

景观生态风险评价研究进展与展望

彭 建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭

(北京大学城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 面向全球城市化进程的快速推进与生物圈环境变化的不断增强, 生态风险评价能够明晰制约区域生态持续性的主要生态要素与过程, 成为当前自然地理学与宏观生态学应对社会—生态系统综合管理的热点研究领域之一。景观生态学高度关注空间异质性及景观格局—过程互馈, 景观生态风险评价则为这一领域提供了新的研究视角。本文明确界定了景观生态风险评价的概念内涵, 系统梳理了景观生态风险评价与生态风险评价、区域生态风险评价的异同; 从评价对象的类型选择、评价单元的景观意义表征、评价方法的范式统一、评价模型的指数化途径和评价指标权重设定等方面, 探讨了国内外景观生态风险评价的现今进展; 同时, 研究还展望了景观生态风险评价的重点发展方向, 即基于景观过程的生态内涵明晰、尺度推绎在风险评价中的应用、评价结果的不确定性分析、耦合非线性生态模型的风险阈值判定、生态系统服务及其价值的整合、源汇景观过程识别与模型综合集成。

关键词: 景观生态风险评价; 景观格局—过程; 空间异质性; 进展与展望

DOI: 10.11821/dlxb201504013

自然生态系统为人类社会发展提供了重要的物质基础和生态服务^[1], 其结构与功能的持续稳定已成为人类社会发展的先决条件。然而, 人类社会的不断扩张使得全球绝大部分区域的自然生态系统都直接或间接地承受着人类活动所带来的压力和胁迫; 这些压力和胁迫导致了诸多的生态风险, 科学地管理这些生态风险是人类与自然和谐发展的重要前提。而生态风险的有效规避、主动适应及综合管理, 首先要求基于人与自然耦合关联视角对特定区域的生态风险进行科学、准确的评价^[2]。生态风险评价作为现阶段区域生态建设、资源管理、环境修复等诸多工作和相关决策制定的重要依据^[3], 引起了国内外学者的高度重视, 已成为当前生态系统综合评估的关键问题和宏观生态学的热点研究方向之一^[4]。

近年来, 随着全球环境变化、人类—自然耦合系统研究在地球系统科学领域的高度关注, 地理学研究生态化、生态学研究宏观化的趋向逐步明晰, 且二者的交叉融合益发受到国内外学者的关注; 而景观生态学横断了地理学的水平空间异质性与生态学的垂直相互关联, 是对二者的整合统一。同时, 地理—生态过程的区域集成是近年来自然地理学过程研究重点关注的科学问题^[5]; 为正确认识地理—生态过程的综合影响, 有必要将传统关注种群、群落、生态系统功能的生态学方法与强调区域、全球空间异质性的地理学思维相结合。此外, 随着生态风险评价研究的快速发展, 评价尺度从生态系统向景观、区域不断扩大, 评价对象从单一类型生态系统到多种生态系统的空间镶嵌, 迫切要求生

收稿日期: 2014-10-23; 修订日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(41322004) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41322004]

作者简介: 彭建(1976-), 男, 四川彭州人, 副教授, 中国地理学会会员(S110006685M), 主要从事景观生态与土地利用、生态系统综合评估研究。E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

664-677 页

态风险评价的方法论更新。因此,伴随着景观生态学空间异质性与格局—功能互馈核心概念在多学科领域的广泛应用^[6],基于景观生态过程与空间格局相互关联视角的景观生态风险评价应运而生。

景观生态风险指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。作为生态风险评价在区域尺度的重要分支领域,景观生态风险评价依托景观生态学的生态过程与空间格局耦合关联视角,更加注重风险的时空异质性和尺度效应,致力于实现多源风险的综合表征及其空间可视化。因此,基于多目标、多尺度、多等级系统、多重作用关系的过程分析,景观生态风险评价可以为区域综合风险防范提供决策依据、有效指引区域景观格局优化与管理。然而,尽管目前景观生态风险评价已成为地理—生态过程研究的热点方向,但对其理论与方法的系统梳理仍较为缺乏。基于此,本研究在对比分析景观生态风险评价与生态风险评价、区域生态风险评价异同的基础上,系统梳理景观生态风险评价的近今进展,明晰景观生态风险评价基本原理与方法,并展望景观生态风险评价的重点研究方向,以期整体推进景观生态风险研究领域的形成与发展。

1 从生态风险评价到景观生态风险评价

1.1 生态风险与区域生态风险评价

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^[4,7]。生态风险除了具有一般意义上的“风险”涵义和特点(如客观性和不确定性)之外,还具有自身鲜明的危害性、内在价值性和动态性特点^[8]。鉴于生态风险对于区域资源开发和生态建设的重要指示作用,生态风险评价成为宏观生态管理的一项重要途径。

生态风险评价起源于20世纪80年代,最初仅局限在人体健康评价的领域内,针对极小尺度的评价对象;后来逐步发展成为衡量一定范围内生态系统中一种或多重压力造成的,已经发生或正在发生的具有负生态效应的可能性的研究手段^[9-10]。通过为生态环境保护和风险管理提供科学依据和技术支持,生态风险评价的理论和方法得到了迅速发展。最初的生态风险评价大多针对单一风险源对一定区域内生态系统的胁迫作用进行评价,基于生态毒理学方法以环境中的化学污染物为主要风险源,来评估其对生态系统的结构和功能带来的不利影响^[11-13]。在其后的发展中,生态风险评价不再将视角局限于化学污染因子上,而是放眼更为多元的生态风险源和风险受体,如气候、生物、疾病等风险源,以及地质、水文环境或生态系统中的一个关键种等风险受体^[8,14]。基于风险因子的数量,生态风险评价方法可以分为还原论途径(Reductionist Approach)和整体论途径(Holistic Approach)^[15-16]。其中,前者是将一个地区的生态风险简化为该区域最主要的生态胁迫,然后用这个主要风险因子衡量其生态风险;后者则一般适用于区域内有多个风险源、多个风险受体,难以通过单一过程定量的情况^[17]。整体论途径一般不太关注区域生态系统的细节,而是将其看作黑箱,基于外部的整体结构和动态过程来评价生态风险。随着风险因子数量的不断增加,学者开始关注不同尺度下的生态风险评价,并逐渐重视区域尺度的生态风险评价工作,改变了早期研究过分集中于人体健康尺度和全球环境尺度的状况。

在人体健康和全球环境两个极端尺度之间,以区域作为评价尺度的生态风险评价逐渐成为了生态学与地理学前沿研究共同关注的热点问题。区域生态风险评价是指区域尺度上不同类型生态系统中的环境污染、人为胁迫或自然灾害等多种风险因子对于评价终

点造成不利影响的可能性和潜在危害程度^[18]。区域生态风险评价的提出,不仅意味着评价尺度的改变,更在于它将空间异质性的概念引入到了生态风险评价体系。在一个区域中,风险源和风险受体均存在空间分异现象,即在区域的不同空间位置上,风险源的种类和对风险受体的影响程度均有所不同。同时,相对于单一地点,区域生态风险涉及的风险因子更多,并存在相互作用和叠加效应^[8]。而在处理这些相互作用和叠加效应时,需要考虑不同因子和过程对于风险构成的重要性以及它们之间的等级关系,这样更有助于对风险危害的系统衡量。由此可见,区域生态风险评价作为区域尺度上对于生态风险的全面考量,在整体论途径的基础上增加了对内部过程的详细刻画。相对于传统的生态风险评价方法,区域生态风险评价引入了尺度效应、空间异质性和等级理论,而这三点同时也是景观生态学的核心概念。因此,区域生态风险评价理论与方法研究对于景观生态风险评价的源起与发展具有重要的推动作用。

1.2 景观与景观生态风险评价

景观这一概念最初由德国地理学家 Carl Troll 在观察东非遥感影像中提出,作为自然地表的综合体,是高度空间异质性的区域生态系统集合^[19]。景观由异质的要素组成,其异质性生态系统的干扰能力、恢复能力、稳定性和多样性有着非常密切的关系。由于景观的高度异质性,其整体结构的改变和动态过程均比较缓慢,但组成景观的空间组分在受到干扰时可以不同速度和强度发生变化,这就使得生态风险评价可以通过景观这一慢速改变量衡量风险受体范围和危害状况等生态风险评价的关键要素^[20]。同时,景观动态过程往往建立在静态镶嵌格局之中,这种镶嵌格局具有很多同质的生态系统所不具备的特征。在不同的镶嵌格局下,水文过程、营养循环和生物多样性等物质、能量和干扰的运动状态和空间分布均有所不同。因此,相较于侧重多重风险综合叠置的区域生态风险评价,景观生态风险评价更强调景观格局对于生态过程或功能的影响。

对尺度的重视是景观生态风险评价有别于其他风险评价的重要特征。尺度是指研究某一物体或现象时所采用的时间或空间单位,是景观生态学研究的核心概念。从不同的尺度上观察,景观格局的异质程度和动态过程会出现很大差异。同样,选取不同尺度时,生态风险评价的方法和效果也差异显著。例如,以一个特定的生态系统为尺度进行生态风险评价时,研究将主要着眼于外界的环境变化和种群数量的动态特征^[21];而如果选取区域为研究尺度,那么极端气候、土地利用变化等自然和人类活动带来的干扰则成为评价关注的重点^[22]。因此,充分考虑尺度效应,选取合理的研究尺度,对于景观生态风险评价评价结果的科学性和准确性非常重要。

综上可知,景观生态风险评价源于区域生态风险评价。广义的区域生态风险,包括区域空间格局呈现的生态风险、区域特定社会—生态过程产生的生态风险等多种形式,而景观生态风险则可被视为基于空间格局视角的区域生态风险。但在评价的侧重点与实现途径等方面,景观生态风险与区域生态风险的评价内容又有着显著差异(表1)。具体而言,景观生态风险评价是指从景观要素镶嵌、景观格局演变和景观生态过程入手,通过分析它们对于内在风险源和外部干扰的响应,针对一个特定区域进行的景观组分、结构、功能和过程受人类活动或自然灾害影响的判定或预测方法。景观生态风险评价更加注重区域时空异质性及其尺度效应,关注风险在空间和时间上的分异特征以及特定空间格局对于生态功能、过程的风险表达,而非传统区域生态风险评价所侧重的对于生态环境整体风险的定量评估。同时,景观生态风险评价不仅关注具体风险受体遭受损害的程度,也注重生态风险对于整体景观格局破碎度、多样性的影响。因此,在景观生态风险评价的相关研究中,衡量区域景观格局状况的景观指数往往被纳入景观生态风险评价框

表1 景观生态风险评价与区域生态风险评价异同
Tab. 1 Contrast between assessments of landscape ecological risk and regional ecological risk

	相同点	不同点	
		景观生态风险评价	区域生态风险评价
起源时间	20世纪后期	20世纪90年代	20世纪80年代
内涵	描述和评估环境污染、人为活动或自然灾害对生态系统产生不利影响的可能性和危害程度	运用景观生态学方法，耦合景观格局与生态过程，更加注重风险的时空异质性和尺度效应	集成多重地理-生态过程，侧重于综合描述多源风险对生态环境组分、结构和功能的整体影响
风险源	环境污染、自然灾害、人类活动	将景观作为风险综合体，集成表述多种风险源	分门别类表述多种风险源，对结果进行综合
风险受体	生态环境组分与结构要素	一种或多种景观	社会—生态系统或人地耦合系统
生态终点	生态退化与人类福祉下降	景观稳定性、连通性、多样性的降低，进而造成景观持续性的下降	人居环境恶化、生物多样性减少等，最终导致社会-生态系统的崩溃
评价单元	行政区、流域、空间格网	以风险小区、风险栅格、小流域等为主	以便于表述社会经济损失的各级行政区为主
评价方法	生态灾害发生的概率乘以可能造成的损失	源汇景观识别与景观格局分析	风险源识别-受体分析-暴露与危害评价，多重风险空间叠置
评价模型	基于多重准则构建综合评价数学模型与指标体系	基于景观格局指数、土地利用类型赋值指数等构建准则	基于社会经济要素属性或具体生态模型运算结果构建准则
权重赋值	层次分析法等主观权重赋值为主	依据景观格局特征属性的重要性或代表性	依据社会与生态要素属性的重要性或代表性
不确定性	较高不确定性	尚鲜有研究	逐渐受到重视
结果表征	时空制图，高风险区域识别	强调景观格局对于风险的定量影响，格局是评价要素	关注风险的时空格局特征，格局只用于风险评价结果的展示

架^[23]。简而言之，如果将区域生态风险评价的发展归结为生态学研究的宏观化趋向，那么景观生态风险评价的出现正体现了地理学研究的生态化趋向，是基于景观生态学空间异质性与景观格局—功能互馈机理的地理—生态过程集成表达；尽管二者均以风险的时空制图及高风险区域识别为评价结果表征，但区域生态风险评价关注风险的时空格局特征，而景观生态风险评价则强调空间格局的风险效应。

2 景观生态风险评价研究进展

景观生态风险概念提出以来，中国学者高度关注景观生态风险评价理论与方法的探讨，目前已初步形成了具有一定国际引领意义的景观生态风险评价研究框架。整体上看，当前考虑的景观因子主要集中在对景观格局的量化和分析，并用其结果直接或间接地表征景观生态风险。近年来，不同学者针对不同区域、不同评价目的选择相关指标、方法和模型，开展了大量卓有成效的景观生态风险评价探索。

2.1 评价对象的类型选择

景观生态风险评价起源于区域生态风险评价，因而目前景观生态风险评价研究的热点区域沿袭了区域生态风险评价的热点，主要以流域^[24]、行政区^[25]、城市地域^[26]为主，也有一些针对工矿开采区^[27]、自然保护区^[28]等重点风险控制区的研究。此外，景观生态学在道路生态影响研究中的应用，则形成了道路景观生态风险评价这一道路生态学、景观生态学的热点交叉方向^[29]。按照景观生态风险源的不同，耦合景观格局与生态过程的多

尺度生态风险可具体包括两种类型：① 景观整体格局对生态过程影响的风险。这一类型景观生态风险没有确切的风险源，或是隐含人类活动为风险源；② 景观格局变化对生态过程的生态影响风险，如湿地变化生态风险。该类型景观生态风险以特定景观格局的变化为明确风险源。

相对于大量针对人为活动剧烈区域的景观生态风险评价，将研究区选定在森林、草原等自然地域的研究较少，这与近年来宏观生态学强调人类活动对生态系统的影响、着重研究生态环境—社会经济综合体的发展趋势基本一致^[1]。同时，立足于海岸带^[30]、湿地^[31]、黄土丘陵区、农牧交错带和沙漠绿洲等生态脆弱且对全球变化具有极强响应的自然地带的景观生态风险评价仍有待继续深入。这些区域的景观整体格局相对较为破碎、稳定性及恢复力差，在人类活动和自然干扰下变化迅速且明显。因此，上述地区将成为未来景观生态风险评价研究的热点区域。从景观格局及其动态衡量区域生态系统健康状况分析出发，明确物种生境和环境因子所受胁迫具有重要的生态学意义，可为这些区域的生物多样性保护、水土保持等景观可持续性管理工作提供重要决策支持^[32]。

2.2 评价单元的景观意义表征

不同目的、不同区域的景观生态风险评价需要合理选择目标单元以优化评价效果。景观生态风险评价的重要特点即在于关注了空间异质性这一区域基本特征，所以在选取评价单元时也应充分考虑区域内部地理空间单元的异质性。以风险小区或风险栅格作为评价单元是早期景观生态风险评价中的常用方法^[23,33]，并可以将结果插值为在评价区域上连续的风险空间分布。但以行政区和风险小区为评价单元均未充分考虑空间异质性，一定程度上割裂了原有的地表自然地理联系，严重干扰了研究者对于景观格局的整体把握和综合分析。因此，近年来的景观风险评价研究已开始逐步重视评价单元的地理意义表征。

根据评价区域和目的的不同，评价单元可以由研究者人为划分，也可以是自然地理条件形成的区域。为生态环境保护提供理论和数据支持是景观生态风险评价的重要意义，也是评价单元选取的导向依据。以行政区作为评价单元有利于决策制定者针对不同行政区的生态风险情况制订不同政策，是在人为干扰强烈和生态恢复紧迫性高的区域进行风险评价的理想单元。相对而言，使用地表自然界线如小流域分水岭作为评价单元的边界，代表自然条件下的自然景观分布状况，在其范围内计算生态风险可以保证单元内自然要素结构与过程的完整性。也就是说，小流域内具有相似的风险源和自然环境，而不同小流域之间风险源和自然环境差别较大，即所谓生态风险的区内同质性和区间异质性在小流域表征最为显著。

2.3 评价方法的范式统一

景观生态风险评价基本可以划分为基于风险源汇和基于景观格局两种评价方法。早期的景观生态风险评价以前者为主，继承了传统生态风险评价和区域生态风险评价的方法原理。在评价过程中，首先识别威胁区域生态系统健康的风险受体和风险源。风险受体的选取与评价目标区域有关，一般是最能代表区域内景观健康状况的物种、环境因子或生态系统。风险源的类型由风险受体决定，多是对该区域生态风险受体的种群结构、环境质量或生态系统健康具有毁灭性打击的自然灾害，或是在区域历史上发生概率较高的自然或人为干扰^[34]。相对于区域生态风险评价，基于风险源汇的景观生态风险评价的进步之处是在暴露分析过程中引入了景观格局因子，用景观镶嵌格局的生态学效应来预测风险源在一定景观格局下的空间传递和作用效果，在设定的评价目标单元中计算生态风险。这一方法体系主要适用于研究区内具有明确的区域生态安全风险胁迫因子的评价

目标^[27]。

基于景观格局的评价方法在一定程度上摆脱了传统生态系统评价的“风险源识别—受体分析—暴露与危害评价”固有模式,在区域尺度上直接从空间格局出发评价景观生态风险。风险受体不再是区域生态系统中的单一要素,而是组成异质性景观的生态系统本身。风险源也不再是环境污染物、自然灾害或人为干扰,而是评价景观镶嵌体相对于最优格局的偏离程度的生态风险效应。目前,这一方法体系下的研究热点是以土地利用/覆盖变化为诱因的生态风险评价^[35]。土地自身就是地表景观的宏观表征方式,其组成结构或格局变化与景观生态风险的时空分布和动态具有高度关联。基于空间格局的景观生态风险评价关注景观要素的数量、功能和组合方式对于生态风险的影响,将景观生态学作为支持评价的核心而非辅助评价的方法纳入到研究中,适用于所有类型区域的风险综合评价,但对于强调特定过程的风险评价并不适用。

尽管两种评价方法在实际操作中差别较大,但二者遵循共同的景观生态风险评价基本原理,即区域内的景观生态风险均可用当前景观中生态灾害发生的概率乘以生态灾难可能造成的损失表征。对于多风险源汇过程的景观生态风险评价,只需要对每一过程的景观生态风险乘以其在最终评价中所占的权重并叠加^[9]。不过,需要注意的是,多风险叠加所代表的并不是简单的求和运算,而是一个复杂的函数关系,因为不同的生态风险之间不是相互独立而是相互影响的,这时在计算综合生态风险时并不能将它们简单相加,而需要针对不同的评价对象将函数具体化。因此,景观生态风险评价的两种方法其核心思想都是依循概率乘以损失的风险表征范式,差异主要体现在如何度量概率和损失上;从方法论层面来看,二者的基本范式是统一的。

2.4 评价模型的指数化途径

尽管存在两种不同的评价方法,景观生态风险评价的基本流程则是一致的:首先,对研究区进行分析,确定危害其生态安全的风险源和承受此风险源的生态风险受体;其次,进行景观类型划分,得出区域内景观生态风险研究中需要针对的景观类型,以及每一种景观类型所承受的风险源类型;再次,选择合适的基本评价单元,对研究区域进行暴露和危害分析,选用相关的景观格局指数来描述当地景观受到不同方面干扰的程度;最后,对每一个评价单元由景观格局指数计算得到其综合景观生态风险值,并以此作为评价的最终结果。因此,在景观生态风险评价流程中,基于景观格局或土地镶嵌格局构建景观生态风险指数是核心环节。目前,主要的景观生态风险指数包括基于景观格局的风险指数、基于土地利用类型的风险指数和基于外部压力—景观暴露性—稳定性的风险指数3类。

基于景观格局的景观生态风险指数目前最为常用,是在风险概率乘以危害程度的风险评价核心模型基础上,根据景观干扰度指数和景观脆弱度指数具体构建。该指数的具体算法为将每种景观组分的景观干扰度指数和景观脆弱度指数相乘并开平方,并以此为权重将风险小区内所有景观组分的面积比重加权求和,即可得到整个风险小区的景观生态风险指数^[23, 33]。其中,景观脆弱度指数表征景观中不同生态系统的易损性,研究中一般通过人为赋值得到;景观干扰度指数衡量景观格局对外界干扰的抵抗能力,通常用景观破碎度、景观分离度、景观优势度加权求和来定量表征^[23, 33]。相对而言,基于土地利用类型的景观生态风险指数在由土地利用变化诱发的景观生态风险评价中比较常用;往往通过不同土地利用/覆被类型占评价区域的面积比例进行来直接表征,即将评价区域内某种土地利用/覆盖类型的面积比例乘以该土地利用/覆盖类型的生态风险系数,并对所有土地利用/覆盖类型的生态风险求和得到评价区域的景观生态风险^[25, 35]。

除了从景观或土地类型的空间格局入手来计算风险指数之外,还可以从景观的外部受迫和内部承压能力来衡量其风险程度。例如,李景刚等将快速城市化地区自然/半自然景观生态风险定义为外部压力与景观暴露性之和减去景观稳定性后的差值^[36]。其中,外部压力可以由受迫景观的面积和到风险源的距离计算得出,景观暴露性依据景观中斑块到交通干线等连接镶嵌体外部的廊道的距离来计算,景观稳定性则可以由借助景观破碎化程度表征的内部稳定性和通过景观单元的邻域异质性高低来衡量的邻域稳定性二者加和得出。此外,在计算得到每一个评价单元的景观生态风险值之后,将结果推绎到整个研究区域多采用地理克里金插值手段来实现,但是否对既得风险值进行插值取决于评价单元的选取和对评价结果的需求。在以风险小区为单元评价特定区域时,如需得到区域内连续的生态风险分布,就应进行插值分析;而在以县域为单元的行政区评价中则一般没有必要进行空间插值,因为行政单元的风险值正是各级政府制定生态环境规划与管理的定量依据^[37]。

2.5 评价指标的权重赋值

评价指标的权重赋值是景观生态风险评价中不可或缺的环节。其中,基于风险源汇的景观生态风险评价方法主要针对不同风险源进行权重赋值,多采用层次分析法,即将与决策总是有关的要素分解为目标、原则等层次,并在此基础上进行定性和定量分析^[1]。具体计算中通常将风险源在干扰范围、干扰强度和干扰频率等层次上进行分析,得到每一种风险源所对应的评价结果。

在基于景观格局的景观生态风险评价中,权重赋值可以分为针对景观特征的赋值和针对格局指数的赋值。针对景观特征的赋值常用于景观脆弱度的计算和生态风险系数的确定,主要采用专家打分法和排序归一法。前者通过调查多位经验丰富的专家人为设立指标权重,后者根据不同景观类型的特征按照景观的性质将景观风险系数或脆弱度排序,之后进行归一化处理得到每一景观类型的权重^[23, 33]。一般而言,针对格局指数的赋值取决于评价对象的具体景观结构和自然环境。不同景观特征下,景观格局指数的重要性不同,因而在评价中所占的权重也随重要性有所变化。

值得注意的是,权重赋值方法本身并无普适性的优劣之分,而需要根据具体的风险评价目标确定合适的赋权方法。在现阶段,根据区域具体数据运算而得到客观权重赋值的研究相对较少,更多的是基于研究者的经验和判断进行主观的权重确定。这种赋值方法尽管不够客观,但一般都能基本反映不同评价指标之间的重要性差异,并可以根据具体情况灵活转换,相比于客观赋权法其适用性、实用性更强。然而,权重赋值环节依然是景观生态风险评价中的难点,不恰当的方法应用可能会直接左右评价结果的分布特征,显著增加评价结果的不确定性。

3 景观生态风险评价研究展望

随着人类活动范围的不断扩张和强度的不断增大,景观生态风险评价作为预测和衡量人类活动对生态环境产生不良影响的重要手段日益受到重视。近年来,有关景观生态风险评价的研究数量不断增加。但由于评价的理论意义尤其是生态学内涵尚不够明晰,方法论体系并不完善,因此对于解决实践问题往往缺乏实质指引。尤其是景观格局优化与土地系统设计作为景观生态风险评价的应用出口,面临缺乏机理解释的困境,亟待景观生态风险评价的理论与方法深化以提供规划设计依据。具体而言,目前景观生态风险评价主要存在以下几个方面的问题:第一,景观生态风险评价重点关注静态景观镶嵌格

局,尤其是景观格局指数的运算,这与景观尺度上生态系统结构、功能、过程及动态的景观生态学学科关注点有一定脱节。一些景观生态风险评价已成为单纯的景观格局指数计算和堆砌,多数基于土地利用/覆盖变化的景观生态风险评价工作对于景观功能、格局变化过程关注不足,而仅仅选取一个时间节点对多种景观格局指数进行计算得到风险数值,这直接导致了风险评价结果的可信度与适用性下降;第二,很多研究关注尺度这一核心问题,但大多只是选取了较为合适的尺度进行评价,并没有对不同尺度上的结果进行对比与整合;第三,景观所综合表征的风险源与受体往往较多,因而评价结果的不确定性相对较大,但对于不确定性的认知及度量关注较少。此外,生态流动态、土地利用/覆盖变化的生态效应、景观非线性动态与景观复杂性,均是景观/区域生态风险识别与评价不可忽视的重要方面,但已有研究对于其与景观生态风险的内在关联及其在风险评价中的定量表征均缺乏应有的关注。

因此,景观生态风险评价亟待理论演进与方法革新;基于现阶段生态风险管理对于风险评价研究的迫切需求^[38]和景观生态学的发展趋势^[39],下述几个方面将成为景观生态风险评价进一步发展的重点方向(图1)。其中,在理论层面,需要进一步重视风险评价结果对于生态过程的内涵表征,明确景观生态风险的尺度效应,关注风险评价误差;在方法层面,有必要耦合非线性生态模型判定风险阈值,将生态系统服务价值纳入风险损失的定量表征,依托源汇景观过程识别完成风险评价中景观格局与生态过程的整合。最终,基于理论演进与方法革新的交互,实现对人类—自然耦合系统景观生态风险规避、减缓与适应的防范指引。

3.1 基于景观过程的生态内涵明晰

景观生态风险评价以景观生态学原理为理论内核,因此风险评价结果的景观生态学内涵解析是研究的重要内容。景观生态风险评价结果既包含着生态系统中物质代谢、能量转换、信息交流等具体生态流的动态演变,也体现了土地利用/覆盖变化所产生的直接或间接生态效应。景观生态流是指物质和能量在景观要素中的流动过程,作为一种功能流直接受土地利用/覆盖变化即景观格局演变影响而发生动态变化。并且,这种功能流的演变往往是非线性的,具有复杂系统特征。尽管景观格局指数在一定程度上能够定量表征景观格局的安全状况和受迫程度,从而间接表征景观复杂性、稳定性和多样性;但指数本身无法体现景观非线性动态的形成机理以及景观生态流的演进方式,更不能解释复杂性科学视角下景观格局演变生态后果的驱动原因。这导致了目前景观生态风险评价结果的生态内涵不明,无法将风险评价结果与具体的生态要素相对应,从而使风险管控失去指向性。

因此,在进一步研究中应当发展和使用基于过程的格局分析方法:在选取和计算格局指数的同时,关注生态系统物质、能量在既定景观格局下的流动性和景观格局在时间尺度上的动态变化,明确诸如水土流失、地质灾害、道路阻隔、水利施工、城市热岛、

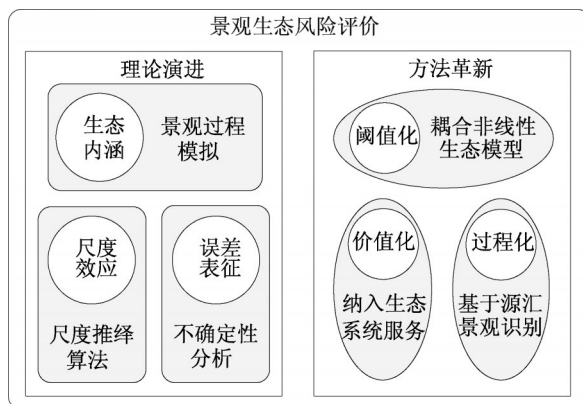


图1 景观生态风险评价理论与方法框架
Fig.1 Framework on the theory and method of LERA

土地沙化、水体污染等具体地理—生态过程所对应的景观结构与功能^[40-44]。而为实现风险评价结果生态内涵的明晰,有必要重点加强特定景观过程的模拟,完成从空间异质性的结构表征到生态过程—功能识别这一景观生态风险评价的理论演进;从而基于格局—过程—功能集成的风险评价框架,定量表征景观生态流非线性演进中的景观功能动态、土地利用/覆盖变化的生态效应,明晰复杂性视角下景观系统各层级生态损失的产生原因及其相互关联,以便更直观准确的指引景观格局优化与土地系统设计。

3.2 尺度推绎在风险评价中的应用

尺度是景观生态学的核心概念之一,多尺度综合和尺度推绎是景观生态风险评价过程的重要环节。在不同的尺度上评价同一地区的景观生态风险结果会有所不同,但并非完全割裂。大尺度评价结果可作为小尺度评价的基底,揭示区域景观生态风险的总体状况;小尺度评价结果则是大尺度评价结果的细化,展现了在相对同质的区域内景观生态风险的异质性。而多尺度的综合和转换并非不同尺度研究结果的简单叠置,如何有机协调和有效整合多尺度的评价结果,是景观生态风险评价未来亟待解决的重大问题。

尺度推绎是指把信息从一个尺度转译到另一个尺度上,是景观生态学实践中最为重要的内容。当某个尺度上的景观生态风险评价不可行或精度有限时,就需要应用其它尺度上的生态风险进行推演,得到理想的评价结果。然而,由于生态过程存在着复杂的非线性关系和反馈作用,尺度推绎往往存在较大的误差。因此,对景观生态风险尺度效应的应用,其核心工作在于尺度推绎算法这一关键环节。目前,无论是地理学、生态学还是景观生态学都在这一环节陷入困局,而综合野外观测、控制实验、3S技术和数理模型模拟的一体化途径被认为最有可能推动尺度推绎理论与方法的发展、突破^[45]。

3.3 评价结果的不确定性分析

同其它生态风险一样,景观生态风险也具有不确定性。景观生态风险评价是一个基于研究者经验的判断过程,不可避免地存在数据不完整或随机干扰等不确定性。所以,不确定性评价是景观生态风险评价的重要环节,只有明确评价结果中的不确定性,才能真正为相关生态环境决策提供准确的科学依据。

目前,不确定性分析的定量方法主要包括采样法、响应曲面法、差量分析法和蒙特卡洛模拟等^[46]。其中,蒙特卡洛模拟在生态风险评价中应用比较广泛^[47]。然而,现阶段国内的景观生态风险评价鲜有将不确定性评价纳入风险评价,这使得风险评价结果的可靠性难以把握。因此,基于不确定性分析实现对景观生态风险评价结果误差的定量表征,是达成景观生态风险防范现实指引的基本途径;在未来的景观生态风险评价研究中,必须高度重视评价结果的不确定性分析,同时保证景观生态风险结果的有效性和可靠性。

3.4 耦合非线性生态模型的风险阈值判定

生态模型在全球气候变化模拟和区域植被生产力模拟等诸多宏观生态学领域应用广泛,但在景观生态风险评价中目前尚不普及。尽管在传统生态风险评价中已经开始应用较为成熟的生态模型,基于给定的生态因子(如植被类型、食物网等)和风险因子(环境污染物)数据分析特定生态系统的生态风险;但由于其研究尺度较小,对于涉及生态因子和风险因子较多且尺度较大的景观生态风险评价尚无能为力^[48]。但是,将宏观非线性生态模型应用到景观生态风险评价中是完全必要的。一方面,通过宏观模型执行其程序设定的既定步骤,可以有效避免景观生态风险评价中的主观性,增强了评价的可靠性;另一方面,使用计算机进行生态建模进行运算会大大加速研究速度,降低研究的执行难度,进而提高景观生态风险评价的实用性。

定量判定景观格局与生态过程相互作用产生不利后果的阈值是景观生态风险评价的核心难点。与环境污染生态风险往往对应具体的危害健康浓度不同,景观格局所产生生态风险的损失界定存在较高不确定性。特定的景观格局可能在某一时空范围内作用于生态过程引发风险,而在另一时空背景下该景观格局对生态过程的非线性作用不一定会带来风险。因此,基于景观格局指数的风险评价方法尚不足以完成景观生态风险阈值的定量判定。而通过景观格局与水文模型相结合判定水环境风险目前已受到关注^[49, 50],通过各种生态模型明确不同地理背景下的非线性生态过程可以作为景观生态风险阈值界定的主要依据。例如,可以采用光能利用率模型判定不同乔灌木空间格局的生物量合成差异,引入空气污染扩散模型识别不同景观格局对应的大气环境质量,通过气候舒适度模型评价景观格局对人体冷热感知的影响等。所以,引入宏观非线性生态模型实现景观格局与生态过程的复合度量,是定量判定风险阈值的根本途径与重要发展方向。

3.5 生态系统服务及其价值的整合

与环境污染、自然灾害等风险评价更多关注人类健康和财产的可能损失不同,多目标导向下的景观生态风险不仅包含人类社会所受到的直接损失,更侧重于关注不同等级系统生态损失的度量以及这些生态损失对人类福祉潜在影响的评判。生态系统服务作为近年来宏观生态学的研究热点,是指人类从生态系统中得到的惠益,包括供给服务、调节服务、文化服务与支持服务^[51]。采用生态系统服务价值将区域内各种生态过程所产生的不同服务货币化,可以有效关联生态过程与人类福祉。因此,一个区域的生态系统服务价值体现着其生态系统健康程度及人地关系的和谐程度,是衡量区域生态安全的重要指标之一^[52]。

特定的景观格局构建无疑有助于土壤保持、水源涵养、防风固沙、生物多样性保护等生态功能的维持,而该景观格局被破坏后生态风险的增大则直接表现为生态系统服务的下降,进而影响人类福祉的可持续性。因此,可以将生态系统服务价值损失作为景观生态风险对人类福祉影响的重要评判依据。首先,景观生态风险衡量的是生态灾难出现的概率和损失的期望值,而风险发生后生态系统服务价值损失是生态灾难的一种表现,二者相互关联;其次,生态系统服务价值体现了生态系统对人类社会的支持能力,符合景观生态风险评价的基本内涵;最后,景观格局、源汇动态评价侧重于生态系统空间镶嵌的结构和分布特点,而依据生态系统服务价值则强调生态系统集合的功能特征,只有同时把握景观的结构格局和功能优劣才能综合评估一个区域所承受的景观生态风险。目前,随着生态系统服务以及价值估算方法的日益完善,将其整合纳入景观生态风险评价体系已具备了良好的实现基础。

3.6 源汇景观过程识别与模型综合集成

从格局走向过程是景观生态风险评价的最新趋势,而源汇景观模型则提供了格局与过程之间的一个综合集成途径。源汇景观概念源于景观生态学中寻求景观格局与生态过程耦合的研究目的,常应用于非点源污染、土壤侵蚀、化学物质迁移等生态过程受景观格局影响的定量表述^[53]。根据具体的风险胁迫与作用对象,明确源、汇景观类型和风险作用过程,可以有效避免单纯依赖景观格局指数的景观生态风险评价方法存在的表征意义不明确等弊端。因此,基于源汇景观模型的风险评估,整合了格局与过程,是未来景观生态风险评估模型的重要发展趋向。

虽然源汇景观理论可以有效表征不同景观类型在空间上的动态平衡及其对生态过程的影响,但对于不同的风险胁迫而言,源汇景观的贡献不同甚至可以相互转化,增加了评价中的定量难度^[54]。例如,生物多样性保护、热岛效应、地质灾害等体现了与非点源

污染完全不同的暴露与胁迫。因此,如何在景观尺度上对主导生态过程所产生的风险一一剥离,并进行正确的源汇景观关系识别,是应用源汇景观模型解决实际问题的难点所在;为完成源汇景观过程识别,有必要依托不同尺度生态内涵的概念明晰和生态模型化、人类福祉化的方法革新,开展地理—生态模型的综合集成。通过集成模型使景观生态风险评价能够综合、准确的预测和衡量全球环境变化与人类活动对景观格局与功能产生的不利影响,可以有效实现景观生态风险评价结果与景观格局优化、土地系统设计的正确对接,从而直接服务于景观可持续性的动态维系^[55-56]。

参考文献(References)

- [1] 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: 研究方法进展. *生态学报*, 2007, 27(11): 4877-4885.]
- [2] Cao Hongfa, Shen Yingwa. Brief review: Ecological risk assessment research. *Environmental Chemistry*, 1991, 10(3): 26-30. [曹洪法, 沈英娃. 生态风险评价研究概述. *环境化学*, 1991, 10(3): 26-30.]
- [3] Suter G W, Norton S B, Barnhouse L W. The evolution of frameworks for ecological risk assessment from the Red Book ancestor. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(5): 1349-1360.
- [4] Yang Wenrui, Wang Rusong, Huang Jinlou, et al. Ecological risk assessment and its research progress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1869-1876. [阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 生态风险评价及研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869-1876.]
- [5] Fu Bojie, Zhao Wenwu, Chen Liding. Progress and perspective of geographical-ecological processes. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1123-1131. [傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 地理—生态过程研究的进展与展望. *地理学报*, 2006, 61(11): 1123-1131.]
- [6] Peng Jian, Wang Yanglin, Zhang Yuan, et al. Research on the influence of land use classification on landscape metrics. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(2): 157-168. [彭建, 王仰麟, 张源, 等. 土地利用分类对景观格局指数的影响. *地理学报*, 2006, 61(2): 157-168.]
- [7] Landis W G. Twenty years before and hence; Ecological risk assessment at multiple scales with multiple stressors and multiple endpoints. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(5): 1317-1326.
- [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] Chen Hui, Liu Jinsong, Cao Yu, et al. Progress of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1558-1566. [陈辉, 刘劲松, 曹宇, 等. 生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2006, 26(5): 1558-1566.]
- [10] Norton S B, Rodier D J, Gentile J H, et al. A framework for ecological risk assessment at the EPA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1992, 11(12): 1663-1672.
- [11] Solomon K R, Baker D B, Richards R, et al. Ecological risk assessment of Atrazine in North American surface waters. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, 15(1): 31-76.
- [12] Tannenbaum L V. Detoxifying ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2005, 11(2): 469-472.
- [13] Wang Hao, Feng Chenglian, Guo Guanghui, et al. Ecological risk assessment of Bisphenol A in Chinese freshwaters. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2319-2328. [汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 等. 我国淡水水体中双酚A (BPA) 的生态风险评价. *环境科学*, 2013, 34(6): 2319-2328.]
- [14] Zhang Sifeng, Liu Hanmeng. Review of ecological risk assessment methods. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2735-2744. [张思锋, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评. *生态学报*, 2010, 30(10): 2735-2744.]
- [15] Weber M, Schmid B. Reductionism, holism, and integrated approaches in biodiversity research. *Interdisciplinary Science Reviews*, 1995, 20(1): 49-60.
- [16] Leuven R S, Poudevigne I. Riverine landscape dynamics and ecological risk assessment. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 845-865.
- [17] Zeng Yong. The regional ecological risk assessment of Hohhot City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 668-673. [曾勇. 区域生态风险评价: 以呼和浩特市为例. *生态学报*, 2010, 30(3): 668-673.]
- [18] Zhou Ting, Meng Jijun. Research progress in regional ecological risk assessment methods. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(4): 762-767. [周婷, 蒙吉军. 区域生态风险评价方法研究进展. *生态学报*, 2009, 28(4): 762-767.]

- [19] Turner M G. Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process. Springer, 2001.
- [20] Wu Liyun. The study of regional landscape ecological risk assessment and the environmental risk management countermeasure: Take Dongshan Island for example. Fuzhou: Fujian Normal University, 2004. [巫丽芸. 区域景观生态风险评价及生态风险管理研究: 以东山岛为例. 福州: 福建师范大学, 2004.]
- [21] Dong Cuifang, Liang Guofu, Ding Shengyan, et al. Multi-scale effects for landscape metrics and species diversity under the different disturbance: A case study of Gongyi City. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3444-3451. [董翠芳, 梁国付, 丁圣彦, 等. 不同干扰背景下景观指数与物种多样性的多尺度效应: 以巩义市为例. *生态学报*, 2014, 34(12): 3444-3451.]
- [22] Zhang Ying, Lei Guoping, Lin Jia, et al. Spatiotemporal change and its ecological risk of landscape pattern in different spatial scales in Zhalong Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1250-1256. [张莹, 雷国平, 林佳, 等. 扎龙自然保护区不同空间尺度景观格局时空变化及其生态风险. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1250-1256.]
- [23] Chen Peng, Pan Xiaolin. Ecological risk analysis of regional landscape in inland river watershed of arid area: A case study of Sangong River Basin in Fukang. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(4): 116-120. [陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆流域区域景观生态风险分析: 以阜康三工河流域为例. *生态学杂志*, 2003, 22(4): 116-120.]
- [24] Li Xiehui, Li Jingyi. Analysis on regional landscape ecological risk based on GIS: A case study along the lower reaches of the Weihe River. *Arid Zone Research*, 2008, 25(6): 899-903. [李谢辉, 李景宜. 基于GIS的区域景观生态风险分析: 以渭河下游河流沿线区域为例. *干旱区研究*, 2008, 25(6): 899-903.]
- [25] Meng Xiao, Ren Zhiyuan, Zhang Chong. Study on land use change and its ecological risk in Xianyang City. *Arid Zone Research*, 2012, 29(1): 137-142. [蒙晓, 任志远, 张翀. 咸阳市土地利用变化及生态风险. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 137-142.]
- [26] Gao Bin, Li Xiaoyu, Li Zhigang, et al. Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on landscape pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3441-3450. [高宾, 李小玉, 李志刚, 等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析. *生态学报*, 2011, 31(12): 3441-3450.]
- [27] Wu Jiansheng, Qiao Na, Peng Jian, et al. Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3816-3824. [吴健生, 乔娜, 彭建, 等. 露天矿区景观生态风险空间分异. *生态学报*, 2013, 33(12): 3816-3824.]
- [28] Gaines K F, Porter D E, Dyer S A, et al. Using wildlife as receptor species: A landscape approach to ecological risk assessment. *Environmental Management*, 2004, 34(4): 528-545.
- [29] Liu Shiliang, Yang Zhifeng, Cui Baoshan, et al. Effects of road on landscape and its ecological risk assessment: A case study of Lancangjiang River valley. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(8): 897-901. [刘世梁, 杨志峰, 崔保山, 等. 道路对景观的影响及其生态风险评价: 以澜沧江流域为例. *生态学杂志*, 2005, 24(8): 897-901.]
- [30] Hayes E H, Landis W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment: Cherry Point, WA. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2004, 10(2): 299-325.
- [31] Liu D D, Qu R J, Zhao C H. Landscape ecological risk assessment in Yellow River Delta. *Journal of Food Agricultural & Environment*, 2012, 10(2): 970-972.
- [32] Hu Hebin, Liu Hongyu, Hao Jingfeng, et al. The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3432-3440. [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. *生态学报*, 2011, 31(12): 3432-3440.]
- [33] Xie Hualin. Regional eco-risk analysis of based on landscape structure and spatial statistics. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 5020-5026. [谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. *生态学报*, 2008, 28(10): 5020-5026.]
- [34] Forbes V E, Calow P. Developing predictive systems models to address complexity and relevance for ecological risk assessment. *Integrated environmental assessment and management*, 2013, 9(3): e75-e80.
- [35] Wang Juan, Cui Baoshan, Liu Jie, et al. The effect of land use and its change on ecological risk in the Lancang River watershed of Yunan Province at the landscape scale. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 269-277. [王娟, 崔保山, 刘杰, 等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 269-277.]
- [36] Li Jingang, He Chunyang, Li Xiaobing. Landscape ecological risk assessment of natural/semi-natural landscapes in fast urbanization regions: A case study in Beijing, China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 33-47. [李景刚, 何春阳, 李晓兵. 快速城市化地区自然/半自然景观空间生态风险评价研究: 以北京为例. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 33-47.]
- [37] Zang Shuying, Huang Xi, Zheng Shufeng. Landscape processing response analysis on landuse development trend of natural resources based city: A case study in Daqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1699-1707. [臧淑英, 黄

- 樨, 郑树峰. 资源型城市土地利用变化的景观过程响应: 以黑龙江省大庆市为例. 生态学报, 2005, 25(7): 1699-1706.]
- [38] 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.]
- [39] Chen Liding, Liu Yang, Lv Yihe, et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: Current, challenges and future. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5521-2231. [陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.]
- [40] Xie Yuchu, Gong Jie, Zhao Caixia. Evaluation of landscape ecological risk of soil and water erosion in the Bailongjiang watershed in Southern Gansu, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(3): 702-708. [谢余初, 巩杰, 赵彩霞. 甘肃白龙江流域水土流失的景观生态风险评价. 生态学杂志, 2014, 33(3): 702-708.]
- [41] Gong Jie, Zhao Caixia, Wang Heling, et al. Ecological risk assessment of Longnan Mountainous Area based on geological disasters: A case study of Wudu. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(5): 570-577. [巩杰, 赵彩霞, 王合领, 等. 基于地质灾害的陇南山区生态风险评价: 以陇南市武都区为例. 山地学报, 2012, 30(5): 570-577.]
- [42] 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: 91-99.
- [43] Zhang Zhaoling, Liu Shiliang, Zhao Qinghe, et al. Effects of road network on landscape ecological risk: A case study of Red River watershed. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2223-2228. [张兆苓, 刘世梁, 赵清贺, 等. 道路网络对景观生态风险的影响: 以云南省红河流域为例. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2223-2228.]
- [44] Liu Qi, Liu Shiliang, Zhao Qinghe, et al. Landscape ecological risk and the influential factors of Manwan hydropower station under construction. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(6): 113-118. [刘琦, 刘世梁, 赵清贺, 等. 漫湾水电站建设的景观生态风险时空分异及影响因子研究. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 113-118.]
- [45] Wu Jianguo. The key research topics in landscape ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2074-2076. [邬建国. 景观生态学中的十大研究论题. 生态学报, 2004, 24(9): 2074-2076.]
- [46] Ma Luyi, Xu Xuegong, Xu Lifan. Uncertainty analysis of integrated ecological risk assessment. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 893-900. [马禄义, 许学工, 徐丽芬. 中国综合生态风险评价的不确定性分析. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5): 893-900.]
- [47] 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.]
- [48] Malekmohammadi B, Rahimi Blouchi L. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 133-144.
- [49] Liu Zhenhuan, Li You, Peng Jian. The landscape components threshold of stream water quality: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5983-5993. [刘珍环, 李猷, 彭建. 河流水质的景观组分阈值研究进展. 生态学报, 2010, 30(21): 5983-5993.]
- [50] Liu Zhenhuan, Li You, Peng Jian. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment. *Progress in Geography*, 2011, 30(3): 275-281. [刘珍环, 李猷, 彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展. 地理科学进展, 2011, 30(3): 275-281.]
- [51] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [52] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 2012, 45: 24-29.
- [53] Stow C A, Borsuk M E, Stanley D W. Long-term changes in watershed nutrient inputs and riverine exports in the Neuse River, North Carolina. *Water Research*, 2001, 35(6): 1489-1499.
- [54] Chen Liding, 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.]
- [55] Zhao Wenwu, Fang Xuening. Landscape sustainability and landscape sustainability science. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2453-2459. [赵文武, 房学宁. 景观可持续性科学. 生态学报, 2014, 34(10): 2453-2459.]
- [56] Wu J. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28: 999-1023.

Review on landscape ecological risk assessment

PENG Jian, DANG Weixiong, LIU Yanxu, ZONG Minli, HU Xiaoxu

(Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Under the background of accelerating global urbanization and environmental change, it is of great significance for ecological risk assessment to identify local ecological elements and processes influencing regional ecological sustainability. Ecological risk assessment has been regarded as one of the key topics in researches on integrated management of social ecological system in the view of physical geography and macro ecology. With a special focus on spatial heterogeneity and the correlations between landscape patterns and ecological processes deriving from landscape ecology, landscape ecological risk assessment (LERA) deepens this topic with a new perspective and paradigm. In this paper, through the contrast among ecological risk assessment, regional ecological risk assessment, and landscape ecological risk assessment, the connotation of LERA is clearly defined. Detailed research progresses on LERA are also discussed and focused on region selection of assessing target, landscape meaning characterization of assessing unit, paradigm uniformity of assessing method, indexation of assessing model, and weight setting of assessing index. Finally, future research prospects on LERA are proposed, including detecting ecological implication in the view of landscape process, applying the scaling concept in risk assessment, quantifying the uncertainty of assessing results, coupling nonlinear ecological model with risk threshold determination, incorporating values of ecosystem services into risk assessment, and integrating multiple ecological models through the identification of source and sink landscape process. A framework has also been constructed to illustrate the logic relationships among the prospects of LERA.

Keywords: landscape ecological risk assessment; landscape pattern and process; spatial heterogeneity; research progress and prospect