

基于地理环境分区建模的云南省橡胶种植适宜性评价

龙 飞^{1,2}, 钱堂慧^{3,4*}, 周定杰³, 陈桂良^{1,2}, 汪翼瑞³, 李兴全³, 李立伟³

1. 云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室, 云南景洪 666100; 2. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100;
3. 云南省测绘工程院, 云南昆明 650021; 4. 云南师范大学, 云南昆明 650021

摘 要: 针对当前橡胶种植适宜性评价中忽视地理环境差异的问题, 本研究提出了一种基于地理分区建模的评价方法。首先, 从地形条件、水热条件和寒害风险 3 个方面选择了 8 个关键因子构建评价指标体系, 综合利用层次分析法 (AHP) 和地理探测器 (GeoDetector) 确定各指标因子的权重; 然后, 以哀牢山山脊为地理分界线, 将云南省橡胶种植区划分为哀牢山以西和哀牢山以东, 分别建立适应各区域的因子适宜性分级标准, 并进行因子重分类; 最后, 对重分类因子进行线性加权实现橡胶种植适宜性综合评价, 并将结果划分为不适宜、基本适宜、次适宜和适宜 4 个等级。结果显示: 云南省 6 个植胶地州中, 适宜种植橡胶的土地约占全部土地面积的 4.29%, 次适宜区约占 2.79%, 基本适宜区约占 5.06%, 合计约 12.14%, 主要分布在西双版纳州、普洱市和红河州; 评价结果与 2024 年橡胶种植空间分布数据叠加分析发现, 约 47.80% 的橡胶分布在适宜区, 约 22.09% 分布在次适宜区, 约 19.29% 分布在基本适宜区, 合计占比 89.18%, 与实际种植分布具有较高空间一致性。评价结果具有 10 m 空间分辨率, 能够反映云南山地环境的微尺度差异, 可为云南省橡胶种植规划和调整提供参考。

关键词: 橡胶; 种植适宜性评价; 地理分区建模; 层次分析法; 地理探测器

中图分类号: S432.1 文献标志码: A

Rubber Plantation Suitability Assessment in Yunnan Province Based on Geographical Zoning Modeling

LONG Fei^{1,2}, QIAN Tanghui^{3,4*}, ZHOU Dingjie³, CHEN Guiliang^{1,2}, WANG Yirui³, LI Xingquan³, LI Liwei³

1. Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree, Jinghong, Yunnan 666100, China; 2. Yunnan Academy of Tropical Crops Sciences, Jinghong, Yunnan 666100, China; 3. Surveying and Mapping Engineering Institute of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650021, China; 4. Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650021, China

Abstract: To address the limitation of conventional rubber plantation suitability assessments that overlook geographical environmental heterogeneity, this study proposes a suitability evaluation approach based on geographical zoning modeling. Eight key indicators were selected from three dimensions, topographic conditions, hydrothermal conditions, and cold damage risk, to construct the evaluation index system. The weight of these indicators was determined by integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) with the GeoDetector method. Using the Ailao Mountains ridge as a geographical demarcation, the rubber plantation area in Yunnan province was divided into western and eastern zones, for which region-specific factor suitability grading standards were established and applied for factor reclassification. Subsequently, the reclassified factors were integrated through linear weighting to produce a comprehensive suitability evaluation, classifying the results into four categories, unsuitable, marginally suitable, moderately suitable, and highly suitable. Among the six prefecture-level regions engaged in rubber cultivation, highly suitable areas accounted for approximately 4.29% of the total land area, moderately suitable areas for 2.79%, and marginally suitable areas for 5.06%, totaling about 12.14%. These areas are mainly concentrated in Xishuangbanna, Pu'er and Honghe. Overlay analysis with

收稿日期 2025-08-21; 修回日期 2025-08-28

基金项目 云南省科技人才与平台计划 (No. 202405AG340001); 云南省热带作物科技创新体系建设专项“智慧胶园关键技术构建与应用” (No. RF2025-6); 云南省现代农业橡胶产业技术体系“胶园信息化研究室” (No. 2025KJTX-12-8)。

作者简介 龙 飞 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 智慧农业与林业。*通信作者 (Corresponding author): 钱堂慧 (QIAN Tanghui), E-mail: hutooq@163.com。

2024 rubber plantation distribution data revealed that about 47.80% of existing plantations in highly suitable zones, 22.09% in moderately suitable zones, and 19.29% in marginally suitable zones, accounting for a combined 89.18%. This distribution shows a high degree of spatial consistency with the actual planting patterns. The evaluation results, with a spatial resolution of 10 m, are capable of reflecting fine-scale variations in Yunnan's mountainous environments, and can thus provide valuable references for rubber plantation planning and adjustment in Yunnan province.

Keywords: rubber; plantation suitability evaluation; geographical zoning modeling; Analytic Hierarchy Process; GeoDetector

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.024

橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 原产于南美亚马逊河流域, 是典型的热带雨林树种, 传统种植区主要在赤道附近南北纬 10° 之间^[1]。作为重要的工业原料和战略物资, 天然橡胶在交通运输、医疗、电子等产业中占据不可替代的地位。云南省是我国天然橡胶的主产区, 种植面积约占全国总种植面积的 50%, 干胶产量约占全国总产量的 60%。然而, 云南省植胶区位于热带北缘, 属于橡胶树种植的非传统区, 其生态环境特征与世界传统植胶区存在明显差异。区域内复杂的地理环境 (高山峡谷交错) 和多样的气候条件 (立体气候), 给云南橡胶种植适宜区的精准划分带来更大挑战。另外, 受全球气候变化影响, 云南橡胶种植适宜区已发生显著变化^[2], 亟需开展精细化的适宜性评价研究, 以科学指导区域橡胶种植布局的优化调整。

橡胶种植适宜性评价方法主要包括气候适宜度模型^[2]、最大熵模型^[3]和基于 GIS 空间分析技术的综合评价方法^[4]等。气候适宜度模型通过计算温度、降水、光照、风速等因子的适宜度函数, 综合评价橡胶种植的适宜性。最大熵模型通过分析物种的已知分布数据和环境变量数据^[5], 通过最大化熵原理来预测物种在未观测区域的潜在分布概率, 概率值越高, 表示该区域越适合橡胶树生长^[6]。基于 GIS 空间分析的综合评价方法将气候、土壤、地形等多源数据整合, 通过空间叠加分析确定适宜性区域^[7]。在权重确定方面, 主成分分析法^[8]与层次分析法^[9]等多准则决策方法被广泛应用于指标权重的科学确定, 为构建评价体系提供量化依据。

目前研究更多关注气候因子^[10]、地形条件^[11]、土壤环境^[12]、灾害风险^[13]等对橡胶种植的影响, 而较少探讨橡胶树对气候变化的响应^[14]和其对地理环境的适应性变化^[15]。以云南省为例, 哀牢山作为云贵高原与横断山脉的分界线, 不仅是云

南地理、地貌上的一条重要分界线, 也是东、西气候分异的分界线。哀牢山以西由于有无量山等高山屏障, 寒潮侵袭受阻滞, 宜胶海拔上限较东部高, 宜胶降水量和温度下限较东部低。而目前的研究忽视了这种地理环境的差异, 通常将云南植胶区作为一个整体, 采用统一的评价标准进行适宜性评价, 导致评价结果不够客观和准确。对此, 本研究旨在构建一种基于地理环境分区建模的橡胶种植适宜性评价方法, 针对不同地理区域建立差异化的评价标准, 解决传统评价方法忽视地理环境差异性的缺陷, 为云南省橡胶种植的科学布局和可持续发展提供理论支撑和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究区概况 云南省橡胶种植区包括西双版纳州、普洱市、红河州、临沧市、德宏州和文山州 6 个州 (市) (图 1)。以哀牢山山脉为界, 将植胶区分为哀牢山以西和哀牢山以东 2 个区域。哀牢山以西包括德宏州、临沧市、普洱市、西双版纳州及红河州部分区 (县), 属于横断山脉南延分支, 山体陡峭, 沟壑深切, 海拔较高。哀牢山以东主要包括文山州和红河州部分区 (县), 为云贵高原边缘, 地势相对平缓, 但受红河大断裂影响, 河谷发育显著 (如元江干热河谷)。哀牢山东西两侧因地形阻隔形成显著的气候差异, 导致西部宜胶海拔上限较东部高, 宜胶降水量和温度下限较东部低。

1.1.2 数据来源 研究数据包括 2024 年云南省橡胶园地分布、数字高程模型 (DEM)、年降水量和温度数据, 以及行政区划等辅助数据。2024 年云南省橡胶园地分布和数字高程模型由云南省自然资源厅提供。DEM 空间分辨率为 10 m, 基于 DEM 提取坡度、坡向和哀牢山山脊线 (东西区分界线)。降水和温度数据来自云南省气象局的

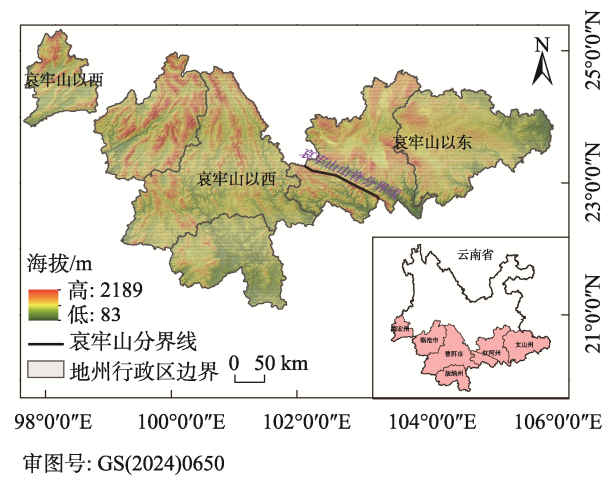


图 1 研究区范围
Fig. 1 The study area

逐日观测数据，空间分辨率为 1000 m。通过栅格统计和计算，得到年平均气温、月均温 $\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 月数、最冷月均温、极端低温多年平均值、年降水量等指标数据。为了能够真实反映地理环境上的细微差异，对所有降水和温度指标数据通过地形协变量回归插值^[16]，结合 DEM 进行空间降尺度处理，生成与 DEM 匹配的 10 m 分辨率气候要素分布图。行政区划数据来自国家地理信息公共服务平台（<https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision>）。数据详情见表 1。

1.2 方法

1.2.1 构建评价指标体系并确权 参考已有研究成果，从地形条件、水热条件和寒害风险 3 个层面选择年平均温度、月均温 $\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 月数、年降水量、海拔、坡度、坡向、最冷月均温和极端低温多年平均值 8 个指标构建天然橡胶种植适宜性评价指标体系。并利用层次分析法（AHP）和地理

表 1 数据资料情况
Tab. 1 Data characteristics

数据内容 Data content	数据格式 Data format	分辨率 Spatial resolution/m	数据来源 Data source
2024 年云南省橡胶园地图斑	Shapefile		云南省自然资源厅
数字高程模型（DEM）	Tiff	10	
降水数据	Tiff	1000	云南省气象局
温度数据	Tiff	1000	
行政区划范围	Shapefile		国家地理信息公共服务平台

探测器（GeoDetector）组合确定权重。

AHP 法^[17]通过将复杂问题进行逐层分解（目标层、准则层、指标层），并利用两两比较和数学计算，将主观判断转化为定量权重，最终确定各指标的相对重要性和权重。

首先，邀请多位行业专家对 8 个指标构建的判断矩阵（ A ）进行两两比较打分，结果见表 2。

然后，利用特征值法求权重（ w ），特征方程见式（1）。即求矩阵（ A ）的主特征值（ $\lambda_{\max}$ ）及对应的主特征向量（ v ）：

$$A = \lambda_{\max} v \tag{1}$$

式中， A 为特征矩阵， $\lambda_{\max}$ 为主特征值， v 为特征值对应的主特征向量。归一化主特征向量得到权重向量（ w_i ）（表 3）：

$$w_i = \frac{v}{\sum_{i=1}^n v_i} \tag{2}$$

式中， v_i 为特征向量 v 中的特征元素， w_i 为特征元素对应的特征权重。

表 2 判断矩阵
Tab. 2 Judgment matrix

因子 Factor	年平均气温 Annual mean temperature	月均温 $\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 月数 Number of months with monthly mean temperature	年降水量 Annual precipitation	海拔 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect	最冷月均温 Mean temperature of the coldest month	极端低温多年平均值 Multi-year average of extreme low temperature
年平均气温	1.0	1.0	2.5	1.0	2.5	2.5	1.0	1.0
月均温 $\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 月数	1.0	1.0	2.5	1.0	2.5	2.5	1.0	1.0
年降水量	0.4	0.4	1.0	0.4	2.0	2.0	0.4	0.4
海拔	1.0	1.0	2.5	1.0	2.5	2.5	1.0	1.0
坡度	0.4	0.4	0.5	0.4	1.0	2.0	0.4	0.4
坡向	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	1.0	0.4	0.4
最冷月均温	1.0	1.0	2.5	1.0	2.5	2.5	1.0	1.0
极端低温多年平均值	1.0	1.0	2.5	1.0	2.5	2.5	1.0	1.0

最后, 计算一致性指标 (CI) 与一致性比率 (CR), 进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

通过求解计算, 主特征值 $\lambda_{\max}=8.12$, $CI=0.0176$, $RI=1.41$ ($n=8$), $CR=0.0125$, 远小于 0.1, 说明一致性较好, 通过检验。

地理探测器^[18]基于“如果某个自变量对某个因变量有重要影响, 那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性”的假设, 利用空间分层异质性统计量 (q) 探测因子 (X) 的空间分布多大程度上影响了属性 (Y) 的空间分异, q 值越大, 说明 X 的分布对 Y 的分布贡献越大, 权重就越高。

分别将指标因子重分类结果作为 X 变量, 2024 年橡胶种植分布核密度图的自然断点分类结果作为 Y 变量, 输入公式 (5) 计算 q 值, 最后将 8 个指标因子对应的 q 值归一化处理后, 得到各指标因子的权重。指标因子重分类标准见表 4。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中, $h=1, \dots, L$, 为因子 (X) 的分层 (即分类); N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。 q 的值域为 [0,1], q 值越大, 表示自变量 (X) 对属性 (Y) 的解释力越强, 反之则越弱。

最终将 AHP 法和地理探测器分别确定的权重取均值得到组合权重, 结果见表 3。

表 3 指标权重计算结果
Tab. 3 Calculation results of indicator weights

准则层 Criterion layer	指标 Indicator	层次分析法权重 AHP weight	地理探测器权重 Geodetector weight	组合权重 Combined weight
水热条件	年平均气温	0.1600	0.191	0.175
	月均温 ≥ 18 °C 月数	0.1600	0.129	0.144
	年降水量	0.0789	0.038	0.059
地形条件	海拔	0.1600	0.292	0.221
	坡度	0.0659	0.006	0.041
	坡向	0.0551	0.001	0.038
寒害风险	最冷月均温	0.1600	0.200	0.175
	极端低温多年平均值	0.1600	0.143	0.147

1.2.2 指标等级划分与因子重分类标准 考虑云南橡胶种植区的地理环境差异, 以哀牢山山脊为界, 将种植区分为西部和东部 (图 1)。哀牢山以西由于有无量山、哀牢山等高山屏障, 寒潮侵袭受阻滞, 宜胶海拔上限较东部高, 可达 900~1000 m; 宜胶的降水量和温度均比东部低, 年平均温度下限为 19 °C, 年降水量下限为 1000 mm。东部冬季受寒潮影响较大, 宜胶海拔上限较低, 为 300~400 m; 适宜的年平均温度下限为 21 °C; 适宜的年降水量下限为 1200 mm。因此, 分别针对哀牢山以西地区和以东地区制定橡胶种植适宜性评价标准, 结果见表 4。

1.2.3 适宜性综合评价 根据指标重分类标准, 先对指标因子进行适宜性区间映射和重分类, 然后将重分类结果 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和对应权重 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 带入公式 (6) 加权求和, 即可计算得到天然橡胶种植环境适宜性指数 (Index), 其

中 $n=8$ 。

$$\text{Index} = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i \quad (6)$$

最后, 按照自然断点法将计算结果划分为 4 个等级, 从低到高分别为不适宜、基本适宜、次适宜和适宜, 即得到适宜性评价结果。

2 结果与分析

2.1 水热条件指标及其重分类

水热条件是影响橡胶种植的主导因素。15 °C 是橡胶树组织分化的临界温度, 18 °C 是橡胶树正常生长的临界温度, 适宜橡胶树快速生长和产胶的温度范围是 20~27 °C^[19]。橡胶树喜湿润, 年降水量在 1000 mm 以上为宜。因此, 选取年平均气温、月均温 ≥ 18 °C 月数和年降水量 3 个关键指标表征水热条件。哀牢山以西和哀牢山以东适宜橡胶种植的年平均气温下限分别为 19 °C 和 21 °C,

表 4 云南省橡胶种植适宜性评价指标等级划分与因子重分类标准

Tab. 4 Grading and reclassification criteria for suitability evaluation indices of rubber cultivation in Yunnan province

准则层 Criterion layer	指标 Indicator	哀牢山以西 West of Ailao Mountains				哀牢山以东 East of Ailao Mountains			
		不适宜 Not suita- ble	基本适宜 Marginally suitable	次适宜 Moderately suitable	适宜 Highly suitable	不适宜 Not suita- ble	基本适宜 Marginally suitable	次适宜 Moderately suitable	适宜 Highly suitable
水热条件	年平均气温/℃	<19	[19,20)	[20,21)	≥21	<21	[21,22)	[22,23)	≥23
	月均温 ≥ 18 ℃ 月数	<7	[7,8)	[8,9)	≥9	<7	[7,8)	[8,9)	≥9
	年降水量/mm	<1000	[1000,1200)	[1200,1400)	≥1400	<1200	[1200,1300)	[1300,1500)	≥1500
地形条件	海拔/m	>1000	(900,1000]	(800,900]	≤800	>350	(250,350]	(150,250]	≤150
	坡度/(°)	>35	(20,35]	(10,20]	≤10	>35	(20,35]	(10,20]	≤10
	坡向	阴坡	半阴坡/无坡	半阳坡	阳坡	阴坡	半阴坡/无坡	半阳坡	阳坡
寒害风险	最冷月均温/℃	<12	[12,13)	[13,15)	≥15	<12	[12,13)	[13,15)	≥15
	极端低温多年 平均值/℃	<2	[2,3)	[3,5)	≥5	<2	[2,3)	[3,5)	≥5

年降水量下限分别为 1000 mm 和 1200 mm，月均温 ≥ 18 ℃ 月数下限相同，为 7 个月（表 4）。年平均气温和月均温 ≥ 18 ℃ 月数基于 2005—2024 年的逐日气温数据通过计算和统计得到。年降水量基于 2005—2024 年的逐日降水数据通过求和计算得到。3 个指标原始空间分辨率为 1000 m，为了与其他指标的空间分辨率对齐，升采样到 10 m 的分辨率。得到因子数据后，分哀牢山以西和哀牢山以东按照表 4 对应的分类标准进行重分类，结果如图 2 所示。从年平均气温和月均温 ≥ 18 ℃ 月数分布来看，适宜橡胶种植的地区主要分布在西双版纳州和普洱市的低海拔地区和其他地州的河谷地区，如红河的元江河谷地带（图 2A，图 2B）。从降水情况看（图 2C），除了临沧市、普洱市和红河州的北部高纬度地区，其余地区的降水条件均适宜橡胶种植。

2.2 地形条件指标及其重分类

地形地貌的分布影响光照、气温和降水等气象要素的空间分布，对橡胶种植有重要影响^[4]。适宜橡胶种植的坡度应小于 35°，坡度过大不利于土壤水分及养分的保持，也不利于橡胶生产运输。阳坡和半阳坡光照条件好，更适宜橡胶树生长和产胶。因此，选取海拔、坡度和坡向作为地形条件指标。哀牢山以西和哀牢山以东适宜橡胶种植的海拔上限分别为 1000 m 和 350 m，坡度上限一致，均为 35°，坡向适宜性分类标准也相同，光照条件好的阳坡、半阳坡更适宜橡胶种植（表 4）。3 个指标均基于 5 m 分辨率的 DEM 数据通过计算得到，并通过下采样统一到 10 m 分辨率。其

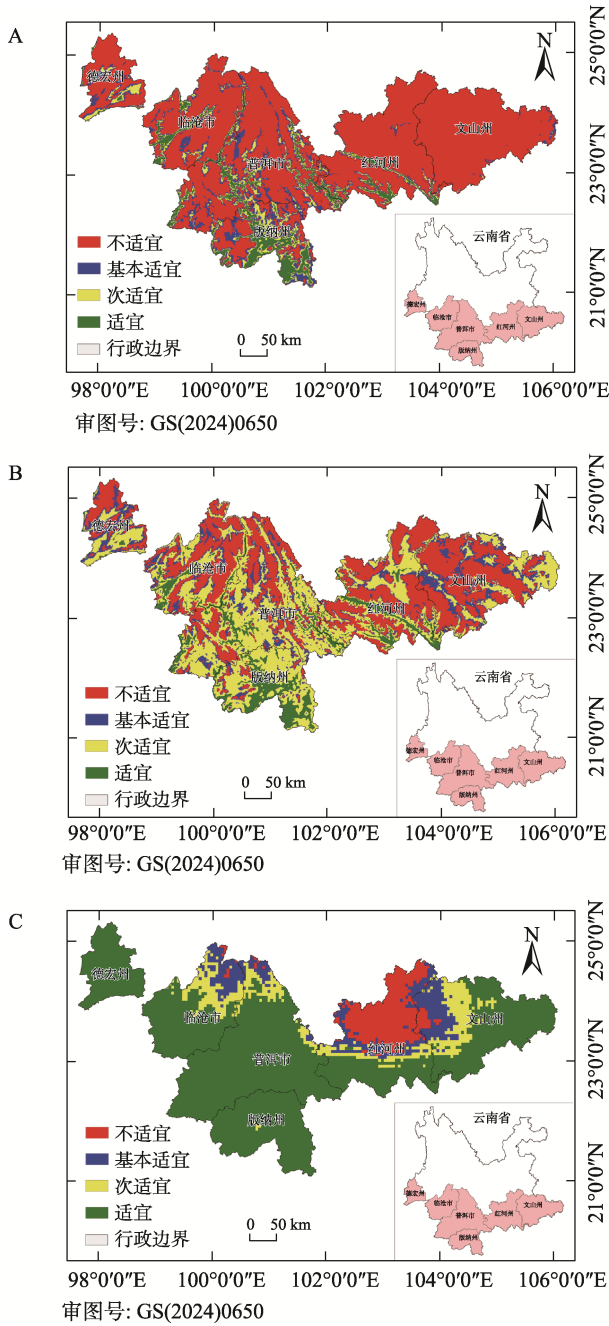
中，根据原始计算得到的方位角按照表 5 的坡向分类标准分为阳坡、半阳坡、阴坡、半阴坡和无坡向 5 类。得到因子数据后，分哀牢山以西和哀牢山以东按照表 4 对应的分类标准分别进行重分类，结果如图 3 所示。从海拔来看，适宜橡胶种植的地区主要分布在低海拔的河谷地带（图 3A）。从坡度看，适宜橡胶种植的地区为坡度小于 10° 的山间盆地（图 3B）。适宜的坡向随机分布，未形成集聚区，存在局部影响（图 3C）。

2.3 寒害风险指标及其重分类

寒害是指热带、亚热带植物在冬季生育期间出现一个或多个低温天气过程，造成植物生理的机能障碍，导致减产或死亡的现象^[20]。已有研究表明，寒害已经成为我国橡胶树种植区特有和主要的气象灾害之一^[21]。胶林内平均气温低于 5 ℃ 时，橡胶树部分叶片即出现轻微的寒害症状^[22]。云南橡胶种植主要受年平均辐射型积寒和年平均平流型积寒威胁^[21]。本研究选择年最冷月均温和极端低温多年平均值作为寒害风险指标。哀牢山以西和以东的寒害风险指标分级标准相同，最冷月均温下限为 12 ℃，极端低温多年平均值下限为 2 ℃（表 4）。从重分类结果可以看出，受寒害影响小的地区同样分布在低海拔的山间盆地和河谷地区，这些地区极端低温和持续时间突破下限的概率低，受寒害的频率低（图 4）。

2.4 云南省植胶地适宜性分析

根据评价方法，将重分类后的 8 个因子带入公式（6）进行加权求和计算得到适宜性指数，再按照自然断点法对适宜性指数进行分类，最后得



A: 年平均气温; B: 月均温 $\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 月数; C: 年降水量。
A: Annual mean temperature; B: Number of months with monthly mean temperature above $18\text{ }^{\circ}\text{C}$; C: Annual precipitation.

图 2 水热条件因子重分类

Fig. 2 Reclassification of hydrothermal condition factors

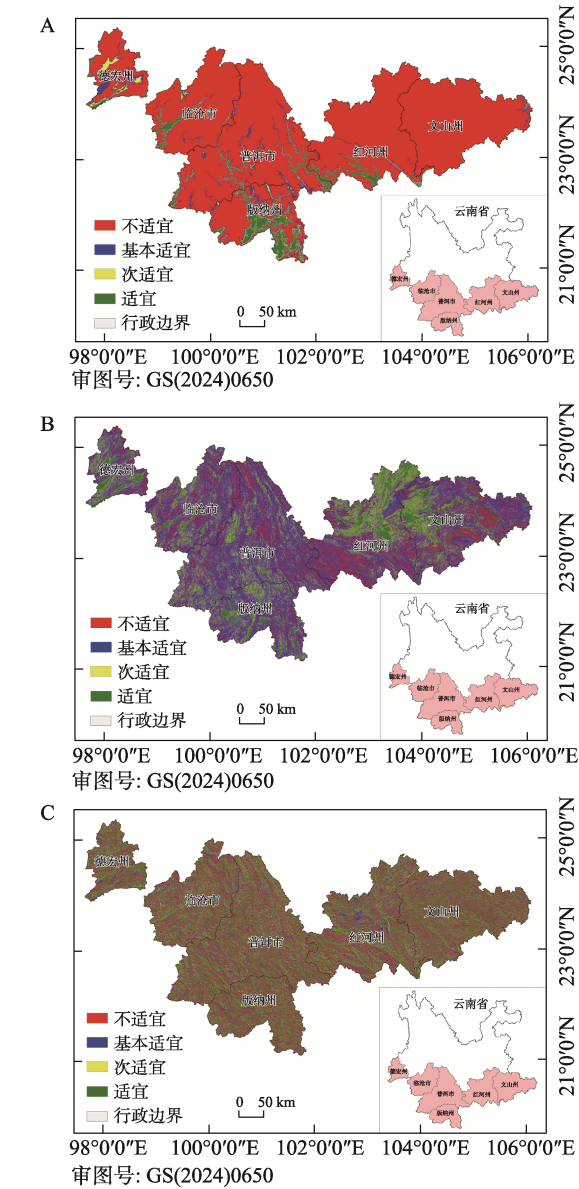
到适宜性评价结果。基于评价结果栅格数据, 得到适宜性等级和地州行政区划统计面积分布如图 5 所示。

从种植适宜性空间分布(图 5A)来看, 综合 8 个环境因子后, 适宜种植橡胶的地区主要分布在景洪市、勐腊县、江城县、绿春县、金平县、河口县、孟连县、耿马县、沧源县、瑞丽市和芒

表 5 坡向分类标准

Tab. 5 Slope aspect classification standards

坡向 Aspect	坡向方位角 Aspect azimuth/($^{\circ}$)	坡向类型 Aspect type
无坡向	$[-1, -0.000001]$	无坡向
北	$(-0.000001, 22.5], (337.5, 360]$	阴坡
东北	$(22.5, 67.5]$	阴坡
东	$(67.5, 112.5]$	半阴坡
东南	$(112.5, 157.5]$	半阳坡
南	$(157.5, 202.5]$	阳坡
西南	$(202.5, 247.5]$	阳坡
西	$(247.5, 292.5]$	半阳坡
西北	$(292.5, 337.5]$	半阴坡



A: 海拔; B: 坡度; C: 坡向。

A: Elevation; B: Slope; C: Aspect.

图 3 地形条件因子重分类

Fig. 3 Reclassification of terrain condition factors

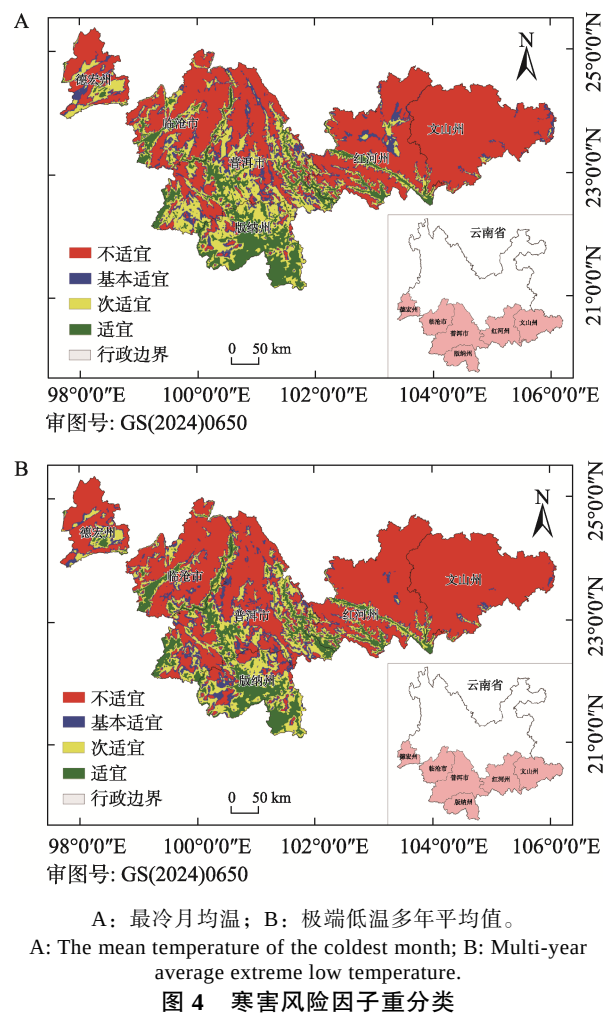


Fig. 4 Reclassification of cold damage risk factors

市等地区。这与已有的云南省橡胶生态适宜区划基本一致。从适宜性等级面积统计来看, 6 个地州适宜种植橡胶的土地约 694 000 hm², 占 6 个地州土地总面积的 4.29%; 次适宜种植天然橡胶的土地约占 2.79%, 基本适宜的约占 5.06%。

从适宜种植天然橡胶的地州面积分布 (图 5B) 来看, 适宜种植天然橡胶的地区主要分布在西双版纳州、普洱市和红河州, 分别占 53.57%、17.09%和 13.88%。文山州适宜面积占比最少为 0.03%。次适宜区占比较高的地州有西双版纳州 (39.07%)、普洱市 (24.98%)、红河州 (12.61%) 和德宏州 (12.41%)。结果表明, 适宜橡胶种植的地区主要分布在哀牢山以西。另外, 基本适宜的地区产胶量较低, 不推荐规模种植。

2.5 云南省 2024 年橡胶种植区适宜性分析

基于适宜性评价结果, 利用 2024 年云南省橡胶种植分布图 (图 6) 进行叠加分析, 分别按照

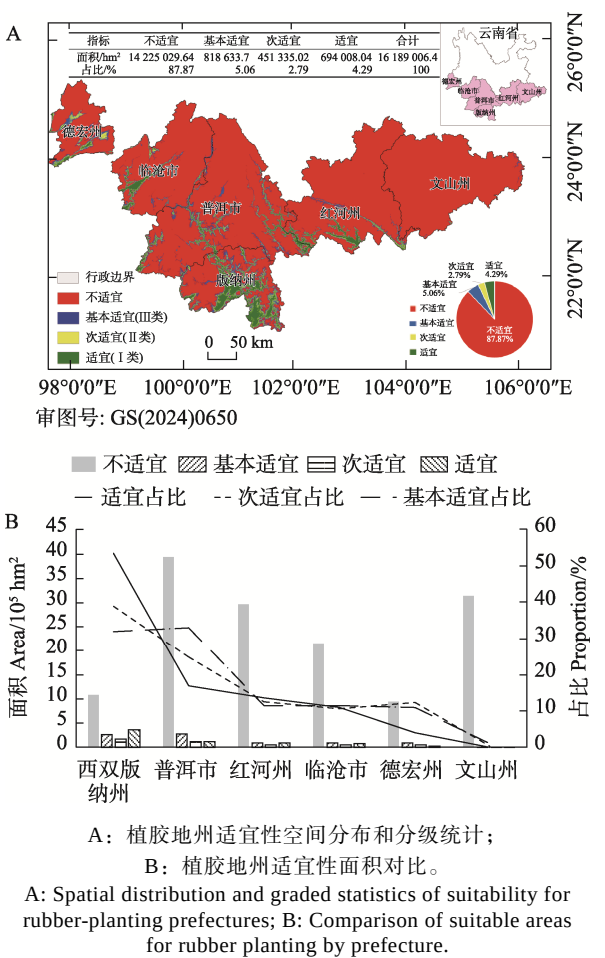


图 5 云南省植胶适宜性空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of suitability for rubber-planting prefectures in Yunnan province

适宜性等级和地州行政区划统计面积分布, 得到 2024 年云南天然橡胶种植区适宜性评价结果如图 7 所示。

从适宜性等级统计结果可以看出, 2024 年云南省橡胶种植地约 47.80%的面积分布在适宜区, 约 22.09%分布在次适宜区, 约 19.29%分布在基本适宜区, 约 10.81%分布在不适宜种植区, 合计占比约 89.18%, 与橡胶种植现状分布情况吻合度较好 (图 7A)。

从地州统计结果看, 西双版纳州橡胶种植面积最多, 约占云南省橡胶种植总面积的 61.70%; 其次是普洱市、红河州和临沧市, 分别占 17.77%、9.94%和 8.33%; 文山州种植面积最少, 仅占 0.09%。从适宜和次适宜占比来看, 适宜占比和次适宜占比最高的依然是西双版纳州, 分别占 62.89%和 56.52%; 其次是普洱市, 分别占 14.04%和 22.03%; 德宏州和文山州占比较少, 均小于 3.00% (图 7B)。

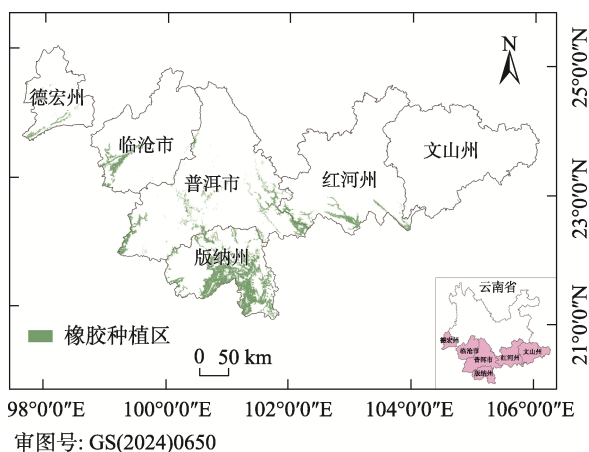
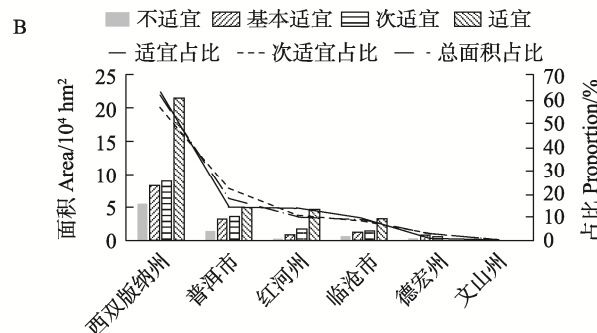
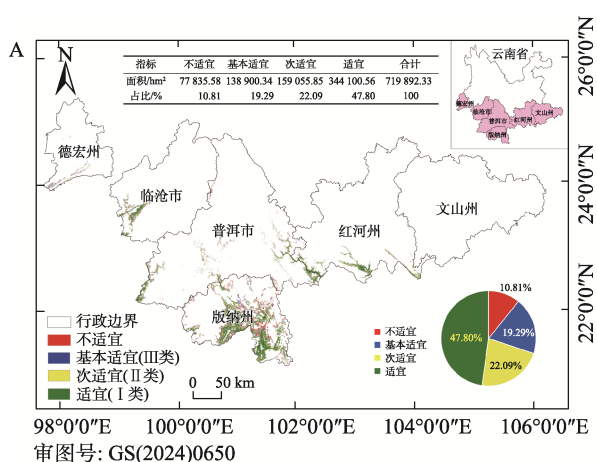


图 6 2024 年云南省橡胶种植区分布图

Fig. 6 Rubber planting areas in Yunnan province in 2024



A: 适宜性空间分布和分级统计; B: 按照地州统计适宜性面积。

A: Spatial distribution and classification statistics of suitability; B: Statistics of suitable area by prefecture.

图 7 2024 年云南省橡胶种植区适宜性空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of suitability for rubber planting areas in Yunnan province in 2024

3 讨论

低温寒害一直是云南省发展天然橡胶的主要限制因素。哀牢山作为云南地理环境的重要分界线,其东西两侧气候条件存在显著差异,哀牢山以西因地形屏障作用,寒潮侵袭频率较低,而哀

牢山以东易受寒潮影响。气候差异也导致橡胶树在东西两侧的适应性差异显著,如东部地区年均温要求在 21°C 以上,而西部地区年均温在 19°C 以上就能满足橡胶树正常生长和产胶;东部地区橡胶种植的海拔要求一般不能超过 400 m ,但西部地区可达 1000 m 。以往有关云南橡胶种植适宜性评价研究多采用统一的适宜性评价标准^[3, 7],未能充分考虑区域间气候屏障对橡胶树寒害风险的阻滞效应和橡胶树适应性的影响。刘少军等^[4]在开展中国橡胶树种植气候适宜性区划研究过程中,计算橡胶树寒害指数时考虑了哀牢山东西两侧的差异,但未明确东西部的具体界线。本研究首次提出以哀牢山山脊为界划分区域的建模思路,分别制定差异化评价标准,有效解决了单一模型难以适应复杂地理环境的问题。这一方法与基于生态区划的作物适宜性评价理念相契合^[23],在国内热带作物研究中属首次系统应用。

国外橡胶种植适宜性研究多聚焦于东南亚热带地区(如泰国、马来西亚),其评价体系侧重于气候因子(如年均温、年降水量)和土壤因子(如 pH、有机质含量)^[24],较少考虑地形屏障对气候风险的阻滞效应。相比之下,本研究针对云南独特的山地气候特征,引入地形因子(海拔、坡度、坡向)和寒害风险量化指标,更符合中国西南山地橡胶种植的实际需求^[25]。

本研究结合层次分析法(AHP)与地理探测器(GeoDetector)2种方法确定指标权重,兼具主观经验与客观数据的双重优势。AHP方法考虑了专家经验,通过专家经验赋权,弥补了传统统计方法对复杂农业生态系统的解释不足。地理探测器考虑了数据客观性,通过数据驱动识别关键因子,增强了模型对空间异质性的响应能力。二者结合提高了权重确定的科学性和准确性。

本研究的不足之处是未考虑日照、风速等条件对橡胶树生长的影响。例如,如果日照时数不足,橡胶树树形细高,树冠小;冬季如果白天光照时间长,有减轻橡胶树寒害症状的效果;微风利于促进天然橡胶的新陈代谢,强风会抑制橡胶树的生长发育,8级及以上风力会导致橡胶树折枝和断干^[4]。虽然日照、风速不是影响橡胶树大范围种植的关键因子,但是在数据可获得的情况下,可以纳入评价体系。另外,寒害风险的指标相对简单,仅使用了年最冷月均温和极端低温多年平均值,对发生寒害风险概率的量化不足。后

期研究可以考虑增加年度最大降温幅度、年度寒害持续日数、年度辐射型积寒、年度平流型积寒、年度最长平流型低温天气过程的持续日数等指标^[22]，构建橡胶综合寒害指数等对寒害风险进行更全面的量化。

4 结论

本研究提出了一种基于地理环境分区建模的橡胶种植适宜性评价方法，考虑了哀牢山东西两侧的气候、地形等差异，分区制定差异化评价标准，对云南省橡胶种植适宜性进行了精细化评价，主要结论如下：

（1）云南省适宜种植橡胶的地区主要分布在景洪市、勐腊县、江城县、绿春县、金平县、河口县、孟连县、耿马县、沧源县、瑞丽市和芒市等地区。这与已有的云南省橡胶生态适宜区划基本一致。6 个地州适宜种植橡胶的土地约 694 000 hm²，占 6 个地州土地总面积的 4.29%，次适宜区约占 2.79%，基本适宜区约占 5.06%。

（2）2024 年云南省橡胶种植园地总面积约 719 892.33 hm²，约 47.80%分布在适宜区，约 22.09%分布在次适宜区，约 19.29%分布在基本适宜区，约 10.81%分布于不适宜区。

（3）评价结果具有较高空间分辨率（10 m），可以识别细微的地理环境差异，能够为云南省橡胶种植的科学布局和可持续发展提供更精细化的数据支撑和实践指导。

参考文献

- [1] 刘少军, 周广胜, 房世波. 中国橡胶种植北界[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1272-1280.
LIU S J, ZHOU G S, FANG S B. A preliminary study of the northern planting boundary of rubber tree cultivation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1272-1280. (in Chinese)
- [2] 宋艳红, 史正涛, 王连晓, 冯泽波. 云南橡胶树种植的历史、现状、生态问题及其应对措施[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 171-175.
SONG Y H, SHI Z T, WANG L X, FENG Z B. History, current situation, ecological problems and countermeasures of rubber tree in Yunnan province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(8): 171-175. (in Chinese)
- [3] 鲁韦坤, 李蒙, 胡雪琼, 李湘. 气候变化对云南橡胶潜在种植区的影响[J]. 应用气象学报, 2023, 34(3): 379-384.
LU W K, LI M, HU X Q, LI X. Impacts of climate change on the potential planting areas of rubber in Yunnan[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2023, 34(3): 379-384. (in Chinese)
- [4] 刘少军, 周广胜, 房世波. 中国橡胶树种植气候适宜性区划[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2335-2345.
LIU S J, ZHOU G S, FANG S B. Climate suitability zoning for rubber tree cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(12): 2335-2345. (in Chinese)
- [5] 张莉莉. 基于 GIS 的海南岛橡胶种植适宜性区划[D]. 海口: 海南大学, 2012.
ZHANG L L. The study on agricultural climatic regionalization rubber based on GIS technology in Hainan Island[D]. Haikou: Hainan University, 2012. (in Chinese)
- [6] 陈孟焱, 梁子怡, 舒琦, 闹增措, 陈岩, 曾哲飞, 拉琼, 王俊伟. 基于 MaxEnt 模型预测入侵植物鬼针草在中国的潜在分布及适生性[J]. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1749-1758.
CHEN M Y, LIANG Z Y, SHU Q, NAO Z C, CHEN Y, ZENG Z F, LA Q, WANG J W. Predicting potential distribution and adaptability of the invasive plant *Bidens pilosa* in China based on the MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(6): 1749-1758. (in Chinese)
- [7] 刘少军, 周广胜, 房世波, 张京红. 未来气候变化对中国天然橡胶种植气候适宜区的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2083-2090.
LIU S J, ZHOU G S, FANG S B, ZHANG J H. Effects of future climate change on climatic suitability of rubber plantation in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2083-2090. (in Chinese)
- [8] 吴炳孙, 何鹏, 吴敏, 韦家少, 王大鹏, 覃怀德, 高乐. 基于 GIS 的儋州市橡胶种植用地适宜性评价[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1054-1059.
WU B S, HE P, WU M, WEI J S, WANG D P, QIN H D, GAO L. Suitability evaluation of rubber cultivation land in Danzhou based on GIS[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1054-1059. (in Chinese)
- [9] 苏文地, 张培松, 罗微. 基于主成分分析的橡胶种植适宜性评价——以海南省儋州市为例[J]. 热带农业科学, 2014, 34(3): 69-75.
SU W D, ZHANG P S, LUO W. Suitability evaluation of rubber planting based on PCA[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2014, 34(3): 69-75. (in Chinese)
- [10] 齐福佳, 邱彭华, 吴晓涛, 刘友兆. 基于 GIS 的临高县橡胶种植土地适宜性评价[J]. 林业资源管理, 2014(1): 114-119.
QI F J, QIU P H, WU X T, LIU Y Z. Evaluation of land suitability for rubber planting in Lingao county based on GIS technology[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2014(1): 114-119. (in Chinese)

- [11] 刘少军, 蔡大鑫, 佟金鹤, 李伟光. 气象条件对中国橡胶树种植的影响[J]. 热带生物学报, 2022, 13(4): 376-381.
LIU S J, CAI D X, TONG J H, LI W G. Influence of climate factors on rubber plantation in China[J]. Journal of Tropical Biology, 2022, 13(4): 376-381. (in Chinese)
- [12] 彭燕. 西双版纳橡胶林适宜种植海拔上限及不适宜种植区生态修复[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
PENG Y. Suitable planting upper altitude identification and unsuitable planted area ecological restoration of rubber forest in Xishuangbanna[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2023. (in Chinese)
- [13] 曹阳, 宋伟东. 基于云理论、粗集和模糊神经网络的区域橡胶种植适宜度评估模型[J]. 测绘科学, 2009, 34(6): 149-151.
CAO Y, SONG W D. Rubber planting suitability evaluation model based on cloud theory, rough set and fuzzy neural network[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(6): 149-151. (in Chinese)
- [14] 白蕤, 李宁, 张京红, 刘少军, 陈小敏, 邹海平. 未来气候变化背景下橡胶树南美叶疫病入侵中国的风险预测[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3500-3508.
BAI R, LI N, ZHANG J H, LIU S J, CHEN X M, ZOU H P. Risk prediction of South American leaf blight of rubber tree in China under the scenario of climate change[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3500-3508. (in Chinese)
- [15] LAI H Y, CHEN B Q, YIN X, WANG G Z, WANG X C, YUN T, LAN G Y, WU Z X, YANG C, KOU W L. Dry season temperature and rainy season precipitation significantly affect the spatio-temporal pattern of rubber plantation phenology in Yunnan province[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1283315.
- [16] 郎立晨, 唐诚, 高星, 李志慧, 吴锋. 复杂地形下降水的高空间分辨率插值方法研究[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 101-120.
LANG L C, TANG C, GAO X, LI Z H, WU F. Spatial interpolation of high-resolution daily precipitation over complex terrains[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 101-120. (in Chinese)
- [17] JAIMES Y, ROJAS J, CILAS C, FURTADO E L. Suitable climate for rubber trees affected by the South American Leaf Blight (SALB): example for identification of escape zones in the Colombian middle Magdalena[J]. Crop Protection, 2016, 81: 99-114.
- [18] 冯家东. 基于多源遥感数据的橡胶林识别及橡胶-益智种植用地适宜性评价——以白沙县为例[D]. 海口: 海南大学, 2022.
FENG J D. Rubber forest identification and suitability assessment of rubber-puzzle plantation land based on multi-source remote sensing data: the case of Baisha country[D]. Haikou: Hainan University, 2022. (in Chinese)
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [20] 崔读昌. 关于冻害、寒害、冷害和霜冻[J]. 中国农业气象, 1999, 20(1): 56-57.
CUI D C. On frost damage, chilling injury, cold injury and frost[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1999, 20(1): 56-57. (in Chinese)
- [21] 佟金鹤, 张卫红, 刘少军, 李伟光, 陈小敏. 中国橡胶树大风、寒害的时空分布分析[J]. 生态科学, 2023, 42(2): 43-48.
TONG J H, ZHANG W H, LIU S J, LI W G, CHEN X M. Temporal and spatial distribution analysis of gale damage and chilling injury of *Hevea brasiliensis* in China[J]. Ecological Science, 2023, 42(2): 43-48. (in Chinese)
- [22] 刘少军, 周广胜, 房世波. 1961—2010 年中国橡胶寒害的时空分布特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1282-1288.
LIU S J, ZHOU G S, FANG S B. Spatial-temporal characteristics of rubber chilling injury in China during 1961—2010[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1282-1288. (in Chinese)
- [23] SELVALAKSHMI S, KALARIKKAL R K, YANG X. Predicting the habitat distribution of rubber plantations with topography, soil, land use, and climatic factors[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(9): 598.
- [24] SINGH A K, LIU W J, ZAKARI S, WU J E, YANG B, JIANG X J, ZHU X A, ZOU X, ZHANG W J, CHEN C F, SINGH R, NATH A J. A global review of rubber plantations: Impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 796: 148948.
- [25] ZOMER R J, TRABUCCO A, WANG M C, LANG R, CHEN H F, METZGER M J, SMAJGL A, BECKSCHAFER P, XU J C. Environmental stratification to model climate change impacts on biodiversity and rubber production in Xishuangbanna, Yunnan, China[J]. Biological Conservation, 2014, 170: 264-273.