

生物多样性保护与可持续发展背景下的生态安全

郑舒元¹, 刘国华^{1,2,3}, 万凌凡^{2,3}, 赵俊彦¹, 李佳佳¹, 左玲丽¹, 苏旭坤^{2,3*}

1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650504

2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要 总结了生态安全与生物多样性及可持续发展的关系, 以及生态安全研究的发展方向。分析表明, 生态安全研究的时效性与动态性存在不足, 同时在生态安全评价体系与评价因子未明确定义的背景下, 不同保护对象在复杂生态系统中的表现与作用难以兼顾, 故对于生态安全评估的效果与预期存在较大偏差。因此, 建议在生态安全评价研究中引入生态敏感性、生态脆弱性与生态重要性的研究策略, 进一步明确生态保护实体与对象, 提高生态安全评价的时效性, 紧扣生态系统复杂作用过程, 加强风险评估管理。同时, 建议进一步完善生态安全评价指标体系与评价方法, 综合考虑生态敏感性、生态脆弱性与生态重要性的作用与功能以及结合多种未来情景, 进行生态安全空间变化趋势预测, 以期进一步为生物多样性保护与可持续发展的现实决策提供理论依据。

关键词 生态安全; 生物多样性; 可持续发展目标; 生态敏感性; 生态脆弱性; 生态重要性

在人口快速增长与社会经济发展迅速的背景下, 全球生态环境面临着空前的压力, 水土流失、土地退化、环境污染、土地沙漠化等生态环境问题日益突出, 导致区域生物多样性急剧下降, 同时对人类生存环境与社会经济的可持续发展产生极大负

面影响。国际社会为应对这一严峻挑战, 提出并实行了多项全球性议程与计划。自1972年联合国斯德哥尔摩人类环境会议提出将环境保护纳入人类发展的重要内容以来, 1980年世界自然保护战略提出重视生物多样性与可持续利用自然资源的概

收稿日期: 2024-08-02; 修回日期: 2024-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(72394401)

作者简介: 郑舒元, 博士研究生, 研究方向为区域生态, 电子信箱: zhengshuyuan@stu.ynu.edu.cn; 苏旭坤(通信作者), 副研究员, 研究方向为生物多样性保护与生态安全, 电子信箱: xksu@rcees.ac.cn

引用格式: 郑舒元, 刘国华, 万凌凡, 等. 生物多样性保护与可持续发展背景下的生态安全[J]. 科技导报, 2024, 42(18): 46-57;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.08.01041

念,1992年里约热内卢联合国环境与发展会议中签署的《21世纪议程》与《生物多样性公约》中强调了对自然资源的可持续利用以及生物多样性的保护,2000年联合国通过的《千年宣言》中将确保环境的可持续能力作为八项千年发展目标之一,2010年生物多样性第十次缔约方大会通过了《2011—2020年生物多样性战略计划》,为全球生物多样性保护明确了时间节点与保护路线^[1],2015年联合国发展峰会提出了17项可持续发展目标(Sustainable development goals, SDGs)及169项子目标,并进一步提出包含232个指标的SDGs全球指标框架,以期能够对国家或区域开展更具时效性与客观性更强的定量评价^[2],而在2022年通过的《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》中,提出对生物多样性与生态系统服务功能重要区域进行重点恢复,对生态系统退化区域进行有效恢复,通过空间规划实现对高价值区域的保护^[3]。上述生物多样性保护与可持续发展目标的实现与生态系统的自我修复能力和稳定性直接相关,而生态安全正是对生态系统健康程度与完整性的反应,同时在生态环境条件与生态系统服务对经济发展与社会安定形成有效支撑^[4-5],维护区域生态安全对生物多样性保护与可持续发展具有重要意义。

随着可持续发展研究与生物多样性保护的深入,从最初的单一生态环境问题及外来物种入侵等角度来解释与阐述可持续发展与生物多样性保护被认为是不全面的^[6],可持续发展与生物多样性保护的决策需要根据具体区域来提供评估与决策支持^[7]。生态安全评价研究从早期针对个体与种群以及自然灾害的研究转为区域生态安全评价、生态安全格局构建^[8],现阶段生态安全评价强调评价结果的客观性、时效性以及时空尺度的变化过程,深化生态安全评价研究对可持续发展与生物多样性保护具有重要意义。马克明等^[9]认为保护和恢复生物多样性是实现生态安全的必由途径,肖笃宁等^[10]指出栖息地消失对生物的影响应作为区域生态安全分析的重要部分,黄备等^[11]基于生态安全评价的模型与思路得出了研究区生物多样性压力受干扰而

增加。生物多样性保护被认为是生态安全格局构建的首要任务^[9],随着生态安全格局研究的深入,生物多样性保护的核心已经从物种保护转为格局规划^[12],以生态源地识别、生态廊道提取、战略点选取以及生态红线划定^[13]为基础的生态安全格局建设研究为生物多样性保护提供了更为有效的途径。SDGs的提出,对于可持续发展目标的落实有了较为明确的参考^[14-15],其中,SDG6、SDG13、SDG14、SDG15被认为与生态安全高度相关^[6],在基于地理信息的SDGs量化评估体系以及综合评估方法研究有所发展的背景下^[17-18],对于SDG6.6、SDG14.5、SDG15.1.2、SDG15.4.1等指标而言,通过生态安全评估与生态安全格局构建,能够进一步针对SDGs践行目标的空间格局及区域差异进行评估与规划^[19]。对基于多源数据的SDGs目标检测与评估研究进展的总结中,归纳出生态安全评价及生态安全格局评估结果是SDG15为代表的可持续发展目标监测评估的有力支撑^[20]。区域生态安全评估、生态安全格局构建与生态脆弱性评价对生物多样性保护与可持续发展目标具有重要意义。

生态安全对于生物多样性与可持续发展至关重要,它确保了生态系统的稳定性和适应性,维持了丰富的物种和基因多样性^[21],是生物多样性保护的重要空间途径。高水平的生物多样性能够增强生态系统的抗扰动能力,使其能够应对更强的环境变化和自然灾害^[22]。同时,生态安全为人类提供了持续利用自然资源的保障,支持社会经济的可持续发展,保护生态安全不仅有利于自然环境的健康,也是实现经济繁荣和人类福祉的根本条件。为了能够更好保障区域的生物多样性,贯彻落实可持续发展目标,对区域生态质量整体状态及其变化趋势进行客观、准确的反映,根据环境污染、人类活动与自然灾害等因素开展区域生态安全评价是生物多样性保护与可持续发展背景下的重要研究内容^[23],同时也是生态学领域研究的热点,本文从生态安全、生物多样性保护与可持续发展之间的关系进行论述,进一步探讨在生物多样性保护与可持续发展背景下现阶段生态安全评价需关注的问题。

1 研究现状

1.1 生物多样性保护背景下的生态安全评价

人类活动的强度上升使得生物多样性的丧失远超以往的自然速率,区域内生物多样性降低,大面积单一群落的形成会使得区域内原有物质平衡被打破,土壤水分、化学物质等条件的改变使得物种多样性、遗传多样性受到影响,进而引发生态环境问题^[24],生物多样性安全作为生态安全的主体对象,确保区域生物多样性,使得生态系统服务能力破坏值不超过最低限度是区域生态安全的重要内容^[8]。因此,生物多样性是生态安全的基础,是维持基本生态过程与生命系统的物质基础,保护与恢复生物多样性是实现区域生态安全的必由途径。

早期生物多样性保护背景下的生态安全研究主要致力于解决外来入侵生物的问题,主要针对单一物种进行防治,同时通过定性评估对外来物种容易侵入的区域进行重点监测与保护,对入侵物种的传入与扩散机制探讨较少^[22]。张洁瑜等^[25]在鄱阳湖地区物种多样性研究的基础上,考虑生物多样性保护过程中影响景观格局变化的驱动力因子以提出不同程度生态安全格局设计方案,是将生物多样性保护与湿地生态安全格局构建相结合的案例;李文杰等^[26]认为基于遥感(remote sensing, RS)与地理信息系统(geographic information system, GIS)技术与数据的发展,应进一步对生态安全评价与生物多样性保护研究的耦合机制进行研究,加强生物多样性保护背景下生态安全评估的时空特征。随着空间分析技术的发展与生态规划空间尺度上升,生物多样性保护的着眼点由物种、种群逐渐上升为生态系统与景观,学者们从生态源地识别、生态廊道提取、生态红线划定的角度^[13]对生物多样性保护决策与规划提供了参考。建设生态安全格局对生物多样性保护起到直接的促进作用,其通过分析区域生态环境问题,优化空间格局,从区域尺度对生物多样性进行保护与恢复,从生态系统整体的角度对生物多样性提供了保护。由于生物多样性保护与生态安全是相互促进的关系,有学者从生物多样性保护的视角下对区域生态安全进行评估^[27],将生物多

样性保护纳入评价体系以构建生态安全格局,从保证区域的生物多样性的角度进一步确保了生态系统功能的完整性与稳定性,也增强了生态系统的适应能力,使其能够更有效应对环境变化与压力,其对于生态安全奠定了基础,进而维护人类社会的福祉与发展。

1.2 可持续发展背景下的生态安全评价

生态安全与可持续发展的讨论最早可追溯到1987年的报告《我们共同的未来》中,报告中指出“和平和安全问题的某些方面与可持续发展的概念是直接有关的。实际上,他们是可持续发展的核心”,随着可持续目标的提出与发展,可持续发展已成为生态学、社会学等多学科共同关注的前沿科学问题。在早期研究中,由于生态安全是区域发展追求的目标,而由于区域具备行政概念与社会经济概念,区域生态安全受到资源生态环境压力、资源生态环境质量、资源生态环境保护整治及建设能力三方面的制约^[28],其基于驱动力-PSR生态环境系统服务的概念框架,按照层次分析法从可持续发展角度选取不同评价指标完成对区域生态安全的评价^[29]。但由于技术手段与数据的限制,该类型评价通常以行政区尺度进行开展,对于评价结果的空间特征并不直观^[30],同时由于区域差异,对于可持续发展指标的选取存在较大差异性,导致评价结果的通用性较差。2015年,联合国提出的17项SDGs及169项子目标为可持续发展定量评价提供了统一的指标体系后,大量研究虽然基于SDGs进行评价,但缺乏对地理空间信息的运用,从而缺乏对SDGs实施的区域差异以及时空效应的反应^[17]。为使评估结果具备更加可靠的时空特征,不同学者对基于地理空间视角的SDGs综合评估方法开始了研究以及讨论,对可直接用地理信息计算的SDGs指标类型进行了总结^[31],并且采用上述指标综合多源数据开展了监测评估^[20],2020年发布的《地球大数据支撑可持续发展目标报告》中对SDG2、SDG6、SDG11、SDG13、SDG14、SDG15开展了26个典型案例研究^[32],许多学者对中国推进SDGs的研究中认为SDG6、SDG13、SDG14、SDG15与生态安全高度相关,并对上述4个目标开展了一系列基于多源数据的SDGs

评价,其中包括多项生态安全评价结果及生态安全格局建设结果与其延伸运用^[32],区域生态安全评价研究是区域可持续发展评价的重要组成部分^[16]。

1.3 生物多样性保护、可持续发展与生态安全的关系

生态安全在生物多样性保护与可持续发展的背景下如何发挥作用?发挥什么样的作用?上述问题需要从理解生物多样性保护、可持续发展、生态安全三者内涵的基础上进一步去认识。生物多样性是生物及其环境形成的生态复合体,以及与此相关的各种生态过程的综合,包括生态多样性、物种多样性与遗传多样性,其表征了生态系统的复杂程度^[33],生态系统的完整性与生物多样性密不可分;而可持续发展的内涵是人类赖以生存的地球生态系统可持续性得以保障的条件下的经济活动规模与程度不被打破条件下的发展,人类赖以生存的生态系统整体在发展过程中必须得到维护;狭义的生态安全是自然与半自然生态系统的安全,即生态系统完整性与健康整体水平反应,主要对生态系统的健康状况进行研究,而广义的生态安全是指在生态环境条件与生态系统服务可以有效支撑经济发展与社会安定,保障人民生活与健康不受生态破坏损害的状态^[9]。通过对生物多样性保护、可持

续发展、生态安全3个概念的阐述,可归纳得到:可持续发展的目的是人类经济活动与发展中必须对生态系统的稳定性与可持续性进行维护,实现生态安全正是可持续发展的目标;而生态安全的内涵中包含了对生物多样性的保护,通过生态安全预测、生态风险评价、生态安全格局构建,保证生态系统中本地物种生态位,防止生境破碎化,同时防止生态系统中大量单优群落生成,对区域生态系统多样性保护、物种多样性保护、基因多样性保护的具体决策与落实提供了科学依据^[22],维持区域生态安全是区域生物多样性的保障。相对地,区域生态安全是区域可持续发展的根本,生态安全维持就是对生态系统稳定性与完整性的维持,通过构建生态安全格局、生态风险评价与生态安全预测,从而使得SDG6.3.2、SDG6.6.1、SDG11.6.2、SDG14.2.1、SDG14.5.1、SDG15.1.1、SDG15.1.2、SDG15.3.1、SDG15.4.1与SDG15.4.2^[34-35]等指标得以改善,从而推进对SDG6、SDG11、SDG14、SDG15等目标^[16]的落实,而可持续发展目标的实现对于人类社会于生态系统的发展是整体性的,意味着可持续发展目标的实现一定伴随着对于生态安全的落实。综上,生物多样性保护、可持续发展与生态安全是具有高度相关性的(图1),相互之间都起到了正向促进作用。

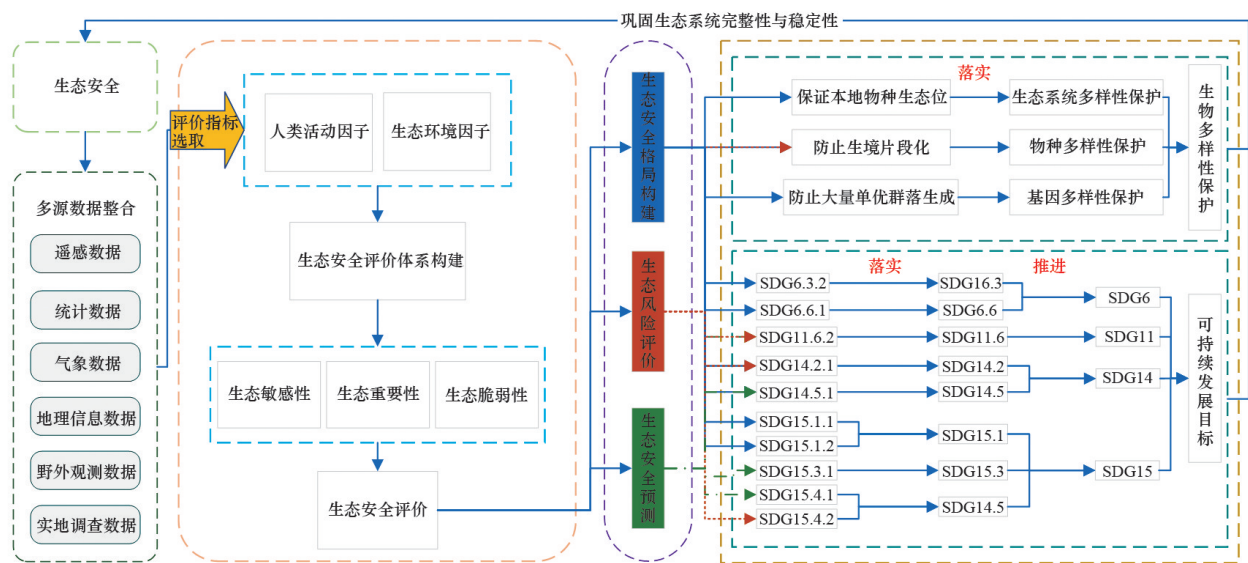


图1 生物多样性保护、可持续发展与生态安全的关系

2 生态安全研究的发展方向

在生态安全研究的初期,主要局限于化学污染物的毒理以及人体健康的风险研究,研究的尺度主要集中于个体与种群,局限于小尺度^[23]。20世纪90年代末期至21世纪初期,研究方向转变为以生态安全角度进行区域生态管理评价,以及基于生态安全角度在可持续发展、资源开发管理等方面的论述,同时水资源、地质灾害、气候变化及人类活动对生态安全的影响也开始得到讨论^[36],研究评价的范围得到进一步扩大,扩展至流域、不同景观区域、城市区域。近年来,随着生态文明和国土空间规划战略的提出与实施,要求从时间尺度与空间尺度对区域生态质量整体状态及其变化趋势进行更加客观、准确的反映,由此,生态安全评估的研究重心集中于开展区域生态风险评价以及构建生态安全格局^[37]。但在近期的研究中指出,在传统评价体系中,由于生态系统的复杂性和不确定性,不同保护

对象在复杂生态系统中的表现与作用难以兼顾,且对于生态实体功能属性密切相关的人类福祉缺乏考虑,对于生态安全评价的主体由传统的景观逐渐上升为生态系统服务,同时评估对象逐渐上升为对于区域生态安全的综合评估^[37]。

当前的生态安全评价研究中,主要基于自然环境-社会经济等一系列相对静态的要素组合,但该研究方法不能明确反映生态系统整体性、系统性的特征,并未真正抓住生态安全的核心问题,对生态系统层面上的动态特征反应程度较差,并不利于保障生态安全。为明确生态保护实体与对象,提高生态安全评价的时效性,紧扣生态系统复杂作用过程,加强风险评估管理,进一步为生物多样性保护与可持续发展的实际决策提供明确科学依据,将生态敏感性、生态脆弱性与生态重要性引入生态安全评估是当前生态风险评估的热点、难点与新思路,而围绕生态敏感性、生态脆弱性、生态重要性在生态安全评价中的应用需予以讨论(表1)。

表1 生态敏感性、生态脆弱性与生态重要性概念及意义

评价内容	概念及意义	文献
生态敏感性	衡量生态环境问题发生的难易程度和可能性大小,反映了生态系统不稳定的程度以及环境问题发生的概率,生态敏感性高的区域为生态环境问题易发区	[38]、[39]
生态脆弱性	在特定时空尺度生态系统相对于外界干扰所表现出的生态响应及自我恢复能力,若生态系统承载压力超过其生态阈值会导致生态系统逆向发展,且难以恢复其原有自然属性	[40]、[41]
生态重要性	指某个地区在土壤侵蚀敏感性和生物多样性等多因子综合影响下对维持区域生态安全的重要程度,生态保护重要性高的地区在受到人类不合理干扰时容易产生生态问题	[42]~[44]

2.1 生态敏感性在生态安全研究中的应用

2.1.1 生态敏感性概念与研究发展

生态敏感性是衡量生态环境问题发生的难易程度和可能性大小,是用来反应生态系统对人类活动干扰和自然环境变化反应程度的指标^[38],反映生态系统不稳定的程度以及环境问题发生的概率,后续研究中^[39]将生态敏感性进一步阐述为在生态环境质量不受损失或降低的前提下,生态因子对外部压力或外界干扰的适应能力。生态敏感性的概念可追溯到生态设计规划之父 McHarg 的《Design with Nature》中,其将土壤学、气象学、地质学和水

资源学等综合学科运用到流域、农田、海岸带等的综合开发规划中^[42]。21世纪以来,随着硬件设备与GIS技术的快速发展,国内外学者对于生态敏感性的评估对象与评估范围进一步拓宽,生态敏感性不再局限于单一的生态安全问题评估,且相比于早期的单因子生态敏感性分析,逐渐演变为多因子综合评估模型,此阶段生态敏感性研究对象大致分为3类^[45-48]:(1)针对某一单一生态环境问题的敏感度分析^[47];(2)场地景观生态敏感性分析^[48];(3)针对城市生态敏感性进行分析^[49]。同时,经过大量学者分析研究后,归纳出了一套相对具有普适性的生态

敏感性评价方法^[43],其核心共4部分:(1) 指标选取,即为分析对象生态敏感性因子选择,可归纳为自然因素与人为因素两大类;(2) 单因子生态敏感性评价,基于不同生态环境问题形成的机制,选取直接影响该问题的生态因子;(3) 生态环境问题敏感性评价,在单因子得出的环境敏感性的基础上综合反应目标区域的变异;(4) 生态综合敏感性评价,综合考虑各生态环境问题,采取最大值方法,计算不同空间单元生态敏感性综合指数。

近年来,在中国开展生态文明战略的背景下,识别区域生态环境问题的时空分布格局,以及指出需要开展生态环境保护的重点区域受到学者重视,部分学者围绕2015年生态环境部印发的《全国生态功能区划(修编版)》中所阐述的水土流失敏感性、沙漠化敏感性、冻融侵蚀敏感性、石漠化敏感性进行生态敏感性计算指标选取,但该文件中未给出上述生态问题敏感度计算的具体参考指标,由此产生了选择相同的生态问题计算敏感度,但不同研究中选取的指标仍有较大差异的问题。2017年生态环境部印发的《生态保护红线划定指南》中,定义陆地生态环境敏感性评估主要包括水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性、盐渍化敏感性,并给出了具体的参考计算指标,一定程度上规范了对于陆地生态环境敏感性的计算体系,但因为不同地域生态环境问题存在差异,该计算体系不能全面、客观描述不同区域生态敏感性,且部分学者提出人类活动对生态环境造成的压力也是生态环境问题产生的重要因素,从而提出从自然因素与人类活动2个方面进一步综合考虑生态敏感性的计算,应在今后的研究中做出进一步讨论。

2.1.2 生态敏感性评价体系构建

早期,国外学者在开展生态敏感性相关研究时,由于研究对象主要针对单一的生态环境敏感度进行分析,其生态敏感性指标多围绕研究对象展开选取,其普适性较低,评价因子的选择与生态综合敏感度的计算未构成体系。康秀亮等^[43]总结出在构建生态系统敏感度指标体系时应遵循如下原则:(1) 科学性原则,选择评价指标时,指标概念必须明确且具备科学内涵;(2) 主成分性原则,应选取

数目足够少但最能标准该系统本质行为的最主要成分的指标;(3) 定性与定量相结合原则,指标要尽可能量化,对于受限于研究现状而难以量化却又意义重大的指标可用定性指标进行描述;(4) 可操作性原则,指标必须具有一定显示统计基础、可比性、可测性;(5) 简洁与聚合的原则,简洁的指标易于使用,同时聚合有助于全面解决问题,后续研究多为遵循该原则选取评价指标。

生态敏感性评价指标又可归纳为自然因素与人为因素2类^[50]。自然因素造成的敏感性主要指自然环境的变化导致生态系统发展不利,影响生态系统敏感度的自然因子很多,例如植被覆盖、土壤、地质、地形等指标。人为因素的表现形式主要是人类对环境资源的不合理开发应用,例如过度放牧、过度垦殖、污染物排放等^[51],由于人为因素在不同地区差异性过大,且不同地域存在不同人为因素导致的问题,故目前没有可靠性较强的指标选择参考。

由于各因子对生态系统敏感性的影响程度不同,评价时必须确定各指标在整个评价体系中的权重,而确定权重的方法主要分为主观判断和数学方法等,早期最常用的方法为专家咨询法与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP),但近期研究认为主观判断人为因素干扰性太大,且国外开展相关研究时,最常用的是基于数理分析的客观权重选择法,最常用的客观分析法有主成分分析法(principal component analysis, PCA)^[52]、模糊物元法^[53]、层次分析法^[54]、德尔菲法^[55]和熵值法^[56]。然而这些方法仍然存在不足之处。PCA方法对变量的要求较高;AHP和德尔菲法缺乏客观性;熵值法忽略了变量之间的相互作用^[57]。在进行区域生态敏感性评估时,应根据研究对象的特点选择合适的权重确定方法。

综上,虽然生态敏感性评价体系在评价指标的选取以及定权2个环境还未有较为权威的参考对象,但其评价框架及流程基本已经确定,具体步骤为:(1) 评价指标选取;(2) 相关数据收集;(3) 建立各生态指标数据库;(4) 单因子敏感度评价;(5) 各生态问题环境敏感度评价;(6) 区域生态系统敏感度综合评价。

2.2 生态脆弱性在生态安全研究中的应用

2.2.1 生态脆弱性概念与研究发展

生态系统脆弱性涉及的学科主要为自然生态系统、社会系统、社会-生态系统耦合3大类^[58],因不同学科对生态环境脆弱性的内涵阐述侧重面不同,导致学术界对生态脆弱性还没有统一的定义,但普遍认为生态脆弱性是在特定时空尺度生态系统相对于外界干扰所表现出的生态响应,从“压力-状态-响应”的角度分析,凡受较大外界压力而处于其生态阈值附近的生态系统均为脆弱生态系统,其不局限于生态交错带或生态过渡区,而是涵盖了所有生态压力接近或超过其生态阈值的生态系统^[40]。

生态脆弱性涉及的组成要素较多,其包括风险、易损性、边缘化、自然灾害、敏感性、适应能力、恢复力和弹性等^[40],其中部分要素概念存在混淆与重叠,学界目前接受的脆弱性要素包括敏感性、暴露性以及适应能力。敏感性是系统对各种灾害干扰的敏感程度,反映系统抵抗灾害干扰的能力,主要取决于系统结构的稳定性^[40];暴露性与“风险”有关,反映系统遭遇危害的程度,取决于系统在灾害事件中暴露的概率,决定了系统在灾害影响下的潜在损失大小^[41]。适应能力是可以改变和调节的潜在状态参数,包括系统本身的适应能力和人类适应2个层次,决定了系统在灾害事件中受损失的实际情况^[40]。

生态脆弱性的研究类型主要可分为专项脆弱性研究与综合脆弱性研究2种^[59]。专项脆弱性研究主要针对单一对象或领域对某一自然事件或生态安全问题的脆弱性^[41,60];而综合脆弱性的研究对象由单一系统转向复合系统,其主要应用于区域综合生态脆弱性的评价。近年来,国内外的生态脆弱性研究的研究类型主要由专项脆弱性研究转到逐步扩展到典型生态系统及其组分脆弱性的具体研究,同时也有研究对脆弱性机制进行深度分析,这些研究的结论与模型对脆弱性科学问题的进展起到了很大的推进作用。

2.2.2 生态脆弱性评价体系构建

由于生态脆弱性研究涉及学科领域较广,包含

了地学、生态学、生物学、气象学等学科领域的研究,具有很强的综合性,由于不同研究切入的角度差异,其采用的评价模型与评价指标会有很大的差异,但生态脆弱性的分析内容有相对固定的流程^[61],即:(1) 数据收集;(2) 建立评价指标体系;(3) 确定评价体系中各指标权重;(4) 根据所用模型计算脆弱度指数;(5) 脆弱性评价结果分析。目前生态脆弱性评价方法主要有2种,一是定性评价法,其在早期研究中使用较多,由归纳分析法与比较分析法2种方法组成,但其评价精度较低;其二是定量评价法,其基本思路为:(1) 构建评价指标体系;(2) 指标标准化;(3) 指标权重确定;(4) 评价结果解释与应用。以往研究中指出,生态脆弱性评价指标选取应结合研究区脆弱性特征,根据导致脆弱性的主导因素中综合选取,但全球变化影响到生态系统的各个方面,反应生态系统变化的指标多而复杂,目前衡量生态系统脆弱性的指标尚无统一标准,同时脆弱性本身的表示方法不尽相同^[59]。由于评价的角度与侧面不同,在不同区域的生态环境脆弱性评价中,同个指标体系下的二级评价指标选取也存在一定差异。

生态环境评价可分为静态评价与动态评价,静态评价即以单个时间点的指标数据为基础进行生态脆弱性评价,其评价结果侧重于分析评价的区域内不同单元之间脆弱性的空间差异性;而动态评价则是在一个时间序列上对区域的脆弱性展开评价,其评价结果侧重于分析区域内的脆弱性表征演变情况,反应其变化趋势。动态评价也可以说是对多期静态评价的深入分析,通过对不同年份的区域生态脆弱性静态评价结果进行空间叠加后可得到一个时间序列上区域生态脆弱性的空间特征分布,进一步得到不同生态脆弱性等级变化以及脆弱性等级转移情况,从而分析区域环境脆弱性的驱动因子、区域环境脆弱性的演变过程以及发展趋势。

2.3 生态重要性在生态安全研究中的应用

2.3.1 生态重要性概念与研究发展

生态重要性的概念提出的基础最早立足于生态风险评价与管理,在21世纪初期,生态安全研究开始注重生态系统及其以上水平,力求以宏观生态

学理论为指导,将单个地点或较小区域内的生态风险问题联系起来,进行区域生态风险的综合评价。生态保护重要性的讨论可追溯到2008年汶川地震重灾区生态保护重要性评价中,其阐明生态保护重要性评价是资源环境承载能力综合评估的重要指标与内容,同时指出生态保护重要性评价由生态敏感性与生态系统服务功能重要性组成^[62]。2011年,李晖等^[44]提出生态保护重要性概念,阐明生态保护重要性是指某个地区在土壤侵蚀敏感性和生物多样性等多因子综合影响下对维持区域生态安全的重要程度。生态保护重要性高的地区在受到人类不合理干扰时容易产生生态问题,应该重点关注其生态保护、恢复与建设。其是从生态系统服务功能角度进行定义,但也有学者从景观安全格局的角度出发,认为景观各生态要素对维护区域生态平衡的重要程度并不相同^[45],景观中的部分处于特殊位置的点、线、面对景观物质能量的交流起到促进或抑制作用,其对于景观安全是非常关键的。同时,有学者也认为生态重要性空间识别即为识别出对景观安全起到关键作用的点、线、面以维持生态平衡,防止生态恶化或退化^[46]。对于生态重要性的定义是采用景观角度或生态系统服务角度的讨论并不明确,故目前对生态重要性未做出统一定义。

2.3.2 生态重要性评价体系构建

对于生态重要性的评价体系,部分学者将生态系统服务功能与生态敏感性2个部分进行叠加分析^[44],对不同研究区开展了生态重要性评估,其基本思路为选取生态敏感性指标进行研究区域生态敏感性指标计算,同时计算得到研究区不同生态系统服务功能评价,通过自然断点分级法等方法,对区域生态敏感性评价结果与研究区不同生态系统服务功能评价结果由低至高赋值,通过叠加分析来获取生态重要性综合评价结果,最后根据评价结果的不同取值范围来获取研究区不同生态重要性区域的分布;也有学者直接针对研究区生物资源、水资源及营养物质保持的角度构建生态重要性评价指标体系^[63],除了评价因子的选取有所不同,其计算思路同样为在单个指标评价的基础上,将不同指标评价结果分级后赋值进行叠加分析以完成

区域生态重要性的评估;也有学者综合景观生态空间格局、生态系统服务功能、生态敏感性来进行区域生态重要性评估^[64],在分别完成生态重要性空间识别指标及权重后,同样采用分级赋值并叠加分析的思路来进行生态重要性评估。综上,生态重要性评价有如下固定流程:(1) 数据收集;(2) 建立评价指标体系;(3) 单项指标计算;(4) 单项指标分级评分;(5) 多指标叠加评定区域生态重要性。

3 生物多样性保护与可持续发展背景下生态安全评价的局限性

尽管生态安全评价研究已经有相当的理论基础与研究实例,但在现阶段的生态安全评估中,生态安全评价需要与生物多样性保护与可持续发展战略进一步深入结合。在这个过程中仍存在一些需要进一步探索的问题。

1) 在现阶段生态安全评价研究中,仍然没有一个统一、合理的指标体系与评价方法,目前主流的生态安全评价体系是基于王韩民等^[65]提出的,明确将“压力-状态-响应”框架引入生态安全评价指标体系中,“状态”包含了各项生态系统的现状指标,“压力”则反映了自然环境与经济社会要素的影响,而“响应”则代表了人类活动相关的指标。然而,对于3个维度指标的综合并无统一的方法,目前大多数研究采用的思路均为将所有指标归一化并对应不同指标赋予权重,根据最后求和所得的综合性生态指标对区域生态安全进行评价;也有根据生态足迹指标对生态安全程度进行反应,通过不同土地利用类型和对应的当量因子对生态安全进行评价。然而应凌霄等^[37]指出前者将所有指标加权求和的方式与“压力-状态-响应”框架的实际意义不能做到真正对应,因不同指标在性质与维度上存在较大偏差,而生态足迹指标等方法对于生态系统层面的特征过度简化,评价结果缺乏全面性。故在生物多样性保护与可持续发展背景下,如何构建紧扣生态安全内涵,构建具备科学性、系统性、全面性、客观性与综合性的生态安全评价指标体系与评价方法需深入探讨。

2) 目前对于生态评价体系中各项评价内容的评价因子缺乏统一选取标准,由于评价指标体系的建立涉及多个学科领域,同时需要对评价系统有足够认识,使得生态安全评价体系建立较为复杂。不同生态系统与不同尺度的生态安全分析需要使用不同的评价指标^[66],因而部分研究方法所选取的评价指标很难表征生态风险影响因素的不确定性与复杂性,导致不同研究中的评价结果互通性较低^[67]。同时,环境因子与社会因子间的平衡性需要进行深入探讨,在评价中原始数据的获取存在局限性,部分数据由于尺度不同,若不对因尺度差异带来影响进行讨论的情况下贸然对其进行综合计算,会使得生态安全评价的科学性与客观性受到质疑^[68],同时由于生态安全评价具有动态性与相对性,对于生态安全评价指标的选取时,部分静态特征较强的指标会对生态安全评价结果的实时性产生一定影响。故对如何紧贴生态安全概念内涵的同时兼顾考虑指标的动态性、平衡性、尺度一致性选取评价指标有待进一步研究。

因此,针对上述问题,需要将理论研究、实地考察等方式相结合,综合运用定点观测、遥感影像、野外采样等多源数据,加强运用大数据、人工智能、模型模拟等多种技术手段,进一步完善生态安全评价研究体系与方法。

4 展望

生态安全是生物多样性保护的基础,是可持续发展目标的重要组成部分。为使生态安全评价体系具备更强综合性与整体性,生态安全评价结果更具客观性、动态性、时效性,能够更好为生物多样性保护与可持续发展的规划决策提供科学、客观的参考依据,本研究提出3点生态安全研究在未来的展望,以期能够对相关研究的发展与深化提供参考。

1) 理论上,结合生物多样性保护与可持续发展战略,深化生态安全评价中将人类福祉与人类活动纳入评价范畴的研究。由于人类活动直接作用于生态系统,其造成的负面影响使得生态系统的完整性与稳定性降低,导致生物多样性与可持续

发展受到较大负面影响而反过来对人类福祉产生负面作用,因此将人类活动量化为不同生态安全评价指标,将其灵活纳入生态安全评价体系中,探索人类活动与生态安全的时空耦合机制对于生物多样性保护与可持续发展决策具有重要意义,需要深化相关研究。

2) 技术方法上,突破传统的生态安全评价方法,综合考虑生态敏感性、生态脆弱性与生态重要性的作用与功能,形成更加全面客观的生态安全评价技术。由于现行生态安全评价中,不同指标对于生态安全的共享难以从一而论,对于生物多样性保护与可持续发展而言,需要从多个测度综合反应区域生态安全,生物多样性退化与可持续发展阻力较大的重点区域是研究的核心内容。综合考虑生态敏感性、生态脆弱性与生态重要性对区域进行生态安全评价,对探明生物多样性保护、可持续发展与区域内重点区域的相关性有重要参考价值。

3) 应用前景上,在生物多样性保护与可持续发展背景下,结合多种未来情景,进行生态安全空间变化趋势预测。由于生态安全的动态性特征,开展区域生态安全空间变化趋势预测对制定生态建设方针与生态风险防控措施,能够对支撑区域生物多样性保护与区域可持续发展以及开展对应保护规划与决策提供时空尺度详细参考,对制定有效的区域生态环境保护措施、构建合理生态安全格局奠定理论基础。

参考文献(References)

- [1] Persson Å, Weitz N, Nilsson M. Follow-up and review of the sustainable development goals: Alignment vs. internalization[J]. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 2016, 25(1): 59-68.
- [2] Cheshmehzangi A, Dawodu A. The review of sustainable development goals (SDGs): People, perspective and planning[M]//*Sustainable Urban Development in the Age of Climate Change*. Singapore: Springer Singapore, 2018: 133-156.
- [3] Zhang S, Zhou Y Q, Yu R, et al. China's biodiversity conservation in the process of implementing the sustainable development goals (SDGs)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 338: 130595.

- [4] Liu G H. Formation and evolution mechanism of ecological security pattern in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7088-7091.
- [5] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(6): 8-20.
- [6] 苏飞, 应蓉蓉, 张慧敏, 等. 可持续性科学研究热点及其知识基础: 以 Sustainability Science 载文数据为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(9): 2764-2772.
- [7] 尹晓波. 我国可持续发展生态安全面临的挑战及对策[J]. *计划与市场探索*, 2003(2): 24-26.
- [8] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 等. 生态安全研究进展[J]. *生态学报*, 2005(4): 861-868.
- [9] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. *生态学报*, 2004(4): 761-768.
- [10] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. *应用生态学报*, 2002(3): 354-358.
- [11] 黄备, 邵君波, 孟伟杰, 等. 利用 PSR 模型的椒江河口生态系统环境质量评价[J]. *湿地科学*, 2016, 14(6): 825-831.
- [12] 曲艺, 陆明. 生物多样性保护视角下的城市生态安全格局构建研究[J]. *城市发展研究*, 2017, 24(4): 134-137.
- [13] 董文渊, 王逸之. 生态保护红线划定对云南生物多样性保护影响研究[J]. *环境科学导刊*, 2015, 34(6): 18-21.
- [14] Rosenstock T S, Lamanna C, Chesterman S, et al. When less is more: Innovations for tracking progress toward global targets[J]. *Current Opinion In Environmental Sustainability*, 2017, 26-27: 54-61.
- [15] Dizdaroglu D. The role of indicator-based sustainability assessment in policy and the decision-making process: A review and outlook[J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 1018.
- [16] 吕永龙, 王一超, 苑晶晶, 等. 关于中国推进实施可持续发展目标的若干思考[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(1): 1-9.
- [17] 陈军, 彭舒, 赵学胜, 等. 顾及地理空间视角的区域 SDGs 综合评估方法与示范[J]. *测绘学报*, 2019, 48(4): 473-479.
- [18] Kanter D R, Schwoob M H, Baethgen W E, et al. Translating the Sustainable Development Goals into action: A participatory backcasting approach for developing national agricultural transformation pathways[J]. *Global Food Security*, 2016, 10: 71-79.
- [19] Weise K, Hofer R, Franke J, et al. Wetland extent tools for SDG 6.6.1 reporting from the Satellite-based Wetland Observation Service (SWOS)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111892.
- [20] 王一超. 基于多源数据融合的可持续发展目标监测与评估研究进展[J]. *地球科学进展*, 2024, 39(2): 181-192.
- [21] Clemencon R. Is sustainable development bad for global biodiversity conservation?[J]. *Global Sustainability*, 2021, 4: e16.
- [22] 郭传友, 王中生, 方炎明. 外来种入侵与生态安全[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2003(2): 73-78.
- [23] Zhu B, Hashimoto S, Cushman S A. Navigating ecological security research over the last 30 years: A scoping review[J]. *Sustainability Science*, 2023, 18(5): 2485-2498.
- [24] Ehrenfeld J G, Scott N. Invasive species and the soil: Effects on organisms and ecosystem processes 1[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(5): 1259-1260.
- [25] 张洁瑜, 马克明. 湿地生态安全格局设计与生物多样性保护[C]. 中国科学院生物多样性委员会、国家环境保护总局自然生态保护司、国家林业局野生动植物保护司、教育部科技司、国家海洋局环境保护司, 2002: 1.
- [26] 李文杰, 张时煌. GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6674-6681.
- [27] 刘前媛, 李云鹏. 生物多样性保护视角下成都平原经济区生态安全格局构建[C]. 中国城市规划学会, 2023: 10.
- [28] 尹晓波. 区域可持续发展的生态安全评价[J]. *数量经济技术经济研究*, 2003(7): 139-144.
- [29] 蒋树芳, 胡宝清, 郑峰. 桂西石山区可持续发展的生态安全评价及跨越式发展对策[J]. *广西师范学院学报(自然科学版)*, 2003(S1): 22-26.
- [30] Scott G, Rajabifard A. Sustainable development and geospatial information: A strategic framework for integrating a global policy agenda into national geospatial capabilities[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2017, 20(2): 59-76.
- [31] 陈军, 任惠茹, 耿雯, 等. 基于地理信息的可持续发展目标(SDGs)量化评估[J]. *地理信息世界*, 2018, 25(1): 1-7.
- [32] 郭华东. 地球大数据支撑可持续发展目标报告. 2020, 中国篇[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [33] Wang W, Feng C, Liu F, et al. Biodiversity conservation in China: A review of recent studies and practices[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2020, 2: 100025.
- [34] Zhao L, Jia K, Liu X, et al. Assessment of land degradation in Inner Mongolia between 2000 and 2020 based on remote sensing data[J]. *Geography and Sustainability*, 2023, 4(2): 100-111.
- [35] Yuan B, Jia K, Xia M, et al. Using remote sensing data to evaluate the ecological restoration in Taiyuan from

- the SDGs perspective[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2023, 16(2): 4621–4645.
- [36] Liu C. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2022.
- [37] 应凌霄, 孔令桥, 肖焱, 等. 生态安全及其评价方法研究进展[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1679–1692.
- [38] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. *生态学报*, 2000(1): 10–13.
- [39] Mmingwu Z, Haijiang J, Desuo C, et al. The comparative study on the ecological sensitivity analysis in Huixian karst wetland, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 386–398.
- [40] Birkmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications[J]. *Environmental Hazards*, 2007, 7: 20–31.
- [41] Cumming G S, Barnes G, Perz S, et al. An exploratory framework for the empirical measurement of resilience [J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 975–987.
- [42] 谢花林, 李秀彬. 基于GIS的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 230–238.
- [43] 康秀亮, 刘艳红. 生态系统敏感性评价方法研究[J]. *安徽农业科学*, 2007(33): 10569–10571.
- [44] 李晖, 杨树华, 姚文璟, 等. 基于GIS的怒江流域中段生态保护重要性评价[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 947–953.
- [45] 郭怀成, 都小尚, 刘永, 等. 基于景观格局分析的区域规划环评方法[J]. *地理研究*, 2011, 30(9): 1713–1724.
- [46] 王志涛, 门明新, 崔江慧. 沽源县未利用地生态重要性空间识别及其地形梯度特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(2): 256–264.
- [47] Happer E B, Stella J C, Fremier A K. Global sensitivity analysis for complex ecological models: A case study of riparian cottonwood population dynamics[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(4): 1225–1240.
- [48] Eggermont H, Versschuren D, Audenaert L, et al. Limnological and ecological sensitivity of Rwenzori mountain lakes to climate warming[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 648(1): 123–142.
- [49] Jin X, Wei L, Wang Y, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem service functions and ecological sensitivity assessment: A case study in Fengxian County of Jiangsu Province, China[J]. *Environment Development And Sustainability*, 2021, 23(1): 563–590.
- [50] Xu A, Hu M, Shi J, et al. Construction and optimization of ecological network in inland river basin based on circuit theory, complex network and ecological sensitivity: A case study of Gansu section of Heihe River Basin[J]. *Ecological Modelling*, 2024, 488: 110578.
- [51] Guo S, Wang Y. Ecological security assessment based on ecological footprint approach in Hulunbeir Grassland, China[J]. *International Journal of Environmental Research And Public Health*, 2019, 16(23): 4805.
- [52] Wei X, Eboyo O V, Xu L, et al. Ecological sensitivity of urban agglomeration in the Guanzhong Plain, China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 4804.
- [53] Zhang J, Wang K, Chen X, et al. Combining a fuzzy matter–element model with a geographic information system in eco–environmental sensitivity and distribution of land use planning[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(4): 1206–1221.
- [54] Hu X, Ma C, Huang P, et al. Ecological vulnerability assessment based on AHP–PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection—A case of Weifang City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107464.
- [55] Song G, Li Z, Yang Y, et al. Assessment of ecological vulnerability and decision–making application for prioritizing roadside ecological restoration: A method combining geographic information system, Delphi survey and Monte Carlo simulation[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 57–65.
- [56] Shi Y, Li J, Xie M. Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 729–741.
- [57] Xu Y, Liu R, Xue C, et al. Ecological sensitivity evaluation and explanatory power analysis of the giant panda national park in China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109792.
- [58] De Lange H J, Sala S, Vighi M, et al. Ecological vulnerability in risk assessment: A review and perspectives[J]. *Science of The Total Environment*, 2010, 408(18): 3871–3879.
- [59] 杨飞, 马超, 方华军. 脆弱性研究进展: 从理论研究到综合实践[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 441–453.
- [60] Morato T, Cheung W W L, Pitcher T J. Vulnerability of seamount fish to fishing: Fuzzy analysis of life-history attributes[J]. *Journal of fish Biology*, 2006, 68(1): 209–221.
- [61] 张学玲, 余文波, 蔡海生, 等. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述[J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5970–5981.
- [62] 徐卫华, 欧阳志云, 王学志, 等. 汶川地震重灾区生态保护重要性评价与对策[J]. *生态学报*, 2008, 28(12):

- 5820–5825.
- [63] Du Y Y, Hu Y N, Yang Y, et al. Building ecological security patterns in southwestern mountainous areas based on ecological importance and ecological sensitivity: A case study of Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8241–8253.
- [64] 李明玉, 田丰昊, 董玉芝. 延龙图地区城市生态用地生态重要性空间识别与保护[J]. *地理科学*, 2016, 36(12): 1870–1876.
- [65] 王韩民, 郭玮, 程漱兰, 等. 国家生态安全: 概念、评价及对策[J]. *管理世界*, 2001(2): 149–156.
- [66] Bundy A, Gomez C, Cook A M. Scrupulous proxies: Defining and applying a rigorous framework for the selection and evaluation of a suite of ecological indicators[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 737–754.
- [67] Wen J, Hou K. Research on the progress of regional ecological security evaluation and optimization of its common limitations[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107797.
- [68] Wang W, Chen W. Study on urban land expansion evaluation index system in ecological environment security restraints[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 584–586: 474–478.

Progress in ecological security research in the context of biodiversity and sustainable development

ZHENG Shuyuan¹, LIU Guohua^{1,2,3}, WAN Lingfan^{2,3}, ZHAO Junyan¹, LI Jiajia¹, ZUO Lingli¹, SU Xukun^{2,3*}

1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650504, China
2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Given the exponential growth of the global population and the advancements in socio-economic development, ecological security has emerged as a pivotal factor for both biodiversity conservation and sustainable development strategies. Thus, this paper provides a comprehensive review of the relationship among ecological security, biodiversity conservation, and sustainable development, as well as the future directions of ecological security research. Due to the lack of clearly defined ecological security assessment systems and evaluation factors, reconciling diverse conservation objectives within intricate ecosystems poses a formidable challenge, resulting in substantial disparities between anticipated and actual ecological security assessments. To address these challenges, the integration of research strategies focusing on ecological sensitivity, vulnerability, and importance is proposed to be included into the assessment of ecological security. This approach aims to enhance the clarity of conservation entities and targets, improve the timeliness of ecological security evaluations, and strengthen risk assessment and management by establishing close links with complex ecosystem processes. Furthermore, this research critically examines the current research methods and presents future prospects for investigation in terms of improving the selection of indices and evaluation methods for ecological security. It aims to overcome traditional approaches by comprehensively considering the roles and functions of ecological sensitivity, ecological vulnerability, and ecological importance. Additionally, it seeks to predict spatial trends in ecological security by incorporating various future scenarios. This aims to provide practical decision-making references for the conservation of biodiversity and the promotion of sustainable development.

Keywords ecological security; biodiversity; sustainable development goals; ecological sensitivity; ecological vulnerability; ecological importance ●



(责任编辑 徐丽娇)