

土地利用生态风险评价研究进展

王洁^{1,2}, 摆万奇², 田国行¹

(1. 河南农业大学林学院, 郑州 450002; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 土地利用生态风险评价是对生态系统在土地利用直接或间接作用下可能产生的不利影响的评价。在梳理已有研究工作的基础上, 从评价模型、生态风险空间表达和不确定性分析三个方面, 总结土地利用生态风险评价研究方法的进展, 阐述土地利用生态风险管理在土地利用生态风险评价中的地位和作用。目前该领域存在的主要问题是: (1) 评价指标和评价标准不统一; (2) 评价过程和评价结果的不确定性较大; (3) 生态风险管理环节研究薄弱。未来的发展趋势包括: (1) 关注全球变化条件下的土地利用生态风险; (2) 重视土地利用生态风险评价在国土空间规划与生态修复中的作用; (3) 加强土地利用生态风险管理研究; (4) 建立并完善土地利用生态风险评价的数据管理平台。

关键词: 土地利用; 生态风险评价; 生态风险管理; 研究进展

生态风险是指一个种群、生态系统或整个景观的正常功能受外界胁迫, 从而在目前和将来减少该系统内部某些要素或其本身的健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值的可能性^[1]。生态风险评价是认识和防控生态风险的基础, 其发展过程经历了从环境影响评价到环境风险评价再到生态风险评价的渐进过程^[2,3], 反映了一种或多种因素对生态系统的负面影响, 可表征气候变化和人类活动对生态系统的威胁程度, 从而揭示生态过程的机理和发展趋势^[4]。1998年, 美国环境保护局 (USEPA) 颁布“生态风险评估指南”^[5], 标志着生态风险评估进入成熟阶段^[6]。世界卫生组织 (WHO) 进一步修改了美国环境保护局的评估框架, 突出了风险管理的重要性^[7,8]。早期的生态风险评价研究主要集中在污染物对生态系统及其组成的影响上, 近年来更加关注生态风险的空间分布和对生态系统服务的影响^[9], 评价规模从单个有机体扩展到流域、区域和城市^[10]。在区域层面扩展出的区域生态风险评价和景观层面延伸出的景观生态风险评价是生态风险研究的两个重要领域, 并且正向着大区域、多层次、结合空间统计学的综合生态风险评价发展^[11]。

随着全球变化和生态风险研究的深入, 土地利用变化所引起的生态系统的风险受到越来越多的关注。土地利用变化所造成的土地覆被变化改变了生态系统的结构和功能, 其影响涉及大气、土壤、水体和生物等一系列生态过程, 具有广泛的生态效应^[12-15], 由此产生包括土地退化在内的各种现实或潜在的生态风险^[16,17]。与生态风险概念相对应, 土地

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-12-09

基金项目: 中国科学院战略先导科技专项 (A类) (XDA20040201); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZ KK0603)

作者简介: 王洁 (1994-), 女, 河南安阳人, 硕士, 研究方向为土地利用生态风险研究。

E-mail: 434348259@qq.com

通讯作者: 田国行 (1964-), 男, 河南封丘人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城乡绿地资源调控。

E-mail: tgh0810@163.com

利用生态风险是指土地利用及其变化过程导致种群、生态系统或景观结构改变及相应生态功能降低的可能性。土地利用生态风险评价是对种群、生态系统或景观在土地利用及其变化过程作用下可能产生的不利后果的评价,依据生态风险评价结果针对土地利用进行生态风险管理的过程。其中风险源的识别、风险的分析 and 表达是评价过程中的主要内容。评价过程一般通过风险评价模型定量评估土地利用过程造成的不利影响,包括生态系统中有价值结构和功能的改变和退化^[18],将评价结果在空间上进行图示化表达,以此为基础对土地利用生态风险加以管理。作为生态风险研究的新领域和生态风险评价的重要分支,土地利用生态风险评价可为生态文明建设背景下的国土空间规划与生态修复提供科学依据和有力的决策支撑。本文梳理了国内外相关研究现状,结合研究案例的分析,对土地利用生态风险评价的主要方法与技术进行归纳总结,并提出未来可能的发展方向,以期为该领域的理论提升和生态风险研究提供依据和支持。

1 土地利用生态风险评价方法

1.1 土地利用生态风险评价模型

土地利用生态风险的评价模型可实现评价结果的定量化表达,是影响评价结果准确性的关键。目前,在土地利用生态风险评价中,相对风险模型(RRM)和 $R=P \times D$ 模型应用最为广泛。相对风险模型(RRM)是由Landis等^[19]提出,具有综合性、系统性和直观性,在区域生态风险评价研究中应用广泛^[20,21],模型通过分析各个风险单元内部因子的风险贡献程度,综合风险源、生境和风险受体对区域生态风险进行定量评价^[22,23]。一些学者基于RRM开展土地利用生态风险评价研究,取得了一些积极成果。如李晓敏等^[24]运用RRM构建了广东省川山群岛开发利用的生态风险评价模型,认为不同压力源及生境类型所存在的风险差异明显,需关注关键因子的潜在风险压力;Guo等^[25]采用RRM对矿业城市大冶进行了区域土地生态风险评价,根据子区域不同的生态风险特征,提出在评价和管理过程中应有相应的侧重。 $R=P \times D$ 模型源于区域生态风险评价,其中 R 为生态风险值, P 为风险发生的概率, D 为生态风险可能造成的损失^[26]。该方法一般通过计算景观损失度来构建土地利用生态风险模型,景观损失度通常由干扰度和脆弱度表征^[27,28],可将某一区域生态风险的时空变化特征进行空间化表达,便于长时间序列的生态风险研究。除运用景观指数外,该模型也可在风险评价指标的选取时考虑自然地理环境、气候变化和人类社会影响等多重因子。如刘焱序等^[29]通过“潜力—连通度—恢复力”三维框架,结合有序加权平均法对深圳市景观生态风险进行了情景模拟,为不同偏好下的城市开发提供了个性化决策指导;周启刚等^[30]和刘迪等^[31]分别通过“压力—状态—响应”(PSR)和“风险概率—敏感性—损失度”框架(PSI)构建以自然和人为因素为基础的生态风险评价框架,针对不同区域的土地利用生态风险进行了较综合的评价。

RRM和 $R=P \times D$ 是目前相关研究中运用最广泛的两类模型。RRM能够联系区域内部多种与土地利用相关的生态风险影响,准确识别其内部的主要生态威胁因素,便于后期确定管理行为的优先次序。但RRM所涉及到的变量较多,变量间关系十分复杂,在数据获取上困难较大,且生态风险的空间表达能力不足。 $R=P \times D$ 模型能深入表达生态风险的空间分布特征,并在多时序生态风险空间表达上弥补RRM的不足。尤其是在运用景观指数评价生态风险时, $R=P \times D$ 模型可从时间和空间上分析生态系统对自然和人类共同作用

下土地利用格局变化的累积影响,表达生态系统在时间序列上的空间异质性变迁。两类模型也存在共同的不足,即不同区域评价结果的可比性较差,所得到的生态风险是一种相对风险,仅可用于研究区域内部风险单元间生态风险大小和等级的比较。该问题导致不同评价研究之间无法比较,如何解决此问题在未来的土地利用生态风险评价研究中十分关键。随着土地利用生态风险研究的不断深入,评价方法和评价模型更加多样化,如基于生态系统服务价值评价土地利用生态风险^[32],将生态系统服务价值纳入评价指标体系,同时结合景观格局指数^[33]和生态系统健康^[34]的研究也逐渐增多,土地利用生态风险评价结果的合理性也在不断提高。

1.2 土地利用生态风险空间表达

生态风险的量化和空间表达能够提高评价结果的可视化程度,便于分析土地利用生态风险的时空特征。其中,风险单元划分是实现生态风险空间表达的基础工作。常用的方法有:(1)以行政边界划分风险单元,此方法多用于人类活动密集区域,便于土地利用生态风险管理措施的制定和实施;(2)以地貌、流域等自然地理边界划分风险单元,该方法在相对完整的生态区域内确定风险单元划分,风险单元内部的生态系统和景观结构具有高度的同质性;(3)网格法,该方法按照一定的粒度将研究区划分为面积相等的网格,以网格为风险单元计算生态风险指数值。在基于景观指数评价生态风险的研究中,一般以斑块平均面积的2~5倍定义网格划分尺度^[35,36]。此方法未考虑自然景观分布状况,不能保证自然要素的完整性,但便于进行空间插值以得到连续的风险分布图,因此目前运用较为普遍。由于尺度效应的存在,土地利用生态风险单元的划分对最终风险评价结果具有重要影响。

揭示生态风险的空间分布特征是生态风险评价的核心内容,而将所得风险值进行空间表达是分析生态风险空间分布规律的基础。常用的方法是借助地理信息系统软件进行图层叠加或采用空间统计学方法。图层叠加主要用于多风险指标体系的图示化表达,空间统计学方法常用来分析相邻区域的生态风险空间分布特性。Moran's I 是空间统计学中重要的空间自相关指标,可反映全局空间自相关性^[37]。表征区域生态风险在空间上的异质性规律时主要采用半方差分析^[38,39],其中的块金值、基台值可分析随机因素引起的空间异质性的占比,反映土地利用生态风险指数空间相关性的强弱,表达局部空间自相关性,并得到较准确的区域生态风险分布图。

图示化是土地利用生态风险空间表达的主要形式。通过地理信息系统将量化的数据转化为图表,可以更直观简洁地反映土地利用生态风险的空间分布及时间演化规律,从而确定生态风险亟待关注的重点区域。目前,图示化表达仍然存在不少问题,例如,在图层叠加时对各图层的权重赋值存在着较大的主观性,一些学者对此进行了相关研究^[40],但仍然是土地利用生态风险评价中的一个突出问题。

1.3 土地利用生态风险评价不确定性分析

土地利用生态风险评价存在较大的不确定性。不确定性分析既可以分析评价条件对结果的影响程度,又可以验证评价结果的可靠性,是土地利用生态风险评价的重要组成部分^[41]。目前不确定性分析的方法主要有蒙特卡罗法、泰勒简化方法、概率数方法、专家判断法以及灵敏度分析、置信区间法等方法^[42]。其中采用最多的为蒙特卡罗模拟方法,该方法便于人们了解不同评价参数对评价目标变量的综合影响,发现目标变量最终

结果的统计特性^[43]。赵源等^[44]运用蒙特卡洛模拟方法对相对风险模型评价中的响应系数取值进行了模拟，各风险单元风险模拟值与研究中得到的评价结果基本吻合，验证了评价的准确性。Bartolo等^[21]利用区间数学和敏感性分析，探讨澳大利亚热带河流域生态风险评估中不确定性的主要来源，提出可采用蒙特卡罗模拟结合空间数据的使用，改进不确定性的评价方法。

权重赋值是土地利用生态风险评价的关键环节，也是不确定性的主要来源。在景观脆弱度、不同风险源的重要性及生态风险损失度指数的确定等过程中，都存在权重赋值问题。如Lu等^[6]通过熵值法对郑州市区域生态风险评价中的人类贡献进行权重赋值；吕乐婷等^[35]、徐建昭等^[45]通过参考相关文献以及专家打分法确定不同土地利用类型的风险损失度和景观类型的脆弱度指数等。不同的权重赋值方法得到的评价结果有所差异，针对权重赋值进行相应的不确定性分析，可以增加评价结果的准确性。

不确定性贯穿于土地利用生态风险评价的整个过程，在数据质量、尺度选择、单元划分及权重赋值等多个环节上存在的问题均可导致评价结果的不确定性。目前对土地利用生态风险评价不确定性的研究十分薄弱，只有相对风险模型（RRM）有少量的明确分析过程，其他评价模型鲜有涉及。尤其对于权重赋值不确定性研究的不充分在一定程度上降低了生态风险评价结果的可靠性。今后的研究需要不断丰富不确定性分析方法，注重评价过程中各个环节的不确定性分析，提高评价结果的可信度，为生态风险的防范和管理提供更加有效的决策依据。

2 土地利用生态风险管理

生态风险管理是指风险管理者根据生态风险评价过程中不同风险源的识别和风险等级的差异，针对生态风险的预警、应对和修复采取的有效防范和管理措施，从而规避和减轻生态风险^[46]。它是生态风险评价过程十分重要的组成部分，可将生态风险评价结果与区域法律、政治、社会、经济等复杂因素相结合，其管理结果又可对下一轮的风险评价提供依据^[47]。土地利用生态风险管理是生态风险管理的一个方面，重点针对土地利用活动产生的生态风险采取相应的防范措施和管理对策，包括分析风险消减的费用和效益，确定可接受的生态风险度和最大生态损失水平等。

目前，土地利用生态风险管理的方法体系尚未建立，研究工作仍处于定性描述阶段，多是以土地利用生态风险的评价结果为基础，提出相应的风险管理建议。因此，建立并完善土地利用生态风险管理的基本框架是重要的研究方向。这方面可以借鉴一般生态风险管理的研究成果。如周平等^[46]针对区域生态风险管理提出了风险来临前的动态监测与分级预警、风险过程中的应急决策与实时监控、风险过后的恢复重建与风险转移补偿的框架体系，并根据该框架建立信息共享平台。Wang等^[18]建立了一个针对城市生态风险评估和管理的平台，可供用户快速识别区域风险源，并通过模型预测风险可能造成的后果，对区域采取更加有效的生态风险管理对策。陈卫平等^[48]在进行城市生态风险管理研究时提出了城市生态系统的弹性管理、生态风险的动态管理与异质性管理，以及后期保障机制的实施等城市生态风险管理体制。苏超等^[49]基于模糊认知图和神经网络模型对山西盂县矿区实施了生态风险管理探究，为煤矿区建立了相对完善的生态环境管理机制。这些一般生态风险管理研究的探索为深化土地利用生态风险管理研究提供了很好的

思路和途径。土地利用生态风险管理的重要依据是土地利用生态风险评价。Kaplan等^[50]在对土耳其西部三角洲地区的生态风险研究中指出,生态风险评价可引导环境管理和决策过程,帮助决策者找出研究区域现存和未来的压力源。Tang等^[9]在建立厦门城市生态风险评价方法的过程中提出可改进生态风险评价方法和过程,使其更好地服务于生态风险管理。土地利用生态风险评价结果可使管理者了解区域生态风险空间分布规律,识别高风险与中高风险区域,以风险评价等级为基础,针对不同土地利用类型的风险源和风险时空分异规律提出切实可行的风险管理对策。土地利用管理是生态风险管理的重要途径,通过优化土地利用结构和空间布局可以有效地降低区域生态风险。Chen等^[51]通过卫星数据的分析,发现中国和印度的土地利用管理对全球绿地面积的增加贡献最大,尤其是中国保护和扩大森林面积、荒漠化防治等一系列措施产生了明显效果,这表明了实施土地管理的重要性。因此,土地利用生态风险管理应以风险评价为基础,使土地利用生态风险的防范和降低更加科学合理。同时,土地利用生态风险评价与土地利用生态风险管理可通过相互反馈加以持续改进。土地利用生态风险管理具有阶段时效性,它与土地利用生态风险评价研究的动态性相联系,可促进评价过程的良性循环。因此,协调风险评价与风险管理之间的动态关系也是未来土地利用生态风险管理研究中需要重点关注和解决的问题。

3 土地利用生态风险评价存在的问题与发展趋势

近年来土地利用生态风险评价越来越受到关注,案例研究不断增多,但目前理论与方法体系尚待完善,主要存在以下几个方面问题:(1)评价指标和评价标准不统一。土地利用生态风险评价尚无统一的指标体系,各案例中由于所选研究区域和对象的不同,其评价指标的选取也存在较大差异。即使采用同一种评价模型,如相对风险模型(RRM),其中的风险源、风险受体等指标也不完全相同。其次是缺乏统一的风险评价标准,不同区域的生态风险评价结果不具有可比性。如生态风险等级的划分一般是根据研究结果中风险值的实际分布范围确定的,而不同区域风险值的分布范围不同,划分的等级自然不同,评价结果也难以直接比较。因此,目前的土地利用生态风险评价结果只是相对的,仅可评判本区域的生态风险相对高低,无法与同类型区域横向对比,不便于生态风险的动态监测和管理。(2)评价过程不确定性较大。生态风险评价是对风险发生概率的评估,本身就存在着不确定性。除了评价指标和评价标准不统一产生的影响外,数据的可获得性和数据质量是不确定性的重要来源,如遥感影像的精度和质量、解译的准确性等。人类活动对生态系统的某些影响具有间接性和滞后性^[6],这部分难以被确定或量化的因素对生态风险评价结果也有很大影响。目前的不确定性分析方法尚不太完善,不确定性的定量分析能力不足,同样是导致评价过程不确定性较大的重要原因。(3)生态风险管理环节研究薄弱。土地利用生态风险管理尚未形成成熟的框架体系,从理论方法到具体案例的研究均不够丰富,尤其缺乏定量化研究。当前关于土地利用生态风险管理的研究多是基于风险评价结果提出相应的管理方向,未能将生态风险评价结果与国土空间规划与生态修复较好地结合,导致评价结果对管理决策的指导作用不强。

综合该领域存在的主要问题,以及国土空间规划与生态修复面临的任务,土地利用

生态风险评价研究需要把握以下几个方面的发展趋势。

3.1 关注全球变化条件下的土地利用生态风险

土地利用与覆被变化在不断改变地表景观格局的同时，对区域气候、水文、生物地球化学循环及生物多样性等生态过程与功能具有重大影响，是全球变化的主要驱动力和重要组成部分。土地利用生态风险评价对于全球变化及其影响评估提供了新思路新方法，有助于采取相应的减缓与适应策略。未来土地利用生态风险评价需要更多地与全球变化其他领域的研究相结合，如关注与温室气体排放有关的土地利用变化，包括森林砍伐、城镇扩张等，以及土地利用政策失误造成的生态风险，如毁林开荒、湿地围垦等。通过深入探讨土地利用变化影响下的区域生态风险格局演变，更好地应对全球变化产生的一系列生态问题。此外，对于一些重点区域的土地利用生态风险演变需要重点关注，如全球变化背景下“一带一路”区域的生态风险研究，可以为沿线国家的绿色发展和国家重要经济走廊的生态安全提供支撑；生态脆弱区和重要生态功能区的土地利用生态风险评价研究，包括对气候变化敏感的海岸带、农牧交错带、生物多样性重点保护区等，有助于采取合理的生态工程措施，构建生态安全屏障，优化国土空间。

3.2 重视土地利用生态风险评价在国土空间规划与生态修复中的作用

土地利用是国土空间规划与生态修复的重要基础，土地利用变化产生的现实和潜在生态风险是国土空间规划和生态修复需应对的重要问题。目前，对于土地利用生态风险评价与国土空间规划和生态修复关系的研究仍然薄弱，加强这方面的研究应该成为土地利用生态风险评价的重要方向之一。

国土空间规划的主要依据包括主体功能区划、生态功能区划和生态保护红线划定，土地利用生态风险评价可有效支持这些基础工作的实施。土地利用生态风险评价通过在科学优化空间开发，合理划定生产空间、生活空间、生态空间范围，形成生态安全的国土空间格局等方面发挥作用，从而与国土空间规划建立紧密联系。未来应注重土地利用生态风险阈值的研究，使得国土空间规划与生态修复能根据生态风险评价结果识别生态保护的重点区域和红线区域，根据生态风险等级的高低制定相应的土地利用规划等。生态修复的重要途径是生态工程建设，其中大部分生态工程涉及土地利用变化。因此，开展土地利用生态风险评价可为生态修复工作提供有力的支撑与保障。目前我国生态修复的主要区域涉及生态安全屏障功能区、重要生态功能保护区、沿海湿地、各类自然保护地等，加强这些区域的土地利用生态风险评价，重视评价过程中的不确定性分析和生态风险预测模拟，对于确定合理的生态修复时序和空间布局具有重要作用，有利于优化修复方案，提高修复效果。

3.3 加强土地利用生态风险管理研究

根据世界卫生组织（WHO）对生态风险评估框架的修改完善，生态风险管理已经被纳入生态风险评价的范畴内。但在土地利用生态风险评价中，并未明确将生态风险管理纳入其方法体系，两者之间缺乏紧密联系，这也是造成土地利用生态风险管理研究相对薄弱的重要原因。因此，加强对于土地利用生态风险管理的研究，需要在完善土地利用生态风险评价框架的过程中，重视生态风险管理的作用，包括生态风险评价结果对风险管理的支撑和服务作用，以及生态风险管理对生态风险评价的反馈作用。由于土地利用对生态系统的影响具有尺度效应，应考虑尺度效应对土地利用生态风险评价过程、评价

结果和风险管理的影响,强化不同时空尺度条件下土地利用生态风险管理措施的研究。另一方面是构建完整的土地利用生态风险管理研究方法,加强量化研究,综合考虑生态系统服务功能、经济社会发展等问题,基于土地利用生态风险评价开展生态风险管理的情景模拟,从而建立生态风险动态监测、生态风险预警与生态风险决策机制,实现土地利用生态风险的综合动态管理。

3.4 建立并完善生态风险评价与数据管理平台

生态风险评价与数据管理平台建设可完善土地利用生态风险的评价与管理,使生态风险评价更好地服务于生态风险管理,帮助环境管理部门准确理解和预测各生态因素与生态系统的关系,促进国土空间规划和生态修复工作。

生态风险评价与数据管理平台可以将土地利用变化与生态系统服务功能、经济社会发展等问题相结合,形成针对土地利用风险源和风险受体的生态风险管理信息库^[52],及以生态风险评价与管理为基础的动态监测和反馈系统,识别土地利用及其变化可能导致的生态风险,加强风险预警和防范。利用该平台评估不同区域的土地利用生态风险影响,使决策者及时、科学地评价区域生态风险并预测其发展方向,保障生态风险管理的有序进行。

当前关于土地利用生态风险的评价指标和标准不统一的问题,依据数据管理平台,可以建立统一的生态风险评估框架和方法,在区域、国家,甚至全球层面监测土地利用生态风险时空动态变化,较好地解决不同尺度不同区域评价结果可比性差的问题。此外,在统一的数据平台上,实现在数据获取、方法模型、指标体系、风险单元划分、权重赋值等评价环节的标准化,从而有效降低评价过程和评价结果的不确定性,更好地服务于生态风险管理工作。

参考文献(References):

- [1] 卢宏伟,曾光明,谢更新,等.洞庭湖流域区域生态风险评价.生态学报,2003,23(12):2520-2530.[LU H W, ZENG G M, XIE G X, et al. The regional ecological risk assessment of the Dongting Lake Watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2520-2530.]
- [2] SUTER II G W, NORTON S B, BARNTHOUSE L W. The evolution of frameworks for ecological risk assessment from the red book ancestor. *Human & Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2003, 9(5): 1349-1360.
- [3] ZHAO Y, HUANG C M, ZHANG H J. Ecological risk assessment of provincial land-use overall planning in China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2014, 20(6): 1491-1506.
- [4] 赵越,罗志军,曹丽萍,等.基于土地利用变化的鄱阳湖流域生态风险评价.江西农业大学学报,2018,40(3):635-644.[ZHAO Y, LUO Z J, CAO L P, et al. Ecological risk assessment of Poyang Lake Basin based on land use change. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, 40(3): 635-644.]
- [5] USEPA. Guidelines for Ecological Risk Assessment. Risk Assessment Forum, 1998, EPA/630/R095/002F, Washington DC.
- [6] LU Y, QIN F, CHANG Z B, et al. Regional ecological risk assessment in the Huai River Watershed during 2010-2015. *Sustainability*, 2017, 9(12): 1-14.
- [7] World Health Organization. Report on integrated risk assessment, 2001, WHO/IPCS/IRA/01/12, Geneva, Switzerland.
- [8] CHEN H, LIU J S, CAO Y, et al. Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [9] TANG L, MA W. Assessment and management of urbanization-induced ecological risks. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2018, 25(5): 383-386.
- [10] HUA L Z, LIAO J F, CHEN H X, et al. Assessment of ecological risks induced by land use and land cover changes in Xiamen city, China. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2018, 25(5): 439-447.

- [11] 朱艳景, 张彦, 高思, 等. 生态风险评价方法学研究进展与评价模型选择. 城市环境与城市生态, 2015, 28(1): 17-21. [ZHU Y J, ZHANG Y, GAO S, et al. Progress of ecological risk assessment methodology and choice of assessment models. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2015, 28(1): 17-21.]
- [12] 虞燕娜, 朱江, 吴绍华, 等. 多风险源驱动下的土地生态风险评价: 以江苏省射阳县为例. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1264-1274. [YU Y N, ZHU J, WU S H, et al. Assessment of land ecological risks driven by multi-sources: A case study of Sheyang county, Jiangsu province. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1264-1274.]
- [13] TURNER B L. The sustainability principle in global agendas: Implication understanding land use/cover change. *The Geographical Journal*, 1997, 163(2): 133-140.
- [14] 倪绍祥. 土地利用/覆被变化研究的几个问题. 自然资源学报, 2005, 20(6): 932-937. [NI S X. Some issues in the study on land use/cover change. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(6): 932-937.]
- [15] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [16] ZOU T, ZHANG J, YOSHINO K. Ecological risk assessment of land use change in the Northeast China: A case study of Linjiang area. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2016, 7(4): 312-315.
- [17] GONG J, YANG J X, TANG W 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.
- [18] WANG H W, ZHU L C, ZHAO C Y, et al. Urban ecological risk assessment management platform. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2018, 25(5): 477-482.
- [19] LANDIS W G, WIEGERS J A. Design considerations and a suggested approach for regional and comparative ecological risk assessment. *Human & Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1997, 3(3): 287-297.
- [20] HAYES E H, LANDIS W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment: Cherry Point, WA. *Human & Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2004, 10(2): 299-325.
- [21] BARTOLO R E, VANDAM R A, BAYLISS P. Regional ecological risk assessment for Australia's tropical rivers: Application of the relative risk model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2012, 18(1): 16-46.
- [22] SUTER II G W, VERMEIRE T, MUNNS W R, et al. Framework for the integration of health and ecological risk assessment. *Human & Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2003, 9(1): 281-301.
- [23] 孙洪波, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 沿江地区土地利用生态风险评价: 以长江三角洲南京地区为例. 生态学报, 2009, 30(20): 5616-5625. [SUN H B, YANG G S, SU W Z, et al. Ecological risk assessment of land use in the area along Changjiang River: A case study of Nanjing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 30(20): 5616-5625.]
- [24] 李晓敏, 张杰, 曹金芳, 等. 广东省川山群岛开发利用生态风险评价. 生态学报, 2015, 35(7): 2265-2276. [LI X M, ZHANG J, CAO J F, et al. Ecological risk assessment of exploitation and utilization in Chuanshan Archipelago, Guangdong province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2265-2276.]
- [25] GUO K, KUAI X, CHEN Y Y, et al. Risk assessment of land ecology on a regional scale: Application of the relative risk model to the mining city of Daye, China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2017, 23(3): 550-574.
- [26] 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. [ZHANG S F, LIU H M. Review of ecological risk assessment methods. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2735-2744.]
- [27] ZHANG F, YUSHANJIANG A, WANG D F. Ecological risk assessment due to land use/cover changes (LUCC) in Jinghe county, Xinjiang, China from 1990 to 2014 based on landscape patterns and spatial statistics. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(13): 491. <http://doi.org/10.1007/s12665-018-7676-z>.
- [28] YAN Y, SHI S N, HU B Q, et al. Ecological risk assessment of Guangxi Xijiang River Basin based on landscape pattern. *Ekoloji*, 2018, 27(105): 5-16.
- [29] 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. [LIU Y X, WANG Y L, PENG J, et al. Urban landscape ecological risk assessment based on the 3D framework of adaptive cycle. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1052-1067.]
- [30] 周启刚, 张晓媛, 王兆林. 基于PSR模型的三峡库区重庆段土地利用生态风险评价. 水土保持研究, 2013, 20(5): 187-192. [ZHOU Q G, ZHANG X Y, WANG Z L. Land use ecological risk evaluation of the Three Gorges Reservoir area in Chongqing based on PSR model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(5): 187-192.]
- [31] 刘迪, 陈海, 史琴琴, 等. 黄土丘陵沟壑区生态风险时空动态及其风险分区: 以陕西省米脂县为例. 自然资源学报, 2019, 34(9): 2012-2025. [LIU D, CHEN H, SHI Q Q, et al. Spatio-temporal variation of ecological risk in the Loess Hilly-gully Region and its precaution partitions: A case study of Mizhi county, Shaanxi province, China. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 2012-2025.]

- [32] LIAO J F, JIA Y Q, TANG L N, et al. Assessment of urbanization-induced ecological risks in an area with significant ecosystem services based on land use/cover change scenarios. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2018, 25(5): 448-457.
- [33] YANG X, WANG J, SUN X Q, et al. Tourism industry-driven changes in land use and ecological risk assessment at Jiuzhaigou UNESCO World Heritage Site. *Journal of Spatial Science*, 2018, 63(2): 341-358.
- [34] KANG P, CHEN W P, HOU Y, et al. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1442-1454.
- [35] 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. *生态学报*, 2018, 38(16): 1-9. [LYU L T, ZHANG J, SUN C Z, et al. Landscape ecological risk assessment of Xi River Basin based on land-use change. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 1-9.]
- [36] 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. [GONG J, ZHAO C X, XIE Y C, 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.]
- [37] 徐羽, 钟业喜, 冯兴华, 等. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局. *生态学报*, 2016, 36(23): 7850-7857. [XU Y, ZHONG Y X, FENG X H, et al. Ecological risk pattern of Poyang Lake Basin based on land use. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7850-7857.]
- [38] 田义超, 梁铭忠, 任志远. 城乡过渡区土地利用变化模拟与生态风险时空异质性特征. *环境科学研究*, 2013, 26(5): 540-548. [TIAN Y C, LIANG M Z, REN Z Y. Simulation of land use change and temporal-spatial heterogeneity of eco-risk in urban fringe. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(5): 540-548.]
- [39] 于化龙, 陈青锋, 田超, 等. 基于景观结构的土地利用生态空间特征及风险评估: 以怀来县为例. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 155-163. [YU H L, CHEN Q F, TIAN C, et al. Eco-spatial characteristics and risk evaluation of land use based on landscape structure: Taking Huailai county as an example. *Reserch of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 155-163.]
- [40] LIU Q, YANG Z, SHI H, et al. Ecological risk assessment of geohazards in Natural World Heritage Sites: An empirical analysis of Bogda, Tianshan. *Open Geosciences*, 2019, 11(1): 327-340.
- [41] 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. [MA L Y, XU X G, XU L F. Uncertainty analysis of integrated ecological risk assessment of China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 893-900.]
- [42] 王永杰, 贾东红, 孟庆宝, 等. 健康风险评价中的不确定性分析. *环境工程*, 2003, 21(6): 66-69. [WANG Y J, JIA D H, MENG Q B, et al. Uncertainty analysis of health risk assessment. *Environmental Engineering*, 2003, 21(6): 66-69.]
- [43] 王祺, 蒙吉军, 孙宁. 基于RRM模型和不确定性分析的喀斯特地区生态风险管理: 贵阳市案例研究. *山地学报*, 2016, 34(4): 476-484. [WANG Q, MENG J J, SUN N. Ecological risk management in karst area based on RRM and uncertainty analysis: A case study in Guiyang city. *Mountain Research*, 2016, 34(4): 476-484.]
- [44] 赵源, 黄成敏. 基于RRM的市级土地利用总体规划生态风险评价. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1102-1109. [ZHAO Y, HUANG C M. Ecological risk assessment of municipal-level land-use master planning based on relative risk model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1102-1109.]
- [45] 徐建昭, 郝仕龙, 王玉英. 黄土丘陵区土地利用变化及其生态风险. *水土保持通报*, 2017, 37(5): 157-162. [XU J Z, HAO S L, WANG Y Y. Land use change and ecological risk evolution in Loess Hilly Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(5): 157-162.]
- [46] 周平, 蒙吉军. 区域生态风险管理研究进展. *生态学报*, 2009, 29(4): 2097-2106. [ZHOU P, MENG J J. Progress of ecological risk management research: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2097-2106.]
- [47] 文军. 千岛湖风景区生态风险及风险管理对策研究. *地域研究与开发*, 2005, 24(3): 72-75. [WEN J. The ecological risk and risk management countermeasures of Qiandao Lake scenic area. *Areal Research and Development*, 2005, 24(3): 72-75.]
- [48] 陈卫平, 康鹏, 王美娥, 等. 城市生态风险管理关键问题与研究进展. *生态学报*, 2018, 38(14): 5224-5233. [CHEN W P, KANG P, WANG M E, et al. Review on urban ecological risk management. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 5224-5233.]
- [49] 苏超, 张红, 梁迅. 基于模糊认知图的生态风险管理探究. *生态学报*, 2014, 34(20): 5993-6001. [SU C, ZHANG H, LIANG X. Exploration of ecosystem risk management based on fuzzy cognitive map. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5993-6001.]
- [50] KAPLAN A, HEPCAN S. An examination of ecological risk assessment at landscape scale and the management plan.

- In: ILLANGASEKARE T H, MAHUTOVA K, BARICHIII J J. Decision Support for Natural Disasters and Intentional Threats to Water Security. Netherlands: Springer Netherlands, 2009: 237-251.
- [51] CHEN C, PARK T, WANG X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [52] 吕永龙, 王尘辰, 曹祥会. 城市化的生态风险及其管理. *生态学报*, 2018, 38(2): 359-370. [LYU Y L, WANG C C, CAO X H. Ecological risk of urbanization and risk management. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 359-370.]

A review on ecological risk assessment of land use

WANG Jie^{1,2}, BAI Wan-qi², TIAN Guo-hang¹

(1. College of Forestry, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China;

2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Ecological risk assessment is the foundation of prevention and control of ecological risks. Its development has experienced a process from environmental impact assessment to environmental risk assessment and then to ecological risk assessment gradually. With the further research on global change and ecological risk, more and more attention has been paid to the ecosystem risk caused by the change of land use. Therefore, ecological risk assessment of land use is also an important part of ecological risk research, which is the assessment of the possible adverse effects of the ecosystem under the direct or indirect impacts of land use. Through reviewing the existing researches, in this paper we summarize the progresses in methodology of ecological risk assessment of land use from three aspects: assessment model, spatial expression of ecological risk and uncertainty analysis. And we also expound the status and function of land use ecological risk management in land use ecological risk assessment. There exist three main problems in this field: (1) The evaluation index and standard of ecological risk assessment of land use are not unified; (2) There is great uncertainty with evaluation process and relevant result; (3) The research on ecological risk management is rather limited. The future trends of the study in this field include: (1) More attention should be paid to the ecological risk of land use under the background of global change, which needs to be more integrated with other fields of research and deal with the effect of ecological environment on global change; (2) The role of land use ecological risk assessment in land space planning and ecological restoration should be emphasized, which will give us a deep understanding of the current condition of the ecosystem and in an effort to maintain the sustainable development of the ecological environment; (3) The study of ecological risk management of land use is supposed to be strengthened, especially the link between risk management and assessment; (4) Ecological risk assessment and data management platform ought to be established and improved. It will standardize the risk index system, evaluation method and data acquisition, and reduce the uncertainty in the evaluation process effectively. What's more, our essay will enrich the theoretical system and provide related reference materials in this field.

Keywords: land use; ecological risk assessment; ecological risk management; research advance