, 柴达木盆地和喜马拉雅山脉的西段最低(图1)。

与青藏高原有蹄类物种密度分布不同, 青藏高原特有有蹄类物种集中分布在青藏高原内部, 以昆仑山脉东段、巴颜喀拉山脉东段、祁连山脉南坡之间物种密度最高, 青藏高原西北部次之, 柴达木盆地、青藏高原东部和东南部最低(图2)。

2.2 青藏高原有蹄类保护现状

根据1998年、2004年和2015年的红色名录评估结果, 中国青藏高原有蹄类物种红色名录指数持续下降, 青藏高原有蹄类物种生存状态持续恶化(图3)。

除了在昆仑山脉东段、巴颜喀拉山和横断山脉北段以外, 有蹄类动物物种密度高的区域已经大部分被国家级自然保护区所覆盖(图4)。羌塘、三江源、

图2 青藏高原每2,500 km²面积上特有有蹄类物种分布密度
Fig. 2 Endemic ungulate species density per 2,500 km² area on the Qinghai-Tibetan Plateau

图3 青藏高原有蹄类物种的红色名录指数

Fig. 3 Red list index of ungulate species on the Qinghai-Tibetan Plateau

可可西里、阿尔金山等国家级自然保护区形成了一个自然保护区群,保护了藏羚、野牦牛、藏野驴等青藏高原特有动物的栖息地。然而,现有国家级自然保护区对普氏原羚、白唇鹿、西藏盘羊和帕米尔盘羊的覆盖度较低。也就是说,青藏高原的国家级自然保护区仍然存在空缺。

3 讨论

青藏高原与邻近区域没有阻隔,内部有多种地表覆盖和完整的垂直植被带谱;有从城市到无人区等开发程度不同的区域。青藏高原是探讨生物进化、物种保育、人类与野生动物关系等多方面内容的天然实验室(陈发虎等, 2017)。我们在喜马拉雅山东段南坡和横断山三江并流地区以海拔4,000 m高程,并依照地貌完整性划定青藏高原动物地理区的

边界,确定了青藏高原有蹄类的种类与分布格局。由于研究地区面积大、内部地形复杂,物种分布会随环境变化而变迁,随着研究的深入,人们还可能会发现新的有蹄类分布记录种类。然而,本研究确定了现代青藏高原有蹄类的大格局。

3.1 高原有蹄类动物的演化

欧亚大陆是有蹄类的起源中心(Castell, 2016),青藏高原隆升促使了物种进化和扩散。不仅在青藏高原起源的动物通过扩散影响新近纪的动物地理格局,中国其他地区的动物多样性特点也受到青藏高原隆升的强烈影响(邓涛等, 2015)。高原有蹄类动物是高原生物多样性的重要组成部分,青藏高原有蹄类是青藏高原生态系统食物链的重要一环,维系着雪豹(*Panthera uncia*)、猞猁(*Lynx lynx*)、狼(*Canis lupus*)等食肉动物种群。作为与南极、北极并列的地球第三极,青藏高原具有比极地更多的生境类型和生物种类,研究高原有蹄类将能揭示动物的演化史。青藏高原为物种起源、分化与全球扩散创造了条件,影响了现生动植物的演替,使其成为全球物种形成、分化与扩散的重要中心之一。青藏高原独特的动物区系能够适应高寒缺氧等生境。青藏高原有蹄类动物保存了较大的群体,保持了继续进化的潜力。

关于青藏高原的动物从何而来,目前有“演化说”和“填充说”(冯祚建等, 1986)。持“演化说”的学者

图4 青藏高原现有国家级自然保护区对青藏高原有蹄类分布的覆盖

Fig. 4 Overlapping of national nature reserves on the ranges of ungulate species on the Qinghai Tibetan Plateau

认为青藏高原的动物起源于高原, 在高原演化至今; 而持“填充说”的学者认为当青藏高原隆升后, 青藏高原四周的动物扩散到高原, 填充了这块原本是空白的生境。从青藏高原有蹄类的演化来看, 现有古生物学证据支持“演化说”(Wang et al, 2015)。张荣祖(1997)将青藏高原动物地理区划为古北界青藏区。陈宜瑜等(1996)基于历史时空的角度分析了青藏高原地区鱼类区系演化, 提出了青藏高原作为一个独立的动物地理区划单元, 青藏高原动物区系应划为独立于古北界、东洋界之外的青藏界的观点。青藏高原动物地理区究竟应当划分为青藏界、青藏亚界或是古北界青藏区, 值得进一步研究。

青藏高原是地球上最年轻的高原, 仍在隆升之中。青藏高原有蹄类也在进化, 其中以藏羚的分化最明显。藏羚的起源进化一直是一个悬而未决的难题。Simpson (1945)曾将藏羚和赛加羚羊(*Saiga tatarica*)同置于赛加羚亚科。根据头骨形态和线粒体DNA, 雷润华等(2004)将藏羚置于羊亚科。Lei等(2003)比较研究了藏羚线粒体DNA后, 发现藏羚是一种特化的山羊而不是羚羊。Chen等(2012, 2015)用COI基因序列比较构建系统发育树, 发现藏原羚、蒙原羚、鹅喉羚与赛加羚羊同属于羚羊亚科, 藏羚、绵羊、山羊属于羊亚科, 藏羚与羚羊亚科的亲缘关系较远, 印证了Lei等(2003)和雷润华等(2004)的研究结果。

在青藏高原的地质历史变迁过程中, 没有迁徙特性的藏原羚经历了一个复杂的、伴随多次种群扩张或缩小的历史种群动态, 其种群已经明显分化为几个亚种群。藏原羚种群发生了显著的遗传分化, 在4.4–2.2 Ma之间, 藏原羚分化为西藏、四川和青海–阿尔金山–可可西里3个分支, 这个时间正好与3.6–2.6 Ma前青藏高原的强烈隆升期吻合(Zhang et al, 2013)。

由于青藏高原抬升, 原羚属(*Procapra*)发生了分化, Hu等(2015)发现随着高原隆升, 生态位分化促使了原羚属物种形成。Chen等(2015)通过微卫星研究发现藏原羚、蒙古原羚的遗传多样性高于期望值, 而普氏原羚的遗传多样性却低于期望值, 是原羚属3种原羚中遗传多样性最低的一个种。说明普氏原羚历史上曾经历多次遗传瓶颈, 种群数量下降, 对其的保护更为急迫。然而, Turghan等(2013)却发现普氏原羚哇玉种群与其他种群的形态差异达到

了亚种标准, 于是, 他们将普氏原羚哇玉类群定为一个新亚种: *P. przewalskii wayu*。说明即使是种群较小的动物, 由于空间隔离, 种群之间差异在积累, 物种仍在进化。

牦牛分为野牦牛和家牦牛(*Bos grunniens*) (Leslie & Schaller, 2009)。关于牦牛的属级分类地位一直存在争议。郭松长等(2006)用线粒体D-loop区与Cytb基因序列构建的系统树显示牦牛与野牛属(*Bison*)的草原野牛、美洲野牛具有最近的共同祖先, 而与牛属的其他亚洲物种亲缘关系较远。他们的研究结果不支持将牦牛独立为牦牛属(*Poephagus*), 牛属与野牛属在分类上应合并为一个属。这说明牛属的祖先可能随着青藏高原的隆升而扩散, 也可能野牦牛的祖先在青藏高原隆升的某一阶段扩散到现在的青藏高原地区。

盘羊栖息在亚洲中部的各大山系, 分布范围广, 亚种分化多, 为中亚高山及亚高山荒漠有蹄类动物的典型代表类群, 以青藏高原为核心的泛第三极地区是盘羊分布区的核心地带。由于盘羊栖息环境荒僻, 标本收藏量有限, 而根据零星标本, 不同学者对其种下分类持不同的观点。Shackleton和Lovari (1997)将盘羊分为9个亚种, 其中6个亚种分布在中国; 王应祥(2003)则认为中国有8个盘羊亚种。Groves和Grubb (2011)在*Ungulate Taxonomy*一书中将盘羊亚种提升为种。Wilson和Mittermeier (2012)在*Handbook of the Mammals of the World, Vol. 2: Hoofed Mammals*中将盘羊属(*Ovis*)分为12种, 其中, 中国有7种(蒋志刚等, 2017)。

3.2 全球变化背景下的高原有蹄类动物

青藏高原近年来的暖湿化倾向受到国际社会的高度关注, 被“2018年全球保护与生物多样性新事件天际线扫描研究”列为未来可能影响全球生物多样性与环境的15项新事件之一(Sutherland et al, 2018)。青藏高原对气候变化尤为敏感, 整个泛第三极地区的升温速率是全球平均速率的2倍, 以青藏高原为核心的第三极是未来全球气候变化影响不确定性最大的地区(姚檀栋等, 2017)。青藏高原上的野生动物区系受到了气候变化、土地覆盖面变化和人类活动等全球变化的深刻影响。Luo等(2015)使用政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)三种大气环流模型(MK3, HADCM3和MIROC3_2-MED)、3种温室气体

排放情景(B1, A1B和A2)和两种迁移假设(全迁移假设和零迁移假设),采用多模型整合法,获得了共6,160个青藏高原有蹄类分布预测结果,预测了青藏高原有蹄类在2020年、2050年和2080年的分布状况及物种多样性格局,发现在全球气候变化背景下,青藏高原有蹄类动物将丧失30–50%的适宜生境,分布区平均向北迁移近300 km,平均海拔下降约650 m;在未来的100年内,55–68%的青藏高原有蹄类动物将成为濒危种,23–32%的青藏高原有蹄类动物将极度濒危,4–7个青藏高原特有有蹄类动物将成为全球濒危种,这一地区面临的生物多样性危机将比其他地区更严峻。在全球气候变化的背景下,青藏高原有蹄类物种多样性总体上呈由东向西递减的趋势,东南部山地目前物种最丰富,但物种灭绝的威胁更大;而东北部环青海湖地区和西北部干旱地区物种多样性可能上升。近年来青藏高原上的野生动物区系受到了全球变化的深刻影响,另一方面,青藏高原的动物,特别是草食动物呼吸也排放了二氧化碳、甲烷等温室气体。

广义的全球变化包括土地覆盖类型的变化和人类活动。人类活动对青藏高原的有蹄类,特别是特有有蹄类动物产生了强烈影响。Yang等(2011)发现相比高山湖泊等地理隔离效应,道路、草原围栏、放牧和人类定居点等现代人类活动对普氏原羚种群遗传结构的隔离效应更大,在人类活动的影响下,普氏原羚的种群遗传结构发生了显著变化。青藏运输线分割了青藏高原自然保护区。Yin等(2006)发现尽管野生有蹄类在逐步调整活动节律以适应繁忙的青藏铁路、青藏公路,青藏运输线依然对藏羚、藏原羚和藏野驴的活动造成了影响。Lian等(2011, 2012)发现青藏铁路与青藏公路的阻隔增大了藏羚被捕食的风险,在可可西里自然保护区,藏羚和藏原羚开始回避青藏铁路与青藏公路。此外,大规模的草原围栏对高原有蹄类产生了更大的影响(Mallon & Jiang, 2009)。You等(2013)发现草原围栏影响了普氏原羚的采食、求偶等行为,分割了其栖息地面积,降低了其逃离天敌的能力,大大增加了其被狼捕食的比例。全球变化对青藏高原动物区系的影响究竟有多大?青藏高原生态系统对全球变化的贡献有多大?其中动物对全球变化的贡献有多大?我们尚不知道答案。

3.3 泛第三极、“一带一路”与濒危物种保护

泛第三极地区以第三极为中心向东西南北不同方向辐散,西至高加索等山脉,东至黄土高原西部,面积约2,000万平方公里。青藏高原与连接欧亚大陆的“一带一路”高度契合(陈发虎等, 2017)。跨越泛第三极的“一带一路”沿途的环境与生物多样性保护是世人所关注的问题(Sutherland et al, 2018)。继续推动“世界第三极”综合观测,深化高原地区生态系统变化的全球影响研究,已被列入科技部《推进“一带一路”建设科技创新合作专项规划》(www.yidaiyilu.gov.cn/)。野生哺乳动物多处于濒危状态,其保护是世界性的难题(IUCN, 2017)。灵长类、食肉类和有蹄类是哺乳动物的三大重点保护类群。青藏高原生态系统原真性好,有大面积无人区,并且藏羚、藏野驴、野牦牛和藏原羚等高原有蹄类的种群大。因此,青藏高原有蹄类是中国生物多样性保育的重点之一。

青藏高原动物研究将为高原畜牧产业的可持续发展提供科学决策。青藏高原有蹄类可为改良高原家畜提供丰富的遗传资源。家牦牛存在生产品质退化问题,需要不断引入野牦牛的基因进行品质改良,盘羊也被利用作为家羊的遗传品质改良的种源。加强青藏高原及其周边地区自然环境变化对青藏高原动物区系影响的研究,对揭示该地区环境变化规律,制订与实施“一带一路”、西部大开发战略规划具有重要的意义(姚檀栋等, 2017)。许多野生有蹄类的分布,如帕米尔盘羊、喜马拉雅麝等,不受国界的限制,在“一带一路”项目中,应设立更多的跨国界保护区,保护那些分布范围大的野生动物。

青藏高原面积约为中国国土面积的1/4,中国有66种现存有蹄类(蒋志刚等, 2017)。青藏高原单位面积上有蹄类物种平均密度比全国平均密度高62%。2016年,中国哺乳动物红色名录(蒋志刚等, 2016b)评估的青藏高原有蹄类中,20种为受威胁物种,占青藏高原有蹄类的71%。青藏高原有蹄类中有灭绝风险的比例远高于世界平均水平(Butchart et al, 2010; IUCN, 2017)。

16种青藏高原有蹄类被列入濒危野生动植物种国际贸易公约(Convention on International Trade of Species of Wild Fauna and Flora, CITES)的附录I或附录II,占青藏高原有蹄类物种数的54%。藏羚的保护一直是CITES缔约方大会的议题之一。1999年

12月12–14日, CITES秘书处曾经专门在青海西宁召开了保护藏羚羊国际研讨会, 2000年在第11届CITES缔约方大会上通过了第11.8号决议(Conf. 11.8)--《保护和控制藏羚羊贸易的决议》, 在第12、13、16届CITES缔约方大会上讨论通过了该决议的修正案, 2016年在第17届CITES缔约方大会上再次通过了修正案(Conf. 11.8 Rev.17, <https://cites.org/eng/res/11/11-08R13.php>)。说明国际社会对以保护藏羚羊为代表的高原有蹄类动物的重视。

28种高原有蹄类中有24种被列为国家重点保护野生动物, 其中13种被列为一级重点保护野生动物, 约占高原有蹄类的一半。尽管中国森林植被面积在增加, 中国的物种濒危形势仍然严峻(Jiang et al, 2015)。与全球的生物多样性趋势相仿(Butchart et al, 2010), 青藏高原有蹄类的生存状况整体仍在变差, 仅少数种类的生存状况有所改善(蒋志刚等, 2016a)。Cardillo等(2005)发现体重大于3千克的哺乳动物容易灭绝, 而青藏高原有蹄类的体重都大于3千克。Dirzo等(2014)也发现大型动物容易灭绝, 受到人类最早期开发利用的威胁, 大型野生动物是人类世 (Anthropocene) 第一波灭绝的动物类群(Cardillo et al, 2005)。青藏高原有蹄类的生存危机说明青藏高原仍处于早期阶段, 必须对青藏高原有蹄类, 特别是特有有蹄类动物实施抢救性保护。

相对于低海拔地区, 中国高海拔地区的濒危物种比例更高(蒋志刚等, 2016a)。如何保护高海拔地区的濒危物种是中国生物多样性保护的关键问题之一。自然保护区是保护濒危物种种群与栖息地的重要措施。经过30年的实践, 青藏高原已经建立了大面积的自然保护区, 覆盖了西藏、青海国土面积的1/3以上(<http://sts.mep.gov.cn/zrbhq/zrbhq>), 但一些高原有蹄类的重要栖息地与种群仍没有纳入自然保护区, 现有的自然保护区仍存在野生有蹄类动物的保护空缺。例如, 平晓鸽等(2018)发现普氏原羚的重要种群与栖息地还没有建立自然保护区。

目前正在发展的中国国家公园建设是一个自然保护的重大项目。青藏高原的三江源国家公园的目标是整合自然资源管理体系, 解决“九龙治水、多头管理”的弊端。然而, 乔慧捷等(2018)却发现, 建设中的三江源国家公园没有完全覆盖三江源国家级自然保护区, 也未将其中的国家重点保护野生动

物全部纳入国家公园。这显然有悖于三江源国家公园的建设初衷, 不利于青藏高原野生有蹄类动物的有效保护和草原生物多样性的整体保护。

高原腹地是藏羚羊等高原有蹄类动物最后的乐园。青藏高原正在悄然发生巨大的变化, 人类活动加剧, 建立了大面积的草原围栏(Mallon & Jiang, 2009), 藏羚羊、藏野驴和野牦牛被挤到了高原腹地的贫瘠土地上。应加强草原生物多样性的整体保护, 对家畜牧场进行综合管理, 以保护需要大面积生境的高原有蹄类种群。尽管野生动物已经开始适应人类活动(Yang & Xia, 2008), 但是这种适应是缓慢的, 我们应当高度关注青藏高原野生有蹄类动物。

致谢: 本文的初步思路曾在2016年玉树举行的“青藏高原生物多样性研讨会”上报告, 谨此, 对会议的组织者致谢。此外, 我们感谢本团队的研究生、博士后以及研究人员在长期研究中做出的贡献, 感谢方红霞高级工程师帮助整理哺乳动物名录, 感谢环境保护部南京环境科学研究所提供国家级自然保护区数据。本文作者还感谢《生物多样性》编辑部的耐心等待和支持, 以及责任编辑和审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- Andrew TS, Xie Y (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [Andrew TS, 解焱 (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Bubb PJ, Butchart SHM, Collen B, Dublin H, Kapos V, Pollock C, Stuart SN, Vié JC (2009) IUCN Red List Index—Guidance for National and Regional Use. IUCN, Gland, Switzerland.
- Butchart SHM, Walpole M, Collen B, van Strien A, Scharlemann JPW, Almond REA, Baillie JEM, Bomhard B, Brown C, Bruno J, Carpenter KE, Carr GM, Chanson J, Chenery AM, Csirke J, Davidson NC, Dentener F, Foster M, Galli A, Galloway JN, Genovesi P, Gregory RD, Hockings M, Kapos V, Lamarque J-F, Leverington F, Loh J, McGeoch MA, McRae L, Minasyan A, Morcillo MH, Oldfield TEE, Pauly D, Quader S, Revenga C, Sauer JR, Skolnik B, Spear D, Stanwell-Smith D, Stuart SN, Symes A, Tierney M, Tyrrell TD, Vié J-C, Watson R (2010) Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science*, 328, 1164–1168.
- Cardillo M, Mace GM, Jones KE, Bielby J, Bininda-Emonds ORP, Sechrest W, David L, Orme C, Purvis A (2005) Multiple causes of high extinction risk in large mammal species.

- Science, 309, 1239–1241.
- Castell JR (2016) Bovids of the World. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Chen FH, An CB, Dong GH, Zhang DJ (2017) Human activities, environmental changes, and rise and decline of silk road civilization in Pan-Third Pole region. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 32, 967–975. (in Chinese with English abstract) [陈发虎, 安成邦, 董广辉, 张东菊 (2017) 丝绸之路与泛第三极地区人类活动、环境变化和丝路文明兴衰. 中国科学院院刊, 32, 967–975.]
- Chen J, Jiang Z, Li C, Ping XG, Cui S, Tang S, Chu H, Liu B (2015) Identification of ungulates used in a traditional Chinese medicine with DNA barcoding technology. Ecology and Evolution, 5, 1818–1825.
- Chen J, Li C, Yang J, Luo Z, Tang S, Li F, Li C, Liu B, Jiang Z (2012) Isolation and characterization of cross-amplification microsatellite panels for species of *Procapra* (Bovidae; Antilopinae). International Journal of Molecular Sciences, 13, 8805–8818.
- Chen YY, Chen YF, Liu HZ (1996) Studies on the position of the Qinghai-Xizang Plateau region in zoogeographic divisions and its eastern demarcation line. Acta Hydrobiological Sinica, 20, 97–103. (in Chinese with English abstract) [陈宜瑜, 陈毅峰, 刘焕章 (1996) 青藏高原动物地理区的地位和东部界线问题. 水生生物学报, 20, 97–103.]
- Cui SP, Luo X, Li CW, Hu HJ, Jiang ZG (2018) Predicting the potential distribution of white-lipped deer using the MaxEnt model. Biodiversity Science, 26, 171–176. (in Chinese with English abstract) [崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚 (2018) 基于MaxEnt模型预测白唇鹿的潜在分布区. 生物多样性, 26, 171–176.]
- Deng T, Wang XM, Wang SQ, Li Q, Hou SK (2015) Evolution of the Chinese Neogene mammalian faunas and its relationship to uplift of the Tibetan Plateau. Advances in Earth Science, 30, 407–415. (in Chinese with English abstract) [邓涛, 王晓鸣, 王世骥, 李强, 侯素宽 (2015) 中国新近纪哺乳动物群的演化与青藏高原隆升的关系. 地球科学进展, 30, 407–415.]
- Dirzol R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac N, Collen B (2014) Defaunation in the Anthropocene. Science, 345, 401–406.
- Duckworth JW, MacKinnon J (2008) *Capricornis thar*. The IUCN Red List of Threatened Species 2008: e.T3816A10096556. <http://www.iucnredlist.org/details/3816/0> (accessed on 2018-2-13)
- Duckworth JW, Steinmetz R, Chaiyarat R (2008) *Naemorhedus griseus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2008: e.T14303A4430834. <http://www.iucnredlist.org/details/14303/0> (accessed on 2018-2-13)
- Feng ZJ, Cai GQ, Zheng CL (1986) Mammals of Tibet. Science Press, Beijing. (in Chinese) [冯祚建, 蔡桂全, 郑昌琳 (1986) 西藏哺乳类. 科学出版社, 北京.]
- Gao EH, He JK, Wang ZC, Xu Y, Tang XP, Jiang HS (2017) China's zoogeographical regionalization based on terrestrial vertebrates. Biodiversity Science, 25, 1321–1330. (in Chinese with English abstract) [郜二虎, 何杰坤, 王志臣, 徐扬, 唐小平, 江海声 (2017) 全国陆生野生动物调查单元区划方案. 生物多样性, 25, 1321–1330.]
- Groves CP, Grubb P (2011) Ungulate Taxonomy. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Guo SC, Liu JQ, Qi DL, Yang J, Zhao XQ (2006) Taxonomic placement and origin of yaks: Implications from analyses of mtDNA D-loop fragment sequences. Acta Theriologica Sinica, 26, 325–330. (in Chinese with English abstract) [郭松长, 刘建全, 祁得林, 杨洁, 赵新全 (2006) 牦牛的分类学地位及起源研究: mtDNA D-loop序列的分析. 兽类学报, 26, 325–330.]
- He J, Kreft H, Gao E, Wang Z, Jiang H (2017) Patterns and drivers of zoogeographical regions of terrestrial vertebrates in China. Journal of Biogeography, 44, 1172–1184.
- Hu J, Jiang Z, Chen J, Qiao H (2015) Niche divergence accelerates the evolution in Asian endemic *Procapra gazelles*. Scientific Reports, 5, 10069.
- 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.]
- IUCN (2017) IUCN Redlist of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org/>. (accessed on 2017-03-20).
- Jiang Z, Jiang J, Wang Y, Zhang E, Zhang Y, Li L, Cai B, Luo Z, Li C, Ping X, Xie F, Cao L (2016) China's ecosystems: Overlooked species. Science, 353, 657.
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016a) Red List of China's Vertebrates. Biodiversity Science 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢峰, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016a) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Jiang ZG, Li LL, Luo ZH, Tang SH, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Feng ZJ, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Ping XG, Fang HX (2016b) Evaluating the status of China's mammals and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. Biodiversity

- Science, 24, 552–567. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 李立立, 罗振华, 汤宋华, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 冯祚建, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 平晓鸽, 方红霞 (2016b) 通过红色名录评估研究中国哺乳动物受威胁现状及其原因. 生物多样性, 24, 552–567.]
- Jiang ZG, Liu SY, Wu Y, Jiang XL, Zhou KY (2017) China's mammalian Diversity (2nd edition). Biodiversity Science, 25, 886–895. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚 (2017) 中国哺乳动物多样性(第2版). 生物多样性, 25, 886–895.]
- Jiang ZG, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Feng ZJ, Zhou KY, Liu SY, Luo ZH, Li CW (2015a) China's mammalian diversity. Biodiversity Science, 23, 351–364. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 冯祚建, 周开亚, 刘少英, 罗振华, 李春旺 (2015a) 中国哺乳动物多样性. 生物多样性, 23, 351–364.]
- Jiang ZG, Ma Y, Wu Y, Zhou KY, Liu SY, Feng ZJ (2015b) China's Mammals: Diversity and Geographic Distribution. Science Press, Beijing. (in Chinese with English summary) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 周开亚, 刘少英, 冯祚建 (2015b) 中国哺乳动物多样性及地理分布. 科学出版社, 北京.]
- Lei R, Jiang Z, Hu Z, Yang W (2003) Phylogenetic relationships of Chinese antelopes based on mitochondrial ribosomal RNA gene sequences. Journal of Zoology, 261, 227–237.
- Lei RH, Jiang ZG, Hu ZA, Yang WL (2004) Taxonomic status of *Procapra* and the classification of Chinese antelopes and gazelles. Acta Zootaxonomica Sinica, 29, 622–627. (in Chinese with English abstract) [雷润华, 蒋志刚, 胡志昂, 阳文龙 (2004) 原羚属分类地位研究兼论中国羚羊的分类. 动物分类学报, 29, 622–627.]
- Leslie DM, Schaller GB (2009) *Bos grunniens* and *Bos mutus* (Artiodactyla: Bovidae). Mammalian Species, 836, 1–17.
- 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.]
- Lian X, Li X, Zhou D, Yan P (2012) Avoidance distance from Qinghai-Tibet Highway in sympatric Tibetan antelope and gazelle. Transportation Research Part D, 17, 585–587.
- Lian X, Zhang T, Cao Y, Su J, Thirgood S (2011) Road proximity and traffic flow perceived as potential predation risks: Evidence from the Tibetan antelope in the Kekexili National Nature Reserve, China. Wildlife Research, 38, 141–146.
- Liu J, Luo YH, Li DZ, Gao LM (2017) Evolution and maintenance mechanisms of plant diversity in the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent regions: Retrospect and prospect. Biodiversity Science, 25, 163–174. (in Chinese with English abstract) [刘杰, 罗亚皇, 李德铎, 高连明 (2017) 青藏高原及毗邻区植物多样性演化与维持机制: 进展及展望. 生物多样性, 25, 163–174.]
- Luo Z, Jiang Z, Tang S (2015) Impacts of climate change on distributions and diversity of ungulates on the Tibetan Plateau. Ecological Applications, 25, 24–38.
- Mallon DP, Jiang ZG (2009) Grazers on the plains: Challenges and prospects for large herbivores in Central Asia. Journal of Applied Ecology, 46, 516–519.
- 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 QH, Wang YX, Yan K (2007) A Field Guide to Mammals of China. pp. 420. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [潘清华, 王应祥, 岩崑 (2007) 中国哺乳动物彩色图鉴. 420页. 中国林业出版社, 北京.]
- Ping XG, Li CW, Li CL, Tang SH, Fang HX, Cui SP, Chen J, Wang EG, He YB, Cai P, Zhang Y, Wu YL, Jiang ZG (2018) The distribution, population and conservation status of Przewalski's gazelle, *Procapra przewalskii*. Biodiversity Science, 26, 177–184. (in Chinese with English abstract) [平晓鸽, 李春旺, 李春林, 汤宋华, 方红霞, 崔绍朋, 陈静, 王恩光, 何玉邦, 蔡平, 张毓, 吴永林, 蒋志刚 (2018) 普氏原羚分布、种群和保护现状. 生物多样性, 26, 177–184.]
- Qiao HJ, Wang XY, Wang W, Luo ZH, Tang K, Huang Y, Yang SN, Cao WW, Zhao XQ, Jiang JP, Hu JH (2018) From nature reserve to national park system pilot: Changes of environmental coverage in the Three-River-Source National Park and implications for amphibian and reptile conservation. Biodiversity Science, 26, 202–209. (in Chinese with English abstract) [乔慧捷, 汪晓意, 王伟, 罗振华, 唐科, 黄燕, 杨胜男, 曹伟伟, 赵新全, 江建平, 胡军华 (2018) 从自然保护区到国家公园体制试点: 三江源国家公园环境覆盖的变化及其对两栖爬行类保护的启示. 生物多样性, 26, 202–209.]
- Schaller GB, Rabinowitz A (2004) Species of barking deer (genus *Muntiacus*) in the eastern Himalayan region. Journal of the Bombay Natural History Society, 101, 442–444.
- Shackleton DM, Lovari S (1997) Classification adopted for the Caprinae survey. In: Wild Sheep and Goats and Their Relatives: Status Survey and Conservation Action Plan for Caprinae (ed. Shackleton DM), pp. 9–14. IUCN/SSC Caprinae Specialist Group, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Simpson G (1945) The principles of classification and a classification of mammals. Bulletin American Museum of Natural History, 85, 1–35.
- Sutherland WJ, Butchart SHM, Connor B, Culshaw C, Dicks LV, Dinsdale J, Doran H, Entwistle AC, Fleishman E, Gibbons DW, Jiang Z, Keim B, Le Roux X, Lickorish FA,

- Markillie P, Monk KA, Mortimer D, Pearce-Higgins JW, Peck LS, Pretty J, Seymour CL, Spalding MD, Tonneijck FH, Gleave RA (2018) A 2018 horizon scan of emerging issues for global conservation and biological diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 32, 47–58.
- Turghan M, Jiang Z, Groves CP, Yang J, Fang H (2013) Subspecies in Przewalski's gazelle *Procapra przewalskii* and its conservation implication. *Chinese Science Bulletin*, 58, 1897–1905.
- Wang S (1998) China Red Data Book of Endangered Animals: Mammals. Science Press, Beijing. (in Chinese with English summary) [汪松 (1998) 中国濒危动物红皮书. 科学出版社, 北京.]
- Wang S, Xie Y (2004) China Species Red List Vol. II: Vertebrates Part 2. Science Press, Beijing. (in Chinese with English summary) [汪松, 解焱 (2004) 中国物种红色名录脊椎动物卷. 科学出版社, 北京.]
- Wang XM, Wang Y, Li Q, Tseng ZJ, Takeuchi GT, Deng T, Xie GP, Chang MM, Wang N (2015) Cenozoic vertebrate evolution and paleoenvironment in Tibetan Plateau: Progress and prospects. *Gondwana Research*, 27, 1335–1354.
- Wang YX (2003) A Complete Checklist of Mammal Species and Subspecies in China: A Taxonomic and Geographic Reference. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese with English summary) [王应祥 (2003) 中国哺乳动物种与亚种分类名录与分布大全. 中国林业出版社, 北京.]
- Wilson DE, Mittermeier RA (2012) Handbook of the Mammals of the World, Vol. 2. Hoofed Mammals. Lynx Edicions, Barcelona.
- Wilson DE, Reeder DM (2005) Mammal Species of the World: A Taxonomic and Geographic Reference, 3rd edn. John Hopkins University Press, Baltimore, MA.
- Xia WP (1964) Album of China's Animals: Mammals. Science Press, Beijing. (in Chinese) [夏武平 (1964) 中国动物图谱: 兽类. 科学出版社, 北京.]
- Yang J, Jiang Z, Zeng Y, Turghan M, Fang H, Li C (2011) Effect of anthropogenic landscape features on population genetic differentiation of Przewalski's gazelle: Main role of human settlement. *PLoS ONE*, 6, e20144.
- Yang Q, Xia L (2008) Tibetan wildlife is getting used to the railway. *Nature*, 452, 810–811.
- Yao TD, Chen FH, Cui P, Ma YM, Xu BQ, Zhu LP, Zhang F, Wang WC, Ai LK, Yang XX (2017) From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32, 924–931. (in Chinese with English abstract) [姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 马耀明, 徐柏青, 朱立平, 张凡, 王伟财, 艾丽坤, 杨晓新 (2017) 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, 32, 924–931.]
- Yin B, Huai H, Zhang Y, Zhou L, Wei W (2006) Influence of the Qinghai-Tibetan railway and highway on the activities of wild animals. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 3917–3923.
- You Z, Jiang Z, Li C, Mallon D (2013) Impacts of grassland fence on the behavior and distribution range of the critically endangered Przewalski's gazelle on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 58, 2262–2268.
- Zhang F, Jiang Z, Xu A, Zeng Y, Li C (2013) Recent geological events and intrinsic behavior influence the population genetic structure of the Chiru and Tibetan gazelle on the Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 8, e60712.
- Zhang RZ (1979) Physical Geography of China: Zoogeography. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1979) 中国自然地理: 动物地理. 科学出版社, 北京.]
- Zhang RZ (1997) Distribution of Mammalian Species in China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1997) 中国哺乳动物分布. 中国林业出版社, 北京.]
- Zhang YL, Li BY, Zheng D (2002) A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographic Research*, 21, 1–8. (in Chinese with English abstract) [张镱锂, 李炳元, 郑度 (2002) 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 21, 1–8.]

(特邀责任编辑: 李晟 责任编辑: 时意专)