

# 基于MaxEnt模型的青藏高原草原毛虫虫害发生趋势预测

陈文静<sup>1,2</sup>, 陈珂璐<sup>1</sup>, 马丽<sup>2</sup>, 马文良<sup>3</sup>, 张中华<sup>2</sup>, 周华坤<sup>2\*</sup>

(1. 茅台学院, 贵州 遵义 564507; 2. 中国科学院西北高原生物研究所青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 海西蒙古族藏族自治州林业站, 青海 德令哈 817099)

**摘要:**【目的】草原毛虫是青藏高原主要害虫之一, 受到气候变化的强烈影响。预测未来气候变化影响下的草原毛虫虫害发生情况, 有利于制定合理的草原管理政策。【方法】基于从公开文献获取的24个草原毛虫虫害发生位点, 利用MaxEnt模型和GIS软件模拟了两种社会共享经济路径(Shared Socio-economic Pathways, SSPs)下当前(2021—2040年)和未来(2081—2100年)草原毛虫虫害的潜在发生区。【结果】1)在两种SSPs下主导当前和未来草原毛虫虫害发生的环境因子均为年降水量和坡度; 2)在两种SSPs下, 未来草原毛虫虫害发生的最适宜年降水量较当前有所升高, 最适宜坡度较当前降低; 3)在两种SSPs下, 未来草原毛虫虫害发生中高风险区面积较当前有所降低; 4)未来草原毛虫虫害发生中高风险区海拔范围在SSP126下下移, 其海拔分布上限和下限在SSP585下分别下移和上移。【结论】气候变化将不利于草原毛虫虫害的发生。未来制约草原毛虫虫害发生的主要环境因子是年降水量。现有的基于野外控制试验的草原毛虫研究不足以模拟气候变化情境下的情况, 未来草原毛虫相关研究需着重关注降水的变化。

**关键词:**草原毛虫; 青藏高原; 最大熵模型; 虫害发生

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)02-0237-08

**DOI:**10.13817/j.cnki.cycp.2024.02.025



青藏高原因其独特的地理条件和水热条件等因素, 对气候变化极为敏感<sup>[1]</sup>。大量研究表明, 气候变化强烈驱动着青藏高原高寒草地生态系统的生态过程<sup>[2]</sup>。研究未来气候变化背景下的青藏高原生态学问题有助于政府制定合理的生态管理措施。

草原毛虫是指鳞翅目(Lepidoptera)毒蛾科(Lymantriidae)草原毛虫属(*Gynaephora*)昆虫, 该类昆虫共有15个种, 其中有8个种分布于青藏高原, 是青

高原草地的主要虫害种类之一<sup>[3]</sup>。该类昆虫主要以禾草、莎草类等植物为食, 可造成草地植被严重破坏, 导致草地退化<sup>[3]</sup>。同时, 草原毛虫被毛或口腔分泌物与人体接触可造成手部、眼部感染<sup>[4]</sup>。目前, 关于草原毛虫的研究大多集中于生活史、虫害发生调查与评价、防治措施等领域。近年来, 一些研究表明全球气候变化与草原毛虫生长发育、种群格局以及与植物互作关系等密切相关。例如, 余新超等<sup>[5]</sup>和陈珂璐等<sup>[6]</sup>通过模拟增温控制试验, 发现适度增温有利于草原毛虫生长发育及种群维持。曹慧等<sup>[7]</sup>和Cao等<sup>[8]</sup>通过红外增温控制试验发现增温有利于青藏高原牧区草原毛虫适合度的提升。史长光等<sup>[9]</sup>通过模拟增温和氮素添加控制试验发现增温和氮添加导致草原毛虫存活率增加, 顾慧洁等<sup>[10]</sup>发现草原毛虫密度随氮素添加梯度增加而升高, 暗示气候变化可能增加草原毛虫成灾风险, 但与此相反, Yang等<sup>[11]</sup>发现氮素添加可以通过降

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-06-11

基金项目: 青海省自然科学基金创新团队项目(2021-ZJ-902); 国家自然科学基金联合基金项目(U21A20186)

作者简介: 陈文静(1990-), 女, 贵州都匀人, 博士。

E-mail: chenwj886@163.com

\*通信作者。E-mail: hkzhou@nwipb.cas.cn

低地表温度抑制草原毛虫的取食活动。此外,气候变暖引起的植物多样性丧失也可导致草原毛虫数量发生改变<sup>[12]</sup>。总之,全球气候变化将对草原毛虫产生显著影响,但目前对于全球气候变化背景下的草原毛虫害发生及分布情况的相关研究仍处于探索阶段。

最大熵模型(MaxEnt)是一种基于物种存在位点和环境变量预测物种分布的模型,该模型可以在物种分布与环境因子之间关系不明确的情况下进行预测,同时,对于物种分布点数据较少的情况下预测依然稳健<sup>[13]</sup>。近年来,最大熵模型的适用范围被不断拓展。例如,熊巧利等<sup>[14]</sup>将MaxEnt模型从物种尺度拓展到了植被大类的生境模拟。此外,在植物病虫害发生领域也有良好表现。杜志宏<sup>[15]</sup>运用MaxEnt模型预测气候变化情境下稻瘟病的发生区域。于跃<sup>[16]</sup>将MaxEnt模型用于分析大兴安岭林区落叶松毛虫虫害发生的环境因子。

综上,我们利用MaxEnt模型对未来气候变化情景下青藏高原草原毛虫虫害的发生进行预测分析,以期对草原毛虫防治和青藏高原草地管理措施的制定提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

青藏高原位于我国西部,北起西昆仑山—祁连山脉北麓,南抵喜马拉雅山等山脉南麓,西自兴都库什山脉和帕米尔高原西缘,东抵横断山等山脉东缘,地理范围为25°59′30″N~40°1′0″N,67°40′37″E~104°40′57″E,总面积 $3.0834 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平均海拔4320 m。在行政区域上,青藏高原分布于中国、印度、巴基斯坦、塔吉克斯坦、阿富汗、尼泊尔、不丹、缅甸、吉尔吉斯斯坦等9个国家。其中约83.7%的范围位于中国境内,平均海拔4400 m,主要包括青海、西藏、新疆、甘肃、四川、云南等省区<sup>[17]</sup>。本研究所用青藏高原边界为张懿铨等<sup>[17]</sup>发表的数据。草原毛虫分布区域的共同特点有:低温、干旱、夏季凉爽、冬季漫长、植物生长季短和生境中天敌数量多等,毛虫多呈斑块状分布,占据空间狭小<sup>[3]</sup>。

### 1.2 数据获取

根据现行草原毛虫虫害防治标准,将草原毛虫虫害发生标准定为幼虫虫口密度 $\geq 30 \text{ 头/m}^2$ 。草原毛虫

虫害发生数据从目前公开发表的文献中获取。具体方法为:通过中国知网按主题检索“草原毛虫”以及通过web of science按Topic检索“grassland caterpillar”的文献,从检索到的文献中筛选出虫口密度达到30头/ $\text{m}^2$ 且明确标明经纬度坐标(或通过所述采样点、研究区域等信息能基于奥维互动地图等软件确定经纬度坐标)的数据作为草原毛虫虫害发生分布位点数据,共获得24个位点数据(表1)。

表1 草原毛虫虫害发生分布位点

Table 1 Occurrence and distribution sites of grassland caterpillar infestation

序号	经度(E)	纬度(N)	参考文献
1	100.169 555 6	37.677 872 22	[18]
2	100.652 583 3	37.720 833 33	[19]
3	101.208 444 4	37.657	[20]
4	100.885	34.097 777 78	[21]
5	100.389 833 3	36.745 361 11	[22]
6	99.718 166 67	37.195 361 11	[23]
7	91.791 388 89	31.063 055 56	[24]
8	100.757 5	37.056 666 67	[25]
9	96.747 35	32.890 591 67	
10	96.621 536 11	32.892 211 11	
11	97.348 247 22	33.355 186 11	
12	97.453 047 22	33.300 455 56	
13	97.520 902 78	33.315 516 67	
14	95.819 122 22	33.786 644 44	[26]
15	95.808 786 11	34.034 533 33	
16	95.737 875	33.913 033 33	
17	97.407 502 78	33.332 169 44	
18	96.640 025	33.165 85	
19	97.3	33.408 333 33	[27]
20	97.424 166 67	33.334 444 44	[28]
21	101.867 5	30.682 222 22	[11]
22	102.616 577 8	32.967 891 67	[29]
23	97.356 031 71	33.468 679 04	[30]
24	97.42	33.33	[31]

根据现有研究中有关草原毛虫发生规律的影响因素以及笔者长期开展草原毛虫相关研究的实际经验,选择地形(海拔、坡向、坡度)、气候(19个生物气候变量)共22个环境因子(表2)作为预测草原毛虫虫害发生区域的影响因子。地形因子数据来源于(<https://worldclim.org/data/worldclim21.html>)网站中提供的用于生成WorldClim 2.1数据集的数字高程数据,用Arcgis 10.2软件进行提取。生物气候数据获取于WorldClim数据库中的WorldClim v2.1数据集。

WorldClim v2.1 共有 5 种社会共享经济路径 (Shared Socio-economic Pathways, SSPs), 其中, SSP1 和 SSP5 分别为社会经济发展对全球气候变化影响最小和最重的模拟情景, 也即气候变暖最轻微和最严重的情境。我们选择 SSP1 和 SSP5 两种情境下的生物气

候数据纳入本项研究。我们将 2021—2040 年的生物气候数据用于模拟当前草原毛虫虫害发生情况, 将 2081—2100 年生物气候数据用于模拟未来草原毛虫虫害发生情况。所有环境因子数据均为 GCS\_WGS\_1984 坐标系, 分辨率均为 30"。

表 2 22 个环境因子数据

Table 2 Environmental factors used in this article

变量	描述	模型			
		SSP126 2021—2040	SSP126 2081—2100	SSP585 2021—2040	SSP585 2081—2100
Bio1	年均温	+	+	+	+
Bio2	昼夜温差月均值	+	+	+	+
Bio3	等温性	+	-	-	-
Bio4	温度季节性	-	-	-	+
Bio5	最热月最高温	-	-	-	-
Bio6	最冷月最低温	+	-	-	+
Bio7	年温差	+	+	+	-
Bio8	最湿季均温	-	-	-	-
Bio9	最干季均温	-	-	-	-
Bio10	最热季均温	-	-	-	-
Bio11	最冷季均温	-	-	-	-
Bio12	年降水	+	+	+	+
Bio13	最湿月降水量	-	-	-	-
Bio14	最干月降水量	+	+	-	-
Bio15	降水季节性	-	+	-	-
Bio16	最湿季降水量	-	-	-	-
Bio17	最干季降水量	-	+	-	-
Bio18	最热季降水量	-	-	-	-
Bio19	最冷季降水量	-	-	-	-
Elev.	海拔高度	+	+	+	+
Slope	坡度	+	+	+	+
Aspect	坡向	+	+	+	+

注: “+”表示该环境变量被纳入所在模型中, “-”表示该环境变量未被纳入所在模型中。

### 1.3 数据处理

在 Arcgis 10.2 软件中使用青藏高原矢量边界对所有环境数据进行掩膜提取。使用“坡度”和“坡向”工具将数字高程数据提取为坡度和坡向数据。使用 Arcpy 模块将生物气候数据的 19 个波段分别提取为单个图层。同一像元中只保留一个草原毛虫虫害分布位点数据。使用草原毛虫虫害分布位点数据对所有环境因子图层进行多值提取, 对 SSP126 和 SSP585 两种模式以及 2021—2040 和 2081—2100 时段共的 4 个模型 (SSP126\_2021—2040, SSP126\_2081—2100, SSP585\_2021—2040, SSP585\_2081—2100) 中分布位点的环境变量进行 Pearson 相关分析, 对于相关系数绝对值  $\geq 0.8$  的变量, 只保留一个代表性变量<sup>[32]</sup>。经

筛选后纳入 4 个模型的环境变量情况见表 1。

将草原毛虫虫害发生分布位点数据和环境变量数据导入 MaxEnt software (Version 3.4.1)。选取 75% 的分布数据用作模型训练, 选取剩余 25% 的数据用于模型验证, 重复数为 10, 其他参数参考唐中海等<sup>[33]</sup>的描述, 根据输出结果中受试者工作特征曲线下面积 (Area under the receiving operator curve, AUC) 评价模型可靠性 (AUC 值在 0.5~0.6 之间, 表示模拟精度过低; AUC 值在 0.6~0.7 之间, 表示结果较差, 勉强可用; AUC 值在 0.7~0.8 之间, 表示结果一般, 可用; AUC 值在 0.8~0.9 之间, 表示结果良好; AUC 值  $\geq 0.9$ , 表示结果优秀。), 运用刀切法 (Jackknife) 分析各环境变量的重要程度 (将累计贡献率超过 60% 的环境

变量作为主导因子<sup>[34]</sup>),输出方式为 Logistic。将输出结果导入 Arcgis 10.2 中进行重分类,将结果中值为  $<0.25$  的区域定义为草原毛虫虫害无风险区,  $0.50 > \text{值} \geq 0.25$  的区域定义为草原毛虫虫害发生低风险区,  $0.75 > \text{值} \geq 0.50$  的区域定义为草原毛虫虫害发生中风险区,  $\text{值} \geq 0.75$  的区域定义为草原毛虫虫害发生高风险区,得到青藏高原草原毛虫虫害发生的风险等级分布图。用不同等级风险区对数字高程数据进行掩膜提取,可统计得到各风险等级分布区的海拔范围。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型结果评价与分析

本研究 4 个模型 AUC 均大于 0.8,表示结果良好,表明 MaxEnt 模型可以很好的预测青藏高原草原毛虫虫害发生区。

刀切法结果表明,4 个模型中的主导因子均为年降水量和坡度。在两种 SSPs 下,草原毛虫虫害发生的最适年降水量及适宜范围在未来(2081—2100 年)

均大于当前(2021—2040)。在同一时段,SSP585 下的草原毛虫虫害发生最适年降水量及适宜范围均大于 SSP126 下的这一指标。例如,在 SSP126 和 SSP585 下,未来草原毛虫虫害发生的最适年降水量分别为 700.00、749.46 mm,降水量适宜范围分别为 537.21~7 227.90、540.31~2 178.65 mm,而当前最适年降水量分别为 685.31、712.87 mm,降水量适宜范围分别为 538.46~1 338.00、549.50~1 232.67 mm。

与此类似,在两种 SSPs 下,草原毛虫虫害发生的坡度适宜范围在未来(2081—2100 年)均大于当前(2021—2040),最适坡度在未来均小于当前。在同一时段,SSP585 下的草原毛虫虫害发生坡度适宜范围均大于 SSP126 下的这一指标,SSP585 下最适坡度小于 SSP126 下这一指标。例如,在 SSP126 和 SSP585 下,未来草原毛虫虫害发生的最适坡度分别为  $1.11^\circ$ 、 $1.03^\circ$ ,坡度适宜范围分别为  $0^\circ \sim 5.76^\circ$ 、 $0^\circ \sim 5.59^\circ$ ,而当前最适坡度分别为  $1.15^\circ$ 、 $1.25^\circ$ ,坡度适宜范围分别为  $0^\circ \sim 5.22^\circ$ 、 $0^\circ \sim 5.11^\circ$ 。

表 3 模型主要结果

Table 3 The main results of model

模型	训练集 AUC	测试集 AUC	主导因子	贡献率%	适宜范围/mm	最适值/mm
SSP126 2021—2040	0.975 4	0.899 9	Bio12	40.7	538.46~133 8.00	685.31
			slope	27.9	0~5.22	1.15
SSP126 2081—2100	0.979 6	0.922 2	Bio12	38.8	537.21~722 7.90	700.00
			slope	26.2	0~5.76	1.11
SSP585 2021—2040	0.972 0	0.922 0	Bio12	41.1	549.50~123 2.67	712.87
			slope	28.2	0~5.11	1.25
SSP585 2081—2100	0.976 9	0.923 5	Bio12	37.3	540.31~217 8.65	749.46
			slope	28.2	0~5.59	1.03

### 2.2 草原毛虫虫害发生分布格局与面积

模型结果显示,在两种 SSPs 下,当前和未来草原毛虫虫害发生中高风险区均主要位于青海省的海北、海南、黄南、果洛、玉树以及西宁和海西少数地区,西藏自治区的那曲,甘肃省的甘南,四川省的甘孜和阿坝(图 1)。

在 SSP126 下,与当前相比,未来草原毛虫虫害发生中高风险区面积减少 7.41%,由 127 906 km<sup>2</sup>减少至 118 434 km<sup>2</sup>;低风险区面积增加,由 3 938 014 km<sup>2</sup>增加至 3 956 018 km<sup>2</sup>;低风险区面积减少,由 251 944

km<sup>2</sup>减少至 243 409 km<sup>2</sup>;中高风险区海拔范围下移,由 1 860~5 875 m 下移至 1 407~5 546 m。

在 SSP585 下,与当前相比,未来草原毛虫虫害发生中高风险区面积减少 7.58%,由 141 705 km<sup>2</sup>减少至 130 971 km<sup>2</sup>;低风险区面积增加,由 141 705 km<sup>2</sup>减少至 130 971 km<sup>2</sup>;低风险区面积减少,由 266 983 km<sup>2</sup>减少至 245 977 km<sup>2</sup>;中高风险区海拔范围下限上移,由 1 407 m 上移至 2 448 m,上限下移,由 5 427 m 下移至 5 238 m(表 4)。

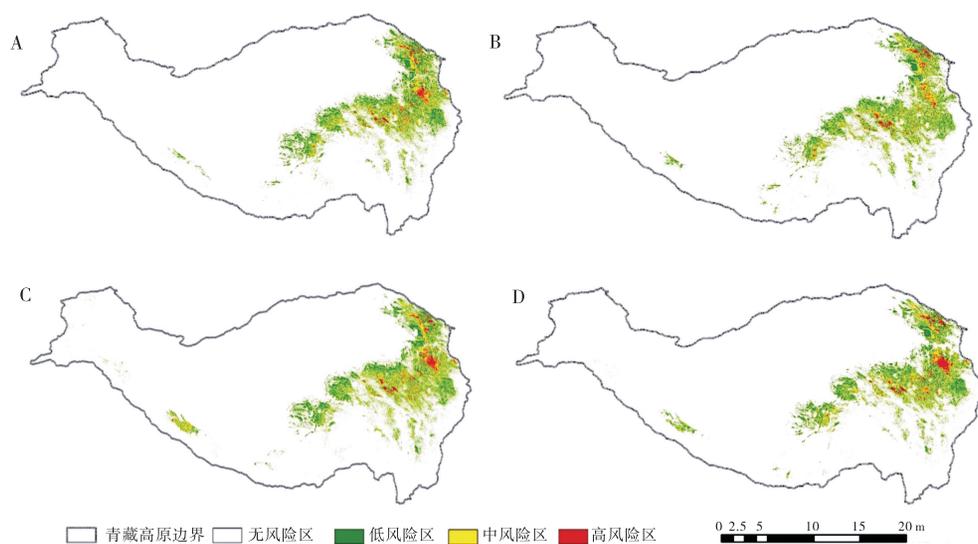


图 1 不同模型草原毛虫虫害潜在风险区

Fig. 1 Potential risk areas of caterpillar infestation in different models of grassland

注:A:SSP126 2021—2040;B:SSP126 2081—2100;C:SSP585 2021—2040;D:SSP585 2081—2100;此图基础矢量数据来源于张懿锂等<sup>[17]</sup>发表于国家青藏高原数据中心的青藏高原边界数据总集,底图边界无修改。

表 4 各风险等级区面积及海拔

Table 4 Area and elevation range of each risk level

模型	潜在风险区级别	面积/km <sup>2</sup>	海拔/m	中高风险区增加面积比例/%
SSP126 2021—2040	无风险区	3 938 014	298~8 424	-7.41
	低风险区	251 944	1 392~6 253	
	中风险区	107 533	1 860~5 875	
	高风险区	20 373	2 321~4 924	
SSP126 2081—2100	无风险区	3 956 018	298~8 424	-7.58
	低风险区	243 409	1 350~6 338	
	中风险区	102 254	1 407~5 546	
	高风险区	16 180	2 336~5 000	
SSP585 2021—2040	无风险区	3 909 176	298~8 424	-7.58
	低风险区	266 983	1 191~6 338	
	中风险区	119 533	1 407~5 427	
	高风险区	22 172	2 492~4 959	
SSP585 2081—2100	无风险区	3 949 917	298~8 424	-7.58
	低风险区	245 977	2 202~5 683	
	中风险区	98 841	2 448~5 238	
	高风险区	32 130	2 637~4 886	

### 3 讨论

#### 3.1 环境因子对草原毛虫虫害发生的影响

草原毛虫的生长、发育、繁殖以及种群动态等受温度、降水、种群数量、天敌及地形等众多环境因子影响<sup>[35-37]</sup>。早期的研究多认为温度是草原毛虫生长发育的限制因子<sup>[4]</sup>。近年来的一系列野外控制试验也表

明增温将有利于草原毛虫的生长发育<sup>[5-7]</sup>。

但本研究中,与温度相关的气候因子并不影响草原毛虫的虫害发生,而是年降水量和坡度对草原毛虫虫害发生起主导作用,这与周华坤等<sup>[37]</sup>的结果类似。周华坤等<sup>[37]</sup>认为 1998—2007 年气温逐渐升高以及降水量逐渐下降致使温度已不再是草原毛虫的限制因

子,降水量虽然降低但相对而言仍可满足草原毛虫需要,因此只在草原毛虫产卵、孵化等关键时期才会成为草原毛虫的限制因子。长期来看,气候变暖所造成的温度的升高易造成昆虫代谢加剧,昆虫最适需水量也将进一步升高。本研究也表明,在两种 SSPs 下,与当前相比,未来草原毛虫虫害发生的最适年降水量均有所提高。尽管青藏高原气候变化呈现暖湿化趋势<sup>[38]</sup>,但由增温所造成的草原毛虫最适需水量的提高可能远大于草原毛虫虫害发生区域的降水量增长,这方面目前尚缺乏试验证据的支撑。

Beavis 等<sup>[36]</sup>发现草原毛虫在低洼及平缓处的密度大于其在山坡和山脊处的密度,我们在野外调查中也发现这一规律。与此类似,本研究的结果表明在两种 SSPs 下,与当前相比,未来草原毛虫虫害发生的最适坡度有所降低。这可能是由于未来增温将导致草原毛虫最适需水量提高<sup>[38]</sup>,而低洼及平缓处土壤和地面湿度较山坡和山脊处高,可以为草原毛虫提供更加湿润的小气候。同时,气候变化导致青藏高原地表风速增强,较大的风速将会加剧植物叶片扰动,这不利于草原毛虫的取食活动<sup>[39-40]</sup>,而低洼及平缓处风速较山坡和山脊处低,更适宜草原毛虫生存。

### 3.2 草原毛虫虫害发生格局与面积

本研究结果表明在两种 SSPs 下,未来草原毛虫虫害发生中高风险区面积均较当前有所降低,在 SSP585 下这一降低幅度更大。表明,气候变化将不利于草原毛虫虫害的发生。结合主导因子进行分析,造成这一结果的主要原因是年降水量的增加不足以匹配由气候变暖导致的草原毛虫最适需水量的升高。

此外,在 SSP126 下,草原毛虫虫害发生区海拔范围下移,在 SSP585 下,草原毛虫虫害发生区海拔范围上限下移而下限上移。这与大多数物种在气候变化影响下由于温度升高而向更高海拔分布的情形不同。这可能是因为一方面气候变化将导致降水对于草原毛虫虫害发生的限制更为明显,另一方面,青藏高原降水随海拔升高呈降低趋势<sup>[41]</sup>,到达一定海拔后,降水条件将不足以满足草原毛虫虫害的发生。同时,在草原毛虫虫害发生的海拔下限附近,随着气候变化的进行,该区域草原毛虫虫害发生的适宜年降水范围逐渐超过气候变化造成的降水增加。从长远来看,气候变化将导致草原毛虫垂直分布范围趋于缩小。值得

注意的是,现有的基于模拟增温、养分添加等方法开展的草原毛虫研究忽略了水分对于草原毛虫的影响,未来可通过模拟增雨或控水等试验方法对草原毛虫相关研究进行优化。

## 4 结论

未来气候变化将导致青藏高原草原毛虫虫害发生中高风险区面积降低,海拔分布范围缩小,不利于草原毛虫虫害的发生。年降水量和坡度是驱动这一变化的主要因子。未来草原毛虫虫害的监测和防治需重点关注降水较为充沛的年份以及地势平坦的区域。

### 参考文献:

- [1] Chen W J, Zhou H K, Wu Y, *et al.* Plant-mediated effects of long-term warming on soil microorganisms on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2021, 204: 105391.
- [2] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, *et al.* Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms [J]. *Earth - Science Reviews*, 2020, 208: 103269.
- [3] 严林. 草原毛虫属的分类,地理分布及门源草原毛虫生活史对策的研究[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [4] 王俊彪,汪志智,央德扎西,等. 西藏聂荣县草原毛虫分布危害综合调查研究[J]. *西藏科技*, 2002(4): 29-35.
- [5] 余欣超,陈珂璐,姚步青,等. 模拟增温下门源草原毛虫幼虫生长发育特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(24): 8002-8007.
- [6] 陈珂璐,石国玺,张中华,等. 模拟增温和丛枝菌根对门源草原毛虫幼虫生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2237-2243.
- [7] 曹慧,朱文琰,赵新全. 试验增温和放牧对门源草原毛虫生长发育的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(1): 268-272.
- [8] Cao H, Zhao X Q, Wang S P, *et al.* Grazing intensifies degradation of a Tibetan Plateau alpine meadow through plant-pest interaction. *Ecology and Evolution*[J]. 2015, 5(12): 2478-2486.
- [9] 史长光,习新强,类延宝,等. 模拟增温与氮沉降对草原毛虫生长发育特征的影响[J]. *草学*, 2017(6): 27-33.
- [10] 顾慧洁,汪浩,上官子健,等. 外源氮添加对高寒草地门源草原毛虫种群密度的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1958-1967.
- [11] Yang Y H S, Xi X Q, Zhong X T, *et al.* N addition sup-

- presses the performance of grassland caterpillars (*Gynaephora alpherakji*) by decreasing ground temperature [J]. *Ecosphere*, 2017, 8(3): e01755.
- [12] 雍青措姆, 习新强, 牛克昌. 高寒草甸植物物种丧失对草原毛虫的影响[J]. *生物多样性*, 2022, 30(11): 1-19.
- [13] 刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 等. 基于MaxEnt模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4181-4188.
- [14] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于MaxEnt模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估[J]. *生态学报*, 2019, 39(24): 1-11.
- [15] 杜志宏. 基于MaxEnt的气候变化情景下全球及中国麦瘟病的适生性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [16] 于跃, 大兴安岭林区落叶松毛虫发生的影响因子分析[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2016.
- [17] 张懿铨, 李炳元, 刘林山, 等. 再论青藏高原范围[J]. *地理研究*, 2021, 40(6): 1543-1553.
- [18] 侯秀敏, 王有良, 韩显忠, 等. 0.4%蛇床子素乳油防治草原毛虫药效试验报告[J]. *青海草业*, 2016, 25(3): 17-19.
- [19] 李林霞. 1.2%瑞·苏微乳剂对青海草原毛虫的防治[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(9): 3866-3867.
- [20] 拉毛才让, 王朝华, 史小为. 1.2%烟碱和苦参碱防治草地虫害药效试验[J]. *养殖与饲料*, 2008(9): 70-71.
- [21] 于红妍. 1.8%阿维菌素和0.5%甲维盐对草原毛虫的防治效果[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(7): 2918-2919.
- [22] 拉毛才让, 王朝华, 史小为. 阿维菌素与4.5%高效氯氰菊酯防治草原毛虫药效试验报告[J]. *养殖与饲料*, 2008(5): 45-47.
- [23] 张生合, 王朝华, 史小为, 等. 阿维菌素与类产碱生物防治剂防治青海草原害虫试验报告[J]. *养殖与饲料*, 2008(5): 57-61.
- [24] 魏学红, 臧建成, 马少军, 等. 西藏那曲地区草原毛虫发生为害情况调查及药剂防治试验[J]. *中国植保导刊*, 2009, 29(11): 27-28.
- [25] 赵晓军, 吉汉忠. 毛虫复合剂对草原毛虫的防控效果[J]. *畜牧兽医科技信息*, 2020(9): 18-18.
- [26] 王海贞, 刘昕. 玉树州境内草原毛虫种群分布及其对生境草场植被的影响[J]. *环境昆虫学报*, 2022, 44(4): 891-902.
- [27] 于健龙, 石红霄. 草原毛虫对高寒嵩草草甸植物群落结构及土壤特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2020, 38(9): 4662-4664.
- [28] 马培杰, 潘多锋, 陈本建, 等. 草原毛虫对小嵩草草地植被群落的影响[J]. *草原与草坪*, 2016, 36(5): 111-120.
- [29] 万秀莲, 张卫国. 草原毛虫幼虫的食性及其空间格局[J]. *草地学报*, 2006, 14(1): 84-88.
- [30] 杨文才, 拉巴, 吴新宏, 等. 三江源区称多县高寒草甸鼠虫害空间分布及防治[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(18): 9707-9709.
- [31] 潘多锋. 青藏高原高寒草甸草食动物间的相互作用关系及机制[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [32] 李璇, 李焱, 方炎明. 基于优化的Maxent模型预测白柞在中国的潜在分布区[J]. *林业科学*, 2018, 54(8): 153-164.
- [33] 唐中海, 罗华林, 王建华, 等. 基于GIS和Maxent模型的白唇鹿(*Cervus albirostris*)潜在适宜生境及保护GAP分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 1-10.
- [34] 杜倩, 魏晨辉, 梁陈涛, 等. 中国东北地区12个建群树种对气候变化响应的MaxEnt模型分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(33): 1-14.
- [35] 刘汉武, 张凤琴, 李秋英. 草原毛虫种群动态及其成灾原因研究[J]. *运城学院学报*, 2016, 34(6): 1-4.
- [36] Beavis W D, Ówens J C, Órtiz M, 等. 地形部位对草原毛虫的密度和发育期的影响[J]. *国外畜牧学—草原与牧草*, 1983(4): 17-21.
- [37] 周华坤, 王晓辉, 温军, 等. 果洛州玛沁县草原毛虫虫害发生与气候因子的相互关系[J]. *草业科学*, 2012, 29(1): 128-134.
- [38] 陈发虎, 汪亚峰, 甄晓林, 等. 全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究[J]. *中国藏学*, 2021(4): 21-28.
- [39] 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 青藏高原近60年来气候变化及其环境影响研究进展[J]. *高原气象*, 2022, 41(1): 1-10.
- [40] Xi X Q, Griffin J N, Sun S C. Grasshoppers amensalistically suppress caterpillar performance and enhance plant biomass in an alpine meadow[J]. *Oikos*, 2013, 122(7): 1049-1057.
- [41] 张宇欣, 李育, 朱耿睿. 青藏高原海拔要素对温度、降水和气候型分布格局的影响[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(3): 505-515.