

DOI: 10.20103/j.stxb.202312272842

曹伊婷, 赵红蕊, 刘欣桐. 基于玻尔兹曼熵的延河流域景观格局复杂度计算及生态可持续性分析. 生态学报, 2025, 45(3): 1116-1125.

Cao Y T, Zhao H R, Liu X T. Calculation of landscape complexity and analysis of ecological sustainability in the Yanhe watershed based on Boltzmann entropy. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1116-1125.

基于玻尔兹曼熵的延河流域景观格局复杂度计算及生态可持续性分析

曹伊婷^{1,2}, 赵红蕊^{1,2,*}, 刘欣桐^{1,2}

1 清华大学土木工程系交通工程与地球空间信息研究所, 北京 100084

2 清华大学 3S 中心, 北京 100084

摘要: 将流域视作自组织、有生命力的系统, 构建了适用于土地利用数据的玻尔兹曼熵改进模型, 提出了流域景观格局复杂度定量表征方法。通过计算 1980—2020 年延河流域景观格局复杂度及其动态变化, 从“格局”和“动态”两个维度分析了延河流域的生态可持续性。结果显示: (1) 延河流域景观格局复杂度呈现显著的空间异质性, 不同地理位置和土地利用类型之间存在显著差异; 延安市辖区北部地区景观格局复杂度最高, 南部地区较高, 上游地区呈现交错分布的特点, 下游地区最低; 水库和坑塘平均景观格局复杂度最高, 有林地、高覆盖度草地和灌木林地平均景观格局复杂度最低; (2) 延河流域景观格局经历了显著的变化: 2000—2010 年, 75% 的景观单元格局复杂度增加; 2010—2020 年, 整体景观格局复杂度显著下降后趋于稳定, 流域景观格局有序性增强。研究提出的基于玻尔兹曼熵的景观格局复杂度计算及生态可持续性分析方法原则上也适用于其他流域或景观类型, 可为流域生态保护和管理提供新的视角和方法。

关键词: 生态可持续性; 玻尔兹曼熵; 景观格局复杂度; 土地利用; 延河流域

Calculation of landscape complexity and analysis of ecological sustainability in the Yanhe watershed based on Boltzmann entropy

CAO Yiting^{1,2}, ZHAO Hongrui^{1,2,*}, LIU Xintong^{1,2}

1 Institute of Transportation Engineering and Geomatics, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2 3S Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Watersheds, as fundamental units of terrestrial ecosystems, hold representative significance in ecological sustainability research. This study conceptualizes the watershed as a self-organizing and dynamic system, aiming to quantitatively analyze the complexity of landscape patterns and accurately assess its ecological sustainability. The study innovatively proposes an enhanced Boltzmann entropy model for land use data, comprehensively considering the components and spatial configuration characteristics of different land use types. This model has been applied to quantitatively assess landscape pattern complexity in the Yanhe watershed from 1980 to 2020, exploring ecological sustainability from the perspectives of “pattern” and “dynamics”. The results reveal several key findings: (1) The complexity of landscape patterns within the Yanhe watershed exhibits significant spatial heterogeneity. Specifically, the upper-middle reaches of the basin exhibit the highest landscape complexity, followed by the middle-lower reaches, whereas the upper reaches display an intertwined distribution of complexity, and the lower reaches exhibit the lowest complexity. Among different land use types, reservoirs and ponds have the highest average landscape complexity, while natural woodland, high-coverage grassland and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971379)

收稿日期: 2023-12-27; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhr@mails.tsinghua.edu.cn

shrublands have the lowest. (2) The landscape complexity of the Yanhe watershed has undergone significant changes over the past four decades. Between 2000 and 2010, 75% of landscape units experienced an increase in complexity, particularly as agricultural land was converted to forested and grassland areas. From 2010 to 2020, although land use did not change much, the overall landscape complexity showed a clear downward trend before stabilizing. The reduction in complexity suggests a trend toward greater landscape orderliness and enhanced ecological system stability within the watershed. The method for calculating landscape pattern complexity and analyzing ecological sustainability based on Boltzmann entropy is applicable to other watersheds or landscape types, providing a novel perspective and approach for ecological protection and management.

Key Words: ecological sustainability; Boltzmann entropy; landscape complexity; land use; Yanhe watershed

生态可持续发展是中国的重要目标^[1]。流域作为融合多种生态要素的综合生态系统^[2],其生态可持续性研究备受重视^[3-6]。生态系统的景观格局特征决定了生态系统服务功能^[7-10],深入分析流域景观格局的复杂性有助于准确评估生态可持续性^[11-13]。熵理论为景观格局复杂性的定量研究提供了科学有效的分析框架^[14-17],玻尔兹曼熵与信息熵是应用广泛的两种熵方法^[18-19],信息熵在反映景观的空间配置上具有局限性^[20-27],玻尔兹曼熵能够反映景观的组分构成与空间配置,并提供对生态系统复杂性的深入理解^[28-33]。但空间数据玻尔兹曼熵模型的研究仍处于初级阶段,尚缺乏广泛的实际应用案例^[21-22],现有模型处理大规模数据时,仍面临着显著的计算复杂性^[21],且不同分析尺度可能会导致结果的差异^[34-35]。本研究将延河流域视作自组织、有生命力的系统,通过构建适用于流域规模的土地利用数据的玻尔兹曼熵模型,对延河流域景观格局复杂性进行定量表征并分析其动态演化规律,旨在从“格局”和“动态”的角度分析延河流域的生态可持续性,为延河流域与其他类似流域的生态保护和可持续土地管理提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

延河位于黄土高原,是黄河的一级支流,总长 286.9 km,发源于靖边县,流经志丹、安塞、延安,于延长县汇入黄河。延河流域面积为 7725 km²,地形复杂,植被分布从上游的草原区到中游的森林-草原过渡区,再到下游的森林区,呈现显著的梯度分布特征。自 20 世纪 80 年代至今,该地区景观格局经历了从“耕地主导”到“相对平衡”再到“林草主导”的演变过程^[36]。自 1999 年以来,流域内实施了一系列生态工程,第一轮退耕还林(草)工程在 2008 年左右完成,显著提高了森林覆盖率^[37-38],缓解了水土流失和土壤侵蚀问题^[39]。但流域内植被恢复规模已接近水资源可持续承载力临界点^[40],植被恢复策略在一定程度上缺乏对自然规律的考虑^[41],过度的人工恢复可能导致流域生态可持续性下降^[42-43]。以延河流域为研究对象,分析其景观格局复杂性和生态可持续性对于探索黄土高原生态修复策略具有代表性意义。延河流域位置与高程分布如图 1 所示。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括:(1)土地利用数据:土地利用会对生态系统功能和生态可持续性有显著影响^[44]。本研究选用了中科院数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的八期土地利用数据(1980、1990、2000、2005、2010、2015、2018、2020 年),空间分辨率为 30 m,总体精度 88.95%。通过多源数据校正、配准、裁剪、异常值检测等处理,得到延河流域 1980—2020 年土地利用数据集。(2)其他相关数据:包括水系数据、统计年鉴数据,ASTER GDEM 30 m 分辨率 DEM 数据两套。

2 研究方法

2.1 玻尔兹曼熵概念模型

玻尔兹曼熵源自统计物理学^[45],核心概念涉及系统的宏观状态(Macrostates)和微观状态(Microstates)。

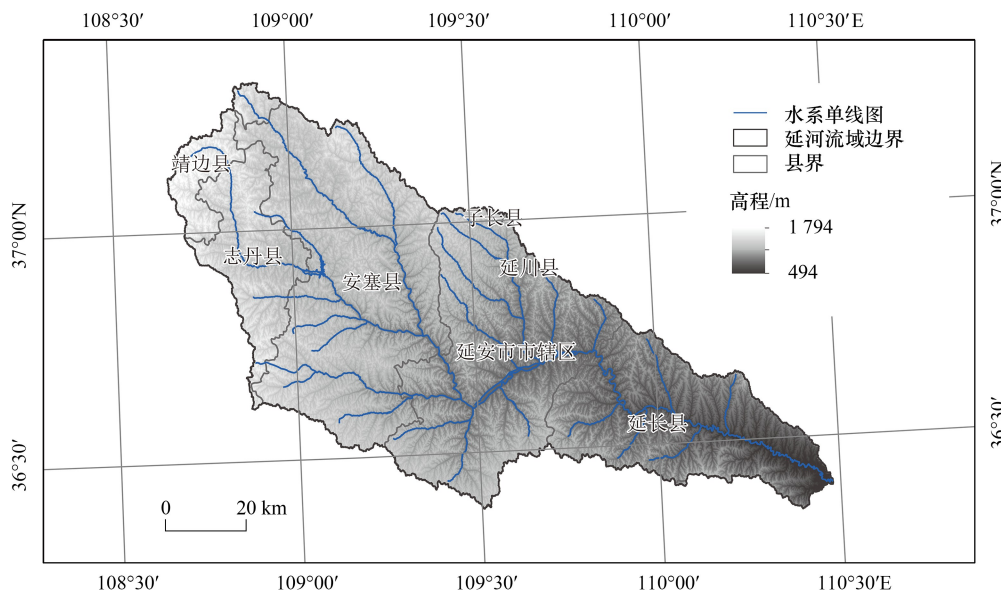


图1 延河流域位置图

Fig.1 Location of Yanhe watershed

玻尔兹曼基于等概率原理,通过计算热力学系统中可能的微观状态数量,提出量化系统宏观无序度的方法^[14]。系统的宏观状态由一组宏观状态参数所定义,而详细组分和空间配置通过微观状态来展现。玻尔兹曼熵计算公式见公式 1。

$$S = k_B \log W \quad (1)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常数($k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), W 为给定宏观状态下对应的微观态的数量。

2.2 基于景观单元的玻尔兹曼熵计算模型

生态系统的可持续性评估与其研究尺度紧密相关,本研究基于土地利用数据,提出改进的玻尔兹曼熵计算模型,将特定尺度区域的“景观单元(Landscape Unit)”作为量化景观格局空间复杂度的基本单位。每个景观单元中,参考定量型栅格数据玻尔兹曼熵模型的重采样技术^[16,22,46],使用 2×2 的观察窗口通过预设步长滑动以计算微观态分布,旨在保证计算效率的基础上,确保每种配置组合出现的概率接近等概率原理下的理想情况。宏观状态参数由观察窗口内土地利用类型的种类和数量确定,微观状态反映了具有相同宏观状态参数的所有景观配置。图2展示了 2×2 观察窗口下所有可能的宏观状态参数及其对应的微观状态。

通过计算所有观察窗口的微观状态数量的乘积并代入玻尔兹曼公式(公式1),得到该景观单元的玻尔兹曼熵 S_{LU} (公式2)。

$$S_{LU} = k \log \left(\prod_{i=1}^l W_i \right) \quad (2)$$

式中 W_i 表示第 i 个观察窗口下的微观状态数; l 表示景观单元内的观察窗口总数; k 为常数,取 $k = 1$ ^[21,26];对数底数取10。

根据热力学第二定律,孤立系统的熵呈现对数型增长趋势,直至平衡态^[47]。为验证改进模型的热力学一致性,采用Gao等人的数据集^[48]计算 S_{LU} 。该数据集通过10万个 128×128 像素的景观模拟了理想气体的混合过程,景观无序度随迭代次数的增加而递增。

2.3 延河流域景观格局复杂度计算

计算延河流域土地利用数据(M 行 $\times N$ 列像素)景观格局复杂度,步骤如图3所示。

(1)景观单元划分。设定景观单元参数 A , A 代表每个景观单元的行数与列数。将原始数据划分为 $m \times n$ 个 $A \times A$ 的景观单元(其中 $m = \lceil \frac{M}{A} \rceil$, $n = \lceil \frac{N}{A} \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整),对于不足以形成 $A \times A$ 景观单元的区域采用

2×2观察窗口的宏观状态	示例	微观状态数量	对应的的微观状态
一种土地利用类型, 数量为4	A A A A	1	A A A A
两种土地利用类型, 数量为1:3	B A A A	4	B A A B A A A A A A B A
两种土地利用类型, 数量为2:2	B A B A	6	B A A B A B A A B B B A B A A A
三种土地利用类型, 数量为2:2:1	A A B C	12	A A A B A B B A B C B A A A A C A C C A C B C A A A A C A C C A C B C A A B
四种土地利用类型, 数量为1:1:1:1	A B C D	24	A B A B A C A C A D A D C D D C B D D B B A A B C A C A D A D A B C C B B D B C C B C D D C D B D C A D A B A B A C B A D B D C C D C B B C D A D A
一种土地利用类型, 数量为3 包含1个“NODATA”	A N A A	1	A N A A
一种土地利用类型, 数量为2 包含2个“NODATA”	N N A A	1	N N A A
一种土地利用类型, 数量为1 包含3个“NODATA”	N N N A	1	N N N A
两种土地利用类型, 数量为1:1 包含2个“NODATA”	N N A B	2	N N N N A B B A
两种土地利用类型, 数量为2:1 包含1个“NODATA”	A N A B	3	A N A N B N A B B A A A
三种土地利用类型, 数量为1:1:1 包含1个“NODATA”	A N B C	6	A N A N B N B N C N C N A N A N B N B N C N C N A N A N B N B N C N C N

图2 观察窗口(2×2)所有可能的宏观态参数及其对应的微观态

Fig.2 All possible macrostates of the 2 * 2 observation window and corresponding microstates

A、B、C、D 表示不同的土地利用类型,N 表示土地利用数据中的无数据值像元(NODATA);对于存在 NODATA 的观察窗口,固定 NODATA 像元位置,根据其他像元类型和数量确定所有可能的微观态,避免引入额外信息,以保证后续精确计算

NODATA 填充处理,以标准化每个景观单元的大小。将至少有一个像素具有土地利用属性值的景观单元视作有效单元。

(2)重采样。依据 2.2 节的改进模型,对有效单元进行重采样处理,得到每个景观单元的玻尔兹曼熵值 S_{LU} 。

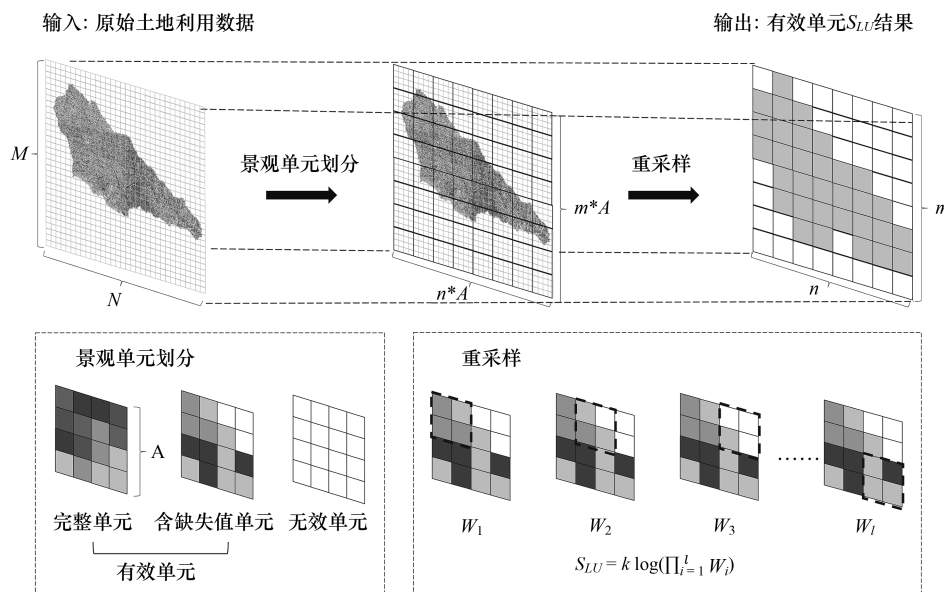


图3 基于改进玻尔兹曼熵模型的景观格局复杂度计算示意图

Fig.3 Schematic diagram of landscape pattern complexity calculation based on enhanced Boltzmann entropy model

本研究中,延河流域土地利用数据为 4067 行 $\times$ 5501 列像素。评估不同景观单元参数 A 对结果的影响,评估指标包括 S_{LU} 范围、均值、标准差以及变异系数,旨在确定能捕捉细节特征并维持计算效率的尺度。经过预实验对比,设定 $A=30$,划分得到 136×184 个 30×30 像素的景观单元,其中有效单元 9877 个。

2.4 延河流域整体复杂度指标

为衡量流域作为整体系统的复杂度,提出表示整体复杂度的指标 S_{Global} (见公式 3)。

$$S_{Global} = \sum_{i=1}^n S_{LU} \quad (3)$$

式中, S_{LU} 代表单个景观单元的玻尔兹曼熵值, n 表示有效景观单元总数。

S_{Global} 的趋势反映了延河流域整体景观格局复杂度随时间的变化情况,应用中需结合 S_{LU} 进行分析,以排除极个别异常变化带来的影响。

3 结果与分析

3.1 改进模型热力学一致性评估结果

应用改进模型得到 10 万个模拟景观的玻尔兹曼熵值(S_{LU}),结果呈现出符合预期的对数增长模式,如图 4 所示。表明 S_{LU} 能够准确反映景观无序度,与玻尔兹曼熵的原始定义在热力学框架内具备较高的一致性,因此可作为衡量景观格局复杂度的指标,其相对变化有助于理解景观动态演替规律。

3.2 延河流域景观格局复杂度结果及其动态分析

计算 1980 年至 2020 年延河流域 S_{LU} ,结果表明,延河流域景观格局复杂度呈现一致的空间异质性:延安市市辖区北部(延河流域中上游地区)玻尔兹曼熵值最高,延安市市辖区南部(中下游地区)玻尔兹曼熵值较高,安塞县西北端(上游地区)玻尔兹曼熵值呈现交错分布的特点,延长县东南端(延河流域下游地区)玻尔兹曼熵值最低。其中,2020 年延河流域景观格局复杂度计算结果如图 5 所示。

比较延河流域不同年份的景观格局复杂度,1980—2000 年间无显著变化,94.5%的景观单元复杂度变化幅度在 $\pm 5\%$ 以内。2000—2010 年间,75.0%的景观单元复杂度增加,17.5%的景观单元复杂度增幅在 10% 以上,增幅较大的景观单元集中在延安市市辖区东北部(延河流域中游)。2010—2020 年间,44.6%的景观单元

复杂度下降,8.8%的景观单元复杂度降幅在 10% 以上,延长县(延河流域下游)的景观单元复杂度下降最为显著。

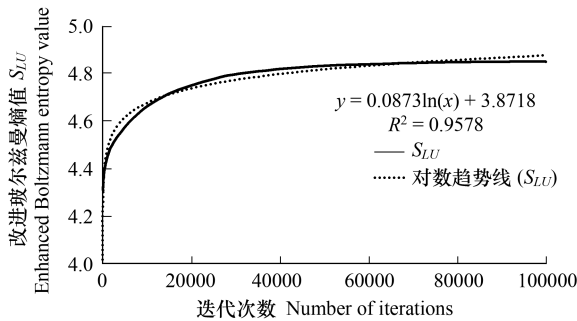


图 4 无序度递增的模拟数据的景观单元复杂性结果

Fig.4 Landscape Unit Complexity (S_{LU}) for the simulated data with increasing disorder degree

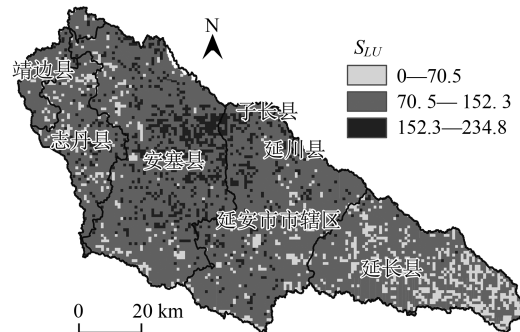


图 5 延河流域 2020 年景观格局复杂度计算结果(S_{LU})

Fig.5 Landscape Unit Complexity (S_{LU}) for the Yanhe watershed in 2020

3.3 延河流域整体复杂度指标变化趋势

图 6 展示了延河流域 1980—2020 年整体复杂度指标 S_{Global} 的变化趋势。结果表明,1980—2000 年,延河流域 S_{Global} 无显著变化,仅增加 0.19%;2000—2010 年, S_{Global} 显著增加了 2.79%,在 2010 年达到最高值;2010—2018 年, S_{Global} 连续降低;2018—2020 年 S_{Global} 有缓慢回升趋势,增加了 0.02%。

对比不同景观单元参数 A 与观察窗口大小下延河流域不同时期的 S_{Global} 演化规律,部分结果如图 7 所示。结果表明,2000 年与 2010 年是延河流域景观格局复杂度变化的关键转折点,且一定尺度范围内,不同的模型参数不会导致 S_{Global} 演化规律的根本性改变。

3.4 不同土地利用类型的景观格局复杂度结果

选取 2000 年、2010 年和 2020 年三个关键时点,旨在探讨退耕还林政策实施期(2000—2010 年)及生态措施保持期(2010—2020 年)延河流域土地利用与景观格局复杂度的关系,计算不同土地利用类型的景观格局复杂度加权平均值 $\bar{S}_i$ (见公式 4)及其组分占比 p_i 变化(见表 1)。

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{j=1}^m (S_{LUj} \times n_{ij})}{\sum_{j=1}^m n_{ij}} \quad (4)$$

式中, i 表示第 i 种土地利用类型, j 表示第 j 个有效景观单元, m 表示有效景观单元总数, S_{LUj} 表示第 j 个有效景观单元的景观格局复杂度 S_{LU} , n_{ij} 表示第 j 个有效景观单元中第 i 种土地利用类型的像元数量。

由表 1 可知,延河流域不同土地利用类型平均复杂度存在明显差异:高覆盖草地、有林地、灌木林地 $\bar{S}_i$ 最低,水库、坑塘、低覆盖度草地、滩地 $\bar{S}_i$ 最高。2000—2010 年,旱地面积显著减少,其 $\bar{S}_i$ 保持相对稳定;林地、草地面积显著增加,高覆盖度草地和其他林地的 $\bar{S}_i$ 增幅在 10% 以上,对整体景观格局复杂度的上升贡献最大。

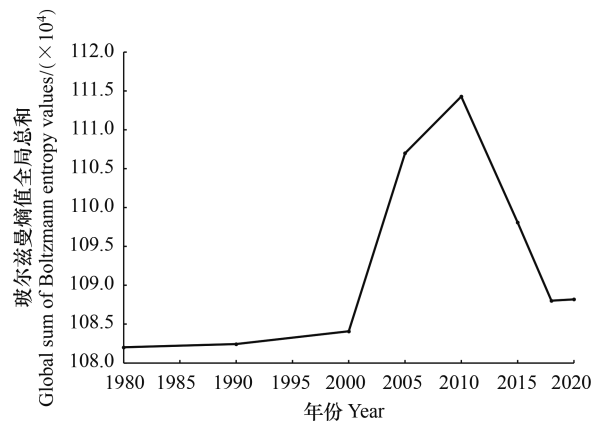


图 6 延河流域 1980—2020 年整体复杂度指标 (S_{Global}) 变化趋势

Fig.6 Trend of Complexity Index (S_{Global}) for the Yanhe watershed from 1980 to 2020

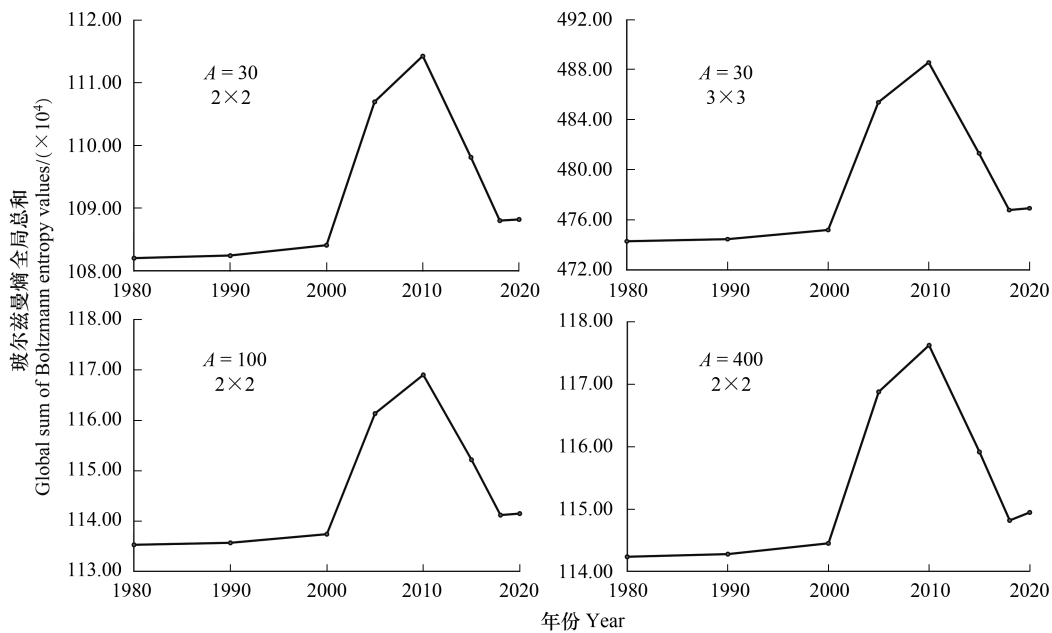


图 7 不同参数下延河流域整体复杂度指标 (S_{Global}) 变化趋势

Fig.7 Trend of Complexity Index (S_{Global}) for the Yanhe watershed under different parameters

2010—2020 年,大部分用地类型面积变化不显著,而 $\overline{S_i}$ 下降,其中林、草类型 $\overline{S_i}$ 下降较为显著,表明以林、草为主的景观单元无序度下降。

表 1 延河流域土地利用类型的景观格局复杂度加权平均值及其组分占比变化

Table 1 Weighted average Landscape Complexity by land use type in the Yanhe watershed

土地利用类型 I Land use type I	土地利用类型 II Land use type II	2000 年		2010 年		2020 年	
		p_i	$\overline{S_i}$	p_i	$\overline{S_i}$	p_i	$\overline{S_i}$
耕地 Arable land	旱地	43.05%	114.473	31.81%	118.752	31.31%	118.133
	林地 Woodland	0.54%	99.673	0.57%	102.473	0.57%	102.866
林地 Woodland	灌木林地	7.29%	97.734	7.99%	101.770	8.05%	100.638
	疏林地	3.00%	103.882	3.28%	107.165	3.29%	107.927
	其他林地	0.40%	110.456	2.94%	122.907	2.94%	122.449
	草地 Grassland	0.04%	91.035	1.64%	105.829	0.51%	97.233
草地 Grassland	高覆盖度草地	21.47%	102.873	27.08%	106.618	27.62%	99.384
	中覆盖度草地	23.49%	122.923	23.73%	127.002	24.23%	125.474
	低覆盖度草地	0.19%	112.409	0.19%	113.585	0.19%	109.734
水域 Water bodies	河渠	0.00%	109.774	0.02%	126.053	0.02%	117.631
	湖泊	0.07%	120.847	0.05%	132.382	0.07%	128.755
	水库、坑塘	0.06%	119.674	0.06%	121.681	0.05%	122.630
	滩地	0.08%	105.726	0.07%	98.873	0.12%	98.998
城乡、工矿、居民用地	城镇用地	0.25%	121.627	0.40%	117.845	0.39%	118.135
Urban construction and rural housing	农村居民点	0.03%	117.013	0.14%	116.856	0.49%	84.448
未利用土地 Unused land	裸土地	0.03%	119.999	0.01%	116.269	0.15%	120.255

$\overline{S_i}$:第 i 种土地利用类型在该年份的景观格局复杂度加权平均值 The weighted average of Landscape Complexity for the i -th land use type; p_i :第 i 种土地利用类型占延河流域面积比例 The proportion of the i -th land use type in the Yanhe watershed area

4 讨论

本研究选用玻尔兹曼熵模型作为量化工具,以深入揭示延河流域景观格局的空间特征及其演变趋势。玻尔兹曼熵模型通过综合考虑景观的组成和空间配置,解决了传统景观格局指数缺乏统一评价标准、对空间格局动态特征的捕捉精细度不足的局限。

延河流域 1980 至 2020 年的土地利用数据玻尔兹曼熵结果揭示了流域景观格局的空间特征及变化趋势,反映出不同历史阶段流域所受人类活动和自然过程的综合影响。1980—2000 年间,延河流域大部分景观单元的 S_{LU} 与整体复杂度指标 S_{Global} 无显著变化,反映了该时期景观格局的稳定性,可能与本阶段较为单一的土地利用模式(耕地主导)和稳定的环境条件有关。1999 年延河流域开始实施退耕还林(草)等一系列生态工程,2000—2010 年间,旱地向林地及中高覆盖度草地转变,影响了原有景观单元结构与连通性,大量景观单元 S_{LU} 上升,整体复杂度指标 S_{Global} 迅速增加,展现出更为复杂和破碎的景观特征,反映出生态系统状态受人类活动影响而突变。2010—2020 年间,大部分用地类型面积无显著变化,而整体复杂度指标 S_{Global} 与平均复杂度 $\bar{S}_i$ 连续下降,说明景观格局破碎化程度降低。2018 年至 2020 年整体复杂度指标 S_{Global} 恢复稳定,相对于 1980 年至 2000 年期间的增速更慢,反映了生态系统经历一系列扰动后,通过内在的调节机制逐渐趋于稳定,土地管理措施或自然恢复过程可能已开始产生效果。因此,退耕还林政策初期增加了景观格局复杂度,但长期有助于生态系统的稳定和可持续性发展。未来应继续监测延河流域土地利用类型和景观格局复杂度的变化,评估退耕还林等政策的长期效益。

针对延河流域的生态挑战,流域管理策略需要将流域本身视作自组织的生命体,根据不同区域的景观格局特征现状与历史演化规律差异,制定差异化管理措施。本研究基于 2020 年的景观格局复杂度分布(见图 5),根据 1980 至 2020 年数据的稳定性特征,综合得到延河流域生态管理措施建议图(见图 8)。

具体措施包括:

(1) 提高多样性。对于低复杂性且稳定的区域,重点在于提高生物多样性与景观多样性,包括种植本地优势植物、恢复湿地、改善水文条件等,以增强生态系统的自我调节和维持能力。

(2) 自然恢复。对于中、高复杂性且稳定的区域,优先考虑保持现有景观结构,保护自然演替过程,避免过度开发和人为干扰破坏自然生态过程,旨在加固生态系统的可持续性与稳定性。

(3) 生态干预。对于中、低复杂性且不稳定的区域,监测植被的生存状况并实施回复措施,以增强生态系统的韧性和适应性。为平衡城市发展与生态保育的需求,应通过科学的土地利用规划,促进城市景观的多样化和生态网络的构建。

(4) 重点监测。对于高复杂性且不稳定的区域,定期评估生态系统健康指标,以便及时识别生态系统的状态变化和潜在风险,限制土地开发以恢复生态,例如探索免耕法等保护性耕作方式,在提高土地生产效率的同时降低对生态的破坏。

5 结论

本研究提出的改进玻尔兹曼熵模型通过景观单元划分、宏观态和微观态定义优化,实现了景观格局复杂性的定量计算,且显著提升了其计算效率,更具实用性;同时,该模型具备对不同形状、不同规模数据的适配

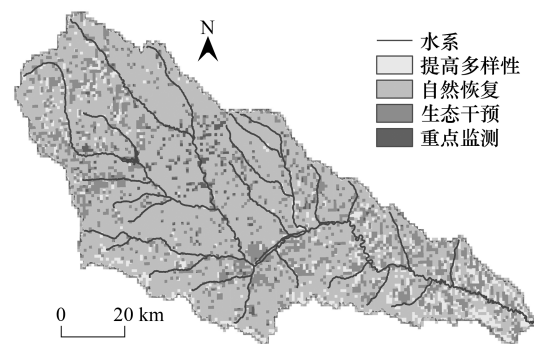


图 8 延河流域生态管理措施建议

Fig.8 Suggestions for ecological management measures in the Yanhe watershed

性,可适用于不同分析尺度的需求,有利于对生态系统复杂性的深入理解。提出的 S_{Global} 指标在一定尺度范围内具备稳健性和可靠性,展示了其在景观生态学研究中的潜力和优势。

本研究建立了流域景观格局复杂性的定量表征方法,分析了 1980—2020 年间延河流域景观格局复杂度及其动态变化。结果表明:(1)延河流域景观格局复杂度呈现显著的空间异质性;延安市辖区北部(中游北部)景观格局复杂度最高,市辖区南部(中下游)较高,安塞县(上游地区)呈现交错分布的特点,延长县(下游)最低。(2)延河流域的整体景观格局复杂度在 2000 年、2010 年发生关键转折:1980 年至 2000 年,延河流域景观格局复杂度无显著变化,94.5%的景观单元格局复杂度变化幅度在 5%以内,景观格局较为稳定;2000 年至 2010 年,延河流域 75.0%的景观单元格局复杂度增加,其中,景观格局复杂度显著增加的景观单元集中在延安市市辖区东北部,林、草类型土地的平均复杂度提升最为显著;2010 年至 2020 年,整体景观格局复杂度连续下降后趋于稳定,增速较 2000 年以前更低,表明流域的景观格局有序性增强,有助于生态可持续性发展。本研究提出的基于玻尔兹曼熵的景观格局复杂度计算及生态可持续性分析方法原则上也适用于其他流域或景观类型,可为流域生态保护和管理提供新的视角和方法。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋. 国务院关于 2021 年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告——2022 年 4 月 18 日在第十三届全国人民代表大会常务委员会第三十四次会议上. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2022(3): 539-543.
- [2] Cao Z, Wang S T, Luo P P, Xie D N, Zhu W. Watershed ecohydrological processes in a changing environment: opportunities and challenges. *Water*, 2022, 14(9): 1502.
- [3] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. *The Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 1250-1263.
- [4] 闫猛, 杜二虎, 王宗志, 张倩, 吴锋. 行为经济与自然过程耦合视角下的水资源复杂系统建模研究. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(6): 53-60.
- [5] Newman E A, Kennedy M C, Falk D A, McKenzie D. Scaling and complexity in landscape ecology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 293.
- [6] 王浩, 胡鹏. 水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题. *水利学报*, 2020, 51(9): 1009-1014.
- [7] 马宗文, 许学工. 土地变化的生态效应研究方法. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(2): 80-86.
- [8] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999-1023.
- [9] Zheng Z J, Du S H, Wang Y C, Wang Q. Mining the regularity of landscape-structure heterogeneity to improve urban land-cover mapping. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 214: 14-32.
- [10] 叶晶萍, 刘士余, 盛菲, 刘政, 杨敏, 李俊. 寻乌水流域景观格局演变及其生态环境效应. *生态学报*, 2020, 40(14): 4737-4748.
- [11] 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.
- [12] Parrott L. Measuring ecological complexity. *Ecological Indicators*, 2010, 10(6): 1069-1076.
- [13] Zurlini G, Petrosillo I, Jones K B, Zaccarelli N. Highlighting order and disorder in social-ecological landscapes to foster adaptive capacity and sustainability. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 1161-1173.
- [14] Gao P C, Wang J C, Zhang H, Li Z L. Boltzmann entropy-based unsupervised band selection for hyperspectral image classification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(3): 462-466.
- [15] Gao P C, Wang X Y, Wang H Y, Cheng C X. A correction to the entropy weight coefficient method by Shen et al. for accessing urban sustainability [Cities 42 (2015) 186—194]. *Cities*, 2020, 103: 102742.
- [16] Nowosad J, Gao P C. Belg: a tool for calculating boltzmann entropy of landscape gradients. *Entropy*, 2020, 22(9): 937.
- [17] Xue C Y, Shao C F, Chen S H. SDGs-based river health assessment for small- and medium-sized watersheds. *Sustainability*, 2020, 12(5): 1846.
- [18] Boltzmann L. *Lectures on gas theory*. Berkeley: University of California Press, 1964.
- [19] Liang X Y, Jia H, Chen H, Liu D, Zhang H. Landscape sustainability in the loess hilly Gully Region of the Loess Plateau: a case study of Mizhi County in Shanxi Province, China. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3300.
- [20] Cushman S A. Thermodynamics in landscape ecology: the importance of integrating measurement and modeling of landscape entropy. *Landscape Ecology*, 2015, 30(1): 7-10.

- [21] Cushman S A. Calculating the configurational entropy of a landscape mosaic. *Landscape Ecology*, 2016, 31(3): 481-489.
- [22] Gao P C, Zhang H, Li Z L. A hierarchy-based solution to calculate the configurational entropy of landscape gradients. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1133-1146.
- [23] Wang C J, Zhao H R. Spatial heterogeneity analysis: introducing a new form of spatial entropy. *Entropy*, 2018, 20(6): 398.
- [24] Zhao Y, Zhang X C. Calculating spatial configurational entropy of a landscape mosaic based on the Wasserstein metric. *Landscape Ecology*, 2019, 34(8): 1849-1858.
- [25] Gao P C, Li Z L. Computation of the Boltzmann entropy of a landscape: a review and a generalization. *Landscape Ecology*, 2019, 34(9): 2183-2196.
- [26] Zhang H, Wu Z W, Lan T, Chen Y Y, Gao P C. Calculating the Wasserstein metric-based boltzmann entropy of a landscape mosaic. *Entropy*, 2020, 22(4): 381.
- [27] 高培超, 程昌秀, 叶思菁, 沈石, 张红. 空间玻尔兹曼熵的研究进展与应用. *地理学报*, 2021, 76(7): 1579-1590.
- [28] Li Z L, Huang P Z. Quantitative measures for spatial information of maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(7): 699-709.
- [29] Vranken I, Baudry J, Aubinet M, Visser M, Bogaert J. A review on the use of entropy in landscape ecology: heterogeneity, unpredictability, scale dependence and their links with thermodynamics. *Landscape Ecology*, 2015, 30(1): 51-65.
- [30] Rodríguez R A, Herrera A M, Quirós Á, Fernández-Rodríguez M J, Delgado J D, Jiménez-Rodríguez A, Fernández-Palacios J M, Otto R, Escudero C G, Luhrs T C, Miranda J V, Navarro-Cerrillo R M, Perdomo M E, Riera R. Exploring the spontaneous contribution of Claude E. Shannon to eco-evolutionary theory. *Ecological Modelling*, 2016, 327: 57-64.
- [31] Cushman S A. Calculation of configurational entropy in complex landscapes. *Entropy*, 2018, 20(4): 298.
- [32] 金晖, 姚美岑, 候焱臻, 李明玉. 熵视角下的延边城市生态系统可持续发展能力分析. *延边大学农学学报*, 2018, 40(1): 32-40.
- [33] 谢明阳, 焦春萌, 韩小雨, 焦峰. 熵视角下延安市生态系统服务价值时空递变规律及其影响因子. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 247-254.
- [34] 高培超. 面向图像空间信息度量的玻尔兹曼熵. *测绘学报*, 2020, 49(10): 1374.
- [35] Díaz-Varela E, Rocas-Díaz J V, Álvarez-Álvarez P. Detection of landscape heterogeneity at multiple scales: use of the Quadratic Entropy Index. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 153: 149-159.
- [36] 花东文, 温仲明, 杨士梭, 苗连朋. 黄土丘陵沟壑区土地利用景观格局变化分析——以延河流域为例. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 86-91.
- [37] Guo J, Gong P. Forest cover dynamics from Landsat time-series data over Yan'an city on the Loess Plateau during the Grain for Green Project. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(17): 4101-4118.
- [38] He J, Shi X Y, Fu Y J. Identifying vegetation restoration effectiveness and driving factors on different micro-topographic types of hilly Loess Plateau: from the perspective of ecological resilience. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112562.
- [39] Zhong X, Jiang X H, Li L L, Xu J, Xu H Y. The impact of socio-economic factors on sediment load: a case study of the Yanhe River watershed. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2457.
- [40] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [41] 徐鑫. 人工与自然两种植被恢复模式识别及退化风险评价——以黄土高原为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [42] 张金良, 王伟, 付健, 张超. 黄河流域内流区土地利用与植被覆盖时空演变规律. *人民黄河*, 2022, 44(11): 1-5, 19.
- [43] 许闯胜, 宋伟, 李换换, 李寒. 中国生态修复的实践错位问题与应对措施. *资源科学*, 2023, 45(1): 222-234.
- [44] 康紫薇, 张正勇, 位宏, 刘琳, 宁珊, 赵贵宁, 王统霞, 田浩. 基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价. *生态学报*, 2020, 40(18): 6472-6485.
- [45] Wolff S L. Rudolph Clausius: A pioneer of the modern theory of heat. *Vacuum*, 2013, 90: 102-108.
- [46] Gao P C, Zhang H, Li Z L. An efficient analytical method for computing the Boltzmann entropy of a landscape gradient. *Transactions in GIS*, 2018, 22(5): 1046-1063.
- [47] Boltzmann L, Seeger R J. Lectures on gas theory. *American Journal of Physics*, 1965, 33(11): 974-975.
- [48] Gao P C, Li Z L. Aggregation-based method for computing absolute Boltzmann entropy of landscape gradient with full thermodynamic consistency. *Landscape Ecology*, 2019, 34(8): 1837-1847.