#### DOI: 10.5846/stxb202101290316

陈雪莹,高雪娇,许嘉巍,靳英华,张英洁,王彩玲.长白山风灾景观 30 年格局变化过程分析.生态学报,2022,42(4):1327-1339. Chen X Y,Gao X J,Xu J W, Jin Y H,Zhang Y J,Wang C L.Analysis of the pattern change process of Changbai Mountain wind-damaged landscape in the past thirty years.Acta Ecologica Sinica,2022,42(4):1327-1339.

# 长白山风灾景观 30 年格局变化过程分析

陈雪莹<sup>1,2</sup>,高雪娇<sup>1,2</sup>,许嘉巍<sup>1,2,\*</sup>,靳英华<sup>1,2</sup>,张英洁<sup>1,2</sup>,王彩玲<sup>1,2</sup>

1 东北师范大学地理科学学院,长春 130000

2长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室,长春 130000

摘要:以长白山自然保护区内的由 1986 年台风形成的风灾景观为研究对象。选取 1987 年、1993 年、1999 年、2004 年、2010 年和 2016 年遥感影像进行解译。利用 Fragstats 4.2 软件对景观格局指数进行定量分析,并用主成分分析法与景观综合评价指数相 结合的方法对景观格局变化做出综合评价,揭示风灾后 30 年景观格局变化过程。结果表明:(1)草本-灌木的优势度不断下降; 阔叶林和针叶林在恢复过程中先以增加大斑块为主,后期面积增加主要是以小斑块为主;岳桦林恢复过程中先以增加小斑块为 主,后期以大斑块连片生长。(2)小而分散的斑块在恢复过程中转换为大而集中的斑块,景观趋于均质化。(3)草本-灌木,阔 叶林,针叶林,岳桦林四种斑块类型在恢复过程中呈现一种演替关系。(4)确定了分别与景观规模、形状和景观聚散度相关的 两个主成分,作为表征景观恢复性的关键指标。(5)在 30 年的恢复期中,研究区整体景观格局质量得到提升,但恢复缓慢,与风灾前依然相差较大。(6)多次强风干扰可以形成长白山西、南坡非标准的垂直带谱。 关键词:长白山;风灾景观;景观格局;变化过程

# Analysis of the pattern change process of Changbai Mountain wind-damaged landscape in the past thirty years

CHEN Xueying<sup>1,2</sup>, GAO Xuejiao<sup>1,2</sup>, XU Jiawei<sup>1,2,\*</sup>, JIN Yinghua<sup>1,2</sup>, ZHANG Yingjie<sup>1,2</sup>, WANG Cailing<sup>1,2</sup> 1 Northeast Normal University, Changchun 130000, China

2 Key Laboratory of Geographical Process and Ecological Security of Changbai Mountain, Ministry of Education, Changchun 130000, China

**Abstract**: The wind-damaged landscape formed by the 1986 typhoon in Changbai Mountain Nature Reserve was studied in this paper. High-definition remote sensing images in 1987, 1993, 1999, 2004, 2010 and 2016 were selected to decode to analyze the change of each patch type in the study area. Fragstats 4.2 was used to quantitatively analyze the landscape pattern indices, and a combination of principal component analysis and comprehensive landscape evaluation index was used to make a comprehensive evaluation to reveal the process of landscape pattern changes 30 years after the wind damage. The results were as follows: (1) the dominance of herbaceous-shrub kept decreasing, but the distribution was homogenous, the patch shape was regular, and the degree of aggregation was high; broad-leaved forest and coniferous forest firstly increased in large patches during the recovery process, and later on the area increase was mainly in small patches, the patch shape of broad-leaved forest tended to be regular, and coniferous forest was complex; *Betula ermanii* forest firstly increased in small patches, and later on the large patches grew in succession, the shape became more complicated, and there was a trend of contiguous growth. (2) At the landscape level, small and scattered patches were converted into large and concentrated patches in the restoration process, the irregularity of shape increased and the connectivity of the landscape decreased. As the restoration continues, the landscape tended to be homogenized. (3) According to the landscape transfer matrix, herbaceous-

基金项目:国家自然科学基金(41571078);国家自然科学基金(41171072)

收稿日期:2021-01-29; 采用日期:2021-06-28

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xujw634@ nenu.edu.cn

shrub patches in the study area would be continuously transformed into arboreal patches, the proportion of herbaceous-shrub gradually decreased, while arboreal increased. Among them, herbaceous-shrub mainly transformed into broad-leaved forest, broad-leaved forest mainly transformed into coniferous forest, and coniferous forest mainly transformed into *Betula ermanii* forest. The four patch types of herbaceous-shrub, broad-leaved forest, coniferous forest, and *Betula ermanii* forest showed a succession relationship during the restoration process. (4) Through the principal component analysis method, two principal components related to landscape scale and shape and landscape dispersion, respectively, were identified as key indices to characterize landscape restoration. (5) Using the combination of principal component analysis and the comprehensive landscape evaluation index to evaluate the wind-damaged landscape in Changbai Mountain, the results showed that during the 30-year restoration period, the quality of the study area was improved, but the recovery was slow and still differed significantly from that before the wind damage. (6) Multiple strong wind disturbances can form a non-standard vertical band spectrum on the western and southern slopes of Changbai Mountain.

Key Words: Changbai Mountain; wind-damaged landscape; landscape pattern; process of change

景观是由一系列不同的生态系统镶嵌构成,且具有明显视觉特征的地理实体<sup>[1]</sup>。景观格局是指大小不一、形状不同的景观斑块在空间上的配置<sup>[2]</sup>。景观格局包括景观斑块的类型、数目以及空间分布,是景观异质性的具体体现者,反映了生态系统的演变过程<sup>[3-5]</sup>。景观格局指数是用来定量描述景观格局的常用指标,能够在一定程度上反映景观组成和空间配置特征<sup>[2,6]</sup>。随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术的发展,将其与景观格局指数结合的定量分析景观格局变化已经成为经典的研究方法<sup>[7]</sup>。近年来,我国广泛采用了该研究方法进行景观格局变化研究,如靖传宝<sup>[8]</sup>以1986—2017年 Landsat 遥感影像为基础,定量分析 1988—2017年深圳市城市化过程中景观格局动态变化特征。郭少壮、白红英等<sup>[9]</sup>基于 Landsat 影像数据,利用 GIS空间分析和景观格局指数法研究了秦岭地区林地与草地景观格局变化及其驱动因素。李明珍、李阳兵等<sup>[10]</sup>以三峡库区典型流域——草堂溪为研究区,利用 2000年、2010年、2018年系列遥感影像,探讨研究区土地利用类型时空演变过程。

长白山自然保护区拥有地球同纬度最典型、保存最完整的温带山地森林生态系统<sup>[11]</sup>。植被分布存在独特性,拥有温带地区完整的山地垂直景观带,依次为红松阔叶林—针阔混交林—暗针叶林—亚高山岳桦林—高山苔原带。但这种完整的垂直变化仅存在于长白山北坡<sup>[12]</sup>,与西、南坡存在较大坡向差异,目前此差异产生的原因尚不明确。1986年8月28日15号台风维拉袭击了长白山自然保护区,使得长白山西、南两坡原始森林受到了严重的破坏,形成了大面积的风灾景观。我国中纬度林区形成风灾景观属首次被观察与记录<sup>[13]</sup>。 30年来,随着植被持续恢复与演替,风灾景观的格局不断变化,为干扰后格局的自然变化研究提供了理想的研究场所。明确台风过后景观的构成及随时间变化规律,更能阐明长白山森林生态系统各组分相互影响机制,进而定量揭示强风干扰下长白山植被演替过程。为此,本文以长白山风灾景观为研究对象,基于 Landsat影像获取景观格局指数,分析风灾后 30年景观格局变化过程。基于此过程说明由强风干扰引起的景观格局

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

长白山自然保护区位于吉林省东南部,地理坐标范围约为41°41′49″—42°25′18″N,127°42′55″—128°16′48″E。 该地区为温带大陆季风性气候,四季分明,夏季短暂温凉,冬季漫长寒冷。年平均气温-7—3℃,年平均降水 量700—1400mm,多集中在6月—9月。受地形和水热条件的影响,研究区内的植被类型有着明显的垂直分 布特点<sup>[14]</sup>,由低海拔到高海拔分别为:1100m 以下为针阔混交林带;1100—1800m 为山地针叶林带;1800— 2100m 为亚高山岳桦林带;2100—2300m 为高山苔原带;2300m 以上高山寒漠带。 风灾景观位于 41°52′55″—42°01′10″N,127°53′29″—128°00′11″E,分布在海拔 750—2000m 的长白山西、 南坡,面积 11386hm²(图 1)。风灾景观海拔总体变化趋势为自西向东逐渐升高,位于西北方向的风灾迹地在 1400m 以下,而东南方向的海拔在 1400m 以上。跨越针阔混交林带,山地针叶林带和亚高山岳桦林带<sup>[15-16]</sup>, 土壤分别为暗棕色森林土、棕色针叶林土和亚高山草甸森林土。地表有大量被风吹倒带有树根的腐朽倒 木<sup>[13]</sup>。风灾景观内有残存的林木斑块和新生的草本-灌木斑块,草本-灌木斑块的主要植物有小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*)和大叶章(*C. lanysdorffii*)等草本植物,蓝靛果忍冬(*Lonicera caerulea var.edulis*)、库 叶悬钩子(*Rubus sachalinensis*)等灌木,植被平均高度达 1m 以上<sup>[17]</sup>。30 年来,草本-灌木斑块发生演替,面积 萎缩,森林斑块面积扩张(图 2)。



图 1 长白山风灾景观所在位置

Fig.1 Location of wind-damaged landscape in Changbai Mountain



图 2 长白山风灾前后对比图 Fig.2 Comparison of before and after wind-damaged in Changbai Mountain

# 1.2 景观格局指数选取

景观指数常被划分为斑块水平、斑块类型水平以及景观水平3个级别,分别描述单个斑块、同一斑块类型 以及整个景观3个尺度上的格局特征。本研究区斑块数量多,对单个斑块的研究无法体现景观格局的规律, 因此本文分别从斑块类型水平上和景观水平上选取不同的景观指数,旨在从多个角度对长白山风灾景观格局 变化进行总结。选取的景观格局指数如表1所示。

I able 1	Landscape pattern in	dex of wind-damaged lands	scape in Changbal Mountain
景观格局指数	缩写	研究尺度	计算内容
Landscape pattern index	Abbreviations	Scale	Calculation content
斑块总面积 Class area	CA	斑块类型	某一类型景观斑块总面积
斑块所占景观面积比例 Percentage of landscape	PLAND	斑块类型	某一斑块类型总面积占景观总面积的比例
斑块数量 Number of patches	NP	斑块类型、景观水平	某一斑块类型或景观中所有斑块总数
斑块密度 Patch density	PD	斑块类型、景观水平	每 100hm <sup>2</sup> 土地范围内的斑块数量
最大斑块指数 Largest patch index	LPI	斑块类型、景观水平	最大面积斑块占景观面积的比例
斑块形状指数 Landscape shape index	LSI	斑块类型、景观水平	所有斑块的边界总长度(乘以正方形校正常数)除 以景观总面积的平方根
平均斑块分维数 Mean patch size	AREA_MN	景观水平	景观级别的斑块平均面积
平均形状指数 Mean patch shape index	SHAPE_MN	景观水平	斑块周长除以最紧凑斑块可能的最小周长
周长面积分维数 Perimeter-area fractal dimension	PAFRAC	景观水平	2 除以通过将斑块面积的对数与斑块周长的对数进 行回归得到的回归线的斜率 鼻如由冬斑地米型断上鼻视面和乘出冬斑地米型
蔓延度指数 Contagion index	CONTAG	景观水平	之间相邻的格网单元数目占总相邻的格网单元数 目的比例,乘以该值的自然对数之后的各班块类型 之和,除以2倍的班块类型总数的自然对数,其值加 1后再转化为百分比的形式 <sup>[18]</sup>
景观分割指数 Landscape division index	DIVISION	景观水平	1 减去各斑块类型面积的总和与景观总面积比值的 平方
分离指数 Splitting index	SPLIT	景观水平	景观总面积的平方与各斑块类型的面积平方之和 的比值
香侬多样性指数 Shannon's diversity index	SHDI	景观水平	景观水平上等于各斑块类型的面积比乘以其值的 自然对数之后的和的负值
聚合度 Aggregation index	AI	斑块类型、景观水平	景观类型的相似邻接斑块数量除以景观类型的相 似邻接斑块数量的最大值

表1 长白山风灾景观的景观格局指数

1.3 解译方法

本研究使用的遥感影像数据为 1987 年 5 月 20 日 Landsat TM、1993 年 5 月 28 日 Landsat TM、1999 年 9 月 2 日 Landsat TM、2004 年 6 月 3 日 Landsat TM、2010 年 9 月 24 日 Landsat TM、2016 年 5 月 19 日 Landsat ETM+(分辨率 30m×30m)。对遥感影像进行辐射校正和几何校正,由于 TM 6 波段的分辨率为 120m,不适合植被信息收集,故将 TM 1,TM 2,TM 3,TM 4,TM 5,TM 7,TM 8 波段进行融合。利用长白山自然保护区边界矢量数据对融合后的遥感影像进行掩膜处理<sup>[19]</sup>。

对风灾后的6期遥感影像进行增强处理。利用 ENVI 软件选取5、4、3 波段融合,并分别赋予红、绿、蓝3 种颜色进行假彩色合成,增强地物信息。利用植物光谱反射特征,采用最大似然法进行监督分类,得到长白山风灾景观的各斑块类型图。

# 1.4 斑块类型数据提取

长白山风灾景观主要由大小不一、形状各异的林地和草甸斑块组成。由于各林型光谱特征相似,区分难 度比较大,故本文采用监督分类的方法对风灾后的6期遥感影像进行分类解译,依据光谱信息、纹理信息、地 学逻辑的原理,确定研究区各斑块类型的解译标识,对分类后的影像进行精度验证,总体分类精度为94.47%, Kappa 系数为0.93,每种斑块类型的制图精度和用户精度都大于85%,满足研究要求。

# 1.5 风灾景观范围的提取

归一化植被指数 NDVI, Deering 提出将 RIV 经非线性归一化处理, 得到 NDVI, 其值在[-1,1]之间, 正值

表示植被覆盖,且随覆盖度增大而增大;负值表示地面覆盖为云、水等对可见光高反射;0表示有岩石或裸 土等<sup>[20]</sup>。

NDVI 值计算公式:

NDVI=(TM 4 波段值-TM 3 波段值)/(TM 4 波段值+TM 3 波段值)

对 NDVI 值的计算有最大值法、均值法、差值法以及一元线性回归趋势计算<sup>[21]</sup>。本文采用南颖等人<sup>[22]</sup>的 提取方法利用长白山遥感影像,将均值加上一倍标准差定义为正常值被变化上限,均值减去两倍标准差定义 为正常植被变化的下限,最终将超出均值减去两倍标准差下限之外的部分作为长白山自然保护区风灾景观的 范围。

1.6 景观转移矩阵

景观转移矩阵可定量表明不同景观类型之间的转化情况,从而更好的对景观类型结构的变化特征及各景 观类型的流向进行深入分析。景观转移矩阵的数学公式为:

 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1j} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2j} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{i1} & S_{i2} & \cdots & S_{ij} & \cdots & S_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nj} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}$ 

式中,*S*表示转移矩阵;*S<sub>ij</sub>*表示在某时间段景观类型*i*转移成景观类型*j*的面积;*n*表示景观类型数。在实际应用中,景观转移矩阵一般以表格形式呈现,用来分析长白山风灾景观中斑块类型转移情况。

1.7 成图与景观指数计算

本研究中运用 ArcGIS 10.2 软件进行专题地图的制作,使用 Fragstats 4.2 软件计算景观格局指数,在 Excel 中对数据进行预处理,用 Origin 作图。

#### 2 结果与分析

2.1 斑块类型水平景观格局指数分析

风灾景观中主要以草本-灌木、针叶林、阔叶林及岳桦林4种斑块类型为主,其中草本-灌木斑块所占面积 比重最大。随着植被恢复与演替,其他类型斑块波动增加。各斑块类型分类图如图3所示。

从斑块总面积(CA)和斑块所占景观面积比例(PLAND)来看(如表 2、3 所示),草本-灌木斑块面积最大, 所占比例最高,其次是针叶林和阔叶林,岳桦林面积最小,所占比例最低。在风灾过后恢复初期,以草本-灌木 斑块恢复为主,从 1993 年开始,乔木面积开始增多,到了 1999 年,乔木所占比例为 48%,超过草本-灌木斑块。 四种斑块类型在 30 年的恢复过程中,以针叶林斑块和阔叶林斑块变动最大,增长率分别为 125%和 73%,岳 桦林斑块增长率为 43%,只有草本-灌木斑块面积不断减少,变化率为 48%。从图 4 中可以看出,1987 年到 1993 年期间,是针叶林斑块和岳桦林斑块快速生长的时期;阔叶林斑块从 1999 年开始面积增长迅速;草本-灌 木斑块在 1987 年到 1999 年减少幅度最大。2016 年岳桦林斑块面积略有下降,可能是因为所选遥感影像日 期为 5 月份,气温较低,岳桦林没有开始生长因而在影像上观测不明显。

为进一步分析长白山风灾景观各斑块类型之间的相互转移,本文对 1987—2016 年研究区内的景观类型 转移矩阵进行了分析。1987—2016 年长白山风灾景观面积转移矩阵如表 4 所示。对表分析可知,1987—2016 年间各景观类型均有变化,各斑块类型景观面积变化量的绝对值的排序为:草本-灌木>针叶林>阔叶林> 岳桦林。

从景观类型转出来看:草本-灌木斑块共转出了 3634.51hm<sup>2</sup>,在4种景观类型中变化最大,其中 60.59%转 化为阔叶林,是草本-灌木斑块转化的主要方向,针叶林其次占 34.79%,岳桦林比例最小,仅占 4.62%。阔叶





林斑块转移量 1052.78hm<sup>2</sup>,位于第二位,主要转移方向为针叶林。针叶林斑块转移量为 461.03hm<sup>2</sup>,向草本-灌 木、阔叶林、岳桦林转移比例大致相同。岳桦林斑块转移量最小,主要受雪覆盖的影响。

从景观类型转入来看:阔叶林斑块转入量最多,共转入了2377.91hm<sup>2</sup>,主要来源是草本-灌木和针叶林,分别占总转入量的92.61%、6.63%。4种斑块类型中,针叶林面积变化最大,从1987年的1422.36hm<sup>2</sup>增长至2016年的3199.77hm<sup>2</sup>,增长率为125%。针叶林转入量2229.54hm<sup>2</sup>,略低于阔叶林,草本-灌木仍占有最大的转入比重为56.71%,阔叶林占42.42%。岳桦林斑块的转入来源主要是草本-灌木和针叶林。草本-灌木的转入量最少,49.37%来源于针叶林。

Table 2 The area change of each type in wind-damaged landscape of Changbai Mountain									
	斑块总面积 CA/hm <sup>2</sup>								
	1987	1993	1999	2004	2010	2016			
草本-灌木 Herbaceous-shrub	7842.69	6701.04	5516.10	5536.89	4908.78	4119.21			
阔叶林 Broad-leaved forest	1717.56	1290.96	1882.71	2233.89	2825.73	2976.84			
针叶林 Coniferous forest	1422.36	2669.13	2692.44	3065.85	3095.73	3199.77			
岳桦林 Betula ermanii forest	728.46	1584.09	1369.71	1409.58	1414.98	1038.15			

表 2 长白山风灾景观中斑块类型总面积变化

长白山风灾景观斑块类型水平指数变化图如图 5 所示。斑块数量(NP)和斑块密度(PD)是直接反映景 观破碎化程度的景观指数。植被恢复过程中不同年份、 不同斑块类型的斑块数量、斑块密度变化不同,表明破 碎化程度不同。从不同斑块类型上看,草本-灌木斑块 数量和斑块密度不断减少,说明随着草本-灌木面积的 减小,破碎化程度降低。阔叶林与针叶林的斑块数量和 斑块密度先减小后增大,与 1987年相比整体上呈减少 趋势。2004年阔叶林的斑块数量、斑块密度达到最低 值,此时期是阔叶林面积增长的高峰期,高纬度阔叶林 连片生长,破碎度从 2010年开始有所增加,表明在恢复 的过程中,阔叶林与针叶林首先以大且集中的斑块生 长,而后面积增长主要以零散的斑块为主。岳桦林的斑 块数量和斑块密度一直增加,2016年有所减低,整体上 呈上升趋势,破碎度增加。该结果表示,与阔叶林和针



图 4 长白山风灾景观各斑块类型面积变化趋势 Fig.4 The area change trend of each type in the wind-damaged landscape of Changbai Mountain

叶林相反,岳桦林面积增大首先以小斑块为主,然后有逐渐连成片的趋势。从时间尺度上看,草本-灌木作为 面积最大的斑块类型,在不同年份的六期影像上斑块数量与斑块密度并不是最大,说明草本-灌木的斑块较大 且分布均匀。1999年四种斑块类型的斑块数量、斑块密度均出现异常高值,原因是 1999年所选取的遥感影 像是 9月份的,此时岳桦林和阔叶林的叶片已经凋落,可以看见水体,水体将大斑块分割成许多破裂的小斑 块,因而各斑块类型的斑块数量与斑块密度迅速增加。

	-			-					
	斑块所占景观面积比例 PLAND/%								
	1987	1993	1999	2004	2010	2016			
草本-灌木 Herbaceous-shrub	64.0470	54.7237	45.0463	45.2131	40.0873	33.6366			
阔叶林 Broad-leaved forest	14.0264	10.5426	15.3748	18.2415	23.0762	24.3083			
针叶林 Coniferous forest	11.6156	21.7973	21.9874	25.0351	25.2811	26.1287			
岳桦林 Betula ermanii forest	5.9489	12.9364	11.1855	11.5103	11.5554	8.4773			

表 3 长白山风灾景观中各类斑块占比 Table 3 Percentage of each type in wind-damaged landscape of Changbai Mountain

表 4 长白山风灾景观 1987—2016 景观转移矩阵/hm<sup>2</sup>

Fable 4	Landscap	e transfer	matrix	from	1987	to2016	of	wind-damag	ged i	n (	Changbai	Moun	tai

1097	2016								
1987	草本-灌木	阔叶林	岳桦林	针叶林	转出量	总计			
草本-灌木 Herbaceous-shrub	3846.38	2202.18	168.03	1264.30	3634.51	7480.89			
阔叶林 Broad-leaved forest	99.36	518.43	7.65	945.78	1052.78	1571.22			
岳桦林 Betula ermanii forest	13.11	18.07	489.47	19.46	50.64	540.11			
针叶林 Coniferous forest	109.68	157.66	193.68	801.56	461.03	1262.58			
转入量 In	222.16	2377.91	369.35	2229.54	5198.96				
总计 Total	4068.54	2896.35	858.82	3031.09		10854.80			

最大斑块指数(LPI)表示某一景观类型中最大斑块占景观总面积的比重。草本-灌木最大斑块指数最高, 表明草本-灌木是研究区的优势景观类型,且在研究区内呈片状分布;最大斑块指数总体呈下降趋势,说明随 着恢复进行,草本-灌木面积减少,优势度不断降低。阔叶林最大斑块指数总体上增加,且增加趋势明显,优势 度不断上升。30年恢复过后,针叶林成为面积第二大的斑块类型,仅次于草本-灌木,与阔叶林所占比重相 近,但是最大斑块指数远小于阔叶林,说明针叶林分布不均,斑块小而分散。岳桦林最大斑块指数最小且变化 不大,优势度最低。

景观形状指数(LSI)值的大小代表景观形状复杂程度的高低。值越大,表明景观形状的复杂性越高。研究时段内,各斑块类型斑块呈现出明显的不规则化趋势,其中,针叶林的景观形状指数最大,说明针叶林斑块的形状最复杂,近年来趋于稳定;草本-灌木的景观形状指数变化不大,表明草本-灌木均匀成片形状较规则; 阔叶林在 1987 年恢复初期景观形状指数最大,之后的年份里波动上升下降,整体上下降,有向着规则的斑块恢复的趋势;岳桦林景观形状指数整体呈上升趋势,不规则程度加深。

聚合度指数(AI)用来描述斑块的聚集程度,聚集程度越大,AI值越大。从不同斑块类型来看,草本-灌木 的聚合度最大,随着草本-灌木面积的减小,聚合度指数变化并不显著,说明草本-灌木这一斑块类型聚集程度 高且分布均匀。阔叶林斑块聚合度指数先升高后下降,整体上呈上升趋势,这与阔叶林在恢复过程中首先以 大斑块为主,在恢复后期以小斑块为主的趋势相对应,2004年是阔叶林恢复的高峰期,因此聚合度指数最高, 此后恢复的小斑块破碎且离散,聚合度有所下降。针叶林斑块聚合度指数变化趋势与阔叶林大致相同,但略 低于阔叶林,由于形状复杂聚合程度相对较低。岳桦林斑块聚合度指数从总体上看变化不明显,1999年受水 体影响聚合度最低,此后随着恢复不断进行且有连片生长的趋势,聚合度上升。

综上所述,在长白山风灾景观四种斑块类型中,草本-灌木所占比例最大,随着 30 年恢复不断进行,面积 逐渐变小,优势度不断下降,但分布均匀,斑块形状规则,聚合程度高。阔叶林和针叶林在恢复过程中先以增 加大斑块为主,后期面积增加主要是以小斑块为主,两种斑块类型优势度增加,阔叶林斑块向着规则的形状恢 复,针叶林形状最复杂。岳桦林优势度最低,恢复过程中先以增加小斑块为主,后期以大斑块连片生长,形状 趋于复杂,聚合度上升。





Fig.5 The index variation at the class level of wind-damaged landscape in Changbai Mountain

http://www.ecologica.cn

#### 2.2 景观水平景观格局指数分析

表 5 为 1987—2016 年长白山风灾景观景观水平上各时期景观格局指数变化趋势。除 1999 年受水体影响外,长白山风灾景观斑块数量(NP)和斑块密度(PD)均表现为先下降后升高并逐渐趋于稳定。在恢复初期,草本-灌木所占比例较大,超过 50%,因此最大斑块指数(LPI)所占比例较高;随着植被恢复的进行,最大斑块指数(LPI)逐渐趋于稳定,所占比例仅为 12%左右,说明各斑块类型分布比较均匀,没有某一种或几种斑块独占鳌头的情况。景观形状指数(LSI)、平均斑块分维数(AREA\_MN)、平均形状指数(SHAPE\_MN)等形状指数的波动增加,也反映了整体景观的形状的复杂程度和不规则性不断加深,说明研究区的景观空间形态向着多样化趋势转变。周长面积分维数(PAFRAC)取值范围一般在 1—2 之间,受人为干扰程度越大时值越接近 1;受人为干扰程度越小时越接近 2<sup>[23]</sup>,该地区 PAFRAC 值接近 2,说明在研究区植被恢复时期并未受到强烈的人为干扰。蔓延度指数(CONTAG)表示景观中不同类型斑块的团聚程度或延展趋势,风灾景观 1987—2016 年蔓延度指数波动下降,表明景观连续性降低,对应景观分割指数(DIVISION)、分离指数(SPLIT)的上升,景观破碎度增加。香侬多样性(SHDI)指标是一种基于信息理论的测量指数,能反映景观异质性,数值呈上升趋势说明各景观类型所占比例差异减小,景观类型在景观空间呈均衡化趋势分布,优势组分对景观的控制作用减弱<sup>[24]</sup>。聚合度(AI)有减少趋势,说明景观的聚集度在缓慢的减小,景观分布更加均匀。

	Table 5 The index variation at the landscape level											
	NP	PD	LPI	LSI	AREA_MN	SHAPE_MN	PAFRAC	CONTAG	DIVISION	SPLIT	SHDI	AI
1987	9672	78.9859	24.5822	68.9417	1.2660	1.2557	1.5028	43.4916	0.9117	11.3300	1.1154	71.2694
1993	6187	50.5258	13.2546	62.1551	1.9792	1.3041	1.4495	35.1208	0.9671	30.3799	1.1637	74.9802
1999	14962	122.1847	9.6406	85.3367	0.8184	1.2270	1.5204	26.1695	0.9861	72.0630	1.4012	62.3662
2004	5069	41.3924	11.6544	59.3774	2.4159	1.3297	1.4464	33.3729	0.9691	32.3585	1.2648	76.5158
2010	8612	70.3295	12.4190	68.3787	1.4219	1.2535	1.4629	26.8224	0.9673	30.5695	1.3018	71.6061
2016	8573	70.0053	12.6282	70.7358	1.4285	1.2832	1.4764	30.2383	0.9722	35.9393	1.4636	70.3606

表 5 景观水平景观格局指数

总体来说,从 1987 年到 2016 年,长白山风灾景观斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、蔓延度指数(CONTAG)、聚合度(AI)总体呈现出减少的变化趋势;景观形状指数(LSI)、平均斑块分维数(AREA\_MN)、平均形状指数(SHAPE\_MN)、景观分割指数(DIVISION)、分离指数(SPLIT)和香侬多样性(SHDI)逐渐增加。 说明随着风灾景观植被的恢复,小而分散的斑块转换为大而集中的斑块,同时不规则程度增加,形状复杂,各斑块间连通性总体下降,破碎化程度有所降低,景观均质化发展。

#### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

(1)长白山风灾景观关键指数提取

为确定适合用于风灾景观恢复性表征的关键指数,对景观水平上各景观格局指数归一化处理后,进行主成分分析,得到结果如表 6、7 所示。由表 6 可知,提炼出第 1、第 2 主成分的累计方差贡献率达到 93.753%,满 足大于 90%的要求。对标准化后的指标用 x 表示,LSI 为  $x_1$ ,AI 为  $x_2$ ,NP 为  $x_3$ ,PD 为  $x_4$ ,AREA\_MN 为  $x_5$ ,SHAPE\_MN 为  $x_6$ ,PAFRAC 为  $x_7$ ,SPLIT 为  $x_8$ ,SHDI 为  $x_9$ ,LPI 为  $x_{10}$ ,DIVISION 为  $x_{11}$ ,CONTAG 为  $x_{12}$ 。由载 荷矩阵(表 7)可以得到两个主成分线性组合如下:

具体分析第1、第2成分对于各指数的贡献值,可以看出,第1成分与景观形状指数、斑块数量、聚合度等 相关性较高;第2主成分与最大斑块指数、景观分割指数、蔓延度指数相关性较高。可见第1成分与景观规 模、形状相关,第2成分与景观聚散度相关,两类因子可以作为衡量长白山风灾景观恢复程度的关键性指标。

		表 6	景观水平景观格局指数主成分分析结果						
	Table 6 Principal component analysis of landscape pattern index at landscape level								
主成分 Principal component		特征值 Eigenvalue	方差百分比/% Variance percentage	累计贡献率/% Cumulative variance contribution rate					
1		7.560	63.004	63.004					
2		3.690	30.749	93.753					

表 7 各景观指数载荷矩阵

Table 7 Matrix of principal component of landscape index										
		omponent								
	1	2		1	2	_				
LSI	0.992	-0.112	PAFRAC	0.826	-0.521					
AI	-0.991	0.115	SPLIT	0.792	0.513					
NP	0.965	-0.242	SHDI	0.603	0.602					
PD	0.965	-0.242	LPI	-0.298	-0.946					
AREA_MN	-0.889	0.393	DIVISION	0.367	0.921					
SHAPE_MN	-0.854	0.406	CONTAG	-0.561	-0.767					

 $F_1 = 0.992 \ x_1 - 0.991 \ x_2 + 0.965 \ x_3 + 0.965 \ x_4 - 0.889 \ x_5 - 0.854 \ x_6 + 0.826 \ x_7 + 0.792 \ x_8 + 0.603 \ x_9 - 0.298 \ x_{10} + 0.367 \ x_{11} - 0.561 \ x_{12};$ 

 $F_2 = -0.112 \ x_1 + 0.115 \ x_2 - 0.242 \ x_3 - 0.242 \ x_4 + 0.393 \ x_5 + 0.406 \ x_6 - 0.521 \ x_7 + 0.513 \ x_8 + 0.602 \ x_9 - 0.946 \ x_{10} + 0.921 \ x_{11} - 0.767 \ x_{12} + 0.513 \ x_{11} - 0.513 \ x_{11} - 0.513 \ x_{12} - 0.513 \ x_{13} + 0.513 \ x_{14} - 0.513 \ x_{15} - 0.513 \$ 

(2)长白山风灾景观 30 年景观格局变化综合评价

对于景观格局评价体系的探索,目前主要基于景观格局指数的组合应用,并采用因子分析法减少指数数 量避免信息的重复<sup>[25]</sup>。本文对景观指数主成分分析结果进一步处理,利用两个主成分各评价指数的荷载数 与其方差贡献率的乘积之和,得到各指标的系数。如 *x*<sub>1</sub>的系数为:(0.992×63.004%—0.112×30.749%)/ (63.004%+30.749%)=0.6299。得到综合得分模型为:*Y*=0.6299 *x*<sub>1</sub>-0.6283 *x*<sub>2</sub>+0.5691 *x*<sub>3</sub>+0.5691 *x*<sub>4</sub>-0.4685 *x*<sub>5</sub>-0.4407 *x*<sub>6</sub>+0.3842 *x*<sub>7</sub>+0.7005 *x*<sub>8</sub>+0.6027 *x*<sub>9</sub>-0.5105 *x*<sub>10</sub>+0.5487 *x*<sub>11</sub>-0.6286 *x*<sub>12</sub>。因系数中存在负值,采用归 一化指数函数 Softmax 函数进行归一化处理,得到各景观格局指数的权重值如表 8 所示。

Table 8 Standardized results of landscape index											
$x_1$	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	$x_4$	<i>x</i> <sub>5</sub>	$x_6$	<i>x</i> <sub>7</sub>	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	<i>x</i> <sub>11</sub>	<i>x</i> <sub>12</sub>
0.122	0.035	0.115	0.115	0.041	0.042	0.095	0.131	0.119	0.039	0.112	0.035

表 8 各景观指数归一化值

 $x_1$ :斑块形状指数 LSI; $x_2$ :聚合度 AI; $x_3$ :斑块数量 NP; $x_4$ :斑块密度 PD; $x_5$ :平均斑块分维数 AREA\_MN; $x_6$ :平均形状指数 SHAPE\_MN; $x_7$ :周 长面积分维数 PAFRAC; $x_8$ :分离指数 SPLIT; $x_9$ :香依多样性指数 SHDI; $x_{10}$ :最大斑块指数 LPI; $x_{11}$ :景观分割指数 DIVISION; $x_{12}$ :蔓延度指数 CONTAG

本文从景观规模、形状、优势度、聚集度评价体系出发,选取景观形状指数、景观密度、周长面积分维数、香 依多样性指数、景观聚合度五个指标,结合景观综合指数从多方面进行评价。此外,本文参考乔志和<sup>[26]</sup>长白 山自然保护区 1977 年风灾前景观格局指数,作为长白山风灾景观 30 年格局变化对照依据。各个景观指数的 值如表 9 所示,将各数值进行归一化处理得到表 10。结合表 10、11,得到长白山风灾景观评价综合得分 (表 12)。

	Table 9 Evaluation index of landscape pattern of wind-damaged landscape in Changbai Mountain									
年份 Year	LSI	PD	PAFRAC	SHDI	AI					
1977	72.5013	3.3062	1.6415	1.4135	81.8137					
1987	68.9417	78.9859	1.5028	1.1154	71.2694					
2016	70.7358	70.0053	1.4764	1.4636	70.3606					

表 9 长白山风灾景观格局评价各指标计算结果

主 10 长台山冈京早现枚巳证从久长圩山—— 化 结甲

	农10 人口山风火泉花怕为许川百油你妇 化用木								
Table 10 Standardized results of evaluation index of landscape pattern in the study area									
年份 Year	LSI	PD	PAFRAC	SHDI	AI				
1977	1.000	0.000	1.000	0.856	1.000				
1987	0.000	1.000	0.160	0.000	0.079				
2016	0.504	0.881	0.000	1.000	0.000				
		表 11 各景芝	观评价指标权重						
	Table 11Evaluation index weight table								
LSI	PD	PAF	RAC	SHDI	AI				
0.122	0.115	0.0	95	0.119	0.035				

# 表 12 长白山风灾景观评价综合得分

Table 12 Landscape comprehensive evaluation index of wind-damaged landscape in Changbai Mountain									
年份 Year	得分 Score	年份 Year	得分 Score						
1977	0.354	2016	0.282						
1987	0.133								

从研究结果看,风灾发生前,该区域斑块形状复杂,景观由少数较大斑块组成,异质程度低。风灾发生破 坏了成带状分布的原植被带,大斑块被分割成小斑块。经过 30 年的恢复,长白山风灾景观综合评价得分升 高,说明研究区整体景观格局质量得到提升,但恢复缓慢,与风灾发生前依然相差较大。黎奕晖<sup>[27]</sup>结合景观 指数,运用主成分分析法和综合评价指数的方法,对湖南金童山国家自然保护区金童山片区景观类型格局进 行评价,结果表明仅在 10 年的时间里,研究区的景观综合评价指数达到 0.527,景观类型普遍呈现出优化趋 势,景观多样性、聚集度、相对密度都有相应提升。而长白山风灾景观经过 30 年的恢复,景观多样性有所上 升,但形状指数升高,形状复杂,植被恢复效果不佳。这与长白山区气候恶劣、无霜期短、火山灰土质差、土层 薄、草深且密度大、枯草层厚,树籽无法接触土壤并生根发芽等原因分不开<sup>[28]</sup>。常禹等<sup>[29]</sup>、马琳等<sup>[30]</sup>、王美 玲等<sup>[14]</sup>等相继研究了长白山保护区内森林景观格局及边界的动态变化,均得出了长白山景观趋于破碎化的 结论,与本文对风灾景观研究的结论一致。国内外学者在森林生态系统受干扰后的特征、恢复可行性评价、恢 复技术、恢复生态系统的生态学过程、恢复过程中的生物安全等方面展开了大量研究<sup>[31-32]</sup>。长白山风灾景观 的干扰不断存在,由于草木—灌木的面积最大,分布均匀且连通性较好,应注意防火;对不同的乔木类型采取 不同的保护措施,促进生态系统的稳定恢复。

(3)长白山西、南坡斑块镶嵌分布独特的垂直带谱的成因

温带地区完整的垂直带谱只在长白山北坡出现,而西、南坡不同植被类型成镶嵌分布的现象最早由钱家 驹<sup>[33]</sup>提出。针对长白山西、南坡出现独特垂直带谱的成因,赵大昌<sup>[34]</sup>等认为,火山喷发对火山锥体各坡向的 不同影响是造成这一差异的重要原因。目前此结论仍有待考证。许多学者认为,使长白山植被遭到严重破坏 的那次火山爆发发生在公元 589 年左右<sup>[35-36]</sup>,距今已经 1000 多年,1000 多年前的火山干扰似乎应该已经消 除,植被分布应为标准的垂直带谱。1986 年长白山遭遇的台风破坏了西、南坡原有植被,本文通过对风灾景 观的分析,得出了西、南坡植被斑块化的结论,风干扰下形成不同的斑块,与植被恢复的共同作用,会出现不同 时间形成的斑块空间分布格局。因此本文提出,地带化植被的斑块化是由外部干扰造成的,多次强风干扰可 以形成长白山西、南坡与北坡不同的、独特的斑块镶嵌结构。

3.2 结论

本文以长白山风灾景观为研究区域,通过解译六期高清遥感影像数据,分析研究区 1987—2016 年各斑块 类型变化情况,在斑块类型水平及景观水平分别选取不同景观指数,结合景观面积转移矩阵,探讨研究区 30 年来植被恢复过程中的景观变化特征,并对景观格局变化做出评价。主要结论如下: (1)在斑块类型水平上,草本-灌木的优势度不断下降,但分布均匀,斑块形状规则,聚合程度高;阔叶林和 针叶林在恢复过程中先以增加大斑块为主,后期面积增加主要是以小斑块为主,阔叶林的斑块形状趋于规则, 针叶林复杂;岳桦林恢复过程中先以增加小斑块为主,后期以大斑块连片生长,形状趋于复杂,聚合度上升,有 连片生长的趋势。

(2)在景观水平上,小而分散的斑块在恢复过程中转换为大而集中的斑块,形状不规则程度增加,景观的 连通度总体下降,随着恢复的不断进行,景观异质性越来越低,景观趋于均质化。

(3)从景观转移矩阵看,研究区草本-灌木斑块会不断向乔木斑块转化,草木—灌木所占比例逐渐下降,乔 木所占比例上升。其中,草本-灌木主要转化为阔叶林,阔叶林主要转化为针叶林,针叶林主要转化为岳桦林, 四种斑块类型在恢复过程中呈现一种演替关系。经过 30 年的恢复期,阔叶林和针叶林恢复较好,目前已经从 聚集生长模式转化为非聚集生长模式;岳桦林正处于恢复的旺盛生长时期聚集生长。

(4)运用主成分分析法,确定了适合用于风灾景观恢复性表征的关键指数,两个成分分别与景观规模、形状和景观聚散度相关。

(5)运用主成分分析法与景观综合评价指数相结合的方法对长白山风灾景观进行评价,结果表明 30 年的恢复期中,研究区整体景观格局质量得到提升,但恢复缓慢,与风灾发生前依然相差较大。

(6)多次强风干扰可以形成长白山西、南坡非标准的垂直带谱。

#### 参考文献(References):

- [1] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133-142.
- [2] 邬建国.景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版).北京:高等教育出版社,2007.
- [3] O'Neill R V, Krummel J R, Gardner R H, Sugihara G, Jackson B, DeAngelis D L, Milne B T, Turner M G, Zygmunt B, Christensen S W, Dale V H, Graham R L. Indices of landscape pattern. Landscape Ecology, 1988, 1(3): 153-162.
- [4] 张秋菊,傅伯杰,陈利顶.关于景观格局演变研究的几个问题.地理科学,2003,23(3):264-270.
- [5] 张楷若. 基于 RS 和 GIS 的广元朝天区土地利用景观格局分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [6] Gustafson E J. Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art?. Ecosystems, 1998, 1(2): 143-156.
- [7] Kelly M, Tuxen K A, Stralberg D. Mapping changes to vegetation pattern in a restoring wetland: Finding pattern metrics that are consistent across spatial scale and time. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 263-273.
- [8] 靖传宝. 基于 Landsat 时间序列数据的城市景观格局分析——以深圳市为例[D]. 济南:山东师范大学, 2019.
- [9] 郭少壮,白红英,孟清,赵婷,黄晓月,齐贵增.秦岭地区林地与草地景观格局变化及其驱动因素.生态学报,2020,40(1):130-140.
- [10] 李明珍,李阳兵,冉彩虹.土地利用转型背景下的乡村景观格局演变响应——基于草堂溪流域的样带分析.自然资源学报,2020,35 (9):2283-2298.
- [11] 郭笑怡. 中国东北森林干扰遥感研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [12] 靳英华,许嘉巍,梁宇,宗盛伟.火山干扰下的长白山植被分布规律.地理科学,2013,33(2):203-208.
- [13] 郭利平, 姬兰柱, 张伟东, 张悦, 薛俊刚. 长白山西坡风灾区森林恢复状况. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1381-1388.
- [14] 王美玲,张继超,王舶鉴,王诗洋,郝占庆,王绪高.长白山区森林景观格局动态.生态学杂志,2017,36(11):3138-3147.
- [15] 王士远. 长白山自然保护区生态环境评价及风灾区森林恢复监测[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [16] 侯向阳,韩进轩.长白山红松阔叶混交林风灾迹地的更新与恢复.林业科学,1996,32(5):419-425.
- [17] 牛丽君,梁宇,王绍先,许嘉巍,张睿,武影,国微.长白山自然保护区风灾区植被恢复评价.生态学杂志,2013,32(9):2375-2381.
- [18] 秦艳丽,时鹏,何文虹,霍春平,李鹏,李占斌,杨殊桐,冯朝红.西安市城市化对景观格局及生态系统服务价值的影响.生态学报, 2020,40(22):8239-8250.
- [19] 高翔,张英洁,许嘉巍,靳英华,郭笑怡,陶岩,胡睿,韩莹莹,白云玉,王慧赟.温带山地森林强风致灾的影响因子分析——以长白山风灾区为例.东北师大学报:自然科学版,2019,51(2):130-139.
- [20] 车良革,胡宝清,李月连.1991—2009年南流江流域植被覆盖时空变化及其与地质相关分析.广西师范学院学报:自然科学版,2012,29 (4):52-59.
- [21] 冯露, 岳德鹏, 郭祥. 植被指数的应用研究综述. 林业调查规划, 2009, 34(2): 48-52.

- [22] 南颖, 刘志锋, 朱卫红, 武耀祥, 薛俊刚. 长白山的台风灾区范围及植被恢复动态——基于遥感技术的研究. 自然灾害学报, 2011, 20 (6): 131-139.
- [23] 吴未,许丽萍,张敏,欧名豪,符海月.不同斑块类型的景观指数粒度效应响应——以无锡市为例.生态学报,2016,36(09): 2740-2749.
- [24] 罗紫薇. 基于 GIS 的上杭县城市景观格局演变研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2019.
- [25] Cain D H, Riitters K, Orvis K. A multi-scale analysis of landscape statistics. Landscape Ecology, 1997, 12(4): 199-212.
- [26] 乔志和. 长白山自然保护区景观格局演化与模拟[D]. 长春:东北师范大学, 2012.
- [27] 黎奕晖. 湖南金童山国家自然保护区金童山片区森林景观格局评价研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2019.
- [28] 赵晓飞, 牛丽君, 陈庆红, 张植, 栾艳新. 长白山自然保护区风灾干扰区生态系统的恢复与重建. 东北林业大学学报, 2004, 32(4): 38-40.
- [29] 常禹,布仁仓,胡远满,徐崇刚,王庆礼.长白山森林景观边界动态变化研究.应用生态学报,2004,15(1):15-20.
- [30] 马琳,高成德,张玉波,王沫竹,李俊清.长白山地区森林景观格局动态变化分析.四川农业大学学报,2014,32(2):177-184.
- [31] McNaughton SJ. 1988. Diversity and stability. Nature, 1988, 333(6170): 204-205.
- [32] Jackson L L, Lopoukhine N, Hillyard D. 1995. Ecological restoration: A definition and comments. Restoration Ecology, 1995, 3(2): 71-75.
- [33] 钱家驹. 长白山西侧中部森林植物调查报告. 北京:科学出版社, 1956.
- [34] 赵大昌. 长白山火山爆发和植被发展演替关系的初步探讨. 自然资源, 1984(1): 72-78.
- [35] 徐文铎,何兴元,陈玮,刘常富.长白山植被类型特征与演替规律的研究.生态学杂志,2004(5):162-174.