

页岩气开发对乌江沿岸景观与生态格局的影响研究¹

张欣^{1,2} 张虹^{1,2*}

(1. 地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆师范大学, 重庆 401331;

2. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

【摘要】:景观生态格局是区域生态安全和可持续发展的基础。以乌江沿岸页岩气开发区为例, 基于 2010、2020 年两期遥感影像、页岩气开发规模等相关数据, 应用移动窗口获取景观格局指数, 计算景观生态风险指数; 构建生态网络, 探究页岩气开发对区域景观格局的直接影响和生态格局的间接影响。结果表明: (1) 2010~2020 年, 乌江沿岸页岩气开发区内林地、耕地分别减少了约 52.78、43.78 km², 建设用地增加 92.04 km², 草地和水域用地基本保持不变。页岩气矿区内景观聚集指数、最大斑块指数降低, 降幅分别为 9.38%~30.61%、14.36%~57.69%; 斑块密度、分离度指数上升, 增幅分别 25.29%~55.39%、2.57%~5.11%, 景观生态风险指数增幅 0.20%~0.52%。(2) 井场、管线、道路等基础设施建设带来的土地损毁, 影响周边景观生态。其中道路沿线斑块密度指数、景观生态风险指数增幅最大, 分别为 50.95%~54.28%、0.59%~0.62%, 对生态环境影响明显。(3) 10 年间, 乌江沿岸生态源地面积减少 250 km², 生态节点增加 10 个、廊道长度增加 55 km, 生物流运行阻碍增强, 不稳定性因素增加。页岩气开发加剧了乌江沿岸地表扰动, 并形成累积效应, 随井场规模增加, 景观、生态格局响应明显。研究对深入认识区域页岩气开发的景观、生态格局影响, 开展针对性地生态保护与修复提供一定参考。

【关键词】:页岩气开发; 景观格局; 生态网络; 生态脆弱区

【中图分类号】:X523 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004- 8227(2023)01- 0123- 14

【DOI】:10.11870/cjlyzyyhj202301012

景观生态学是在宏观尺度上研究景观的空间异质性、生态学过程以及两者间相互关系的综合性学科^[1]。景观格局与生态格局是景观生态学研究的重要议题。景观格局是景观要素的类型、数目以及空间分布与配置^[2], 直接影响区域生态过程^[3]。景观格局指数是景观格局定量分析的常用工具^[4], 可直接反映自然营力和人类活动综合作用于地理空间的结果^[5], 多用于景观格局的空间异质性、时空演变特征研究^[6]。生态格局源于景观空间格局—生态过程耦合理论, 由景观中关键局部、位置和空间联系构成^[7]。基于“源地—廊道—节点”框架的生态网络是构建区域生态格局的重要方法^[8], 从生态系统深层反映物质流、能量流和生态流克服不同异质性空间阻力的流动能力, 以表征生态系统稳定性和安全性^[9]。生态网络被应用于省域、城市、流域、矿区等不同区域的生态系统时空变化、生态格局分异与生态安全等研究^[10]。将区域景观格局与生态格局相结合, 能够有效反映区域景观要素空间结构、生态系统过程与生态效能。

¹ **【收稿日期】**: 2022- 02- 23; **【修回日期】**: 2022- 05- 17

【基金项目】: 国家自然科学基金项目(41807498); 国家重点基础研究发展计划项目(2019YFC1805502); 重庆市教委科技项目(KJQN201800525)

【作者简介】: 张欣(1999 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用. E-mail: 875266654@qq.com

【* 通讯作者 E-mail】: zh_angh@cqu.edu.cn

页岩气开发是缓解我国能源紧张，保障能源安全，促进碳中和的重要举措^[11]。而页岩气开发过程中，水力压裂，放喷试气等特征开采技术，在短时间内带来较强的地表扰动，环境影响，生态破坏^[12,13]，受到国内外学者的广泛关注。现有研究主要通过实地采样、环境跟踪监测、遥感^[14]等获取数据，运用数值模拟^[15]、数学建模^[16]、综合指数^[17]、景观指数^[18]等方法，分析了页岩气开发对区域大气、水资源、生态环境、土壤及景观变量等要素的影响。研究表明页岩气开发区存在一定程度的生态空间萎缩，景观破碎，生境质量下降，局部环境污染加剧以及生态风险增加，这些成果为进一步认识页岩气开发的生态环境影响提供了重要参考。但将表层的景观指数和深层的生态安全格局相结合，由表及里分析生态环境脆弱地区的页岩气开发景观生态影响还较为鲜见。另外，目前的研究大都聚焦于评价区域整体的景观和生态安全格局的变化特征，而深入分析不同人类活动对区域生态环境的扰动强度的研究较少。

重庆作为页岩气开发的主战场，其山地特有地理位置和自然条件^[19]，使页岩气开发的环境影响方式、强度均不同于其他地区。目前，重庆页岩气开发的重点区域主要分布于乌江沿岸，属典型岩溶地区，地形条件复杂，兼有山地、丘陵、盆地。水资源丰富，水环境敏感，岩溶发育，区域地下水以岩溶水为主，地下水易污染。局部地区水土流失严重，属土壤侵蚀及石漠化高度敏感区，生态环境脆弱。短期内大规模的页岩气开发，使得区域景观格局、生境质量、生态安全受到不同程度威胁。文章尝试通过景观格局指数、景观生态风险及生态安全格局，研究页岩气开发对乌江沿岸景观、生态的直接和间接影响，探究页岩气开发对区域生态环境的作用机制，解析不同基础设施建设活动对开发区景观生态的响应强度，为针对性地开展生态保护与修复提供一定技术方法和参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于重庆境内乌江沿岸，介于 107° 15′ E~107° 36′ E, 29° 15′ N~29° 48′ N 之间，面积为 2 060.90 km²，内有 4 个开采区块，面积 821.83 km²，含 280 个井台，截至 2020 年，累积产气突破 300 亿 m³，是我国页岩气资源优势区域之一。该区属亚热带季风性湿润气候，多年平均气温为 16~18℃；降水时空分布不均，多夏洪秋汛，雨量充沛，多年平均降雨量为 1 072 mm；土壤以黄壤和紫色土为主，主要植被有亚热带常绿阔叶林、暖性针叶林^[20]。区域地层产状平缓，断层不发育，页岩气资源储量大，水资源丰富，有利于大规模页岩气开发，已形成商产。乌江地处中国云贵高原东侧与四川盆地南缘，是重庆市内主要河流之一，其支流有麻溪河、包鸾河和龙河等。乌江在涪陵直接汇入三峡库区，其水质状况将直接影响三峡水库水质安全与全国水资源战略安全。乌江流域是西南地区的重要安全屏障^[21]，区域岩溶发育，溶洞、落水洞、地下暗河分布广，污染物易进入地下，地表、地下水环境敏感；岩溶区土层薄，地表井场、道路、集输管线(以下称之为管线)等页岩气工程扰动易造成植被破坏，局部水土流失。

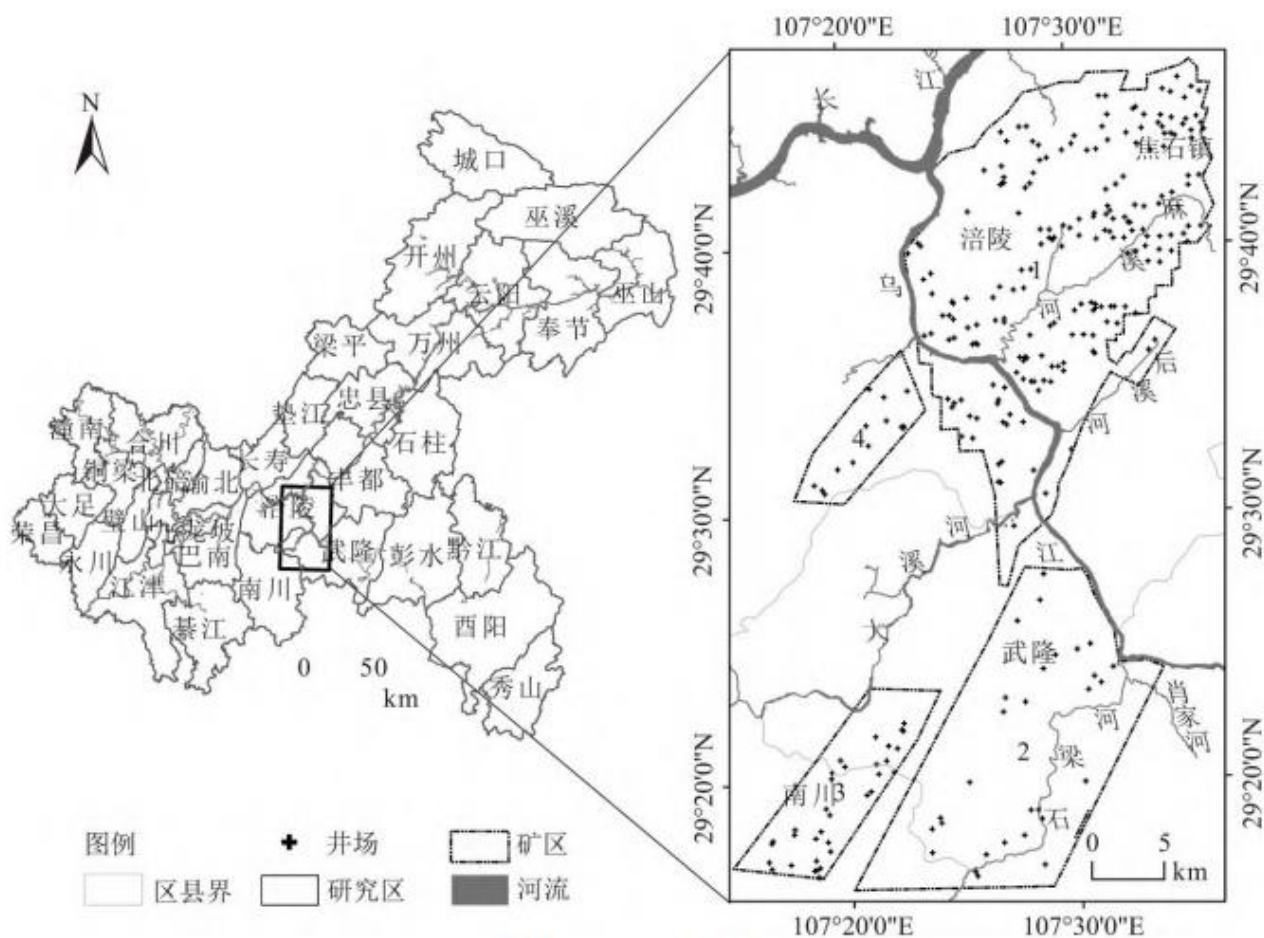


图1 研究区概况
Fig.1 Overview of study area

涪陵焦石坝区块经历了北区—中区—南区三个阶段的滚动开发。2013年,重庆涪陵焦石坝一期产建区北区在我国率先实现页岩气商业化规模开发,截至2014年底,投产45口井,建成产能20亿 m^3 ,累计产气量10.24亿 m^3 。经过中区和南区的建设,截至2015年底建成产能50亿 m^3 ;截至2018年底,投产341口,建成产能100亿 m^3/a ,占当年我国页岩气产能(135亿 m^3/a)至少74%,当年产量60.2亿 m^3 ,占全国产量(108.8亿 m^3)的56%,累计产气214亿 m^3 ;截至2021年2月底,投产572口井,累计产气356.57亿 m^3 。

1.2 数据来源

研究所需数据包括遥感影像、DEM、行政区划及页岩气开发相关数据,具体年乡镇行政区划地图数据和遥感影像数据均来源于地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>);选用2010、2020年遥感影像,在Envi5.3支持下,对遥感影像进行预处理,运用最大似然法对其进行监督分类,参照GB/T 21010-2017《土地利用现状分类》以研究区实际情况将其分为林地、耕地、水域、草地和建设用地等5类;2010、2020年土地利用分类结果的kappa系数分别为0.88、0.92,均大于0.85,显示出分类结果与实际景观的良好一致性。另外,将分类结果在Google Earth中进行对比验证,确保分类精度能够满足研究需要。2010年道路数据源于Spot5 2.5 m高分影像解译,2020年页岩气井场、道路、管线等数据源于实地资料收集及天地图解译,页岩气规模和产量数据源于《重庆市页岩气发展规划(2015-2020)》。

1.3 数据处理

1.3.1 土地利用动态度

土地利用动态度可定量描述研究区各种土地利用类型在研究时段内的变化速度,包括单一土地利用动态度和综合土地利用动态度,单一土地利用动态度[22]公式和综合土地利用动态度[22]公式如下:

$$K = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中:K为某种地类在研究时期内的单一动态度;LC为综合土地利用动态度;T为研究时间段;U₁和U₂分别表示研究初期和末期的土地利用类型面积;LU_i为研究初期第i类土地利用类型面积;ΔLU_{i-j}为研究时段内第i类土地利用类型转化为非i类土地利用类型面积的绝对值。

1.3.2 景观格局指数

(1) 景观格局指数

景观格局指数能够浓缩景观格局信息、反映其结构组成和空间配置特征^[23],基于前人研究成果^[24],文章从景观尺度上选取斑块密度(Patch Density, PD)、分离度指数(Splitting Index, SPLIT)、聚集度指数(Aggregation Index, AI)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)综合分析页岩气开发对景观格局的影响。其中,斑块密度反映景观破碎化程度,分离度指数反映景观斑块分布的分散程度;聚集度指数反映各属性网格的聚合程度;最大斑块指数反映景观中最大斑块面积占整个景观面积的比例,是对景观优势度的度量。

应用Fragstats 4.2软件中的移动窗口,设置200 m为起点,2 000 m为终点,200 m为间隔,共10种不同尺度的矩形窗口大小^[25],并计算不同窗口下的景观格局指数值;基于GS+ 9.0软件,利用半变异函数和块基比值来刻画景观指数的空间变异情况,块基比值越低,景观指数的空间稳定性越高^[26];最终选择比值变化趋势稳定的1 km窗口。

(2) 景观生态风险指数

选用景观干扰度指数(Ei)和景观脆弱度指数(Fi)构建景观生态风险指数(ERI)^[27, 28],具体公式:

$$ERI_i = \sum_{j=1}^n \frac{A_{ij}}{A_i} \times R_i \quad (3)$$

$$R_i = E_i \times F_i \quad (4)$$

$$E_i = a C_i + b D_i + c N_i \quad (5)$$

式中：ERI_i 为第 i 个评价小区的景观生态风险指数；R_i 是第 i 类景观类型的景观损失度指数；E_i 是景观干扰度指数；n 为景观类型数量；A_i 是评价小区 i 的面积；A_{ij} 是评价小区 i 内第 j 类景观类型的面积；F_i 是景观的脆弱度指数；C_i、D_i、N_i 分别为景观的破碎度指数、优势度指数和分离度指数；a、b、c 分别为三者的权重比例，且 a+b+c=1，借鉴前人研究成果^[27]，分别赋值 0.5、0.1、0.4。结合研究区实地情况以及各景观类型自身的特点，分别赋水域、耕地、草地、林地和建设用地的景观脆弱度^[27]为 4、3、2、2 和 1。

1.3.3 生态网络

生态网络是由生态源地、生态廊道及生态节点三方面共同构成的完整网络系统，对构建生态安全格局具有重大意义。

(1) 识别生态源地

生态源地是生态系统相对稳定，生境质量较高且生物种类和生物量较多的生态用地^[29]，对维持景观结构、过程和功能具有重要作用^[30]。参照相关研究^[31]，以对乌江沿岸生态环境稳定发展具有重要意义的大面积林地作为生态源地，并在分析生境斑块数量、斑块面积与生境用地占比随阈值变化的基础上，确定生态源地的最小面积阈值^[32, 33]，保留面积大，连片性好，满足生态功能的斑块作为生态源地。

(2) 构建生态阻力面

景观空间中的物质流、能量流和生态流需克服异质空间阻力^[34]，且阻力高低会对交流的时间、过程产生不同程度的影响。文章选取土地利用类型、坡度、高程、距水域距离、距城镇用地距离作为阻力因子，并赋值^[35]。研究认为，高程、坡度值越大以及距离水域越远，阻力值越大；距离城镇用地距离越近，人类活动强度越大，生态系统收到扰动的机会越大，因此阻力越高，阻力赋值越大。如表 1 所示。

表 1 阻力因子赋值

因子	赋值					权重
	1	10	20	40	80	
土地利用类型	林地、水域	草地	耕地	建设用地		0.5
高程(m)	<400	400~800	800~1200	1200~1600	>1600	0.15
坡度(°)	<5	5~15	15~25	25~35	>35	0.15

距水域距离(m)	<100	100~500	500~1000	1000~2000	>2000	0.1
距城镇用地距离(m)	>1500	1000~1500	500~1000	100~500	<100	0.1

将 5 类基础阻力面进行加权求和，构建综合阻力面[36],再运用成本距离工具生成最小累积阻力面，具体公式如下：

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (6)$$

式中：Di j 表示物种从生态源地 j 到景观单元 i 之间的空间距离；Ri 为运动过程中的阻力值大小；MCR 为计算得出的最小累积阻力面值，其大小可以判断源地向外扩展的可能性，展现空间单元与源地的连通性和相似性。

(3) 识别生态廊道与选取节点

生态廊道是生态系统中连接生态源和重要生态节点的连线，为动植物的迁徙、繁殖等过程提供了通道和场所^[37]。生态廊道作为连接不同生态源地之间的桥梁与纽带，可促进源地间物质、能量和信息流^[38]。基于 ArcGIS 中最短路径模型识别生态廊道，并借助水文分析模块，获得生态阻力面中阻力值大的部分，即最小累计阻力面的“山脊线”^[39]。生态廊道与“山脊线”的交点即生态薄弱点，为生态节点；另外，各生态廊道的交点在生态流动中起关键作用，也作为生态节点。

2 结果与分析

2.1 页岩气开发的景观变化分析

2010~2020 年，乌江沿岸页岩气矿区的井场、道路、管线等基础设施建设，及勘探、压裂、试气、集输等开采过程一定程度上造成了区域土地损毁和植被破坏，影响区域生态环境。乌江沿岸有 4 个页岩气开采矿区(图 2),面积约 821.83 km²,共 280 个钻井平台。各矿区开采规模不同，乌江以北 1 号矿区 437.72 km²,含 203 个井台，井场、道路、管线分布相对密集，乌江以南 2 号(261.76 km²)、3 号(79.09 km²)、4 号(43.26 km²)矿区井台数分别为 29 个，34 个，14 个，井场、道路、管线较为分散。

乌江沿岸土地类型以耕地和林地为主，山地面积比重大，岩溶发育，河谷深切。地表缺水，石漠化程度高，土地垦殖率低，人均有效耕地面积为全国平均值的 0.7 倍。页岩气的勘探开发需要占用一定土地资源，对于交通欠发达地区，道路等基础设施建设工程占地增加明显。从景观类型看，2010~2020 年，研究区内林地、耕地分别减少了约 52.78、43.78 km²,建设用地增加 92.04 km²,草地和水域用地面积变幅较小。页岩气 4 个矿区内表现为林地、耕地总量分别减少 14.45、19.88 km²,动态度为-0.32%、-0.59%,建设用地增加 35.18 km²,动态度为 19.63%。其中，1 号矿区页岩气开发规模大，井场、道路、管线分布广。2020 年，该矿区井密度 0.46 个/km²,道路密度 1.02 km/km²,管线密度 0.33 km/km²,总体高于其他矿区(表 4),综合土地利用动态度为 0.46%。4 号矿区井密度 0.32 个/km²、道路密度 0.34 km/km²,管线密度 0.57 km/km²,矿区面积小，土地利用动态度达 0.67%。

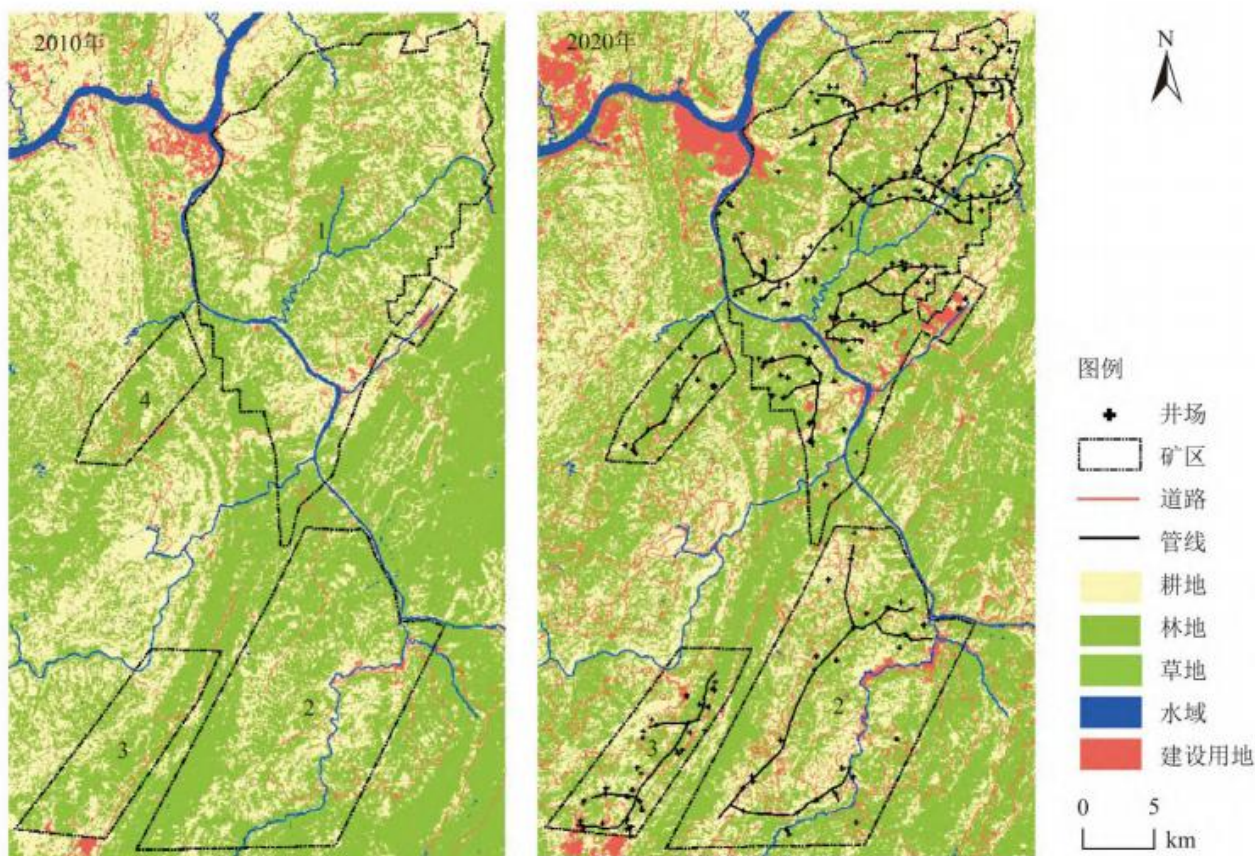


图 2 土地利用现状及基础设施建设

Fig. 2 Land use status and infrastructure construction

表 2 2010~2020 年研究区土地利用面积及动态度

土地利用类型	面积 (km ²)			单一土地利用动态度 (%)	综合土地利用动态度 (%)
	2010 年	2020 年	变化		
耕地	807.66	763.88	-43.78	-0.54	
林地	1 119.43	1 066.65	-52.78	-0.47	
草地	44.50	49.17	-4.67	1.05	0.47
水域	29.86	29.71	-0.15	-0.05	
建设用地	59.45	151.49	92.04	15.48	

表 3 2010~2020 年矿区土地利用动态度

矿区号	单一土地利用动态度(%)					综合土地利用动态度(%)
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	
1	-0.80	-0.24	0.10	-0.2	20.26	0.46
2	-0.18	-0.61	-4.23	-2.18	23.95	0.45
3	-0.62	-0.27	-0.31	4.89	35.22	0.33
4	-2.00	-0.52	-10.68	3.33	9.17	0.67
合计	-0.59	-0.32	-0.77	-0.08	19.63	0.43

表 4 矿区基础设施密度 导出到 EXCEL

矿区号	井场	管线	道路
1	0.46	0.33	1.02
2	0.11	0.16	0.78
3	0.43	0.32	0.71
4	0.32	0.24	0.57

乌江沿岸页岩气工程占地以耕地为主，表现为耕地数量减少，耕地质量下降。页岩气开采过程中产生碎屑、废料堆放在地表，破坏地表、污染土壤，造成土壤板结；页岩气开采区内修建各类废水池，用于收集开采过程中产生的钻井废水、返排液等，如发生泄漏或遇暴雨废液外溢，均会带来周边土壤、水污染，导致农作物污染、减产，农产品品质下降等，影响区域农业发展，威胁粮食安全。

2.2 页岩气开发的景观格局影响

2.2.1 乌江沿岸及矿区的景观格局影响

基于移动窗口法计算出斑块密度(PD)、分离度指数(SPLIT)、聚集度指数(AI)、最大斑块指数(LPI),并运用公式 3~5,获得景观生态风险(ERI)的空间分布图(图 3)。

2010~2020 年，乌江沿岸页岩气开发使得区域景观格局发生变化。页岩气开采区内 PD、SPLIT 分别增幅 25.29%~55.39%、2.57%~5.11%,AI、LPI 减少幅度分别为 9.38%~30.61%、14.36%~57.69%,景观生态风险指数(ERI)增幅 0.20%~0.52%(表 5)。各页岩气开采区内景观生态风险变化有所差异，其中，1 号矿区内景观生态风险指数增加 0.52%,变幅最大。1 号矿区是最早进行页岩气开发的矿区，较其他矿区，面积最大，页岩气开发规模最广。页岩气开发过程中，为了便于运输，需进行大量道路等基础设施建设，矿区内井场、管线、道路密度均高于其他矿区(表 4)。4 号矿区面积最小，井场数量最少，新增管线、道路少，10 年间建设用地扩张不明显，建设用地动态度为 9.17%,矿区风险指数增幅 0.20%,均低于其他矿区。区域西北部为涪陵中心城区，城镇用地多，生态绿地少，且城区扩张，景观生态高值分布于此。另外，由于区域地处渝东南边缘大娄山脉褶皱带，属新华夏

构造体系和南北径向构造体系，地势东北高，西南低，山脉多为北东—南西走向，岭谷相间排列。乌江沿岸景观生态风险指数低值沿东北—西南走向分布，与武陵山脉走向一致。

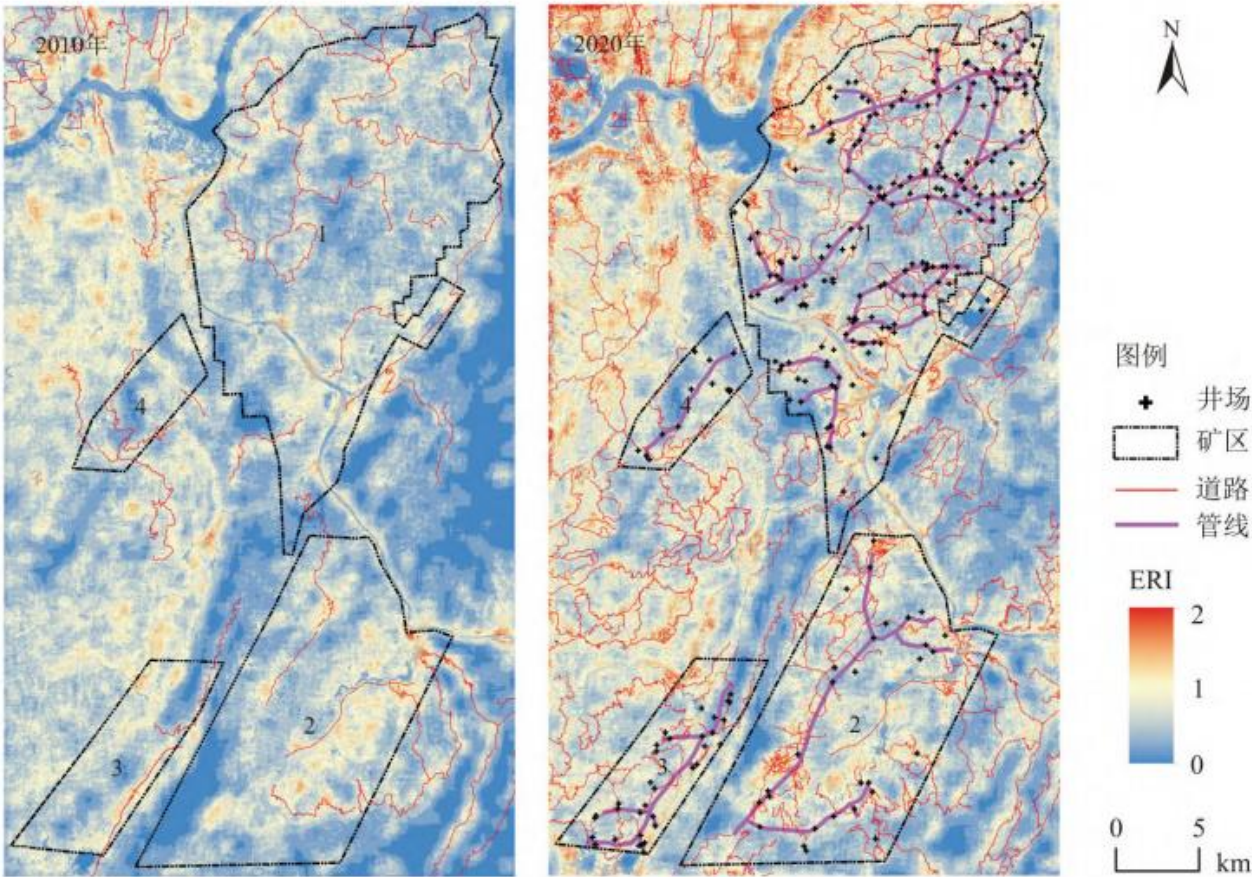


图3 景观生态风险指数空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of landscape ecological risk index

表5 2010~2020年页岩气开采区内景观格局指数及景观生态风险指数年际变化率

矿区号	景观格局指数(%)				ERI (%)
	PD	SPLIT	AI	LPI	
1	55.39	5.11	-25.24	-43.66	0.52
2	41.79	2.57	-30.60	-40.01	0.51
3	37.31	3.38	-25.68	-57.69	0.49
4	25.29	3.78	-9.38	-14.36	0.20

2.2.2 不同类型基础设施的景观格局影响分析

为了更明显的展示景观格局及风险的变幅情况，在区域内选取样带分析页岩气工程基础设施建设对区域景观格局、景观风险的影响大小(图 4)。研究选取的样带区横跨矿区，含井场、道路、管线 3 种基础设施，长 19 500 m，宽 500 m。基于 3D 分析工具，获取样带中线处两期风险剖面图，横坐标为样带长度，纵坐标为景观生态风险值。在样带区内，两期风险指数大小空间分布总体一致，2020 年景观风险有所增加。施工道路设施附近，两期景观生态风险差异大，在管线设施附近的差异相对较小。

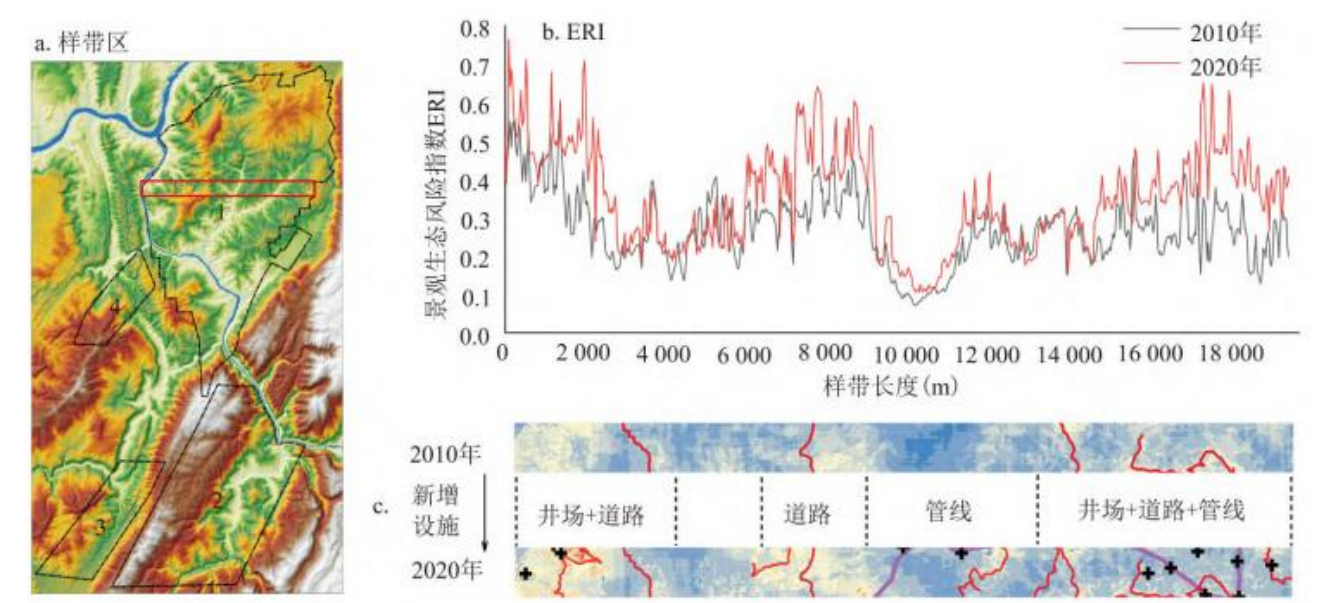


图 4 基础设施样带风险分析

Fig. 4 Risk analysis of infrastructure transect

为进一步识别页岩气开发各类基础设施建设对景观格局、景观生态风险的影响程度，参照《建设项目环境风险评价技术导则(HJ 169-2018)》，分别建立距离井场、道路、管线 100、200、500 m 缓冲区，并统计 2010~2020 年各缓冲区的景观格局指数、景观风险指数及变化情况(表 6)。不同基础设施建设对景观格局、景观生态影响程度不同。其中，道路建设以新增和改扩建乡村道路为主，贯穿于多个井场之间。

表 6 2010~2020 年距离设施不同范围下景观格局指数及景观生态风险指数变化率

基础设施类型	范围(m)	景观格局指数(%)				ERI(%)
		PD	SPLIT	AI	LPI	
井场	100	44.42	4.79	-25.35	-35.63	0.44
	200	43.72	4.59	-25.21	-33.51	0.42
	500	42.94	4.02	-25.05	-33.44	0.39
	100	40.96	4.55	-28.51	-37.02	0.49
管线	200	42.51	4.31	-28.55	-36.75	0.48

	500	43.62	3.93	-28.31	-35.76	0.43
	100	51.88	6.88	-39.09	-51.94	0.62
道路	200	50.95	6.01	-35.66	-51.15	0.59
	500	54.28	4.67	-30.44	-47.29	0.62

道路及周边地表植被破坏明显，对景观生态影响最大；井场占地以农耕地为主，平整场地、设备运输等使周边土地紧实，土壤活力下降，影响农作物生长，对景观生态有一定影响；管线建设虽属临时占地，但开挖过程中土地扰动大，植被破坏，产生废弃土石方临时堆放，易造成局部水土流失，植被恢复需要一定时间，对景观生态影响程度小于其他基础设施建设。

基础设施建设对景观格局和景观生态影响大小均随距离呈现衰减的趋势。在样带上选取井场、管线、道路三类样例，并统计 2010~2020 年不同范围下的景观格局指数、景观生态风险指数(图 5)。基础设施的建设对生态环境的影响程度由高到低依次为道路、管线和井场，距离基础设施越远，景观指数变幅越小，页岩气开采施工对周围环境影响越小，景观风险指数变化趋势与景观格局指数相同。其中，道路沿线 100 m 范围内，景观格局变化最大，景观生态风险最高，且随距道路的距离增加，景观格局变化减小，景观生态风险降低。

2.3 生态网络分析

2.3.1 生态源地识别结果

随生境斑块面积阈值增加，景观斑块数量和面积比例急剧下降(图 6),当阈值增加到 5.4 km²后，斑块数量和面积比例变化趋于平稳，故设定最小面积阈值为 5.4 km²。基于此提取出乌江沿岸研究区范围内 2010 年 21 个生态源地，面积 866.65 km²；2020 年 25 个生态源地，面积 617.35 km²。研究区地处西南山区，林地多，源地分布广，且源地空间呈西南-东北方向分布，与区内山脉走向一致。2010~2020 年，区域源地数量增加 4 个，面积减少近 250 km²，源地整体趋于零散化、破碎化。源地在 1、2、3 号页岩气矿区内减少明显，表明页岩气开发造成区域林地景观一定程度上的减少。

图 6 最小面积阈值 [下载原图](#)

Fig.6 Minimum area threshold

2.3.2 生态阻力面构建

以生态源地构建的区域生态阻力面(图 8),生态阻力值呈：东部、南部小，西北部、北部大。2010~2020 年，乌江沿岸生态阻力值有所增加，东南部土地覆被以林地为主，生境质量好，生态阻力低；北部建设用地、耕地分布较广，人类活动强度高，生态阻力值高。10 年间，区域城镇化与能源开发活动使得建设用地扩张明显，土地一定程度损毁，植被减少，生态系统各要素间物质流、能量流、信息流相互作用受阻。

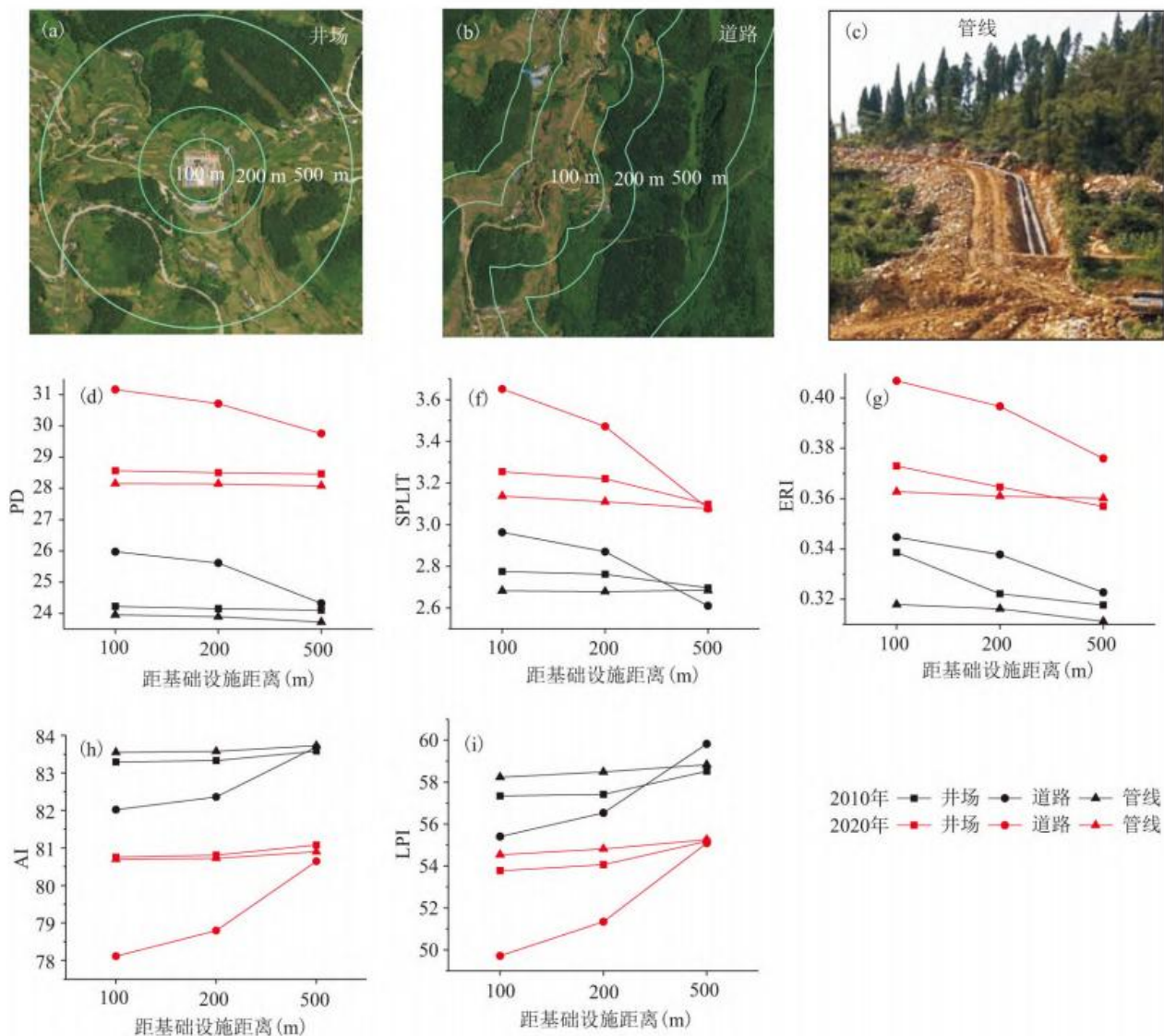


图5 基础设施样例缓冲区景观格局指数及风险指数对比

Fig. 5 Comparison of landscape pattern index and risk index of buffer zone of sample infrastructure

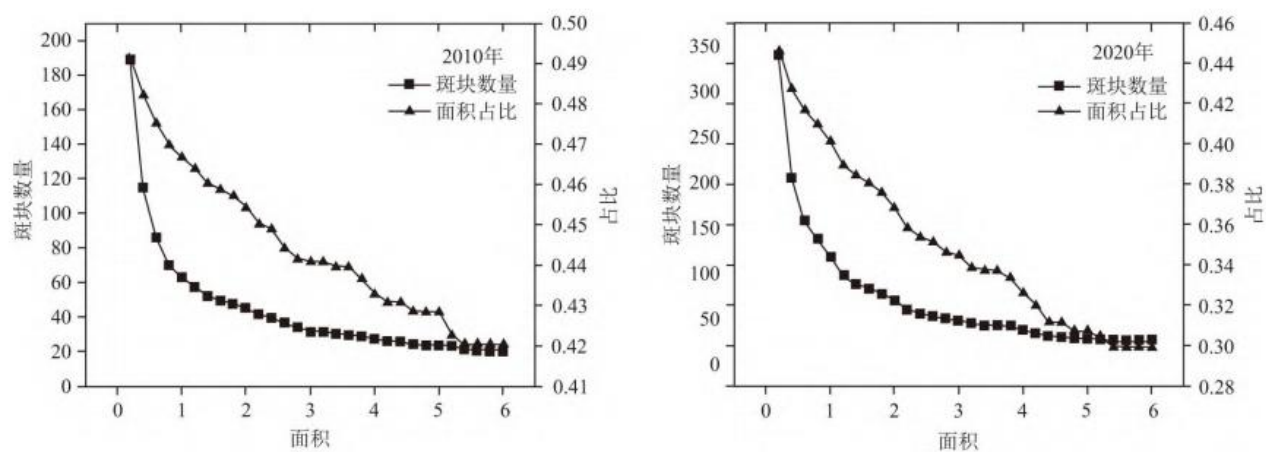


图6 最小面积阈值

Fig. 6 Minimum area threshold

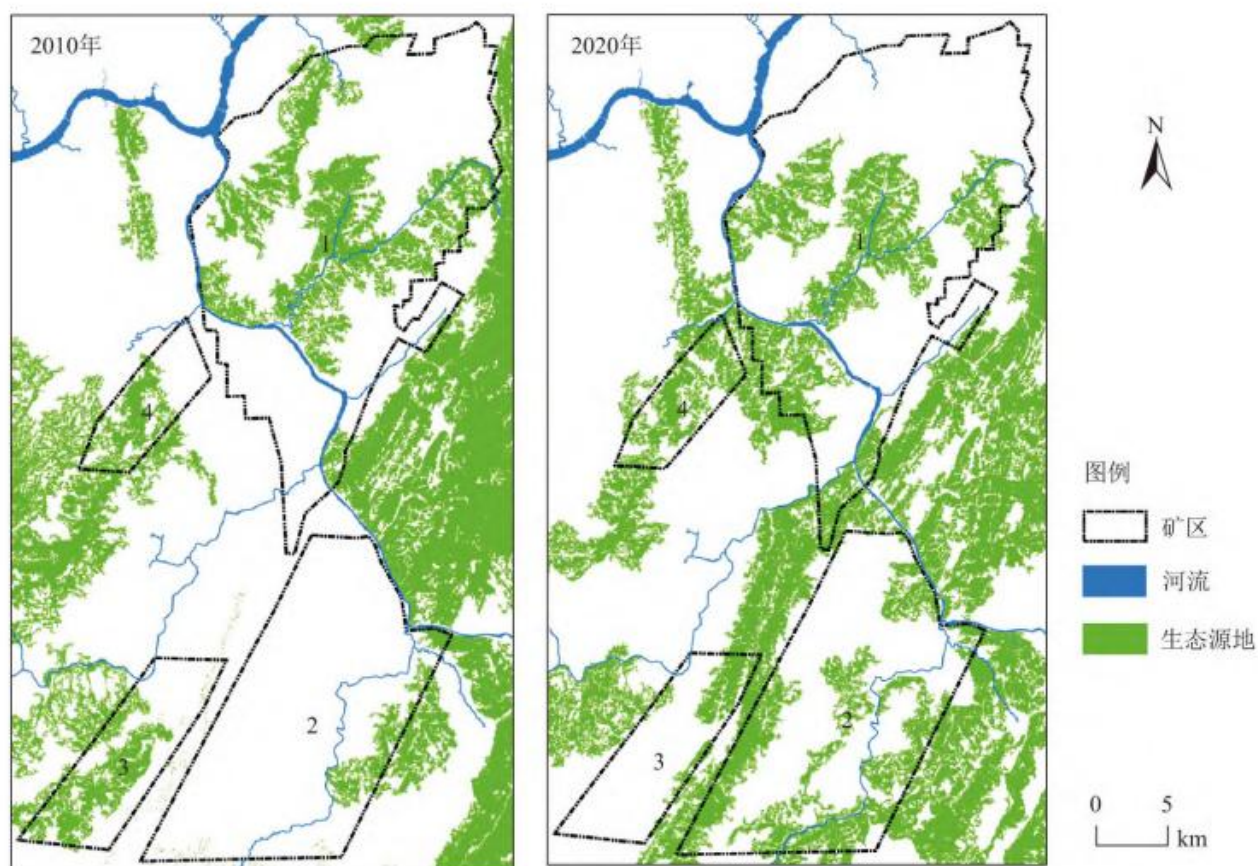


图7 生态源地

Fig. 7 Ecological sources

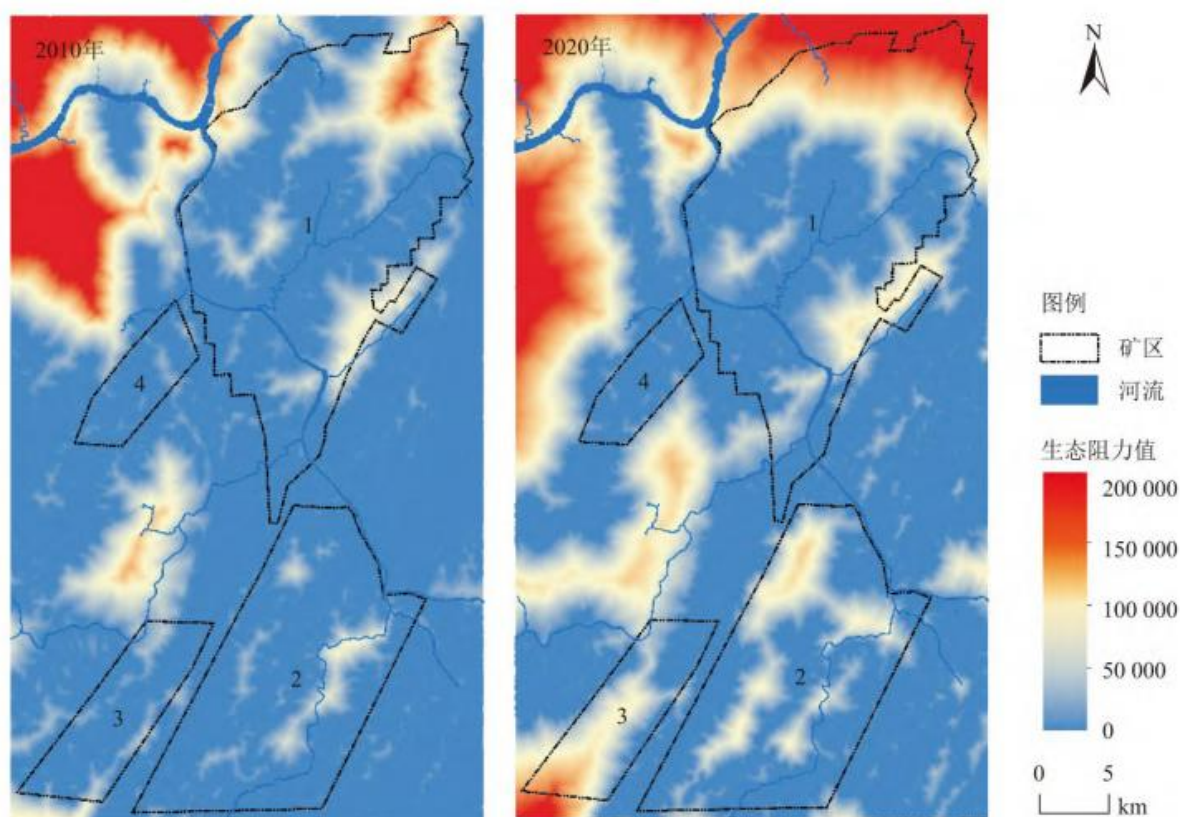


图 8 生态阻力面

Fig. 8 Ecological resistance surface

2.3.3 生态网络构建

基于生态阻力面和最小累计阻力模型构建的生态网络(图 9), 识别出 2010 年生态节点 23 个, 生态廊道 33 条, 长度 103.21 km; 2020 年生态节点 22 个, 生态廊道 44 条, 长度 58.65 km。乌江作为最长生态廊道, 将涪陵东部生态源地与武隆西部生态源地连接起来, 生态网络联系紧密。2010~2020 年, 生态结点增加 10 个, 生态廊道总长度增加 55 km, 生态网络复杂性增大。

2010 年乌江左岸西南部生态源地、廊道数量较多, 生态流、物质流、信息流交流密切。乌江右岸北部源地面积大数量少, 廊道与节点分散分布, 物质能量联系程度低。2012 年后, 北部页岩气大规模开发, 钻井数量多、密度大(1 井/km²)、分布广, 并伴有管线与道路建设, 增加地表扰动, 土地损毁增大。到 2020 年, 开采区内生态源地面积减少, 林地破碎度和离散度增加, 生态结点增多, 生态廊道变长, 生态系统各要素之间流动路径和成本增加, 生态系统稳定减弱, 生态风险增大。表明页岩气开采过程中, 井场、管线、道路等基础设施建设对乌江沿岸景观生态网络造成影响, 也一定程度上影响区域生态系统稳定性, 破坏生态安全格局。

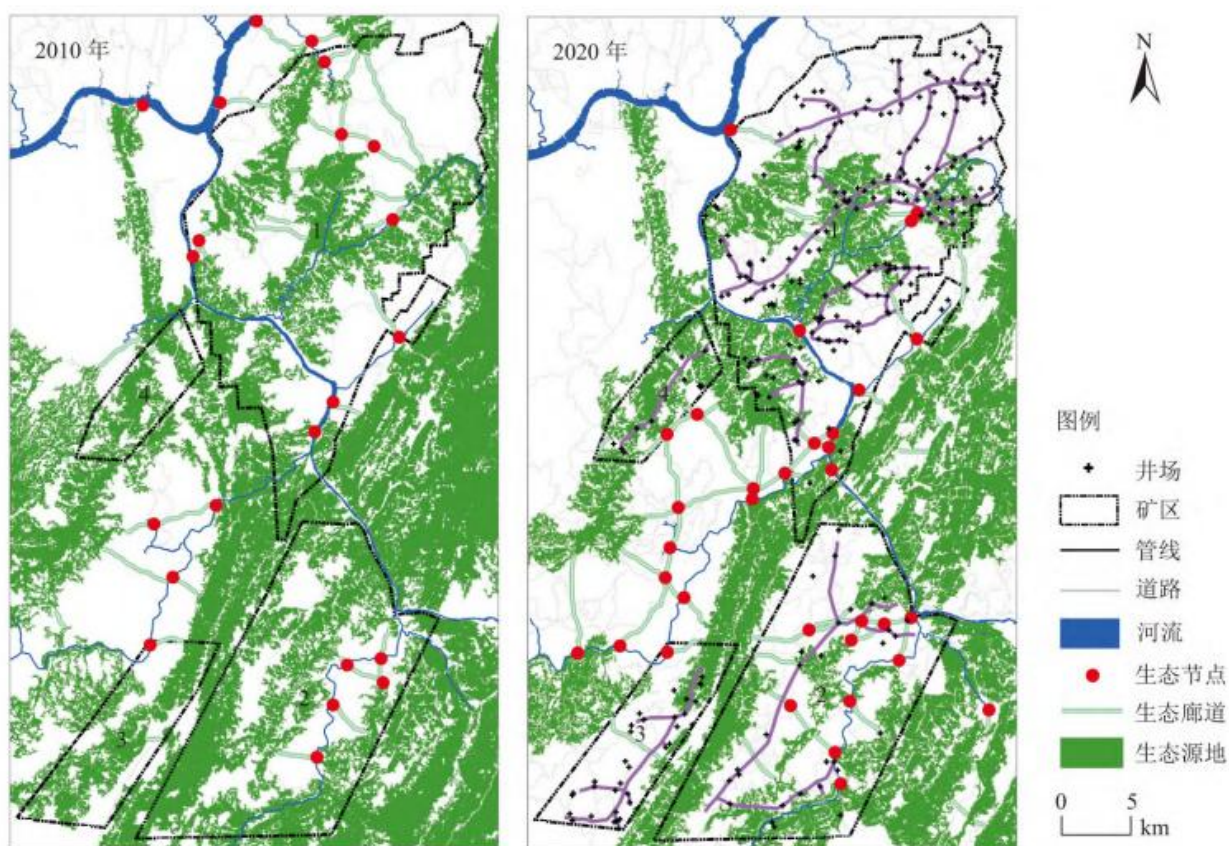


图9 生态网络

Fig. 9 Ecological network

3 结论与讨论

3.1 结论

基于景观格局分析和生态网络构建，研究页岩气开采对景观生态的直接和间接影响，得到以下结论：

(1) 乌江沿岸地区页岩气开发使得区域土地利用动态度、各景观格局指数发生不同程度的变化。2010~2020 年，页岩气开采矿区内林地、耕地面积减少，建设用地面积增加，景观破碎化程度和景观生态风险明显高于其他区域。

(2) 页岩气开发区井场、道路、管线等不同基础设施建设，所引起的地表扰动强度不同，景观格局影响程度不同。道路建设对景观生态格局的影响最大，管线影响最小，且明显随距离增加而减小。页岩气开发过程中，生态有一定的自我修复过程，但 10 年间页岩气开发的景观生态影响在区域上具有一定的累积效应。

(3) 2010~2020 年，乌江沿岸地区页岩气开发改变了区域生态网络格局。生态源地数量有所增加，而面积减少，景观趋于破碎；生态节点增加，廊道长度增加，生态稳定性下降，生态脆弱性增加，物质流动受到阻碍增大。

3.2 讨论

2010~2020年,乌江沿岸页岩气开采带来的工程永久占地,改变了土地利用性质,一定程度破坏了土壤结构和理化性质,导致部分耕地、林地的利用方式和功能发生改变,土地利用类型优势度下降,景观斑块数量、分离度增加,景观破碎度增加,表明乌江沿岸地区页岩气开发改变区域景观格局,易造成区域生态系统结构、功能变化,生态风险增加。从“生态源—生态阻力—生态网络”构建区域生态安全格局,进一步识别页岩气开采对乌江沿岸生态网络的间接影响,表明区域生态系统稳定性下降,生态安全格局改变。页岩气开采对生态环境带来负面影响的结论与其他学者研究一致^[40]。而景观格局指数侧重页岩气开发生态环境影响具有直接指示作用,直观反映其影响方式和影响程度。生态网络构建,可从系统上和整体上间接反映页岩气开发的生态安全格局影响。页岩开发较煤矿、天然气等大型矿区^[41],具有建设周期短,集中建设强度大,虽局部生态修复较快,但对生态脆弱地区的累积影响明显,生态网络可指示生态敏感地区页岩气开发的生态安全格局变化,也可间接指示生态修复工程的效应。为针对性实施页岩气开发的生态环境保护与修复提供参考。

除探究页岩气开发对区域景观生态的直接影响,后期还考虑综合自然地理环境、环保措施等进一步开展相关研究。另外,页岩气开发过程中,土地损毁类型可进一步细化,如钻井前后、放喷池、集气站、废水池建设等不同扰动类型的景观生态影响。页岩气开发的生态安全格局也可以与生态承载力结合研究,细化网络的基本要素,如对廊道、节点进行分级,设计廊道宽度并提出优化方案等。

参考文献

- [1] 郭建国. 景观生态学——概念与理论[J]. 生态学报, 2000, 19(1):42-52. WU J G. Landscape Ecology-Concepts and Theories[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(1):42-52.
- [2] RIITTERS K H, O' NEILL R V, HUNSAKER C T, et al. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics[J]. Landscape Ecology, 1995, 10(1):23-39.
- [3] WANG K, ZHANG C, CHEN H, et al. Karst landscapes of China: Patterns, ecosystem processes and services[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(12):2743-2763.
- [4] 方仁建, 沈永明. 围垦对海滨地区景观演变及其质心移动的影响——以盐城保护区部分区域为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5):772-783. FANG R J, SHEN Y M. Effects of coastal beach reclamation on the change of landscape pattern and its spatial centroids: A case study in coastal wetland of part of Yancheng National Natural Reserve[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5):772-783.
- [5] 郭建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007. WU J G. Landscape ecology[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [6] 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 等. 自然条件下海滨湿地土壤生态过程与景观演变的耦合关系[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1):63-72. ZHANG H B, LIU H Y, LI Y F, et al. The coupling relationship between soil eco-processes and landscape evolution under the natural conditions in Yancheng coastal wetland[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(1):63-72.
- [7] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1):8-15. YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1):8-15.
- [8] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7):1052-1061. MENG J J, WANG Y, WANG X D, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang

based on MCR Model[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2016,25(7):1052-1061.

[9] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419. PENG J,ZHAO H J,LIU Y X,et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J].Geographical Research,2017,36(3):407-419.

[10] 王回茜,李汉廷,谢苗苗,等.资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建[J].自然资源学报,2020,35(1):162-173. WANG H H,LI H T,XIE M M,et al. Construction of ecological security pattern for systematic restoration of industrial and mining land in resource-based cities[J].Journal of Natural Resources,2020,35(1):162-173.

[11] 范世涛,赵峥,周键聪.专题一世界能源格局:四大趋势[J].经济研究参考,2013(2):17-42. FAN S T,ZHAO Z,ZHOU J C. Special topic:World energy pattern:Four major trends[J].Review of Economic Research,2013(2):17-42.

[12] JORDAN C,BATESON L,NOVELLINO A. Environmental baseline monitoring for shale-gas development:Insights for monitoring ground motion using InSAR analysis[J].Science of the Total Environment,2019,696:134075.

[13] MCNALLY H,HOWLEY P,COTTON M. Public perceptions of shale gas in the UK:Framing effects and decision heuristics[J].Energy,Ecology and Environment,2018,3(6):305-316.

[14] HOWDEN C M,STONE E T,NALLUR V,et al. Impact of the Bakken/Three Forks unconventional oil and gas development on natural habitats in North Dakota[J].Land Degradation & Development,2019,30(5):524-532.

[15] VANDECASTEELE I,RIVERO I M,SALA S,et al. Impact of shale gas development on water resources:A case study in northern Poland[J].Environmental Management,2015,55(6):1285-1299.

[16] 辜海林,岳晓晶,陈鸿汉,等.页岩气开采区地下水脆弱性评价模型[J].水资源保护,2018,34(5):57-62. GU H L,YUE X J,CHEN H H,et al. Assessment model of groundwater vulnerability in shale gas exploitation area[J].Water Resources Protection,2018,34(5):57-62.

[17] 李炎,田冬梅,赖星,等.页岩气井场区域土壤重金属含量特征及生态风险评价[J].四川农业大学学报,2019,37(5):695-701. LI Y,TIAN D M,LAI X,et al. Characteristics of heavy metal content and ecological risk assessment of soil in shale gas field area[J].Journal of Sichuan Agricultural University,2019,37(5):695-701.

[18] MENG Q. Modeling and prediction of natural gas fracking pad landscapes in the Marcellus Shale region,USA[J].Landscape and Urban Planning,2014,121:109-116.

[19] 徐春华,钟云浩,汪传胜,等.中国页岩气勘探开发的关键要点与初期产能特征[J].地质学刊,2021,45(2):197-212. XU C H,ZHONG Y H,WANG C S,et al. A brief analysis of key points and early production characteristics of shale gas exploration and development in China[J].Journal of Geology,2021,45(2):197-212.

[20] 李月臣,刘春霞,赵纯勇,等.三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2009,29(2):788-796. LI Y C,LIU C X,ZHAO C Y,et al. Assessment and spatial differentiation of sensitivity of soil erosion

in Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2):788-796.

[21] 黄大勇. 乌江水资源安全与旅游产业的战略互动[J]. 南通大学学报(社会科学版), 2017, 33(5):23-28. HUANG D Y. Strategic interaction between water resources security and tourism industry in Wujiang[J]. *Journal of Nantong University(Social Sciences Edition)*, 2017, 33(5):23-28.

[22] 罗湘华, 倪晋仁. 土地利用/土地覆盖变化研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(3):262-272. LUO X H, NI J R. Advances in land use and land cover change[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2000, 8(3):262-272.

[23] 齐伟, 曲衍波, 刘洪义, 等. 区域代表性景观格局指数筛选与土地利用分区[J]. 中国土地科学, 2009, 23(1):33-37. QI W, QU Y B, LIU H Y, et al. Selection of representative landscape pattern indexes and land use division[J]. *China Land Science*, 2009, 23(1):33-37.

[24] 王宪礼, 布仁仓, 胡远满, 等. 辽河三角洲湿地的景观破碎化分析[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3):299-304. WANG X L, BU R C, HU Y M, et al. Analysis on landscape fragment of Liaohe delta wetlands[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3):299-304.

[25] 张玲玲, 赵永华, 殷莎, 等. 基于移动窗口法的岷江干旱河谷景观格局梯度分析[J]. 生态学报, 2014, 34(12):3276-3284. ZHANG L L, ZHAO Y H, YIN S, et al. Gradient analysis of dry valley of Minjiang River landscape pattern, based on moving window method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12):3276-3284.

[26] 邬紫荆, 李枝坚, 曾辉. 惠州市景观格局空间分异特征的梯度分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(2):490-500. WU Z J, LI Z J, ZENG H. A gradient analysis of urban landscape pattern in Huizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(2):490-500.

[27] 陈心怡, 谢跟踪, 张金萍. 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价[J]. 生态学报, 2021, 41(3):975-986. CHEN X Y, XIE G Z, ZHANG J P. Landscape ecological risk assessment of land use changes in the coastal area of Haikou City in the past 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3):975-986.

[28] 靳甜甜, 张云霞, 朱月华, 等. 黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性——以子午岭区为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):1623-1632. JIN T T, ZHANG Y X, ZHU Y H, et al. Spatiotemporal variations of ecosystem service values and landscape ecological risk and their correlation in forest area of Loess Plateau, China: A case study of Ziwuling region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5):1623-1632.

[29] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建——以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7):2555-2564. LI T, GONG Y B, GE J Z, et al. Construction of urban landscape ecological security pattern based on circuit theory: A case study of Hengyang City, Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7):2555-2564.

[30] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 新疆南部地区风沙扩散风险评价及景观格局优化[J]. 地理学报, 2021, 76(1):73-86. SHI N N, HAN Y, WANG Q, et al. Risk assessment of sandstorm diffusion and landscape pattern optimization in southern Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1):73-86.

[31] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨旸, 等. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为

例[J]. 生态学报, 2017, 37(24):8241-8253. DU Y Y, HU Y N, YANG Y, et al. Building ecological security patterns in southwestern mountainous areas based on ecological importance and ecological sensitivity: A case study of Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24):8241-8253.

[32] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 等. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别[J]. 生态学报, 2019, 39(13):4720-4731. WU M Q, HU M M, WANG T, et al. Recognition of urban ecological source area based on ecological security pattern and multi-scale landscape connectivity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13):4720-4731.

[33] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 等. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法[J]. 自然资源学报, 2020, 35(5):1190-1200. DU T F, QI W, ZHU X C, et al. Precise identification and control method of natural resources space based on ecological security pattern in mountainous hilly area[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(5):1190-1200.

[34] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5):1444-1449. CHEN L D, FU B J, ZHAO W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5):1444-1449.

[35] 张美丽, 齐跃普, 张利, 等. 基于 Linkage Mapper 与粒度反推法的太行山中北段生态节点识别与分析: 以河北省阜平县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(12):1569-1578. ZHANG M L, QI Y P, ZHANG L, et al. Identification and analysis of ecological nodes based on Linkage Mapper and granularity inverse method in the middle and northern sections of Taihang Mountain: A case study of Fuping County, Hebei Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(12):1569-1578.

[36] 郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(3):874-885. ZHENG Q M, SHEN M Z, ZHONG L S. Construction of ecological security pattern in Pudacuo National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3):874-885.

[37] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 等. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建——以广西河池为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7):2596-2608. GAO M W, HU Y C, LI X, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem services and environmental sensitivity in karst mountainous areas: a case study in Hechi, Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7):2596-2608.

[38] 邓金杰, 陈柳新, 杨成韞, 等. 高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例[J]. 地理研究, 2017, 36(3):573-582. DENG J J, CHEN L X, YANG C Y, et al. Significance evaluation of ecological corridor in an highly-urbanized areas: A case study of Shenzhen[J]. Geographical Research, 2017, 36(3):573-582.

[39] 张学渊, 魏伟, 颜斌斌, 等. 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11):2389-2402. ZHANG X Y, WEI W, XIE B B, et al. Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in arid areas of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11):2389-2402.

[40] 张虹, 张代钧, 卢培利. 涪陵焦石坝页岩气开采区土地损毁的生态风险评价[J]. 生态学报, 2017, 37(17):5807-5817. ZHANG H, ZHANG D J, LU P L. Ecological risk assessment of land destruction by shale gas development at Fuling Jiaoshiba, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17):5807-5817.

[41] 常小燕, 李新举, 万红, 等. 采煤塌陷区景观格局尺度效应及变化特征分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1):231-242. CHANG X Y, LI X J, WAN H, et al. Scale effect and change characteristics of landscape pattern in coal-mining subsided area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1):231-242.