

基于SRP模型的新安江流域生态脆弱性评价

王熙¹, 李建松¹, 刘权毅¹, 张建新², 唐心悦²

(1. 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 安徽省第四测绘院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 开展生态脆弱性与流域生态补偿机制研究, 对环境保护与生态修复具有重要意义。选取反映流域生态环境的13个指标, 构建生态敏感性-生态恢复力-生态压力度模型(SRP), 运用层次分析法并结合专家打分对指标权重进行赋值, 在500 m×500 m的栅格尺度下叠加生态红线的划定, 对新安江流域2015年和2020年的生态脆弱性进行评价, 可为区域生态保护与修复提出对策和建议。结果表明:(1)新安江流域整体生态状况良好, 极度脆弱区略高于1%, 且与人类活动强度的空间耦合性较好, 呈现由中部核心区向周围逐渐衰减的态势;(2)5年间流域生态敏感性向好发展, 生态恢复力略有下降, 生态压力度维持在稳定态势, 整体生态脆弱性结构稳定, 脆弱性强度值虽下降了0.12, 但86.6%区域的脆弱性等级未发生变化;(3)县域尺度上, 脆弱性变化出现“马太效应”, 生态环境较脆弱的屯溪区、徽州区和黟县生态脆弱性上升, 而生态环境较好的祁门县、休宁县和黄山区生态脆弱性下降;(4)流域生态红线保护区受人类影响较小, 基本无极度脆弱区, 但仍需加大水源涵养功能保护区的维护力度。

关键词: SRP模型; 生态脆弱性; 层次分析法; 生态修复; 新安江流域

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)02-0001-09

土地是人类活动和社会发展的重要空间载体, 为人类生存和发展提供了基础性物质条件(曹嘉钰, 2021)。近年来, 城镇化和工业化快速发展所引起的植被破坏、水土流失等生态系统退化问题, 在某种程度上已严重制约区域可持续发展。生态脆弱性研究是在特定时空尺度下, 对生态系统抵抗外界干扰能力和恢复能力进行量化评价, 可为生态修复、生态保护提供针对性的数据支撑。

目前, 关于生态环境脆弱性评价主要集中在研究尺度的精细、评价指标体系的构建和评价方法的多元化等方面。从研究空间尺度上看, 国外主要集中于大规模、大范围的生态系统对外界生态环境及气候变化敏感程度的前期研究(Horne & Hickey, 1991; Rodriguez & Vila, 1996; Jactap et al., 2003; Eggermont et al., 2010); 而国内多以乡镇、县域(王瑞燕等, 2009)及市域(常溢华和蔡海生, 2022)作为基本评价

单元; 微观尺度则是以栅格、格网进行生态脆弱性评价(王贝贝等, 2019)。构建合理有效的评价指标体系是生态脆弱性评价的关键步骤, 由于不同区域的自然条件和人为因素不同, 研究者所选取的评价模型也各不相同, 最早提出的是压力-状态-响应模型(PSR), 该模型中人与自然的相互作用关系清晰(薛联青等, 2019); 除此之外, 还有暴露-敏感-适应模型(李佳芮等, 2017)、分布式水文模型模型(宋一凡等, 2017)、压力-敏感-弹性模型(孙平军等, 2010)、物元模型(王明全等, 2007)、灰色三角白化权集对分析(SPA)模型(舒英格等, 2020)以及本文运用的生态敏感性-生态恢复力-生态压力度模型(SRP)(张泽等, 2021); 其中, SRP模型依据生态系统稳定性的内在含义构建, 已在生态脆弱性评价中得到广泛应用。随着对评价对象尺度的细化以及对评价模型的深入研究, 评价方法也越来越系统化、多元化, 目前主要的评价方法包括层次分析法(贾运娜和王蕾, 2016)、主成分分析法(类延忠等, 2013)、BP神经网络法(孙国军, 2012)、熵权法(刘鹏举, 2021)、模糊评价法(张宪宇等, 2021)、贝叶斯网络法(莫定源, 2017)等。从时间分辨率上看, 已从过去对单一时点的研究(覃小群等, 2005)转变为多时段的时空演化特征研究(王鹏等, 2021)。尽管当前的研究已经能为流域生态环境状况和修复做出合理评价, 但仍有些许不足。研究尺度上虽然越来越精细, 但缺乏对最优尺度选择的

收稿日期: 2022-04-20 修回日期: 2023-07-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42071368); 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2033216)。

作者简介: 王熙, 2000年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为地理国情监测与自然资源管理。E-mail: 1422100346@qq.com

通信作者: 李建松, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感影像解译、智慧城市地理国情监测教研工作。E-mail: jiansongli@whu.edu.cn

研究;评价指标因子的选取缺乏定量标准,大多是依据主观思想,导致了对于特殊地区缺乏针对性;评价方法越来越趋于智能化,反而对其评价过程缺乏科学性的揭示。

本研究通过对新安江流域干流沿岸的实地考察,并根据流域内生态环境状况,本文选取 13 个有针对性的评价指标因子构建 SRP 模型,综合考虑区域面积以及最小可塑性单元对测算结果的尺度效应,采用 500 m×500 m 的栅格大小进行生态脆弱性评价;同时,选择 2015 年和 2020 年 2 个时间节点对脆弱性变化进行规律总结,探寻其内在驱动因素,叠加生态红线功能区的划定进行统计分析,以期为流域生态保护与修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新安江是安徽省内仅次于长江、淮河的第三大水系,发源于黄山市休宁县,流域总面积约 11 452 km²,其中安徽境内流域面积约 6 018 km²,干流长约 240 km。本文选取的新安江流域涵盖了安徽省黄山市的 7 个县、区(歙县、休宁县、黟县、祁门县、屯溪区、黄山区、徽州区)和宣城市的绩溪县(图 1)。新安江流域水资源丰富,安徽省境内的平均出境水量占千岛湖年均入库水量的 60% 以上,正常年降水量 1 752 mm,河系发育健全,河网密度大,居全省首位,但流域经济总量在省内处于较低水平,且区内经济发展差异明显。

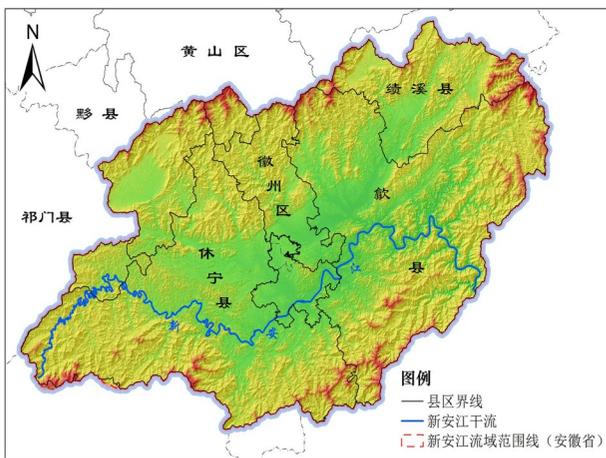


图 1 安徽省新安江流域

Fig.1 Xin'anjiang River basin in Anhui Province

1.2 数据来源及预处理

本研究所用到的数据包括地理国情监测数据、DEM 数据、遥感影像数据、土壤类型数据、气象数据及人口数据,其来源及用途如表 1 所示。

表 1 数据来源及主要用途

Tab.1 Data sources and their usage in this study

资料类别	数据来源	主要用途
2015 年和 2020 年地理国情监测成果	安徽省测绘档案资料馆	提取地表覆盖信息
DEM 数据	安徽省测绘档案资料馆	提取高程、坡度、坡向
正射卫星遥感影像	安徽省测绘档案资料馆、地理空间数据云	提取归一化差值植被指
土壤类型数据	中国科学院资源环境科学数据中心	提取土壤类型分布数据
气象专题数据	安徽省气象局	提取年均降水量、年均气温
人口数据	黄山市、宣城市统计年鉴	人口密度分析

(1)地理国情监测数据:从资料馆获取安徽省地理国情监测成果数据,按照新安江流域的矢量边界进行裁剪,得到研究区域的地表覆盖信息。

(2)DEM 数据:从资料馆获取 5 m 空间分辨率的数字高程模型数据进行矢量裁剪和重采样,再利用 ArcGIS 工具箱的[Aspect]和[Slope]提取坡度和坡向。

(3)遥感影像数据:数据预处理包括辐射定标、大气校正和镶嵌三大步,均可在 ENVI 软件中完成;同样,在该软件中利用[Band Math]工具计算归一化植被指数(NDVI)。

(4)土壤类型数据:在 ArcGIS 中对 1 km×1 km 的栅格数据进行重采样。

(5)气象专题数据:在 ArcGIS 中将表格形式的气象数据转换成矢量点数据后,再进行空间插值与重采样。

(6)人口数据:考虑到不同类型房屋建筑区之间的人口密度差异(李炫等,2020),利用地理国情普查成果地表覆盖数据中的一级类——房屋建筑区图斑,按照其不同属性,以“建筑物面积×楼层数”作为建筑物的有效居住面积,把每个县区的人口数量按照有效居住面积占比分配到每个建筑物;最后,汇总每个栅格内的人口数量除以栅格面积(即 25 万 m²),即可得到该栅格单元的人口密度。

1.3 模型建立

1.3.1 构建评价指标体系 本文针对新安江流域的自然资源空间分布特征,从敏感性、恢复力、压力度 3 个层面选取指标构建 SRP 模型。根据实地考察,新安江两岸虽然植被覆盖度比较高,但大多是低矮灌木丛。因此,在生态敏感性层面,除了基础的坡度、坡向、地表覆盖类型、气温及降水指标,还添加了植被类型因子。当地的气候条件有利于枇杷生长,但干流两岸却鲜见枇杷,说明其土壤类型并不适合种

植,故从生态恢复力的角度,在表征水文和植被长势的基础因子上,加入了土壤类型因子;此外,流域的种植面积占比超过20%,在人口、交通和建筑区的基础压力上,还考虑了耕地占比对脆弱性的影响。综合考虑,本研究构建的新安江流域生态脆弱性评价指标体系如表2所示,并按其属性分为正向、负向和定性指标。

1.3.2 确定评价指标权重 层次分析法(The Analyt-

ic Hierarchy Process, AHP)是20世纪70年代初提出的一种定性与定量相结合的层次权重决策分析方法(杨爱明等,2017)。本文在利用AHP方法得到指标权重后,综合分析专家意见并对相应的指标进行权重调整,得到各指标的最终权重(表2)。生态敏感性是指生态系统对各种气候变化和人类活动干扰的敏感程度(康秀亮和刘艳红,2007),能够反映生态系统在自然状态下生态环境问题出现的概率大小。

表2 新安江流域生态脆弱性评价指标体系权重

Tab.2 Index weighting in the ecological vulnerability evaluation system for Xin'anjiang River basin

目标层	目标层权重	准则层	准则层权重	指标层	属性	指标层权重	因子权重
生态 敏感性	0.3091	地形因子	0.1096	坡度	正向	0.2500	0.0085
				坡向	定性	0.7500	0.0254
		地表因子	0.5813	地表覆盖类型	定性	0.6667	0.1198
				植被类型	定性	0.3333	0.0599
				年均降水量	负向	0.6667	0.0637
气象因子	0.3091	年均气温	负向	0.3333	0.0318		
		水土资源因子	0.2000	水网密度	负向	0.7500	0.0164
土壤类型	定性			0.2500	0.0055		
植被因子	0.8000			归一化植被指数	负向	1.0000	0.0877
生态 恢复力	0.1096	社会经济因子	1.0000	人口密度	正向	0.4891	0.2843
				路网密度	正向	0.1519	0.0883
生态 压力度	0.5813			耕地占比	正向	0.0760	0.0442
				居住地占比	正向	0.2830	0.1645

1.4 数据标准化

为了消除各评价指标量纲及其属性之间的差异性,所有指标都需要进行标准化处理,将栅格值统一至0~10。按表2的属性分为正向指标和负向指标分别进行标准化处理;而定性评价指标则根据栅格值对应不同生态脆弱性等级,按照等级重分类为1、3、5、7、9,不同的数据具体对应方法不同。

$$X = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \times 10 \quad (1)$$

$$X' = \frac{(X_{\max} - X_i)}{(X_{\max} - X_{\min})} \times 10 \quad (2)$$

式中: X 为正向标准化后的栅格值, X' 为负向标准化后的栅格值, X_i 为原栅格值, X_{\min} 为最小栅格值, X_{\max} 为最大栅格值。

1.5 生态脆弱性评价

将所有标准化后的栅格因子图层按表2权重进行GIS加权叠加,该方法结合了空间特性,用栅格图层中每个栅格的量化值乘以对应的权重再求和,计算公式如下:

$$S_i = \frac{\sum_{k=1}^n B_{ki} W_k}{\sum_{k=1}^n W_k} \quad (3)$$

式中: S_i 为流域内第*i*个栅格单元(500 m×500 m)的综合评价价值, n 为流域内的栅格总个数, k 为第*k*个评价指标因子; B_{ki} 为流域内第*i*个栅格单元第*k*个评价指标因子的量化值; W_k 为第*k*个评价指标因子对应的权重,且同时满足 $\sum_{k=1}^n W_k = 1$ 。

2 结果与分析

2.1 生态敏感性

流域生态敏感性按照自然断点法分为极低、较低、中度、较高和极高共5个等级(表3、图2、图3)。其中,极低、较低和中度等级占比均超过20%,流域整体敏感性中等;其主要驱动因素是植被覆盖类型,休宁县南部广泛分布的原生乔木林以及灌木林比次生植被和人工植被更容易受到干扰、敏感性更高。对比发现,极低敏感性区域占比上升了9.8%,较低敏感

性区域下降了 6.5%，中度敏感性区域减少了 1.8%。变化集中在两处，一是休宁县西南部受到降水量增加的影响，由中度敏感转向极低敏感；二是歙县和绩溪县北部受到气温降低的影响，由较低敏感转向中度敏感。因此，虽然空间分布规律变化较大，但各等级占比变化不大，且生态敏感性整体发展向好。

表 3 新安江流域生态敏感性等级划分及占比统计

Tab.3 Ecological sensitivity grading and proportions in Xin'anjiang River basin

敏感性等级	2015 年计算值	占比/%	2020 年计算值	占比/%
极低	1.37~3.75	14.5	2.36~4.09	24.3
较低	3.76~4.52	30.4	4.10~4.85	23.9
中度	4.53~5.34	27.7	4.86~5.74	25.9
较高	5.35~6.30	17.1	5.75~6.79	16.3
极高	6.31~9.33	10.3	6.80~9.24	9.6

2.2 生态恢复力

生态恢复力从水土资源因子和植被因子两方面进行表征，分别对应的具体指标是水系密度、土壤类型以及归一化植被指数。流域整体恢复力较高，约 90% 的区域是中等以上的恢复力，仅 3.8% 左右的区域为极低恢复力(表 4)，但也存在一定问题。水网密度的恢复力比较差，高密度水系仅分布在休宁县的南北两侧及徽州区的南部，在空间上整体呈西高东低的分布格局，这是歙县东南部恢复力不高的原因之一；其次，中度恢复力区域上升 6.8%，而极高恢复力区域下降了 7.1%，观其空间分布情况(图 2、图 3)，休宁县中部及歙县南部植被长势变差(NDVI 值下降)是其主要诱因。

表 4 新安江流域生态恢复力等级划分及占比统计

Tab.4 Ecological resilience grading and proportions in Xin'anjiang River basin

恢复力等级	2015 年计算值	占比/%	2020 年计算值	占比/%
极高	2.36~4.09	34.6	0.92~2.20	27.5
较高	4.10~4.85	41.4	2.21~2.88	40.1
中度	4.86~5.74	13.0	2.89~3.73	19.8
较低	5.75~6.79	7.6	3.74~4.98	8.8
极低	6.80~9.24	3.4	4.99~8.71	3.8

2.3 生态压力度

流域较高压力和极高压力区域占 3.6%，其中极高压力区仅占 0.9%，超过 50% 的区域都是极低压力区，聚集效应十分显著(表 5、图 2、图 3)。在中心高压城区(屯溪区和黟县盆地中部)应继续引导人口和产业向四周转移，以此缓解中心城镇的生态高压。从中心向外辐射分布着以种植为主的徽州区南部和黟县盆地是中度压力区，面积占比略有增长。从 5 年变化情况来看，除了极低压力度区域占比下降了 1.2%，其余所有等级的变化都在 1% 以内。因此，流域整体有一定的承压能力，生态压力度趋于稳定。

表 5 新安江流域生态压力度等级划分及占比统计

Tab.5 Ecological pressure grading and proportions in Xin'anjiang River basin

压力度等级	2015 年计算值	占比/%	2020 年计算值	占比/%
极低	2.36~4.09	58.5	0.00~0.54	57.3
较低	4.10~4.85	28.5	0.55~1.22	29.0
中度	4.86~5.74	9.6	1.23~2.40	10.1
较高	5.75~6.79	2.6	2.41~4.39	2.7
极高	6.80~9.24	0.8	4.40~8.61	0.9

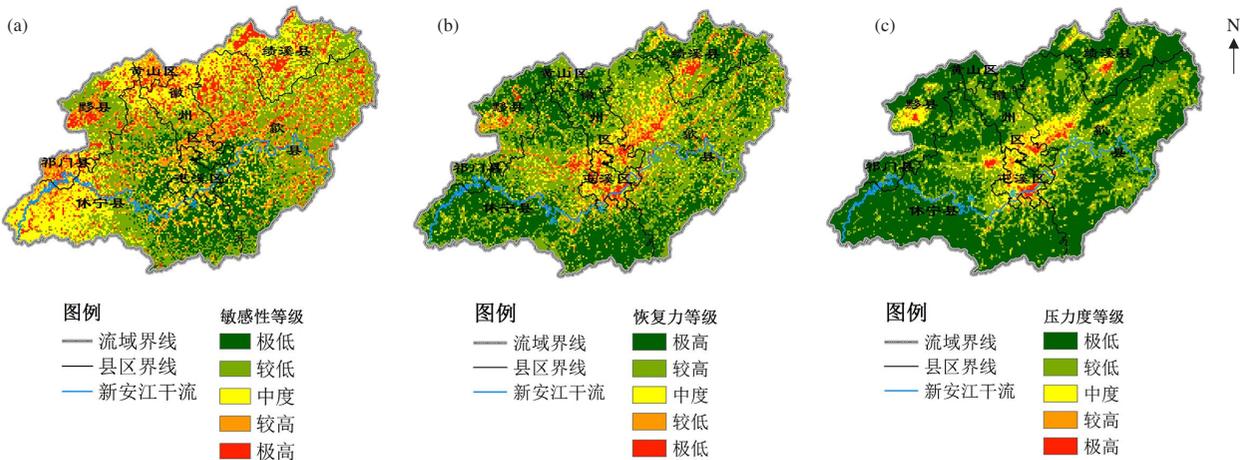


图 2 新安江流域 2015 年生态敏感性(a)、生态恢复力(b)及生态压力度(c)等级分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological sensitivity (a), ecological resilience (b) and ecological pressure (c) in Xin'anjiang River basin in 2015

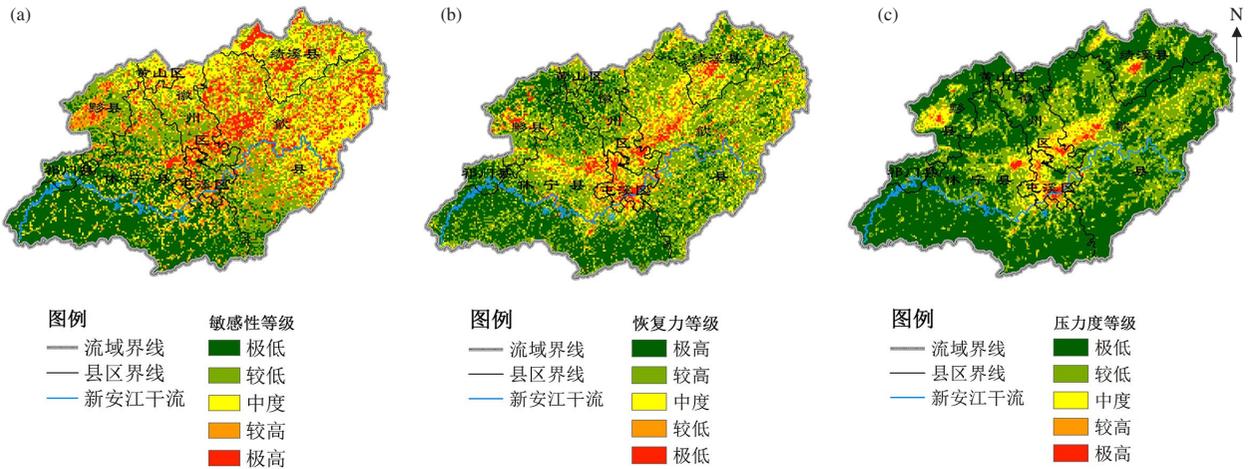


图3 新安江流域2020年生态敏感性(a)、生态恢复力(b)及生态压力度(c)等级分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological sensitivity (a), ecological resilience (b) and ecological pressure (c) in Xin'anjiang River basin in 2020

2.4 生态脆弱性现状

2020年综合生态脆弱性整体良好(图4)。按自然断点法分为5个等级,即微度脆弱区、轻度脆弱区、中度脆弱区、重度脆弱区和极度脆弱区。2015年微度脆弱区占比最高,为54.6%,轻度脆弱区占25.3%,中度脆弱区占13.9%,重度脆弱区占5.1%,极度脆弱区仅1.1%。极度脆弱区分布在屯溪区、徽州区南部、绩溪县中部和黟县盆地;重度脆弱区以及中度脆弱区则是以极度脆弱区为中心向四周辐射分布,仍主

要分布于屯溪区、徽州区和绩溪县;而微度脆弱区和轻度脆弱区大多分布在祁门县、休宁县南部、歙县南部以及黄山区。空间分布规律受地表覆盖类型的影响强烈,脆弱性较高的地区主要以房屋建筑、铁路与道路、构筑物和人工堆掘地覆盖为主,以这些区域为中心向外辐射的中等脆弱区与人类农耕活动相关性较强;南部广泛分布的微度脆弱区域则大部分都是林草覆盖以及水域覆盖,显著的区位优势以及优越的气象条件营造了优质的生态环境。

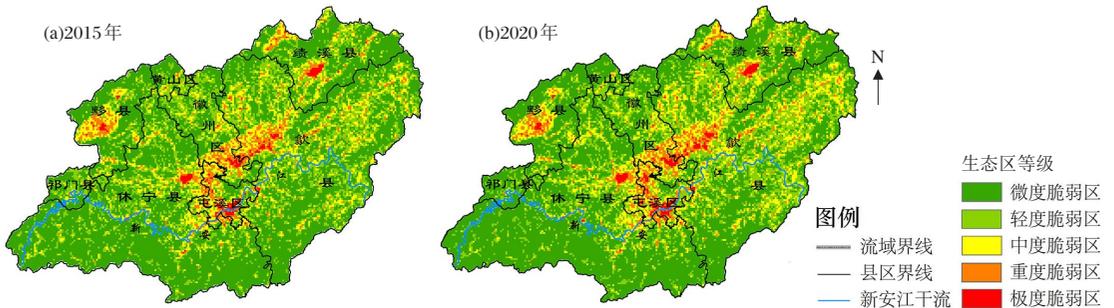


图4 新安江流域生态脆弱性综合评价

Fig.4 Comprehensive assessment of ecological vulnerability in Xin'anjiang River basin

在县域尺度上,各区生态脆弱性差异较大(表6)。2020年最脆弱的县区是屯溪区,中度脆弱以上的区域超过65%,其中极度脆弱区占县区面积的11.2%;其次是徽州区,极度脆弱区占2.3%。生态最好的祁门县没有极度脆弱区,重度脆弱区也仅占0.4%。歙县东南部由于人类耕作活动频繁,中度脆弱区占比接近县域面积的20%,而重度脆弱和极度脆弱区仅占6.0%。

2.5 生态脆弱性变化

2015-2020年新安江流域总体生态脆弱性变化不明显(表7)。从脆弱性计算结果看,2015年为

表6 2020年新安江流域分县区脆弱性统计

Tab.6 Vulnerability statistics of the investigated districts and counties in Xin'anjiang River basin in 2020

县级 区划	脆弱区占比/%				
	微度	轻度	中度	重度	极度
屯溪区	9.5	24.7	29.3	25.3	11.2
黄山区	62.7	28.5	7.4	1.1	0.3
徽州区	41.3	29.8	17.9	8.7	2.3
歙县	41.1	33.4	19.6	5.0	0.9
休宁县	68.5	19.5	8.9	2.6	0.5
黟县	57.5	17.2	15.8	8.2	1.3
祁门县	71.6	24.1	3.9	0.4	0.0
绩溪县	51.1	27.2	14.5	5.3	1.9

0.95~7.41, 2020 年有所下降, 为 0.95~7.29。从面积占比看, 2020 年微度脆弱区为 52.4%, 比 2015 年下降了 2.2%; 轻度脆弱区为 26.2%, 比 2015 年上升了 0.9%; 中度脆弱区为 14.9%, 比 2015 年上升了 1%; 重度脆弱区为 5.2%, 极度脆弱区为 1.3%, 相比其它等级区域涨幅较小, 分别为 0.1% 和 0.2%。

表 7 新安江流域生态脆弱性等级划分及占比统计

Tab.7 Ecological vulnerability grading and proportions in Xin'anjiang River basin

脆弱性等级	2015 年计算值	占比/%	2020 年计算值	占比/%
微度	0.95~1.71	54.6	0.95~1.69	52.4
轻度	1.71~2.32	25.3	1.69~2.31	26.2
中度	2.32~3.08	13.9	2.31~3.08	14.9
重度	3.08~4.45	5.1	3.08~4.40	5.2
极度	4.45~7.41	1.1	4.40~7.29	1.3

从变化等级来看(图 5), 流域整体等级不变的区域占比达 86.6%, 等级上升的区域仅 8.7%, 等级下降的为 4.7%, 即流域内总体等级上升的区域占比大于等级下降的区域, 这意味着新安江流域 2020 年生态脆弱性程度略有升高。在空间分布规律上, 等级变化的区域分布较为破碎, 但等级上升的区域主要集中在歙县和屯溪区, 等级下降的区域则主要是在黄山区和祁门县。结合单因子探究其驱动因素, 植被长势变差是歙县局部地区等级上升明显的主要原因, 而屯溪区是城镇发展中心, 人口、经济、交通的快速发展都在使环境变脆弱。黄山区和祁门县本身生态环境良好, 同时由于气温适宜、降水充足, 植被长势良好, 林草覆盖度也高, 生态修复成效十分明显。

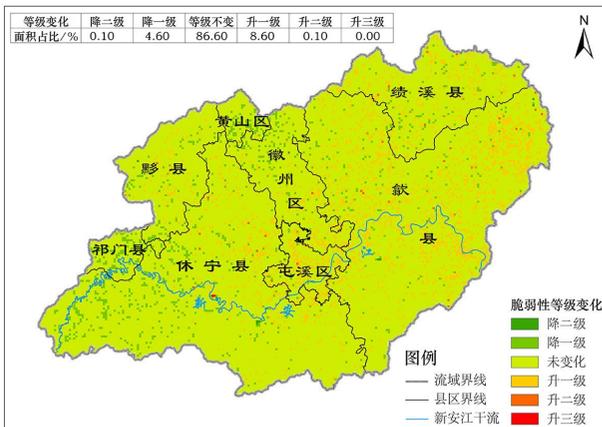


图 5 新安江流域 2015—2020 年生态脆弱性变化

Fig.5 Variation of ecological vulnerability in Xin'anjiang River basin from 2015 to 2020

各县区脆弱性等级变化如表 8 所示, 生态环境明显变脆弱的区域包括屯溪区和歙县。屯溪区等级上

升一级的区域占县区面积的 22.1%, 而等级下降一级的区域仅 2.4%。屯溪人口密度和资本密集程度高, 土地利用格局缺乏系统的规划, 给县区生态环境带来极大的压力。歙县升级区域的占比(13.4%)仅次于屯溪, 该区虽农业发达, 但要尽量避免不合理的开垦和建设, 减少土地荒废, 提高土地利用效率, 加强各种保护土地的措施, 巩固退耕还林成果。

生态环境明显变好的区域包括黄山区和祁门县。祁门县没有生态脆弱性等级上升的区域, 且下降的区域占 23.3%, 黄山区降级区域也较大(18.3%), 升级区域面积仅占 1.3%。黄山区蕴藏着丰富的旅游资源, 有着深厚的文化底蕴, 能完美地发挥地理优势, 打造健康特色生态经济, 带动区域生态建设。

其次, 黟县和休宁县降级区域面积占比均大于升级区域, 但差异不明显, 县区内生态脆弱性以不变化为主(等级不变区域均在 90% 左右)。休宁县虽然林草覆盖达到一定的水平, 但植被质量有所欠佳, 县南部有重度敏感的天然草被和竹林分布, 天然草被可能是由于部分耕地修复不到位, 在以自然修复为主的同时, 应将部分生态修复的重心放在植被类型的改善上; 同时, 休宁县月潭水库库区居民安置点的转移, 导致局部脆弱性上升, 扩展到全流域来说都应注意库区安置与周围生态协调问题, 优化水资源利用。

表 8 新安江流域分县区脆弱性等级变化统计

Tab.8 Vulnerability changes of the investigated districts and counties in Xin'anjiang River basin

县级区划	脆弱性等级变化/%					
	降二级	降一级	不变	升一级	升二级	升三级
屯溪区	0.0	2.4	75.2	22.1	0.3	0.0
黄山区	0.0	18.3	80.4	1.3	0.0	0.0
徽州区	0.1	7.2	84.7	7.9	0.1	0.0
歙县	0.0	1.9	84.5	13.4	0.2	0.0
休宁县	0.1	5.7	90.0	4.1	0.1	0.0
黟县	0.1	5.1	90.7	4.1	0.0	0.0
祁门县	0.0	23.3	76.7	0.0	0.0	0.0
绩溪县	0.0	3.4	87.5	8.9	0.2	0.0

2.6 生态红线保护区

生态保护红线是生态文明建设实现的根本与保障。整个流域内, 生物多样性维护功能区总面积为 549.72 km², 而水源涵养功能区面积是生物多样性的 2 倍, 为 1 225.45 km²。从空间分布看(图 6), 生物多样性维护和水源涵养两大功能区分别占据流域的西北部与东南部。脆弱性等级分析发现, 在生物多样性功能区中, 生态环境被划分为极度脆弱的区域仅占

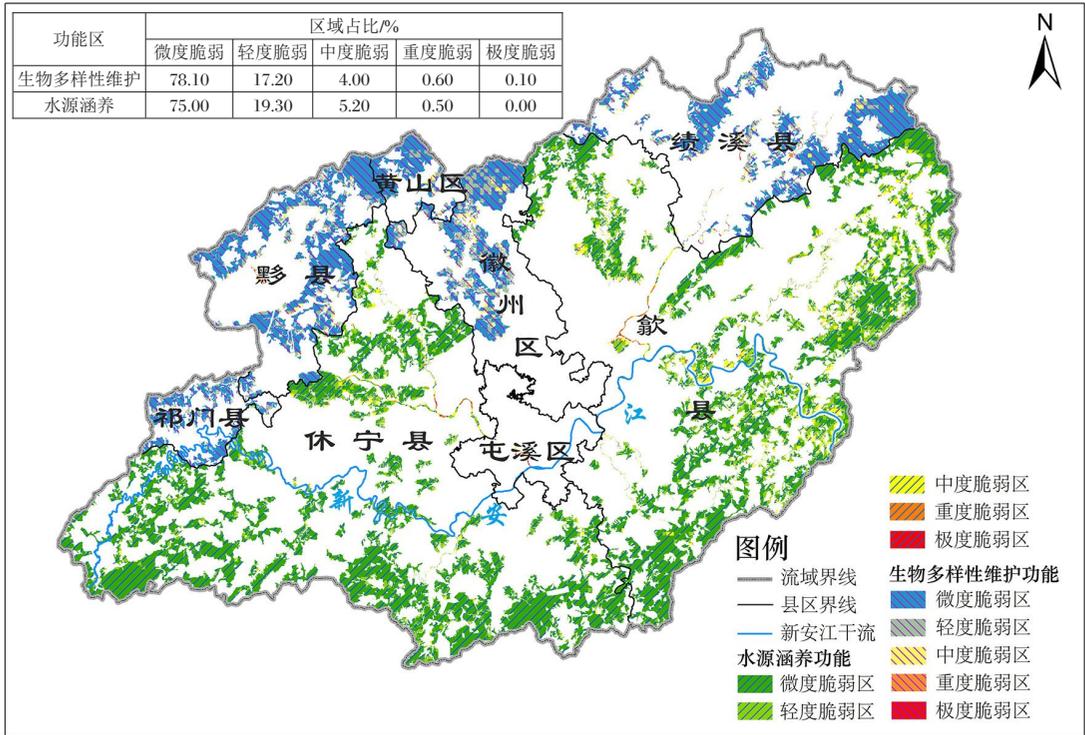


图6 新安江流域2020年生态红线内脆弱性分布

Fig.6 Distribution of vulnerability within the ecological red line areas of Xin'anjiang River basin in 2020

0.10%,可以忽略不计,超过78%的保护区都为微度脆弱;水源涵养功能区中,极度脆弱占比为0,超过75%的保护区都为微度脆弱;表明流域内基本没有重度脆弱区和极低脆弱区,红线内的整体生态维护效果良好,虽然有部分压力较高的区域,但还未触碰生态保护红线。

3 讨论

3.1 新安江流域的生态修复现状与驱动因素

2021年是新安江流域作为我国首个生态补偿机制试点的第10年,流域以生态环境保护为本、以绿色发展为路径,探索并形成了“新安江模式”。在此特色背景的引领下,本文基于多源数据空间分析,结合实地考察与自然环境现状,探究了流域2015–2020年生态脆弱性的时空变化,发现各县区的生态修复效果不尽相同,植被覆盖类型、气象因子以及人类活动因素是影响流域生态脆弱性的主要驱动因素。地表覆盖类型的变化能体现人类活动对自然的改造(朱琪等,2021),屯溪区、徽州区和黟县作为流域发展的增长极,是城镇化建设的主要承载体,建成区面积的扩张对生态环境造成了较大的压力,脆弱性不断升高;自然因素是影响生态环境的直接要素(姚雄等,2016),祁门县、休宁县和黄山区自然资源丰富,地理优势明显,降水丰沛,气温适宜,林草发育良好,是皖

西南地区旅游省市级示范区,旅游发展与生态环境保护已经形成相互促进与协调发展态势,生态质量不断提高,生态脆弱性有所下降。

3.2 新安江流域经济发展与生态保护协调良好

本研究表明,新安江流域生态敏感性中等,生态恢复力整体较高,生态压力度的分布聚集效应明显,脆弱性与人类活动强度有较好的空间耦合性,呈现出由中心向四周逐渐衰退的“核心–边缘”空间分布态势;2015–2020年脆弱性整体变化幅度不大且向好发展,超过85%区域的脆弱性等级不变,且脆弱性计算值下降0.12;在县域尺度上呈现“马太效应”,生态环境本身较差的区域其脆弱性不断提高,而生态环境良好的区域,脆弱性下降,生态质量持续提升;流域整体经济发展与生态保护协调良好,未触及生态保护底线,生态红线保护区内维护效果良好,基本无极度和重度脆弱区。

本次研究只选取了2015年和2020年2个时间点,只能对比分析,无法进行时空演化。气象数据空间化的过程是采用研究区内和及其周围的气象站点数据进行空间插值,其科学性还有待考证;同时,在指标选取上,生态恢复力计算虽然加入了土壤类型因子,但该因子的人为可控性较小。这些不足需要在以后的研究中进一步完善。

参考文献

- 曹嘉铄,2021. 神农架地区生态环境演变及其脆弱性研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学.
- 常溢华,蔡海生,2022. 基于 SRP 模型的多尺度生态脆弱性动态评价——以江西省鄱阳县为例[J]. 江西农业大学学报, 44(1):245-260.
- 贾运娜,王蕾,2016. 基于层次分析法的鹤岗市煤矿区生态脆弱性评价[J]. 安徽农业科学, 44(15):92-93,117.
- 康秀亮,刘艳红,2007. 生态系统敏感性评价方法研究[J]. 安徽农业科学, 35(33):10569-10571,10574.
- 类延忠,冯颖,周宝同,等,2013. 基于主成分分析及聚类分析法的岩溶区生态脆弱性评价——以毕节岩溶区为例[J]. 广东农业科学, 40(2):169-172.
- 李佳芮,张健,司玉洁,等,2017. 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, 36(2):274-280.
- 李炫,张璇,文学虎,等,2020. 基于地理国情数据的人口空间化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 43(12):51-54.
- 刘鹏举,2021. 基于熵权法的生态脆弱性评价——以济南市为例[J]. 环境影响评价, 43(2):70-73.
- 莫定源,2017. 基于贝叶斯网络的生态环境脆弱性评估模型与应用[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所.
- 舒英格,彭文君,周鹏鹏,2020. 基于灰色三角白化权集对分析模型的喀斯特山区农业生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报, 31(8):2680-2686.
- 宋一凡,郭中小,卢亚静,等,2017. 一种基于 SWAT 模型的干旱牧区生态脆弱性评价方法——以艾布盖河流域为例[J]. 生态学报, 37(11):3805-3815.
- 孙国军,2012. BP 神经网络在生态环境脆弱性评价方面的应用:以乌拉特前旗为例[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 48(5):105-114.
- 孙平军,修春亮,王忠芝,2010. 基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究——以辽宁阜新为例[J]. 经济地理, 30(8):1354-1359.
- 覃小群,梁茂珍,陈阵,2005. 基于 GIS 的广西岩溶生态环境脆弱性评价[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), (4):103-106.
- 王贝贝,丁明军,管琪卉,等,2019. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 39(15):5460-5472.
- 王明全,王金达,刘景双,等,2007. 基于物元模型的吉林省西部生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 26(2):291-295.
- 王鹏,赵微,柯新利,2021. 基于 SRP 模型的潜江市生态脆弱性评价及时空演变[J]. 水土保持研究, 28(5):347-354.
- 王瑞燕,赵庚星,周伟,等,2009. 县域生态环境脆弱性评价及其动态分析——以黄河三角洲垦利县为例[J]. 生态学报, 29(7):3790-3799.
- 薛联青,王晶,魏光辉,2019. 基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 47(1):13-19.
- 杨爱明,向青青,杨水,2017. 宁波地区公共建筑土壤热泵系统适宜性评价方法探讨[J]. 浙江建筑, 34(2):56-60.
- 姚雄,余坤勇,刘健,等,2016. 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, 27(3):735-745.
- 张宪宇,鄯晗彤,杨文杰,2021. 基于模糊综合评价法的北京永定河源地生态脆弱性评价[J]. 环境保护科学, 47(3):159-163.
- 张泽,胡宝清,丘海红,等,2021. 基于山江海视角与 SRP 模型的桂西南-北部湾生态环境脆弱性评价[J]. 地球与环境, 49(3):297-306.
- 朱琪,王亚楠,周旺明,等,2021. 东北森林带生态脆弱性时空变化及其驱动因素[J]. 生态学杂志, 40(11):3474-3482.
- Eggermont H, Verschuren D, Audenaert L, et al, 2010. Lirnnological and ecological sensitivity of Rwenzori mountain lakes to climate warming[J]. Hydrobiologia, 648(1):123-142.
- Horne R, Hickey J E, 1991. Ecological sensitivity of Australian rainforests to selective logging[J]. Australian Journal of Ecology, 16(1):119-129.
- Jactap T G, Komarpant D S, Rodrigues R S, 2003. Status of a seagrass ecosystem: An ecologically sensitive wetland habitat from India[J]. Wetlands, 23(1):161-170.
- Rodriguez E, Vila L, 1996. Ecological sensitivity atlas of the Argentine continental shelf[J]. International Hydrographic Review, 69(2):47-53.

(责任编辑 万月华)

Evaluation of Ecological Vulnerability in Xin'anjiang River Basin Based on SRP Modelling

WANG Xi¹, LI Jian-song¹, LIU Quan-yi¹, ZHANG Jian-xin², TANG Xin-yue²

(1. Wuhan University, School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan 430000, P.R.China;
2. Anhui Fourth Surveying and Mapping Institute, Hefei 230031, P.R. China)

Abstract : The study of ecological vulnerability is important for identifying regional ecological and environmental problems and carrying out ecological protection and restoration. We analyzed the ecological vulnerability of Xin'anjiang River basin in Anhui Province from 2015 to 2020 by superimposing the ecological red line delimited at a scale of 500 m × 500 m. The evaluation was based on an ecological sensitivity-resilience-pressure (SRP) model, consisting of 13 indices that accurately and appropriately reflect ecological conditions in the basin, and the weight of each index was assigned by expert scoring and analytic hierarchy. Based on the results, countermeasures and suggestions for regional ecological protection and restoration were recommended. There were four major conclusions: (1) The overall ecological condition of Xin'anjiang River basin is good, and the ecological vulnerability of the basin did not change significantly during the study period, 2015–2020. The area of extreme vulnerability was approximately 1% in 2015 and 1.3% in 2020 and presented good spatial coupling with the intensity of human activities, with gradual attenuation from the central core to the surrounding area. (2) Ecological sensitivity in the Xin'anjiang River basin developed well during the investigation period. Ecological resilience decreased slightly, and the ecological pressure and overall ecological vulnerability were stable. The vulnerability intensity decreased by 0.12, while the vulnerability level (86.6%) of the study area did not change. (3) At the county scale, vulnerability displayed the Matthew effect, and the ecological vulnerability of Tunxi District, Huizhou District and Yi County with fragile ecological environments increased, while the ecological vulnerability of Qimen County, Xiuning County and Huangshan District with robust ecological environments decreased. (4) The ecological red line areas in the basin were little affected by human production and life, and there were no extremely vulnerable areas, but maintenance of water conservation areas should be strengthened. The successful evaluation of ecological vulnerability in Xin'anjiang River basin demonstrates the power of ecological thinking.

Key words: SRP model; ecological vulnerability; analytic hierarchy process (AHP); ecological restoration; Xin'anjiang River basin