

摘要

气候变暖和土地利用变化正深刻地改变着全球生物多样性，这是物种和保护管理者所面临的重大挑战。自二十世纪六十年代，中国开始在多地建立自然保护区以保护生物多样性，并且自然保护区的建立对物种现有栖息地的保护发挥着重要的作用。然而，它们在未来气候和土地利用变化下的有效性仍有待评估。此外，在调整自然保护区范围时，很少同时考虑气候和土地利用因素对多个物种地理分布格局的影响。因此，准确预测物种在未来环境条件下的地理分布格局不仅有助于理解物种将如何应对全球环境变化，并且对于未来的保护规划具有重要的指导意义。在此，我们使用物种分布模型评估了未来气候和土地利用变化对四川省野生大熊猫及其同域物种潜在分布范围变化的综合影响。

本文以四川省内大熊猫分布区为研究区域，以大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)及其同域分布的 22 个兽类物种为研究对象，基于物种分布数据、气候数据和土地利用数据，构建最大熵模型(MaxEnt)。评估了各物种在当前和未来不同时期(2050s、2070s)内不同共享社会经济路径(SSP1-2.6、SSP5-8.5)以及不同扩散模式下的适宜栖息地分布范围变化趋势以及其质心迁移的方向和距离，并探讨了未来气候和土地利用变化对大熊猫及其同域物种物种丰富度空间分布格局的影响。最后，基于研究区域内物种丰富度的变化特征明确未来时期的两种优先保护区，即“值得探索的区域”(即物种丰富度升高的区域)和“值得关注的区域”(即物种丰富度减少的区域)，并在此基础上，通过计算上述两种优先保护区和当前自然保护区的重叠面积来分析当前自然保护区的保护空缺。本研究获得的主要研究结果如下：

(1) 所有 MaxEnt 模型对物种当前的分布范围预测能力较高，其平均 AUC 值为 0.854 ± 0.052 。

(2) 在气候变量中，年平均气温(BIO1)是影响大多数物种(13种)当前分布的主要因子，其模型贡献率在 12.475%到 71.326%之间。在土地利用变量中，林地面积的比例(Forest)是影响大多数物种(16种)分布的主要因子，其模型贡献率在 4.705%到 37.480%之间。

(3) 在未来气候和土地利用变化情景下，各物种在不同扩散模式和不同温室气体排放情景下对环境变化具有不同的响应。在全局扩散模式下，约 50%的物种

其适宜栖息地将在低温室气体排放情景下扩增，而超过 60% 的物种其适宜栖息地
在高温温室气体排放情景下将会缩减。在零扩散模式下，所有物种的适宜栖息地都
将会面临不同程度的缩减，并且在高温温室气体排放情景下，物种将失去更多的适
宜栖息地。与此同时，大部分物种适宜栖息地分布的质心都将会向北迁移，其迁
移的距离在 0.21~110.89 km 之间，而少数物种适宜栖息地分布的质心将会向南迁
移，其迁移的距离在 0.01~120.53 km 之间。

(4) 在当前时期，研究区域内所有栅格的平均物种丰富度为 5.533 ± 6.422 。
在未来时期，研究区域内各栅格的物种丰富度的变化取决于温室气体的排放情景。
具体而言，在 SSP1-2.6 情景下，研究区域内的平均物种丰富度将在 21 世纪 50 年
代和 70 年代分别增加 0.232 ± 3.833 和 0.241 ± 4.268 ；而在 SSP5-8.5 情景下，研究
区域内的平均物种丰富度将在 21 世纪 50 年代和 70 年代分别减少 0.246 ± 4.703 和
 0.423 ± 5.403 。此外，在未来所有气候和土地利用变化情景下，平均物种数损失最
多的区域主要集中在凉山山系和大相岭山系，而平均物种数增加最多的区域则主
要集中在岷山山系和小相岭山系。

(5) 在未来气候和土地利用变化情景下，“值得探索的区域”（即物种丰富度
升高的区域）的面积在 $0.43 \times 10^3 \sim 1.30 \times 10^3 \text{ km}^2$ 之间，其主要分布在岷山山系和邛
崃山系，而“值得关注的区域”（即物种丰富度减少的区域）的面积在 $1.35 \times 10^3 \sim$
 $2.44 \times 10^3 \text{ km}^2$ 之间，其主要分布在凉山山系和大相岭山系。保护空缺分析结果表明，
“值得探索的区域”和“值得关注的区域”位于现有自然保护区之内的面积分别
不超过 31% 和 19%。

上述结果强调了将气候和土地利用变量相结合以预测大熊猫及其同域物种未
来分布的重要性，并且物种的扩散能力及栖息地的连通性对物种在未来环境条件
下迁移到合适的栖息地具有十分重要的作用。此外，明确了在空间上考虑目标物
种的预计范围变化模式以指导保护和管理战略的必要性。

关键词：大熊猫；同域物种；气候变化；土地利用变化；最大熵模型

目 录

摘 要.....	III
Abstract.....	V
第 1 章 前言	1
1.1 选题依据.....	1
1.2 气候变化和土地利用变化对生物多样性影响的研究进展.....	2
1.2.1 气候变化对生物多样性影响的研究进展.....	2
1.2.2 土地利用变化对生物多样性影响的研究进展.....	3
1.2.3 气候和土地利用变化对大熊猫及其同域物种影响的研究进展.....	3
1.3 物种分布模型的研究进展.....	4
1.4 研究目的、意义及内容.....	4
1.4.1 研究目的.....	4
1.4.2 研究意义.....	5
1.4.3 研究内容.....	5
第 2 章 研究区概况	7
2.1 地理位置与资源概况.....	7
2.2 气候特征.....	9
2.3 大熊猫自然保护区.....	9
第 3 章 材料与方法	11
3.1 物种分布数据.....	11
3.2 环境数据与变量计算.....	12
3.2.1 气候数据.....	12
3.2.2 土地利用数据.....	13
3.2.3 变量筛选.....	14
3.3 物种分布模型.....	14
3.4 统计分析.....	15
3.4.1 物种潜在适宜栖息地分析.....	15

3.4.2 物种丰富度空间分布格局	16
3.4.3 优先保护区和保护空缺的分析	16
第 4 章 研究结果	17
4.1 变量选择	17
4.2 模型的拟合优度及变量的相对重要性	17
4.3 物种在不同气候和土地利用情景下的分布范围变化	20
4.4 物种丰富度空间分布特征	24
4.5 优先保护区及保护空缺识别	26
第 5 章 讨论与结论	28
5.1 讨论	28
5.1.1 环境因子对物种潜在地理分布的影响	28
5.1.2 物种的适宜栖息地变化特征	29
5.1.3 气候和土地利用变化下的保护优先事项	30
5.2 结论	31
第 6 章 保护管理建议	33
参 考 文 献	34
致 谢	i
关于学位论文原创性的声明	ii
关于学位论文使用授权的声明	ii
在学期间的科研情况	iii

Abstract

Climate warming and land use change are profoundly altering global biodiversity, a major challenge for species and conservation managers. Since the 1960s, China has begun to establish nature reserves in many places to protect biodiversity, and the establishment of nature reserves has played an important role in the protection of existing habitats of species. However, the effectiveness of nature reserves under future climate and land use changes remains to be assessed. In addition, the effects of climate and land use factors on the geographical distribution pattern of multiple species are rarely considered when adjusting the scope of nature reserves. Therefore, accurately predicting the geographical distribution pattern of species under future environmental conditions not only helps to understand how species will respond to global environmental changes, but also has important guiding significance for future conservation planning. Here, we used species distribution models to assess the integrated impacts of future climate and land use changes on the potential distribution range of wild giant pandas and their sympatric species in Sichuan Province.

In this study, the distribution area of giant pandas in Sichuan Province was used as the study area, and giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) and 22 animal species in their sympatric distribution were used as the study objects. The maximum entropy model (MaxEnt) was constructed based on species distribution data, climate data and land use data. The trends in the distribution range of suitable habitats and the direction and distance of their centroids migration were assessed for each species under different Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP5-8.5) and different dispersal patterns in the current and future periods (2050s, 2070s). We also explored the impact of future climate and land use changes on the spatial distribution patterns of species richness of giant pandas and their sympatric species. Finally, based on the characteristics of the change in species richness in the study area, two types of priority protected areas were identified for the future period, namely "areas worth exploring" (i.e., areas with increasing species richness) and " areas needing attention " (i.e., areas with decreasing

species richness), and on this basis, the conservation gaps in the current nature reserves were analyzed by calculating the overlap area between these two types of priority protected areas and the current nature reserves. The main findings obtained in this study are as follows:

(1) All MaxEnt models had high predictive power for the current range of the species with a mean AUC value of 0.854 ± 0.052 .

(2) Among the climate variables, the mean annual temperature (BIO1) was the main factor influencing the current distribution of most species (13 species), with model contributions ranging from 12.475% to 71.326%. Among the land use variables, the proportion of forest land area (Forest) was the main factor affecting the distribution of most species (16 species), with model contributions ranging from 4.705% to 37.480%.

(3) Under future climate and land use change scenarios, each species has different responses to environmental changes under different dispersal patterns and different greenhouse gas emission scenarios. Under a perfect dispersal model, suitable habitat for about 50% of species will expand under an optimistic greenhouse gas emission, while suitable habitat for more than 60% of species will decrease under a pessimistic greenhouse gas emission. Under a no dispersal model, all species will experience various degrees of contraction in suitable habitat, and under a pessimistic greenhouse gas emission, species will lose even more suitable habitat. At the same time, the centroid of suitable habitat distribution for most species will migrate northward, with distances of between 0.21 km and 110.89 km. However, the centroid of suitable habitat distribution for a few species will migrate southward, with distances of between 0.01 km and 120.53 km.

(4) In the current period, the mean species richness of all grid cells in the study area is 5.533 ± 6.422 . In the future period, the changes in species richness across all grid cells in the study area depend on the greenhouse gas emission scenario. Specifically, under the SSP1-2.6 scenario, the average species richness is predicted to increase in the 2050s and 2070s by 0.232 ± 3.833 and 0.241 ± 4.268 , respectively, while under the SSP5-8.5 scenario, the average species richness is predicted to decrease in the 2050s and 2070s by 0.246 ± 4.703 and 0.423 ± 5.403 , respectively. In addition, under all future climate and

land use change scenarios, the largest mean number of species loss are mainly located in the Daxiangling and Liangshan mountains, while the largest mean number of species increase are mainly located in the Minshan and Xiaoxiangling mountains.

(5) Under future climate and land use change scenarios, the area of "areas worth exploring" (i.e., areas with increasing species richness) are between 0.43×10^3 and 1.30×10^3 km² and are mainly located in the Minshan and Qionglai mountains. The area of "areas needing attention" (i.e., areas with decreasing species richness) are between 1.35×10^3 and 2.44×10^3 km² and are mainly distributed in the Liangshan and Daxiangling mountains. Based on the conservation gaps analysis, No more than 31% of the " areas worth exploring " and no more than 19% of the " areas needing attention " are located within existing nature reserves.

These results emphasize the importance of combining climate and land use variables to predict the future distribution of giant pandas and their sympatric species, and that the dispersal ability of species and habitat connectivity are important for species to migrate to suitable habitats under future environmental conditions. In addition, the need for a spatial explicit consideration of the projected range change patterns of target species for guiding conservation and management strategies.

Key words: giant pandas; sympatric species; climate change; land use change; MaxEnt

第 1 章 前言

1.1 选题依据

全球环境变化已经对生物多样性及其相关的生态系统功能及服务构成了严重的威胁^[1-3]。为避免生物多样性的进一步丧失，我们迫切需要开展合理有效的保护工作^[4,5]，但这首先需要了解在未来环境条件下生物多样性是如何变化的^[6-8]。这种前瞻性的研究方法是至关重要的，由于引起生物多样性变化的驱动因素及其相对作用会随着时间的推移而发生变化^[9]。因此，精确预测物种在未来环境条件下的地理分布格局不仅有助于我们理解物种将如何应对全球环境变化，并且对于未来的保护管理规划具有重要的指导意义。

已有大量研究表明，全球气候变化和土地利用变化是当前驱动物种地理分布变迁的两个主要因子^[10-12]。并且大多数研究侧重于通过使用物种分布模型（Species distribution models, SDMs）这一预测物种未来地理分布格局的强大工具来对未来环境条件下物种的分布变迁进行预测^[13,14]。然而，目前这些研究大都集中在气候变化这一单一因素上，而忽视了土地利用变化的影响^[7]。这种基于单因素估计未来物种地理分布变迁的方法受到越来越多的质疑^[15]，因为这种方法极有可能会产生不可靠^[16]，并限制我们对驱动因素之间的相互作用如何影响物种未来分布的理解以及制定有效的保护政策和管理的的能力^[17,18]。因此，改进对物种未来地理分布变迁的预测需要同时将气候变化和土地利用变化这两种因素纳入到物种分布模型中^[19,20]。

为了有效提升模型模拟结果的实际应用价值，我们有必要根据对物种潜在分布区的预测进一步确定物种的优先保护区域^[21]。此外，识别物种优先保护区在保护管理者考虑保护成本情况下制定保护决策发挥着重要作用^[22]。因此，我们需要根据各物种的空间分布特征及丰富度变化情况，结合现有的自然保护区进一步确定“需要关注的区域”和“值得探索的区域”，这些区域的确定能明确物种的受保护现状，这能有效的指导自然保护区的管理和保护体系的完善^[23]。并且我们同时纳入多个物种进行优先保护区的识别，较单一物种能增加物种优先保护区域的代表性^[24]。因此，我们有必要根据物种在未来气候和土地利用变化背景下的潜在分布来评估优先保护区^[25]，并为各保护地的规划建设、自然资源的有效保护提供科学依据。

大熊猫（*Ailuropoda melanoleuca*）是我国特有的珍稀濒危动物，也是全球生物多样性保护的旗舰物种，目前主要分布于秦岭、岷山、邛崃、大相岭、小相岭和凉山等 6 大山系中^[26]。大熊猫分布区内物种多样性丰富，包括小熊猫（*Ailurus*

fulgens)、黑熊 (*Ursus thibetanus*) 等珍稀濒危动物以及 6000 多种维管束植物, 是全球生物多样性热点地区之一^[27]。在过去的几十年里, 气候变化和土地利用变化对该区域的生物多样性造成了前所未有的干扰和破坏^[28,29]。因此, 理解气候因子和土地利用因子在影响该区域生物多样性中的相对作用, 对于该区域的生物多样性保护具有重要意义^[18]。然而, 当前关于大熊猫及其一些同域分布物种的研究主要集中在物种层面上, 即: 1) 研究气候因子和土地利用因子对单一物种分布及其分布范围变化的影^[30,31]; 2) 估计物种的潜在分布区^[32]。尽管一些学者从活动节律及栖息地利用^[33]、物种丰富度分布模式^[34]等方面对许多珍稀兽类开展了研究, 但关于未来不同气候和土地利用变化背景下对大熊猫及其同域物种潜在适宜栖息地的影响还不甚了解。

1.2 气候变化和土地利用变化对生物多样性影响的研究进展

1.2.1 气候变化对生物多样性影响的研究进展

在进化的历史中, 许多生物由于不适应全球气候变化而走向灭绝。随着濒危物种的灭绝, 全球生物多样性也陷入了危机^[35]。在以环境变异性 and 多样性丧失为特征的长期管理系统中, 能够很好地适应当前环境条件的物种变得更加稀少^[36]。例如, Myers 等 (2000) 人指出地球上超过一半的物种分布在仅有 1.4% 的陆地面积中^[22]。此外, 大量研究表明在人为气候变化的影响下, 生态系统也发生了大范围的变化^[37]。例如, 曹晓云等 (2022) 人指出近六十年来高原气温呈显著升高趋势, 从而导致青藏高原东南部呈暖干化、西北部呈暖湿化趋势^[38]。总的来说, 全球气候变化对生物多样性的影响主要体现在以下几个层面上:

(1) 物种对气候变化的响应。动植物对全球气候变化的响应主要包括: 地理分布、生活周期、迁徙习性以及栖息地发生改变等多个方面^[39]。其中, 山地地区物种地理分布的变迁是物种应对气候变化的最基本响应^[40]。已有许多的研究表明, 为了应对当前的气候变化, 世界各地的许多物种已经开始沿着海拔和纬度梯度改变着它们的分布范围^[32,41], 其中一些扩散能力有限的物种可能无法跟上气候的变化而面临更高的灭绝风险。Parmesan 等 (2003) 在讨论过去 20~140 年的 1 700 多种物种的分布范围变化时指出, 随着气候变暖的影响, 各物种平均每 10 年向两极方向移动 6.1km^[42]。

(2) 群落对气候变化的响应。自然界中的各种生物之间存在着各种各样的相互作用, 例如寄生、捕食、互利共生、对有限的食物资源和空间资源的竞争等^[43]。因此, 将有一些物种对气候变化的反应可能依赖于其他物种对气候的反应而被间接影响^[44]。对于植物和动物间的相互作用, 通常表现为动物对植物的依赖, 因此多以植物的分布为预测因子来预测动物的分布动态^[45]。例如, 2020 年 Huang 等利用竹子发生数据推算竹子的分布以预测大熊猫潜在栖息地的分布状况^[46]。

(3) 生态系统对气候变化的响应。生态系统对气候变化的响应会直接影响物

种组成和结构的改变。生态系统受多种自然因素的干扰，当这些干扰超过生态系统本身的适应能力时，必然会在某些方面表现出不可逆转的损伤或退化，其表现形式包括系统退化、生产力下降和对环境的调节能力下降等多个方面^[47]。例如，在气候变化的影响下，长江源地区高寒草甸初级生产力显著下降，并且土壤有机质含量微量减少^[48]。当气候变化导致生态系统向大气中排放过多的二氧化碳时，原来的碳源汇平衡将进一步被破坏，最终将导致高寒草甸从弱的碳汇转换成弱的碳源^[49]。

1.2.2 土地利用变化对生物多样性影响的研究进展

土地利用变化导致的栖息地丧失和破碎化可能会加剧气候变化对物种分布格局的影响^[9]。近年来，人类活动引起的土地利用变化已对生物多样性构成了巨大的威胁，并且不同物种对土地利用变化的响应可能具有个体差异性^[50]。例如，Newbold 等（2015）讨论了全球范围内在一切照旧的土地使用情景下，预计到 2100 年全球样本丰富度将进一步下降 3.4%，并且主要集中在生物多样性丰富但经济贫困的国家。气候变化将成为生物多样性危机中日益突出的问题，但人类发展和人口增长意味着过度开发和农业扩张的影响也将持续增加^[51]。Maxwell 等（2016）分析报告中指出，过度开发和农业生产是 IUCN 红色名单上综合评估的 8 688 种受威胁或接近受威胁物种面临的最普遍威胁^[51]。同时，土地利用变化对生物的影响主要体现在以下几方面：

土地利用变化影响物种的分布范围变化。物种在长期进化过程中，彼此之间及其与环境之间形成了相对稳定的适应关系^[52]。因此，当土地利用发生变化时，在一定程度上也将会导致物种的分布范围发生相应的改变，如梁国付等（2020）研究了土地利用/覆被变化对生物栖息地连接度的影响，发现土地利用/覆被变化将通过改变生物栖息地而对物种分布产生影响^[53]。并且土地利用变化引起的栖息地破碎化不仅会导致栖息地丧失，而且会使适宜栖息地空间格局发生改变，从而影响物种的迁移和扩散^[54]。

土地利用变化影响物种的种间相互作用。通常情况下，物种间通过捕食、竞争、互利共生等生物过程紧密联系在一起，对于哺乳动物的区域共存是经过长期演化形成的相对稳定状态^[55]。然而，长期以来人类社会的生产活动对自然生境的破坏导致我国哺乳动物栖息地大量丧失，栖息地破碎化日趋严重，种群数量和分布范围严重缩小，潜在种间关系发生改变^[56]。

1.2.3 气候和土地利用变化对大熊猫及其同域物种影响的研究进展

近年来，为应对环境变化给生物多样性带来的负面影响，各保护管理部门主要通过建立自然保护区对关键的生物多样性区域进行科学的管理和保护，目前自然保护区的建立是保护野生动植物资源的主要保护策略^[57]。大熊猫是世界自然保护联盟最具魅力的物种之一，通常被自然保护区作为优先保护的目標物种。这些

自然保护区的建立有效地促进了大熊猫适宜栖息地的恢复和种群数量的增长^[58]。然而，有许多研究指出，由于气候变化所导致的栖息地破碎化或植被分布范围的改变等因素将改变大熊猫及一些同域分布兽类的分布范围^[30,59]。例如，Songer 等（2012）预测在 70 年内，气候变化可能使大熊猫栖息地减少近 60%，并且潜在栖息地主要分布于保护区范围之外，仅有 15%属于目前的保护区体系^[30]。李艳忠等（2015）在探讨近 40 年川金丝猴在岷山白河自然保护区的生境动态时发现，该地区的川金丝猴适宜栖息地范围随着白河自然保护区及其周边生境质量而变化^[60]。

土地利用变化对许多物种的栖息地产生直接的影响，在上世纪 70 年代，由于过度开发及伐木等因素的影响导致大熊猫及其同域物种可获得的适宜栖息地数量大大减少^[61]。齐增湘等（2011）应用 MaxEnt 模型探讨了影响秦岭山系黑熊生境选择的主要生态因子是人类干扰和土地利用类型^[62]。值得关注的是，近年来随着自然保护区的建立和有效管理，对野生大熊猫的数量以及栖息地的恢复产生了积极的影响^[58]。在 20 世纪末，由于天然林保护工程（the Natural Forest Conservation Program (NFCP)）、退耕还林工程（the Grain-To-Green Program (GTGP)）的实施，使得次生林在保护措施下恢复，大熊猫也越来越多的利用次森林中的生境^[63]。同时，“退耕还林（草）工程”的实施，在很大程度上减少了耕种面积，使大熊猫栖息地由低质量向高质量转化，栖息地破碎化程度降低^[64]。

1.3 物种分布模型的研究进展

从 1971 年由 Austin 等人利用物种分布模型 (Species Distribution Models, SDMs) 分析植物区域分布与环境的关系开始，该模型正式以计算机与统计分析技术进入生态学领域^[65,66]。随着统计学方法和生态位理论的发展，物种分布模型在生态学领域中得到了长足发展。现如今，该模型已经成为将物种发生数据与环境数据相结合以探讨环境变化对物种适宜栖息地的影响及预测物种热点分布区的重要工具^[67,68]。对于物种分布区域常见的物种生态模型包括生物气候模型 (BIOCLIM)、规则集遗传算法 (GARP)、生态位因子分析 (EnFA)、区域环境模型 (DOMAIN) 和最大熵模型 (MaxEnt) 等^[69]。其中，S.J. Phillips 等人于 2004 年构建了最大熵模型 (MaxEnt)^[70]。进入 21 世纪以来，随着 MaxEnt 模型在生态学领域中的不断发展，该模型已具有预测准确性高、运行速度快和应用范围广^[69,71]等特点，并且被众多研究通过拟合具有熵值最大的概率分布对物种的潜在分布作出估计^[72]。近年来，越来越多的研究利用物种分布模型探讨濒危物种对气候变化的响应^[73]、入侵物种潜在分布区的预测^[74]、人类活动对濒危物种的影响以及珍稀濒危物种保护区范围规划^[62]等。

1.4 研究目的、意义及内容

1.4.1 研究目的

预测未来气候和土地利用变化情景下物种的潜在地理分布格局对理解物种如

何应对全球环境变化以及制定切实有效的保护管理措施不可或缺。尽管气候和土地利用变化是影响物种地理分布格局的两个主要驱动因子，然而，当前关于物种对全球环境变化脆弱性的研究主要集中在气候变化上，很少同时将土地利用变化的影响纳入考虑范围内，这无疑会限制管理决策者对全球环境变化影响物种分布变迁的全面系统认识。为此，本研究项目在 R 软件中进行统计建模分析，就气候和土地利用变化对四川省内野生大熊猫及其同域物种的潜在影响展开分析研究，以揭示气候和土地利用因素在影响大熊猫及其同域物种地理分布格局中的相对作用，进一步评估各物种在未来不同气候和土地利用变化背景下的脆弱性，并明确未来气候和土地利用背景下大熊猫及其同域分布物种的优先保护区域。

1.4.2 研究意义

该论文的顺利实施具有如下的积极意义：

(1) 丰富和深度发展物种脆弱性评估体系。将气候变化和土地利用变化同时纳入到物种脆弱性评估体系中，有利于为物种应对全球环境变化的脆弱性评估提供更加全面的视角和基本思路；

(2) 丰富大熊猫及其同域物种在全球环境变化背景下的研究。如上所述，目前关于大熊猫及其同域物种的研究多集中在气候变化对大熊猫地理分布格局的影响上，而很少探讨气候和土地利用变化共同作用下对大熊猫及其同域分布物种分布范围变化的影响。因此，同时对大熊猫及其同域物种展开研究，可进一步丰富大熊猫及其同域物种在全球环境变化研究方面的基础信息；

(3) 为大熊猫及其同域物种的科学保护提供有价值的参考。例如，关于对各物种对气候和土地利用变化的脆弱性的揭示，有利于相关保护管理部门对这些物种进行有的放矢的保护；并且关于优先保护区的识别可为相关部门不断完善自然保护区管理体系提供科学依据。

1.4.3 研究内容

(1) 气候和土地利用因子在影响大熊猫及其同域分布物种地理分布中的相对作用

查询世界自然保护联盟濒危物种红色名录 (IUCN)、相关文献及全国第四次大熊猫调查报告等方法收集研究区域内兽类种类、分布的经纬度以及环境因子(地形和植被)等数据。此外，分别从全球气候数据集 (WorldClim 2.1) 和全球土地覆盖高分辨率观测和监测数据集 (FROM-GLC) 获取气候数据和土地利用/覆盖数据。在此基础上，构建同时包含气候变量和土地利用变量的物种分布模型。然后，从模型的拟合优度 (AUC 值) 和变量的相对重要性等方面来评估气候因子和土地利用因子在影响大熊猫及其同域物种地理分布格局中的相对作用。

(2) 不同物种对未来气候和土地利用变化的脆弱性

拟在上述物种分布模型的基础上，进一步结合筛选出的气候变量和土地利用变量。使用物种分布模型预测当前和未来气候和土地利用背景下各物种的适宜栖

息地分布。在此基础上，基于适宜栖息地面积的变化来评估各物种在不同时期的分布范围变化情况，并通过每个物种分布范围的变化分别评估各物种对气候和土地利用变化的脆弱性。

(3) 未来气候和土地利用变化对大熊猫及其同域分布物种物种丰富度空间分布格局的影响

在 Arcgis10.8 软件中，将各物种在不同时期内的适宜和非适宜栖息地分布图分别进行叠加获取物种丰富度空间分布图，以探讨不同气候和土地利用变化情景下各区域的物种丰富度空间分布特征。

(4) 明确未来气候和土地利用背景下大熊猫及其同域分布物种的优先保护区域

以当前时期的物种丰富度空间分布特征为依据，分析未来不同时期各栅格内的物种丰富度变化情况。然后，为物种丰富度变化设置了 99% 的置信区间，将置信区间外的区域视为“优先保护区域”，并根据优先保护区域内物种丰富度的变化趋势将其分为两个部分：1) 需要关注的区域，即物种丰富度降低的区域；2) 值得探索的区域，即物种丰富度升高的区域。

第2章 研究区概况

2.1 地理位置与资源概况

该研究的地理范围涉及四川省内野生大熊猫分布的秦岭山系（四川部分）、岷山山系、邛崃山系、大相岭山系、小相岭山系和凉山山系等六大山系（图 2-1）。该区域属全球生物多样性保护热点地区，具有丰富的动植物资源。

岷山山系和秦岭山系（四川部分）位于甘肃和四川两省边界，从甘肃省岷县南至四川省都江堰市。此地区地势从东向西逐渐抬升，地形以高山峡谷为主。该地区动物区系组成复杂，动物种类繁多，并且分布有许多珍稀濒危动物，其中有大熊猫、川金丝猴（*Rhinopithecus roxellanae*）、小熊猫等多种国家重点保护动物^[75]。受气候变化和地形条件等的影响，该山系植被呈现出垂直分布的特点^[76]，该区内部主要分布有铁杉（*Pinaceae*）、油松（*Pinus tabulaeformis Carr*）、高山松（*Pinus densata*）、红桦（*Betula albosinensis*）等代表性乔木物种^[77]。

邛崃山系是岷江和大渡河的分水岭，山脉南北走向，其主峰为四姑娘山，海拔可达 6 250m，是四川盆地和青藏高原之间的天然地理屏障^[78]。该地区具有丰富的生物多样性，并且是大熊猫、扭角羚（*Budorcas taxicolor*）、水鹿（*Rusa unicolor*）、金丝猴等多种珍稀动物的重要分布区^[79]。同时本区植被类型丰富，垂直带谱明显，其中包括暗针叶林、高山松林和高山栎林等代表性植被类型^[80]。海拔 1 600m 以下为亚热带常绿阔叶林，海拔 1 600~2 000m 为常绿与落叶阔叶混交林，海拔 2 000~2 600m 为针阔叶混交林，海拔 2 600~3 600m 为亚高山针叶林，海拔 3 600~4 400m 为高山灌丛草甸^[78]。

大相岭山系位于四川盆地西南边缘，总体呈西北-东南走向。东起峨眉山，南到大渡河，西至荥经河，北抵青衣江。该山系由瓦屋山和峨眉山组成，最高峰为汉源、荥经、洪雅三县交界的小凉水井，其海拔可达 3 552m^[81]。该区域具有丰富的动植物资源，红外相机监测结果显示，在大相岭自然保护区内有野生兽类 5 目 14 科 23 种，野生鸟类 5 目 11 科 33 种，其中包括大熊猫、小熊猫、林麝（*Moschus berezovskii*）、中华鬣羚（*Capricornis milneedwardsii*）等国家重点保护野生动物。此外还有珙桐（*Davida involucrata*）、红豆杉（*Taxus chinensis*）等珍稀濒危野生植物^[82]。

小相岭山系地处横断山脉东缘，位于喜德县、越西县、冕宁县的交界处，山脉呈现南北走向，东北高，西南低，主峰钵头尖海拔 4 791m。该山系的动植物资源丰富，其中有白辛树（*Pterostyrax psilophyllus*）、水青树（*Tetracentron sinense*）、峨眉冷杉（*Abies fabric*）和麦吊云杉（*Picea brachytyla*）等我国特产的植物，以及

红豆杉、珙桐等国家I级保护植物^[83]。此外，此山系分布有小熊猫、毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)、黑熊、小鹿(*Muntiacus reevesi*)等多种大熊猫同域物种^[84]。

凉山山系地处四川盆地南部向青藏高原的过渡地带，东起马边河，西至甘洛河、越西河，北抵大渡河，南到金沙江^[85]。该山系植被垂直分布明显，海拔2600m以下为阔叶林带，海拔2600~3800m为寒温性针叶林带，海拔3800m以上为高山灌丛和草甸带^[86]。同时此山系动植物资源丰富，其中包括珙桐、红豆杉、伯乐树(*Bretschneidera sinensis*)等8种国家I级重点保护野生植物，川黄檗(*Phellodendron chinense*)、丁茜(*Trailliaedoxa gracilis*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)等42种国家II级重点保护野生植物，以及峨眉含笑(*Michelia wilsonii*)、峨眉黄连(*Coptis omeiensis*)、红豆树(*Ormosia hosiei*)等27种中国特有种^[87]。此外，该山系分布有大熊猫、小熊猫、黑熊、林麝等多种珍稀濒危动物^[88]。

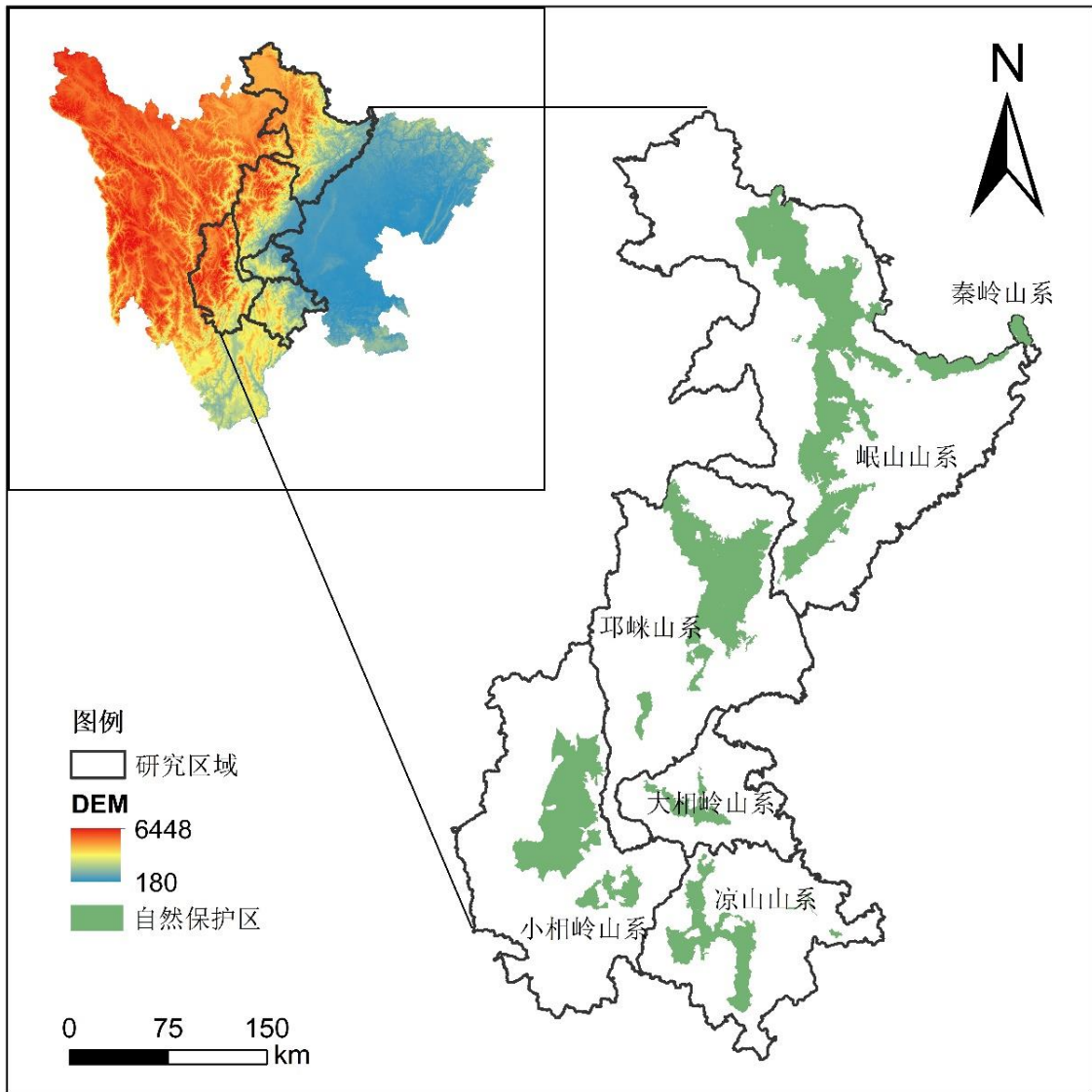


图 2-1 研究区域地理位置图
Fig. 2-1 Geographical location of the study area

2.2 气候特征

岷山山系和秦岭山系（四川部分）区域由于受到地理位置偏北和高大山体的影响，岷山地区东西坡和南北坡两侧的气候差异明显。南部的龙门山是四川著名的暴雨区，气候温凉潮湿，年降水量可达 1 200~1 500mm；位于西部的岷江河谷和北部的白龙江河谷，年降水量不足 700~800mm，其中茂县、九寨沟县等地年降水量不到 600mm^[89]。邛崃山系为亚热带内陆山地气候，气候垂直分带明显。年平均气温为 8.6~12.1℃，最冷月均温为-1~3℃。西部气候干燥少雨，河谷地带因受焚风影响形成干热河谷，东部气候温暖湿润，降雨充沛，如都江堰市年降雨量达 1229.1mm^[80]。大相岭山系位于亚热带湿润季风气候区，该地区气候湿润，年均气温 16℃以上，年均降水量为 1 300~2 000mm，此山系地势西高东低，正当季风迎风面，多地形角，并且处于高原低槽与高原低涡引来的冷空气与东南暖湿气流交汇处，容易形成锋面雨。降雨充沛，雨日多达 200d^[81]。小相岭山系地区位于亚热带季风气候区，该区域地势北高南低，具明显的“雨屏效应”，气候湿润多雨，年降水量高达 2076.6mm，年均相对湿度 87.9%^[83]。凉山山系地区位于亚热带季风区，其中大凉山气候为西南季风与东南季风过渡带，年平均气温为 10.9~15.8℃，年降水量为 1 000mm 左右；小凉山气候为亚热带湿润季风气候，年平均气温为 16.9℃，年降水量可达 1 600~2 000mm^[90]。

2.3 大熊猫自然保护区

自然保护区是人类为保护自然环境和自然资源，拯救并保存濒于灭绝的生物种源，监测人为活动对自然界的影 响，研究探讨自然生态系统的演变规律和如何合理利用自然资源而设立的永久性基地和自然资源库^[91]。从 20 世纪 60 年代至今，四川省共建自然保护区 166 处，在四川自然保护地体系中，自然保护区占比最高（34%），建设历史最早，多年来对四川省的生态保护方面发挥着重要的作用^[92]。保护大熊猫是建立该保护区系统的重要早期推动力，并且中国的大熊猫保护区系统正在对大熊猫及其栖息地产生实质性的积极影响^[58]。根据四川省第四次大熊猫调查结果显示，四川省已建立以大熊猫及其栖息地为主要保护对象的自然保护区 46 个。其中，大熊猫栖息地面积最大的自然保护区是卧龙自然保护区，其次是雪宝顶，大熊猫栖息地面积分别为 $9.05 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $5.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[27]。

自 20 世纪 90 年代实施的退耕还林和天然林保护等工程，对恢复四川省大熊猫自然保护区的森林覆盖率起着十分重要的作用，并且有利于促进生物多样性的保护。Li 等（2012）研究保护政策对大熊猫栖息地森林覆盖变化的影响时表明，在保护大熊猫的两大生态工程实施七年后，四川大熊猫保护区中 58% 的乡镇区域显示出森林覆盖率的增加^[93]。Wei 等（2020）在探讨中国大熊猫自然保护区体系的保护成效时指出，与自然保护区外的区域相比，自然保护区内提供的保护有效的减少了大多数类型的人为干扰^[58]。依据全国第三次、第四次大熊猫调查报告及 2016

年野外生境调查显示，随着草坡自然保护区大熊猫种群数量的增长，大熊猫的空间利用面积扩大了 45.62%^[94]。

第3章 材料与方法

3.1 物种分布数据

到目前为止,我国已先后于1974~1977年、1985~1988年、1999~2003年和2011~2014年开展了四次全国大熊猫调查。其中,第四次全国大熊猫调查不仅延续了前三次全国大熊猫调查成熟的技术和方法,还在调查内容、调查技术和调查手段上有所创新^[27]。此外,大熊猫的同域分布物种也是第四次全国大熊猫调查的重点内容之一。在调查过程中,调查人员主要通过动物的活体、尸体以及粪便、毛皮和觅食迹象等各种活动痕迹来识别和记录物种的分布点。为了减少物种鉴定中的潜在错误并确保数据质量,在调查期间没有记录无法准确进行物种鉴定的分布点^[27]。在我们研究区域内,本次调查共获取了属于44种哺乳动物的13 898个分布点。为了与气候和土地利用变量的空间分辨率保持一致,并降低物种分布数据中可能存在的抽样偏差,我们将整个研究区域划分为与气候和土地利用变量图层相同的1 km × 1 km 栅格,并去除每个物种在每个栅格中的重复分布点。由于物种的分布数量较少可能会导致MaxEnt模型的预测能力较差^[95],我们进一步去除了处理后分布点数量少于15的物种。最终,我们保留了23个物种用于评估未来气候变化和土地利用变化对大熊猫及其同域兽类的影响。

这23种兽类隶属于4目、14科,并且按照不同保护级别大致分为国家I级重点保护动物、国家II级重点保护动物和有益的、有重要经济、科学研究价值的陆生野生动物等三类(表3-1)。其中,国家I级重点保护动物有5种,国家II级重点保护动物有11种,有益的、有重要经济、科学研究价值的陆生野生动物有7种。从世界自然保护联盟濒危物种红色名录(IUCN)所划分的濒危等级来看,在这23个物种中,濒危(EN)物种有4种,易危(VU)物种有6种,近危(NT)物种有2种;无危(LC)物种有11种(表3-1)。

表3-1 研究区域内大熊猫及其同域分布兽类名录
Table 3-1 List of giant panda and its sympatric mammals in the study area

目 Order	科 Family	中文名 Chinese name	学名 Scientific name	保护等级 Protection level	红色名录 IUCN	分布点 Number of records
灵长目	猴科	川金丝猴	<i>Rhinopithecus roxellanae</i>	I	EN	207
		猕猴	<i>Macaca mulatta</i>	II	LC	51
		藏酋猴	<i>Macaca thibetana</i>	II	NT	330
偶蹄目	麝科	林麝	<i>Moschus berezovskii</i>	I	EN	298
	猪科	野猪	<i>Sus scrofa</i>		LC	1526
	牛科	羚牛	<i>Budorcas taxicolor</i>	I	VU	1842

续表 3-1 研究区域内大熊猫及其同域分布兽类名录

目 Order	科 Family	中文名 Chinese name	学名 Scientific name	保护等级 Protection level	红色名录 IUCN	分布点 Number of records
		中华鬣羚	<i>Capricornis milneedwardsii</i>	II	VU	914
		中华斑羚	<i>Naemorhedus griseus</i>	II	EN	1485
	鹿科	毛冠鹿	<i>Elaphodus cephalophus</i>	II	NT	830
		四川梅花鹿	<i>Cervus nippon</i>	I	LC	20
		水鹿	<i>Rusa unicolor</i>	II	VU	322
		小鹿	<i>Muntiacus reevesi</i>		LC	80
食肉目	熊科	黑熊	<i>Ursus thibetanus</i>	II	VU	580
	大熊猫科	大熊猫	<i>Ailuropoda melanoleuca</i>	I	VU	3406
	小熊猫科	小熊猫	<i>Ailurus fulgens</i>	II	EN	734
	灵猫科	果子狸	<i>Paguma larvata</i>		LC	28
	鼬科	猪獾	<i>Arctonyx albogularis</i>		VU	154
	犬科	狼	<i>Canis lupus</i>	II	LC	19
		赤狐	<i>Vulpes vulpes</i>	II	LC	30
		豹猫	<i>Prionailurus bengalensis</i>	II	LC	535
啮齿目	竹鼠科	中华竹鼠	<i>Rhizomys sinensis</i>		LC	74
	松鼠科	喜马拉雅旱獭	<i>Marmota himalayana</i>		LC	18
	豪猪科	豪猪	<i>Hystrix brachyura</i>		LC	121

备注：保护级别：I，国家一级重点保护动物；II，国家二级重点保护动物。IUCN：EN，濒危；VU，易危；NT，近危；LC：无危。

3.2 环境数据与变量计算

3.2.1 气候数据

从世界气候数据集 WorldClim 2.1 (<http://www.worldclim.org/>) 中获取研究区域内在当前时期（1970~2000年）和未来两个时期内（2050s：2041~2060年；2070s：2061~2080年）的气候数据。WorldClim 数据集包括与温度和降水相关的 19 个生物气候变量，空间分辨率为 1km^[96]（BIO1-BIO19；表 3-2）。这些变量具有明显的生物学意义，因而被广泛运用于物种分布及其相关的生态建模中^[97]。对于未来时期，我们选择在中国区域内被广泛应用的全球环流模型 MRI-ESM2-0 所模拟的 19 个生物气候变量来预测物种的分布。对于该模型，我们使用两种情景（共享社会经济路径：SSP1-2.6 和 SSP5-8.5）来表示未来几十年温室气体的排放浓度。其中，SSP1-2.6 是温室气体排放浓度最低的路径，其放射性强迫（全球能量失衡）水平在本世纪中叶达到 3.1W/m²，到 2100 年下降 2.6W/m²，而 SSP5-8.5 则是是温室气

体排放浓度最高的路径，其放射性强迫水平到2100年达到 8.5 W/m^2 ^[98]。

表 3-2 生物气候变量
Table 3-2 Bioclimatic variables

气候变量 Climate variables	变量描述 Variables description	单位 Units
BIO1	年平均气温 Mean Annual Temperature	°C
BIO2	气温平均月较差 Mean Diurnal Range	°C
BIO3	等温性 Isothermality (BIO2/BIO7)×100	
BIO4	温度季节性 Temperature Seasonality	°C
BIO5	最暖月最高温 Max Temperature of Warmest Month	°C
BIO6	最冷月最低温 Min Temperature of Coldest Month	°C
BIO7	气温年较差 Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	°C
BIO8	最湿季平均温 Mean Temperature of Wettest Quarter	°C
BIO9	最干季平均温 Mean Temperature of Driest Quarter	°C
BIO10	最暖季平均温 Mean Temperature of Warmest Quarter	°C
BIO11	最冷季平均温 Mean Temperature of Coldest Quarter	°C
BIO12	年降水量 Annual Precipitation	mm
BIO13	最湿月降水量 Precipitation of Wettest Month	mm
BIO14	最干月降水量 Precipitation of Driest Month	mm
BIO15	降水季节性 Precipitation Seasonality	
BIO16	最湿季降水量 Precipitation of Wettest Quarter	mm
BIO17	最干季降水量 Precipitation of Driest Quarter	mm
BIO18	最暖季降水量 Precipitation of Warmest Quarter	mm
BIO19	最冷季降水量 Precipitation of Coldest Quarter	mm

3.2.2 土地利用数据

拟从清华大学公开发布的全球土地覆盖高分辨率观测和监测数据集（Finer Resolution Observation and Monitoring-Global Land Cover, FROM-GLC; <http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>）中获取研究区域内的土地利用数据。FROM-GLC 数据包括 10 个与土地利用相关且空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的变量，即裸地、农田、荒地、不透水层、草地、灌木地、冰雪地、城市绿地、水域和湿地等这 10 种土地利用类型在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 栅格中所占面积的比例^[99]（表 3-3）。该数据为目前全球尺度和区域尺度相关研究中的重要数据源，也是目前可利用的具有极高分辨率的土地利用数据源之一^[100]。为了与气候数据保持一致，研究从 FROM-GLC 数据中获取当前时期（2010 年）和未来时期（2041-2070 年和 2071-2100 年）这两个时期内两种不同共享社会经济路径情景下（SSP1-2.6 和 SSP5-8.5）的 10 个土地利用变量。

表 3-3 土地利用/覆盖变量
Table 3-3 Land use/cover variables

土地利用/覆盖变量 Land use/cover variables	变量描述 Variables description	单位 Units
Barren	荒地面积的比例 The proportion of barren land area	%
Cropland	耕地面积的比例 The proportion of cropland area	%
Forest	林地面积的比例 The proportion of forest land area	%
Grass	草地面积的比例 The proportion of grassland area	%
Imprvious	不透水面面积的比例 The proportion of imprvious area	%
Shrub	灌丛面积的比例 The proportion of shrubland area	%
Snow-ice	冰雪地面积的比例 The proportion of snowice area	%
Ugs	城市绿地面积的比例 The proportion of urban green space area	%
Water	水域面积的比例 The proportion of water area	%
Wetland	湿地面积的比例 The proportion of wetland area	%

3.2.3 变量筛选

为了避免环境变量之间的多重共线性，我们选择利用皮尔逊相关系数（Pearson Correlation Coefficient）来对上述 29 个环境变量（19 个生物气候变量和 10 个土地利用变量）进行筛选^[101]。通常认为 Pearson 相关系数的绝对值大于 0.7 的变量具有高度相关性^[102]。因此，本研究筛选出 Pearson 相关系数的绝对值小于 0.7 的环境变量用于构建物种分布模型。

3.3 物种分布模型

在物种分布模型中，机器学习算法（如 MaxEnt、增强回归树和随机森林）通常优于基于回归的方法^[103]。此外，与其他方法相比，MaxEnt 模型的预测精度相对较高^[104]，并且在估计物种的潜在分布范围变化方面表现良好^[105]。因此，在本研究中，我们使用 MaxEnt 模型来预测大熊猫及其同域分布物种在当前和未来气候和土地利用条件下的分布范围。

我们使用交叉验证（cross-validation）的方法对模型的拟合优度进行评估，即从数据集中随机选取 70% 的数据用于模型的训练，而剩余的 30% 的数据用于计算受试者工作特征曲线下的面积（the area under receiver operating characteristic curve, AUC）^[106]，以该指标评估模型的拟合优度。当 AUC 值越接近于 1 时，模型的预测效果越好^[107]。对于每个物种，我们将上述交叉检验过程重复运行 10 次，因此我们总共创建了 230 个模型。对于每个模型，我们使用 MaxEnt 模型的标准输出“百分比贡献”（即每个变量对模型的相对贡献率）来评估气候变量和土地利用变量对大熊猫及其同域分布物种分布的影响。

在此基础上，基于训练后的 MaxEnt 模型来预测研究区域内大熊猫及其同域分布物种在当前时期以及未来不同时期（2050s、2070s）不同共享社会经济路径情景

下 (SSP1-2.6、SSP5-8.5) 的栖息地适宜性分布图。因此, 对于每个物种, 我们得到 10 个当前 (10 次重复) 和 40 个未来 (10 次重复×2 个时期×2 个 SSP 情景) 栖息地适宜性分布图。由于不同的预测可能会导致预测分布的不确定性, 我们采用 Araujo & New (2007) 所使用的组合方法来计算每个时间内每种情景下每个物种的单一的生境适宜性图层。即对于给定的物种、给定的时期和给定的情景, 我们使用 AUC 值作为加权系数来计算这 10 个交叉验证模型所预测的生境适宜性的加权平均值作为总体的预测值^[108,109]。最后, 以这 10 个交叉验证模型所产生的使得模型敏感性和特异性最大化 (maximums model sensitivity plus specificity) 的阈值的平均值作为总体阈值, 将每个物种在不同时期的栖息地适宜性图转换为适宜和不适宜这两种类型的二元分布图。

3.4 统计分析

3.4.1 物种潜在适宜栖息地分析

基于每个物种在不同时期内的适宜和非适宜栖息地分布图, 采用 Zhang 等 (2015) 的计算方法^[110], 我们使用两个指标来量化未来气候变化和土地利用变化对物种分布范围的影响: 适宜栖息地总面积的相对变化率 (the relative change rate in total area of suitable habitat, CSH) 和当前适宜栖息地的损失率 (the percentage of the loss of current suitable habitat, LSH)。第一个指标假定物种在未来时期内可以扩散到全部适宜栖息地内 (即全局扩散模式), 其计算公式如下:

$$CSH = \frac{AREA_{future} - AREA_{current}}{AREA_{current}} \times 100\%$$

其中, $AREA_{future}$ 和 $AREA_{current}$ 分别为物种在未来和在当前环境条件下的适宜栖息地面积。CSH 的取值范围为[-100,100], 其负值表示物种的适宜栖息地面积将会减少 (即分布范围缩小), 而正值则表示物种的适宜栖息地面积将会增加 (即分布范围扩大)。第二个指标假定物种不能扩散到当前适宜栖息地以外的区域 (即零扩散模式), 其计算公式如下:

$$LSH = [1 - \frac{Overlap(AREA_{future}, AREA_{current})}{AREA_{current}}] \times 100\%$$

其中, $Overlap(AREA_{future}, AREA_{current})$ 表示物种在未来和当前时期其适宜栖息地的重叠面积。LSH 的取值范围为[0,100], 其值越大表明物种在当前时期的适宜栖息地的损失越大。

此外, 为了进一步评估各物种在未来气候和土地利用条件下分布范围变化的方向和强度, 我们使用 R 软件包 ‘rgeos’ 中的 ‘gCentroid’ 函数分别计算当前时期以及未来时期不同气候和土地利用变化情景下物种适宜栖息地的质心及它们之间的距离。同时, 为了明确物种分布范围变化的方向, 我们以迁

移距离的正值表示物种的适宜栖息地向北移动，而以负值表示向南移动。

3.4.2 物种丰富度空间分布格局

为了明确未来气候变化和土地利用变化对大熊猫及其同域分布物种物种丰富度的影响，我们将每个物种在不同时期内的适宜和非适宜栖息地分布图分别进行叠加，得出不同时期内大熊猫及其同域分布物种物种丰富度分布图。并在此基础上，以当前时期的物种丰富度分布特征为基准，计算未来不同气候和土地利用变化情景下每个栅格内物种丰富度的增加量、减少量以及相对变化率。

3.4.3 优先保护区和保护空缺的分析

为了明确未来气候变化和土地利用条件下的优先保护区，对于每个情景，我们采用 Xie 等（2022）的方法计算出物种丰富度相对变化率的 99% 置信区间，并将置信区间以外的区域确定为优先保护区（即物种丰富度高变化区）。根据优先保护区的确立方法可将其分为两类：1) 需要关注的区域，即物种丰富度降低的区域；2) 值得探索的区域，即物种丰富度升高的区域^[111]。此外，为了分析当前自然保护体系在未来气候和土地利用条件下对大熊猫及其同域分布物种的保护有效性，我们将所确定的优先保护区和当前自然保护区体系的边界进行叠加，以明确了当前自然保护区体系的保护空缺^[112]。

第 4 章 研究结果

4.1 变量选择

通过使用皮尔逊相关性分析对上述 29 个环境变量（19 个生物气候变量和 10 个土地利用变量）进行筛选后，我们保留了 8 个环境变量来构建物种分布模型，包括年平均气温（BIO1）、温度季节性（BIO4）、年降水量（BIO12）、降水季节性（BIO15）、耕地面积的比例（Cropland）、林地面积的比例（Forest）、灌丛面积的比例（Shrub）和城市绿地面积的比例（Ugs）（图 4-1）。

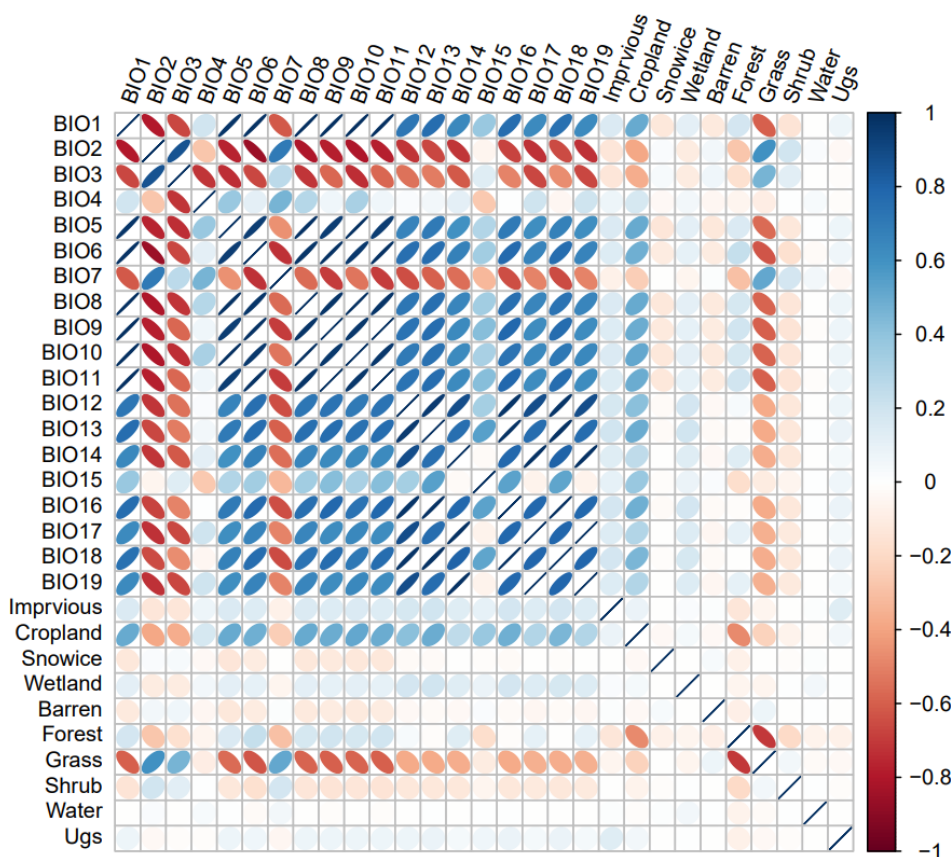


图 4-1 气候变量和土地利用变量的相关性分析

Fig.4-1 Correlation analysis of climate and land use variables

4.2 模型的拟合优度及变量的相对重要性

在 R studio 4.1.2 版本中运行 MaxEnt 模型，并使用受试者工作特征曲线下的面积（AUC）指标评估了物种分布模型的拟合优度。研究结果表明，23 个物种的平均 AUC 值为 0.854 ± 0.052 （图 4-2）。这说明该研究选择的 MaxEnt 模型拟合效果好，并且模型预测结果可靠。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/936055001033010101>