

引用格式:贾慧,陈海,毛南赵,等. 高度敏感生态脆弱区景观可持续性评价[J]. 资源科学,2018,40(6):1277-1286. [Jia H, Chen H, Mao N Z, et al. Landscape sustainable development in highly sensitive ecological fragile areas[J]. *Resources Science*, 2018, 40(6):1277-1286.] DOI :10.18402/resci.2018.06.17

高度敏感生态脆弱区景观可持续性评价

贾 慧^{1,2}, 陈 海^{1,2}, 毛南赵^{1,2}, 聂 霞^{1,2}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127;

2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘 要:运用熵变分析方法从景观的视角阐明生态脆弱区景观可持续动态演变规律具有重要的理论意义和实践价值。本文基于耗散结构理论和景观复合生态系统理论,以高度敏感生态脆弱区陕西省米脂县高渠乡为例,构建景观可持续评价指标体系,运用信息熵构建研究区景观可持续评价模型,通过计算熵流、熵产生和总熵变,分析研究区2009—2014年间的系统承载力、活力和有序度,探讨研究区的可持续性。研究表明:①建立的景观可持续评价指标体系能够有效地反映景观复合生态系统的功能和演化机制,研究方法可以有效地进行生态脆弱区景观可持续性评价研究;②在2009—2014年间,高渠乡熵流呈减少趋势,熵产生总体上升,总熵变除2012年外,其余年份逐年下降,景观复合生态系统内部朝着健康有序方向发展;③高渠乡可持续总得分呈上升趋势,景观可持续性总体上升。

关键词:景观可持续性;熵变分析;评价;景观复合生态系统;陕西省米脂县高渠乡

DOI :10.18402/resci.2018.06.17

1 引言

景观是自然要素和人类行为相互作用下可以被人们感知的整体区域^[1],不局限于文化、人工和自然等单一要素,是由相互联系的不同类型的生态系统组成的异质性空间单元^[2]。景观可持续性是景观所具有的能够长期而稳定地提供景观服务、维护和改善本区域人类福祉的综合能力^[3]。近年来,随着景观生态学和可持续性科学的发展,景观可持续性已成为研究热点^[4,5]。景观可持续性理论与案例研究均有长足发展,比较有代表性的包括 Selman 和 Musacchio,分别构建了表征景观可持续性的理论框架^[6,7]。在此基础上,2013年邬建国系统的总结了景观可持续的发展,确立了景观可持续理论系统的基础^[8]。房学宁等进一步完善了景观可持续科学理论体系,提出了景观可持续科学研究的核心问题以及景观可持续性评价研究的概念框架^[9]。目前,已有学者通过景观服务和景观格局的变化来探究和分

析景观可持续性研究,例如孙晓兵在进行延安市土地利用变化及景观可持续性研究中,利用生态退耕背景下土地利用变化对景观格局的影响来进行景观可持续发展模式的探究^[2],付鹏通过对景观指数的计算,以景观格局的变化来分析乡村景观的可持续发展和规划^[10],蒋欣阳通过对锡林郭勒草原景观服务供给能力的分析,来探讨提高景观可持续性的措施^[11]。但通过景观服务和景观格局变化对景观进行可持续性评价的目前还不多见,因此本文通过建立景观服务、景观格局变化和景观可持续性之间的联系来进行可持续性研究。

景观复合生态系统与热力学的耗散结构系统特征相吻合,可采用耗散结构系统熵变理论描述其演化机制^[12],加之熵变在可持续发展研究方面也有丰富的研究成果^[13,14],因此,本文依据熵变理论,以陕西省米脂县高渠乡为例,来评价高度敏感生态脆弱区景观的可持续性,为从整体上分析景观可持续性积累经验。

收稿日期:2017-05-19,修订日期:2017-12-03

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41671086;41271103)。

作者简介 贾慧,女,山西忻州人,硕士生,主要研究方向为土地利用行为对景观服务的影响。E-mail: jhyx586955@126.com

通讯作者 陈海,E-mail: chw@nwu.edu.cn

2 研究区概况、研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

中国生态脆弱区类型多、范围广、地域差异大,导致其生态敏感性程度不同,可持续程度也不同;将全国18个重点生态脆弱区划分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感5个等级已得到很多学者的认同^[15-17]。研究区米脂县高渠乡地处陕西省榆林市的东南部,位于陕北黄土高原丘陵沟壑区,属于高度敏感生态脆弱区,是榆林市的典型贫困县,生态环境问题和贫困问题严重制约了该区域可持续性的提高。米脂县位于109°49'E—110°29'E,37°40'N—38°06'N,总面积1212km²。地貌主要以崩、梁、沟、川为主,地势东西高中间低。属于中温带半干旱气候区,降水集中在夏季,全年雨量不足^[18]。高渠乡位于米脂县城北10km处,总人口10 054人,土地总面积72.40km²,在2009—2014年间,各类型土地利用面积发生较大变化^[19]。2014年高渠乡的耕地面积是16.59km²,相比2009年减少42%;林草地面积为40.93km²,相比2009年增加35%;水域面积为0.04km²,相比2009年增加19%;建设用地和道路面积为11.23km²,相比2009年增加15%,其他用地面积为3.58km²,相比2009年增加12%。高渠乡是米脂县退耕还林典型示范乡,而且随着经济的不断发展,村民对景观服务的需求发生很大变化,为了构建现代农业产业体系,发展农业产业化经营,高渠乡逐渐成为“一乡一业”和“一村一品”的典型乡镇。景观格局和景观服务需求的变化极大地影响了其可持续性,了解景观格局和服务需求变化后其景观整体的可持续性对于高渠乡的发展显得极为重要,这为了解和分析景观整体的可持续性提供了良好的平台。

2.2 研究方法

2.2.1 景观复合生态系统熵变机理分析

“熵”最初是由德国物理学家Rudolf Clausius在1968年提出的热力学概念^[20],后来经Shannon引入信息论中定义为信息熵^[21],可用来描述任何一种具有耗散结构特征的系统或物质运动的有序度,定量判断物质或系统的演化方向。基于信息熵进行熵变分析时,一个系统越是有序,信息熵就越低,反之,一个系统越是混乱无序,信息熵就越高^[22]。

目前,熵变理论在经济学、信息科学、社会科学和自然科学等领域均已得到广泛应用^[23]。其中,在地理学研究范畴内,许多学者将熵变理论应用于复杂系统整体状态及其随时间连续变化过程的分析,比较有代表性的有柳崇健等利用大气系统演变的熵流特征对其演化趋势进行了分析^[24];李春华等运用熵变理论构建指标体系分析了耕地安全系统的演化趋势^[25];张妍等基于熵变理论对城市生态系统演化进行了分析^[26]等。在此基础上,有学者进一步论证了将熵变理论用于可持续研究领域的合理性,如狄乾斌等、林珍铭等运用熵变分析方法分别对海洋生态系统和城市生态系统的可持续性进行了分析研究^[13,14]。

2.2.2 指标体系构建

景观的内外干扰作用和再生能力对景观格局有较大影响^[3],分析了解不同景观格局下景观服务能力和景观服务需求之间的动态平衡关系可以有效进行景观可持续性评价,即当特定景观格局的景观服务需求大于景观服务能力,景观不可持续,反之,景观可以支撑更大的人口负荷及其需求^[9]。因此,在景观尺度上,通过对景观内外干扰作用、景观再生能力(景观脆弱性和景观应对能力^[27])以及景观服务能力和景观服务需求间关系的衡量,就可对景观可持续性进行评价。

景观是由自然、经济和社会子系统耦合而成的开放性复合生态系统,景观要素及其空间组合特征决定了不同的物质、能量和信息在景观内部及景观之间流动和转换,这与耗散结构的特征相吻合。景观的熵变过程是其要素、结构和功能不断变化形成新的景观格局和功能的过程。因此,可以通过了解不同类型景观服务能力和景观服务需求的状况来掌握景观要素和结构,通过对景观存在的问题和人类应对措施的了解来分析景观功能及其变化,以此实现对景观熵变的分析。

本文基于景观可持续理论和熵变理论的结合,从两方面来构建指标体系:一是从耗散结构出发,确定由景观复合生态系统熵流和熵产生组成的二级层次指标体系;二是考虑景观与人类之间的景观服务流动(熵流)和系统存在的问题及其应对能力(熵产生),利用景观服务能力和景观服务需求来表

2018年6月

征景观的熵流,利用景观脆弱性和景观应对能力来表征景观的熵产生,建立集成自然-经济-社会子系统的三级层次指标体系(见表1)。

在选择指标层的具体指标时,需掌握景观服务能力和景观服务需求的状况,以此来分析景观的熵流;需掌握景观脆弱性和景观应对能力的状况,以此来分析景观的熵产生。下面分别对4种类型熵具体指标的选择进行说明:①在选择景观服务能力具体指标时,以提供不同类型景观服务的物质和设施的状况,作为分析景观服务能力变化的基础;②在

选择景观服务需求具体指标时,通过居民从景观复合生态系统中实际得到的服务,分析景观服务需求的变化;③在选择景观脆弱性具体指标时,以景观复合生态系统存在的自然、经济和社会问题作为评价指标,以此来分析景观脆弱性的变化;④在选择景观应对能力指标时,主要依据人类对各种问题做出的一系列调整措施作为评价指标,分析景观应对能力的变化。

依据指标数据的准确性、可得性、连续性和研究区特殊性等原则,以及对景观4种类型熵的说明,

表1 高渠乡景观复合生态系统可持续评价指标体系

Table 1 The index system of sustainability for the landscape ecosystem in Gaoqu Commune

目标层	准则层	次准则层	指标层	
			一级指标	二级指标(代码)
景观复合生态系统可持续性评价	熵流	景观服务能力(A)	自然	人均耕地面积(A1)
				水域及水利设施面积(A2)
				林地面积(A3)
			经济	单位面积粮食产量(A4)
				牛羊数量(A5)
				人均纯收入(A6)
		景观服务需求(B)	社会	道路密度(A7)
				初中以上文化程度人员比例(A8)
				修建水库数(A9)
			自然	人均居住面积(B1)
				人均绿地面积(B2)
				农村安全饮用水人口(B3)
	熵产生	景观脆弱性(C)	经济	农用柴油使用量(B4)
				化肥施用量(B5)
				农药施用量(B6)
			社会	文化教育费用支出(B7)
				居民日常生活支出(B8)
				医疗费用支出(B9)
		景观应对能力(D)	自然	坡耕地面积(C1)
				耕地退化面积(C2)
			经济	农用塑料薄膜使用量(C3)
				农业人口比例(C4)
			社会	外出打工人口比例(C5)
				贫困人口比例(C6)
		景观应对能力(D)	自然	有效灌溉面积(D1)
				造林面积(D2)
			经济	技术人员比重(D3)
				农业商品化水平(D4)
			社会	城镇化率(D5)
				乡村从业人员数(D6)

分别从自然、经济和社会3个子系统进行研究区具体指标的选取。在选择景观服务能力指标时将耕地、水域和林地作为自然子系统能够提供景观服务的物质资料指标,将粮食、牛羊和收入作为反映经济系统能够提供景观服务的生存资料指标,将道路密度、初中以上文化程度人员比例、修建水库数作为反映社会系统能够提供景观服务的基础设施资料指标,其中修建水库数指标对于改善和提升研究区粮食供给和水源供给等景观服务作用巨大,通过初中以上文化程度人员比例反映研究区的受教育程度,借此来反映研究区提供文化服务的能力;在选择景观服务需求指标时考虑到较难获得景观服务使用主体的需求数据,因此通过农户实际占用、消耗和消费的资源量来间接代表其对景观服务的需求,通过选择人均居住面积、人均绿地面积和农村安全饮用水人口指标来间接反映农户对于自然系统的居住、绿地面积和饮用水的需求,通过农用柴油使用量、化肥使用量和农药施用量等的消耗,来间接反映农户对经济系统的柴油、化肥和农药的需求,通过文化教育费用支出、居民日常生活支出和医疗费用支出来间接反映农户对社会系统的文化教育、医疗等服务的需求;在选择景观脆弱性指标时考虑到研究区的景观脆弱性主要体现在生态环境恶化和贫困方面,因此选择与环境相关的坡耕地面积和农用塑料薄膜使用量,与贫困相关的耕地退化、农业人口比例、外出打工人口和贫困人口比例。景观应对能力则选择与改善生态环境和提高经济水平相关的指标,包括有效灌溉面积、造林面积、技术人员比重、农业商品化水平、城镇化率和乡村从业人数。

2.2.3 基于信息熵的景观可持续评价模型

将信息熵引入景观可持续性评价中进行熵变分析和可持续性评价,即通过计算熵流、熵产生和总熵变,分析景观的承载力、活力和有序度,通过计算综合评价得分值,分析景观的可持续性。熵流、熵产生和总熵变的符号表征和计算公式见表2。首先,通过指标标准化数值,计算指标信息熵,利用指标信息熵计算指标权重;其次,采用年份信息熵计算4种类型熵;最后,通过指标标准化数值和指标权重,计算景观可持续得分数值。公式如下:

表2 景观复合生态系统的熵流、熵产生和总熵变的

符号和计算公式

Table 2 The symbols and calculation formulae of entropy exchange, entropy production and total entropy change of landscape ecosystem

项目	变量和公式	表征
景观服务能力	S_{j1}	系统无序度
景观服务需求	S_{j2}	系统无序度
景观脆弱性	S_{j3}	系统无序度
景观应对能力	S_{j4}	系统无序度
熵流	$S_{j2}-S_{j1}$	生态系统承载力
熵产生	$S_{j3}-S_{j4}$	生态系统活力
总熵变	$(S_{j2}-S_{j1})+(S_{j3}-S_{j4})$	生态系统有序度、健康水平

注:变量说明见公式(6)。

对评价指标采用极差法进行标准化,使结果落到[0,1]区间。正向指标和负向指标的归一化方法分别如下:

$$\text{正向指标: } Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } Z_{ij} = \frac{\max(X_j) - X_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (2)$$

对 m 个年份的 n 个评价指标进行信息熵的计算,则第 i 项指标的信息熵为:

$$E_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m \frac{q_{ij}}{q_i} \ln \frac{q_{ij}}{q_i} \quad (3)$$

式中 E_i 为第 i 项指标的信息熵; q_{ij} 为指标原始数据的标准化数值; q_i 为第 i 项指标所有年份的标准化数值求和,即:

$$q_i = \sum_{j=1}^m q_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

指标权重 Q_i 可由信息熵计算获得,则第 i 个指标的熵权为:

$$Q_i = (1 - E_i) / \left(n - \sum_{i=1}^n E_i \right) \quad (5)$$

对 m 个年份的 n 个评价指标进行熵变的计算,则上文所构建的4种类型熵变为:

$$\Delta S_{jk} = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n \frac{q_{ij}}{q_j} \ln \frac{q_{ij}}{q_j} \quad (6)$$

式中 ΔS_{jk} 为构建的第 k ($k=1,2,3,4$) 类熵第 j 年的熵变值,即本文景观可持续性评价研究中的景观服务能力、景观服务需求、景观脆弱性和景观应对能力的熵变数值; q_{ij} 为指标原始数据的标准化数值; q_j 为

2018年6月

第 j 年所有指标的标准化数值求和,即

$$q_j = \sum_{i=1}^n q_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m) \quad (7)$$

最后,计算景观复合生态系统可持续总体得分值为:

$$G = \sum Q_i Z_j \quad (8)$$

式中 G 为景观可持续总体得分值, G 值越大,可持续性就越强; Q_i 为指标 i 的权重; Z_j 为第 j 年评价指标原始数据的标准化值。

2.3 数据来源

(1)2009年和2014年高渠乡土地利用数据。2009年的高渠乡土地利用数据来源于米脂县第二次全国土地调查数据^[28];2014年的高渠乡土地利用数据源自监督分类、人工目视解译2014年7—8月份米脂县的航片遥感影像数据(摄影比例尺为1:1万,绝对航高为6400m,航摄影类型为RMKA,焦距为153.039mm)^[29]。

(2)2009—2014年米脂县统计年鉴数据。源于《米脂县国民经济统计年鉴(2009—2014年)》^[30],其中主要包括高渠乡的单位面积粮食产量、牛羊数量、修建水库数、农村安全饮用水人口、农用柴油使用量、化肥施用量、农药施用量、农用塑料薄膜使用量、农业人口比例、坡耕地面积、林地面积、有效灌溉面积、造林面积、城镇化率和乡村从业人数。

(3)2009—2014年农户社会经济调研数据。源于2009—2014年期间课题组每年7—8月,通过参与式调研法共获取的高渠乡调研问卷1600份,有效问卷有1504份,有效率为94%,问卷数据主要包含农户家庭基本信息、收支状况、耕地面积及农作物投入产出等信息。

3 结果及分析

3.1 基于指标时间序列变化及其熵权分析

依据公式(1)和公式(2)可计算出可持续评价指标标准化后的数值。如表3所示,在2009—2014年间,景观服务能力指标的标准化数值中,除人均耕地面积和单位面积粮食产量,其他指标都呈上升趋势,这两个指标数值的减少率分别为37%和88%,不利于其景观服务能力和可持续性的提高。景观服务需求指标中,除农村安全饮用水人口、农药施用量和文化教育费用支出三个指标,其它指标数值

在研究期间大幅上升,其中居民日常生活支出和医疗费用支出指标数值的增长率最大,都为100%,说明研究区居民在这几方面对景观服务的需求不断增大,若不合理控制将不利于景观可持续。景观脆弱性指标中,农用塑料薄膜使用量、外出打工人口比例在研究期间升高,数值增长率分别为100%和50%,不利于可持续性的提高。景观应对能力指标中,造林面积、技术人员比重和有效灌溉面积的指标数值呈下降趋势,其中有效灌溉面积指标数值的减少率最大,为98%,会降低景观的应对能力,影响景观可持续性的提高。

依据公式(3)和公式(5)计算高渠乡可持续评价指标的信息熵和熵权的结果见表4(见第1283页)。其中,二级层次指标体系的熵权在计算过程中出现极端值,运用改进的熵权法对其进行修正^[31]。在景观服务能力指标中,水域及水利设施面积和单位面积粮食产量的比重较大,是因为在黄土高原丘陵沟壑区粮食生产和水资源对于居民的日常生活至关重要,对研究区的景观可持续性影响大。在景观服务需求指标中,农药施用量和农用柴油使用量的熵权较大,是因为高渠乡居民的主要生产活动是农业生产,与农业生产有关的指标对景观可持续性影响较大。在景观脆弱性指标中,农用塑料薄膜使用量、农业人口比例和贫困人口比例的熵权较大,是因为研究区属于高度敏感生态脆弱区,贫困和生态环境破坏是最典型的问题,相对于景观脆弱性的其他指标,这三个指标对景观可持续性影响较大。在景观应对能力指标中,造林面积、技术人员比重和农业商品化水平的熵权较大,是因为这些指标是改善研究区生态环境和贫困状况的关键因素,对景观应对能力的影响较大。

3.2 景观的总熵变及可持续性分析

依据公式(6)和表2可计算景观的熵流、熵产生和总熵变,计算结果见表5(见第1283页)。下面分别对研究区景观演化过程中的熵变与景观可持续性进行分析。

3.2.1 高渠乡景观复合生态系统发展与演化的熵变分析

景观服务能力在2009—2014年间逐年增大(表5,见第1283页),说明高渠乡的生产力水平不断

表3 高渠乡景观可持续评价指标的标准化值数据

Table 3 The standard data of the sustainable evaluation index of the landscape in Gaoqu Commune

指标类型	指标(代码)	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
景观服务	人均耕地面积(A1)	1.00	0.00	0.24	0.16	0.37	0.63
能力指标	水域及水利设施面积(A2)	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
(A)	林地面积(A3)	0.00	0.16	0.38	0.53	0.63	1.00
	单位面积粮食产量(A4)	1.00	0.00	0.31	0.21	0.16	0.12
	牛羊数量(A5)	0.00	0.39	0.03	0.94	0.84	1.00
	人均纯收入(A6)	0.00	0.34	0.31	0.74	0.84	1.00
	道路密度(A7)	0.00	0.16	0.53	0.74	0.74	1.00
	初中以上文化程度人员比例(A8)	0.00	0.75	1.00	0.50	1.00	1.00
	修建水库数(A9)	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
景观服务	人均居住面积(B1)	0.99	0.87	0.81	1.00	0.58	0.00
需求指标	人均绿地面积(B2)	1.00	0.84	0.63	0.50	0.34	0.00
(B)	农村安全饮用水人口(B3)	0.03	0.06	0.00	1.00	0.35	1.00
	农用柴油使用量(B4)	1.00	1.00	0.03	0.00	0.00	0.14
	化肥施用量(B5)	1.00	0.58	0.74	0.00	0.97	0.77
	农药施用量(B6)	0.98	0.01	0.01	0.00	0.00	1.00
	文化教育费用支出(B7)	0.00	1.00	0.64	0.91	0.22	0.28
	居民日常生活支出(B8)	1.00	0.81	0.78	0.35	0.14	0.00
	医疗费用支出(B9)	1.00	0.29	0.41	0.72	0.69	0.00
景观脆弱性	坡耕地面积(C1)	0.00	1.00	0.87	0.87	0.87	0.87
指标	耕地退化面积(C2)	0.00	0.43	1.00	1.00	1.00	1.00
(C)	农用塑料薄膜使用量(C3)	1.00	0.18	0.11	0.09	0.04	0.00
	农业人口比例(C4)	0.00	0.00	1.00	0.50	0.50	1.00
	外出打工人口比例(C5)	1.00	0.75	0.38	0.00	0.75	0.50
	贫困人口比例(C6)	0.00	0.20	0.80	0.90	1.00	1.00
景观应对	有效灌溉面积(D1)	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
能力指标	造林面积(D2)	0.20	1.00	0.33	0.17	0.00	0.00
(D)	技术人员比重(D3)	0.00	0.42	0.08	0.00	1.00	0.00
	农业商品化水平(D4)	0.40	0.00	0.04	0.95	0.05	1.00
	城镇化率(D5)	0.00	0.30	0.37	0.71	0.85	1.00
	乡村从业人数(D6)	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00

增大;景观服务需求除2013年外,其余年份都不断降低,总体呈下降趋势,说明高渠乡的复杂性降低。景观脆弱性和景观应对能力在2009—2014年间不断在上下波动,其中景观脆弱性总趋势下降(表5),说明各子系统存在的问题没有进一步恶化,景观的应对能力以2012年为转折,先增大后减小,变化幅度小,说明其应对问题的能力提高幅度较小。熵流在2009—2014年间呈下降趋势(表5),说明该区域景观的承载力提高。熵产生在研究期间的数值上下波动,呈上升趋势,说明景观的活力较差。总熵变在研究期间除2012年外,其余年份均呈下降趋势,说

明高渠乡不断朝着健康有序的方向发展,而有序度不稳定体现出该区域的生态脆弱性和内部复杂性。

3.2.2 高渠乡景观复合生态系统可持续性分析

景观服务能力指标得分在研究期间呈上升趋势(图1a),景观服务需求指标得分除2013年较2012年小幅度上升外,其余年份逐年下降,且以2010年为转折点,2010年后景观服务能力指标得分大于景观服务需求指标得分,且景观服务能力指标权重(Q_A)大于景观服务需求指标权重(Q_B),说明研究区景观服务能力大于景观服务需求,有利于提高景观可持续性。

景观脆弱性指标得分和景观应对能力指标得

2018年6月

表4 高渠乡景观复合生态系统可持续评价指标的信息熵和熵权

Table 4 Information entropy and entropy weights of the sustainable development evaluation indicators for the landscape ecosystem in Gaoqu Commune

指标类型	具体指标(代码)	E_i	Q_i
景观服务能力指标(A)	人均耕地面积(A1)	0.80	0.11
	水域及水利设施面积(A2)	0.78	0.13
	林地面积(A3)	0.82	0.10
	单位面积粮食产量(A4)	0.71	0.16
	牛羊数量(A5)	0.77	0.13
	人均纯收入(A6)	0.85	0.08
	道路密度(A7)	0.84	0.09
	初中以上文化程度人员比例(A8)	0.88	0.07
	修建水库数(A9)	0.78	0.13
	人均居住面积(B1)	0.89	0.05
景观服务需求指标(B)	人均绿地面积(B2)	0.86	0.06
	农村安全饮用水人口(B3)	0.64	0.16
	农用柴油使用量(B4)	0.53	0.21
	化肥施用量(B5)	0.89	0.05
	农药施用量(B6)	0.42	0.25
	文化教育费用支出(B7)	0.82	0.08
	居民日常生活支出(B8)	0.81	0.08
	医疗费用支出(B9)	0.85	0.06
	坡耕地面积(C1)	0.90	0.08
	耕地退化面积(C2)	0.88	0.10
景观脆弱性指标(C)	农用塑料薄膜使用量(C3)	0.56	0.37
	农业人口比例(C4)	0.74	0.21
	外出打工人口比例(C5)	0.87	0.11
	贫困人口比例(C6)	0.85	0.13
	有效灌溉面积(D1)	0.90	0.06
	造林面积(D2)	0.62	0.23
景观应对能力指标(D)	技术人员比重(D3)	0.44	0.35
	农业商品化水平(D4)	0.66	0.21
	城镇化率(D5)	0.85	0.09
	乡村从业人员数(D6)	0.90	0.06

表5 2009—2014年高渠乡基于信息熵的景观复合生态系统熵值与总熵变

Table 5 Values of entropy exchange, entropy production and total entropy change of the landscape ecosystem in Gaoqu Commune based on information entropy from 2009 to 2014

指标类型	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
景观服务能力	0.39	0.81	1.10	1.16	1.18	1.18
景观服务需求	1.10	1.08	1.01	0.97	0.99	0.79
景观脆弱性	0.39	1.42	0.92	0.81	0.91	0.89
景观应对能力	0.68	0.71	0.79	0.84	0.80	0.62
熵流	0.71	0.28	-0.08	-0.19	-0.18	-0.39
熵产生	-0.30	0.71	0.13	-0.03	0.11	0.27
总熵变	0.39	0.36	0.05	0.81	-0.08	-0.12

分在研究期间均呈波动上升趋势(图1a),除2010年和2011年外,其余年份景观脆弱性指标得分小于景观应对能力指标得分,且景观应对能力指标权重(Q_D)大于景观脆弱性指标权重(Q_C),说明在2009—2014年间高渠乡的景观应对能力提高,有利于提高景观可持续性。

该景观可持续得分在2009—2014年间总体上升(图1b),说明其可持续性在研究期间不断提高。2010年和2011年得分较低是由于研究区域遭受极端天气侵扰,经济损失严重,2014年得分最高是因为研究区的经济社会发展和环境治理水平在研究期间不断提高。

4 结论与讨论

在前人研究成果的基础上,本文基于景观可持续性视角,构建基于熵变理论的景观可持续评价指标体系,并以典型生态脆弱区——高渠乡为例,探

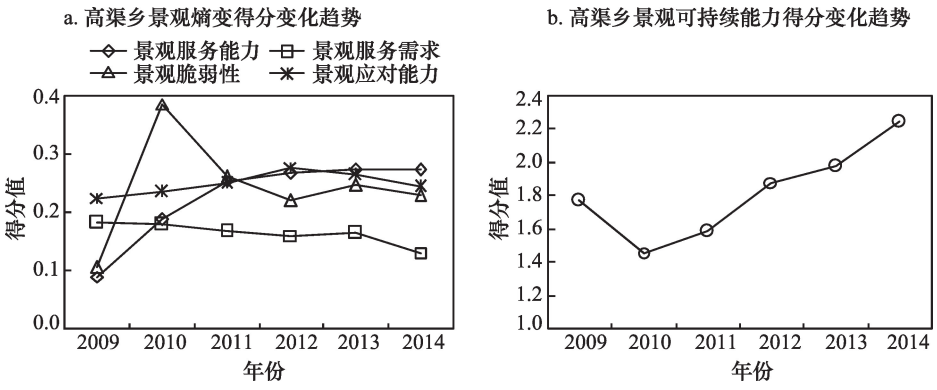


图1 2009—2014年高渠乡景观复合生态系统熵流、熵产生和可持续得分变化趋势
Figure 1 Score trends of the landscape entropy exchange, entropy production and landscape ecosystem sustainable in Gaoqu Commune from 2009 to 2014

讨论熵变分析方法评价景观可持续性的适宜性,得出的结论如下:

(1)熵变分析方法能够有效进行生态脆弱区景观可持续性评价研究。将熵权与指标时间序列变化分析相结合,有助于提出针对性措施^[13],有效解决各子系统存在的不利于景观可持续的问题,提高景观可持续性;

(2)通过景观熵变分析可知,研究区景观复合生态系统的承载力不断增大,系统朝着健康有序方向发展。通过景观可持续得分值的分析可知,研究区可持续性有一定程度提高;

(3)依据评价指标和可持续发展时间序列变化分析可知,提高景观可持续性的措施有在确保生态环境好转的前提下,提高人均耕地面积和单位面积粮食产量;降低生产能耗,在保证农业产值的基础上合理控制农药和农用柴油的使用量;合理控制农用塑料薄膜的使用量,大力发展二三产业,促进经济发展;提高有效造林面积和灌溉面积。

熵变分析方法可以从复合生态系统的本质出发,揭示其真正的可持续水平,且基于熵变理论构建的指标体系能够有效反映景观复合生态系统的结构、功能和演化机制^[14],丰富景观可持续评价的指标体系。本文从景观可持续性视角,构建基于熵变理论的景观可持续评价指标体系,通过分析复合生态系统各个子系统的熵值变化,更好地理解研究区环境的演化和可持续性^[23],这为基于熵变理论进行可持续性研究提供了鲜活的案例,也为类似区域的可持续性分析积累经验。

虽然熵变理论可以从景观复合生态系统发展演化的角度来分析研究区可持续发展能力,但还不能进行水平等级标准数值的计算,不利于空间尺度的横向对比分析^[14]。因此,进一步耦合其他方法来弥补横向比较的不足,就成为今后研究的重点任务之一。

参考文献(References):

- [1] 鲍梓婷. 景观作为存在的表征及管理可持续发展的新工具[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. [Bao Z T. Landscape as the representation of existence and new tool for sustainability management [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.]
- [2] 孙晓兵. 生态退耕背景下延安市土地利用变化及景观可持续研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. [Sun X B. Research on land use change and landscape sustainable in Yan'an City under the background of ecological restoration [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.]
- [3] 赵文武, 房学宁. 景观可持续性与景观可持续性科学[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2453-2459. [Zhao W W, Fang X N. Sustainable landscapes and landscape sustainability science[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 34(10): 2453-2459.]
- [4] Iris C. Bohnet, Peter C. Roebeling, Kristen J. Williams, et al. Landscapes Toolkit: an integrated model framework to assists take holders in exploring options for sustainable landscape development [J]. *Landscape Ecology*, 2011(26): 1179-1198.
- [5] Robert Axelsson, Per Angelstam, Lennart Myhrman, et al. Evaluation of multilevel social learning for sustainable landscapes: perspective of a development initiative in Bergslagen, Sweden[J]. *AMBIO*, 2013(42): 241-253.
- [6] Selman P. What do we mean by sustainable landscape[J]. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 2008, 4(2): 23-28.
- [7] Musacchio L R. The scientific basis for the design of Landscape sustainability: a conceptual framework for translational landscape research and practice of designed landscape and the six ES of landscape sustainability[J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 993-1013.
- [8] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6) : 999-1023.
- [9] Fang X N, Zhao W W, Fu B J. Landscape service capability, landscape service flow and landscape service demand: a new framework for landscape services and its use for landscape sustainability assessment[J]. *Progress in Physical Geography*, 2015, 39(6) 817-836.
- [10] 付鹏. 基于景观可持续性分析的乡村景观规划设计途径探究 [D]. 晋中: 山西农业大学, 2016. [Fu P. Approach to planning and design of rural landscape based on landscape sustainability analysis [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2016.]
- [11] 蒋欣阳. 锡林郭勒盟草原景观的时空动态和景观服务的权衡分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017. [Jiang X Y. The temporal and spatial dynamics of prairie landscape and the trade-off analysis of landscape services in Xilin Gol League[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2017.]
- [12] 徐建华, 高玉景. 地理系统演化的自组织途径、影响因素及熵标志[J]. 系统辩证学学报, 2001, 9(3): 53-57. [Xu J H, Gao Y J. The Self organizable way, influencing factors and entropy index of geographical system evolution[J]. *Systemic Dialectics Journal*, 2001, 9(3): 53-57.]
- [13] 狄乾斌, 韩雨汐. 熵视角下的中国海洋生态系统可持续发展能力分析[J]. 地理科学, 2014, 34(6): 664-671. [Di Q B. Han Y X.

2018年6月

- Analysis of sustainable development ability of China's marine ecosystem from the perspective of entropy[J]. *Geographical Science*, 2014, 34(6): 664–671.]
- [14] 林珍铭, 夏斌. 熵视角下的广州城市生态系统可持续发展能力分析[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 45–57. [Ling Z M, Xia B. Analysis of sustainable development ability of urban ecosystem in Guangzhou from the perspective of entropy [J]. *Geography Journal*, 2013, 68(1): 45–57.]
- [15] 刘军会, 邹长新, 高吉喜等. 中国生态环境脆弱区范围界定[J]. 生物多样性, 2015, 23 (6): 725 – 732. [Liu J H, Zhou C X, Gao J X. The definition of the fragile area of ecological environment in China[J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23 (6): 725–732.]
- [16] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 等. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3243–3255. [Chen C D, Jia Z Y, Wu S Y, *et al.* A bibliometrics review of Chinese studies on the application of landscape connectivity[J]. *Journal of Ecology*, 2017, 37(10): 3243–3255.]
- [17] 沈明, 沈镭, 钟帅, 等. 基于生态敏感条件的中国资源型城市去产能空间格局优化[J]. 资源科学, 2016, 38(10): 1962–1974. [Shen M, Shen L, Zhong S, *et al.* The spatial optimization of mineral industrial capacity reduction planning of resource-based cities in China based on ecological sensitive areas[J]. *Resources Science*, 2016, 38(10): 1962–1974.]
- [18] 李芹. 生态脆弱区耕地集约利用评价及农户集约行为模拟研究——以陕西省米脂县高西沟村为例[D]. 西安: 西北大学, 2013. [Li Q. The Study of intensive use of cultivated land and Simulation of intensive behavior of farmers in ecologically fragile areas —— as a case of Gaoxigou village in Mizhi County of Shaanxi Province [D]. Xi'an: Northwestern University, 2010.]
- [19] 温馨. 生态脆弱区村落类型与人类福祉相关性研究[D]. 西安: 西北大学, 2017. [W X. Correlation between village types and human well-being in ecologically fragile areas [D]. Xian: Northwestern University, 2017.]
- [20] 汤霞芳. 基于耗散结构理论的矿区生态安全评价研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015. [Tang X F. The study of ecological security evaluation of mining area based on Dissipative Structure Theory [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2015.]
- [21] 揣小伟, 黄贤金, 王倩倩, 等. 基于信息熵的中国能源消费动态及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1280–1285. [Chuai X W, Huang X J, Wang Q Q, *et al.* Energy consumption dynamics and its influencing factors in China based on information entropy[J]. *Resources Science*, 2009, 31(8): 1280–1285.]
- [22] 周子英, 段建南, 梁春风. 长沙市土地利用结构信息熵时空变化研究[J]. 经济地理, 2012, 32(4): 124–129. [Zhou Z Y, Duan J N, Liang C F. Temporal and spatial variation of land use structure based on information entropy in Changsha[J]. *Economic Geography*, 2012, 32(4): 124–129.]
- [23] 王玉明. 地理环境演化趋势的熵变化分析[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1508–1517. [Wang Y M. Entropy change analysis of evolution trend of geographical environment [J]. *Journal of Geography*, 2011, 66(11): 1508–1517.]
- [24] 柳崇健, 刘英, 徐辉. 熵流与大气系统的演变[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1251–1256. [Liu C J, Liu Y, Xu H. Entropy flow and the evolution of the atmospheric systems[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1251–1256.]
- [25] 李春华, 李宁, 史培军, 等. 基于信息熵的江苏省耕地安全系统演化分析[J]. 资源科学, 2008, (01): 43–51. [Li C H, Li N, Shi P J, *et al.* Evolution analysis of cultivated land safety system in Jiangsu Province based on information entropy[J]. *Resource Science*, 2008, (01): 43–51.]
- [26] 张妍, 杨志峰, 何孟常, 等. 基于信息熵的城市生态系统演化分析[J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1127–1134. [Zhang Y, Yang Z F, He M C, *et al.* Analysis on the evolution of urban ecosystem based on information entropy [J]. *Environmental Science Journal*, 2005, 25(8): 1127–1134.]
- [27] 王群, 陆林, 杨兴柱. 千岛湖社会—生态系统恢复力测度与影响机理[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 779–795. [Wang Q, Lu L, Yang X Z. Measurement and influence mechanism of resilience of social ecosystem in Thousand island lake [J]. *Journal of Geography*, 2015, 70(5): 779–795.]
- [28] 中华人民共和国国土资源部. 土地调查成果共享应用服务平台 [EB/OL]. [2017–05–19]. http://g.mlr.gov.cn/201701/t20170123_1430473.html. [People's Republic of China Ministry of land and resources. Land survey results sharing application service platform [EB/OL]. [2017–05–19]. http://g.mlr.gov.cn/201701/t20170123_1430473.html.]
- [29] 北京数字空间科技有限公司. 地理国情监测云平台 [EB/OL]. [2017–05–19]. <http://www.dsac.cn/>. [Beijing Digital View Technology Co., Ltd. Cloud platform for geographical conditions monitoring. [EB/OL]. [2017–05–19]. <http://www.dsac.cn/>.]
- [30] 米脂县统计局. 米脂县国民经济统计资料 2009–2014 [M]. 米脂县: 米脂县统计局, 2009–2014. [Mizhi County Bureau of Statistics. Mizhi County National Economic Statistics 2009–2014 [M]. Mizhi County: Mizhi County Bureau of Statistics, 2009–2014.]
- [31] 汪妮, 方正, 解建仓. 改进的熵权法在再生水价值评价中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 416–420. [Wang N, Fang Z, Jie J C. Application of improved entropy weight method in evaluation of reclaimed water resources[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2012, 28(4): 416–420.]

Landscape sustainable development in highly sensitive ecological fragile areas

JIA Hui^{1,2}, CHEN Hai^{1,2}, MAO Nanzhao^{1,2}, NIE Xia^{1,2}

(1. Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity of Shaanxi Province, Xi'an 710127, China)

Abstract: Scientific evaluation of complex landscape ecosystem sustainable development is important to grasp whether healthy development is occurring. Employing dissipative structure theory to illustrate the evaluation and dynamic evolution of landscape sustainability in ecological fragile areas has important theoretical and practical significance. This study has been carried out by three principal aspects in the process of sustainable evaluation, and a case study was conducted for Gaoqu commune in Mizhi County, an ecological fragile area. First, the evaluation index system of sustainable development of the landscape was formed based on the dissipative structure theory and landscape nature- economy- society complex system theory. Second, the appraisable model of landscape sustainability was set up based on entropy change. Last, input- output entropy, metabolism entropy production and total entropy, three types of information entropy, were calculated to analyze the order, complexity and sustainability of landscapes. We found that the evaluation index system accurately grasps the characteristic of landscapes and is useful for indicating function and complex evolutionary mechanisms. The appraisable model reflects landscape sustainable development. From 2009 to 2014, trends in the input-output entropy of the Gaoqu commune declined, and the metabolism entropy production did not. On the whole, the orderliness degree of the commune increased in a healthy direction. The numerical value of sustainable development in the study area increased, and landscape sustainability is on the rise. Some optimization measures are put forward to promote landscape sustainable development.

Key words: landscape sustainability; theory of entropy analyze; evaluation; integrated ecosystem of landscape; Gaoqu Commune, Mizhi County, Shaanxi Province