

DOI: 10.5846/stxb202012133171

赵卫, 王昊, 肖颖, 白丰桦, 梁芳源. 气候变化对野生生物类自然保护区的影响及其风险. 生态学报, 2023, 43(13): 5270-5280.

Zhao W, Wang H, Xiao Y, Bai F H, Liang F Y. Effect and risk of climate change on wildlife nature reserves. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5270-5280.

气候变化对野生生物类自然保护区的影响及其风险

赵 卫, 王 昊, 肖 颖*, 白丰桦, 梁芳源

生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

摘要:自然保护区是禁止开发区域、生态保护红线、自然保护地等生态功能重要地区的核心组成部分, 在保护生物多样性、保障国家生态安全中居于重要地位。在生态文明体系加快构建、人类活动不利影响逐渐得到遏制的背景下, 气候变化及其影响将成为自然保护区建设和管理面临的主要挑战。鉴于此, 分析和总结了气候变化对野生生物的影响, 剖析了气候变化对野生生物类自然保护区的风险, 以期协同推进自然保护区管理与应对气候变化工作, 建立完善国土空间规划体系和自然保护地体系的自然保护区管理制度等提供科学依据。结果表明, 气候变化对野生动植物物种分布、生物物候、种间关系的影响更加凸显, 加剧了物种灭绝风险; 气候变化影响特别是气候变化引起的物种适应性迁移, 将对以相对固定的空间布局、保护边界、功能分区为主要特征的自然保护区建设和管理模式提出新的挑战, 使得野生生物类自然保护区保护对象、保护功能等面临风险, 形成自然保护区气候变化风险; 而且当前自然保护区优化调整仍然滞后于气候变化影响, 将进一步加剧自然保护区气候变化风险。

关键词:物种; 保护对象; 保护功能; 气候变化风险; 自然保护区

Effect and risk of climate change on wildlife nature reserves

ZHAO Wei, WANG Hao, XIAO Ying*, BAI Fenghua, LIANG Fangyuan

Nanjing institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

Abstract: As the main part of no-development regions, ecological redlines and protected areas, nature reserves play an important role in biodiversity conservation and nationally ecological security. Under the background of notable progress in building an ecological civilization, efforts to develop a system for building an ecological civilization have been accelerated, the adverse effects of human activities have been curbed gradually, while climate change and its impact will turn into the main challenge for the development and management of the nature reserves. In view of this, effects on wildlife resulted from climate change were analyzed and summarized, the risk of wildlife nature reserves resulted from climate change was dissected, so as to provide scientific basis for synergistic promotion between nature reserve management and coping with climate change, and improvement of nature reserve management systems under the territorially spatial planning system and protected area system. The results showed that effects of climate change on species distribution, biological phenology and interspecific relationship of wild animals and plants were more prominent, which exacerbated the risk of species extinction. Effects of climate change, especially the adaptive migration of species caused by climate change, will challenge the development and management mode of the nature reserves with relatively fixed spatial layout, protection boundary and functional zoning as the main characteristics, which make the protected objects and protected functions of wild biological nature reserves facing risks, and result in risks on nature reserves. At present, adjustments to spatial layout, protection boundary and functional zoning of nature reserves still lag behind the impact of climate change, which will further aggravate the risk of climate change in the nature reserves.

基金项目:江苏省第五期“333 工程”培养资金资助项目(BRA202039); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项重点项目(GYZX210501)

收稿日期:2020-12-13; **网络出版日期:**2023-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: niesxy@126.com

Key Words: species; protected object; protected function; climate change risk; natural reserve

气候变化是人类共同面临的重大危机和严峻挑战,对自然生态系统和人类生存发展产生了广泛而深远的影响。研究表明,气候变化已成为威胁生物多样性的主要因素之一,且预计在今后的几十年中将逐渐演变为生物多样性丧失主要的、直接的驱动力。在此背景下,许多物种通过迁徙来适应气候变化,对生物多样性保护工作提出了新的挑战^[1-2]。

建立自然保护区是生物多样性就地保护最直接、最有效的途径^[3]。经过 60 多年努力,我国建立了数量众多、类型丰富、功能多样的自然保护区,在保护生物多样性、维护国家生态安全等方面发挥了重要作用,但也存在多头管理、边界不清、权责不明、违法违规开发等问题。为此,自然保护区被列为禁止开发区域、生态保护红线、自然保护地等生态功能重要地区的核心组成部分,并实施严格的生态空间管控。加之生态文明体系加快构建、“绿盾”自然保护区监督检查专项行动深入开展以及公众生态保护意识的不断提高,人类活动对自然保护区的不利影响将逐渐得到遏制,气候变化及其影响将成为自然保护区建设和管理面临的主要挑战。其中,自然保护区建设和管理对气候变化的适应能力,事关我国主体功能区、生态保护红线、自然保护地等生态环境保护战略的实施成效;国土空间规划体系、自然保护地体系等生态文明制度的建立,为完善自然保护区建设和管理制度、提升自然保护区对气候变化的适应能力提供了新的契机。因此,开展气候变化对野生生物类自然保护区的影响和风险研究具有紧迫性和必要性。

鉴于自然保护区在生物多样性保护、生态安全保障中的重要地位及其建设和管理所面临的气候变化挑战,分析和总结气候变化对野生生物的主要影响,识别野生生物类自然保护区气候变化风险,为协同推进自然保护区管理与应对气候变化工作、建立完善国土空间规划体系和自然保护地体系的自然保护区管理制度,保证和增强全球气候变化背景下自然保护区的保护功能等提供科学基础与决策依据。

1 气候变化对野生生物的主要影响

1.1 气候变化对物种分布的影响

温度、降水等气候因子是决定野生动植物物种地理分布的关键因素^[1],当温度和降水格局发生变化时物种的分布会随之变化^[4-5]。以变暖为主要特征的气候变化使得一些物种不得不迁移到更为寒冷和湿润的地方^[6-8]。研究表明,气候变化导致鸟类等物种平均每 10 年向极地移动 16.9 km,向高海拔地区移动 11.0 m^[9-10]。

1.1.1 对动物分布的影响

鸟类对气候和环境改变的反应较为敏感,是生态系统中最活跃的组成部分,也是气候变化影响研究和观测最多的物种之一^[9,11]。鸟类在北半球的分布北界主要由低温线决定,气候变暖成为改变鸟类分布范围的主要因素^[9]。对近 20 年我国鸟类分布变化的分析表明,由于气候变暖而改变分布范围的鸟类共 120 种,约占中国鸟类种数(1332 种)的 9.01%,其分布范围表现出向北或向西扩展的变化趋势^[11]。其中,中白鹭(*Egretta intermedia*)繁殖地北移是鸟类分布变化的典型例证。中白鹭亚种原分布于四川西昌以东、长江中下游以南的华南大陆,2004 年在辽宁丹东的东港市首次出现该鸟的繁殖种群;受气候变暖影响而改变分布范围的鹭科鸟类还有白鹭(*Egretta garzetta*)、绿鹭(*Butorides striatus*)、池鹭(*Ardeola bacchus*)等,其分布范围也明显北移^[11]。此外,在欧洲、北美洲也观测到了鸟类繁殖地、越冬地向高纬度地区移动的变化趋势,并且与气候变暖有关^[12-15]。在低纬度的热带地区,由于缺乏显著的纬度气候梯度、森林毁坏加快和鸟类本身的扩散能力低等因素,气候变化对鸟类分布的影响较重,使得该区域鸟类分布主要向高海拔区域转移^[9,16-18]。在哥斯达黎加蒙特沃德国家公园(Monteverde National Park, Costa Rica),低地鸟类的繁殖地在 20 世纪末已经扩展到山区云雾林^[16]。研究表明,气候变化下大部分鸟类的分布范围在缩小而非扩大,适宜生境缩减^[9,19]。例如,1970—

2010 年黑嘴松鸡 (*Tetrao parvirostris*) 适宜分布区面积减少了 23.57%, 原分布于完达山、长白山一带的黑嘴松鸡种群已经完全消失; 在 RCP4.5、RCP8.5 气候变化情景下, 到 2050s、2070s 黑嘴松鸡适宜分布区将继续呈缩减趋势且不断加剧^[20]。

除鸟类外, 气候变化还导致其他动物的地理分布变化、适宜生境缩减。其中, 气候变化对我国野生动物, 尤其是濒危物种栖息地及其分布变化等的影响已成为研究热点。在东北地区, RCP4.5、RCP8.5 气候变化情景下, 濒危动物驼鹿 (*Alces alces*) 潜在生境整体上呈现出向高海拔、高纬度地区迁移的趋势, 到 2050s、2070s 驼鹿当前潜在生境面积明显减少, 新增潜在生境面积相对较少, 驼鹿潜在生境总面积呈急剧减少趋势^[21]。在长江中下游地区, RCP2.6、RCP8.5 气候变化情景下, 到 2050s、2080s 我国特有濒危动物黑麂 (*Muntiacus crinifrons*) 适宜生境面积均呈减少趋势, 特别是 RCP8.5 气候变化情景下黑麂的适宜生境整体萎缩, 其空间位置也将发生较为明显的变化, 表现为向高纬度地区移动的变化趋势^[22]。在秦岭地区, 气候变化将导致大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*)、川金丝猴 (*Rhinopithecus roxellana*)、羚牛 (*Budorcas taxicolor*)、黑熊 (*Selenarctos thibetanus*) 等濒危物种的适宜生境向高海拔地区转移、适宜分布面积减少, 到 2050s 大熊猫、川金丝猴、羚牛、黑熊适宜生境平均海拔均显著高于其当前适宜生境平均海拔, 适宜分布面积将分别减少 5.8%、51.22%、42.97%、46.09%^[23]。在西部地区, 气候变化下鹅喉羚 (*Gazella subgutturosa*) (柴达木亚种)、鹅喉羚 (南疆亚种)、草原斑猫 (*Felis silvestris*)、蒙古野驴 (*Asinus hemionus*)、石貂 (*Martes foina*) 和野骆驼 (*Camelus ferus*) 适宜分布范围将缩小, 到 2081—2100 年时段鹅喉羚 (南疆亚种)、草原斑猫和蒙古野驴适宜分布范围的变化幅度较大, 鹅喉羚 (柴达木亚种)、石貂 (*Martes foina*) 和野骆驼次之^[24]。此外, 在全国大熊猫生境及秦岭山系、岷山山系、邛崃山系等大熊猫山系, 气候变化下未来大熊猫主食竹和生境面积均呈减少趋势, 生境整体破碎化程度增加, 大熊猫被迫向更高海拔、更高纬度扩散, 而且未来大熊猫新增的适宜生境大多位于现有大熊猫分布区以外^[25—27]。

1.1.2 对植物分布的影响

植物地理分布及其对气候变化的响应过程是植物与环境胁迫关系的具体体现。一旦气候变化导致水热组合格局改变, 势必造成植被带的范围、面积和界线发生变化^[28]。全球气候变化下, 气候带将向极地方向发生一定程度的位移, 地带性植被类型的分布边界随之向高纬度地区移动。近 30—40 年, 在俄罗斯西伯利亚——芬兰北极苔原带一些地区已经长出高大树木, 局部形成森林^[29]。在垂直高度上, 林线是全球气候变化理想的监测器, 对气候变化十分敏感。对 1905 年、1985—1986 年、2005 年欧洲西部 171 种森林植物分布的研究发现, 气候变暖导致该区森林植物的最适分布海拔平均每 10 年上升 29 m^[30]。20 世纪气温平均升高 0.8℃, 使得斯堪的纳维亚山系 (Scandinavian Mountains) 瑞典区域的林线上升了 100 m 以上^[31]。1977—2007 年, 美国加州圣罗萨山区 (Santa Rosa Mountains) 海拔 122—2560 m 内 10 种优势植物的平均分布上升了 65 m, 主要原因是当地气候变暖和降水增加^[32]。

在以增暖为主要特征的气候变化影响下, 我国植被带分布具有向高纬度、高海拔地区推移的趋势^[28, 33—34]。在 SRES 排放情景下, 我国东部地区多数植被带将发生北移, 尤其是热带森林到本世纪中期将向东北方向移动 30—174 km, 热带森林、暖温带森林、热带草原、灌丛面积增加, 北方针叶林、温带森林、冻土苔原面积减少^[28, 35]。其中, 东北地区的中温带和暖温带面积有所增加, 植被带分布的界线将发生北移, 部分针叶林逐渐被落叶阔叶林取代^[36]; 当 CO₂ 倍增时, 40%—57% 的冻原将消失, 被其南部的森林代替^[4]。气候变化对我国主要森林类型的影响研究表明, 增暖可能导致北方森林带呈继续北移的趋势^[37]。对于亚热带常绿阔叶林, 气温升高 2℃, 纬向上向北扩大 3 个纬度; 气温升高 4℃, 纬向上则向北扩大 6 个纬度^[38]。垂直方向上, 2℃ 增温使得东北森林的垂直带谱普遍上移 300 m 左右, 而在 CO₂ 浓度倍增的条件下, 温带落叶阔叶林的林线将升高 100—160 m, 亚热带山地针叶林和热带阔叶林将分别升高 150—350 m 和 280—560 m^[39]。在 RCPs 气候变化情景下, 内蒙古草原植被的南部界限大幅度北移, 面积有所减少^[40]。对 2015—2018 年呼伦贝尔草原区不同草地类型分布的研究表明, 基于植被-气候学分类系统和 Holdridge 分类系统的草甸草原与典型草原边

界整体上向东北方向有较大的迁移,通过遥感影像及辅助数据获得的不同草地类型分布整体上也向东北方向发展^[41]。在 RCP2.6、RCP6.0 气候变化情景下,到 2050s、2070s 我国西部地区典型荒漠植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的潜在分布范围将显著扩张,向西北、东北方向迁移^[42]。

1.2 气候变化对生物物候的影响

1.2.1 对动物物候的影响

动物物候是自然环境中动物生命活动的季节现象,包括候鸟、昆虫及其他动物初见、初鸣、绝见、终鸣等。对动物迁徙期、产卵期、始鸣期、发育期、绝鸣期等的影响,是目前气候变化对动物物候影响研究的主要方面,鸟类、昆虫等是研究最多的物种。

气候变化对动物物候的影响主要表现为产卵时间、迁徙时间、始鸣期、发育期提前和绝鸣期推迟。对于鸟类,其产卵时间、迁徙到达时间明显提前。全球范围内关于鸟类产卵时间的研究中,大约有 60% 的研究显示鸟类的产卵时间提前。其中,英国一项持续 25 年的研究发现,65 种鸟类中有 25 种鸟类的产卵时间平均提前 8.8d,而且这与气候变暖有显著的统计学相关性;在气温升高影响下瑞典大山雀(*Parus major*)、蓝山雀(*Cyanistes caeruleus*)、沼泽山雀(*Poecile palustris*)三种山雀的产卵期平均每 a 提前了 0.25d^[43]。对近 63 年加拿大 96 种迁徙鸟类物候数据的分析发现,有 27 种鸟类的迁徙到达时间有所提前^[44]。在我国亚热带地区,部分动物春季物候也呈提前趋势。研究表明,广东省蚱蜢(*Cryptotympana atrata*)始鸣期与 3—4 月平均气温、1 月 1 日至平均始鸣期期间 $>10^{\circ}\text{C}$ 有效积温之间呈显著的负相关关系;1997 年以来广东省各站点 3—4 月平均气温明显上升,蚱蜢始鸣期提前,中部、北部地区的蚱蜢始鸣期提前较多;全球和区域气候模式预估的春季平均气温增暖幅度下,到 2030 年广东省动物春季物候期将比 1983—2010 年平均物候期提前 3.5d^[45]。近 10 年桂林雁山青蛙(*Rana nigromaculata*)和蟋蟀(*Gryllulus*)始鸣期呈提前趋势,终鸣期稳定,始终鸣间隔期及生长繁殖季显著延长,其中青蛙始鸣期、始终鸣间隔期与 3 月平均最高气温均呈显著相关性,蟋蟀始鸣期、始终鸣间隔期与 2—4 月平均气温均呈显著相关性^[46]。

气温是影响动物物候的主要气候因子,有关研究进一步分析了气温对动物物候的影响强度。近 30 年许多不列颠蝴蝶(*Rhopalocera*)发育期提前,而且在无其他干扰因素下,气温每升高 1°C ,蝴蝶物种的发育期和高峰发育期提前 2—10d^[47]。在我国,青海省动物物候对气候变化的响应分析表明,上年 9 月至当年 4 月平均气温升高 1°C ,大杜鹃平均始鸣期提早约 5.4 d 左右;上年 9 月至当年 7 月平均气温升高 1°C ,大杜鹃(*Cuculus canorus*)平均绝鸣期推迟 8.3 d;上年 9 月至当年 7 月平均气温升高 1°C ,大杜鹃始绝鸣期平均间隔日数延长 11.8 d^[48]。

1.2.2 对植物物候的影响

植物物候包括植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等规律性的现象,是植物适应其生长环境的季节性变化而呈现的规律性变化。近几十年来,持续增温使得北半球不同区域植物春季物候提前、秋季物候推迟,生长季呈延长趋势^[49]。国际物候园观测资料显示,欧洲中西部地区现在的春季物候比 50 年前提前 10—20d,变化速率在物种间、地区间和年际间存在差异^[50]。

气候变化带来我国植物物候期的显著变化,植物物候表现出与气候变暖协同变化的特征但存在区域差异^[49,51]。在北方温带地区,1986—2005 年旱柳平均展叶始期、开花始期和果实成熟期分别以 4.2 d/10a、3.8 d/10a、3.3 d/10a 的平均速率显著提前,叶变色始期呈不显著推迟的趋势,落叶末期以 2.4 d/10a 的平均速率显著推迟^[52]。在秦岭地区,近 52 年植物物候始期普遍呈提前趋势,提前速率 1.2 d/10a;物候末期普遍呈推迟趋势,推迟速率 3.5 d/10a;物候生长期普遍延长^[49]。在华北地区,1980s 以后植物春季物候亦呈大幅度提前趋势^[49,53]。在东部地区,木本植物秋季叶全变色期整体上表现为推迟趋势,且 1980s 后推迟趋势明显^[54]。在东北地区,木本植物展叶初期提前速率为 0.23 d/a,枯黄初期推后速率为 0.19 d/a,生长季延长速率为 0.30 d/a^[55]。在西北荒漠区,植物物候也表现出春季物候期提前、落叶末期推迟且 1985 年后生长季呈显著性延长的变化趋势^[56—57]。其中,甘肃民勤荒漠区的中生植物春季物候期(芽初膨大、芽开放期、始展叶期、展叶盛期、

蕾或序现、开花始期和开花末期)自 1974 年以来平均提前 9.0 d,落叶末期平均推迟 3 d;旱生植物春季物候期平均提前 6.5 d,落叶末期平均推迟 3.9 d^[58]。

气温是影响植物物候最重要的气候因子。气温升高对春季休眠解除具有促进作用,对植物秋季休眠具有延缓效应,总体上表现为升温能够延长植物生活史周期^[59]。对近 40 年我国植物物候期变化趋势的分析表明,我国植物物候期变化对温度变化的响应显著,温度上升 1℃,物候期提前 3.5 d^[53]。Ma 等通过个体观测、整合分析、遥感监测、模型模拟等研究发现,在过去 30 年中,气温每增加 1℃,我国植物春季物候期就会提前 4.93 d^[60]。在我国温带地区,春季日平均气温升高 1℃导致平均植物生长季开始日期提前 3.1 d,秋季平均气温升高 1℃使得植物生长季结束日期延迟 2.6 d^[10]。在我国北方温带地区,区域平均春季最佳期间日均温每升高 1℃,旱柳展叶始期、开花始期和果实成熟期的发生日期分别提前 3.08 d、2.83 d 和 3.54 d;区域平均秋季最佳期间日均温每升高 1℃,旱柳叶变色始期和落叶末期的发生日期分别推迟 1.69 d 和 2.28 d^[52]。

1.3 气候变化对生物多样性的影响

1.3.1 气候变化对种间关系的影响

气候变化导致物种分布向高纬度、高海拔地区移动,将改变新旧生境的生态位、物种组成和群落结构,对其种间关系产生影响。首先,气候变化引起的物种迁移会改变高海拔、高纬度地区的生物多样性和物种丰富度,提高杂交几率,形成全新的种间关系。在过去 100 年,低海拔物种的迁入使得瑞士境内高山带植物多样性显著增加,喜马拉雅山高山带物种丰富度也明显提高^[61-62]。20 世纪 70 年代,降水变化尤其冬季降水量显著增加,使得美国奇瓦瓦荒漠(Chihuahuan Desert)木本灌丛密度升高 3 倍,稀有动物数量增加,但是常见动物数量减少^[63]。近 10 年阿尔卑斯山(Alps)的监测结果显示,高山草甸有先锋种出现,一些适应寒冷气候的物种丧失;与过去 100 年相比,这些山顶可以容纳种类更多的先锋植物^[64]。而且在气候变化引起的野生动植物物种迁移中,各类物种的迁移速度存在差异。这意味着气候变化会打乱现有物种间的相互关系,使生态系统中物种链改变。其中,生命期短、繁殖周期快的草本、蕨类和藓类植物迁移速度明显快于繁殖较慢、生长期长的乔木种群。此外,气候变化引起的物种迁移也存在携带病害的风险,可能引起有害生物泛滥,导致害虫、疾病等爆发强度和频率增加,对新生境的生态系统造成严重后果^[65]。

除改变物种分布外,气候变化通过改变本地种适宜生境、增强外来种竞争能力,使得本地种面临威胁、濒临灭绝或被其他物种所替代,进而影响区域生物多样性和种间关系。对于外来种,气候变暖会增强外来种生存、繁殖和竞争能力,使物种形成速率加快,同时也会削弱本地种竞争优势,导致区域特有种减少或消失。例如,气候变暖对新西兰特有种高达 93% 的 613 种高山维管植物种类的影响研究表明,目前平均气温维持在比 1900 年高 0.6℃ 时,将有大量外来物种增加,40—70 个本地植物种可能面临威胁;大约 100 年后气温上升 3℃ 时,新西兰高山植物区系维管植物总数将达 550—685 种,200—300 个高山本地种丧失^[66-67]。对 1902—1949 年、1975—1984 年、1985—1999 年观测数据的比较显示,随着气温升高,荷兰维管束植物中喜热植物种类明显增加;气温升高使无脊椎动物数量增加,但由于物种间的竞争,生物多样性反而减少^[68-69]。对于本地种,气候变暖及其对高纬度、高海拔区域生境的改变,使得生物或优势物种因为适宜生境消失而濒临灭绝或被其他物种替代。例如,连续 5 年升温和施肥使瑞典北部高山苔原带苔藓和地衣优势群落的物种数量减少,物种丰富度和多样性降低;在增温和养分增加条件下,挪威南部高山带的优势矮灌木宽叶仙女木(*Dryas octopetala*)被禾本科和非禾本科草本取代^[66,70]。在过去 40 年中,欧洲候鸟和留鸟丰富度也因气温升高而发生改变^[71]。

气候变化还将改变野生生物的物候期、生理特征等,对区域生物多样性和种间关系产生影响。由于气候变化对繁殖期、迁徙期等物候期的改变,部分欧洲鸟类和极地动物在原栖息地的种群数量发生改变,极地北极熊出现明显的出生率下降、种群数量减少等变化^[72]。其中,植物、传粉昆虫、鸟类等对气候变化的响应程度明显不同,这种差异会影响到相关动植物生长和繁衍,从而影响生态系统食物链和食物网。例如,落基山地区(Rocky Mountains)植物的开花时间随积雪融化时间提早而提前,同时植物的传粉过程也受到影响^[73]。

1.3.2 气候变化加剧物种灭绝风险

联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告指出,若未来全球升温幅度超过 1.5—2.5℃,全球

20%—30%物种的灭绝风险将显著增加^[2]。在相关研究基础上,对物种灭绝风险观测案例和预测案例的META分析(Meta-analysis)表明,到2100年,气候变化造成的平均灭绝率预计将达7%,其中基于观测结果的平均灭绝率将达15%;若不采取减缓气候变化措施、延续当前发展模式,气候变化将威胁全球1/6的物种^[74]。气候变化对欧洲1400种植物的影响研究显示,到2100年,10%的植物物种将从欧洲消失,1%的物种将灭绝,其中北欧有35%的物种将发生生物入侵,南欧有25%的物种因丧失适宜栖息地将面临局部灭绝^[75]。

气候变化改变物种生境及其地理分布,使得物种面临灭绝风险。对于移动能力较强的物种,其地理分布将随气温升高而向高纬度、高海拔地区移动,当温度变化在其耐受范围内时其分布范围将因边界移动而扩大;但是物种在气候变化引起的迁移过程中可能会遭遇“气候槽”或其他地理屏障,导致物种迁移受阻,给物种带来灭绝风险^[76]。其中,大部分鸟类的分布范围在气候变化影响下呈减小趋势,进而增加其物种灭绝的可能性。对于移动能力较弱的物种,气温升高将对其种群构成直接威胁,使其分布范围萎缩、种群规模下降,进而增加其灭绝风险。例如,气温升高使得苔原分布区整体上向高纬度地区转移,但是在北半球由于北冰洋的阻挡,其北界延伸受到限制、南界则大幅度向北移动,导致大面积苔原消失^[4]。由于气候变化对物种原有适宜栖息地的改变,食物、水和生存环境遭到破坏,适应能力较弱的物种更易受到影响、更易趋向灭绝,尤其是那些分布在高纬度、高海拔地区的物种,气候变化下几乎没有可供生存的栖息地开拓,未来将面临灭绝的风险^[19,77]。到2050年,英国极地高山物种分布的生境将因气候变化影响而消失,地衣植物区系空间分布也将发生改变,部分植物物种面临灭绝或丧失的风险^[78—79]。

气候变化诱发自然灾害,加剧物种灭绝风险。首先,气候变化改变降水格局,会引发干旱、强降水等极端气候事件,对物种造成极大伤害。其中,长时间水淹或洪水可导致沉水植物、浮叶植物甚至部分挺水植物的种群密度和生物量大幅降低,造成湿地生态系统大量物种死亡^[80—81]。2011年,长江流域春季长时间干旱导致鄱阳湖、洞庭湖、洪湖等主要湖泊面积缩减,对早春植物生长繁殖造成不利影响,沉水植物与挺水植物也被迫向湖心方向迁移;同年6月后连续四次强降雨带来的洪水对干旱后幸存的湿地植物造成严重的水淹胁迫^[82]。其次,气候变化会加速高山冰川、冻土消融,冰川分割可能引发雪崩、滑坡、泥石流等自然灾害,严重威胁高海拔地区生物多样性^[83]。此外,气候变暖也是影响森林、草原火灾的重要因素,气候变暖及干旱等极端气候事件使得火灾发生概率增加、火灾强度加大,对森林、草原生物多样性构成威胁^[84]。

2 气候变化对野生生物类自然保护区的风险

自然保护区是有代表性的自然生态系统、珍稀濒危野生动植物物种的天然集中分布区和法定保护区域。当前自然保护区建设和管理以相对固定的空间布局、保护边界和功能分区为主要特征,这一特征在预防、减轻不合理人类活动的不利影响方面发挥了重要作用。但是现有自然保护区多是基于物种的现状分布而设计的,难以满足气候变化下野生动植物物种的保护需求^[22]。其中,气候变化下物种分布是否与自然保护区相匹配,是物种适应气候变化的重要方面,也是导致野生生物类自然保护区气候变化风险的重要原因。此外,气候变化对生物物候、种间关系、物种灭绝等的影响,也是野生生物类自然保护区气候变化风险的重要原因,对野生生物类自然保护区保护对象、保护功能等造成风险。

2.1 气候变化对自然保护区保护对象的风险

(1) 气候变化对保护对象生境产生不利影响,使得野生生物类自然保护区保护对象面临消失、灭绝等风险。

气候变化对野生动植物物种赖以生存的生境的不利影响,将加剧野生生物类自然保护区生境的面积萎缩及其对保护对象的适宜性和承载能力下降,导致野生生物类自然保护区保护对象面临濒危程度加剧、数量减少甚至灭绝等风险。对美国八个主要国家公园213种兽类分布的模拟预测表明,2倍碳排放情景下南方物种将向北方迁移,南方国家公园将平均失去8%的物种,特别是南方的Big Ben、Great Smoky Mountains两个国家公园失去的物种最多,分别为20.8%和16.7%^[85]。

在我国,气候变化也导致部分自然保护区野生生物赖以生存的生境出现面积减少、破碎度增加、适宜性下降等变化,形成对自然保护区保护对象的风险。其中,四川若尔盖湿地国家级自然保护区以高寒沼泽湿地及黑颈鹤(*Grus nigricollis*)等野生动物为主要保护对象,1971—2010年若尔盖湿地年平均气温、年潜在蒸散量明显上升,降水量、地表湿润度下降,气候呈明显的暖干化趋势,使得保护区内沼泽和季节性沼泽面积减少,湿地面积缩减衰退、破碎化程度越来越大,对保护区濒危鸟类——黑颈鹤的繁衍生存构成较大威胁^[86-88]。内蒙古鄂尔多斯遗鸥国家级自然保护区以遗鸥(*Larus relictus*)及其湿地生态系统为主要保护对象,2000—2015年保护区水面面积缩减73.42%且主要发生在保护区核心区,导致遗鸥的主要栖息地迅速萎缩,使得遗鸥由2000年万余只至2005年基本消失,其后10年间一直处于消失状态,其中温度上升、湿度下降引起的保护区流域自然产水量减少是保护区生境变化的重要原因^[89]。青海湖国家级自然保护区以黑颈鹤、斑头雁(*Anser indicus*)、棕头鸥(*Larus brunnicephalus*)等水禽及湿地生态系统为主要保护对象,1974—2004年在气温上升、降水减少、蒸发增加等影响下青海湖出现水面萎缩、水位下降、岸线后退、砂砾裸露、沙化扩大等现象,导致保护区湿地生态系统退化、26种鸟类消失;2004年后随着气温上升、降雨量增加,青海湖水位不断上升、面积逐渐扩大,湖岸线扩张导致鸟岛被淹没,造成鸟类栖息地萎缩^[90-91]。内蒙古达里诺尔国家级自然保护区地处干旱半干旱草原地区,1985—2014年保护区年平均气温上升,年均降水量下降,气候呈暖干化趋势,其中湿地面积与降水量呈正相关关系、与气温呈负相关关系;气候暖干化导致保护区黑颈鹤等珍稀鸟类赖以生存的沼泽湿地面积总体上呈减少趋势,对保护区黑颈鹤等珍稀鸟类及其生境等主要保护对象构成风险威胁^[92-93]。在珠穆朗玛峰国家级自然保护区,气温显著上升、降水减少等气候干暖化致使保护区冰川处于退缩状态,1976—2006年保护区冰川总面积减少15.63%,年均减少约16.73 km²,导致雪豹(*Uncia uncia*)赖以生存的栖息地(积雪环境)逐渐往更高海拔的地区缩减并呈零星斑块状分布,使得保护区主要保护对象——雪豹面临近亲繁殖、数量减少甚至局部灭绝等风险^[94]。

(2)气候变化造成的物候期改变、病虫害加剧、极端气候事件等也是野生生物类自然保护区气候变化风险的主要风险源,造成保护对象数量减少、面临灭绝风险。

从气候变化对物候期的影响看,气候变暖导致俄罗斯北极特别自然保护区北极熊(*Ursus maritimus*)和北美驯鹿(*Rangifer caribou*)的物候期改变,使得保护对象不能如期繁殖或繁殖失败,保护对象个体数量显著减少,面临灭绝风险。从气候变化对病虫害的影响看,近30多年河北小五台山国家级自然保护区气温平均升高1.6℃左右,森林虫害种类相应增加,原有病虫害的水平和垂直分布范围扩大,发生频率和危害程度也有所增加,同时病虫害发生与气候变暖的关系日益显现,形成气候变化对保护区温带森林生态系统等主要保护对象的风险^[95]。从极端气候事件的影响看,2008年江西鄱阳湖国家级自然保护区遭受严重的冰雪冻灾,对保护区白琵鹭(*Platalea leucorodia*)及其生境造成严重的直接伤害,导致后两年在鄱阳湖自然保护区越冬的白琵鹭种群数量大幅下降^[96]。此外,气候变化对自然保护区周边人类活动的影响也会加剧自然保护区气候变化风险。由于气候变化引起的区域性干旱,在内蒙古鄂尔多斯遗鸥国家级自然保护区的周边出现了在河道上建设蓄水坝、湿地开垦成农田、过度开采利用地下水等现象,导致地下水水位下降、湿地水源供给破坏,进而造成保护区湿地生境面积缩减、遗鸥数量减少等风险^[89]。

2.2 气候变化对自然保护区保护功能的风险

气候变化对野生动植物物种地理分布、适宜生境、物候期等的改变,使得野生生物类自然保护区的保护对象分布出现相对于其保护边界、功能分区的位移,导致自然保护区对保护对象的保护功能面临削弱、丧失的风险。研究表明,3种气候变化情景下,墨西哥中部自然保护区的物种将超出保护区范围,导致保护对象因脱离自然保护区的保护而面临灭绝风险^[97]。在我国,气候变化对朱鹮(*Nipponia nippon*)潜在生境的影响分析表明,气候变化影响下朱鹮潜在生境将逐渐北移,其生境中心将脱离现在的保护区,使得自然保护区对朱鹮及其生境的保护功能面临削弱、丧失的风险;黑龙江扎龙国家级自然保护区以丹顶鹤(*Grus japonensis*)等珍禽及湿地生态系统为保护对象,1979—2006年暖干的气候变化趋势造成保护区湿地生态系统水文条件改变,加速了

沼泽地向耕地的转化过程,导致湿地退化、沼泽地面积比例减少以及沼泽地、草地分布相对于核心区北移等变化趋势,削弱了该自然保护区对保护对象及其赖以生存的湿地生境的保护功能^[98-99]。

气候变化影响下物种是否仍旧能分布在自然保护区,是气候变化对自然保护区保护功能的风险的重要方面^[100]。Hitz 和 Smith(2004)研究发现,气温升高 3℃,50%的自然保护区将不再能容纳保护区内目前分布的物种^[101]。对欧洲 1200 种植物的分析表明,6%—11%物种在 50 年内将从目前的保护区内完全消失^[102-103]。

3 结论与讨论

研究表明,在生态文明建设和全球气候变化的双重背景下,气候变化对野生动植物物种分布、生物物候、种间关系等的影响更加凸显,加剧了物种灭绝风险,特别是驱使野生动植物物种分布向高纬度、高海拔地区迁移,将对以相对固定的空间布局、保护边界、功能分区为主要特征的自然保护区建设和管理模式提出挑战,形成自然保护区气候变化风险。

野生生物类自然保护区气候变化风险是气候变化对野生生物类自然保护区保护对象、保护功能等造成不利影响的可能损失,涉及气候变化影响、自然保护区建设和管理、相关人类活动等方面:①从气候变化影响看,气候变化对野生动植物物种地理分布、生物物候、种间关系等及其生境的影响日益凸显,将改变保护对象在自然保护区内的分布情况和自然保护区生境对保护对象的适宜性,使得自然保护区的保护对象、保护功能等面临风险;②从自然保护区建设和管理看,自然保护区空间布局、保护边界、功能分区等相对固定,其优化调整滞后于气候变化影响,将削弱自然保护区对保护对象的保护效用,使得自然保护区的保护对象因脱离自然保护区保护而面临灭绝风险、保护功能因保护对象消失而面临丧失风险;③从相关人类活动看,气候变化对自然保护区周边区域生产、生活等人类活动的影响,也会加剧自然保护区气候变化风险,例如气候暖干化引起的水资源短缺、农业用水增加等生态环境问题,将会加剧生产生活与生态环境之间的用水争夺,导致自然保护区生境退化,使得自然保护区保护对象、保护功能面临风险。总体上,气候变化对野生动植物物种及其生境的影响,特别是气候变化引起的野生生物适应性迁移是造成野生生物类自然保护区气候变化风险的根本原因,自然保护区空间布局、保护边界、功能分区等优化调整滞后于气候变化影响将进一步加剧野生生物类自然保护区气候变化风险。

近年来,国内外学者在气候变化对野生生物地理分布、生物物候、种间关系、物种灭绝等的影响方面开展了大量观测和研究,为野生生物类自然保护区气候变化风险研究奠定了工作基础。然而,当前野生生物类自然保护区气候变化风险研究仍然局限于定性分析气候变化对自然保护区保护对象、保护功能等的风险,定量研究明显不足,对生态文明建设与全球气候变化双重背景下自然保护区建设和管理的支撑作用尚未得到有效发挥。在此基础上,综合考虑适应气候变化,以及协同推进自然保护区建设管理与应对气候变化的工作需求,需要进一步加强野生生物类自然保护区气候变化风险研究,为加强自然保护区气候变化风险应对能力、提升自然保护区气候变化适应能力等提供科学基础和决策依据。

参考文献(References):

- [1] 吴军,徐海根,陈炼. 气候变化对物种影响研究综述. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 1-6.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 王智,柏成寿,徐网谷,蒋明康. 我国自然保护区建设管理现状及挑战. 环境保护, 2011, 39(4): 18-20.
- [4] 彭少麟,李勤奋,任海. 全球气候变化对野生动物的影响. 生态学报, 2002, 22(7): 1153-1159.
- [5] Parmesan C. Climate and species' range. Nature, 1996, 382(6594): 765-766.
- [6] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.
- [7] Walther G R, Beißner S, Burga C A. Trends in the upward shift of alpine plants. Journal of Vegetation Science, 2005, 16(5): 541-548.
- [8] Colwell R K, Brehm G, Cardelús C L, Gilman A C, Longino J T. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. Science, 2008, 322(5899): 258-261.
- [9] 吴伟伟,徐海根,吴军,曹铭昌. 气候变化对鸟类影响的研究进展. 生物多样性, 2012, 20(1): 108-115.

- [10] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [11] 杜寅, 周放, 舒晓莲, 李一琳. 全球气候变暖对中国鸟类区系的影响. *动物分类学报*, 2009, 34(3): 664-674.
- [12] Thomas C D, Lennon J J. Birds extend their ranges northwards. *Nature*, 1999, 399(6733): 213-213.
- [13] Brommer J E. The range margins of northern birds shift polewards. *Annales Zoologici Fennici*, 2004, 41(2): 391-397.
- [14] Hitch A T, Leberg P L. Breeding distributions of North American bird species moving north as a result of climate change. *Conservation Biology*, 2007, 21(2): 534-539.
- [15] Valiela I, Bowen J L. Shifts in winter distribution in birds: effects of global warming and local habitat change. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2003, 32(7): 476-480.
- [16] Pounds J A, Fogden M P L, Campbell J H. Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature*, 1999, 398(6728): 611-615.
- [17] Shoo L P, Williams S E, Hero J M. Climate warming and the rainforest birds of the Australian Wet Tropics: using abundance data as a sensitive predictor of change in total population size. *Biological Conservation*, 2005, 125(3): 335-343.
- [18] Peh K S H. Potential effects of climate change on elevational distributions of tropical birds in Southeast Asia. *The Condor*, 2007, 109(2): 437-441.
- [19] Huntley B, Collingham Y C, Green R E, Hilton G M, Rahbek C, Willis S G. Potential impacts of climatic change upon geographical distributions of birds. *Ibis*, 2006, 148(S1): 8-28.
- [20] 任月恒. 基于时空尺度的东北地区黑嘴松鸡种群分布变化趋势研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [21] 张微, 姜哲, 巩虎忠, 栾晓峰. 气候变化对东北濒危动物驼鹿潜在生境的影响. *生态学报*, 2016, 36(7): 1815-1823.
- [22] 雷军成, 王莎, 王军围, 吴军. 未来气候变化对我国特有濒危动物黑麂适宜生境的潜在影响. *生物多样性*, 2016, 24(12): 1390-1399.
- [23] 李佳. 秦岭地区濒危物种对气候变化的响应及脆弱性评估[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [24] 吴建国, 周巧富. 气候变化对 6 种荒漠动物分布的潜在影响. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 464-475.
- [25] 王玉君, 李玉杰, 张晋东. 气候变化对大熊猫影响的研究进展. *野生动物学报*, 2018, 39(3): 709-715.
- [26] 刘艳萍, 申国珍, 李景文. 大熊猫栖息地质量评价研究进展. *广东农业科学*, 2012, 39(22): 193-198.
- [27] Fan J T, Li J S, Xia R, Hu L L, Wu X P, Li G. Assessing the impact of climate change on the habitat distribution of the giant panda in the Qinling Mountains of China. *Ecological Modelling*, 2014, 274: 12-20.
- [28] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. *生态学报*, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [29] Elmendorf S C, Henry G H R, Hollister R D, Björk R G, Björkman A D, Callaghan T V, Collier L S, Cooper E J, Cornelissen J H C, Day T A, Fosaa A M, Gould W A, Grétarsdóttir J, Harte J, Hermanutz L, Hik D S, Hofgaard A, Jarrad F, Jónsdóttir I S, Keuper F, Klanderud K, Klein J A, Koh S, Kudo G, Lang S I, Loewen V, May J L, Mercado J, Michelsen A, Molau U, Myers-Smith I H, Oberbauer S F, Pieper S, Post E, Rixen C, Robinson C H, Schmidt N M, Shaver G R, Stenström A, Tolvanen A, Totland Ø, Troxler T, Wahren C H, Webber P J, Welker J M, Wookey P A. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. *Ecology Letters*, 2012, 15(2): 164-175.
- [30] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, De Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, 320(5884): 1768-1771.
- [31] Kullman L. 20th Century Climate Warming and tree-limit rise in the southern scandes of Sweden. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, 30(2): 72-80.
- [32] Kelly A E, Goulden M L. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(33): 11823-11826.
- [33] Wilson R J, Gutiérrez D, Gutiérrez J, Martínez D, Agudo R, Monserrat V J. Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology Letters*, 2005, 8(11): 1138-1146.
- [34] 张富广. 气候变化背景下祁连山高寒草甸上界现代分布变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [35] Zhao D S, Wu S H. Responses of vegetation distribution to climate change in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 117(1/2): 15-28.
- [36] 郭笑怡, 张洪岩. 生态地理分区框架下的大兴安岭植被动态研究. *地理科学*, 2013, 33(2): 181-188.
- [37] Wang H, Ni J, Prentice I C. Erratum to: Sensitivity of potential natural vegetation in China to projected changes in temperature, precipitation and atmospheric CO₂. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(3): 729-729.
- [38] Ni J. Impacts of climate change on Chinese ecosystems: key vulnerable regions and potential thresholds. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(1): 49-64.
- [39] 贾庆宇, 王笑影, 吕国红, 谢艳兵. 辽宁省气候-植被指标时空变化特征及森林适宜性分析. *生态环境学报*, 2010, 19(9): 2031-2035.

- [40] 苏力德, 杨劫, 万志强, 谷蕊, 闫玉龙, 高清竹. 内蒙古地区草地类型分布格局变化及气候原因分析. 中国农业气象, 2015, 36(2): 139-148.
- [41] 徐大伟. 呼伦贝尔草原区不同草地类型分布变化及分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [42] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 罗冲, 孙芳芳. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1243-1250.
- [43] Källander H, Hasselquist D, Hedenström A, Nord A, Smith H G, Nilsson J Å. Variation in laying date in relation to spring temperature in three species of tits (Paridae) and pied flycatchers *Ficedula hypoleuca* in southernmost Sweden. Journal of Avian Biology, 2017, 48(1): 83-90.
- [44] Murphy-Klassen H M, Underwood T J, Sealy S G, Czyrnyj A A. Long-term trends in spring arrival dates of migrant birds at delta marsh, Manitoba, in relation to climate change. The Auk, 2005, 122(4): 1130-1148.
- [45] 黄珍珠, 李春梅, 翟志宏, 叶维端. 广东省自然物候对气候变暖的响应. 生态环境学报, 2012, 21(6): 991-996.
- [46] 李世忠, 谭宗琨, 夏小曼, 张印平, 邹丽霞, 唐广田. 桂北动物物候气候变暖响应. 气象科技, 2010, 38(3): 377-382.
- [47] Roy D B, Sparks T H. Phenology of British butterflies and climate change. Global Change Biology, 2000, 6(4): 407-416.
- [48] 祁如英. 青海省动物物候对气候变化的响应分析. 青海气象, 2006, 12(1): 28-31.
- [49] 邓晨晖, 白红英, 翟丹平, 高山, 黄晓月, 孟清, 贺映娜. 气候变化背景下 1964-2015 年秦岭植物物候变化. 生态学报, 2017, 37(23): 7882-7893.
- [50] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. Climatic Change, 2003, 57(3): 243-263.
- [51] Ge Q S, Wang H J, Rutishauser T, Dai J H. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. Global Change Biology, 2015, 21(1): 265-274.
- [52] 陈效述, 张福春. 近 50 年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应. 中国农业气象, 2001, 22(1): 1-5.
- [53] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. 科学通报, 2002, 47(20): 1582-1587.
- [54] 仲舒颖, 郑景云, 葛全胜. 近 40 年中国东部木本植物秋季叶全变色期变化. 中国农业气象, 2010, 31(1): 1-4.
- [55] 李荣平, 周广胜. 1980—2005 年中国东北木本植物物候特征及其对气温的响应. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2317-2326.
- [56] 韩福贵, 徐先英, 王理德, 王键, 张应昌, 韩生慧. 民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应. 生态学报, 2013, 33(13): 4156-4164.
- [57] 邓晨晖. 气候变化背景下秦岭山地物候时空变化及其响应[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [58] 常兆丰, 邱国玉, 赵明, 杨自辉, 韩富贵, 仲生年, 李爱德, 刘淑娟. 民勤荒漠区植物物候对气候变暖的响应. 生态学报, 2009, 29(10): 5195-5206.
- [59] 翟佳, 袁凤辉, 吴家兵. 植物物候变化研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3237-3243.
- [60] Ma T, Zhou C H. Climate-associated changes in spring plant phenology in China. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(2): 269-275.
- [61] Thuiller W. Climate change and the ecologist. Nature, 2007, 448(7153): 550-552.
- [62] Gaur U N, Raturi G P, Bhatt A B. Quantitative response of vegetation in glacial moraine of central Himalaya. Environmentalist, 2003, 23(3): 237-247.
- [63] Hersteinsson P, MacDonald D W. Interspecific competition and the geographical distribution of red and arctic foxes *Vulpes vulpes* and *Alopex lagopus*. Oikos, 1992, 64(3): 505-515.
- [64] Grabherr G. Alpine vegetation dynamics and climate change—a synthesis of long-term studies and observations//Nagy L, Grabherr G, Körner C, Thompson D B A, eds. Alpine Biodiversity in Europe. Berlin: Springer, 2003: 399-409.
- [65] Gitay H, Suárez A, Watson R T, Dokken D J. Climate Change and Biodiversity. Geneva: IPCC, 2002.
- [66] 刘洋, 张健, 杨万勤. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展. 生物多样性, 2009, 17(1): 88-96.
- [67] Halloy S R P, Mark A F. Climate-change effects on alpine plant biodiversity: a New Zealand perspective on quantifying the threat. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2003, 35(2): 248-254.
- [68] Tamis W L M, Zelfde M V, Van Der Meijden R, De Haes H A U. Changes in vascular plant biodiversity in the Netherlands in the 20th century explained by their climatic and other environmental characteristics. Climate Change, 2005, 72(1/2): 37-56.
- [69] Kaufmann R, Fuchs M, Gosterxeier N. The soil fauna of an alpine glacier foreland: colonization and succession. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2002, 34(3): 242-250.
- [70] Jägerbrand A K, Lindblad K E M, Björk R G, Alatalo J M, Molau U. Bryophyte and lichen diversity under simulated environmental change compared with observed variation in unmanipulated alpine tundra. Biodiversity & Conservation, 2006, 15(14): 4453-4475.
- [71] Lemoine N, Schaefer H C, Böhning-Gaese K. Species richness of migratory birds is influenced by global climate change. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16(1): 55-64.
- [72] Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). Impacts of a Warming Arctic. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [73] Morales C G, Ortega M T, Labajo J L, Piorno A. Recent trends and temporal behavior of thermal variables in the region of Castilla-León (Spain).

- Atmósfera, 2005, 18(2): 71-90.
- [74] Maclean I M D, Wilson R J. Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(30): 12337-12342.
- [75] Bakkenes M, Eickhout B, Alkemade R. Impacts of different climate stabilisation scenarios on plant species in Europe. *Global Environmental Change*, 2006, 16(1): 19-28.
- [76] Burrows M T, Schoeman D S, Richardson A J, Molinos J G, Hoffmann A, Buckley L B, Moore P J, Brown C J, Bruno J F, Duarte C M, Halpern B S, Hoegh-Guldberg O, Kappel C V, Kiessling W, O'Connor M I, Pandolfi J M, Parmesan C, Sydeman W J, Ferrier S, Williams K J, Poloczanska E S. Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity. *Nature*, 2014, 507(7493): 492-495.
- [77] Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, Hill J K, Thomas C D, Descimon H, Huntley B, Kaila L, Kullberg J, Tammaru T, Tennent W J, Thomas J A, Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 1999, 399(6736): 579-583.
- [78] Holman I P, Nicholls R J, Berry P M, Harrison P A, Audsley E, Shackley S, Rounsevell M D A. A regional, multi-sectoral and integrated assessment of the impacts of climate and socio-economic change in the UK. *Climatic Change*, 2005, 71(1): 43-73.
- [79] Ellis C J, Coppins B J, Dawson T P. Predicted response of the lichen epiphyte *Lecanora populicola* to climate change scenarios in a clean-air region of Northern Britain. *Biological Conservation*, 2007, 135(3): 396-404.
- [80] Vretare V, Weisner S E B, Strand J A, Granéli W. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. *Aquatic Botany*, 2001, 69(2/4): 127-145.
- [81] Asaeda T, Hung L Q. Internal heterogeneity of ramet and flower densities of *Typha angustifolia* near the boundary of the stand. *Wetlands Ecology and Management*, 2007, 15(2): 155-164.
- [82] 罗文泊, 谢永宏, 宋凤斌. 洪水条件下湿地植物的生存策略. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1478-1485.
- [83] Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M, Paul F. Alpine glaciers to disappear within decades?. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(13): L13504.
- [84] 徐靛. 气候变化对自然保护区的影响及法律对策研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [85] Burns C E, Johnston K M, Schmitz O J. Global climate change and mammalian species diversity in U.S. national parks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(20): 11474-11477.
- [86] 王建兵, 王素萍, 汪治桂. 1971—2010 年若尔盖湿地潜在蒸散量及地表湿润度的变化趋势. *地理科学*, 2015, 35(2): 245-250.
- [87] 左丹丹, 罗鹏, 杨浩, 牟成香, 李月蛟, 莫利, 李婷, 罗川, 李红林, 吴素娟. 保护地空间邻近效应和保护成效评估——以若尔盖湿地国家级自然保护区为例. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(4): 854-861.
- [88] 张国钢, 戴强, 刘冬平, 侯韵秋, 陆军, 沈尤, 杜科. 若尔盖湿地水鸟资源季节变化. *动物学杂志*, 2013, 48(5): 742-749.
- [89] 王玉华, 布仁图雅, 孙静萍, 白力军. 遗鸥国家级自然保护区近十五年来生态环境变化特征. *环境与发展*, 2017, 29(1): 78-83, 87-87.
- [90] 骆成凤, 许长军, 曹银璇, 童李霞. 1974-2016 年青海湖水面积变化遥感监测. *湖泊科学*, 2017, 29(5): 1245-1253.
- [91] 马瑞俊, 蒋志刚. 青海湖流域环境退化对野生陆生脊椎动物的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 3066-3073.
- [92] 杨晓潇, 王秀兰, 秦福莹. 达里诺尔自然保护区近 30 年湿地动态变化及其影响因素分析. *西北林学院学报*, 2019, 34(4): 171-178, 222-222.
- [93] 赵卫, 沈渭寿, 刘海月. 自然保护区气候变化风险及其评估——以达里诺尔国家级自然保护区为例. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3831-3837.
- [94] 聂勇, 张镱锂, 刘林山, 张继平. 近 30 年珠穆朗玛峰自然保护区冰川变化的遥感监测. *地理学报*, 2010, 65(1): 13-28.
- [95] 郑斌, 仰素琴, 亢海英, 郝明亮, 徐波. 气候变暖对小五台山自然保护区森林有害昆虫发生的影响. *河北林业科技*, 2011, 39(6): 37-40.
- [96] 李佳, 李言阔, 缪沪君, 谢光勇, 袁芳凯, 黄燕, 许鹏. 越冬地气候条件对鄱阳湖自然保护区白琵鹭种群数量的影响. *生态学报*, 2014, 34(19): 5522-5529.
- [97] Téllez-Valdés O, Dávila-Aranda P. Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán biosphere reserve, México. *Conservation Biology*, 2003, 17(3): 846-853.
- [98] 翟天庆, 李欣海. 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响. *生态学报*, 2012, 32(8): 2361-2370.
- [99] 沃晓棠, 孙彦坤. 扎龙湿地土地利用变化及驱动力分析. *东北林业大学学报*, 2010, 38(5): 77-79, 82-82.
- [100] 吴建国, 吕佳佳, 艾丽. 气候变化对生物多样性的影响: 脆弱性和适应. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 693-703.
- [101] Hitz S, Smith J. Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change*, 2004, 14(3): 201-218.
- [102] Coulston J W, Riitters K H. Preserving biodiversity under current and future climates: a case study. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(1): 31-38.
- [103] Araújo M B, Cabeza M, Thuiller W, Hannah L, Williams P H. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1618-1626.