

张明达, 胡雪琼, 张露, 等. 云南省三角梅种植生态适宜性及低温灾害研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 92–99. [Zhang Mingda, Hu Xueqiong, Zhang Lu, et al. Study on Ecological Suitability and Low Temperature Risk of Bougainvillea in Yunnan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 92–99. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.015.]

## 云南省三角梅种植生态适宜性及低温灾害研究<sup>\*</sup>

张明达<sup>1</sup>, 胡雪琼<sup>1</sup>, 张露<sup>2,3,4</sup>, 李世峰<sup>2,3,4</sup>, 张颢<sup>2,3,4</sup>,  
李绅崇<sup>2,3,4</sup>, 宋杰<sup>2,3,4</sup>

(1. 云南省气候中心, 云南 昆明 650034; 2. 云南省农业科学院花卉研究所, 云南 昆明 650205;  
3. 国家观赏园艺工程技术研究中心, 云南 昆明 650205; 4. 云南省花卉育种重点实验室, 云南 昆明 650205)

**摘 要:**三角梅是云南打造世界一流“绿色食品品牌”千亿云花产业的主要花卉品种, 开展三角梅种植生态适宜性和低温灾害风险区划研究有助于优化产业布局。在 ArcGIS 平台下, 采用层次分析法, 基于气候、地形地貌和土壤理化性质的 8 个生态适宜性和 2 个低温灾害因子, 开展了云南省三角梅种植生态适宜性和低温风险精细化空间分析。结果表明: 气候适宜性因子是限制三角梅种植的关键性影响因子, 土壤理化性质因子的影响次之, 地形地貌因子的影响较小。其中, 气温和日照相关因子的影响较大, 土壤理化性质适宜性因子在全省范围表现较好, 仅在部分干热河谷区和石漠化区适宜性较差, 地形地貌适宜性因子分布规律不明显。低温灾害方面, 云南西南部地区无风险, 中部和东南部为低风险、东部为中风险, 西北部为高风险。该研究方法可推广至其他园林植物种类种植区划研究。

**关键词:**三角梅; 生态适宜性; 低温灾害; 层次分析法; 种植区划

**中图分类号:** S42; X43; X915.5; P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)03–0092–08

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.015

三角梅 (*Bougainvillea* spp.) 是瑞香目 (*Thymelaeaceae*) 紫茉莉科 (*Nyctaginaceae*) 植物, 原产于南美洲, 1799 年在巴西首次发现, 并用 *Bougainvillea* 命名, 19 世纪从巴西引种到欧洲, 而后引种至亚洲、非洲、澳大利亚等地区, 现多种植在中南亚热带和热带地区。国内最早在 1919 年于广西北海采集到三角梅标本, 1924 年在云南昆明采集到三角梅样本。除作为观赏类植物外, 三角梅在化学、药学、工业应用和食品等领域<sup>[1–2]</sup>的应用价值也非常丰富。作为耐污染植物, 三角梅具有净化空气环境、减轻空气污染的作用<sup>[3]</sup>, 尤其对 PM<sub>2.5</sub> 具有很好的吸附作用<sup>[4]</sup>, 是环境友好且经济的功能性植物。三角梅规模化种植有助于清除大气中的 CO<sub>2</sub><sup>[5]</sup>, 有助于降低气候变化的影响、助力碳中和目标实现。

云南作为世界三大最适宜花卉生产的地区(肯尼亚、哥伦比亚和厄瓜多尔、云南)之一, 正致力于打造世界一流“绿色食品品牌”, 千亿“云花”产业品牌。云南省有 1.7 万多种高等植物, 其中野生花卉

和观赏植物数量超过 5 300 种, 具有较高观赏价值的花卉达 2 500 多种。2021 年云南省花卉种植面积 12.8 万 hm<sup>2</sup>, 种植面积和产值增速均居全球第 1。三角梅种植适应性强、栽培简单、病虫害少、花期长、应用形式广泛, 是公认的重要大城乡景观木本花卉。全国三角梅种植基地面积合计超过 2 万 hm<sup>2</sup>, 产值超过 40 亿元, 广泛种植于云南、福建、广东、广西、海南、贵州、重庆和台湾等省份。云南是全国重要的三角梅产销中心, 全省种植三角梅品种 200 余个, 种植面积接近 3 km<sup>2</sup>, 年产量达 3 000 万株, 年产值超过 12 亿元, 种植面积和产值位列全国第 2 位。据统计, 云南省三角梅种植面积与福建相当, 有 12 亿元的年产值, 但距离福建省 50 亿的年产值相差甚远, 产业发展地区之间不均衡, 产值提升空间较大, 因此需科学合理开展布局。

遵循“适地适树”的原则, 开展园林植物种植生态适宜性和低温灾害区划研究, 有利于提高花卉产量和品质, 节约生产成本, 减轻气象灾害的

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2023–01–28 修回日期: 2023–03–10

基金项目: 云南省花卉育种重点实验室开放基金项目(FKL–202102); 云南省重大科技专项“生物资源数字化开发应用项目”(202002AA100007); 云南省科技厅重点研发项目(2018BC007); 云南省气象局科研项目(YZ202204); 云南省财政部门预算项目“绿色食品品牌打造科技支撑行动(花卉)专项”

第一作者简介: 张明达(1982–), 男, 汉族, 吉林吉林市人, 高级工程师, 主要从事农业气象、生态气象和气候变化研究。

E-mail: rockerdada@163.com

通信作者: 宋杰(1980–), 男, 汉族, 山西长治人, 副研究员, 主要从事观赏植物种质资源评价和利用研究。

E-mail: songjie2591@126.com

损失<sup>[6]</sup>。开展花卉的生态适宜性研究,有助于通过气候相似的引种理论和逐步锻炼的方法,人为改变其遗传特性,从而适应新的栽培环境<sup>[7]</sup>。准确地评价“云花”在云南各区域种植发展的生态适宜性,分析气象条件对“云花”产业发展的利弊特征,是合理优化空间布局、提高“云花”资源利用率,避免无序开发和生态破坏的重要手段,对产业优化、科学管理都有重要作用。综合分析评价云南省三角梅种植适宜性和开展低温灾害风险区划研究,并针对具体生态和灾害要素,提出持续发展的建设性意见,可以为政府制定支持三角梅花卉产业发展的政策措施和规划提供依据,同时为三角梅种植企业和从业者的科学决策提供参考,也将为云南省三角梅产业建设和发展提供基础保障。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

云南省位于 21°08'32"~29°15'08"N 和 97°31'39"~106°11'47"E,北依青藏高原,南临印度洋、太平洋,受云贵高原大地形和东南、西南季风的综合影响,气候类型复杂,兼具低纬气候、高原气候和季风气候的特征,四季温差小、日较差大,干湿季分明,气候垂直差异明显,立体气候特征显著。云南的地形地貌为山地高原地形,属青藏高原南延部分,地势由西北向东南呈阶梯状下降,地貌类型多样,地形以山地、高原为主,其中山地占全省的 84%,高原、丘陵占全省的 10%,兼有丘陵、盆地等类型,喀斯特地貌分布广泛,坡度 25°以下区域占总面积的 56%。云南土壤资源丰富,成土条件复杂,种类繁多、分布较广,纬向、径向和垂直分布特征明显,有机质含量较丰富,养分适宜。全省有 18 个土壤类型,多为微酸性或中性,其中红壤占全省国土面积的一半,砖红壤、赤红壤和燥红土等土壤资源占比大;黄壤占 20%,紫色土和石灰土约占 9%。

### 1.2 资料

#### 1.2.1 气象数据

本研究所用气候数据来源于云南省 125 个国家气象观测站,为 1991—2020 年逐日平均气温、最低气温、降水量、日照时数等气象观测资料,计算获得各气候因子的气候态均值。通过与各观测站点的经度、纬度和海拔等地理要素信息,在 SPSS 下建立多元线性回归模型,再结合残差订正和空间内插,将推算值与残差值相叠加,修正回归模型<sup>[8]</sup>,最终获得相应气象要素的云南省精细化空间分布,数据空间分辨率为 30 m,作为气候适宜性区划因子指标。

#### 1.2.2 地形地貌数据

地形地貌数据来源于中科院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),其中 DEM 为利用 ASTER GDEM 数据加工得出的 30 m 空间分辨率数据集,应用小网格技术提取经度、纬度、海拔、坡度、坡向等信息,作为地形地貌适宜性区划因子指标。

#### 1.2.3 土壤理化性质数据

土壤理化性质数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心([https://](https://www.geodata.cn)

[www.geodata.cn](http://www.geodata.cn)),该套数据引自世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.2, HWSD1.2),为南京土壤所提供的 1:1 000 000 全国土地调查数据。选取 30~60 cm 深度层的土壤酸碱度(pH),土壤质地,土壤有机质含量作为土壤理化性质适宜性区划因子指标。采用美国制等边三角形法进行土壤质地分类计算<sup>[9]</sup>,采用范贝梅伦方程计算土壤有机质含量换算<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.4 采样点数据

采样点信息来源于云南省农业科学院花卉研究所和云南省三角梅协会,包含 12 个企业种植基地,样点信息包括经纬度、海拔、地形、坡度、坡向及土壤类型等信息,用于对生态适宜性区划结果进行验证。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 生态适宜性和低温灾害指标选取

三角梅的生长和开花受枝条成熟度、激素水平等生理状态及光照、温度、水分等气候因素的综合影响,喜温暖湿润、光照充足,耐热不耐寒,不耐荫,耐干旱不耐积水,在养分充足、光照和水分满足时,一年可多次开花。三角梅生长期最适温度范围为 20~30℃,生育适温约为 20~32℃<sup>[11]</sup>,35℃高温条件下难以开花,会造成叶片灼伤、叶片卷曲的情况,引起失水。低温是限制花卉观赏价值及品质的重要环境因素之一,三角梅种植推广的最大障碍就是冬季低温,温度过低时会导致植株生长不利、枝叶色泽不佳<sup>[12]</sup>。不同品种的三角梅安全越冬的最低温度也不同,温度低于 10℃时,花芽分化基本停止,大多数品种对 4℃以下的低温较为敏感,15℃以上才能开花<sup>[13]</sup>,累年极端最低气温在 -3℃以上时,三角梅露地栽植不受冻。三角梅虽具有一定的抗旱性,但持续的干旱会导致水分利用速率下降,光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率均下降,进而抑制光合作用<sup>[14]</sup>,同时,三角梅在水分供应不足时也易产生落叶现象,影响植株正常生长或延迟开花。一定程度的干旱有利于三角梅抗寒越冬,而且干旱越重越利于抗寒。三角梅的干旱处理可用来调节花期,在暂时缺水的条件下,能促使三角梅顶芽提前停止营养生长,转入到夏季休眠或半休眠状态,从而分化出大量花芽<sup>[15]</sup>。三角梅属强阳性短日照植物,长日照条件下很难完成花芽分化和开花,无光合“午休”现象<sup>[16]</sup>,日照 7.5 h 能有效促进三角梅花芽的形成,且花期整齐一致;日照 10.5 h 促花效果及开花品质最好,但不能长于 11 h。遮阴条件下的云南三角梅趋于徒长,而非趋于开花,适宜光照条件下对三角梅开花繁多有利。因此,选取年平均气温、年降水量和年日照时数,这 3 项气候因子,作为云南省三角梅种植气候适宜性指标,选取最冷月平均气温、最冷月平均最低气温作为低温灾害区划指标。三角梅对光照要求较高,因此适宜在平坦、半坡丘陵下垫面上种植,坡度不宜过大,因此适宜在阳坡种植,阴坡适宜性差<sup>[17]</sup>。三角梅种植对土壤的要求不严,以富含有机质的弱酸性沙壤土为好,最优为富含腐殖质的疏松肥沃土壤,以免积水而影响开花质量,适宜 pH 值为 6~6.5。在含矿物质丰富的土壤中及排水良好的砂质土壤生长良好,最适合疏松肥沃的沙质壤土。

1.3.2 生态适宜性和低温灾害风险分析

采用层次分析法(AHP)对云南省三角梅种植开展生态适宜性评价。首先建立气候、地形地貌、土壤理化性质3个准则层,再建立3个准则层内共8个生态适宜性指标的Satty标度权重系数判断矩阵,两两比较判断同一层次中每个指标的相对重要性。邀请花卉、农业、气象领域专家和种植户等技术专家,对各适宜性因子的重要性进行两两打分,确定各因子的相对重要性。最后进行层次排序和一致性检验,形成特征向量权重,构建生态适宜性评价模型(表1)。通过检验,生态适宜性层次排序CR值为0.05,具有满意的一致性<sup>[18]</sup>。三角梅低温灾害风险区划指标主要考虑冬季平均气温和平均最低气温情况,分别选取最冷月平均气温和最冷月平均最低气温,表示低温灾害影响的强度,将三角梅低温灾害分为高风险、中风险、低风险和无风险共4级,具体分级和权重见表2。基于ArcGIS的重分类工具进行各因子的重新赋值,并采用栅格计算器工具进行层次分析权重系数和因子的栅格运算,使用自然断点法进行分级处理<sup>[19]</sup>,最终获得各个因子和综合的三角梅种植生态适宜性和低温灾害风险区划结果。

表1 云南省三角梅种植生态适宜性层次分析指标权重

生态适宜性指标	高度适宜	中度适宜	勉强适宜	不适宜	权重
年平均气温/℃	[18 ~ 23]	[15 ~ 18], (23 ~ 25]	[13 ~ 15), (25 ~ 27]	> 27, < 13	0.233
年降水量/mm	[1 200 ~ 1 800]	[1 000 ~ 1 200), (1 800 ~ 2 200]	[800 ~ 1 000), (2 200 ~ 2 500]	> 2 500, < 800	0.091
年日照时数/h	≥ 2 000	[1 200 ~ 2 000)	[800 ~ 1 200)	< 800	0.235
坡度/(°)	≤ 15	(15 ~ 20]	(20 ~ 35]	> 35	0.033
坡向/(°)	[135 ~ 225]	[225 ~ 315]	[45 ~ 135]	[0 ~ 45], [315 ~ 359]	0.045
土壤酸碱度	[5.5 ~ 6)	[5 ~ 5.5], [6 ~ 6.5]	[4.5 ~ 5], [6.5 ~ 7]	< 4.5, > 7	0.137
土壤质地	壤砂土	砂黏壤土	砂壤土	砂土	0.118
有机质含量/%	≥ 3	[2 ~ 3)	[1 ~ 2)	< 1	0.106

表2 云南省三角梅低温灾害风险区划指标及权重

低温灾害区划指标	无风险	低风险	中风险	高风险	权重
最冷月平均气温/℃	≥ 15	10 ~ 15	7 ~ 10	≤ 7	0.5
最冷月平均最低气温/℃	> 3	< 3	≤ 0	≤ 3	0.5

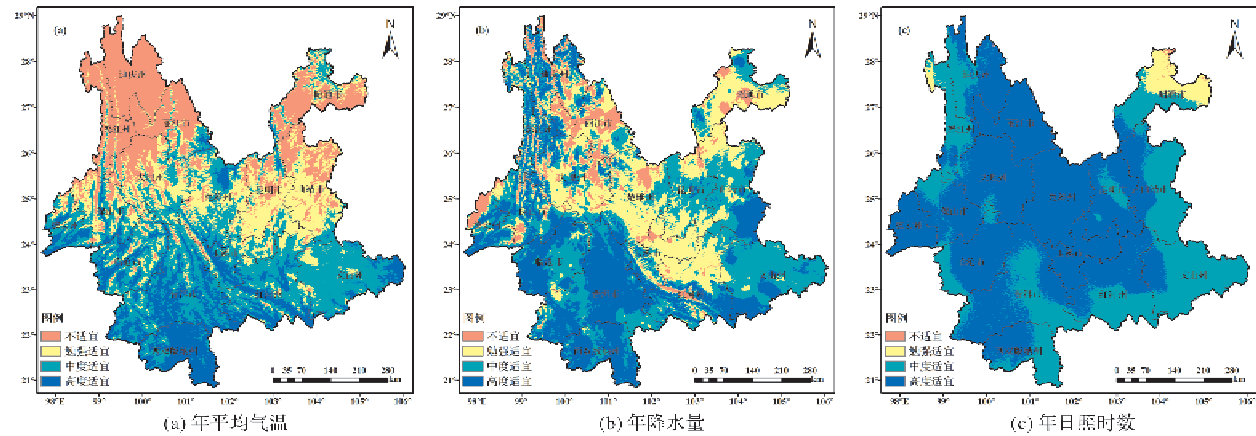


图1 云南省三角梅种植气候适宜性评价图  
(审图号:云S(2019)033号,底图无修改,下同)

2 结果与分析

2.1 气候适宜性

选用年平均气温、年降水量和年日照时数3个对云南省三角梅种植有显著影响的气候因子作为气候适宜性评价指标,并分别绘制气候适宜性空间分布图。在年平均气温方面(图1a),云南的西南部、南部以及河谷地区,均适宜开展种植,尤其是德宏、临沧、普洱、西双版纳和红河南部等地,四季均衡的温度,没有突出的高温和明显的低温,是三角梅种植的高度、中度适宜区。在年降水量方面(图1b),西南暖湿气流在遭遇横断山脉的抬升作用时,位于迎风坡向的西部和西南部地区年降水量充沛,适宜性均达到高度和中度适宜的等级;位于背风坡向的东南等地年降水量稍下降,为勉强适宜区;云南西北部等地的较干旱区域为不适宜区。在年日照时数方面(图1c),全省绝大多数地区均能满足种植要求,除怒江北部边缘和昭通北部为勉强适宜区外,其他地区均为高度、中度适宜区。

## 2.2 地形地貌适宜性

选用坡度和坡向两个对云南省三角梅的种植有显著影响的地形地貌因子作为地形地貌适宜性评价指标, 并分别绘制适宜性区划图。在坡度方面(图 2a), 高度适宜区主要分布在昆明南部、曲靖中部和南部、楚雄中部和南部、德宏大部等地, 这些地区地势较为平坦, 地形起伏度小, 适宜开展规模种植, 占总面积的 26.6%。中度适宜区零星分布在省内各州市, 占 15%, 勉强适宜区分布较广, 集中在中部和南部地区, 占总面积 43.7%。不适宜区主要分布在云南西北部和东北部, 占 14.6%。在坡向方面(图 2b), 由于云南地形条件复杂, 起伏度较大, 因此适宜性的分布呈破碎化状况, 无明显规律, 各适宜性等级的占比也很接近, 各占全省国土面积的约 1/4。

## 2.3 土壤理化性质适宜性

选用土壤质地、土壤有机质和土壤 pH 值三个对云南省三角梅的种植有显著影响的物理化学因子作为土壤理化性质适宜性评价指标, 并分别绘制适宜性区划图。在土壤质地方面(图 3a), 高度适宜区主要分布在迪庆州、怒江州、昭通市北部和西部、曲靖市北部、昆明市东北部、楚雄州北部以及大理市西北部和东北部等地, 占全省面

积 18.6%。中度适宜区在全省的分布最广, 集中分布在西南部、东南部和中部等地, 占全省面积的 76.3%。勉强适宜区和不适宜区主要分布在曲靖市中部、文山州西部以及红河州北部等地, 合计仅占全省国土面积的 5.1%。在土壤有机质含量方面(图 3b), 全省高度适宜区和中度适宜区总体分布较少, 主要分布在昭通市西部、曲靖市东部、迪庆州北部、临沧市西南部、普洱市北部、玉溪市西部和红河州西南部等地, 这些地区的土壤有机质含量较高, 占总面积的 16.7%, 勉强适宜区在全省范围内分布最多, 占 79.5%, 不适宜区仅占 3.7%, 主要分布在元谋和华坪等干热河谷区。在土壤 pH 值方面(图 3c), 高度适宜区面积占全省面积的 41.8%, 主要分布在昆明市、玉溪市、楚雄州南部、曲靖市、文山州北部、红河州北部、怒江州、丽江市、大理市西部、保山市东部、临沧市北部和普洱市北部等地, 这些地区的土壤偏微酸。中度适宜区主要分布在德宏、保山西部、临沧西南部、普洱中部和南部、红河州南部以及文山州南部等地, 占 44.7%。勉强适宜区和不适宜区主要分布在迪庆州、大理州东部、楚雄州北部和昭通市北部等地, 占 13%。

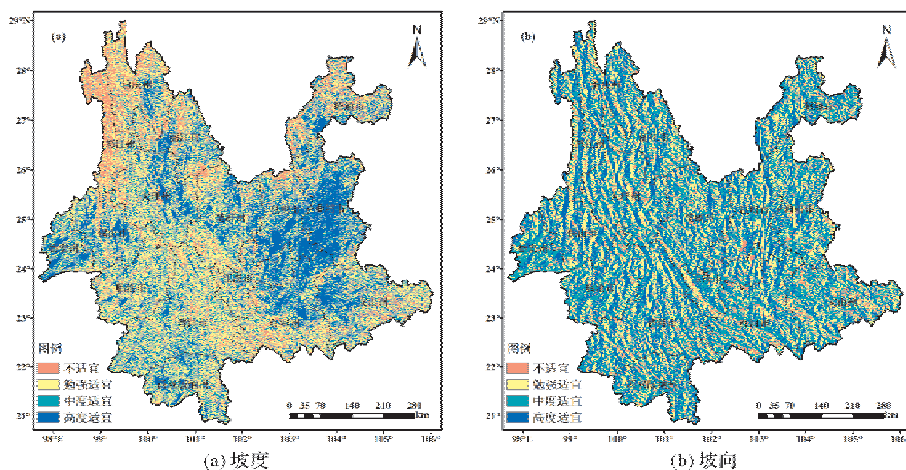


图2 云南省三角梅种植坡度坡向适宜性评价图

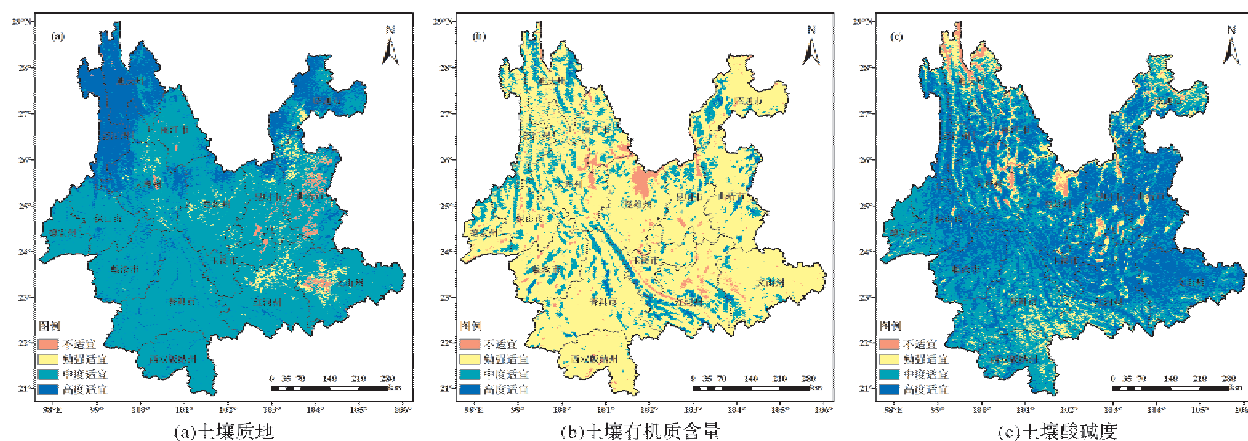


图3 云南省三角梅种植土壤理化性质适宜性评价图



2.4 生态适宜性区划

从三角梅种植生态适宜性区划结果来看(图4),云南省三角梅种植的高度适宜区主要分布在云南的西南部,主要包括德宏州中部和南部、保山市中部、临沧市中部和北部、临沧市北部和中部、普洱市西部和东部、西双版纳州中部、玉溪市西部、楚雄州南部等地,占全省国土面积的21.8%。中度适宜区主要分布在德宏州中部、保山市东部、临沧市南部、普洱市中部、红河州中部、文山州中部、楚雄州大部、昆明市西部和东部等地等地,占全省国土面积的38.8%。勉强适宜区主要包括德宏州北部、保山市北部和西南部、怒江州中部、大理州西部和东部、丽江市中部、曲靖市中部和南部等地,占全省国土面积的27.8%。不适宜区主要分布在怒江州北部、迪庆州大部、丽江市西部和中部、曲靖市东部和昭通市大部等地,占全省面积的11.6%。

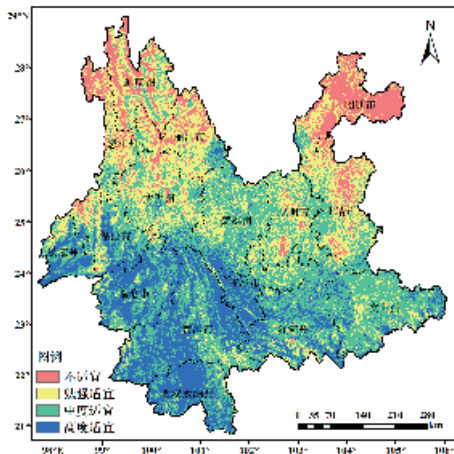


图4 云南省三角梅种植生态适宜性评价图

从云南省16个州市三角梅种植生态适宜性各评价等级的面积比例来看(表3),西双版纳州、临沧市、普洱市3个州市高度适宜种植区面积比例极

高,均超过了50%,其中西双版纳州高达62.8%。云南南部的德宏州、红河州和玉溪市的生态适宜区的面积比例也都超过了30%。文山州、楚雄州和红河州的中度适宜种植区的面积比例超过了50%,玉溪市、昆明市、大理州和普洱市的中度适宜种植区面积比例也都超过了40%,这表明云南中部及偏北的一些地区,虽然偶尔会受到冷空气的影响,但是总体上仍很适合开展三角梅种植。从高中度种植适宜区和可种植区来看,云南省有11个州市都分别达到了40%以上和90%以上。曲靖市、丽江市、怒江州、迪庆州和昭通市分别位于云南省的西北部和东北部地区,这些地方年均气温较低,降水稍偏少,种植生态适宜性较差。

2.5 低温灾害风险区划

在最冷月平均气温方面(图5a),得益于哀牢山脉大地形的阻隔作用,只有强度很大的冷空气才能翻越,很少受到冷空气的侵扰<sup>[20]</sup>,基本不会发生冻害,因此西南部地区总体为中度适宜区,而东南部地区多为勉强适宜区,高度适宜区则仅分布在西双版纳及元江河谷区。在最冷月平均最低气温方面(图5b),云南中部和南部地区都为高、中度适宜种植区,其中纬度较低的西南部和东南部地区都达到了高度适宜等级。将最冷月平均气温和最冷月平均最低气温2个低温灾害因子进行等权重叠加,并采用自然断点法进行分级,得到云南省三角梅种植低温灾害风险区划(图5c),由图5可见,德宏州中部和南部、临沧市西部和中部、普洱市中部和南部、西双版纳州大部、红河州中部和南部、玉溪市西部、楚雄州南部等地为低风险区,占云南总面积的13.6%(表4)。德宏州北部、保山市西部和东部、大理市南部、楚雄州中部、玉溪市东部、昆明市南部以及文山州大部为低风险区,占24.1%。昆明市北部、曲靖市大部和昭通市中部等地为低温灾害中风险区,占32.2%。高风险区主要位于云南的西北部等地,占30.1%。

表3 云南省各州市三角梅种植生态适宜性的面积比例

地区	高度适宜区	中度适宜区	勉强适宜区	不适宜区	高中度适宜区	可种植区
昆明市	1.2	48.5	44.2	6.1	49.7	93.9
曲靖市	0.9	30.6	50.8	17.6	31.6	82.4
玉溪市	34.6	49.1	16.3	0.1	83.6	99.9
保山市	26.2	39.2	28.2	6.4	65.4	93.6
昭通市	0.9	5.1	25.4	68.5	6.0	31.5
丽江市	2.7	16.8	57.3	23.3	19.5	76.7
普洱市	53.0	40.0	6.8	0.2	93.0	99.8
临沧市	54.5	37.6	7.5	0.5	92.0	99.5
楚雄州	10.4	62.4	26.8	0.5	72.8	99.5
红河州	32.8	55.1	11.0	1.1	87.9	98.9
文山州	15.9	66.5	16.8	0.8	82.4	99.2
西双版纳州	62.8	33.0	3.4	0.8	95.8	99.2
大理州	4.5	40.3	48.3	7.0	44.8	93.0
德宏州	42.2	39.0	16.8	2.0	81.2	98.0
怒江州	1.4	17.9	52.4	28.3	19.3	71.7
迪庆州	0.1	14.0	49.7	36.2	14.2	63.8

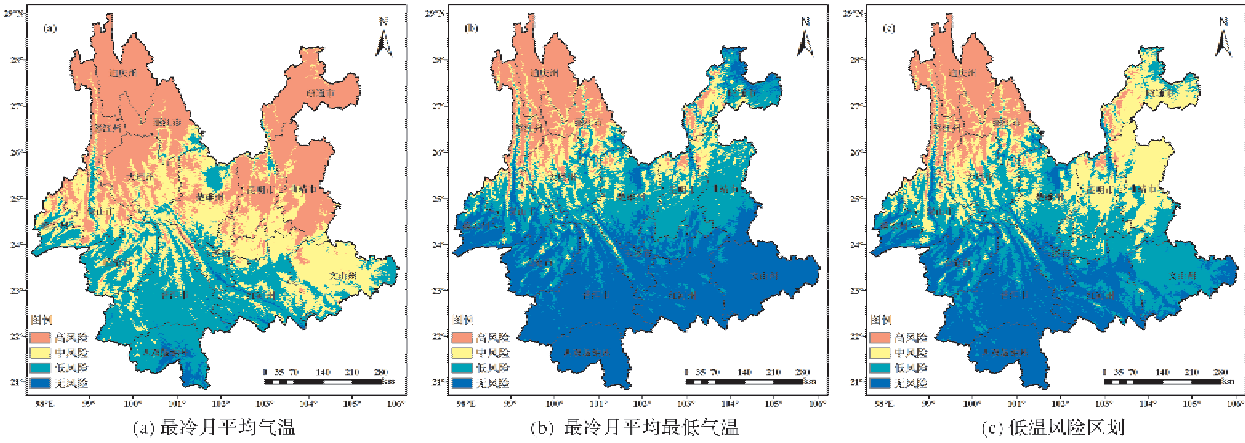


图5 云南省三角梅种植低温灾害风险图

表4 云南省各州市三角梅种植低温灾害风险区划面积比例 %

州市	高风险区	中风险区	低风险区	无风险区	高-中风险区	低-无风险区
昆明市	3.3	52.1	42.2	2.3	55.4	44.6
曲靖市	1.4	72.7	25.4	0.4	74.2	25.8
玉溪市	0.0	9.8	51.4	38.8	9.8	90.2
保山市	3.5	34.7	48.9	12.9	38.2	61.8
昭通市	7.8	69.4	21.7	1.2	77.1	22.9
丽江市	56.1	27.3	13.9	2.7	83.4	16.6
普洱市	0.0	1.2	16.1	82.7	1.2	98.8
临沧市	0.0	5.4	39.7	54.8	5.4	94.6
楚雄州	1.0	29.8	54.4	14.8	30.8	69.2
红河州	0.0	2.2	32.8	65.0	2.2	97.8
文山州	0.0	1.4	74.4	24.1	1.5	98.5
西双版纳州	0.2	0.0	0.8	99.0	0.2	99.8
大理州	16.3	44.0	37.3	2.3	60.4	39.6
德宏州	0.1	10.1	45.0	44.8	10.2	89.8
怒江州	67.4	23.0	7.2	2.4	90.4	9.6
迪庆州	93.4	6.6	0.0	0.0	100.0	0.0

2.6 区划结果验证

云南省有德宏州、临沧市2个州市和开远、瑞丽、宜良3个县市将三角梅评为市花和县花。从生态适宜性评价结果来看(图6a),德宏和临沧的高度适宜区分别为54.5%和42.2%,可种植区面积均超过98%;开远、瑞丽和宜良3个县的高度适宜区占比分别达到了32.5%、72.5%和2.5%,高-中度适宜区占比分别为96.4%、92.5%和70.6%。从低温灾害风险区划结果来看(图6b),

德宏和临沧的低-无风险区分别为89.8%和94.6%,开远、瑞丽和宜良3个县的低-无风险区分别为100%,100%和82.2%。宜良县作为云南省最重要的三角梅种植基地,其适宜性等级和低温灾害等级均明显优于所在昆明市的其他地区,研究成果准确可靠。通过与宜良、开远和砚山3个县三角梅种植基地位置对比发现,全部12个种植基地采样点均位于可种植区和低温灾害低-无风险区,说明适宜性和低温风险区划结果准确。

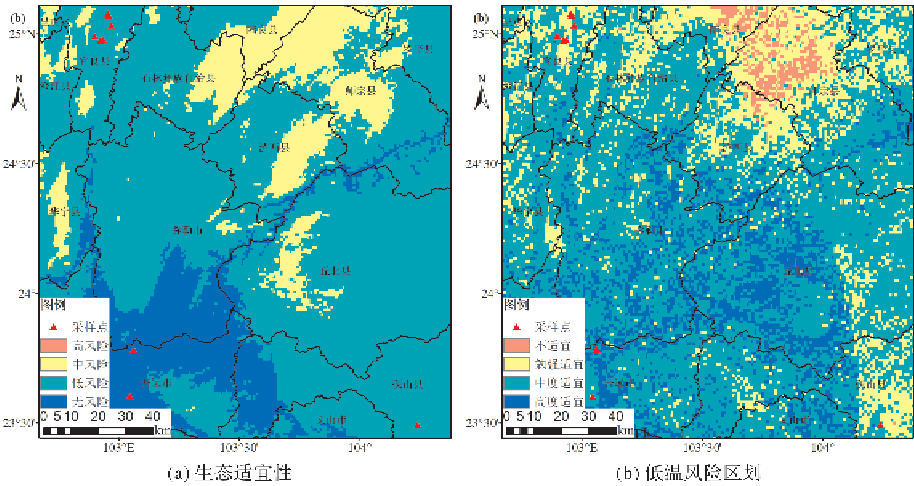


图6 三角梅种植生态适宜性和低温风险区划结果验证

### 3 结论与讨论

本研究采用层次分析法,综合筛选对三角梅种植、生长以及开花有显著影响的气候条件、地形地貌条件和土壤理化性质方面共 10 种指标,进行云南省三角梅种植生态适宜性和低温灾害风险精细化空间分析,主要结论如下:

(1)气候适宜性是限制三角梅种植生态适宜性的关键因子,土壤理化性质的影响次之,地形地貌的影响较小。气温和日照的影响较大,导致西北部地区和东北部地区气候适宜性明显下降。云南中东部地区的坡度较小,适宜性较高,西北部坡度较大地区适宜性低,坡向适宜性规律不明显。全省土壤质地适宜性较好,仅东部和东南部受石漠化影响,适宜性较差,土壤有机质含量在全省绝大多数地区为勉强适宜,土壤酸碱度在部分干热河谷区为不适宜。

(2)从三角梅种植低温灾害风险区划结果来看,云南省的西南部地区开展三角梅种植基本不会受到低温灾害的影响,昆明南部、楚雄和文山等地区,低温灾害影响总体偏轻,为低风险地区。云南的东部是三角梅种植的中风险区,而西北部等高海拔地区是高风险区。

三角梅作为著名的观赏花木,以其绚丽的色彩、较强的抗逆性,深受大众的青睐,作为重要的景观花卉,在生态文明建设中起到了非常重要的作用。云南省三角梅种植产业发展优势地区主要分布在云南省中部和东南部地区,而西南部地区三角梅种植的生态适宜性更好,且更不容易受到低温灾害的影响。本文研究中,尚未考虑社会经济等因子的影响,如灌溉条件、人口数量等因素也会对园林产业发展构成影响,在今后的研究中应加以结合。

**致谢:**感谢国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)提供数据支撑。

### 参考文献:

- [1] MAHENDRAN G B, RAMALINGAM S J, RAYAPPAN J B, et al. Green preparation of reduced graphene oxide by Bougainvillea

- glabra flower extract and sensing application[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31 (17): 14345–14356.
- [2] KUMAR S N, RITESH S K, SHARMILA G, et al. Extraction optimization and characterization of water soluble red purple pigment from floral bracts of Bougainvillea glabra[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10(2): 2145–2150.
- [3] SHARMA S C, SRIVASTAVA R, ROY R K. Role of bougainvilleas in mitigation of environmental pollution[J]. Journal of Environmental Science & Engineering, 2005, 47(2): 131–134.
- [4] KULSHRESHTHA K, RAI A, MOHANTY C, et al. Particulate pollution mitigating ability of some plant species[J]. International Journal of Environmental Research, 2009, 3(1): 137–142.
- [5] ZHANG M Z, LIU J N, WANG W J, et al. Responses of Bougainvillea spectabilis to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> under galaxolide (HHCB) pollution and the mechanisms of its rhizosphere metabolism[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 159–170.
- [6] 宋杰, 李树发, 陆琳, 等. 2013—2014 年冬春昆明主要园林植物冻害调查分析[J]. 西南林业大学学报, 2015, 35(3): 102–106.
- [7] 李世峰, 李卫琼, 解玮佳, 等. 云南报春花种质资源分布特点及观赏类型[J]. 江西农业学报, 2010, 22(3): 85–87.
- [8] 张明洁, 赵艳霞. 北方地区日光温室气候适宜性区划方法[J]. 应用气象学报, 2013, 24(3): 278–286.
- [9] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227–241.
- [10] 王飞, 秦方锦, 吴丹亚, 等. 土壤有机质和有机碳含量计算方法比较研究[J]. 农学报, 2015, 5(3): 54–58.
- [11] 邢海盈, 余文琴. 低温胁迫下三角梅若干生化指标的变化[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2013, 42(5): 493–497.
- [12] 陈香波, 罗玉兰, 张启翔. 三角梅在我国温度适宜分布区划[J]. 中国园林, 2009, 25(7): 97–99.
- [13] 马晓华, 胡青荻, 郑坚, 等. 三角梅自然越冬过程的生理生化响应[J]. 中国农学通报, 2021, 37(8): 48–53.
- [14] 王春春, 谢利娟, 韩蕾, 等. 干旱处理对不同品种簕杜鹃光合特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(4): 70–75.
- [15] CIRILLO C, ROUPHAEL Y, CAPUTO R, et al. The influence of deficit irrigation on growth, ornamental quality, and water use efficiency of three potted bougainvillea genotypes grown in two shapes[J]. HortScience, 2014, 49(10): 1284–1291.
- [16] 张学权. 两个三角梅品种光合生理特性比较分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 201–203, 219.
- [17] SALAM P, BHARGAV V, GUPTA Y C, et al. Evolution in bougainvillea (bougainvillea commers.) – A review[J]. Journal of Applied and Natural Science, 2017, 9(3): 1489–1494.
- [18] 闫敏慧, 姚秀萍, 王蕾, 等. 用层次分析法确定气象服务评价指标权重[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 470–475.
- [19] 唐熠, 谢晓燕, 周秀华, 等. 广西低温雨雪冰冻灾害危险性评估和区划[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 101–106.
- [20] 尹丽云, 梅寒, 张腾飞, 等. 云南省精细化冰雹灾害危险性区划分析[J]. 灾害学, 2022, 33(7): 99–105.

## Study on Ecological Suitability and Low Temperature Risk of Bougainvillea in Yunnan Province

ZHANG Mingda<sup>1</sup>, HU Xueqiong<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>2,3,4</sup>, LI Shifeng<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Hao<sup>2,3,4</sup>,  
LI Shenchong<sup>2,3,4</sup>, SONG Jie<sup>2,3,4</sup>

(1. Yunnan Climate Center, Kunming 650034, China; 2. Flower Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 3. National Engineering Research Center for Ornamental Horticulture, Kunming 650205, China; 4. Key Lab of Yunnan Flower Breeding, Kunming 650205, China)

**Abstract:** Bougainvillea is an important variety for Yunnan to build world – class “green food brand” hundred – billion industry. Research on ecological suitability and low temperature disaster of bougainvillea will help to optimize the industrial layout. In this study, using the ArcGIS, Analytic Hierarchy Process (AHP) method is used to obtain the fine distribution results of bougainvillea ecological suitability based on 8 ecological factors and 2 low tem-

perature factors included by climate, topography and soil. The highly suitable growing areas for bougainvillea are mainly distributed in the west and south region within Yunnan province. Climate suitability factor is the key factor limiting bougainvillea, followed by terrain and soil, among which temperature and sunshine related factors have a greater comprehensive effect, while sunshine and precipitation could not form a limiting effect. The soil factors perform better in whole province, but only in some dry hot valleys and karst areas performs relatively poor, while the distribution regularity of terrain factors is not obvious. In terms of low temperature disaster, there is no risk in the southwest of Yunnan, low risk in the central and southeast, medium risk in the east and high risk in the northwest. This method can be extended to the research on planting regionalization of other varieties.

**Keywords:** Bougainvillea; ecological suitability; low temperature disaster; Analytic hierarchy process; planting division

(上接第 91 页)

- [12] 刘建华, 张正, 吴洁明. 基于 BP 神经网络的城市水灾灾情预测模型[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(3): 699–701, 734.
- [13] 陈韬, 钟传胤, 赵大维, 等. 基于二元 Logistic 对城市内涝风险区预测研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 57–61, 69.
- [14] 卢宇丹. 基于混合优化的神经网络在气象灾情评估中的应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [15] 张梦, 赵靛芳, 全星. PSO-ESN 在城市内涝点降雨积水预测中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2019(6): 56–59, 65.
- [16] 梅松, 程伟平, 刘国华. 基于支持向量机的洪水预报模型初探[J]. 中国农村水利水电, 2005(3): 34–36.
- [17] 卢敏, 张展羽, 冯宝平. 支持向量机在径流预报中的应用探讨[J]. 人民长江, 2005, 36(8): 38–39, 47.
- [18] 冯峰, 靳晓颖, 刘翠, 等. 基于相对差异函数的海绵城市弹性评价[J]. 水利水电工程学报, 2021(1): 53–61.
- [19] CORTES C, VAPNIK V. Support – vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273–297.
- [20] VAPNIK V N. Statistical learning theory[M]. New York: Wiley, 1998.
- [21] 黄曦涛, 张瑜, 赵绍兵, 等. 西安市城市内涝模拟与损失灰色关联度研究[J]. 测绘通报, 2019(9): 62–67.
- [22] 邓聚龙. 灰色预报与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988.
- [23] 李海宏, 吴吉东, 王强, 等. 基于机器学习方法的上海市暴雨内涝灾情预测模型研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 191–200.

## Research on Waterlogging Evaluation Model of Kaifeng City Based on Support Vector Machine

YU Qianhua<sup>1,2</sup>, HUO Jichao<sup>1,2</sup>, TONG Yanyan<sup>1,2</sup>

(1. Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China; 2. Kaifeng Meteorological Bureau, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** Taking the main urban area of Kaifeng City in Henan Province, a typical waterlogging prone area, as an example, and using hourly waterlogging depth at urban waterlogging monitoring points and rainfall data from meteorological stations at the same time, a waterlogging evaluation model based on precipitation factors (model 1 group) and historical waterlogging precipitation factors (model 2 group) is constructed using gray correlation degree and support vector machine methods; The applicability of the model is evaluated by taking “7·20” heavy rain in 2021 as an example. The results show that 1~3 h short-term heavy rainfall is the main reason for the formation of waterlogging disaster. Compared with the occurrence time of rainstorm, the ponding has the characteristics of lagging behind 1~3 h; Model group 1 has a certain ability to assess the risk of waterlogging, but the overall error is significantly higher than model group 2; In model group 2, 80% of the sites have  $R^2 \geq 0.9$ , and the average MAE of the training set and test set is  $\leq 3.9$  cm. The fitting results are evaluated excellent and have good generalization ability. During the “7·20” heavy rain in Kaifeng City in 2021, the average RSME and MAE of the two groups of assessment results of the model and the measured ponding are 4.33 cm and 2.94 cm respectively, which accurately assess the flood season, recession period and maximum ponding depth of the waterlogging disaster during the extreme rainstorm process, and can provide better support for urban flood prevention and emergency decision-making.

**Keywords:** urban waterlogging evaluation; support vector machine; “7·20” heavy rain; Kaifeng Henan