

DOI: 10.20103/j.stxb.202307041436

冯青郁, 凡会会, 杨磊, 陈利顶, 黄勇, 李博永, 范茵琳, 杨能亮. 基于“斑块-廊道-基质”和“源-流-汇”范式景观格局分析的景观生态学工具箱原理与应用. 生态学报, 2024, 44(11): 4678-4686.

Feng Q Y, Fan H H, Yang L, Chen L D, Huang Y, Li B Y, Fan Y L, Yang N L. Theory and application of the Landscape Ecology Toolbox software for landscape pattern analysis based on the Patch-Corridor-Matrix and the Source-Flow-Sink paradigm. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4678-4686.

# 基于“斑块-廊道-基质”和“源-流-汇”范式景观格局分析的景观生态学工具箱原理与应用

冯青郁<sup>1</sup>, 凡会会<sup>1,2</sup>, 杨磊<sup>1</sup>, 陈利顶<sup>1,\*</sup>, 黄勇<sup>3</sup>, 李博永<sup>1,2</sup>, 范茵琳<sup>3</sup>, 杨能亮<sup>3</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

**摘要:** 景观格局的定量分析是评价其对生态过程影响的先决条件, 也是生态系统规划和管理的重要依据。当前的景观格局分析软件都仅提供基于“斑块-廊道-基质”景观分析范式的格局指数计算, 不包含基于“源-流-汇”的范式的指数计算。这不仅无法适应景观生态学理论的发展, 也无法满足大数据时代对计算场景和速率的需求。针对该问题, 在研发基于“源-流-汇”的范式的指数算法的基础上, 开发了景观生态学工具箱 (Landscape Ecology Toolbox, LET)。不仅同时提供基于两种分析范式下的景观格局指数计算, 也提供了图形用户界面和命令行两种运行方式。在对 LET 主要功能进行介绍的基础上, 将 LET 同现有景观分析软件在操作逻辑、景观指数计算范围、特色功能等方面进行了详细的对比, 最后对软件未来的发展方向进行了讨论。

**关键词:** 景观生态学工具箱; 景观格局指数; “源-流-汇”范式; “斑块-廊道-基质”范式

## Theory and application of the Landscape Ecology Toolbox software for landscape pattern analysis based on the Patch-Corridor-Matrix and the Source-Flow-Sink paradigm

FENG Qingyu<sup>1</sup>, FAN Huihui<sup>1,2</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>, CHEN Liding<sup>1,\*</sup>, HUANG Yong<sup>3</sup>, LI Boyong<sup>1,2</sup>, FAN Yinlin<sup>3</sup>, YANG Nengliang<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China

**Abstract:** Quantification of landscape pattern is the prerequisite for determining the impact of landscape pattern on ecological processes, and is also critical reference for ecological system planning and management. Existing softwares for conducting landscape pattern only provide calculation of landscape pattern indices based on the “Patch-Corridor-Matrix” paradigm. None of them provide calculation for indices based on the “Source-Pathway-Sink” paradigm, which are not catching up with the theoretical development in landscape ecology. In addition, their existing way of implementation and calculation capability cannot meet the requirement of speed and flexibility by the increased size of input data and application situation in the current big data era. Thus, this study developed the landscape ecology toolbox (LET), a new software

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (42077057); 西藏生态保护-修复关键技术与生态文明高地建设示范 (XZ202201ZD0005G03)

**收稿日期:** 2023-07-04; **网络出版日期:** 2024-03-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

capable of calculating indices for both paradigms and providing both graphical and command line user interfaces. The paper firstly described the main features of the LET software. Then, the detailed comparison was made on LET with existing software for calculating landscape pattern analysis in terms of their usage, indices provided by each software, and special functions. At last, future development of the LET was discussed.

**Key Words:** landscape ecology toolbox; landscape pattern indices; the “Source-Pathway-Sink” paradigm; the “Patch-Corridor-Matrix” paradigm

多个不同类型的生态系统镶嵌在地表构成了景观,而各个生态系统内部和系统之间的能量流动、物质循环、信息传递等生态过程相互作用达到平衡时所产生的景观镶嵌体的综合空间分布状态,被称为景观格局<sup>[1]</sup>。景观格局是景观镶嵌体中发生的各种生物和非生物过程在不同尺度上作用的结果,同时又因为资源和环境分布的异质性影响着生态过程的发生,也影响着生态系统的稳定性、生物多样性和生态环境质量<sup>[2]</sup>。因此,景观格局的定量分析成为了评价其对生态过程影响的先决条件,也是生态系统规划和管理的重要依据<sup>[3-5]</sup>。

当前对景观格局的定量分析是通过景观格局指数的计算来实现的<sup>[6-11]</sup>。而根据景观分析范式的不同,景观格局指数的计算方法和各指数所代表的含义也各不相同。当前,景观分析主要包括两种范式,第一种是传统的“斑块-廊道-基质”范式<sup>[12-13]</sup>。该范式中,斑块作为景观的基本组成单元,是指针对所关注的生态过程在空间上同周围环境条件相比较为均一且不连续的特定空间单元;廊道则是针对特定生态过程在空间上起到连接、迁徙、阻挡、过滤等作用的狭长条带状空间单元;景观空间上除斑块和廊道的空间则被认为是基质。依据该范式所构建的景观格局指数从斑块、类型(所有同一类型的斑块)、景观三个层次对景观格局从面积、边缘、形状、核心区域、对比、邻近度、多样性、聚散性等方面进行描述,这些景观格局指数也得到了广泛的应用<sup>[14-18]</sup>。然而,尽管这些指数中包含邻近度、多样性等功能性指数,但这些指数是从景观结构上出发,无法从生态学角度来解释格局同生态过程的关系<sup>[19-20]</sup>。为解决该问题,同景观过程联系更紧密的分析逐渐出现,并形成了基于“源-流-汇”的景观分析范式<sup>[19]</sup>。该研究范式基于生态过程进行景观格局的分析,并提出了一些新的景观格局指数,如景观空间负荷比指数(Location-Weighted Landscape Model, LWLI)<sup>[20]</sup>、流域景观养分截留功能指数<sup>[21]</sup>、流域景观汇流功能指数等。

景观格局指数的计算往往需要借助特定的工具来进行。对基于“斑块-廊道-基质”范式的景观格局指数计算,当前多种计算工具被开发出来,包括 Fragstats<sup>[22]</sup>、Landscapemetrics<sup>[23]</sup>、pyLandStats<sup>[24]</sup>等,也有不少研究采用 ArcGIS 来进行参数计算。对基于“源-流-汇”范式的景观格局指数,尚未有成熟的产品。现有的景观分析工具存在如下的三个问题。首先,软件的运行效率较低,无论是目前被广泛应用的 Fragstats 软件,还是 Landscapemetrics 软件包,计算速度都不高,尽管 Landscapemetrics 采用了 RCPP 工具包进行 R 语言和 C 语言的混合编程来提高软件运行效率。其次,软件在处理较大的空间数据时能力有限,常常无法完成计算。Fragstats 的 64 位版本近期被开发出来,可以处理超过包含 2.5 亿个单元的空间数据,其计算速度也得到了大幅度的提高。再次,这些软件主要用于计算基于“斑块-廊道-基质”范式的景观格局指数,尚未包含基于“源-流-汇”范式的景观格局指数计算。

由此可见,当前的景观生态学分析工具并没有跟上景观生态学理论的发展,也不能适应当前大数据时代对分析软件计算场景和速率的需求。因此,中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室结合景观生态学的科研和实际应用的需求,在研发基于“源-流-汇”范式格局指数算法的基础上,开发了景观生态学工具箱(Landscape Ecology Toolbox, LET),同时支持基于两种分析范式的景观格局指数计算。工具箱利用 c++语言进行内核计算开发,以命令行运行为基础,同时提供了用户友好的桌面版图形交互界面(之后简称“界面”),不仅极大地提高了计算的能力和速度,也极大地丰富了软件的运行场景,为相关领域的研究人员

提供了一个有效、便捷的景观格局分析工具。软件的可执行文件及其使用说明书可在 <http://dse.rcees.cas.cn/kyzy/stmx/> 进行下载。本文将首先介绍 LET 的主要功能和体系结构,然后将 LET 同现有软件在覆盖的景观指数计算和特色功能上进行分析,最后对软件后续的发展和应用方向进行了探讨。

## 1 LET 概述

景观生态工具箱主要由界面和计算单独景观格局指数的命令构成。图 1 显示了主界面的布局。界面共设置了四个功能标签,分别对应项目控制 (Projects)、基于“源-流-汇”范式的景观指数计算 (Source-Pathway-Sink Indices)、基于“斑块-廊道-基质”范式 (Patch-Corridor-Boundary) 的景观指数计算和界面简介 (About) 四个部分。

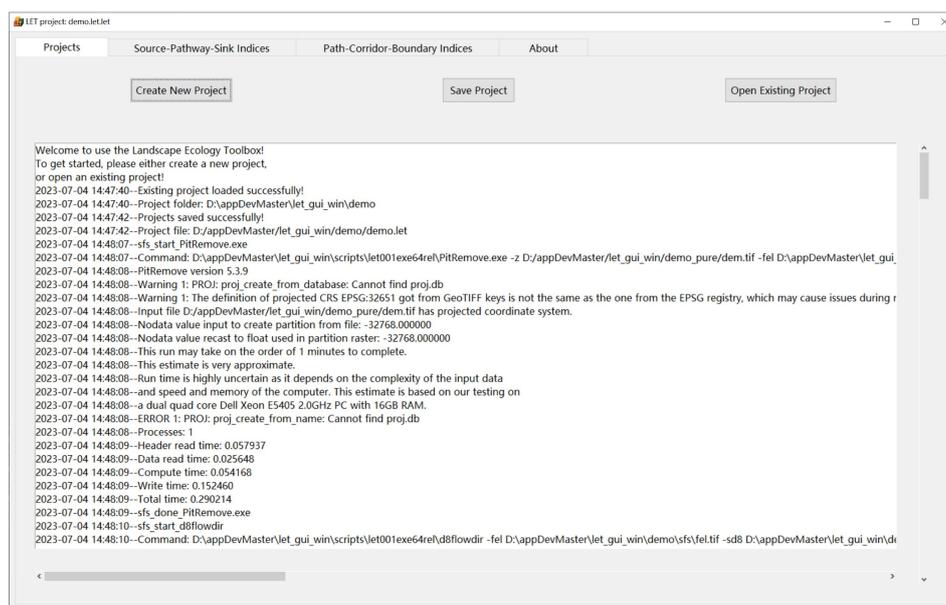


图 1 景观生态工具箱 (LET) 桌面版图形界面项目控制功能展示

Fig.1 Screenshot for the “Projects” tab of the landscape ecology toolbox desktop graphical user interface

### 1.1 项目控制标签

在该软件中,一个项目是指从界面运行开始,到数据选择和计算目标参数的整个过程。该功能标签提供了四个功能。(1) 创建新项目 (Create New Project): 为项目运行创建对应的文件夹,并开始记录界面运行的状态。(2) 保存项目 (Save Project): 保存项目运行状态,并创建项目运行所需要的文件夹结构,并创建以文件夹名称为名称的项目文件(以 .let 为后缀)。(3) 打开已有项目 (Open Existing Project): 用于打开之前构建的项目。(4) 展示项目运行状态: 下方的文本框将实时显示用户每一个操作的运行输出,包括计算过程和运行命令行输出,并保证参数计算过程中界面不冻结,使用户可以实时监测计算进度。

### 1.2 基于“源-流-汇”范式的景观指数标签

该标签提供 LWLI 的计算。该指数主要用于估计小流域内的养分流失风险。计算该指数所需的指标包括高程、坡度和每个栅格距离流域出口的距离。计算过程中,首先将空间中的景观分为源景观和汇景观两类,并用权重表征每种景观类型对养分流失的贡献或者影响;其次绘制每种景观类型下各个指标的洛伦兹曲线,通过将某一景观类型下所有栅格像元的高程、坡度或到流域出口的距离三个指标从小到大进行排列,以每个指标的具体值为横坐标,以各个数值的栅格面积占该景观类型面积的累计百分比为纵坐标,绘制洛伦兹曲线;再次计算各景观类型下各个指标的洛伦兹曲线下的面积、对应的权重和对应景观占流域总面积的百分比三者的乘积,最后通过计算所有源景观的乘积之和占有所有景观类型的乘积之和的比例得到各个指标的 LWLI (公

式 1)。

$$LWLI_{\text{elevation, slope, distance}} = \frac{\sum_{i=1}^m \text{Source}_i \times W_i \times Pc_i}{\sum_{i=1}^m \text{Source}_i \times W_i \times Pc_i + \sum_{j=1}^m \text{Sink}_j \times W_j \times Pc_j} \quad (1)$$

式中,Source 和 Sink 分别代表源景观和汇景观的高程、坡度或者距流域出口距离所构成的洛伦兹曲线下的面积,  $i$  和  $j$  分别代表某一源或汇景观,  $W$  代表某一景观对养分流失的贡献或者影响,  $Pc$  代表某景观占流域总面积的百分比,  $LWLI_{\text{elev, slope, distance}}$  代表各个指标单独的景观空间负荷比指数。最后,通过公式 2 计算景观空间负荷比指数。

$$LWLI = \frac{LWLI_{\text{distance}} \times LWLI_{\text{elevation}}}{LWLI_{\text{slope}}} \quad (2)$$

如图 2 所示,该指数的计算过程包括流域划分 (Watershed Delineation) 和指数计算 (SFS Based Landscape Index Calculation) 两个部分构成。流域划分部分是以 DEM 为输入数据,通过调用 TauDEM 的流域划分命令进行,设置了 7 个小步骤,包括选取 DEM 数据、填洼和流向计算、汇流面积计算、定义汇流阈值、绘制汇流路径、选取流域出口、绘制流域等 7 个小步骤。界面为 DEM 选取、绘制河道和流域都提供了显示功能,用以查看生成的效果。指数计算部分以生成的流域为边界,通过四个小步骤进行,包括计算各个栅格到流域出口的距离、计算洛伦兹曲线、选择源汇景观分类和权重定义文件、计算景观空间负荷比指数。界面为洛伦兹曲线提供了显示选项。左下角的进度条将显示每一步的运行进度。此外,对于流域绘制和洛伦兹曲线计算都提供了并行选项,用户可以定义计算式使用的 CPU 数量来加快运算速度。

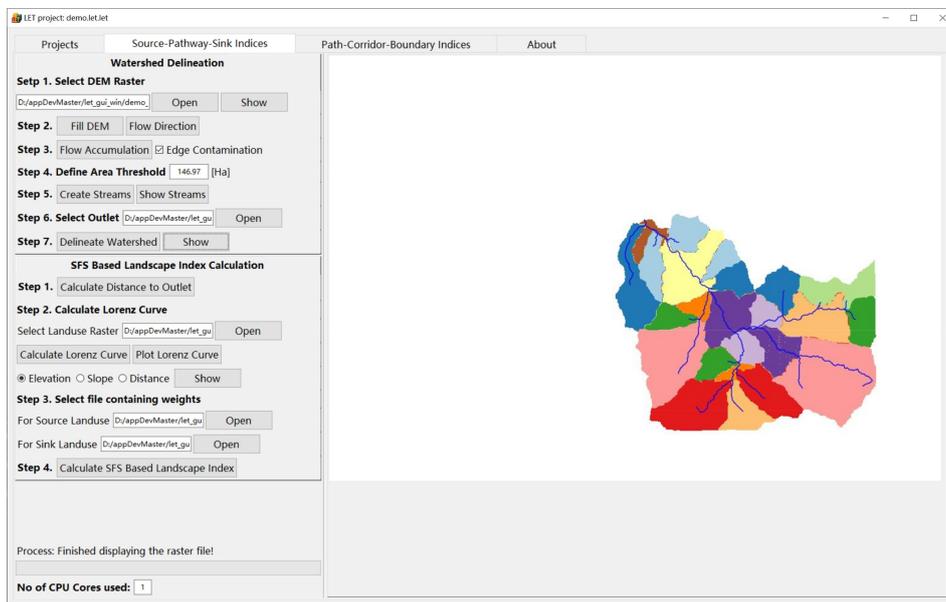


图 2 景观生态工具箱 (LET) 种基于“源-流-汇”范式的景观指数计算标签截图

Fig.2 Screenshot for the “Source-Pathway-Sink” tab of the landscape ecology toolbox desktop graphical user interface

### 1.3 基于“斑块-廊道-基质”范式的景观指数标签

如图 3 所示,该标签提供了面积和边界 (Area-Edge)、核心面积 (Core Area)、熵 (Entropy)、形状 (Shape)、多样性 (Diversity) 和聚集度 (Aggregation) 六个方面的指数计算。每个方面的指数计算参照 Fragstats 软件分为斑块 (Patch)、类型 (Class) 和景观 (Landscape) 三个层次。在界面中,指数后面带有包含“\_CL”、“\_C”、“\_L”和无标注四个类型的标注,其中“\_CL”表示对应斑块层次指数的平均值、极差、中位数、面积加权平均、变异系

数、标准差等 6 个统计值,“\_C”表示该指数为类型层次的指数,“\_L”表示该指数为景观层次的指数,无标注则表示为斑块层次的指数。该标签页的使用步骤包括选择并保存目标指数、选取景观图(Tiff 格式)、计算三个主要步骤。右上角的进度条显示了总的计算进度,同时计算过程将在项目控制标签的文本框中实时显示。同时为了方便使用,该标签页还提供了“选择”和“取消选择”所有指标两个按钮。

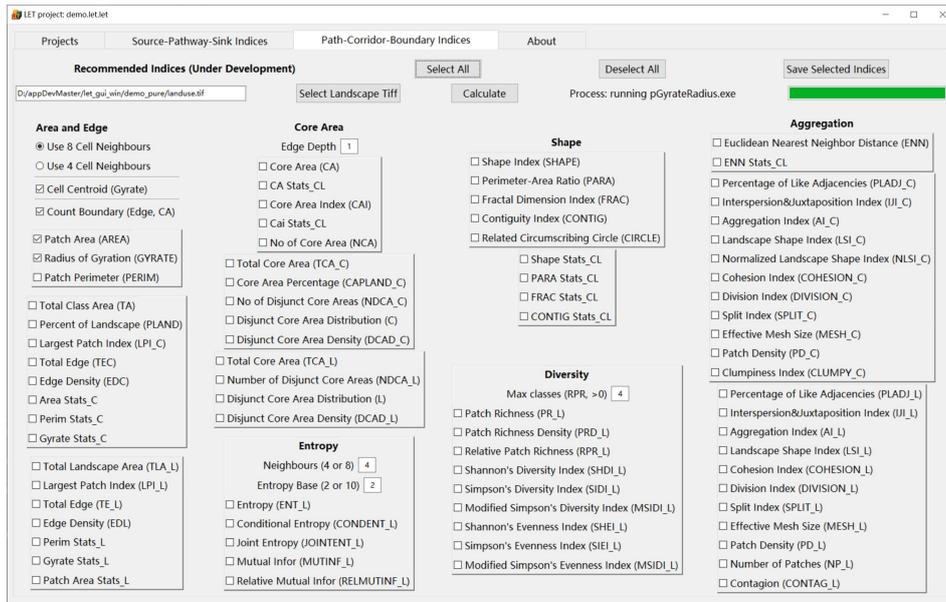


图 3 景观生态工具箱(LET)种基于“斑块-廊道-基质”范式的景观指数计算标签截图

Fig.3 Screenshot for the “Path-Corridor-Boundary” tab of the landscape ecology toolbox desktop graphical user interface

1.4 界面简介标签

该标签提供了对界面功能的综述、开发者、软件下载地址等基本信息。

1.5 景观格局指数计算指令

软件的用户界面是为了方便用户进行操作而开发的。在计算所选定的指数时,界面是通过后台调用对应的景观格局指数计算命令来完成计算的。这些命令是由 c++语言开发编译而成,因此也可以在命令行独立运行。图 4 展示了通过命令行计算斑块面积(Patch Area)的命令。软件所提供的其他指数的命令详见软件用户手册。在计算斑块命令是,所输入的基础命令为:

路径\pArea.exe-patchfile 路径\斑块栅格文件(.tif)-ofidx 路径\输出文件名称.csv

式中,pArea.exe 为主命令,用于计算斑块面积。该命令需要两个选项,一个是斑块栅格文件,通过“-patchfile”选项来设定;另一个是输出文件的位置,通过“-ofidx”选项来设定。

2 LET 同现有计算软件对比

当前常用的景观分析软件包括 Fratstats、LandscapeMetrics 和 pyLandStats 等。这些都只能计算基于“斑块-廊道-基质”范式的景观格局指数,因此本文将以此为对比领域,对上述三个软件同 LET 的功能进行对比,包括(1)操作逻辑、(2)所包含的景观指数、(3)功能特征等方面的特点进行概述。

操作逻辑上 Fragstats 和 LET 都提供了基于图形的用户界面。虽然两个软件都以项目形式管理用户计算

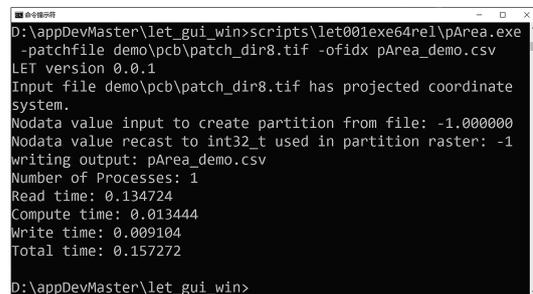


图 4 采用命令行计算斑块面积示意图

Fig.4 Screenshot showing the calculation of the patch area index using command line prompt

过程,但用途不同。Fragstats 的项目文件(.fca)存储了用户的文件存放位置、计算特定指数的选项等,而 LET 界面则主要设置了项目文件夹,所有的输入和输出都在相应的文件夹下保存。此外,两个软件都提供了命令行运行的模式。Fragstats 的命令行运行需要借助 R 语言,且需要先使用用户界面构建项目,再通过命令行的 R 语言命令调用该项目进行计算。LET 的命令行运行则直接输入 LET 相应的指数计算命令进行计算。LandscapeMetrics 和 pyLandStats 当前并未提供用户界面,主要在相应的编译环境下运行,比如 R 语言的 Rstudio 软件和 python 语言的 pyCharm 软件。利用这两个软件进行计算主要通过调用相应指数的命令来实现。

这四个软件都需要景观栅格图作为输入数据。目前 LET 仅支持 GeoTiff 格式的栅格数据。Fragstats 支持多种格式的栅格数据,包括 GeoTiff、Ascii 文件、以及 8 位、16 位和 32 位的二进制文件。LandscapeMetrics 的输入数据采用 R 的 Terra 工具包来读取栅格数据,该工具包支持多种格式的输入数据。pyLandStats 则采用 python 中的 Rasterio 来进行栅格数据的读取,也支持多种格式的景观分布图。

在所支持的景观指数方面,表 1 显示了四个软件所能够计算的景观格局指数之间的对比。在计算传统景观格局指数方面,Fragstats 可以计算的指数最全面,LET、LandscapeMetrics 未提供包括对比度、临近度、相似度、连接度等指标的计算,pyLandStats 也未提供面积-边缘、形状、对比、聚集度和多样性的部分指标和核心面积方面的所有指标。对于新兴的同信息熵有关的指标,Fragstats 未提供相关的计算,而在 LET、LandscapeMetrics 和 pyLandStats 中都有提供。除了单个指标的计算,各个软件还都提供了斑块尺度指标在类型和景观尺度的统计值。LET、Fragstats 和 pyLandStats 都提供了所能计算指标的平均值、面积加权平均、中位数、变化范围、标准差、变异系数等统计值,而 LandscapeMetrics 则提供了平均值、标准差和变异系数。

表 1 景观生态工具箱(LET)、Fragstats、LandscapeMetrics 和 pyLandStats 所包含的斑块、类型和景观水平的格局指数对比

Table 1 Comparison on available indices at the patch, class, and landscape level in LET, Fragstats, LandscapeMetrics, and pyLandStats

景观属性 Landscape properties	水平 Level	指数名称(中文) Indices name (Chinese)	指数名称(英文) Indices name (English)	景观生态学工具箱 Landscape ecology toolbox	Fragstats	LandscapeMetrics	PylandStats	
面积边缘 Area edge	斑块	面积	Area	•	•	•	•	
		周长	Perimeter	•	•	•	•	
		回转半径	Radius of gyration	•	•	•		
	类型/景观	总面积	Total area	•	•	•	•	
		类型占景观面积百分比	Percentage of landscape	•	•	•	•	
		最大斑块指数	Largest patch index	•	•	•	•	
		总边缘长度	Total edge	•	•	•	•	
	形状 Shape	斑块	边缘密度	Edge density	•	•	•	•
			周长面积比	Perimeter-area ratio	•	•	•	•
			形状指数	Shape index	•	•	•	•
类型/景观		分形维数指数	Fractal dimension index	•	•	•	•	
		相关外接圆	Related circumscribing circle	•	•	•		
		邻接指数	Contiguity index	•	•	•		
		周长面积分形维度	Perimeter-area fractal dimension	•	•	•		
核心面积 Core area	斑块	核心面积	Core area	•	•	•		
		核心数量	Number of core areas	•	•	•		
		核心面积指数	Core area index	•	•	•		
	类型/景观	总核心面积	Total core area	•	•	•		
		核心占景观面积百分比	Core area percentage of landscape	•	•	•		
		离散核心数量	Number of disjunct core areas	•	•	•		
		离散核心密度	Disjunct core area density	•	•	•		

续表

景观属性 Landscape properties	水平 Level	指数名称(中文) Indices name (Chinese)	指数名称(英文) Indices name (English)	景观生态学工具箱 Landscape ecology toolbox	Fragstats	LandscapeMetrics	PylandStats	
对比 Contrast	斑块	边缘对比度指数	Edge Contrast Index		•			
		对比度加权边缘密度	Contrast-weighted edge density		•			
	类型/景观	总边缘对比度指数	Total edge contrast index		•			
聚集度 Aggregation	斑块	欧式邻近距离	Euclidean nearest neighbor distance	•	•	•	•	
		邻近度	Proximity index		•			
		相似度	Similarity index		•			
	类型/景观	散布与并列指数	Interspersion & juxtaposition index	•	•	•		
		相似邻接比例度	Percentage of like adjacencies	•	•	•		
		聚集指数	Aggregation index	•	•	•		
		丛聚指数	Clumpiness index	•	•	•		
		景观形状指数	Landscape shape index	•	•	•	•	
		归一化形状指数	Normalized landscape shape index	•	•	•		
		斑块内聚力指数	Patch cohesion index	•	•	•		
		斑块数	Number of patches	•	•	•	•	
		斑块密度	Patch density	•	•	•	•	
		景观分离度	Division index	•	•	•		
		分散指数	Splitting index	•	•	•		
		有效网格大小	Effective mesh size	•	•	•	•	
景观连接性指数	Connectance index		•					
蔓延度指数	Contagion index	•	•	•	•			
多样性 Diversity	景观	斑块丰富度	Patch richness	•	•	•		
		景观丰富度密度	Patch richness density	•	•	•		
	相对斑块丰富度	Relative patch richness	•	•	•			
	香浓多样性指数	Shannon's diversity index	•	•	•	•		
	辛普森多样性指数	Simpson's diversity index	•	•	•			
	修正辛普森多样性指数	Modified simpson's diversity index	•	•	•			
	香浓均匀度指数	Shannon's evenness index	•	•	•			
	修正辛普森均匀度指数	Modified simpson's evenness index	•	•	•			
	熵 Entropy	景观	熵	Entropy	•		•	•
			条件熵	Conditional entropy	•		•	•
联合熵			Joint entropy	•		•	•	
互信息			Mutual information	•		•	•	
		相对互信息	Relative mutual information	•		•	•	

• 代表软件包里有计算该指数的能力;Fragstats 是由美国马萨诸塞州立大学的 Dr. Kevin McGarigal 等教授联合开发的用于景观分析与制图的空间分析软件,软件的官方网站为 <https://fragstats.org/index.php>;LandscapeMetrics 是由美国密歇根州立大学的 Dr. Maximilian H.K. Hesselbarth 基于 R 语言主导开发的用于景观分析的开源软件包,访问地址为 <https://r-spatialecology.github.io/landscapeMetrics/index.html>;pyLandStats 是由瑞士洛桑大学的 Dr. Martí Bosch 基于 python 语言主导开发的用于景观分析的开源软件包,软件包官方地址为 <https://pylandstats.readthedocs.io/en/latest/>;这三个软件的名字由于没有对应的英文全称,故不提供中文翻译

在功能特征方面,除了进行选定指标的计算之外,各个软件都有自己一些特点。LET 的特色功能是在计算过程中会生成斑块分布栅格图。在计算过程中,软件为每一个类型下的每一个斑块都分配了一个单独的标

识号码,用于将斑块计算的结果同栅格图上的斑块单元一一对应。在 Landscapemetrics 中也提供了制图功能,但存在制图速度慢和使用过程中需要输入的参数不明确等问题。Fragstats 和 pyLandStats 当前不提供斑块分布图的绘制功能。Fragstats 的功能特色功能是一键计算多个景观图的目标指数。其他三个软件的多个景观图计算需要通过命令行来实现。另外,Fragstats 和 Landscapemetrics 也都提供了通过滑动窗口来构建类型和景观水平格局指数窗口梯度图的功能。

### 3 LET 未来的发展方向与应用场景

通过上述同类软件的多方面的对比分析可以看出,LET 不仅包含了对常用景观格局指数的计算,还提供了便捷的界面和命令行运行方式,并具有较快的运行效率。除此之外,LET 还有两个最重要的特点。第一个是将斑块水平格局指数计算结果同地图上的斑块一一对应,并提供斑块空间分布图。第二个是包含基于“源-流-汇”范式的景观格局指数计算。然而,LET 也有一些仍然需要改进的方面。

继续增强景观格局相关的制图功能。LET 的景观制图当前是以斑块标识号码为主进行空间分布图绘制的,而 Landscapemetrics 则是将所计算的斑块水平的格局指数值进行空间分布图绘制。这两种绘制思路的差别在于,LET 是将输出指数同输入数据的空间位置进行一一对应,而 Landscapemetrics 是景观格局指数的空间分布,并不能够直观地体现特定斑块的变化对格局指数的直接影响。从景观生态学理论在实际应用中的需求来讲,景观空间格局的演变、规划、管理都是通过景观空间分布图来体现的,也就是作为输入数据直接决定了景观格局指数的计算。此外,斑块水平的格局指数计算也是类型和景观水平相关格局指数计算的基础。因此,将斑块进行唯一标识更加有助于景观空间格局的精细管理。在之后的开发中,LET 也将增加格局指数的空间分布图绘制,以便于景观规划、管理、演变相关工作的使用。

继续加强基于“源-流-汇”范式的景观格局指数的计算功能。在当前版本中,仅仅包含了景观空间负荷比指数的计算,用于描述土壤和养分流失风险的描述<sup>[25-27]</sup>。一方面,该指数在计算过程中需要用户依据经验来进行各个景观类型的权重设置,在后面的开发中,将加入对不同景观类型源汇强度识别的计算功能。另一方面,“源-流-汇”范式是为了解决“斑块-廊道-基质”范式中的“偏格局、轻过程”这一问题而发展出来的,其基本思想是针对特定过程在确定其对应的“源”和“汇”景观之后进行格局-过程的耦合分析。因此,在后续开发中将逐步加入对包括城市热岛、洪涝灾害、自然灾害、人口流动、抗生素迁移<sup>[28-37]</sup>等过程的特定指数计算与分析,通过技术的更新和理论的创新来促进“源-流-汇”范式的发展。

在计算效率上,尽管 LET 采用 c++作为基础语言进行计算,已经极大地提高了计算的速度与能力,但在计算“欧式邻近距离”等计算过程复杂的指数时,速度仍然很慢,还有很大的提升空间。在后面的开发中,将对算法进行进一步优化,以更好地适应大数据时代对软件响应速度的需求。

在应用方面,该软件设计的主要目的是通过对现有景观生态学计算方法的整合,一方面促进景观生态学理论在城市规划相关的大数据计算方面的应用<sup>[30]</sup>,比如城市智慧管理平台。另一方面则是通过技术革新,促进相关领域研究人员在研究和教学过程中进行使用,进而促进景观生态学理论的发展,比如对不同于子流域的计算目前主要是只能采用“源-流-汇”的范式指数计算<sup>[31]</sup>,在子流域尺度进行“斑块-廊道-基质”范式下的指数计算当前还没有流程化的工具。

#### 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬. 区域生态安全格局:概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [3] 胡巍巍,王根绪,邓伟. 景观格局与生态过程相互关系研究进展. 地理科学进展, 2008, 27(1): 18-24.
- [4] 郭建国. 景观生态学中的十大研究论题. 生态学报, 2004, 24(9): 2074-2076.
- [5] 陈利顶,李秀珍,傅伯杰,肖笃宁,赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [6] 陈文波,肖笃宁,李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121-125.

- [ 7 ] 肖笃宁, 赵羿, 孙中伟, 张国枢. 沈阳西郊景观格局变化的研究. 应用生态学报, 1990, 1(1): 75-84.
- [ 8 ] 王计平, 陈利顶, 汪亚峰. 黄土高原地区景观格局演变研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(5): 535-542.
- [ 9 ] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 问青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕. 景观格局指标对不同景观格局的反应. 生态学报, 2004, 24(1): 123-134.
- [ 10 ] 张金屯, 邱扬, 郑凤英. 景观格局的数量研究方法. 山地学报, 2000, 18(4): 346-352.
- [ 11 ] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容. 生态学报, 2002, 22(7): 1135-1142.
- [ 12 ] Hess G R, Fischer R A. Communicating clearly about conservation corridors. Landscape and Urban Planning, 2001, 55(3): 195-208.
- [ 13 ] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [ 14 ] 黄金良, 李青生, 洪华生, 林杰, 曲盟超. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析. 环境科学, 2011, 32(1): 64-72.
- [ 15 ] Xu L L, Yu H, Zhong L S. Evolution of the landscape pattern in the Xin'an River Basin and its response to tourism activities. The Science of the Total Environment, 2023, 880: 163472.
- [ 16 ] Abbas Z, Zhu Z Y, Zhao Y L. Spatiotemporal analysis of landscape pattern and structure in the Greater Bay Area, China. Earth Science Informatics, 2022, 15(3): 1977-1992.
- [ 17 ] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2077-2086.
- [ 18 ] 肖笃宁, 李秀珍. 景观生态学的学科前沿与发展战略. 生态学报, 2003, 23(8): 1615-1621.
- [ 19 ] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [ 20 ] 王甜, 卢付强, 李祖政. 基于遥感数据的常州市植被景观连通度研究. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 188-197.
- [ 21 ] Chen L D, Sun R H, Lu Y H. A conceptual model for a process-oriented landscape pattern analysis. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 2050-2057.
- [ 22 ] 赵新峰, 陈利顶, 杨丽蓉, 马岩, 张海萍, 施茜. 基于水流路径与景观单元相互作用的非点源污染模拟研究. 环境科学学报, 2010, 30(3): 621-630.
- [ 23 ] McGarigal K, Cushman S, Neel M, Ene E. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. (2002) [2024-01-31]. <https://www.fragstats.org>.
- [ 24 ] Hesselbarth M H K, Sciaini M, With K A, Wiegand K, Nowosad J. *landscapemetrics*: an open-source R tool to calculate landscape metrics. Ecography, 2019, 42(10): 1648-1657.
- [ 25 ] Bosch M. PyLandStats: an open-source Pythonic library to compute landscape metrics. PLoS One, 2019, 14(12): e0225734.
- [ 26 ] 王金亮, 谭少军, 李梦冰, 倪九派, 周丙娟. 基于流域面源污染过程的“源-汇”景观格局分析研究进展. 中国生态农业学报: 中英文, 2023, 31(10): 1657-1667.
- [ 27 ] 侯琨, 王秀茹, 王计平, 袁普金, 程复. 延河流域产沙过程对“源”“汇”景观格局的响应. 中国水土保持科学: 中英文, 2022, 20(1): 1-8.
- [ 28 ] 许芬, 周小成, 孟庆岩, 张颖. 基于“源-汇”景观的饮用水源地非点源污染风险遥感识别与评价. 生态学报, 2020, 40(8): 2609-2620.
- [ 29 ] 李玉杰, 马昊, 邓涛, 张源, 付晖. 基于“源-汇”理论的海口城市景观格局与热岛效应响应机制. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 223-232.
- [ 30 ] 邱俊楠, 苏涛, 雷波, 刘欣蓓, 孟成, 徐良泉, 王仁义. 基于“源-汇”景观格局的城市热岛效应及影响因素分析——以合肥市为例. 中国环境科学, 2023, 43(11): 6039-6050.
- [ 31 ] 高静, 龚健, 李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例. 地理科学进展, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [ 32 ] 李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊. 城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系. 环境科学, 2020, 41(5): 2264-2271.
- [ 33 ] 闫思嘉, 晁云舒, 潘辉, 赵佳文, 巫丽芸. 基于“源-汇”景观的永春县雨洪过程动态分析与风险评估. 水土保持研究, 2023, 30(4): 286-292.
- [ 34 ] 严秋怡, 张凯云. 基于“源-汇”模型理论的城市雨洪管理研究. 城市建筑, 2019, 16(12): 67-69.
- [ 35 ] 余志超, 陈明星, 赵春雨, 袁婷. 安徽省流动人口特征和源汇格局. 安庆师范大学学报: 社会科学版, 2021, 40(6): 93-101.
- [ 36 ] 张赫, 胡佳慧, 王睿, 叶青. 面向国土空间规划的县域规划建设低碳评价方法研究——以河北省武安市为例. 西部人居环境学刊, 2021, 36(6): 23-30.
- [ 37 ] 陈前虎, 吴昊. 国土空间开发“源汇”格局对河道水质的影响——以杭州市 11 个排水分区为例. 城市规划, 2020, 44(7): 28-37.