

DOI: 10.20103/j.stxb.202305251110

魏彦强, 张亮, 孙建, 王金牛. 青藏高原典型濒危乔木适宜分布区及优先保护建议. 生态学报, 2024, 44(18): 8196-8207.

Wei Y Q, Zhang L, Sun J, Wang J N. The suitable distribution areas and suggested-priority protect areas of the typical endangered arbors on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8196-8207.

青藏高原典型濒危乔木适宜分布区及优先保护建议

魏彦强^{1,*}, 张 亮², 孙 建³, 王金牛⁴

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃省遥感重点实验室, 兰州 730000

2 甘肃连城国家级自然保护区管理局, 兰州 730333

3 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

4 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

摘要: 随着全球气候变暖及人类活动的增强, 濒危物种灭绝趋势明显增加。保护青藏高原地区濒危植物尤其是珍稀濒危乔木, 具有重要的现实意义。选取了青藏高原代表性的 14 个珍稀濒危乔木作为研究对象, 对其现状和未来气候情景下的分布进行了建模和丰富度分析, 并对适宜分布区和优先保护区进行了探讨。结果显示, 当前濒危乔木适宜分布的区域主要集中在高原东南部的海拔较低、水热条件较好的河谷、中、低山地带, 但这些地区自然保护区的数量和面积均较低, 被自然保护区所覆盖的比例较低, 形成了大量的保护空缺区, 对青藏高原濒危乔木的保护极为不利。从濒危乔木适宜分布热点区的分布来看, 雅鲁藏布江中下游河谷区、青藏高原东南部横断山谷区、青藏高原东部川西高原河谷区等 3 个地区, 是应优先考虑保护区规划和建设的重点区域。应适时建立自然保护区, 提高濒危乔木对气候变化和人类活动的适应。

关键词: 濒危乔木; 适宜分布; 优先保护; 气候变化; 人类活动; 青藏高原

The suitable distribution areas and suggested-priority protect areas of the typical endangered arbors on the Qinghai-Tibetan Plateau

WEI Yanqiang^{1,*}, ZHANG Liang², SUN Jian³, WANG Jinniu⁴

1 Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 Gansu Liancheng National Nature Reserve Administration, Lanzhou 730333, China

3 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract: With global warming and the intensity of human activities, the extinction trend of endangered species has increased significantly. It is of great practical significance to protect endangered plants in the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP), especially rare and endangered trees. In this paper, 14 representative rare and endangered arbors on the QTP were selected as the research objects, and their distribution under current and future climate scenarios were modeled and the richness were analyzed, and the suitable distribution areas and priority protection areas were discussed. The results show that the suitable distribution areas of endangered arbors are mainly concentrated in the southeastern, the middle and low-elevation mountains of the QTP, where the altitude is relatively lower and the water-heat conditions are relatively better. However, the proportions of nature reserves covered in these areas are very low, forming a large number of protection gaps, which is extremely unfavorable to the protection of endangered arbors on the QTP. Based on the analyses of this paper, the

基金项目: 国家社会科学基金项目 (22BJY136)

收稿日期: 2023-05-25; 网络出版日期: 2024-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiyq@lzb.ac.cn

valleys in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River, the Hengduan Valleys in the southeastern QTP, and the valleys in the western Sichuan Plateau in the eastern QTP are suggested as key areas that should be prioritized for planning and construction of protected areas. Nature reserves should be established in due course to improve the adaptation of endangered trees to climate change and human activities.

Key Words: endangered arbors; suitable distribution; priority protection; climate change; human activities; the Qinghai-Tibetan Plateau

按照 IPCC AR5 的推算,全球平均地表温度将在 21 世纪末升高 0.3—4.8℃^[1],而中国气候变暖显著高于全球平均增温速率^[2-4]。区域气候的变化对自然生态系统带来了广泛的影响^[4-6]。研究表明,气候变化使植被盖度、生物量及群落结构发生变化,并导致一定区域内植被发生演替^[7-8]。植物的分布和物种多样性与气候变化存在相互作用,气候变化改变植物的生长、分布、迁移以及种间关系,与此同时植物分布、植被盖度、生物量、植物群落结构变化及植被演替等在一定程度上改变区域气候,形成特殊小气候系统,从而影响生态系统^[9]。气温升高,导致种群密度降低、物种适宜生境退化,灭绝风险增加,从而影响区域内物种多样性^[8,10]。

青藏高原是全球重要的生物物种基因库,被公认为全球气候变化的“驱动机”和敏感区域,对“温室气体”的响应比其周边低海拔地区更为敏感^[2,5]、增温速度更为显著。魏彦强等利用青藏高原及其周边 144 个站点的分析表明,1961—2010 年间青藏高原的平均增温速度为 0.0318℃/a,高于周边同纬度的其他地区,且青藏高原冬季增温明显高于其他季节^[2]。吴成启等研究表明,1961—2010 年青藏高原年平均气温每年增加 0.028℃^[11]。在气候变化、人类活动的共同影响下^[12],青藏高原地区主要以多年冻土退化、冰川退缩、生态系统脆弱性增加、物种多样性减少等问题为主要特征^[5,13-16]。青藏高原自然环境脆弱,植物对气候变化响应敏感^[16],植物种群数量减少、病虫害增加、适宜生境退化等问题突出,使得濒危植物灭绝率增加^[5],随着气候变化和人类活动的增强,亟需重视和加强青藏高原地区濒危物种的保护^[4-5,14,17]。

乔木是构成森林的主体生物群落。青藏高原地区受高海拔、高寒、生长季短等自然气候条件的限制,森林的分布范围受到很大制约,主要集中在藏东南低海拔河谷区,广大的高原中西部高海拔区则以灌丛为主^[18]。2021 年,青藏高原森林覆盖面积只有不到其总面积的 13%,其中青海、西藏两省的森林覆盖率分别只有 5.8% 和 12.1%。但森林和高原灌丛系统在青藏高原水源涵养、防风固沙、遏制水土流失、生物多样性丧失、提供珍稀野生动物栖息地、提供林业资源等方面却有着不可替代的作用。对我国几个关键流域上游的水源涵养和水土保持有着极为重要的作用,如在雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、长江等各流域中,其各类生态系统中的森林生态系统土壤保持能力最高,其上游的水土保持主要依赖于流域内的林地延迟汇流时间、削减风速和洪峰流量、提高流域的防洪能力、减少地表径流等一系列对水蚀、风蚀的减缓作用^[19-21]。此外,高原生物中的半数以上在森林地区栖息繁殖,是高原生物的避难所^[22],其形成的区域小气候环境对其他物种有着深刻的影响,特别是形成森林生态系统,为其他物种进化和发育提供了良好的生存空间和环境^[23]。全球范围内,森林的破坏对鸟类、哺乳类动物的栖息地及种群数量有很大的威胁^[24],而在高海拔地区森林的消退是濒危野生动物栖息地缩减、生物多样性降低的最大威胁^[22]。除了乔木的生态学功能,青藏高原独特的传统文化和宗教信仰则赋予了乔木特有的文化景观功能^[25]。以神林、圣树为基础的自然圣境(sacred nature sites)构成了雪域高原来自民间的自然保护体系^[26]。在赋予了山、水、草、木神圣宗教意义的同时,乔木高大、健硕、奇特等特点天然承担起了宗教载体的作用,这也促成了对其周围环境和动植物广泛的禁忌行为,渗透着或隐性或显性的生态伦理意识^[27],发挥了其作为“旗舰物种”对周围其他物种的“伞保护效应”^[25-26]。可以说,藏区特有的文化和乔木有着不可分割的文化渊源关系,是青藏高原生态景观文化中不可或缺的组成部分。

但是,青藏高原森林分布相对集中于高原东南部河谷地区,大部分森林结构简单、树种单一、人工种植和恢复困难,不利于人工营造混交林和构建“乔-灌-草”类型齐全的森林植被。因此,青藏高原森林的气候风险

和脆弱性普遍较强,在抵御自然灾害和人为影响方面的恢复力较差,极易受到外来因素的干扰而退化^[17,28]。近些年来,随着全球气候变暖及人类活动的增强,青藏高原地区的森林生态系统面临着很大的风险。许多乔木和灌木树种在气候变化和开采利用中面临着灭绝的危险,珍稀濒危物种的保护面临着很大的挑战^[17,23,28]。开展对青藏高原珍稀濒危乔木适宜分布区的模拟和保护研究,对维持青藏高原森林生态系统的可持续发展及生态、景观、文化价值具体重要的现实意义^[16-17]。

在物种分布模拟方面,MaxEnt 模型是以最大熵原理为理论支撑的机器学习模型,具有简明的数学定义和稳定的算法^[29]。其受样本量影响较小^[30]、连续型和分类型的变量均可作为环境因子参与建模^[31]、受变量之间相关性影响较小^[29]、模拟预测结果优于其他模型^[29,32-35]、模拟结果能直观展示^[31]等优点使得其广泛应用于物种分布模拟^[36-38]。随着研究对象样点分布数据的增加,MaxEnt 模型可以得到逐步优化,而随着环境因子数据的可获得性与分辨率的提高及研究范围由大到小,其模拟结果则逐渐精细化^[29]。一般情况下,在建模中综合考虑的众多生物气候因子、地理因子、土壤因子、人为活动因子等能较为综合而客观地反映物种栖息地受自然环境、人为因素的影响,具有很高的可信度^[32,37]。在青藏高原物种模拟方面,魏彦强等对冬虫夏草的分布模拟显示未来气候情景下虫草的潜在分布范围在退缩^[32],胡华伟等对 17 个濒危兰科植物的模拟显示其主要分布在青藏高原东南部且多样性随海拔增加而降低^[35]。胡忠俊等基于 MaxEnt 模型研究了青藏高原紫花针茅的地理分布变化,指出青藏高原的高海拔腹地、喜马拉雅地区为其主要分布区,受气候变化的影响,未来分布区可能进一步缩减^[39]。Wu 等对青藏高原高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)潜在地理分布进行了研究,指出青藏高原北部、南部和东部高山草甸区为主要适宜区,西藏南部和青海北部分布较为分散^[40]。刘文胜等通过 MaxEnt 模型对青藏高原优势种青藏苔草(*Carex moorcroftii*)潜在分布进行研究,羌塘高原、可可西里地区为当前青藏苔草最适宜分布区^[41]。李宁宁等基于 MaxEnt 模型预测未来两个时期青藏高原东南部丽江云杉、紫果云杉潜在分布,其中前者潜在适宜分布区为四川西南部和西藏东部,后者潜在适宜分布区为四川西北部、甘肃南部、青海东南部及西藏东部地区;未来丽江云杉适宜区向北迁移,紫果云杉向西迁移^[42]。而对青藏高原东南松属乔木的分布模拟表明 12 种松属乔木中,细叶云南松的潜在分布范围最窄,马尾松的分布范围最广^[43]。

以上对青藏高原植物资源空间分布的研究表明,MaxEnt 模型在物种分布模拟方面具有较好的适用性^[32,35,44]。通过地理分布动态模拟可以得到高分辨率、清晰化、动态化的物种空间分布,一改传统的空间界限模糊、难以捕捉其动态过程等问题^[29,38,45]。为濒危植物物种多样性、优先保护区、保护空缺区的确定奠定基础^[32,35],同时为青藏高原自然保护区和国家公园的潜在区确定、规划与建设提供一定的数据支持与参考^[32,46]。

1 数据和方法

1.1 物种数据

本文濒危乔木遴选于《国家重点保护野生植物名录》、《中国珍稀濒危植物名录》、《中国红色物种名录》、《青海植物志》、《西藏植物志》和 IUCN 红色物种名录(<https://www.iucnredlist.org>),共计 14 种珍稀濒危乔木(表 1)。而这些物种空间样本点的分布主要来自于国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn>)、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn>)、相关文献报道(CNKI, WOS, Elsevier, 等文献库)^[44]。

1.2 气候与生态气候分区数据

本研究所用生态气候分区采用郑度等拟定的青藏高原自然地域系统^[47]。该分类系统将青藏高原地区划分为 5 个干/湿地区、3 个不同的温度带,共细分为 11 个生态气候分区(表 2、图 1)。

1.3 研究方法

本研究采用广泛使用的 MaxEnt 模型进行建模。为降低众多环境因子的共线性、降低模型模拟中的运算量,本研究利用 Spearman 秩相关检验首先对所有变量进行了检验,只保留了秩相关系数绝对值小于 0.8 的典

型因子进入模型参与模拟(表3)。模拟时逐一对每个乔木物种进行模拟,随机地选取2/3样本点作为模型的训练数据,而剩余的1/3样本点则作为模型性能评估的测试数据^[32,38,44]。模拟得到每个物种的空间潜在分布适宜度。采用阈值法得到每个物种的空间分布图。将每个物种有空间分布的栅格赋值为1,没有分布的栅格赋值为0,空间上通过14个物种的分布累加得到累计得分,再对累计得分进行“最大值-最小值”归一化,最终得到物种丰富度分布图。

表1 本文所选的代表性濒危乔木及其样本点数量

Table 1 The selected representative endangered arbors and their samples

序号 No.	拉丁名 Latin name	中文名 Species	科名 Family	样本点数 Samples	濒危等级 Endangered rank	保护级别 Protect rank
1	<i>Populus euphratica</i>	胡杨	杨柳科	90	易危	II 级
2	<i>Haloxylon ammodendron</i>	梭梭	藜科	93	易危	
3	<i>Abies squamata</i>	鳞皮冷杉	松科	55	易危	
4	<i>Larix potaninii</i>	红杉	松科	49	近危	
5	<i>Picea brachytyla</i>	油麦吊云杉	松科	46	近危	
6	<i>Picea likiangensis</i>	川西云杉	松科	45	近危	
7	<i>Picea crassifolia</i>	青海云杉	松科	44	近危	
8	<i>Picea purpurea</i>	紫果云杉	松科	39	近危	II 级
9	<i>Taxus yunnanensis</i>	云南红豆杉	红豆杉科	47	濒危	
10	<i>Cupressus torulosa</i>	西藏柏木	柏科	20	濒危	
11	<i>Juniperus przewalskii</i>	祁连圆柏	柏科	27	易危	
12	<i>Juniperus komarovii</i>	塔枝圆柏	柏科	22	易危	
13	<i>Juniperus tibetica</i>	大果圆柏	柏科	57	近危	
14	<i>Juniperus convallium</i>	密枝圆柏	柏科	30	近危	

表2 青藏高原地区生态-气候自然地域系统区划

Table 2 The Qinghai-Tibetan Plateau bio-climatic area system

温度带 Temperature region	干湿地区 Arid/humid	生态-气候分区 Eco-climate zone
HI. 高原亚寒带 HI. Plateau sub-frigid region	B. 半湿润地区 C. 半干旱地区	HIB1 果洛那曲高原山地高寒灌丛草甸区 HIC1 青南高原宽谷高寒草甸草原区 HIC2 羌塘高原湖盆高寒草原区
III. 高原温带 III. Plateau temperate region	D. 干旱地区 A/B. 湿润/半湿润地区 C. 半干旱地区 D. 干旱地区	HID1 昆仑高山高原高寒荒漠区 HIIAB1 川西藏东高山深谷针叶林区 HIIIC1 祁连青东高山盆地针叶林/草原区 HIIIC2 藏南高山谷地灌丛草原区 HIIID1 柴达木盆地荒漠区 HIIID2 昆仑北翼山地荒漠区 HIIID3 阿里山地荒漠区
IVA6. 山地亚热带 IVA6. Mountain subtropics		

1.3.1 模型精度检验

1997年,Fielding和Bell首次将AUC(area under ROC curve)引入物种分布模型的性能评价中,因AUC值不受诊断阈值影响,被公认是目前最优的模型预测指标^[29-30]。采用AUC值评价模型的性能,其取值范围为[0.5,1],0.5表示随机分布,1表示模型结果与物种实际分布区完全相同,值越大表示模型预测精度越高^[29]。参考常用的经验标准,AUC值 ≥ 0.8 时预测精度较准确,预测结果可信度高;AUC值 ≤ 0.5 时模型预测精度较差, $0.5 < \text{AUC} < 0.8$ 时预测精度一般^[30,32,35,44]。

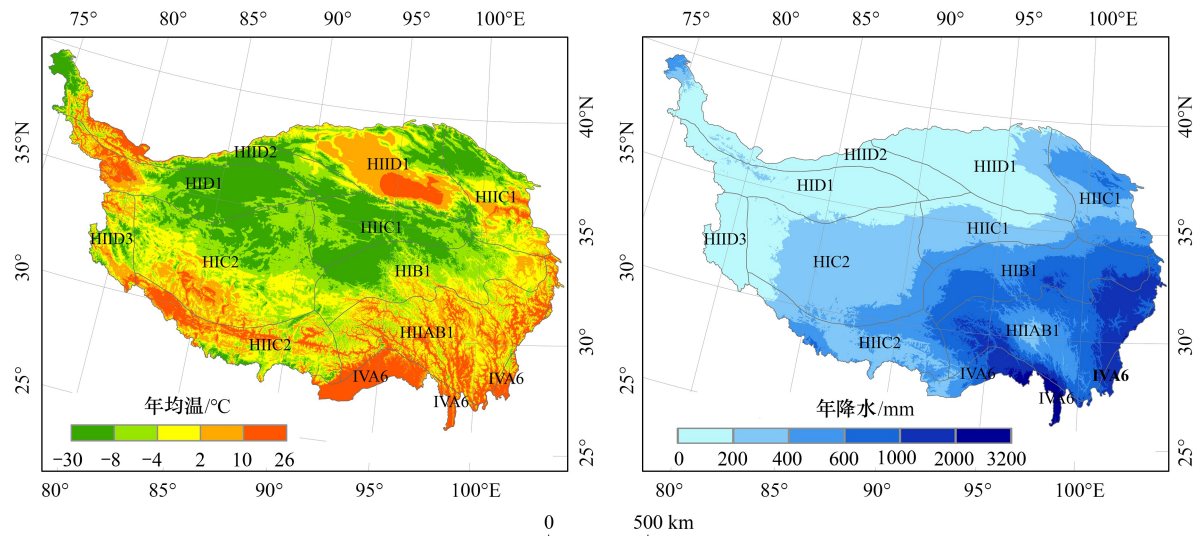


图 1 青藏高原生态-气候分区及近年来年均温及年降水量

Fig.1 The bio-climatic areas, annual mean temperature and annual total precipitation of the Qinghai-Tibetan Plateau in recent years

沿用文献^[47]标注方法,HI、HII、IVA6 表示 3 个不同的温度带,A、B、A/B、C、D 表示 5 个干/湿地区,共细分为 11 个生态气候分区(具体名称请参照表 2)

表 3 遴选后的濒危乔木空间分布建模环境因子

Table 3 Selected environmental indicators for modelling spatial distributions of endangered arbors

环境因子 Environmental factor	变量名 Factor	变量英文描述 Description	因子简称 Abbreviation	单位 Unit
气候因子 Climatic factor	月均日温差	Mean monthly temperature range	Bio_2	℃
	气温等温性	Isothermality	Bio_3	—
	气温年变化范围	Annual temperature range	Bio_7	℃
	最湿季节均温	Wettest season mean temperature	Bio_8	℃
	最冷季节均温	Coldest season mean temperature	Bio_11	℃
	降水的季节性	Seasonality of precipitation	Bio_15	—
	最湿季节降水量	Wettest season precipitation	Bio_16	mm
	最冷季降水量	Coldest season precipitation	Bio_19	mm
	土壤有效含水量	Available water content	AWC	kg/m ³
土壤因子 Soil factor	黏土含量	Clay Fraction	Clay	%
	盐分含量	Salinity	ECE	dS/m
	碱分含量	Sodicity	ESP	%
	土壤砾石含量	Gravel Content	Gravel	%
	有机碳含量	Organic Carbon	OC	% weight
	酸碱度	pH (H ₂ O)	PH	
	USDA 土壤分类	USDA Texture	USDA	—
地形因子 Terrain factor	海拔	Altitude	ASL	m

USDA:美国农业部 United states department of agriculture

1.3.2 适宜区评价

MaxEnt 模型输出结果为 ASCII 格式,适宜性指数 P 的范围为[0,1]。根据相关研究,将物种适宜分布范围划分为不适宜区和适宜区两类^[32,35,44]。

2 研究结果

2.1 濒危乔木潜在适宜区模拟结果

本研究中珍稀濒危乔木主要包括杨柳科 1 种、藜科 1 种、红豆杉科 1 种、5 种柏科乔木和 6 种松科乔木,共

14 种(表 1)。MaxEnt 结果表明,青藏高原主要的珍稀濒危乔木适宜生长区主要集中在青藏高原海拔相对较低、水热条件相对较好,植物的生长季相对较长的地区。其中胡杨、梭梭的潜在适宜生长区相似,分布范围相对较窄,均集中在高原北部的柴达木盆地周围。而紫果云杉、祁连圆柏、大果圆柏等树种的潜在适宜生长区范围较广,在高原的东、南部地区均有分布(图 2)。

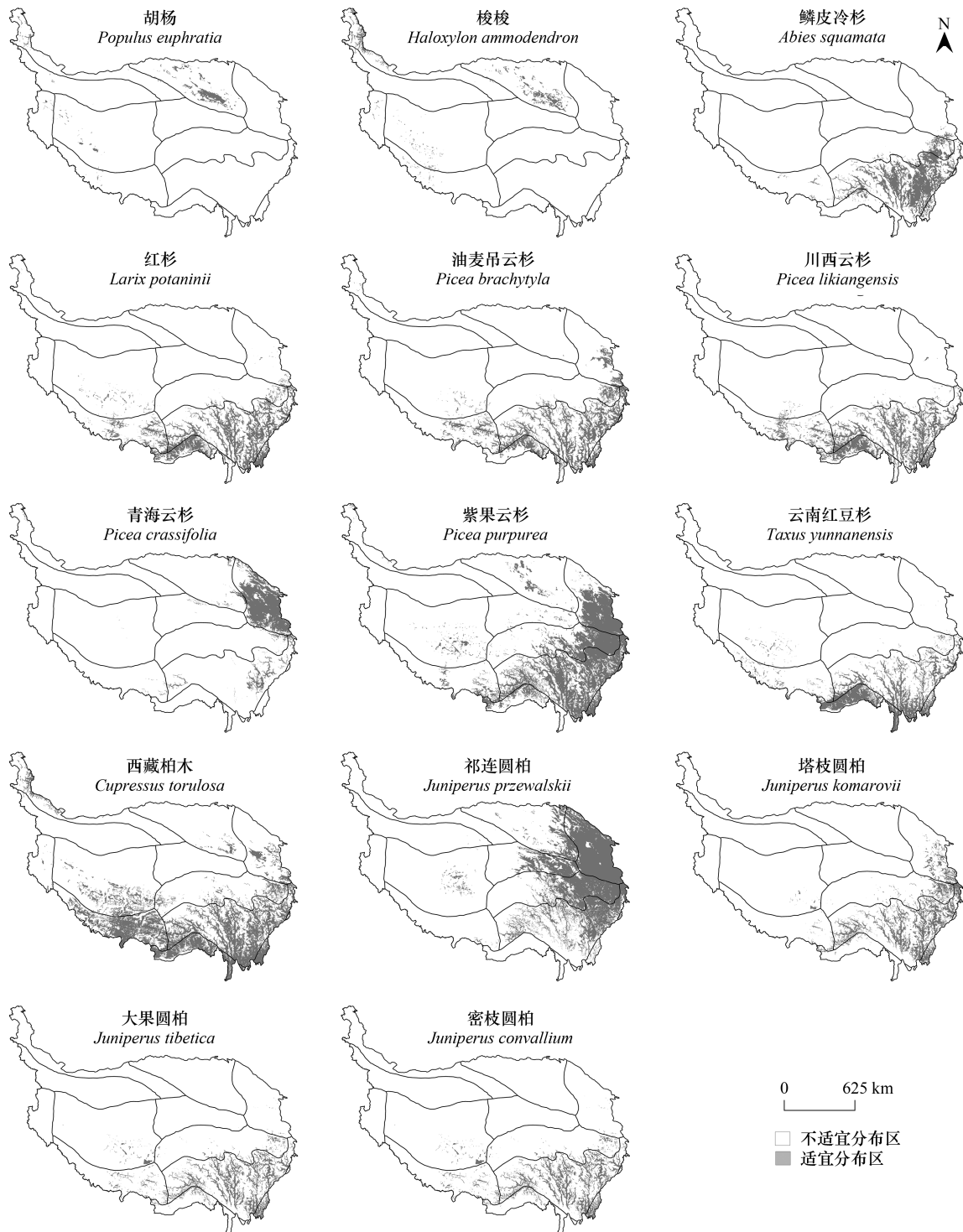


图 2 当前气候条件下濒危乔木潜在适宜区分布

Fig.2 The Suitable zones of the endangered arbors on the Qinghai-Tibetan Plateau

对于以上结果进行分树种逐一统计分析,结果显示,青藏高原 14 种代表性的濒危乔木的潜在适宜区面积为 2.93—51.54 万 km^2 ,各物种的分布区空间范围和面积差异较大。统计的各物种的分布面积如图 3 所示。

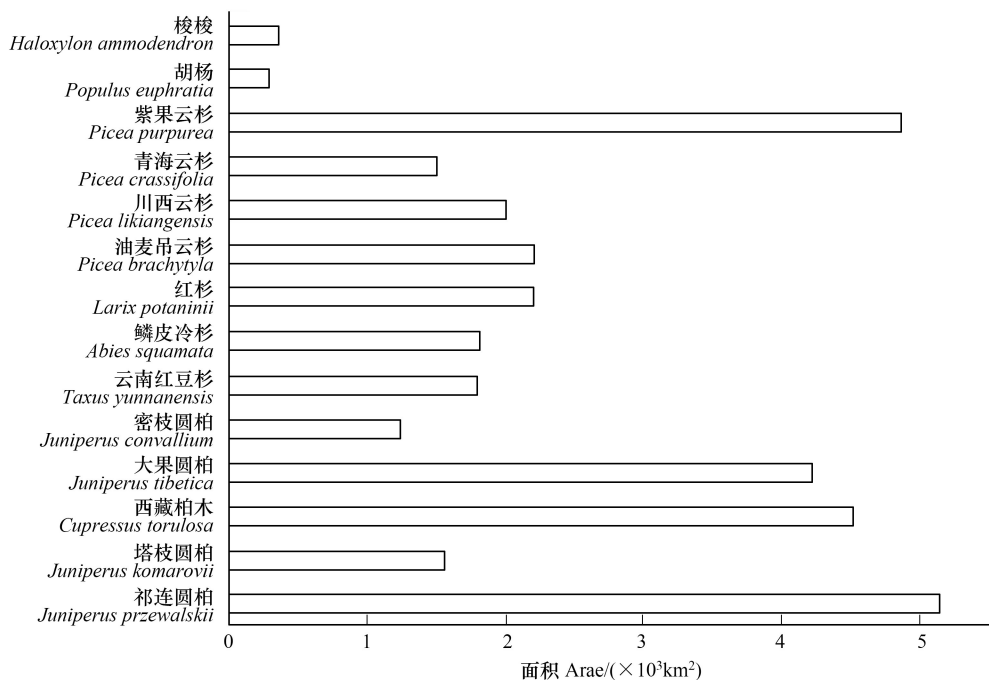


图 3 当前濒危乔木潜在适宜区面积

Fig.3 The potential suitable distribution areas of the endangered arbors on the Qinghai-Tibetan Plateau

松科树种中,全球松科约 230 余种,多产于北半球寒温带、寒带等全年温度相对较低的地区。我国的松树有 10 个属,113 个种和 29 个变种,是组成我国原始森林生态系统和人工次生林的重要树种。本研究中所选的 6 种代表性的珍稀濒危松科树种中,鳞皮冷杉潜在适宜区面积约为 18.2 万 km^2 ,主要集中在川西、高原东部高山深谷针叶林区、果洛-那曲高原山地高寒灌丛草甸区。红杉潜在适宜区面积约为 22.2 万 km^2 ,主要集中在藏东南山地亚热带、藏南高山谷地灌丛草原区中部和东南部、以及川西-藏东高山深谷针叶林区等地区。其中以紫果云杉面积最大,其潜在适宜区面积为 48.7 万 km^2 ,在藏东南各区及海拔相对较低的河谷区均有分布(图 3)。

柏科树种中,全球柏科共 22 个属约 150 种,其中我国柏树有 29 个种和 7 个变种,共计 8 个属。本研究主要选择了 5 个代表性濒危柏科树种。MaxEnt 结果显示,祁连圆柏潜在适宜区面积最大,约为 51.5 万 km^2 。主要分布在祁连山、青海省东部高山盆地针叶林/草原区、果洛-那曲高原山地高寒灌丛草甸区东部等地区。其他种主要集中在高原东南部的海拔相对较低、水热条件相对较好的河谷地区,分布相对较为集中。

红豆杉科树种中,本文仅选取了 1 种代表性的云南红豆杉。红豆杉是云南省级珍稀濒危树种。MaxEnt 结果显示,其适宜分布区的面积约为 18.1 万 km^2 ,主要分布在青藏高原东南部山地亚热带、川西-藏东高山深谷针叶林区南部。相对来说,梭梭和胡杨相对耐旱耐涝、抗盐碱胁迫能力也较强,是高原北部干旱区重要的防风固沙植物,具有重要的防风固沙等生态防护效益,两个树种主要集中在柴达木盆地荒漠区、昆仑高山高原高寒荒漠区等较为干旱的地区^[44]。

2.2 不同气候情景下适宜分布区变化

基于不同的气候变化情景,青藏高原在未来不同的温室气体排放情景下其总体以“暖”、“湿”化为主(图 4)。在 RCP 2.6 排放情景下,2050s 青藏高原年均降水量比当前平均增加约 26.6 mm;年均温比当前平均增加约 3.3 $^{\circ}\text{C}$ 。2070s 青藏高原年均降水量比当前平均增加约 27.6 mm,年均温比当前增加约 3.4 $^{\circ}\text{C}$ 。在其他 RCP

4.5 和 RCP 8.5 两个较高温室气体排放情景下,年平均最高温度、年平均温度、年平均最低温度、年降水量等的趋势基本一致,但增幅却更大。

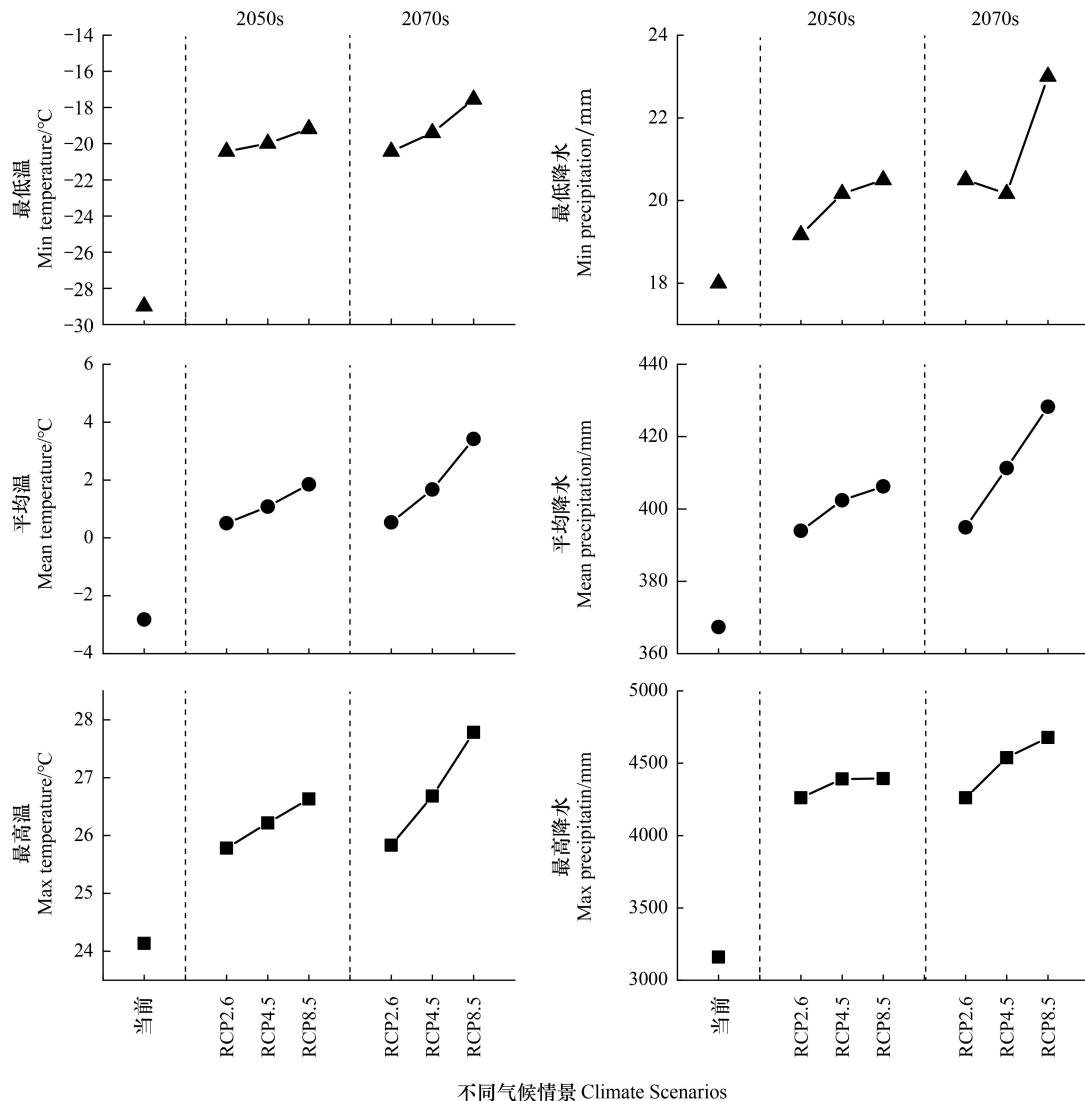


图4 不同气候情景青藏高原年均温、年均降水量变化

Fig.4 The changes of annual mean temperature and precipitation of the Qinghai-Tibetan Plateau under different climate scenarios

RCP: 代表性浓度途径 Representative concentration pathways

本文对未来不同气候情景下的每个濒危乔木的适宜分布进行了模拟。从模拟后统计结果来看,在未来气候变化背景下,2050s 大部分乔木潜在适宜区有增加趋势,2070s 濒危乔木潜在适宜区平均增减比例相等(图5)。

从 MaxEnt 的结果来看,当前至 2050s,适宜生长区退化最为明显的树种主要有紫果云杉、西藏柏木、川西云杉、祁连圆柏、胡杨、红杉等 6 种濒危乔木,而其中以西藏柏木退化范围最大。当前至 2070s,潜在适宜生长区退化明显的有塔枝圆柏、紫果云杉、祁连圆柏、大果圆柏、胡杨、川西云杉、梭梭等 7 种濒危乔木,而其中以紫果云杉退化较为显著。这些树种主要集中分布在低山河谷、海拔 4000 m 以下相对较低的沟谷、山前缓坡洪积带和阶地,一般以分化土、洪积土为主,土壤孔隙率高、厚度较高、有机质较为丰富、降水较好或靠近河流等水源相对较为丰富的地区。由于树冠一般较大,抗风能力差,因此高海拔、靠近山脊、开阔的高原顶部等均不适宜这些乔木生存;一般和中低山灌丛、高寒灌丛如杜鹃属、金露梅属、柳属、绣线菊属等相伴生或杂生,形成集

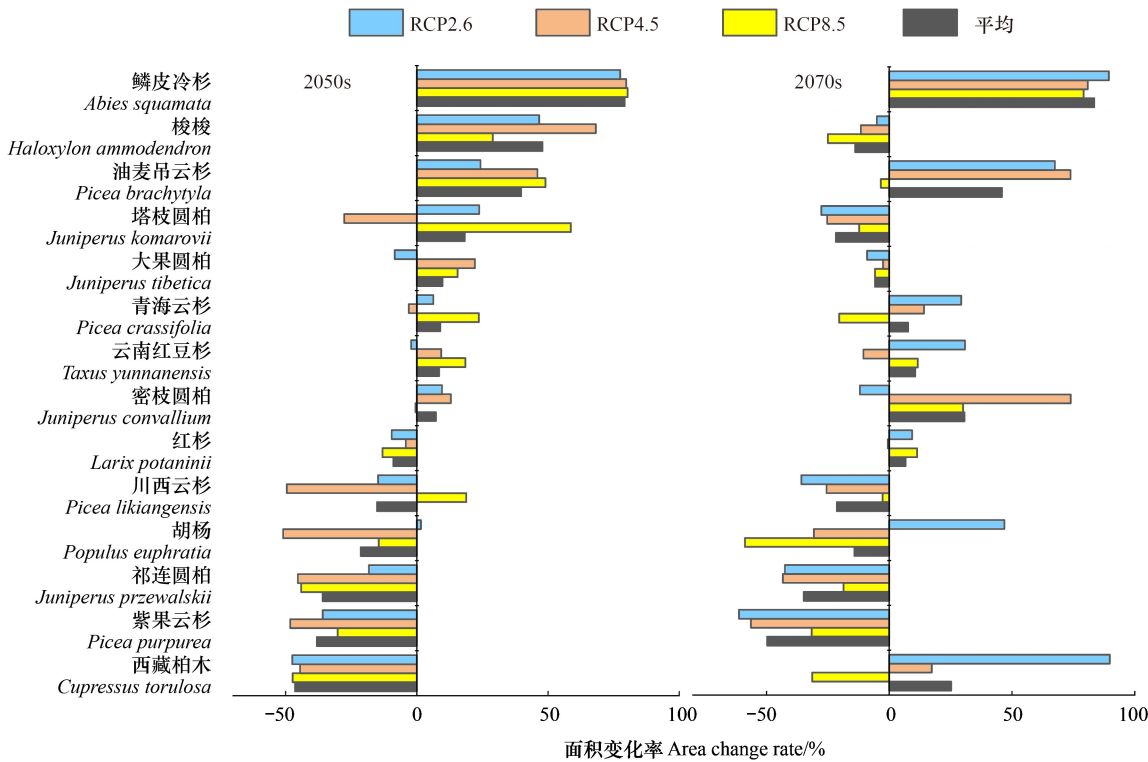


图 5 青藏高原濒危乔木 2050s、2070s 潜在适宜区面积变化
Fig.5 Changes of potential suitable areas of the endangered arbors in 2050s and 2070s

中连片的维系高原防风固沙、水源涵养、水土保持等重要生态功能的生态林。

2.3 濒危乔木适宜分布区及优先保护区分析

本文基于 14 种濒危乔木的当前分布结果,利用空间累积得分的方法得到濒危乔木的空间累积得分,最后对累积结果进行最大值-最小值归一化处理,得到了青藏高原基于 14 种濒危乔木的物种丰富度(图 6)。

从分析结果来看,当前物种丰富度较高且集中的区域主要分布在高原东南部的海拔较低、水热条件较好的河谷、中低山地带。这些区域的物种丰富度可达 0.6 以上,且分布范围较小,分布较为集中。而在高原的中、西部高海拔区域,濒危乔木的分布相对较少,物种丰富度普遍较低或接近于 0,显示出乔木在高海拔、高寒、少雨、生长季较短的中西部区域很难生存,分布范围有限。

结合已建立的国家级、省级自然保护区的分布来看(图 6),面积较大、覆盖范围较广的保护区,如祁连山国家公园、三江源国家公园、羌塘自然保护区、珠峰自然保护区等主要集中在青藏高原的中西部高海拔、物种丰富度较低的无人区,而在高原东南部濒危乔木丰富度较高的地区,自然保护区的数量和面积均较小,濒危乔木适宜分布区被自然保护区所覆盖的比例较低。通过 GAP 分析可以看出,在这些地区对濒危乔木形成了大量的保护空缺区,这对该地区濒危乔木的保护极为不

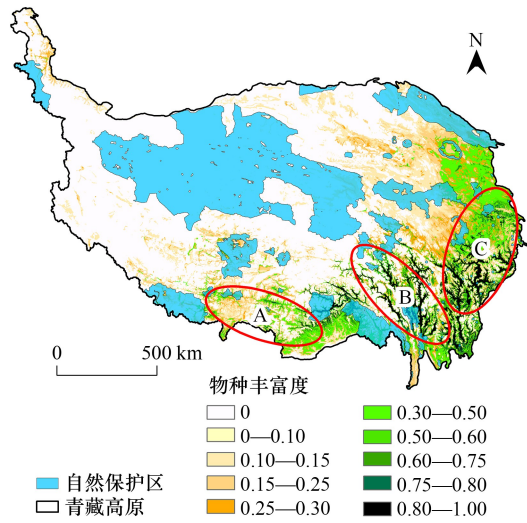


图 6 青藏高原濒危乔木丰富度及与已建自然保护区分布图
Fig.6 The endangered arbor richness and the established natural parks on the Qinghai Tibetan Plateau

利。而这些濒危乔木丰富度较高的地区,是其集中分布和保育的核心地带,应划为重点优先保护区,是未来规划和建立针对濒危乔木的自然保护区的关键地带。

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型精度及检验

本文所选的 14 种濒危乔木的样本量相对较高,平均有效样本量接近 50 个(表 1),能充分满足 MaxEnt 模型建模的需要。对于模拟的可信度,本研究中 14 个濒危物种中,无论是训练集还是测试集,其 AUC 值均 >0.8 ,表明 MaxEnt 结果的可信度较高、预测结果较好^[32,44,48]。较大的样本数量和较高的模型模拟可信度保证了本文所得的结果较为客观,对于计算物种的丰富度和提出优先保护区的科学性具有重要意义。

3.2 当前物种丰富度和未来适宜分布区的变化

本文基于当前气候条件所得的青藏高原濒危乔木的分布,主要以水热条件较好、生长季较长的青藏高原东南部的低海拔河谷、低海拔山地为主。可以看出,这些地区有着较高的物种丰富度和分布适宜性。较为适宜的气候条件,对于濒危乔木的越冬、适应高寒气候具有很重要的作用。相对应的,青藏高原的中、西部海拔较高的区域,如昆仑山高寒荒漠区、青海省南部高寒草甸草原区、羌塘高原高寒草原区等高寒、高海拔地区,则鲜有乔木的分布。高海拔、高寒、植物生长季较短、冬季严寒而漫长、越冬困难等恶劣自然气候条件限制了这些地区的乔木生长,乔木物种丰富度极低。

从未来的气候情景来看,RCP4.5 情景下,至 2050s 全区域年均温增加 3.9°C ,年均降水量增加 35.1 mm。潜在适宜区退化明显的有紫果云杉、川西云杉、红杉、西藏柏木、祁连圆柏、胡杨等,西藏柏木退化最大。相对应的,鳞皮冷杉、塔枝圆柏、青海云杉、密枝圆柏、大果圆柏、云南红豆杉、油麦吊云杉、梭梭等潜在适宜区扩张明显。至 2070s,潜在适宜区退化较为显著的有塔枝圆柏、大果圆柏、祁连圆柏、川西云杉、紫果云杉、梭梭、胡杨等。总体来看,暖湿化是青藏高原气候情景的总体趋势,在 2050s 大部分乔木潜在适宜区有增加的趋势,2070s 濒危乔木潜在适宜区平均增减比例相等(图 5)。

3.3 优先保护区的规划和建设

从目前已建立的保护区的分布来看,青藏高原地区的自然保护区大都集中于高原的中、西部地广人稀、乔木很难存活、植被稀少的区域。相应的,高原东、南部地区的自然保护区数量、面积、覆盖比例均相对较低,与青藏高原濒危乔木分布热点区的重叠比例较小,从而形成了对濒危乔木保护上的大片空缺区(图 6)。这种保护区和濒危物种空间分布上的不一致性,决定了保护区在保护青藏高原濒危乔木上的局限性。从本文得到的青藏高原乔木适宜分布热点区的分布来看,以下 3 个区域,是考虑保护区优先规划和建设的重点区域(图 6):

(A)雅鲁藏布江中下游河谷区。该区域生物气候类型主要以羌塘高原湖盆高寒草原区、东喜马拉雅山南翼山地常绿阔叶林带两种气候类型为主。主要分布有红杉、油麦吊云杉、川西云杉、紫果云杉、西藏柏木、云南红豆杉等珍稀濒危乔木(图 2)。该区域是藏东南地区水热条件较好的地区,受孟加拉湾湿热气团的影响,南亚季风在雨季沿林芝地区的低地和雅江河谷向北爬升,降水较为丰富,在低海拔河谷区,形成了雅鲁藏布江中下游河谷森林和其他物种的天然保育区,对雅江流域水源涵养和水土流失防护具有重要意义。但目前仍缺乏面积较大、覆盖范围较高的自然保护区,大片濒危乔木适宜分布区未被列入保护范围,是未来考虑保护区优先规划和建设的重点区域。

(B)青藏高原东南部横断山谷区。该地区主要的生物气候类型为川西藏东高山深谷针叶林区,以湿润半湿润气候为主,主要分布有鳞皮冷杉、红杉、油麦吊云杉、川西云杉、紫果云杉、塔枝圆柏、西藏柏木、大果圆柏、云南红豆杉等珍稀濒危乔木(图 2)。该区域是全球 36 个生物多样性热点地区之一,山地植被呈垂直带谱发育,物种丰富度极高,是高原乔木集中分布和保护的重点区。该区域也是金沙江、澜沧江、怒江这三条发源于青藏高原的大江的中、上游并流区,其水土保持和水源涵养意义重大。但目前已有的保护区范围较小或没有覆盖,保护空缺面积大,保护区的保护与保育功能很难发挥,亟需在该地区规划和扩建自然保护区范围,以实

现对青藏高原珍稀濒危乔木和其他物种的保护。

(C) 青藏高原东部川西高原河谷区。该地区的主要生物气候类型为果洛那曲高原山地高寒灌丛草甸区东部、川西藏东高山深谷针叶林区两个类型。主要在河谷和高原低海拔区集中分布了紫果云杉、油麦吊云杉、鳞皮冷杉、川西云杉、红杉、塔枝圆柏、祁连圆柏、大果圆柏、西藏柏木、云南红豆杉、密枝圆柏等珍稀濒危乔木(图2)。该地区是横断山和秦岭山脉之间的连接和过渡带,山地垂直带谱发育,物种分布类型较多,濒危乔木丰富度较高。但目前的保护区只有零星点状的以动物保护为主的分布(图6),缺乏对珍稀濒危乔木的有效覆盖和保护,因此亟需建立分布范围较广、覆盖度较高的自然保护区系统,形成对该区域包括濒危乔木在内的其他濒危物种的自然保护区或国家公园。

4 结论

本文选取了青藏高原代表性的14个珍稀濒危乔木作为研究对象,对其现状和未来气候情景下的分布进行了建模和丰富度分析,并对适宜分布区和优先保护区进行了探讨,主要的结论有:

(1) 青藏高原的珍稀濒危乔木主要集中在海拔相对较低、水热条件相对较好、生长季相对较长的东南部地区。

(2) 在未来气候变化背景下,2050s大部分乔木潜在适宜区有增加趋势,2070s濒危乔木潜在适宜区平均增减比例相等。

(3) 当前濒危乔木适宜分布的区域主要集中在高原东南部的海拔较低、水热条件较好的河谷、中、低山地带。但这些地区自然保护区的数量和面积均较低,濒危乔木适宜分布区被自然保护区所覆盖的比例较低,形成了大量的保护空缺区,对青藏高原濒危乔木的保护极为不利。

(4) 从本文得到的青藏高原濒危乔木适宜分布热点区的分布来看,雅鲁藏布江中下游河谷区、青藏高原东南部横断山谷区、青藏高原东部川西高原河谷区等3个地区,是考虑保护区优先规划和建设的重点区域,应适时建立自然保护区,发挥其对濒危乔木的保护作用。

参考文献(References):

- [1] Watson R, Albritton D, Barker T, Baskmakov I, Canziani O, Christ R, Cubasch U, Davidson O, Gitay H, Griggs D, Halsnaes K, Houghton J, House J, Kundzewicz Z, Lal M, Leary N, Magadza C, McCarthy J, Mitchell J, Moreira J, Munasinghe M, Noble I, Pachauri R, Pittock B, Prather M, Richels R, Robinson J, Sathaye J, Schneider S, Scholes R, Stocker T, Sundararaman N, Swart R, Taniguchi T, Zhou D. Climate Change 2001: synthesis Report: a contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [2] Wei Y Q, Fang Y P. Spatio-temporal characteristics of global warming in the Tibetan Plateau during the last 50 years based on a generalised temperature zone-elevation model. PLoS One, 2013, 8(4): e60044.
- [3] Lamsal P, Kumar L, Shabani F, Atreya K. The greening of the Himalayas and Tibetan Plateau under climate change. Global and Planetary Change, 2017, 159: 77-92.
- [4] Kuang X, Jiao J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121: 3979-4007.
- [5] Zhong L, Ma Y M, Xue Y K, Piao S L. Climate change trends and impacts on vegetation greening over the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(14): 7540-7552.
- [6] Beardall J, Stojkovic S, Larsen S. Living in a high CO₂ world: impacts of global climate change on marine phytoplankton. Plant Ecology & Diversity, 2009, 2(2): 191-205.
- [7] 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.
- [8] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F N, de Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Townsend Peterson A, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. Nature, 2004, 427: 145-148.
- [9] Jose V S, Nameer P O. The expanding distribution of the Indian Peafowl (*Pavo cristatus*) as an indicator of changing climate in Kerala, southern India: a modelling study using MaxEnt. Ecological Indicators, 2020, 110: 105930.
- [10] Lewis O T. Climate change, species-area curves and the extinction crisis. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2006, 361(1465): 163-171.
- [11] 吴成启, 唐登勇. 近50年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征. 水土保持研究, 2017, 24(6): 262-266, 272.
- [12] 魏彦强, 芦海燕, 王金牛, 孙建, 王旭峰. 近35年青藏高原植被带变化对气候变化及人类活动的响应. 草业科学, 2019, 36(4): 1163-1176, 927.

- [13] Biskaborn B K, Smith S L, Noetzi J, Matthes H, Vieira G, Streletskiy D A, Schoeneich P, Romanovsky V E, Lewkowicz A G, Abramov A, Allard M, Boike J, Cable W L, Christiansen H H, Delaloye R, Diekmann B, Drozdov D, Etzelmueller B, Grosse G, Guglielmin M, Ingeman-Nielsen T, Isaksen K, Ishikawa M, Johansson M, Johannsson H, Joo A, Kaverin D, Kholodov A, Konstantinov P, Kröger T, Lambiel C, Lanckman J P, Luo D L, Malkova G, Meiklejohn I, Moskalenko N, Oliva M, Phillips M, Ramos M, Sannel A B K, Sergeev D, Seybold C, Skryabin P, Vasiliev A, Wu Q B, Yoshikawa K, Zheleznyak M, Lantuit H. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, 10: 264.
- [14] Yang M X, Wang X J, Pang G J, Wan G N, Liu Z C. The Tibetan Plateau cryosphere: observations and model simulations for current status and recent changes. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 353-369.
- [15] Yao T D, Thompson L, Yang W, Yu W S, Gao Y, Guo X J, Yang X X, Duan K Q, Zhao H B, Xu B Q, Pu J C, Lu A X, Xiang Y, Kattel D B, Joswiak D. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [16] Wei Y Q, Lu H Y, Wang J N, Wang X F, Sun J. Dual influence of climate change and anthropogenic activities on the spatiotemporal vegetation dynamics over the qinghai-tibetan plateau from 1981 to 2015. *Earth's Future*, 2022, 10(5): e2021EF002566.
- [17] Wang S J, Wei Y Q. Qinghai-tibetan plateau greening and human well-being improving: the role of ecological policies. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1652.
- [18] Cui X F, Graf H F. Recent land cover changes on the Tibetan Plateau: a review. *Climatic Change*, 2009, 94(1): 47-61.
- [19] 赵健, 李蓉. 雅鲁藏布江流域土壤侵蚀区域特征初步研究. *长江科学院院报*, 2008, 25(3): 42-45.
- [20] 郑绍伟, 慕长龙, 陈祖铭, 龚固堂, 黎燕琼. 长江上游森林影响流域水文过程模拟分析. *生态学报*, 2010, 30(11): 3046-3056.
- [21] 陈龙, 谢高地, 裴厦, 张昌顺, 范娜, 张彩霞, 李士美. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2249-2256.
- [22] Korner C., Spehn E. M. Mountain biodiversity: a global assessment. Routledge, 2019.
- [23] Mu Y M, Fang O Y, Lyu L X. Nighttime warming alleviates the incidence of juniper forest growth decline on the Tibetan Plateau. *The Science of the Total Environment*, 2021, 782: 146924.
- [24] Betts M G, Yang Z Q, Hadley A S, Smith A C, Rousseau J S, Northrup J M, Nocera J J, Gorelick N, Gerber B D. Forest degradation drives widespread avian habitat and population declines. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6: 709-719.
- [25] 才让卓玛. 论果洛藏族民间信仰的生态伦理. *西北民族大学学报: 哲学社会科学版*, 2010(6): 73-76.
- [26] 杨立新, 裴盛基, 张宇. 滇西北藏区自然圣境与传统文化驱动下的生物多样性保护. *生物多样性*, 2019, 27(7): 749-757.
- [27] 赵艳. 青藏高原藏族民间宗教信仰生态伦理意识的思考. *青海民族研究*, 2013, 24(3): 103-105.
- [28] Liu J Y, Zou H X, Bachelot B, Dong T F, Zhu Z F, Liao Y C, Plenková-Moraj A, Wu Y. Predicting the responses of subalpine forest landscape dynamics to climate change on the eastern Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2021, 27(18): 4352-4366.
- [29] Phillips S J. A brief tutorial on Maxent. Princeton: AT&T Research, 2011.
- [30] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [31] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. in Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning 83 (Association for Computing Machinery, Banff, Alberta, Canada, 2004).
- [32] Wei Y Q, Zhang L, Wang J N, Wang W W, Niyati N, Guo Y L, Wang X F. Chinese caterpillar fungus (*Ophiocordyceps sinensis*) in China: current distribution, trading, and futures under climate change and overexploitation. *The Science of the Total Environment*, 2021, 755 (Pt 1): 142548.
- [33] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [34] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [35] Hu H W, Wei Y Q, Wang W Y, Ji S N, Wang S X, Chen Z, Guan J H, Deng Y F. Richness and distribution of endangered orchid species under different climate scenarios on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 948189.
- [36] Guisan A, Thuiller W, Zimmermann N E. Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [37] Senay S D, Worner S P, Ikeda T. Novel three-step pseudo-absence selection technique for improved species distribution modelling. *PLoS One*, 2013, 8(8): e71218.
- [38] 张亮, 魏彦强, 王金牛, 周强, 刘峰贵, 陈琼, 刘飞. 气候变化情景下黑果枸杞的潜在地理分布. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(4): 969-978.
- [39] 胡忠俊, 张懿锂, 于海彬. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 的青藏高原紫花针茅分布格局模拟. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 505-511.
- [40] Wu L, Wang M, Hua O Y, Cheng S K, Song M H. Spatial distribution modelling of *Kobresia Pygmaea* (Cyperaceae) on the qinghai-tibetan plateau. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(1): 20-29.
- [41] 刘文胜, 游简婷, 曾文斌, 齐丹卉. 气候变化下青藏苔草地理分布的预测. *中国草地学报*, 2018, 40(5): 43-49.
- [42] 李宁宁, 张爱平, 张林, 王克清, 罗红燕, 潘开文. 气候变化下青藏高原两种云杉植物的潜在适生区预测. *植物研究*, 2019, 39(3): 395-406.
- [43] 陆双飞, 陈禹衡, 周斯怡, 殷晓洁. 西南地区松属乔木对气候变化的响应. *森林与环境学报*, 2020, 40(5): 466-477.
- [44] 张亮. 青藏高原濒危植物潜在地理分布及保护区建设研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2020.
- [45] Fourcade Y, Engler J O, Rödder D, Secondi J. Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PLoS One*, 2014, 9(5): e97122.
- [46] Wang C G, Tang Z, Nan Z B. The caterpillar fungus boom on the Tibetan Plateau: curse or blessing? *China Economic Review*, 2018, 47: 65-76.
- [47] 郑度. 青藏高原自然地域系统研究. 中国科学: D 辑: 地球科学, 1996, 26(4): 336-341.
- [48] 许仲林, 赵传燕, 冯兆东. 祁连山青海云杉林物种分布模型与变量相异指数. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(4): 55-63.