

中国三指雪莲花植被地理分布及其斑块特征

王润宇

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年1月30日; 发布日期: 2026年2月11日

摘要

高寒生态系统作为全球生态脆弱区的典型代表, 其生态退化进程加剧与生物多样性锐减问题日趋凸显。三指雪莲花作为高寒生境的特有珍稀物种, 是维持高寒生态系统结构稳定、支撑区域生物多样性的关键类群之一, 具有重要的生态价值与保护意义。本研究利用ArcGIS软件, 基于《中国植被图集(1:1,000,000)》获取的三指雪莲花群落分布数据, 结合斑块特征和形状指数分析方法, 以三指雪莲花群落为研究对象, 系统探究其地理分布格局、斑块形态特征及空间分布规律的内在特征与关联。结果表明: 我国三指雪莲花群落总面积为377.59 km², 总斑块数为61个, 其主要集中分布于青藏高原核心区域, 以西藏自治区为核心分布区, 新疆南部高海拔区域有少量分布。通过空间格局分析, 三指雪莲花群落呈现“小斑块数量多、大斑块占比少”的特征, 斑块面积大小差异显著。不同类型三指雪莲花群落斑块的形状指数存在显著差异, 这一特征反映出各类斑块与外界进行物质、能量交换的活跃程度具有明显分异。斑块扩展度与方形指数的最大值和最小值, 分别出现于三指雪莲花荒漠 + 高山嵩草荒漠、三指雪莲花 + 垫状点地梅荒漠这两类群落中, 且各数值均大于1, 揭示了三指雪莲花不同群落类型的斑块形状均偏离圆形与方形, 整体呈现不规则的形态特征, 以上特征说明三指雪莲花群落的空间异质性较高, 这与高海拔生境破碎化及生态因子异质性特征相契合。

关键词

三指雪莲花, 地理分布, 形状指数, 斑块特征, 高寒群落

Geographical Distribution and Patch Characteristics of *Saussurea tridactyla* Vegetation in China

Runyu Wang

College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: December 29, 2025; accepted: January 30, 2026; published: February 11, 2026

Abstract

As a typical representative of global ecologically fragile regions, the alpine ecosystem is increasingly confronted with intensified ecological degradation and a sharp decline in biodiversity. *Saussurea tridactyla*, an endemic and rare species in alpine habitats, serves as one of the key taxa for maintaining the structural stability of alpine ecosystems and supporting regional biodiversity, thus holding significant ecological value and conservation significance. Taking *Saussurea tridactyla* communities as the research object, this study systematically explored the inherent characteristics and correlations of their geographical distribution patterns, patch morphological features, and spatial distribution laws by using ArcGIS software, based on the distribution data of *Saussurea tridactyla* communities obtained from the *Vegetation Atlas of China* (1:1,000,000), combined with the analysis methods of patch characteristics and shape indices. The results showed that the total area of *Saussurea tridactyla* communities in China was 377.59 km², with a total of 61 patches. These communities were mainly concentrated in the core area of the Qinghai-Tibet Plateau, with the Tibet Autonomous Region as the central distribution zone, and a small number of distributions were found in the high-altitude areas of southern Xinjiang. The spatial pattern analysis revealed that *Saussurea tridactyla* communities were characterized by a large number of small patches and a small proportion of large patches, with significant differences in patch area. There were significant differences in the shape indices of patches among different types of *Saussurea tridactyla* communities, a feature that reflected the obvious differentiation in the activity of material and energy exchange between various patches and the external environment. The maximum and minimum values of patch elongation index and squareness index were observed in *Saussurea tridactyla* desert + *Kobresia pygmaea* desert communities and *Saussurea tridactyla* + *Androsace tapete* desert communities, respectively, with all values greater than 1. This indicated that the patch shapes of different *Saussurea tridactyla* community types deviated from regular circles and squares, showing an overall irregular morphology. The above characteristics suggested a high level of spatial heterogeneity of *Saussurea tridactyla* communities, which was consistent with the habitat fragmentation and the heterogeneity of ecological factors in high-altitude areas.

Keywords

Saussurea tridactyla, Geographical Distribution, Shape Index, Patch Characteristics, Alpine Cold Community

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三指雪莲花(*Saussurea tridactyla* Sch.Bip. ex Hook.f.), 别名三指雪莲、藏区雪莲, 是菊科风毛菊属的多年生珍稀草本物种[1]。风毛菊属总计包含约 400 余种, 自然分布范围覆盖北温带与高山寒带地区, 而三指雪莲花是风毛菊属中典型的高寒特有物种, 以西藏自治区为核心分布区, 新疆南部高海拔区域有少量分布[2]。三指雪莲花作为高寒生态系统的关键建群种之一, 在维系生境稳定性、促进水土保持、支撑高寒区生物多样性等方面发挥着重要作用, 因生境特殊、资源匮乏及生态价值突出, 该物种被列为国家重点保护野生植物[3]。

随着全球气候变化与人类活动的加剧, 高寒生态系统的退化风险与生物多样性丧失问题日益凸显。

中国青藏高原核心区域及其周边高海拔地带,作为全球典型的高寒生态脆弱区,生态系统稳定性维持与珍稀物种保护已成为当前生态研究的重点领域。三指雪莲花作为该区域特有的珍稀濒危植物,具有极强的抗逆性,尤其对低温、强紫外线、高海拔缺氧及贫瘠流石滩基质等极端高寒环境表现出独特的适应性,是维系高寒生态系统结构完整与功能稳定的关键物种之一[4]。其植株低矮、根系发达且与土壤微生物形成协同共生体系,能有效减少高山流石滩区域的水土流失、增强地表稳定性,对抑制高寒生境退化、促进区域生态系统恢复具有不可替代的作用[5]。与荒漠植物的经济利用价值不同,三指雪莲花的核心价值集中于生态保护与生物多样性维持:三指雪莲花依赖高寒区特有传粉昆虫完成繁殖过程,其斑块特征直接调控授粉效率与种群繁殖成功率。目前“小斑块数量多、大斑块占比少”的格局,导致斑块间隔离度增加、连通性下降:一方面,小斑块的花粉产量与蜜源资源有限,难以支撑传粉昆虫的觅食与繁殖需求,导致昆虫拜访频率降低;另一方面,斑块间距超过传粉昆虫的活动阈值时,花粉传播受阻,种群间基因交流中断,易引发近交衰退,进一步加剧小种群的灭绝风险。除此之外,破碎化导致的生境异质性升高,可能使不同斑块的开花物候出现差异,降低传粉昆虫的资源利用效率,形成“斑块破碎化-传粉限制-种群衰退”的恶性循环[6]。三指雪莲花通过提升高寒生境的地表覆盖度,减少冰雪融水流失与土壤风蚀,促进高寒草甸与流石滩生态系统的物质循环,对维系区域水土平衡与生态安全具有关键意义[7]。然而,受全球变暖导致的高寒生境碎片化、过度采挖及旅游开发等人类活动的干扰,三指雪莲花的自然种群数量持续减少,分布范围不断萎缩,其生存现状面临严峻威胁[8]。因此,系统阐明三指雪莲花的地理分布规律、群落结构特征及其与高寒生态因子的耦合关系,不仅是植被生态学的核心研究任务之一,更为该珍稀物种的就地保护、迁地保育及高寒生态系统的修复提供重要的科学依据。

斑块特征(patch characteristics)指的是植物群落在空间上的分布形式与结构特征,是景观空间结构的核心参数之一[9]。植被斑块被用来量化高寒生境破碎化与生态系统退化过程,对高寒生态系统的稳定性、物种多样性维持及关键生态过程发挥着不可替代的作用[10]。以三指雪莲花群落为研究对象,开展其地理分布格局、斑块形态特征及空间分布规律的系统探析。通过探析三指雪莲花群落斑块的尺度特征、形态构型及空间分布格局,可进一步阐明高寒珍稀植物的分布规律、生境适应机制及其所在生态系统的稳定性与抗干扰潜力[2],进而为高寒珍稀物种保育及生态系统修复实践奠定科学基础。本文利用《中国植被图集(1:1,000,000)》中提取的5种三指雪莲花相关群落类型数据,包括三指雪莲花单一群落(*Saussurea tridactyla* single community)、三指雪莲花流石滩型荒漠(*Saussurea tridactyla* scree slope-type desert)、三指雪莲花碎石基质型荒漠(*Saussurea tridactyla* gravel-substratum-type desert)、三指雪莲花荒漠+高山嵩草荒漠(*Saussurea tridactyla* desert-and-*Kobresia pygmaea* alpine desert)、三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠(*Saussurea tridactyla* desert-and-*Androsace tapete* desert) [11],依托地理信息系统软件(ArcGIS 10.8.1)等现代信息化处理技术,绘制三指雪莲花群落在中国境内的地理分布格局图。通过系统分析不同区域三指雪莲花群落的空间分布规律与斑块特征,并结合其生态生物学特性(如抗寒、耐贫瘠、与微生物共生等),进一步探讨斑块特征与高寒生态服务功能之间的关系,从而为三指雪莲花的就地保育、种群重建及高寒生态系统的可持续修复,提供技术支撑与科学理论依据。

2. 研究方法

2.1. 数据来源和处理方法

本文植被数据源自科学出版社2001年出版的《中国植被图集(1:1,000,000)》。研究利用ArcGIS软件,对提取的三指雪莲花关联植被群落数据进行空间配准、矢量数字化及栅格化等标准化预处理,核心聚焦三指雪莲花群落空间地理分布特征的分析。通过量化运算获得各群系斑块特征参数及形状指数,并据此开展系统分析与评估。

数据来源:

(1) DEM (数字高程模型)数据源自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>), 分辨率为 30 m, 用于提取海拔、坡度、坡向等地形因子;

(2) 气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网, 包括研究区 1970~2020 年的年平均降水量、年平均气温等气象因子, 经克里金插值法处理为与植被数据一致的空间分辨率;

(3) 坡度、坡向通过 ArcGIS 10.8.1 的空间分析工具基于 DEM 数据提取, 统一进行投影转换与裁剪, 确保与三指雪莲花群落数据的空间匹配性。

具体研究内容为:

(1) 明确三指雪莲花群落空间分布格局, 绘制精准的空间分布图;

(2) 统计群落斑块数量、各群系总面积与周长等基础参数, 标准化计算得到平均面积、斑块密度、边缘密度及面积变异系数, 结合斑块形状指数深度分析群落, 揭示其斑块结构特征与空间组织规律;

(3) 结合三指雪莲花生态生物学特性, 分析其在高山生态系统维持、水土保持及生物多样性保育中的生态功能;

(4) 量化分析斑块特征与海拔、坡度、坡向、年降水量、年平均气温等环境因子的耦合关系。

2.2. 计算方法

2.2.1. 斑块特征计算方法

斑块平均面积计算公式如下:

$$S = A/n \quad (1)$$

式中: S ——植被斑块平均面积

A ——植被总面积

n ——植被斑块数

斑块平均面积可用于表征景观粒度, 且在一定程度上能够反映景观的破碎化程度。

斑块密度计算公式如下:

$$PD = n/A \quad (2)$$

式中: PD ——斑块密度

n ——植被斑块数

A ——植被总面积

斑块密度同时还能表征景观的整体破碎化程度, 亦可以体现景观单位面积内的空间异质性水平, 其数值越高, 对应的景观破碎化程度则越显著。

斑块边缘密度计算公式如下:

$$ED = P/A \quad (3)$$

式中: ED ——植被斑块边缘密度

P ——植被斑块边缘长度

A ——植被总面积

斑块边缘密度是衡量景观破碎化程度的关键指标, 其数值大小与景观破碎度存在正相关关系: 边缘密度越高, 意味着景观破碎化程度越强烈, 景观边缘效应也更为突出, 系统的开放性水平随之越高。

斑块面积极差的计算公式表述如下:

$$RA = X_{\max} - X_{\min} \quad (4)$$

式中： X_{\max} ——斑块面积最大值

X_{\min} ——斑块面积最小值

斑块面积极差是表征研究区内斑块面积离散程度的重要量化指标，该指标数值越大，意味着不同斑块间的面积差异越显著；相反，指标值越小，斑块面积的均匀性相对越高。

变异系数计算公式如下：

$$CV = \frac{SD}{S} \times 100\% \quad (5)$$

式中： SD ——斑块面积标准差

S ——植被斑块平均面积

斑块变异系数作为景观生态学中的重要量化指标，可有效表征景观的离散化程度。

2.2.2. 斑块形状指数计算方法

斑块圆环度指数公式如下：

$$C_i = P_i / A_i \quad (6)$$

式中： C_i ——对应第 i 类斑块的圆环度指数

P_i ——对应第 i 类斑块中第 i 个斑块的周长

A_i ——第 i 类斑块的面积

斑块扩展度指数公式如下：

$$D_i = \frac{P_i}{2\sqrt{\pi A_i}} \quad (7)$$

式中： D_i ——对应第 i 类斑块的圆环度指数

A_i 、 P_i 字母含义同上

斑块方形指数公式如下：

$$S_i = \frac{0.25P_i}{\sqrt{A_i}} \quad (8)$$

式中： S_i ——对应第 i 类斑块的方形指数

A_i 、 P_i 字母含义同上。

2.3. 斑块特征与环境因子耦合分析方法

采用 Pearson 相关分析与冗余分析相结合的方法，探究斑块特征与环境因子的关联。选取斑块密度、边缘密度、面积极差、形状指数作为斑块特征指标，海拔、坡度、坡向、年平均降水量、年平均气温作为环境因子，通过 SPSS 26.0 与 Canoco 5.0 软件进行数据分析，检验耦合关系的显著性($\alpha = 0.05$)，明确影响斑块特征的关键环境因子。

3. 结果与分析

3.1. 三指雪莲花植被群落类型及其空间分布

荒漠是我国主要生态景观类型之一，属于地球上自然条件极端恶劣的生态系统范畴。依据气候特征

可划分为亚热带荒漠、温带典型荒漠与高寒荒漠三大类，不同气候地带可依据土壤基质类型再做细分，具体可分为砾质荒漠、沙质荒漠、壤土荒漠、黏土荒漠和盐碱荒漠等类别[12]。三指雪莲花群落隶属于荒漠植被型中的高寒半灌木-草本荒漠亚型，是高寒荒漠生态系统的典型代表类群[13]。

三指雪莲花多生长在高山流石滩、冰缘带及高寒草甸边缘等地带，由于海拔梯度变化引发温度、土壤湿度、碎石覆盖度等生态因子的交替波动，易形成两个及以上高寒植被群落重复交替的结构格局[14]。高寒区气候的垂直分异与季节波动也是导致该类荒漠植被出现复合现象的原因之一[15]。在《中国植被图集》中，将基质特征明显的三指雪莲花荒漠植被进一步划分出三指雪莲花流石滩型荒漠、三指雪莲花碎石基质型荒漠，对基质特征不明显的统称为三指雪莲花荒漠；根据不同群系斑块复合的情况划分出三指雪莲花荒漠 + 高山嵩草荒漠、三指雪莲花荒漠 + 垫状点地梅荒漠[16]。

见图 1 所示，我国现存的三指雪莲花的空间分布范围大致以东至西藏自治区八宿县为界，约位于东经 96°1'，以西至西藏自治区亚东县为界，约位于东经 88°3'，以北至西藏自治区加查县为界，约位于北纬 29°2'，以南至西藏自治区错那县为界，约位于北纬 27°4' [12]。三指雪莲花荒漠及其复合群落分布海拔范围在 4300~5300 m，平均海拔为 4800 m。其中，西藏自治区分布的斑块最广泛，无新疆维吾尔自治区、

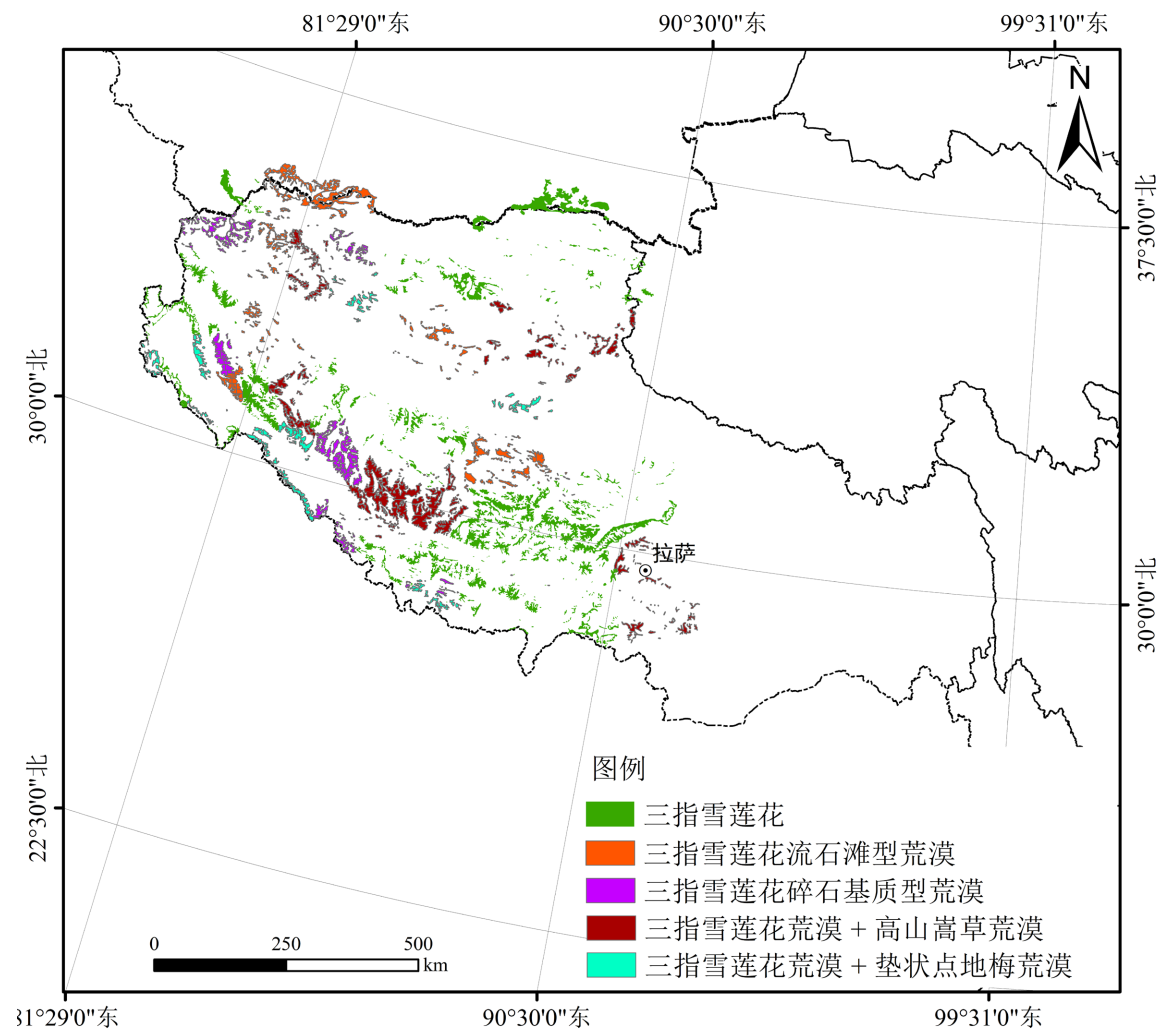


Figure 1. Geographical distribution map of *Saussurea tridactyla* lotus vegetation
图 1. 三指雪莲花植被地理分布图

内蒙古自治区分布记录。根据张新时《中国植被图集(1:1,000,000)》中的植被区划标准,现存三指雪莲花荒漠植被主要分布在西藏自治区的喜马拉雅山脉北侧高海拔流石滩、冈底斯山脉东段及念青唐古拉山脉南麓的碎石基质区域;在西藏东南部主要集中分布在横断山脉的高山冰缘带;少量斑块分布在西藏吉隆县的高山流石滩地带[11]。

由表 1 可知,我国三指雪莲花荒漠植被的总面积约为 377.59 km²,其中西藏自治区分布面积最广,约为 336.9km²,占全国三指雪莲花荒漠植被总面积的 89.2%;新疆维吾尔自治区有分布,面积约为 40.70 km²,占比约为 10.8% [12]。通过对不同三指雪莲花荒漠植被群落类型的面积进行分析可知,三指雪莲花流石滩型荒漠的分布范围最广,面积约为 112.5 km²,占全国该植被总面积的 29.8%;其次是三指雪莲花碎石基质型荒漠,面积约为 62.3 km²,占比为 16.5%;此外,三指雪莲花荒漠 + 高山嵩草荒漠的分布面积约为 32.82 km²,占比为 8.7%;三指雪莲花荒漠 + 垫状点地梅荒漠的分布面积约为 11.00 km²,占比为 2.9% [16]。

Table 1. Vegetation types and area distribution of *Saussurea tridactyla* lotus vegetation (km²)
表 1. 三指雪莲花植被类型和面积分布表(km²)

| 三指雪莲花荒漠群落类型 | 新疆 | 西藏 | 全国 |
|-------------------|-------|--------|--------|
| 三指雪莲花 | 19.11 | 139.87 | 158.98 |
| 三指雪莲花流石滩型荒漠 | 10.58 | 101.92 | 112.5 |
| 三指雪莲花碎石基质型荒漠 | 5.75 | 56.55 | 62.3 |
| 三指雪莲花荒漠 + 高山嵩草荒漠 | 3.94 | 28.88 | 32.82 |
| 三指雪莲花荒漠 + 垫状点地梅荒漠 | 1.32 | 9.68 | 11.00 |
| 合计 | 40.70 | 336.9 | 377.59 |

3.2. 三指雪莲花植被的斑块特征

Table 2. The patch characteristics of *Saussurea tridactyla* vegetation
表 2. 三指雪莲花植被斑块特征

| 三指雪莲花群落类型 | 斑块数 | 总面积 (km ²) | 占比 (%) | 平均面 积 (km ²) | 最小面 积 (km ²) | 最大面 积 (km ²) | 斑块 密度 (个/hm ²) | 边缘密度 (m/hm ²) | 面积极差 (km ²) | 面积变异 系数(%) |
|-----------------------|-----|---------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|
| 三指雪莲花 | 27 | 158.98 | 51.4 | 12.28 | 1.67 | 8.65 | 4.01E-03 | 3.61 | 8.47 | 96.75 |
| 三指雪莲花流石滩型荒漠 | 15 | 112.5 | 14.7 | 7.50 | 0.80 | 14.8 | 1.33E-03 | 2.70 | 14.03 | 82.10 |
| 三指雪莲花碎石基质型荒漠 | 10 | 62.3 | 13.8 | 6.23 | 0.62 | 9.87 | 1.61E-03 | 3.12 | 9.25 | 72.15 |
| 三指雪莲花荒漠 + 高山嵩 草荒漠 | 6 | 32.82 | 15.0 | 5.47 | 0.50 | 8.2 | 1.83E-03 | 2.90 | 7.70 | 69.30 |
| 三指雪莲花荒漠 + 垫状点 地梅荒漠 | 3 | 11.00 | 5.10 | 3.67 | 0.45 | 5.1 | 2.73E-03 | 2.50 | 4.65 | 65.20 |
| 合计 | 61 | 377.59 | 100 | 35.15 | 4.04 | 46.62 | 1.15E-02 | 14.83 | 44.1 | / |

斑块的各类特征对应着独特的生态内涵,其规模、数量及密度等属性,对生态系统的生产力供给、养分周转效率与水土流失调控等核心过程具有显著调控作用。一般而言,斑块数量偏高往往对应着更高的景观破碎化水平,此时斑块间连通性减弱、内部资源呈分散分布格局,这一状态不利于植被种群的持

续稳定发育[15]。若斑块规模较大,其内部微生境的稳定性更强,更易支撑较高的生物多样性水平,同时亦可为之群落提供更充足的资源保障,进而有利于种群遗传多样性的维持。此外,斑块密度过高往往预示着景观破碎化风险加剧,生态系统的抗干扰能力也会相应下降;低密度斑块虽利于提高植被整体连通性,但在荒漠化区域,适度增加斑块密度可在一定程度上减轻生态破碎化态势,从而增强生态系统的结构稳定性[15]。

对我国三指雪莲花植被的斑块特征进行计算分析,其结果见表2。

由表2可知,三指雪莲花植被共有61个斑块,斑块数量分布不均衡。其中斑块密度最大(4.01×10^{-3})的是三指雪莲花,其次是三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠(2.73×10^{-3}),最小的是三指雪莲花流石滩型荒漠(1.33×10^{-3})。说明三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠的破碎化程度高,而三指雪莲花流石滩型荒漠破碎化程度最低,斑块连通性较好[14]。

三指雪莲花植被群落类型总面积为377.59 km²,斑块之间的面积差别较大,三指雪莲花斑块总面积最大,为158.98 km²,占总面积的51.4%。斑块面积和极差均能表示斑块大小的离散情况,最大的斑块面积出现在三指雪莲花流石滩型荒漠,为14.8 km²,最小的斑块面积出现在三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠,为0.45 km²。并且三指雪莲花流石滩型荒漠的面积极差最大[16],其次是三指雪莲花碎石基质型荒漠,再次是三指雪莲花,分别为14.03 km²、9.25 km²、8.47 km²,以上均说明三指雪莲花植被斑块大小差异较大。同一景观级别上具有较小的平均面积比具有较大平均面积的景观更易破碎。表中可以看出,三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠的平均面积最小,为3.67 km²,三指雪莲花荒漠+高山嵩草荒漠次之,说明它们的斑块破碎化程度较高,易受到外界人为因素的干扰[15]。而三指雪莲花的平均面积最大,为12.28 km²,说明该群系受外界干扰程度低,能够较好的维持物种丰富度,提供丰富资源,进一步验证了上文的论断[15]。

边缘密度越小,不易被外界干扰,更有利于保存能量、养分和生物,而边缘密度高的斑块更易受到外界干扰,可指示出敏感区域,以此加强保护[16]。从表1可以得出三指雪莲花植被群落各类型边缘密度,总体上不高。三指雪莲花的边缘密度最高,为3.61 hm²,其次是三指雪莲花碎石基质型荒漠,再次表明这两个群系的斑块破碎化程度高,受自然和人为因素的影响最大。三指雪莲花流石滩型荒漠和三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠的边缘密度较低,分别为2.70 hm²、2.50 hm² [15]。由于三指雪莲花的斑块数量较少,边缘密度较低,平均面积最大,说明该群系斑块保存状况良好且完整性较高,多数呈大面积连续分布格局,群系整体稳定性及斑块间连通性均处于较高水平。三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠与此相反,其受干扰能力低[15]。

边缘密度是表征边缘效应强度的核心指标,从表2可以得出三指雪莲花单一群落的边缘密度最高(3.61 m/hm²),意味着其边缘效应最为显著。从生态过程来看,边缘效应增强对该物种抗逆性的影响具有双重性:利的方面,边缘区域光照、热量资源更充足,且可能接收周边群落的养分输入,一定程度上缓解高寒生境的资源限制,提升植株对低温、贫瘠的耐受能力;弊的方面,边缘区域微环境波动性强,且易受到外界干扰,打破了三指雪莲花适应的稳定高寒生境,导致植株生理压力增加。例如,边缘植株的叶片角质层厚度、抗氧化酶活性显著高于核心区域植株,但长期的生理应激会消耗大量能量,抑制繁殖生长,降低种群延续能力[17]。总体而言,高海拔极端生境下,三指雪莲花对稳定微环境的依赖性更强,边缘效应增强的负面影响更突出,这也解释了为何边缘密度高的群落虽平均面积较大,但面积变异系数高达96.75%,种群稳定性较差。

斑块变异系数又名景观离散指数,能够表征区域的离散化程度。三指雪莲花和三指雪莲花流石滩型荒漠的斑块变异系数较大,分别为96.75%、82.10%。表明群系中斑块大小的分布较广,异质性较高。三指雪莲花荒漠+垫状点地梅荒漠的变异系数较低,则表明景观中斑块大小较为均匀。

3.3. 三指雪莲花植被的斑块形状指数分析

本研究采用《中国植被图集(1:1,000,000)》作为数据基础，比例尺效应对本次计算结果存在不可忽视的影响：该中比例尺数据会简化斑块的精细边界，导致斑块边界的细节信息部分丢失，这可能使得C值所反映的“单位面积边界数量”存在一定程度的低估或偏差；同时，中比例尺下的斑块合并、轮廓简化处理，也会干扰D值、S值的计算精度，使得不同群落斑块形状偏离规则形态的程度判定带有一定的尺度局限性。由表3的数据分析结果可见，三指雪莲花碎石基质型荒漠的C值居于最高水平，这一结果意味着该群落单位面积下的边界数量相对最为丰富，其与外界环境之间的物质循环及能量流动过程也更为活跃。而三指雪莲花流石滩型荒漠的C值最小，说明其单位面积的边界相对较少；由于流石滩型荒漠的生境为高海拔狭域的流石滩，生境破碎且分布范围有限，因此该群落与外界的物质、能量交换活跃度较低。三指雪莲花荒漠 + 高山嵩草荒漠的D值和S值均为最大，说明该群落的斑块形状偏离圆形、方形的程度较高，呈现明显的不规则形态。而三指雪莲花的D值和S值相对最小，但二者数值均大于1，表明三指雪莲花各类荒漠群落的斑块形状均属于不规则类型。整体来看，无论是C值，还是D值与S值，不同三指雪莲花荒漠群落类型间的景观指数差异较为显著，这一特征反映出三指雪莲花荒漠景观的异质性程度较高。

Table 3. The mean value of the shape index of *Saussurea tridactyla* vegetation patches
表 3. 三指雪莲花植被斑形状指数平均值

| 三指雪莲花荒漠群落类型 | C | D | S |
|-------------------|------|------|------|
| 三指雪莲花 | 0.65 | 1.72 | 1.58 |
| 三指雪莲花流石滩型荒漠 | 0.52 | 2.15 | 1.97 |
| 三指雪莲花碎石基质型荒漠 | 0.68 | 1.89 | 1.74 |
| 三指雪莲花荒漠 + 高山嵩草荒漠 | 0.57 | 2.31 | 2.09 |
| 三指雪莲花荒漠 + 垫状点地梅荒漠 | 0.55 | 2.03 | 1.85 |

3.4. 斑块特征与环境因子的耦合关系分析

3.4.1. 地形因子与斑块特征的耦合关系

分析结果显示，坡度与斑块密度呈显著正相关($r = 0.72, P < 0.01$)，与边缘密度呈极显著正相关($r = 0.81, P < 0.001$)，表明坡度越大的区域，三指雪莲花斑块破碎化程度越高——这是由于高坡度区域土壤侵蚀强烈、基质稳定性差，植被难以形成连续分布的大斑块，多呈零散小斑块分布。海拔与斑块平均面积呈显著正相关($r = 0.65, P < 0.01$)，4800 m 以上高海拔区域斑块平均面积更大，而低海拔(4300~4500 m)区域斑块更破碎，可能与低海拔区域受人类活动干扰更强有关。坡向对斑块形状影响显著，阳坡斑块的D值显著高于阴坡，阳坡斑块形状更不规则，推测与阳坡温度波动大、水分蒸发快，生境异质性更高有关。

3.4.2. 气象因子与斑块特征的耦合关系

年平均降水量与斑块形状指数呈显著负相关($r = -0.68, P < 0.01$)，即降水越少的区域，斑块形状越复杂。干旱环境下水分分布不均，植被需分散占据适宜的微生境，导致斑块偏离规则形态，呈现不规则延伸特征。年平均气温与斑块密度呈显著负相关($r = -0.59, P < 0.05$)，低温区域斑块密度更低，斑块连续性更好，这与三指雪莲花耐寒的生物学特性一致，低温环境下人类活动干扰少，生境完整性更高。

4. 总结与讨论

4.1. 总结

我国三指雪莲花植被总面积为 377.59 km²，总斑块数为 61 个，其中西藏自治区为核心分布区域，占总面积的 88.0%，新疆南部高海拔区域有少量分布，占比 12.0%，其余省份无该植被分布记录。基于地理空间分布特征、斑块量化指标及形状指数的综合分析表明，我国三指雪莲花植被的斑块呈现显著特征：以中小型斑块为主，大型斑块稀缺，斑块面积差异显著；不同群落类型的斑块面积分布极不均衡，斑块形状普遍偏离圆形与方形，呈不规则形态；且各群落类型的形状指数存在明显差异，反映出三指雪莲花植被景观具有较高的异质性，这与高海拔生境的破碎化特征及生态因子异质性高度契合。

4.2. 讨论

三指雪莲花作为高海拔地区典型的耐寒草本植物，是高山流石滩、冰缘带生态系统的核心组分，其独特的生物学特性使其在稳固碎石土壤、减缓水土流失、维持高山生物多样性等方面发挥着不可替代的作用[16]。在生态修复领域，针对三指雪莲花的种群扩繁已探索出飞机播撒种子、人工培育移栽等技术手段，可在适宜生境中快速提升种群覆盖度，为高山生态系统修复提供基础支撑[17]。然而，在全球气候变化与人类活动的双重影响下，三指雪莲花的生存面临严峻挑战，其群落空间分布呈现明显的“斑块化”趋势，核心生境持续缩减[15]。高海拔区域的资源供给量直接决定植被斑块的规模与稳定性，而气候变暖导致的冰川退缩、降水模式改变，进一步影响资源再分配过程，调控着三指雪莲花斑块的形成与消亡，进而驱动区域景观格局的演变[16]。本研究的环境因子耦合分析表明，斑块特征与地形、气象因子的关联具有明确的生态意义：坡度通过影响土壤稳定性与水分滞留能力，成为调控斑块破碎化的关键地形因子，高坡度区域的生境破碎化直接导致斑块密度升高[18]；降水作为干旱高寒区的限制性因子，通过影响植被分布的连续性，间接调控斑块形状复杂度，少雨区域的水分异质性促使斑块形成不规则形态。这一结果与高海拔生境的资源分配规律一致——极端环境下，植被斑块的分布与形态需适应环境因子的空间异质性，从而形成“环境因子-斑块特征”的耦合适配关系[19]。因此，深入开展三指雪莲花的斑块特征研究，对于高山生态保护具有重要现实意义。通过科学调控斑块格局，适度提升斑块连通性、整合碎片化小斑块，可进一步增强生态系统异质性，为高山特有物种提供多样化生境。同时，结合其种群扩繁技术与生境适配性特征，制定针对性保护策略，既能维系三指雪莲花的种群延续，也能为高海拔生态系统的稳定与修复提供科学依据，对保障青藏高原及周边地区的生态安全具有重要价值。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第七十八卷第二分册) [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] 西藏自治区植物志编辑委员会. 西藏植物志(第四卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] Wu, Z.Y., Raven, P.H. and Hong, D.Y. (2001) Flora of China. Vol. 20-21, Science Press.
- [4] 赵德修, 赵丽丽. 雪莲花的研究进展[J]. 中草药, 1996, 27(6): 372-374.
- [5] 周浙昆, 等. 横断山区维管植物(下册) [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [6] 刘尚武. 西藏植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [7] Xie, Y. and Wang, Y. (2007) Alpine Plant Diversity in the Qinghai-Xizang Plateau. *Biodiversity Science*, **15**, 689-698.
- [8] 中国科学院植物科学数据中心. 三指雪兔子[Z]. 植物智库(中国植物图像库), 2020.
- [9] Wu, G. and Wang, Y. (2019) The Impacts of Climate Change on Alpine Plants in the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **43**, 1-11.
- [10] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集(1:1000000) [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

-
- [11] 周浙昆, 孙航, 李德铎. 横断山区高山流石滩植物多样性与适应进化[J]. 生物多样性, 2006, 14(1): 1-10.
 - [12] 张新时. 中国的植被区划[J]. 植物学报, 1989, 31(7): 509-525.
 - [13] 张新时, 杨莫安. 中国植被的结构与功能[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
 - [14] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
 - [15] 刘世梁, 傅伯杰, 吕一河. 景观破碎化的生态效应及生态修复[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 340-347.
 - [16] 李英年, 赵新全, 曹广民. 青藏高原高寒草甸生态系统与全球变化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
 - [17] 中国科学院西北高原生物研究所. 青藏高原高寒植被恢复与重建技术规程[R]. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2015.
 - [18] 吴绍洪, 杨勤业, 郑度. 青藏高原气候变化对生态系统的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 1-8.
 - [19] 姚檀栋, 秦大河. 青藏高原环境变化科学评估[M]. 北京: 科学出版社, 2011.