#### DOI: 10.5846/stxb202102250527

赵红蕊,刘欣桐,王超军.时空信息熵在延河流域生态可持续性分析中的应用.生态学报,2022,42(9):3749-3758. Zhao H R, Liu X T, Wang C J.Spatio-temporal information entropy for the analysis of ecological sustainability and its application in the Yanhe watershed. Acta Ecologica Sinica,2022,42(9):3749-3758.

# 时空信息熵在延河流域生态可持续性分析中的应用

赵红蕊<sup>1,2,\*</sup>,刘欣桐<sup>1,2</sup>,王超军<sup>3</sup>

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
 3 洛阳市自然资源和规划局,洛阳 471000

**摘要:**视流域为一个有生命力的不可分割的有机整体,为表征其生态可持续性,从熵的视角出发,提出结合空间信息熵和时间信 息熵的时空信息熵方法。其中空间信息熵用于表征生态系统格局在空间分布的有序程度,时间信息熵用于度量生态系统的动 态演变是否有序,时空信息熵方法将格局和动态有机结合,定量分析流域生态系统的可持续性。以延河流域为研究区,基于土 地利用数据和归一化植被指数数据,利用时空信息熵方法分析 2000—2018 年延河流域生态可持续性。结果表明:(1)延河流域 生态系统格局朝着有序的方向变化,此间整体处于生长期或恢复期;(2)时间信息熵结果呈现空间异质性,耕地、中低覆盖度草 地和其他林地的时间信息熵值较高,生态弹性能力更强;(3)研究区生态可持续性以"强"和"较强"为主(61%),广泛分布在其 中部和北部地区,表明流域的生态弹性能力总体增强,生态可持续状况明显改善。对基于熵视角研究生态可持续问题的有益探 索,为延河流域及黄土高原其他类似流域的生态保护和修复提供借鉴和参考。 关键词:生态可持续性;时空信息熵;延河流域;遥感

# Spatio-temporal information entropy for the analysis of ecological sustainability and its application in the Yanhe watershed

ZHAO Hongrui<sup>1,2,\*</sup>, LIU Xintong<sup>1,2</sup>, WANG Chaojun<sup>3</sup>

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

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

3 Bureau of Natural Resources and Planning of Luoyang, Luoyang 471000, China

**Abstract**: Regarding watershed as an indivisible organic whole with self-organizing capability, in order to characterize its ecological sustainability, the spatio – temporal information entropy method combining spatial information entropy and temporal information entropy was proposed from the perspective of entropy. The spatial information entropy was used to characterize the order degree of ecosystem pattern in spatial distribution, and the temporal information entropy was used to measure whether the dynamic evolution of ecosystem was orderly or not. The spatio – temporal information entropy method analyzed the sustainability of watershed ecosystem quantitatively by combining pattern and dynamics. Taking Yanhe watershed as the study area, based on three-period land use data and long time series Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data, the ecological sustainability of Yanhe watershed from 2000 to 2018 was analyzed using the spatio – temporal information entropy method. The results showed that: (1) the ecosystem pattern of the Yanhe watershed changed in an orderly direction, indicating that the Yanhe watershed was in the growth or recovery period as a whole. (2) The distribution of temporal information entropy showed the spatial heterogeneity. The temporal information entropy values in the

收稿日期:2021-02-25; 网络出版日期:2022-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41971379,41571414)

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

south and southwest of the study area were the lowest, while the values of the north and central were higher, and the values in the northwest and southeast were the staggered distribution. The temporal information entropy values of the cultivated land, middle and low coverage grassland and other woodland were higher than others, so the ecological resilience of these vegetation types was stronger. The pattern of cultivated land with middle coverage grassland could be adopted in the future. (3) The ecological sustainability was mainly strong and less strong (totally 61%), most of which were distributed in the central and northern regions, indicating that the ecological resilience capacity of Yanhe watershed was mostly enhanced and the overall situation of ecological sustainability was significantly improved. The proportion of weak and less weak was the lowest (totally 13%), which was concentrated in the northwest and south ends of the basin, and the ecological sustainability of these regions still needed to be further improved. Specific ecological management measures were formulated for different grades of regions. This research is a useful exploration for the study of ecological sustainability from the perspective of entropy, which provides a new perspective with interdisciplinary characteristics for the study of ecological sustainability, and can be a reference for the ecological protection and restoration of Yanhe watershed and other similar watersheds in the Loess Plateau.

Key Words: ecological sustainability; spatio-temporal information entropy; Yanhe watershed; remote sensing

生态可持续发展已成为备受各界关注的焦点<sup>[1-2]</sup>,其一方面强调社会和经济的发展必须要尊重地球的生物物理极限<sup>[3]</sup>,另一方面强调生态系统是不可分割的有机整体<sup>[4-5]</sup>。故从整体的观点研究生态可持续性是必然趋势。但当前关于可持续性的研究多是从社会、经济、环境3个子系统中分别遴选评价指标,并计算得出综合指数来反映某区域的可持续状态<sup>[6]</sup>。为了与生态可持续性强调的生态系统有机性和整体性相适应,很多学者倡导转变研究思路,以生态系统为研究对象,从它的基本特征出发——生态系统是一个开放的、具有自组织能力的生命体(即"生命体"观),能够不断优化自身的结构和功能,朝着有序的方向发展<sup>[7-8]</sup>。

随着研究思路的转变,熵这一重要分析方法受到关注。将熵用于可持续性问题的探索已有近三十年的历 史。Addiscott<sup>[9]</sup>在1995年初步阐述了熵视角下生态系统的可持续性过程,并提出以"最小熵产生"作为衡量 系统是否可持续的概念模型;Zurlini等<sup>[10]</sup>认为生态可持续性可以通过衡量生态系统的功能或过程指标动态 演变的有序性来表征;Nielsen等<sup>[11]</sup>更是指出从熵的视角出发,通常可以更好地对传统科学提出的基本问题 (如可持续性、复原力、完整性和生态系统健康等)的因果关系进行解释。熵被应用于生态可持续性研究主要 有以下3个方面的原因:一是在生态学领域,将生态系统看作有活力的生命体,"生命赖负熵为生"的观念对 生态系统研究影响深远<sup>[12]</sup>;二是生态可持续性本质上是生态系统的结构和功能不退化的状态,而熵被广泛用于 度量系统的退化(或无序性)程度<sup>[13-14]</sup>,反映复杂系统的自组织能力<sup>[11, 15]</sup>;三是熵具有反应系统复杂性的整体 性的特性<sup>[16]</sup>,复杂性度量可以有效捕获生态系统状态的系统级变化<sup>[17]</sup>,具有"透过树木以见森林"的优势<sup>[5]</sup>。

熵在生态可持续性研究中的具体应用分为两大类——生态系统格局和生态系统动态。

关于生态系统格局,如何定量区分和刻画不同的景观格局是生态学研究的重点之一<sup>[18]</sup>。许多研究指出, 生态系统格局的空间分布及其演变规律遵循熵原理<sup>[19-20]</sup>。熵度量可以对景观格局的均匀性和随机性进行分 类,是复杂性度量的良好替代<sup>[17]</sup>。相对于传统景观指数理论,基于熵方法表征生态系统格局在空间分布的有 序或无序程度,可以更好地深入生态过程的机理层面<sup>[21-22]</sup>。如何选择合适的熵模型,以及如何让熵方法在有 效表达空间格局分布特征的同时具有生态学含义是当前学者们研究的重点和难点<sup>[22]</sup>。

关于生态系统动态,对长时间序列数据记录的生态系统变化过程进行客观的表达与分析,可以反映生态 系统的健康状况<sup>[23]</sup>。受自然和人为双重耦合因素的影响,生态参数的变化呈现出非稳定和非线性特点<sup>[24]</sup>。 同时,生态系统是有自组织能力的生命体,具有自调节、自适应的能力,其变化除了对外界条件改变的响应,还 是其具有生命力的表现,应同时考虑其自身的属性特征<sup>[25]</sup>。与时间序列分割法、主成分分析法、傅里叶变换 等常用方法相比,熵方法从"生命体"的角度出发,可以更好地表达生态系统复杂的变化信息,揭示生态系统 的自组织和弹性能力等自身属性特征<sup>[26-27]</sup>。目前基于熵方法分析生态系统动态特征已得到较为广泛应 用<sup>[23, 28]</sup>,部分熵方法存在的先验函数模型选择困难以及计算结果的生态学意义难以解释等问题,使其应用范 围受到一定约束。

此外,已有基于熵方法的生态可持续性研究多从生态系统格局或动态分途讨论生态可持续性,对二者之间关联的分析较少。但生态系统是一有机整体,格局和动态之间存在着密切的关联,将二者结合起来分析,格局(空间)和动态(时间)相辅相成,无疑可以提供更加客观的可持续性分析结果。

本文从熵的视角出发,以延河流域为研究区,尝试提出将格局和动态相结合的时空信息熵方法。延河流 域是典型的黄土丘陵沟壑区,其生态环境问题尤其是退耕还林还草工程实施过程中的植被恢复可持续性问题 一直吸引着众多学者的关注<sup>[29-31]</sup>。目前关于延河流域生态可持续性研究,主要侧重具体地类的变化特征 (如耕地向林、草地的转化),以及由此带来的生态效益(如各地类所提供的生态服务功能),而鲜有从整体的 视角分析该流域生态系统格局和动态的变化特征。以时空信息熵方法定量分析该流域的生态可持续性,希望 为当地及黄土高原其他类似流域的生态保育和管理工作提供辅助决策支持。

### 1 研究区概况与数据来源

# 1.1 研究区概况

延河是黄河的一级支流,全长约 286.9 km,发源于榆林市靖边县天赐湾乡,自西北向东南依次流经靖边 县、志丹县、安塞区、宝塔区和延长县,最后注入黄河。延河流域位于陕北黄土高原腹地,地理位置 36°23′— 37°17′N,108°45′—110°28′E,总面积约 7687 km²,地势起伏较大,呈现出西北高、东南低的特点,平均海拔约 1214 m。在地质构造上,该区域黄土地貌沟壑纵横,主要是第四纪的黄土岩系,土质疏松,抗冲刷、抗侵蚀能力 差,极易被分散和搬运。该流域属半干旱大陆性季风气候区,年平均气温约 6.2—12.4℃。年平均降雨量约为 520 mm,降水季节性分配不均匀,6—9 月份降雨量占全年总量的 75%以上,且多以暴雨形式出现。流域内植 被多样性较为丰富,植被分布从南向北呈现出梯度分布特征,大致分为三大植被带分区:森林带、森林草原过 渡带和草原带。延河流域位置及 2015 年土地利用情况见图 1。

过去受不合理的人类活动和自然因素的影响,延河流域的生态系统明显退化,天然植被锐减、水土流失等现象严重<sup>[32]</sup>。自1999年起,为了遏制该地区生态系统的退化,国家开展了一系列生态建设政策,退耕还林还 草工程在延河流域大范围开展<sup>[29,32–33]</sup>。然而延河流域(乃至整个黄土高原)在该工程实施过程中,由于所引 进的植被类型的耗水量较高,且未充分考虑当地土壤水分的承载力,导致土壤水分过度消耗、土壤水分的涵养 功能退化,由此引发土壤干层,反过来又影响到植被恢复的可持续性<sup>[29–30]</sup>。

#### 1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括:

(1)土地利用数据:生态系统格局多以土地利用/覆盖的形式表征,土地利用的组成及其空间分布特征会直接影响生态系统功能<sup>[34-35]</sup>,与生态可持续性密切相关。本文采用来源于中科院数据中心(http://www.resdc.cn)的三期(2000、2010、2015年)土地利用数据,其空间分辨率为100m,包括15种土地利用类型,数据集总体精度超过80%。

(2) 归一化植被指数数据: 归一化植被指数(NDVI) 是反映植被覆盖水平的指示因子, 且植被是陆地生态 系统的重要组成部分, 可以有效反映生态环境状况<sup>[23]</sup>。因此, 时间序列 NDVI 数据可以作为研究生态系统动 态演变的关键状态变量。本文采用来源于 NASA 数据中心(https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data)的 MODIS 植被指数产品(MOD13Q1 V6), 时间范围为 2000—2018 年, 共计 432 景数据, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨 率为 16 天。经过投影、格式转换、数据重采样、裁剪、对缺失像元的数据修复等环节, 得到延河流域 NDVI 月 均值数据集, 共计 226 组。进一步利用最大值合成法, 得到 2000—2018 年 NDVI 年极大值数据。



函 I 延河加坡也直及 2013 年上地村市小息函 Fig.1 Location of Yanhe watershed and land use map in 2015

#### 2 研究方法

将流域生态系统看成是一个开放的、具有自组织能力的生命体,其可持续性可以通过刻画系统功能和过程指标动态演变的有序性来表征<sup>[10]</sup>。利用空间信息熵和时间信息熵,研究生态系统格局以及生态系统动态 演变的特征,并将两者结合分析生态系统可持续性,初步建立结合"格局"和"动态"的时空信息熵方法。同时,需要指出的是,新方法的目的是探索生态可持续性分析的新视角,可视为对已有研究方法的补充而非 替代。

# 2.1 空间信息熵

玻尔兹曼熵和信息熵是研究生态系统格局常用的两种熵方法。基于玻尔兹曼熵的方法在实际应用中存 在随着景观维度和类型数目的增加,计算量剧增的问题,且其景观组分和理想气体之间是否存在热力学联系 的前提假设尚不明确。与玻尔兹曼熵相比,信息熵由于其自身的"数学理论"特性,在景观格局分析中有着更 广泛的应用<sup>[22]</sup>。然而由于信息熵的研究对象是一维的,而空间是二维或多维的,故信息熵难以反映实际空间 格局的分布特征,即存在"维度不匹配"问题。

空间信息熵(H<sub>s</sub>)是一种可以有效解决该问题的景观格局分析方法<sup>[22]</sup>,其基于信息熵,结合地理学第一定 律<sup>[36]</sup>,以考虑公共边界长和质心距离的邻近度作为定量刻画空间属性影响的关键因子,使得H<sub>s</sub>可以同时包含 格局的组成信息及结构信息,更为客观地表征格局的空间异质性和无序性。H<sub>s</sub>的计算式如下:

$$H_s = -\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{d_i} p_i \log_2 p_i \tag{1}$$

$$L_i = \sum_{k=1, i \neq k}^n L_{ik}$$
<sup>(2)</sup>

$$d_i = \sum_{k=1, i \neq k}^n d_{ik} \tag{3}$$

式中,n为土地利用类别的数量,p<sub>i</sub>为土地利用类别 *i* 所占面积比例。L<sub>i</sub>/d<sub>i</sub>被定义为邻近度,其中 L<sub>i</sub>表示不同 类别之间的公共边界长,它等于与类别 *i* 相邻的其他类别的所有边界长之和(公式(2))。d<sub>i</sub>表示不同类别间 的距离,即类别*i*与其他不同类别质心间的距离之和(公式(3)),本文所指距离为欧式距离,为避免当不同类别的质心重合时,*d<sub>i</sub>*为空值产生噪声效应,需将此时的*d<sub>i</sub>*设为相对较小的常量,本文取为栅格长度的一半。由上式可知,*H<sub>s</sub>*的取值范围为[0,+∞),对于给定的类别数目和比例的不同空间格局,*H<sub>s</sub>*会随着邻近度的变化而变化。

关于空间信息熵的生态学意义,对于同一研究区域,不同时期生态系统格局的熵值降低,反映系统生态复杂度提升,朝着有序的方向发展,生态可持续状况好转<sup>[22]</sup>。但需要补充的是,由于信息熵具有概率属性<sup>[37]</sup>,故熵值的下降并不绝对意味着系统状态的好转。为避免此种情况,在实际研究中,可选择具有一定时间间隔的生态系统格局数据,将生态系统的自组织能力考虑进来。

### 2.2 时间信息熵

信息熵从生态系统为"生命体"的角度出发,揭示生态系统动态演变的机制以及系统的组织能力<sup>[11]</sup>。时间信息熵(temporal information entropy, *H<sub>t</sub>*)<sup>[27]</sup>是信息熵在反映生态参数在时间维动态演变相对不确定性的延伸,其基于观测数据直接计算熵值,克服了以往信息熵方法需要选择合适先验模型的局限性<sup>[32]</sup>,适用范围更 广。*H<sub>t</sub>*的计算式如下:

$$H_{i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \log_{2}\left(\frac{y_{i+m} - y_{i-m}}{c_{i} \times m \times \Delta \div n}\right)$$
(4)

其中,

$$c_{i} = \begin{cases} 1 + \frac{i-1}{m} & 1 \leq i \leq m \\ 2 & m+1 \leq i \leq n-m \\ 1 + \frac{n-i}{m} & n-m+1 \leq i \leq n \end{cases}$$
$$\begin{cases} y_{i-m} = y_{1} & i \leq m \\ y_{i+m} = y_{n} & i \geq n-m \end{cases}$$

式中,*n*为所选时间序列的项数, $y_1 \le y_2 \le \cdots \le y_n$ 是像元不同时期的观测值 $x_1, \cdots, x_n$ 按照从小到大的顺序 排列后得到的。*m*表示时间频率因子,为不超过n/2的正整数,该值的选择与所研究的时间范围相关。 $\Delta$ 为 缩放系数,使计算结果恒为正值,一般取为时间序列数据的基本变化单元。

时间信息熵的生态学意义需要视具体情况而定,需考虑生态系统所处的宏观状态,如稳定态、生长期或恢 复期、退化期等。并且由于 H<sub>i</sub>反映的是生态弹性增强的程度,而非绝对值,因此需要兼顾不同的景观格局(特 别是不同的植被类型)。H<sub>i</sub>的生态学含义通常与系统的弹性能力结合起来讨论,弹性反映的是系统能够维持 自身稳定性的能力<sup>[38]</sup>,可以反应生态系统的可持续性。在稳定态的条件下,生态参数的 H<sub>i</sub>值越小,反映其动 态变化越稳定、有序,相应的生态弹性能力越强,系统越可持续。而在生长期或恢复期条件下,对于同一类型 的植被,H<sub>i</sub>值越大,生态弹性越强,生态系统越有序,生态可持续性越强。

2.3 时空信息熵

基于时间信息熵和空间信息熵,将"格局"和"动态"两个维度初步结合起来,建立定量分析生态可持续性的时空信息熵方法,生态系统格局的熵值(即空间信息熵)用于反映生态可持续性的整体状态,提供关于系统所处宏观状态的客观信息,为生态系统动态特征的分析提供参考依据。同时,将时间序列生态参数动态演变的熵值结果(即时间信息熵)与土地利用格局(特别是不同植被类型)结合起来,理解计算结果的生态学含义,判断生态可持续性。

时空信息熵方法具体步骤如下:

步骤一:利用多期生态系统格局数据计算各时期的空间信息熵,根据空间信息熵的变化情况,分析生态系统格局的有序(或无序)程度,判断生态可持续性的整体情况和生态系统所处的宏观状态(见 2.1 节)。本文

以土地利用数据表征生态系统格局,考虑到信息熵的概率属性以及生态系统的自组织能力,可能需要一定的 时间才可以反映出退耕还林还草工程对延河流域生态系统的影响,因此选用 2000、2010、2015 年三期土地利 用数据计算空间信息熵;

步骤二:选取合适的生态参数,基于该参数的长时间序列数据,计算时间信息熵,分析生态系统动态演变 状况(见 2.2 节)。本文选取 NDVI 数据作为研究生态系统动态演变的关键状态变量。由于本文的目的是探 究生态系统在一段时间范围内的总体变化特征,侧重对年际间动态特点的讨论。因此,忽略了年内物候因素, 选取 2000—2018 年 NDVI 年极大值数据作为时间信息熵值计算的输入数据;

步骤三:由于不同生态系统宏观状态下,时间信息熵所反映的生态学含义不同:在稳定态的条件下,H<sub>i</sub>与 生态可持续呈负相关,即熵值越大,生态可持续性越弱;而在生长期或恢复期条件下,H<sub>i</sub>与生态可持续呈正相 关。因此,将步骤一得到的生态系统宏观状态作为前提条件,根据步骤二所得时间信息熵值大小判断研究区 各像元的生态可持续性。

3 结果与分析

# 3.1 延河流域生态格局分析

选取延河流域 2000、2010、2015 年三期土地利用数 据进行基于空间信息熵的生态系统格局分析,按前述方 法计算的空间信息熵值结果如图 2 所示。由图 2 可知, 三期土地利用数据的 H,连续降低,反映生态系统格局 的有序性提升,生态复杂度增强,生态可持续性整体状 态好转。据此,判断出延河流域处于生长期或恢复期。

结合延河流域空间信息熵的具体计算过(表1)程, 进一步分析影响熵值变化的主要因素。根据表1中 2000、2010、2015年的 H<sub>si</sub>值,可知11种土地利用类型 中,耕地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、灌木林4种类 型对 H<sub>s</sub>计算结果的贡献最多。从各地类 H<sub>si</sub>值的变化可 以看出,耕地面积及其邻近度的改变对 H<sub>s</sub>的影响最大, 中覆盖度草地的影响次之。

3.2 延河流域生态动态特征分析

基于延河流域 2000—2018 年 NDVI 年极大值数 据,按前述方法计算得到 NDVI 时间信息熵结果(图 3)。图3中掩模区为非植被区域,包括居民用地、水域、 其他建设用地和未利用地。由图3可知,*H*,呈现空间异 质性,总体分布特征为:研究区南部、西南部的熵值最 低,北部和中部的熵值较高,西北、东南两端的熵值呈交 错分布的特点。

由于 NDVI 的大小与植被类型有关,结合延河流域 的土地利用类型图,比较植被覆盖区域中不同植被类型 的 H,值情况,结果如图 4 所示。由图 4 可知,有林地、灌 木林、高覆盖度草地熵值较低;耕地、中低覆盖度草地、 其他林地熵值较高,且此四类之间的彼此差异较小。





Fig.2 Spatial information entropy  $(H_s)$  of Yanhe watershed





表1 空间信息熵的计算过程分析

Table 1 Calculation process of spatial information entropy $(H_s)$									
土地利用类型 Land use type	2000 年			2010 年			2015 年		
	$H_i$	$L_i / d_i$	H <sub>si</sub>	$H_i$	$L_i / d_i$	$H_{si}$	$H_i$	$L_i / d_i$	$H_{si}$
耕地 Arable land	0.5236	237.22	124.20	0.5282	220.28	116.36	0.5244	176.72	92.67
有林地 Natural woodland	0.0411	3.04	0.13	0.0411	2.38	0.10	0.0429	2.83	0.12
灌木林 Shrubbery	0.3378	56.58	19.11	0.3424	45.59	15.61	0.3565	50.48	17.99
其他林地 Other woodland	0.0320	2.37	0.08	0.1514	12.86	1.95	0.1488	13.04	1.94
高覆盖度草地 High coverage grassland	0.0049	0.18	0.0009	0.0363	1.27	0.05	0.0408	1.53	0.06
中覆盖度草地 Middle coverage grassland	0.4770	86.11	41.07	0.4746	85.74	40.69	0.5126	103.30	52.95
低覆盖度草地 Low coverage grassland	0.4908	93.41	45.85	0.4880	95.19	46.45	0.4956	95.81	47.49
水域 Water bodies	0.0269	3.17	0.09	0.0247	2.08	0.05	0.0286	2.63	0.08
居民用地 Urban land	0.0268	2.39	0.06	0.0305	2.31	0.07	0.0653	3.58	0.23
其他建设用地 Other construction land	0.0034	0.21	0.0007	0.0048	0.24	0.0011	0.0164	0.96	0.02
未利用地 Unused land	0.0038	0.18	0.0007	0.0038	0.16	0.0006	0.0006	0.02	0.0000

*H<sub>i</sub>*:土地类型*i*的信息熵;*p<sub>i</sub>*:土地类别*i*所占面积比例;*L<sub>i</sub>/d<sub>i</sub>*:邻近度;*L<sub>i</sub>*:土地类型*i*与其他类别间的所有边界长之和;*d<sub>i</sub>*:土地类型*i*与其他 不同类别质心间的距离之和;*H<sub>i</sub>*:土地类型*i*的空间信息熵

#### 3.3 延河流域生态可持续性分析

根据 3.1 节, 延河流域生态可持续性整体状态好转, 处于生长期或恢复期。对应于这一宏观状态, 时间信息熵值越大, 意味着生态弹性能力越强, 生态系统越有序, 可持续性越强。因此, 根据 H<sub>i</sub> 计算结果判断生态可持续性, 利用自然间断点法, 将 H<sub>i</sub>结果划分为 5 个等级: 弱(9.04—10.21)、较弱(10.21—10.77)、中等(10.77—11.13)、较强(11.13—11.49)、强(11.49—12.41), 以此表征生态可持续性等级, 各等级的空间分布及各自所占比例如图 5 所示。

由图 5 可知,延河流域生态可持续性以"强"和"较 强"为主(61%),且分布范围广(尤其是中部和北部), 表明流域的生态弹性能力总体增强,生态可持续性较 好;"中等"类型则散乱地分布在其他类型周围;"弱"、 "较弱"占比最低,集中在流域的西北和南部两端,表明



该区域的生态弹性能力尚未增强或增强幅度较少,生态可持续性需进一步提高。

# 3.4 结果验证与建议

关于生态可持续性的研究通常难以进行直接的验证,但仍可从以下两个方面作进一步地讨论:

(1)自2000年起,一系列生态建设工程在延河流域得到有效开展,多数研究结果表明生态系统质量、生态系统服务功能得到提升<sup>[29,32-33]</sup>。由于流域生态系统是一有机整体,生态系统质量和生态系统服务功能的提升,也反映出生态系统结构和功能的改善,即生态可持续性状况好转。与本文得出的延河流域生态系统整体处于生长期或恢复期,朝着有序的方向发展的结论相符合。

(2)在 2013 年延河流域遭遇了百年一遇的大暴雨,此次暴雨无论降雨强度、笼罩范围都远超其他年份记录,但并未造成以往常见的洪水与水土流失现象<sup>[39]</sup>。从生态系统自身的属性特征出发,这得益于生态系统的





复杂度和弹性能力的增强,有效地抵抗了外界的干扰,这与时间信息熵及生态可持续性分析结果相吻合。

生态可持续性的研究,可为延河流域生态保护和治 理提出建议。在退耕还林还草诸项措施中,耕地、中覆 盖度草地的面积及邻近度的改变是空间信息熵值改变 的主要影响因素。并且耕地、中覆盖度草地的时间信息 熵值较高,表明其生态弹性能力更强。因此,建议今后 重点采取"耕地-中覆盖度草地"这一模式。同时,二者 的分布应相对集中,使其邻近度降低(如增大质心距 离,减少公共边界长),有助于降低空间信息熵值。对 于时间信息熵的计算结果中生态弹性无明显增强的区 域,应继续开展生态保护和修复措施。由于生态弹性与 植被类型有关,在开展生态保护和修复时,还应兼顾不 同植被类型自身的特点。基于生态可持续性分区图 (图 5),提出以下两项具体措施(图 6):(1)对于等级为



"弱"和"较弱"的区域,应加强生态修复。根据植被类型,修复措施又可分为人工调节和自然恢复,前者针对 耕地、经济林地,后者包括天然林、灌木林及各类草地。(2)对于等级为"中等"的区域,应加强生态保护。

4 结论

面向生态可持续性研究,本文视生态系统为具有自组织能力的生命体分析其生态可持续性分析,是一种 新的尝试,或可以提供研究生态可持续性的新视角。该视角具有交叉学科的特点,初步将生态系统格局和动 态结合起来,暂称之为时空信息熵方法,其中表征格局有序性的空间信息熵结果反映生态可持续的整体状态, 提供关于系统所处宏观状态的客观信息,为动态特征分析提供参考;时间信息熵与土地利用格局结合起来,分 析生态系统动态演变的有序性,可望更综合诠释研究区域生态学意义。

由于已有关于延河流域研究鲜有从整体的视角分析生态系统格局的变化特征,本文进一步研究延河流域

生态系统格局的总体状态及其变化特征是非常有必要的。对于延河流域在退耕还林还草工程实施过程中的 植被恢复可持续性问题,本文从生命体观出发,通过植被覆盖连续动态变化的有序程度,分析当地植被恢复的 效果,可为其今后的生态修复和治理工作提供参考。此外,延河流域地处陕北黄土高原腹地,是具有代表性的 黄土丘陵沟壑区。黄土高原其他类似流域可同样被视为生命体,通过选取符合当地流域特点的生态监测参 数,时空信息熵方法可望为其生态保护和修复提供借鉴和参考。

无论是时空信息熵概念,其表达式及结合遥感数据的具体计算,还是其尺度效应问题,都需要进一步系统 化的研究。毕竟,生态可持续性问题本身是非常复杂的,但基于生命体观的熵的研究视角,是值得继续的有益 尝试。未来研究需要从生命体观及时空尺度出发,探讨流域生态可持续问题的时空关联性。

#### 参考文献(References):

- [1] 周兵兵,马群,邬建国,胡国华,毛德华,曾小箕,郭杰,房学宁,刘宇鹏,吕立刚.再论可持续性科学:新形势与新机遇.应用生态学报,2019,30(1):325-336.
- [2] Vadén T, Lähde V, Majava A, Järvensivu P, Toivanen T, Hakala E, Eronen J T. Decoupling for ecological sustainability: a categorisation and review of research literature. Environmental Science & Policy, 2020, 112: 236-244.
- [3] Ryberg M W, Owsianiak M, Clavreul J, Mueller C, Sim S, King H, Hauschild M Z. How to bring absolute sustainability into decision-making: an industry case study using a planetary boundary-based methodology. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1406-1416.
- [4] Costanza R. Ecological economics in 2049: getting beyond the argument culture to the world we all want. Ecological Economics, 2020, 168: 106484.
- [5] Bastianoni S, Coscieme L, Caro D, Marchettini N, Pulselli F M. The needs of sustainability: the overarching contribution of systems approach. Ecological Indicators, 2019, 100: 69-73.
- [6] 诸大建. 用国际可持续发展研究的新成果和通用语言解读生态文明. 中国环境管理, 2019, 11(3): 5-12.
- [7] Ibarra-Michel J P, Olmos-Martínez E. Effective ecological sustainability as a complex system from a social dimension//Ortega-Rubio A, ed. Socioecological Studies in Natural Protected Areas. Cham: Springer, 2020: 37-49.
- [8] Patten B C. Systems ecology and environmentalism: getting the science right. Part I: facets for a more holistic Nature Book of ecology. Ecological Modelling, 2014, 293: 4-21.
- [9] Addiscott T M. Entropy and sustainability. European Journal of Soil Science, 1995, 46(2): 161-168.
- [10] 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.
- [11] Nielsen S N, Müller F, Marques J C, Bastianoni S, Jørgensen S E. Thermodynamics in ecology-an introductory review. Entropy, 2020, 22 (8): 820.
- [12] Riera R, Rodríguez R A, Herrera A M, Delgado J D, Fath B D. Endorheic currents in ecology: an example of the effects from scientific specialization and interdisciplinary isolation. Interdisciplinary Science Reviews, 2018, 43(2): 175-191.
- [13] Zhang Y, Yang Z F, Li W. Analyses of urban ecosystem based on information entropy. Ecological Modelling, 2006, 197(1/2): 1-12.
- [14] Pelorosso R, Gobattoni F, Leone A. The low-entropy city: a thermodynamic approach to reconnect urban systems with nature. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 22-30.
- [15] Gershenson C, Fernández N. Complexity and information: measuring emergence, self-organization, and homeostasis at multiple scales. Complexity, 2012, 18(2): 29-44.
- [16] Jørgensen S E, Nielsen S N, Fath B D. Recent progress in systems ecology. Ecological Modelling, 2016, 319: 112-118.
- [17] Parrott L. Measuring ecological complexity. Ecological Indicators, 2010, 10(6): 1069-1076.
- [18] Nowosad J, Stepinski T F. Information theory as a consistent framework for quantification and classification of landscape patterns. Landscape Ecology, 2019, 34(9): 2091-2101.
- [19] Huang F, Ochoa C G, Chen X, Cheng Q B, Zhang D R. An entropy-based investigation into the impact of ecological water diversion on land cover complexity of restored oasis in arid inland river basins. Ecological Engineering, 2020, 151: 105865.
- [20] Cushman S A. Calculation of configurational entropy in complex landscapes. Entropy, 2018, 20(4): 298.
- [21] Claramunt C. A spatial form of diversity//Cohn A G, Mark D M, eds. Spatial Information Theory. Berlin: Springer, 2005: 218-231.
- [22] Wang C J, Zhao H R. Spatial heterogeneity analysis: Introducing a new form of spatial entropy. Entropy, 2018, 20(6): 398.
- [23] Xu W, Liu H, Zhang Q X, Liu P. Response of vegetation ecosystem to climate change based on remote sensing and information entropy: a case

study in the arid inland river basin of China. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(4): 132.

- [24] 陈宽,杨晨晨,白力嘎,陈瑜,刘锐,潮洛濛.基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响. 生态学报, 2021, 41 (12): 4963-4975.
- [25] Li S S, Yang S N, Liu X F, Liu Y X, Shi M M. NDVI-Based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China. Remote Sensing, 2015, 7(9): 11163-11182.
- [26] 王超军,吴锋,赵红蕊,陆胜寒.时间信息熵及其在植被覆盖时空变化遥感检测中的应用.生态学报,2017,37(21):7359-7367.
- [27] Wang C J, Zhao H R. Analysis of remote sensing time-series data to foster ecosystem sustainability: use of temporal information entropy. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(8): 2880-2894.
- [28] 刘思怡,丁建丽,张钧泳,张振华,陈香月,玛依拉·热西丁.艾比湖流域草地生态系统环境健康遥感诊断.草业学报,2020,29(10): 1-13.
- [29] 朱青,周自翔,刘婷,白继洲.黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究——以延河流域为例.生态学报,2021,41(7): 2557-2570.
- [30] Jiang C, Zhang H Y, Wang X C, Feng Y Q, Labzovskii L. Challenging the land degradation in China's Loess Plateau: Benefits, limitations, sustainability, and adaptive strategies of soil and water conservation. Ecological Engineering, 2019, 127: 135-150.
- [31] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. 生态学报, 2019, 39(3): 823-834.
- [32] 王超军. 时间信息熵及在延河流域生态环境质量评价中的应用[D]. 北京:清华大学, 2016.
- [33] 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): 2457-2475.
- [34] 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.
- [35] 雷金睿,陈宗铸,陈小花,李苑菱,吴庭天. 1980-2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [36] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. Economic Geography, 1970, 46(S1): 234-240.
- [37] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [38] De Keersmaecker W, Lhermitte S, Honnay O, Farifteh J, Somers B, Coppin P. How to measure ecosystem stability? An evaluation of the reliability of stability metrics based on remote sensing time series across the major global ecosystems. Global Change Biology, 2014, 20(7): 2149-2161.
- [39] 顾朝军,穆兴民,孙文义,高鹏,赵广举.极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究.自然资源学报,2017,32 (10):1755-1767.