

DOI: 10.5846/stxb202012173213

景培清, 张东海, 艾泽民, 郭斌. 基于格局-过程生态适应性循环三维框架的自然景观生态风险评价——以黄土高原为例. 生态学报, 2021, 41(17): 7026-7036.

Jing P Q, Zhang D H, Ai Z M, Guo B. Natural landscape ecological risk assessment based on the three-dimensional framework of pattern-process ecological adaptability cycle: a case in Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 7026-7036.

基于格局-过程生态适应性循环三维框架的自然景观生态风险评价 ——以黄土高原为例

景培清, 张东海*, 艾泽民, 郭斌

西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054

摘要:传统的景观生态风险评估侧重于评价景观镶嵌体相对于最优格局的偏离程度, 忽视生态系统过程和景观类型内部分异, 使得黄土高原景观生态风险评估存在一定的片面性。综合“格局-过程”的生态适应性循环三维框架, 构建适合自然生态系统的景观生态风险评价指标体系, 对黄土高原 2000 年、2010 年、2017 年的景观生态风险进行评估。从空间分异来看, 相较于传统的景观格局风险指数法仅在沙漠景观呈现高风险单一结果, 本研究结果显示黄土高原景观生态风险由高到低依次为城市和沙漠景观、中部丘陵沟壑区草地景观、西北荒漠草地景观和东南部农田景观、东南部高山林地景观, 具有明显空间分异。从时间变化来看, 生态工程实施以来黄土高原景观生态风险总体呈现持续下降趋势, 平均值由 0.410 降低到 0.385, 但 2010—2017 年下降不明显, 生态工程持续实施对景观生态风险持续下降作用变弱。其中, 自然景观(林地和草地)受生态工程促进生态风险持续降低, 而人工景观(城市和农田)尤其是城市范围的不断扩大促使区域生态风险升高明显, 建议加强城市土地集约高效利用, 同时限制北部环境恶劣小城镇的发展。此外, 中部丘陵沟壑区草地恢复力不足和降水侵蚀力增强也会促使风险升高, 建议在生态保护时给予重点考虑。

关键词:黄土高原; 景观生态风险; 格局-过程; 有序加权平均; 空间格局

Natural landscape ecological risk assessment based on the three-dimensional framework of pattern-process ecological adaptability cycle: a case in Loess Plateau

JING Peiqing, ZHANG Donghai*, AI Zemin, GUO Bin

College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: Recent ecological hazards frequently occurred due to natural ecosystems under direct or indirect pressures and stresses from human society with accelerating changes. In 2019, President Jinping Xi stated that the ecological protection and high-quality development for Yellow River Basin, as an important ecological barrier in China, are critical national needs. Additionally, on behalf of the people of different groups, the health of natural environment and sustainable development of ecology attracts full attention. Especially the Loess Plateau, which experienced the heaviest soil erosion in the middle reaches of the Yellow River basin, is an important object of ecological engineering. Therefore, assessing landscape ecological risk in the Loess Plateau lays an important scientific foundation for optimizing regional natural ecosystem security pattern, and serves ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. However, traditional landscape ecological risk assessment based on evaluating the deviation degree of landscape mosaics from the optimal pattern was biased at Loess Plateau due to underestimating the difference between landscape types and

基金项目:国家自然科学基金(41907409); 陕西省教育厅项目(20JK0760); 陕西省自然科学基金(2021JQ-563)

收稿日期:2020-12-17; **网络出版日期:**2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhang_donghai@126.com

ecosystem processes. Therefore, a landscape ecological risk assessment index system should be further developed based on a comprehensive pattern-process ecological adaptability cycle three-dimensional framework. The landscape ecological risks of the Loess Plateau are then respectively evaluated in 2000, 2010, and 2017. The results of the spatial distribution were significantly different from the simple phenomenon of high risk only in desert landscapes using the traditional landscape pattern risk index method. The ecological risk show descending tendency in the following four regions, urban and desert landscapes, grassland landscapes in the middle of hilly and gully areas, desert grassland landscapes in the northwest, farmland landscapes in the southeast, and alpine woodland landscapes in the southeast. Additionally, the average value of landscape ecological risk has been decreasing from 0.410 to 0.385 whilst implementing the grain for green project between 2000 and 2017. It is worth noting that, the impact of ecological project on the sharp decline of landscape ecological risk becomes weaker in recent years, according to the slightly decrease tendency from 2010 to 2017. Further, although natural landscape units (i.e. woodland and grassland) have been made better by ecological projects, the ecological risks in artificial landscapes (i.e. cultivated field and construction land) have been decreasing due to urban expansion. We strongly suggest to strengthen the intensive and efficient use of urban land and restrict the development of small towns with harsh environments in the north. Serious considerations for ecological protection should also be taken into in hilly and gully region in the central Loess Plateau since insufficient vegetation restoration and increased precipitation erosion at this region will also increase the risk.

Key Words: Loess Plateau; landscape ecological risk; pattern-process; ordered weighted average; spatial pattern

自然生态系统的持续稳定已经成为人类社会发展的先决条件。近年来,由于人类社会的快速发展导致自然生态系统承受着直接或间接的压力与胁迫,这些压力与胁迫产生了诸多生态危害^[1-3]。十九大报告在论述生态文明建设的重要性时,提出“实行最严格的生态环境保护制度”^[4]。科学地评估区域生态风险,优化自然生态系统安全格局成为科学开展生态环境保护的迫切需求。景观生态风险评估是区域生态风险评估的重要方向,主要探讨自然因素或人类活动干扰对生态环境与景观格局交互作用造成的负面影响^[5-6]。自然景观生态风险评估需要将横向的地理空间异质性和纵向生态过程进行耦合,通过景观尺度上对格局与过程定量表征,有效描绘有多风险源和风险受体的自然生态系统对区域生态安全的维护作用^[7]。

目前常见的景观生态风险评估主要侧重于评价景观镶嵌体相对于最优格局的偏离程度的生态风险效应,也就是以土地利用/覆盖变化为诱因的生态风险评价^[8-10]。该方法主要包括两种,一种是土地利用结构综合指数法^[11-12],该方法考虑评价单元内各土地利用类型的面积比例及其类型的风险系数(以经验性为主),一般以二者的乘积表征该类型的生态风险,将各类土地类型的生态风险之和为评价单元的生态风险值(即加权求和);另一种方法是景观格局的风险指数法^[13-15],该方法是在前者的基础上,将经验性的景观类型风险系数改进为各景观类型景观干扰度指数和景观脆弱度指数乘积的平方根,然后进行加权求和计算。尽管上述方法早期在学界得到较为广泛应用,但仍有一定的缺陷^[8]:一是在理论上仅关注静态景观格局,忽略生态系统过程(如空间交互和时间动态),缺乏生态学含义^[16];二是在数据源上仅依赖于土地利用/覆盖数据,受单一数据的详细程度影响会忽视各景观类型内部风险分异且会低估生态风险系数,如黄土高原草地类型中干旱区荒漠草地生态风险程度明显高于半湿润区草地,不能直接统一对待;三是在尺度上多以小范围的规则格网为评价单元,会将本应连通的景观斑块分离,降低景观格局的优化程度进而高估景观生态风险^[11]。因此,景观生态风险的评价有必要逐渐向多角度、多层次推进,从单一静态格局到考虑时空动态变化,在指标选择上考虑本体暴露与外部干扰相结合的多要素评估,在尺度上打破区域界限考虑个体与区域整合关系^[17-18]。然而,相关研究多选择在沿海地区、河流流域等人类活动剧烈的城市区域,对于森林、草原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仍有待继续深入^[19]。如前人基于“潜力—连通度—恢复力”三维框架对深圳市城市景观生态风险进行了评估^[17],该方法集成社会—生态系统时空动态干扰与暴露指标表征城市景观生态风险,为景观生态风险评估提供了重要的理论发展,但指标体系中表征经济发展强度的夜间灯光

强度及变化趋势并不适合自然生态系统,因此有关自然生态系统的景观生态风险评估亟待发展。

2019 年习近平总书记指出黄河流域是我国的重要生态屏障,黄河流域生态保护和高质量发展是国家重要战略需求,且社会各界愈加重视自然环境健康以及生态的可持续发展,所以科学优化评估黄土高原的自然景观生态风险就显得尤为重要。随着退耕还林工程的实施黄土高原的空间分布格局发生了巨大的改变^[20-21],自然恢复与人类干预作用强烈,以往的研究多将人类干扰作为负向影响,而黄土高原的植被恢复过程中人类促进作用更为强烈,因此开展黄土高原自然景观生态风险评价具有较强的区域代表性。此外,黄土高原景观生态风险的相关研究还存在一定的不确定性,如刘迪等构建“概率-损失”二维模型考虑到自然灾害和人为扰动等多重因素下的生态风险指出 2000—2015 年陕西地区风险逐渐升高^[22],而傅微等以人类干预(退耕还林和城镇化)角度分析认为退耕还林逐年拓展的区域生态风险趋于降低^[23],因此亟待对黄土高原景观生态风险进行全面系统地评估。

鉴于此,本研究从景观生态学的“格局-过程”出发,结合生态适应性循环三维框架,构建适合自然生态系统的景观生态风险评价指标体系,以黄土高原为例对退耕还林(草)工程实施以来 2000 年、2010 年、2017 年三个时间节点的自然景观生态风险制图,探讨其时空变化特征,并对现状进行多情景制图探讨其生态安全格局建设。评价结果可对黄河流域未来生态规划和高质量发展提供建议和参考。

1 数据及方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国中北部(33°43′—41°16′N,100°54′—114°33′E),属黄河流域中上游地区,是地球上分布最集中且面积最大的黄土区。该地区属温带大陆性气候,由西北内陆干旱气候向暖温带湿润季风气候过渡,年平均降雨量为 200—800 mm,但降水量分布不均多集中在 6—9 月;多年平均温度为 3.6—14.3℃,气温和降雨均呈现从东南向西北递减趋势。黄土高原地形复杂,南部沟壑纵横,水土流失严重,北部为风沙地貌,总体生态环境脆弱,生态风险高。受水热条件和地形影响,黄土高原植被覆盖由东南向西北依次为暖温带夏绿阔叶林、森林草原、干草原及中温带荒漠草原。近年来随着生态工程大力实施,黄土高原植被恢复显著,但同时也受到了强烈城市发展的侵扰,生态风险的增减尚无定论。

1.2 数据源

本研究涉及的数据主要包括数字高程模型(digital elevation model, DEM)、气温、降水、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和土地利用数据等。各数据具体特征和来源如表 1 所示。需要说明的是,尽管 2017 年的土地利用数据产品总体精度达到 85%以上,但在局部地区还存一些问题,例如将起伏度较大的阴影区错分为建设用地,荒漠草地认定为沙漠,本研究对照 Google earth 和 MODIS NDVI 数据对 2017 年土地利用类型中的荒漠草地范围进行修正,并将错分为建设用地的阴影区根据周边临近土地利用类型进行合并,使得该数据与前三期的分类体系和分布基本保持一致,最终将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、建设用地、水体和未利用地等六种类型。

表 1 数据源
Table 1 Data Source

数据 Data type	年份 Years	分辨率 Spatial resolution	来源 Data source
DEM	2009 年	30 m	http://www.gscloud.cn
气温、降水 Temperature and precipitation	2000、2010、2017 年	68 个气象站点数据	http://data.cma.cn
GIMMS 3g NDVI	1990—2000 年	8 km	https://ecocast.arc.nasa.gov
MODIS13Q1 NDVI	2000—2017 年	250 m	https://modis.gsfc.nasa.gov
土地利用数据	1990、2000、2010 年	30 m	http://www.resdc.cn
Land use cover	2017 年	30 m	http://data.ess.tsinghua.edu.cn

2 方法

2.1 自然景观生态风险评估框架和指标体系

生态系统是在一定的时间和空间范围内,生物群落与非生物环境通过能量流动和物质循环所形成的一个相互影响、相互作用并具有自调节功能的自然整体。也就是说,在评估自然景观生态风险时,不仅要考虑静态的空间格局,还需综合考虑动态的生态过程^[24-25]。因此,本研究根据景观生态学的理论体系将自然景观生态风险评估分为格局和过程两个方面,也就是将地理学横向空间异质性与纵向生态过程嵌套起来。鉴于此,本研究参考城市景观生态风险评估的生态适应性循环三维框架(即潜力-连通度-恢复力)^[3,17],构建适合自然景观生态风险评估框架和指标体系,其中格局表示评价对象的空间分布状态及其自身属性和功能(即潜力),而过程包括景观单元在空间邻域上的交互影响(即连通度)和时间上的自身动态持续变化趋势(即恢复力)两个方面。此外,为了区分风险评估中景观的自身属性特征和外界环境对景观的干扰,进一步将各准则中的指标又划分为暴露和干扰两类。具体涉及的指标如下(表2):①格局方面,生态风险的暴露对应于景观单元的地形、土地利用方式和植被覆盖度等要素;而外界干扰主要包括限制植被正常生长的必要条件水热状况和反映黄土高原主要自然灾害水土流失的降水侵蚀力;②过程的连通度方面,生态风险的暴露主要考虑景观类型的分离度和斑块的连通性,前者反应景观受到特定干扰时系统崩溃的概率,景观类型聚集系统崩溃的概率越小,后者表征斑块的稳定性或抵御风险的能力^[26];外界干扰则考虑城市开发对周边的干扰(建设用地距离)和景观单元空间邻域交互作用的影响(景观生态邻接系数);③过程的恢复力方面,生态风险暴露主要考虑植被自身变化过程(植被指数变化趋势),表征其抗干扰能力;外界干扰则考虑土地利用类型流转,表征景观单元自身功能的变化。各指标权重基于层次分析法来确定,本研究基于专家的重要程度打分基础上进行优化确定最终各指标间的重要程度,并基于 AHP 软件计算各指标权重,且通过一致性检验。各评价指标的具体计算方式如表 3 所示。

表 2 基于“格局-过程”的自然景观生态风险评价指标体系

Table 2 Natural landscape ecological risk assessment index system based on pattern-process						
层次 Level	准则 Criterion	风险 Risk	指标 Index	内涵 Connotation	类型 Type	权重 Weight
格局 Pattern	潜力	暴露	坡度	滑坡等地质灾害	+	0.1162
			土地利用类型	土地利用现状	+	0.0732
			植被覆盖度	植被空间分布状况	-	0.1035
		干扰	年总降水量	植被生长的重要因子	-	0.0968
			年平均气温	植被生长的重要因子	-	0.0352
			降雨侵蚀力	潜在水土流失威胁	+	0.0684
过程 Process	连通度	暴露	景观分离度	斑块的聚散程度	+	0.0339
			蔓延度指数	斑块的延展性和连通性	-	0.1299
		干扰	建设用地距离	城市化对于自然生态的影响	+	0.0698
			景观生态邻接系数	空间邻接景观之间的相互作用	+	0.0772
	恢复力	暴露	植被覆盖变化趋势	绿色植被空间恢复程度	-	0.0653
		干扰	土地利用类型	土地利用数据空间变化情况	+	0.1305

“+”表示该指标相对于景观生态风险为正向指标,即数值越大风险可能性越高,则对其采用正向标准化;“-”表示该指标相对于景观生态风险为负向指标,即数值越大风险可能性越低,对其采用负向标准化

需要说明的是,在进行植被覆盖度提取时以非植被区域(包括建设用地和未利用地)NDVI 的 5% 累计概率值作为土壤背景值,以各植被类型的 NDVI 的 95% 累计概率值作为其 NDVI 最大值;考虑到土地利用数据中非植被区域也存在植被覆盖(如土地利用数据中整个建成区均定义为建设用地但实际有些区域是绿化地),此处以耕地的 NDVI 最大值作为建设用地和未利用地的 NDVI 最大值来计算植被覆盖度;将水体的植被

覆盖度直接赋值为 0。在进行蔓延度指数计算时,其值在斑块边缘具有较高的得分,但斑块内部均质区域得分则为零,考虑到不同土地利用类型的抗干扰能力,此处利用土地利用类型进行零值区域重新赋值,具体参见表 3 中的土地利用类型的风险赋值。在计算植被覆盖度时,对于 NDVI 显著性增加区域风险认为植被恢复状态好预期的暴露明显降低,则将其生态风险赋值为 0,对于 NDVI 显著下降区域认为潜在风险增大,赋值为 1。对于植被非显著增加区域,将其趋势反向归一化到[0,0.5],对于植被非显著退化区域,将趋势的绝对值归一化到[0.5,1]。

表 3 各评价指标的计算方法
Table 3 The calculation method of each evaluation index

指标 Index	数据处理方法 Data processing method
坡度 Slope	坡度 $\leq 2^{\circ}$ 时为风险极小,赋值 0;坡度 $\geq 25^{\circ}$ 时为风险极大,赋值为 1;坡度在 $2^{\circ}-25^{\circ}$ 之间归一化处理
土地利用类型 Land use type	设定建设用地风险为 1,未利用地为 0.9,耕地为 0.5,草地为 0.2,水域为 0.1,林地 为 0 ^[17,27]
植被覆盖度 Vegetation coverage	此处采用像元二分法 ^[28-29] 提取植被覆盖度
年总降水量 Annual total precipitation	基于 ANUSPLIN 软件以经纬度为自变量,高程数据为协变量进行插值
年平均气温 Annual average temperature	基于 ANUSPLIN 软件以经纬度为自变量,高程数据为协变量进行插值
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity	基于水土流失方程中 Wischmeier 提出的经验公式来计算 ^[30] ,其中月降水量和年降水量数据均采用 ANUSPLIN 软件插值
景观分离度 Landscape splitting index	利用 Fragstats 4.2 软件对土地利用数据进行计算,其中窗口设置为半径 1 km 的滑动窗口
蔓延度指数 Contagion index	利用 Fragstats 4.2 软件对土地利用数据进行计算,其中窗口设置为半径 1 km 的滑动窗口
建设用地距离 Distance of construction land	土地利用类型中的建设用地边界为起点进行距离制图
景观生态邻接系数 Landscape ecological adjacency coefficient	基于 IDL 软件分析逐个像元与 8 邻域像元的关系并取最大值作为中心像元值,邻接系数如表 4 所示
植被覆盖变化趋势 Change trend of vegetation cover	利用近 10 年的 NDVI 作一元线性回归趋势分析
土地利用类型转化系数 Land use type change coefficient	利用两期土地利用数据进行叠置分析,具体赋值参见景观生态风险邻接系数

表 4 景观生态风险邻接系数矩阵
Table 4 Adjacency coefficient matrix of landscape ecological risk

风险受体 Risk receptor	风险源 Risk sources				
	林地/草地	耕地	水体	未利用地	建设用地
林地/草地 Woodland/Grassland	0	0.4	0.1	0.6	0.9
耕地 Cultivated field	0	0.1	0.2	0.6	0.8
水体 Waters	0	0.5	0	0.6	0.9
未利用地 Unutilized land	0	0	0	0.7	1
建设用地 Construction land	0	0	0.4	0.8	1

2.2 基于 OWA 方法的自然景观生态风险情景设置

为了进一步增加自然景观生态风险评估的在决策中的偏好和可操作性,本研究基于 OWA 算法中次序权重计算黄土高原自然景观生态风险,实现多种决策风险情况下的生态风险评价,为生态安全空间优化决策提供更全面的策略。其情景评估思路是,首先对所有已经乘以 AHP 权重的指标进行重排序,同一位置上的像元 12 个指标值计算结果从大到小重新排序;然后,利用 OWA 算子计算 12 个指标在不同情景下的位序权重;再利用重排序的指标与对应的位序权重相乘求和得到不同情境下黄土高原的景观生态风险。目前常用的 OWA 位序权重的方法为 Yager 所定义的算子^[31-32],公式如下:

$$W_j = Q_{\text{RIM}}\left(\frac{j}{n}\right) - Q_{\text{RIM}}\left(\frac{j-1}{n}\right), \quad j = 1, 2, \dots, n, Q_{\text{RIM}}(r) = r^\alpha \quad (1)$$

式中, j 为位序, W_j 为位序权重, n 为指标数量。 r 为自变量, α 为表征情景的幂指数。其中, $\alpha < 1$ 表示越重要的因子权重越大,位序越高其权重因子越大,即研究者持悲观状态,说明景观生态风险趋于增大; $\alpha > 1$ 时表示位序越低权重因子越大,即研究者持乐观状态,指景观生态风险趋于降低; $\alpha = 1$ 表示无偏好。

3 结果分析

3.1 黄土高原风险时空分布特征

2000年、2010年和2017年黄土高原自然景观生态风险分布如图1所示,三期景观生态风险总体分布特征较为相似,由高到低依次为城市和沙漠景观、中部丘陵沟壑区草地景观、西北荒漠草地景观和东南部农田景观、东南部高山林地景观,具有明显空间分异。就2017年而言,高风险地区(风险 >0.6)主要分布在西北部沙漠地区,东南部零散分布的城市建成区也处于高风险地区,如西安市、洛阳市等,面积分布相对较少仅占全区的3.32%(表5);中风险地区(风险0.4—0.6)面积相对较大,占全区的32.40%,主要分布在黄土高原中部丘陵沟壑区,如甘肃天水、平凉市以及宁夏固原市等,其中相对而言西南部生态风险稍高;全区63.80%的区域处于较低风险(风险0.2—0.4)状态,主要分布于黄土高原东部和南部的平原区(河谷平原区)及西北部荒漠草原平地区(鄂尔多斯乌审旗和鄂托克旗东部);低风险区(风险 <0.2)面积最少,仅占全区的0.48%,主要位于东部和南部的高山林地,如秦岭北麓地区以及吕梁山和太行山。

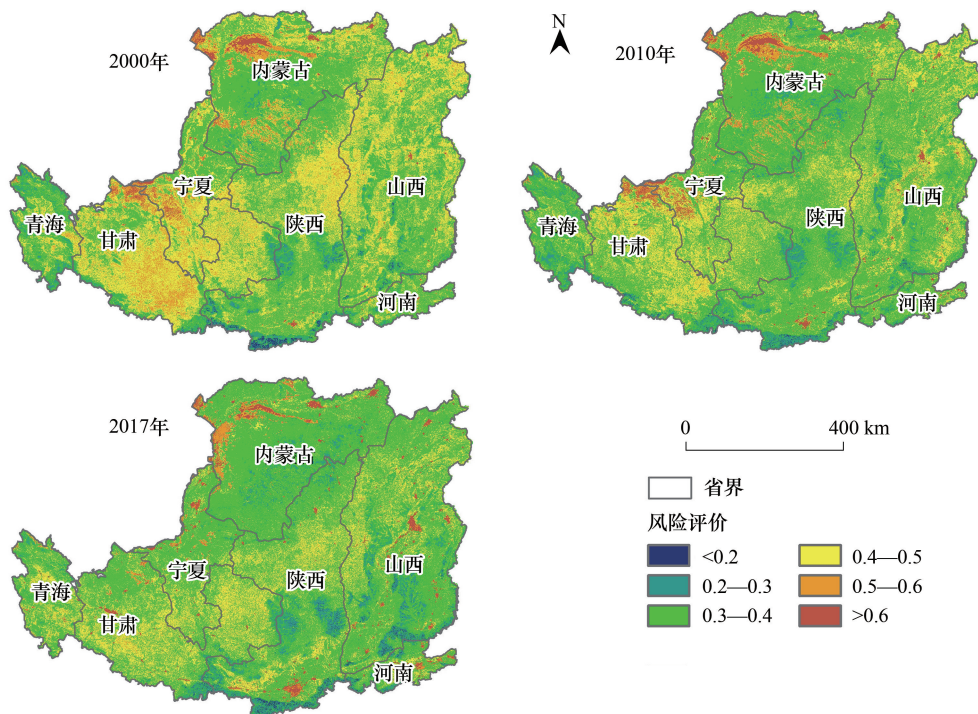


图1 黄土高原景观生态风险分布

Fig.1 Landscape ecological risk distribution on the Loess Plateau

从时间变化上来看,在退耕还林(草)等生态工程实施初期(即2000年)黄土高原景观生态风险总体偏高,平均值为0.410,生态工程实施后10年(2010年)黄土高原景观生态风险降低明显,平均值为0.392,但2017年总体平均水平下降不明显为0.385(表5)。其原因是,2000—2010年,黄土高原中部丘陵沟壑区的中风险区大面积转化为较低风险区,同时内蒙古南部部分荒漠草地的景观生态风险也有所降低,总体上低风险

区(即风险<0.4)增加面积占全区的13.08%;而高风险区(风险>0.6)因东南部城市化发展有所增加,但增加面积占全区的1.36%。尽管2010—2017年景观生态风险平均水平未发生明显变化,但空间上仍具有一定差异,主要表现为东南部城市化持续发展增加的高风险面积多于西北部生态恢复降促进高风险降低的面积,总体上高风险仍在增加,增加面积占总面积的0.07%;在半干旱黄土丘陵沟壑区西部宁夏与甘肃交界的生态风险明显降低,但在其丘陵沟壑区东部(如陕西省榆林市南部)生态风险有所增加;此外值得注意的关中的渭北旱塬区(陕西省宝鸡市、咸阳市等)的生态风险也有所升高。总体而言,近十几年间,自然景观单元(林地和草地)受人类活动促进生态风险持续降低,而人工景观(耕地和建成区)受人类活动干扰生态风险升高明显。

表 5 黄土高原景观生态分级占比/%
Table 5 Proportion of landscape ecological classification in the Loess Plateau

风险等级 Risk level	2000 年	2010 年	2017 年	风险等级 Risk level	2000 年	2010 年	2017 年
<0.2	0.30	0.19	0.48	0.5—0.6	10.10	4.84	4.00
0.2—0.3	6.01	8.62	10.23	>0.6	1.90	3.25	3.32
0.3—0.4	40.89	51.48	53.57	平均风险值 Average risk value	0.410	0.392	0.385
0.4—0.5	40.80	31.62	28.40				

3.2 指标年际变化对黄土高原景观生态风险的影响

黄土高原景观生态风险各指标变化情况如图 2 所示,其中年总降水量、建设用地距离、蔓延度指数和覆盖度指数的平均值相对较大,说明这几个指标对综合风险值贡献大,需要重点关注。从三期变化趋势来看,除建设用地距离、植被覆盖变化趋势和降雨侵蚀力等三个指标外,其余指标均呈现下降趋势,尤其是植被覆盖度在生态工程实施后风险值下降明显,说明近十几年间黄土高原水热条件优越,植被恢复显著,生态风险总体趋于降低。值得注意的是,建设用地贡献率较高,且呈现增长趋势,城市发展对其周边景观生态风险的影响更为强烈;植被变化趋势在近 10 年内风险有所上升,说明该阶段植被恢复处于稳定期,与 2000—2010 年间相比并不显著,其生态恢复潜力不足;此外随着集中性降雨的增多,近年来黄土高原降雨侵蚀力风险明显增大,对于丘陵沟壑区来说该影响不容忽视。

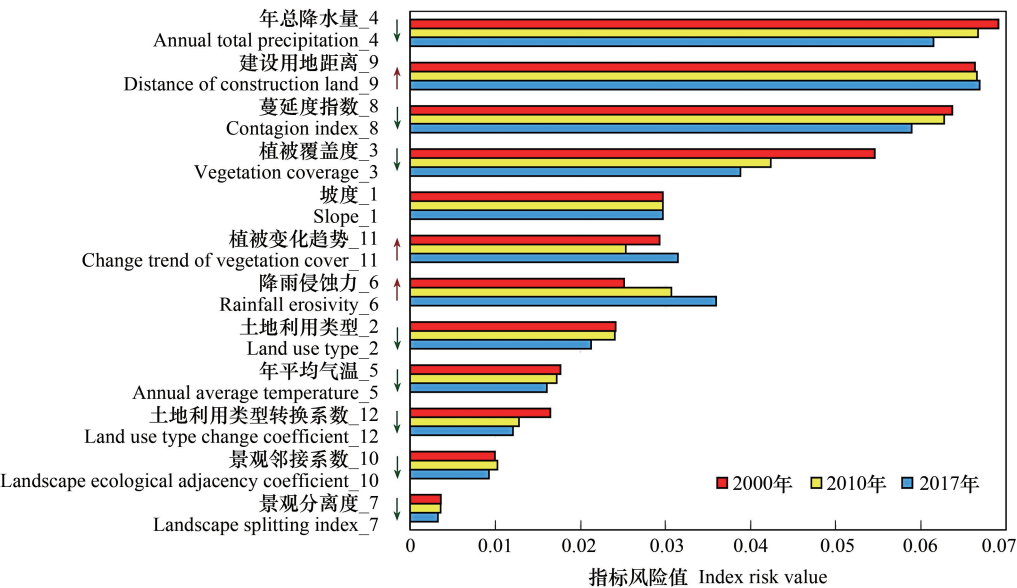


图 2 黄土高原景观生态风险各指标平均值
Fig.2 Average values of landscape ecological risks in the Loess Plateau

3.3 多情景风险制图与分级

设置从悲观到乐观的情景对指标进行 OWA 评价,不同情景的景观生态风险结果如图 3 所示。对比发现,强悲观情景($\alpha=0.2$)下,整个研究区内绝大部分区域处于高风险区域,只有秦岭北麓地区、延安市黄陵县和黄龙县、吕梁山和太行山地区等高山林地处于较高风险区域;较强悲观情景($\alpha=0.4$)下,西北部河套平原均为大面积高风险区,中部丘陵沟壑区也存在大面积高风险区,但格局较为破碎;中等悲观情景($\alpha=0.6$)下,上述高风险区范围进一步缩小,但问题仍然较为严重;弱悲观情景($\alpha=0.8$)下,高风险区与正常情景下一致,主要为城市建成区和沙漠区。弱乐观情景下($\alpha=1.2$)高风险区为城市建成区,其中以北部城市风险相对较为突出,而沙漠地区已降低为中等风险,其他地区均为较低或者低风险区;中等乐观情景($\alpha=1.6$)也是城市建成区和沙漠区风险为中等;较强($\alpha=2.5$)和强乐观($\alpha=5.0$)情景下全区风险值较低。以上情景对景观生态风险评估具有较好的预警效果。

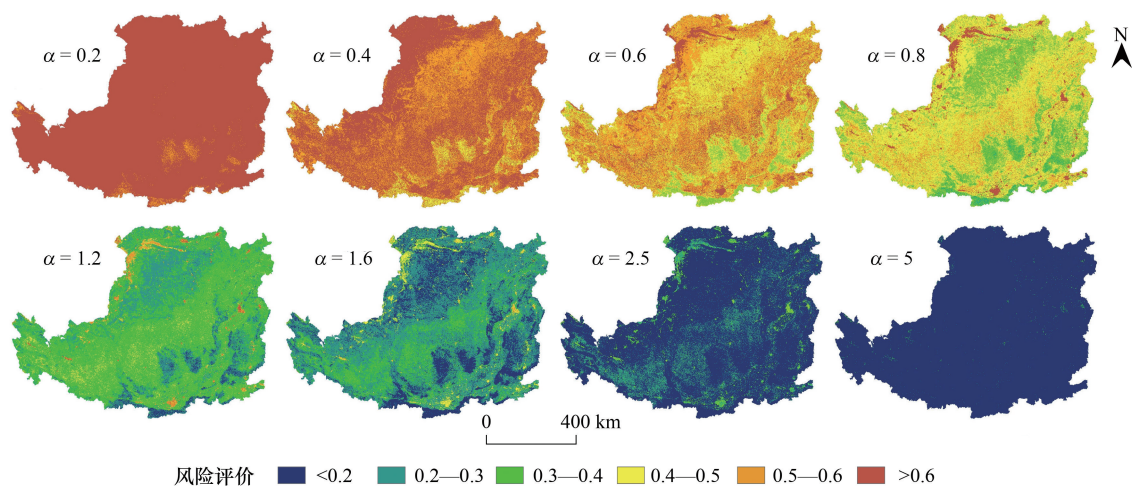


图 3 2017 年黄土高原不同情景下景观风险制图

Fig.3 Landscape risk mapping under different scenarios of the Loess Plateau in 2017

基于以上分析,中等悲观情景($\alpha=0.6$)和中等乐观情景($\alpha=1.6$)图层不仅数据分离度较好,且能够很好地反映风险预警,因此本研究以中等悲观情景为风险恶化潜力,以中等乐观情景为风险控制潜力,进行空间叠置分析,设定当同一个像元控制潜力低于恶化潜力两个等级时则认为该像元生态风险恶化在乐观情景下易控制。结果如图 4 所示,恶化潜力风险 >0.6 的面积占全区的 21.19%,主要分布在城市建成区(如陕西西安市、河南洛阳市等)和西北部的沙漠(内蒙古鄂尔多斯市西北部)大面积连续分布,同时中部丘陵沟壑区也存在大范围不连续分布,其中难控制的面积相对较少,主要为北部城市建成区和杭锦旗乌海市的沙漠地区,面积仅占全区的 2.38%,其余地区其恶化潜力风险均属于易控制性。恶化潜力风险 0.5—0.6 的面积最大,占全区的 42.88%,但基本均属于易控性,其中在西部大面积连续分布,即西南部沟壑区包括甘肃中部等和西北部平原区包括宁夏中南部、河套平原,但在西北部平原区相对更多,其余皆分布在恶化潜力风险 >0.6 区域的外围且成破碎形态,以东部平原和中部丘陵区为主(如陕北榆林地区)。恶化潜力风险 0.4—0.5 的面积占全区面积的 31.96%,主要在西北部荒漠草地区大面积连续分布,在东南部高山林地外围也有部分,且绝大部分属于易控制性,仅 1.57%的面积处于难控性,基本均位于中部丘陵沟壑区,且为碎小斑块。恶化潜力风险 <0.4 的面积占全区面积仅为 3.97%,且基本均属于易控制性,在空间上均为高山林地,在正常情景下均处于低风险区。

4 讨论

4.1 综合格局-过程的生态适应性循环三维框架有利于景观生态风险评价

相较于传统仅依赖于土地利用数据的土地利用结构综合指数法和景观格局的风险指数法,本研究基于综

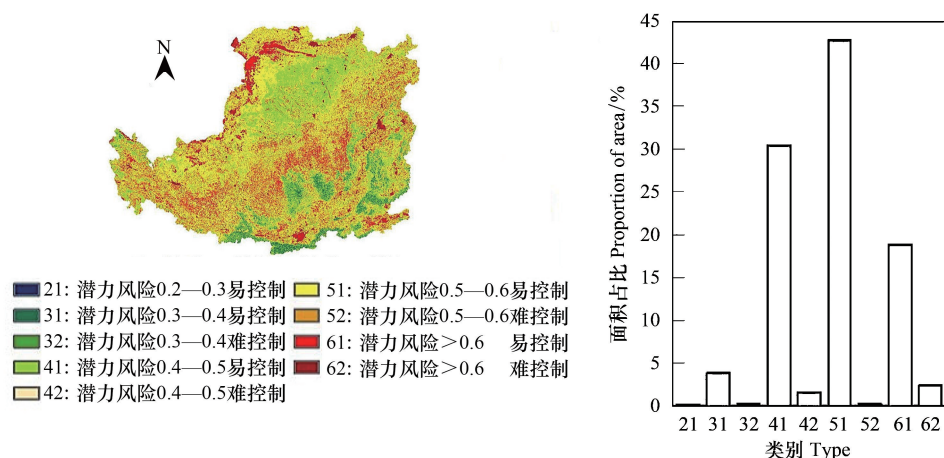


图4 黄土高原景观生态风险潜力分区

Fig.4 Landscape ecological risk potential zoning on the Loess Plateau

合格局-过程的生态适应性循环三维框架(即潜力-连通度-恢复力),构建适合自然景观生态风险评估框架和指标体系,该方法不仅考虑了评价对象的空间分布状态及其自身属性和功能,而且还包括了景观单元在空间邻域上的交互影响和时间上的自身动态持续变化趋势,更为全面和系统地反应景观的格局和过程,符合景观生态系统的本质。另外,本研究还基于传统的景观格局风险指数法对研究区进行了评估,该方法采用干扰度和脆弱度的乘积获得,其中干扰度是由景观破碎度、景观分离度和景观优势度的加权求和获取,脆弱度则依据土地利用类型进行经验赋值^[33]。其评价结果如图5所示,可以看出仅在沙漠区表现为高风险,且北部荒漠草地与南部的沟壑区的草地的风险基本无差异,在制定对策时难以采用具有针对性的措施,而综合格局-过程的生态适应性循环三维框架更有利于景观生态风险评价,研究结果更能体现生态系统的暴露和干扰,生态风险评价图不仅显示土地沙漠化的高风险区域,同时凸显了城市发展和水土流失等黄土高原等多个重点生态问题。

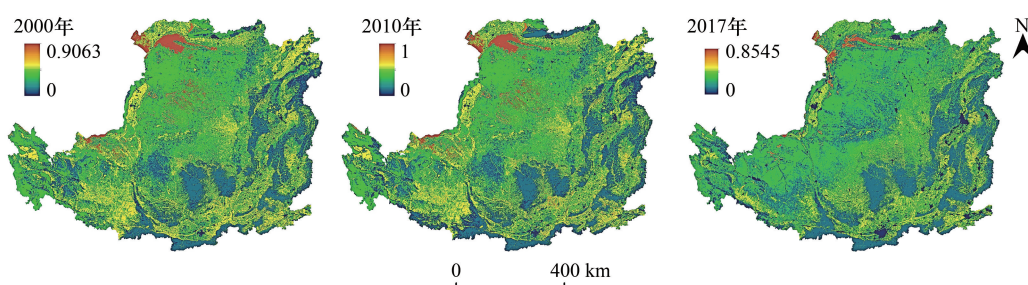


图5 基于景观格局的风险指数法的黄土高原景观生态风险

Fig.5 Landscape ecological risks of the Loess Plateau based on the risk index method of landscape pattern

另外,本研究在参考前人城市景观生态风险评估指标体系的基础上,针对自然生态系统和黄土高原的生态风险胁迫特点对其指标体系进行了改进。例如,本研究聚焦于自然生态系统,因此剔除了反应经济发展状况的夜间灯光强度及其变化趋势,根据黄土高原干旱半干旱的特性在潜力的干扰层中增加了水分限制要素年总降水量,同时考虑到土地开发利用对景观生态风险的影响,在恢复力的干扰层中增加了土地利用类型转化系数。这里需要说明的是,由于景观连通度计算复杂且效率较低,一般适合于小区域(比如城市建成区)的计算,在大区域的黄土高原难以获得相应的计算结果,因此本研究采用同样表征与邻域连通的蔓延度进行替换,并进行改进(见2.1);同时,多样性指数与景观分离度具有较强的相关性,本研究为了继承传统的基于景观格

局的风险指数法,选用了景观分离度替换多样性指数。

4.2 受城市发展影响趋于降低的黄土高原景观生态风险潜力不足

本研究发现 2000—2017 年间黄土高原景观生态风险总体趋于降低,平均值由 0.410 降低到 0.385,但 2010 年景观生态风险已经降低到 0.392,近 7 年间景观生态风险降低潜力明显。景观生态风险总体降低生态工程实施功不可没,林地和草地等自然单元面积不断扩大,沙漠化问题退化,景观连通性变好,且植被覆盖度一直在提升,其景观生态风险总体降低。但是黄土高原同时受到城市扩展影响较强,在城市建成区及其周边农田生态风险不断扩大,是黄土高原景观生态风险局部升高的主要原因。这里需要说明的是,传统的基于景观格局的风险指数法认为建设用地为城市生态系统,其稳定性强于自然生态系统,故赋值最低。然而城市生态系统依赖于外部物质的流入才能维持其强稳定性,一旦切断外部供给则其生态系统就会崩溃;同时城市生态的系统发展比较快,外部的土地和物质补给量大,对其周边会产生强胁迫,因此本研究与刘焱序等^[7]均认为建设用地风险最高,所以黄土高原城市发展是其生态风险的主要干扰源。其次,植被恢复力降低也是景观生态风险降低潜力不足的原因之一,生态工程实施前十年黄土高原变绿显著,但近期基本成型多呈现波动性变化,植被恢复并没有前期显著,Zhao 等^[20]和 Liu 等^[21]也到相似的结果。此外,本研究发现近年来极端降水的增多,该结果与李双双等^[34]成果一致,极端降水的增多会增强丘陵沟壑区的土壤侵蚀的风险,也是阻碍生态风险降低的因素之一。

4.3 生态风险防范建议

根据本研究 2017 年景观生态风险评估及多情景风险制图结果,可以提出针对性的管理举措建议。

(1)高风险区:城市建成区及其周边属于高风险且大部分属于难控制区,尤其是北部外部条件恶劣的城市其景观生态风险极高,建议加强内部土地集约高效利用,合理配置城市内部绿地建设,对于北部环境恶劣的小城镇建议限制发展,促进大城市集中化发展,减少多源干扰。西北地区沙漠区属于高风险潜力易控制区,建议在自然条件允许的情况下可开展生态工程,以较低成本防止恶化为目标。

(2)中风险区:中部黄土丘陵沟壑区属于高风险潜力易控制区,水土流失是该地区的主要问题,近年来生态工程成效显著,建议继续开展生态工程对现有成果进行巩固,对于局部高风险区优先进行针对性保护。

(3)较低风险区:平原农耕区也属于高风险潜力易控制区,城市发展是其主要潜力影响,建议严格落实土地占补平衡政策,提高农田质量,整治撂荒土地;西北部荒漠草地区属于中风险易控制区,该地区早期沙漠化问题明显,近年来生态恢复显著,但总体偏干旱植被以荒漠草地为主,建议在自然条件允许下继续保持和改善。

(4)低风险:高山林地属于中风险潜力易控制区,建议继续保持提高保护等级。

5 结论

本研究综合“格局-过程”的生态适应性循环三维框架,构建适合自然生态系统的景观生态风险评价指标体系,对黄土高原 2000 年、2010 年、2017 年的自然景观生态风险进行评估,分析其时空变化特征并对现状进行多情景制图。主要得到以下结论:

(1)黄土高原景观生态风险空间分布,由高到低依次为城市和沙漠景观、中部丘陵沟壑区草地景观、西北荒漠草地景观和东南部农田景观、东南部高山林地景观,具有明显空间分异。

(2)随着生态工程实施以来,黄土高原景观生态风险总体呈现下降趋势,平均值由 0.410 降低到 0.385,但 2010—2017 年下降不明显,生态工程持续实施对景观生态风险持续下降作用变弱。这是因为尽管自然景观单元(林地和草地)受生态工程促进生态风险持续降低,而人工景观(耕地和建成区)受人类活动胁迫生态风险升高明显,其中城市发展是风险增强的主要原因,此外植被恢复力不足和降水侵蚀力增强也会促使风险升高。

(3)通过模拟不同情景探讨黄土高原安全格局建设,建议在高风险的城市建成区加强内部土地集约高效

利用,限制北部环境恶劣的小城镇发展;西北地区沙漠区属于高风险易控制区,建议在自然条件允许的情况下以较低成本防止恶化为主;中部黄土丘陵沟壑区属于高风险潜力易控制区,建议继续开展生态工程,且对于局部高风险区优先进行保护;平原农耕区建议严格落实土地占补平衡政策,提高农田质量;西北部荒漠草地区建议在自然条件允许下继续保持和改善;高山林地属于中风险潜力易控制区,建议继续保持提高保护等级。

参考文献 (References):

- [1] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.
- [2] Wang B B, Ding M J, Li S C, Liu L S, Ai J H. Assessment of landscape ecological risk for a cross-border basin: a case study of the Koshi River Basin, central Himalayas. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106621.
- [3] Liu Y X, Peng J, Zhang T, Zhao M Y. Assessing landscape eco-risk associated with hilly construction land exploitation in the southwest of China: trade-off and adaptation. *Ecological Indicators*, 2016, 62: 289-297.
- [4] 《中共中央关于坚持和完善中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化若干重大问题的决定》编写组. 中共中央关于坚持和完善中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化若干重大问题的决定. 北京: 人民出版社, 2019.
- [5] 彭建, 谢盼, 刘焱序, 胡晓旭. 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. 地理学报, 2015, 70(11): 1747-1761.
- [6] 吴健生, 乔娜, 彭建, 黄秀兰, 刘建政, 潘雅婧. 露天矿区景观生态风险空间分异. 生态学报, 2013, 33(12): 3816-3824.
- [7] Wu X T, Wei Y P, Fu B J, Wang S, Zhao Y, Moran E F. Evolution and effects of the social-ecological system over a millennium in China's Loess Plateau. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabc0276.
- [8] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题. 地理科学, 2003, 23(3): 264-270.
- [9] Cui L, Zhao Y H, Liu J C, Han L, Ao Y, Yin S. Landscape ecological risk assessment in Qinling Mountain. *Geological Journal*, 2018, 53(S1): 342-351.
- [10] Xue L Q, Zhu B L, Wu Y P, Wei G H, Liao S M, Yang C B, Wang J, Zhang H, Ren L, Han Q. Dynamic projection of ecological risk in the Manas River basin based on terrain gradients. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 283-293.
- [11] 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.
- [12] 胡绵好, 袁菊红, 蔡静远, 周早弘. 河流城市土地利用景观格局变化及其生态风险分析——以江西省德兴市为例. 生态科学, 2018, 37(1): 78-86.
- [13] 巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 高彦净. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2153-2160.
- [14] 谢小平, 陈芝聪, 王芳, 白毛伟, 徐文阳. 基于景观格局的太湖流域生态风险评估. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3369-3377.
- [15] 刘珍环, 张国杰, 付凤杰. 基于景观格局-服务的景观生态风险评价——以广州市为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3295-3302.
- [16] 王洁, 摆万奇, 田国行. 土地利用生态风险评价研究进展. 自然资源学报, 2020, 35(3): 576-585.
- [17] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. 地理学报, 2015, 70(7): 1052-1067.
- [18] Luo F H, Liu Y X, Peng J, Wu J S. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 125-134.
- [19] 李青圃, 张正栋, 万露文, 杨传训, 张杰, 叶晨, 陈裕婵. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [20] Zhao A Z, Zhang A B, Liu J H, Feng L L, Zhao Y L. Assessing the effects of drought and "Grain for Green" Program on vegetation dynamics in China's Loess Plateau from 2000 to 2014. *CATENA*, 2019, 175: 446-455.
- [21] Liu X F, Hu B Y, Zhang D H. Differences in monitoring vegetation dynamics between Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Collection 5 and Collection 6 vegetation index products on the Loess Plateau, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(15): 5957-5972.
- [22] 刘迪, 陈海, 耿甜伟, 张行, 史琴琴. 基于地貌分区的陕西省区域生态风险时空演变. 地理科学进展, 2020, 39(2): 243-254.
- [23] 傅微, 吕一河, 傅伯杰, 胡维银. 陕北黄土高原典型人类活动影响下景观生态风险评价. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 290-299.
- [24] Chen L D, Liu Y, Lü Y H, Feng X M, Fu B J. Pattern analysis in landscape ecology: progress, challenges and outlook. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [25] Cao Q W, Zhang X W, Lei D M, Guo L Y, Sun X H, Kong F E, Wu J S. Multi-scenario simulation of landscape ecological risk probability to facilitate different decision-making preferences. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 325-335.
- [26] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121-125.
- [27] 马胜, 梁小英, 刘迪, 段宁, 陈海. 生态脆弱区多尺度景观生态风险评价——以陕西省米脂县高渠乡为例. 生态学杂志, 2018, 37(10): 3171-3178.
- [28] 陈晋, 陈云浩, 何春阳, 史培军. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用. 遥感学报, 2001, 5(6): 416-422.
- [29] 张东海, 任志远, 王晓峰, 白江涛, 刘宪锋, 冯雪铭. 基于 MODIS 的陕西黄土高原植被覆盖度变化特征及其驱动分析. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 29-35.
- [30] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26(5): 189-193.
- [31] Yager R R. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 1996, 11(1): 49-73.
- [32] Zarghami M, Szidarovszky F. Fuzzy quantifiers in sensitivity analysis of OWA operator. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 54(4): 1006-1018.
- [33] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. 生态学报, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [34] 李双双, 孔锋, 韩鹭, 延军平, 汪成博, 武亚群. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素. 地理研究, 2020, 39(1): 140-151.