

# 生态脆弱区景观生态风险时空分异及其地形梯度分析 ——以陕西省米脂县为例

刘迪<sup>1,2</sup>, 陈海<sup>1,2</sup>, 张敏<sup>1,2</sup>, 商舒涵<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:**目前,生态脆弱区已成为景观生态风险评价研究的热点区域之一。以黄土丘陵沟壑区陕西省米脂县为研究区,以2009年、2015年土地利用数据为基础数据,将研究区划分为耕地、林地、草地、果园、水域、城镇工矿用地和荒地7类土地利用类型,基于干扰度与脆弱度构建生态风险模型,并结合地形分布指数进一步分析了生态风险随高程和坡度梯度的动态变化规律,得出如下结论:(1)米脂县土地利用格局变化明显,耕地面积减少3 168.45 hm<sup>2</sup>,林地与荒地面积分别增加1 102.95、1 609.47 hm<sup>2</sup>;(2)米脂县2009年、2015年景观生态风险指数分别为0.221 7、0.228 9,且呈现西高东低,中间高南北低的空间分布格局。Ⅰ级风险主要转化为Ⅱ级风险,面积比例由28.17%降为13.59%;Ⅲ级风险达到研究区面积的1/3,主要由Ⅱ级风险区转化而来;Ⅳ与Ⅴ级风险区面积变化不大,面积比例整体上升3.9%;(3)生态风险等级时空分布随高程和坡度梯度变化显著。Ⅰ级风险向低海拔、低坡度转移的趋势明显;Ⅱ与Ⅲ级风险均向高海拔转移;Ⅳ与Ⅴ级风险在地形梯度上无明显的风险转移。

**关键词:**景观生态风险; 时空分异; 地形梯度; 米脂县; 生态脆弱区

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0239-06

## Analysis of Spatial-temporal Distribution of Landscape Ecological Risk in Ecologically Vulnerable Areas and Its Terrain Gradient —A Case Study of Mizhi County of Shaanxi Province.

LIU Di<sup>1,2</sup>, CHEN Hai<sup>1,2</sup>, ZHANG Min<sup>1,2</sup>, SHANG Shuhan<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:** Ecologically fragile area has become one of the hot spots of landscape ecological risk assessment research. Taking Mizhi County of Shaanxi Province in the Loess Plateau as research area, we divided the land-use types into seven types, including farmland, orchard, forests, grassland, water body, construction land and wasteland, with the help of the land-use pattern data in 2009 and 2015. The spatial-temporal distribution of ecological risk was analyzed through the ecological risk model integrated the interference degree and the vulnerability degree. The distribution of ecological risk under the terrain gradient was revealed by the terrain distribution index. Several conclusions were drawn as the follows. (1) The land-use pattern in Mizhi County had experienced considerable changes. The area of farmland decreased by 3 168.45 hm<sup>2</sup>, while forestland and wasteland increased by 1 102.95 hm<sup>2</sup> and 1 609.47 hm<sup>2</sup>, respectively. (2) The integrated ecological risk index increased from 0.221 7 in 2009 to 0.228 9 in 2015. The spatial distribution pattern of ecological risk was higher in the west than in the east as well as the middle was higher than the north and south. The grade I risk was mainly converted to grade II risk, and the area ratio was reduced from 28.17% to 13.59%. The grade III risk reached 1/3 of the area of the research area, which was mainly transformed from the grade II risk. The grade IV and V risk area changes were limited, and the area ratio increased by 3.9%. (3) The spatial-temporal distribution of landscape ecological risk was presented on the trend of terrain distribution index clearly. The trend of grade I risk shifting to low altitude and low slope was obvious, and both grade II and III risk were transferred to high altitude. There was no obvious risk transfer phenomenon

收稿日期:2018-08-27

修回日期:2018-09-28

资助项目:国家自然科学基金(41671086,41271103)

第一作者:刘迪(1993—),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为综合自然地理与景观生态。E-mail:lcx@stumail.nwu.edu.cn

通信作者:陈海(1971—),男,山西侯马人,博士,教授,主要从事土地利用与农户行为研究。E-mail:chw@nwu.edu.cn

of grade IV and V risk on the terrain gradients.

**Keywords:** landscape ecological risk; spatial-temporal distribution; terrain gradient; Mizhi County; ecologically fragile areas

生态脆弱区指生态系统结构稳定性较差,抵抗外来干扰及维持自身稳定性能力较弱,易于生态退化且难以自我修复的区域<sup>[1]</sup>。黄土丘陵沟壑区作为我国典型的生态脆弱区<sup>[2]</sup>,区内黄土土质疏松,加之降雨集中,植被稀疏,成为我国土壤侵蚀最为严重的地区之一。伴随微观异质性农户行为干扰与退耕还林政策二元驱动影响的深入,自然基底与人为扰动频繁交互,景观类型更迭剧烈,景观格局较为破碎,生态系统稳定性及恢复力差,已成为景观生态风险评价研究的热点区域之一<sup>[3]</sup>。

生态风险是生态系统组分受到外界压力而产生不利生态影响的可能性<sup>[4-5]</sup>。基于景观格局指数的生态风险评价方法能够快速识别土地利用异质性产生的干扰与生态系统自身脆弱性<sup>[6]</sup>,为明晰景观生态风险空间分异特征提供了有效的方法支撑<sup>[7]</sup>。近年来,基于景观格局的生态风险研究已成为常见的风险研究范式,已在流域<sup>[8-10]</sup>、绿洲<sup>[11-12]</sup>、海岸带<sup>[13-14]</sup>等自然地域以及矿区<sup>[15]</sup>、行政区<sup>[16-17]</sup>等人文地域等诸多区域取得应用,但立足于黄土丘陵沟壑区等生态脆弱且对全球变化具有极强响应的自然地带的景观生态风险评价研究还不多见<sup>[3]</sup>。在地形起伏度较大的黄土丘陵沟壑区,地形特征决定景观与人类活动的分布状况<sup>[18]</sup>,生态风险受地形影响呈现较为复杂的空间分布规律<sup>[10]</sup>。赵岩洁<sup>[8]</sup>、徐羽<sup>[19]</sup>等通过风险与地形因子叠加厘清了风险在地形因子上的面积比例分布;胡金龙等<sup>[10]</sup>通过计算地形等级上风险指数说明风险对地形的简单响应。分布指数作为与地形因子关联的无量纲函数,在阐释景观格局与地形关系方面应用广泛<sup>[18,20]</sup>,目前基于地形分布指数深入揭示风险与地形关系的相关研究较少。

基于此,本文以陕西省米脂县为例,基于干扰度与脆弱度构建景观生态风险评价模型,揭示研究区风险时空变化特征,并结合地形分布指数探究生态风险分布模式,以期为黄土丘陵沟壑区典型地域的风险管控与生态恢复提供依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

米脂县(109°49′—110°29′E,37°39′—38°05′N)位于陕西省榆林市东南,总面积 1 178 km<sup>2</sup>,地处黄土丘陵沟壑区(图 1)。属中温带半干旱气候带,全年降雨量低,夏季是降雨主要季节。境内地势东西高中间

低,以中部无定河川道为集水区;西北部以梁峁景观为主,临近榆林风沙区,风蚀沙化明显;东部以峁状丘陵景观为主,坡陡沟深,共同构成米脂县沟壑纵横、梁峁起伏的地貌景观。米脂县土地利用类型以耕地、林草地为主;山地主要种植经济林,川坝地及梯田多种植粮食与经济作物,有玉米、土豆、红葱、杂粮等,构成多样性生产景观。作为国家首批退耕还林示范县,1999—2015 年持续退耕使林草地面积持续增加,在城镇化推进、社会经济转型驱动下,耕地类型转化与弃耕撂荒行为频发;加之自然条件过渡性与多样性,研究区土地利用类型结构产生较大变化,为揭示景观生态风险的时空演化提供了良好的研究平台。

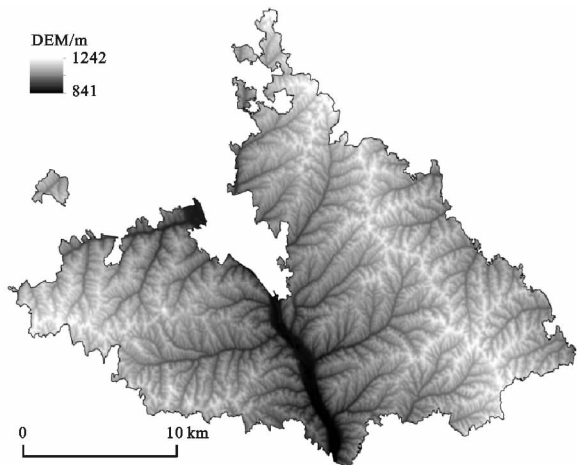


图 1 米脂县数字高程

### 1.2 数据来源与处理

数据来源涉及土地利用、地形、行政边界等多类数据。2009 年米脂县土地利用类型数据基于第二次全国土地利用 1:1 万调查数据集获得;2015 年米脂县土地利用类型数据以该年高分一号影像为数据源,该影像为 2 m 全色、8 m 多光谱融合数据,在 ENVI 5.1 软件下进行几何校正、影像增加处理后,结合典型地物图斑样点数据和 2009 年米脂县二调土地利用数据进行监督分类和目视解译获取<sup>[21]</sup>,解译结果的 Kappa 指数达到 0.86,满足风险评价精度要求。参照全国土地利用现状分类标准(GB/T21010—2017)与研究区地类情况,将两期土地利用类型划分为耕地、果园、林地、草地、水域、城镇村及工矿用地、荒地(含盐碱地)7 类,并统一重采样为 10 m×10 m 土地利用栅格用于后续分析与比较。DEM 数据来源于中科院计算机网络信息中心地理空间数据云 ASTER GDEM 数据集 30 m DEM 栅格(<http://www.>

gscloud.cn/),通过GPS测点,插值重采样为10 m DEM并提取高程、坡度<sup>[22]</sup>。

### 1.3 空间化途径

为探讨生态风险指数空间分异,本文利用等间距系统采样将研究区划分为362个2 km×2 km网格(图1),将计算得到的风险数值赋予风险小区中心点。生态风险指数作为一种典型的区域变量<sup>[14]</sup>,可以用地统计学中半方差函数来衡量其在空间上的变化规律。公式<sup>[19]</sup>如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_{i+h}) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

式中: $\gamma(h)$ 是样本距为 $h$ 的半方差值; $h$ 是样本距(变程); $Z(x_{i+h})$ 是位置 $x_{i+h}$ 处的生态风险值; $Z(x_i)$ 是位置 $x_i$ 处的生态风险值; $N(h)$ 是间距为 $h$ 的样本对的总个数。

本文采用地统计软件GS+7.0实现样本变异函数最优拟合<sup>[16,23]</sup>。由于球状模型模拟结果最优,本文生态风险空间分析基于球状模型进行拟合,同时借助ArcGIS 10.2空间分析工具进行普通克里金插值,实现风险数值空间化。

### 1.4 景观生态风险指数构建

生态风险的大小取决于生态系统内部各个景观类型受到外部干扰的强度以及内部脆弱性大小。本文充分考虑不同景观类型对外界风险源的抵抗能力以及自身脆弱性,从景观类型结构出发,根据景观组分的面积比重,选用干扰度和脆弱度建立景观格局与生态风险之间的经验联系,构建景观生态风险指数模型。其中,ERI计算公式<sup>[17]</sup>为:

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

式中: $n$ 为景观类型的数量; $E_i$ 为景观类型 $i$ 的干扰指数; $F_i$ 为景观类型 $i$ 的脆弱度指数; $S_{ki}$ 为第 $k$ 个风险小区内第 $i$ 类景观类型的面积; $S_k$ 为第 $k$ 个风险小区的总面积。

景观干扰度反映不同景观类型代表的生态系统受到干扰的程度。生态系统所受干扰越大,风险越大。不同景观类型所受外界干扰的大小可以反映在其景观结构的变化上<sup>[12]</sup>。干扰度指数构建以景观生态学中格局分析方法为基础,选取破碎度、分离度、优势度三者叠加并赋予相应权重来度量不同景观代表的生态系统受到干扰的程度。公式<sup>[13,24]</sup>如下:

$$E_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (3)$$

依据前人研究成果<sup>[12,17]</sup>计算 $C_i$ 、 $N_i$ 、 $D_i$ 指标。 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 代表各个指标对干扰的贡献程度,且 $a+b+c=1$ 。参考文献<sup>[12,17]</sup>,重要性依次为破碎度、分离度、优势度,分别赋予权值0.5、0.3、0.2。

景观脆弱度表示各个景观类型内部结构的易损性,能够反映景观对外界风险干扰的敏感程度及抵抗能力的大小,景观类型代表的生态系统对外界的抵抗能力越小,则脆弱性越大,风险也越大,反之亦然<sup>[22]</sup>。本文在借鉴前人研究<sup>[11,23]</sup>的基础上,通过专家打分法,将景观类型脆弱性分为7个等级,经过求和标准化处理后脆弱度由低到高分别为城市与建设用地0.036,林地0.071,草地0.107,果园0.143,耕地0.179,水域0.214,荒地0.25。

### 1.5 地形因子梯度

1.5.1 高程与坡度分级 结合黄土丘陵沟壑区地貌特征,研究区最高海拔1252 m,最低海拔843 m,考虑两侧极端高程区域面积<sup>[8]</sup>,将高程分为5个梯度:高程小于940 m和高程大于1120 m各作为一级,940~1120 m区间内按照间隔60 m进行分级。坡度梯度分级依据汤国安等<sup>[25]</sup>针对黄土丘陵沟壑区所做临界坡度分级法,认为3°以下为无侵蚀区,3°~8°存在细沟但侵蚀较弱,8°~15°水力侵蚀加强,15°~25°水力渐趋加剧,25°是水力与重力侵蚀转折点也是黄土高原退耕还林界限。本文依据上述特征阈值将坡度梯度划分为5个梯度:3°以下,3°~8°,8°~15°,15°~25°,25°以上。

1.5.2 地形分布指数 为消除不同地形因子区段面积差异和不同风险组分面积比重差异,用无量纲分布指数来描述各风险组分在地形因子梯度上的分布状况。公式<sup>[18,20]</sup>如下:

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

式中: $P$ 为分布指数; $S_{ie}$ 为第 $e$ 种地形因子下第 $i$ 类风险等级面积; $S_i$ 为第 $i$ 类风险等级总面积; $S_e$ 为第 $e$ 种地形因子总面积; $S$ 为研究区总面积。 $P>1$ ,说明特定风险等级在特定地形因子上处于优势分布,且 $P$ 值越大,分布优势越明显。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用类型变化分析

如表1所示,研究期间米脂县土地利用类型总体变化不大。在土地利用类型动态变化上,草地、果园、水域以及城镇用地面积比例基本维持稳定,而耕地、林地、荒地存在明显的土地流转现象。耕地面积减少了3168.45 hm<sup>2</sup>,变化幅度为-6.16%;林地面积增加了1102.95 hm<sup>2</sup>,变化幅度为8.54%;荒地面积增加了1609.47 hm<sup>2</sup>,变化幅度为183.70%,是研究期间在面积比例变化最大的土地利用类型。减少的耕地,部分受退耕还林政策推动转化为林地,部分受农户个体抛荒转化为荒地。抛荒行为原因多样,大多受经济利

益驱动,年轻农户出外打工或响应移民搬迁政策离开农村选择主动抛荒,部分农户因年龄增长难以负担繁重农工而被迫抛荒。林地增加大多来源于耕地转入,主要受退耕还林、三北防护林工程项目的推动。

表 1 2009—2015 年米脂县土地利用类型变化 %

年份	耕地	果园	林地	草地	水域	城建用地	荒地
2009	43.41	12.35	11.01	28.55	0.73	3.17	0.78
2015	40.74	12.38	11.95	28.71	0.77	3.23	2.22

2.2 景观生态风险时空分异

本文利用 ArcGIS 10.2 自然断点法将生态风险值进行分级统计:I级( $ERI < 0.212$ )、II级( $0.212 \leq ERI < 0.224$ )、III级( $0.224 \leq ERI < 0.237$ )、IV级( $0.237 \leq ERI < 0.253$ )、V级( $ERI > 0.253$ ),且等级越高,生态风险值越大,以此得到研究区 2009 年、2015 年生态风险空间分布图(图 2)。

从生态风险空间变化来看(图 2),米脂县生态风险

空间差异显著,呈现西高东低,中间高南北低的空间分布格局。2009 年I与II级风险占研究区面积的 55%,主要分布于东部和南部。IV与V级风险占研究区面积的 19.9%,分布于中西部,呈片状直线分布,被III级风险隔开。与 2009 年相比,2015 年生态风险维持前期的整体空间分布格局,但各个等级风险面积比例与空间位置发生较大变化。I级风险面积由 28.17%降为 13.59%,是面积变化最大的风险等级,主要转化为II级风险,集中在东部的印斗、姬岔。II级风险面积由 26.83%增加至 29.74%,期间伴随 I 级风险的转入与自身向 III 级风险的转出。III 级风险面积扩大较明显且多已联接成片,达到研究区面积的 1/3。IV 与 V 级风险面积变化不大,但空间格局变化明显,桥河岔西部 IV 级风险区内出现 V 级风险核心,石沟 IV 与 V 级风险区核心缩小,同时桃镇 IV 级风险的出现以及 III 级风险的扩展使该区域形成风险值的第 4 个高值区。

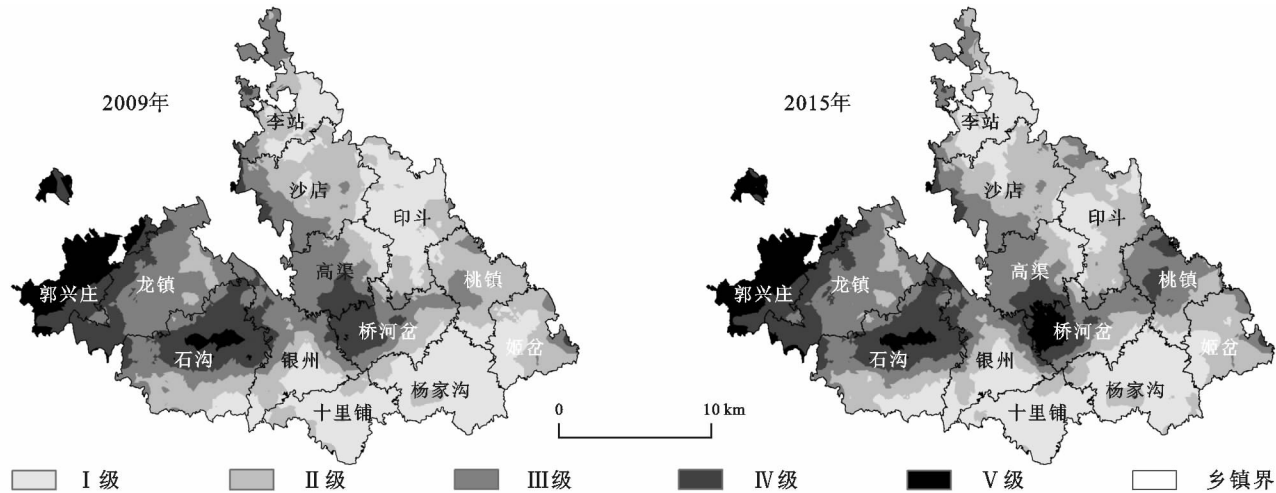


图 2 米脂县 2009—2015 年景观生态风险空间分布

从生态风险动态变化来看,2009 年、2015 年米脂县景观生态风险指数<sup>[9]</sup>分别为 0.221 7、0.228 9,风险值上升 3.25%。依据风险数值的变化可知 362 个风险小区中有 234 个单元风险值上升,占单元总数的 64.64%,说明大多数区域风险逐渐升高。为了更好地说明风险值变化的动态特征,本文采用生态风险转移矩阵<sup>[13]</sup>说明各个风险等级面积转化情况(表 2)。表 2 中,研究期间风险转移类型除各个风险级别保持不变之外,主要有 I-II, I-III, II-III, II-IV, III-IV, III-V, IV-V 7 类等级增加的风险转移类型以及 II-I, III-II, IV-III, V-IV 4 类等级减小的风险转移类型。结合表 2,将相邻等级风险转换面积相互抵消,即可得到风险面积转化去向: I-II 转化面积为 16 141 hm<sup>2</sup>; II-III 转化面积为 12 289 hm<sup>2</sup>; III-IV 转化面积为 4 167 hm<sup>2</sup>; IV-V 转化面积为 1 258 hm<sup>2</sup>。从风险面积转化去向可以看出,生态风险等级均在自身

风险等级的基础上转向较高级别风险,说明研究期间生态风险度虽在局部地区有所下降,但在整体上呈显著上升趋势。通过简单统计,风险等级由低到高转变的面积占研究区面积的 30.8%,而反向转变面积仅占 0.8%,风险值的显著升高揭示了米脂县生态环境的逐步恶化。

表 2 米脂县 2009—2015 年生态风险转移矩阵

hm <sup>2</sup>					
生态风险等级	I	II	III	IV	V
I	15866	145			
II	16286	18614	154		
III	1052	12443	24900	349	
IV		417	4516	15447	297
V			15	1555	5802
2009 年总计	33204	31619	29585	17351	6100
面积净变化	-17193	3435	9160	3326	1273

2.3 生态风险分布与地形的关系

为分析不同生态风险级别在地形因子上的分布情况,以高程梯度、坡度梯度为单一因子,考察两类梯度下生态风险时空分布状况并对研究结果进行对比分析。表 3、表 4 分别为生态风险与高程、坡度梯度的分布关系;数字 1—5 分别表示不同高程与坡度梯度;数值区为分布指数  $P$ ,  $P>1$ ,说明特定风险等级在特定高程或坡度上处于优势分布,且  $P$  越大,分布优势越明显; $P<1$  不显示。

由表 3 可知,2009 年Ⅰ级风险在 1,4—5 级高程位上占优势。2015 年Ⅰ级风险在 1 级高程位上优势程度增加显著,在 4—5 级高程位上则明显减小,说明Ⅰ级风险区在低海拔区有增大的趋势,在高海拔区有减小的趋势。2009 年Ⅱ级风险在 3—4 级高程位上占优势,2015 年Ⅱ级风险区向高海拔转移的趋势明显,在 4—5 级占优势。2009 年Ⅲ级风险在 1—3 级高程位上占优势且优势程度较为均一,2015 年Ⅲ级风险分布优势向高海拔转移,在 3—4 级高程位上占优势。Ⅳ与Ⅴ级风险分别在 2—3 与 2,5 级高程位上占优势,期末Ⅳ与Ⅴ级风险优势分布区间不变,但从Ⅴ级风险优势分布数值变化来看,其有向低海拔转移的趋势。

Ⅰ级风险第 1 高程位为无定河川道,为全县粮食主要产区,耕地集中分布,破碎度低,且米脂县城位于该高程等级上,景观脆弱性小。4—5 级高程位多为丘陵山区,置耕梯田与退耕林地广布。由于梯田交通通达性差,肥力低,导致农户频繁撂荒,致使风险升高。Ⅱ级风险 3—4 级高程位内丘陵冠顶分布有大量置耕梯田与平整坡地,耕地优势度高,风险较低。2015 年Ⅱ级风险向高海拔转移与其取代研究区东部大部分低风险区有关。Ⅲ级风险第 1 级高程位的川道河谷区北部临近榆林市,受区域城市化影响明显,景观干扰较大。2—3 级高程多位于沟谷向塬面过渡的沟坡地带,林地稀疏破碎,且分布有大片梁麓坡耕地,频发的水土流失使景观结构趋于破碎。2015 年Ⅲ级风险分布优势向高海拔转移与研究区东部中风险区面积的大量增加有关。Ⅳ与Ⅴ级风险 2—3 级高程主要分布于石沟与桥河岔,是米脂县最大的两条侵蚀沟,坡面侵蚀切割明显,加之土地利用开发程度强,沟谷环境恶劣,且脆弱性较大的盐碱地广布于河谷,环境易损性大。Ⅴ级风险第 5 级高程指米脂县西部梁峁,此处毗邻榆林风沙区,地形起伏较大,土壤风蚀沙化明显,耕地细碎,生态环境较为脆弱。

由表 4 可知,2009 年Ⅰ级风险在 1,4 级坡度上处于优势分布。2015 年Ⅰ级风险在 1 级坡度上优势程度凸显且在第 4 坡度上分布优势消失,反映了Ⅰ级

风险有向低坡度转移的趋势。研究期间Ⅱ级风险与Ⅲ级风险坡度优势分布相对较为和缓,分别在 2—3 级与 1—2 级坡度位上优势分布。Ⅳ级风险以 4—5 坡度为优势分布,Ⅴ级风险以 2,5 级坡度为主要优势分布,从数值来看两者分布优势均有所减小。

表 3 米脂县生态风险与高程梯度的分布关系

生态风险等级		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
1(<940 m)	2009 年	1.62	—	1.27	—	—
	2015 年	1.94	—	—	—	—
2(940~1000 m)	2009 年	—	—	1.32	1.72	1.06
	2015 年	—	—	—	1.67	1.17
3(1000~1060 m)	2009 年	—	1.03	1.32	1.22	—
	2015 年	—	—	1.22	1.23	—
4(1060~1120 m)	2009 年	1.10	1.29	—	—	—
	2015 年	1.03	1.24	1.17	—	—
5(>1120 m)	2009 年	1.80	—	—	—	1.16
	2015 年	1.39	1.30	—	—	1.05

注:“—”代表未发现,下表同。

Ⅰ级风险 1 级坡度位主要位于川道河谷坝地,风险较小。4 级坡度位内涵盖部分交通可达性较低的低覆草地,景观优势度较高,研究期间人为扰动使部分陡坡草地被占用为坡耕地,致使风险升高,从而分布优势消失。Ⅱ级风险 2—3 坡度涉及面积最广,包括丘陵斜坡地与侵蚀沟坡地。丘陵斜坡地耕地集中分布,优势度较高,沟间林草地分布成片,景观稳定,风险较低。Ⅲ级风险在川道的分布主要位于无定河米脂段上游,该区域北部与榆林市榆阳区相连,受城市化影响,距榆阳区城市建成区和农村居民点越近,人为干扰越大,风险越高。Ⅲ级风险第 2 坡度位于侵蚀沟谷外延区与人为景观主导的景观过渡带,脆弱度较高。Ⅳ与Ⅴ级风险 5 级坡度位为黄土丘陵区退耕还林下线,但受农户行为决策影响使该坡度上陡坡地与撂荒土地广布加之严重的土壤侵蚀,使景观脆弱度居高不下。该坡度段虽然林地分布,但由于土壤干层的扩大,林地难以发挥减轻水土流失的生态功能。第 2 坡度位上Ⅴ级风险分布与主干侵蚀沟谷斩坡取土式的城镇建设以及盐碱地的广泛分布有莫大关系。

结合表 3—5,生态风险等级时空分布随高程和坡度梯度变化明显。研究期间Ⅰ级风险向低海拔、低坡度转移的趋势十分显著;Ⅱ与Ⅲ级风险均向高海拔转移,其对坡度梯度变化的响应均不明显;Ⅳ与Ⅴ级风险由于研究期间面积变化较小,在高程与坡度梯度上均无明显风险转移现象。各等级生态风险在地形梯度上呈现的分布优势差异与黄土丘陵沟壑区特殊的地形地貌条件、多样的农业种植结构有关,而研究期间各等级风险随地形不同程度的转移则与研究

区农户撂荒、盐碱地转入、城乡建设向侵蚀沟谷的延伸密不可分。

表 4 米脂县生态风险与坡度梯度的分布关系

生态风险等级		I	II	III	IV	V
1(<3°)	2009 年	1.18	—	1.14	—	—
	2015 年	1.39	—	1.06	—	—
2(3°~8°)	2009 年	—	1.02	1.04	—	1.03
	2015 年	—	1.03	1.03	—	1.02
3(8°~15°)	2009 年	—	1.02	—	—	—
	2015 年	—	1.04	—	—	—
4(15°~25°)	2009 年	1.03	—	—	1.01	—
	2015 年	—	—	—	1.01	—
5(>25°)	2009 年	—	—	—	1.21	1.20
	2015 年	—	—	—	1.17	1.18

表 5 生态风险等级在地形梯度上的优势分布区间

生态风险等级	高程梯度		坡度梯度	
	2009 年	2015 年	2009 年	2015 年
I	1,4—5	1,4—5	1,4	1
II	3—4	4—5	2—3	2—3
III	1—3	3—4	1—2	1—2
IV	2—3	2—3	4—5	4—5
V	2,5	2,5	2,5	2,5

3 讨论与结论

3.1 讨论

基于黄土丘陵沟壑区特殊自然条件,本文通过构建地形分布指数,来探讨生态风险在不同高程和坡度梯度下的空间分布及其变化规律。与前期研究相比,本文不仅给出了景观生态风险的空间分异状况,也进一步揭示出不同地形因子下景观生态风险的可能分布及其变化,为针对性的风险防范提供方向性依据。

本文基于土地利用变化的景观生态风险模型,从景观格局方面探讨风险受体自然损失,为后续综合景观格局和生态学过程来探讨生态风险奠定坚实的基础。加之农户行为是造成景观格局和生态学过程变化的主要因子。因此,综合考虑景观格局与生态学过程,基于农户行为模型探讨和分析生态风险的演化模式,就为今后探讨宏观生态风险的微观驱动机理提供了有效途径。

3.2 结论

(1) 研究期间米脂县景观结构发生较大变化,充分体现了以退耕还林政策与农户行为二元主导的农耕区土地利用格局特点。持续退耕与耕地撂荒,使耕地面积不断减少,造林与抛荒面积不断增加。

(2) 米脂县生态风险指数分别为 0.221 7、0.228 9,生态风险增加。生态风险空间分异明显且呈现西高东低,中间高南北低的整体分布格局。I 级风险主要

转化为 II 级风险,面积比例由 28.17%降为 13.59%;III 风险区期末达到研究区面积的 1/3,主要由 II 风险区转化而来;IV 与 V 风险面积比例整体上升 3.9%且空间格局变化明显。

(3) 生态风险等级时空分布随高程和坡度梯度变化显著。I 级风险向低海拔、低坡度转移的趋势明显;II 级与 III 级风险均向高海拔转移;IV 级与 V 级风险在地形梯度上无明显的风险转移现象。

参考文献:

[1] 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.

[2] 冯舒,赵文武,陈利顶,等. 2010 年来黄土高原景观生态研究进展[J]. 生态学报,2017,37(12):3957-3966.

[3] 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.

[4] 张思锋,刘晗梦. 生态风险评价方法述评[J]. 生态学报,2010,30(10):2735-2744.

[5] Malekmohammadi B, Blouchi L R. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system[J]. Ecological Indicators, 2014,41(6):133-144.

[6] 张甜,刘焱序,彭建,等. 深圳市景观生态风险多尺度关联分析[J]. 生态学杂志,2016,35(9):2478-2486.

[7] 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.

[8] 赵岩洁,李阳兵,邵景安. 基于土地利用变化的三峡库区小流域生态风险评价:以草堂溪为例[J]. 自然资源学报,2013,28(6):944-956.

[9] 王娟,崔保山,刘杰. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. 环境科学学报,2008,28(2):269-277.

[10] 胡金龙,周志翔,滕明君. 基于土地利用变化的典型喀斯特流域生态风险评估:以漓江流域为例[J]. 应用生态学报,2017,28(6):2003-2012.

[11] 韩晓佳,刘小鹏,王亚娟,等. 基于景观格局的干旱区绿洲生态风险评价与管理:以青铜峡市为例[J]. 水土保持研究,2017,24(5):285-290.

[12] 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.

[13] 李加林,徐琼慧,杨磊. 浙江省海岸带景观生态风险格局演变研究[J]. 水土保持学报,2016,30(1):293-299.

[14] 田颖,李冰,王水. 江苏沿海地区景观格局的生态风险研究[J]. 水土保持研究,2015,22(1):241-245,251.

[15] 吴健生,乔娜,彭建,等. 露天矿区景观生态风险空间分异[J]. 生态学报,2013,33(12):3816-3824.

- 2017(4):64-69.
- [17] 王鑫杰. 基于 SWAT 模型的杭埠河流域农业非点源污染分析[D]. 天津:天津大学,2012.
- [18] 刘科家. 改进 SWAT 模型在锦矿区土水界面流锑污染负荷模拟中的应用研究[D]. 湖南湘潭:湖南科技大学,2015.
- [19] 吕梦醒,张展羽,冯宝平,等. 基于 SWAT 模型的浊漳河干流灌溉制度优化研究[J]. 节水灌溉,2015(1):90-95.
- [20] 谢金红. 安徽省大别山区小流域水文响应模拟与分析[D]. 安徽芜湖:安徽师范大学,2012.
- [21] 郭正鑫. 基于 GIS 流域水质水量联合调控系统的实现与应用[D]. 济南:山东师范大学,2009.
- [22] 姚海芳,师长兴,邵文伟,等. 基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(6):139-144.
- [23] 邵辉. 渭河流域水土流失变化对梯田措施响应的模拟研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [24] 张晶楠. AVSWAT 模型在河北省平原区的水文模拟研究[D]. 河北保定:河北农业大学,2011.
- [25] 李鸿儒,卢远,何文. 钦江流域土地利用/覆被变化对径流产沙的影响[J]. 中国水土保持,2016(4):40-43.
- [26] 赵素霞. 基于多目标决策的耕地保有量目标预测研究[J]. 湖北农业科学,2014,53(17):4219-4222,4243.
- [27] 孟现勇,师春香,刘时银,等. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用:以黑河流域为例[J]. 人民珠江,2016,37(7):1-19.
- [28] 孟现勇,吉晓楠,刘志辉,等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源学报,2014(3):528-539.
- [29] Xianyong M, Danlin Y U, Zhihui L, et al. Energy balance-based SWAT model to simulate the mountain snowmelt and runoff-taking the application in juntanghu watershed(China) as an example[J]. Journal of Mountain Science, 2015,12(2):368-381.
- [30] 孟现勇,王浩,刘志辉,等. 基于 CLDAS 强迫 CLM3.5 模式的新疆区域土壤温度陆面过程模拟及验证[J]. 生态学报,2017,37(3):979-995.
- [31] 陈曼雨,崔远来,郑世宗,等. 基于 SWAT 模型的农业面源污染尺度效应研究[J]. 中国农村水利水电,2016(9):187-191.
- [32] 刘闻. 基于 SWAT 模型的水文模拟及径流响应分析[D]. 西安:西北大学,2014.
- [33] 李晓娟. 基于 SWAT 模型的泔河流域土地利用变化对径流的影响[D]. 西安:西北大学,2016.
- [34] 唐丽霞,张志强,王新杰,等. 晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用与气候变化的响应[J]. 植物生态学报,2010,34(7):800-810.
- [35] 杜金龙,朱记伟,解建仓,等. 近 25 a 关中地区土地利用及其景观格局变化[J]. 干旱区研究,2018,35(1):217-226.
- [36] 黎明. 基于 SWAT 的北江流域土地覆盖及气象条件变化的水文响应模拟研究[D]. 广州:中国科学院研究生院,2015.
- [37] 李帅,魏虹,刘媛,等. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J]. 生态学报,2017,37(4):1252-1260.

(上接第 244 页)

- [16] 唐利华,张永福,刘小辉. 干旱区河谷城市土地利用生态风险动态预测:以新疆伊宁市为例[J]. 水土保持研究,2016,23(3):240-245.
- [17] 李玉珍,张永福,安放舟. 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.
- [18] 喻红,曾辉,江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学,2001,21(1):64-69.
- [19] 徐羽,钟业喜,冯兴华,等. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局[J]. 生态学报,2016,36(23):7850-7857.
- [20] 梁发超,刘黎明. 基于地形梯度的土地利用类型分布特征分析:以湖南省浏阳市为例[J]. 资源科学,2010,32(11):2138-2144.
- [21] 宋世雄,梁小英,陈海,等. 基于多智能体和土地转换模型的耕地撂荒模拟研究:以陕西省米脂县为例[J]. 自然资源学报,2018,33(3):515-525.
- [22] 毛南赵,梁小英,段宁,等. 基于 ODD 框架的农户有限理性决策模型的构建及模拟:以陕西省米脂县马蹄洼村为例[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(5):164-171,218.
- [23] 张月,张飞,周梅,等. 干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J]. 应用生态学报,2016,27(1):233-242.
- [24] 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[J]. Sustainability, 2018,10(9). DOI: 10.3390/su10093239.
- [25] 汤国安,宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报,2006,20(2):157-160,192.