

DOI: 10.5846/stxb201708211502

张学玲, 余文波, 蔡海生, 郭晓敏. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述. 生态学报, 2018, 38(16): - .

Zhang X L, Yu W B, Cai H S, Guo X M. Review of the evaluation methods of regional eco-environmental vulnerability. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

区域生态环境脆弱性评价方法研究综述

张学玲^{1,3}, 余文波^{1,2}, 蔡海生^{1,2,*}, 郭晓敏³

1 江西农业大学 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/南昌市鄱阳湖生态重点实验室, 南昌 330045

2 江西农业大学 农村土地资源利用与保护研究中心, 南昌 330045

3 江西农业大学 江西省森林培育重点实验室, 南昌 330054

摘要: 随着社会经济的快速发展以及人口压力的不断增长, 人类活动正越来越强烈地影响着地球的生态系统平衡, 导致当前生态环境的脆弱性进一步加剧, 生态环境问题越来越突出。通过对区域生态环境脆弱性评价研究相关文献资料整理, 认为生态环境脆弱性是个相对的概念, 受到自然地理条件因素、系统自身恢复能力、人为活动干扰因素等多重影响, 是自然因素和人为因素共同作用的结果。论文结合生态环境脆弱性内涵表征及其评价的主要内容、评价指标选取及体系构建、评价方法及分析模型等方面的研究, 分析了生态脆弱性评价研究领域的发展状况及其不同区域指标体系和评价方法的差异, 讨论了在研究理论方法的创新、评价指标体系及计算模型的构建、自然因素和人为因素评判的定量分析描述、评价结果的应用研究等方面仍存在问题, 并结合评价模型构建、数据处理分析的有效性、评价结果应用等方面分析了生态环境脆弱性评价研究的发展趋势。总体认为, 区域生态环境脆弱性评价在未来研究中: 研究思路需要进一步突出综合系统性; 数据处理需要进一步突出时空动态性; 研究方法需要进一步突出学科融合性; 研究结果需要进一步突出实践应用性。

关键词: 生态环境; 脆弱性评价; 区域; 研究综述

Review of the evaluation methods of regional eco-environmental vulnerability

ZHANG XueLing^{1,3}, YU WenBo^{1,2}, CAI HaiSheng^{1,2,*}, Guo Xiaomin³

1 Ecology Key Laboratory of Po-yang Lake watershed in Jiangxi Province/Ecology Key Laboratory of Po-yang Lake in Nanchang, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 Research center of Rural Land Resource Utilization and Protection, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

3 Key laboratory of forest cultivation in Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330054, China

Abstract: With the rapid development of world economy and the growth of global population pressure, human activities have been more and more strongly affecting the balance of ecosystem, which increased the vulnerability of environment and aggravated the environmental problems. By reviewing relevant literatures focusing on evaluation the vulnerability of regional eco-environment, it appears that ecological environment vulnerability is a relative concept, affected by multiple interfering factors, such as natural geography, ecosystem restoration ability, and human activities, and that it is the result of the combination of natural and human factors. The paper combined with the study on ecological environment vulnerability including its connotation and characterization and main content of evaluation, evaluation index selection and system construction, evaluation method and analysis model. The paper analyzed the development status in the field of evaluation study on ecological vulnerability, and the difference of index system and evaluation method among different regions of the world. It pointed out the existing problems in many aspects, such as innovation of theoretical methods, construction of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660140, 31560150, 31360177); 江西省自然科学基金 (20161BAB204180); 江西省科技计划项目 (20144BBF60002); 江西省教育厅科技项目 (GJJ12218)

收稿日期: 2017-08-21; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caihsh@263.net

evaluation index system and calculation model, quantitative analysis description of the natural factors and human factors evaluation, application of evaluation results. In this paper, the trend of eco-environmental vulnerability evaluation was analyzed based on the evaluation model construction, validity of data processing analysis, and application of evaluation results. To summarize, the research ideas need to be more comprehensive and systematic, the spatiotemporal dynamics have to be highlighted during data processing, the research methods should further highlight the interdisciplinary integration, and the results obtained from these studies need to be more practical and applicable.

Key Words: ecological environment; fragility evaluation; region; research review

人类的一切生产和生活既依赖于生态环境,同时又影响着生态环境的发展变化。对生态环境科学认识评价和合理优化调控,既是资源环境领域研究的热点问题,又是生态进步认知、生态经济发展和生态文明建设的迫切需求^[1]。因此,科学认识生态环境脆弱性并进行有效的土地生态管控,合理利用土地资源,促进区域社会经济和人口、资源环境协调发展,已成为生态环境建设面临的紧迫而又艰巨的任务^[2-3]。自 1972 年斯德哥尔摩“联合国人类环境会议”世界各国政府代表第一次在一起讨论生态环境问题以来,已经过去了将近半个世纪,人类的目光就从未离开过这个事关人类生存与发展的主题,可持续发展战略、全球气候变化框架条约、新千年生态系统评估、生态优先战略、生态文明建设等一个个重大事件,无不与之息息相关。国内外相关领域的专家学者,也随着生态脆弱性研究的理论方法、数据获取、科技手段的更新发展,实现了从专题研究向综合研究、从单一方法向方法集成、从数理模型分析向 3S 空间分析等转变,将生态环境脆弱性研究不断推向深入。国内方面,徐庆勇等基于 RS 和 GIS 技术,利用空间主成分分析法,对珠江三角洲 2004—2008 年进行了生态脆弱性定量评价^[4];韦晶等基于 SRP 模型,对三江源地区的生态环境进行了定量分析及评价^[5];卢亚灵等以环渤海地区五省市为研究对象,利用主成分分析法做相关性分析,对该地区生态脆弱性及其空间自相关进行了系统分析^[6];蔡海生等在分析生态环境脆弱性的内涵和机理的基础上,提出生态环境脆弱性具有复合性、动态性、相对性和可控性等表现特征,并对生态环境脆弱性静态评价和动态评价进行比较分析^[7]。国外方面,Lamsal 等从气候变化对尼泊尔的地形、海拔等变化角度出发,分析气候变化对森林和淡水湿地生态系统的脆弱性影响^[8];Preston 等认为气候变化背景下的脆弱性评价,涉及到“评估的目的是什么”“脆弱性评价体系如何构建”“评价的技术方法”“谁参与评价,以及如何利用评价结果来促进社会经济发展”等 4 个关键问题^[9];Kienberger 等通过建立弹性和适应性来解决生态脆弱性的空间和时间变异性的挑战,提出了时空尺度和概念的框架:“脆弱性立方体”理念^[10];Malik 等从每个区域对气候变化的生态暴露度、人口对气候变化的敏感性、特定地区居住人口的适应能力等三方面构建加权气候变化脆弱性指数,分析气候变化的各种潜在健康影响因素^[11];Salvati 基于 ESA 方法从气候质量、土壤质量、植被质量、土地管理质量四方面建立评价体系,对意大利土地脆弱性演变及土地潜在的退化能力进行了空间分析评价^[12];Girard 等从气候对自然及人类系统的敏感性及其适应能力进行了评价^[13];Pham 等基于 RF、LMT、BFD、CART 等决策树的机器学习方法选取了 16 个条件因素对 Pauri Garhwal 地区土地敏感性进行评估对比分析,表明 RF 模型预测最佳,其次为 LMT、BFD 和 CART 模型^[14];Riedel 采用 WOVA 方法并入重要性权重及 ORNESS 值来扩展重要性权重,为复合脆弱性指数提供了新的方法尝试,对美国未来洪水脆弱性进行了分析^[15]。综上所述,针对生态脆弱性研究,研究区域从省域尺度到县域^[16-18]、从湖泊到流域^[19-20]、从地区到经济带到全球变化^[21-22],研究方法有模糊综合决策分析法和 AHP 结合、GIS 和 K-means 聚类分析方法、模糊多属性方法(FMA)和 GIS 空间分析方法、3S 技术方法、机器学习方法等等^[23-26],研究区域范围涵盖之广、尺度之大,研究方法、途径多样,表明区域生态环境脆弱性研究因与人类的“三生空间”联系密切而越来越走向研究常态化。

生态环境脆弱性受到自然条件、人为干扰等诸多因素的干扰,具有类型多、范围广、时空演变快等特点,成为 21 世纪土地资源和生态环境可持续利用的重要障碍。国家严格执行生态优先发展战略,出台了耕地保护红线、水资源保护红线、生态保护红线、城市开发边界线等管控措施,为实现资源生态可持续利用和社会经济

可持续发展助力。然而,尽管国内外许多专家学者针对生态环境脆弱性进行了非常广泛而有成效的研究,但至今尚未形成一个评价范式。进一步综合国际国内生态脆弱性研究方法,从生态环境脆弱性评价研究对象、评价指标选择和体系构建、计算方法模型、评价结果应用等方面,分析脆弱性评价研究的现状以及存在的问题,探讨未来的研究思路及其发展趋势,对于土地开发利用、国土空间管控和生态文明建设等都具有非常重要的指导意义。

1 区域生态环境脆弱性内涵及其表征

1.1 区域生态环境脆弱性内涵分析

脆弱生态环境分布广泛、类型多样、敏感性强,在外力作用下容易受到干扰,失去原有的系统平衡向不利于人类利用的方向发展,进而影响相应尺度的区域甚至全球生态环境和社会经济发展。生态脆弱性评价作为生态学研究的重要内容之一,是在全球生态环境现状与演变研究基础上的进一步深化,是科学认知生态脆弱性现状表征、驱动机理、演变过程、发展趋势的重要途径^[27]。1988年在布达佩斯的第七届环境科学委员会(SCOPE)大会上,首次确认了生态脆弱带的概念,此后针对生态环境脆弱性的研究日渐活跃。

生态环境脆弱性涉及了生态学、地理学、土地科学、环境科学等众多学科,所以针对生态环境脆弱性内涵的认识也各有侧重。赵珂等认为生态脆弱性突出表现为生态系统偏离原本良好的稳定状态,因受外界人为干扰后表现出生态系统的不稳定性^[28];赵桂久等认为生态脆弱性是生态系统在特定时空尺度下相对于干扰而具有的敏感和恢复反应状态,是生态系统自身属性在外界干扰作用下的表现^[29];徐广才等认为生态环境脆弱性应从暴露、敏感性、适应性三方面来分析,首先生态系统受到气候变化的影响,其次受到气候变化影响后对生态系统产生的有利或有害的难易及灵敏程度,最后是自然及人类活动对其采取的影响措施^[30]。虽然学术界针对生态脆弱性还没有统一的定义,但普遍认为:一是生态环境自身内部的生态系统引起的内在脆弱性,如气候变化、滑坡、地震、泥石流等;二是由于人类活动干扰所引起的外在脆弱性,如不合理的人类活动、过度的土地开发利用等对生态系统的破坏,引发诸如荒漠化、沙尘暴、水土流失等问题。

总之,生态环境脆弱性是个相对的概念,是自然因素和人为因素共同作用的结果,无论其发展成因、表现形式和脆弱程度如何,都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,只要它易于向生态退化或环境恶化的方向发展,就应视为脆弱,当干扰超过了生态环境的承受能力和自恢复能力,就可能会出现生态脆弱症状。

1.2 区域生态环境脆弱性表征分析

生态环境脆弱性表征主要包括植被退化、土地适宜性降低、水土流失、地质灾害、荒漠化、盐碱化、环境污染加剧、灾害频度和强度增大、生物多样性退化等。不同时空区域,生态环境脆弱性主导驱动因素及其表征存在很大的差异。陈美球等从地质基础、地形地貌、土壤类型、气候条件、植被因素、水文因素等6个方面对鄱阳湖区进行了自然脆弱性综合评价^[31];徐庆勇等认为影响珠江三角洲地区生态环境脆弱性的原因是海拔低、暴雨日数多、污染严重、土地利用变化大等4大特征^[4];韦晶等认为三江源地区本身的自然生态环境脆弱是导致区域大规模脆弱的主要原因,人为活动明显加重了脆弱程度^[5];蔡海生等从水土流失、河流水质、森林覆盖率、环境保护和治理、生态建设和生物多样性保护、人口增长压力、社会经济发展等6个方面,分析了江西省域生态环境脆弱性特征^[32]。Shao H等基于SPCA选取指标体系,通过计算得出影响安宁河流域的主要原因是人为因素,社会经济因素和“天然林保护”、“绿色粮食”等环保政策等^[3];Jabbar利用3S技术分析地表变化情况,然后通过选取土地退化指标结合GIS技术对区域生态环境进行变化分析,结果表明风蚀是影响South part of Iraq生态环境恶化的主要原因^[33];Xiaolei Z等从自然因素、经济因素、社会因素等3方面选取了17个指标计算EEV值,并利用EEV值和影响因子进行多元线性回归得到方程,分析影响因素的贡献程度,最后表明在青藏高原东北缘生态环境恶化的过程中,自然因素的作用强于经济因素和社会因素^[34]。

综合上述研究,区域生态环境脆弱性具体表征主要来自3个方面:(1)自然地理条件因素:不少地区由于

海拔高低影响、森林覆盖率低、气候干旱、地质灾害带、生态系统的稳定性差等,直接导致生态环境系统脆弱;(2)系统自身恢复能力:一般生态系统有着潜在脆弱性和再生性特点,脆弱生态系统自我恢复能力比较弱,如果受外力干扰突破了其生态阈值、打破了其生态平衡,若想恢复其生态功能难度极大;(3)人为活动干扰因素:人口密度及经济发展能源需求量超过资源承载力时,容易产生森林过度砍伐、过度利用水资源、随意排污等资源不合理利用,导致土地退化、生态环境污染等问题,生态环境极容易恶化。

2 区域生态环境脆弱性评价指标选取及体系构建

2.1 生态环境脆弱性评价指标选取

生态脆弱性评价指标选取应结合研究区脆弱性表征,从导致脆弱性的主导因素中科学选取。一般情况下,地形、地貌、气候、水文、土壤、地质等可作为潜在(内在)脆弱因子,植被覆盖、土壤侵蚀、土地利用、社会经济等可以作为胁迫(外在)脆弱因子。综合比较不同区域生态环境脆弱性评价指标选取情况如表1所示:

表1 生态环境脆弱性评价指标选取比较

Table 1 Index selection of ecological environment vulnerability evaluation

选取指标 The first grade indicators		评价模式 The evaluation model	研究区域实例 The study area instance	作者代表 The author represents
一级指标 Level indicators	二级指标 The secondary indicators			
自然要素脆弱性、社会要素脆弱性	热量水分气候、地形起伏度、土壤侵蚀、水土流失敏感性、草地结构、森林结构、河谷地区土地沙漠化、人口数量与结构、土地利用结构、产业结构、投资与收益	动态评价	西藏“一江两河”地区	陶和平等 ^[35]
自然因素、人为因素、社会经济因素	地貌、气候、土壤、水文、地质土地利用、空间格局、社会指数、经济指数	静态评价	鄱阳湖区	周丙娟等 ^[36]
风险、抵抗力、损害与退化	气候、地质人口、资源与服务、地理学、资源与服务	静态评价	海南岛区域	黄宝荣 ^[37]
自然潜在脆弱、人为干扰脆弱	地形地貌、气候、土壤、水文、地质基础;植被、土壤侵蚀、土地利用、空间格局、社会发展、经济发展	动态评价	江西省域	蔡海生等 ^[32]
自然因素、人类干扰因素	干燥度指数、植被归一化指数、土壤侵蚀程度、人类干扰指数	静态评价	山西绛县县域	徐明德等 ^[38]
暴露度、敏感性、适应力	人口—产业分布、人为活动干扰强度、生物多样性、环境保护状况、自然生态系统服务水平、水资源状况、地形条件、经济社会发展水平、资源利用水平、环保意识、可持续发展水平	动态评价	中国县域	魏晓旭等 ^[39]
压力指标、潜在指标	自然指标、经济指标、社会指标、环境指标	静态评价	西部地区	王娟娟等 ^[40]
生态敏感性、生态恢复力、生态压力度	地形因子、地表因子、气象因子、土壤侵蚀强度	静态评价	沂蒙山区	刘正佳等 ^[41]
遥感衍生属性、气象属性、地形属性	植被指数、湿度指数、土壤指数、地表温度指数、年温度、年降水量、海拔	静态评价	Fuzhou city in China	Shi Z ^[42]
原因因素、结果因素	自然因素、经济因素、社会因素	动态评价	Qinghai-Tibetan Plateau, China	Xiaolei Z ^[34]
压力、灵敏度、稳定性	人口压力、环境压力、社会经济压力、荒漠化敏感性、盐碱敏感性、结构、功能、活力、弹性	静态评价	The Turpan Oasis, China	Pei H ^[43]
生态环境脆弱性评价指标	高程、坡度、植被、土地利用类型、土壤类型、土壤侵蚀、降水、温度、人口	动态评价	Anning River Basin	Shao H ^[3]
气候质量、土壤质量、植被覆盖、人为压力	降水率、干旱指数、土壤质地、土壤深度、土壤母质、植被覆盖率、人口密度、人口年增长率	动态评价	Italy	Salvati ^[12]
滑坡敏感性脆弱评估	坡度、高程、坡向、剖面曲率、土地覆盖度、曲率、岩性、平面曲率、土壤距离、线距、线密度、道路距离、道路密度、河流距离、河流密度和降雨量	静态评价	Pauri Garhwal	Pham ^[14]

2.2 生态环境脆弱性动态评价指标体系构建

建立生态环境脆弱性评价指标体系是评价科学性、客观性的关键一环。蔡海生等对生态环境脆弱性静态评价指标体系构建了三级指标,其中一级指标主要分为自然潜在脆弱以及人为干扰脆弱两大方面^[7, 32]。同时,蔡海生等对各评价模型指标体系的构建情况进行了具体的归纳,对生态化评价相关模型的指标体系进行层次划分,主要划分为目标层、准则(要素)层、指标(因子)层三个基本结构,其中目标层又分为生态环境质量评价、生态现代化水平评价、生态文明指数评价、工业产业生态化水平评价、农业现代化发展水平评价、小康社会综合评价、国家创新战略生态化评价以及低碳经济发展水平评价等八大目标层。对于区域生态脆弱性评价同样具有一定的借鉴意义^[44-45]。

结合国内外研究情况,针对生态环境脆弱性特征,以自然环境因素为主,综合考虑人为作用因素,兼顾指标的可操作性和可比性,基于层次分析法选取自然因素和人为因素两大一级指标,可以构建一个初步的生态环境脆弱性评价指标体系,包括 2 个一级指标、10 个二级指标、28 个三级指标。如表 2 所示。

表 2 生态环境脆弱性动态评价的指标体系
Table 2 Dynamic evaluation index system of Ecological environment vulnerability

一级指标 The first grade indicators	二级指标 The secondary indicators	三级指标 The third grade indicators
生态环境脆弱自然指标 Ecological environment fragile natural index	地形地貌、气候、土壤、水文、地质环境	地形、坡度陆地表面起伏度、雨季降水量、旱季干旱天数、年极端高温天数、年极端低温天数、年风灾天数、土壤可蚀性(K 值)、地表径流、湖泊水面退缩率、岩性、地震
生态环境脆弱人为因素指标 Ecological environment fragile human factor index	植被、土壤侵蚀、人类活动强度、社会发展、经济发展	植被覆盖率、水土流失强度、多样性指数、坡耕地指数、破碎度指数、人口密度、人均耕地面积、公路密度、CO ₂ 排放量、工业用废水排放量、人均 GDP、基尼系数、基本社会保险覆盖率、人均纯收入、失业率(城镇)、城镇化率

对于各指标权重的确定上,其方法主要有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法根据评价者依据经验对各个指标的重视程度决定指标的权重,而客观赋权法是根据各个指标客观上提供的内在信息量来决定指标的权重,方法有层次分析法^[46]、熵权法^[47]、多层次模糊综合评价法^[16]、熵值法^[20]、专家经验法^[48]等。

在指标选取和体系构建的基础上,还需要考虑动态评价和静态评价方面的问题。生态环境脆弱性计算和分析主要包括静态计算(潜在脆弱性计算、胁迫脆弱性计算、现实脆弱性计算)、动态计算(生态环境脆弱性变化绝对度和相对度)^[32]。蔡海生等对生态环境脆弱性动态评价的数据收集和处理进行了具体的论述,其将图形数据和属性数据作为数据的两大来源,并将生态环境内在脆弱性数据来源细分为地质专题图、地形专题图、土壤专题图、水文专题图、气候专题图等五大方面;生态环境外在脆弱性细分为历年的植被覆盖变化、土壤侵蚀变化、土地利用变化、社会经济变化等四个方面,并给出了脆弱性数据处理流程图^[32]。

3 生态环境脆弱性评价方法与分析模型

3.1 评价方法分析

3.1.1 基于经验统计数据的分析方法

生态环境脆弱性评价方法很多,在生态脆弱性的评价过程中,具体评价方法的选择十分关键,应根据指标的不同特征,针对不同数据的特点来选择能表现系统特征的评价方法。

杨建平等依据县级行政单位将长江黄河源区分为八大地区,使用主成分分析法对各地区的生态环境进行了综合评价^[49];蔡海生等对我国脆弱生态环境脆弱度评价的脆弱性机理、评价指标的选择以及脆弱度评价方法等研究情况进行了简要的综述,并就脆弱生态环境脆弱模糊评价法、脆弱生态环境脆弱度定量评价法、脆弱生态环境脆弱度 EFI 评价法、脆弱生态环境脆弱度 AHP 评价法、脆弱生态环境脆弱度关联评价法以及脆弱生态环境脆弱度的综合评价进行了较为详细的介绍^[7];廖富强等建立了鄱阳湖典型湿地生态环境脆弱性评价

完整的指标体系,并使用模糊数学的方法对鄱阳湖湿地生态环境脆弱性进行了评价^[50];王瑞燕等将生态位适宜度模型引进到脆弱性评价中,分析了土地利用变化对生态环境脆弱性的影响机理^[51];Mahapatra 等基于层次分析法从物理脆弱性和社会经济变量等两方面构建权重及分数对印度 South Gujarat coast 地区进行了脆弱性评价^[52];Shao H 等基于 SPCA 选取指标体系,对安宁河流域的生态脆弱性进行了系统的研究分析^[3];Riedel 采用 WOWA 方法及 ORNESS 值为脆弱性评价提供了尝试,对美国未来洪水脆弱性进行了分析^[15]。

3.1.2 基于 3S 技术的分析方法

遥感、地理信息系统与全球定位系统是目前对地系统中空间信息获取、存储管理、更新、分析和应用的三大支撑技术,简称为“3S”技术,已经在相关空间信息研究领域得到了广泛的应用^[53]。在生态环境领域的研究领域的研究应用发展迅速,利用 3S 技术进行资源环境信息的获取、处理和动态分析成为脆弱生态环境研究的一个重要趋势^[43, 54]。

廖伟等基于 RS 及 GIS 技术,从土地利用变化角度入手,结合土壤类型、气象、道路、水土流失等专题数据及年鉴统计数据,利用 IDRISI 地理信息系统软件建立数据库,采用空间主成分分析法分析了丹江口库区生态环境脆弱性的时间分布规律^[55];荆玉平等结合遥感与 GIS 技术,以内蒙古自治区奈曼旗近 25 年来的土地利用变化为基础,根据其景观结构和土地利用结构特征,构建了综合性生态脆弱性指数,对研究区进行了生态脆弱性评价^[56];陈佳等基于 VSD 框架和 SERV 模型,运用 RS 和 GIS 空间技术,定量分析了榆林市社会——生态系统脆弱性的空间演变规律,并采用 OWA 算法,模拟及预测了决策者不确定性偏好下区域脆弱性未来的情景^[57];Sahana 等基于 GIS 技术分析了印度 Rudraprayag 地区景观脆弱性从而来探讨森林火灾的敏感性^[58];Rapicetta 通过模拟 Etna 火山活动,通过结合地理信息系统(GIS)做出生态脆弱性地图,对环境脆弱性研究火山爆发提出了新的思路^[59];Wu H 选取土地利用变化及植被覆盖等因素,基于遥感(RS)和地理信息系统技术(GIS)构建生态环境脆弱性评价体系及模型,对中国福州市生态环境脆弱性进行了分析^[60]。

3.2 常用评价模型分析

生态环境脆弱性评价可以分为静态评价和动态评价。静态评价是以一个时间点的指标数据为基础,评价结果反映的是评价区域内的不同单元之间的脆弱性表征的差异;动态评价是在多个时间点的脆弱性评价,评价结果反映的是评价区域内的脆弱性表征发展演变情况,能更加全面的表征区域生态环境脆弱性。根据蔡海生等的研究,生态环境脆弱性动态评价是静态评价的深入^[7],是根据不同年份的生态环境胁迫脆弱性静态评价结果的空间叠加分析,得到各生态脆弱性等级的变化和转移情况,从而可分析研究区域生态脆弱性的驱动机理、演变过程、发展趋势及其空间特征,进而为实施有效管控提供决策依据^[61]。具体的模型分如下:

(1) 生态环境脆弱性静态计算:

单因子脆弱性(G_i) = 等级判分(R) × 因子权重(W)

潜在(内在)脆弱性(G_{li}) = $\sum$ [自然因子等级判分(R) × 因子权重(W)]

胁迫(外在)脆弱性(G_{li}) = $\sum$ [人文因子等级判分(R) × 因子权重(W)]

现实脆弱性(G_{ri}) = 潜在脆弱性(G_{li}) + 胁迫脆弱性(G_{li})

评价单元脆弱性(G) = $\sum$ [单因子脆弱性(G_i) × 面积的百分比(P)]

其中,单因子脆弱性可分别给予 1、3、5、7、9 的赋分;各因子权重可根据专家咨询法、层次分析法计算确定;潜在脆弱性、胁迫脆弱性、现实脆弱性可分为微脆弱、轻脆弱、中脆弱、强脆弱、极脆弱等 5 个等级;单因子评价一般以图斑或最小统计区域为评价单元(统计数据);综合评价可选用县乡行政区域划分,以方便进行生态环境治理。

(2) 生态环境脆弱性动态计算:

生态环境脆弱性绝对变化率(N_a) = $100\% \times [\text{现实脆弱性}(N_i) - \text{潜在脆弱性}(N_o)] / \text{潜在脆弱性}(N_o)$

生态环境脆弱性相对变化率(N_c) = $100\% \times [\text{后期现实脆弱性}(N_{i2}) - \text{前期现实脆弱性}(N_{i1})] / \text{前期现实脆弱性}(N_{i1})$

其中,不同年限的生态环境现实脆弱性比较,正值表示相对退化,负值表示相对修复。由此,可对多个单元的计算结果进行聚类分析,从而对研究区域进行分区。

另外,钟晓娟等指出生态环境脆弱度是用于研究区域生态脆弱水平和表征生态环境脆弱性程度的重要指标,他们根据脆弱生态环境的主要成因及结果指标来计算生态环境脆弱度,采用以下公式计算^[62]。

$$G = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i W_i}{\left(\max \sum_{i=1}^n X_i W_i + \min \sum_{i=1}^n X_i W_i\right)}$$

式中, X_i 为各指标初始值; W_i 为各指标权重; G 为灾区生态脆弱度。

也有专家结合空间栅格数据因子综合分析法,或者 AHP 层次分析法^[7,18],进行生态脆弱度(EVI)的评价。

$$EVI = \sum_{i=1}^n f_i w_i$$

式中, f_i 为第*i*个因子的评分值, W_i 为第*i*个因子相对应的权重值, n 为评价因子个数。EVI 值越大,脆弱程度越重。

3.3 模型方法比较分析

综合生态环境脆弱性评价方法模型,主要包括层次分析法、模糊评价法、主成分法、综合评价法及机器学习(PSVM、RF)等 12 种,各模型方法特征比较见表 3:

表 3 生态环境脆弱性评价方法比较
Table 3 Assessment method of ecological environment vulnerability

评价方法 Evaluation method	主要内涵 The main connotation	适用范围 Scope of application	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
层次分析法 ^[5] Analytic hierarchy process	确定评价指标、评分值及权重,将评分值与其权重相乘,加和得到总分值,据总分值确定脆弱生态环境的脆弱度等级	可用于生态脆弱地区脆弱度比较	计算过程简单,可根据脆弱生态区域的特点选择不同的环境影响因子、权重及评分等级	指标选取、权重赋值以及脆弱度分级等主观性较强
模糊评价法 ^[63] Fuzzy evaluation method	确定指标体系及权重,计算各因子对各评价指标的隶属度,分析结果向量,从而评价出各子区域的脆弱度等级并排序	适用于省、区等大范围及县(市)、乡(镇)等小范围	计算方法简单易行	对指标的脆弱度反映不够灵敏
主成分法 ^[62] Principal component method	计算特征值和特征向量、通过累计贡献率计算得到主成分,最后进行综合分析。	适用于基础资料较全面的生态环境脆弱程度评估	可将原来的指标重新组合成新的综合指标且保证原始指标信息的真实性,能够客观地确定评价指标的权重,避免主观随意性	存在一定的信息损失问题
环境脆弱指数法 ^[64] Environment fragile index method	确定指标、权重及其生态阈值,在数试标准化基础上,根据公式计算生态脆弱性指数 EFI,划分脆弱度等级	适于某一区域内部生态环境脆弱程度的比较分析	EFI 法可以将脆弱度评价与环境质量紧密结合在一起	EFI 的结果是相对的
综合评价法 ^[65] Comprehensive evaluation method	包括现状评价、趋势评价及稳定性评价三部分	适用于长时期积累的数据资料	综合评价法较为全面、宏观;评价结果具有较强的综合性及逻辑性、系统性。	综合评价法较为复杂,涉及内容多。不适用大范围的生态脆弱性评价
定量评价法 ^[66] Quantitative evaluation method	选择主要的成因指标和表现特征指标建立指标体系,并赋予各指标权重	用于各省、区内县、市、镇之间的对比评价	使用方便、快捷	考虑指标有限,不利于某一脆弱生态环境的精细评价。
集对分析法 ^[67] Set pair analysis	以联系度为核心,特别是处理不确定性的问题时有较强的吸附作用	用于某一区域内的时序动态评价	计算简单、方法容易	系数的取值问题如何确定
状态空间法 ^[17] State space method	采用加权求和算出各脆弱性分指数,利用数理模型求得综合指数	适用于省域、市域等范围	计算方法简单容易	不能反映内部各评价因子的影响大小关系,有一定的主观性

续表

评价方法 Evaluation method	主要内涵 The main connotation	适用范围 Scope of application	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
3S 技术 ^[68] 3S Technology	将统计数据转换为栅格数据,配合原有的矢量化数据,应用空间分析技术对各评价因子进行叠加分析	可用于区域及内区域内各评价单元的分析及时空动态对比分析	数据处理快,易于管理及后期预测及调控	软件数据处理技术要求相对较高
证据权重法 ^[57] Evidence weighting method	建立脆弱性模型的因子要满足独立性检验条件,通常与 GIS 空间综合分析技术相结合,获得区域生态环境脆弱性评价后验概率图	中微观尺度的研究较为优	直观明了、实用,能详细显示监测及预测区域内各因子的走势情况	评价精度依靠监测点及证据因子间的空间分布关系
最临近支持向量机 ^[69] Proximal support vector machine	建立模型数理关系曲线,给出系统因子达到脆弱性的状态,通过 PVSM 训练分析因子达到极限状态的值,得到最佳的临界值	高维空间尺度和小型训练样本的分析较优	评价精度高,减少了算法及数值的不确定性	依赖于各个因子达到脆弱性极限的二维曲线关系以及训练样本的拟合精度
随机森林 ^[14] Random forest	选取合适因子,生成训练和测试数据集,使用 RF 方法构建评价模型,验证模型,生成敏感性脆弱性图	合适用于各个尺度	不需要对显性因素进行假设,能分析因素之间的相互作用,随机预测具有低偏差,能处理数据的不均衡和过度拟合	在某些噪音较大的分类或回归问题上会过拟;不同取值属性的数据,对其会产生一定的影响

4 存在的问题和发展趋势分析

以生态环境脆弱性评价为切入点,以土地利用变化和社会经济发展为基础,进行生态环境脆弱性动态评价,讨论生态环境脆弱性的驱动机理、演变过程和发展趋势,服务于资源生态可持续利用和社会经济可持续发展,是生态环境脆弱性研究的通常路径。梳理了最近 30 年来的发展历程,依然存在一些问题和不足,这也是未来的研究中需要破解和改进的地方。

4.1 存在问题分析

生态环境脆弱性研究是涉及领域和范围较广,包含了地学、生态、生物等多领域的研究,具有较强的综合性。研究的切入点、侧重点不同,则研究的方法模型会存在一定的差异性。但不管研究对象、研究方法有什么不同,都要涉及到 5 个方面的内容(如图 1):①数据收集;②选择建立评价指标体系;③确定指标体系中各因子权重;④利用模型分析计算脆弱度指数;⑤评价结果的分析和应用。总体上存在以下几个共性的问题。

(1)研究理论方法创新不足。

当前对区域生态环境脆弱性评价和研究主要集中在实证性研究,主要针对人地系统展开,而对于具有较强不确定性的子系统如气候变化、自然灾害等研究较少,也相对薄弱。脆弱性评价理论方法研究还不够深入,基于人地耦合的系统脆弱性研究还处于发展阶段,实证研究仍以生态系统脆弱性评估和多元统计分析为主,脆弱性实证评价方法尚未成熟,时空动态及未来趋势预测评价综合性不够,各地脆弱性实证评价指标体系建构中,层次与问题目标定位不明确,针对性不够强。

(2)评价指标体系及分析模型难以统一。

在生态脆弱性评价的指标选择、模型选取等方面,不可避免存在外界干扰及数据不完整等不确定因素的影响,无论是自然条件因素还是社会经济指标都没有统一的分析标准。不同学者在研究中往往有不同的评价指标体系、不同的计算分析方法,未形成一套综合的、完整的、涉及各种对象和尺度的生态脆弱性评价系统,导致评价结果存在不确定性,不同评价区域之间评价结果没有可比性,评价模型方法的标准化非常需要加强。

(3)人为主观因素影响了评价结果的有效性。

由于不同的专家学者对生态脆弱性评价等级划分及阈值认知不统一,对生态脆弱性评价指标的判分、权重和脆弱性等级划分标准不一,直接导致评价结果的主观性太强。如,指标或等级评分有 5 级、4 级、3 级等标

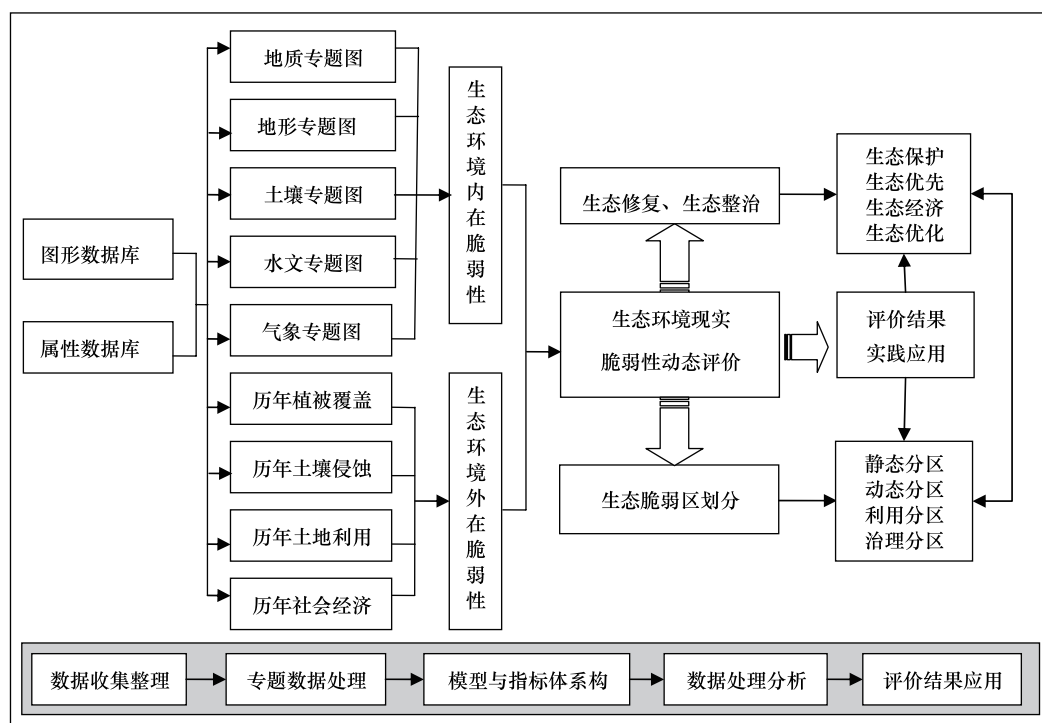


图1 区域生态环境脆弱性评价内容体系逻辑框架图

Fig.1 Content system and logic frame of ecological environment vulnerability evaluation

准,评价结果等级划分采用自然断点法、自然分界法、专家经验、平均分配等不同方法。哪怕是针对同样的研究对象,不同的专家学者其评价结果都很难进行对比分析,统一评价指标体系、判分标准及评价等级划分是提升评价结果有效性的关键一环。

(4) 评价结果的应用研究有待拓展。

生态环境脆弱性评价是基于研究者对生态环境认知数据经验分析,研究结果最终只是一些简单的数值或数值段,通过“3S”技术我们可以将这些评价结果数值落实到时空区域,但这不是研究的全部。通过对生态脆弱性动态分析,认识其驱动机理、演变过程和发展趋势,进一步与研究区域人地耦合方式、土地利用模式、生态保护措施等有效的衔接,开展生态环境的分区治理和有效管控研究,才能提高脆弱生态研究的科学性、有效性和实用性。

4.2 发展趋势分析

生态环境脆弱性评价是自然地理、生态环境和社会经济综合研究的一个交叉领域,具有很高的现实意义和应用价值。综上所述,针对某一研究区域进行生态环境脆弱性评价研究,也许构建的指标体系与评价模型方法或有所不同,但关于生态脆弱性的驱动机理、演变过程、发展趋势、生态管控等研究目标是相同的。围绕着研究目标更好地实现,有以下几方面的发展趋势。

(1) 研究思路需要进一步突出综合系统性。

随着研究方法和技术手段发展进步,无论图形数据和属性数据都突出了综合性,数据来源都更加稳定、可靠和容易获取。其中包括:地质、地形、土壤、水文、气候等构成生态环境潜在脆弱性的主要分析数据;植被覆盖变化、土壤侵蚀变化、土地利用变化、社会经济变化等构成生态环境胁迫脆弱性的主要分析数据。这为生态脆弱性综合研究提供了很好的数据支撑。在生态环境脆弱性评价目标方面,以人地关系为切入点,逐渐从单纯的生态环境脆弱性评价走向生态环境与经济社会耦合脆弱性综合评价,向“土地利用-社会经济-生态效应”综合研究发展,帮助我们更好地认知生态环境背景下的人地耦合的时空特征,为资源生态和社会经济可持续发展提供重要的决策信息和管控依据。

(2) 数据处理需要进一步突出时空动态性。

早期的生态脆弱性评价静态分析的比较多。随着“3S”技术的发展及其广泛应用,特别是其数据获取、模型构建、数据分析、空间分析、平台展示等功能,为生态环境脆弱性动态评价提供了强劲的技术支撑。“大数据”背景下,充分发挥“3S”技术优势,与传统的研究方法手段相融合,实现统计信息和空间信息的及时处理,构建区域尺度上兼备评价、预测与预警功能的生态环境脆弱性评价模型,将是生态环境脆弱性评价的重要发展方向之一。在“3S”技术支持下,以全球气候变化为背景的宏观研究也得到了迅速发展,通过将遥感影像数据与长期定点观测数据相融合,从时间和空间上更好地分析生态群落的演变、社会经济的发展对生态环境脆弱性的作用机理和发展机制,实现更科学、客观的时空动态评价。

(3) 研究方法需要进一步突出学科融合性。

在大数据背景下,生态脆弱性评价的方法不断现代化,学科交叉研究得到了快速发展。最新的研究显示,数据的获取更多综合了遥感数据、野外调查、样地调查、地理国情普查等来源,数据分析方法也综合了自然地理、土地生态、区域经济、社会政策、统计学等相关学科方法,通过计算机强大的运算功能及 3S 技术软件平台技术,将人工智能中的核心机器学习方法运用到生态环境脆弱性评价中来,打破传统的数理模型方法计算,更深程度的挖掘影响生态环境脆弱性的数据信息,这种交叉综合性研究方法运用到区域大尺度上优势更加突出。同时,因为研究基础数据的多源融合、相互补充,为区域生态环境长期的演变特征分析提供了新的数据平台,为提高训练样本及今后的预测精度提供了条件和保障。

(4) 研究结果需要进一步突出实践应用性。

生态脆弱性评价的目标是为资源可持续利用和社会经济可持续发展提供信息支撑和决策依据,所以用评价结果来指导土地利用和生态管控,是研究的最终落脚点。结合评价结果加强分区研究是区域生态环境脆弱性研究未来发展的重点方向。依靠生态环境脆弱性评价结果对研究区域合理分区,针对不同的分区结果采纳不同的整治对策,可为优化国土空间开发格局、构建国土全域保护格局及生态功能区综合整治提供重要信息。根据研究目标不同可选择不同的分区依据:一是依照潜在脆弱性评价进行区分;二是依照胁迫脆弱性评价进行区分;三是依照现实脆弱性评价进行区分;四是依照绝对变化率进行区分;五是依照相对变化率进行区分。分别表示生态环境脆弱性的自然区划、胁迫区划、现实区划、绝对变化程度区划、相对变化程度区划。总体上,依据评价结果实现对区域资源生态和社会经济进行综合治理和有效管控,助力生态优先、可持续发展,是生态脆弱性评价最终价值实现的重要途径。

参考文献 (References):

- [1] Lavorel S, Flannigan M D, Lambin E F, Scholes M C. Vulnerability of land systems to fire: Interactions among humans, climate, the atmosphere, and ecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(1): 33-53.
- [2] Demirkesen A C, Evrendilek F. Compositing climate change vulnerability of a Mediterranean region using spatiotemporally dynamic proxies for ecological and socioeconomic impacts and stabilities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(1): 29-29.
- [3] Shao H Y, Liu M, Shao Q F, Sun X F, Wu J H, Xiang Z Y, Yang W N. Research on eco-environmental vulnerability evaluation of the Anning River Basin in the upper reaches of the Yangtze River. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(5): 1555-1568.
- [4] 徐庆勇, 黄玫, 刘洪升, 闫慧敏. 基于 RS 和 GIS 的珠江三角洲生态环境脆弱性综合评价. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2987-2995.
- [5] 韦晶, 郭亚敏, 孙林, 江涛, 田信鹏, 孙光德. 三江源地区生态环境脆弱性评价. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1968-1975.
- [6] 卢亚灵, 颜磊, 许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析. *资源科学*, 2010, 32(2): 303-308.
- [7] 蔡海生, 陈美球, 赵小敏. 脆弱生态环境脆弱度评价研究进展. *江西农业大学学报: 自然科学版*, 2003, 25(2): 270-275.
- [8] Lamsal P, Kumar L, Atreya K, Pant P K. Vulnerability and impacts of climate change on forest and freshwater wetland ecosystems in Nepal: A review. *Ambio*, 2017, 46(8): 915-930.
- [9] Preston B L, Yuen E J, Westaway R M. Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. *Sustainability Science*, 2011, 6(2): 177-202.
- [10] Kienberger S, Blaschke T, Zaidi R Z. A framework for spatio-temporal scales and concepts from different disciplines: the ‘vulnerability cube’. *Natural Hazards*, 2013, 68(3): 1343-1369.

- [11] Malik S M, Awan H, Khan N. Mapping vulnerability to climate change and its repercussions on human health in Pakistan. *Globalization and Health*, 2012, 1(8):1-10
- [12] Salvati L, Tombolini I, Perini L, Ferrara A. Landscape changes and environmental quality: the evolution of land vulnerability and potential resilience to degradation in Italy. *Regional Environmental Change*, 2013, 13(6): 1223-1233.
- [13] Girard P, Boulanger J, Hutton C. Challenges of climate change in tropical basins: vulnerability of eco-agrosystems and human populations. *Climatic Change*, 2014, 127(1): 1-13.
- [14] Pham B T, Khosravi K, Prakash I. Application and Comparison of Decision Tree-Based Machine Learning Methods in Landside Susceptibility Assessment at Pauri Garhwal Area, Uttarakhand, India. *Environmental Processes*, 2017, 4(3): 711-730.
- [15] Riedel I, Guéguen P, Dalla Mura M, Pathier E, Leduc T, Chanussot J. Seismic vulnerability assessment of urban environments in moderate-to-low seismic hazard regions using association rule learning and support vector machine methods. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 1111-1141.
- [16] 毛学刚, 汪航. 基于栅格尺度的北京市密云县生态环境脆弱性评价. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(1): 96-102.
- [17] 王岩, 方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究. *地理科学*, 2014, 34(5): 547-555.
- [18] 樊哲文, 刘木生, 沈文清, 林联盛. 江西省生态脆弱性现状 GIS 模型评价. *地球信息科学学报*, 2009, 11(2): 202-208.
- [19] 王雪梅, 席瑞. 基于 GIS 的渭干河流域生态环境脆弱性评价. *生态科学*, 2016, 35(4): 166-172.
- [20] 余中元, 李波, 张新时. 湖泊流域社会生态系统脆弱性时空演变及调控研究——以滇池为例. *人文地理*, 2015, 30(2): 110-116.
- [21] 李平星, 樊杰. 基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价——以广西西江经济带为例. *资源与生态学报(英文版)*, 2014, (2): 163-170.
- [22] 徐庆勇, 黄玫, 李雷, 唐磊, 王军邦. 晋北地区生态环境脆弱性的 GIS 综合评价. *地球信息科学学报*, 2013, 15(5): 705-711.
- [23] Hou K, Li X X, Wang J J, Zhang J. An analysis of the impact on land use and ecological vulnerability of the policy of returning farmland to forest in Yan'an, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(5): 4670-4680.
- [24] Yang G F, Chen Z H. RS-based fuzzy multiattribute assessment of eco-environmental vulnerability in the source area of the Lishui River of northwest Hunan Province, China. *Natural Hazards*, 2015, 78(2): 1145-1161.
- [25] Yang Y J, Ren X F, Zhang S L, Chen F, Hou H P. Incorporating ecological vulnerability assessment into rehabilitation planning for a post-mining area. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(6): 245-245.
- [26] Huang P H, Tsai J S, Lin W T. Using multiple-criteria decision-making techniques for eco-environmental vulnerability assessment: a case study on the Chi-Jia-Wan Stream watershed, Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 168(1/4): 141-158.
- [27] 靳毅, 蒙古军. 生态脆弱性评价与预测研究进展. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2646-2652.
- [28] 赵珂, 饶懿, 王丽丽, 刘玉. 西南地区生态脆弱性评价研究——以云南、贵州为例. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(2): 38-42.
- [29] 赵桂久. 生态环境综合整治与恢复技术研究取得重大成果. *中国科学院院刊*, 1996, (4): 289-292.
- [30] 徐广才, 康泰谊, 贺丽娜, 李亚飞, 陈雅如. 生态脆弱性及其研究进展. *生态学报*, 2009, 29(5): 2578-2588.
- [31] 陈美球, 蔡海生, 黄靓. 鄱阳湖区生态环境自然脆弱性综合评价, *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 181-183.
- [32] 蔡海生, 刘木生, 陈美球, 林联盛. 基于 GIS 的江西省生态环境脆弱性动态评价. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 190-196.
- [33] Jabbar M T, Zhou X P. Eco-environmental change detection by using remote sensing and GIS techniques: a case study Basrah province, south part of Iraq. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(5): 1397-1407.
- [34] Zhou X L, Yan Y E, Wang H, Zhang F, Wu L Y, Ren J Z. Assessment of eco-environment vulnerability in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(4): 667-674.
- [35] 陶和平, 高攀, 钟祥浩. 区域生态环境脆弱性评价——以西藏“一江两河”地区为例. *山地学报*, 2006, 24(6): 761-768.
- [36] 周丙娟, 蔡海生, 陈美球. 鄱阳湖区生态环境脆弱性评价及对策分析. *生态经济*, 2009, (4): 37-41.
- [37] 黄宝荣, 欧阳志云, 张慧智, 张利华, 郑华. 海南岛生态环境脆弱性评价. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 639-646.
- [38] 徐明德, 曹露, 何娟, 李静, 王海蓉. 基于 GIS 的生态环境脆弱性模糊综合评价. *中国水土保持*, 2011, 30(6): 19-21.
- [39] 魏晓旭, 赵军, 魏伟, 颜斌斌. 中国县域单元生态脆弱性时空变化研究. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 726-739.
- [40] 王娟娟, 何佳琛. 西部地区生态环境脆弱性评价. *统计与决策*, 2013, 29(22): 49-52.
- [41] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 黄玫. 基于 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2084-2090.
- [42] Shi Z, Li H Y. Application of artificial neural network approach and remotely sensed imagery for regional eco-environmental quality evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 128(1/3): 217-229.
- [43] Pei H, Fang S F, Lin L, Qin Z H, Wang X Y. Methods and applications for ecological vulnerability evaluation in a hyper-arid oasis: a case study of the Turpan Oasis, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1449-1461.
- [44] 蔡海生, 王晓明, 张学玲, 金志农. 区域生态化评价模型构建及其应用研究——以江西省为例. *生态经济*, 2014, 30(10): 57-62.
- [45] 蔡海生, 张学玲, 王晓明, 金志农. 区域生态化评价模型的构建方法研究. *生态经济*, 2014, 30(4): 143-148.
- [46] 李佳芮, 张健, 司玉洁, 刘玉, 刘庆群, 卢文虎. 基于 VSD 模型的象山湾生态系统脆弱性评价分析体系的构建. *海洋环境科学*, 2017, 36

(2): 274-280.

- [47] 封建民, 郭玲霞, 李晓华. 基于景观格局的榆阳区生态脆弱性评价. 水土保持研究, 2016, 23(6): 179-184.
- [48] 张德君, 高航, 杨俊, 席建超, 李雪铭. 基于 GIS 的南四湖湿地生态脆弱性评价. 资源科学, 2014, 36(4): 874-882.
- [49] 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区生态环境脆弱性评价初探. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1012-1017.
- [50] 廖富强, 刘影, 叶慕亚, 郑林. 鄱阳湖典型湿地生态环境脆弱性评价及压力分析. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 133-137.
- [51] 王瑞燕, 赵庚星, 于振文, 张玉婷, 张海洋. 利用生态位适宜度模型评价土地利用环境脆弱性效应. 农业工程学报, 2012, 28(11): 218-224.
- [52] Mahapatra M, Ramakrishnan R, Rajawat A S. Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India. *Natural Hazards*, 2015, 76(1): 139-159.
- [53] 汤国安, 赵牡丹, 杨昕, 周毅. 地理信息系统(第二版). 北京: 科学出版社, 2010: 192-192.
- [54] Fang C L, Wang Y, Fang J W. A comprehensive assessment of urban vulnerability and its spatial differentiation in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(2): 153-170.
- [55] 廖炜, 李璐, 吴宜进, 史志华. 丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1879-1889.
- [56] 荆玉平, 张树文, 李颖. 奈曼旗生态脆弱性及空间分异特征. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2): 159-164.
- [57] 陈佳, 杨新军, 尹莎, 吴孔森. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟. 地理学报, 2016, 71(7): 1172-1188.
- [58] Sahana M, Ganaie T A. GIS-based landscape vulnerability assessment to forest fire susceptibility of Rudraprayag district, Uttarakhand, India. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(20): 676-676.
- [59] Rapicetta S, Zanon V. GIS-based method for the environmental vulnerability assessment to volcanic ashfall at Etna Volcano. *GeoInformatica*, 2009, 13(3): 267-276.
- [60] Wu H, Tao H P, Lu Y. Evaluation of eco-environmental fragility based on remote sensing and geographic information system. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2007, 12(4): 715-720.
- [61] 蔡海生, 张学玲, 周丙娟. 生态环境脆弱性动态评价的理论与方法. 中国水土保持, 2009, 30(2): 18-22.
- [62] 钟晓娟, 孙保平, 赵岩, 李锦荣, 周湘山, 王引乾, 邱一丹, 冯磊. 基于主成分分析的云南省生态脆弱性评价. 生态环境学报, 2011, 20(1): 109-113.
- [63] 康永辉, 解建仓, 黄伟军, 王宝红. 广西大石山区农业干旱成因分析及脆弱性评价. 自然灾害学报, 2014, 23(3): 24-32.
- [64] 王让会, 樊自立. 干旱区内陆河流域生态脆弱性评价——以新疆塔里木河流域为例. 生态学杂志, 2001, 20(3): 63-68.
- [65] 张龙生, 李萍, 张建旗. 甘肃省生态环境脆弱性及其主要影响因素分析. 中国农业资源与区划, 2013, 34(3): 55-59.
- [66] 何云玲, 张一平. 云南省生态环境脆弱性评价研究. 地域研究与开发, 2009, 28(2): 108-111, 122.
- [67] 张鑫, 杜朝阳, 蔡焕杰. 黄土高原典型流域生态环境脆弱性的集对分析. 水土保持研究, 2010, 17(4): 96-99.
- [68] 陈美球, 蔡海生, 赵小敏, 林联盛. 基于 GIS 的鄱阳湖区脆弱生态环境的空间分异特征分析. 江西农业大学学报: 自然科学版, 2003, 25(4): 523-527.
- [69] Mahmoudi S N, Chouinard L. Seismic fragility assessment of highway bridges using support vector machines. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(6): 1571-1587.