

基于遥感影像的长白山自然保护区景观格局变化研究

王 宇

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年12月19日; 录用日期: 2024年1月17日; 发布日期: 2024年1月30日

摘 要

长白山自然保护区是我国保存较为完整的一处森林生态系统, 其景观格局变化对整个保护区的生态系统具有重要意义。本文基于Landsat遥感影像数据, 运用Fragstats4.2软件计算各种景观指数, 通过对景观类型面积、优势度指数和多样性指数进行分析从而提出了自然保护区未来的发展趋势和保护措施。本研究以长白山国家级自然保护区为研究对象, 以2013、2017年的多波段遥感图像为数据, 采用人机交互方法, 结合GIS技术, 对长白山自然保护区景观格局进行分析, 发现该区域景观以林地、草原为主, 且随开发年限的增加, 景观片段密度、Shannon多样性指数、Shannon均值指数等指标均呈降低趋势。在景观中, 片状的均匀分布显示出上升趋势。可以看出, 在各种因素的驱动下, 景观模型向着多样化和均质性演化, 同时在2013年至2017年期间, 林地总面积与各类景观面积之比逐渐上升。综上所述, 长白山自然保护区内景观格局变化的主要原因是人类活动对森林生态系统造成的影响。

关键词

GIS, 景观格局, 景观指数, 长白山

Study on Changes of Landscape Pattern in Changbaishan Nature Reserve Based on Remote Sensing Images

Yu Wang

School of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Dec. 19th, 2023; accepted: Jan. 17th, 2024; published: Jan. 30th, 2024

Abstract

Changbaishan Nature Reserve is a relatively well-preserved forest ecosystem in China, and changes in its landscape pattern are of great significance to the ecosystem of the whole reserve. Based on Landsat remote sensing image data, this paper uses Fragstats 4.2 software to calculate various landscape indices, and analyzes the area of landscape types, dominance index and diversity index to propose future development trends and protection measures for the nature reserve. This study takes Changbaishan National Nature Reserve as the research object, takes the multi-band remote sensing images in 2013 and 2017 as the data, adopts the human-computer interaction method, and combines the GIS technology to analyze the landscape pattern of Changbaishan Nature Reserve, and finds that the landscape of the region is dominated by woodland and grassland, and with the increase of the development years, the density of the landscape segments, Shannon diversity index, Shannon mean index and other indicators showed a decreasing trend. In the landscape, the uniform distribution of fragments showed an increasing trend. It can be seen that the landscape model evolved toward diversity and homogeneity driven by various factors, while the ratio of the total area of forested land to the area of various types of landscapes gradually increased during the period from 2013 to 2017. In summary, the main reason for the change of landscape pattern in Changbaishan Nature Reserve is the impact of human activities on the forest ecosystem.

Keywords

GIS, Landscape Pattern, Landscape Index, Changbaishan

Copyright © 2024 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

长白山自然保护区地处欧亚大陆东缘,在东北亚大陆上,位于长白山山脉,是一个典型的火山堰塞湖湿地,其生态系统具有典型的长白山森林生态系统特征。随着长白山自然保护区的发展,在保护区内人类活动也随之增多,由此对保护区内的景观格局产生了很大的影响[1]。因此,开展对长白山自然保护区景观格局变化研究对于了解该区域生态环境变化情况和生态系统服务功能具有重要意义。

景观是在某一区域所代表的一个场景,融合了地形,空间和材料等类型。景观是自然中复杂的,具有空间差异的区域之一,对重复使用的部分和生态系统进行分类,含有对自然和人文相互作用[2] [3]。景观的广域意义在于,反映了从微观到宏观的许多层次上的,具有异质性的空间单元。景观格局是指在一定区域内,各种类型的自然、经济和社会活动在时间上和空间上所构成的空间格局,它包括土地利用、土地覆盖类型、景观组成要素等。景观格局受自然因素和人为因素的共同作用,不同时期景观格局变化的主导因素也有所不同,且各景观类型之间存在着相互联系[4]。因此,为了了解整个自然保护区的生态过程和功能,有必要分别研究自然保护区的景观形态,并在不同的尺度上进行研究。

近年来,我国自然保护区的景观格局演变与生态系统健康问题受到了越来越多的关注,对我国自然保护区的科学研究与保护管理具有重要意义。目前常用的研究手段有两种[5],一种是指示种法,另一种是指数系统法,它能综合反映生态、社会、经济等要素,并能将生态、社会、经济等因素综合分析,得

到了越来越多的认同和应用。随着 GIS 技术的成熟程度的提高，我们在研究自然保护区景观模式的变化方面取得了重大进展[6]，基于 1986~2017 年 Landsat 卫星数据，靖传宝[7]对深圳市 1988~2017 年城镇化进程中的景观分布进行了量化分析。郭少壮、白红英等[8]以秦岭为研究对象，采用 GIS、景观格局指标等方法，结合 Landsat 卫星遥感资料，开展森林草原景观格局演变特征及主要影响因子的研究，这项研究得到了生态理论和相关领域的支持。本研究以 GIS 与遥感图像为主要研究手段，以长白山自然保护区为研究对象，综合运用 GIS、遥感等多源遥感数据，从宏观到微观的多尺度、多层次、多层次地评估流域内的生态系统健康状态。

2. 研究区概况

长白山自然保护区位于吉林省东南部如图 1 所示，地理坐标范围约为 41°41'49"~42°25'18"N，127°42'55"~128°16'48"E，总面积 168.87 万公顷，是一处以保护温带森林生态系统及珍稀濒危野生动植物为主的国家级自然保护区。保护区处于中、朝、俄三国交界处的长白山，气候复杂多变，四季分明，年平均气温 2.7℃，年平均降水量在 1000 mm 以上，气候温和湿润、四季分明。保护区内主要分布有森林、山地草原、高山湖泊等自然景观[9]。

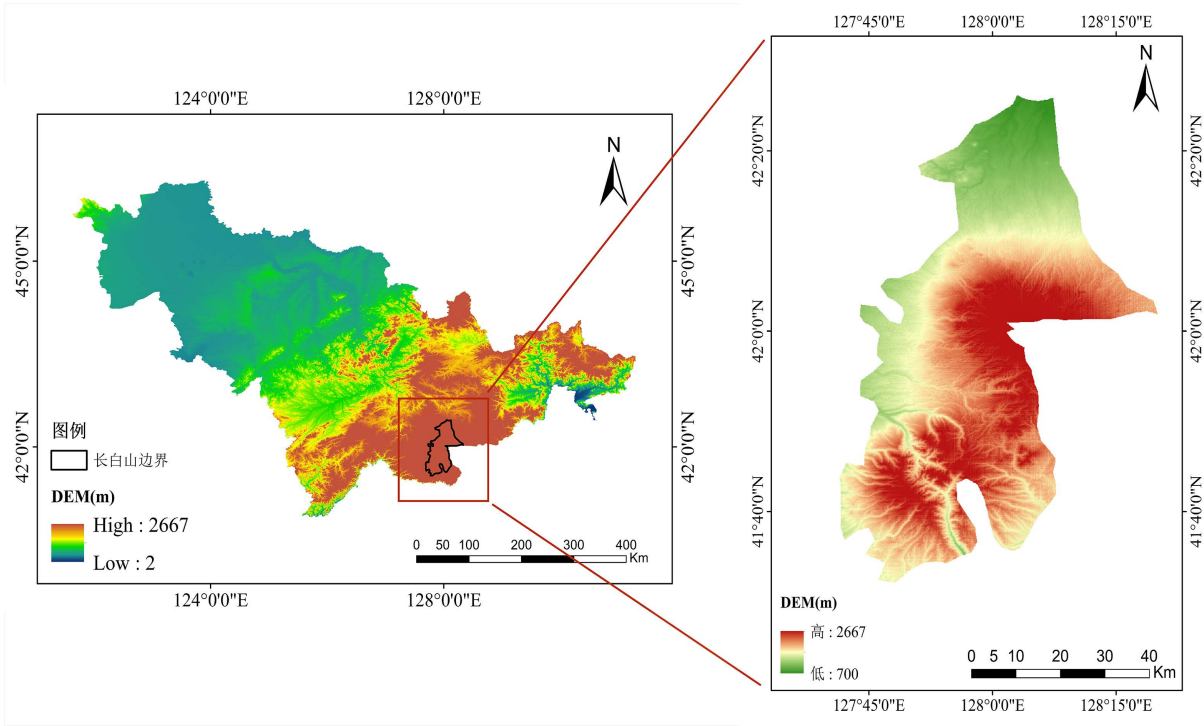


Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区概况

3. 研究数据与方法

3.1. 数据来源

本研究中的遥感影像数据源为 Landsat TM 影像，该数据在 2013 和 2017 年两期得到，分别是 2013 年 9 月 16 日和 2017 年 8 月 26 日，主要覆盖了长白山自然保护区的部分区域。基于遥感技术的景观指数方法是研究长白山自然保护区景观格局变化的有效手段。景观指数能够反映不同区域间的景观差异，比

较不同区域内的景观结构特征，为研究区域内的土地利用/覆被变化和人类活动提供有效信息。本研究采用 ENVI 软件对 2 期保护区遥感原始数据进行图像融合，进一步使用优化监督分类对图像进行解译和利用。采用 Fragstats4.2 软件中的景观指数方法对长白山自然保护区的景观格局进行分析，计算出长白山自然保护区在不同时期内的景观指数。

3.2. 研究方法

本文以两期的遥感图像为数据源，利用图像处理系统和景观地图，图像分类为研究当今景观生态的常用方法。使用 ArcGIS、ENVI 等地理信息系统处理工具作为媒介。计算破碎化景观的数量、面积和周围环境等特征时，计算了各种景观指标，分析了景观空间模型变化的相关性，并分析了这些变化的决定因素。

3.2.1. 景观指数选择

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[10]。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自然保护区景观格局变化进行总结。选取的景观格局指数如表 1 所示。

Table 1. Landscape pattern index
表 1. 景观格局指数

景观格局指数	公式	生态学含义
斑块总面积(CA)	$CA = \sum_{i=2}^n a_i$	大小对某些景观斑块的物种丰富度有影响
斑块个数(NP)	$NP = \sum_{i=1}^m S_i$	它是景观组成等指标的基础
斑块密度(PD)	$PD = \frac{n_i}{A} \times 100000$	它代表了景观的破碎化程度和空间格局以及过程分布的不均匀性与复杂性
最大斑块所占景观面积的比例(LPI)	$LPI = \frac{A_{\max}}{A} \times 100\%$	它对敲定景观的类别有很大用处。LPI 值的大小显示了景观的优越性，人类对景观的干扰也可以通过它来体现。
边界密度(ED)	$ED = \frac{E}{A} 10^6$	边界密度指数反映了景观类型划分为边界的程度，主要用于分析景观的边缘效应。
景观形状指数(LSI)	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	当该值在 LSI 值范围内较大时，表示景观中不同类型点的衔接度较低，反之，不同类型点的衔接度较高。
平均斑块分维数(MPFD)	$MPFD = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{2 \ln(0.25P_{ij})}{\ln(a_{ij})} \right]}{N}$	平均斑块分维数代表景观板块形状的平均复杂性，主要用于描述和比较斑块的几何特征
平均邻近指数(MPI)	$MPI = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{a_{js}}{h_{ijs}^2}}{N'}$	平均邻域指数反映了同一类型斑块之间景观的破碎化程度和接近程度
斑块集聚度指数(RC)	$RC = 1 - \frac{C}{C_{\max}}$	高 RC 值表明景观是由大簇组成的，低 RC 值表明景观是由许多小块组成的

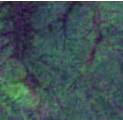
续表

景观分离指数(S_i)	$S_i = \frac{D_{ij}}{A_j}$	景观分离度是指景观类型中不同斑块数个体之间的衔接或分散程度，主要代表被划分的景观的分散程度
香农多样性指数 (SHDI)	$SHDI = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$	香农多样性指数用于评价群落多样性
香农均匀度指数 (SHEI)	$SHEI = \frac{SHDI}{SHDI_{max}} \times 100\%$	香农均匀度指数主要反映不同类型景观斑块分布的均匀性

3.2.2. 遥感影像解译标志及分类

遥感数据预处理完成之后，分析地形、土壤形态和植被特征，使用监督的分类方法对遥感图像进行解释和分类。图像交互解译的前提是建立遥感图像解译符号。地理相关分析应用于遥感图像的解译信号，考虑了遥感图像的色调、颜色、大小、形状、阴影、纹理、饱和度、结构和位置等特征[11]。确定采集的基本数据、资源类型、属性和实际现场工作范围，以及用于提取信号的遥感图像信息从而创建一个搜索区域(如表 2 所示)。

Table 2. Types of image interpretation
表 2. 影像解译类型

地物类型	影像实例	影像特征		
		形状	色调	纹理
高海拔林地		几何特征不明显	以暗绿色为主	影像颜色较为均匀
中海拔林地		几何特征不明显	大多以暗绿色为主	影像较为细腻，颜色均匀
荒草地		几何特征不明显	为灰绿，灰紫色为主	影像颜色不均匀
耕地		几何特征明显，形状规则，边界清楚	以浅紫色为主	影像细腻
水体		几何特征明显，河流弯曲，湖泊有大概的形状	以深蓝色或蓝色为主	纹理特征不同宽度的弯曲或椭圆形区域
极地苔原		几何特征不明显	为浅紫色和白色	颜色较为均匀
中海拔林地		几何特征不明显	为浅绿色	纹理粗糙

4. 结果与分析

4.1. 景观类型的空间变化分析

通过分析 2013 年和 2017 年的长白山保护区的遥感影像数据得到空间分布如图 2 所示，如表 3 所示，2017 年森林面积较 2013 年显著增加，其中高海拔森林、中海拔森林面积分别增加 18.63%和 30.92%。与此同时，荒地、极地苔原和水体也分别增加了 17.50%、34.33%和 30.92%。农业用地面积明显萎缩，减少 96.16%。从 2013 年和 2017 年长白山各景观区变化来看，林地总面积呈上升趋势，耕地面积明显减少，区域生态环境呈演化趋势。这表明生态环境正在缓慢改善。

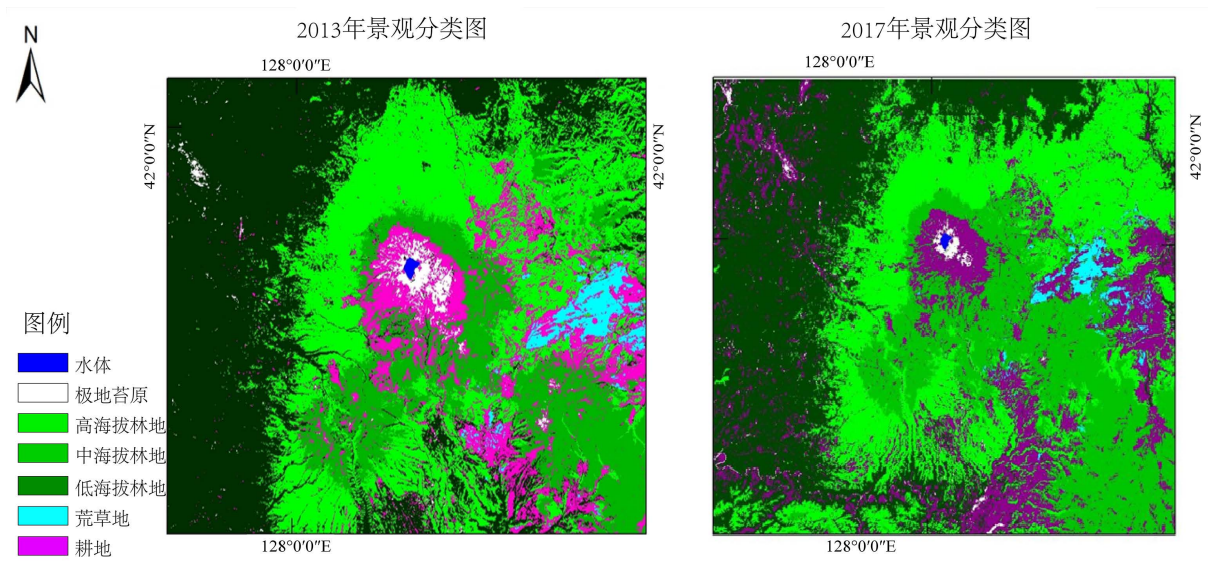


Figure 2. Landscape classification maps for 2013 and 2017
图 2. 2013 年和 2017 年景观分类图

Table 3. Change in landscape category area between 2013 and 2017
表 3. 2013 与 2017 景观类别面积的变化

景观类别	2013 年面积(km ²)	2017 年面积(km ²)	2013~2017 变化率(%)
高海拔林地	5312.9619	7745.6322	18.6289
中海拔林地	3144.5118	5959.0899	30.9172
低海拔林地	3144.5118	5959.0899	30.9172
荒草地	5359.1391	7633.1889	17.5030
耕地	60898.7592	1191.4398	96.1622
极地苔原	16669.1691	34096.4523	34.3289
水体	3144.5118	5959.0899	30.9172

4.2. 景观空间格局特征统计分析

通过 Fragstats4.2 软件的分析，得到了研究区的景观水平指数情况，斑块面积变化不大，但分析范围内各景观要素的地块面积在 2013 年至 2017 年间发生了一定程度的变化，如表 4 所示。与 2017 年相比，2013 年森林面积增加 $8.06 \times 10^7 \text{ m}^2$ ，剩余草地面积增加 $2.27 \times 10^6 \text{ m}^2$ ，极地冻原面积增加 $1.74 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，耕地面积减少 $5.97 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。2013 年各景观类型面积大小顺序为：耕地 > 极地苔原 > 林地 > 水体 > 荒

草地，2017 年各景观类型面积大小顺序为：极地苔原 > 林地 > 草地 > 水体 > 耕地。在对长白山自然保护区不同地理位置的比例进行比较时，2013 年和 2017 年分别达到 19937 个和 270173 个，分别占当年斑块总数的 30.95%和 68.59%，以土地数量来说，从林地、荒草地、极地苔原景观斑块，而耕地的地貌却在减少。边界密度可以被用来说明斑块密度的变化，近年来，研究区内高、中、低森林区域的边界密度一直在增加，共增加 1.3351 m。野生草原和极地苔原之间的极限密度也呈上升趋势。因此，森林、草地和极地冻原地区范围往往密度的增加的风景，但其他类型的风景的变化并不明显，但景观破碎一般倾向于增加。研究地点内的景观指数显示了一个日益增长的趋势，香农多样性指数和香农均匀度指数均呈下降趋势，其中香农多样性指数下降 0.32，香农均匀度指数下降 0.21。因此，景观的空间异质性在很大程度上呈下降趋势。景观指数等分析结果显示区域不断增长的趋势，平均周长面积指数和景观形状指数，2013~2017 期间增加了 0.3 和 0.43，2013 年至 2017 年，平均分维数显示平均下降 0.01。随着研究领域的发展，景观的整体形式变得越来越复杂。在调查地区的地段数量从 2013 年的 64425 个增加到 2017 年的 393922 个，总共增长了 71.89%。平均斑块面积从 2013 年的 80.22 降至 2017 年的 19.06，下跌 62%。从 2013 年到 2017 年地区呈现的零碎现象越来越明显，研究区的景观破碎化程度趋于增大。研究区内近年来，景观的香农多样性指数和景观均匀度指数越来越少，表明景观类型逐渐变得单一。

Table 4. Landscape level index
表 4. 景观水平指数

景观水平指数	缩写	2013 年	2017 年	变化率(%)
斑块数量(个)	NP	64425	393922	71.89
斑块类型总面积	CA	5590305.18	5589590.49	-0.0064
斑块密度(个/m ²)	PD	0.29	2.35	2.06
最大斑块指数(%)	LPI	20.81	29.11	8.30
边缘密度	ED	7.60	20.29	0.46
景观形状指数	LSI	116.99	292.45	0.43
平均斑块面积(m ²)	AREA_MN	80.22	19.06	-0.62
平均形状指数	SHAPE_MN	1.31	1.13	-0.07
平均分维数	FRAC_MN	1.05	1.03	-0.01
平均周长面积比	PARA_MN	543.49	1014.93	0.30
平均邻近指数	CONTIG_MN	0.56	0.23	-0.42
斑块分维数	PAFRAC	1.28	1.34	0.02
斑块凝聚度(%)	COHESION	99.11	98.38	-0.73
景观分离度(%)	SPLIT	80.33	80.09	-0.23
香农多样性指数	SHID	0.75	0.39	-0.32
香农均匀度指数	SHEI	0.54	0.35	-0.21

4.3. 景观要素动态变化分析

选取斑块密度、景观形状指数和平均斑块分形维数等 16 个景观特征指数来描述景观要素的动态变化。调查区域的景观密度是指具有重大变化的景观，如森林、草甸、农田、极地苔原和水生景观等的变化情况。斑块的形状在一定程度上影响着景观的功能[12]。一般来说，不规则斑块的生态过程可能比正常斑块具有更多的异质性。2013~2017 年，研究区景观中各类点的形状指数变化范围为 1.13~1.31。各景观

要素的斑块形状指数在过去两年没有明显变化。2013 年和 2017 年, 每个景观元素片段的分形维数基本在 1.34 以下, 说明每个景观元素片段的形状一般比较简单。不同景观类型或同一景观类型的优势比例与景观优势度有关, 而景观优势度又与偏离程度呈线性关系, 优势度越高, 偏离程度越高, 景观类型就不同, 反之相同[13]。

4.4. 驱动力分析

在景观模型动力学的研究中, 动力机制的研究是非常重要的。研究景观模型的演变、原因、基本过程、景观模型变化的内部机制、对未来变化的预测以及相应控制发展的沟通机制是有非常重要的意义。景观模型在特定区域和特定时间内演变的决定因素取决于分析的不同区域, 但景观模型演变的决定因素仍然具有恒定的时间和空间规律, 更长的时间轴。空间尺度结合了地形和气候等自然因素[14]。人口、文化和当地社会经济环境等人为因素在不断变化的景观模式中发挥着重要作用, 而植被、土壤和技术创新等因素在中小空间中发挥着重要作用。模型的决定因素改变了自然因素和人文景观, 景观变化模型的决定因素通常可以分为两类: 一个是自然因素、地形、气候和水文。一个是人为因素, 包括人口、政治、经济和文化因素。这两个因素通常在不同的时间和空间尺度上执行不同的功能级别。为了确定与景观的关系, 有必要进一步研究与景观过程的相互作用程度及其对景观的影响和相互关系。火灾、洪水、以及其他自然灾害等影响景观模式变化的因素有很多, 可能会给景观带来巨大的变化。在小景观尺度上, 环境因素支配着植被模式。在长白山自然保护区, 较好地表现出局部栖息地的微气候条件, 影响空间格局和景观变化。驱动景观的自然因素, 通常在更大的时间和空间尺度上影响风景。人类活动给景观生态系统带来了很多的困扰。农业文明时代, 农业生产取得了巨大的进步, 包括农田、小型水库、居民区、道路、世界各地的许多景观、农业生态系统和人类文明[15]。随着人口的增长, 对食物的需求也在增长, 地球正在显著恢复, 人类对自然景观的破坏性影响也在显著恢复。然而, 由于生产率低, 对景观模型的损害是局部的。在工业时代, 人类社会从农业向大规模工业生产转变, 进入了信息时代。科学技术的发展使生产力达到了前所未有的水平。地球景观发生了巨大的变化, 这不可避免地会给地球带来生态和环境问题。无论是半自然的乡村景观还是完全人工的城市景观, 都有不同层次的文化景观, 文化对景观的影响是显著的。它不仅反映了人类在历史时期创造的经济价值, 也反映了在历史进程中形成文化景观的精神、伦理和审美价值。近年来, 通过教育和培训, 人们对环境保护的认识有了很大的提高。然而成熟的森林可能会受到非法砍伐的影响。这需要更多的管理和推广。

5. 结论

本文介绍了 2013~2017 年地球资源观测卫星 Landsat8_OIL 获取的遥感影像, 利用 GPS 技术、RS、GIS 技术, 对长白山自然保护区景观的主要研究类型分类, 包括地貌特征, 分析比较关键的指标, 结合景观生态学原理和其他相关领域。展示了 2013 年和 2017 年长白山自然保护区的土地利用和景观模式。反映了长白山自然保护区土地利用和景观格局的快速变化, 得出以下结论。近年来, 由于人类活动和经济发展, 景观模式发生了重大变化。

(1) 从景观数据水平的主要指标来看, 近年来研究领域的景观数据的碎片化程度在增加, 碎片的平均面积在减少, 边缘的密度在增加。景观空间异质性的程度在逐渐减少。受长白山自然保护区保护政策的影响, 景观片段密度、香农多样性指数、香农平均指数逐年下降。在景观中, 片状的均匀分布显示出上升趋势。可以看出, 在各种因素的驱动下, 景观模型向着多样化和均质性演化。

(2) 对自然因素和人为因素的分析表明, 气候、降雨、蒸发和自然灾害等因素导致了所分析地区景观模式的变化。通过加强保护自然保护区的政策, 我们将加强对草原、森林、水资源、野生动物和生境的

保护以及可持续发展,同时加强法律法规的传播和教育。综上所述,与2013年相比,长白山的景观近年景观情况变好,更加多样化,凝聚力更小。

在这项研究中,卫星遥感图像数据被用作基本数据和来源,但它使用的空间远程检测和分析的技术,则使遥感数据的精度不够。这项研究的目的是通过对长白山景观模式的变化进行精确的定量分析来实现。然而,在一些研究中,虽然遥感图像数据具有许多优势,但诸如传感器、图像时间和大气条件等因素不可避免地根据表面特性导致具体的错误。在遥感图像的分类中,由于图像分辨率和采集时间的不同,会发生许多分类错误,这影响了分类的准确性。在创新方面,理论、方法和技术在研究景观模式和驱动力变化方面已经成熟,本文需要进一步发展。在分析区域内建立景观指标和选择系统是非常简单的,可以充分反映分析区域的独特特征。这只是一个定性的观点,包括人类行为对当地景观模型分析的影响。需要更详细地说明,详细讨论和分析。由于数据收集、数据处理、各种景观指标和空间统计方法、空间分类和分析以及人类和机器运动的实际水平的限制和不确定性,景观模型分析造成了错误。需要进行进一步的研究和分析,以便为可持续利用自然保护区提供科学管理、保护和科学决策。对导致景观变化的决定因素的影响进行定量分析的方法值得进一步讨论和分析。

参考文献

- [1] 王健铭, 张天汉, 于琳倩, 等. 基于生态保护格局的长白山北部森林景观特征分析[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(5): 70-80. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20140413>
- [2] 张吕成, 张一帆, 董灵波. 基于 Landsat TM 数据的大兴安岭森林景观空间格局及其关联性[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 1-9. <https://doi.org/10.16270/j.cnki.slgc.2021.06.004>
- [3] 王耕, 常畅, 韩冬雪, 等. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1910-1922.
- [4] 杨强强, 徐光来, 杨先成, 李爱娟, 陈晨. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9048-9058.
- [5] 熊李虎. 鸟类及其群落对崇西湿地生态恢复和生境重建的响应[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2011. <http://cdmd.cnki.com.cn/Article/CDMD-10269-1011034637.htm>
- [6] 马琳, 卢珺, 高成德, 等. 基于 GIS 的长白山南坡森林景观格局定量分析[J]. 河南林业科技, 2017, 37(1): 6-10.
- [7] 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]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2019.
- [8] 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[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 130-140.
- [9] 乔志和. 长白山自然保护区景观格局演化与模拟[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- [10] 杜小娅, 孙薇薇, 陈添悦. 土地利用格局幅度效应研究——以扬州市广陵区为例[J]. 城镇化与集约用地, 2020, 8(2): 107-116. <https://doi.org/10.12677/ULU.2020.82011>
- [11] 苏凯, 王茵然, 孙小婷, 等. 基于 GIS 与 RS 的东北森林带景观格局演变与模拟预测[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 195-204.
- [12] 赵福强, 代力民, 于大炮, 等. 长白山露水河林业局森林景观格局动态[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1180-1184.
- [13] 杨飞, 姚作芳, 孙九林, 等. 基于 RS 和 GIS 的长白山林区景观格局变化分析——以抚松和安图县为例[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(4): 431-437.
- [14] 余新晓, 牛健植, 关文彬, 冯仲科, 编. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 42-53.
- [15] Keenest, P. (1993) Analyzing of Historic Landscape Patterns with a Geographical Information System: A Methodological Outline. *Landscape Ecology*, 8, 103-118. <https://doi.org/10.1007/BF00141590>