

# 基于 GIS 和 PCA 降维的森林景观格局等级特征分析

王计平<sup>1</sup> 支晓蓉<sup>1</sup> 黄继红<sup>2</sup> 孟超<sup>3</sup> 胡艳萍<sup>4</sup> 张德成<sup>4</sup>

(1. 中国林业科学研究院国家林业局盐碱地研究中心, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院森林与生态环境保护研究所, 北京 100091;

3. 河北农业大学林学院, 保定 071000; 4. 中国林业科学研究院科技信息研究所, 北京 100091)

**摘要:** 森林景观空间格局及其内在等级特征辨识是森林资源管理和生态环境规划的重要基础。以新疆天山北坡西段霍城林场为对象, 以森林资源二类调查资料和 DEM 数据为基础, 基于 GIS 和 PCA 降维方法, 通过景观等级分类和景观指数分析, 对林区森林景观空间格局及其等级特征进行了研究。结果表明: 天山北坡森林景观格局存在明显的等级特征, 在不同等级上森林景观破碎化严重, 斑块大小空间变异强烈; 随着森林景观等级细化, 森林核心斑块大小、破碎化、景观丰富度、空间邻近程度等指标变异加强; 在较高等级水平上, 斑块密度 (PD)、平均斑块面积 (AREA\_MN)、景观形状指数 (LSI)、周长-面积分形维数 (PAFRAC) 等指数对概括森林景观空间格局具有决定性。森林景观资源保护和精细化管理应注重对景观破碎化、丰富度、斑块空间邻接度等指标的考虑及调控, 进而为林区景观格局优化、森林景观资源健康经营与管理提供有力参考。

**关键词:** 森林景观格局; 等级理论; GIS; PCA 降维; 天山北坡

中图分类号: S757.2; S7-05 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0195-07

## Hierarchical Characteristics Analysis of Forest Landscape Pattern Based on GIS and PCA Dimension Reduction Method

WANG Jiping<sup>1</sup> ZHI Xiaorong<sup>1</sup> HUANG Jihong<sup>2</sup> MENG Chao<sup>3</sup> HU Yanping<sup>4</sup> ZHANG Decheng<sup>4</sup>

(1. Research Center of Saline and Alkali Land, State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2. Institute of Forest Ecology, Environmental and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China

4. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Forest landscape spatial pattern and identification differences in their internal hierarchical characteristics are important basis for forest resource management and ecological environment planning. Huocheng forest farm, locating in the western section of north slope of Tianshan Mountain in Xinjiang, a place with relatively stable landscape diversity, was selected as typical study area, based on forest resource inventory data for management and digital elevation model (DEM) date, and with the support of geo-information system (GIS), dimension reduction method of principal component analysis (PCA) and landscape pattern indices (LPIs), the spatial patterns and grading characteristics of forest landscape in the forest region were studied through landscape classification and landscape index analysis. The following results were obtained. In the first place, the forest landscape pattern had obvious hierarchical characteristics in the north slope of Tianshan Mountain. At different levels of organizational hierarchy, landscape was seriously fragmented, and the patch size showed considerable spatial variability, in addition, with the refinement of forest landscape organizational hierarchy, spatial variability of some landscape indexes core patch area, fragmentation, landscape richness, adjacency were increased. In the second place, at a higher grade level, patches density (PD), average patch area (AREA\_MN), landscape shape index (LSI) and perimeter area fractal dimension (PAFRAC) were key indexes for summarizing the spatial pattern of forest landscape. The research result can provide a strong reference for optimizing forest landscape pattern and healthy management of forest landscape resources in landscape

收稿日期: 2018-08-06 修回日期: 2018-08-31

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2017ZA007-3、CAFYBB2014MC004) 和林业软科学研究项目 (2018-R5)

作者简介: 王计平 (1978—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事森林景观格局评价、盐碱地林业改良与利用研究, E-mail: wjp\_gis@163.com

level by using the dimensionality reduction method of landscape pattern information. Most noteworthy, the protection and refinement management of forest landscape resources should be fragmentation, richness and spatial adjacency of landscape.

**Key words:** forest landscape pattern; hierarchy theory; geo-information system; principal component analysis dimensionality reduction; northern slope of Tianshan Mountain

## 0 引言

景观格局、过程及其与尺度间的相互关系是景观生态学研究的重要内容之一<sup>[1]</sup>。生态学中景观概念有两种方式:一种为直观意义上的,即景观是一个具有数公里尺度的生态系统综合体,包括森林、草原、灌丛、村落等可视景观要素的某一具体区域;另一种是抽象意义上的,即景观可看作为对生态系统进行空间研究的一个生态学标尺,可代表任意尺度上的空间异质性<sup>[2]</sup>。森林景观作为一种特殊的景观类型,是指某一特定区域内数个异质森林群落或森林类型构成的复合生态系统,它是以森林生态系统为主体所构成的景观,包括各种类型的天然林、人工林、灌木林、草地、河流、农田、居民点等要素<sup>[3]</sup>。气候、水文和生物等多种自然因素和人为作用共同塑造了结构与功能独特的森林景观<sup>[4]</sup>。在这种类型中,一个重要特点就是森林景观系统的复杂性表现为系统组织多层次,空间结构信息量大,维数多<sup>[5-6]</sup>。因此,准确把握森林景观等级规律及其格局特征信息,对深入理解森林生态系统结构与功能的相互关系、深化景观等级理论及其尺度效应研究具有重要的意义。

等级指系统组织的层次秩序性<sup>[7]</sup>。等级理论最根本的作用之一就是简化复杂系统,以便于对其结构、功能和动态进行理解和预测<sup>[8]</sup>。森林景观作为一个复杂系统,是由森林植物个体、种群、群落、生态系统、景观等不同层次构成的生态学组织<sup>[9]</sup>,在自然地形、土壤、气候等影响下,具有高度时空异质性和系统可分解性<sup>[10-11]</sup>。目前,针对森林资源保护的研究主要从树木分布、树种多样性、种群结构、群落组成等方面开展<sup>[12-15]</sup>,在景观尺度上,通常把林区地类、林种当作一种景观类型,通过比较不同区域森林景观格局差异或同一区域不同时期森林景观格局变化来理解森林资源格局与动态<sup>[16-17]</sup>,而从相邻层级间考量各层级森林景观格局等级特征的案例较少<sup>[18]</sup>,因而不足以全面揭示森林资源内在结构及景观系统的复杂性。WU<sup>[19]</sup>利用尺度方差分析法,对加拿大一个针叶林景观在空间格局上所表现的多尺度和等级特征进行了研究,并找到了临界尺度。然而类似研究与

应用在国内还很少见。

本文以新疆天山北坡景观多样性相对稳定的林区霍城林场为例,从水文生态学角度,以流域为分析单元,运用等级理论和景观信息降维技术研究森林景观格局等级特征及关键指标,以期为森林景观资源保护、森林景观资源健康经营与管理提供重要的参考依据。

## 1 研究区概况

天山是世界七大山系之一,东西横跨中国、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦四国,全长 2 500 km。霍城林区位于天山北坡西段,在行政上属于伊犁哈萨克自治州,位于 80° 11' ~ 81° 24' E, 43° 39' ~ 44° 50' N,林场总经营面积为 89 745. 12 hm<sup>2</sup>,属温带半干旱气候,全年平均气温 8. 2 ~ 9. 4℃,气候严寒,年温差较大,热量不足,全年日照时数 2 550 ~ 3 500 h,日均日照时数 8 ~ 12 h,无霜期 165 d,年降水量 140 ~ 460 mm,主要集中在 6—12 月,年降雪 130 ~ 140 d,积雪深度 45 ~ 55 cm,积雪和融雪水文效应突出。从霍城林场森林资源看,林地总面积 50 341. 08 hm<sup>2</sup>,其中有林地 21 709. 93 hm<sup>2</sup>,有林地中,纯林 19 858. 06 hm<sup>2</sup>,占林地面积的 39. 45%,混交林 1 851. 87 hm<sup>2</sup>,占 3. 68%,林场植被呈现出明显的垂直地带性分布,植被类型多样,表明霍城林场森林景观类型相对丰富。

## 2 研究方法

### 2.1 数据收集与处理

以霍城林区 2009 年森林资源调查资料和 DEM 为基础数据,在 GIS 技术支持下,对森林资源、地形数据进行整理。森林资源数据为 SHP 矢量格式,DEM 为 GRID 格式,栅格大小是 30 m × 30 m。数据处理主要包括数据投影系统转换与统一、林区地类及森林类型的重分类、流域地形分析及水文单元确定等,均在 ArcGIS 软件中完成。

### 2.2 流域与景观等级类型划定

通常可用于森林景观格局分析的空间幅度有自然地形学分区<sup>[20-21]</sup>(如集水区、流域等)、生态功能分区<sup>[22]</sup>、所有权边界(如县域、营林区、林班等)<sup>[23-26]</sup>等类型。在新疆特别是山区,积雪分配及

融雪水文过程对山区森林植被分布具有决定意义。为了更好地理解森林景观空间格局与生态功能特征,采用自然地形学分区,基于 EDM 数据划定 47 个流域单元(图 1、2),作为森林景观分析单元。在高等级水平上,将霍城林区分为针叶林、阔叶林、混交林、疏林地、苗圃地、灌木林、宜林荒山荒地和非林地 8 类(图 3);在低水平等级上,根据林区地类特征,将针叶林、阔叶林、混交林、疏林地、苗圃地、灌木林和宜林荒山荒地合并为林地,即与非林地一起,构成 2 类景观类型(图 4)。

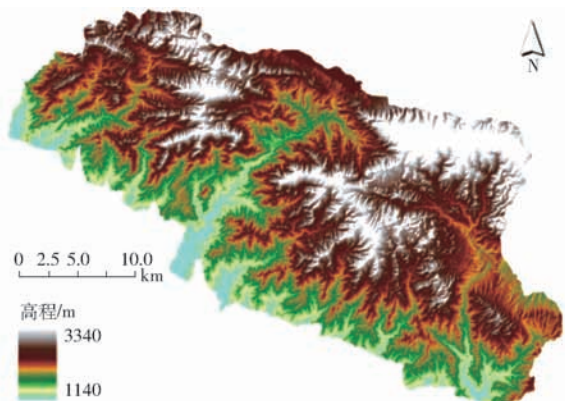


图 1 研究区高程分析图

Fig. 1 Elevation analysis map in study area

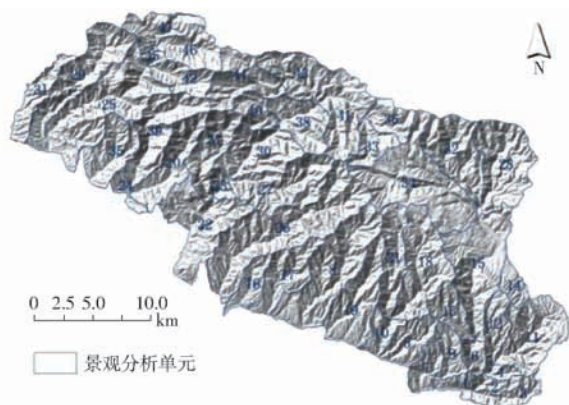


图 2 基于 DEM 的景观分析单元

Fig. 2 Landscape analysis unit based on DEM

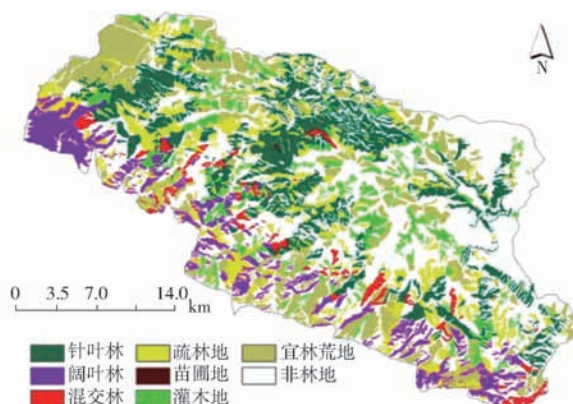


图 3 研究区景观分类(8 类)

Fig. 3 Landscape classification in study area(eight classes)

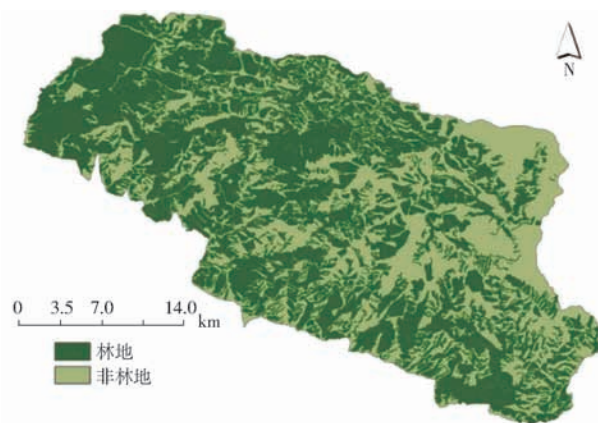


图 4 研究区景观分类(2 类)

Fig. 4 Landscape classification in study area(two classes)

### 2.3 景观指数筛选与确定

为了全面刻画林区森林景观格局特征,从斑块边缘特征、空间邻接度、景观多样性等方面,从景观水平上选取 39 个代表性景观指数,计算每个等级中每个流域上景观指数。考虑到部分景观指数间存在一定相关性,应用 RIITERS 等<sup>[27]</sup>提出的方法将景观指数的数量减少到一个可操作的水平,即对每一对景观指数进行相关性分析,计算各等级水平各流域各所有景观指数的皮尔森矩相关系数,检查决定系数不小于 0.81 ( $R \geq 0.9$ ) 的指数对,根据其可解释能力进行剔除。对于某对指数在某一数据集中呈现高度相关关系,而在另一组数据中却无明显相关,在这种情况下,保留该景观指数,并用于同另一个等级尺度计算的结果,进行比较而决定取舍。此外,在各子流域各个等级水平上,一些计算结构均表现为固定值的景观指数也将被剔除。按照此标准,最终确定 29 个景观指数,包括面积/密度/边缘类指数:斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、总边缘长度(TE)、边缘密度(ED)、景观形状指数(LSI)、平均斑块面积(AREA\_MN)、平均回旋半径(GYRATE\_MN);形状指数:平均形状指数(SHAPE\_MN)、平均分维数(FRAC\_MN)、平均周长面积比(PARA\_MN)、平均邻近指数(CONTIG\_MN)、周长-面积分形维数(PAFRAC);核心面积指数:总核心面积(TCA)、独立核心斑块密度(DCAD)、平均核心面积(CORE\_MN)、平均独立核心面积(DCORE\_MN)、平均核心斑块面积指标(CAI\_MN);隔离/亲近指数:平均邻近度指数(PROX\_MN)、平均几何最邻近距离(ENN\_MN);蔓延度/散布指数:蔓延度(CONTAG)、散布与并列指数(IJI)、分离度(DIVISION)、有效网格面积(MESH);邻接度指数:连接度(CONNECT)、凝结度(COHESION)、分隔度(SPLIT);多样性指数:斑块多度密度(PRD)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)。各

指数采用 FRAGSTATS 3.3 软件进行计算,公式及说明参照文献[7]。

## 2.4 统计分析

主成分分析(PCA)将多个相关变量通过线性变换以选出较少个数重要不相关的变量的一种多元统计分析方法<sup>[28-30]</sup>,又称主分量分析,可以使大多数原始变量对变异的解释能力通过少量的主分量反映。本文运用主成分分析法来确定最后入选的指数,为了辨识关键的景观水平格局指数,在2个等级水平上分别进行PCA分析,为了增加结果的解释能力,应用方差最大方法对前6个主分量进行正交旋转。用主成分载荷系数解释PCA最终结果。在前几个主成分中具有最高载荷的景观指数被认为是响应等级水平上最重要的景观水平指数。

聚类分析是以个体相似性为基础,将物理或抽象对象的集合分组成为由类似的对象组成的多个类的分析过程。目前,已有一些研究通过对景观水平景观指数聚类分析,从而实现景观单元划分<sup>[31]</sup>。本

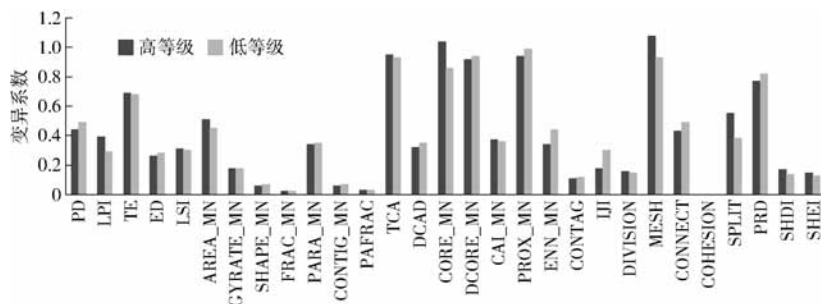


图5 景观水平不同等级类型景观指数变异系数

Fig.5 Variation coefficient of landscape indices in different classes of landscape level

## 3.2 森林景观格局等级特征差异及解释性分析

对47个小流域单元各入选景观指数进行PCA分析,辨析不同等级水平上控制林区景观空间格局的关键指标(表1)。在高等级水平上,6个主分量累积解释总分异的85.52%以上,发现斑块密度、平均斑块面积、有效网格面积、平均核心面积、景观形状指数、总边缘长度、周长-面积分形维数、平均分维数、平均核心面积指数等是决定和影响森林景观结构与功能的主要指标;在低等级水平上,平均斑块面积、平均核心面积、斑块总边缘长度、景观形状指数、连接度、斑块多度密度、平均核心面积指数、平均形状指数、平均分维数等指数是森林景观的主要解释性指标,6个主分量累积解释量达到84.69%。

对前4个主分量高载荷解释能力进行分析发现,在2个等级水平上,森林景观格局具备一些共同的特征,即森林景观破碎化严重,斑块面积空间变异较高。随着等级水平的提高,森林景观空间异质性程度加强,景观水平上斑块形状、空间邻接关系变得

文以不同等级水平关键景观指数对47个景观单元(小流域)运用K-means聚类分析法进行归类。

## 3 结果与分析

### 3.1 森林景观格局特征空间变异分析

在两个等级上,对47个流域单元景观指数进行统计分析发现(图5),总边缘总长度(TE)、总核心面积、平均核心面积、平均独立核心面积、平均邻近度指数、有效网格面积、斑块多度密度空间变异程度最大,而平均面积分维数、平均邻近指数和平均形状指数、聚合度指数变异程度较小,这表明以流域为自然地形分异单元来看,在不同分类等级上,林区森林景观斑块大小、破碎化程度在空间上差异较大,而景观斑块性状复杂性、空间邻接程度在各流域各等级水平表现均衡。景观等级水平的提高对核心斑块面积、破碎化、丰富度、空间邻接程度等影响较为明显,因此在较高等级水平上应重视景观破碎化、丰富度、邻接度等指标。

较为复杂,特别是核心斑块数量、面积及其空间聚合特征开始显现。尽管核心斑块面积和数量呈一定优势,但破碎的林地斑块空间散布与聚集程度较高,景观空间连接度有待加强。此外,等级水平的改变对森林景观斑块大小、边缘、形状、空间布局等特征具有明显的影响。

### 3.3 不同等级水平森林景观格局相似性分析

运用一致性系数比较PCA结果,表明在两个等级PC1间、PC3间均具有较好的一致性,一致性系数分别达到了0.93和0.81,说明在这两个等级上,森林景观格局具备一些共同特征,就是森林景观破碎化严重,斑块大小空间变异较高,尽管核心斑块面积和数量呈一定优势,但破碎的林地斑块空间散布、聚集程度较高,景观连接度有待加强。同样在两个等级PC2和PC4,也呈现出较高的相关性,一致性系数分别为0.75和0.73。这说明等级水平的改变对森林景观斑块大小、边缘、形状、空间布局等特征具有明显的影响。

表 1 霍城林区不同等级水平森林景观特征指数主成分分析主分量载荷

Tab.1 Principal component analysis of forest landscape characteristic index at different levels in Huocheng forest area

景观指数	高等级				低等级			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
PD	-0.80	-0.41	-0.18	-0.12	-0.79	-0.36	-0.25	-0.19
LPI	0.76	-0.46	-0.31	-0.15	0.71	-0.33	-0.40	-0.04
TE	0.20	0.83	-0.16	-0.35	0.25	0.83	0.07	-0.40
ED	-0.78	0.13	-0.51	-0.09	-0.82	0.35	-0.34	-0.05
LSI	-0.04	0.84	-0.30	-0.33	-0.04	0.9	-0.01	-0.33
AREA_MN	0.92	0.16	0.20	0.14	0.93	0.13	0.22	0.12
GYRATE_MN	0.57	0.54	0.30	0.35	0.59	0.43	0.37	0.39
SHAPE_MN	0.13	0.53	-0.42	0.63	0.04	0.66	-0.25	0.61
FRAC_MN	0.15	0.15	-0.41	0.70	0.10	0.32	-0.37	0.61
PARA_MN	0	-0.47	0.63	-0.08	-0.11	-0.55	0.53	-0.12
CONTIG_MN	-0.01	0.50	-0.62	0.06	0.10	0.57	-0.52	0.10
PAFRAC	-0.16	0.32	-0.69	0.27	-0.19	0.53	-0.52	0.36
TCA	0.80	0.42	0.19	-0.12	0.82	0.32	0.22	-0.24
DCAD	-0.71	0	-0.15	-0.36	-0.72	0.18	-0.17	-0.26
CORE_MN	0.89	0.01	0.23	0.15	0.92	-0.05	0.22	0.10
DCORE_MN	0.82	-0.11	0.29	0.20	0.77	-0.23	0.28	0.17
CAI_MN	0.40	0.29	0.73	0.09	0.44	-0.03	0.66	0.08
PROX_MN	0.58	0.18	0.02	-0.34	0.61	0.26	-0.05	-0.21
ENN_MN	0.15	0.10	0.02	-0.07	0.45	-0.10	0.19	0.21
CONTAG	0.73	-0.35	-0.47	-0.01	0.79	-0.28	-0.37	-0.13
IJI	-0.29	0.35	0.67	0.03	-0.32	0.14	0.55	0.14
CONNECT	-0.23	-0.66	0.22	0.40	-0.23	-0.63	0.17	0.40
COHESION	0.84	0.13	-0.19	-0.26	0.83	0.27	-0.03	-0.16
DIVISION	-0.79	0.52	0.25	0.03	-0.73	0.45	0.40	-0.04
MESH	0.91	0.09	-0.09	-0.14	0.88	0.20	-0.06	-0.20
SPLIT	-0.51	0.65	0.23	0.12	-0.58	0.52	0.41	-0.12
PRD	-0.58	-0.65	-0.07	0.19	-0.56	-0.68	-0.23	0.02
SHDI	-0.64	0.59	0.28	0.15	-0.65	0.33	0.51	0.16
SHEI	-0.68	0.36	0.53	0.03	-0.73	0.27	0.46	0.15
总变异	10.50	5.56	4.20	2.05	10.9	5.50	3.55	1.97
变异程度/%	36.22	19.18	14.49	7.06	37.59	18.96	12.23	6.78
累积变异/%	36.22	55.40	69.89	76.95	37.59	56.55	68.78	75.56

3.4 不同等级水平重要景观指数、指数组比较

对不同等级重要景观指数和指数组进行比较发现,总边缘长度、景观形状指数、平均斑块面积、平均形状指数、平均分维数和平均核心面积是两个等级上共同的指数(表 2)。在高等级上,周长-面积分维数、有效网格面积、斑块密度、平均几何最邻近距离等指数也是影响和控制森林景观格局的关键指数。在低等级上,总核心斑块面积、边缘密度、凝结度、香农均匀度等指数对决定森林景观格局特征具有重要解释度。从景观指数分组看,面积/密度/边缘指数组、形状指数组、核心面积指数组在两个等级上表现较为一致。此外,在低等级上,景观邻接度和多样性指数组在流域单元上表现活跃,随着景观等级的提高,隔离/亲近指数和蔓延度/散布指数组的表现更为突出。景观斑块大小、数量及形状的变化对景观等级的改变响应明显,因此可通过对这些景观指标或因素进行调控,优化林区景观斑块的空间邻接关

表 2 不同等级水平主要景观指数和指数组比较

Tab.2 Comparison of main landscape index and index groups at different levels

项目	高等级	低等级	
		TE	TE
	LSI	LSI	
在两个等级上均为关键景观指数	AREA_MN	AREA_MN	
	SHAPE_MN	SHAPE_MN	
	FRAC_MN	FRAC_MN	
	CAI_MN	CAI_MN	
	CORE_MN	CORE_MN	
在单一等级上为关键景观指数	PAFRAC	TCA	
	MESH	SHEI	
	PD	ED	
	ENN_MN	COHESION	
面积/密度/边缘指数	+++ +	+++ +	
形状指数	+++	++	
核心面积指数	++	+++	
景观指数组	隔离/亲近指数	+	
	蔓延度/散布指数	+	
	邻接度指数		+
	多样性指数		+

注：“+”表示景观指数。

系和相互作用。

## 4 结论

(1)随着分类等级细化,散布与并列指数、欧几里得最近距离指数、景观连接度、斑块密度、拼块多度密度指数、平均斑块邻近指数等指数的变异程度增幅明显,表明景观等级水平的增高对核心斑块大小、破碎化、丰富度、空间邻接程度等影响较大。

(2)在高等级上,斑块密度、平均斑块面积、有效网格面积、平均核心面积、景观形状指数、总边缘长度、周长-面积分形维数、平均形状指数、平均分维数、平均核心斑块面积指数等是决定和影响森林景观结构与功能的主要指标。在低等级上,平均斑块

面积、平均核心面积、总边缘长度、景观形状指数、连接度、斑块多度密度、平均核心斑块面积指数、平均形状指数、平均分维数等景观指数是解释景观格局特征空间变异的主要指标。

(3)在2个等级上,总边缘长度、景观形状指数、平均斑块面积、平均形状指数、平均分维数、平均核心面积指数等是两个等级水平上影响和控制林区森林景观格局特征的共同指数。霍城林区内大部分流域森林景观破碎化程度较高,斑块面积空间变异较高,斑块间空间连接程度较低。尽管核心斑块面积和数量呈一定优势,但破碎的林地斑块空间散布与聚集程度较高,景观空间连接度有待加强。此外,等级水平的改变对森林景观斑块大小、边缘、形状、空间布局等特征具有明显的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 岳德鹏,于强,张启斌,等. 区域生态安全格局优化研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):1-10. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170201&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170201&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.001.  
YUE Depeng, YU Qiang, ZHANG Qibin, et al. Progress in research on regional ecological security pattern optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):1-10. (in Chinese)
- [2] PICKETT S T A, CADENASSO M L. Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems[J]. Science, 1995, 269(5222):331-334.
- [3] GOND V, FREYCON V, MOLINO J F, et al. Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield[J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2011, 13(3):357-367.
- [4] 魏书精,罗碧珍,孙龙,等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境学报,2013,22(4):689-704.  
WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al. Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4):689-704. (in Chinese)
- [5] 田平,程小琴,韩海荣,等. 环境因子对山西太岳山典型森林类型物种多样性及其功能多样性的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(5):992-1003.  
TIAN Ping, CHENG Xiaoqin, HAN Hairong, et al. Effect of environment factors on species diversity and functional diversity of the typical forests of Taiyue Mountain Shanxi, China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(5):992-1003. (in Chinese)
- [6] 肖笃宁. 景观生态学[M]. 2版. 北京:科学出版社,2010.
- [7] 傅伯杰,吕一河,陈利顶,等. 国际景观生态学研究新进展[J]. 生态学报,2008,28(2):798-804.  
FU Bojie, LÜ Yihe, CHEN Liding, et al. The latest progress of landscape ecology in the world[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):798-804. (in Chinese)
- [8] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2007.
- [9] TRAMMELL E J, CARTER S K, HABY T, et al. Evidence and opportunities for integrating landscape ecology into natural resource planning across multiple-use landscapes[J]. Current Landscape Ecology Reports, 2018, 3(1):1-11.
- [10] BAILEY D, HERZOG F, AUGENSTEIN I, et al. Thematic resolution matters: indicators of landscape pattern for European agro-ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(3):692-709.
- [11] 李伟斌,袁凤辉,王鸿儒,等. 森林生态系统土壤呼吸空间异质性研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, 27(2):11-16.  
LI Weibin, YUAN Fenghui, WANG Hongru, et al. Research progress on spatial heterogeneity of soil respiration in forest ecosystem[J]. World Forestry Research, 2014, 27(2):11-16.
- [12] 袁士云,张宋智,刘文楨,等. 小陇山辽东栎次生林的结构特征和物种多样性[J]. 林业科学, 2010, 46(5):27-34.  
YUAN Shiyun, ZHANG Songzhi, LIU Wenzhen, et al. Tree species diversity and structure characteristic of secondary forests of *Quercus liaotungensis* on Xiaolongshan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5):27-34. (in Chinese)
- [13] 洪仁辉,薛杨,王小燕,等. 文昌8个森林群落结构与物种多样性研究[J]. 热带农业科学, 2015, 35(10):2137-2141.  
HONG Renhui, XUE Yang, WANG Xiaoyan, et al. Forest community structure and species diversity of eight forest types in

- Wenchang City[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2015, 35(10): 2137 - 2141. (in Chinese)
- [14] 曹菁, 杨同辉, 章建红, 等. 浙江天童冬青属植物的种群结构及更新类型[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(1): 76 - 83.  
CAO Jing, YANG Tonghui, ZHANG Jianhong, et al. Population structure and regeneration types of *Ilex* spp. in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2015, 32(1): 76 - 83. (in Chinese)
- [15] 张育新, 马克明, 祁建, 等. 北京东灵山辽东栎林植物物种多样性的多尺度分析[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2179 - 2185.  
ZHANG Yuxin, MA Keming, QI Jian, et al. Multi-scale analysis of plant species diversity of Oak (*Quercus liaotungensis*) forest at Dongling Mountain, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2179 - 2185. (in Chinese)
- [16] 张启斌, 岳德鹏, 于强, 等. 磴口县景观格局 AES - LPI - CA 模型演化模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 128 - 134. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170515&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170515&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.015.  
ZHANG Qibin, YUE Depeng, YU Qiang, et al. Simulation of landscape pattern evolution in Dengkou County using AES - LPI - CA model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 128 - 134. (in Chinese)
- [17] 梁艳艳, 周年兴, 谢慧玮, 等. 庐山森林景观格局变化的长期动态模拟[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7807 - 7818.  
LIANG Yanyan, ZHOU Nianxing, XIE Huiwei, et al. Long-term dynamic simulation on forest landscape pattern changes in Mount Lushan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7807 - 7818. (in Chinese)
- [18] 赵春燕, 李际平, 马文俊, 等. 顾及耦合作用的森林景观多尺度分类[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 183 - 188.  
ZHAO Chunyan, LI Jiping, MA Wenjun, et al. Multi-scale forest landscape classification considering coupling effect[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(11): 183 - 188. (in Chinese)
- [19] WU J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations[J]. Landscape Ecology, 2004, 19(2): 125 - 138.
- [20] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地地区景观格局变化及优化研究——以河北省怀来县为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 556 - 569.  
CHEN Ying, HA Kai, HE Wenlong, et al. Study on the change and optimization of landscape pattern in the basin of northwest Hebei Mountains—a case study of Huailai County, Hebei Province[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(4): 556 - 569. (in Chinese)
- [21] 徐燕, 孙小银, 张大智, 等. 1980—2015 年南四湖流域景观格局及其脆弱性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 635 - 642.  
XU Yan, SUN Xiaoyin, ZHANG Dazhi, et al. Landscape pattern and its vulnerability of Nansihu Lake basin during 1980—2015[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 635 - 642. (in Chinese)
- [22] 张启斌, 岳德鹏, 方敏哲, 等. 基于 SFLA - M - L 模型的景观格局优化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 159 - 166. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170720&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170720&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.020.  
ZHANG Qibin, YUE Depeng, FANG Minzhe, et al. Landscape pattern optimization based on SFLA - M - L model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 159 - 166. (in Chinese)
- [23] 马玥, 姜琦刚, 孟治国, 等. 基于随机森林算法的农耕区土地利用分类研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 297 - 303. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160140&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160140&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.040.  
MA Yue, JIANG Qigang, MENG Zhiguo, et al. Classification of land use in farming area based on random forest algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 297 - 303. (in Chinese)
- [24] 卢立华, 冯益明, 农友, 等. 基于林班尺度的森林立地类型划分与质量评价[J]. 林业资源管理, 2018(2): 48 - 57.  
LU Lihua, FENG Yiming, NONG You, et al. Classification and quality evaluation of forest site types by using compartments as the research scale[J]. Forest Resources Management, 2018(2): 48 - 57. (in Chinese)
- [25] 彭志杰, 姚卫红, 董金秀, 等. 基于 GIS 的县域森林景观格局研究——以河北省大名县为例[J]. 河北林果研究, 2011, 26(2): 136 - 139.  
PENG Zhijie, YAO Weihong, DONG Jinxiu, et al. Study of forest landscape pattern of county based on GIS—a case of Daming County in Hebei Province[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2011, 26(2): 136 - 139. (in Chinese)
- [26] 闫王玉, 曹宇, 谭永忠. 基于景观安全格局的县域生态用地保护研究——以浙江省青田县为例[J]. 中国土地科学, 2016, 30(11): 78 - 85.  
YAN Yuyu, CAO Yu, TAN Yongzhong. Research on ecological land protection at county scale by landscape security patterns method; taking Qingtian County as an example[J]. Land Science of China, 2016, 30(11): 78 - 85. (in Chinese)
- [27] RIITERS K H, O'NEILL R V, HUNSAKER C T, et al. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics[J]. Landscape Ecology, 1995, 10: 23 - 39.

- [32] HYMAN C, PALIINO R L. Possible role of the reticuloendothelial system in protein transport [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 88(1): 232 - 239.
- [33] HUANG C, ZHANG D, SONG G. A novel mapping algorithm for three-dimensional network on chip based on quantum-behaved particleswarm optimization[J]. *Frontiers of Computer Science*, 2017, 11(4): 1 - 10.
- [34] 陈永明, 林萍, 何勇. 基于遗传算法的近红外光谱橄榄油产地鉴别方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 671 - 674.  
CHEN Yongming, LIN Ping, HE Yong. Study on discrimination of producing area of olive oil using near infrared spectra based on genetic algorithms[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 671 - 674. (in Chinese)
- [35] 章海亮, 罗微, 刘雪梅, 等. 应用遗传算法结合连续投影算法近红外光谱检测土壤有机质研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 584 - 587.  
ZHANG Hailiang, LUO Wei, LIU Xuemei, et al. Measurement of soil organic matter with near infrared spectroscopy combined with genetic algorithm and successive projection algorithm[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 584 - 587. (in Chinese)
- [36] 廖阔, 付建胜, 杨万麟. 改进的 Relief F 算法用于雷达距离像目标识别[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(9): 831 - 836.  
LIAO Kuo, FU Jiansheng, YANG Wanlin. Modified Relief F algorithm for radar HRRP target recognition[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(9): 831 - 836. (in Chinese)
- [37] 何涛, 胡洁, 夏鹏, 等. 基于 Relief F 算法与遗传算法的肌电信号特征选择[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(2): 204 - 208.  
HE Tao, HU Jie, XIA Peng, et al. Feature selection of emg signal based on Relief F algorithm and genetic algorithm[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(2): 204 - 208. (in Chinese)
- 

(上接第 201 页)

- [28] 王增丽, 冯浩, 余坤. 基于主成分分析的不同预处理麦秸改良土壤效果评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 150 - 155. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161020&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161020&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.020.  
WANG Zengli, FENG Hao, YU Kun. Effect evaluation of different pretreated wheat straw utilizations on soil improvement based on principal component analysis[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 150 - 155. (in Chinese)
- [29] 唐秀美, 刘玉, 刘新卫, 等. 基于格网尺度的区域生态系统服务价值估算与分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 149 - 153. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170419&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170419&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.019.  
TANG Xiumei, LIU Yu, LIU Xinwei, et al. Estimation and analysis of ecosystem service value based on grid scale[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 149 - 153. (in Chinese)
- [30] 崔文举, 舒清态, 刘满宾, 等. 西双版纳热带林森林景观稳定性研究[J]. *云南地理环境研究*, 2010, 22(2): 29 - 33.  
CUI Wenju, SHU Qingtai, LIU Manbin, et al. Study on stability of tropical forest landscape in Xishuangbanna[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2010, 22(2): 29 - 33. (in Chinese)
- [31] EETVEL V V, ANTROP M. A stepwise multi-scaled landscape typology and characterisation for trans-regional integration, applied on the federal state of Belgium[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2009, 91(3): 160 - 170.