

# 基于 SRP 模型的喀斯特山区生态脆弱性评价

## ——以遵义市为例

张娜 周国富 雷婧 韦荣婷<sup>1</sup>

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

**【摘要】**为了探讨快速城镇化背景下喀斯特山区的生态脆弱性, 本文以遵义市为研究区, 基于 SRP 模型, 从生态敏感性、生态恢复力和生态压力度三方面构建包含自然和人文因素的 17 个指标体系, 采用层次分析法, 从区域整体、县域、不同坡度耕地 3 个维度揭示研究区的生态脆弱性。结果表明: (1) 研究区生态脆弱性以轻度脆弱性为主, 占研究区总面积的 30%, 且空间差异显著, 总体由城市核心向外逐渐减弱的趋势。(2) 从县域尺度看, 较发达城市腹地受工业化和城镇化影响, 多以极度和重度脆弱为主, 其中红花岗区、汇川区、新蒲新区、播州区和仁怀市最为严重, 处于非喀斯特地区的赤水市生态脆弱程度最弱。(3) 耕地的生态脆弱性受坡度影响明显, 坡度 $<6^\circ$  的耕地, 重度及以上脆弱性面积比例高于中度及以下脆弱性,  $>6^\circ$  的耕地则相反。耕地脆弱面积主要集聚于  $6^\circ \sim 25^\circ$  的坡度之间, 在 $<25^\circ$  的耕地范围内, 脆弱面积随坡度增加, 涨落幅度递增; 在 $>25^\circ$  的耕地范围内, 涨落幅度递减。研究可为遵义市协调社会经济发展与生态保护, 优化耕地利用方式提供数据支撑和决策支持。

**【关键词】** 生态脆弱性 SRP 模型 喀斯特山区 遵义市

**【中图分类号】**: X171 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1003-6563(2022)03-0043-08

频繁的人类活动及资源的不合理利用加剧了人地矛盾, 导致生态系统自我恢复能力不断下降, 水土流失、极端天气、石漠化等生态环境问题频发<sup>[1]</sup>, 极大地威胁了区域的生态安全。对生态环境的科学认识和合理的优化调控, 是协调区域生态环境与经济发展的重要手段, 亦是生态文明建设的迫切需求<sup>[2]</sup>。1905 年, 美国学者 Clements. F. E 首次将 Ecotone 这一术语引入生态学<sup>[3]</sup>。随着人地关系研究的深入, 生态脆弱性研究逐渐成为生态学、地理学、环境学等学科研究热点<sup>[4]</sup>。当前层次分析法<sup>[5]</sup>、主成分分析法<sup>[6]</sup>、熵权法<sup>[7]</sup>等研究方法已经被广泛应用到生态脆弱性评价中。从研究区域来看, 生态脆弱性研究主要集中在自然条件较差、人为干扰较严重的地区, 如青藏高原高寒区<sup>[8]</sup>、南方丘陵区<sup>[9]</sup>、干旱半干旱区<sup>[10]</sup>、黄土高原<sup>[11]</sup>等区域。近年来, 东部沿海城市<sup>[12]</sup>、矿业城市<sup>[13]</sup>、农牧交错区<sup>[14]</sup>等人为干扰严重的区域逐渐成为学术界关注的焦点。目前针对喀斯特山区生态脆弱性的研究主要集中在水土流失、石漠化严重、经济发展相对滞后的典型区域<sup>[15, 16]</sup>和流域<sup>[17, 18]</sup>, 由于自然因子和人为因子对生态脆弱性的影响复杂, 各因子相互影响, 难以在相对独立的条件下评价二者对生态脆弱性的影响, 绝大多数学者注重于自然因子对生态脆弱性的影响<sup>[19, 20]</sup>, 而对人为因子的关注度不够, 尤其对快速城镇化和工业化背景下人地矛盾突出的喀斯特山区生态脆弱性的研究略显不足。

贵州省特殊的地质地貌背景下, 生态环境表现出敏感性高、环境容量低、抗干扰能力弱等特征<sup>[21]</sup>, 不合理的人类活动使原本就比较脆弱的喀斯特环境向恶性循环的方向发展。遵义市作为贵州第二大城市及工业强市, 独特的喀斯特地貌和人地矛盾突出, 导致水土流失和石漠化等环境问题, 快速的经济发展和城镇化进程则使资源环境承载力过度负荷<sup>[22]</sup>, 造成极大的生态压力。因此,

<sup>1</sup>**作者简介:** 张娜 (1996-), 女, 硕士, 研究方向: 水土保持与国土整治方向。周国富 (1963-), 男, 硕士生导师, 教授, 研究方向: 水土保持与国土整治方向。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (41771115); 贵州省科技计划资助项目 (黔科合基础[2019]1231 号)

将快速城镇化背景下喀斯特山区的代表遵义市作为研究区，基于地形、土壤、植被、土地利用及社会经济等自然和人文因素数据，以 SRP 模型为评价体系，采用层次分析法和综合指数法，从区域整体、县(区)、不同坡度耕地 3 个维度分析研究区的生态脆弱性，旨在揭示遵义市生态脆弱性空间分布格局，针对生态脆弱性分区进行归因分析并提出管控策略，力图为协调喀斯特山区社会经济发展和环境保护，优化耕地利用方式提供科学依据。

## 1 研究区概况

遵义市( $27^{\circ} 8' \sim 29^{\circ} 13' N$ ,  $105^{\circ} 36' \sim 108^{\circ} 13' E$ )隶属贵州省，地处中国西南腹地，云贵高原东北部，总面积约  $30762 km^2$ ，总人口约 800 万人。遵义市属亚热带高原湿润季风气候，年平均气温  $15.4^{\circ}C$ ，年平均降雨量  $1246.6 mm$ 。研究区地形复杂多样，地势西北高东南低，西北以中山峡谷为主，山高谷深，东南以中山丘陵和宽谷盆地为主，较平坦开阔(图 1)。地形起伏大，岩溶作用强烈，滑坡、泥石流、水土流失等自然灾害频发，局部地区石漠化严重。主要土壤类型包括石灰土、粗骨土、紫色土、黄壤、黄棕壤、水稻土等。2018 年末，遵义市完成地区生产总值  $3000.23$  亿元，增长  $10.4\%$ ，排全省第 3 位；规模工业增加值增长  $12.1\%$ ，排全省第 1 位。城镇化率由 2000 年的  $22.98\%$  上升到 2018 年的  $49.46\%$ 。

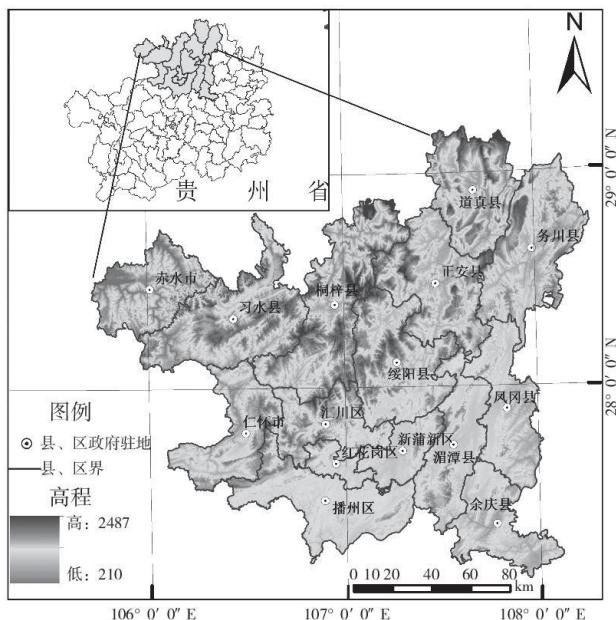


图 1 研究区地理位置示意图

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本文采用的数据包括遥感数据、DEM 数据、植被数据、气象数据及社会经济数据。土地利用数据选用基于 2017 年分辨率为  $30m$  的 Landsat 遥感影像 (<http://www.gscloud.cn>)，采用 ENVI5.3 进行监督分类以及目视解译获得，最后运用 GoogleEarth 进行校正。DEM 数据和 NDVI 数据均来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)，气象数据来源于中国气象数据共享网络 (<https://data.cma.cn/>)；土壤数据来源于全国第二次土壤普查汇总成果所形成的土壤资源数据库；水土流失数据来源于《乌江流域遵义境内 2016-2020 水土保持公告项目》。社会经济统计数据来源于遵义市统计年鉴以及各县的社会经济统计公报。水土流失率、水资源总量、生物丰度、人口密度、人均 GDP、城市化率、第二产业比重先在 ArcGIS10.0 中对遵义市各县区的矢量图层进行赋值，最后对赋值后的数据进行栅格化，所有数据经过预处理后均为  $30m \times 30m$  的 image 数据，详细数据来源见表 1。

表 1 研究区详细数据来源

数据类型	指标	指标描述及计算	数据来源
地形因子	高程	采用 DEM 数据	地理空间数据云平台 ( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
	坡度	采用 DEM 数据, 利用 ArcGIS 表面分析提取	
	地形起伏度	采用 DEM 数据, 利用 ArcGIS 焦点统计提取, 算单位面积内最大高程值与最小高程值差值	
地表因子	水土流失率	水土流失面积/总面积	乌江流域遵义境内 2016-2020 水土保持公告项目
	土地利用类型	由遥感影像划分 6 个土地利用类型	Landsat 影像数据
	坡耕地面积比	利用 ArcGIS, 将耕地与坡度数据叠加	
	土壤类型	30*30 栅格数据	全国第二次土壤普查
	石漠化程度	30*30 栅格数据	
气象因子	气温	利用气象数据, 采用克里金插值	国气象数据共享网络 ( <a href="https://data.cma.cn/">https://data.cma.cn/</a> )
	降水		
	水资源总量	以县区为单元, 处理为 30*30 的栅格数据	遵义市水资源公报
植被因子	归一化植被指数 NDVI	$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}$	地理空间数据云平台 ( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
	生物丰度	生物丰度=(0.11*耕地面积+0.35*林地面积+0.21*草地面积+0.28*水体面积+0.04*建筑用地面积+0.01*裸地面积)/研究区总面积。	土地利用数据
社会经济因子	人口密度	人口总量/总土地面积	遵义市统计年鉴; 遵义市国民经济发展公报
	人均 GDP	社会产品和服务的产出总额/总人数	
	城市化率	城镇人口/总人口	
	第二产业比重	第二产业总产值/地区生产总值	

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 评价模型构建

SRP (sensitivity-resilience-pressure) 模型是一项能全面反映生态脆弱性的综合评价模型<sup>[23]</sup>, 已在环渤海地区<sup>[24]</sup>、石羊河<sup>[25]</sup>、白龙江<sup>[26]</sup>流域、西南山区<sup>[27]</sup>、沂蒙山区<sup>[28]</sup>等地区广泛应用。根据研究区生态环境现状及存在的问题, 从生态敏感性-生态恢

复力-生态压力”三个维度筛选 17 个指标构建遵义市生态脆弱性评价体系(表 3)。生态敏感性指区域生态环境抵抗各种外在干扰的能力, 用地形因子、地表因子、气象水文因子表示。其中, 地形因子是影响喀斯特地区生态环境的重要因素, 用海拔、坡度、地形起伏度表示; 地表因子包括坡耕地面积比、土地利用类型、水土流失率、石漠化程度和土壤类型; 气象水文因子包括年均气温、年均降水量和水资源总量。生态恢复力是指生态系统在外界干扰下环境的恢复能力, 用植被归一指数和生物丰度表征植被情况和生态活力; 生态压力表示生态环境受到外界干扰及产生的效应, 用人口密度、人均 GDP、城市化率和第二产业比重表示。SRP 模型能反映自然因素和人为干扰的双重影响, 适用于喀斯特山区的生态脆弱性评价。

## 2. 2. 2 指标标准化

由于各项指标数据属性的量纲和数量级不同, 需对原始数据进行无量纲与同趋化处理, 本文指标数据包括定量数据和定性数据, 因此, 采取两种标准化方式。

### (1) 极差标准化

对定量化指标的处理, 分别对正负向指标采用不同的标准化, 计算公式如下:

$$\text{正向指标: } X'_i = \frac{X_i - X_n}{X_m - X_n} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } X'_i = \frac{X_m - X_i}{X_m - X_n} \quad (2)$$

式中:  $X'_i$  为指标标准化后的值,  $X_i$  为指标原数据的值,  $X_m$  为指标原数据最大值,  $X_n$  为指标数据最小值。

### (2) 分级赋值法标准化

针对定性指标, 参照雷波等<sup>[29]</sup>的无量纲处理, 根据研究区的土壤、土地利用及石漠化特征, 土壤类型根据该类型的可蚀性 K 值分级赋值<sup>[30]</sup>, 土地利用类型和石漠化程度结合相关研究成果<sup>[9,31]</sup>按照分级赋值法进行量化赋值, 最后再进行极差标法标准化处理, 标准化赋值越大, 表示指标对应的等级对生态环境脆弱程度的影响越大, 见表 2。

表 2 定性指标赋值

土地利用类型	土壤类型	石漠化程度	标准化赋值
林地、水体	水稻土	微度石漠化	2
草地	紫色土	轻度石漠化	4
耕地	石灰土	中度石漠化	6
建设用地	黄棕壤、黄壤	重度石漠化	8
未利用地	粗骨土、石质土	极度石漠化	10

### 2.2.3 指标权重确定

本文采用层次分析法(AHP)确定各指标权重。利用 Yaahp7.0 软件,采用1~9标度法对各指标的重要性进行两两比较,构建指标层判断矩阵,并将判断矩阵结果进行一致性检验。经检验,判断矩阵一致性为0.0516,所得要素权重结果可信度较高。模型指标权重计算合理,得到17个单项指标的最终权重(表3)。+表示正向指标, -表示负向指标。

表3 生态脆弱性评价指标体系

目标层	要素层	指标层	指标性质	指标层权重
敏感性	地形因子	海拔	+	0.0442
		坡度	+	0.0884
		地形起伏度	+	0.0442
	地表因子			
		水土流失率	+	0.0945
		坡耕地面积比	+	0.0716
		土地利用类型	定性	0.0543
		土壤类型	定性	0.0216
		石漠化程度	定性	0.0793
	气象水文因子			
		气温	-	0.0253
		降水	+	0.0319
恢复力	植被因子	水资源总量	-	0.0401
		归一化植被指数	-	0.1099
	社会经济因子	生物丰度	-	0.0183
压力度	社会经济因子	人口密度	+	0.0815
		人均GDP	+	0.0686
		城市化率	+	0.0577
		第二产业比重	+	0.0686

### 2.2.4 生态脆弱性计算及分级

以单项指标评价为基础的条件下,利用层次分析法(AHP)确定各要素指标的权重,并采用线性加权方法计算生态脆弱性指数。其公式如下<sup>[32]</sup>:

$$EVI = \sum_{i=1}^n C_i W_i \quad (3)$$

式中: EVI 表示生态脆弱性评价指数,  $i$  表示所涉及的指标数量,  $C_i$  表示指标标准化值,  $W_i$  表示  $i$  个指标的权重值。一般地, 生态脆弱指数越大, 生态环境脆弱程度越高, 反之亦然。

为了保证组内差异最小、组间差异最大, 本文采用自然断点法将生态脆弱性划分为以下 5 个等级, 微度脆弱性 ( $EVI < 0.23$ )、轻度脆弱性 ( $0.23 \leq EVI < 0.29$ )、中度脆弱性 ( $0.29 \leq EVI < 0.35$ )、重度脆弱性 ( $0.35 \leq EVI < 0.42$ )、极度脆弱性 ( $0.42 \leq EVI < 0.69$ )。

### 3 结果分析

#### 3.1 遵义市整体生态脆弱性空间分布特征

研究结果表明(图 2), 极度和重度脆弱性集聚于研究区西南部的核心城市, 主要受到城镇化和工业化的影响。微度、轻度和中度脆弱性呈零星交叉分布在西部、东部和北部, 这与区域特殊的地形地貌有关, 总体呈现“西南部向东部-西部-北部降低”的趋势。由表 4 可知, 研究区不同生态脆弱性等级面积大小顺序为: 轻度脆弱>中度脆弱>微度脆弱>重度脆弱>极度脆弱。根据年度生态脆弱性分级统计结果来看, 微度脆弱性面积为  $7253.12 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 24%; 轻度脆弱区为  $9346.98 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 30%; 中度脆弱区为  $7954.43 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 26%; 重度脆弱区为  $4398.71 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 14%; 极度脆弱区为  $1809.11 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 6%。其中, 轻度脆弱区占比较大。

表 4 不同生态脆弱性等级分区面积及占比

脆弱性等级	面积/ $\text{km}^2$	比重/%
微度脆弱	7253.12	24
轻度脆弱	9346.98	30
中度脆弱	7954.43	26
重度脆弱	4398.71	14
极度脆弱	1809.11	6

#### 3.2 各县(区)生态脆弱性情况及归因分析

由于各生态脆弱等级分布较分散, 为了更好地揭示研究区生态脆弱性, 以 EVI 的平均值确定各县(区)的生态脆弱性等级, 通过对比发现(表 5), 红花岗区在 15 个县(区)中生态脆弱强度最大, 极度脆弱性占该区总面积的 69%, EVI 平均值达 0.45。作为遵义市的中心城市, 除了人口密度、人均 GDP、城市化率高以外, 重工业比重大, 工业布局不合理是导致该区生态脆弱的重要原因, 2017 年红花岗区重工业比重完成增加值占规模以上工业增加值比重达 83.3%, 工业污染加剧了区域的生态脆弱性。

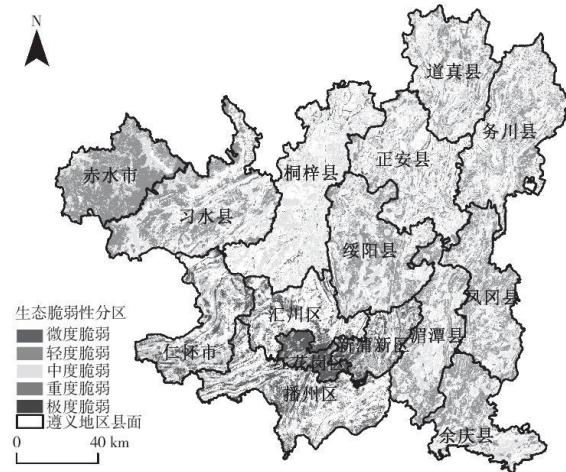


图 2 遵义市生态脆弱性空间分布图

表 5 各县(区)生态脆弱性等级占比及 EVI 平均值

县(区)域	微度脆弱/%	轻度脆弱/%	中度脆弱/%	重度脆弱/%	极度脆弱/%	EVI 平均值	脆弱性等级	排序
红花岗区	0	0	0	31	69	0.454249	极度	1
汇川区	0	0	42	41	17	0.381378	重度	5
播州区	0	0	38	44	18	0.385897	重度	4
新蒲新区	0	0	32	46	22	0.396931	重度	2
仁怀县	0	0	30	51	18	0.386677	重度	3
凤冈	37	42	17	3	0	0.256305	轻度	11
湄潭	35	45	18	2	0	0.255618	轻度	12
绥阳	35	42	18	4	1	0.254679	轻度	13
余庆	36	44	17	3	0	0.250443	轻度	14
赤水	74	22	4	0	0	0.220830	微度	15
习水	43	30	23	3	1	0.258394	轻度	10
桐梓	3	44	42	9	2	0.295945	中度	6
正安	16	38	34	9	3	0.290976	中度	7
道真	23	37	30	8	2	0.285419	轻度	8
务川	26	36	30	8	1	0.286489	轻度	9

新蒲新区、汇川区、播州区和仁怀县均无微度和轻度脆弱性分布, 重度脆弱区占比均达到40%以上, EVI平均值达0.38以上, 整体属重度脆弱区。由于该区域人口与城镇化率高、产业相对密集、经济发展迅速、开发强度大、产业和城市无序扩张导致区域内植被覆盖度较低, 生态环境差。桐梓县、正安县、务川县和道真县4县中度脆弱占比较大, 重度和极度脆弱性少量分布在强烈以上水土流失和石漠化地区, EVI平均值在0.29左右, 整体为中度脆弱区。主要受自然条件影响, 海拔高、坡陡、地形起伏度大、坡耕地面积大, 加之经济条件较差, 耕作方式粗放, 部分水土流失程度达强烈以上且局部石漠化程度较高, 导致较高的生态敏感性, 生态环境较脆弱。湄潭县、凤冈县、绥阳县、余庆县和习水县5县以轻度脆弱为主, EVI平均值均在0.25左右, 整体属轻度脆弱区。该区域海拔较低, 地势较平坦开阔, 水土流失较轻, 人口密度低, 有少量工业分布, 但多为茶叶加工等轻工业, 对生态环境影响较小, 生态环境整体较好。赤水市微度脆弱占比高达74%, EVI平均值仅为0.22, 为全市唯一的微度脆弱区, 由于赤水市是非喀斯特区域且林地覆盖率高, 此外, 境内赤水市桫椤国家级保护区、丹霞地貌自然遗产地和竹海国家森林公园等国家级自然保护区较多, 受政策保护, 人为干扰小, 生态环境本底较好, 加之保护力度大, 生态环境较好。

### 3.3 耕地生态脆弱性的梯度效应

喀斯特山区耕地资源短缺、坡耕地面积大, 不合理的耕地利用方式导致水土流失从而造成土地退化, 形成恶性循环<sup>[33]</sup>。因此, 分析耕地的生态脆弱性对缓解人为因素造成的生态脆弱具有重要的现实意义, 以期为研究区耕地保护提出对策。本文根据不同坡度和不同耕地类型(水田和旱地), 将耕地坡度分为 $0^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 、 $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 、 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 和 $>25^{\circ}$ 等5个等级。

从不同坡度下耕地的脆弱性来看(图3), 坡度 $<6^{\circ}$ 的耕地重度及以上脆弱性面积比例高于中度及以下脆弱性,  $>6^{\circ}$ 的耕地则相反, 水田的变化尤为明显。说明在坡度较小的地区, 受人类活动干扰强烈, 耕地生态脆弱程度较高, 随着坡度不断增大, 干扰逐渐减少, 生态脆弱性强度随之减弱。从不同坡度下的旱地来看, 各等级生态脆弱面积主要集中在 $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的坡度之间, 脆弱性面积随着坡度的增加呈先增后减趋势, 随着坡度增加到 $25^{\circ}$ , 脆弱面积呈减少趋势。水田与旱地在坡度上反映的规律有所不同, 水田的脆弱面积集中于 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 之间, 当坡度 $>15^{\circ}$ , 随着坡度增加脆弱面积不断减少。由于遵义地区耕地主要集中在 $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的坡地, 频繁的农业生产活动导致水土流失严重, 耕地生态环境脆弱。随着坡度的增加, 水土流失愈加严重, 农业投入和产出效果不理想, 坡度 $>25^{\circ}$ 的耕地农业活动逐渐减少, 同时, 在坡度 $>25^{\circ}$ 的坡地上实施退耕还林政策。在较少的人为干扰和政策保护下,  $>25^{\circ}$ 的坡耕地生态环境整体较好, 可见在 $>25^{\circ}$ 耕地实施退耕还林等生态修复工程, 有利于促进区域生态可持续发展。

总的来说, 遵义市耕地的生态脆弱等级为中度脆弱性>轻度脆弱性>重度脆弱性>极度脆弱性>微度脆弱性。从耕地类型来看, 坡度较缓的水田脆弱程度高于旱地, 坡度较陡的旱地脆弱程度略高于水田。从分布格局来看, 位于城市周边地区、强烈以上水土流失和石漠化程度高的耕地区域生态脆弱程度均较高。究其原因, 一方面城市扩张侵占了原有的生态空间, 干扰强度超出了生态系统的自我修复能力, 导致耕地生态环境脆弱, 另一方面, 过度不合理坡耕地开垦加剧了山区耕地的生态脆弱性。

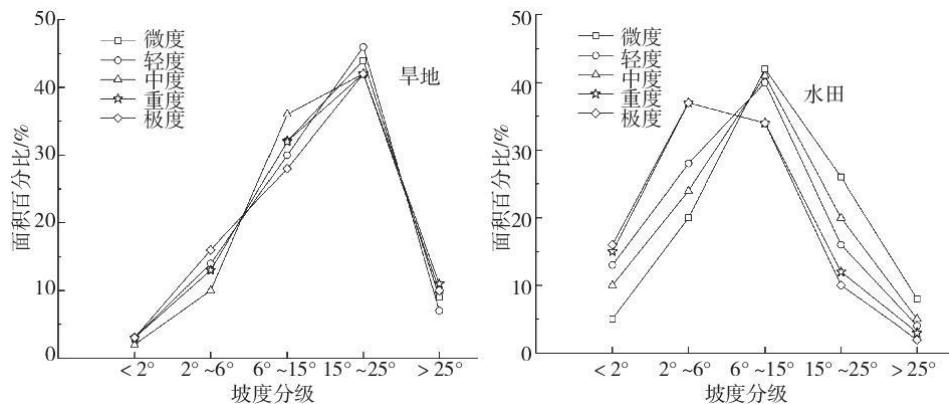


图3 不同坡度下耕地的生态脆弱性

### 3.4 对策建议

针对极度脆弱区，应合理规划城市工业布局，积极调整产业结构，有序推动高消耗、高污染的重工业企业转移到环境承载力较大的区域。此外，应加强生态环境修复治理，协调好经济发展和生态保护之间的关系，缓解区域生态压力。重度脆弱区应坚持区域开发和治理并重的原则，严格划定生态空间与城镇空间的界限，控制开发强度、防止产业和城市无序扩张带来的生态功能损坏；对资源、工业开发及城镇建设过程中，要切实做好水土保持和环评工作，强化城市绿化设施，积极开展生态修复；在抗干扰能力较差的中度脆弱区，应对坡度较大的耕地实施退耕还林和坡改梯等重点生态建设工程，以起到降低土壤侵蚀强度，保持水土的作用，防止生态环境进一步恶化。未来农业发展注重耕地保护，针对坡度较小的耕地，应合理确定城市开发边界和规模，严格控制非农建设占用耕地，坡度较大的耕地要加强坡耕地治理等生态修复工程的实施。

## 4 结论及讨论

本文以遵义市为研究区，基于 SRP 模型，对遵义市的生态脆弱性进行评价分析，所得结论如下：

(1) 从整体上看，遵义市生态脆弱性以轻度和中度脆弱性为主，分别占总面积的 30% 和 26%，整体分布特征呈“西南部向东部-西部-北部降低”的趋势，由城市核心区向外逐渐减弱，除了城市和产业集聚地区生态环境遭到破坏以外，其他地区生态环境相对较好，表明遵义市生态环境受自然本底条件限制，人类活动干扰加剧了生态脆弱程度。

(2) 从各县(区)域的生态脆弱性程度来看，极度脆弱性主要分布于红花岗地区，比率占 69%，微度脆弱区主要聚集于非喀斯特地区的赤水市，比率占 74%。表明红花岗区是遵义市生态脆弱性最严重的地区，赤水市生态脆弱性最弱，进而说明喀斯特地区的生态环境脆弱程度远高于非喀斯特地区。

(3) 从遵义市耕地的生态脆弱情况来看，耕地的生态脆弱主要以中度脆弱为主，部分地区耕地生态脆弱程度较高，急需优化耕地利用方式，坡度对耕地生态脆弱性影响明显，耕地的生态脆弱面积主要集中在  $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$  的坡度范围，坡度  $< 6^{\circ}$  的耕地，重度和极度脆弱性面积比例较大，未来开发要尽量避免非农建设占用耕地， $> 6^{\circ}$  的耕地，尤其是  $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$  的旱地要更加注重坡耕地的治理。

### 参考文献：

- [1] 徐超璇, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口地区生态脆弱性及其影响因素 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1288-1300.
- [2] 张学玲, 余文波, 蔡海生, 等. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述 [J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5970-5981.
- [3] 刘平, 汤万金, 胡聃. 露天煤矿生态系统脆弱性评价方法研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(4): 32-36.
- [4] 杨飞, 马超, 方华军. 脆弱性研究进展: 从理论研究到综合实践 [J]. 生态学报, 2019, 39(2): 441-453.
- [5] 李佳芮, 张健, 司玉洁, 等. 基于 VSD 模型的象山湾生态系统脆弱性评价分析体系的构建 [J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 274-280.
- [6] 王钰, 胡宝清. 西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(7): 947-956.
- [7] 封建民, 郭玲霞, 李晓华. 基于景观格局的榆阳区生态脆弱性评价. 水土保持研究, 2016, 23(6): 179-184.

- 
- [8]于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究, 2011, 30(12):2289-2295.
- [9]姚雄, 余坤勇, 刘健, 等. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3):735-745.
- [10]郭兵, 孔维华, 姜琳. 西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3):412-424.
- [11]李珍珍. 甘肃省生态脆弱性时空演变及与土地利用关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [12]林金煌, 胡国建, 祁新华, 等. 闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(12):4155-4166.
- [13]刘婷. 攀枝花市生态环境脆弱性时空格局变化及驱动力分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [14]王林峰, 张平宇, 李鹤, 等. 东北西部农牧交错带社会生态系统脆弱性[J]. 中国科学院大学报, 2018, 35(3):345-352.
- [15]谢人栋, 赵翠薇. 基于栅格尺度的喀斯特槽谷区生态环境脆弱性时空分异研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4):48-53.
- [16]陈群利, 左太安, 孟天友, 等. 基于 SPA 的毕节水土流失区生态脆弱性评价[J]. 中国水土保持, 201(12):53-56.
- [17]肖小林, 兰安军, 熊康宁. 基于 GIS 的邢江河流域生态环境敏感性分析[J]. 人民长江, 2015, 46(9):68-72.
- [18]安芬, 李旭东, 程东亚. 贵州省乌江流域生态脆弱性评价及其空间变化特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4):261-269.
- [19]李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 等. 西南岩溶山地生态脆弱性研究[J]. 中国岩溶, 2002, 21(1):27-31.
- [20]郭兵, 姜琳, 罗巍, 等. 极端气候胁迫下西南喀斯特山区生态系统脆弱性遥感评价[J]. 生态学报, 2017, 37(21):7219-7231.
- [21]张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1):77-79.
- [22]郜红娟, 韩会庆, 罗绪强, 等. 贵州土地利用变化对淡水生态系统服务的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(1):157-163.
- [23]李永化, 范强, 王雪, 等. 基于 SRP 模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究——以辽宁省朝阳县为例[J]. 地理科学, 2015, 35(11):1452-1459.
- [24]马子惠, 马书明, 张树深. 大连市生态脆弱性评价及其不确定性分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3):237-242.
- [25]贾晶晶, 赵军, 王建邦, 等. 基于 SRP 模型的石羊河流域生态脆弱性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1):34-41.
- [26]齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 等. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. 水土保通报, 2017, 37(1):224-228.

- 
- [27] 姚昆, 余琳, 刘光辉, 等. 基于 SRP 模型的四川省生态环境脆弱性评价 [J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(2):291-295.
- [28] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 等. 基于 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(8):2084-2090.
- [29] 雷波, 焦峰, 王志杰, 等. 黄土丘陵区不同植被带典型小流域生态脆弱性评价 [J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5):149-159.
- [30] 安宏锋, 徐浩, 安宁, 等. 喀斯特山区生态环境脆弱性综合评价——以贵州省黔中地区为例 [J]. 环境影响评价, 2016, 38(4):51-56.
- [31] 谢人栋. 喀斯特山区生态环境脆弱性评价 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2018.
- [32] 李平星, 樊杰. 基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价——以广西西江经济带为例 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(5):779-788.
- [33] 朱青, 崔宏浩, 张钦, 等. 绿肥阻控贵州山区坡耕地水土流失的应用 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(2):101-105.