

# 基于空缺分析的中国自然保护地保护成效评析 ——以陆栖哺乳动物为例

李满钰<sup>1</sup>, 任翌成<sup>1</sup>, 戴文昱<sup>1</sup>, 徐子怡<sup>1</sup>, 余博洋<sup>1</sup>, 王结臣<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室, 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

**摘要:** 哺乳动物具有重要的保护意义, 自然保护地能直接、有效地减缓物种多样性的丧失。基于等面积网格测度中国不同受威胁等级的陆栖哺乳动物丰富度格局, 从保护空缺区域和保护空缺物种两方面、自然保护地和自然保护斑块两尺度展开分析, 引入物种种群的最小需求栖息地面积, 考虑了物种间的差异性和空间需求的多样性。结果表明: (1) 受威胁陆栖哺乳动物丰富度呈现从西南向北递减的趋势, 共识别出7个自然保护地覆盖面积有限导致的保护空缺区域。(2) 92.06%的受威胁物种的分布范围与自然保护地存在重叠, 7种濒危、3种易危哺乳动物的分布区未受现有自然保护地保护。(3) 22种受威胁国家重点保护物种的半数受保护斑块在不同种群内在增长率水平下存在面积有限的问题。研究结果对物种保护优先区识别、自然保护地规划与优化等有参考意义。

**关键词:** 受威胁陆栖哺乳动物; 自然保护地; 空缺分析; 最小需求栖息地面积; 中国

物种多样性是生物多样性的重要组成部分, 为人类社会的可持续发展提供基础的生命支持<sup>[1]</sup>。哺乳动物作为最高等的脊椎动物类群, 与人类关系最为密切。中国是世界上哺乳动物物种多样性最丰富的国家之一<sup>[2]</sup>, 分布有全球13%的哺乳动物物种<sup>[3]</sup>。然而中国也是生物多样性受威胁程度最高的国家之一<sup>[4]</sup>, 近几十年来国内陆栖脊椎动物种群数量下降49.71%<sup>[5]</sup>。2020年《中国生物多样性红色名录: 脊椎动物卷(2020)》将国内181种哺乳动物物种认定为受威胁物种<sup>[6]</sup>, 比例高于IUCN红色名录对全球哺乳类的受威胁评估结果<sup>[7]</sup>。如何有效保持中国生物多样性优势、合理保护丰富的哺乳动物资源成为新的迫切要求。

自然保护地能直接、有效地减缓物种多样性丧失<sup>[8,9]</sup>, 在维持和恢复物种生存力方面发挥重要作用<sup>[10]</sup>。中国目前已建立的自然保护地数量和面积均位居全球前列<sup>[11]</sup>, 然而现有保护地网络存在保护低效性的问题<sup>[12,13]</sup>, 在全国乃至全球尺度上均出现重要保护价值区域或物种未被纳入保护体系等情况<sup>[14-16]</sup>。因此, 开展自然保护地保护成效的系统评估, 对促进中国物种的科学保护、保护地管理与优化有重要意义。空缺分析(GAP Analysis)作为一种有效的大尺度区域保护评估方法, 被广泛应用于自然保护地对物种保护作用的研究中<sup>[17]</sup>, 目前空缺分析应用研究主要分为生物多样性典型区域和受威胁物种保护两个方向<sup>[18]</sup>。李迪强等<sup>[19]</sup>基于物种适宜生境分布识别自然保护地内的保护空缺区域, 蒋明康

收稿日期: 2024-07-22; 修订日期: 2024-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871294, 42371430)

作者简介: 李满钰(2001-), 女, 湖北武汉人, 硕士, 研究方向为空间分析与建模、动物地理学。

E-mail: 1290833241@qq.com

通讯作者: 王结臣(1973-), 男, 安徽太湖人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为地图学与地理信息系统、动物地理学。E-mail: wangjiechen@nju.edu.cn

等<sup>[20]</sup>、Brooks等<sup>[21]</sup>结合自然保护地内的物种规模、自然保护地覆盖率等识别存在保护空缺的物种。随着岛屿生物地理学在生物多样性保护领域得到重视,学者们开始关注自然保护地在物种分布范围内覆盖多少面积才算实现有效保护<sup>[22]</sup>。物种的最小需求栖息地面积(Minimum Area Requirement, MAR)指种群长期生存所需的空间大小<sup>[23]</sup>,通过比较生境斑块与MAR的大小关系可实现单一物种的保护空缺判定<sup>[24]</sup>或识别区域尺度自然保护地中目标类群的保护空缺情况<sup>[25,26]</sup>。对多物种进行系统性的MAR值估算需充分考虑各类物种性状,早期MAR值估算研究将所有物种的最小可存活种群(Minimum Viable Population, MVP)设置为固定值,忽略了种间差异性<sup>[27]</sup>;Verboom等<sup>[28]</sup>学者基于不同种群的MVP数据集<sup>[29]</sup>更精确地估算了澳洲、美洲部分哺乳动物的MAR值;国内大型哺乳动物的MAR值由基于物种巢域范围的方法估算得出<sup>[30]</sup>,但有研究表明基于密度的MAR估算方式更适用于哺乳动物类群<sup>[23,31]</sup>。

目前针对国内保护物种的MAR合理估算及考虑种群MAR的自然保护地空缺分析研究有限。为实现大尺度下自然保护地对多物种的保护作用评估并考虑物种MAR估算结果,本文利用陆栖哺乳动物分布数据,从自然保护地保护空缺区域以及保护空缺物种两方面开展研究,以期为中国物种保护优先区识别、自然保护地规划与优化等提供依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况与数据来源

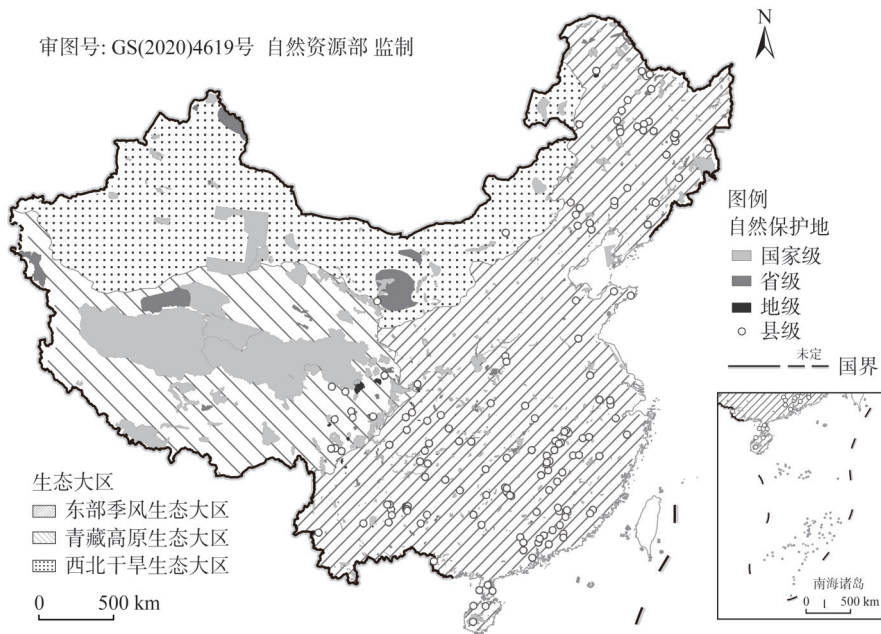
本研究范围涵盖中国大陆地区(港澳台部分数据缺失),主要研究数据包括自然保护地数据和哺乳动物物种分布数据。

#### 1.1.1 自然保护地数据

2019年中共中央办公厅、国务院办公厅提出以国家公园为主体、自然保护区为基础、自然公园为补充的自然保护地体系<sup>[32]</sup>。考虑到哺乳动物物种生存需求面积相对较大,自然公园数量多但面积过小,且其主要作用并非针对哺乳动物物种保护,本文仅选择国家公园、自然保护区作为分析对象,共计790个(图1)(以下简称“自然保护地”)。国家公园分布数据依据三江源国家公园、东北虎豹国家公园、海南热带雨林国家公园、大熊猫国家公园、武夷山国家公园等5个已建国家公园的总体规划图确定;自然保护区数据主要来自自然保护区网络(<http://www.zrbhq.com.cn>)发布的自然保护区名录,据此获取各保护区所属行政区域、类型、等级等信息,其分布范围来源于中国林业科学研究院建设的中国自然保护区标本资源共享平台地理信息库(<http://www.papc.cn>)、中国科学院资源环境科学与数据中心建设的资源环境科学与数据平台(<https://www.resdc.cn>)、联合国环境规划署世界保护监测中心等建设的世界保护区数据库(<http://www.protectedplanet.net>)。

#### 1.1.2 哺乳动物物种分布数据

哺乳动物物种分布情况主要参考IUCN发布的全球陆生哺乳动物空间分布数据(<http://www.iucnredlist.org>)。依据《中国生物多样性红色名录:脊椎动物卷(第一卷)·哺乳动物》<sup>[33]</sup>划定的“极危”“濒危”“易危”受威胁等级,共确定受威胁陆栖哺乳动物物种126种(极危41种、濒危39种、易危46种);物种的体重、食性等数据来自2022年发布的中国哺乳动物形态、生活史、生态特征数据集<sup>[34]</sup>;物种的保护等级参考国家林业和草原局2021年发布的《国家重点保护野生动物名录》<sup>[35]</sup>。



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 研究区自然保护地分布

Fig. 1 Distribution of nature reserves in China

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 物种丰富度的计算

物种丰富度指一个群落或生境中的物种数目。参考迟瑶<sup>[36]</sup>、林鑫等<sup>[37]</sup>的计算方法, 将研究区域划分为  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$  的等面积网格, 剔除中心点在研究区范围外的网格, 最终得到 342776 个网格单元。叠加陆栖哺乳动物分布区矢量数据图层, 通过判断网格中心与物种分布范围的拓扑关系, 将有物种分布的网格赋值为 1, 否则赋值为 0, 叠加得到每个网格单元的哺乳动物物种数目, 即物种丰富度。

### 1.2.2 保护空缺区域分析

保护空缺分析可以获取应得到保护却不在保护地体系中的生物多样性保护空缺区域<sup>[38]</sup>。计算每个网格单元的受威胁哺乳动物物种丰富度, 筛选出丰富度较高但不在自然保护地范围的网格单元作为潜在的保护空缺区域。

### 1.2.3 保护空缺物种分析

#### (1) 基于受保护面积和受保护面积比例的保护空缺物种分析

计算自然保护地与受威胁陆栖哺乳动物分布范围的重叠面积 (以下简称“物种受保护面积”), 计算物种分布范围在自然保护地内的面积占物种总分布区域面积的比例 (以下简称“物种受保护面积比例”), 受保护面积与受保护面积比例能反映自然保护地对各类物种分布区的保护情况。对于受保护面积或受保护面积比例极低甚至为 0 的物种, 将其筛选为存在保护空缺的物种。

#### (2) 基于物种最小需求栖息地面积 (MAR) 的保护空缺物种分析

不同物种的空间需求不同, 使用单一阈值划分的评估结果较为概略, 考虑种间差异

性并针对各物种计算其最小需求栖息地面积 (*MAR*) 相对更合理。*MAR*指可以维持种群长期生存所需的空间大小<sup>[23]</sup>, 是适宜容纳最小可存活种群 (*MVP*) 的最小面积<sup>[39,40]</sup>, 可以作为保护阈值来确定某一生境斑块面积大小是否足以容纳最小生存种群。

物种受自然保护地保护的斑块大小影响物种保护成效<sup>[41]</sup>, 物种需要足够大且连通的适宜保护区域<sup>[42]</sup>, 因此物种分布范围与自然保护地的重合斑块评估对陆栖哺乳动物的有效保护有重要意义。计算各类受威胁物种分布区域与自然保护地范围的重合斑块面积 (以下简称“受保护斑块面积”), 将各物种的受保护斑块面积最大值、中位数分别与其 *MAR* 值进行比较, 小于 *MAR* 值的物种作为候选保护空缺物种。

物种的最小需求面积 *MAR* 可通过某一物种个体所需面积 (Individual Area Requirements, *IAR*) 与最小可存活种群 (*MVP*) 相乘得到。目前有两种主流方法估算某一物种的 *MAR* 值 [式 (1)、式 (2)], Allen 等<sup>[27]</sup>提出通过物种的巢域面积 (home range size) 估算哺乳动物 *MAR*; 但已有研究发现在估计种群面积需求时, 密度 (density) 更适合用于哺乳类等大型动物的 *IAR* 值计算, 因为其巢域范围可能大量重叠<sup>[23,31]</sup>, 故本文参考 Verboom 等<sup>[28]</sup>提出的 *MAR* 计算公式。

$$MAR_{species_i} = 0.5 \times home\ range\ size_{species_i} \times MVP_{species_i} \tag{1}$$

$$MAR_{species_i} = MVP_{species_i} / density_{species_i} \tag{2}$$

*IAR* 值的估算参考基于物种体重推导的物种密度公式<sup>[33,43]</sup>, 不同食性的哺乳动物 *IAR* 与体重 (*BWT*) 的关系不同 (肉食类:  $\beta = 0.87, \alpha = -3.15$ ; 草食类:  $\beta = 0.77, \alpha = -4.33$ ; 杂食类:  $\beta = 0.78, \alpha = -3.84$ )。

$$\lg IAR = \alpha + \beta \times \lg BWT \tag{3}$$

*MVP* 值估算参考 Hilbers 等<sup>[44]</sup>提供的模型并完成单位转换 (表 1), 假设种群增长率为内在增长率 ( $r_m$ ) 的 0.2、0.4、0.6 或 0.8 倍来估计最小可存活种群数量, 最后计算出相应的四个增长率水平下的陆栖哺乳动物的最小需求面积。其中种群增长率的划分反映了环境质量的不同水平, 增长率高代表环境质量更优, *MVP* 与 *MAR* 估计值相对较低, 增长率低代表环境质量更劣, *MVP* 与 *MAR* 估计值相对更高; 这里将增长率为  $0.2r_m$ 、 $0.4r_m$ 、 $0.6r_m$ 、 $0.8r_m$  对应的环境质量划分为较优、适中、较劣三个等级。

表 1 不同内在增长率条件下的最小可存活种群 (*MVP*) 与体重的回归模型

Table 1 Regression model of minimum viable population (*MVP*) targets against body masses for different intrinsic growth-rate conditions

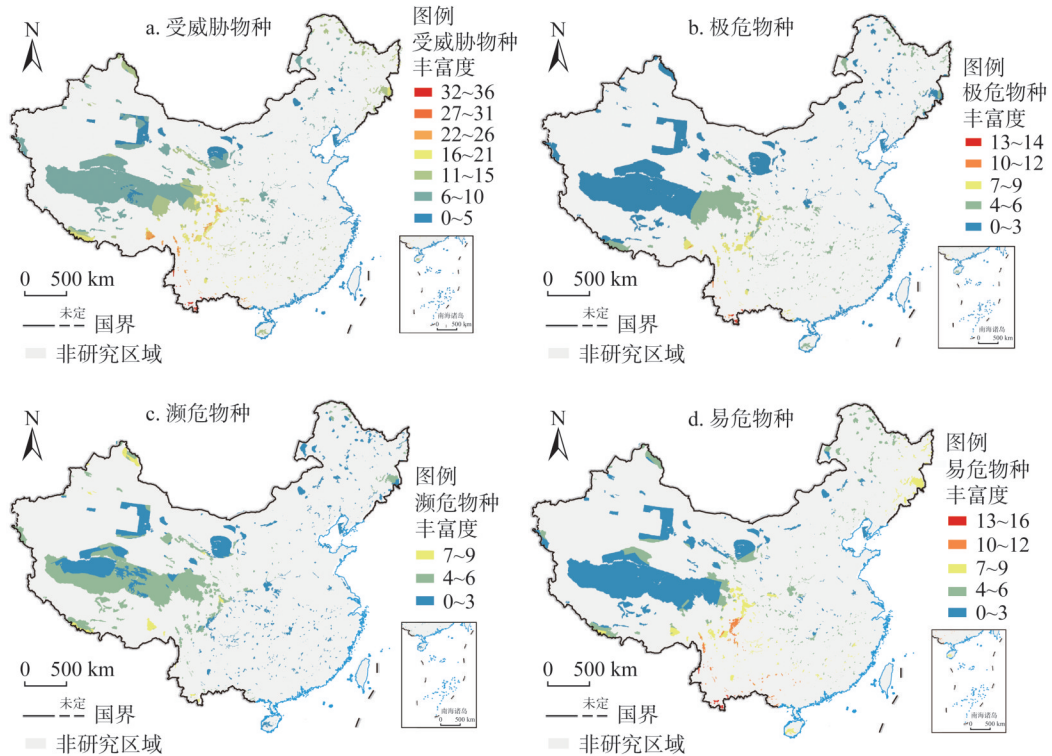
增长率	环境质量	公式
$0.8r_m$	较优	$\lg MVP = 3.44 - 0.77 \lg BWT + 0.06 \times \lg BWT^2$
$0.6r_m$	适中	$\lg MVP = 3.91 - 0.84 \lg BWT + 0.06 \times \lg BWT^2$
$0.4r_m$	适中	$\lg MVP = 4.96 - 1.11 \lg BWT + 0.08 \times \lg BWT^2$
$0.2r_m$	较劣	$\lg MVP = 7.35 - 1.77 \lg BWT + 0.13 \times \lg BWT^2$

注:  $r_m$  为每时间单元的种群内在增长率。

## 2 结果分析

### 2.1 自然保护地受威胁物种丰富度格局及保护空缺区域分析

通过对中国自然保护地网格单元的受威胁物种丰富度的计算得到结果图 2。全国自然保护地中 98.91% 的区域分布有受威胁陆栖哺乳动物, 物种丰富度高值区主要集中在西南地区自然保护地, 整体上呈现从西南向北递减的趋势, 云南省、四川省的自然保



审图号: GS(2020)4619号 自然资源部 监制

图2 受威胁哺乳动物物种丰富度分布

Fig. 2 Distribution of the species richness of threatened mammals in nature reserves of China

护地内受威胁物种丰富度较为显著, 如图2a所示。所有自然保护地网格中受威胁物种丰富度最高值为36, 位于云南省西双版纳自然保护区内。丰富度在0~10之间的区域占自然保护地总面积的73.57%, 丰富度在11~26之间的区域占13.75%, 在27以上的自然保护地面积之和仅有0.42% (表2)。这也反映出部分自然保护地规模与保护效果之间不平衡的问题, 一些自然保护地面积较大但平均保护的受威胁物种数量较少, 保护效能相对较低; 一些自然保护地平均保护的受威胁物种数量较高, 但其面积较小。

表2 自然保护地受威胁哺乳动物物种丰富度面积统计

Table 2 Statistics of species richness of threatened mammals in nature reserves of China

受威胁哺乳动物物种丰富度	0~5	6~10	11~15	16~21	22~26	27~31	32~36
自然保护地网格单元面积/km <sup>2</sup>	150892	857848	241944	96928	17772	1772	3948
面积比例/%	11.01	62.57	17.65	7.07	1.30	0.13	0.29

自然保护地内不同受威胁程度的物种丰富度分布如图2b~图2d, 其中云南、四川等地自然保护地的极危、濒危、易危物种丰富度均较高。极危物种丰富度最高的网格分布在云南西双版纳自然保护区和元阳观音山自然保护区, 有14种极危哺乳动物物种分布; 濒危物种丰富度高值集中在云南省西部、南部和西藏自治区东部自然保护地内, 其中丰富度值最高(9)的网格分布在云南西双版纳自然保护区、西藏自治区察隅慈巴沟自然保护区 and 四川大熊猫国家公园; 易危物种丰富度同样在云南、四川省自然保护地内最高,

云南纳版河流域自然保护区、黄连山自然保护区、德党后山水源林自然保护区内的网格单元均最多分布有16种易危物种。每个自然保护区网格单元(4 km<sup>2</sup>)中分布的极危、濒危、易危物种丰富度均值分别为2.15、3.66、3.25, 84.86%的自然保护地中的极危物种丰富度小于4, 丰富度在4~9之间的保护地面积占比14.67%, 丰富度在10~14之间的保护地面积仅占0.47%; 自然保护区网格单元内濒危物种丰富度均小于10, 96.69%的自然保护地中的濒危物种丰富度小于7, 丰富度在7~9之间的保护地面积仅占3.31%; 89.24%的自然保护地中的易危物种丰富度小于7, 超过10%的自然保护地内易危物种丰富度在7~16之间(表3)。

表3 自然保护区极危、濒危、易危陆栖哺乳动物物种丰富度统计

Table 3 Statistics of species richness of critically endangered, endangered, and vulnerable mammals in nature reserves

丰富度	极危物种		濒危物种		易危物种			
	自然保护区网格单元面积/km <sup>2</sup>	面积比例/%	丰富度	自然保护区网格单元面积/km <sup>2</sup>	面积比例/%	丰富度	自然保护区网格单元面积/km <sup>2</sup>	面积比例/%
0~3	1163568	84.86	0~3	575796	42.00	0~3	962956	70.23
4~6	172100	12.55	4~6	749884	54.69	4~6	260632	19.01
7~9	29008	2.12	7~9	45424	3.31	7~9	116412	8.49
10~12	4380	0.32	—	—	—	10~12	26116	1.90
13~14	2048	0.15	—	—	—	13~16	4988	0.36

通过空缺分析可以确定受威胁陆栖哺乳动物当前的保护空缺区域, 明确需要关注的重点地域。中国受威胁陆栖哺乳动物丰富度分布如图3所示, 丰富度高值区域主要集中在云南省一带, 西双版纳自然保护区、纳板河流域自然保护区、北海湿地自然保护区、

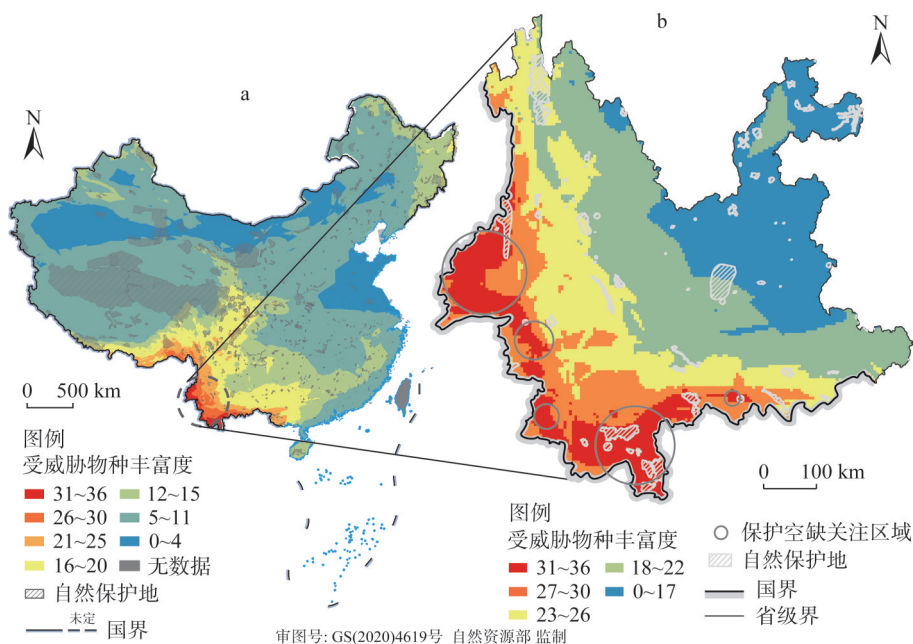


图3 受威胁物种保护空缺区域分布

Fig. 3 Distribution of conservation gaps of threatened mammals in China

高黎贡山自然保护区、黄连山自然保护区、元阳观音山自然保护区、德党后山水源林自然保护区等自然保护地均为受威胁哺乳动物分布的热点区域。

根据空缺分析可视化结果，进一步划分出7个潜在的保护空缺区域。云南省西双版纳傣族自治州（图4a）的受威胁物种丰富度整体较高，有78.91%的区域受威胁物种丰富度达到31及以上，有较高的保护价值；其次，高黎贡山自然保护区西南侧的保山市腾冲市、东北侧的怒江傈僳族自治州泸水市（图4b），以及临沧市西部、南部的镇康县、耿马傣族佤族自治县及沧源佤族自治县（图4c）内的网格单元受威胁物种丰富度均部分达到31及以上；红河哈尼族彝族自治州内黄连山自然保护区周边地区（图4d）及元阳观音山自然保护区周边地区（图4e）也丰富度较高，这些地区虽已有一定的自然保护地，但保护地周围仍存在未覆盖的受威胁丰富度高值区域，故作为潜在保护空缺区域值得关注。德宏傣族景颇族自治州（图4f）内74.95%的区域受威胁丰富度达到31及以上，普洱市西南部的江城哈尼族彝族自治县、西盟佤族自治县、孟连傣族拉祜族佤族自治县（图4g）内网格单元受威胁物种丰富度部分达到31及以上，但这两片热点区域存在较大程度的保护空缺，可视作为具有较大提升空间的潜在保护空缺区域。识别出的七个保护空缺区域均位于云南省边陲地带，与周边国家毗邻，且与目前已有的全球生物多样性热点区（Biodiversity Hotspots, BHs）<sup>[45]</sup>、生物多样性关键区（Key Biodiversity Areas, KBAs）<sup>[46]</sup>、生物多样性优先区（Conservation Priority Zones, CPZs）<sup>[47]</sup>等保护框架涉及地域有重叠；7个保护空缺区域内共分布有63种哺乳动物，其中57种存在跨境分布的情况。

### 2.2 受威胁物种分布区受自然保护地保护状况分析

保护空缺分析能明确当前存在保护不足的物种，计算受威胁陆栖哺乳动物的受保护面积及受保护面积比例，确定存在严重或较严重保护空缺的物种，结果如表4所示。

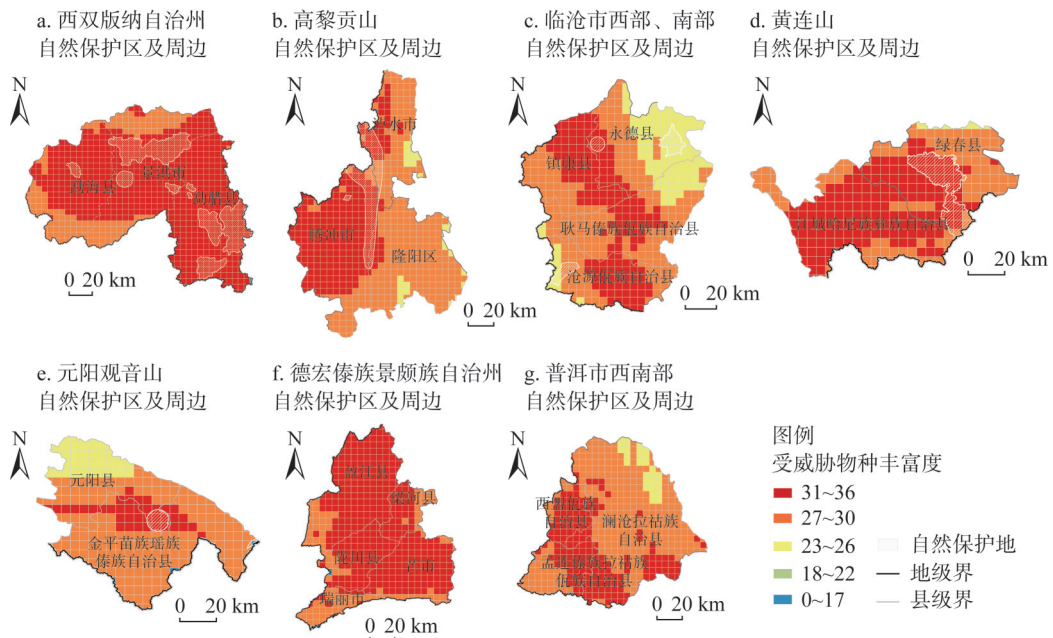


图4 云南省潜在保护空缺区域

Fig. 4 The potential conservation gaps in Yunnan province

表4 受威胁哺乳动物受保护面积及受保护面积比例统计表

Table 4 Coverage of protected areas within the distribution range of threatened mammals

物种	拉丁名	等级	分布 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 比例/%	物种	拉丁名	等级	分布 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 比例/%
棕熊	<i>Ursus arctos</i>	VU	3914492.21	1076458.88	27.50	长尾斑羚	<i>Naemorhedus caudatus</i>	CR	104596.75	8294.61	7.93
石貂	<i>Martes foina</i>	EN	4058848.84	1068384.84	26.32	大斑灵猫	<i>Viverra megaspila</i>	CR	196933.26	7991.00	4.06
兔狲	<i>Otocolobus manul</i>	EN	3975476.03	1047521.58	26.35	蜂猴	<i>Nycticebus bengalensis</i>	EN	209542.63	7836.34	3.74
阿尔泰盘羊	<i>Ovis ammon</i>	CR	2567108.68	940723.48	36.65	云猫	<i>Pardofelis marmorata</i>	EN	183661.80	7649.10	4.16
猞猁	<i>Lynx lynx</i>	EN	2696378.29	928224.11	34.42	黑叶猴	<i>Trachypithecus francoisi</i>	EN	234266.12	7208.72	3.08
雪豹	<i>Panthera uncia</i>	EN	2221516.83	691340.23	31.12	梅花鹿	<i>Cervus nippon</i>	EN	27520.79	7133.15	25.92
艾鼬	<i>Mustela eversmanni</i>	VU	4128369.06	622462.31	15.08	白颊猕猴*	<i>Macaca leucogenys</i>	CR	26149.1	7125.04	27.25
豹猫	<i>Prionailurus bengalensis</i>	VU	4871268.29	395510.62	8.12	蒙原羚	<i>Procapra gutturosa</i>	CR	95135.56	7036.76	7.40
马麝	<i>Moschus chrysogaster</i>	CR	1389248.94	380604.66	27.40	西白眉长臂猿	<i>Hoolock hoolock</i>	CR	7320.60	6926.59	94.62
野牦牛	<i>Bos mutus</i>	VU	468601.89	379722.98	81.03	长舌果蝠	<i>Eonycteris spelaea</i>	VU	123259.38	6245.26	5.07
金钱豹	<i>Panthera pardus</i>	EN	4401091.49	355475.85	8.08	熊狸	<i>Arctictis binturong</i>	CR	142508.39	4999.07	3.51
鹅喉羚	<i>Gazella subgutturosa</i>	VU	2484721.03	321340.10	12.93	北豚尾猴	<i>Macaca leonina</i>	CR	118570.50	4889.32	4.12
荒漠猫*	<i>Felis bieti</i>	CR	940462.32	311933.63	33.17	滇金丝猴*	<i>Rhinopithecus bieti</i>	EN	29673.48	4545.71	15.32
黑熊	<i>Ursus thibetanus</i>	VU	4259538.24	261224.00	6.13	莱氏蹄蝠	<i>Hipposideros lylei</i>	VU	93686.37	4115.88	4.39
马鹿	<i>Cervus canadensis</i>	EN	1606918.98	259411.94	16.14	印支灰叶猴	<i>Trachypithecus crepusculus</i>	EN	48212.07	4043.46	8.39
云豹	<i>Neofelis nebulosa</i>	CR	2964912.43	227932.76	7.69	宽齿鼯*	<i>Eurosaptor grandis</i>	VU	114137.42	3619.23	3.17
伶鼬	<i>Mustela nivalis</i>	VU	2403249.81	202554.82	8.43	黑麝*	<i>Muntiacus crinifrons</i>	EN	113890.72	3307.57	2.90
亚洲宽耳蝠	<i>Barbastella leucomelas</i>	VU	1877424.66	200439.62	10.68	马来穿山甲	<i>Manis javanica</i>	CR	19656.85	2841.18	14.45
虎鼬	<i>Vormela peregusna</i>	EN	1913545.69	198459.32	10.37	北白颊长臂猿	<i>Nomascus leucogenys</i>	CR	24173.24	2701.55	11.18
虎	<i>Panthera tigris</i>	CR	4370363.87	182444.37	4.17	原仓鼠	<i>Cricetus cricetus</i>	EN	107398.50	2595.09	2.42
黄喉貂	<i>Martes flavigula</i>	VU	2761266.23	170155.10	6.16	海南新毛猬*	<i>Neohylomys hainanensis</i>	EN	4591.39	2489.79	54.23
白鼬	<i>Mustela erminea</i>	EN	1984759.42	148806.46	7.50	亚洲象	<i>Elephas maximus</i>	CR	13940.29	2371.97	17.02

续表

物种	拉丁名	等级	分布面积 /km <sup>2</sup>	受保护面积 /km <sup>2</sup>	受保护面积 比例/%	物种	拉丁名	等级	分布面积 /km <sup>2</sup>	受保护面积 /km <sup>2</sup>	受保护面积 比例/%
林麝	<i>Moschus berezovskii</i>	CR	1584908.17	139916.60	8.83	缅甸鼬獾	<i>Melogale personata</i>	EN	33474.38	1766.14	5.28
大灵猫	<i>Viverra zibetha</i>	CR	2523057.82	127572.85	5.06	小齿狸	<i>Arctogalidia trivirgata</i>	CR	8675.09	1595.36	18.39
复齿鼯鼠*	<i>Trogopterus xanthipes</i>	VU	1062639.86	119458.76	11.24	塔里木马鹿	<i>Cervus hanglu</i>	CR	6481.81	1470.88	22.69
原麝	<i>Moschus moschiferus</i>	CR	1083930.25	106021.94	9.78	缙灵猫	<i>Chrotogale owstoni</i>	CR	20791.28	1470.33	7.07
豺	<i>Cuon alpinus</i>	EN	815516.60	99917.38	12.25	高黎贡白眉长臂猿	<i>Hoolock tianxing</i>	CR	36695.15	1450.97	3.95
斑林狸	<i>Prionodon pardicolor</i>	VU	1376360.18	93426.33	6.79	塔尔羊	<i>Hemitragus jemlahicus</i>	CR	1509.05	1449.23	96.04
藏酋猴*	<i>Macaca thibetana</i>	VU	1327341.76	82631.06	6.23	大黑伏翼	<i>Arielulus circumdatus</i>	VU	48213.07	1441.90	2.99
驼鹿	<i>Alces alces</i>	CR	741685.17	80933.44	10.91	长白山鼠兔	<i>Ochotona coreana</i>	VU	8230.41	1441.40	17.51
小飞鼠	<i>Pteromys volans</i>	VU	873824.80	78524.94	8.99	蒙古野驴	<i>Equus hemionus</i>	VU	51939.72	1303.27	2.51
貂熊	<i>Gulo gulo</i>	EN	637840.52	73127.61	11.46	峨眉鼯鼠*	<i>Uropsilus andersoni</i>	VU	4138.30	1231.77	29.77
食蟹猴	<i>Herpestes urva</i>	VU	1962881.23	70323.29	3.58	短耳犬蝠	<i>Cynopterus brachyotis</i>	VU	75845.71	1185.11	1.56
熊猴	<i>Macaca assamensis</i>	VU	846243.79	62452.07	7.38	四川毛尾睡鼠*	<i>Chaetocauda sichuanensis</i>	EN	1189.35	1012.53	85.13
野骆驼	<i>Camelus ferus</i>	CR	151110.36	59388.51	39.30	菲氏叶猴	<i>Trachypithecus phayrei</i>	VU	33813.66	1011.83	2.99
贡山羚牛	<i>Budorcas taxicolor</i>	CR	379165.94	59277.69	15.63	西黑冠长臂猿	<i>Nomascus concolor</i>	CR	9731.48	982.82	10.10
穿山甲	<i>Manis pentadactyla</i>	CR	1787953.10	56701.38	3.17	倭蜂猴	<i>Nycticebus pygmaeus</i>	CR	16304.24	909.18	5.58
扁颅鼯鼠	<i>Sorex roboratus</i>	VU	487824.97	53759.11	11.02	小臭鼯	<i>Suncus etruscus</i>	VU	67606.61	895.30	1.32
小熊猫	<i>Ailurus fulgens</i>	VU	277725.75	46671.26	16.80	阿尔泰鼯鼠	<i>Myospalax myospalax</i>	VU	3330.34	855.67	25.69
红背鼯鼠	<i>Petaurista petaurista</i>	VU	872970.19	43129.36	4.94	沟牙田鼠*	<i>Proedromys bedfordi</i>	VU	6685.66	569.17	8.51
丛林猫	<i>Felis chaus</i>	CR	433164.57	37226.53	8.59	安徽麝*	<i>Moschus anhuiensis</i>	EN	13000.45	555.40	4.27
紫貂	<i>Martes zibellina</i>	VU	324103.07	35931.38	11.09	渡濑氏鼠耳蝠	<i>Myotis rufoniger</i>	VU	14481.14	542.49	3.75
柯氏鼠兔*	<i>Ochotona koslowi</i>	EN	44743.07	33328.60	74.49	东黑冠长臂猿	<i>Nomascus nasutus</i>	CR	5210.55	500.11	9.60
大鼯鼠	<i>Sorex mirabilis</i>	VU	220310.27	28188.11	12.79	安氏长舌果蝠	<i>Macroglossus sobrinus</i>	EN	6110.96	440.56	7.21

续表

物种	拉丁名	等级	分布 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 比例/%	物种	拉丁名	等级	分布 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 /km <sup>2</sup>	受保护 面积 比例/%
滇攀鼠	<i>Vernaya fulva</i>	EN	322412.00	27188.81	8.43	普氏原羚*	<i>Procapra przewalskii</i>	EN	1076.34	393.66	36.57
长尾叶猴	<i>Semnopithecus schistaceus</i>	CR	43090.72	25621.62	59.46	白掌长臂猿	<i>Hylobates lar</i>	CR	9574.58	111.63	1.17
短尾猴	<i>Macaca arctoides</i>	VU	849871.79	25585.85	3.01	金黄鼠耳蝠	<i>Myotis formosus</i>	VU	1992.63	81.41	4.09
大熊猫*	<i>Ailuropoda melanoleuca</i>	VU	34605.17	22825.91	65.96	海南长臂猿*	<i>Nomascus hainanus</i>	CR	164.98	78.84	47.79
爪哇猿	<i>Herpestes javanicus</i>	VU	522345.27	18337.35	3.51	白头叶猴*	<i>Trachypithecus leucocephalus</i>	CR	834.83	66.63	7.98
黑麝	<i>Moschus fuscus</i>	CR	179020.51	17715.48	9.90	黔金丝猴*	<i>Rhinopithecus brelichi</i>	CR	67.48	35.19	52.15
喜马拉雅雅斑羚	<i>Naemorhedus goral</i>	EN	53889.75	17616.61	32.69	抱尾果蝠	<i>Rousettus amplexicaudatus</i>	VU	1448.41	34.47	2.38
小巨鼠耳蝠	<i>Myotis hasseltii</i>	VU	382968.71	15167.04	3.96	海南兔*	<i>Lepus hainanus</i>	CR	586.58	32.68	5.57
巨松鼠	<i>Ratufa bicolor</i>	VU	200778.30	13337.82	6.64	高氏缺齿鼯	<i>Chodsigoa caovansunga</i>	CR	323.94	29.52	9.11
小犛鼠	<i>Hapalomys delacouri</i>	VU	249770.44	12801.30	5.13	粗毛兔	<i>Caprolagus hispidus</i>	EN	30.69	0	0
贡山鹿*	<i>Muntiacus gongshanensis</i>	EN	116409.25	12347.06	10.61	达旺猴	<i>Macaca munzala</i>	EN	1686.46	0	0
纹鼬	<i>Mustela strigidorsa</i>	EN	361082.98	11919.15	3.30	戴帽叶猴	<i>Trachypithecus pileatus</i>	EN	1061.36	0	0
马来熊	<i>Helarctos malayanus</i>	CR	270795.40	11203.63	4.14	短尾鼯	<i>Euroscaptor micrura</i>	VU	2453.83	0	0
赤斑羚	<i>Naemorhedus baileyi</i>	EN	109957.44	11196.17	10.18	懒熊	<i>Melursus ursinus</i>	EN	1976.75	0	0
印度野牛	<i>Bos gaurus</i>	CR	120913.06	11140.03	9.21	威氏麂鹿	<i>Tragulus williamsoni</i>	EN	199.33	0	0
无尾蹄蝠	<i>Coelops frithii</i>	VU	178381.66	10037.48	5.63	萧氏叶猴	<i>Trachypithecus shortridgei</i>	EN	2148.14	0	0
喜马拉雅麝	<i>Moschus leucogaster</i>	EN	16361.41	9669.89	59.10	小齿鼯	<i>Euroscaptor parvidens</i>	VU	474.23	0	0
彩蝠	<i>Kerivoula picta</i>	EN	138055.19	9658.78	7.00	伊犁鼠兔*	<i>Ochotona iliensis</i>	EN	12781.20	0	0
球果蝠	<i>Sphaerias blanfordi</i>	VU	44371.22	8794.02	19.82	云南菊头蝠	<i>Rhinolophus yunnanensis</i>	VU	14888.53	0	0

注：标注底色的物种表示其受保护面积小于1000 km<sup>2</sup>或受保护面积比例小于3%，\*表示特有种。

### 2.2.1 极危物种

极危物种中阿尔泰盘羊的受保护面积最大,为94.07万 $\text{km}^2$ ,马麝、荒漠猫的受保护面积均超过30万 $\text{km}^2$ ,云豹和虎的受保护面积其次,分别为22.79万 $\text{km}^2$ 和18.24万 $\text{km}^2$ 。受保护面积比例较高的物种是塔尔羊和西白眉长臂猿,比例分别达到96.04%和94.62%,塔尔羊主要分布在西藏自治区珠穆朗玛峰自然保护区南部,西白眉长臂猿主要分布在雅鲁藏布大峡谷自然保护区,物种分布较为集中;长尾叶猴、黔金丝猴和海南长臂猿其次,受保护面积比例分别为59.46%、52.15%和47.79%,长尾叶猴分布在青藏高原西部边陲地区,受保护区域位于珠穆朗玛峰自然保护区,黔金丝猴主要分布在贵州梵净山自然保护区,海南长臂猿主要分布在海南热带雨林国家公园西北侧。

中国目前所有极危哺乳物种的分布范围均与一定面积的自然保护地重合,没有出现绝对的空缺情况,但部分极危物种受到保护的面积仍然不容乐观:受保护面积最小的极危物种是高氏缺齿鼯和海南兔,仅有29.52 $\text{km}^2$ 和32.68 $\text{km}^2$ ,占各自分布面积的9.11%和5.57%;黔金丝猴和海南长臂猿虽然受保护面积比例较高,但实际受保护面积仅有35.18 $\text{km}^2$ 和78.84 $\text{km}^2$ ,白头叶猴受保护面积为66.63 $\text{km}^2$ ,占比7.98%;西黑冠长臂猿、倭蜂猴、东黑冠长臂猿和白掌长臂猿受保护面积均不足1000 $\text{km}^2$ ,其中白掌长臂猿的受保护面积比例也极低,仅有1.17%。受保护面积较小的物种还包括熊狸、北豚尾猴、马来穿山甲、北白颊长臂猿、亚洲象、小齿狸、塔里木马鹿、缙灵猫、高黎贡白眉长臂猿和塔尔羊,均小于5000 $\text{km}^2$ ,其中熊狸、北豚尾猴和高黎贡白眉长臂猿受保护面积比例也较低,均不足5%;穿山甲、大斑灵猫、马来熊和虎的受保护面积情况较好,但受保护面积比例也均不足5%。

### 2.2.2 濒危物种

濒危哺乳物种在不同自然保护地中的保护情况有着显著差异性,其中受保护面积最大的是石貂和兔狲,均超过100万 $\text{km}^2$ ,猞猁和雪豹的受保护面积分别为92.82万 $\text{km}^2$ 和69.13万 $\text{km}^2$ ,金钱豹和马鹿的受保护面积也分别超过35万 $\text{km}^2$ 和25万 $\text{km}^2$ 。四川毛尾睡鼠的受保护面积比例最高,达到85.13%,其集中分布在四川大熊猫国家公园中;柯氏鼠兔的受保护面积比例其次,达到74.49%,其受保护区域主要分布在新疆维吾尔自治区阿尔金山自然保护区和中昆仑自然保护区;喜马拉雅麝和海南新毛猬的受保护面积比例分别达到59.10%和54.23%,分别主要分布在西藏自治区珠穆朗玛峰自然保护区和海南热带雨林国家公园。

有七种濒危物种的受保护面积比例为0,分别为粗毛兔、达旺猴、戴帽叶猴、懒熊、威氏麋鹿、萧氏叶猴和伊犁鼠兔。其中粗毛兔和威氏麋鹿在国内分布面积极小,分别仅有30.69 $\text{km}^2$ 和199.33 $\text{km}^2$ ;达旺猴、戴帽叶猴、懒熊主要分布在藏南边陲地区,萧氏叶猴主要分布在云南怒江傈僳族自治州与西藏自治区交界处,伊犁鼠兔作为中国特有种,主要分布在新疆维吾尔自治区天山山脉,这些物种存在严重保护空缺。受保护面积较小的物种还包括安徽麝、安氏长舌果蝠和普氏原羚,受保护面积均不足1000 $\text{km}^2$ ,其中安徽麝受保护面积比例仅有4.27%;滇金丝猴、印支灰叶猴、黑鹿、原仓鼠、海南新毛猬、缅甸鼬獾的受保护面积均小于5000 $\text{km}^2$ ,其中黑鹿和原仓鼠受保护面积比例低于3%;云猫、蜂猴、纹鼬和黑叶猴受保护面积情况较好,但受保护面积比例均不足5%。

### 2.2.3 易危物种

易危哺乳动物中棕熊的受保护面积最大,超过100万 $\text{km}^2$ ,艾鼬、豹猫和野牦牛其

次，保护面积分别达到 62.25 万 km<sup>2</sup>、39.55 万 km<sup>2</sup>和 37.97 万 km<sup>2</sup>。野牦牛的受保护面积比例也最高，为 81.03%，其主要分布在西藏自治区羌塘自然保护区、青海可可西里自然保护区、新疆维吾尔自治区中昆仑自然保护区 and 阿尔金山自然保护区内；大熊猫是中国特有种，受保护面积比例为 65.96%，主要分布在四川大熊猫国家公园及其周围的九寨沟自然保护区、美姑大风顶自然保护区、马边大风顶自然保护区、冶勒自然保护区、甘洛马鞍山自然保护区、黑竹沟自然保护区、金口河八月林自然保护区 and 甘肃白龙江阿夏自然保护区、多尔自然保护区。

目前中国易危物种中短尾鼯、云南菊头蝠和小齿鼯的受保护面积为 0，存在严重保护空缺：短尾鼯的分布范围分布较为零散，在云南德宏傣族景颇族自治州、西藏自治区山南市、林芝市均有分布；云南菊头蝠主要分布在云南德宏傣族景颇族自治州，小齿鼯主要分布在云南红河哈尼族彝族自治州南部，分布面积仅有 474.23 km<sup>2</sup>。受保护面积积极的物种还包括抱尾果蝠和金黄鼠耳蝠，面积分别为 34.47 km<sup>2</sup>和 81.41 km<sup>2</sup>，受保护面积比例分别为 2.38%和 4.09%；小臭鼯、阿尔泰鼯鼠、沟牙田鼠和渡濑氏鼠耳蝠的受保护面积均小于 1000 km<sup>2</sup>，其中小臭鼯和渡濑氏鼠耳蝠受保护面积比例分别仅占 1.32%和 4.09%。莱氏蹄蝠、宽齿鼯、大黑伏翼、长白山鼠兔、蒙古野驴、峨眉鼯鼠、短耳犬蝠、菲氏叶猴和短耳犬蝠受保护面积均小于 5000 km<sup>2</sup>，其中蒙古野驴、菲氏叶猴、大黑伏翼和短耳犬蝠受保护面积比例不足 3%，莱氏蹄蝠受保护面积比例不足 5%；红背鼯鼠、小巨足鼠耳蝠、食蟹獐、爪哇獐和短尾猴的受保护面积情况较好，但受保护面积比例小于 5%。

### 2.3 考虑最小需求面积(MAR)的保护空缺物种分析

用单一阈值对自然保护地面积进行评价的方法还需进一步改进，引入最小需求面积(MAR)的保护空缺物种分析方法能考虑到物种间的差异性和空间需求的多样性。

筛选出受威胁陆栖哺乳动物中的国家重点保护一、二级物种共 82 种，按照动物食性将所有物种分为三类，按照动物体型大小进一步划分为中小型哺乳动物(体重<10 kg)和大型哺乳动物(体重≥10 kg)<sup>[48]</sup>，在四种增长率下的 MAR 计算结果如图 5 所示。肉食动物的最小需求面积远大于草食、杂食动物的需求面积，大型哺乳动物的最小需求面积大于中小型哺乳动物所需面积，中小型哺乳动物的 MAR 值更加集中，大型哺乳动物的计算结果更加分散。肉食哺乳动物中虎的最小需求面积最大，雪豹、金钱豹、猞猁其

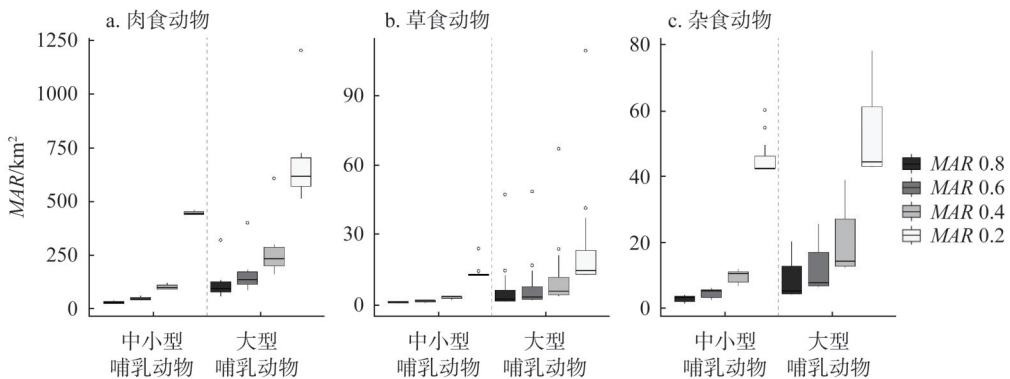


图 5 受威胁物种 MAR 分布结果

Fig. 5 The calculation of minimum area requirement of threatened mammals

次, 大体型物种在四种增长率水平下的  $MAR$  均值分别为  $128.52 \text{ km}^2$ 、 $174.09 \text{ km}^2$ 、 $287.47 \text{ km}^2$  和  $706.00 \text{ km}^2$ , 中小体型物种分别为  $29.26 \text{ km}^2$ 、 $47.71 \text{ km}^2$ 、 $101.56 \text{ km}^2$  和  $446.41 \text{ km}^2$ ; 草食哺乳动物中亚洲象的最小需求面积最大, 印度野牛、野骆驼、野牦牛其次, 大体型物种在四种条件下的  $MAR$  均值分别为  $5.80 \text{ km}^2$ 、 $6.96 \text{ km}^2$ 、 $10.60 \text{ km}^2$  和  $22.32 \text{ km}^2$ , 中小体型物种分别为  $0.88 \text{ km}^2$ 、 $1.41 \text{ km}^2$ 、 $2.98 \text{ km}^2$  和  $13.83 \text{ km}^2$ ; 杂食哺乳动物中棕熊的最小需求面积最大, 黑熊、懒熊其次, 大体型物种的四种  $MAR$  均值分别为  $4.67 \text{ km}^2$ 、 $6.88 \text{ km}^2$ 、 $12.99 \text{ km}^2$  和  $47.46 \text{ km}^2$ , 小体型物种均值分别为  $4.16 \text{ km}^2$ 、 $6.26 \text{ km}^2$ 、 $12.13 \text{ km}^2$  和  $46.57 \text{ km}^2$ 。

物种需要足够大且相连的保护区域<sup>[42]</sup>, 而国内部分自然保护地存在零碎、分散的问题, 为充分考虑保护区域的连通性, 需要从自然保护地尺度转向斑块尺度。自然保护地与受威胁重点保护哺乳动物分布范围的重合斑块情况如表5所示, 考虑到最大、最小受保护斑块面积相差较大, 同时选用中位数斑块面积完成后续评估(若受保护斑块数为偶数, 取最接近中位数的斑块面积)。受保护斑块面积整体情况较好的物种是野牦牛、长尾叶猴、喜马拉雅斑羚和赤斑羚, 其中位数斑块面积分别达到  $34834.46 \text{ km}^2$ 、 $25621.62 \text{ km}^2$ 、 $17616.61 \text{ km}^2$  和  $10234.66 \text{ km}^2$ ; 其次分别为喜马拉雅麝、白颊猕猴、蒙原羚和西白眉长臂猿, 其受保护斑块面积中位数均超过  $5000 \text{ km}^2$ 。除了已筛选出的受保护面积及比例为0的7种物种外, 受保护斑块面积整体情况较差的物种还包括倭蜂猴, 其中位数受保护斑块面积仅有  $2.11 \text{ km}^2$ , 云猫、小齿狸的斑块面积中位数均小于  $20 \text{ km}^2$ , 这也说明这些物种分布范围内的自然保护地斑块存在面积大小不均匀、部分斑块较破碎的问题。

为分析国家重点保护的野生动物在受保护斑块尺度是否存在保护空缺, 将四种增长率水平(后续直接用  $0.8r_m$ 、 $0.6r_m$ 、 $0.4r_m$ 、 $0.2r_m$  表示对应条件)下的  $MAR$  计算结果与受保护斑块面积最大值进行比较。在四种情况下现有自然保护地均能为91.46%的受威胁国家重点保护哺乳物种提供足够大的保护斑块, 除粗毛兔、达旺猴、戴帽叶猴、懒熊、威氏麋鹿、萧氏叶猴和伊犁鼠兔之外, 现有自然保护地对其他物种均提供了有效保护。

为了减少极端值的影响, 采用中位数对受保护斑块面积的总体中心值进行估计, 当一个物种的受保护斑块面积中位数满足某一环境质量下的  $MAR$  要求, 意味着在该条件下自然保护地中一半以上的保护斑块对此物种的保护达标。在环境质量较优 ( $0.8r_m$ ) 的情况下, 89.02%的国家重点保护物种的分布区内受保护斑块面积中位数满足最小需求面积; 环境质量适中 ( $0.6r_m$  和  $0.4r_m$ ) 的情况下, 分别有85.36%和82.93%的物种受保护斑块中位数达标; 环境质量较恶劣 ( $0.2r_m$ ) 的情况下, 67.07%的物种受保护斑块面积中位数能满足最小需求面积要求。

不同物种的受保护斑块面积中位数在四种增长率条件下的达标情况如表6所示, 伊犁鼠兔、粗毛兔、威氏麋鹿、戴帽叶猴、萧氏叶猴、达旺猴、懒熊七种国家保护动物的分布范围内自然保护地斑块面积为0, 虎、云猫的受保护斑块面积中位数均未达到四种增长率水平下的  $MAR$  要求; 虽然已有专门保护虎的国家公园和自然保护区, 且已有一定大小的受保护面积, 但考虑到种群生存所需的最小面积, 现有自然保护地仍有一半以上的斑块保护作用有限, 在环境质量较优、种群内在增长率高的情况下也不能满足物种的生存空间需求。倭蜂猴、云豹和金钱豹的受保护斑块面积中位数达到了  $0.8r_m$  条件下的最小需求面积, 但不满足  $0.6r_m$  条件下的最小需求面积。穿山甲和豺獾的受保护斑块面积中

表5 受威胁重点保护物种的受保护斑块面积统计表

Table 5 Area of protected patches of threatened mammals under special protection

物种名称	保护等级	最大斑块面积/km <sup>2</sup>	平均斑块面积/km <sup>2</sup>	中位数斑块面积/km <sup>2</sup>	物种名称	保护等级	最大斑块面积/km <sup>2</sup>	平均斑块面积/km <sup>2</sup>	中位数斑块面积/km <sup>2</sup>
野牦牛	一级	228708.98	54246.14	34834.46	豹猫	二级	102686.53	606.61	122.63
长尾叶猴	一级	25621.62	25621.62	25621.62	菲氏叶猴	一级	803.33	252.96	121.89
喜马拉雅斑羚	一级	17616.61	17616.61	17616.61	斑林狸	二级	24467.35	464.81	118.48
赤斑羚	一级	10234.66	5598.08	10234.66	金钱豹	一级	123100.45	603.52	115.68
喜马拉雅麝	一级	9669.89	9669.89	9669.89	大熊猫	一级	8814.93	760.86	114.28
白颊猕猴	二级	7125.04	7125.04	7125.04	缟灵猫	一级	618.38	210.05	113.07
蒙原羚	一级	7036.76	7036.76	7036.76	北白颊长臂猿	一级	1995.01	675.39	113.07
西白眉长臂猿	一级	6926.59	6926.59	6926.59	藏酋猴	二级	12318.46	333.19	112.76
马来穿山甲	一级	2679.49	1420.59	2679.49	白掌长臂猿	一级	111.63	111.63	111.63
野骆驼	一级	49386.61	14847.13	2445.87	熊狸	一级	2404.83	249.95	107.92
亚洲象	一级	2362.95	1185.98	2362.95	黑叶猴	一级	584.50	163.83	107.92
塔尔羊	一级	1449.23	1449.23	1449.23	黑熊	二级	32833.43	422.01	106.27
蒙古野驴	一级	1303.27	1303.27	1303.27	云豹	一级	40851.79	496.59	102.50
黑麝	一级	9249.36	2530.78	1264.77	黄喉貂	二级	30588.88	374.79	102.50
贡山麂	二级	10234.64	3086.77	831.43	虎	一级	14864.24	290.52	93.77
鹅喉羚	二级	80674.28	5355.67	745.65	东黑冠长臂猿	一级	175.61	100.02	91.55
马麝	一级	214894.74	4817.78	600.85	黑鹿	一级	1020.90	137.82	85.00
雪豹	一级	261096.40	7277.27	555.84	大灵猫	一级	12687.39	293.95	79.64
兔孙	二级	308242.84	7224.29	497.30	安徽麝	一级	291.13	111.08	79.04
驼鹿	一级	20248.28	986.99	427.14	海南长臂猿	一级	78.84	78.84	78.84
貂熊	一级	20248.28	1029.97	427.14	马来熊	一级	2855.87	339.50	78.70
马鹿	二级	81952.31	1866.27	427.14	梅花鹿	一级	2680.08	324.23	77.81
荒漠猫	一级	167617.78	3948.53	414.71	短尾猴	二级	2801.64	175.25	64.54
普氏原羚	一级	393.66	393.66	393.66	穿山甲	一级	4447.44	179.43	57.32
棕熊	二级	307940.25	5077.64	386.83	白头叶猴	一级	55.12	33.32	55.12
豺	一级	31829.37	1784.24	348.03	印支灰叶猴	一级	2708.37	449.27	44.52
石貂	二级	308242.84	5902.68	256.10	巨松鼠	二级	4447.44	272.20	37.04
原麝	一级	20248.28	834.82	251.43	黔金丝猴	一级	35.19	35.19	35.19
小熊猫	二级	10234.66	1333.46	238.74	西黑冠长臂猿	一级	540.58	163.80	31.49
贡山羚牛	一级	12687.39	1004.71	211.19	海南兔	二级	28.26	16.34	28.26
紫貂	一级	14611.22	665.40	207.59	滇金丝猴	一级	2620.02	1136.43	26.69
丛林猫	一级	6736.05	630.96	188.18	云猫	二级	2801.64	305.96	18.47
北豚尾猴	一级	2466.96	488.93	175.75	小齿狸	一级	1458.40	177.26	13.32
大斑灵猫	一级	2782.49	332.96	175.61	倭蜂猴	一级	491.74	101.02	2.11
豺獠	二级	308242.84	7308.85	174.13	粗毛兔	二级	0	0	0
印度野牛	一级	5661.19	1012.73	161.69	达旺猴	二级	0	0	0
长尾斑羚	二级	3579.72	307.21	157.22	戴帽叶猴	一级	0	0	0
林麝	一级	18625.51	506.94	155.40	懒熊	二级	0	0	0
高黎贡白眉长臂猿	一级	1264.77	362.74	145.00	威氏麂鹿	一级	0	0	0
蜂猴	一级	2801.64	313.45	128.54	萧氏叶猴	一级	0	0	0
熊猴	二级	27831.76	780.65	122.81	伊犁鼠兔	二级	0	0	0

表6 受威胁哺乳动物受保护斑块面积及MAR统计表  
Table 6 Area of protected patches and MAR of threatened mammals

物种名称	中位数受保护 斑块面积/km <sup>2</sup>	中位数受保护斑 块NPP/[J/(m <sup>2</sup> ·a)]	MAR(0.2r <sub>m</sub> ) /km <sup>2</sup>	MAR(0.4r <sub>m</sub> ) /km <sup>2</sup>	MAR(0.6r <sub>m</sub> ) /km <sup>2</sup>	MAR(0.8r <sub>m</sub> ) /km <sup>2</sup>	受保护斑块面积 中位数达标情况
伊犁鼠兔	0	—	<b>24.04</b>	<b>1.88</b>	<b>0.56</b>	<b>0.28</b>	四种水平下的 MAR均不达标
粗毛兔	0	—	<b>13.28</b>	<b>2.50</b>	<b>1.08</b>	<b>0.63</b>	
威氏麂鹿	0	—	<b>12.85</b>	<b>2.69</b>	<b>1.22</b>	<b>0.73</b>	
戴帽叶猴	0	—	<b>12.62</b>	<b>3.60</b>	<b>1.86</b>	<b>1.20</b>	
萧氏叶猴	0	—	<b>12.67</b>	<b>3.70</b>	<b>1.92</b>	<b>1.25</b>	
达旺猴	0	—	<b>43.94</b>	<b>13.71</b>	<b>7.34</b>	<b>4.88</b>	
懒熊	0	—	<b>64.06</b>	<b>29.16</b>	<b>18.37</b>	<b>13.91</b>	
云猫	18.47	44.56	<b>442.51</b>	<b>98.27</b>	<b>45.58</b>	<b>27.72</b>	达到0.8r <sub>m</sub> 条件 下的MAR
虎	93.77	40.48	<b>1202.56</b>	<b>606.09</b>	<b>400.11</b>	<b>318.38</b>	
倭蜂猴	2.11	27.41	<b>60.11</b>	<b>6.52</b>	<b>2.24</b>	1.18	
云豹	102.5	40.97	<b>564.97</b>	<b>196.63</b>	<b>110.30</b>	75.72	达到0.6r <sub>m</sub> 条件 下的MAR
金钱豹	115.68	20.78	<b>647.75</b>	<b>251.09</b>	<b>147.50</b>	104.94	
穿山甲	57.32	36.47	<b>440.14</b>	<b>93.27</b>	42.42	25.52	达到0.4r <sub>m</sub> 条件 下的MAR
猓狨	174.13	31.75	<b>586.94</b>	<b>211.28</b>	120.24	83.44	
小齿狸	13.32	16.57	<b>44.89</b>	8.18	3.49	2.03	
西黑冠长臂猿	31.49	56.96	<b>42.25</b>	11.03	5.48	3.47	
巨松鼠	37.04	28.94	<b>46.22</b>	7.83	3.24	1.86	
豹猫	122.63	36.64	<b>439.17</b>	89.91	40.30	24.05	
丛林猫	188.18	22.32	<b>458.60</b>	117.48	57.87	36.44	
豺	348.03	38.28	<b>511.31</b>	159.56	85.44	56.75	
荒漠猫	414.71	21.02	<b>460.24</b>	119.04	58.88	37.17	
雪豹	555.84	29.69	<b>722.46</b>	299.27	180.92	131.86	

注：表中加粗的部分表示该物种的中位数受保护斑块面积小于该条件下的MAR值。

位数达到了0.8r<sub>m</sub>和0.6r<sub>m</sub>条件下的最小需求面积，不满足0.4r<sub>m</sub>条件下的最小需求面积。小齿狸、西黑冠长臂猿、巨松鼠、豹猫、丛林猫、豺、荒漠猫和雪豹的受保护斑块面积中位数达到了环境质量较优及适中条件下的最小需求面积，但在环境质量较差、增长率较低的情况下未达到MAR要求。

考虑到中国陆域广阔，生态系统多元，不同区域的保护斑块所在地生物生产力不同，以净初级生产力NPP数据<sup>[49]</sup>为依据，可进一步探讨各物种在受保护斑块内可能的种群增长率情况。NPP越大，可以考虑增长率较高情况下的MAR需求，反之，NPP越小，应考虑增长率较低情况下的MAR，最小需求面积会偏大。小齿狸、金钱豹和荒漠猫的中位数受保护斑块NPP值偏低，故应重点考虑0.2r<sub>m</sub>及0.4r<sub>m</sub>情况下的种群最小需求面积，以更好地结合实地情况对面积需求标准做出调整。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1) 本文测度三种受威胁等级的中国陆栖哺乳动物在自然保护地内的丰富度格局，并综合保护空缺区域和保护空缺物种两方面对自然保护地的物种保护成效展开评估。研

究发现中国受威胁陆栖哺乳动物丰富度整体上呈现从西南向北递减的趋势，极危、濒危、易危三个受威胁等级的哺乳动物物种丰富度分布特点相似，丰富度热点集中在云南省西部及南部地区，共识别出7个自然保护地覆盖面积有限导致的保护空缺区域。从受保护面积及比例角度评估，92.06%的受威胁物种分布范围与现有自然保护地存在重叠，但仍有7种濒危（粗毛兔、达旺猴、戴帽叶猴、懒熊、威氏麂鹿、萧氏叶猴、伊犁鼠兔）、3种易危（短尾鼯、云南菊头蝠、小齿鼯）物种受保护面积为0，存在严重保护空缺，9种极危、12种濒危、13种易危物种存在较严重保护空缺（受保护面积小于1000 km<sup>2</sup>或受保护面积比例≤3%）。部分物种虽然已有一定的受保护面积，但考虑到种群的最小需求面积，从受保护斑块角度评估发现，现有自然保护地体系能为91.46%的受威胁国家级重点保护物种提供足够大的保护斑块，73.17%的物种受保护斑块面积中值能达到四种不同种群增长率水平下MAR要求；9种哺乳动物（伊犁鼠兔、粗毛兔、威氏麂鹿、戴帽叶猴、萧氏叶猴、达旺猴、懒熊、云豹、虎）过半数的受保护斑块面积小于所有估计情况下的MAR值，在此基础上，过半数受保护斑块未达到 $0.6r_m$ 、 $0.4r_m$ 和 $0.2r_m$ 三种条件下最小面积需求的受威胁物种还分别有3种（倭蜂猴、云豹、金钱豹）、两种（穿山甲、猓猯）、8种（小齿狸、西黑冠长臂猿、巨松鼠、豹猫、丛林猫、豺、荒漠猫、雪豹）；3种哺乳动物（小齿狸、金钱豹、荒漠猫）所在中位数受保护斑块生物生产力偏低，应主要考虑其种群内在增长率偏低时的MAR标准；这些受威胁国家重点保护物种仍面临着受保护面积有限的问题。

(2) 基于上述研究本文提出以下政策建议，以促进中国陆栖哺乳动物的有效保护。首先，由于西南地区（特别是云南省西双版纳傣族自治州、德宏傣族景颇族自治州、临沧市西部、南部、高黎贡山自然保护区周边、黄连山自然保护区周边、元阳观音山自然保护区周边地区、普洱市西南部）的丰富度热点显著，建议加强对这些区域的保护措施并提高该区域在国家保护战略中的优先级。针对识别出的保护空缺区域，应制定和实施扩展现有保护地网络的相关策略，或结合其他有效的基于区域的保护措施（Other Effective area-based Conservation Measures, OECMs）等，确保对生物多样性重要区域的有效覆盖；针对保护空缺物种（达旺猴、戴帽叶猴等），可根据其受保护等级设立专门的保护计划和项目。其次，鼓励自然保护地之间的合作，建立信息共享和协作机制，实现跨区域的有效保护，确保能提供足够的保护斑块面积以满足物种的最小需求面积。例如虎、金钱豹、猓猯与雪豹等，这些物种存在一定范围的受保护面积，但受保护斑块面积有限，若增强保护地之间的跨界管理与合作，可以提供更大面积的自然保护地斑块。此外，应考虑到区域的全球意义及物种的跨境分布特点，通过全球视角或多方合作机制来共同制定和实施有效的保护措施。

### 3.2 讨论

本文实现了国家尺度下自然保护地对多物种的保护作用评估，充分分析不同受威胁等级哺乳动物的受保护情况，从保护空缺区域和保护空缺物种两方面、自然保护地和自然保护斑块两尺度为中国物种保护优先区识别、自然保护地规划及优化提供参考。相比于以往研究，本文在物种受保护面积及比例指标的基础上考虑最小需求面积MAR，从单一阈值划分转向更科学合理的多物种阈值估算；虽然目前已有一定的结合MAR估算的自然保护地规划研究<sup>[27,30]</sup>，但在计算方法上存在不足，本研究采用基于物种密度的MAR估

算优化方法,充分考虑了物种食性及体型等物种间的差异性。

需要注意的是,文中采用的陆栖哺乳动物分布区数据仅代表物种的分布范围,不能反映分布区内生境适宜性的空间差异,而物种栖息地保护需要尽可能选择最适宜的栖息地,故还需通过现有模型来推理或预测潜在适宜生境分布数据,更进一步展开物种多样性保护相关研究。由于本文主要面向哺乳动物保护,考虑到物种生存需求面积相对大小及自然保护区主要保护对象,仅选择国家公园、自然保护区展开分析;然而中国自然保护区体系共包含十余种类别,约占20%的国土面积<sup>[50]</sup>,故分析结果比实际保护情况更为保守。未来的研究可以进一步探讨多种类型保护地在哺乳动物保护中的协同作用,以及如何优化保护地网络布局,以实现更有效的生物多样性保护目标。此外,使用的MAR计算模型考虑了物种的食性、体型以及不同环境质量下的种群内在增长率等因素,在增长率水平的选取上考虑了不同区域的生物生产力,但动物的空间需求由取食空间、繁殖空间、隐蔽空间和迁徙空间组成<sup>[51]</sup>,这种集中分布地能保证物种以怎样的规模存续多久,还需结合物种活动能力、繁殖习性、生境偏好等多方面来讨论。本文虽然考虑到了生境连通性,对自然保护区在区域尺度和斑块尺度均进行了保护空缺物种分析,但对于自然保护区边界连通性的讨论仍有进一步探索空间。后续研究可将视角扩展至跨行政区乃至跨境的自然保护区网络尺度,以更好地应对物种迁移能力带来的跨界扩散的可能性<sup>[52]</sup>,例如可通过自然保护区网络与物种分布范围或各类保护规划的空间分析探讨其保护斑块内物种的跨界情况,从而对跨区域或跨境保护管理提供更科学的数据支持。

### 参考文献(References):

- [1] CHAPIN F S, ZAVALETA E S, EVINER V T, et al. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 234-242.
- [2] 中国科学院. 中国生物物种名录 2023 版. 北京: 科学出版社, 2023. [The Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences. *Catalogue of Life China: 2023 Annual Checklist*. Beijing: Science Press, 2023.]
- [3] LI B V, PIMM S L. How China expanded its protected areas to conserve biodiversity. *Current Biology*, 2020, 30(22): R1334-R1340.
- [4] 柏成寿, 崔鹏. 我国生物多样性保护现状与发展方向. *环境保护*, 2015, 43(5): 17-20. [BAI C S, CUI P. The current situation and direction of biodiversity conservation in China. *Environmental Protection*, 2015, 43(5): 17-20.]
- [5] World Wildlife Fund. 2015 Living Planet Report of China. China: WWF, 2015: 9-10.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 中国生物多样性红色名录: 脊椎动物卷(2020). [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/t20230522\\_1030745.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/t20230522_1030745.html), 2023-05-19. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *China's Red List of Biodiversity: Vertebrates Volume (2020)*. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/t20230522\\_1030745.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/t20230522_1030745.html), 2023-05-19.]
- [7] 蒋志刚, 李立立, 罗振华, 等. 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*, 2016, 24(5): 552-571. [JIANG Z G, LI L L, LUO Z H, et al. Evaluating the status of China's mammals and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 2016, 24(5): 552-571.]
- [8] 马建章, 戎可, 程颀. 中国生物多样性就地保护的研究与实践. *生物多样性*, 2012, 20(5): 551-558. [MA J Z, RONG K, CHENG K. Research and practice on biodiversity in situ conservation in China: Progress and prospect. *Biodiversity Science*, 2012, 20(5): 551-558.]
- [9] 薛达元, 蒋明康. 中国自然保护区对生物多样性保护的贡献. *自然资源学报*, 1995, 10(3): 286-292. [XUE D Y, JIANG M K. Contributions of nature reserves in China to biodiversity conservation. *Journal of Natural Resources*, 1995, 10(3): 286-292.]
- [10] GREENWOOD O, MOSSMAN H L, SUGGITT A J, et al. Using in situ management to conserve biodiversity under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(3): 885-894.
- [11] 唐小平, 栾晓峰. 构建以国家公园为主体的自然保护区体系. *林业资源管理*, 2017, (6): 1-8. [TANG X P, LUAN X F.

- Developing a nature protected area system composed mainly of National Parks. *Forest Resources Management*, 2017, (6): 1-8.]
- [12] FULLER R A, MCDONALD-MADDEN E, WILSON K A, et al. Replacing underperforming protected areas achieves better conservation outcomes. *Nature*, 2010, 466: 365-367.
- [13] 徐菲菲, 钟雪晴, 王丽君. 中国自然保护区研究的现状、问题与展望. *自然资源学报*, 2023, 38(4): 902-917. [XU F F, ZHONG X Q, WANG L J. Status, problems and prospects of domestic research on protected areas. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(4): 902-917.]
- [14] JENKINS C N, PIMM S L, JOPPA L N. Global patterns of terrestrial vertebrate diversity and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(28): E2602-E2610.
- [15] RODRIGUES A S L, AKÇAKAYA H R, ANDELMAN S J, et al. Global gap analysis: Priority regions for expanding the global protected-area network. *BioScience*, 2004, 54(12): 1092-1100.
- [16] 黄宝荣, 张丛林, 邓冉. 我国自然保护区历史遗留问题的系统解决方案. *生物多样性*, 2020, 28(10): 1255-1265. [HUANG B R, ZHANG C L, DENG R. The systemic solution to historical problems in China's natural protected areas. *Biodiversity Science*, 2020, 28(10): 1255-1265.]
- [17] 晏玉莹, 邓娇, 张志强, 等. 野生动物类型自然保护区保护成效评估研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33(4): 1128-1134. [YAN Y Y, DENG J, ZHANG Z Q, et al. Research progress in the protection efficacy evaluation of wildlife nature reserves. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 1128-1134.]
- [18] 刘吉平, 吕宪国, 殷书柏. GAP分析: 保护生物多样性的地理学方法. *地理科学进展*, 2005, 24(1): 41-51. [LIU J P, LV X G, YIN S B. GAP analysis: A geographic approach to protect biological diversity. *Progress in Geography*, 2005, 24(1): 41-51.]
- [19] 李迪强, 蒋志刚, 王祖望. 青海湖地区生物多样性的空间特征与GAP分析. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 47-54. [LI D Q, JIANG Z G, WANG Z W. Biodiversity spatial characteristics and gap analysis in Qinghai lake region. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(1): 47-54.]
- [20] 蒋明康, 王智, 秦卫华, 等. 我国自然保护区内国家重点保护物种保护成效评价. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(4): 35-38. [JIANG M K, WANG Z, QIN W H, et al. Effectiveness of national priority wildlife protection in nature reserves. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(4): 35-38.]
- [21] BROOKS T M, BAKARR M I, BOUCHER T, et al. Coverage provided by the global protected-area system: Is it enough?. *BioScience*, 2004, 54(12): 1081-1091.
- [22] 吴兆录, 闫海忠. 生物多样性保护的一个理论框架: 生物最小面积概念. *生物多样性*, 1996, 4(1): 26-31. [WU Z L, YAN H Z. A theoretical framework for biodiversity conservation: The concept of biological minimum area. *Biodiversity Science*, 1996, 4(1): 26-31.]
- [23] PE'ER G, TSIANOU M A, FRANZ K W, et al. Toward better application of minimum area requirements in conservation planning. *Biological Conservation*, 2014, 170: 92-102.
- [24] QING J, YANG Z S, HE K, et al. The minimum area requirements (MAR) for giant panda: An empirical study. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37715, Doi: 10.1038/srep37715.
- [25] LIU X Q, WANG H Z. Estimation of minimum area requirement of river-connected lakes for fish diversity conservation in the Yangtze River floodplain. *Diversity and Distributions*, 2010, 16(6): 932-940.
- [26] DARDANELLI S, NORES M L, NORES M. Minimum area requirements of breeding birds in fragmented woodland of Central Argentina. *Diversity and Distributions*, 2006, 12(6): 687-693.
- [27] ALLEN C R, PEARLSTINE L G, KITCHENS W M. Modeling viable mammal populations in gap analyses. *Biological Conservation*, 2001, 99(2): 135-144.
- [28] VERBOOM J, SNEP R P H, STOUTEN J, et al. Using Minimum Area Requirements (MAR) for assemblages of mammal and bird species in global biodiversity assessments. Wageningen: WOT Natuur & Milieu, 2014.
- [29] TRAILL L W, BRADSHAW C J A, BROOK B W. Minimum viable population size: A meta-analysis of 30 years of published estimates. *Biological Conservation*, 2007, 139(1-2): 159-166.
- [30] WANG Y H, ZHANG C C, QIU L, et al. Gaps in mammal conservation in China: An analysis with a framework based on minimum area requirements. *Global Change Biology*, 2023, 29(18): 5224-5239.

- [31] JETZ W, CARBONE C, FULFORD J, et al. The scaling of animal space use. *Science*, 2004, 306(5694): 266-268.
- [32] 王昌海, 谢梦玲. 以国家公园为主体的自然保护地治理: 历程、挑战以及体系优化. *中国农村经济*, 2023, (5): 139-162. [WANG C H, XIE M L. Governance of nature reserves with national parks as the main body: History, challenges, and systemic optimization. *Chinese Rural Economy*, 2023, (5): 139-162.]
- [33] 蒋志刚, 吴毅, 刘少英, 等. 中国生物多样性红色名录: 脊椎动物(第一卷)·哺乳动物. 北京: 科学出版社, 2021. [JIANG Z G, WU Y, LIU S Y, et al. China's Red List of Biodiversity: Vertebrates, Volume I, Mammals. Beijing: Science Press, 2021.]
- [34] 丁晨晨, 梁冬妮, 信文培, 等. 中国哺乳动物形态、生活史和生态学特征数据集. *生物多样性*, 2022, 30(2): 91-100. [DING C C, LIANG D N, XIN W P, et al. A dataset on the morphological, life-history and ecological traits of the mammals in China. *Biodiversity Science*, 2022, 30(2): 91-100.]
- [35] 国家林业和草原局. 国家重点保护野生动物名录(2021). <https://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html>, 2021-02-01. [National Forestry and Grassland Administration. List of endangered and protected species of China (2021). <https://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html>, 2021-02-01.]
- [36] 迟瑶. 中国陆栖哺乳动物类群空间分异与地理格局研究. 南京: 南京大学, 2021. [CHI Y. Study on the spatial differentiation and geographical pattern of terrestrial mammal taxa in China. Nanjing: Nanjing University, 2021.]
- [37] 林鑫, 王志恒, 唐志尧, 等. 中国陆栖哺乳动物物种丰富度的地理格局及其与环境因子的关系. *生物多样性*, 2009, 17(6): 652-663. [LIN X, WANG Z H, TANG Z Y, et al. Geographic patterns and environmental correlates of terrestrial mammal species richness in China. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 652-663.]
- [38] MAXTED N, DULLOO E, V FORD-LLOYD B, et al. Gap analysis: A tool for complementary genetic conservation assessment. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(6): 1018-1030.
- [39] SHAFFER M L. Minimum population sizes for species conservation. *BioScience*, 1981, 31(2): 131-134.
- [40] SHAFFER M. Minimum Viable Populations: Coping with Uncertainty. *Viable Populations for Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987: 69-86.
- [41] VAN DER HOEK Y, ZUCKERBERG B, MANNE L L. Application of habitat thresholds in conservation: Considerations, limitations, and future directions. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 3: 736-743.
- [42] RONDININI C, RODRIGUES A S L, BOITANI L. The key elements of a comprehensive global mammal conservation strategy. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2011, 366(1578): 2591-2597.
- [43] DAMUTH J. Interspecific allometry of population density in mammals and other animals: The independence of body mass and population energy-use. *Biological Journal of the Linnean Society*, 1987, 31(3): 193-246.
- [44] HILBERS J P, SANTINI L, VISCONTI P, et al. Setting population targets for mammals using body mass as a predictor of population persistence. *Conservation Biology*, 2017, 31(2): 385-393.
- [45] MYERS N, MITTERMEIER R A, MITTERMEIER C G, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [46] EKEN G, BENNUN L, BROOKS T M, et al. Key biodiversity areas as site conservation targets. *BioScience*, 2004, 54(12): 1110-1118.
- [47] YANG R, CAO Y, HOU S Y, et al. Cost-effective priorities for the expansion of global terrestrial protected areas: Setting post-2020 global and national targets. *Science Advances*, 2020, 6(37): eabc3436, Doi: 10.1126/sciadv.abc3436.
- [48] WEN Z X, CAI T L, FEIJÓ A, et al. Using completeness and defaunation indices to understand nature reserve's key attributes in preserving medium- and large-bodied mammals. *Biological Conservation*, 2020, 241: 108273, Doi: 10.1016/j.biocon.2019.108273.
- [49] CHEN P F. Monthly NPP dataset covering China's terrestrial ecosystems at north of 18°N (1985-2015). *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3(1): 34-41.
- [50] 欧阳志云, 杜傲, 徐卫华. 中国自然保护地体系分类研究. *生态学报*, 2020, 40(20): 7207-7215. [OUYANG Z Y, DU A, XU W H. Research on China's protected area system classification. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7207-7215.]
- [51] 蒋志刚. 动物行为原理与物种保护方法. 北京: 科学出版社, 2004. [JIANG Z G. Animal Behavior Principle and Species Protection Method. Beijing: Science Press, 2004.]
- [52] 高燕, 邓毅. 自然保护地跨区联合保护可以降低保护资金投入吗: 基于保护生物学的空间效应分析. *自然资源学*

报, 2023, 38(4): 1040-1057. [GAO Y, DENG Y. Does cross-regional natural conservation reduce the investment of conservation funds: Spatial effect analysis based on conservation biology. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(4): 1040-1057.]

## Assessment of the protective role of China's nature reserves based on GAP Analysis: An analysis of terrestrial mammals

LI Man-yu<sup>1</sup>, REN Yi-cheng<sup>1</sup>, DAI Wen-yu<sup>1</sup>, XU Zi-yi<sup>1</sup>, YU Bo-yang<sup>1</sup>, WANG Jie-chen<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Key Laboratory for Land Satellite Remote Sensing Applications of Ministry of Natural Resources, School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Mammals hold crucial significance in the realm of biodiversity conservation. Nature reserves serve as vital zones that effectively mitigate the loss of species diversity. Based on equal-area grid, this study evaluates the abundance patterns of terrestrial mammals across different levels of threats, analyzes regions and species under protection gaps, considering both the broad scale of nature reserves and the finer scale of protective patches. However, there are limited traditional gap analyses that fully take into account the diversity of species and their spatial requirements. We integrate the concept of Minimum Area Requirement (MAR) of species populations as a new supplementary assessment metric to assess the sufficiency of nature reserve patches, and species with poorer compliance are considered as the candidate species under conservation gaps, replacing the single threshold division approach with a multispecies threshold estimation method. The results show that: (1) The richness of threatened terrestrial mammals decreases progressively from the biodiversity-rich southwest to the north, highlighting the importance of Southwest China, particularly Yunnan province, as a critical biodiversity hotspot. Additionally, seven key regions are identified as conservation gap areas, where nature reserves fail to provide sufficient coverage for the protection of threatened species. (2) The distribution ranges of a total of 92.06% of the threatened species overlap with existing nature reserves, however, the presence of the overlaps does not ensure the provision of sufficient conservation, as evidenced by the fact that seven mammal species classified as endangered and three mammal species categorized as vulnerable are subject to absence of protection coverage. (3) Half of the protected patches for each of twenty-two nationally important threatened species face area limitations under different population growth rate levels. The results hold significant implications for identifying priority conservation areas and optimizing the planning of nature reserves to safeguard mammalian biodiversity.

**Keywords:** threatened terrestrial mammals; nature reserve; GAP Analysis; minimum habitat area requirement; China