

基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化

李青圃¹, 张正栋¹, 万露文², 杨传训³, 张杰¹, 叶晨¹, 陈裕婵¹

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 密歇根州立大学地球与环境科学系,
美国 东兰辛 48823; 3. 广州地理研究所, 广州 510070)

摘要: 流域景观生态风险受到多源因素的综合作用, 识别流域景观生态风险是实现景观格局优化的基础与前提, 景观格局优化是应对生态风险的有效手段。以宁江流域为研究区, 采用空间主成分分析法, 从“自然—人类社会—景观格局”3个维度对流域景观生态风险进行综合评价, 基于景观生态风险评价结果, 构建累积阻力表面, 利用最小累积阻力模型进行了流域景观格局的优化。结果表明: 人类社会和景观格局因素对综合风险影响更为强烈, 地形和距水体距离等自然因素对综合生态风险影响较弱; 宁江流域整体景观生态风险偏大, 较高景观生态风险区域位于流域西南部, 面积为523.99 km², 占流域面积的36.06%; 识别出流域生态源地为面积大于50 km²的林地和面积大于0.2 km²的水体。研究构建了15条生态廊道, 一级生态廊道长度大于30000 m, 二级生态廊道介于10000~30000 m之间, 三级生态廊道长度在10000 m以内; 识别了19个生态节点, 形成了多层次生态网络。通过对比研究区景观格局优化前后的连通度发现, 优化后流域整体景观格局连通度得到明显提升。

关键词: 景观生态风险评价; 景观格局优化; 空间主成分分析; 最小累积阻力模型; 宁江流域
DOI: 10.11821/dlxb201907011

1 引言

景观生态风险是指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^[1]。随着自然因素与人类活动对景观格局影响的不断加强, 景观格局受到的干扰与胁迫逐渐增加, 流域尺度上的景观生态风险评价日益成为近年来“景观格局—生态过程”互馈研究的热点^[2]。在生态风险评价的发展早期, 相关研究多以不透水面增加、土壤侵蚀、水质污染等一种或几种特定风险源进行评价, 使得评价结果较为单一, 缺少多源风险下流域景观生态风险的综合考量^[3-5]。近年来, 由于景观格局指数分析法能够增加对景观异质性的关注与空间定量表征, 因而被引入景观生态风险评价体系中, 使景观生态风险评价脱离了传统以某一特定自然风险表征区域风险状态的局限, 逐渐成为流域景观生态风险评价研究的主流^[6]。然而, 由于流域生态系统是不仅受到特定景观格局的影响, 同时也是受自然与社会因素共同影响的自然综合体, 单一的景观格局指数指标并不能对“自然—社会系统”复合风险进行有效概括^[7]。与此同时, 前人研究较少从“自然—人类社会—景观格局”3个维度对流域景观生态风险进行空间定量评价^[8]。为此, 有必要将景

收稿日期: 2018-03-07; 修订日期: 2019-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471147) [Foundation: National Natural Foundation of China, No.41471147]

作者简介: 李青圃(1993-), 女, 河南南阳人, 硕士生, 主要从事景观格局与生态水文研究。

E-mail: 2016022031@m.scnu.edu.cn

通讯作者: 张正栋(1968-), 男, 甘肃榆中人, 博士, 教授, 主要从事景观格局与生态水文研究。

E-mail: zhangzdedu@163.com

景观格局指数与流域多源“自然—社会系统”影响要素整合,共同纳入到景观生态风险评价体系中,以评价异质性景观镶嵌格局与多种自然及人类社会干扰因素对流域景观生态风险的综合影响,为景观格局优化提供依据。

景观格局优化是依据景观生态学理论,在对景观格局与生态过程、功能关系的综合理解基础上,对景观要素在空间上进行调整与组合,以实现最大的生态效益与区域可持续发展^[9]。景观格局优化研究多基于识别特定生态安全格局或景观生态风险状态,明确景观格局规划的保护重点,进一步提出优化建议^[10-11]。在景观格局优化方法层面,研究方法历经从概念模型、计量模型到空间模型的变化^[12-15]。最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance Model, MCR)最早由Knaapen用于景观格局优化^[16-19],该模型能够较好依据“景观—格局—过程—效应”机制在水平方向上反映景观格局对生态过程的影响。近年来利用MCR模型对景观格局进行优化的研究已经日趋成熟,诸多学者在控制非点源污染、水环境保护、城市扩展边界确定^[20-22]等多个领域应用MCR模型,通过构建景观累积阻力表面,寻找累积阻力表面中阻力最小的“通道”,构建生态廊道和生态节点等关键生态要素,对景观格局进行优化。累积阻力表面的确定是MCR模型建立的关键,但是,以往的研究多选取自然要素对研究区景观格局阻力进行定义,缺乏考虑人类活动对阻力值的影响^[23]。同时,多数研究对阻力值的计算采用多要素简单叠加或专家打分法的方法,存在主观性过大等不足^[24]。空间主成分分析(Spatial Principal Component Analysis, SPCA)方法可以通过抽取原始评价指标的主成分,去除冗余,使结果清晰的落实到空间的每个栅格上。将SPCA方法引入景观生态风险评价中可以有效减少评价结果的主观性,增强评价结果的空间表达效果^[25]。

宁江流域位于广东省东北部,是韩江流域梅江段流域面积最大支流。流域景观格局异质性明显,人类经济社会活动对流域景观格局影响较为剧烈。在人类活动及自然因素共同作用之下,宁江流域“生态—社会系统”可持续发展存在较大威胁^[26]。本文以宁江流域为研究区,从“自然—人类社会—景观格局”3个维度对研究区景观生态风险进行空间定量识别。在此基础上,借助MCR模型识别研究区关键景观格局要素,构建多层次生态网络,对流域景观格局进行优化,以期为宁江流域景观生态风险防控与景观格局优化实践提供理论指导。

2 研究区概况、数据与方法

2.1 研究区概况

宁江发源于江西寻乌高峰村境内,贯穿广东省兴宁市南北,是韩江上游地区流域面积最大的支流。宁江自西北向东南流,至水口圩汇合梅江^[27],流域介于23°58'18"N~24°34'43"N、115°32'33"E~115°55'47"E(图1)。宁江流域气候类型属于典型的海洋性季风气候,全年温暖湿润,年平均降水量大于1600 mm,干流长约107 km,流域面积为1452.96 km²,地势北高南低,高差910 m,宁江中上游区为阶地地貌,地势起伏较大,下游为盆地,地势平缓。受特定的自然条件影响,流域内洪水和滑坡等自然灾害频发。宁江流域景观格局空间分异明显,上游地区以林地为主,下游地区以城镇建设用地与耕地为主。宁江中下游地区经过兴宁市区,此区域工商业活动密集。近年来,伴随兴宁市城镇化进程的推进和工业的发展,人类活动对生态环境的扰动日益频繁,流域中下游地区景观格局破碎化程度不断加剧,流域生态系统面临的多源景观生态风险日益增加。

研究基本单元的选取是景观生态研究中的一个重要议题,相关研究主要采用风险小

区、子流域、风险栅格^[3, 23, 33]等作为景观格局分析的基本单元。为提高空间分析结果的准确性, 本文经过对多个景观格局指数分级粒度分析发现, 60 m是宁江流域不同景观格局指数变化第一尺度转折阈中中等偏大的节点。由于不同景观格局指数粒度变化的第一尺度阈中, 中等偏大的转折点能够较好对景观格局信息进行概括^[59], 因此, 选取60 m的栅格象元作为研究区景观生态风险评价基本单元, 以有效代表研究区景观格局的信息, 并充分体现区域景观生态风险的异质性。

2.2 数据来源

研究数据包括土地利用数据、土壤数据和DEM数据。① 土地利用数据: 2015年的中国科学院遥感解译土地利用类型数据, 空间分辨率为30 m, 比例尺为1:10万, 各土地利用类型分类精度超过90%^[28]。包括林地、草地、水体、耕地、城镇工矿建设用地、未利用地6个一级地类, 城镇建设用地和水库坑塘等18个二级地类。

② 土壤数据: 土壤类型数据为2010年广东省土壤类型数据, 比例尺为1:10万, 来源于中国科学院。土壤属性数据主要来源于广东省第二次土壤普查成果《广东土种志》^[29]。③ DEM数据: 采用GDEM V2数字高程数据, 分辨率为30 m, 来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)。

2.3 研究方法

2.3.1 生态风险评价指标选择

针对研究区生态环境现状, 从自然要素、人类社会要素、景观格局3个层面综合选取指标作为研究区景观生态风险的评价要素, 构建“自然—人类社会—景观格局”三维综合的景观生态风险评价体系。不同景观生态风险划分为4个等级, 1~4级别分别表示低度、中度、较高和高度风险。坡度、土壤类型和土地利用类型主要结合进行分级(表1)。其他指标主要在参考相关文献的基础上, 利用自然断裂点法, 完成对各指标的分级。各指标分级空间定量表达通过ArcGIS重分类工具完成。

景观生态风险评价中的自然要素选取坡度、海拔、土壤类型、距水体距离。坡度与海拔反映了地形因素对土壤侵蚀过程及滑坡等灾害的潜在影响, 其值越高表示景观生态风险越大; 坡度8°、15°、25°分别对应轻度、中度、强度土壤侵蚀的分界线^[30]。土壤的固碳能力对区域尺度小气候的调节以及粮食产量有着重要影响。根据研究区不同类型土壤所对应的固碳能力差异, 设定土壤固碳能力越高的地区景观生态风险水平越低^[31]。水体具有多种重要的生态系统服务功能, 如水源供给、生境维持、生态游憩等生态系统服务功能^[32], 大面积的水体往往对区域生态环境有良好的促进与维持作用, 本文设定距离水体越近的地区具有较低的景观生态风险。

景观生态风险评价中的人类社会因子选取: 距居民点距离、距工业用地距离、距城

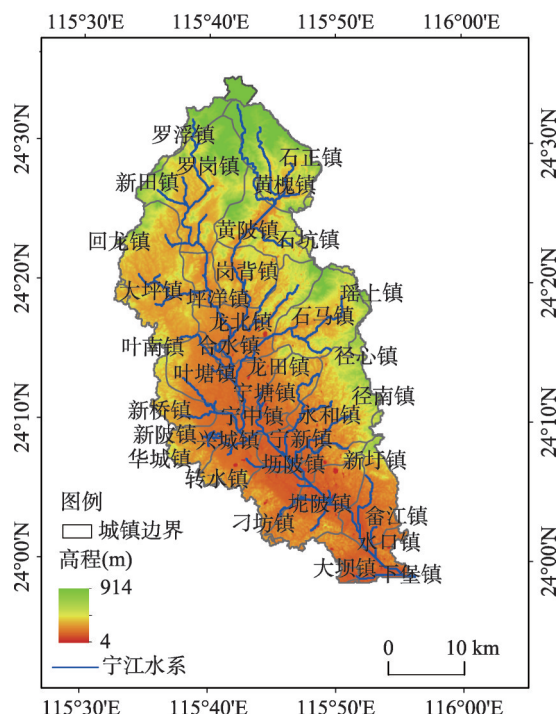


图1 宁江流域区位图

Fig. 1 Location of Ningjiang River Basin

表1 宁江流域景观生态风险指标及其分级评价标准

Tab. 1 The evaluation standard of landscape ecological risk in the Ningjiang River Basin

| 评价层次 | 评价因子 | 指标分级 | 分级标准 | 参考文献 |
|--------|------------------|------|---------------------------------|------|
| 自然环境因素 | 坡度(°) | 1 | 0~8 | [30] |
| | | 2 | 8~15 | |
| | | 3 | 15~25 | |
| | | 4 | > 25 | |
| | 海拔(m) | 1 | 0~170 | [30] |
| | | 2 | 170~292 | |
| | | 3 | 292~469 | |
| | | 4 | 469~914 | |
| | 土壤类型 | 1 | 中性紫色土 | [31] |
| | | 2 | 页红壤、麻赤红壤、赤红壤、麻红壤、片赤红壤、侵蚀赤红壤 | |
| | | 3 | 潯育水稻土 | |
| | | 4 | 页黄壤、麻赤黄壤、麻红黄壤、麻黄壤 | |
| | 距水体距离(m) | 1 | 0~1000 | [32] |
| | | 2 | 1000~2000 | |
| | | 3 | 2000~3000 | |
| | | 4 | ≥ 3000 | |
| 人类社会因素 | 距居民点距离(m) | 1 | ≥ 600 | [33] |
| | | 2 | 400~600 | |
| | | 3 | 200~400 | |
| | | 4 | 0~200 | |
| | 距工业用地距离(m) | 1 | ≥ 4500 | [34] |
| | | 2 | 3000~4500 | |
| | | 3 | 1500~3000 | |
| | | 4 | 0~1500 | |
| | 距城镇用地距离(m) | 1 | ≥ 3000 | [34] |
| | | 2 | 2000~3000 | |
| | | 3 | 1000~2000 | |
| | | 4 | 0~1000 | |
| 景观格局因素 | 土地利用类型 | 1 | 有林地、其他林地、疏林地、灌木林、水库坑塘、湖泊、高覆盖度草地 | [32] |
| | | 2 | 水田、中覆盖度草地、河渠 | |
| | | 3 | 旱地、滩涂、滩地 | |
| | | 4 | 沙地、裸地、城镇建设用地、农村居民点、工矿建设用地 | |
| | 香农均匀度指数(SHEI) | 1 | 0.75~1 | [36] |
| | | 2 | 0.5~0.75 | |
| | | 3 | 0.25~0.5 | |
| | | 4 | 0~0.25 | |
| | 蔓延度指数(CONTAG)(%) | 1 | 75~100 | [37] |
| | | 2 | 50~75 | |
| | | 3 | 25~50 | |
| | | 4 | 0~25 | |

镇用地距离。居民点的建设改变了原有的土地利用覆被与景观构成,距居民点的距离远近可以反映人类生活对生态系统干扰的大小;距工业用地距离反映了人类工业生产活动对景观格局的扰动;距城镇用地距离反映了城镇扩张对景观生态风险的影响。参考前人研究^[33-34],本文设定距居民点、工业用地、距城镇用地的距离越远风险值均越低。

景观生态风险评价中的景观格局因子选取:土地利用类型、香农均匀度指数(SHEI)、蔓延度指数(CONTAG)。土地利用类型参考文献^[32]进行分级(表1)。景观格局指数通过Fragstats软件moving window窗口进行空间化处理,移动窗口大小参考前人研究^[35]设定为500 m。香农均匀度指数表示给定景观丰富度的景观最大可能多样性,景观丰富度较高的地区往往生态系统更为稳定^[36],因此本文设定香农均匀度指数低对应生态系统稳定性低。蔓延度指数表示景观格局优势斑块的连接性,其值越高表示景观格局具有越高的完整性,有利于防止农业非点源污染的渗透与扩散^[37],蔓延度指数越低对应外界活动干扰在景观格局中容易发生扩散的风险。

2.3.2 空间主成分分析 空间主成分分析方法可以将每个变量对应一个矩阵,且能将主成分因子分析结果清晰地落实到空间所对应的每一个栅格上,将原有主成分分析结果直观的拓展到二维空间,空间可视化效果良好^[38-40],本文将空间主成分分析方法引入到流域景观生态风险评价中,定义景观生态风险评价公式表达如下^[41]:

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a_{ij} F_j) \quad (1)$$

式中: E 表示综合景观生态风险评价结果; a_{ij} 为第*i*个栅格对应的第*j*个主成分; F_j 为第*j*个主成分的特征值贡献率。

根据空间主成分分析的计算原理,分别将每个景观风险评价因子所对应的栅格数据输入到ArcGIS空间分析模块principal components工具中,通过该工具可以得到每个主成分所对应的空间载荷图以及各主成分的累积贡献率。根据流域景观生态风险评价的公式(公式(1)),将SPCA方法所得到的有统计学意义的主成分(累积贡献率超过85%),通过ArcGIS地图代数工具结合各主成分的累积贡献率进行加权叠加,并使用自然断裂点法进行分级,得到最终景观格局生态风险评价结果。

为进一步分析原始评价因子对提取主成分本的贡献大小,本文进一步采用ArcGIS中随机取样工具,对每个评价因子的空间分布图随机取100个样点,根据每个样点所对应的景观生态风险属性,在SPSS软件中进行主成分分析,可得到每个主成分所对应的原始评价因子的载荷矩阵,评价因子的载荷越接近于1,则对评价结果的贡献越大。

2.3.3 景观格局优化 景观格局阻力的确定是MCR模型进行景观格局优化的关键。MCR模型公式为^[42]:

$$MCR = f_{\min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (D_{ij} W_i) \quad (2)$$

式中: MCR 表示生态源*j*到任意一点*i*之间的最小阻力的累积值; D_{ij} 表示景观格局阻力表面上第*i*个栅格到第*j*个生态源地之间所跨越的距离; W_i 为景观阻力表面上第*i*个栅格阻碍生态流运行的阻力值^[43-44]。

(1)“生态源地”识别。在提高生态系统连通性和稳定性,降低景观生态风险为目标的景观格局优化中,“源地”是指那些具有良好生态稳定性、扩展性的地区。结合相关理论^[45]以及宁江流域实际情况,确定对宁江流域生态环境稳定发展具有重要意义的大面积林地,及起到重要水源供给与径流调蓄功能的水库作为研究区的生态源地。并根据林地的结构、数量及空间分布,剔除零散分布的小面积林地,最终确定林地生态源地的最小

面积在 50 km²以上。在 ArcGIS 中对水库面积进行计算, 发现大多数水库面积在 0.2 km² 以上。因此最终本文选择面积大于 50 km² 的林地, 以及面积大于 0.2 km² 的水体作为研究区的生态源地。

(2) 阻力面确定。阻力面的确定是 MCR 模型构建的基础。由于景观格局的异质性, 物质及生态流在景观格局中运行和穿越不同类型的异质性空间, 要克服特定的阻力^[46]。基于空间主成分分析的结果作为景观格局阻力的评价要素, 并利用 ArcGIS 中的耗费距离工具生成研究区景观格局累积阻力表面。采用 ArcGIS 中自然断裂点法将阻力表面依据综合阻力的大小分为 1~4 个等级: 低阻力、中等阻力、较高阻力与高阻力 (表 2)。

(3) 生态廊道判别。生态廊道是景观格局中重要的元素, 在不同的生态源之间起到连通作用, 廊道一般为生态阻力最小的通道^[47]。基于 MCR 模型生成的景观格局累积阻力表面, 利用 ArcGIS 水文分析工具, 提取累积阻力表面的“谷线”。方法为: 首先生成累积阻力表面的反地形、再依次进行计算流向、计算累积汇流量等操作, 结合研究区实际情况将累积汇流阈值设置为 1500, 提取 0 值累积汇流量。再通过邻域分析和重分类等操作将得到结果与负地形相乘, 最终得到属性为 1 的栅格, 即为景观格局累积阻力值最低的生态廊道。根据生态廊道的性质, 将其分类为: 河流型、绿带型、道路型生态廊道。根据生态廊道在景观格局中的长度及连通作用, 将生态廊道分为 3 个等级 (表 3)。

(4) 生态节点判别。生态节点是整个生态系统中的关键点, 亦是生态系统中相对脆弱的地区, 需要对其加以识别与重点保护^[48]。本文把宁江流域景观格局的生态节点设定为“谷线”与“脊线”的交点, 利用 ArcGIS 中水文分析模块提取景观格局阻力表面阻力值最高的“脊线” (脊线的提取方法与谷线相似, 区别在于不需要进行反地形的提取), 再将“脊线”与“谷线”进行叠加分析, 识别流域生态节点。根据生态节点的性质, 将其分类为: 河流型、道路型、建设用地型、耕地型和林地型生态节点。根据生态节点阻力大小, 又将生态节点分为 3 个等级 (表 4)。

(5) 景观格局优化效果评估。景观连接度描述了景观组分在景观格局、过程和功能上的有机联系。前人研究多采用整体连通性指数 (*IIC*)、景观一致性概率 (*LCP*)、可能连通性指数 (*PC*) 等指标来定量表征景观格局的优化效果^[49]。其中 *IIC* 与 *LCP* 应用较为广泛, 且能较好表现景观格局斑块及关键生态要素间的连通状况^[50]。因此, 选取 *IIC* 和 *LCP* 指数对景观格局优化前后的连通性进行计算, 以定量分析景观格局的优化效果。计算公式为^[51]:

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + NL_{ij}}}{A_L^2} \quad (3)$$

表 2 宁江流域景观格局累积阻力分级标准

Tab. 2 Classification criteria of the landscape cumulative resistance

| 阻力等级 | 累积阻力值 |
|------|------------|
| 1 | 0~2981 |
| 2 | 2981~6987 |
| 3 | 6987~12112 |
| 4 | > 12112 |

表 3 宁江流域廊道分级标准

Tab. 3 Classification criteria of ecological corridors

| 廊道等级 | 廊道长度(m) |
|------|-------------|
| 1 | ≥ 30000 |
| 2 | 10000~30000 |
| 3 | < 10000 |

表 4 宁江流域生态节点分级标准

Tab. 4 Classification criteria of ecological nodes

| 生态节点等级 | 分级标准 |
|--------|-----------------|
| 1 | 位于一级生态廊道与阻力脊线交点 |
| 2 | 位于二级生态廊道与阻力脊线交点 |
| 3 | 位于三级生态廊道与阻力脊线交点 |

$$LCP=\sum_{i=1}^{N_c}\left(\frac{C_i}{A_L}\right)^2$$

(4)

式中： a_i 与 a_j 分别表示任意斑块*i*和斑块*j*的面积； A_L 表示流域总面积； NL_{ij} 表示斑块*i*和斑块*j*之间的连接数。 IIC 的取值介于0~1之间，值越大表示景观格局连接性越高。 N_c 表示研究区中关键生态要素（生态源地、生态廊道、生态节点）的个数， C_i 表示生态关键要素区域的面积总和， LCP 取值介于0~1之间， LCP 用来刻画两个随机点同时落在研究区中同一生态关键要素区域的概率， LCP 越接近1，表示景观格局联通性程度越高。

为进一步定量表示景观格局优化前后连通度的变化幅度，将景观格局连通度的变化率定义如下：

$$R=\frac{e-d}{d}\times 100\%$$

(5)

式中： R 表示*IIC*或*LCP*指数的变化率； d 表示景观格局优化前*IIC*或*LCP*指数分别对应的数值； e 分别表示优化后*IIC*或*LCP*指数分别对应的数值。

本文选取常用于计算景观格局连通度的Conefor Sensinode 2.6软件，对研究区景观格局的*IIC*指数与*LCP*指数进行计算。通过对比研究区景观格局优化前后的*IIC*指数与*LCP*指数变化，对研究区景观格局优化效果进行评估。

3 结果与分析

3.1 流域景观生态风险评价

3.1.1 流域“自然—人类社会—景观格局”三维景观生态风险评价 经过空间主成分分析，共生成10个主成分。前2个主成分的累积贡献率达到100%，能够对景观生态风险的综合信息进行有效地概括（表5）。各主成分所对应的原始评价因子载荷如表6所示。

在自然环境维度中，四类评价因子在第一主成分的载荷均较小，土壤类型因子在第二个主成分中载荷较高（0.647），说明自然维度影响因子总体对综合景观生态风险的影响较弱，土壤类型因子相对于自然环境维度其他评价因子来说对综合风险有更显著的影响。

表5 各主成分特征值及其累积贡献率
Tab. 5 Eigen values and accumulative contribution rates of principal components

| 主成分 | 特征值 | 贡献率(%) | 累积贡献率(%) |
|-----|-------|--------|----------|
| 1 | 3.359 | 89.372 | 89.372 |
| 2 | 3.995 | 10.628 | 100 |

表6 主成分载荷矩阵
Tab. 6 Load matrix of principal components

| 评价维度 | 评价指标 | 主成分 | | | | | | | | | |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 自然环境 | 坡度 | -0.424 | 0.442 | 0.029 | 0.215 | -0.498 | -0.146 | 0.547 | 0.013 | -0.098 | 0.005 |
| | 海拔 | -0.747 | -0.056 | 0.116 | 0.289 | 0.217 | 0.244 | 0.081 | -0.052 | 0.329 | 0.344 |
| | 土壤类型 | 0.376 | 0.647 | 0.017 | 0.357 | -0.127 | -0.184 | -0.341 | -0.264 | 0.268 | -0.062 |
| | 距水体距离 | -0.249 | 0.379 | 0.629 | 0.048 | 0.435 | -0.334 | -0.043 | 0.285 | -0.111 | -0.032 |
| 人类社会 | 距居民点距离 | 0.815 | 0.043 | 0.068 | -0.018 | -0.234 | -0.123 | -0.083 | 0.193 | -0.103 | 0.452 |
| | 距工业用地距离 | 0.186 | 0.416 | 0.419 | -0.445 | -0.182 | 0.601 | 0.005 | 0.087 | 0.117 | -0.055 |
| | 距城镇用地距离 | 0.557 | 0.220 | -0.031 | 0.387 | 0.407 | 0.373 | 0.225 | -0.213 | -0.301 | 0.022 |
| 景观格局 | 土地利用类型 | 0.725 | -0.088 | -0.162 | 0.145 | 0.176 | -0.049 | 0.365 | 0.311 | 0.372 | -0.130 |
| | 香农均匀度指数 | -0.379 | 0.409 | -0.615 | 0.170 | 0.023 | 0.226 | -0.249 | 0.398 | -0.100 | -0.011 |
| | 蔓延度指数 | -0.043 | 0.462 | -0.409 | -0.615 | 0.33 | -0.216 | 0.186 | -0.170 | 0.056 | 0.132 |

在人类社会维度中,距居民点距离因子在第一个主成分中相对于其他因子载荷最高(0.815),距城镇距离因子在第一主成分中的载荷较高(0.557),反映居民点距离对综合景观生态风险具有最为强烈的影响,同时城镇扩张对综合景观生态风险也具有较重要影响。

在景观格局维度中,土地利用类型因子在第一主成分中载荷较高(0.725),蔓延度指数因子在第二主成分中载荷相对于该维度其他因子载荷最高(0.462)。反映了土地利用类型因子对综合景观生态风险具有较为重要的影响,蔓延度指数因子对综合风险的影响一般,但是高于香农均匀度指数对综合景观生态风险的影响(0.409)。

进一步对比各景观生态风险评价因子空间分布图(图2):自然环境维度评价因子(图2a~2d)中,海拔、坡度因子的风险分布趋势较为相似,均呈现景观生态风险高值区集中于流域北部区域,向南部风险逐渐降低的趋势;土壤类型因子中高景观生态风险区占比较小,较高景观生态风险主要分布于流域中下游地区;距水体距离因子景观生态风险呈现以西南部与西北部两个区域为中心,风险向外围依次升高的趋势。人类社会维度的3个评价因子(图2e~2g)均呈现由西南部为中心,向外围景观生态风险依次降低的趋势。景观格局维度(图2h~2j)的土地利用类型因子与人类社会维度评价因子风险分布状况较为接近,西南部风险较高而外围偏低;香农均匀度指数与蔓延度指数的景观生态风险表现出强烈的空间异质性。

3.1.2 流域景观生态风险综合评价 研究区综合景观生态风险空间分布特征为(表7、图3):

① 高度景观生态风险区主要分布于宁江流域中下游地区。该区域主要用地类型为城镇用地、耕地、及工业建设用地,受到人为活动干扰频繁。② 较高景观生态风险区分布于城镇边缘外围地区,土地利用类型主要为工业用地或耕地以及部分有林地,该风险区范围最大。③ 中度景观生态风险区位于较高景观生态风险区外缘的大坪、罗岗、黄陂、龙背、石马等乡镇,以及研究区东南部水口、径南镇部分地区,用地类型主要为耕地、草地及林地。④ 轻度景观生态风险区占研究区面积占比最小,主要土地利用类型为林地,受人类活动干扰较小,生态环境优良。

3.1.3 单维度指标与综合景观生态风险的对比 对比研究区单项景观生态风险因子空间分布(图2)与流域综合景观生态风险评价结果(图3)可以看出:

自然环境维度评价因子与流域综合景观生态风险呈现相反的空间分布趋势。单项自然环境维度评价因子景观生态风险在研究区北部偏高,西南部偏低而流域综合景观生态风险则由西南部向外围依次降低。这说明自然环境因素对流域综合景观生态风险影响较小,这与研究区的实际情况也是相符的。在水热条件充足的南方湿热流域地区,流域整体水资源分布较为均衡,因此距水体距离对综合生态风险的影响较小。流域地形起伏平缓,大部分地区为坡度小于25°的丘陵或平原,流域低固碳潜力类型土壤区域占比小,所以导致地形与土壤因素对流域综合生态风险影响较弱。人类社会维度评价因子与综合景观生态风险契合度较高,高度风险区主要分布于流域中下游地区。反映了人类活动对宁江流域景观生态风险影响更为强烈,由于流域中下游平原地区居民点广泛的分布显著改变了地表的景观格局,城镇的扩展及工业活动也对周边生态环境产生了巨大的干扰,这些因素使得人类社会维度因素成为影响流域综合景观生态风险的主导因素。在景观格局维度中土地利用类型因子与综合景观生态风险空间分布更为接近,反映了土地利用类型对宁江流域综合风险的影响较为显著。蔓延度指数与综合景观生态风险空间布局的契合度高于香农均匀度指数,反映了在宁江流域蔓延度指数对景观生态风险具有更强的指示作用。香农均匀度指数与蔓延度指数空间布局差异较大,也反映了并不存在某一类指标对综合风险起决定作用。总之,① 宁江流域综合景观生态风险偏高,人类活动因素对流

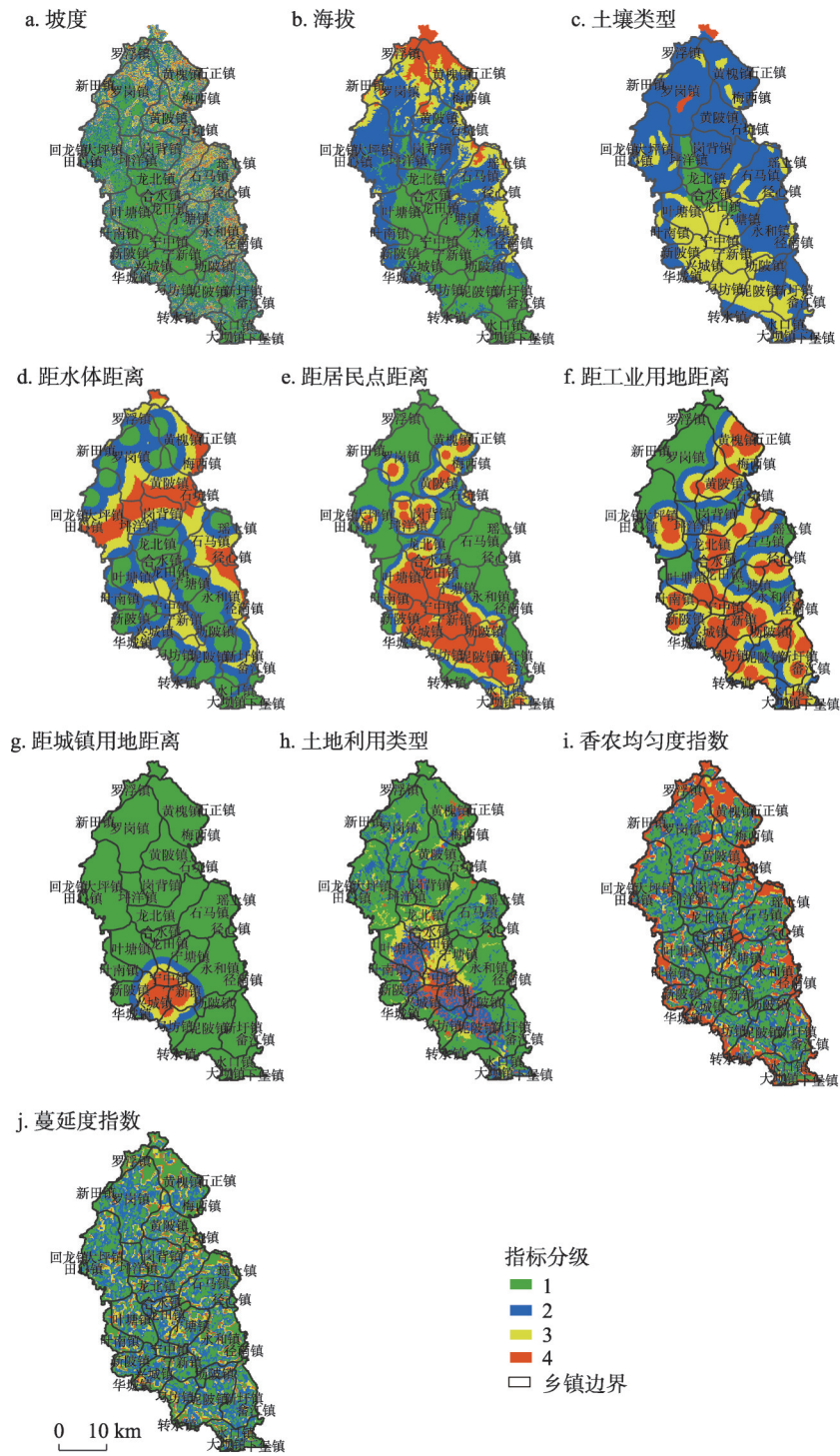


图2 宁江流域景观生态风险因子空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of landscape ecological risk factors

表7 宁江流域景观生态风险等级评价结果
Tab. 7 Landscape ecological risk results evaluation

| 生态风险 | 等级 | 面积(km ²) | 面积占比例(%) |
|----------|----|----------------------|----------|
| 轻度景观生态风险 | 1 | 120.96 | 8.33 |
| 中度景观生态风险 | 2 | 496.34 | 34.16 |
| 较高景观生态风险 | 3 | 523.99 | 36.06 |
| 高度景观生态风险 | 4 | 311.65 | 21.45 |

域景观生态风险影响大于景观格局及自然因素对其影响。② 轻度景观生态风险区在研究区中所占面积占比最少, 且分布分散。③ 流域综合景观生态风险是多种因素在空间上相互权衡的结果, 需要加强对多种景观生态风险影响因素的综合考虑。④ 流域生态系统脆弱, 高度景观生态风险区与轻度景观生态风险区之间连通受阻。这种不平衡的景观生态风险空间分布格局不利于生态系统中物质、能量的流通, 使流域生态可持续发展存在较大威胁。

3.2 宁江流域景观格局优化

3.2.1 流域生态源地的确立 由图4可见, 林地型生态源地为主要生态源地, 主要分布在流域东部径南、黄陂、黄槐等乡镇, 占地面积为203.98 km², 及流域上游丘陵地区以大坪、罗岗镇的龙母樟为中心的林地分布区, 占地面积为183.48 km²。亦有小范围的林地型生态源地分布于叶塘、叶南等乡镇, 占地面积为63.92 km², 此区域受人类活动干扰影响较小, 生态系统稳定性较高。

水源型的生态源地在流域的上中下游均有分布, 其空间分布较为分散。位于流域中部干流地区的合水水库是研究区面积最大的水源型生态源地。研究区东部的和山岩水库、福岭水库, 流域下游的长墩水库以及北部的温公水库, 是研究区面积中等的水源型生态源地, 距离高度生态风险区较远。流域西北部地区的热热水水库以及西南部的平星水库水域面积相对较小, 对抗外部扰动能力较弱。

3.2.2 流域景观格局阻力表面 由表8、图5可见, 流域的景观格局阻力空间分布特征为: ① 低阻力区占40.62%, 占地面积最大, 面积为590.19 km²。主要分布在大坪、罗浮、合水、宁塘、罗岗、石马等乡镇。② 中等阻力区占32.67%, 占地面积次之, 分布在低级阻力区的外围地区, 主要位于华城、永和、径心、水口等乡镇。③ 较高阻力区主要分布在研究区中部城镇建设用地集中分布的外围的黄槐、黄陂、石正、刁坊等乡镇。④ 高阻力区所占面积比例最少, 占比为8.20%, 面积为119.20 km²。研究区景观格局高阻力区集中分布在中下游地区, 景观格局高阻力区与较大斑块的生态源地之间缺乏连接, 对生态流的运行产生较大阻力。在流域中下游以宁塘、合水镇为中心的地区出现了阻力值低谷, 有必要构建相应的生态廊道, 对宁江流域景观格局阻力高值区与生态源地进行连通, 以促进生态流的流动。

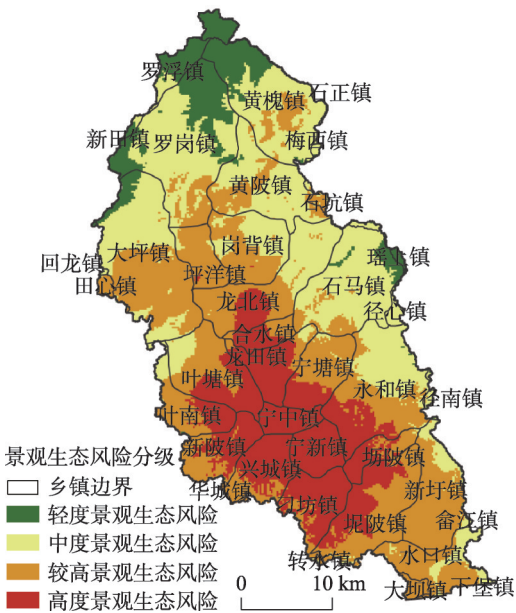


图3 宁江流域综合景观生态风险分级
Fig. 3 Landscape ecological risk classification for the Ningjiang River Basin

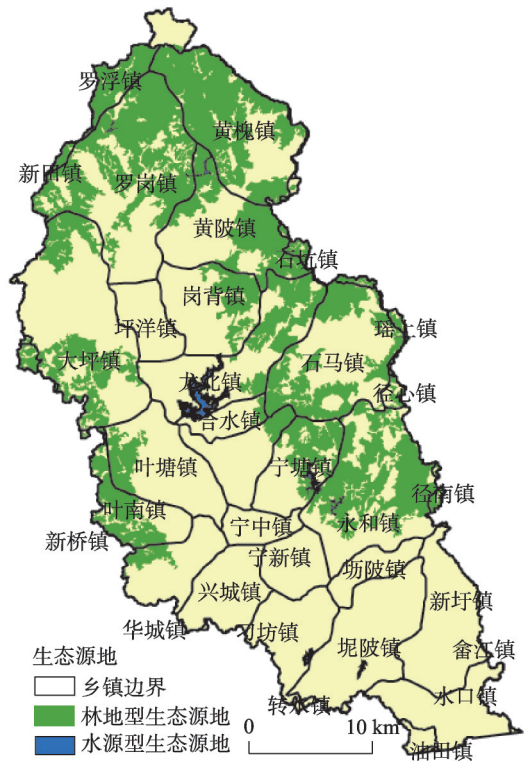


图4 宁江流域生态节点分级标准

Fig. 4 Ecological sources areas of the Ningjiang River Basin

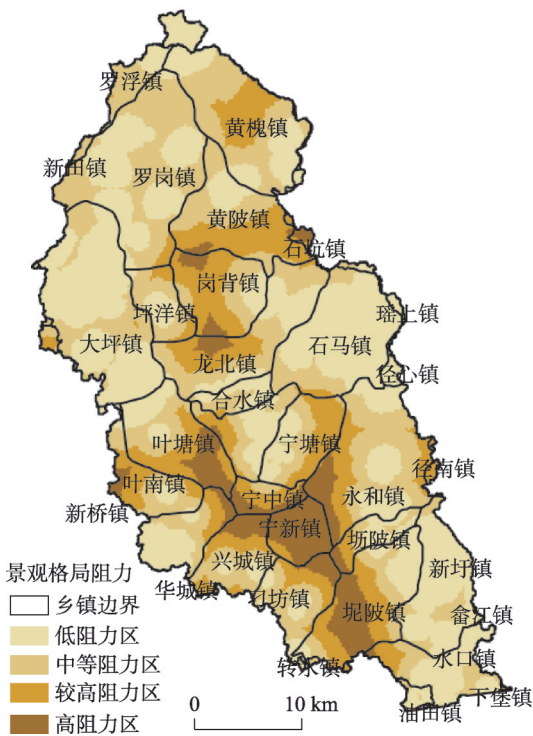


图5 宁江流域景观格局累积阻力分级

Fig. 5 Classification of the landscape pattern cumulative resistance surface in the Ningjiang River Basin

3.2.3 流域生态廊道的构建 由表8、图6可见,研究区现有生态廊道8条,识别潜在生态廊道7条,共构建15条生态廊道。① 一级生态廊道有1条,经过石马、合水、宁塘、宁新、坵陂、坵陂等乡镇,类型为河流型廊道。一级生态廊道贯穿研究区中部与东部景观格局高阻力地区,长度为36294.86 m,在所有生态廊道中长度最长,是需要进行重点维护与发展的生态关键要素。② 二级生态廊道共有6条。其中2号生态廊道经过岗背、石马等乡镇,3号生态廊道穿过大坪、坪洋等乡镇,长11150.76 m,4号生态廊道穿过新田、罗岗等乡镇,长12784.50 m,都为绿带型廊道。5号生态廊道长14508.02 m,穿过新圩、坵陂、永和等乡镇,6号生态廊道经过华城、宁中等乡镇,长14711.96 m,都为道路型廊道。7号生态廊道经过大坪、龙北等乡镇,长15318.93 m,为绿带型廊道。③ 三级生态廊道共8条。其中8号生态廊道经过刁坊、新圩等镇,长6406.72 m,为道路型廊道。9号生态廊道经过大坪镇、新田镇,长6534.74 m,10号廊道经过大坪镇、叶塘镇,长6944.76 m,为绿带型廊道。11号廊道经过黄陂、黄槐等镇,长7018.76 m,为道路型廊道。12号生态廊道经过石马、宁塘等镇,长7949.50 m,13号生态廊道经过水口、新圩等镇,长8159.47 m,都为绿带型廊道。14号生态廊道经过刁坊镇、宁新镇,长8493.98 m,为道路型廊道。15号生态廊道经过叶南、叶塘镇,长9953.15 m,为绿带型廊道。对于河流型生态廊道,可在廊道边缘设置绿带缓冲区以降低景观格局阻力。道路型生态廊道一方面可促进物质、能量流的流通,另一方面与之伴随的交通活动会对当地生态环境造成不利影响,可通过适当扩展道路型生态廊道两侧绿带宽度,以促进生态流的流通。对于绿带型生态廊道可进一步增加其连通性与扩展廊道宽度,以降低流域景观生态风险。

表8 宁江流域生态廊道分级结果
Tab. 8 Ecological corridor classification results

| 生态廊道分级 | 编号 | 廊道长度(m) | 廊道类型 |
|--------|----|----------|---------|
| 一级廊道 | 1 | 36294.86 | 河流型 |
| | 2 | 10740.43 | 绿带型(新增) |
| 二级廊道 | 3 | 11150.76 | 绿带型(新增) |
| | 4 | 12784.50 | 绿带型 |
| | 5 | 14508.02 | 道路型 |
| | 6 | 14711.96 | 道路型 |
| | 7 | 15318.93 | 绿带型 |
| 三级廊道 | 8 | 6406.72 | 道路型 |
| | 9 | 6534.74 | 绿带型(新增) |
| | 10 | 6944.76 | 绿带型(新增) |
| | 11 | 7018.76 | 道路型 |
| | 12 | 7949.50 | 绿带型(新增) |
| | 13 | 8159.47 | 绿带型(新增) |
| | 14 | 8493.98 | 道路型 |
| | 15 | 9953.15 | 绿带型(新增) |

3.2.4 流域生态节点的建立 由图6可见，根据生态节点位于生态廊道与景观格局阻力脊线的交点和生态节点在景观格局中的重要性，共识别研究区潜在生态节点19个。其中一级生态节点有3个，二级生态节点有5个，三级生态节点共有11个。

① 一级生态节点分布于龙北、石马、刁坊等乡镇。生态节点的类型主要为河流型、道路型生态节点。主要位于宁江干流中下游景观格局阻力拐点处，在研究区关键生态源地之间起重要的连通作用。此区域是研究区关键生态源地与景观格局阻力高值区域联系薄弱的关键节点，生态流运行受到人类活动干扰较大，宜在河流型生态节点周边设置植被缓冲区，在道路型生态节点周围设置绿带等屏障，为物种的扩散与迁移提供“踏脚石”^[52-53]。

② 二级生态节点主要分布于大坪、新圩、龙北、叶南、叶塘等乡镇，主要为耕地型生态节点与建设用地型生态节点。此类生态节点主要位于二级生态廊道与景观格局阻力脊线交汇处，是城镇建设用地、耕地间的过渡地带。此区域可通过在节点处增加绿带斑块面积，提高植被覆盖率，增加景观格局的异质性，来促进生态网络的连通。

③ 三级生态节点分布在罗岗、宁新、宁塘、坪洋、水口、黄槐等乡镇。主要位于三级生态廊道与景观格局阻力脊线的交汇点，生态节点主要为耕地型、林地型节点。对于耕地型生态节点可以通过在节点周边引入抗污染力强的植物，防止农业非点源污染的扩散。对于林地型生态

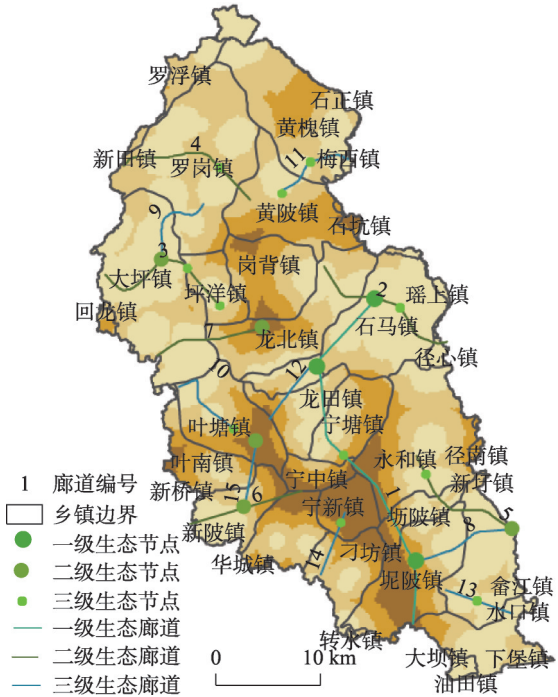


图6 宁江流域景观格局优化网络
Fig. 6 Optimization of landscape ecological network

节点，可通过提升其植被覆盖度来提升景观格局的连通性，以减弱人类活动对生态系统的干扰，维持景观格局稳定性。

3.2.5 优化效果评估 对比研究区景观格局优化前后的 *IIC* 指数和 *LCP* 指数发现

(表9)：景观格局优化之前，研究区 *IIC* 指数与 *LCP* 指数都维持在 0.0034 左右。在景观格局优化后，宁江流域的 *IIC* 指数上升至 0.00827 以上，*LCP* 指数增长至 0.00834 以上，各评价指标的变化率有一倍以上的增长。根据相关研究^[54-55]，景观格局连通性高的地区往往生态稳定性更高，表明本文景观格局优化结果对维持流域景观格局稳定性具有促进作用。

表9 景观格局优化效果评估

Tab. 9 Landscape optimization evaluation

| 评价指标 | 优化前 | 优化后 | 变化率(%) |
|------------------------|----------|----------|----------|
| 整体景观连通指数(<i>IIC</i>) | 0.003478 | 0.008275 | 137.9241 |
| 景观一致性概率(<i>LCP</i>) | 0.003486 | 0.008349 | 139.5009 |

4 讨论与结论

4.1 讨论

随着景观生态学的发展，景观生态风险评价研究从注重单风险源、单一风险受体的评价逐渐转变为注重多风险源、多受体的综合景观生态风险评价^[5, 56]。学界对于多源景观生态风险的评价日益关注，但从自然、社会以及景观格局视角对流域景观生态风险评价的研究较少^[2]，因此本文基于“自然—人类社会—景观格局”三维视角综合选取评价要素作为研究区景观格局风险源，进一步明确景观生态风险评价结果的地理—生态内涵。在具体因子的风险分级设定中，由于研究视角不同，分级结果亦会出现差异。以水体为例，本文主要考虑水体在研究区重要的水源供给、生境维持功能，设定距水体距离越远景观生态风险水平越高。贡璐等^[4]根据富营养化灾害发生率等因素，等将距离水体近的区域设置具有高的景观生态风险；而潘竟虎等^[37]根据水体重要的水源供给功能，将距水体近的区域设定更高的安全等级。可见，对于同一种景观要素而言，可能存在多种景观生态风险指示内涵，在下一步研究中有必要结合区域实际情况，进一步深入分析。此外，受特定的环境条件制约，不同研究中景观生态风险的主导因素存在差异，孙洪波等^[33]研究显示城镇建设用地对景观生态风险影响较大，这与本文研究结果类似；而赵岩洁等^[57]的研究表明三峡库区小流域景观生态风险除受土地利用类型影响较大外，还受海拔、坡度因素较大影响。因此，在实际评价过程中需要考虑增加多源景观生态风险影响因素。

景观生态风险评价往往以景观格局优化为目的和终点。本文通过对流域景观生态风险进行综合评价，明确了流域景观格局的现状与问题，为接下来景观格局优化提供依据。阻力表面的判定是景观格局优化研究的重要部分，以往研究多选取地形要素或不同用地类型的生态服务价值当量作为景观格局阻力的评价要素^[22, 58]。由于景观格局阻力不仅受到地形的制约，同时还受到自然环境条件、人类活动、景观格局构成等多方面因素综合影响，而且统一划定的生态服务价值当量不能够反映每个地区的景观阻力实际情况，所以制约了景观格局阻力判定方法在实践中的指导意义。本文将景观格局生态评价结果作为景观阻力的赋值依据，可以增加阻力判定中对于自然、人类社会及景观格局因素的综合考虑，改善单一指标对阻力赋值的片面性与主观性。在景观格局生态源地的选择中，有学者分别选取了生态环境良好的水源、林地、自然保护区等作为生态源地^[31]，亦有学者将综合生态系统服务高值区域作为生态源地^[10]，或者基于景观格局综合生态重要性选择研究区生态源地^[42]。本文选择林地及水体作为研究区的生态源地，虽然考虑了景观要素所具有的生态属性，仍具有一定主观性，未来有必要进一步综合多种方法，提

高生态源地选择的科学性。由于生态廊道和生态节点在景观格局中具有不同空间位置 and 不同景观格局基质, 其要素形态、类型、性质均具有差异性。已有研究中对于生态廊道与生态节点的优化更多集中于空间位置的选定^[3], 而根据生态廊道、生态节点的景观异质性对其分级优化的设计不足。本文根据生态廊道、生态节点在景观格局中对生态过程的影响及属性差异, 对其分为不同类型与等级, 也使得景观格局优化次序更为明晰。但是, 具体的优化措施(斑块面积的优化尺度、缓冲区设置等)以及基于ArcGIS的优化结果可能会与实际景观格局存在误差, 导致在实际优化操作中产生不确定性, 未来有必要结合实践作进一步的深入研究与探讨。

4.2 结论

本文从“自然—人类社会—景观格局”3个维度综合选取研究区景观生态风险评价因子, 在对宁江流域景观生态风险综合评价的基础上, 基于MCR模型对研究区景观格局进行优化, 研究结果表明:

(1) 宁江流域景观生态风险是空间上自然环境、人类社会、景观格局3个维度多种影响要素综合权衡的结果。人类社会维度评价因子对综合风险的影响最为强烈, 景观格局维度因素对综合风险的影响次之, 自然维度因素对综合风险的影响较弱。风险评价结果符合宁江流域实际情况。

(2) 宁江流域景观生态风险偏高, 主要原因是生态源地之间缺乏连接, 不利于生态流流动。流域高度景观生态风险区面积为311.65 km², 面积占比为21.45%, 主要分布于宁中、宁新、兴城、刁坊、圪垯等乡镇; 较高景观生态风险区域面积为523.96 km², 面积占比为36.06%, 主要分布于宁塘、永和、坪洋、岗背等乡镇; 中度景观生态风险区的面积为496.34 km², 面积占比为34.16%, 主要分布于大坪、罗岗、黄陂、龙背、石马等乡镇; 轻度景观生态风险的区域面积为120.96 km², 占总面积占比为8.33%, 主要分布于回龙、新田、罗浮、石正等乡镇。

(3) 基于MCR模型对流域景观格局进行优化, 识别出研究区主要的生态源地为面积大于50 km²的林地(主要位于径南、黄陂、黄槐等乡镇)和面积大于0.2 km²的水域(主要包括合水水库、福岭水库、温公水库等); 共构建了15条生态廊道(其中一级生态廊道1条, 二级生态廊道有6条, 三级生态廊道8条)和19个生态节点(其中一级生态节点有3个, 二级生态节点有5个, 三级生态节点有11个); 并对关键景观格局要素进行分级, 构建了多层次的生态网络。

(4) 优化前后的景观格局连通度对比, 结果显示: 对宁江流域景观格局优化可使宁江流域整体景观格局连通度提升一倍以上, 本文优化结果对于提高研究区景观格局的连通性与稳定性具有促进作用。

参考文献(References)

- [1] Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4): 664-677. [彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 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] Peng Jian, Liu Yanxu, Pan Yajing, et al. Study on the correlation between ecological risk due to natural disaster and landscape pattern-process: Review and prospect. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(10): 1186-1196. [彭建, 刘焱序, 潘雅婧, 等. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究: 回顾与展望. *地理科学进展*, 2014, 29(10): 1186-1196.]
- [3] Li Yangfan, Lin Jingyu, Sun Xiang. An early warning method on ecological risk and its application to improve landscape ecological security pattern regulation. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 485-494. [李杨帆, 林静玉, 孙翔. 城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用. *地理研究*, 2017, 36(3): 485-494.]
- [4] Gong Lu, Ju Qiang, Pan Xiaoling. Ecological landscape risk assessment study of Bosten lake. *Journal of Arid Land*

- Resources and Environment, 2007, 21(1): 27-31. [贡璐, 鞠强, 潘晓玲. 博斯腾湖区域景观生态风险评价研究. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 27-31.]
- [5] Gong Jie, Zhao Caixia, Xie Yuchu, et al. Ecological risk assessment and its management of Bailongjiang watershed, southern Gansu based on landscape pattern. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2041-2048. [巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 等. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2041-2048.]
- [6] Xu Yan, Gao Junfeng, Zhao Jiahui, et al. The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 284-292. [许妍, 高俊峰, 赵家虎, 等. 流域生态风险评价研究进展. 生态学报, 2012, 32(1): 284-292.]
- [7] Chen Chunli, Lv Yonglong, Wang Tieyu, et al. Emerging issues and prospects for regional ecological risk assessment. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 808-816. [陈春丽, 吕永龙, 王铁宇, 等. 区域生态风险评价的关键问题与展望. 生态学报, 2010, 30(3): 808-816.]
- [8] 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. [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. 地理学报, 2015, 70(7): 1052-1067.]
- [9] Han Wenquan, Chang Yu, Hu Yuanman, et al. Research advance in landscape pattern optimization. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1487-1492. [韩文权, 常禹, 胡圆满, 等. 景观格局优化研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1487-1492.]
- [10] Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 701-710. [彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.]
- [11] Pan Jinghu, Liu Xiao. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule River Basin. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3): 791-799. [潘竞虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.]
- [12] Forman R. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [13] Seppelt R, Voinov A. Optimization methodology for land use patterns: Evaluation based on multiscale habitat pattern comparison. Ecological Modelling, 2003, 168(3): 217-231.
- [14] Bilonis I, Zabaras N. A stochastic optimization approach to coarse-graining using a relative-entropy framework. Journal of Chemical Physics, 2013, 138(4): 313-344.
- [15] Forman R. Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133-142.
- [16] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 10-16.
- [17] Ou Dinghua, Xia Jianguo. Landscape pattern optimization in peri-urban areas based on the particle swarm optimization method: A case study in Longquanyi District of Chengdu. Geographical Research, 2017, 36(3): 553-572. [欧定华, 夏建国. 基于粒子群算法的大城市近郊区景观格局优化研究: 以成都市龙泉驿区为例. 地理研究, 2017, 36(3): 553-572.]
- [18] Qin Xiangdong, Abuliti, Lin Qizhao. Research on two categories of spread model commonly used for forest fire. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(5): 117-122. [秦向东, 阿布里提, 林其钊. 两类常用森林火灾蔓延模型的比较. 自然灾害学报, 2005, 14(5): 117-122.]
- [19] Huang Fang, Liu Xiangnan, Zhang Yangzhen. GIS-based eco-environmental vulnerability evaluation in West Jilin Province. Scientia Geographica Sinica, 2003, 24(1): 95-100. [黄方, 刘湘南, 张养贞. GIS支持下的吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究. 地理科学, 2003, 24(1): 95-100.]
- [20] Chen Liding, Li Xiuzhen, Fu Bojie, et al. Development history and future research priorities of landscape ecology in China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3129-3141. [陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 等. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.]
- [21] Yue Juan, Wang Yanglin, Li Guicai, et al. The conceptual framework of watershed landscape optimization concerning water environmental protection. Progress in Geography, 2007, 26(3): 38-46. [岳隽, 王仰麟, 李贵才, 等. 基于水环境保护的流域景观格局优化理念初探. 地理科学进展, 2007, 26(3): 38-46.]
- [22] Huang Liming, Chen Jianfei. Suitability evaluation of urban construction land based on features extraction of a MCR surface. Resources Science, 2014, 36(7): 1347-1355. [黄丽明, 陈健飞. 广州市花都区域城镇建设用地适宜性评价研究: 基于MCR面特征提取. 资源科学, 2014, 36(7): 1347-1355.]
- [23] Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. Geographical Research, 2017(3): 471-484. [陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017(3): 471-484.]

- [24] Li Qian, Dai Liang, Zhu Qing, et al. Ecological connectivity changes and its pattern optimization during land consolidation based on minimal accumulative resistance model. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(6): 733-739. [李谦, 戴靓, 朱青, 等. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究. *地理科学*, 2014, 34(6): 733-739.]
- [25] Liu Ruimin, Wang Xxuejun, Tao Peng, et al. Spatial PCA and pollutant sources of topsoil PAHs in Tianjin Area. *Progress in Geography*, 2005, 24(3): 109-117. [刘瑞民, 王学军, 陶澎, 等. 天津表土PAHs的空间主成分与污染源分析. *地理科学进展*, 2005, 24(3): 109-117.]
- [26] Zhu Ruxiong, Zhang Zhengdong, Yang Chuanxun, et al. Relationship between landscape pattern change and runoff in the Southern China humid area river basin: A case study of Ning Jiang. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 49(5): 79-85. [朱汝雄, 张正栋, 杨传训, 等. 华南湿热山地小流域景观格局演变与径流关系: 以宁江为例. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(5): 79-85.]
- [27] Dong Caiwen, Zhang Zhengdong, Yang Chuanxun, et al. Run off Characteristics and hysteresis to precipitation in Meijiang River Basin in Guangdong Province during 1960-2013. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(3): 38-45. [董才文, 张正栋, 杨传训, 等. 1960-2013年广东省梅江流域径流特征及其对降水的滞后效应. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 38-45.]
- [28] Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang, et al. Analysis on the spatial pattern of land use change in China. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 2002, 32(12): 1031-1040. [刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2002, 32(12): 1031-1040.]
- [29] Liu Anshi. *Guangdong Soil Species*. Beijing: Science Press, 1996. [刘安世. *广东土种志*. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [30] Tang Guoan, Song Jia. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs. *Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 157-192. [汤国安, 宋佳. 基于DEM坡度制图图中坡度分级方法的比较研究. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 157-192.]
- [31] Zhang Zhengdong, Yang Chunhong. Variations in soil organic carbon storage and the potential for carbon sequestration by topsoil over 25 years. *Resources Science*, 2013, 35(4): 809-815. [张正栋, 杨春红. 近25a珠江北江上游土壤表层有机碳储量变化及固碳潜力估算: 以广东省翁源县为例. *资源科学*, 2013, 35(4): 809-815.]
- [32] Wang Qi, Fu Mengdi, Wei Lai, et al. Groundwater quality assessment in Northern Anhui based on multi-layer weighted principal component analysis. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4546-4554. [王琦, 付梦娣, 魏来, 等. 基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建: 以安徽省宁国市为例. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4546-4554.]
- [33] Zhang Xiaofei, Wang Rusong, Li Zhengguo, et al. Comprehensive assessment of urban ecological risks: The case of Huaibei City. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6204-6214. [张小飞, 王如松, 李正国, 等. 城市综合生态风险评价: 以淮北市城区为例. *生态学报*, 2011, 31(20): 6204-6214.]
- [34] Sun Hongbo, Yang Guishan, Su Weizhong, et al. Ecological risk assessment of land use in the area along Changjiang River: A case study of Nanjing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5616-5625. [孙洪波, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 沿江地区土地利用生态风险评价: 以长江三角洲南京地区为例. *生态学报*, 2010, 30(20): 5616-5625.]
- [35] Mc Garigal K, Cushman S A, Ene E. FRAGSTATS v4: Spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. University of Massachusetts, Amherst. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, 2012.
- [36] Jiao Sheng, Yang Na, Peng Kai, et al. The effects of land-use and landscape pattern on water quality in Weihe river watershed- ed. *Geographical Research*, 2014, 32(12): 2263-2274. [焦胜, 杨娜, 彭楷, 等. 渭河流域土地景观格局对河流水质的影响. *地理研究*, 2014, 32(12): 2263-2274.]
- [37] Jiao Sheng, Li Zhenmin, Gao Qing, et al. The application of landscape connectivity theory in urban ecology suitability assessment and optimization. *Geographical Research*, 2013, 32(4): 720-730. [焦胜, 李振民, 高青, 等. 景观连通性理论在城市土地适宜性评价与优化方法中的应用. *地理研究*, 2013, 32(4): 720-730.]
- [38] Li Lianxiang, Xu Di, Cheng Xianjun, et al. Groundwater quality assessment in Northern Anhui based on multi-layer weighted principal component analysis. *Resources Science*, 2015, 37(1): 61-67. [李连香, 许迪, 程先军, 等. 基于分层构权主成分分析的皖北地下水水质评价研究. *资源科学*, 2015, 37(1): 61-67.]
- [39] Feng Lihua, Ma Weiyu. Application of principal component analysis in evaluation of area's comprehensive strength. *Geography and Geo-information Science*, 2004, 20(6): 73-75. [冯利华, 马未宇. 主成分分析法在地区综合实力评价中的应用. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(6): 73-75.]
- [40] Pan Jinghu, Li Baojuan. Simulation and analysis of human dimensions of urban thermal environment in valley-city: A case study of Lanzhou City. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 662-670. [潘竞虎, 李宝娟. 基于空间PCA的兰州市热

- 环境人文驱动因素分析. 干旱区地理, 2011, 34(4): 662-670.]
- [41] Pan Jinghu, Liu Xiao. Assessment of landscape ecological security and optimization of landscape pattern based on spatial principal component analysis and resistance model in arid inland area: A case study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3126-3136. [潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化: 以张掖市甘州区为例. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3126-3136.]
- [42] Tang Li, Luo Yiyin, Luo Gaigai, et al. Landscape pattern optimization based on the granularity inverse method and MCR model in Dongfang City, Hainan Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(12): 3393-3403. [唐丽, 罗亦殷, 罗改改, 等. 基于粒度反推法和MCR模型的海南省东方市景观格局优化. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3393-3403.]
- [43] Lu Yu, She Jiyun, Chen Caihong, et al. Landscape ecological security pattern optimization based on the granularity inverse method: A case study in Xiuying District, Haikou. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6384-6393. [陆禹, 舍济云, 陈彩虹, 等. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化: 以海口市秀英区为例. *生态学报*, 2015, 35(19): 6384-6393.]
- [44] Zhong Shiyu, Wu Jing, Li Yu, et al. Reconstruction of urban land space based on minimum cumulative resistance model: A case study of Xintang Town, Guangzhou City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3173-3179. [钟式玉, 吴菁, 李宇, 等. 基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构: 以广州市新塘镇为例. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3173-3179.]
- [45] Du Yueyue, Hu Yina, Yang Yang, 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8241-8253. [杜悦悦, 胡熠娜, 杨阳, 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. *生态学报*, 2017, 37(24): 8241-8253.]
- [46] Yu Feng, Li Xiaobing, Wang Hong, et al. Optimization of land use pattern based on eco-security: A case study in the huangfuchuan watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3198-3210. [喻锋, 李晓兵, 王宏. 生态安全条件下土地利用格局优化: 以皇甫川流域为例. *生态学报*, 2014, 34(12): 3198-3210.]
- [47] Guo Jiguang, Cai Yongli, Luo Kun, et al. Ecological corridor construction based on target species protection: A case study of Chongming Island. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1668-1672. [郭纪光, 蔡永立, 罗坤, 等. 基于目标种保护的生态廊道构建: 以崇明岛为例. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1668-1672.]
- [48] Zeng Li, Yang Qingyuan, Yang Renhao, et al. Landscape pattern optimization for ecological barrier in the three gorges reservoir area: A case study in Jiangjin, Chongqing. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5): 1364-1373. [曾黎, 杨庆媛, 杨人豪, 等. 三峡库区生态屏障区景观格局优化: 以重庆市江津区为例. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1364-1373.]
- [49] Sun Xianbin, Liu Hongyu. Optimization of wetland landscape patterns based on ecological function evaluation: A case study on the coastal wetlands of Yancheng, Jiangsu Province. *Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1157-1166. [孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优及其效应以江苏盐城海滨湿地为例. *生态学报*, 2010, 30(5): 1157-1166.]
- [50] Meng Jijun, Wang Xiaodong, You Nanshan, et al. Dynamic changes of landscape connectivity for ecological land and distance thresholds in the middle reaches of the Heihe River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1715-1726. [蒙吉军, 王晓东, 尤南山, 等. 黑河中游生态用地景观连接性动态变化及距离阈值. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1715-1726.]
- [51] Maile C. Patch connectivity and genetic diversity conservation in the federally endangered and narrowly endemic plant species *Astragalus albens*, (Fabaceae). *Biological Conservation*, 2008, 141(4): 938-955.
- [52] Diao Feifei. Research on the evolution and optimization of landscape patterns of Hangzhou [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2012. [刁菲菲. 杭州市景观格局的演变及优化研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.]
- [53] Yu Kongjian. Ecologically strategic in landscape and surface model. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 43(Suppl.1): 11-20. [俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型. *地理学报*, 1998, 43(Suppl.1): 11-20.]
- [54] Liu Yu. Landscape connectivity in soil erosion research: Concepts, implication and quantification. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 195-202. [刘宇. 土壤侵蚀研究中的景观连通度: 概念、作用及定量. *地理研究*, 2016, 35(1): 195-202.]
- [55] Zhang Xiaofei, Wang Yanglin, Li Zhengguo. Landscape pattern optimization based upon the concept of landscape functions network: A case study in Taiwan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1707-1713. [张小飞, 王仰麟, 李正国. 基于景观功能网络概念的景观格局优化: 以台湾地区乌溪流域典型区为例. *生态学报*, 2005, 25(7): 1707-1713.]
- [56] Zhao Xiaoqing, Wang Haibo, Yang Shuhua, et al. GIS-based ecological optimization of spatial patterns of land resources. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4892-4901. [赵筱青, 王海波, 杨树华, 等. 基于GIS支持下的土地资源

- 空间格局生态优化. 生态学报, 2009, 29(9): 4892-4901.]
- [57] Zhao Yanjie, Li Yangbing, Shao Jingan. 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. [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. 自然资源学报, 2013, 28(6): 944-956.]
- [58] She Yuchen, Chen Caihong, He Dan, et al. Landscape pattern optimization analysis based on MCR model and kriging in Haikou. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(3): 233-238. [畚宇晨, 陈彩虹, 贺丹, 等. 基于MCR模型和Kriging的海口市景观格局优化分析. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 233-238.]
- [59] Zhao Wenwu. The effects of grain change on landscape indices. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 326-333. [赵文武, 景观指数的粒度变化效应. 第四纪研究, 2003, 23(3): 326-333.]

Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment

LI Qingpu¹, ZHANG Zhengdong¹, WAN Luwen², YANG Chuanxun³,
ZHANG Jie¹, YE Chen¹, CHEN Yuchan¹

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Department of Earth
and Environmental Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA;
3. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The ecological risks facing the landscape in the Ningjiang River Basin are influenced by multiple parameters. Landscape optimization is an effective way to assess the detrimental effects on the ecosystem. In this study, an integrated "natural-social-landscape" landscape ecological risk assessment system was produced, and the landscape ecological risk classification of the Ningjiang River Basin was based on spatial principal component analysis. Ecological resistance surfaces were constructed using the results of the landscape ecological risk analysis. The landscape resistance surfaces were produced based on the minimum cumulative resistance model (MCR). The results show that human activity and landscape patterns had a more significant influence on the final risk assessment than natural factors do, such as terrain and distance from water. The landscape ecological risk was generally high, and the high ecology risk region covered 523.99 km², constituting the largest area and accounting for 36.06% of the research area. With the aim of decreasing the landscape ecological risk of the Ningjiang River Basin, areas of forestland greater than 50 km² and areas of water greater than 0.2 km² were selected as the eco-sources. Using interlinked points, lines and surfaces, a regional ecological network was constructed out of 15 ecological corridors. The length of the first level corridors was greater than 30000 m, the length of second level corridors was between 10000 m and 30000 m, and the length of the third level corridors was less than 10000 m. A total of 19 ecological nodes were produced. The landscape connectivity was significantly improved following landscape pattern optimization. The results of this study may help improve the ecological stability level in the study area and provide a scientific basis for both landscape ecological risk assessment and landscape pattern optimization research.

Keywords: landscape ecological risk assessment; landscape pattern optimization; spatial principal component analysis; minimum cumulative resistance model; Ningjiang River Basin