

# 黄土侵蚀沟谷土地生态系统健康评价 ——以杜家石沟为例

刘迪<sup>1,2</sup>, 陈海<sup>1,2</sup>, 张行<sup>1,2</sup>, 毛南赵<sup>1,2</sup>, 梁小英<sup>1,2</sup>

(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:**健康的生态系统被认为是环境管理的终极目标,进行生态系统健康研究对探索区域生态系统可持续发展具有重要意义。以黄土侵蚀沟谷杜家石沟为例,基于“压力—状态—响应”模型(PSR),利用格网分析法进行数据提取与成图,分析了杜家石沟土地生态系统健康的空间分异,利用地形起伏度及其分布指数探究了生态系统健康与地形之间的空间关系。结果表明:(1)杜家石沟土地生态系统健康空间差异十分显著。健康高值区(27.02%)分布于山地丘陵及其边缘深切沟谷,健康低值区(33.37%)分布于中东部沟谷及其二级侵蚀沟,该类区域应作为格局调控与生态恢复的重点关注区域;(2)生态系统健康与地形起伏度关系密切。人类活动压力随地形起伏度的升高而降低,这一过渡伴随着健康状态值以及响应的差异变化,并最终影响土地生态系统健康的空间分异。

**关键词:**土地生态系统健康; PSR模型; 空间分异; 地形起伏度; 杜家石沟

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0100-07

## Assessment of Land Ecosystem Health of Loess Erosion Valley —A Case Study of Dujiashi Valley

LIU Di<sup>1,2</sup>, CHEN Hai<sup>1,2</sup>, ZHANG Hang<sup>1,2</sup>, MAO Nanzhao<sup>1,2</sup>, LIANG Xiaoying<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** The ecosystem health is considered to be the ultimate goal of environmental management, and it is of great significance to explore the sustainable development of regional ecological system. Taking Dujiashi Valley of Mizhi County, Shaanxi Province in the loess hilly-gully region as research area, we constructed a multi-indices evaluation system to investigate ecosystem health based on the Pressure-State-Response (PSR) model. The spatial differentiation of the ecosystem health of Dujiashi Gully was analyzed, and the relationship between ecosystem health and geographical environment was explored by the terrain relief and its distribution index. The conclusions were drawn as the followings. (1) Spatial differentiation of the comprehensive ecosystem health of Dujiashi Valley was significant. The region with high value of ecosystem health distributed in the hills and the marginal gully area, which accounted for 27.02% of the study area; meanwhile, the region with low value of ecosystem health distributed in the central gully and its secondary erosion gully of middle and eastern gully and its extend area, which made up 33.37% of the study area and should be the focus of landscape pattern regulation and ecological restoration. (2) Ecosystem health was closely related to terrain relief. With the rising of relief, the pressure of human activities decreased. At the same time, this process had an impact on the change of regional productivity, landscape structure and habitat quality, finally affected the spatial differentiation of land ecosystem health degree.

**Keywords:** land ecosystem health; PSR model; spatial differentiation; terrain relief; Dujiashi Valley

目前,地球已经进入“人类世”新纪元,人类控制社会经济走向并极大改变地球表面环境,深刻影响地

球表层系统演化与发展<sup>[1]</sup>。土地生态系统是地球表层系统中自然要素与人类活动相互作用而形成的统

一整体<sup>[2]</sup>,随着生态环境问题的日益严峻,土地生态系统健康愈发受到关注而成为生态系统领域的热点研究问题<sup>[3]</sup>。土地生态系统健康评价可有效区分生态系统的健康与否,为病态系统制定恢复与预防的基本对策,从而促进区域人地关系的协调。生态系统健康是指在人类干扰下生态系统自身结构与功能的完整性<sup>[4-5]</sup>。目前,我国生态系统健康领域研究范式较为统一,一般采用多因子综合评价模型进行评价,包括“压力—状态—响应”模型(Pressure-State-Response)<sup>[6-8]</sup>、“活力—组织—功能—弹性”模型<sup>[9-10]</sup>等,同时随着评价案例的增多,许多研究并不局限于固定的指标体系<sup>[11-12]</sup>。在上述研究中,PSR模型由于具备清晰的因果关系而获得更为广泛的应用<sup>[13]</sup>。作为对人类干扰具有极强响应的自然地带<sup>[14]</sup>,黄土侵蚀沟谷土地生态系统在人地关系交互背景下脆弱性凸显<sup>[15]</sup>,本文土地生态系统健康研究致力于在PSR范式下通过典型指标还原和解释“人类驱动—土地利用结构—生境状态—区域响应”的生态系统健康因果链,从而通过生态恢复促进区域土地生态系统由脆弱性向可持续性的状态转变<sup>[16]</sup>。

基于此,本文以黄土侵蚀沟谷杜家石沟为例,基于PSR模型,选取与区域紧密结合的指标,运用熵权法确定指标权重,选取格网尺度分析杜家石沟土地生态系统健康空间分异,同时基于分布指数探究生态系统健康与地形起伏度的关系,并给出空间差别化的土地生态系统保护对策,以期为区域水土保持与生境恢复提供依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

选取黄土侵蚀沟谷杜家石沟流域为研究区(37°42′16″N—37°48′09″N,109°56′40″E—110°09′08″E)。流域位于陕西省榆林市米脂县西南部,丰水期洪水向东汇入无定河,集水区总面积119.12 km<sup>2</sup>。流域含49个行政村,其中38个隶属杜家石沟乡镇,5个隶属龙镇,6个隶属县城银州。属中温带半干旱气候带,全年降雨量低,气候干燥,夏季是降雨主要季节。杜家石沟是米脂县最大的侵蚀沟,坡面完整但侵蚀切割明显,地形起伏度大,侵蚀程度中度到强度。景观敏感性较大的盐碱地广布于河谷地带,导致流域水土流失频发。杜家石沟是米脂县最大的农业生产区,农药化肥的大量使用、陡坡种植等高密度农耕行为以及近年来开挖沟坡等进行的乡镇建设致使沟谷生境质量下降,增加了区域生态系统的脆弱性;同时,在区域政策与经济利益的驱动下,农户弃耕撂荒行为频发。特殊的地形与水土

条件加之人类高强度农耕影响及城镇建设,使得流域生态环境十分脆弱且空间分异明显,为土地生态系统健康空间分异研究提供较好的研究平台。

### 1.2 数据来源与处理

研究所需数据为杜家石沟土地利用图(栅格大小为10 m)、DEM数字高程图和实地农户调研数据。(1) DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),重采样为10 m×10 m并提取高程与坡度,利用ArcGIS 10.2水文分析模块提取杜家石沟范围;利用ArcGIS 10.2邻域分析工具建立5×5矩形移动窗口分别提取邻域栅格高程最大值与最小值并求取差值,生成研究区地形起伏度用于后续分析;(2) 杜家石沟土地利用图来源于2015年米脂县遥感影像数据与野外实测数据,以该年高分一号影像为数据来源,通过ENVI 5.1进行几何校正与图像增强,并进行监督分类与人工目视解译获取,解译结果的Kappa指数达到0.83,满足生态系统健康评价精度要求。研究区景观类型划分为耕地、果园、林地、草地、水域、城镇建设用地(含居住地、交通用地、工矿用地)、荒地(含盐碱地、撂荒地)7类;(3) 农户个体与村庄整体数据源于外业问卷调查,于2017年7月10—28日以村落或户为单位集中进行问卷发放并回收,发放问卷456份,回收有效问卷430份,有效率94.3%。

研究区为黄土侵蚀沟谷,景观破碎且数据栅格精度较高。为反映生态系统健康空间分异,同时考虑网格内斑块数量与指标精度要求,生成0.1 km×0.1 km网格作为多源数据集成评价的基本单元进行地理空间信息捕捉,实现指标空间化<sup>[2,10]</sup>。

### 1.3 指标体系构建

“压力—状态—响应”模型着重构建人类活动与生态环境之间的因果链,用于分析自然环境所处压力、现状与响应之间的相互关系<sup>[6]</sup>,有助于全面反映土地生态系统健康状态以及人地互馈关联<sup>[2]</sup>。本文将PSR模型引入研究区土地生态系统健康研究,构建杜家石沟土地生态系统健康框架模型(图1)。

目前,由于人类活动与自然环境关联程度不断加深,土地利用替代自然要素在短期内主导环境变化和区域发展已成客观事实<sup>[17]</sup>,因此本文主要选取与农耕活动密切关联的土地利用指标指示区域环境遭受的外部压力;在多重胁迫下生态系统的结构、功能产生变化,经典的景观生态风险指标<sup>[14]</sup>可以很好地表征系统结构面临多源胁迫的无序程度,而在遥感研究中NDVI表征系统生产力也已为学界共识,区域生境敏感性与物种繁衍能力的综合分析通过InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and

Trade offs Model) 生境质量模型量化, 该模型可有效反映沟谷环境在人类活动下引致的生境变化; 生态环境的状态与演变催生政府与农户主体的响应, 在黄土侵蚀沟谷, 响应与退耕还林密切相关, 宏观生态恢复与农户个体对生态环境的认知是主体响应的两种方式。基于以上分析, 本文土地生态系统健康评价框架具有清晰的因果关联, 即能够表征人类驱动—土地利用结构—生境状态—区域响应的对应环节, 从而完善土地生态系统健康因果链。

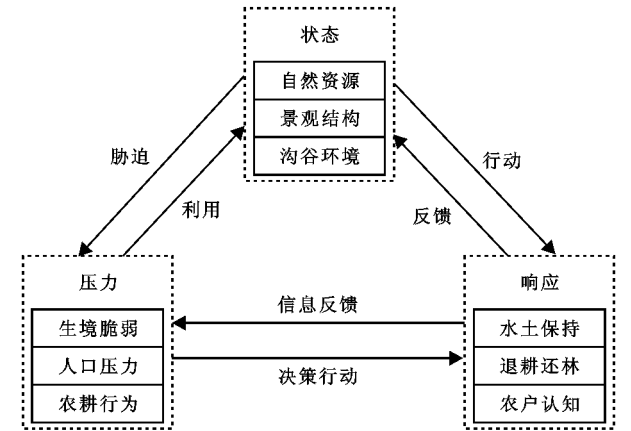


图 1 杜家石沟土地生态系统健康框架

基于土地生态系统健康框架构建相应的杜家石沟土地生态系统健康评价指标体系(表 1)。表中准则层、指标层权重利用客观熵权法计算得到, 熵权法计算方法可参看相关文献<sup>[7,18]</sup>。

表 1 土地生态系统健康指标体系

准则层(权重)	指标层(权重)	指标属性
压力(0.332)	农户密度(0.291)	—
	农药化肥施用强度(0.093)	—
	土地垦殖率(0.118)	—
	建设用地面积比例(0.107)	—
	≥25°坡耕地面积比例(0.052)	—
	坡度可达性(0.149)	—
状态(0.406)	道路可达性(0.190)	—
	NDVI(0.295)	+
	景观损失指数(0.367)	—
	生境质量(0.338)	+
响应(0.262)	林草覆盖率(0.368)	+
	生态退耕率(0.208)	+
	农户认知水平(0.424)	+

1.3.1 压力指标 压力指在人类粮食生产与日常生活影响下土地生态系统所受的胁迫程度<sup>[2]</sup>。根据黄土沟谷农耕种植特点与地形特殊性, 并经过实地勘察与调研, 本文压力指标采用人口密度、农户干扰指数、外部可达性 3 个方面综合衡量。其中, 人口密度根据村庄常住人口进行核算, 外出打工等流动人口暂不考虑。农户干扰指数<sup>[6,10]</sup>表示农户生产生活形成的干扰体对生态系统

施加的影响, 本文利用农药化肥施用强度表征农户施用农药、化肥对耕地、果园的土壤污染程度<sup>[11]</sup>; 土地垦殖率、建筑用地面积比例、≥25°坡耕地面积比例分别通过耕地面积、城镇建设用地面积以及坡耕地面积占单位土地面积比例进行核算<sup>[19]</sup>。外部可达性是农户对各类景观单元干扰强度的刻画, 本文通过外部可达性建立空间层面上农户干扰与坡度、距离之间的有机联系。距道路距离越远, 坡度越大, 景观单元所受农户胁迫越小。坡度可达性与道路可达性对农户干扰强度的影响分别通过式 Slope、式 Road(式 1)求得。

$$\text{Slope} = \begin{cases} 1 & \text{slope} \leq 5^\circ \\ -0.05\text{slope} + 1.25 & 5^\circ < \text{slope} < 25^\circ \\ 0 & \text{slope} \geq 25^\circ \end{cases} \quad \text{Road} = \frac{1}{1 + (d/a_i)}$$

(1)

式中:  $d$  为景观单元距道路的距离;  $a_i$  为距离衰减系数, 表示各地类属性对道路的依赖程度, 根据建筑用地、耕地、果园、水域、草地、林地和荒地对道路依赖程度的不同;  $a_i$  分别取 1 000, 500, 500, 100, 10, 1, 1<sup>[20]</sup>。1.3.2 状态指标 土地生态系统健康状态指标主要遴选能够表征区域生产力、系统结构及功能状态的指标<sup>[20]</sup>, 本文系统健康状态通过 NDVI、景观损失指数、生境质量进行度量。遥感研究表明, 植被生产能力与植被指数具有明显正相关<sup>[6]</sup>, 植被指数是衡量区域生产力的最佳指示因子, 因此归一化植被指数可有效表征土地生态系统的能量与活动性<sup>[2]</sup>。

系统结构与过程是生态系统功能的基础<sup>[21]</sup>, 合理的景观结构、稳定的生态过程与区域可持续发展密切相关<sup>[22]</sup>, 同时系统格局的量化与配置是生态系统稳定与功能优化的前提。本文基于景观生态风险评价(Landscape ecological risk)模型(式 2), 构建景观损失指数反映系统结构状态, 该模型依托于景观结构的空

间显示对生态学过程及区域环境进行探测, 进而反映生态系统结构的复杂性与多样性<sup>[14]</sup>。损失指数由干扰度  $E_i$  与脆弱度  $F_i$  表示; 干扰度表征景观异质性与多样性, 由破碎度、分离度、优势度构成; 脆弱度通过表征景观类型内部结构的易损性来反映景观面对外界干扰的弹性能力。

$$\text{ERI}_k = \sum_{i=1}^n \frac{S_{ki}}{S_k} \sqrt{E_i \times F_i} \quad (2)$$

式中:  $n$  为景观类型数量;  $E_i$  为景观类型  $i$  的干扰度;  $F_i$  为景观类型  $i$  的脆弱度;  $S_{ki}$  为第  $k$  个评价单元第  $i$  类景观类型面积;  $S_k$  为第  $k$  个评价单元面积。参考前人研究<sup>[23-24]</sup>, 干扰度  $E_i$  各项指标在 Fragstats 4.2 中计算得到; 脆弱度  $F_i$  依据专家打分法归一化求得。

生境质量是指生态系统提供适宜个体与种群持续发展生存条件的能力<sup>[25]</sup>,是区域生态安全保障的关键环节<sup>[26]</sup>。生境质量通过高度强调生态系统在外界干扰下自身结构与功能的维持状态可间接表征生态系统健康程度。InVEST 模型是目前较为成熟且应用最多的生态系统服务评估模型<sup>[27]</sup>。本研究选取生境质量(Habitat Quality)模块表征生态系统健康状态,即生境质量越好的区域,物种生存潜力越高,生态系统越健康,反之亦然。模块计算公式如下:

$$Q_{xj} = H \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right];$$
$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left( \frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

式中: $Q_{xj}$ 为土地利用  $j$  中  $x$  栅格的生境质量; $H_j$ 为  $j$  的生境适宜度; $D_{xj}$ 为  $j$  中  $x$  栅格的生境退化度; $k$ 为半饱和常数; $z$ 为归一化常量,取值 2.5。 $R$ 为胁迫因子个数; $W_r$ 为胁迫因子  $r$  的权重; $Y_r$ 为胁迫因子栅格数; $r_y$ 为栅格  $y$  胁迫因子值; $i_{rxy}$ 为栅格  $y$  的胁迫因子  $r_y$  对栅格  $x$  的胁迫水平; $\beta_x$ 为胁迫因子对栅格  $x$  的可达性; $S_{jr}$ 为生境类型  $j$  对胁迫因子  $r$  的敏感程度。

模型是 4 个变量的函数:胁迫因子影响距离、生境的胁迫敏感性、生境与胁迫源的距离及土地受法律保护程度。本文主要考虑前 3 个变量的影响,且胁迫因子对生境的影响随距离的增大呈指数型衰减。威胁因子与生境类型选择、最大影响距离与敏感度设置结合模型使用说明<sup>[28]</sup>、相关学者研究<sup>[26,29]</sup>以及当地主管官员的访谈,结果见表 2。

表 2 生境类型对威胁因子的敏感度、威胁因子

生境类型	生境 适宜度	最大影响距离以及权重				
		威胁因子				
		居住地	交通用地	工矿用地	荒地	耕地
水域	0.9	0.9	0.85	0.9	0.4	0.3
果园	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3
林地	1	0.75	0.7	0.8	0.5	0.75
草地	0.6	0.55	0.5	0.55	0.8	0.35
最大影响距离/km	0.8	0.8	1	0.25	0.25	
权重	1	0.6	0.4	0.05	0.2	

1.3.3 响应指标 响应是指区域主体对生态环境健康状态变化作出的积极反应,目的是通过生态恢复等改善沟谷环境,使其维持结构良好,功能持续的状态,实现土地生态系统健康的持续。在黄土丘陵沟壑区,由于水土保持工程措施的滞后,在响应指标上主要考虑区域生态建设,本文通过林草地覆盖率、生态退耕率及农户认知水平来衡量。林草地覆盖率为林草地面积占单位面积土地的比例、生态退耕率为村落退耕面积占村落总耕地面积的比例;农户认知水平基于农

户个体问卷调查,是农户对退耕还林还草政策重要性认知的打分,农户对该政策的理解与支持可有效助推退耕还林政策的施行。

1.4 地形起伏度及其分布指数

地形起伏度是对区域地形切割深度的数值度量,是表征地貌类型的重要指标,尤其是在地表切割较强地区,地形起伏度的成图成为该类区域地貌过程分析的重要步骤<sup>[30]</sup>。黄土侵蚀沟谷是我国典型的水力侵蚀单元,水力侵蚀形成地表的深切割,表征局域相对高差的地形起伏度在本区域有着更为明显的应用价值。区域内地形对人类活动的限制性和对土地利用空间分布的自然选择性,使区域内人为胁迫在地形起伏度梯度上的分布呈现规律变化。本文结合分布指数<sup>[31]</sup>旨在探讨地形起伏度与生态系统健康之间的空间关联。分布指数通过消除不同地形起伏度等级面积差异和不同健康组分面积差异来描述健康组分在地形起伏度梯度上的分布状况。公式如下:

$$P = (S_{ie}/S_i)(S/S_e) \quad (4)$$

式中: $P$ 为分布指数; $S_{ie}$ 为第  $e$  种地形起伏度下第  $i$  类健康等级面积; $S_i$ 为第  $i$  类健康等级总面积; $S_e$ 为第  $e$  种地形起伏度总面积; $S$ 为研究区总面积。 $P>1$ ,说明特定健康等级在特定地形起伏度上处于优势分布。

2 结果与分析

2.1 土地生态系统健康空间分异

表 1 中各项指标在极差标准化后利用 ArcGIS 10.2 进行差异权重的空间叠加,并基于评价单元进行分区统计,进而得到准则层及土地生态系统健康空间分布图(图 2)。利用自然断点法将准则层指标及土地生态系统健康分为低值区、中值区、高值区 3 级(表 3),在此基础上分析杜家石沟土地生态系统健康空间分异。

表 3 准则层指标与生态系统健康分级标准

分级	压力	状态	响应	生态系统健康
低值区	0.07~0.32	0.19~0.44	0.09~0.37	0.03~0.16
中值区	0.33~0.44	0.45~0.59	0.38~0.53	0.17~0.27
高值区	0.45~0.75	0.60~0.91	0.54~0.89	0.28~0.49

2.1.1 PSR 准则层空间分异 图 2A 中景观单元所受外部压力大致呈现中部高、四周低的空间分布格局,在东部谷口呈现明显的高值“倾泻”。压力由低到高的区域分别占研究区面积的 28.46%,40.98%,30.56%。整体上看,中东部沟谷地区压力较高,距离沟谷较远的丘陵山区压力相对较低。中东部沟谷包括两大部分:一是中部川道、南北两侧沟壑沿线及东部谷口;二是中部沟谷及其延伸区。前者是人口与建筑用地密集区,乡镇建设斩坡取土破坏边坡稳定性从

而导致生态压力增大。与之相比,人口稀少且建筑用地较为分散的丘陵冠顶生态系统受到的干扰较小;后者是耕地集中区,围绕川道区域扩散分布,区域内土地垦殖率与道路通达性较高,景观所受的胁迫较大,耕地陡坡种植时常导致严重的局域水土流失。丘陵山区由于人口密度较小、距离沟谷较远、建筑用地星散从而保持较低的农户胁迫。压力指标能够对生态系统退化起到预警作用,当农耕及城镇建设压力超过沟谷土地生态系统自身调节能力时,会造成系统结构与功能的破坏,导致生态系统退化。

图2B中,状态值整体呈现中北部及东部谷口较高的空间分布格局。状态低值区集中于川道乡镇建设中心区及其北面沟谷、东部沟谷及其南北两侧,占研究区面积的31.47%。在持续的人类干扰下,景观结构变化为异质不连续的斑块镶嵌体,景观破碎化起始于中部沟谷进而向北部村落延伸;区域内建设用地与荒地等景观类型的集中分布反映了生境质量的下降。中值区占研究区面积的45.33%,此类区域地形最为复杂多样,人类活动对景观的改造程度趋于中等,整体上景观结构基本稳定、水土保持功能得以发挥。高值区集中在南部村落及西北少部分地区,占研究区面积的23.2%。此类区域由于地形起伏度较高、农户干扰程度较弱而系统结构稳定;广阔的林草地覆盖能够发挥正常的水源涵养与生态保育功能,生境质量较高,故健康状态良好。作为自然与农耕生态系统的复合体,沟谷土地生态系统的状态与特征是自然与人为因子相互作用的结果,本文状态指标能够充分反映系统结构、功能互动,从而完善健康因果链中间环节。

图2C中,响应值表现为更为复杂的空间分异。研究区生态建设主要受退耕还林政策的推动,因此响应值的大小与林草地覆盖有很大的空间关联性。低值区集中于东南部,占研究区面积的25.5%。南部低值区主要位于海拔较高的置耕梯田,耕地集中连片,故林草地覆盖率较低。中值区分布于研究区大部分区域,占整体面积的45.03%。区域内有广阔的林草地覆盖,且与沟谷地形密切相关,区域内生态退耕率较低且农户对退耕还林政策重要性的认知程度有限。响应高值区面积集中位于北部,占研究区面积的29.48%。西北部林草地覆盖率最好;北部林草地覆盖率一般,但是近年来生态退耕率较高且农户对退耕还林政策有较高的认知;东部谷口由于临近米脂县城且耕作条件优越,林草地覆盖程度与退耕率均较低,但区域内农户普遍认为退耕还林政策十分重要,故响应值较高。对于黄土侵蚀沟谷,退耕还林政策落实是PSR模型评价终点,也是沟谷生态恢复起点。生态

措施的制定可有效缓解区域生境压力,从而促进健康因果链的螺旋式发展,实现生态可持续。

2.1.2 土地生态系统健康空间分异 土地生态系统健康是压力—状态—响应的集成表达。图2D中,健康低值区占研究区面积的37.63%,分布于中部主干沟谷及其二级侵蚀沟内、东部沟谷及其南北延展区。区域内人口密集,农业发达,农户干扰十分显著;耕地面积集中但受地形分割影响,景观类型破碎化程度较高;加之位于集水槽低洼区域,水土流失十分严重,区域生态环境较差;林草地分离度高,退耕率低,故而系统活力较低,生境质量较差,自然生态系统面临退化的风险。健康中值区占研究区面积的38.82%,呈散射状分布于健康低值区周围,该区域地形最为复杂多样。区域内人类干扰中等,系统内部结构基本完整,生境质量良好。健康高值区占研究区总面积的23.54%,主要分布于山地丘陵区及其边缘深切沟谷,海拔较高且地形起伏度较大。区域内人口较少,农户干扰十分有限;梯田广布且集中成片,景观分离度较低,生态系统较为稳定;虽然退耕率较低但深切沟谷内林草地广布,生境质量与系统弹性均较高。

## 2.2 生态系统健康与地形起伏度的关系

为厘清生态系统健康与地理环境的耦合关系,本文以地形起伏度为单一因子,结合地形分布指数考察生态系统健康的空间分布规律(图3),地形起伏度梯度通过自然断点法分级获取。图3中,根据地形起伏度级别变化,生态系统健康变化趋势大致分为3类:持续减少型,即健康低值区;稳定型,即健康中值区;持续增加型,即健康高值区。具体来看,健康低值区在1级梯度上为优势分布,随梯度增加,分布优势持续降低。较低的地形起伏度指示较高的地形完整性与可达性,这些区域与农户活动关系密切,受农户胁迫程度较高,生境质量较差,景观破碎度与脆弱性高;中值区在2~3级梯度上呈现微弱的优势分布,但整体上随梯度变化不明显;高值区在3~5级梯度上呈现优势分布,随梯度增加,分布优势明显上升。较高的地形起伏度说明局域相对高差较大,不适宜农户从事农耕且可达性差,区域内广泛分布的林草地与退耕地使得景观稳定性与生境质量较高。总体来看,人类活动压力随地形起伏度的升高而降低,呈现出从人工生态系统向半自然生态系统的过渡,这一过渡伴随着景观结构、生境质量以及响应值的差异变化,并最终影响土地生态系统健康的空间分异。

基于以上分析,本文结合不同起伏度上优势健康等级分布给出空间差别化的生态保护措施:(1)低地形起伏度区段上健康低值为优势分布,即沟谷坝地,

此类区域为土地生态系统健康调控热点。应严格管控农户农耕行为,控制农药化肥以及塑料薄膜施用量,合理进行乡镇扩张,严禁斩坡取土进行楼房建设,对已存在的高坡度开挖土地进行硬化并围挡,保护坝地和水田,缓解人地矛盾;(2) 高地形起伏度区段上

健康高值为优势分布,即深切梁麓区,此类区域为土地生态系统健康调控冷点。除了禁止坡耕地开发的同时贯彻国家退耕还林还草政策外,暂不需要进行过多的人为防治措施,重点借助土地生态系统自身的恢复力实现生态系统健康的自然调控。

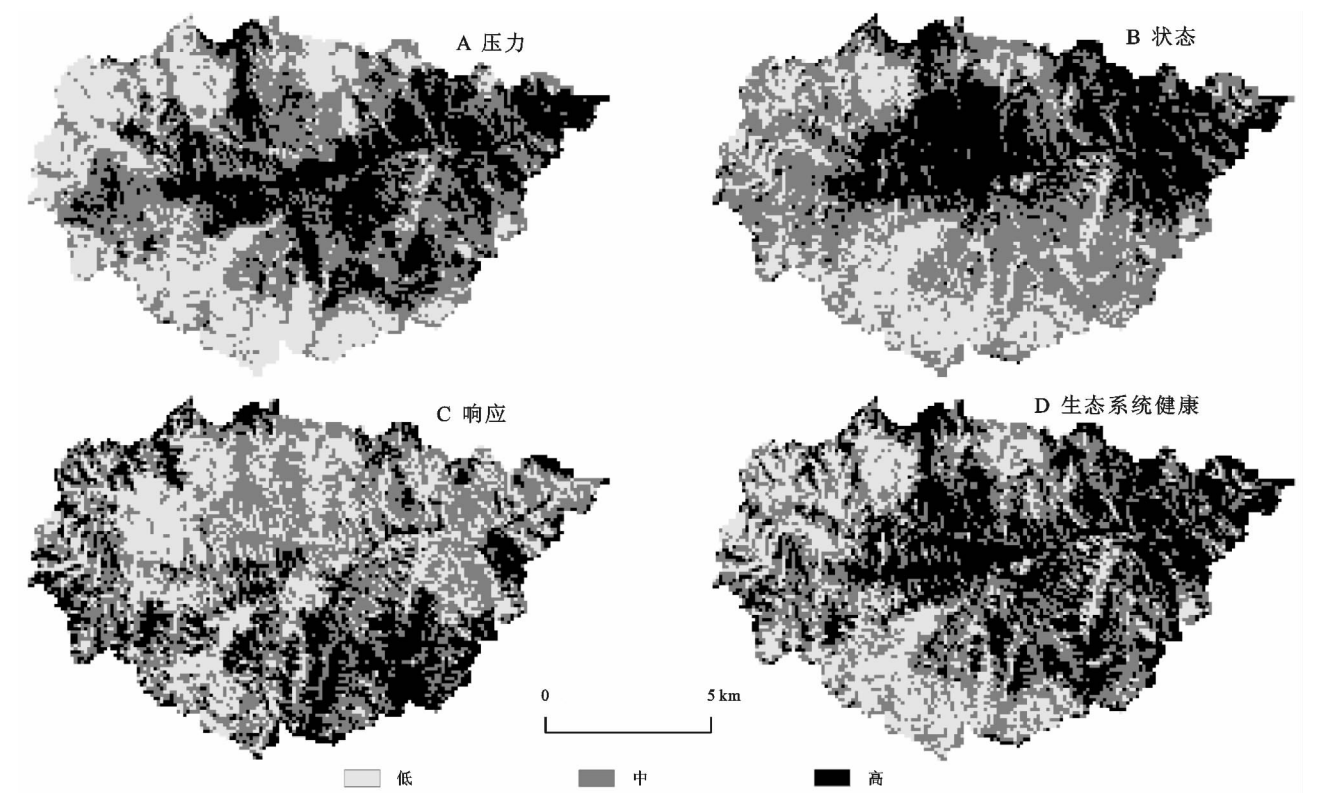


图 2 杜家石沟准则层指标与土地生态系统健康空间分布

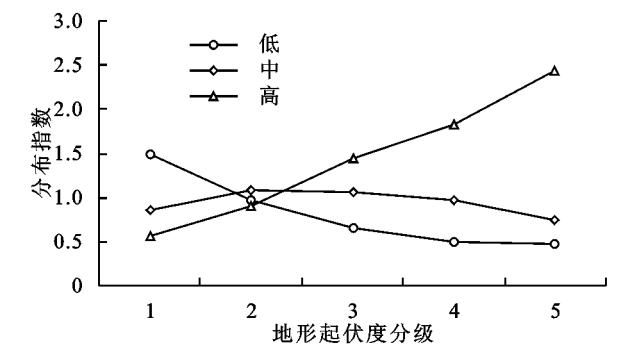


图 3 土地生态系统健康与地形起伏度的分布关系

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 研究区土地生态系统健康空间分异显著。健康高值占研究区面积的 27.02%,主要分布于山地丘陵及其边缘深切沟谷海拔较高且地形起伏度较大的区域;健康低值分布于中部沟谷及其二级侵蚀沟、东部沟谷及其延伸区,占研究区面积的 33.37%,该类区域应作为格局调控与生态恢复的重点区域。

(2) 生态系统健康与地形起伏度关系密切。健康低值区在 1 级梯度上为优势分布,随梯度增加,分布优

势持续降低;中值区在 2~3 级梯度上呈现微弱的优势分布,但整体上随梯度变化不明显;高值区在 3~5 级梯度上呈现优势分布,随梯度增加,分布优势明显上升。总体上来看,人类活动压力随地形起伏度的升高而降低,这一过渡伴随着健康状态值以及响应的差异变化,最终影响土地生态系统健康的空间分异。

3.2 讨论

本文依托于 PSR 范式通过典型指标还原和解释人类驱动—土地利用结构—生境状态—区域响应的生态系统健康因果链。作为健康因果链中间环节,各项准则指标致力于提高 PSR 对沟谷土地生态系统健康的解释力,并取得较好的研究结果。然而,作为一个复合系统,土地生态系统自然本底脆弱性与人类活动复杂性交织,故本文建立的评价体系尚不够完善,且不涉及过程性指标。在今后的研究中应加强区域土壤侵蚀、水土流失等生态过程指标的监测与获取,从而实现黄土沟谷区生态系统健康的客观评价。

评价单元选取上,本文利用格网分析法对研究区进行分割,可较好表征沟谷生态系统健康空间分异。与行政单元空间显示相比,格网分割能够避免大范围

区内同质性等信息平滑的缺点。但是,本文网格尺度选取略显主观。在黄土丘陵沟壑区,使用子流域作为多源数据评价单元,能够保证单元内自然环境的统一及不同单元的区间差异,可以有效对健康格局进行整体分析。基于子流域对健康格局进行空间可视化与分析是今后的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 傅伯杰. 地理学:从知识、科学到决策[J]. 地理学报, 2017,72(11):1923-1932.
- [2] 何新,姜广辉,张瑞娟,等. 基于 PSR 模型的土地生态系统健康时空变化分析:以北京市平谷区为例[J]. 自然资源学报, 2015,30(12):2057-2068.
- [3] Sheldon F, Peterson E E, Boone E L, et al. Identifying the spatial scale of land use that most strongly influences overall river ecosystem health score[J]. Ecological Applications, 2012,22(8):2188-2203.
- [4] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering[J]. Ecological Engineering, 2012,45(8):24-29.
- [5] 刘焱序,彭建,汪安,等. 生态系统健康研究进展[J]. 生态学报, 2015,35(18):5920-5930.
- [6] 徐浩田,周林飞,成遣. 基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究[J]. 生态学报, 2017, 37(24):1-11.
- [7] 杜娟,陈英. 基于 PSR 模型的民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2016,23(1):215-220.
- [8] 罗遵兰,赵志平,孙光,等. 松花江流域湿地生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2015,22(1):105-109,114.
- [9] 陆丽珍,詹远增,叶艳妹,等. 基于土地利用空间格局的区域生态系统健康评价:以舟山岛为例[J]. 生态学报, 2010,30(1):245-252.
- [10] 李卫海,李阳兵,邵景安,等. 基于景观尺度的城市生态系统健康时空过程:贵阳市案例研究[J]. 环境科学学报, 2011,31(2):440-448.
- [11] Wang Z T, Yang L, Cai G J, et al. A Quantitative Health Evaluation of an Eco-Economy in the Semi-Arid Loess Plateau of China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2015,21(7):1884-1902.
- [12] 赵鹏宇,崔婧,冯文勇,等. 淳沱河山区县域农业生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2015,22(3):315-319.
- [13] 宁立新,马兰,周云凯,等. 基于 PSR 模型的江苏海岸带生态系统健康时空变化研究[J]. 中国环境科学, 2016,36(2):534-543.
- [14] 彭建,党威雄,刘焱序,等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015,70(4):664-677.
- [15] 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.
- [16] Peng J, Du Y Y, Liu Y X, et al. How to assess urban development potential in mountain areas: An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems[J]. Ecological Indicators, 2016,60:1017-1030.
- [17] 杜悦悦,彭建,赵士权,等. 西南山地滑坡灾害生态风险评价:以大理白族自治州为例[J]. 地理学报, 2016,71(9):1544-1561.
- [18] 张宁,田美荣,高吉喜,等. 近 35 年科尔沁沙地生态系统健康诊断研究:以巴林右旗为例[J]. 水土保持研究, 2016,23(4):206-211.
- [19] 李远艳,安裕伦,杨广斌. 基于 PSR 模型的喀斯特地区生态系统健康动态评价:以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2015,22(6):279-286.
- [20] 李景刚,何春阳,李晓兵. 快速城市化地区自然/半自然景观空间生态风险评价研究:以北京为例[J]. 自然资源学报, 2008,23(1):33-47.
- [21] 刘明华,董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价[J]. 地理研究, 2006,25(5):930-938.
- [22] 曹祺文,张曦文,马洪坤,等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J]. 地理学报, 2018,73(5):843-855.
- [23] 李玉珍,张永福,安方舟. 基于 GIS 的新和县土地利用生态风险分析[J]. 水土保持研究, 2015,22(1):172-175,180.
- [24] 王文杰,张永福,王慧杰. 基于 GIS 干旱区绿洲县域土地利用变化生态风险分析:以新疆泽普县为例[J]. 水土保持研究, 2016,23(6):216-220.
- [25] 吴健生,曹祺文,石淑芹,等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11):3457-3466.
- [26] 刘春芳,王川,刘立程. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制:以榆中县为例[J]. 地理研究, 2018,37(2):419-432.
- [27] Wong C P, Jiang B, Kinzig A P, et al. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy [J]. Ecology Letters, 2015,18(1):108-118.
- [28] Richard S, Rebecca C K, Spencer W, et al. InVEST 3.3.0 User's Guide[M/OL]. 2015. <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/habitat-quality.html>.
- [29] Liu D, Liang X Y, Chen H, et al. A quantitative assessment of comprehensive ecological risk for a loess erosion gully: a case study of Dujiashi Gully, northern Shaanxi Province, China. Sustainability, 2018, 10, 3239.
- [30] 周自翔,李晶,任志远. 基于 GIS 的关中—天水经济区地形起伏度与人口分布研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8):951-957.
- [31] 哈凯,丁庆龙,门明新,等. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系:以河北省怀来县为例[J]. 地理研究, 2015,34(5):909-921.