

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.024.

胡梦姗, 叶长盛, 顾茉莉. 基于不透水地表扩展的南昌市景观生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 448-459.

HU Mengshan, YE Zhangsheng, GU Moli. Assessment on Landscape Ecological Risk in Nanchang City Based on Impervious Surface Expansion [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 448-459.

# 基于不透水地表扩展的南昌市景观生态风险评价

胡梦姗, 叶长盛, 顾茉莉

(东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013)

**摘要:** [目的] 景观生态风险是识别区域生态风险和衡量区域生态安全的有效指标。基于不透水地表构建, 可直观判定人类活动对风险形成及恶化的环境响应。分析区域景观生态风险评价及风险加剧区的影响因素, 对遏制风险加剧区的滋生与蔓延具有科学意义及实践价值。 [方法] 以南昌市为例, 获取不透水地表信息构建景观生态风险指数, 分析其时空演变特征, 运用地理探测器对研究区景观生态风险的影响因素进行测度。 [结果] (1) 2010—2020年南昌市不透水地表面积剧烈增长, 由648.63 km<sup>2</sup>增至1 075.12 km<sup>2</sup>, 农用地及生态用地资源不断下降, 不透水地表主要由耕地、林地、水域等景观转换而来, 人类活动干扰程度加大; (2) 2010—2020年南昌市景观生态风险指数空间分布以“中间低—两边高”呈现, 平均值整体下降。2010年、2015年、2020年南昌市景观生态高风险区面积分别为519.73 km<sup>2</sup>, 324.82 km<sup>2</sup>, 365.04 km<sup>2</sup>, 景观生态高风险区面积先降后升, 区域以景观生态中高风险区及中风险区为主; (3) 2010年、2015年、2020年南昌市景观生态风险的影响因素由社会经济因子与距离因子为主导, 影响因子的交互作用均大于单因子的解释程度, 距离因子对自然气候因子与社会经济因子具有正向提升作用; (4) 南昌市景观生态风险加剧区以林地、水域、耕地等景观类型为主, 加剧区是自然环境、社会经济及可达性等多重因素导致, 但人为活动影响更为突出。 [结论] 南昌市景观生态状况向好。自然环境、社会经济、距离等因子对景观生态风险指数及风险加剧区的影响呈现差异性和交互性。研究结果对维护区域生态安全和可持续发展具有重要意义。

**关键词:** 景观生态风险; 不透水地表; 影响因素; 地理探测器; 南昌市

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)03-0448-12

## Assessment on Landscape Ecological Risk in Nanchang City Based on Impervious Surface Expansion

HU Mengshan, YE Zhangsheng, GU Moli

(College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** [Objective] Landscape ecological risk is an effective indicator to identify regional ecological risks and measure regional ecological security. Based on the construction of impervious surface, the environmental response of human activities to the formation and exacerbation of risks can be intuitively determined. Regional landscape ecological risk assessment and the influencing factors of the aggravated risk areas are analyzed, which has scientific significance and practical value for curbing the emerging and spreading of risk exacerbation zones. [Methods] Nanchang City was taken as an example, the information of impervious surface was obtained to construct a landscape ecological risk index. The spatiotemporal evolution characteristics of landscape ecological risk were analyzed. The influencing factors of landscape ecological risk in the study area was measured by using geographic detectors. [Results] (1) From 2010 to 2020, the area of impervious surface in Nanchang City increased dramatically, from 648.63 km<sup>2</sup> to 1 075.12 km<sup>2</sup>, and the resources of agricultural

收稿日期: 2022-03-29

修回日期: 2022-04-18

资助项目: 国家自然科学基金(42061041); 东华理工大学研究生创新专项资金项目(DHYC-202125)

第一作者: 胡梦姗(1997—), 女, 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向: 土地利用变化与规划。E-mail: humengshan1102@163.com

通信作者: 叶长盛(1977—), 男, 江西抚州人, 教授, 博士, 研究方向: 城乡发展、土地资源利用与保护。E-mail: yes519@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

land and ecological land continued to decline. The impervious surface was mainly converted from landscapes such as cultivated land, forest land, and water areas, and the degree of interference from human activities increased. (2) From 2010 to 2020, the spatial distribution of Nanchang's landscape ecological risk index was presented as low in the middle and high on both sides. The average value of landscape pattern index decreased as a whole. In 2010, 2015, and 2020, the areas of high-risk areas of landscape ecology in Nanchang City were 519.73 km<sup>2</sup>, 324.82 km<sup>2</sup>, and 365.04 km<sup>2</sup>, respectively. The area of landscape ecological high-risk areas first decreased and then increased. The areas were dominated by landscape ecological medium-high-risk areas and medium-risk areas. (3) The influencing factors of landscape ecological risk in Nanchang City in 2010, 2015 and 2020 were dominated by socio-economic factors and distance factors. The interaction effects of the influencing factors were all larger than the explanation degree of a single factor. The distance factor had a positive effect on natural climate factors and socioeconomic factors. (4) The landscape ecological risk exacerbation zone in Nanchang City was dominated by landscape types such as forest land, water area and cultivated land. Exacerbation zones were caused by multiple factors such as natural environment, socio-economics, and accessibility, but the impact of human activities was more prominent. [Conclusion] The landscape ecological status of Nanchang City has been improving. The impacts of natural environment, social economy, distance and other factors on the landscape ecological risk index and risk exacerbation areas are different and interactive. These research results are of great significance for maintaining regional ecological security and sustainable development.

**Keywords:** landscape ecological risk; impervious surface; influencing factors; geographic detector; Nanchang City

近年来,因“绿水青山就是金山银山”、“山水林田湖草是生命共同体”、“构建人与自然和谐共生的现代化”等发展理念的全面推进,生态安全成为了国家安全的重要组成部分<sup>[1]</sup>。区域内经济发展与环境保护需要齐头并进,人与环境达到和谐共生,已是城市可持续与高质量发展的重要内容。伴随着城镇化及工业化进程加快,人口规模扩大,我国可利用的土地资源减少,景观结构随之发生改变,人地关系矛盾加剧。而区域景观结构受人为干扰后,城市建设用地的扩张取代自然地表,其表现形式即不透水地表的衍生<sup>[2]</sup>,大量建设用地如柏油马路、停车场、水泥路的修建,地表下渗率不断减弱,导致生态环境恶化严重。景观生态风险作为识别区域生态风险、衡量区域生态安全的有效指标<sup>[3]</sup>,明确研究区景观类型,对区域景观生态风险评价开展研究,能够较为准确地表达区域生态状况,以及生态风险的空间分布及演变态势。不透水地表是人为活动造成生态破坏所引发的景观结构及功能变化的直观表现,在提取不透水地表信息的基础上对景观生态风险指数进行计算,进一步提高景观生态风险评价结果的精确性。基于不透水地表的景观生态风险评价可有效关联区域生态与人类福祉间的互馈作用<sup>[4]</sup>,对国土空间规划的景观利用与配置具有参考意义,揭示景观生态风险的影响因素也为构建区域

生态安全格局提供理论依据及实践价值。

早在 20 世纪 70 年代,学者们便开始了生态风险评价的研究,将生态风险评价定义为评估由于一种或多种外界因素导致可能发生或正在发生的不利生态影响的过程<sup>[5]</sup>。最初研究主要以化学有害物质为研究对象,采用统计学方法<sup>[6]</sup>、混合物风险商法<sup>[7]</sup>或潜在生态风险指数法等<sup>[8]</sup>对风险元素的污染现状和生态风险程度进行评价,以期为进一步控制风险源提供科学参考。随着生态风险热点问题的不断深入,部分学者从土地利用视角<sup>[9]</sup>以及景观生态学角度刻画景观格局与生态过程的联系<sup>[10-11]</sup>,基于网格采样法,建立综合景观格局指数,依据研究区自然生态属性,选取符合当地生态系统所受干扰类型及强度大小的景观格局指数<sup>[12]</sup>,以建立景观结构与综合区域生态风险之间的关联性。此外还有学者将风险可能造成的损失与风险出现或发生概率的乘积作为景观生态风险的综合表征,在其基础概念上创建了新的测量方法,如景观生态受损概率 RPROB<sup>[13]</sup>、综合生态风险 CER<sup>[14]</sup>、空间生态风险 V 等<sup>[15]</sup>。在生态风险评估指标体系选择时,不仅考虑生态受损类型,还充分思量研究区景观生态价值及地形地貌、领域范围是否稳定等外部胁迫。景观生态风险通常基于景观要素镶嵌、格局演变及生态过程等分析其风险源及外部干扰的

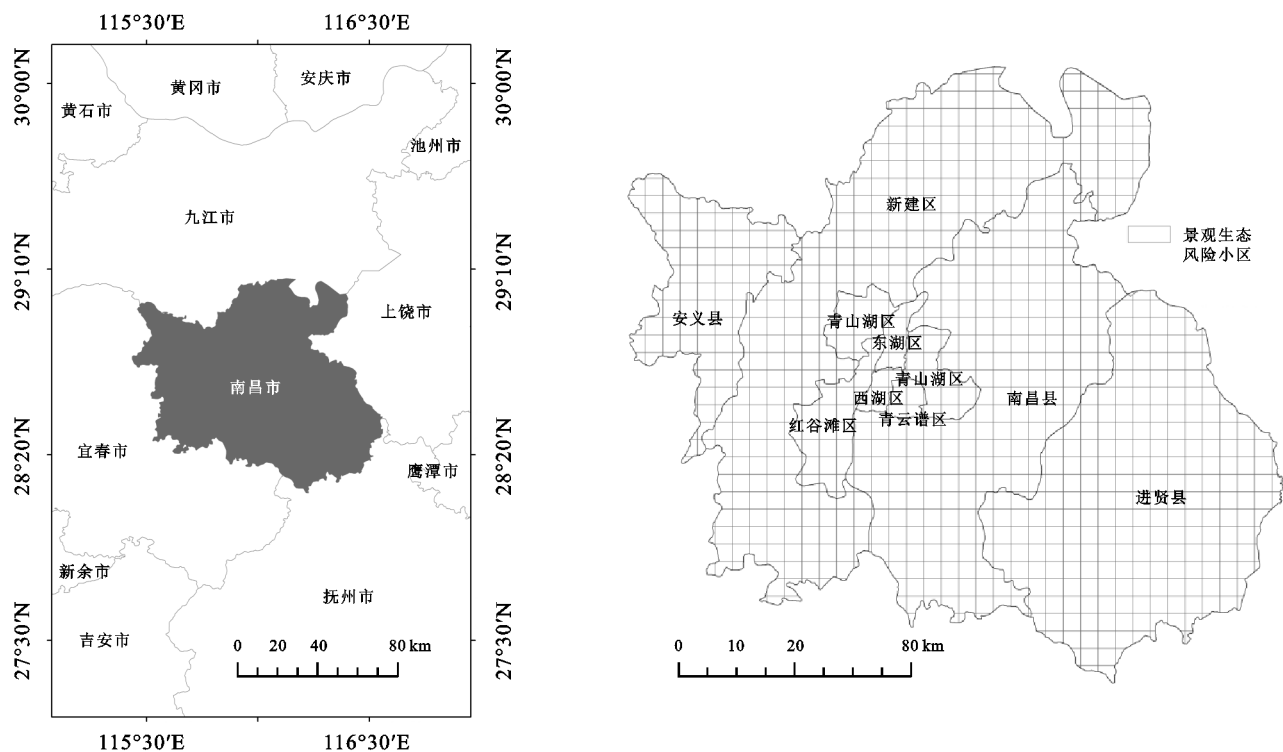
响应,因此从不透水地表角度直观判定人类活动对风险形成及恶化的研究尚不多见。不透水地表的提取方法包含光谱混合分析法<sup>[16]</sup>、指数法<sup>[17]</sup>、决策树模型<sup>[18]</sup>、回归模型法等<sup>[19]</sup>,鉴于不透水地表的提取往往存在精度不高以及异物同谱的混淆问题,本文采用特征指数法,从不透水地表的多角度构建特征指数,借此获取不透水地表信息并分析其扩张演变。此外,现有研究还缺乏对景观生态风险影响因素的探讨,少数学者从城镇化背景<sup>[20]</sup>及城镇化产生的各类效应<sup>[21]</sup>出发,选取影响因子进行定量分析,鲜有研究对景观生态风险加剧区的形成机理深入剖析,明确加剧区产生的驱动机制,针对加剧区提出相应规划政策,以此降低城镇化产生的生态环境风险。

南昌市是江西省政治、经济、文化中心,在城市的发展建设过程中,热岛效应、城市内涝、水质污染等生态环境问题制约了区域的经济的发展。本文以南昌市为例,提取不透水地表信息,以不透水地表作为景观类型构建景观生态风险指数,合理揭示研究区城镇扩展形态及土壤理化性质在区域风险演变中的环境效应。选取自然环境因子、社会经济因子、距离因子等十个指标,运用地理探测器对研究区景观生态风险评价的整体及加剧区影响因素进行探测,揭示生态风险与自然环境及人为活动间的内在关联,丰富景观生态风险研究内容及评价内涵,为研究区及相关加剧区的生态决策及社会经济可持续发展提供依据。

## 1 研究区概况

南昌市位于  $115^{\circ}27'—116^{\circ}35'E, 28^{\circ}10'—29^{\circ}11'N$ ,土地总面积  $7\,402.36\text{ km}^2$ ,下辖东湖、西湖、青云谱、青山湖、红谷滩、新建6个市辖区,以及南昌、进贤、安义3个县。全境以平原为主,占35.8%,东南相对平坦,西北丘陵起伏,水网密布,湖泊众多。2010—2020年,南昌市人口由502.25万人增长至538.29万人,地区生产总值由2145.46亿元上升至5745.51亿元。近年来,南昌市人口数量、城镇规模及发展形态呈剧烈扩张态势,不透水地表随之快速扩张,大量人工地表覆盖自然地表,产生了城市异常增温、局部内涝、生物多样性退化等生态环境问题,阻碍了城市高质量发展,控制不透水地表无序扩张成为城市发展过程中亟待解决的问题。基于不透水地表空间分布,分析南昌市景观生态风险程度,可为缓解区域生态压力,遏制风险加剧区的滋生及蔓延提供有效借鉴。

考虑研究区范围以及数据量处理的可行性,结合前人相关研究经验<sup>[22]</sup>,将南昌市划分为  $3\text{ km}\times 3\text{ km}$  的单元网格,构建景观生态风险小区,统共910个风险小区(图1)。经景观生态风险公式计算,依次获取各样本点内景观生态风险指数。通过普通克里金法进行空间插值,将南昌市景观生态风险指数可视化,借此分析南昌市景观生态风险的时空演变以及2010—2020年风险加剧区的空间分布。



注:底图源自自然资源部(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>),审图号:GS(2019)1822号。

图1 南昌市地理位置及景观生态风险小区划分



## 2 数据源与研究方法

### 2.1 数据源及处理

遥感数据包括 2010 年的 Landsat 4-5 TM 和 2015 年、2020 年的 Landsat8 OLI/TIRS 卫星数字产品,均下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>),经辐射定标、大气校正、影像裁剪等预处理。夜间灯光数据结合 DMSP\_OLS V4(1992—2013 年)与 VIIRS\_VN-LV2(2012—2020 年)等原始数据,通过最优拟合参数构造合成 DMSP(1992—2020 年)数据集,原始数据均下载于 EOG 网站(<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>)。栅格数据如气温、降水、人口密度、km 网格 GDP 源自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),NDVI 由遥感影像借助 ENVI 5.3 获取,生境质量参照《生态环境状况评价技术规范》中相关系数进行可视化,距水系、城镇中心、国道等距离因子通过 ArcGIS 10.2 中欧氏距离获得。

### 2.2 研究方法

2.2.1 景观类型分类及不透水地表信息提取 依据全国土地资源遥感分类系统,将研究区景观类型分为耕地、林地、草地、水域、透水建筑用地、未利用地、不透水地表等 7 类。耕地即种植农作物的土地。林地指生长乔木、竹类、灌木的土地。草地指生长草本植物为主的土地。水域包括陆地水域,如滩涂、沟渠、沼泽等用地。透水建筑用地是指具有透水性的建筑用地,涵盖城镇、村庄范围内公园、植物园、街心花园、用于美化环境及防护的绿化用地,其中以透水地坪材料最为典型。未利用地为城镇、村庄、工矿范围内尚未使用的土地。不透水地表指具有不透水性的一切地类,通常受人为土地利用活动影响而产生不可渗透性。

单一遥感数据难以表达准确的不透水地表信息,为解决精度不足及结果高估问题,从不透水地表多角度特征构建 MISI(Modified Impervious Surface Index)、NDBI(Normalized Difference Built-up Index)、BUAI(Built Up Area Index)3 个指数。MISI 指数从夜间灯光及植被数据中获取,NDBI 指数能够较好地提取城镇建筑用地,引入 BUA I 指数消除低密度植被及裸地等地类对建筑用地异物同谱的影响,进一步提高不透水地表的提取精度。具体原理详见文献<sup>[23]</sup>。计算公式如下:

$$\text{MISI} = \frac{1}{2} \times (1 - \text{NDVI}_{\max}) \times \log(\text{DNB} + 1) \quad (1)$$

$$\text{NDBI} = \frac{R_{\text{MIR}} - R_{\text{NIR}}}{R_{\text{MIR}} + R_{\text{NIR}}} \quad (2)$$

$$\text{BUAI} = \text{NDBI} - \text{NDVI}_{\max} \quad (3)$$

$$\text{ISP} = a \times \text{MISI} + b \times \text{NDBI} + c \times \text{BUAI} + d \quad (4)$$

式中:DNB 是夜间灯光 DN 值;NDVI<sub>max</sub> 是 NDVI 最大值合成; $R_{\text{MIR}}$  是第六波段; $R_{\text{NIR}}$  是第五波段;ISP 是不透水地表盖度; $a, b, c, d$  为估算模型参数,由线性回归结果获得,分别为 0.900, 0.087, 1.300, 0.102。

通过外业调查及随机抽取斑块进行精度分析,选用均方根误差 RMSE 及平均绝对误差 MSE 作为模型精度的评价指标,误差幅度基本控制在 20% 以内,满足区域尺度评估精度要求。

2.2.2 景观生态风险指数 从区域生态系统的景观结构出发,选取景观干扰度、脆弱度及损失度指数构建研究区景观生态风险指数。景观干扰度反映区域生态系统受外部的干扰程度。景观脆弱度指生态系统内部的易损性,体现景观类型内部对外界干扰的抵抗能力。景观损失度表征区域遭受自然及人为双重干扰时,其自然资源本底的损失程度<sup>[24]</sup>。计算公式为:

$$E_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (5)$$

$$R_i = E_i \times F_i \quad (6)$$

$$\text{ERI}_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (7)$$

式中: $E_i$  为景观干扰度指数; $C_i$  为景观破碎度指数; $N_i$  为景观分离度指数; $D_i$  为景观优势度指数,其中  $a, b, c$  分别赋值为 0.5, 0.3, 0.2<sup>[24]</sup>;  $R_i$  为景观损失度指数; $F_i$  为景观脆弱度指数,参考已有研究<sup>[25]</sup>,对 7 类景观类型的脆弱性赋值,依次为耕地 5,林地 3,草地 4,水域 6,透水建筑用地 2,未利用地 7,不透水地表 1,进行归一化计算各类景观的脆弱度指数; $\text{ERI}_k$  为第  $k$  个风险小区景观生态风险指数, $A_{ki}$  为第  $k$  个风险小区内第  $i$  类景观面积, $A_k$  为第  $k$  个风险小区面积。

2.2.3 地理探测器分析 结合研究区经济发展以及自然环境的实际情况,选取气温<sup>[26]</sup>、降水<sup>[26]</sup>、NDVI<sup>[27]</sup>、生境质量<sup>[28]</sup>、人口密度<sup>[27]</sup>、km 网格 GDP<sup>[29]</sup>、夜间灯光<sup>[30]</sup>、距水系距离<sup>[30]</sup>、距城镇中心距离<sup>[30]</sup>、距国道距离等<sup>[30]</sup> 十个影响因子,分析南昌市景观生态风险的影响因素。选用地理探测器的因子探测及交互探测,测度各因子对研究区景观生态风险以及 2010—2020 年加剧区的作用程度。将所有影响因素栅格化并重分类,统一坐标系进行离散化处理。其中因子探测主要度量自变量  $X$  在多大程度上控制了因变量  $Y$  在空间上的分布,用  $q$  值表示, $q$  值越大则该影响因子对南昌市景观生态风险的解释力越强。交互探测则分析不同因子交互作用是否会增强或减弱对因变量的解释力<sup>[31]</sup>,其判断依据见表 1。

表1 交互作用关系

判断依据	交互结果
$q(X_a \cap X_b) < \min(q(X_a), q(X_b))$	非线性减弱
$\min(q(X_a), q(X_b)) < q(X_a \cap X_b) < \max(q(X_a), q(X_b))$	单因子非线性减弱
$q(X_a \cap X_b) > \max(q(X_a), q(X_b))$	双因子增强
$q(X_a \cap X_b) = q(X_a) + q(X_b)$	独立
$q(X_a \cap X_b) > q(X_a) + q(X_b)$	非线性增强

### 3 结果与分析

#### 3.1 景观格局动态变化

2010—2020年,南昌市不透水地表面积由 648.63 km<sup>2</sup> 增至 1 075.12 km<sup>2</sup>, 占土地总面积的比重由 8.34% 升为 13.83%, 增长了 5.49 个百分点, 主要分布在南昌市中心城区, 并随着城镇发展建设扩张至新建区南部以及进贤县中部, 围绕南昌市赣江、瑶湖、青岚湖、

军山湖等水域的四周向外蔓延。此外, 南昌市生态用地面积均不断下降, 林地、水域、草地面积分别下降了 177.63 km<sup>2</sup>, 66.68 km<sup>2</sup>, 11.89 km<sup>2</sup>。耕地及透水建筑用地的降幅显著, 耕地面积由 3 530.74 km<sup>2</sup> 降至 2 676.53 km<sup>2</sup>, 透水建筑用地面积净减少 118.13 km<sup>2</sup>。其中, 2010—2015 年, 南昌市不透水地表面积增幅为 196.03 km<sup>2</sup>, 于红谷滩区北部向南部急剧扩张, 并在进贤县南部呈现部分聚集; 2015—2020 年, 南昌市不透水地表面积增幅持续增长, 上升了 230.46 km<sup>2</sup>, 安义县、进贤县、新建区南部扩展较为剧烈。根据南昌市景观类型的空间转移分析, 2010—2020 年南昌市不透水地表主要由耕地、林地、水域等景观转换而来, 与戴兰等<sup>[32]</sup> 研究结果一致, 分别占转入量的 64.71%, 12.22%, 11.57%, 社会经济的快速发展, 掠夺了大量生态及农用地资源, 使城市生态环境问题更为严峻(图 2)。

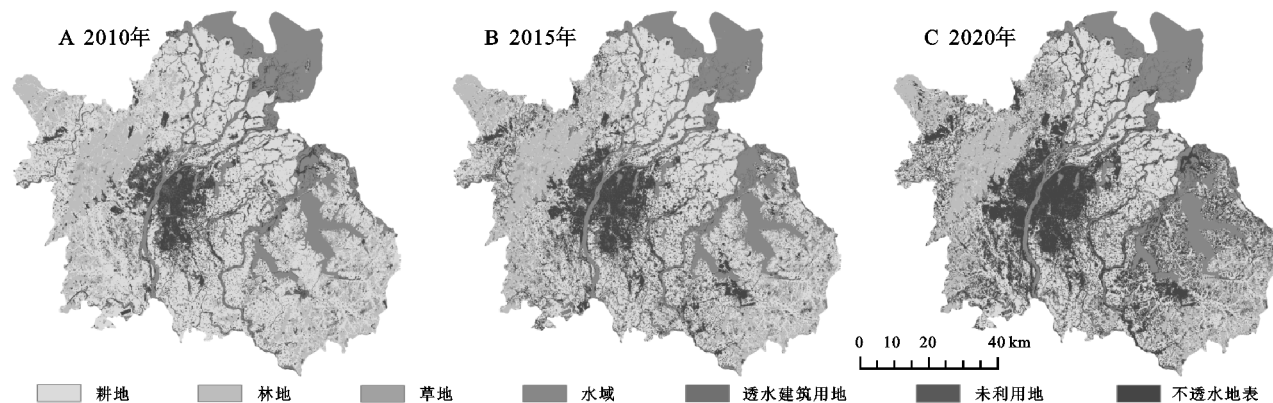


图2 2010年、2015年、2020年南昌市景观类型

景观破碎度及分离度能够反映自然分割及人为切割的破碎化程度, 2010—2020 年南昌市不透水地表破碎度与分离度减弱, 破碎度由 0.052 降至 0.020, 分离度由 0.305 减为 0.127; 耕地、林地、草地、透水建筑用地、未利用地等景观的破碎度与分离度均有所上升; 随着南昌市“十二五”规划中水土流失治理及退田还湖工程的实施<sup>[33]</sup>, 以及“十三五”期间城镇化进程加快<sup>[34]</sup>, 水域面积缩减, 用地矛盾凸显等问题, 水域的破碎度与分离度先降后升。2010—2020 年, 南昌市不透水地表的年均扩展速率达 65.75%, 是耕地年均降低速率的 2.72 倍, 2010 年、2015 年、2020 年南昌市不透水地表的全局 Moran's *I* 指数为 0.40, 0.37, 0.27, 均通过了显著性水平检验, 表明南昌市不透水地表整体呈现显著的邻域分布<sup>[35]</sup>, 与不透水地表的优势度指数逐渐增长的状态相符, 不透水地表逐渐成为南昌市景观类型中的优势地类, 而其余景观类型的优势度指数均不断下降。在城镇化与工业化日益加强的背景之下, 人类活动干扰程度加大, 不透水地表干扰度指数降低, 其余景观类型的干扰度指数

呈现不同幅度的增长, 均可从景观类型面积变化趋势中体现, 损失度指数也相应反映了区域内资源本底的损失程度(表 2)。

#### 3.2 景观生态风险时空演变

经景观生态风险公式计算, 获得各风险小区内景观生态风险指数并进行可视化, 对 2010 年、2015 年、2020 年南昌市景观生态风险空间分布情况进行分析(图 3)。采用自然断点法<sup>[36]</sup> 对 2020 年南昌市景观生态风险指数划分区间, 低风险区( $ERI < 0.024$ ), 中低风险区( $0.024 \leq ERI < 0.034$ ), 中风险区( $0.034 \leq ERI < 0.042$ ), 中高风险区( $0.042 \leq ERI < 0.052$ ), 高风险区( $ERI \geq 0.052$ )。2010 年及 2015 年景观生态风险参照以上划分标准进行分区以便比较。由趋势面分析可知, 南昌市景观生态风险指数空间分布整体呈现“中间低—两边高”的特征, 东部高于西部, 北部高于南部。

2010 年南昌市景观生态高风险区主要分布于新建区北部, 进贤县中部及南部, 2015 年高风险区面积于进贤县区域内有所减少, 但在新建区北部缓慢增

长,发展至 2020 年高风险区范围在新建区北部逐渐扩张。2010 年、2015 年、2020 年南昌市景观生态高风险区面积分别为 519.73 km<sup>2</sup>,324.82 km<sup>2</sup>,365.04 km<sup>2</sup>,占土地总面积的 7.20%,4.50%,5.06%,2010—2020 年南昌市景观生态高风险区面积先降后升,主要景观类型以水域、耕地为主。高风险区覆盖了鄱阳

湖以及军山湖部分湖域,与余敦等<sup>[37]</sup>南昌市土地生态风险评价结果基本相符,南昌市水域景观的破碎度及分离度逐渐增长,干扰度随之增大,由于湖域生态敏感性较强<sup>[38]</sup>,受人类活动干扰性较大,对外界干扰的抵抗能力较弱,因而景观生态风险指数最高,同时也是重点生态管控区域。

表 2 2010 年、2015 年、2020 年南昌市景观格局指数

地类	破碎度			分离度			优势度			干扰度			损失度		
	2010 年	2015 年	2020 年	2010 年	2015 年	2020 年	2010 年	2015 年	2020 年	2010 年	2015 年	2020 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	0.002	0.004	0.007	0.035	0.050	0.069	0.323	0.304	0.289	0.076	0.078	0.082	0.051	0.052	0.055
林地	0.012	0.013	0.016	0.136	0.150	0.171	0.143	0.134	0.132	0.075	0.079	0.086	0.025	0.026	0.029
草地	0.028	0.029	0.033	0.822	0.876	0.981	0.013	0.012	0.012	0.263	0.280	0.313	0.132	0.140	0.157
水域	0.011	0.010	0.012	0.130	0.118	0.138	0.153	0.151	0.147	0.075	0.070	0.077	0.063	0.059	0.064
透水建筑用地	0.083	0.117	0.140	0.769	1.086	1.370	0.097	0.083	0.078	0.292	0.401	0.497	0.049	0.067	0.083
未利用地	0.167	0.250	0.250	50.087	75.079	106.182	0.000	0.000	0.000	15.110	22.649	31.980	15.110	22.649	31.980
不透水地表	0.052	0.040	0.020	0.305	0.219	0.127	0.270	0.316	0.341	0.171	0.149	0.116	0.000	0.000	0.000

2010 年中高风险区基本位于新建区北部并占据南昌县以及进贤县大面积范围,2015 年中高风险面积缩小,大致分布于南昌市东北方向,2020 年中高风险区范围进一步萎缩。2010—2020 年,南昌市景观生态中高风险区面积由 3 337.47 km<sup>2</sup>降至 1 553.59 km<sup>2</sup>,下降了 24.71 个百分点,该范围内大致为耕地及水域等景观类型,其中耕地面积占中高风险区面积比值超过 50%,水域面积占比接近 20%。《江西省国土资源保护与开发利用“十三五”规划》中已明确,到 2020 年耕地保有量以及基本农田保护面积是江西省耕地保护不可逾越的红线<sup>[39]</sup>。鉴于南昌市中高风险区内的耕地及水域面积涵盖了较大范围的保护红线,其景观生态风险指数相对较高。

2010 年南昌市景观生态中风险区主要分布在安义县、新建区南部以及进贤县中部等地,2015 年中风险范围有所增长,蔓延至南昌县中部及南部,覆盖了中高风险区南部的大部分范围,2020 年中风险区面积下降,分布以安义县南部、南昌县南部、进贤县中部为主。中风险区面积先增后降,主要景观类型为耕地以及不透水地表。南昌市《国土空间规划》中表示,对南昌县、进贤县等地部分乡镇适量安排耕地保有量,因此中风险区域内的耕地面积作为南昌市坚守耕地红线以及土地综合整治的主体对象,具有一定程度的景观生态保护意义。

2010 年低风险区以及中低风险区分布以南昌市中心城区为主,2015 年向外扩张,发展至安义县北部并占据新建区中部较大面积,2020 年持续蔓延至新建区南部以及安义县南部,替代了大部分中风险区域。2010—2020 年,南昌市景观生态低风险区以及中低风险区面积均不断增长,低风险区面积由 227.96

km<sup>2</sup>增至 701.90 km<sup>2</sup>,中低风险区面积由 1 169.49 km<sup>2</sup>升为 2 473.16 km<sup>2</sup>。该类区域景观类型主要为不透水地表、耕地以及林地。低风险区虽持续增长,但仅占据南昌市土地总面积的较小比重。不透水地表作为南昌市景观结构的优势类型,其与人类生活存在着密切关联,在城市经济发达、人口密度较大的区域,不透水地表面积也迅速扩张,不透水地表的干扰度及损失度能够体现南昌市现存十分严峻的环境问题<sup>[40]</sup>,因此对南昌市景观生态高风险区的保护管控更加具有警示性(表 3)。

3.3 景观生态风险加剧区划分

为明确区域景观生态风险变化的主要因素,有必要获取南昌市景观生态风险加剧区的空间分布。利用 ERI<sub>2020</sub>—ERI<sub>2010</sub> 计算差值,鉴于风险加剧是“刚性”(即存在一切可能性风险源的区域均为管控区域)<sup>[41]</sup>,风险减弱是“弹性”(生态“保护幻象”的问题屡见不鲜,判断风险是否减弱需要弹性防范区间)<sup>[42]</sup>。以此为评判标准,若 ERI<sub>2020-2010</sub>>0,定义为风险加剧区,ERI<sub>2020-2010</sub><-0.10,则定义为风险减弱区<sup>[30]</sup>,其余部分归为风险平稳区。

在 2010—2020 年南昌市景观生态风险加剧区共有 4 个(图 4)。加剧区 1—4 不透水地表均相应增长,且加剧区 3 不透水地表增幅最大,达 20.41 km<sup>2</sup>,其次为加剧区 2,不透水地表上升了 16.90 km<sup>2</sup>,但加剧区 1 的不透水地表增长倍数最大,扩大了 10.52 倍。加剧区 1 及加剧区 4 主要以林地面积缩减为代价,两地位于安义县西北部以及进贤县东南方向,区域内海拔较高且植被丰富,拥有较好的资源本底,不透水地表的衍生侵蚀林地资源,破坏区域内自然生态屏障,景观生态风险恶化严重。加剧区 2 及加剧



区3内耕地降幅显著,分别减少了12.32 km<sup>2</sup>,12.78 km<sup>2</sup>,加剧区2覆盖大面积梅岭国家级森林公园,加剧区3基本涵盖鄱阳湖国家级自然保护区,依托于丰富的森林及水域面积<sup>[43]</sup>,加剧区内林地及水域受

封洲禁牧、退田还湖、严禁砍伐等相关法律法规条例管控,致使围绕森林公园以及自然保护区缓冲区之外的生态旅游开发与房屋建筑修建仅能以侵占耕地为主(表4)。

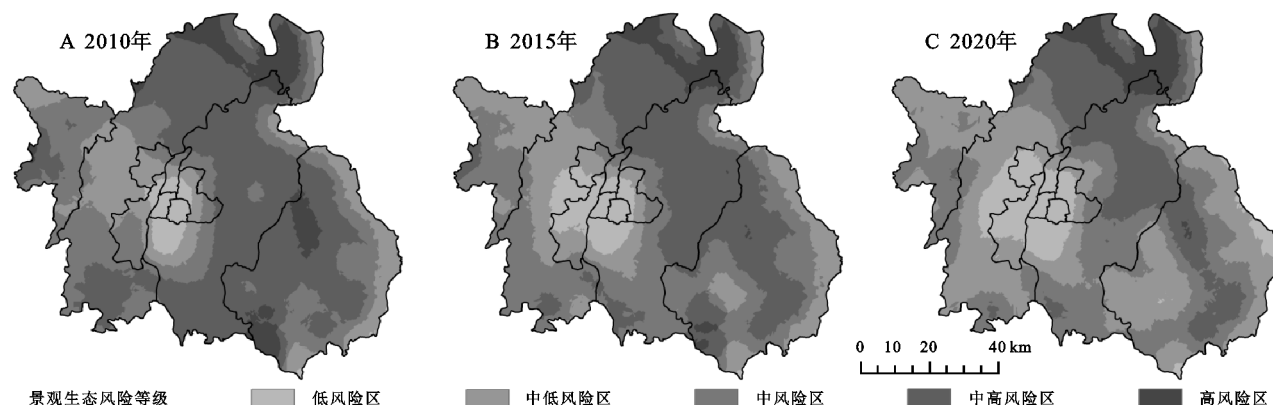


图3 2010年、2015年、2020年南昌市景观生态风险等级分布

表3 2010年、2015年、2020年南昌市景观生态风险等级面积及占比

景观生态风险分区	2010年		2015年		2020年	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
低风险区	227.96	3.16	452.81	6.27	701.90	9.73
中低风险区	1169.49	16.20	1514.09	20.98	2473.16	34.27
中风险区	1962.35	27.19	2426.58	33.62	2123.31	29.42
中高风险区	3337.47	46.24	2498.69	34.62	1553.59	21.53
高风险区	519.73	7.20	324.82	4.50	365.04	5.06

### 3.4 景观生态风险影响因素分析

3.4.1 地理探测器结果与分析 结合研究区自然环境、社会经济情况,共选取10个影响因素。借用地理探测器模型分析各影响因素对南昌市景观生态风险的解释力。各影响因素均通过了显著性水平检验,研究表明社会经济因子与距离因子是景观生态风险的主导因素,也是不同研究区景观生态风险影响因素的普遍结论<sup>[30]</sup>。2010年km网格GDP、夜间灯光、距国道距离等因子贡献量较高,经济水平促进人民生活需求增长,城镇建设刺激区域内景观类型结构改变,生态用地破碎化程度加强,景观生态风险恶化程度增加;2015年距国道距离、夜间灯光、人口密度等成为主要影响因素,且影响程度均有所增强,不透水地表是研究区的主要景观类型,其作为城镇化水平的景观表征方式,充分体现了区域经济与可达性对景观生态风险的影响程度较为显著。2020年距国道距离、降水及夜间灯光等因子更具解释力,其中距国道距离与降水因子的影响程度增强,而夜间灯光则减弱,考虑不透水地表本质属性为地表的不可渗透性,对降水的直观表现即局部内涝,会引发水质污染、绿地破坏等问题<sup>[44]</sup>,因而自然气候因子的解释力有所增强(表5)。

交互探测结果仅包含双因子增强和非线性增强等模式,且2010年、2015年、2020年南昌市景观生态风险影响因子的交互作用均大于单因子的解释程度。本文选取的10个指标交互作用共产生55项,此处仅列举探测值前十的交互因子。在列举的30个交互探测值中,交互频率前三的因子依次为距国道距离、夜间灯光、km网格GDP,分别出现了18次、9次、8次,表明距离因子与社会经济因子对南昌市景观生态风险影响程度最为显著。此外,2010—2020年交互因子探测值位列前三中,频率最高的分别为降水∩距国道距离、气温∩距国道距离、km网格GDP∩距国道距离,体现了距离因子对自然气候因子与社会经济因子具有正向提升作用。其中降水∩距国道距离的交互值由0.600增至0.677后降为0.589,均位于各年首位,在降雨量高值区,距国道距离对景观生态风险的解释力更强,鄱阳湖湖域位处南昌市东北角降雨量较大且距国道距离最远<sup>[45]</sup>,该处景观生态风险指数位于高风险区,符合交互因子增强解释力的实际情况。而气温∩距国道距离的交互值先增后降,其解释力主要受研究区不透水地表景观影响,随着社会需求的日益增长,不透水地表加快衍生,热岛效应加剧,且环鄱阳湖区域旅游圈经济联系强度均不断增强<sup>[46]</sup>,环湖旅游规划游步道、宾馆、民宿、度假村等,破坏当地生态环境,致使景观生态风险问题更为严峻。km网格GDP∩距国道距离意味着,针对研究区内不同经济水平,距国道距离对景观生态风险的影响程度存在差异,2010—2020年交互值呈现上升趋势,经济建设与区域可达性对南昌市景观生态的稳定性造成破坏,因此保障区域生态保护与经济发展的同步建设,才是促进城市高质量发展的关键(表6)。

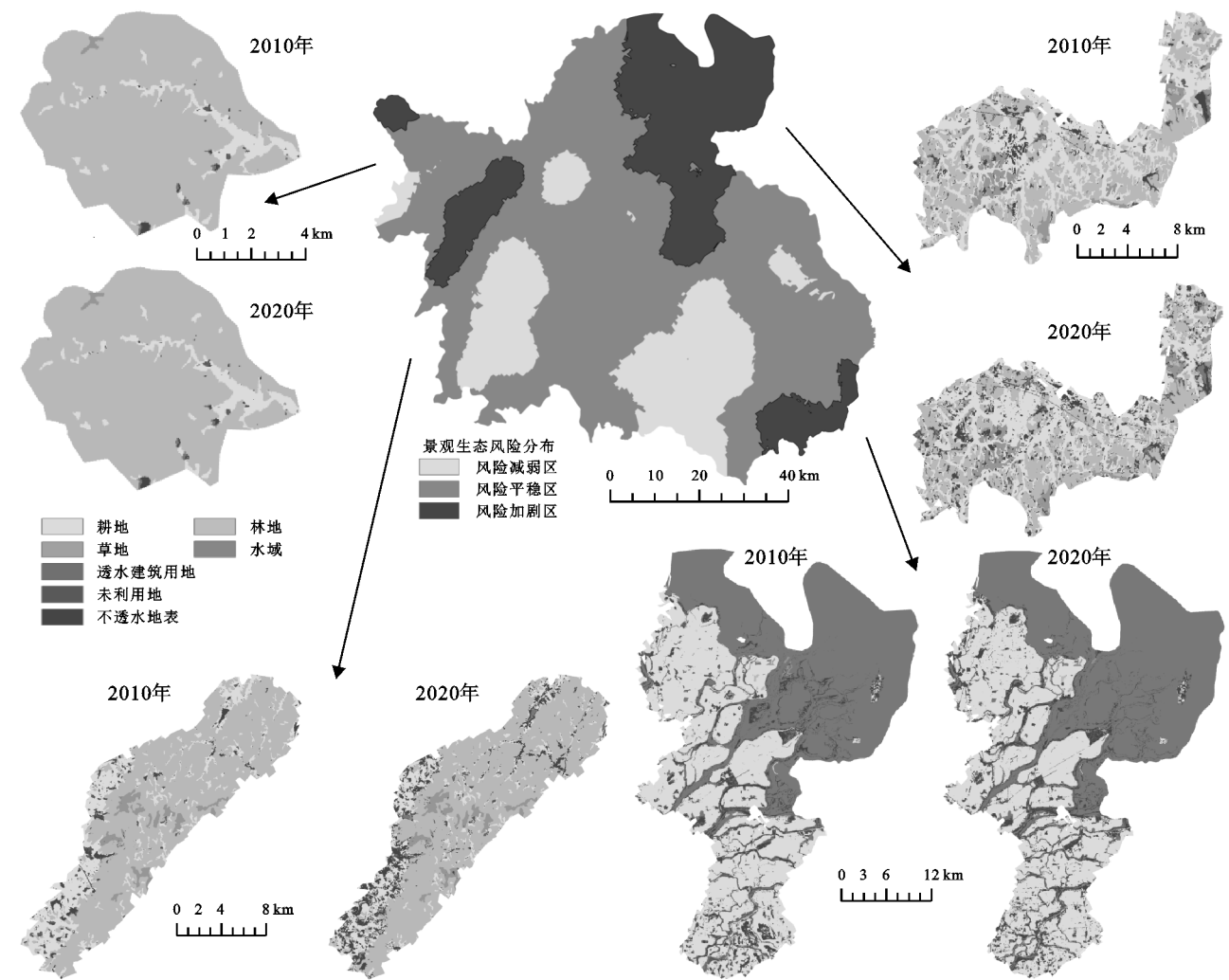


图 4 南昌市景观生态风险加剧区及其景观类型变化

表 4 南昌市景观生态风险加剧区景观面积统计 km<sup>2</sup>

地类	加剧区 1		加剧区 2		加剧区 3		加剧区 4	
	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年
耕地	4.16	3.22	53.76	41.44	479.33	466.55	91.21	85.59
林地	47.90	45.73	170.67	166.36	3.33	2.97	85.55	79.85
草地	0.20	0.22	9.69	9.54	1.62	0.65	14.07	13.02
水域	0.14	0.19	0.67	1.63	529.72	527.87	2.32	2.51
透水建筑用地	0.07	0.03	2.67	1.49	16.95	11.54	1.04	0.65
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
不透水地表	0.31	3.26	7.45	24.35	95.14	115.55	12.79	25.29

3.4.2 加剧区影响因素分析 深入探测南昌市景观生态风险加剧区的影响因素。在满足显著性水平检验的前提下,加剧区 1 地理位置处于南昌市安义县,其主要影响因素为降水、距水系距离、夜间灯光;对于加剧区 2 而言降水、气温、人口密度等影响因子的解释力较强,该区位于新建区中部以及安义县南部;加剧区 3 地处新建区东北部与南昌县北部,降水、距水系距离、距国道距离成为主要影响因素;加剧区 4 位于进贤县东南方向,该区内因子解释力较高的为降水、距水系距离、距国道距离。

结合加剧区实际情况分析,加剧区 1,2,4 均以林地、耕地为主要景观,拥有较高的海拔及坡度,受地形影响不透水地表分布散乱<sup>[47]</sup>,对生态用地的凝聚性造成影响,人为活动干扰程度较大,人地矛盾问题突出。加剧区 3 则以水域、耕地作为优势景观,拥有南昌市最大湖域鄱阳湖,远离城镇扩张区,生态环境优渥,降水等自然环境因素成为了景观生态恶化的主要诱因。经加剧区的整体影响因子解释力统计,共有 11 个自然环境因子对加剧区产生影响,社会经济及距离因子各自有 11,12 个。在加剧区影响因素解释



力位列前三的因子中,降水是所有加剧区的重要影响因素,其次夜间灯光对加剧区 1,3,4 的影响更为强烈,而距国道距离则对加剧区 3,4 存在较强解释力。因此,南昌市景观生态风险加剧区是自然环境、社会经济、及可达性等多重作用导致,但仍旧以人为活动影响为主导(表 7)。

表 5 2010 年、2015 年、2020 年因子探测结果

影响因素	因子名称及符号	2010 年		2015 年		2020 年	
		<i>q</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>p</i>
自然气候因子	气温 $x_1$	0.131	0.000	0.073	0.000	0.189	0.000
	降水 $x_2$	0.135	0.000	0.058	0.000	0.236	0.000
	NDVI $x_3$	0.046	0.000	0.046	0.000	0.046	0.000
	生境质量 $x_4$	0.134	0.000	0.152	0.000	0.168	0.000
社会经济因子	人口密度 $x_5$	0.167	0.000	0.220	0.000	0.127	0.000
	km 网格 GDP $x_6$	0.315	0.000	0.122	0.000	0.111	0.000
	夜间灯光 $x_7$	0.267	0.000	0.304	0.000	0.233	0.000
	距水系距离 $x_8$	0.065	0.000	0.058	0.000	0.062	0.000
距离因子	距城镇中心距离 $x_9$	0.049	0.004	0.071	0.000	0.126	0.000
	距国道距离 $x_{10}$	0.177	0.000	0.346	0.000	0.365	0.000

表 6 2010 年、2015 年、2020 年交互探测结果

排序	2010 年			2015 年			2020 年		
	两两交互	交互值	交互结果	两两交互	交互值	交互结果	两两交互	交互值	交互结果
1	$x_2 \cap x_{10}$	0.600	非线性增强	$x_2 \cap x_{10}$	0.677	非线性增强	$x_2 \cap x_{10}$	0.589	双因子增强
2	$x_2 \cap x_6$	0.473	非线性增强	$x_1 \cap x_{10}$	0.626	非线性增强	$x_6 \cap x_{10}$	0.516	非线性增强
3	$x_6 \cap x_{10}$	0.469	双因子增强	$x_5 \cap x_{10}$	0.511	双因子增强	$x_1 \cap x_{10}$	0.496	双因子增强
4	$x_2 \cap x_7$	0.455	非线性增强	$x_7 \cap x_{10}$	0.501	双因子增强	$x_7 \cap x_{10}$	0.494	双因子增强
5	$x_1 \cap x_{10}$	0.450	非线性增强	$x_1 \cap x_7$	0.493	非线性增强	$x_3 \cap x_{10}$	0.476	非线性增强
6	$x_1 \cap x_7$	0.429	非线性增强	$x_6 \cap x_{10}$	0.469	非线性增强	$x_9 \cap x_{10}$	0.465	双因子增强
7	$x_6 \cap x_7$	0.428	双因子增强	$x_2 \cap x_7$	0.436	非线性增强	$x_1 \cap x_2$	0.457	非线性增强
8	$x_1 \cap x_6$	0.425	双因子增强	$x_5 \cap x_7$	0.428	双因子增强	$x_4 \cap x_{10}$	0.443	双因子增强
9	$x_3 \cap x_6$	0.406	非线性增强	$x_3 \cap x_{10}$	0.427	非线性增强	$x_5 \cap x_{10}$	0.423	双因子增强
10	$x_4 \cap x_6$	0.376	双因子增强	$x_4 \cap x_{10}$	0.418	双因子增强	$x_2 \cap x_7$	0.419	双因子增强

表 7 加剧区影响因素地理探测器结果

影响因素	加剧区 1		加剧区 2		加剧区 3		加剧区 4	
	<i>q</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>p</i> value
$x_1$	0.093	0.412	0.320	0.000	0.048	0.000	0.011	0.738
$x_2$	0.727	0.000	0.423	0.000	0.181	0.000	0.419	0.000
$x_3$	0.030	0.906	0.073	0.000	0.057	0.000	0.038	0.000
$x_4$	0.011	0.928	0.097	0.000	0.004	0.100	0.019	0.029
$x_5$	0.319	0.000	0.251	0.000	0.063	0.000	0.174	0.000
$x_6$	0.164	0.234	0.154	0.000	0.111	0.000	0.068	0.000
$x_7$	0.390	0.000	0.060	0.000	0.124	0.000	0.361	0.000
$x_8$	0.435	0.000	0.100	0.000	0.020	0.000	0.025	0.018
$x_9$	0.127	0.016	0.060	0.000	0.038	0.000	0.101	0.000
$x_{10}$	0.295	0.000	0.059	0.000	0.119	0.000	0.176	0.000

4 讨论

本文以不透水地表信息为基础,评价南昌市的景观生态风险水平,以求提高评估结果的精确性,并从整体及加剧区两个角度分别探讨南昌市景观生态风

险的影响因素。2010 年、2015 年、2020 年南昌市景观生态风险指数的平均值不断下降。在“十三五”期间,自开展污染防治攻坚战以来,南昌市生态文明建设和生态环境保护工作取得了历史性成绩,成效显著。以上成就为南昌市景观生态风险的改善提供了

必要的基础与条件。从面积变化来看,2010—2020年,南昌市景观生态高风险与中高风险区面积整体下降,主要在南昌市新建区北部、南昌县及进贤县内呈现面积萎缩,景观类型以水域、耕地为主。该区域内的水域与耕地位于南昌市生态敏感性的高值范围<sup>[38]</sup>,对人类干扰的负面反馈较明显。在同一时期,南昌县认真执行严格的耕地保护制度,大力推进节约集体用地,进贤县贯彻落实党中央强农惠农政策,有效调动农民种粮积极性、促进耕地地力保护,从而使景观生态风险等级下降。2010—2020年,南昌市景观生态低风险、中低风险及中风险区面积整体上升,大致位于南昌市中部、西北以及南部,景观类型主要为不透水地表、耕地及林地。中心城区由于城镇化发展达到末期,如西湖区以及青云谱区城镇化率已达1,城市建设用地集中连片覆盖<sup>[28]</sup>,不透水地表斑块完整,区域内景观类型相对稳定,因此低风险与中低风险区域范围逐渐扩大。从数值变化来看,景观生态风险加剧区地处中心城区以外的周边区县,均位于植被丰富、水域面积较广的范围内,因此以林地与水域为主的景观类型结构变化及质量保障是南昌市生态稳定性的关键所在。距国道距离、km 网格 GDP、夜间灯光等是南昌市景观生态风险整体的影响因素,景观生态风险加剧区则由降水、夜间灯光、距国道距离为主导。随着城镇化、工业化以及旅游业的发展,人为活动逐渐侵入原始生态用地,景观不断破碎化,分离度增高且连通性下降,导致区域内景观类型之间转换频繁,造成生态环境质量降低的后果<sup>[30]</sup>。因此针对南昌市景观生态风险的不同分区以及风险加剧区,因地制宜地提出保护策略及防治建议是当前重点。

本文尚存些许不足,影响因素的选取还需考虑更加全面,在政策规划方面对景观类型变化同样也会造成一定影响,如土地整治、土地权属、土地资源的保护态度等,在未来研究中将会更为深入剖析。理论上,景观生态风险研究还需融合联合国2030年可持续发展目标,识别景观生态风险目的在于对风险较高区域能够及时给予管控与防范,以此实现可持续发展的景观空间格局,促进景观生态与人类福祉之间的长期联系。方法上,景观生态风险评估可尝试构建在大数据、云计算、人工智能等新兴技术的基础上,通过虚拟情景模拟不同手段及理念的区域规划方案,借此产出空间化、量化、精确化、人性化的风险管控设计方案,降低高风险区的暴露性与脆弱性,积极开展“景观格局—生态系统—种群”多尺度综合集成研究。实践上,景观生态风险评价结

果要服务于国土空间规划主战场,为优化国土空间格局提供有效的技术辅助以及数据支撑。

## 5 结论

(1) 2010—2020年,南昌市不透水地表面积扩张了426.49 km<sup>2</sup>,生态用地均不断下降,南昌市不透水地表主要由耕地、林地、水域等景观转换而来,社会经济的快速发展,掠夺了大量生态及农用地资源。随着城镇化与工业化日益加强,人类活动干扰程度加大,除不透水地表其余景观类型的干扰度指数呈现不同幅度的增长,均可从景观类型面积变化趋势中体现。

(2) 南昌市景观生态风险指数空间分布整体呈现“中间低—两边高”的特征,平均值整体下降,生态状况向好。景观生态高风险区面积先降后升,中高风险区面积不断下降,中风险区面积先增后降,低风险区以及中低风险区面积均不断增长。不透水地表在低风险区急剧衍生,对南昌市景观生态高风险区的保护管控更加具有警示性。

(3) 2010年、2015年、2020年南昌市景观生态风险的影响因素以社会经济因子与距离因子为主,2010年km 网格 GDP、夜间灯光、距国道距离为主要影响因素,2015年距国道距离、夜间灯光、人口密度的因子解释力较强,2020年距国道距离、降水及夜间灯光对景观生态风险指数的影响更为强烈。南昌市景观生态风险影响因子的交互作用均大于单因子的解释程度,距离因子对自然气候因子与社会经济因子具有正向提升作用。

(4) 南昌市景观生态风险加剧区是自然环境、社会经济及可达性等多重作用导致,但仍旧以人为活动影响为主导。其中自然环境因子的降水,社会经济因子的人口密度、夜间灯光,距离因子的距水系、城镇中心、国道距离等在加剧区整体范围内均通过了显著性水平检验。加剧区地处植被丰富的高海拔地区、生态环境优渥的湖域及其周边,主要景观以林地、水域、耕地为主。

基于此,本文提出以下建议:

(1) 对于高风险区与中高风险区,区域内以生态用地为主,远离城镇中心,建设用地扩张受限,城镇用地面积较少,景观脆弱性高,生态系统的抗干扰能力差,致使景观生态风险程度较高。但整体面积下降体现了南昌市对湖域、耕地的保护措施具有显著成效,因此区域还需持续打好“碧水蓝天净土”保卫战,深入开展污染防治“大攻坚”。加快推进风险阻断面的有效治理,以及城市生活污水排放建设。全面开展污染

防治重点区域的试点调查,推进农村生活污水处理设施建设和第三方运营,着力保障区域水域与耕地质量,促进区域高质量发展。

(2) 就低风险区、中低风险区和中风险区而言,区域大致为不透水地表、耕地、林地等,区域面积整体增长,由于建设规模、交通路网的快速扩展,不透水地表作为优势景观,景观斑块更加聚集,抗干扰能力较强,景观损失度小,致使区域风险值较低。但不透水地表的扩展会加剧对生态用地的侵蚀,通过土地整合、置换和储备,控制生产用地,保障生活用地,提高生态用地比例。合理安排土地投放的数量与节奏,改善不透水建设用地的结构与布局,挖掘用地潜力,提高土地配置与利用效率,有效减缓不透水地表的扩张。

(3) 景观生态风险加剧区经地理探测器分析,人为活动是风险加剧的主导因素,因此解决人地矛盾冲突是改善风险加剧区现状,以及遏制风险加剧区衍生的关键。针对风险加剧区有效开展生态安全格局构建,并科学纳入生态保护红线范围,作为强制性严格保护的区域,实施硬性管控。有效提高区域内生态产品供给能力和生态系统服务功能,以此着重增强风险加剧区内的资源生态环境承载力,维护区域生态安全和可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 王敏,胡守庚,张绪冰,等.干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析:以张掖绿洲乡镇为例[J].生态学报,2022,42(14):5812-5824.
- [2] 李发志,朱高立,姬超,等.基于不透水表面指数的城市扩张趋势及驱动机制分析:以南京市为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):575-590.
- [3] 尉芳,刘京,夏利恒,等.基于 LUCC 的陕西渭北旱塬区景观生态风险评价[J].中国环境科学,2022,42(4):1963-1974.
- [4] 朱润苗,陈松林.1980—2020 年福建省景观生态风险与生态系统服务价值的空间关系[J].应用生态学报,2022,33(6):1599-1607.
- [5] Hope B K. An examination of ecological risk assessment and management practices[J]. Environment International, 2006,32(8):983-995.
- [6] 盛文菲.城市化背景下济南岩溶区土地利用变化的生态风险研究[D].济南:山东师范大学,2019.
- [7] 雷慧敏.鄱阳湖生态经济区城镇化与区域生态风险耦合关系研究[D].南昌:东华理工大学,2016.
- [8] 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[J].地理研究,2017,36(3):485-494.
- [9] Duong H A, Phung T V, Nguyen T N, et al. Occurrence, distribution, and ecological risk assessment of antibiotics in selected urban lakes of Hanoi, Vietnam[J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2021, DOI:org/10.1155/2021/6631797
- [10] Berni I, Menouni A, El G I, et al. Health and ecological risk assessment based on pesticide monitoring in Saiss plain (Morocco) groundwater[J]. Environmental Pollution, 2021,276:116638.
- [11] Kimberley K A, Wayne G L. A bayesian approach to landscape ecological risk assessment applied to the upper grande ronde watershed, Oregon[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2012,18(5):946-970.
- [12] 赵曦,黄艺,李娟,等.大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J].生态环境学报,2015,24(6):1013-1021.
- [13] 雷昌文,曹莹,周腾耀,等.太湖水体中 5 种有机磷农药混合物生态风险评价[J].生态毒理学报,2013,8(6):937-944.
- [14] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等.太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境科学,2014,35(1):186-193.
- [15] 白立敏,修春亮,冯兴华.基于土地利用变化的长春市生态风险评价[J].生态科学,2019,38(3):26-35.
- [16] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,84(4):493-505.
- [17] Liu C, Shao Z, Chen M, et al. MNDISI: a multi-source composition index for impervious surface area estimation at the individual city scale[J]. Remote Sensing Letters, 2013,4(8):803-812.
- [18] Yang L, Huang C, Homer C G, et al. An approach for mapping large-area impervious surfaces: synergistic use of Landsat-7 ETM<sup>+</sup> and high spatial resolution imagery[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2003,29(2):230-240.
- [19] Bauer M E, Löffelholz B C, Wilson B. Estimating and mapping impervious surface area by regression analysis of Landsat imagery[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2007.
- [20] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等.流域景观结构的城市化影响与生态风险评价[J].生态学报,2011,31(12):3432-3440.
- [21] 侯蕊,李红波,高艳丽.基于景观格局的武汉市江夏区土地利用生态风险评价[J].水土保持研究,2021,28(1):323-330,403.
- [22] 王飞,叶长盛,华吉庆,等.南昌市城镇空间扩展与景观生



- 态风险的耦合关系[J].生态学报,2019,39(4):1248-1262.
- [23] 李方刚,李二珠,阿里木·赛买提,等.融合多源时序遥感数据大尺度不透水面覆盖率估算[J].遥感学报,2020,24(10):1243-1254.
- [24] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.
- [25] 郭彦君,郭文炯.“三生空间”视角下山西中部盆地城市群景观生态风险分析[J].生态学杂志,2022,41(9):1813-1824.
- [26] 张文静,孙小银,单瑞峰,等.1975—2018年南四湖流域景观生态风险时空变化及其驱动因素研究[J].生态科学,2020,39(3):172-181.
- [27] 孙丽蓉,周冬梅,岑国璋,等.基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J].干旱区地理,2021,44(5):1384-1395.
- [28] 王飞.南昌市城镇空间扩展及其生态风险效应研究[D].南昌:东华理工大学,2019.
- [29] 奚世军,蔡沛伶,安裕伦.2000—2018年贵州喀斯特山区小流域综合生态风险变化及其驱动因素[J].生态与农村环境学报,2020,36(9):1106-1114.
- [30] 高彬,李琛,吴映梅,等.川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素[J].应用生态学报,2021,32(5):1603-1613.
- [31] 钟旭珍,张素,吴瑞娟,等.沱江流域土壤侵蚀动态变化及驱动力分析[J].水土保持研究,2022,29(2):43-49,56.
- [32] 戴兰,王海军,高娟,等.快速城市化背景下景观生态安全时空动态分析:以南昌市区为例[J].华中师范大学学报:自然科学版,2015,49(2):267-273.
- [33] 徐宇,龚云龙,鲁向晖.南昌市水土保持生态建设规划探讨[J].江西水利科技,2017,43(6):457-461.
- [34] 李媛洁,叶长盛,黄小兰.基于CLUE-S模型的南昌市“三生”空间时空演变及情景模拟研究[J].水土保持研究,2021,28(5):325-332.
- [35] 李志,李鹏,刘强.长江中游大城市不透水面增长模式及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(11):3766-3774.
- [36] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
- [37] 余敦,梁珍宝,肖志娟,等.基于景观生态思维的南昌市土地生态风险时空特征分析[J].水土保持研究,2020,27(1):213-220.
- [38] 胡梦姗,叶长盛,卢磊.南昌市生态空间和生态保护红线划定研究[J].生态环境学报,2021,30(3):631-643.
- [39] 良保.江西严守  $3.09 \times 10^{10} \text{ m}^2$  耕地红线,今年底基本完成农村土地确权登记颁证[J].江西农业,2015(2):7.
- [40] 李志,魏宗强,刘雅静,等.1995年以来中国中部城市不透水面增长变化监测及其增长模式研究:以南昌市为例[J].地理科学,2015,35(11):1444-1451.
- [41] Ai J W, Yu K Y, Zeng Z, et al. Assessing the dynamic landscape ecological risk and its driving forces in an island city based on optimal spatial scales: Haitan Island, China [J]. Ecological Indicators, 2022,137:108771.
- [42] Ran P L, Hu S G, Frazier A E, et al. Exploring changes in landscape ecological risk in the Yangtze River Economic Belt from a spatiotemporal perspective[J]. Ecological Indicators, 2022,137:108744.
- [43] 刘晓波,韩祯,王世岩,等.长江大保护视角下鄱阳湖湿地保护的研究思考[J].中国水利水电科学研究院学报,2021,19(2):201-209.
- [44] 赵安周,刘宪锋,裴韬,等.京津冀地区不透水表面覆盖率的时空演变及其对植被的影响[J].地理研究,2021,40(6):1582-1595.
- [45] 雷享勇,高路,马苗苗,等.鄱阳湖流域极端降水时空分布和非平稳性特征[J].应用生态学报,2021,32(9):3277-3287.
- [46] 侯立春,林振山,琚胜利,等.环鄱阳湖旅游圈旅游经济联系与区域发展策略[J].长江流域资源与环境,2017,26(4):508-518.
- [47] 李苗,臧淑英,吴长山,等.哈尔滨市城乡结合部不透水面时空变化及驱动力分析[J].地理学报,2017,72(1):105-115.