•研究报告

基于MaxEnt模型的三江源区草地濒危 保护植物热点区识别

武晓宇^{1,2} 董世魁^{1*} 刘世梁¹ 刘全儒³ 韩雨晖¹
张晓蕾¹ 苏旭坤¹ 赵海迪¹ 冯 憬¹

¹ (北京师范大学环境学院, 北京 100875)

² (北京巧女公益基金会, 北京 100015)

³ (北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

摘要: 三江源地处全球生物多样性热点之一的青藏高原腹地, 是高寒草地生物多样性的集中分布区。但过去几十年中, 人为干扰和气候变化等因素导致高寒草地严重退化, 草地生物多样性受到极大威胁。本研究利用最大熵(MaxEnt)模型模拟了三江源区40种濒危保护植物当前及未来气候变化情景下的热点分布区。根据最大熵模型估计结果统计, 目前三江源濒危保护植物的热点区面积89,438 km², 主要分布于三江源东部和南部, 其中濒危物种大于30种的最热点地区面积485 km², 主要分布于囊谦县、玉树市、班玛县、久治县和河南县。未来在增温增湿的气候变化情景下, 最大熵模型模拟的三江源区草地濒危保护植物的热点区将向西北部扩大, 有利于植物多样性的维持和提升。然而, 模型模拟还发现, 在囊谦县、玉树市、班玛县、久治县和河南县等县市, 均有濒危保护植物大于25种以上的热点区域未被重点保护区覆盖, 总面积为4,423 km²。这一区域被划分为可开展畜牧生产活动的一般保护区, 受到人为干扰的可能性较大, 应予以更多关注与保护。

关键词: 生物多样性; 气候变化; 保护优先区; 最大熵模型

Identifying priority areas for grassland endangered plant species in the Sanjiangyuan Nature Reserve based on the MaxEnt model

Xiaoyu Wu^{1,2}, Shikui Dong^{1*}, Shiliang Liu¹, Quanru Liu³, Yuhui Han¹, Xiaolei Zhang¹, Xukun Su¹, Haidi Zhao¹, Jing Feng¹

¹ School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875

² Beijing Qiaonyu Foundation, Beijing 100015

³ College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract: Located in southern Qinghai Province in China, Sanjiangyuan is the source area for the Yangtze River, Yellow River, and Lancang River, and a worldwide biodiversity hotspot. Sanjiangyuan was degraded through human disturbance and climate change, which has led to a dramatic loss of the biodiversity of range-land resources. We conducted field surveys based on species coordinates during 2014 and 2015. We used the MaxEnt model to predict distribution of 40 endangered plant species in Sanjiangyuan using the species coordinate data and bioclimatic data collected from the WorldClim database. From this, we obtained hotspots of endangered plant species in Sanjiangyuan under current and future climatic conditions. Results showed that hotspot areas of endangered plant species in Sanjiangyuan estimated using the MaxEnt model were approximately 89,438 km², and mainly located in the east and south of the reserve. Among these hotspots, those that included more than 30 endangered plant species totalled 485 km², and were mainly found in Nangqian County, Yushu City, Banma County, Jiuzhi County, and Henan County. The climate will become warmer and wetter in Sanjiangyuan in the future, which would benefit biodiversity and expand hotspot areas to the northwest. However, problems associated with planning the reserve remain. Nearly 4,423 km² of hotspot ar-

收稿日期: 2017-06-26; 接受日期: 2017-12-01

基金项目: 国家重点研发计划专项课题(2016YFC0501906)和水环境模拟国家重点实验室重点项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: dsk03037@bnu.edu.cn

eas have not been protected in the key reserve, including in Nangqian County, Yushu City, Banma County, Jiuzhi County, and Henan County. In these areas grazing is permitted, which might lead to human disturbances. We suggest policy makers focus more attention on these areas and increase conservation efforts.

Key words: biodiversity; climate change; prior conservation area; MaxEnt model

生物多样性是人类生存的物质基础, 具有极大的生态系统服务价值(Costanza et al, 1997; 马克平和钱迎倩, 1998)。其中, 濒危物种的保护一直是保护生物学的核心问题之一(蒋志刚和樊恩源, 2003)。三江源位于青海省南部, 地处青藏高原腹地, 是长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地, 也是高寒草地的集中分布区。它不仅发挥着水源涵养、气候调节、牧业生产、碳汇等重要生态系统服务功能, 也是全球高寒生物和遗传基因的巨大贮存库(Myers et al, 2000; Dong et al, 2010)。据统计, 三江源区共有野生种子植物1,639种, 其中珍稀濒危保护植物逾百种(马莉贞和潘建斌, 2012; 孙海群等, 2013)。然而, 由于过度放牧、滥采乱挖和气候变化等因素的影响, 在过去的几十年中, 三江源区的草地严重退化, 草地生物多样性迅速减少, 植物物种濒危和灭绝速度加快(摆万奇等, 2002; 刘纪远等, 2008)。我国政府于2001年建立三江源国家级自然保护区, 启动了一系列生态恢复工程, 并取得了一定成效(邵全琴等, 2013)。但是, 三江源区的生物多样性保护仍面临一系列问题: 第一, 缺乏生物多样性基础资料的系统调查, 对该区生物多样性的本底认识不清; 第二, 缺乏生物多样性服务功能的全面评估, 对该区生物多样性的价值认识不足; 第三, 缺乏生物多样性热点区的科学识别, 对该区生物多样性的保护规划不清(<http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201404/W020140411568698686984.pdf>)。

生物多样性热点区域的识别是生物多样性保护规划的关键所在。通过生物多样性热点区域的识别, 可以利用有限的资金对更多的物种进行有效保护(Dalton, 2000; Myers et al, 2000)。近年来, 国外许多学者通过物种分布模型来识别保护物种的热点保护区, 从而制定科学、合理的保护规划(Murray-Smith et al, 2009)。其中, 最大熵(MaxEnt)模型是以最大熵理论为基础的物种分布预测模型(Phillips et al, 2006)。MaxEnt首先从物种已知分布区域确定特征空间, 然后寻找限制物种分布的约束条件, 构筑约束集合, 建立二者之间的相互关系。它通过已知

物种坐标和对应气候数据建立方程, 进而预测物种在其他区域的分布情况。由于其准确性高且可以在物种分布点较少的条件下仍获得较准确的结果而被广泛应用(Phillips et al, 2006; Pearson et al, 2007)。例如, Murray-Smith等(2009)运用MaxEnt模型预测了巴西大西洋海岸森林的物种分布热点区域, 并指出优先保护区域的范围。郭彦龙等(2014)运用MaxEnt模型预测了濒危保护植物之一的桃儿七(*Sinopodophyllum hexandrum*)在气候变化下的潜在分布。然而, 在三江源乃至整个青藏高原的生物多样性保护研究中, 运用MaxEnt模型识别保护物种热点区的研究鲜见报道。因此, 本研究拟利用MaxEnt模型对三江源区草地濒危保护植物的热点区进行识别, 并预测不同气候变化情景下热点区的变化趋势, 为三江源区草地植物多样性保护的规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江源自然保护区地处青藏高原腹地(31°39'–36°12' N, 89°45'–102°23' E), 覆盖了玉树藏族自治州、果洛藏族自治州全境和海南藏族自治州、黄南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州的部分地区, 总面积为39.5万km²。保护区属高原山地气候, 冷暖交替、干湿分明、水热同期。年平均气温–5.6至7.8℃, 年降水量262.2–772.8 mm, 年日照时数2,300–2,900 h, 年太阳辐射量5,658–6,469 MJ/m²。保护区内有多种青藏高原特有种和经济植物, 有维管束植物87科471属2,308种, 其中种子植物种数占全国的8.5%(<http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201404/W020140411568698686984.pdf>)。

1.2 濒危保护植物的划分

本研究所用的三江源区草地濒危保护植物名录参考了《中国珍稀濒危保护植物名录》(国家环境保护局和中国科学院植物研究所, 1987)(《中国物种红色名录》(第一卷)(汪松和解焱, 2004)和《国家重点保护野生植物名录》(第一批)(国家林业局和农业部, 1999,

图1 三江源自然保护区濒危保护植物样点分布

Fig. 1 The location of the collected sampling points of the endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve

http://www.gov.cn/gongbao/content/2000/content_60072.htm/)和待公布的第二批(<http://www.plant.csdb.cn/protectlist>)。其中,濒危保护植物主要分为两类:一类是以世界自然保护联盟(IUCN)濒危等级和标准划分的濒危植物,其濒危等级根据物种数量和栖息地面积的规模以及减少程度来划分,本研究中主要有极危、濒危、易危、近危和无危5类;另一类是由国家林业局、农业部在国务院核准后发布的国家重点保护植物,分为一级保护植物和二级保护植物两类。两类植物互有重叠,其中青海省内有濒危保护植物146种,而三江源区濒危保护植物100种,其中非乔木植物83种^①。

1.3 物种地理坐标确认与采集

通过中国数字植物标本馆(www.cvh.ac.cn/)确认三江源区的濒危保护物种名单并获得相关信息,包括地理坐标、采集地点、采集人等。所有包含采集地点的坐标都通过百度地图的坐标拾取系统(<http://api.map.baidu.com/lbsapi/getpoint/index.html/>)进行准确校正,没有标明坐标的标本则通过该功能根据标本采集地点对坐标进行补全。此外,我们于2014年和2015年在三江源地区进行了大范围的实地调查,通过全球定位系统(GPS, Garmin GPSMAP60CSX, 北京佳明航电公司)对调查到的

濒危保护物种坐标进行记录(图1)。整理所有濒危植物的坐标,对于1 km²内的相同物种坐标只保留其中之一,以防止模型的重复计算造成结果偏差。本研究共获取到60种植物的有效坐标,其中有40种濒危保护植物的有效坐标超过5个,能够通过MaxEnt模型较为准确地模拟出物种的潜在分布(Pearson et al, 2007)。在40个物种中,5个为青海省特有种,分别为:南山龙胆(*Gentiana grumii*)、短柄鹅观草(*Roegneria brevipes*)、青海鹅观草(*R. kokonorica*)、青海固沙草(*Orinus kokonorica*)和华福花(*Sinadoxa corydalifolia*),占三江源区濒危保护植物中青海特有种的80% (吴玉虎, 2006)。中国特有种16个,占三江源区濒危保护植物中国特有种的64% (附录1)。

1.4 物种分布模型

1.4.1 环境数据

我们最初选择与植物生长相关的气温、降水等19个气候因子作为环境数据用以模拟三江源濒危保护植物目前和未来的分布区域(表1)。为避免气候因子的过度拟合,我们将贡献率低和性质相近的气候因子剔除,获得了模拟不同三江源濒危保护植物分布的气候因子(附录2)。当前气候数据源于世界气候数据库1950–2000年(WorldClim-Global Climate Data version 1.4, <http://www.worldclim.org/>),气候数据的空间分辨率为30" (~1 km) (Hijmans et al, 2005)。未来气候数据选择政府间气候变化专门委员

① 马莉贞 (2011) 青海省珍稀濒危保护植物的区系地理特征及保护现状研究. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.

表1 19个生物气候环境因子及其描述
Table 1 19 bioclimatic variables and their descriptions

变量	Variable	描述	Description
Bio1		年均温	Annual mean temperature
Bio2		平均温度日较差	Mean diurnal temperature range
Bio3		等温性	Isothermality
Bio4		温度季度变化	Temperature seasonality
Bio5		最热月最高温	Max temperature of warmest month
Bio6		最冷月最低温	Min temperature of coldest month
Bio7		年温度变化范围	Temperature annual range
Bio8		最湿季度均温	Mean temperature of wettest quarter
Bio9		最干季度均温	Mean temperature of driest quarter
Bio10		最暖季度均温	Mean temperature of warmest quarter
Bio11		最冷季度均温	Mean temperature of coldest quarter
Bio12		年平均降水量	Annual precipitation
Bio13		最湿月降水量	Precipitation of wettest month
Bio14		最干月降水量	Precipitation of driest month
Bio15		降水量变异系数 (coefficient of variation)	Precipitation seasonality (coefficient of variation)
Bio16		最湿季度降水量	Precipitation of wettest quarter
Bio17		最干季度降水量	Precipitation of driest quarter
Bio18		最暖季度降水量	Precipitation of warmest quarter
Bio19		最冷季度降水量	Precipitation of coldest quarter

会(IPCC)第五次报告中推荐的5个全球气候变化模型, 包括: MIROC5、GISS-E2-R、HadGEM2-AO、BCC-CSM-1、CCSM4 (IPCC, 2013)。由于不同气候变化模型预测结果差异较大, 因而预测物种在气候变化下的未来分布结果存在不确定性(Meehl et al, 2007), 利用不同的气候变化模型模拟物种未来分布时会产生不同的结果(Goberville et al, 2015)。为减少由单个气候变化模型造成的不确定性, 本研究采用了多种气候变化模型综合模拟的方法(multiple models means), 这种方法已经被较多学者应用于物种未来分布的研究中(Beaumont et al, 2007; Gould et al, 2014)。该方法可能会忽略一些未来气候变化的极端情况, 结果相对保守, 但能够避免不同模型在模拟气候变化时出现的偏热、偏冷、偏干或偏湿等情况。本研究应用5个气候变化模型, 通过ArcGIS 9.3提取这些气候变化模型的平均值, 再导入MaxEnt模型中对物种未来分布进行模拟。由于2015年全球气候变化巴黎大会通过了全球共同合作在2100年使增温不超过工业革命前2℃, 目前仅碳排放路径RCP2.6符合要求, 因此本研究将模拟

RCP2.6情景下三江源濒危保护植物未来分布情况。

1.4.2 模型优化与参数选择

通过MaxEnt模型3.3.3k版本进行三江源濒危植物分布的计算(<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt/>)。采用Jackknife方法进行模型评估, 具体是在建立某个物种的模型时, 将其中一个物种的坐标移除, 并建立基于剩余 $n - 1$ 个坐标的模型, 由此每个物种可以建立 n 个模型。最终选择其中结果最优的模型。采用这种方法的原因是由于濒危植物坐标较少, 不能采用传统的设置训练集和测试集的方法(Pearson et al, 2007)。MaxEnt模型得出较为准确的结果需要每个物种至少5个不同的坐标值。因此, 我们也将其作为计算物种分布时的最低标准。

使用模型的默认设置(Murray-Smith et al, 2009; 刘振生等, 2013; Wulff et al, 2013)。模型结果用受试者工作特征曲线下的面积值进行检验(AUC), 其标准为: $0.9 < AUC < 1.0$, 高度准确; $0.8 < AUC < 0.9$, 良好; $0.7 < AUC < 0.8$, 有用(Swets, 1988)。

1.4.3 物种多样性热点区预测

采用最小存在临界值(lowest presence threshold)来判断物种的栖息地分布(Pearson et al, 2007)。该方法是通过模型模拟出物种分布的适生性概率分布, 其中输入的物种存在坐标所处的最低适生概率即为该物种最小存在的临界值, 高于这个概率的区域可以作为这个物种的栖息地。

通过MaxEnt模型得到各物种的最优分布模型后, 利用ArcGIS 9.3 的栅格计算器功能, 对各物种分布图层进行叠加计算, 得到每一栅格内物种存在的总数, 继而获得全区的濒危保护植物分布的热点区域。

2 结果

2.1 模型的准确性

本研究对三江源区40种濒危植物分布的模拟均可接受, 其平均AUC为0.926, 表明模型预测结果可靠性较高。其中, 28个物种模拟的AUC大于0.9, 表明模型预测结果非常可靠; 12个物种模拟的AUC大于0.8, 表明模型预测结果较为可靠(表2)。

2.2 三江源濒危保护物种分布

模型模拟结果表明, 三江源濒危保护植物分

表2 MaxEnt模型模拟三江源自然保护区濒危植物当前分布的模型预测准确性(AUC值)
Table 2 The AUC value of predicted distribution of endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve based on MaxEnt model

物种 Species	AUC值 AUC value	物种 Species	AUC值 AUC value
褐紫乌头 <i>Aconitum brunneum</i>	0.969	广布红门兰 <i>Orchis chusua</i>	0.910
八宿雪灵芝 <i>Arenaria baxoiensis</i>	0.969	宽叶红门兰 <i>Orchis latifolia</i>	0.919
三刺草 <i>Aristida trisetia</i>	0.978	河北红门兰 <i>Orchis tschiliensis</i>	0.995
华雀麦 <i>Bromus sinensis</i>	0.962	青海固沙草 <i>Orinus kokonorica</i>	0.982
凹舌兰 <i>Coeloglossum viride</i>	0.948	川赤芍 <i>Paeonia veitchii</i>	1.000
毛杓兰 <i>Cypripedium franchetii</i>	0.997	羽叶点地梅 <i>Pomatosace filicula</i>	0.833
黑紫披碱草 <i>Elymus atratus</i>	0.867	小丛红景天 <i>Rhodiola dumulosa</i>	0.992
短芒披碱草 <i>Elymus breviaristatus</i>	0.884	喜马拉雅红景天 <i>Rhodiola himalensis</i>	0.876
矮麻黄 <i>Ephedra minuta</i>	0.930	圆丛红景天 <i>Rhodiola juparensis</i>	0.830
单子麻黄 <i>Ephedra monosperma</i>	0.839	狭叶红景天 <i>Rhodiola kirilowii</i>	0.911
中华羊茅 <i>Festuca sinensis</i>	0.915	四裂红景天 <i>Rhodiola quadrifida</i>	0.844
南山龙胆 <i>Gentiana grumii</i>	0.880	粗茎红景天 <i>Rhodiola wallichiana</i>	0.844
西南手参 <i>Gymnadenia orchidis</i>	0.942	短颖鹅观草 <i>Roegneria breviglumis</i>	0.906
落地金钱 <i>Habenaria aitchisonii</i>	0.981	短柄鹅观草 <i>Roegneria brevipes</i>	0.953
裂瓣角盘兰 <i>Herminium alaschanicum</i>	0.984	青海鹅观草 <i>Roegneria kokonorica</i>	0.980
角盘兰 <i>Herminium monorchis</i>	0.981	云状雪兔子 <i>Saussurea aster</i>	0.818
沼兰 <i>Malaxis monophyllos</i>	0.983	苞叶雪莲 <i>Saussurea obvallata</i>	0.927
红花绿绒蒿 <i>Meconopsis punicea</i>	0.921	红叶雪兔子 <i>Saussurea paxiana</i>	0.855
颈果草 <i>Metaeritrichium microuloides</i>	0.873	羌塘雪兔子 <i>Saussurea wellbyi</i>	0.916
羌活 <i>Notopterygium incisum</i>	0.940	华福花 <i>Sinadoxa corydalifolia</i>	0.993

布自西北向东南呈现逐渐增多的规律。其中,三江源西部的杂多县、治多县、唐古拉山乡和北部的曲麻莱县基本没有濒危保护植物存在。多数濒危保护植物分布于三江源中南部的玉树市、囊谦县、班玛县、久治县和东北部的泽库县、同德县及河南县(图2)。

三江源濒危保护植物的分布受不同气候因子影响。少数濒危保护植物分布的主导影响因子相对单一,例如矮麻黄(*Ephedra minuta*)、圆丛红景天(*Rhodiola juparensis*)分别只受降水量变异系数或年均温的影响;而多数濒危保护植物的分布受多个影响因子主导(附录2)。

2.3 三江源濒危保护植物的热点区

结果显示:三江源濒危保护植物热点区主要分布在东部和南部地区,热点区总面积为89,438 km²,占三江源自然保护区总面积的22.6%。

濒危保护植物达到30种以上的最热点区域面积为485 km²,主要分布在囊谦县的白扎林场、玉树市通天河附近及江西保护区、班玛县的玛可河林场、久治县年宝玉则保护区及其东部和河南县的中

东部地区。濒危保护植物在25–30种之间的热点区域面积为7,285 km²,主要分布于最热点区的周围,包括河南县北部以及泽库县东北部的麦秀林场。濒危保护植物在20–25种之间的热点区域面积达21,490 km²,主要分布于囊谦县和玉树市最热点区的外围,包括班玛县和久治县的东部,河南县全域,泽库县南部和西部、同德县北部以及同德县南部与玛沁县东部交界的中铁–军功地区。濒危保护植物在15–20种之间的热点区域面积为32,002 km²,除以上各地区外,还分布于称多县南部、达日县东北部、久治县西部、贵德县西南与东北部、兴海县东南部等。濒危保护植物在10–15种之间的热点区域面积为28,182 km²,除以上区域周边外,主要分布于称多县北部、玛多县全域及兴海县东北部(图3)。

2.4 气候变化情景下三江源濒危保护植物的热点区变化

2.4.1 气候变化的不确定性分析

在RCP2.6情景下,2070年三江源区平均温度将比目前增长约1.88℃,年平均降水量增加5.76%。虽然整体上三江源的气候变化趋势是增温增湿,但不

图2 基于MaxEnt模型的三江源自然保护区草地濒危植物当前分布概率图。物种存在概率为0-1，暖色为物种存在概率高的区域，最高为红色，依次下降为橙色、黄色、绿色、青色、淡青色，深蓝色为最低。

Fig. 2 The probability graph of current distribution of the grassland endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve based on MaxEnt models. The species existing probability range from 0 to 1. Warmer colors show areas with higher predicted probability, red is the highest, followed by orange, yellow, green, cyan, light cyan and dark blue.

图3 三江源自然保护区草地濒危保护植物多样性热点分布图

Fig. 3 The distribution graph of the grassland endangered plant species hotspots in Sanjiangyuan Nature Reserve

图4 气候变化RCP2.6情景下2070年三江源自然保护区草地濒危保护植物多样性热点分布图

Fig. 4 The distribution map of the grassland endangered plant species hotspots in Sanjiangyuan Nature Reserve under RCP2.6 of climate change in 2070

同模型对气候变化量的预测有较大差异(附录3)。例如,有些气候变化模型对年均气温的预测结果较低,而一些模型的预测结果偏高,导致年均气温变化的差异从增加40%到60%不等。这导致利用单一气候变化模型模拟物种未来分布可能产生较大的偏差。对于未来气候模型的预测难以断定最优模型,因此本文采用多模型综合方法以减少模型预测的不确定性。

2.4.2 气候变化下三江源濒危保护植物分布变化

模型预测结果表明,增温增湿背景下,三江源濒危保护植物的分布将向西部和北部扩大,40种濒危保护草地植物中,35种的分布面积在未来有所增加,只有5种面积减少,分别是:川赤芍(*Paeonia veitchii*)、圆丛红景天、落地金钱(*Habenaria aitchisonii*)、颈果草(*Metaeritrachium microulodes*)和广布红门兰(*Orchis chusua*)。

将三江源濒危保护植物的未来分布区域叠加发现:热点区的总面积达到157,741 km²,占三江源自然保护区总面积的39.93%,较当前面积增加76.36%。其中,濒危植物在30种以上的热点区面积为13,985 km²,较当前面积增大5.7倍。主要由当前热点区向周边扩大,其中囊谦南部、久治县东部、河南县大部分区域及泽库县东部扩大显著。濒危植物在25–30种的热点区面积为7,181 km²,主要是班玛县和达日县北部面积增加。濒危植物在20–25种的热点区面积为21,154 km²,主要是在三江源东北部扩大,在泽库县西北部、同德县北部、兴海县东北部大面积增加。濒危植物在10–20种的热点区面积为115,420 km²,主要向三江源的西部和北部扩大,在杂多县、称多县、曲麻莱县和玛多县都有大面积增加(图4)。

图5 三江源自然保护区草地濒危保护植物热点区保护情况

Fig. 5 The protection situation of the grassland endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve

3 讨论

本研究通过MaxEnt模型对三江源濒危保护植物热点区进行预测, 基于已获得的物种坐标和气候数据, 预测了难以实地调查区域的濒危保护植物分布情况, 对三江源的生物多样性保护工作是必要的补充。由于研究区基础资料缺乏, 本研究预测的物种数接近研究区草地濒危保护植物物种的50%, 仍较为有限。在环境因子的选择方面, 本研究采用了温度和水分两项气候因子。第一, 温度和水分因子是影响植物物种分布最具决定性的因子; 第二, 温度和水分因子具有大范围、长期、稳定的观测数据, 且被多数学者采用。然而, 其他因子对植物物种分布也有一定的影响。如土壤因子在区域尺度的植物物种分布中有着较为重要的作用(John et al, 2007)。在小尺度景观中, 地形因子通过影响其他生态因子对植物分布产生影响(Canton et al, 2004)。因此本研究的结果存在不确定性, 仍需要更多的数据和研究进行完善。但研究发现最热点区主要分布于三江源的白扎、江西、东仲、通天河沿、玛可河、麦秀几大林场, 这些区域是三江源植物多样性最丰富的地区之一^①, 包含大多数未模拟甚至未发现的物种的可能性大, 证明了本研究结果较为可靠。

生物多样性保护优先区的识别有多种标准, 包括生物多样性的丰富度、濒危保护物种丰富度、最

小面积物种丰富度、考虑风险和成本的系统规划理论等(Myers et al, 2000; Orme et al, 2005; Wilson et al, 2006; Liana et al, 2008; 张路等, 2015; Chi et al, 2017)。本研究根据濒危保护物种丰富度识别热点区, 主要考虑了以下两点: 第一, 目前已将三江源全区设为保护区, 面积广大, 濒危保护植物热点区的识别有助于对保护区内区域功能的认识; 第二, 濒危保护植物热点区是生物多样性保护优先区识别的基础, 通过对该区域开展生态风险、人为干扰、保护成本的分析, 可进一步对保护优先区进行识别。

本研究结果表明, 三江源濒危保护植物热点区主要分布于保护区东部和南部, 面积89,438 km²。这些地区主要为高寒草甸分布区, 不仅为濒危保护植物提供了重要栖息地, 同时也是生物多样性富集的地区, 应作为三江源生物多样性保护的优先区域。其中, 濒危保护植物大于30种和25–30种的热点区主要分布于囊谦县、玉树市、班玛县、久治县、河南县和泽库县, 面积分别为485 km²和7,285 km², 应对这些地区予以关注。

三江源区在未来增温增湿的气候变化趋势已被广泛认同(Zhang et al, 2013; Jiang & Zhang, 2015)。在RCP2.6的未来情景下, 温度和降水都相较于目前有小幅提升, 有利于三江源濒危植物的生存, 部分濒危植物由于栖息地面积扩大, 濒危等级可能降低, 这需要未来进一步研究。因此, 在未来气候变化背景下, 人类活动是三江源濒危保护植物的主要干扰。

① 邹大林 (2005) 三江源自然保护区森林植物多样性及其重点保护植物评价. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

三江源自然保护区二期规划中的重点保护区为18个相对独立的保护区,面积19.8万km²,功能为保护和管理典型生态系统和野生动植物栖息地;其余地区主要为一般保护区,面积18.91万km²,可根据资源环境承载能力适当发展畜牧业生产经营活动。通过重点保护区片区图(青海三江源生态保护和建设办公室提供)与本研究的热点区进行叠加,有部分热点区被重点保护区庇护,包括囊谦县、玉树市东部和北部、称多县南部的濒危植物热点区被江西保护区、白扎林场以及东仲、通天河沿保护区等覆盖,班玛县东部和久治县中部的濒危植物热点区被玛可河林场和年宝玉则保护区覆盖,兴海县南部、同德县西南部和玛沁县东北部的濒危植物热点区被中铁—军功保护区覆盖,泽库县东部的濒危植物热点区被麦秀林场保护区覆盖。但同时,也有较大面积的地区未被重点保护区庇护(图5)。三江源的中南部、东北部和东南部都有热点区不处于重点保护区内,其中囊谦县、玉树市、班玛县、久治县和河南县均有濒危保护植物大于25种以上的热点区域未被重点保护区覆盖,面积为4,423 km²。尤其是河南县,全县濒危保护植物物种丰富,但该县全部属于一般保护区,一直以来受人为干扰(包括过度放牧、非法建设和开采等)的影响较为严重,植物栖息地被破坏的潜在风险高(刘敏超等, 2007)。

三江源自然保护区二期规划对生物多样性保护的目标尚不够具体,对濒危植物的保护几乎没有说明(<http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201404/W020140411568698686984.pdf>)。由于保护区面积较大,对该区域需要更进一步的功能划分。对于一般保护区内濒危物种最丰富的地区,建议采取相应的措施减少生产活动。

参考文献

- Bai WQ, Zhang YL, Xie GD, Shen ZX (2012) Analysis of formation causes of grassland degradation in Maduo County in the source region of Yellow River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 823–826. (in Chinese with English abstract) [摆万奇, 张德钊, 谢高地, 沈振西 (2012) 黄河源区玛多县草地退化成因分析. *应用生态学报*, 13, 823–826.]
- Beaumont L, Pitman A, Poulsen M, Hughes L (2007) Where will species go? Incorporating new advances in climate modelling into projections of species distributions. *Global Change Biology*, 13, 1368–1385.
- Canton Y, Barrio GD, Sole-Benet A, Lazaro R (2004) Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain. *Catena*, 55, 341–365.
- Chi XL, Zhang ZJ, Xu XT, Zhang XB, Zhao ZP, Liu YN, Wang QG, Wang H, Li Y, Yang G, Guo LP, Tang ZY, Huang LQ (2017) Threatened medicinal plants in China: Distributions and conservation priorities. *Biological Conservation*, 210, 89–95.
- Costanza R, Groot RD, Farberk S, Grasso M, Hannon B, Limburg KE, Naeem S, Paruelo JM, Raskin RG, Sutton P, Belt MVD (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 386, 253–260.
- Dalton R (2000) Biodiversity cash aimed at hotspots. *Nature*, 406, 818.
- Dong SK, Wen L, Zhu L, Li XY (2010) Implication of coupled natural and human systems in sustainable rangeland ecosystem management in HKH region. *Frontiers of Earth Science in China*, 4, 42–50.
- Goberville E, Beaugrand G, Hautekeete N, Piquot Y, Luczak C (2015) Uncertainties in the projection of species distributions related to general circulation models. *Ecology and Evolution*, 5, 1100–1116.
- Guo YL, Wei HY, Lu CY, Zhang HL, Gu W (2014) Predictions of potential geographical distribution of *Sinopodophyllum hexandrum* under climate change. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 249–261. (in Chinese with English abstract) [郭彦龙, 卫海燕, 路春燕, 张海龙, 顾蔚 (2014) 气候变化下桃儿七潜在地理分布的预测. *植物生态学报*, 38, 249–261.]
- Gould S, Beeton N, Harris R, Hutchinson M, Lechner A, Porfirio L, Mackey B (2014) A tool for simulating and communicating uncertainty when modelling species distributions under future climates. *Ecology and Evolution*, 4, 4798–4811.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- IPCC (2013) Climate change 2013: The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM). Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Jiang C, Zhang LB (2015) Climate change and its impact on the eco-environment of the Three-Rivers Headwater Region on the Tibetan Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 12057–12081.

- Jiang ZG, Fan EY (2003) Exploring the endangered species criteria: Rethinking the IUCN Red List Criteria. *Biodiversity Science*, 11, 382–392. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 樊恩源 (2003) 关于物种濒危等级标准之探讨——对IUCN物种濒危等级的思考. 生物多样性, 11, 382–392.]
- John R, Dalling JW, Harms KE Yavitt JB, Stallard RF, Mirabello M, Hubbell SP, Valencia R, Navarrete H, Vallejo M, Foster RB (2007) Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 864–869.
- Liana NJ, Richard FM, Hugh PP (2008) Optimal allocation of resources among threatened species: A project prioritization protocol. *Conservation Biology*, 23, 328–338.
- Liu JY, Xu XL, Shao QQ (2008) The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters region in Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 63, 364–376. (in Chinese with English abstract) [刘纪远, 徐新良, 邵全琴 (2008) 近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征. 地理学报, 63, 364–376.]
- Liu MC, Li DQ, Wen YM, Luan XF (2006) Assessment of the priorities of species diversity conservation in Sanjiangyuan region by GIS. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(4), 51–54. (in Chinese with English abstract) [刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 栾晓峰 (2006) 基于GIS的三江源地区物种多样性保护优先性分析. 干旱区资源与环境, 20(4), 51–54.]
- Liu ZS, Gao H, Teng LW, Su Y, Wang XQ, Kong FY (2013) Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MaxEnt modeling. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 7243–7249. (in Chinese with English abstract) [刘振生, 高惠, 滕丽微, 苏云, 王晓勤, 孔芳毅 (2013) 基于MaxEnt模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价. 生态学报, 33, 7243–7249.]
- Ma KP, Qian YQ (1998) Biodiversity conservation and its research progress. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 4, 95–99. (in Chinese with English abstract) [马克平, 钱迎倩 (1998) 生物多样性保护及其研究进展. 应用与环境生物学报, 4, 95–99.]
- Ma LZ, Pan JB (2012) Floristic study of rare and endangered plants and national key protected plants in Qinghai Province. *Journal of Northwest Normal University*, 48(1), 78–85. (in Chinese with English abstract) [马莉贞, 潘建斌 (2012) 青海省珍稀濒危植物的区系研究. 西北师范大学学报, 48(1), 78–85.]
- Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P, Gaye AT, Gregory JM, Kitoh A, Knutti R, Murphy JM, Noda A, Raper SCB, Watterson IG, Weaver AJ, Zhao Z (2007) Global climate projections. In: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL). Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Murray-Smith C, Brummitt NA, Oliverira-Filho AT, Bachman S, Moat J, Lughadha EMN, Lucas EJ (2009) Plant diversity hotspots in the Atlantic coastal forests of Brazil. *Conservation Biology*, 23, 151–163.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GABD, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–859.
- Orme CD, Davies RG, Burgess M, Rigenbrod F, Pickup N, Olson VA, Webster AJ, Ding TS, Rasmussen PC, Ridgely RS, Stattersfield AJ, Bennett PM, Blackburn TM, Gaston KJ, Owens IP (2005) Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat. *Nature*, 436, 1016–1019.
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Peterson AT (2007) Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34, 102–117.
- Phillips S, Anderson RI, Schapille RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distribution. *Ecological Modeling*, 190, 231–259.
- Shao QQ, Liu JY, Huang L, Fan JW, Xu XL, Wang JB (2013) Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve. *Geographical Research*, 32, 1645–1656. (in Chinese with abstract) [邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 樊江文, 徐新良, 王军邦 (2013) 2005–2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. 地理研究, 32, 1645–1656.]
- State Environmental Protection Administration, Institute of Botany of the Chinese Academy of Sciences (1987) *China Rare and Endangered Plant Species List, Vol I*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [国家环境保护局, 中国科学院植物所 (1987) 中国珍稀濒危保护植物名录(第一册). 科学出版社, 北京.]
- Sun HQ, Shi HX, Ma L (2013) Floristic study on Sanjiangyuan National Nature Reserve. *Chinese Journal of Grassland*, 35(3), 85–91. (in Chinese with English abstract) [孙海群, 石红霄, 马雷 (2013) 三江源自然保护区种子植物区系分析. 中国草地学报, 35(3), 85–91.]
- Swets JA (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240, 1285–1293.
- Wang S, Xie Y (2004) *China Species Red List, Vol I: Red List*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [汪松, 解焱 (2004) 中国物种红色名录, 第一卷: 红色名录. 高等教育出版社, 北京.]
- Wilson KA, McBride MF, Bode MF Possingham HP (2006) Prioritizing global conservation efforts. *Nature*, 440,

- 337–340.
- Wu YH (2006) The Endemic Species of Seed Plants and Their Eco-geographic Distribution in Qinghai. *Acta Botanica Yunnanica*, 28, 327–336. (in Chinese with English abstract) [吴玉虎 (2006) 青海种子植物特有种及其生态地理分布. 云南植物研究, 28, 327–336.]
- Wulff AS, Hollingsworth PM, Ahrends A, Jaffre T, Veillon JM, Huillier LL, Fogliani B (2013) Conservation priorities in a biodiversity hotspot: Analysis of narrow endemic plant species in New Caledonia. *PLoS ONE*, 8, e73371.
- Zhang L, Guo HD, Ji L, Lei LP, Wang CZ, Yan DM, Li B, Li J (2013) Vegetation greenness trend (2000 to 2009) and the climate controls in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7, 1–17.
- Zhang L, Ouyang ZY, Xu WH (2015) Theory, work frame and hot issues of systematic conservation planning. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1284–1295. (in Chinese with English abstract) [张路, 欧阳志云, 徐卫华 (2015) 系统保护规划的理论、方法及关键问题. 生态学报, 35, 1284–1295.]
- (责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 本研究中所用40种三江源自然保护区濒危保护植物物种名录

Appendix 1 The list of the 40 endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve in this study
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017188-1.pdf>

附录2 三江源自然保护区40种濒危植物及主要气候因子贡献率

Appendix 2 The contribution of the main bioclimatic variables of the 40 endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017188-2.pdf>

附录3 2070年全球气候变化模型RCP2.6情景下三江源自然保护区19种气候因子变化情况

Appendix 3 The variation of the 19 bioclimatic variables under RCP2.6 of Global Climate Models in Sanjiangyuan Nature Reserve in 2070
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017188-3.pdf>

武晓宇, 董世魁, 刘世梁, 刘全儒, 韩雨晖, 张晓蕾, 苏旭坤, 赵海迪, 冯憬. 基于MaxEnt模型的三江源区草地濒危保护植物热点区识别. 生物多样性, 2018, 26 (2): 138–148.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017188>

附录 1 本研究中所用 40 种三江源自然保护区濒危保护植物物种名录

Appendix 1 The list of the 40 endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve in this study

物种	特有性	保护级别	濒危等级
Species	Endemism	Protection level	Endangered category
褐紫乌头 <i>Aconitum brunneum</i>			易危
八宿雪灵芝 <i>Arenaria baxoiensis</i>			易危
三刺草 <i>Aristida triset</i>	中国特有	II	
华雀麦 <i>Bromus sinensis</i>	中国特有	II	
凹舌兰 <i>Coeloglossum viride</i>		II	近危
毛杓兰 <i>Cypripedium franchetii</i>	中国特有	I	易危
黑紫披碱草 <i>Elymus atratus</i>	中国特有	II	
短芒披碱草 <i>Elymus breviaristatus</i>	中国特有	II	
矮麻黄 <i>Ephedra minuta</i>			近危
单子麻黄 <i>Ephedra monosperma</i>			近危
中华羊茅 <i>Festuca sinensis</i>	中国特有	II	
南山龙胆 <i>Gentiana grumii</i>			易危
西南手参 <i>Gymnadenia orchidis</i>		II	易危
落地金钱 <i>Habenaria aitchisonii</i>		II	近危
裂瓣角盘兰 <i>Herminium alaschanicum</i>	中国特有	II	近危
角盘兰 <i>Herminium monorchis</i>		II	近危
沼兰 <i>Malaxis monophyllos</i>		II	近危
红花绿绒蒿 <i>Meconopsis punicea</i>	中国特有	II	
颈果草 <i>Metaeritrichium microuloides</i>			易危
羌活 <i>Notopterygium incisum</i>			易危
广布红门兰 <i>Orchis chusua</i>		II	
宽叶红门兰 <i>Orchis latifolia</i>		II	近危
河北红门兰 <i>Orchis tschiliensis</i>	中国特有	II	近危
青海固沙草 <i>Orinus kokonorica</i>	青海特有	II	
川赤芍 <i>Paeonia veitchii</i>			易危
羽叶点地梅 <i>Pomatosace filicula</i>	中国特有	II	
小丛红景天 <i>Rhodiola dumulosa</i>		II	
喜马拉雅红景天 <i>Rhodiola himalensis</i>		II	
圆丛红景天 <i>Rhodiola juparensis</i>		II	
狭叶红景天 <i>Rhodiola kirilowii</i>		II	
四裂红景天 <i>Rhodiola quadrifida</i>		II	
粗茎红景天 <i>Rhodiola wallichiana</i>		II	
短颖鹅观草 <i>Roegneria breviglumis</i>	青海特有	II	
短柄鹅观草 <i>Roegneria brevipes</i>	中国特有	II	
青海鹅观草 <i>Roegneria kokonorica</i>	青海特有	II	
云状雪兔子 <i>Saussurea aster</i>			易危
苞叶雪莲 <i>Saussurea obvallata</i>			易危
红叶雪兔子 <i>Saussurea paxiana</i>	中国特有		濒危
羌塘雪兔子 <i>Saussurea wellbyi</i>			濒危
华福花 <i>Sinadoxa corydalifolia</i>	青海特有	II	易危

附录2 三江源自然保护区40种濒危植物及主要生物气候因子贡献率

Appendix 2 The contribution of the main bioclimatic variables of the 40 endangered plant species in Sanjiangyuan Nature Reserve

物种	主要生物气候因子	贡献率	物种	主要生物气候因子	贡献率
Species	Main bioclimatic variables	Contribution	Species	Main bioclimatic variables	Contribution
矮麻黄 <i>Ephedra minuta</i>	降水量变异系数	100.0%	裂瓣角盘兰	最热月最高温	37.5%
凹舌兰 <i>Coeloglossum viride</i>	降水量变异系数	37.1%	<i>Herminium</i>	年均温	34.5%
	平均温度日较差	34.5%	<i>alaschanicum</i>	平均温度日较差	32.9%
	年均温	14.8%	羌活	降水量变异系数	56.3%
	最干月降水量	13.6%	<i>Notopterygium</i>	平均温度日较差	36.2%
苞叶雪莲 <i>Saussurea obvallata</i>	温度季度变化	74.2%	<i>incisum</i>	年温度变化范围	5.2%
	最冷季度均温	19.9%		最干月降水量	2.3%
	降水量变异系数	5.0%	羌塘雪兔子	温度季度变化	42.7%
	年温度变化范围	0.9%	<i>Saussurea wellbyi</i>	年温度变化范围	34.4%
川赤芍 <i>Paeonia veitchii</i>	平均温度日较差	80.6%		降水量变异系数	22.4%
	等温性	11.6%		最干季降水量	0.5%
	最冷季度均温	6.4%	青海鹅观草	最暖季度均温	50.8%
	温度季度变化	1.0%	<i>Roegneria</i>	等温性	26.1%
	最干月降水量	0.3%	<i>kokonorica</i>	降水量变异系数	16.5%
	最湿月降水量	0.1%		年均温	5.8%
单子麻黄 <i>Ephedra monosperma</i>	降水量变异系数	69.3%		最冷月最低温	80.0%
	最热月最高温	16.2%	青海固沙草 <i>Orinus kokonorica</i>	最热月最高温	99.4%
	平均温度日较差	14.2%		最暖季度均温	0.4%
	最湿月降水量	0.2%		温度季节变化	20.0%
短柄鹅观草 <i>Roegneria brevipes</i>	最冷月最低温	88.7%	三刺草 <i>Aristida trisetata</i>	年均温	43.4%
	最热月最高温	8.0%		平均温度日较差	31.3%
	年均温	3.2%		最热月最高温	20.4%
短芒披碱草 <i>Elymus breviaristatus</i>	最热月最高温	49.8%		降水量变异系数	3.6%
	降水量变异系数	48.0%		最干月降水量	1.2%
	最暖季度均温	2.3%		最暖季度均温	0.1%
短颖鹅观草 <i>Roegneria breviglumis</i>	年均温	72.6%	四裂红景天	最热月最高温	66.6%
	平均温度日较差	16.7%	<i>Rhodiola quadrifida</i>	年均温	22.1%
	最热月最高温	6.7%		最暖季度均温	11.3%
	降水量变异系数	4.0%	喜马拉雅红景天	最暖季度均温	26.1%
黑紫披碱草 <i>Elymus atratus</i>	最冷月最低温	74.0%	<i>Rhodiola himalensis</i>	温度季度变化	25.7%
	年均温	15.1%		等温性	17.6%
	最冷季降水量	7.3%		最冷月最低温	15.5%
	最暖季度均温	3.6%		降水量变异系数	9.7%
红花绿绒蒿	年平均降水量	63.4%		最干月降水量	3.2%
<i>Meconopsis punicea</i>	平均温度日较差	20.2%		最热月最高温	1.2%
	最冷季度降水量	11.1%		最干季度降水量	0.7%
	降水量变异系数	5.4%		最冷季度降水量	0.1%
红叶雪兔子 <i>Saussurea</i>	降水量变异系数	83.6%	羽叶点地梅	降水量变异系数	99.7%

武晓宇, 董世魁, 刘世梁, 刘全儒, 韩雨晖, 张晓蕾, 苏旭坤, 赵海迪, 冯憬. 基于MaxEnt模型的三江源区草地濒危保护植物热点区识别. 生物多样性, 2018, 26 (2): 138–148.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017188>

<i>paxiana</i>	等温性	16.0%	<i>Pomatosace filicula</i>	最冷季度均温	0.3%
	最冷季度降水量	0.4%	狭叶红景天	降水量变异系数	52.4%
华福花 <i>Sinadoxa</i>	最冷月最低温	67.3%	<i>Rhodiola kirilowii</i>	年均温	26.7%
<i>corydalifolia</i>	等温性	26.2%		最冷季度均温	18.4%
	温度季节变化	5.8%		最暖季度均温	1.8%
	最热月最高温	0.7%		最冷月最低温	0.8%
华雀麦 <i>Bromus sinensis</i>	温度季度变化	51.6%	云状雪兔子	降水量变异系数	86.9%
	等温性	40.4%	<i>Saussurea aster</i>	年均温	13.4%
	最冷季度均温	8.0%		最暖季度均温	0.1%
角盘兰 <i>Herminium</i>	最暖季度均温	73.7%	沼兰 <i>Malaxis</i>	平均温度日较差	45.1%
<i>monorchis</i>	平均温度日较差	17.3%	<i>monophyllos</i>	最热月最高温	33.6%
	最热月最高温	5.4%		年均温	19.8%
	年均温	3.6%		等温性	1.0%
宽叶红门兰 <i>Orchis</i>	降水量变异系数	56.0%		最干月降水量	0.5%
<i>latifolia</i>	年均温	24.8%	中华羊茅 <i>Festuca</i>	最冷月最低温	82.0%
	平均温度日较差	9.6%	<i>sinensis</i>	最热月最高温	14.3%
	最干月降水量	7.7%		最暖季度均温	2.9%
	年平均降水量	1.8%		降水量变异系数	0.4%
八宿雪灵芝 <i>Arenaria</i>	最冷月最低温	92.7%		最湿月降水量	0.4%
<i>baxoiensis</i>	温度季节变化	6.9%	毛杓兰	最冷月最低温	56.1%
	最冷季度均温	0.4%	<i>Cypripedium</i>	等温性	27.5%
粗茎红景天 <i>Rhodiola</i>	温度季节变化	57.2%	<i>franchetii</i>	温度季节变化	16.1%
<i>wallichiana</i>	最冷月最低温	36.0%		年温度变化范围	0.3%
	最冷季度均温	2.4%	西南手参	等温性	62.1%
	最暖季度均温	1.6%	<i>Gymnadenia</i>	年均温	18.4%
	最干月降水量	0.9%	<i>orchidis</i>	最冷季度均温	12.5%
	年平均降水量	0.8%		年平均降水量	5.0%
	年温度变化范围	0.7%		降水量变异系数	1.9%
	最冷季度降水量	0.3%		最湿季度降水量	0.1%
广布红门兰 <i>Orchis</i>	最冷季度均温	99.9%	小丛红景天	等温性	42.3%
<i>chusua</i>	年温度变化范围	0.1%	<i>Rhodiola dumulosa</i>	温度季节变化	39.1%
河北红门兰 <i>Orchis</i>	最冷季度均温	70.6%		平均温度日较差	15.9%
<i>tschiliensis</i>	年均温	27.8%		最干月降水量	2.6%
	最热月最高温	1.6%	圆丛红景天	降水量变异系数	100.0%
褐紫乌头 <i>Aconitum</i>	平均温度日较差	46.1%	<i>Rhodiola juparensis</i>		
	降水量变异系数	27.4%	南山龙胆 <i>Gentiana</i>	年均温	61.3%
	年平均降水量	26.5%	<i>grumii</i>	最热月最高温	35.9%
落地金钱 <i>Habenaria</i>	等温性	74.0%		最暖季度均温	2.3%
	温度季节变化	13.4%		最冷月最低温	0.5%
<i>aitchisonii</i>	平均温度日较差	8.8%	颈果草	降水量变异系数	90.5%
	年温度变化范围	3.4%	<i>Metaeritrichium</i>	最暖季度均温	9.5%
			<i>microuloides</i>

附录3 2070年全球气候变化模型RCP2.6情景下三江源自然保护区19种气候因子变化情况(菱形为5种气候变化模型模拟结果的平均值, 虚线为标准差)

Appendix 3 The variation of the 19 bioclimatic variables under RCP2.6 of Global Climate Models in Sanjiangyuan Nature Reserve in 2070 (The rhombuses and the imaginary lines referred to the mean $\pm$ SD of the results of 5 global climate models)