

基于地貌分区的陕西省区域生态风险时空演变

刘迪, 陈海*, 耿甜伟, 张行, 史琴琴

(西北大学城市与环境学院/陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘要: 论文采用“概率—损失”二维风险模型解构陕西省区域生态风险, 基于地貌分区视角识别多源风险类型的同时以景观格局与生态系统服务价值为关联要素合成潜在生态损失, 在此基础上分析了陕西省2000—2015年单一风险要素及区域生态风险的时空分异, 并基于地貌分区视角结合重心模型探讨了生态风险的时空迁移。结果如下: ① 2000、2015年陕西省多源危险度分别为0.3837、0.4558, 上升18.79%, 大致呈现南北高、中间低的空间格局, 沿南北轴线呈现“W型”展布; 潜在生态损失分别为0.5537、0.6270, 上升13.24%, 除高原南部与秦岭东部山区外, 生态损失均呈现高值; 区域生态风险分别为0.2429、0.2865, 上升17.95%, 空间上呈现“三高夹两低”的分布格局。② 从时序变化来看, 秦巴山地保持较低风险且风险变化率较小; 黄土高原与风沙过渡区变化率处于中等, 后者面临较高风险; 汉江盆地风险最高, 该区域与关中平原分别为风险变化率的首位与次位。从生态风险重心变化趋势看, 黄土高原与风沙过渡区重心均向西南移动, 关中平原与秦岭山地重心东移趋势明显, 汉江盆地与大巴山地重心跃向东南。

关键词: 区域生态风险; 地貌分区; 风险重心; 多源危险度; 潜在生态损失; 陕西省

作为人类开发利用自然环境最直观的表现形式^[1], 土地利用/土地覆被等陆地表层要素处于不断变化与动态平衡中, 驱动着全球生态过程的变迁并形成地表景观的地域分异^[2]。地球“人类世”新纪元的进入反映了全球景观格局与生态功能的双重变化, 并关联生态环境的多向演变, 尤其是针对生态风险(ecological risk)的评估及防范^[3], 已成为当前地理学与生态学应对社会—生态系统综合管理的热点研究方向^[4]。

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^[5]。目前, 生态风险研究范式较为统一: 基于风险源汇或景观格局^[6], 基本范式均为概率与损失的综合表征^[7]。基于源汇的风险评价一般以暴露—响应^[8-9]、PSR^[10]和RRM^[11]等模型为载体展开, 该方法能够快速识别威胁区域的风险源并明确风险受体, 但研究多为单一时间截面分析

而缺乏对风险时序演化的探讨。基于景观指数的风险评价依托于格局与过程耦合关联视角, 更加注重风险的时序性, 常通过土地利用强度参数^[12-13]、景观损失度^[14-15]进行表征, 并在中国流域^[16]、海岸带^[17]、行政区^[15]等诸多区域取得应用, 但在格局视角下难以表征区域灾害与人为扰动等诸多要素对生态风险的影响。因此, 在“概率—损失”二维风险模型框架下, 有必要重新审视源汇与格局风险方法的优劣, 在识别风险源与受体损失的同时突出格局损失度对风险受体的贡献程度^[18], 并以此探讨风险的时空演化。

自然地理要素与土地利用的空间配置具有时空异质性且受制于区域地形地貌特征^[19], 并由此关联多源灾害与人为扰动的时空变化, 表现为生态风险在不同地形梯度上的有向迁移^[18]。相关研究基于风险在地形等级面积比例的分布^[12,20]、地形等级

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-05-16。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671086, 41871185)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41671086 and 41871185.]

第一作者简介: 刘迪(1993—), 男, 河南郑州人, 博士生, 主要从事综合自然地理与景观生态研究。

E-mail: lcx@stumail.nwu.edu.cn

*通信作者简介: 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

引用格式: 刘迪, 陈海, 耿甜伟, 等. 基于地貌分区的陕西省区域生态风险时空演变[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 243-254. [Liu Di, Chen Hai, Geng Tianwei, et al. Spatiotemporal changes of regional ecological risks in Shaanxi Province based on geomorphologic regionalization. Progress in Geography, 2020, 39(2): 243-254.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.02.006

上风险指数计算^[13]、地形与风险剖面线^[21-22]等方法说明了风险对地形的简单响应,然而仅以研究区内独特且单一的地貌特征为依托,很难深入探讨地貌分异对大区域风险演化的影响。因此,以地貌分区视角识别风险及其关联要素的变化趋势,可作为探讨风险空间动态的有效途径。

基于此,本文以地貌类型多样的陕西省为例,依托于地貌分区视角识别不同区域典型风险源,基于多源危险度、潜在生态损失解构生态风险,构建陕西省区域生态风险评价模型,在分析单一准则要素与生态风险时空分异的基础上,探究风险于不同地貌区间的差异分化及重心跃迁,并给出地貌分区视角的降险对策。研究可为大尺度风险评价中源汇要素的遴选提供来自地貌视角的依据,为风险评估中信息的丰富化提供理论支撑,研究结果可为陕西省风险消减、生境恢复提供方向性指导。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

陕西省(105°29'E~111°15'E, 31°42'N~39°35'N)地处西北内陆腹地,土地面积 20.57 万 km²(图 1)。全省年均温 13.7 °C,自南向北递减;年均降水量 680 mm,降水南多北少,陕南为湿润区,关中为半湿润区,陕北为半干旱区。陕南秦巴山区北靠秦岭、南依巴山,中为汉江盆地,具有“两山夹一川”的地貌结构,是南水北调重要水源地和生态功能限制开发区,存在严重的滑坡、山洪等地质灾害;中部为关中盆地,地势西高东低,南北高中部低,是省内城市集聚区,人类活动强烈;陕北地貌类型包括风沙地貌、黄土高原(含塬、梁、峁、丘陵沟壑等)地貌,降水稀少且分布不均,属生态脆弱区,干旱频次高、土壤侵蚀严重。多样的地貌分异引致的自然灾害与人类扰动的空间异质性,为从地貌分区视角探讨陕西省生态风险的时空分异提供了案例基础。

1.2 数据来源与处理

(1) DEM 数据来源于地理空间数据云 ASTER GDEMS 数据集 30 m DEM 栅格(<http://www.gscloud.cn/>),并提取研究区高程。地貌区边界矢量化自陕西省志地貌分区相关图件,分区类型分别为风沙过渡区、黄土高原、关中平原、秦岭山地、汉江盆地、大巴山地,并生成边界矢量文件。

(2) 陕西省 2000、2015 年土地利用数据来源于

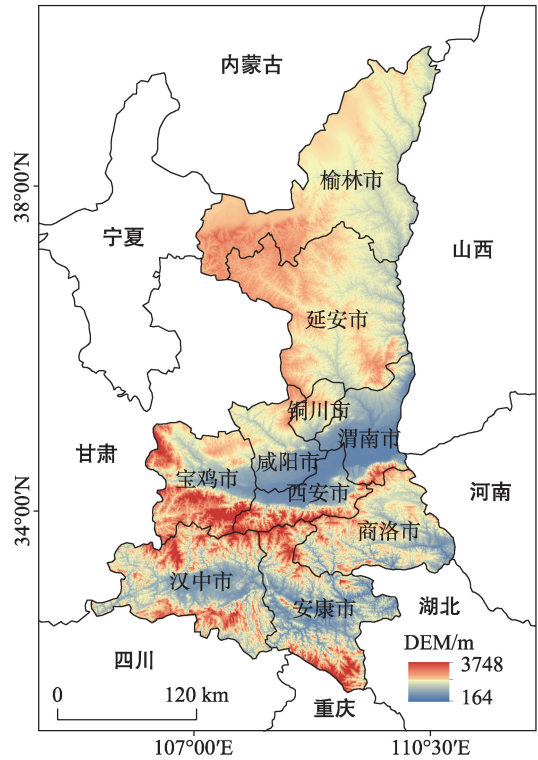


图1 陕西省地理位置及数字高程

Fig.1 Location and digital elevation model (DEM) of Shaanxi Province

中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)的陕西省 1:10 万土地利用矢量数据集,数据基于 Landsat MSS、TM 与 ETM 影像,通过图像光谱、色调等的认知结合地形目视解译生成,精度达 95%,是目前中国精度最高的土地利用数据产品^[23]。参照土地利用分类标准(GB/T21010—2017),将地类分为耕地、林地、草地、水域、城镇村及工矿用地、未利用地 6 类,重采样为 30 m 地类栅格。

(3) 滑坡、山洪等地质灾害数据来源于《秦巴山区山地自然灾害》县级历史灾害频次记录,经由克里金插值生成灾害频次空间分布并标准化分级;依据陕西省气象监测站降雨量和蒸发量数据计算截面年份干旱频率并插值生成干旱灾害空间分布;土壤侵蚀数据来源于《陕西省地图集》1:10 万土壤侵蚀等级面数据;夜间灯光数据来源于 NOAA/NGDC 网站(<https://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>),包括 2 类:一是 1992—2012 年度 DMSP/OLS 数据,分辨率 1 km,经过相对辐射校正与连续性校正从而消除数据饱和,生成 2000 年中国夜间灯光数据;二是 2012—2018 年月度 NPP-VIIRS 数据,分辨率 500 m,

2015 年夜间灯光根据年度按月影像均值合成后,通过 2012—2018 年 NPP-VIIRS 进行连续性校正生成;经陕西省边界掩膜提取截面年份灯光数据并归一化,重采样为 30 m 栅格,以便于时序对比。

2 研究方法

2.1 区域生态风险评价模型构建

外界多源胁迫与内部系统失稳均会导致区域生态风险的产生。由地貌多样特征引致的自然本底脆弱性与人类活动强度具有空间异质性,由此关联多源风险扰动的时空变化。依托于地貌分区视角可识别不同区域典型风险源,进一步明晰风险源汇的作用过程并指示不同地貌区间生态风险的差异演化。

按照生态损失指数法^[21],本文基于经典的“风险=概率×损失”二维框架解构生态风险,从多源危险度、潜在生态损失 2 个层次构建陕西省风险评价模型,模型综合考虑了各种风险要素对生态系统产生的可能性影响。公式如下:

$$ER = \sum_{i=1}^n (H_i \cdot D_i) \quad (1)$$

式中:ER 为生态风险指数; H_i 为风险小区 i 的多源危险度; D 为潜在风险损失; n 为格网个数。本文将陕西省划分为 1471 个 12 km×12 km 的单元网格,将风险数值赋予相应的风险点集实现空间化。

2.1.1 多源危险度

危险度是指生态系统在人为扰动与环境过程交互作用下产生不利影响的可能性。大尺度风险研究中,风险受体往往暴露于多重风险源之下^[24]。因此,本文致力于多源风险的整合量化,考虑不同地貌区内典型灾害风险源以及全区人为扰动风险源的时空异质性,构建危险度:

$$H_i = \sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot H_{ij}) \quad (2)$$

式中: H_{ij} 为风险小区 i 的第 j 类风险源标准化数值; α_j 为第 j 类风险源权重。危险度评估结构如表 1 所示,其中权重以熵值法确定^[25],表中各类评估要素均经过极差标准化后结合图层权重通过 ArcGIS 10.2 地图代数工具实现空间整合。

陕西省灾害性事件类型具有明显的地貌区间分异,本文自然灾害风险综合不同地貌区内典型风险源,其中滑坡、山洪灾害可作为秦巴山地/汉江盆地的主导风险源,干旱、土壤侵蚀作为黄土高原/风

表 1 多源危险度评估结构

Tab.1 Multiple hazard assessment structure

地貌类型	评估要素	权重
秦巴山地/汉江盆地	滑坡	0.1276
	山洪	0.1874
黄土高原/风沙过渡区	干旱	0.0944
	土壤侵蚀	0.1408
全区	城市化水平	0.2133
	工农业活动	0.2365

沙过渡区典型风险胁迫。

目前,快速城市化引致了土地利用类型的剧烈更迭,导致以城市扩展为诱因的区域生态风险日益显著^[26]。夜间灯光指数能直观地反映城市扩展等人类干扰对生态系统产生的间接扰动并给予空间可视^[27]。本文选取相关年份稳定时点夜间灯光数据,提取灯光栅格像元值(DN)并归一化,DN 值越高,表示由城市化引致的生态系统服务降低的可能性越大。

基于土地利用/土地覆被的视角,陆地表层人类活动强度(human activity intensity of land surface, HAILS)被认为是人类对陆地表层土地生态系统的利用与开发程度^[28]。本文通过 HAILS 表征工农业活动等人类扰动对生态系统产生的影响并实现空间分异。公式如下:

$$HAILS = \frac{\sum_{k=1}^n (SL_k \cdot CI_k)}{S} \times 100\% \quad (3)$$

式中:HAILS 为陆地表层人类活动强度, S 为区域总面积, n 为地类数; SL_k 为地类 k 的面积; CI_k 为地类 k 的建设用地当量折算系数。参考已有研究^[28],设置耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 CI 值分别为 0.2、0、0.067、0.6、1、0。

2.1.2 潜在生态损失

在风险评价中,多生态终点的交互作用被广泛关注^[27]。生态终点往往伴随着受体的多向损失,可通过景观结构损失与生态系统服务退化二者综合反映,计算结果由极差标准化后基于地图代数工具等权重空间叠加生成。

由于景观结构的破坏会改变相应生态过程并引致功能丧失,因此土地利用方式的量变及其空间结构能够反映生态环境的区域分异及其累积性特征^[29]。以作为不同类型生态系统结构组成的、具有重复性格局的异质性土地单元的景观为评估视角,基于景观格局定量刻画生态系统的异质性以及格

局与过程的关联^[3],为明晰生态系统在灾害胁迫下其过程、功能损失的演化机理提供了最佳概括途径^[30]。本文以景观干扰指数和脆弱性指数耦合面积加权函数构成景观损失指数,公式如下:

$$LDI_i = \sum_{k=1}^n \frac{S_{ki}}{S_i} \sqrt{E_k \cdot F_k} \quad (4)$$

式中:LDI_i为景观损失指数;*n*为地类数量;*E_k*为地类*k*的干扰度;*F_k*为地类*k*的脆弱度;*S_{ki}*为第*i*个风险小区内地类*k*的面积;*S_i*为第*i*个风险小区的总面积。

干扰度从格局角度反映不同景观类型受到的干扰,选取破碎度、分离度、优势度度量不同地类代表的生态系统受到干扰的程度。借鉴相关研究^[15]中干扰度各项指标含义及公式,*E_k*在Fragstats 4.2中计算得到。脆弱度表征生态系统结构的易损性,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。参考相关研究^[15,18],通过专家打分法,将地类脆弱度分为6个等级,求和标准化处理后脆弱度由低到高分别为城镇村及工矿用地0.0476、林地0.0952、草地0.1429、耕地0.1905、水域0.2381、未利用地0.2857。

陆地表层人地关系失控引致生态系统功能与过程无序,进而表现为生态系统服务(ecosystem services, ES)的增减,生态系统服务退化表明存在一定的生态风险^[7]。因此,将生态系统服务退化水平作为潜在生态损失的度量,可为分析风险源汇及其关联效应提供更加完整的手段^[6],同时认为ES价值越高,遭受灾害风险胁迫时的潜在损失越大^[30-31]。本文依据“千年生态系统评估”(millennium ecosystem assessment, MA)中ES的分类,辅以谢高地等相关成果^[32],结合2010年陕西省平均单位面积粮食产

量与同期全国均值的比值修正当量系数,修正系数为0.82,从而确定陕西省ES当量价值,如表2所示。

2.2 标准差椭圆及风险重心

标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE)在空间统计领域应用广泛,是定量分析点要素空间分布整体特征的常用方法。风险点作为空间变量,使用标准差椭圆及其重心工具可从多角度展示地理要素空间分布的全局特征^[14],公式如下:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}; \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5)$$

式中:(*X*, *Y*)为加权平均中心,(*x_i*, *y_i*)为风险点的坐标;*w_i*为风险点*i*的属性值。标准差椭圆工具以不同时期地貌区内风险的平均中心为重心,分别计算其时序椭圆,在ArcGIS 10.2中方向分布模块中完成。

3 结果分析

3.1 生态风险时空分异

基于概率与损失解构生态风险可从单一视角探究风险要素的时空分异,基于ArcGIS 10.2自然断点法进行分级生成多源危险度、潜在生态损失、区域生态风险的空间分布图,结果分别如图2至图4所示。为使时序要素之间具备可比性,将研究末期各等级间断点与研究初期统一。

3.1.1 多源危险度

以风险概率视角识别陕西省不同地貌分区内主导风险类别并将其可视化(图2)。统计可得,2000、2015年多源危险度分别为0.3837、0.4558,上

表2 陕西省单位面积生态系统服务价值

Tab.2 The value of ecosystem services per unit area in Shaanxi Province

(万元/km²)

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域
供给服务	食物生产	37.98	8.10	10.61	22.34
	原料生产	2.51	18.43	15.64	6.42
	水资源供给	-73.46	9.49	8.65	231.56
调节服务	气体调节	31.01	60.61	55.02	21.50
	气候调节	15.92	181.56	145.53	63.96
	净化环境	4.74	53.91	48.04	155.02
	水文调节	75.97	132.40	106.70	2 855.90
支持服务	土壤保持	0.27	74.02	67.03	25.97
	维持养分循环	5.30	5.58	5.02	0.95
	生物多样性	5.86	67.31	60.89	71.22
文化服务	美学景观	2.51	29.60	26.81	52.79

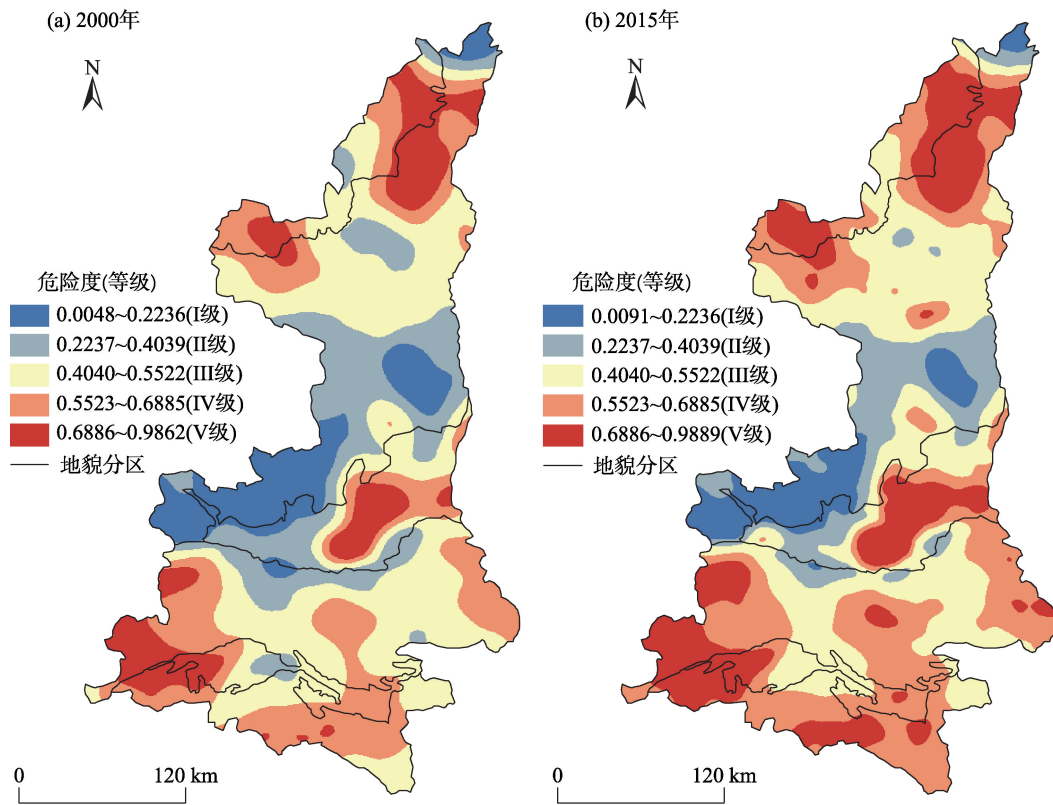


图2 2000—2015年陕西省多源危险度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of multiple hazards in Shaanxi Province, 2000-2015

升18.79%。由图2可知,危险度大致呈现南北高、中间低的空间格局,沿南北轴线呈现“W型”展布。研究期初IV~V级危险度集中分布于陕北榆林地区、关中平原中部、秦巴山地西部及东南部山区,面积占比35.93%。陕北长城沿线为风沙过渡区,风蚀严重,黄土高原北部为沟壑区,土壤侵蚀严重,水土保持能力较差,同时人工生产系统面临严峻的干旱胁迫;与之相对,秦巴山地森林系统受滑坡、山洪等地质灾害胁迫影响较大,且山高沟深的秦巴西部灾害频次显著高于东部;关中平原中部为全省城市化水平最高的区域,且工农业最为发达,人为干扰作用于生态系统从而引致较大的风险危险度。I~II级危险度主要分布于黄土高原南部山区、关中西部,面积占比28.54%。相较于北部沟壑区,高原南部山区土壤侵蚀明显较小,且异于陕南的多雨气候,因此存在较少滑坡及山洪灾害,关中西部亦然。与2000年相比,2015年危险度存在明显的高值扩张。由于自然环境与人类扰动关联程度的不断加深,后者替代前者在短期内主导环境变化已成客观事实^[30]。研究期间全省城市化极大发展,关中

平原尤甚,城市扩展通过影响ES的持续供给进而引致人为扰动强度的升高,表现为研究末期西安、榆林等地市危险度核心的扩大,以及延安、安康等地市高值核心的产生。同时,关中平原工农业的发展扩大了人类干扰强度,主要表现为危险度沿渭河干流的扩张。危险度指标致力于多源灾害及人类扰动的综合量化,从而对生态系统退化起到预警作用,当环境脆弱性及人为扰动胁迫超过生态系统自身调节能力时,会造成生态系统结构与功能的破坏,从而引致风险的升高。

3.1.2 潜在生态损失

以景观格局损失与ES价值损失为关联要素构建陕西省潜在生态损失并将其可视化(图3)。统计可得,2000、2015年生态损失分别为0.5537、0.6270,整体上升13.24%。由图3可知,研究期间除黄土高原南部部分区域及秦岭东部山区外,潜在生态损失均呈现高值。2000年IV~V级损失度面积占35.16%,包含3个区域:①丘陵沟壑区,沟壑地形引致了景观格局的无序与生态学过程的割裂,同时农耕行为进一步胁迫生境,造成ES价值的损失;②关中平原渭河

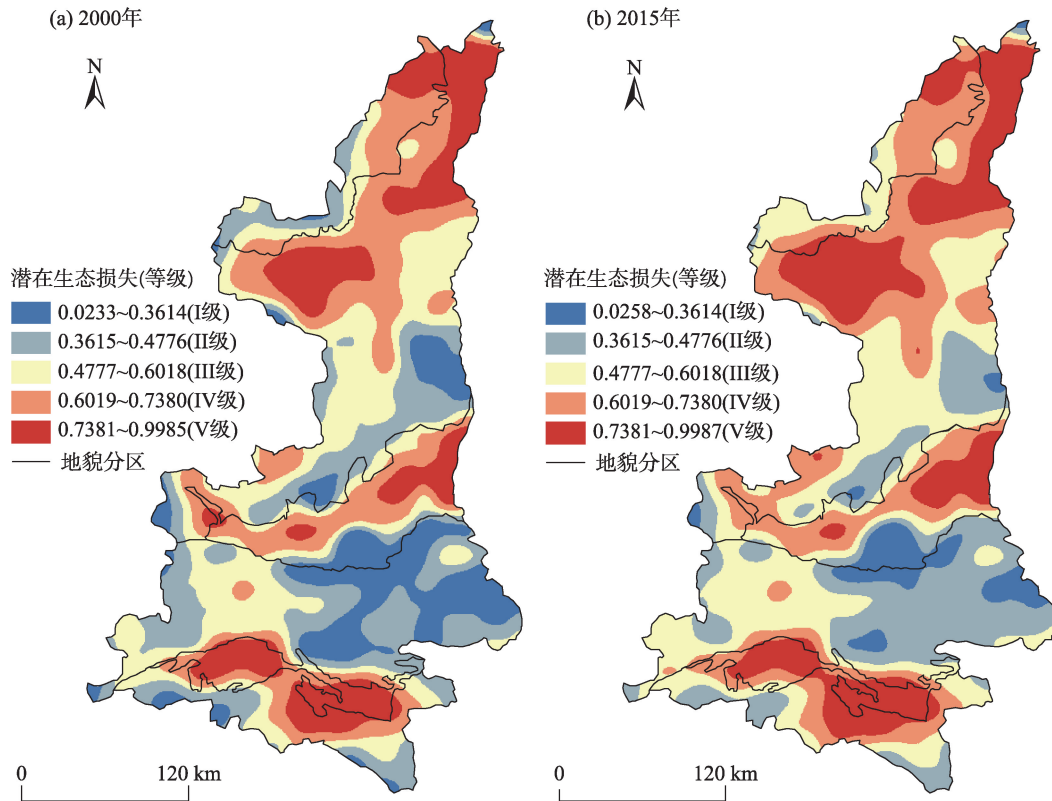


图3 陕西省2000—2015年潜在生态损失空间分布

Fig.3 Spatial distribution of potential ecological damage in Shaanxi Province, 2000–2015

沿线,区域地类斑块及多向廊道对平原基底的切割形成了破碎的景观区域,系统功能受到抑制,且水域ES价值最高,因而渭河周边风险损失较大;③汉江盆地及其辐射区,区域受城市扩张影响,景观分离度较高,且盆地被秦巴山地围合。作为盆地周边辐射区,秦岭南麓与巴山北麓成为景观格局演变与ES价值退化最易发生的区域,也是风险最易蔓延的区域。由图3b可知,2015年部分区域生态损失存在扩张趋势,包括2个区域:①黄土高原北部,丘陵沟壑区为陕北退耕还林的主要区域,大量ES价值较低的耕地覆被转化为ES价值较高的林草地,使得区域遭受灾害风险胁迫时的潜在损失增大;②秦岭东部山区,该区域研究时段内人为活动有增强趋势,从而引致土地利用结构损失^[33]。作为自然要素与人类活动的统一整体,土地生态系统的结构与功能状态被广泛关注,基于格局与ES价值损失的潜在生态损失度量可作为风险因果链的“生态终点”,关注承灾体状态及其变化能进一步识别易损区域空间位置及其损失大小,从而辅助风险管理。

3.1.3 区域生态风险

区域生态风险是“概率×损失”二维风险模型的

集成表达(图4)。统计可得,2000、2015年区域生态风险分别为0.2429、0.2865,整体上升17.95%。由图4可知,生态风险空间差异显著,呈现“三高夹两低”的空间格局。2000年I~II级风险区面积占比41.93%,主要分布于黄土高原南部山地、秦岭东部山区;IV~V等级风险面积占比29.97%,分布于黄土高原北部、关中平原中部及汉江盆地。与2000年相比,2015年生态风险维持前期格局,但生态风险有增加趋势,表现为黄土高原北部IV~V级风险核心扩大,关中平原V级风险向东部延伸并连接成片。自然地理要素的不均衡引发的灾害分布与人类活动引发的景观结构、功能退化共同作用于生态系统,引致危险度的时空演变,同时潜在生态损失给出了风险受体在危险度作用下的可能性后果,这导致了不同局域风险主导因素的差异。

3.2 基于地貌分区的生态风险时空演变

3.2.1 基于地貌分区的生态风险时序变化

基于ArcGIS 10.2分区统计提取不同地貌分区生态风险均值并计算风险的时序变化率,结果示于图5。整体上看,地貌区间内风险数值及时序变化均十分明显。从风险数值大小来看,秦岭山地<黄

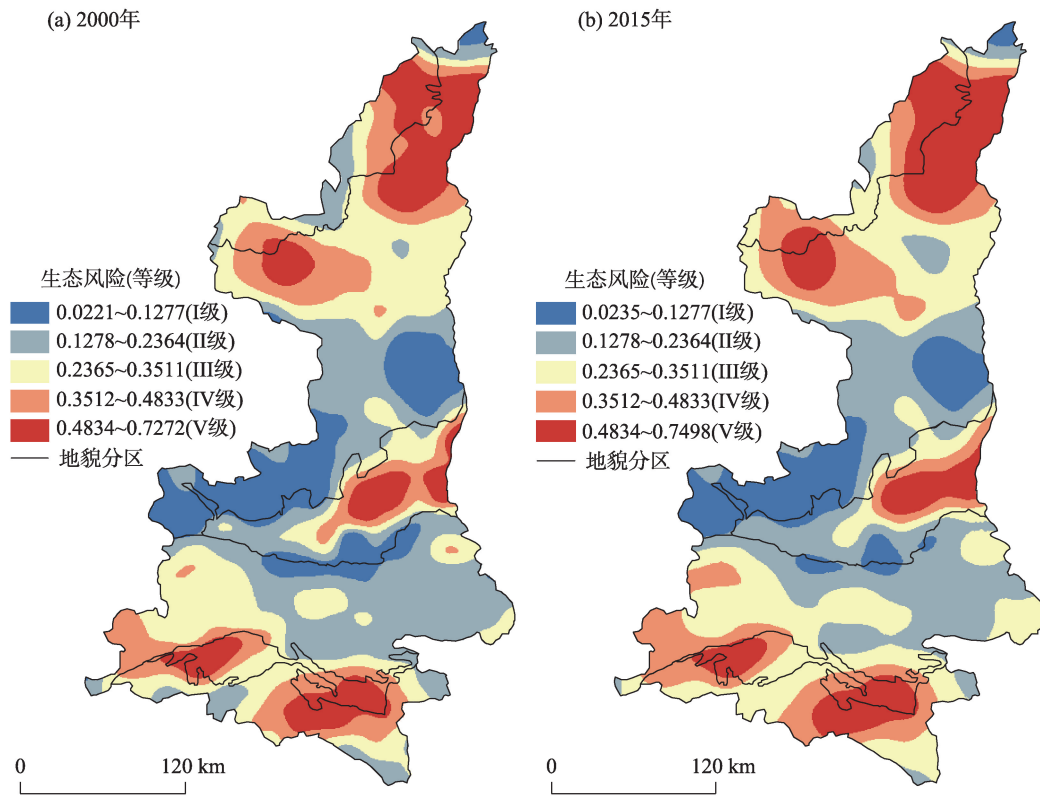


图4 陕西省2000—2015年区域生态风险空间分布

Fig.4 Spatial distribution of regional ecological risks in Shaanxi Province, 2000-2015

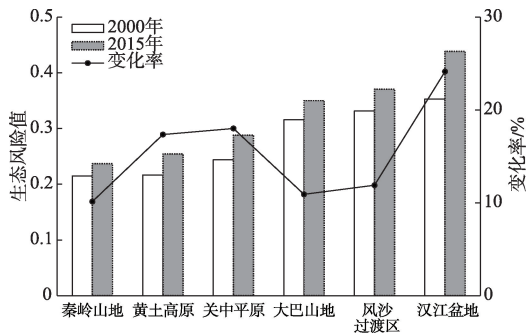


图5 基于地貌分区的2000—2015年陕西省区域生态风险动态变化

Fig.5 Temporal changes of regional ecological risks of Shaanxi Province during 2000-2015 based on geomorphologic regionalization

土高原<关中平原<大巴山地<风沙过渡区<汉江盆地,且研究期间内风险排序保持一致。较高地形起伏度的山地极大限制人类干扰的同时加大了人工要素的扩张成本,形成了相对闭塞的生物避难场所,从而保持较低风险,主要表现在秦巴山地与高原南部山区,同时山地区域汇聚了更高频次的地质灾害,尤其是秦岭西部与大巴山地,这相对提升了

风险危险度。作为生态脆弱区,丘陵沟壑区及西北风沙带生态系统面临严重的土壤侵蚀与干旱胁迫,且丘陵区无序的景观结构及破碎的生态廊道构成了较大的生态损失。平原地貌带来的地形完整性与可达性增强了城镇扩张、工农业生产等人类扰动程度并引致ES退化,主要表现在关中平原、汉江盆地。相较于关中平原,与周边林地生境联系密切的汉江盆地将面临更加严峻的自然灾害与人类活动双重扰动的压力,因此风险值最高。从变化率来看,风险数值均有所升高,且秦岭山地<大巴山地<风沙过渡区<黄土高原<关中平原<汉江盆地。整体上看,山地风险数值增速最慢,平原(或盆地)增速最快,这是不同地貌特征对人类活动限制以及对不同地类空间分布自然选择的结果。

3.2.2 基于地貌分区的生态风险空间演变及其重心跃迁

基于 ArcGIS 10.2 方向分布模块生成 6 大地貌区标准差椭圆并提取风险重心,模型参数选择第一级标准差(图6)。图6中,风险高值变化及与之关联的“方向挟制”削弱了重心的跃迁距离。风险重心

转移方向大致分为4类:西南方向、东北方向、正东方向、东南方向:① 重心向西南方向转移的区域包括风沙过渡区、黄土高原。陕北集聚有大量煤炭、石油等能源,在能源开采、城市化建设以及脆弱的自然基底的共同影响下风险较高,伴随国家能源结构调整、西部定边等县石油开采获得发展,加之三北防护林等国家生态政策的施行,于北部沟壑区围合大量林草地从而形成稳定生境,因此导致了风险的南迁。② 重心向东北方向转移的区域包括关中平原,这与渭河陕西段流向基本一致。渭河上游地

形复杂,城市扩展及工农业活动受限,研究时段内人为扰动趋向于向下游延展,这导致了风险的显著东移。③ 重心向正东方向转移的区域包括秦岭山地。山地西部与东部地形的差异导致了人类活动强度的差异,山地东部海拔呈“手指状”下降,岭谷相间,研究期间面临更高的人为干扰度^[33],故重心东移。④ 重心向东南方向转移的区域包括汉江盆地、大巴山地,转移方向与汉江陕西段流向大体一致。盆地包括汉中、安康地市,后者在研究时段内城镇扩展使得风险聚集,重心向东南转移;大巴山

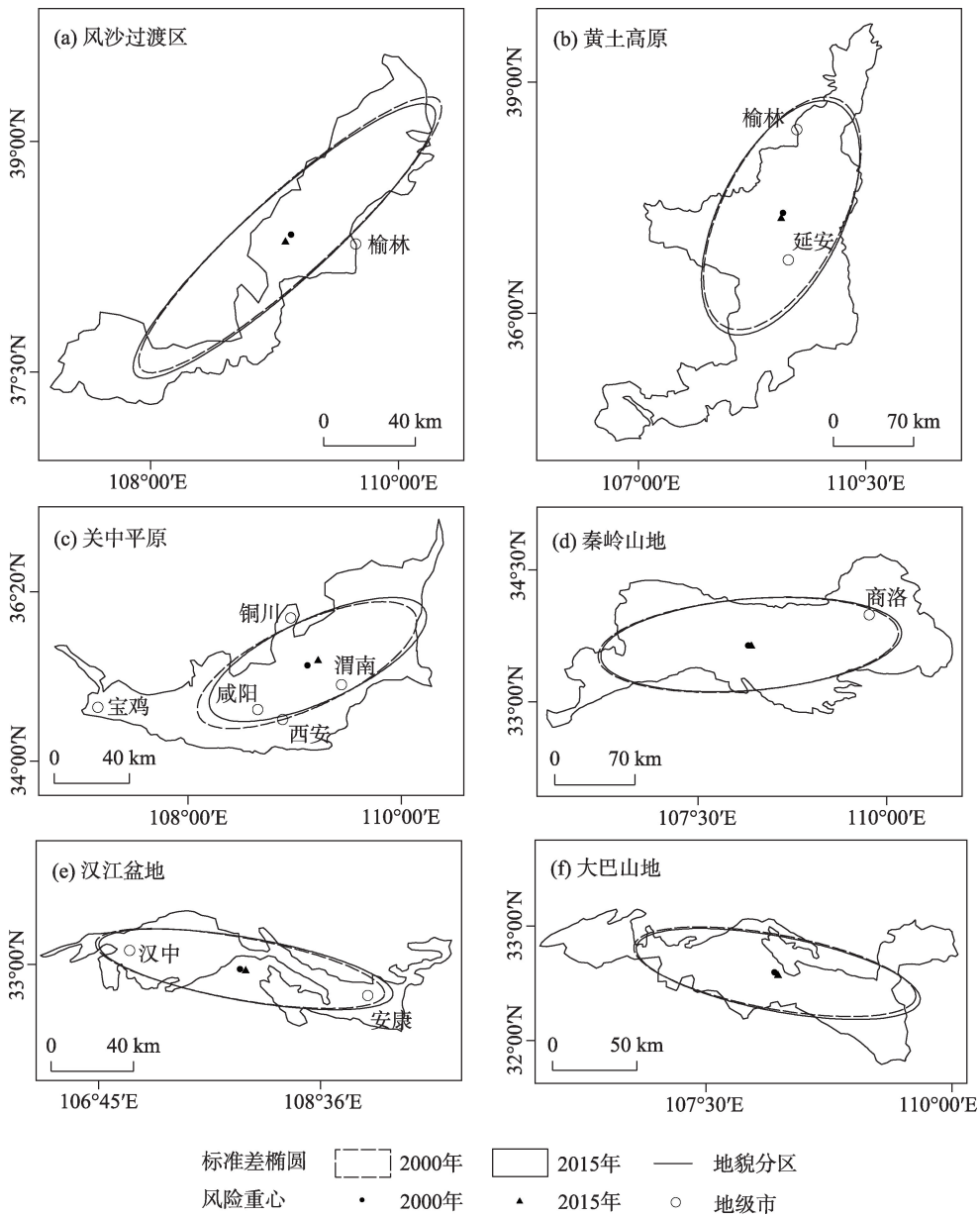


图6 基于地貌分区的区域生态风险标准差椭圆及其重心的动态变化

Fig.6 Temporal changes of standard deviational ellipse (SDE) and its gravity of regional ecological risks based on geomorphologic regionalization

地西部林草地面积的增加进一步稳定生境,因而重心向东南转移。

4 结论与讨论

4.1 结论

以多源危险度与潜在生态损失为主要构建要素的区域生态风险评价体系可有效反映区域风险演化以及生态环境的变迁,从地貌分区视角可进一步明晰风险在空间上的跃迁。研究结论如下:

(1) 2000、2015年陕西省多源危险度分别为0.3837、0.4558,上升18.79%,呈现南北高、中间低的空间格局,沿南北轴线呈现“W型”展布;潜在生态损失分别为0.5537、0.6270,上升13.24%,除高原南部部分区域以及秦岭东部山区外,生态损失均呈现高值;区域生态风险分别为0.2429、0.2865,上升17.95%,且于空间上呈现“三高夹两低”的分布格局。

(2) 从时序变化来看,秦巴山地保持较低风险且风险变化率较小;黄土高原与风沙过渡区变化率处于中等,且后者面临较高风险;汉江盆地风险最高,与关中平原分别为风险变化率的首位与次位。从生态重心跃迁趋势看,黄土高原与风沙过渡区重心均向西南移动,关中平原与秦岭山地重心东移趋势明显,汉江盆地与大巴山地重心跃向东南方向。

4.2 讨论

基于地貌分区视角,本文从工程治理、格局优化等层面为风险消减与生境恢复提供依据:①秦巴山地为生态限制开发区,以自然灾害危险度为主导,需基于遥感数据与外业实测,开展地质灾害隐患点有效排查,严禁陡坡垦殖、“束水造田”,在构造活跃区采取工程治理与避让搬迁等措施减少生态损失;由于秦岭东西段地形差异,东部面临更大的人为干扰,人工建设更应顺应原本的地质地貌、降水条件,优化景观布局以减少景观破碎化,可有效维护生态过程并稳定物种丰度。②关中平原与汉江盆地为主要城市聚集区,以人为扰动危险度为主导,由于城市扩展难以被地形地貌所限制,因此应着力打造以城市为核心的城市群生态空间结构,通过对区域生态基质、斑块及廊道的优化重组进行生态安全格局构建,可有效降低风险;由于区域面积与生境的差异,汉江盆地具备更高的自然度,应更加关注盆地周边区域对人类活动的响应,在最易受到人类胁迫风险的先锋区域设立生境缓冲区,禁止

违规开发,从而减避人工表面对自然生境的影响。③黄土高原及风沙过渡区是中国典型的生态脆弱区,受多源危险度的综合影响,在农耕及城市建设中合理设计景观布局与立体结构,保持大面积生态系统基底边缘的自然度,减少景观的破碎化;贯彻退耕还林政策,宜林则林,宜牧则牧;由于地貌基底不同引致的生境脆弱度的差异,风沙过渡区应进一步减小人为扰动的的影响。

在大尺度风险研究中,源汇要素的识别与整合可有效提升评价的科学性,本文通过将生态风险解构为多源危险度与潜在生态损失,全面厘清了风险源汇要素的空间异质性及其时序变化。从地貌分区视角,通过识别地貌区间内自然风险暴露与人为胁迫因子确保指标选取的区域代表性,同时在分析中完成了客观评价结果与主观认知的交互验证,研究结果与案例地实际较为契合。然而,在利用定量指标法代替服务价值货币总量来量化生态系统服务从而提升大尺度区域潜在生态损失的评价优度,以及基于地貌分区探讨风险防范与经济发 展的权衡关系并进行风险防范分区等方面的研究,还有待进一步探索与深化。

参考文献(References)

- [1] 周汝佳, 张永战, 何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价[J]. 地理研究, 2016, 35(6): 1017-1028. [Zhou Rujia, Zhang Yongzhan, He Huachun. Ecological risk assessment based on land use changes in the coastal area in Yancheng City. Geographical Research, 2016, 35(6): 1017-1028.]
- [2] 郑度, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1475-1483. [Zheng Du, Wu Shaohong, Yin Yunhe, et al. Frontiers in terrestrial system research in China under global change. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1475-1483.]
- [3] 彭建, 杜悦悦, 刘焱序, 等. 从自然区划、土地变化到景观服务: 发展中的中国综合自然地理学[J]. 地理研究, 2017, 36(10): 1819-1833. [Peng Jian, Du Yueyue, Liu Yanxu, et al. From natural regionalization, land change to landscape service: The development of integrated physical geography in China. Geographical Research, 2017, 36(10): 1819-1833.]
- [4] 张小飞, 彭建, 王仰麟, 等. 全球变化背景下景观生态适应性特征[J]. 地理科学进展, 2017, 36(9): 1167-1175. [Chang Hsiao-fei, Peng Jian, Wang Yanglin, et al. Characteristics of landscape system in the context of global change. Progress in Geography, 2017, 36(9): 1167-1175.]

- [5] Forbes V E, Calow P. Developing predictive systems models to address complexity and relevance for ecological risk assessment [J]. *Integrated Environmental Assessment Management*, 2013, 9(3): E75-E80.
- [6] 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. [Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4): 664-677.]
- [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. [Cao Qiwen, Zhang Xiwen, Ma Hongkun, et al. Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 843-855.]
- [8] Malekmohammadi B, Rahima Blouchi L. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 41(6): 133-144.
- [9] 孟晖, 李春燕, 张若琳, 等. 京津冀地区县域单元地质灾害风险评估 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 327-334. [Meng Hui, Li Chunyan, Zhang Ruolin, et al. Risk assessment of geological hazards for counties and districts of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 327-334.]
- [10] 周启刚, 张晓媛, 王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 289-297. [Zhou Qigang, Zhang Xiaoyuan, Wang Zhaolin. Land use ecological risk evaluation in Three Gorges Reservoir area based on normal cloud model. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(23): 289-297.]
- [11] Kanwar P, Bowden W B, Greenhalgh S. A regional ecological risk assessment of the Kaipara Harbour, New Zealand, using a relative risk model [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2015, 21(4): 1123-1146.
- [12] 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. [Xu Yu, Zhong Yexi, Feng Xinghua, et al. Ecological risk pattern of Poyang Lake Basin based on land use. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7850-7857.]
- [13] 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. [Hu Jinlong, Zhou Zhixiang, Teng Mingjun. Ecological risk assessment of typical karst basin based on land use change: A case study of Lijiang River Basin, Southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 2003-2012.]
- [14] 刘春艳, 张科, 刘吉平. 1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力 [J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3729-3740. [Liu Chunyan, Zhang Ke, Liu Jiping. A long-term site study for the ecological risk migration of landscapes and its driving forces in the Sanjiang Plain from 1976 to 2013. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 3729-3740.]
- [15] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价: 以宁夏红寺堡区为例 [J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2672-2682. [Wang Peng, Wang Yajuan, Liu Xiaopeng, et al. Ecological risk assessment of an ecological migrant resettlement region based on landscape structure: A case study of Hongsibu in Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2672-2682.]
- [16] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估 [J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5952-5960. [Lv Leting, Zhang Jie, Sun Caizhi, et al. Landscape ecological risk assessment of Xi River Basin based on land-use change. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5952-5960.]
- [17] Li J L, Pu R L, Gong H B, et al. Evolution characteristics of landscape ecological risk patterns in coastal zones in Zhejiang Province, China [J]. *Sustainability*, 2017, 9: 584. doi: 10.3390/ijerph15071301.
- [18] 刘迪, 陈海, 梁小英, 等. 黄土丘陵沟壑区生态风险动态变化及其地形梯度分析: 以陕西省米脂县为例 [J]. *生态学报*, 2018, 38(23): 8584-8592. [Liu Di, Chen Hai, Liang Xiaoying, et al. The dynamic changes to ecological risk in the loess hilly-gully region and its terrain gradient analysis: A case study of Mizhi County, Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23): 8584-8592.]
- [19] 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. [Ha Kai, Ding Qinglong, Men Mingxin, et al. Spatial distribution of land use and its relationship with terrain factors in hilly area. *Geographical Research*, 2015, 34(5): 909-921.]
- [20] 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. [Zhao Yanjie, Li Yangbing, Shao Jing'an. Ecological risk assessment of small watershed of the Three Gorges Reservoir Area based on land use change: A case study of Caotang River. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(6): 944-956.]
- [21] 彭建, 谢盼, 刘焱序, 等. 低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡: 以大理白族自治州为例 [J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1747-1761. [Peng Jian, Xie Pan, Liu

- Yanxu, et al. Integrated ecological risk assessment and spatial development trade-offs in low-slope hilly land: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture, China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1747-1761.]
- [22] 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: 3239. doi: 10.3390/su10093239.
- [23] 孙智斌, 高敏华, 崔雪峰. 基于遥感与GIS的天山北坡经济带2000—2015年土地利用动态变化研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 397-404. [Sun Zhibin, Gao Minhua, Cui Xuefeng. Land use change in north slope economic zone of Tianshan Mountain based on remote sensing and GIS from 2000-2015. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2018, 54(3): 397-404.]
- [24] 许妍, 高俊峰, 郭建科. 太湖流域生态风险评价 [J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2896-2906. [Xu Yan, Gao Junfeng, Guo Jianke. The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2896-2906.]
- [25] Lu Y, Qin F, Chang Z B, et al. Regional ecological risk assessment in the Huai River Watershed during 2010-2015 [J]. *Sustainability*, 2017, 9(12): 2231. doi: 10.3390/su9122231.
- [26] 方广玲, 香宝, 王宝良, 等. 苏南经济快速发展地区人类活动生态风险评价: 以镇江市丹徒区为例 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1076-1084. [Fang Guangling, Xiang Bao, Wang Baoliang, et al. Ecological risk assessment of human activity of rapid economic development regions in southern Jiangsu, China: A case study of Dantu District of Zhenjiang City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1076-1084.]
- [27] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1052-1067. [Liu Yanxu, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Urban landscape ecological risk assessment based on the 3D framework of adaptive cycle. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1052-1067.]
- [28] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1068-1079. [Xu Yong, Sun Xiaoyi, Tang Qing. Human activity intensity of land surface: Concept, method and application in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1068-1079.]
- [29] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 等. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析 [J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4307-4316. [Wang Feicui, Wang Dongchuan, Zhang Lihui, et al. Spatiotemporal analysis of the dynamic changes in land use ecological risks in the urban agglomeration of Beijing-Tianjin-Hebei region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4307-4316.]
- [30] 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. [Du Yueyue, Peng Jian, Zhao Shiquan, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters in mountainous areas of Southwest China: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1544-1561.]
- [31] 虞燕娜, 朱江, 吴绍华, 等. 多风险源驱动下的土地生态风险评价: 以江苏省射阳县为例 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1264-1274. [Yu Yanna, Zhu Jiang, Wu Shao-hua, et al. Assessment of land ecological risks driven by multi-sources: A case study of Sheyang County, Jiangsu Province. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1264-1274.]
- [32] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [33] 郭少壮, 白红英, 孟清, 等. 1980—2015年秦岭地区景观格局变化及其对人为干扰的响应 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4080-4088. [Guo Shaozhuang, Bai Hongying, Meng Qing, et al. Landscape pattern change and its response to anthropogenic disturbance in the Qinling Mountains during 1980 to 2015. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4080-4088.]

Spatiotemporal changes of regional ecological risks in Shaanxi Province based on geomorphologic regionalization

LIU Di, CHEN Hai*, GENG Tianwei, ZHANG Hang, SHI Qinqin

(College of Urban and Environmental Sciences/Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System
and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Land surface elements such as land use / land cover are in constant change and dynamic balance, driving the changes of global ecological processes and forming the regional differentiation of landscape, which cause many ecological risks under multi-source stresses. Based on a probability-loss risk model, a multiple hazards and potential ecological damage approach was used to construct a regional ecological risk evaluation system of Shaanxi Province. After identifying multiple hazard types from the perspective of geomorphologic regionalization, potential ecological damages were synthesized by taking landscape pattern and ecosystem services value losses as related factors. The spatial and temporal differentiation of individual risk factors and regional ecological risks in Shaanxi Province between 2000 and 2015 were analyzed. Meanwhile, the spatial and temporal changes of ecological risks were demonstrated from the perspective of geomorphologic regionalization and risk gravity model. Several conclusions were drawn from this analysis: 1) In 2000 and 2015, the multiple hazards index values of Shaanxi Province were 0.3837 and 0.4558, respectively, with an increase of 18.79%. Multiple hazards presented the spatial pattern of high in the north and south and low in the middle, with a W-shaped distribution along the north-south axis. Potential ecological damages were 0.5537 and 0.6270, up by 13.24%. Except for the southern part of the Loess Plateau and the eastern part of the Qinling Mountains, potential ecological damages were high. The regional ecological risks were 0.2429 and 0.2865, rising by 17.95%, and presented a spatial distribution pattern of "three high value areas sandwiched by two low value areas". 2) The ecological risks of the Qinling-Daba Mountains were low and the change rate of risks was small. The change rate of risks of the Loess Plateau and the sandification transitional zone was moderate, and the latter was facing a high risk. The Hanjiang Basin had the highest risks and the Hanjiang Basin and Guanzhong Plain took the first and second places in the change rate of risks, respectively. The risk gravity centers of the Loess Plateau and the sandification transitional zone both moved to the southwest, the risk gravity centers of the Guanzhong Plain and the Qinling Mountains moved significantly to the east, and the risk gravity centers of the Hanjiang Basin and the Daba Mountains jumped to the southeast.

Keywords: regional ecological risks; geomorphologic regionalization; risk gravity; multiple hazards; potential ecological damage; Shaanxi Province