

分类号: Q89
学 号: 20232106039

密 级:
单位代码: 10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



CMIP6 气候变化和人类活动干扰下药用甘草适 生区变化及主要化学成分对环境因子的响应

学 位 申 请 人	夏彩霞
指 导 教 师	陆嘉惠教授
申 请 学 位 类 别	专业硕士
专 业 名 称	生物与医药
研 究 领 域	生物技术与工程
所 在 学 院	生命科学学院

中国·新疆·石河子
2026 年 5 月

分类号：
学 号：20232106039

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



CMIP6 气候变化和人类活动干扰下药用甘草适 生区变化及主要化学成分对环境因子的响应

学 位 申 请 人	夏彩霞
指 导 教 师	陆嘉惠教授
申 请 学 位 类 别	专业硕士
专 业 名 称	生物与医药
研 究 领 域	生物技术与工程
所 在 学 院	生命科学学院

中国·新疆·石河子

2026 年 5 月

**Changes in the Suitable Habitat of Medicinal Licorice under
Climate Change and Human Activity Interference, and the Response
of Main Chemical Components to Environmental Factors in CMIP6**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Natural Science

By
Xia Cai-xia
(Biology and Medicine)

Dissertation Supervisor: Prof. Lu Jia-hui

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：夏彩霞

时间：2025年5月20日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：夏彩霞

时间：2026年5月20日

导师签名：陆嘉惠

时间：2026年5月20日

摘要

乌拉尔甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata* Batal.)和光果甘草(*Glycyrrhiza glabra* L.)是中国药用“甘草”三种基源物种,其中乌拉尔甘草和胀果甘草为国家二级保护植物。同时,作为干旱、半干旱荒漠地区重要植物,具有防风固沙、盐碱地改良生态价值。然而,在气候变化和人为活动的双重影响下,从20世纪50年代以来,野生甘草资源量急剧锐减。因此,探究气候变化与人类活动干扰背景下三种药用甘草适生区及保护现状,对于维护野生药用甘草资源生态安全和保护至关重要。同时,揭示主要化学成分与环境因子的相关性并进行品质种植区预测,也为药用甘草野生资源保护策略及优质药材品质规划提供重要依据。

本研究通过使用优化的MaxEnt模型预测并结合实地调查与样本测定拟解决以下问题:(1)在当前气候和人类活动干扰下,分析影响三种药用甘草适生区的主要环境因子;预测人类活动干扰和气候变化下三种药用甘草的适生区的变化;并将适生区与国家自然保护区、中国生物多样性保护优先区叠加分析,了解其保护现状,并提出保护策略;(2)未来气候模式下,预测不同气候情景下三种药用甘草适生区变化,分析其质心迁移路径;(3)通过野外实地调查和样本采集,测定野生药用甘草主要化学成分(甘草酸、甘草苷)含量,分析不同适生区药用甘草化学成分的差异,建立化学成分与环境因子的响应关系,评估不同适生区下的甘草药材品质,实现对三种药用甘草品质分布区的预测。研究结果如下:

1.人类活动干扰是影响三种药用甘草适生区变化最关键的因子,人类活动干扰下三种药用甘草适生区、位于自然保护区与中国生物多样性保护优先区面积均呈现出下降趋势。其中,最干季平均气温、最湿月降水量和季节降水变化系数为影响三种药用甘草的主要环境因子。当前气候下,乌拉尔甘草适生区主要分布于中国西北、华北及东北;适生区面积为 $2.935 \times 10^6 \text{ km}^2$;胀果甘草、光果甘草适生区则集中于新疆西部及东北部,适生区面积分别为 $7.869 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $4.419 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。三种药用甘草适生区面积位于国家自然保护区内占比分别为5.30%、8.24%和1.856%,而位于中国生物多样性保护优先区内为19.00%、13.23%和10.37%。在人类活动干扰的干扰下,三种药用甘草适生区面积锐减60.87%-85.74%,自然保护区与中国生物多样性保护优先区域适生区面积锐减60.57%-94.01%。三种药用甘草适生区面积减少的原因存在差异。应采取针对性保护措施:乌拉尔甘草需遏制过度采挖并促进资源恢复;胀果甘草的保护重点在于维持其原适生区土壤生态;光果甘草核心措施是实施适生区围护工程并提升其保护等级。

2.未来气候情景下,三种药用甘草适生区预测及质心迁移。三种药用甘草适生区均呈现萎缩趋势,光果甘草适生区萎缩最为严重;质心迁移路径存在差异性,在水平梯度上,乌拉尔甘草质心略向西和东南偏移,胀果甘草质心显著向东北方向迁移,光果甘草则略向东和西北移动。在垂直梯度上,乌拉尔甘草、胀果甘草质心整体迁移至高海拔;但光果甘草表现出向低海拔迁移趋势。

3.不同适生区药用甘草甘草酸、甘草苷含量及环境因子的相关性。气温及海拔等气候因子主要影

响甘草酸的积累，土壤质地、有机碳及阳离子交换性等土壤理化特征则对甘草苷含量的变化具有更大的影响。物种的差异和环境因子具有耦合效应，因此，影响不同药用甘草的品质差异的重要环境因子亦有不同。影响三种药用甘草中甘草酸含量的主要环境因子：乌拉尔甘草为海拔、最干季度平均温度、土壤 pH 值；胀果甘草为土壤交换性盐基与土壤碳酸钙含量；光果甘草为土壤交换性钠饱和度与最湿月降水量；影响三种药用甘草中甘草苷含量的主要环境因子：乌拉尔甘草为土壤粉粒含量；胀果甘草为土壤盐基饱和度与最湿月降水量；光果甘草为土壤有机碳含量、土壤粉粒含量、土壤砾石含量与降水量季节性变异系数。

4.不同药用甘草品质种植区预测：乌拉尔甘草中甘草酸、甘草苷含量与适生区等级呈显著负相关；胀果甘草的甘草酸含量与适生区等级呈负相关；光果甘草的甘草酸含量与适生区等级显著正相关。在采集样本中，乌拉尔甘草的两种主要化学成分含量符合《中华人民共和国药典（2020 年版）》标准的样本比例最高，光果甘草次之，胀果甘草最低。乌拉尔甘草的品质种植区面积（甘草酸、甘草苷含量均符合国标）为 $1.454 \times 10^6 \text{ km}^2$ ；占其适生区总面积的 49.54%。其核心分布区为新疆北部至我国东北地区。胀果甘草的品质种植区面积为 $8.483 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；占其适生区总面积的 10.78%，主要集中在分布于新疆哈密市、吐鲁番市与巴音郭楞蒙古自治州。光果甘草的品质种植区面积为 $1.038 \times 10^5 \text{ km}^2$ ；占其适生区总面积的 23.49%，主要分布于新疆伊犁哈萨克自治州、塔城地区、吐鲁番市、哈密市。

综上所述，人类活动干扰是影响三种药用甘草分布的最重要的因子；人类活动干扰导致三种药用甘草适生区面积锐减，适生区均呈现高度破碎化格局；未来气候情景下，三种药用甘草适生区总面积均呈现萎缩趋势；适生区分布质心迁移，在垂直梯度上，乌拉尔甘草、胀果甘草质心整体迁移至高海拔；但光果甘草表现出向低海拔迁移趋势；三种药用甘草主要化学成分与环境因子响应具有物种差异性；三种药用甘草品质种植区远小于各甘草物种当前的适生区。因此，在药用甘草资源评估与品质区划中，应同时兼顾不同甘草物种差异、生态适生区、品质种植区。

关键词：药用甘草；气候变化；最大熵（MaxEnt）模型；适生区；品质种植区

Abstract

Glycyrrhiza uralensis Fisch., *Glycyrrhiza inflata* Batal., and *Glycyrrhiza glabra* L. are the three original species of medicinal "Licorice" in China, among which *G. uralensis* and *G. inflata* are listed as national second-class protected plants. At the same time, as important plants in arid and semi-arid desert regions, they provide ecological value by stabilizing sand dunes and improving saline-alkali soils. However, under the dual impacts of climate change and human activities, the wild resources of licorice have sharply declined since the 1950s. Therefore, exploring the suitable habitats and conservation status of these three medicinal licorice species under the pressures of climate change and human disturbance is crucial for maintaining the ecological security and protection of wild medicinal licorice resources. Furthermore, revealing the correlation between major active components and environmental factors, and predicting the suitable areas for quality-based cultivation, provides an important basis for the conservation strategies of wild medicinal licorice resources and the planning of high-quality medicinal materials.

This study employs an optimized MaxEnt model combined with field surveys and sample measurements to address the following questions: (1) Under current climate and human activity disturbances, identify the major environmental factors affecting the suitable habitats of the three medicinal licorice species; predict changes in their suitable habitats under human disturbance and climate change; overlay the suitable habitat maps with national nature reserves and China's biodiversity conservation priority areas to assess their current conservation status and propose conservation strategies; (2) Under future climate scenarios, predict changes in the suitable habitats of the three medicinal licorice species and analyze the migration pathways of their centroids; (3) Through field surveys and sample collection, determine the contents of the main chemical components (glycyrrhizic acid and liquiritin) in wild medicinal licorice, analyze the differences in chemical composition across different suitable habitats, establish the response relationship between chemical components and environmental factors, evaluate the quality of licorice in different suitable areas, and predict the quality distribution areas of the three medicinal licorice species. The research results are as follows:

1. Human footprint is the most critical factor influencing the distribution of the three medicinal licorice species. Under the impact of human activities, the area of suitable habitats for all three species shows a shrinking trend, and the areas of these species located within national nature reserves and China's biodiversity conservation priority areas have generally declined. Additionally, factors such as the mean temperature of the driest quarter, precipitation of the wettest month, and the coefficient of seasonal precipitation variation also account for significant proportions in the model evaluation. Under current climate conditions, the suitable habitat of *G. uralensis* is mainly distributed in northwest, north, and northeast China, with a total area of 2.935×10^6 km². The suitable habitats of *G. inflata* and *G. glabra* are concentrated in western and

northeastern Xinjiang, with total areas of $7.869 \times 10^5 \text{ km}^2$ and $4.419 \times 10^5 \text{ km}^2$, respectively. The proportions of suitable habitat areas located within national nature reserves are 5.30%, 8.24%, and 1.856%, while those within China's biodiversity conservation priority areas are 19.00%, 13.23%, and 10.37%, respectively. Due to human disturbances, the suitable habitat areas of the three medicinal licorice species have sharply decreased by 60.87%–85.74%, and the areas within national nature reserves and biodiversity priority areas have declined by 60.57%–94.01%. The reasons for the reduction in suitable habitat area differ among the three species, requiring targeted conservation measures: For *G. uralensis*, it is necessary to curb overharvesting and promote resource restoration. For *G. inflata*, conservation should focus on maintaining the soil ecology of its native habitat. For *G. glabra*, the core measures involve implementing habitat protection projects and elevating its conservation status.

2. Prediction of suitable habitats and centroid migration of the three medicinal licorice species under future climate scenarios. The suitable habitats of all three species show a shrinking trend, with the most severe contraction observed in *G. glabra*. There are differences in the migration pathways of their centroids. On the horizontal gradient, the centroid of *G. uralensis* shifts slightly westward and southeastward, the centroid of *G. inflata* migrates significantly northeastward, while the centroid of *G. glabra* moves slightly eastward and northwestward. On the vertical gradient, the centroids of *G. uralensis* and *G. inflata* generally migrate to higher elevations; however, *G. glabra* shows a trend of migrating to lower elevations.

3. Correlation between glycyrrhizic acid and liquiritin contents of medicinal licorice in different suitable habitats and environmental factors. Climatic factors such as temperature and altitude mainly influence the accumulation of glycyrrhizic acid, while soil physicochemical characteristics including soil texture, organic carbon, and cation exchange capacity have a greater impact on the variation of liquiritin content. Species differences and environmental factors have a coupling effect; therefore, the key environmental factors affecting the quality variation of different medicinal licorice species also differ. The main environmental factors influencing glycyrrhizic acid content in the three medicinal licorice species are: for *G. uralensis*: elevation, mean temperature of the driest quarter (bio9), and soil pH (t-pH-H₂O); for *G. inflata* — soil exchangeable bases (t-teb) and soil calcium carbonate content (t-CaCO₃); for *G. glabra*: soil exchangeable sodium percentage (t-esp) and precipitation of the wettest month (bio13). The main environmental factors influencing liquiritin content in the three medicinal licorice species are: for *G. uralensis*: soil silt content (t-silt); for *G. inflata*: soil base saturation (t-bs) and precipitation of the wettest month (bio13); for *G. glabra*: soil organic carbon content (t-oc), soil silt content (t-silt), soil gravel content (t-gravel), and precipitation seasonality (bio15).

4. Prediction of quality planting areas for different medicinal licorice species: For *G. uralensis*, the contents of glycyrrhizic acid and liquiritin show a significant negative correlation with the suitable habitat grade; for *G. inflata*, the glycyrrhizic acid content shows a negative correlation with the suitable habitat grade;

for *G. glabra*, the glycyrrhizic acid content shows a significant positive correlation with the suitable habitat grade. Among the 126 samples collected from 42 sampling sites, *G. uralensis* has the highest proportion of samples meeting the standards for both major chemical components as specified in the Pharmacopoeia of the People's Republic of China (2020 Edition), followed by *G. glabra*, with *G. inflata* having the lowest proportion. The quality planting area for *G. uralensis* (where both glycyrrhizic acid and liquiritin contents meet the national standard) is 1.454×10^6 km², accounting for 49.54% of its total suitable habitat area. Its core distribution area spans from northern Xinjiang to northeastern China. The quality planting area for *G. inflata* is 8.483×10^4 km², accounting for 10.78% of its total suitable habitat area, mainly concentrated in Hami City, Turpan City, and the Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture of Xinjiang. The quality planting area for *G. glabra* is 1.038×10^5 km², accounting for 23.49% of its total suitable habitat area, mainly distributed in the Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Tacheng Prefecture, Turpan City, and Hami City of Xinjiang.

In summary, human activity disturbance is the most important factor affecting the distribution of the three medicinal licorice species. Such disturbance has led to a sharp reduction in the area of suitable habitats for all three species, with the suitable habitats exhibiting a highly fragmented pattern. Under future climate scenarios, the total suitable habitat area for all three medicinal licorice species shows a shrinking trend. The centroids of suitable habitat distribution are migrating: on the vertical gradient, the centroids of *G. uralensis* and *G. inflata* are generally shifting to higher elevations, whereas *G. glabra* shows a trend of migrating to lower elevations. The responses of the major chemical components to environmental factors differ among the three species. The quality planting areas for the three medicinal licorice species are much smaller than their current suitable habitat areas. Therefore, in the assessment of medicinal plant resources and quality zoning, it is essential to simultaneously consider species-specific differences, ecological suitable habitats, and quality planting areas for each licorice species.

Key words: Medicinal licorice; Climate change; MaxEnt model; Potential suitable habitat; Quality Planting Area

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 全球气候变化模型.....	2
1.2.2 物种分布模型.....	3
1.2.3 气候变化对植物地理分布的影响.....	4
1.2.4 人类活动干扰对植物地理分布的影响.....	5
1.2.5 气候变化下三种药用甘草的适生区变化.....	6
1.2.6 生态环境因子对药用植物主要化学成分的影响.....	6
1.2.7 药用植物品质种植区.....	8
1.3 研究目标及内容.....	9
1.3.1 研究目标.....	9
1.3.2 研究内容.....	9
1.3.3 技术路线.....	10
第 2 章 物种分布模型优化及影响适生区变化的关键因子分析.....	11
2.1 材料与方法.....	11
2.1.1 药用甘草分布数据收集.....	11
2.1.2 环境因子收集与处理.....	11
2.1.3 模型参数优化设置.....	12
2.1.4 最大熵模型构建.....	12
2.2 数据分析.....	13
2.2.1 药用甘草样本点处理.....	13
2.2.2 环境因子数据处理.....	13
2.3 结果与分析.....	13
2.3.1 药用甘草地地理分布.....	13
2.3.2 生态因子相关性分析.....	14
2.3.3 模型参数优化评价.....	17
2.3.4 影响药用甘草适生区变化的关键因子分析.....	17
2.4 讨论.....	23

2.4.1 模型预测的准确性	23
2.4.2 关键环境因子对药用甘草分布的影响	23
2.5 本章小结	24
第 3 章 当前气候和人类活动干扰下药用甘草适生区变化及保护现状	26
3.1 材料与方法	26
3.2 数据分析	26
3.3 结果与分析	26
3.3.1 当前气候和人类活动干扰下药用甘草适生区预测	26
3.3.2 当前气候和人类活动干扰下药用甘草保护现状	28
3.4 讨论	32
3.4.1 人类活动干扰下药用甘草适生区变化及保护策略	32
3.4.2 人类活动干扰下药用甘草保护效能及保护建议	35
3.5 本章小结	36
第 4 章 未来气候情景下药用甘草适生区变化与质心迁移	37
4.1 材料与方法	37
4.2 数据处理	37
4.3 结果与分析	37
4.3.1 未来气候情景下药用甘草适生区变化	37
4.3.2 未来气候情景下药用甘草的质心迁移	46
4.4 讨论	49
4.4.1 未来气候情景下药用甘草适生区质心迁移路径	49
4.5 本章小结	50
第 5 章 药用甘草主要化学成分对环境因子的响应与品质种植区预测	51
5.1 材料与方法	51
5.1.1 药用甘草野外调查与样本采集	51
5.1.2 样本环境因子与适宜性指数获取	53
5.1.3 实验方法	53
5.2 数据分析	55
5.3 结果与分析	56
5.3.1 不同适生区药用甘草的甘草酸、甘草苷含量	56
5.3.2 药用甘草主要化学成分对环境因子的响应	57
5.3.3 药用甘草品质种植区	60
5.4 讨论	65
5.4.1 环境因子对甘草酸、甘草苷含量的驱动作用	65

5.4.2 不同适生区的甘草酸、甘草苷含量的差异	66
5.5 本章小结	66
第 6 章 结论与展望	68
6.1 结论	68
6.2 展望	69
参考文献	71
致谢	85
作者简介	86

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

《中华人民共和国药典（2020 年版）》收录的药用甘草为乌拉尔甘草（*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.）、胀果甘草（*Glycyrrhiza inflata* Batal.）和光果甘草（*Glycyrrhiza glabra* L.），三者因兼具抗菌、抗病毒、降血糖及调血脂等药理活性，是我国大宗药材的核心资源^[1,2]。其中乌拉尔甘草和胀果甘草为国家二级保护植物^[3]。乌拉尔甘草广泛分布于中国西北、华北及东北地区；胀果甘草的分布核心区集中于新疆，其东界延伸至甘肃西北部；光果甘草则呈狭域分布，仅见于新疆^[4]。近年来，甘草市场需求持续攀升：据《中药资源》统计，中国甘草年消耗量从 20 世纪 50 年代的 8 000 吨增至 90 年代末的 12 000 吨。至近年，在健康消费升级驱动下，年消耗量已达 15 000 吨左右^[5]。与此同时，资源蕴藏量呈现断崖式下降，从 20 世纪 50 年代的 250 万吨锐减至当前不足 20 万吨^[5]。人为高强度采挖与气候变化的协同胁迫，使野生甘草适生区退化，药用甘草资源量急剧萎缩。

气候变化和人类活动干扰（HF）是全球物种变化的两个重要方面，对生物多样性和生态系统可持续性有重大影响^[6,7]。气候变化引发的适生区退化和消失已经改变了许多生物原有的空间和生活模式。预计一些物种将通过改变地理分布来应对气候变化^[8,9]。气候变化主要引起温度和降水的变化，这使生物多样性面临巨大风险^[10-12]。大量研究表明降水和温度是影响麻黄（*Ephedrae* Herba）^[13]、胀果甘草^[14]、乌头（*Aconitum leucostomum*）^[15]和雪莲（*Saussurea involucrata* (Kar. & Kir.) Sch.Bip.）^[16]等药用植物生长的限制因素。与此同时，随着人类社会的发展，不同范围、模式和强度的人类活动干扰导致了不同类型的土地利用，如旅游开发、工业化和基础设施建设，均造成了物种适宜性适生区大范围减少^[17-19]。因此，气候变化与人类活动干扰的双重胁迫，正通过协同效应放大植物物种的生存压力。药用甘草在医药、食品、日化、畜牧等领域的广泛使用，市场需求量逐年上升，过度采挖导致中国野生甘草资源蕴藏量急剧锐减。系统评估三种药用甘草的适生区分布，解析气候变化与人类活动干扰对其分布的复合影响机制，并量化环境因子与物种分布的耦合关系，对制定科学保护策略具有迫切必要性。

截至 2017 年底，中国已建立了 2833 个自然保护区，覆盖国土面积的 15.3%^[20]。尽管自然保护区建设为保护自然区域做出了重要努力，但全球范围内的自然保护区仍持续受到农业生产^[21,22]、森林砍伐^[23]以及人类聚居区扩张^[24]等人类活动干扰的破坏与退化。其中，人类聚居区扩张不仅会损害保护区的生态流动与景观完整性^[25]，更直接导致适生

区丧失和破碎化^[26,27]。同时,保护区内及周边的人类活动干扰也对保护目标的实现构成了严重威胁^[28,29]。因此,探究药用甘草在人类活动干扰下的保护状况,对于制定科学有效的保护策略至关重要环境之间的关系^[30,31]。

目前,SDM 已广泛应用于濒危物种的保护^[32]、气候变化对物种分布的影响评估^[33]、生态系统管理和保护^[34]和生态恢复^[35]。选择合适物种分布模型是进行药用甘草适生区研究的关键,最大熵(MaxEnt)模型作为一种广泛使用的物种分布模型,用于模拟物种的适生区,具有运行时间短、操作简便、性能良好、避免过度拟合、精度高等优点^[36-38]。同时,该模型能够将当前环境变化和人类活动干扰进行耦合分析^[39,40],获得更有效、更科学适生区预测结果。近年来,MaxEnt 模型在气候变化和人类活动干扰下保护植物^[41-44]、药用植物如麻黄^[13]、水韭(*Isoetes sinensis* Palmer)^[45]和骆驼刺^[46]的研究适生区预测中得到广泛应用。

药材质量的形成是一个复杂的生物学过程,而产地环境被认为是其中关键的驱动因素之一。药用甘草虽在我国分布范围广阔,但不同产区间药材品质参差不齐^[47],这说明仅凭地理分布难以判定其质量优劣。实际上,药用植物的化学成分积累与其生态适应性密切相关^[48,49]。多数情况下,适宜的生态条件有利于化学成分的富集,但也有研究发现,某些胁迫环境下化学成分含量反而更高^[50]。因此,适生区是否必然产出优质甘草,仍需进一步验证。为揭示甘草的道地性形成机制,亟需系统评估不同适生区下的药材质量。此外,生物气候因子作为生态适应性的核心组成,对次生代谢过程具有显著调控作用^[51]。若能建立气候因子与代谢产物之间的定量关系,则可实现对甘草品质种植区的预测,从而为优质甘草产区规划提供科学依据。

综上所述,本研究使用优化的 MaxEnt 模型,首先,探讨影响适生区分布的主要因素,分析当前气候变化和人类活动干扰对药用甘草适生区的影响,再通过未来气候下(SSP126、SSP245、SSP370、SSP585)药用甘草适生区的预测,分析其质心迁移路径,为未来野生药用甘草资源保护和利用提供科学依据。其次,通过 ArcGis 叠加分析评估药用甘草在自然保护区的保护状况。为野生甘草保护策略和保护区管理提供重要参考。最后,通过野外实地调查和样本采集,测定野生甘草主要化学成分(甘草酸、甘草苷)含量,分析不同适生区甘草化学成分的差异,建立化学成分与环境因子的响应关系,评估不同适生区下的药材品质,实现对甘草品质种植区的预测,从而为优质药材的产区规划提供科学依据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 全球气候变化模型

1988 年,联合国大会第 43 届会议首次将气候变化问题列入讨论议程,迅速引发了

全球的广泛关注。同年,世界气象组织与联合国环境规划署联合成立了政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC),旨在评估气候变化相关的科学数据,并提出切实可行的应对方案^[52]。IPCC 第六次评估报告(The 6th Assessment Report, AR6)显示,相较于1850—1990年基准期,2001—2020年全球平均地表温度上升了约0.99℃,而2011—2020年的升温幅度为1.09℃。报告还指出,陆地的升温速度(1.59℃)明显快于海洋(0.88℃)。由此可见,以全球变暖为核心的气候变化正导致各地极端高温事件的频率不断增加,并预计随着气温继续上升,这种趋势将进一步加剧^[53]。2014年和2021年,IPCC分别发布了第五次和第六次评估报告(AR5与AR6)。报告中关于气候变化的模拟与预测所依赖的数据,均来源于耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)。

(CMIP6)的全球气候模型(Global Climate Models, GCMs),该模型一经发布,引起全球研究者的广泛研究,研究队伍不断扩大;但由于CMIP5的GCMs使用的是早期分布的未来气候数据且预测模式单一,很大程度上增加系统误差,降低了预测精度;CMIP6的GCMs预测结果精度更高,对气候变化更敏感。尹辉等学者基于CMIP6未来气候情景,对骆驼刺的潜在分布范围进行了较为准确的预测^[46]。通过对比CMIP6和CMIP5模型在青藏高原降水和温度模拟中的表现,研究发现CMIP6模型在降水和温度的模拟上优于CMIP5模型。此外,CMIP6的多模式集成相较于CMIP5的多模式集成,能够有效减少对降水的过高估计。未来的气候情景涵盖了四种具有代表性的二氧化碳典型浓度路径(Representative Concentration Pathway, RCPs):RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5,分别对应低排放、中排放、高排放以及极高排放的情景^[54]。RCPs情景是由多家科研机构联合开发的新一代气候变化预测方案,通过单位面积的辐射强迫来反映未来100年温室气体的排放水平,不同情景则对应不同的温室气体排放浓度变化曲线^[55]。CMIP6通过将SSP与RCPs相结合形成的新情景(SSP-RCP)来模拟未来气候变化,其中原有的RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景被升级为SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP4-6.0和SSP5-8.5^[56]。SSP-RCP情景更准确地体现了社会经济发展与气候变化之间的相互关系,提供了更细化的未来气候周期预测,其模拟结果也更加贴近实际观测数据^[57]。

1.2.2 物种分布模型

物种分布模型(SDMs, Species Distribution Models)是一种关联模型,通过将物种已知分布位置的发生率与该位置的环境特征信息相结合,来表示物种在特定环境中的适宜性,通常以存在概率的形式呈现^[58]。随着气候变化研究的不断推进以及地理信息系统技术的发展,借助SDMs对气候变化情景下物种适生区变化进行预测,已逐渐成为生物地理学和保护生态学等领域的研究重点^[59]。目前常用的物种分布模型包括生态位因子分析(FNFA)、遗传算法(GARP)、气候箱环境包络(BIOCLIM)以及最大熵模型(MaxEnt)

等方法。这些模型一般应用于解决濒危动植物的保护、人类对物种的干扰以及全球变化对物种分布和多样性的影响等问题^[60]。Hernandez 等人对 4 种常用 SDMs 在不同样本量下对 18 个物种潜在分布进行比较分析, 结果表明, 无论样本量大小, MaxEnt 的模型性能始终最佳, 其预测效果优于其他模型^[61]。段义忠等人比较了三种生态位模型在预测物种适生区范围中的表现, 结果显示, Maxent 预测的最适生区与物种当前的分布范围高度一致。因此, Maxent 具有样本数量要求少、精度高和稳定性强等优点而被广泛应用^[62]。

Maxent 模型由美国学者 Phillips 于 2006 年开发, 随后在国内外被广泛应用于气候变化、外来物种入侵及濒危物种保护等研究领域, 显示出较高的准确性和可靠性^[63]。大量学者在此类模型上展开了大量的研究, 在物种样本数据分布点较少的情况下, 基于 Maxent 对蔷薇科植物水杨梅 (*Geum aleppicum*) 在未来分布变化进行了预测, 结果表明在未来其分布范围会减少 50%^[64]。Ren 确定了在过去和未来时期菟丝子 (*Cuscutachinensis* Lam.) 的潜在适宜分布区和主导环境因子的区间^[65]。Liu 等人利用 MaxEnt 模型预测药食两用植物鱼腥草 (*Houttuynia cordata* Thunb.) 在中国的当前适生区, 基于此分析未来气候下的适宜性评价^[66]。近年来, 我国基于 Maxent 模型对物种潜在分布及适宜性开展的研究呈现出快速增长的趋势。李军军等人预测了三种黄连 (*Coptis herb*) 现在和未来条件下的适生区面积变化及不同分布区的有效化学成分变化, 结果表明三种黄连均不局限于已报道的区域, 还涵盖了其他潜在分布区, 此外, 高适生区的平均生物碱含量最高, 而中等和一般适生区的平均生物碱含量有所降低, 说明生物碱含量可能与环境因子有关^[48]。建峰等人以三种云南松 (*pinus yunnanensis*) 为研究对象, 利用 Maxent 模型对现在和未来不同气候下云南松进行了适宜性评价和适生区范围变化预测, 结果表明, 3 个品种的高、中适生区均呈下降趋势, 而低适生区呈上升趋势, 预计三个品种云南松的分布中心都将向高纬度转移^[67]; 应凌霄等人利用 Maxent 模型对我国西南地区的清香木分布进行了预测, 并探讨了在不同历史和未来气候情景下, 其适生区的分布变化^[68]。

1.2.3 气候变化对植物地理分布的影响

自 20 世纪起, 全球平均气温显著上升。全球变暖对人类社会、经济、生态系统及农业生产带来了严峻挑战, 包括冰川融化、海平面上升、极端天气事件增多以及生物多样性的丧失^[69]。物种对气候变暖做出的响应通常表现为灭绝、适应和迁移^[70]。物种适生区迁移是一种普遍现象, 表现为低海拔或低纬度地区的生物多样性下降, 同时物种向高海拔和高纬度地区移动, 这增加了当地的生物竞争, 进而改变了生态系统的结构^[71]。近年来, 探究不同气候下物种分布范围变化成为国内外的研究热点, 因此, 许多国内外研究者开始关注植物的地理分布范围对气候变化的响应。例如, Boada 将西班牙蒙塞尼山区现在山毛榉林 (*Fagus sylvatica*) 的地理分布与过去进行比较, 结果表明山毛榉林分