

# 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK

曹祺文<sup>1</sup>, 张曦文<sup>2,3</sup>, 马洪坤<sup>2</sup>, 吴健生<sup>2,3</sup>

(1. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 2. 北京大学城市规划与设计学院 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 3. 北京大学城市与环境学院 地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 在快速城市化过程中, 高强度人为活动对生态系统结构和服务功能造成极大扰动, 进而产生一定生态风险。近年来, 景观生态风险评价的兴起为景观格局—生态过程互馈研究提供了新的视角, 可有效支持生态系统管理。本文在探讨生态风险、区域生态风险与景观生态风险联系与区别的基础上, 重点评述了景观指数法和风险“源—汇”法等主要景观生态风险评价方法, 归纳了基于生态系统服务的景观生态风险研究进展。进一步地, 以生态系统服务退化为损失表征, 从地形、人为胁迫、生态恢复力、景观脆弱性等维度构建概率表征指标体系, 提出了基于生态系统服务的景观生态风险评价 (ESRISK) 框架, 以期景观生态风险研究提供一个更为完善、综合的评价方法参考, 并辅助支持风险减缓策略制定和有限资源的高效分配。最后, 从生态系统服务权衡与协同关系、评价结果不确定性分析、景观生态风险与景观格局多尺度关联关系、脆弱性研究深化等方面做出展望。

**关键词:** 景观生态风险; 生态系统服务; 景观格局; 生态风险概率; ESRISK; 研究进展

DOI: 10.11821/dlxb201805005

生态风险评价是一种能有效支持生态系统管理的工具<sup>[1]</sup>, 已成为生态学、地理学等学科热点研究问题之一, 并出现由传统生态风险评价、到区域生态风险评价、再到景观生态风险评价的发展趋向。景观作为多种生态系统的异质性镶嵌体, 是人为活动、生态过程等多要素综合作用的结果。景观生态风险以区域景观为评价对象, 为景观生态学所关注的空间异质性及景观格局—生态过程互馈研究提供了新的视角, 其基本评价范式是损失与概率的综合表征<sup>[2]</sup>, 既考虑风险胁迫因子对景观系统所造成的可能损失, 又度量了风险发生的可能性大小。在人类活动与多种自然要素和过程相互联系、相互作用的人地耦合系统中<sup>[3]</sup>, 不同类型景观是相应生态功能的主要载体, 合理的景观结构、稳定的生态过程及丰富的生态服务功能与区域可持续发展密切相关。在快速城市化和土地利用/覆被变化过程中, 巨大的开发建设需求极大改变了生态系统结构和服务功能, 复杂的自然过程和人为活动产生了一定生态风险, 威胁着人地关系的和谐。因此, 如何衡量景观格局演变的生态风险效应, 是迫切需要回答的问题。在实践上, 研究成果可服务于区域生态可持续管理实践, 对面向风险减缓的景观调控阈值判定、适应性风险减缓策略制定及有限资源的高效分配具有重要实践意义和应用价值。

收稿日期: 2017-06-28; 修订日期: 2018-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330747) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41330747]

作者简介: 曹祺文(1992-), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要研究方向为城市与区域规划、土地科学。

E-mail: cqw17@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 吴健生(1965-), 男, 湖南新化人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为景观生态与土地利用、遥感与GIS。

E-mail: wuj@pkusz.edu.cn

本文在探讨生态风险、区域生态风险与景观生态风险联系与区别的基础上,重点评述了常用景观生态风险评价方法,并针对当前存在的评价终点不明晰等问题,引入生态系统服务,构建了基于生态系统服务的景观生态风险评价(Ecosystem Service Based Landscape Ecological Risk Assessment, ESRISK)框架和指标体系,以期完善现有评价方法,从而更为综合、准确地衡量生态风险发生的潜在可能及其对景观功能的不利影响。

## 1 耦合格局与过程的评价视角:景观生态风险

生态风险通常界定为由外界自然变化或人类活动等压力源对生态系统结构、功能,甚至生态系统稳定性和可持续性所产生负面影响的可能及其损失<sup>[4-6]</sup>,这种负面影响体现在生态系统健康、生产力、遗传结构、经济和美学价值等方面<sup>[7]</sup>。此后,随着研究尺度由局地向区域的演进,生态风险研究形成一个重要分支即区域生态风险,主要从区域尺度上评价环境污染、人为活动或自然灾害对多重风险受体造成不利影响的概率和危害程度<sup>[8-9]</sup>,具有多胁迫因子、历史事件、空间结构、多风险受体、多评价终点、空间异质性的特点<sup>[10-12]</sup>,强调自然、生态、社会、经济等层面的区域性和综合性。近年来,景观生态学的蓬勃发展则使得景观生态风险逐渐得到广泛关注。景观生态风险是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,通常基于景观要素镶嵌、景观格局演变和景观生态过程等分析其对内在风险源和外部干扰的响应,对特定区域景观组分、结构、功能和过程所受人类活动或自然灾害的影响进行判定或预测<sup>[2]</sup>。在联系上,上述三者均属于生态风险范畴,无论何种类型的风险评价,均是对人为或自然胁迫压力下生态系统所受负面影响可能性和危害程度的判定或预测。

哈佛大学景观生态学家Forman曾指出,景观是“空间上镶嵌出现和紧密联系的生态系统组合而成的中尺度异质地表单元”<sup>[13]</sup>。在地理学和景观生态学中,一般将景观视为兼具经济、生态、美学价值<sup>[14]</sup>的地域综合体,强调区域性、异质性、尺度性和功能性<sup>[15]</sup>。景观为社会经济发展提供了资源和开发利用对象,人类活动多在景观层次上开展,这使得其成为研究人类活动及其生态环境效应的一个适宜的空间尺度<sup>[16-17]</sup>。因此,同传统和区域生态风险相比,以景观为研究对象的景观生态风险契合了景观生态学中格局与过程耦合关联视角,更强调景观格局对特定生态功能或过程的影响,关注景观在提供生态系统服务和生态功能方面的整体性损失,其评价目标指向景观脆弱性、恢复力、稳定性等层面,研究结果侧重实现对多源风险的综合表征及空间可视化<sup>[2, 18]</sup>,有利于为可持续的景观规划、设计和生态管理提供支持。

具体看来,在理论上,景观生态风险主要以景观生态学为依托,刻画景观格局与生态过程之间的联系,更加注重风险的时空分异性和尺度效应<sup>[2]</sup>,衡量景观空间格局的综合风险特征。风险受体上,以特定区域和城市一种或多种景观为风险综合体<sup>[19]</sup>,反映景观格局及其演变对生态过程、生态健康的影响。评价方法上,目前多以景观格局分析为基础,在“损失与概率累乘”的范式下借助景观干扰度与景观脆弱度构建景观生态风险综合指数<sup>[20-21]</sup>,以刻画风险时空异质性。此外,也有部分研究采用基于“源—汇”景观理论<sup>[22]</sup>的风险“源—汇”法。

## 2 景观生态风险评价方法

### 2.1 景观指数法

应用最为广泛的景观指数法以土地利用/土地覆被为基础,关注特定景观组合或空间

格局及其变化的生态风险综合效应。其理论基础为格局与过程关联理论,可简单表述为“格局影响过程,过程改变格局”<sup>[23]</sup>,认为景观生态风险是景观格局与生态过程相互作用后的综合性结果。该种评价方法在一定程度上打破了传统生态风险评价“风险源识别—受体分析—暴露与危害评价”的一般模式<sup>[2]</sup>,是对景观镶嵌体中多重风险源生态影响及其累积效应的综合评估<sup>[24]</sup>。方法论上,其评价范式为:损失与概率累乘,即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综合表征。

具体途径上,首先通常对研究区进行风险小区划分,目前以基于等间距采样的格网最为常见<sup>[20-21, 25-26]</sup>,此外也可根据研究需要基于流域或行政区划分<sup>[2, 24]</sup>。其中,基于格网的划分有利于风险空间异质性的表达,格网大小调整灵活,但尺度效应的存在使得结果不确定性增大;基于流域的划分可最大限度地保证单元内自然要素与过程的相似性,不同流域间内部要素条件差异则相对较大,但对风险管理政策制定的指向性不如行政区明显;而基于行政区的划分可辅助决策者依据不同行政区所面临的风险特点,制定适应性风险管理政策,并促进资源优化配置,但容易割裂景观分布的完整性,且难以刻画行政区内部风险的空间差异性。其次,定量测度不同景观类型风险损失状况,常以景观干扰度和景观脆弱度的乘积来构建景观损失度指数。其中,景观干扰度反映不同景观代表的生态系统所受风险胁迫的程度,一般由景观破碎度指数、景观分离度指数、景观优势度指数或其他景观格局指数加权求和得到<sup>[27-28]</sup>。景观脆弱度反映不同景观面临风险时易受损失和破坏的倾向性,其量化常通过对不同景观类型进行专家打分或排序,再作归一化处理。再次,对风险小区内景观生态风险概率进行估计,目前多以各类景观面积所占比例为概率或权重表征。进一步地,将各类景观损失度与风险概率相乘并加权求和,建立景观生态风险指数。最后,依托地统计学相关理论与方法,将风险小区内风险指数作为区域化变量,分析其空间变异特征,并基于Kriging等插值方法实现景观生态风险结果空间可视化。

总体上,基于景观指数的评价方法较适合于区域、流域、城市等多个尺度的景观生态风险评价,在无需依赖大量实测数据的条件下实现对多源风险的综合表征和时空分异表达。然而,仍存在诸多不足之处:①对景观生态风险的刻画以静态景观格局指数计算为主,对相关生态过程及其动态关注相对不足,限制了景观格局与生态过程的耦合程度。未来需进一步明晰其景观生态过程内涵,厘清景观格局、生态过程、生态风险之间的逻辑关联。②评价终点指向性不明,降低了风险评估结果对区域发展决策者的辅助支持作用,将生态系统服务这一链接人类福祉和生态系统的桥梁作为评价终点纳入风险评估体系中,是景观生态风险研究发展趋向所在。③仅以各类型景观面积所占比例为权重,使得风险概率的表征方式缺乏生态内涵,一定程度上导致风险评估的准确性有所降低。

## 2.2 风险“源—汇”法

风险“源—汇”法的理论基础是“源—汇”景观理论<sup>[22]</sup>,促进或阻碍生态过程发展的景观类型分别被称为“源”景观和“汇”景观。在识别景观的风险“源—汇”属性时,需结合特定的生态过程或灾害风险,如建设用地通常是高温热浪风险的“源”景观,林地、水体等则常作为高温热浪风险的“汇”景观<sup>[29]</sup>。对于不同生态过程而言,景观类型的“源—汇”属性则可能相应发生变化。此外,即便是同一类型“源”景观或“汇”景观,其对生态过程或灾害风险的贡献也未必相同。如王金亮等根据距长江干流的远近,将三峡库区耕地这一面源污染的“源”景观分为4个等级<sup>[30]</sup>。Li等根据影响热环境的内外在因素,识别了高温热浪风险的强“源”、弱“源”以及强“汇”、弱“汇”景观<sup>[29]</sup>。

目前,风险“源—汇”法在非点源污染<sup>[30-31]</sup>、水土流失<sup>[32-33]</sup>、热岛效应<sup>[29]</sup>等具体生态风险评价中应用较多。在应用时常与其他方法相结合,如不受空间尺度限制的景观空间

负荷对比指数<sup>[34-35]</sup>、表征物种或污染物迁移阻力的最小累积阻力面<sup>[30]</sup>等。总体上,风险“源—汇”法较适合于评价一定区域内具有明确胁迫因子的特定生态风险。但也存在一定不足:①相比基于景观指数的评价方法,其对景观生态风险的综合特性体现相对较弱,难以表征多源胁迫下的风险状况及其时空分异性。②评价结果容易受到不同景观类型划分标准的影响,如若将同属于不透水面景观的工业用地和商业用地加以区分,则其对大气污染风险的贡献并不相同。③对土地利用、生态规划的实践指向性相对较弱。这是因为该方法在传统景观分类基础上,仅区分出特定生态过程的“源”景观和“汇”景观两种类型,而并不指向用途或功能明确的景观斑块,因而对土地利用管理与规划实践中的指示作用受到限制。

此外,也有部分研究尝试采用其他方式评估景观生态风险。如刘焱序等<sup>[18]</sup>依托生态适应性循环理论,从“潜力—连通度—恢复力”三维准则构建指标体系,从时空一体化的地域空间范畴评估了城市景观生态风险。李扬帆等<sup>[36]</sup>借鉴区域生态风险中的相对生态风险模型,考虑生态风险压力、生态风险受体敏感性及生态风险管控措施,提出了景观生态风险空间预警模型。

### 3 基于生态系统服务的景观生态风险研究进展

#### 3.1 生态系统服务内涵与分类

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中所获得的全部收益<sup>[37]</sup>,是生态系统所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用<sup>[38-39]</sup>。生态系统为人类生存提供了大量产品和服务<sup>[40]</sup>,社会总是依赖生态系统服务来提升人类福祉,故生态系统服务已成为连接人类福祉和生态系统的桥梁<sup>[41]</sup>。

Costanza等<sup>[37]</sup>从价值评估角度出发,依据特定生态系统功能,将全球生态系统服务分为包括气候调节、气体调节、干扰调节、水调节、水供给、控制侵蚀和保持沉积物、废物处理、食物生产、原材料、休闲和文化等在内的17种类型。de Groot等<sup>[42]</sup>将其进一步细化为23个子类,并归类于调节功能、生境支持功能、供给服务及信息功能等类型。但目前应用最为广泛的则为MA<sup>[43]</sup>提出的供给、调节、支持和文化服务四分类法,并指出生态系统服务与人类福祉间相互依存的动态关系。

#### 3.2 生态系统服务在景观生态风险中的应用价值

**3.2.1 明确风险评价终点和保护对象,有效关联景观格局与生态过程** 多数生态风险评估缺乏具体的保护目标<sup>[44]</sup>,如欧洲立法部门在有关化学物质使用的环境保护目标中所提出的“避免对环境或物种的负面影响”等较为模糊的表述<sup>[45]</sup>。多数以景观格局指数计算为主的景观生态风险研究也存在评价终点不明晰等问题,限制了风险评价的生态指示意义。当前,对自然景观所提供的生态系统服务的保护意识正逐渐加强,但将生态系统服务作为评价终点纳入生态风险评价的实践相对较少。USEPA<sup>[46]</sup>将生态风险评价终点定义为需要明确保护的环境价值,并将其操作化为实体和属性两个方面。生态系统服务较好地满足了作为风险评价终点的条件,一方面生态系统服务作为人类生存发展的基础<sup>[47]</sup>,提供了诸多产品和服务,具有极高的保护价值;另一方面,生态系统服务的实体对应特定生态系统的结构和生态过程,而属性则可理解为单元实体所对应的功能和服务<sup>[48]</sup>。此外,将生态系统服务纳入景观生态风险,为景观生态学所关注的格局与过程相互关联研究提供了途径。生态系统服务本身就是景观格局与生态过程互馈作用的产物,景观的结构破坏和功能无序会改变相应生态过程,进而表现为生态系统服务增加或减少<sup>[49]</sup>,生态

系统服务退化表明存在一定生态风险。将生态系统服务退化水平作为风险损失的度量,可为分析景观格局和生态过程动态变化的影响和效应提供手段。

**3.2.2 链接人类福祉和生态系统,辅助风险管理和决策制定** 生态系统为人类社会提供粮食、水资源、干净空气等产品,并提供水质调节、气温调节、侵蚀控制等服务,生态系统服务成为人类生存和发展的基础<sup>[47]</sup>,改善了人类福祉。与此同时,人类对生态系统服务的消费适度与否、生态保育力度大小也会对生态系统服务供给产生影响,进而反馈于生态系统。因此,生态系统服务为景观生态风险评价中生态系统和人类福祉的关联与沟通搭建了桥梁,有助于推动人地系统耦合关系研究。在风险管理方面,基于生态系统服务的景观生态风险评价可提高对环境决策制定的实践指导作用。无论以货币化形式还是物质量等其他形式,对不同发展政策下生态系统服务变化的预估有利于辅助决策者明确不同政策产生的可能影响,进而评判其优劣<sup>[50]</sup>。在此基础上,决策者可有效制定区域风险适应性管理措施,提高决策科学性,促进有限资源的合理分配。

### 3.3 基于生态系统服务的景观生态风险表征与评价方法

如前所述,生态系统服务与人类惠益密切相关,因而在生态风险评价中极具应用价值。一方面,从人地系统耦合关系出发,以社会—生态系统为研究对象的风险评价,常通过对压力、当前状态、未来影响的识别,将生态系统服务纳入 DPSIR 评价框架。如 Pablo 等<sup>[51]</sup>将海滩视为社会—生态系统,构建了面向多重灾害的 DPSIR 风险评价框架,分析了灾害对生态系统服务的影响。Cook 等<sup>[52]</sup>结合专家评价和影响矩阵,研究了直接和间接压力对海洋生态系统及其服务的影响,为不同管理方案优劣评判提供了便利。总体上,该方法虽有利于分析自然、社会、经济等子系统间的关联关系和互馈作用,但作为一种基于生态系统整体性的评价,其对生态系统服务的量化多以单一价值化手段或其他替代指标为基础,对风险时空分异性的表达能力有限。

另一方面,当前对生态系统服务的测度与分析越来越多立足于空间格局视角,也逐渐关注异质性景观之间生态系统服务的空间流动<sup>[53-54]</sup>,且生态系统服务与多功能景观<sup>[55]</sup>等前沿概念高度相关。因此,基于生态系统服务的景观生态风险研究具备一定景观生态学理论支撑。该类评价通常涉及如下6个过程:① 关键生态系统服务选取;② 生态系统服务时空动态制图;③ 关键驱动力或风险源识别;④ 风险结果表征;⑤ 风险与驱动力关系分析;⑥ 风险管理与交流。在方法论上,需综合运用相关生态评估模型,注重对关键生态系统服务的空间模拟,故有助于清晰地掌握生态风险时空分布格局,有效关联景观格局与生态过程,便于分析压力源下关键保护对象的属性变化<sup>[48]</sup>。

但目前基于生态系统服务的景观生态风险评价实践尚不多见,其风险表征形式不尽相同。总体上,可分为基于单一生态系统服务退化状况或多重生态系统服务综合损失程度等两种形式。前者多用于评估灾害、胁迫或土地利用/覆被变化对特定生态系统服务的影响。如 Woli 等<sup>[56]</sup>研究了美国东南部农业干旱所造成的棉花、玉米、花生、大豆等作物产量损失,其中作物产量是农田系统供给服务的表征,而产量损失则是对风险的量化。后者则适于反映多源压力下综合生态风险特征。如 Xu 等<sup>[57]</sup>选取太湖流域陆域生态系统水质调节、水量调节、固碳和粮食生产等关键生态系统服务,综合集成 DNDC、SWAP、Biome-BGC 和 SWAP 等生态过程模型评估了该区生态系统服务退化风险,并分析了土地利用变化这一关键驱动因子的影响。Alla 等<sup>[58]</sup>分别识别了压力源及与食物供给、娱乐活动等相关的7种生态系统服务的空间分布,并对二者空间格局进行关联比较,分析了美国五大湖区域多重压力源的累积风险作用。

### 3.4 存在问题与展望

概率表征方法相对薄弱,综合评价框架亟待完善。当前,基于生态系统服务的景观

生态风险研究多为回顾性评价，其风险表征范式以关键生态系统服务损失为主。然而，景观生态风险注重从损失和概率两方面对风险进行综合表征，其中概率不仅仅是胁迫源发生或出现的可能性，还需考虑风险受体对胁迫源所具备的消纳和抵抗能力。如生态恢复力是景观在干扰胁迫下仍可保持原有结构、功能甚至进行可持续更新的能力，强调以发展的视角关注生态系统组织与更新。但现有研究中对景观生态风险概率的表征方法研究相对薄弱，未来需从多元维度选取更多空间化指标，建立更为完善的综合景观生态风险评价框架。

## 4 基于生态系统服务的评价框架:ESRISK

### 4.1 概念框架及内涵

如前所述，多数景观生态风险所遵循的评价范式为损失与概率之积，所谓损失是指不同景观类型所代表的生态系统在外界胁迫下的自然属性/生态损失，概率则是风险发生的可能性大小。但传统景观生态评价方法仍存在诸多不足之处，如景观指数法对特定生态过程及其动态关注不足、评价终点指向性不明、概率表征方式过于简化等。风险“源—汇”法对景观生态风险的综合特性体现较为薄弱，难以表征多源胁迫下的风险状况及其时空分异性。

生态系统服务作为景观格局与生态过程互馈作用的产物，将其引入风险评价中可在较大程度解决上述问题，故本文建立了基于生态系统服务的景观生态风险评价框架：ESRISK（图1）。该框架认为，作为地域综合体的景观在自然胁迫和人为胁迫双重作用下，其内部生态系统将遭受某种程度损失，并将之定义为关键生态系统服务在一定时期内的退化水平，包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务。进一步地，考虑景观地形敏感性、外在胁迫等风险胁迫发生因子及生态恢复力、景观脆弱性等风险过程作用因子的综合作用，以此作为景观生态风险概率表征。最终，基于损失与概率累乘的评价范式，刻画景观生态风险空间格局。ESRISK框架的科学内涵可从3方面进行解构：

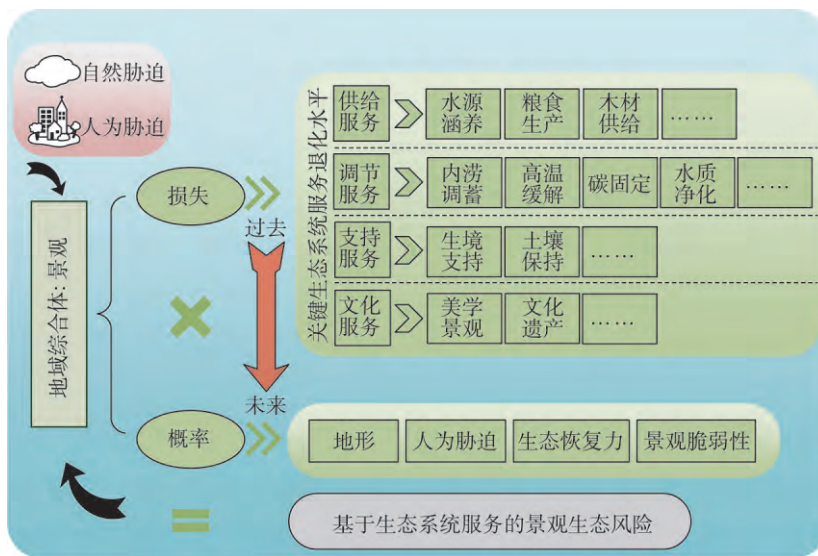


图1 ESRISK 框架

Fig. 1 ESRISK framework

(1) 明确评价终点为生态系统服务, 搭建起人类福祉与生态系统联系的桥梁。将关键生态系统服务退化水平作为损失的表征方式, 不再是景观干扰度、景观脆弱度等生态涵义相对模糊的景观指数简单叠加, 而是明确为与人类福祉休戚相关的物质性生态产品和非物质性生态收益。因而便于辅助规划与管理者明确城市在开发建设过程中的生态损失程度及其空间方位。

(2) 景观生态风险概率的生态内涵具体指向地形、人为胁迫、生态恢复力、景观脆弱性等多要素。ESRISK框架将风险概率分解为上述4个维度, 其中, 地形可作为景观对水土流失等灾害敏感性的反映; 人为胁迫, 通常是景观所面临的最大外在胁迫源, 开发建设活动会深刻改变景观格局与过程, 进而产生不同程度的生态风险; 生态恢复力, 是景观在风险发生时或发生后所表现出的适应能力和韧性, 这一概念更关注系统发展的持久性及其功能的延续性<sup>[59]</sup>。根据适应性循环理论<sup>[60]</sup>, 系统发展会历经“开发—保护—释放—更新”等4个阶段, 而强大的生态恢复力则是系统面临风险时发生变革, 开始另一循环阶段或进入另一稳态的重要推动力; 景观脆弱性, 是对景观格局和以景观类型为代表的生态系统抵抗外部干扰能力和易损性的描述。

(3) 损失和概率两大维度, 内嵌为ESRISK框架中反映生态系统过去和未来状况的时间轴。损失侧重反映的是景观在面临自然与人为胁迫时, 过去和现在所发生的生态系统服务退化状况。在该框架中, 损失并未采用潜在最大生态系统服务退化水平, 因为这通常是一种极端的、非现实情景, 而采用真实发生的退化状况作为表征手段则在一定程度上反映了景观系统自身调节对风险的减缓作用。概率则更强调景观系统未来一定时期遭受风险的可能性大小, 较高的生态系统敏感性和脆弱性、较强的外在胁迫以及较低的恢复力会导致景观在未来演变过程中面临较高的生态风险概率。

## 4.2 指标体系

总体上, 按照生态系统服务供给、调节、支持、文化服务的4分法, 可大致将损失定义为诸如供给服务中水源涵养量、粮食生产量、木材供给量等的下降, 调节服务中内涝调蓄、高温缓解、碳存储量、水质净化能力等的降低, 支持服务中生境支持、土壤保持功能等的衰退, 以及文化服务中美学景观质量和文化遗产价值下降等。

对于风险概率而言(表1): ① 地形可以坡度等指标进行量化, 从而表征区域景观对滑坡、泥石流等地质灾害的敏感性。② 人为胁迫, 可考虑以夜间灯光强度变化、不透水面比例变化来量化, 前者反映社会经济发展状况、高强度人为活动增加量所引起的风险概率大小, 后者反映城市土地开发建设、地表硬化程度对生态系统的胁迫。③ 生态恢复力, 该维度可考虑以净初级生产力、植被覆盖度变化来量化, 前者反映生态系统生物量积累, 可表征陆地生态系统的生产能力和质量状况, Moore等<sup>[61]</sup>认为生态系统生产力越高, 越富有恢复活力, 越能更快从扰动中恢复。后者反映绿色植物空间分布动态变化特征, 是生态系统恢复力的基本构成要素。④ 景观脆弱性, 可考虑以景观连通重要性和景观易损度来量化, 前者刻画生态用地连通度所代表的稳定性, 及建设用地等外在胁迫源因集中连片而带来的干扰大小; 后者则刻画生态系统面临风险时的易受损失程度。

## 4.3 框架实施途径

在应用ESRISK框架评价景观生态风险时, 应首先确定合适的时空尺度。如根据不同城市化特征进行时间阶段划分, 根据流域、行政边界、地理分区等要素划定评价单元与空间范围。其次, 根据气候、土地等要素及对生态系统服务需求的差别, 确定研究区的关键生态系统服务类型, 并量化其在研究时段内所面临的生态损失。对生态系统服务的空间化可根据需要结合相关模拟方法或模型, 其中InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) <sup>[69]</sup>和ARIES (ARtificial Intelligence for Ecosystem

表1 景观生态风险概率评价指标体系

Tab. 1 Assessment index system of probability for landscape ecological risk

维度层	指标层	内涵	数据获取或计算方法	性质
地形	坡度	生态系统对水土流失等灾害的敏感性	提取研究区 GDEM、SRTM 或其他高精度 DEM 数据( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> ), 在 ArcGIS 平台中利用 Slope 函数计算。	正向 <sup>1</sup>
人为胁迫	夜间灯光强度变化	社会经济发展状况、高强度人为活动增加量	提取研究区 DMSP-OLS 或 VIIRS 数据( <a href="https://www.ngdc.noaa.gov/">https://www.ngdc.noaa.gov/</a> )。其中, DMSP-OLS 数据需进行饱和校正 <sup>[62]</sup> 和年际校正 <sup>[63]</sup> 。	正向
	不透水面比例变化	城市土地开发建设、地表硬化对生态系统的胁迫	基于 Landsat 等影像, 利用线性光谱分离算法 <sup>[64]</sup> 进行亚像元分解, 以求取不透水面比例。	正向
生态恢复力	净初级生产力	生态系统生物量积累	CASA 模型 <sup>[65-67]</sup> 。	负向
	植被覆盖度变化	绿色植被空间分布动态变化	基于 Landsat 等影像, 利用线性光谱分离算法 <sup>[64]</sup> 进行亚像元分解, 以求取植被覆盖度。	负向
景观脆弱性	景观连通重要性	生态用地连通度所代表的稳定性	可以景观连通重要性指数 <i>dPC</i> <sup>[68]</sup> 为表征。生态用地 <i>dPC</i> 值越大, 景观脆弱性可能越低, 风险越小。	负向
	景观易损度	建设用地的胁迫源因集中连片而带来的干扰大小 生态系统面临风险时的易受损失程度	胁迫源 <i>dPC</i> 值越大, 干扰强度可能越大, 风险越大。 可参照景观生态风险评价相关文献中对不同类型景观脆弱度的赋值 <sup>[20, 27]</sup> 。	正向

注: ① 过于平缓的坡度因不利于排水, 存在一定内涝风险, 需在评价中加以考虑; ② 由于各指标单位、量级等均不相同, 故需按指标正负属性进行归一化处理。

Services)<sup>[70]</sup>集成了众多生态模型和算法, 在生态系统服务空间化中具有广泛的应用前景。在此基础上, 将各项生态系统服务的退化水平值进行归一化处理, 以消除不同量纲影响, 并求和叠加为损失度指数 *LOSS*。再次, 在 *ESRISK* 框架所确定的概率指标维度下灵活调整具体指标, 并对所选取指标进行空间化(表1)。进一步地, 按照各指标正负性质做归一化处理, 并采用层次分析法等方法确定指标权重, 从而加权叠加为概率指数 *PROB*。最后, 将 *LOSS* 与 *PROB* 之积作为风险指数 *RISK*, 从而评价景观生态风险。最终研究成果可在风险成因分析、服务间权衡与博弈等方面加以应用。

#### 4.4 ESRISK 框架优势

*ESRISK* 框架优势可从以下 3 方面得以论述: ① 科学性: 该框架本质上是以景观为研究对象、以生态系统服务为载体, 对城市和区域发展过程中产生的景观生态风险所作出的综合性评价。一方面, 将关键生态系统服务作为评价终点整合入景观生态风险评价中, 有利于实现景观格局与生态过程、人类福祉与生态系统之间的关联和耦合研究, 明确了风险评价结果的保护对象和生态指示意义。另一方面, 将单一景观指数法拓展至以生态系统服务退化为风险损失, 基于地形、人为胁迫、生态恢复力、景观脆弱性等为概率表征的综合评价框架, 一定程度上弥补了传统景观生态风险评价生态学内涵不明的缺陷。② 可操作性: *ESRISK* 框架中所涉及到的指标均具有可靠、成熟的计算方法或模拟模型支持, 且所需要的大量空间数据总体具有良好的可获取性, 评价过程明确, 具备较强的可操作性。③ 应用前景: 在该框架中, 评价者可根据研究区气候、土地等要素及人类需求的差别, 关注其主导生态系统服务类型的退化状况, 且概率指标在各维度内涵指引下也可灵活调整, 故依此所实现的景观生态风险综合表征结果对不同评价目的、研究区域和尺度等具有良好的适应性。



## 5 结论与展望

景观生态风险是景观格局与生态过程互馈作用下的综合结果,而景观生态风险评价则成为一种有效支持生态系统管理和可持续城市规划的工具。同传统和区域生态风险相比,以景观为研究对象的景观生态风险更强调景观格局对特定生态功能或过程的影响,关注景观在提供生态系统服务和生态功能方面的整体性损失,侧重实现对多源风险的综合表征及空间可视化。在景观生态风险研究中,将生态系统服务作为评价终点,加强对风险概率表征指标体系的研究,可明确保护对象和生态过程内涵,增强评价结果的生态指示意义,且有助于开展地理—生态模型的综合集成研究。此外,从景观地形敏感性、外在胁迫等风险胁迫发生因子及生态恢复力、景观脆弱性等风险过程作用因子切入,加强对风险概率与损失评价指标体系的研究,有助于构建更为完善和综合的景观生态风险评估框架,使其更为准确地衡量生态风险发生的潜在可能及其对景观功能的不利影响。

根据现有研究进展和本文构建的 ESRISK 框架,对景观生态风险研究提出以下展望:

(1) 关注长期生态系统服务损失动态,将权衡与协同关系纳入评价框架。景观生态风险研究不能停留于静态评估,应尽可能关注研究区关键生态系统服务的长时间序列动态变化,以深入把握景观生态风险特征。此外,在将生态系统服务作为评价终点时,本文所确立的 ESRISK 框架未考虑各生态系统服务之间的权衡与协同关系,如何剔除其对风险损失估算的影响并纳入评价框架中是今后研究中需要解决的问题。

(2) 关注评价结果不确定性,加强风险决策情景模拟。无论采用何种框架或方法进行景观生态风险评价,均应进一步关注评价结果的不确定性问题。这是由于时空尺度、生态系统服务模拟、指标权重设置等差异性使得生态风险评估结果存在一定波动范围,容易受到研究者主观认知和评估侧重点不同的影响。此外,景观格局与生态过程复杂的交互作用也充满了不确定性,导致生态风险评价结果并非唯一恒定值,应加强对风险等级高度不确定性区域的识别,模拟决策者不同的风险偏好,减少主观认知对评价结果的影响。

(3) 揭示景观生态风险与景观格局关联关系,深入研究多尺度非线性特征。传统景观生态风险评价多基于一个特定尺度,在假定景观生态风险与景观格局呈线性关系的基础上进行研究。但不同尺度上景观生态风险与景观格局的关系并非恒定,其关系曲线的线性或非线性特征也尚不明晰。应进一步探讨不同类型景观组分和配置特征与景观生态风险关系的多尺度效应及非线性特征,以掌握景观生态风险对景观格局的响应规律,降低风险评价结果不确定性,以指导可持续生态的景观规划实践。

(4) 整合遥感与社会经济数据,将风险评价深化为脆弱性研究。应用 ESRISK 框架进行景观生态风险评价时,将涉及大量自然、生态等遥感空间数据,但对人口暴露、社会经济发展状态与响应等关注不足,下一步研究中可整合遥感与社会经济数据,在风险评价基础上进一步叠加风险暴露因子,将风险评价深化为面向多重灾害胁迫的社会—生态复合景观脆弱性研究。

致谢: 本文在修改阶段获得了北京师范大学地理科学学部刘焱序博士的大力指导,特此致谢。

### 参考文献(References)

- [1] 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. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2013, 19(1): 80-97.
- [2] 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.]

- [3] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [4] Peng Jian, Xie Pan, Liu Yanxu, et al. Integrated ecological risk assessment and spatial development trade-offs in low-slope hilly land: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture, China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1747-1761. [彭建, 谢盼, 刘焱序, 等. 低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡: 以大理白族自治州为例. *地理学报*, 2015, 70(11): 1747-1761.]
- [5] 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.]
- [6] Munns W R. Assessing risks to wildlife populations from multiple stressors: Overview of the problem and research needs. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 709-723.
- [7] Zhou Qixing, Wang Rusong. Ecological risk assessment of urbanization processes: A case study. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 337-342. [周启星, 王如松. 城镇化过程生态风险评价案例研究. *生态学报*, 1998, 18(4): 337-342.]
- [8] Fu Zaiyi, Xu Xuegong. Regional ecological risk assessment. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 267-271. [付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 267-271.]
- [9] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W, et al. Assessing ecological risk on a regional scale. *Environmental Management*, 1990, 14(3): 325-332.
- [10] Landis W G, Wiegiers J A. Design considerations and a suggested approach for regional and comparative ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1997, 3(3): 287-297.
- [11] Wiegiers J K, Feder H M, Mortensen L S, et al. A regional multiple-stressor rank-based ecological risk assessment for the Fjord of Port Valdez, Alaska. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1998, 4(5): 1125-1173.
- [12] Chen Chunli, Lü 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.]
- [13] Forman R T T. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [14] Xiao Duning, Li Xiuzhen. Development and prospect of contemporary landscape ecology. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(4): 69-77. [肖笃宁, 李秀珍. 当代景观生态学的进展和展望. *地理科学*, 1997, 17(4): 69-77.]
- [15] Zeng Hui, Chen Lidong, Ding Shengyan. *Landscape Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2017. [曾辉, 陈利顶, 丁圣彦. *景观生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2017.]
- [16] Jorgensen E E, Canfield T J, Kutz F W. Restored riparian buffers as tools for ecosystem restoration in the MAIA: Processes, endpoints, and measures of success for water, soil, flora, and fauna. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2000, 63(1): 199-210.
- [17] Peng Jian, Wang Yanglin, Wu Jiansheng, et al. Evaluation for regional ecosystem health: Methodology and research progress. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4877-4885. [彭建, 王仰麟, 吴健生, 等. 区域生态系统健康评价: 研究方法与发展. *生态学报*, 2007, 27(11): 4877-4885.]
- [18] 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.]
- [19] Liu S L, Cui B S, Dong S K, et al. Evaluating the influence of road networks on landscape and regional ecological risk: A case study in Lancang River Valley of Southwest China. *Ecological Engineering*, 2008, 34(2): 91-99.
- [20] Xie H, Wang P, Huang H. Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake Eco-economic Zone, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(1): 328-346.
- [21] Fan J, Wang Y, Zhou Z, et al. Dynamic ecological risk assessment and management of land use in the middle reaches of the Heihe River based on landscape patterns and spatial statistics. *Sustainability*, 2016, 8(6): 536.
- [22] Chen Lidong, Fu Bojie, Zhao Wenwu. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449. [陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449.]
- [23] Fu Bojie. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059. [傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059.]
- [24] Peng J, Zong M, Hu Y, et al. Assessing landscape ecological risk in a mining city: A case study in Liaoyuan City, China. *Sustainability*, 2015, 7(7): 8312-8334.

- [25] Zhou Rujia, Zhang Yongzhan, He Huachun. Ecological risk assessment based on land use changes in the coastal area in Yancheng city. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1017-1028. [周汝佳, 张永战, 何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价. *地理研究*, 2016, 35(6): 1017-1028.]
- [26] Zhang Xuebin, Shi Peijun, Luo Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: A case study on Shiyang River basin. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 410-419. [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. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 410-419.]
- [27] Gong J, Yang J, Tang W. Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(11): 14192-14215.
- [28] 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.]
- [29] Li W, Cao Q, Lang K, et al. Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 457-465.
- [30] Wang Jinliang, Xie Deti, Shao Jing'an, et al. Identification of source-sink risk pattern of agricultural non-point source pollution in cultivated land in Three Gorge Reservoir Area based on accumulative minimum resistance model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 206-215. [王金亮, 谢德体, 邵景安, 等. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地面源污染源—汇风险识别. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 206-215.]
- [31] Jiang M, Chen H, Chen Q. A method to analyze "source-sink" structure of non-point source pollution based on remote sensing technology. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 135-140.
- [32] Li Haifang, Wei Wei, Chen Jin, et al. Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River basin, Dingxi, Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4460-4467. [李海防, 卫伟, 陈瑾, 等. 基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究. *生态学报*, 2013, 33(14): 4460-4467.]
- [33] Liu Yu. Effectiveness of landscape metrics in coupling soil erosion with landscape pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 1-13. [刘宇. 景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性. *生态学报*, 2017, 37(15): 1-13.]
- [34] Liu Fang, Shen Zhenyao, Liu Ruimin. The agricultural non-point sources pollution in the upper reaches of the Yangtze River based on source-sink ecological process. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3271-3277. [刘芳, 沈珍瑶, 刘瑞民. 基于“源—汇”生态过程的长江上游农业非点源污染. *生态学报*, 2009, 29(6): 3271-3277.]
- [35] Chen Liding, Fu Bojie, Xu Jianying, et al. Location-weighted landscape contrast index: A scale independent approach for landscape pattern evaluation based on "Source-Sink" ecological processes. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406-2413. [陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法: 景观空间负荷对比指数. *生态学报*, 2003, 23(11): 2406-2413.]
- [36] 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.]
- [37] Costanza R, D'Arge R, DeGroot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [38] Ouyang Zhiyun, Zheng Hua. Ecological mechanisms of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6183-6188. [欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. *生态学报*, 2009, 29(11): 6183-6188.]
- [39] Li Shuangcheng, Zhang Caiyu, Liu Jinlong, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1379-1390. [李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.]
- [40] Lautenbach S, Volk M, Gruber B, et al. Quantifying ecosystem service trade-offs. *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake*. Ottawa, Canada: July 2010: 5-8.
- [41] Cao Qiwen, Wei Xiaomei, Wu Jiansheng. A review on the tradeoffs and synergies among ecosystem services. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11): 1-13. [曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 1-13.]
- [42] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [43] MA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [44] Galic N, Schmolke A, Forbes V, et al. The role of ecological models in linking ecological risk assessment to ecosystem services in agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 93-100.

- [45] Hommen U, Baveco J M, Galic N, et al. Potential application of ecological models in the European environmental risk assessment of chemicals I: Review of protection goals in EU directives and regulations. *Integrated Environmental Assessment & Management*, 2010, 6(3): 325-337.
- [46] USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. EPA/630/R-95/002F. Washington, DC: Risk Assessment Forum, 1998.
- [47] Li Yan, Li Shuangcheng, Gao Yang, et al. Ecosystem services and hierarchic human well-being: Concepts and service classification framework. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(8): 1038-1047. [李琰, 李双成, 高阳, 等. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架. *地理学报*, 2013, 68(8): 1038-1047.]
- [48] Kang Peng, Chen Weiping, Wang Mei'e. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(5): 1192-1203. [康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.]
- [49] Fu B, Wang S, Su C, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [50] Munns W R, Rea A W, Suter G W, et al. Ecosystem services as assessment endpoints for ecological risk assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2016, 12(3): 522-528.
- [51] Pablo Lozoya J, Sarda R, Jimenez J A. A methodological framework for multi-hazard risk assessment in beaches. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(6): 685-696.
- [52] Cook G S, Fletcher P J, Kelble C R. Towards marine ecosystem based management in South Florida: Investigating the connections among ecosystem pressures, states, and services in a complex coastal system. *Ecological Indicators*, 2014, 44: 26-39.
- [53] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [54] Ma Lin, Liu Hao, Peng Jian, et al. A review of ecosystem services supply and demand. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1277-1289. [马琳, 刘浩, 彭建, 等. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289.]
- [55] Peng J, Chen X, Liu Y, et al. Spatial identification of multifunctional landscapes and associated influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Applied Geography*, 2016, 74: 170-181.
- [56] Woli P, Jones J W, Ingram K T, et al. Predicting crop yields with the agricultural reference index for drought. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2014, 200(3): 163-171.
- [57] Xu X, Yang G, Tan Y, et al. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554: 7-16.
- [58] Allan J D, McIntyre P B, Smith S D P, et al. Joint analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(1): 372-377.
- [59] Yan Haiming, Zhan Jinyan, Zhang Tao. Review of ecosystem resilience research progress. *Progress in Geography*, 2012, 31(3): 303-314. [闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 303-314.]
- [60] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington, DC: Island Press, 2002.
- [61] Moore J C, de Ruiter P C, Hunt H W. Influence of productivity on the stability of real and model ecosystems. *Science*, 1993, 261(5123): 906.
- [62] Wu J, He S, Peng J, et al. Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by the invariant region method. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7356-7368.
- [63] Shi K, Chen Y, Yu B, et al. Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data. *Applied Energy*, 2016, 184: 450-463.
- [64] Weng Q, Lu D. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2008, 10(1): 68-83.
- [65] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 31(3): 413-424. [朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.]
- [66] Peng J, Shen H, Wu W, et al. Net primary productivity (NPP) dynamics and associated urbanization driving forces in metropolitan areas: A case study in Beijing City, China. *Landscape Ecology*, 2016, 31(5): 1077-1092.
- [67] Zhu W, Pan Y, He H, et al. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 457-463.
- [68] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based connectivity indices: Towards the

- prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
- [69] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, et al. InVEST User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2015.
- [70] Villa F, Bagstad K J, Voigt B, et al. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment. *PLOS ONE*, 2014, 9(3): e91001.

## Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK

CAO Qiwen<sup>1</sup>, ZHANG Xiwen<sup>2,3</sup>, MA Hongkun<sup>2</sup>, WU Jiansheng<sup>2,3</sup>

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** During rapid urbanization, high-intensity human activities have imposed significant stress on the structure and services of the ecosystem, resulting in ecological risk. In recent years, rising landscape ecological risk assessments have provided a new perspective for studying the relationship between landscape patterns and the ecological process, which can effectively support ecosystem management. Through a comparison of the concepts of ecological risk, regional ecological risk, and landscape ecological risk, this paper primarily reviews the two main methods for landscape ecological risk assessment: landscape index method and risk "source-sink" method. We also discuss the research progress of landscape ecological risk based on ecological services. In addition, this paper puts forward a framework for landscape ecological risk assessment, ESRISK, based on ecosystem services. In this framework, ecological loss is represented by the degradation level of key ecological services, and risk probability is represented from the perspectives of terrain, artificial stress, ecological restoration, and landscape vulnerability. As for scientific rigor, the ESRISK framework is a comprehensive assessment of landscape ecological risk in the urban and regional development process, in which the landscape is the study object and ecosystem services serve as the medium. In terms of application prospects, the ESRISK framework is applicable to different assessment purposes, study areas, and scales. The framework could also potentially provide a more integrative paradigm for assessment of landscape ecological risk and support the determination of regional adaptive risk mitigation strategy, and the efficient allocation of limited resources. Lastly, we have submitted future research trends from four perspectives: (1) Focusing on long-term ecosystem service loss dynamics and incorporating tradeoffs and synergies among ecosystem services into the assessment framework; (2) strengthening the analysis of uncertainty in assessment results and risk decision scenario simulation; (3) revealing relationships between landscape ecological risk and landscape patterns, as well as multi-scale and nonlinear characteristics; and (4) integrating remote sensing and socioeconomic data to deepen risk assessment into vulnerability research.

**Keywords:** landscape ecological risk; ecological services; landscape pattern; ecological risk probability; ESRISK; research progress and prospects