

市县级国土空间生态风险评估方法优化研究

□ 翟端强, 卓健, 徐弈

【摘要】生态风险是指在人类活动与自然活动综合作用下产生生态负面效应的或然性。生态风险评估是我国国土空间规划编制的重要基础性工作,加强生态风险评估技术方法研究对深入推进规划编制具有重要意义。文章首先概括总结了我国国土空间生态风险评估的基本方法,并指出其中的不足。其次,针对市县级国土空间生态风险评估中“人类—自然”互动关系的客观情况,借鉴国内外景观生态学的分析方法,详细阐释了生态风险和景观格局之间的耦合关系,说明这一耦合关系对完善生态风险评估方法的作用和优势。最后,基于耦合关系视角提出市县级国土空间生态风险评估指标体系的优化建议,从基础数据整合、影响因子选取、评估体系构建、适用性分析、情景分析及应用五个方面对评估框架进行补充修正。

【关键词】国土空间规划;生态风险;评估方法;景观格局;耦合关系;市县级

【文章编号】1006-0022(2023)02-0053-08 **【中图分类号】**TU984 **【文献标识码】**A

【引文格式】翟端强,卓健,徐弈.市县级国土空间生态风险评估方法优化研究[J].规划师,2023(2):53-60.

Optimization of Ecological Risk Assessment in City and County Level Territorial Space Planning/Zhai Duanqiang, Zhuo Jian, Xu Yi

【Abstract】 Ecological risk refers to the probability of negative effects on ecology by natural and human activities. As an important fundamental work, ecological risk assessment needs to be further studied for the improvement of planning compilation. The paper concludes the shortcomings of current technical methods of ecological risk assessment in city and county level territorial space, studies the actual interaction between human and nature, and explains the coupling relationship between ecological risk and landscape pattern with the analytical method of landscape ecology. It proposes optimizing the index system of ecological risk assessment in city and county level territorial space planning from five aspects: basic data integration, influencing parameter selection, evaluation system construction, adaptation analysis, scenario analysis and application.

【Key words】 Territorial space planning, Ecological risk, Assessment method, Landscape pattern, Coupling relationship, City and county level

0 引言

构建国土空间规划体系是我国践行生态文明建设、走绿色可持续发展道路的重要举措。习近平总书记多次强调“绿水青山就是金山银山”,是对国土空间保护开发必须坚持生态文明价值观的重要指示。2020年1月,自然资源部发布《省级国土空间规划编制指南(试行)》,明确指出“生态空间开发保护格局”是省级国土空间规划编制的“重点管控性内容”,“现状问题评价和风险评估”是省级国土空间规划编制的“基础准备”工作。2020年8月,《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》也明确提出重视规划实施和灾害风险评估,

开展风险评估是市级国土空间规划的“基础工作”。生态文明建设优先是国土空间规划体系构建的核心价值观,因此应加强对未来面临风险的安全评估,发挥“双评价”“双评估”的技术支撑作用,实现治理能力现代化,推动建设美丽中国^[1]。

当前,我国省级国土空间规划的编制工作已基本完成,市县级国土空间规划正在全面铺开,生态风险评估将是未来一段时间内规划编制工作的重点。不同层级国土空间规划体系的构建需要思维方式转变和过往经验总结的有效结合。生态风险评估作为空间规划编制的前置工作,应主动对接顶层规划的战略要求,并积极回应地方“在保护中发展,在发展中保护”的

【基金项目】 国家自然科学基金面上项目(52178051)、中国人民大学林增杰基金项目

【作者简介】 翟端强,同济大学建筑与城市规划学院博士研究生,并任职于高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室。

卓健,通讯作者,博士,同济大学建筑与城市规划学院规划系主任、教授、博士生导师,并任职于高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室。

徐弈,硕士,现任职于上海市上规院城市规划设计有限公司。

现实诉求。国土生态空间中大型生态斑块和廊道,在生物物种迁徙中起到了关键的中继作用,是生态风险较高的区域,在城市快速开发过程中是最易被人类活动蚕食和随意侵占的空间。完整的土地生命系统自身具备复杂而丰富的生态系统服务功能,生态系统中存在某些关键性的局部、位置 and 空间,对于物种保持和扩散过程有异常重要的意义^[2]。将生态元素纳入空间规划,构建“山—水—绿—文”复合要素的全域绿网格局,识别关键生态空间并明确进行风险把控、要素测控和空间管控,可以为探索生态文明导向下的城镇化路径提供启示^[3]。

相较于省级国土空间生态风险评估的战略引领和底线管控作用,市县级国土空间是人口和社会经济活动高度集聚的空间,其生态风险不但受自然条件的制约,而且“人类—生态”互馈作用更为显著。市县级国土空间的发展诉求更为直接,把握民生诉求是市县级国土空间规划的重要任务^[4]。不同市县级国土空间的发展条件、发展目标和路径的差异性更为明显,仅仅延续省级国土空间生态风险评估框架,将难以满足针对市县级国土空间开发的直接指导要求。同时,市县级国土空间的生态风险评估

不能局限于现状的静态评估,而应当结合不同的发展需求和不同的国土空间开发情景,如现阶段针对洪涝灾害、气候变化等风险灾害的评估已经实现系统化、动态化、情景化,且已成为主流趋势^[5-6]。对于市县级国土空间生态风险评估来说,应重点考虑评估工作的复杂性、差异性与动态性,建立一套可评判国土空间生态风险的方法体系,以实现在时空维度上对人类与自然系统耦合状态的评估。

1 国土空间生态风险概念界定与评估方法

1.1 生态风险的概念界定

有国外学者认为生态风险指事件或灾害可能对生态系统及其组分部分产生不确定性的影响,特指对非人类的生物体、种群和生态系统造成的风险^[7]。国内学者将生态风险定义为生态系统及其组分所承受的风险^[8],其中有学者进一步明确了生态风险是生态系统及其组分在自然或人类活动的干扰下所承受的风险,指一定区域内具有不确定性的事故或灾害对生态系统的结构和功能可能产生的不利影响^[9]。尽管国内外对于生态风险的定义表述不尽相同,但均认为生

态风险是在人类活动、自然活动综合作用下产生的生态负面效应。生态风险评估 (Ecological Risk Assessment, 简称“ERA”) 是定量表征生态受到胁迫和承受风险大小的方法,对于国土空间开发和生态建设具有重要指示作用,是一种能有效支持国土空间生态系统的管理工具^[10-11],可定量预测或表达各类风险源对生态系统产生风险的或然性。生态风险评估的主要目的是调查自然资源本底,以此指导生态建设、资源管理、生境修复等关键决策的制定^[12]。

1.2 我国国土空间生态风险评估方法分析

《省级国土空间规划编制指南 (试行)》明确指出:“通过资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价,分析区域资源环境禀赋特点,识别省域重要生态系统,明确生态功能极重要和极脆弱区域,提出农业生产、城镇发展的承载规模和适宜空间。从数量、质量、布局、结构、效率等方面,评估国土空间开发保护现状问题和风险挑战。”本次研究遵循《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南 (试行)》(以下简称《双评价指南》)的顶层设计,总结《省级国土空间规划编制指南 (试行)》的生态风险评估思路,通过借鉴《双评价指南》中的生态保护、农业生产、城镇建设三方面评价内容^[13-14],梳理得出国土空间生态风险评估的基本方法 (图 1)。

上述国土空间生态风险评估方法多适用于省级国土空间生态风险评估工作。该方法主要从资源环境、自然生态等宏观战略视角出发,较为注重六大自然要素。在此种尺度下,无法细化考虑“人类—自然”互馈作用,因此该方法并不能直接沿用到市县级国土空间生态风险识别。在利用上述国土空间生态风险评估体系与方法的同时,必须认识到市县级国土空间的特殊性和差异性。在市县级尺度下,城市中存在大量“人类—自然”互馈作用较为显著的区域,如城乡交错带、

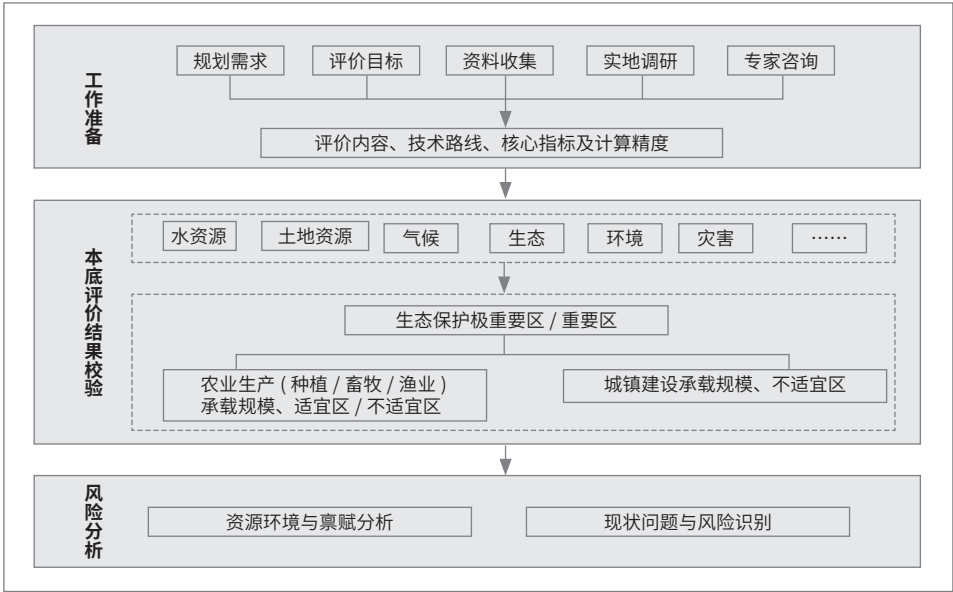


图 1 我国国土空间生态风险评估基本方法示意图
资料来源：根据参考文献 [13-14] 绘制。

城镇开发边缘区、永久基本农田保护区等。为提高市县国土空间生态风险评估精度,生态风险评估需重视人类活动与自然条件的互馈机制,同时结合地方发展诉求和目标,建立动态、多维度、可选择的生态风险评估框架。

2 景观格局在生态风险评估中的作用

2.1 景观格局的概念

“景观格局”(Landscape Pattern)是由景观生态学家福尔曼(Forman)在欧洲景观生态学研究的基础上系统归纳形成的一个概念,指的是“尺度异质地表单元在空间上镶嵌出现且紧密联系的生态系统组合分布”,表征了各类景观组成单元的类型、数目及紧密的空间组合状态(团聚式分布、线状分布、平行分布等),是景观异质性在空间上的综合表现^[15]。地理学较为关注景观格局要素(气候、地形、土壤、植被等)的特征及形成过程,一般将景观格局视为兼具经济、生态、美学价值的高度空间异质地域综合体,是人类活动和自然条件共同作用的结果^[16]。景观生态学重点关注景观单元之间的斑块组合与相互影响,同时也接受地理学中景观的类型含义(城镇景观、农业景观、自然景观等),但景观生态学对于空间单位、时间单位等研究尺度更为重视,强调景观格局是具有空间可测量性的异质性空间单元^[17]。综合来看,景观格局具备四种效应:①异质效应——景观格局由不同类型的自然或人工斑块构成;②地域效应——景观格局的形态特征与功能联系在不同地域空间下存在结构性差异;③尺度效应——不同尺度下的景观格局采用的评价方法与分析过程差异显著;④综合效应——景观格局具备自然、生态、经济、文化、美学等多重价值。

近年来,以地理学、景观生态学为依托,更强调生态环境受人类活动影响的景观格局生态风险评估开始兴起。相

对于传统的生态风险评估方法,借助于景观格局的生态风险评估能够体现地理学的水平空间异质性与生态学的垂直相关性,强调自然或人为因素影响下景观格局与生态过程相互作用可能产生的不利后果^[18]。在当前国土空间开发中,多元化的发展需求进一步放大了国土空间开发与生态保护之间的矛盾,迫切需要协调区域发展资源与生态系统服务的互动关系。而通过景观格局进行生态风险评估更加注重时空异质效应与尺度效应,可以实现多元风险的地域特性、空间综合表征等结果的可视化,可提供多目标、多情景、多体系的生态风险决策框架,科学指引国土空间生态风险研判工作。

2.2 市县国土空间生态风险评估引入景观格局方法的必要性

市县国土空间生态风险评估引入景观格局方法的必要性体现在以下三方面:首先,随着我国城镇化进程的不断推进,市县国土空间成为人口和社会经济活动高度集聚的空间,其生态风险不仅受到自然条件的制约,在很大程度上还受到人类活动的影响。人类活动与自然生态相互作用的关系愈发复杂,人类与自然系统耦合状态在时间尺度上逐渐呈现差异化,耦合动态过程的时间分异特征随着人地系统复杂性的提升而日益凸显^[19]。然而,当前国土空间“双评价”较偏重水资源、土地资源、气候、灾害等自然条件因子,对人类活动和社会经济状况的考虑较少,难以适应城乡空间统筹“生产、生活、生态”三方面资源要素的需要,而景观格局强调“人类—自然”互馈关系和定量表征优势,可以填补现阶段国土空间生态风险评估的短板。

其次,引入景观格局方法也是空间规划差异化的需要。我国幅员辽阔,地域差异显著,自然地理条件差异、社会经济发展水平差异等带来了城市类型、规模、密度、空间形态的巨大差异。即便是同一类型的城市甚至是同一座城市,

城市的发展目标、策略和路径选择将对保护开发带来不同的生态风险。一方面,景观格局指数能够表征不同地域、不同尺度研究对象的国土空间开发状况,如景观指数粒度效应分析法能够筛选出景观格局变化所需的适宜粒度范围,通过分析不同空间尺度的新增斑块数目和新增斑块面积比例,有助于揭示不同尺度的用地发展差异;另一方面,针对同一城市不同发展目标下的各类情景,通过对比各类情景下的代表性景观格局指数集,可以获取不同情景国土空间土地利用配置差异,为国土空间规划决策提供科学支撑。

最后,国土空间规划是面向发展的规划。国土空间规划体系的构建应注意统筹国家意志和地方智慧,充分意识到人类活动与生态文明建设的辩证统一关系,在确定生态优先的基本导向下,仍需要回应社会经济发展的动态诉求^[20]。国土空间生态风险评估不仅是对现状的评估,还应当包含对既有规划的评估。理解自然资源与宏观经济之间的关系重要性,协调人类活动与自然、生态、气候、水文等环境条件,并在时空尺度上进行统筹管控,是国土空间保持可持续开发格局面临的关键问题。因此,市县国土空间生态风险评估不能局限于现状的静态评估,应通过耦合景观格局做到对不同发展需求和不同国土空间开发情景的差异化分析,在时空维度上实现对人类与自然系统耦合状态的多情景动态评估。

2.3 国土空间生态风险评估对象的适用性

为准确掌握国内外景观格局在生态风险评估工作中的最新研究动态,本次研究对评估对象进行了文献整理分析。为了解国外相关研究进展,主要通过Web of Science核心数据库进行分析,以“Landscape Ecological Risk Assessment”作为关键词输入搜索框,共获取英文文献702篇;为把握国内研

表 1 景观格局生态风险评估相关文献评价对象统计

位序	评价对象	篇数	比例 /%
1	区域流域	359	28.58
2	市域	270	21.48
3	森林植被	167	13.31
4	湿地绿洲	131	10.47
5	城市绿地	120	9.59
6	自然保护区、遗产区	95	7.53
7	建设用地	43	3.41
8	风景旅游区	22	1.76
9	工矿区	21	1.70
10	乡村	16	1.27
11	沙漠地区	11	0.90

究动态，主要通过中国知网 (CNKI) 学术期刊数据库进行分析，输入“景观格局”“生态风险”两个关键词进行检索，共获取文献 553 篇。综合国内外研究，可以将景观格局生态风险评估的研究对象分为 11 类 (表 1)。现阶段，景观格局生态风险评估逐渐应用于各项国土空间开发工作中，涉及多个尺度，研究对象为区域^[21]、流域^[22-23]、市域^[24]的相关文献数量最多，占比为 50.06%，同时对重要的国土生态空间，如森林植被、湿地绿洲等也较为关注，对城市局部地区 (城市绿地、自然保护区、遗产区等) 的关注较少。这主要与生态风险评估在微观尺度上的精度不足有关。可见，景观格局生态风险评估工作基本实现了对多尺度、多源风险的综合表征以及“人类—景观”耦合系统空间的分异表达。

上文提到，市县级尺度的国土空间生态风险评估需重点关注人类活动与自然生态之间的互馈关系。近年来，景观格局研究逐步聚焦于景观动态模拟、景观变化驱动因素分析等时空异质性的相关研究。同时，地理遥感技术与情景模拟技术的加入，使景观格局分析成为探讨国土空间土地利用演变规律、建立动态评估模型的有力手段，这进一步深化了对市县级“人—地”互动关系的理解。市县级城市建成区边缘地带是城乡过渡性地带和农业用地与非农用地的复合区，

与自然生态交织效应显著，人类建设活动与自然生态保护之间的矛盾突出，景观格局分析为科学研判生态损失对人类福祉的潜在影响与城镇发展提供了调控依据^[25]。随着美丽乡村等建设工作的不断推进，农业景观、村落景观及其生态效应逐步成为关注的热点，景观格局研究在乡村农业景观优化、土地系统设计等方面卓有成效。综上所述，将景观格局方法应用于市县级国土空间生态风险评估工作中，有利于生态风险评估战略逐级落实，更能科学呈现市县级尺度下人类活动与自然生态之间的互馈关系。同时，将景观生态学跨学科运用于规划管控中，也能从一定程度上弥补以往决策制定中所欠缺的科学性和综合性。

3 市县级国土空间生态风险与景观格局的耦合

3.1 耦合关系

景观格局是能够表征“人类—自然”互馈关系与作用结果的有效手段之一。将其引入国土空间生态风险评估工作，提出生态风险与景观格局的耦合关系具有重要的现实价值。作为“人类—自然”互馈作用的直观呈现，景观格局同样可以反映生态系统的风险变化情况。本次研究具体梳理了国土空间生态风险与景观格局的耦合关系，主要从以下三个方

面进行解构：

(1) “人类—自然”互馈过程方面。随着经济的发展与科技的进步，诸如经济生产、社会文化、规划建设等人类活动所形成的综合系统，不断向自然生态提出生存、生产、安全、能源、游憩等多种需求。自然生态对外输出多种生态服务功能，如水文大气 (生态承载服务)、生产原料 (供给服务)、稳定的气候系统 (调节服务)、绿地景观 (文化精神服务) 等。在自然生态需求的驱动下，人类活动不可避免地会与生态空间内部各类生态活动、生态介质产生互动作用，并对人类综合系统与自然生态系统产生不同的反馈作用，生态风险往往伴随此过程产生。

(2) 生态风险过程方面。人类综合系统与自然生态系统的互馈作用分为正向和负向。对于人类综合系统来说，在获取自然生态系统供给的各类服务后，人类活动一般会收到明显的正向收益，如城市建设用地不断扩张，占用河流、湖泊等水域空间等。对于自然生态系统来说，往往较为容易受到负向作用的影响，如生态用地锐减、生态功能受损、生态斑块破碎化、生物迁徙受阻等，上述过程即为在人类活动影响下生态风险产生的过程。

(3) 景观格局过程方面。上文提到，景观格局是人类和自然生态互动下所呈现的空间镶嵌体，可以较为完整地体现人类活动斑块、生态斑块的动态演变情况。人类活动斑块组合、生态斑块组合可以直观反映人类综合系统与自然生态系统的作用过程和结果。通过计算景观格局指数，可以分析斑块之间的扩张—缺失、挤压—收缩、重叠—冲突、交织—破碎的相互作用关系及作用程度。因此，通过景观格局的指数分析、空间组合分析等手段，可以评估生态受损程度和风险分布结果。

3.2 耦合优势

现阶段国土空间生态风险评估是权

衡人类发展需求与资源本底的重要依据，重视“人类—自然”互馈作用的过程是耦合景观格局的国土空间生态风险评估的重要特征。通过引入景观生态学分析视角，辨析国土空间各类型土地利用之间的功能联系、空间特征、演变规律、相互作用机制等，提升生产、生活、生态功能的风险防范水平，达到生产空间正义化、生活运行平稳化、生态效益最大化，最终实现帕累托最优，是耦合景观格局的国土空间生态风险评估体系构建的意义所在。耦合景观格局的国土空间生态风险评估体系的主要优势在于可以较好地协调人类活动与生态文明的辩证关系，回应社会经济发展的动态诉求。

具体来说，耦合景观格局的国土空间生态风险评估主要具备以下优势（图2）：在内涵与价值方面，景观格局方法基于景观生态学理论，在分析区域资源环境与自然禀赋特点的基础上，较为侧重对人为胁迫与自然胁迫作用过程的描述，综合表征胁迫因素对国土空间开发的不利影响。在风险源与风险受体方面，景观格局方法的引入提升了规划工作者对生态功能、景观过程风险表达的关注度，补充了对风险源与风险受体的分析，将城市作为“社会—生态”的综合系统来考量。在评估思路与权重赋值方面，基于“源—汇”景观学理论，将景观格局分析作为评估体系因子权重赋值的重要依据。权重赋值可以分为景观特征赋值和格局指数赋值，客观性较强，降低了主观因素的影响。在评估体系与评估精度方面，由于较为重视“人类—自然”互馈作用，通过重点分析市县级国土空间的差异性和特殊性，可以进一步提升市县级尺度下的评估精度。在结果表征与情景分析方面，根据不同情景下生态风险评估结果所呈现的风险分区面积矩阵差异，构建地理加权回归模型，进行相关性分析，并对时空异质性和尺度效应进行深入探索，检验不同情景下不同因子对风险分区的影响程度，从而支撑多情景国土空间规划方案比选。



图2 耦合景观格局的市县级国土空间生态风险评估优势分析示意图

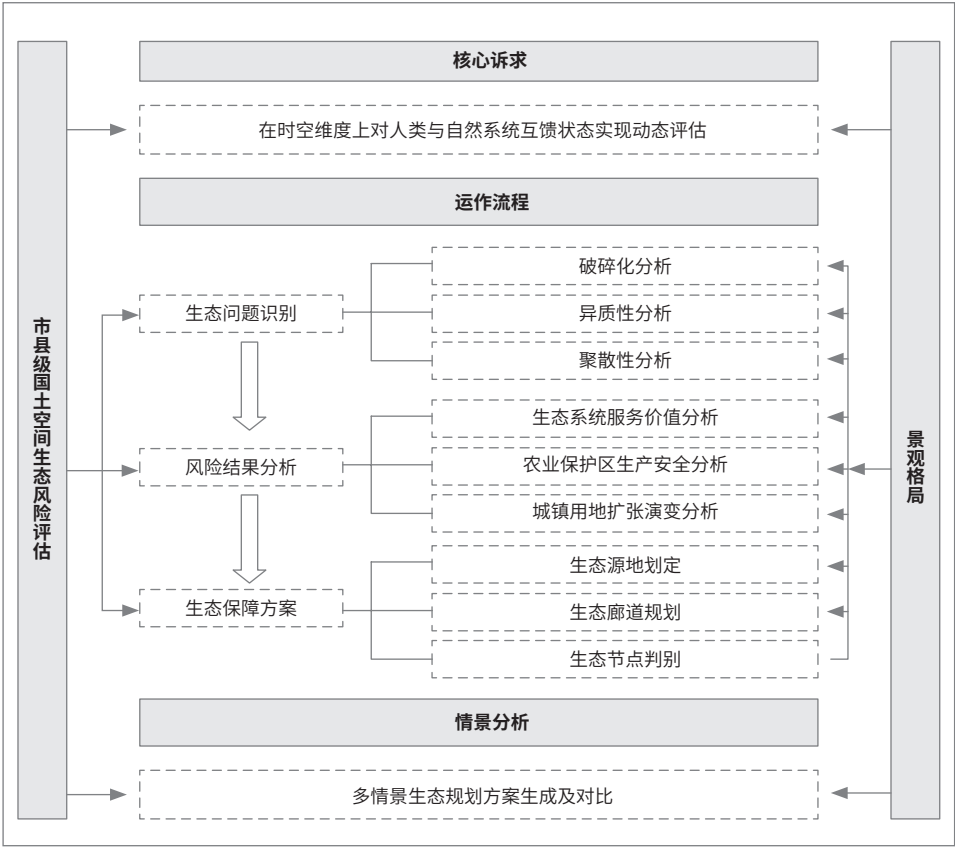


图3 市县级国土空间生态风险与景观格局耦合路径示意图

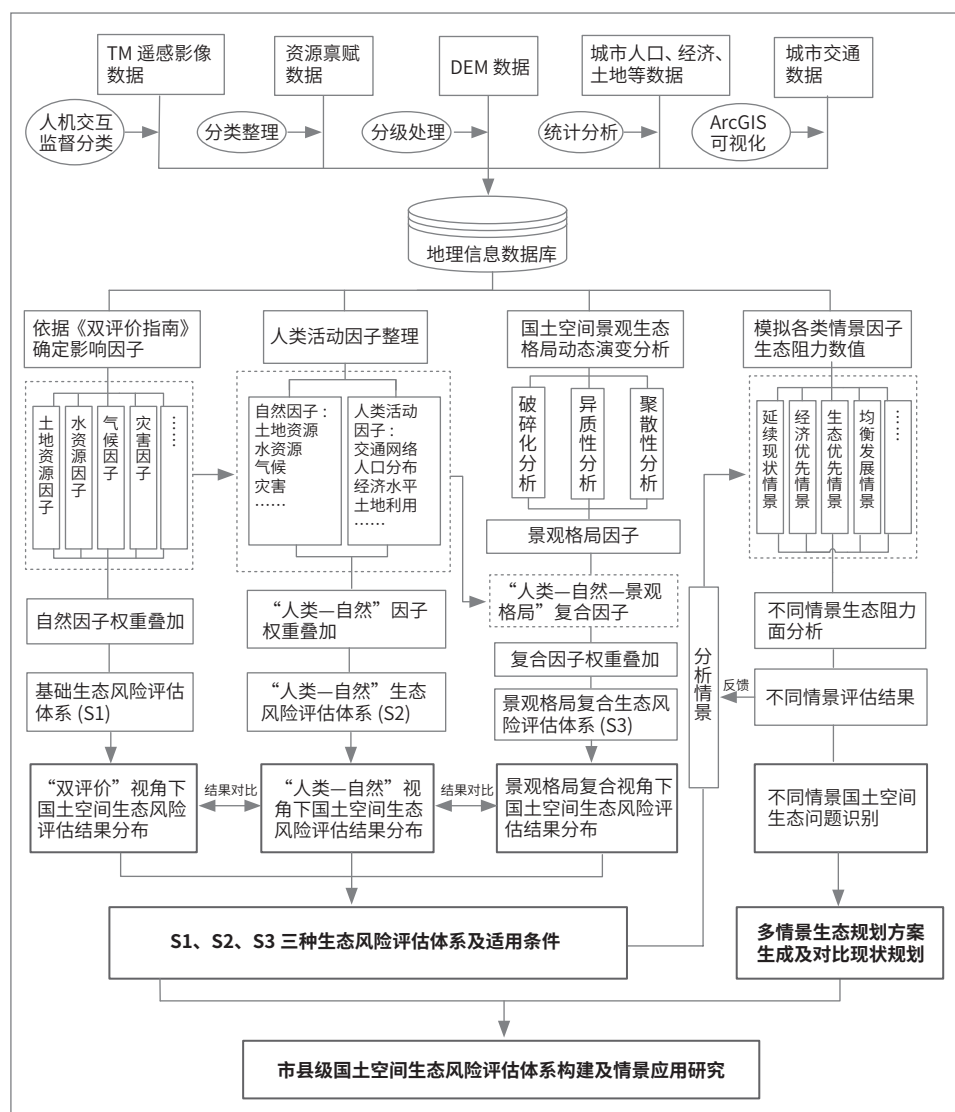


图4 耦合景观格局的市县国土空间生态风险评估基本框架图

3.3 耦合路径

在明确了国土空间生态风险与景观格局的耦合关系及优势之后，本次研究参考现阶段我国相关生态规划编制实践工作流程，提出耦合景观格局的国土空间生态风险评估具体路径，将耦合关系转化为风险应对的主要实践抓手(图3)，主要分为以下三个方面。

(1) 核心诉求方面。市县国土空间生态风险评估要求结合“双评价”的自然资源禀赋分析，针对国土开发中的不确定性和不稳定性，分析区域发展和城镇化趋势、人口与社会需求变化等因素，重点关注人类活动与自然的互馈作用过程。而景观格局方法主要用来分析自然、人为胁迫下的风险状况及其时空分异性，

两者的核心诉求较为统一，即在时空维度上实现人类与自然系统互馈状态的动态评估。

(2) 运作流程方面。市县国土空间生态风险评估的基本分析过程为生态问题识别—风险结果分析—提出生态保障方案。首先，通过计算研究区域的景观格局指数，对研究区域进行破碎化分析、异质性分析、聚散性分析，同时结合其他空间分析方法，初步识别研究区域面临的主要生态问题。其次，将生态系统服务价值分析、农业保护区生产安全分析、城镇用地扩张演变分析等的分析结果，作为研究区域城镇、农业及生态空间风险过程的部分表征。最后，依据风险分区结果，制定生态源地、生态廊道、

生态节点的生态保障方案。

(3) 情景分析方面。首先，依据研究区域现实发展状况，设想若干发展前景，如延续现状情景、经济优先情景、生态优先情景和均衡发展情景等。其次，在不同发展情景下，针对上述情景的生态风险问题识别分析结果，形成对应的生态规划方案。最后，与现状规划方案进行对比分析，提出改进建议，同时检验不同情景下不同因子对风险分区的影响程度，反向验证评估体系因子选取的合理性与针对性，并进一步反馈与修正生态评估体系。

4 基于景观格局耦合关系的生态风险评估方法优化

4.1 总体框架构建

综上所述，现阶段传承省级国土空间生态风险评估方法的市县级国土空间生态风险评估体系面临诸多困境，如评估体系适用性低、动态评估关注不足、缺乏多情景对比分析、难以体现综合性等。借助景观格局分析的诸多定量表征手段，如生态阻力分析、土地利用/覆盖变化的生态效应分析、景观非线性动态分析等，可以帮助市县级国土空间生态风险评估在较大程度上解决上述问题，同时还可以作为市县级国土空间生态风险评估区别于省级国土空间生态风险评估的重要工具。为此，本次研究构建了耦合景观格局的市县国土空间生态风险评估基本框架(图4)，主要包括五部分内容。

(1) 基础数据整合。基础数据源整合了TM遥感影像、资源禀赋、DEM等自然资源数据，以及城市人口、经济、土地利用(基本农田)、交通等人类活动数据，通过定量化、标准化、可视化处理，集成研究区域地理信息数据库。

(2) 影响因子选取。本次研究前期的主要任务是确定各类影响因子，尝试构建不同的生态风险评估体系。生态风险评估体系的影响因子主要来源于自然因

表 2 市县级国土空间生态风险评估拟增补的部分人类活动因子与景观格局因子

功能类别	人类活动因子					景观格局因子	
	人口	经济	交通	建设用地	农业用地	景观类型级别	景观总体特征级别
生态保护	人均碳排放量	生态经济测算量	交通占用生态用地面积	生态用地面积	郊野公园、湿地公园数量等	斑块类型面积 (CA)	斑块密度 (PD)
农业生产	从事农业生产人口	农业、生态经济产值比	城郊交通线数量、乡村交通线数量	乡村定居点数量	基本农田、山地、林地、草地、水体面积	斑块类型所占景观面积的比例 (PLAND)	最大斑块指数 (LPI)
城镇建设	城市边缘区人口密度	GDP 数值与碳排放、碳足迹的比值	建成区交通线里程、密度	各类型城市建设用地 (A、B、R、G、M、S、W、U) 的生态效应测算量	—	斑块个数 (NP)	边缘密度 (ED)
						斑块密度 (PD)	景观形状指数 (LSI)
						平均斑块面积 (AREA_MN)	平均斑块分维数 (FRAC_MN)
						最大斑块指数 (LPI)	蔓延度指数 (CONTAG)
						平均斑块分维数 (FRAC_MN)	散布与并列指数 (IJI)
						聚合度指数 (AI)	连通度指数 (CONNECT)
						散布与并列指数 (IJI)	香农多样性指数 (SHDI)
						斑块结合度指数 (COHESION)	香农均匀度指数 (SHEI)

注：上述因子仅为普适性因子示例，实际工作中可选取部分因子或不限于上述因子。

子、人类活动因子和景观格局因子三类。自然因子主要包括《双评价指南》中的评价因子和其他地方特色自然资源因子；人类活动因子主要包括研究区域内人类自身的生产、生活因子，如土地利用因子、交通网络因子、人口分布因子等；景观格局因子主要包括景观斑块类型、景观格局指数等因子。在各个体系确定指标因子的过程中，还需要参考国内外既有文献研究进展、城市灾害风险应对经验等因子，同时需要注重影响因子选取的科学性、针对性、可操作性及数据的可获取性。

(3) 评估体系构建。根据《双评价指南》中的评价因子和研究区域实际情况，构建基础生态风险评估体系（以下简称“S1”）。在 S1 的基础上引入人类活动因子，构建“人类—自然”生态风险评估体系（以下简称“S2”）。在 S2 的基础上引入景观格局因子，构建景观格局复合生态风险评估体系（以下简称“S3”）。最终，实现层层递进、体系逐步完善的三种评估体系构建。

(4) 适用性分析。首先，通过叠加复合因子，获取评估结果，并尝试引入不同人文地理环境的研究区域，如平原城市、丘陵城市、山地城市等地理环境差异较大的城市，或是高密度人居城市、中密度人居城市、低密度人居城市等人文环境差异较大的城市。其次，使用评

估体系逐一分析对比，进一步探索不同类型国土空间的结果差异，同时加入多个时间断面，分析生态风险演变历程，确定生态风险评估体系对不同类型国土空间评估的适用性。

(5) 情景分析及应用。首先，根据研究区域现状，明确发展诉求并设置各类发展情景，并对不同发展情景的显性阻力面和隐性阻力面进行分析。其中，显性阻力面主要考虑土地使用类型固有的生态阻力，隐形阻力面包含了不同景观类型之间相互影响的生态阻力。其次，从生态连通性、破碎程度、完整性等方面，判断研究区域可能存在的问题及可能面临的生态风险。最后，生成生源地（面）、廊道（线）、节点（点）分布合理的生态保障方案和对比现状的生态规划方案。此外，在完成不同发展情景下评估体系应用分析的主要工作之后，对不同情景下生态评估结果所呈现的风险分区面积矩阵差异进行相关性分析，检验不同情景下不同因子对风险分区的影响程度，反向验证评估体系因子选取的合理性与针对性，并进一步反馈与修正生态评估体系，提升情景分析的科学性以及生态规划方案的针对性与适用性。

4.2 指标体系调整

市县级国土空间中的城市地区已经成为我国社会经济活动的主要载体，人

口和产业高度集聚。其生态风险不仅取决于自然条件和城镇空间特征，还与人类生产、生活的强度与类型等直接相关。源自省级国土空间生态风险评估的基础评估体系，其设定的评价指标主要是自然因子，对于自然资源丰富且人类开发活动较弱的城市地区可以适用，但对于高强度开发、人类活动活跃且与自然环境相互作用频繁的城市地区，就难以评估出人类活动引发的生态风险，从而造成评估结果偏差。因此，耦合景观格局的国土空间生态风险评估指标体系对因子进行补充，结合数据的可获取性，在基础体系分析因子的基础上，选取并增补表征人类活动因子、景观格局因子的代表性因子作为关键性评价因子（表 2）。

增补因子的选取主要考虑科学性、可操作性、适用性三方面因素：①科学性。将人类活动因子与景观格局因子纳入指标体系，在一定程度上弥补了生态风险评估中“人类—自然”互馈作用的缺失，同时有利于在评估体系中明确自然环境、人为胁迫、景观脆弱性的互动关系，对分析风险成因、评估生态损失、情景决策博弈具备重要指示意义。②可操作性。本次研究增补的所有评价因子的数据获取难度较低，同时各个指标的分析计算过程均有较为成熟的数学模型或模拟软件支持，且有多种精度选择，可满足不同研究需求，具备良好的可操

作性。③适用性。耦合景观格局的生态风险评估体系可依据不同研究区域,比较评估前后的结果差异,分析评估体系的适用条件,同时各个指标在不同情景目标导向下可以灵活调整,提升了对不同自然环境、发展诉求的研究区域的适用性。

5 结语

当前,随着市县级国土空间规划编制工作的深入推进,既有生态评估技术体系的一些不足也暴露出来。对应省级国土空间的生态风险评估方法并不完全适用于市县层级的国土空间,尤其是对于“人类—自然”互馈过程与评价因子识别精度的考量,不同空间层次的生态风险评估存在明显差异。基于景观格局视角构建市县级国土空间生态风险评估体系可以成为支撑国土空间开发风险研判的有效手段。与省级国土空间生态风险评估方法相比,耦合景观格局的市县级国土空间生态风险评估体系更加强调生态作用过程及动态性,较为关注生态系统在提供生态价值的同时所遭受的整体性损失,侧重实现对自然、人类等多源胁迫风险的综合表征及空间可视化。在基于景观格局的生态风险评估中,将评估的动态性与国土空间生态风险管理的阶段时效性相联系,并持续改进及相互反馈,可以形成促进评估过程更加科学的良性循环。

本次研究尝试构建耦合景观格局的市县级国土空间生态风险评估体系,以有效支撑国土空间主体功能区、生态功能区、生态保护红线划定等工作的实施。未来,市县级国土空间生态风险评估应重视风险阈值、不确定分析等内容,以进一步加强生态风险评估在国土空间规划中的生态修复作用。目前,基于景观格局指数评价方法仍然无法完全实现对生态风险阈值的判定,因地制宜地设置景观格局生态过程中具有不利影响的阈值,是当前市县级国土空间生态风险评

估的关键难点。同时,在生态风险评估的实际操作中,不可避免地会受到评价者主观经验判断、因子选取不合理、部分数据缺失等不确定性因素的影响,如何定量表征不确定性因素造成的结果误差仍需进一步探索。

[参考文献]

- [1] 杨保军,陈鹏,董珂,等.生态文明背景下的国土空间规划体系构建[J].城市规划学刊,2019(4):16-23.
- [2] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015(6):26-36.
- [3] 赵万民,冯矛,李云燕,等.生态文明视角下山地城市绿色基础设施规划研究——以重庆市九龙坡区新城为例[J].城市规划,2021(7):91-103.
- [4] 钱爱梅.市县级国土空间总体规划的实践探索——以浦东新区为例[J].城市规划学刊,2020(2):64-69.
- [5] 张会,李铨,程炯,等.基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J].地理科学进展,2019(2):175-190.
- [6] 方佳毅,史培军.全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J].地理科学进展,2019(5):3-14.
- [7] Suter G W. Ecological Risk Assessment in National Research Council in the Federal Government: Managing the Process[M]. Washington D C: National Academy Press, 1993.
- [8] 阳文锐,王如松,黄锦楼,等.生态风险评价及研究进展[J].应用生态学报,2007(8):1869-1876.
- [9] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015(4):664-677.
- [10] Zhao Z, Zhang T. Integration of Ecosystem Services into Ecological Risk Assessment for Implementation in Ecosystem based River Management: A Case Study of the Yellow River, China[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2013(1): 80-97.
- [11] 任景明.区域开发生态风险评价理论与方法研究[M].北京:中国环境出版社,2013.
- [12] Suter G W, Norton S B, Banthouse L W. The Evolution of Frameworks for Ecological Risk Assessment from the

Red Book Ancestor[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2003(5): 1349-1360.

- [13] 自然资源部.资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)[S].2020.
- [14] 自然资源部.省级国土空间规划编制指南(试行)[S].2020.
- [15] Forman R T T. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [16] 肖笃宁,李秀珍.当代景观生态学的发展和展望[J].地理科学,1997(4):69-77.
- [17] 欧定华.景观生态安全格局规划理论与方法与应用[M].北京:科学出版社,2019.
- [18] 曾辉.景观生态学[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [19] 樊杰.“人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石[J].地理学报,2018(4):597-607.
- [20] 张京祥,林怀策,陈浩.中国空间规划体系40年的变迁与改革[J].经济地理,2018(7):1-6.
- [21] 贾艳艳,唐晓岚,刘振威,等.长江沿岸芜湖区段景观生态风险时空演变分析[J].中南林业科技大学学报,2019(11):78-87.
- [22] 赵越,罗志军,李雅婷,等.赣江上游流域景观生态风险的时空分异——从生产—生活—生态空间的视角[J].生态学报,2018(13):4676-4686.
- [23] 吕乐婷,张杰,孙才志,等.基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J].生态学报,2017(16):5952-5960.
- [24] 石玉琼,王宁练,李团胜,等.榆林市景观生态风险及其时空分异[J].干旱区研究,2019(2):229-239.
- [25] 唐秀美,陈百明,路庆斌,等.城市边缘区土地利用景观格局变化分析[J].中国人口资源与环境,2010(8):159-163.

[收稿日期]2022-07-16;

[修回日期]2022-09-13