

DOI: 10.5846/stxb201802020289

杨飞,马超,方华军.脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践.生态学报,2019,39(2):441–453.

Yang F, Ma C, Fang H J. Research progress on vulnerability: from theoretical research to comprehensive practice. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 441–453.

脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践

杨 飞¹, 马 超^{1,2,*}, 方华军³

1 中国科学院地理科学与资源研究所,资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101

2 中国科学院大学,北京 100049

3 中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统观测与模拟重点实验室,北京 100101

摘要: 从 20 世纪 60 年代脆弱性概念提出到 21 世纪脆弱性逐渐成为一门独立的新科学,脆弱性已成为评价地区发展状况的依据以及衡量未来发展规划的判据。基于国内外脆弱性研究文献的回顾和总结,回顾了脆弱性概念起源与发展,梳理了脆弱性评价的定性和定量方法,科学评述了 21 世纪以来脆弱性研究的新进展:评价方法创新、多尺度精细评价、多源数据挖掘、关键要素阈值界定、人为活动影响和脆弱性演化机理综合研究。研究发现 21 世纪以来脆弱性进展迅速,主要特点为多元化、多角度、精细化和综合化,表现为评价数据和方法的多元化;横向空间对比和纵向时间序列的多角度分析;多尺度精细评价;关键要素阈值与演化机理综合研究。未来,脆弱性研究应完善脆弱性概念框架和理论体系,关注耦合系统脆弱性过程与机制,探究脆弱性驱动因素和演化机理,科学界定脆弱性关键要素阈值,挖掘和提取多源遥感数据信息,开展系统脆弱性动态评价和时空分析,实现脆弱性定量评价与综合实践,最终满足国家和地区可持续发展战略的需要。

关键词: 脆弱性; 评价方法; 耦合系统; 多源遥感; 人为活动; 要素阈值; 综合实践

Research progress on vulnerability: from theoretical research to comprehensive practice

YANG Fei¹, MA Chao^{1,2,*}, FANG Huajun³

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The concept of vulnerability put forward in the 1960s and the potential vulnerability of the 21st century has gradually developed into an independent new science. Vulnerability research has become the basis for assessing states of development and the criteria for measuring future development plans. This study used previous reports on vulnerability research from China and the rest of the world to review the origin and development of the concept of vulnerability, and the qualitative and quantitative methods for vulnerability assessment. Furthermore, this study scientifically reviewed recent progress in vulnerability research since the beginning of the 21st century, by assessing current evaluation methods, the influence of human activities, multi-scale fine evaluation, multi-source data mining, and the key elements threshold definition. A comprehensive analysis of the mechanism underlying vulnerability evolution was also undertaken. The study found that vulnerabilities research has progressed rapidly since the beginning of the 21st century and that the main features

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604804); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC007)

收稿日期: 2018-02-02; 网络出版日期: 2018-10-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mac.16s@igsnrr.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

are diversification, multiple angles, refinement, and synthesis. Progress in these areas has led to method and data diversification; multi-angle analyses of transverse spatial correlation and longitudinal time series; multi-scale fine evaluation; and research on the key factor threshold and the mechanism that drives the development of vulnerability. Future studies should effectively strengthen the basic theory and vulnerability mechanism, investigate the processes and mechanisms underlying coupled systems, explore evolutionary mechanisms for vulnerability, scientifically define the thresholds for key elements of system vulnerability, and extract information from multi-source remote sensing data. In addition, vulnerability research should aim to carry out a dynamic evaluation of system vulnerability and use space-time analysis to quantitatively evaluate vulnerability and current comprehensive practice. The research results reported in this review will inform and improve national and regional sustainable development strategies.

Key Words: vulnerability; assessment method; coupled human-environment interaction system; multi-source remote sensing; human activity; feature threshold; comprehensive practice

脆弱性概念最早起源于自然灾害领域,20 世纪 70 年代以后,脆弱性研究开始延伸至生态系统、社会科学、地学与可持续科学领域等^[1-3]。特别是 20 世纪 90 年代后期,资源枯竭和环境恶化情况愈演愈重,脆弱性评价在区域规划、可持续发展以及全球环境现状和发展趋势等研究领域越来越重要^[4]。国内外学者普遍认为:脆弱性研究不仅是区域性问题,也是全球性问题,是衡量一个地区发展程度的重要判据。由此可见,科学测度系统脆弱性,探究脆弱性关键要素阈值与演化机理,为应对气候变化、完善系统结构功能和实现可持续发展提供科学依据。

21 世纪以来,脆弱性作为描述社会环境系统、人地耦合系统等发展程度和状况的基本概念,国家越来越重视其研究意义^[5]。政府间气候变化专业委员(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次报告第二工作组报告《气候变化 2014: 影响、适应和脆弱性》中明确人类系统对气候变化的脆弱性和暴露度^[6]。在全球环境变化和可持续发展理论中,脆弱性作为一种全新的研究工具和研究视角发挥着重要作用,同时,脆弱性理论知识和方法体系为生态学和地理学研究、人地相互作用机制以及资源环境保护等提供理论基础和实践应用^[7-9]。

本文针对脆弱性概念起源发展及其组成要素展开探讨,梳理国内外脆弱性研究进展,总结归纳脆弱性研究视角和评价方法,并着重对 21 世纪以来脆弱性研究的新进展进行分析和探讨,指出脆弱性研究中存在问题以及未来方向。

1 脆弱性概念源起与发展

脆弱性一词来自拉丁文 *vulnerare*, 是“可能受伤”之意^[10],最早出现于 20 世纪 60 年代末对自然灾害的研究,即通过灾害发生的可能性及其影响来辨识和预测脆弱群体的危险区域。自此,研究学者开始关注自然灾害表现出不同的脆弱性^[11-12]。20 世纪 70 年代后,专家开始研究生态系统脆弱性^[13];20 世纪 80 年代初期,脆弱性的概念逐渐延伸到社会经济领域。目前,脆弱性概念和研究涉及灾害管理、生态学、地学、工程学、土地利用、可持续科学等方面^[14-16]。

根据 Birkmann 对脆弱性文献的统计分析发现,脆弱性概念超过 25 种^[17-21]。最初自然系统脆弱性定义与“风险”概念相似,是指系统暴露于不利影响或遭受损害的可能性^[22-23]。随着脆弱性研究渗透到社会经济领域,脆弱性概念加入人文驱动因素^[24]。目前,脆弱性内涵包含四层含义^[19-25]: ①脆弱性表现为系统内部和外部的共同影响,系统内部和外部要素之间存在相互作用;②研究脆弱性应针对特定类型的扰动,不同扰动情况下,系统表现出不同的脆弱性;③脆弱性表明系统内部的不稳定性,在遭受扰动时会造成损失和伤害,且具有不可恢复性^[26];④系统对外界干扰和影响比较敏感。国内外比较权威的是 IPCC(2001) 报告中的脆弱性定义,“系统易受或没有能力应对气候变化的扰动,包括变率和极端事件而产生不利影响的程度,是气候变异特

征、变化幅度和速率以及系统敏感性和适应能力的函数”^[27]。

21 世纪以来,全球气候变化的背景下,国内外学者重视可持续发展理论研究,脆弱性概念既考虑了系统内外部条件影响,也将人类活动纳入脆弱性评价。因此,脆弱性组成要素表述为一个集合的概念,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^[28-29]。脆弱性要素之间有概念的混淆和重叠,没有明确的界限。目前广泛接受的脆弱性要素包括敏感性、暴露性、适应能力^[30]。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^[31]。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^[32]。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两个层次^[33],决定了系统在灾害事件中受损失的实际大小。脆弱性三要素及其相互关系如图 1 所示。

纵观国内外几十年的脆弱性研究进展,脆弱性内涵的理解由单一要素向多元要素变化、研究对象由单一系统向复合系统变化,国内外学者提出很多重要的脆弱性理论和模型,推动了脆弱性科学问题进展,促进脆弱性学科的形成,为脆弱性研究提供坚实基础和依据(图 2)。

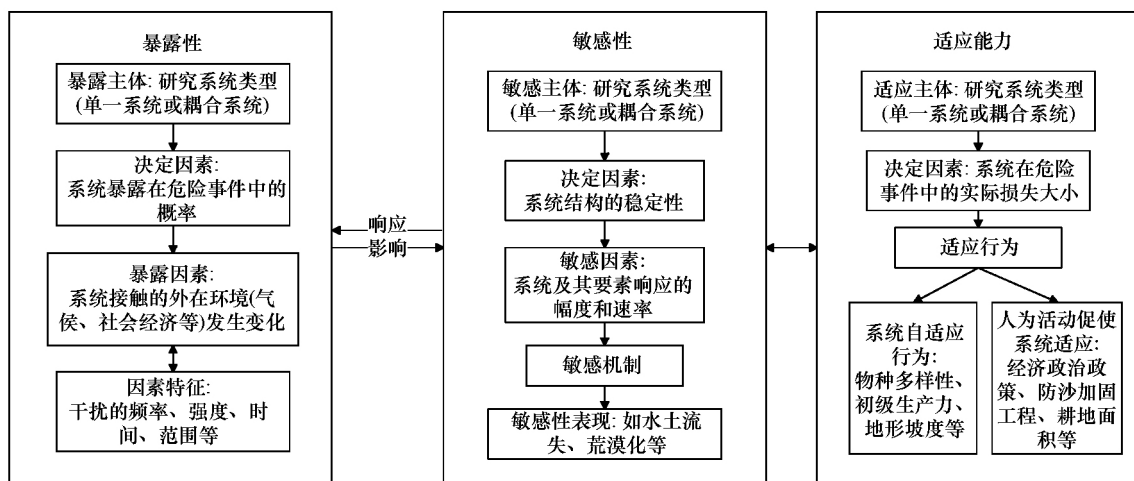


图 1 脆弱性要素及其相互关系

Fig.1 Relationships of vulnerability elements

2 脆弱性研究方法

目前脆弱性评价方法主要有两种:一是定性方法,在脆弱性研究初期使用较多,操作简单,评价精度较低;另一种是定量方法,包括指标评价法、基于地理信息系统(GIS)和遥感(RS)的脆弱性评价法和脆弱性函数模型评价法等。

2.1 定性评价方法

定性评价方法,是利用历史数据和实地考察数据分析系统脆弱性状况,采用归纳与演绎等方法,从历史演变、现实状况和未来发展等方向对系统进行非定量的描述、刻画和预测。

(1) 归纳分析法

归纳法是以一系列经验事物或者知识为依据,寻找其服从的基本规律,并假设类似事物也服从相同规律的思维方法。脆弱性评价常使用历史和实地考察数据作为依据,寻找其脆弱性发展规律,进而用于分析和预测脆弱性发展趋势。

(2) 比较分析法

比较分析法也称对比分析法,是将两个相互联系的指标数据进行比较,从而由一种指标数据规律和本质推算出另一种指标数据的规律和趋势。譬如横向空间比较某一区域的脆弱性;或者纵向比较研究区不同历史

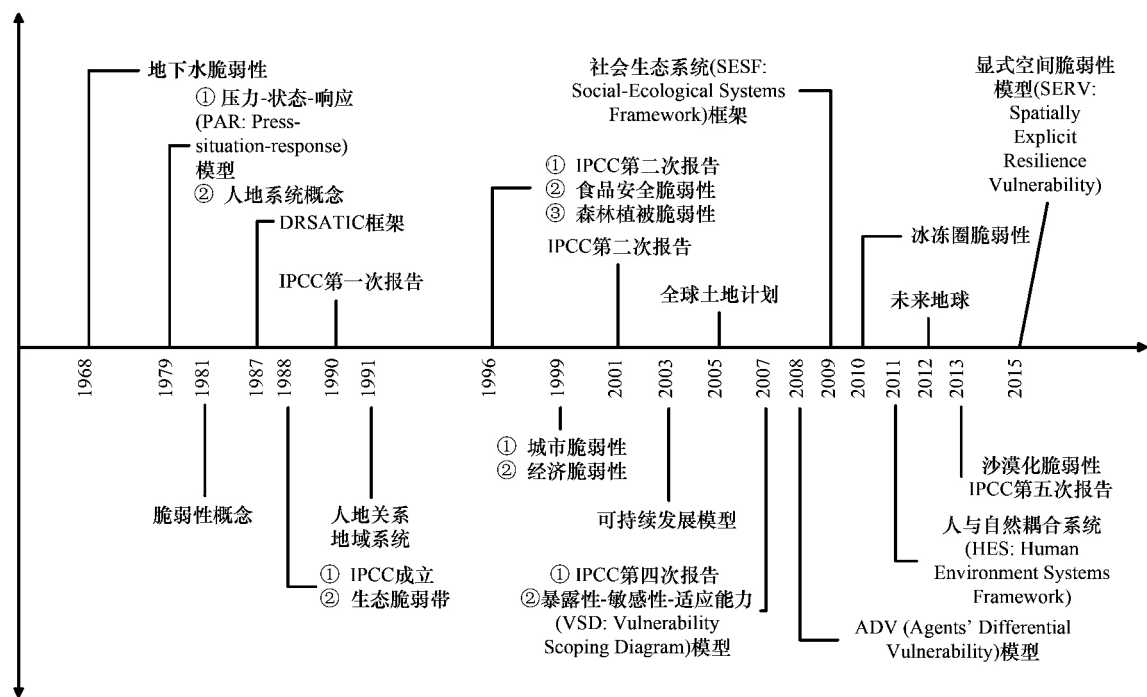


图 2 国内外脆弱性研究重要事件

Fig.2 Important events of vulnerability research at home and abroad

时期的脆弱性情况^[34]。

2.2 定量评价方法

脆弱性评价的目的是探究脆弱性驱动因素和演化机理,评价系统的发展状态,维护系统的可持续发展,缓解外界压力对系统胁迫。目前,很多脆弱性定量评价方法已被提出并得到应用(表 1)。

表 1 脆弱性定量评价方法

Table 1 Quantitative method of vulnerability assessment

方法名称 Method	研究思路 Research ideas	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	需解决的关键问题 Key issues to be solved
指标评价法 ^[35-36] Index evaluation method	具体步骤是分析研究区结构和功能、选择评价指标、评价指标赋权重、计算脆弱性和划分脆弱性等级	通俗易懂,操作简单,适用于多种系统的脆弱性评估	指数赋权重主观性强,忽略指标内在关系,难以验证脆弱性评价结果	指标的选取和指标权重的确定
基于 GIS 和 RS 的脆弱性评价法 ^[37-38] Vulnerability assessment method based on GIS and RS	利用遥感和 GIS 软件功能实现对研究区域的脆弱性分析和制图,实现空间表达和对比分析	识别脆弱性热点区域,进行更精细的分析和预测	脆弱性理论体系不完善,发展较慢	脆弱性理论体系统一和完善
图层叠置法 ^[39] Overlapping method	将不同脆弱性要素构成的图层或者不同形式扰动的脆弱性图层叠置,从而得到脆弱性的空间分布以及差异状况	进行定性和定量分析,直观反映空间差异	未体现图层的相对重要程度,不能实现脆弱性动态预测	选择合适的图层和数学函数进行计算和分析
脆弱性函数模型评价法 ^[40] Vulnerability function model evaluation method	基于对脆弱性要素理解,对系统结构和功能进行分析,运用函数模型评估脆弱性要素之间的关系	较准确表达了脆弱性要素之间的关系,突出脆弱性产生的内在机制和特性等	脆弱性概念和评价体系不完善,要素之间相互关系没有统一的认识	对脆弱性要素有明确的认识,建立合理函数模型

续表

方法名称 Method	研究思路 Research ideas	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	需解决的关键问题 Key issues to be solved
模糊物元评价法 ^[41] Fuzzy matter element evaluation method	首先设定一个参照系统 (要求参照系统脆弱性最 高或者最低),然后计算 研究区域与参照系统的 相似程度,从而确定研究 区域的相对脆弱程度	不考虑变量的相关关系, 充分利用原始变量的 信息	参照系统选取主观性强, 评价结果只能反映相对 大小	设定合理的参照系统
时间序列法 ^[42] Time series method	分析随机过程中时间序 列的平稳性,如周期性、 长期趋势和季节变动	操作简单,规律性强	预测过程可能出现未知 因素影响,导致未来预测 产生偏差	短期脆弱性评价与预测

脆弱性指标评价法步骤包括:评价指标体系构建、指标标准化、指标权重确定和评价结果的解释与应用。首先,选取指标时需要考虑系统内部的功能和结构,同时兼顾外部环境与系统的相互作用关系,国内外比较认可的指标体系类型有五种,具体描述参考表2。

表2 指标评价体系类型

Table 2 The type of indicator evaluation system

指标体系 The system of indicators	指标体系含义 The meaning of indicator system	应用领域 Application areas	脆弱性机理 Vulnerability mechanism	代表性研究 Representative research
“成因及结果表现”指标体系 “Causes and results of performance” index system	包含自然环境的成因指标(气 候、降水等)以及区域系统表现 结果(人均GDP、人口密度 等) ^[43]	生态系统、耦合 系统等	从脆弱性内涵出发,关注系统内 外部因素影响,关注自然条件及 人为干扰状况	张龙生等 ^[44] , 周松秀等 ^[45]
“压力-状态-响应”(PSR)指标 体系 “Press-Situation-Response” index system	压力指标反映人类活动对系统 所造成的负荷,状态指标是系统 内各种因素长期作用的结果,响 应指标一般是人类面对生态问 题所采取的对策与措施 ^[46-47]	各种系统脆弱 性研究	以环境、社会、经济和人类活动 为出发点,集中体现社会和经济 发展同时,反映生态环境的发展 状态和人为活动的正面和负面 影响	余中元等 ^[48] , Zhang 等 ^[36]
“多系统”评价指标体系 “Multi-system” evaluation index system	结合水资源、土地资源、社会经 济资源筛选因子,确定评价指标 体系	多用于复合系 统脆弱性研究	从各子系统的脆弱性出发,分析 各子系统的相互作用,综合分析 地区脆弱性情况以及子系统发 展状况	陈美球等 ^[49]
“暴露-敏感-适应”评价指标 体系 “Exposure-sensitive-adaptation” evaluation index system	暴露性是系统与灾害的接近程 度;敏感性是系统在压力下受损 情况;适应能力是在压力下系统 的状态以及系统受损后的恢复 能力	各类系统脆弱 性研究	从脆弱性内涵出发,分析系统抵 抗干扰的能力、自我调节恢复 的能力和系统暴露于危险干扰下 的概率	李彤珩 ^[50]
生态系统结构-功能-生境指标 体系 Ecosystem structure-function- habitat index system	生态系统结构包括植被指数、叶 面积指数等指标;生态系统功能 包括总初级生产力和净初级生 产力等指标;生态系统生境包括 气候、地形环境因子等	多应用于生态 系统	以结构、功能、生境为指标集反 映生态系统对外界干扰的敏感 性与自身适应能力;在一定程度 上反映了自然扰动和人类活动 的状况	李双成等 ^[2]

其次是指标标准化,多采用最大最小值标准化方法,对正向和负向指标选择不同的标准化公式;然后是指标权重赋值,国内外学者使用的选取指标权重方法有层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)^[51-52]、专家打分法^[53]、平均权重法^[54]、证据权重法(Weight of evidence, WOE)^[55]以及其他统计方法^[56];最后是评价结果的解释与应用,通过分析研究区独特的地理环境及脆弱性特点建立脆弱性分级标准,实现脆弱性评价。但是,现有脆弱性指标评价体系多套用国外不同的理论模式,缺乏清晰的指标因子解释,在评价指标构建过程中,存在层次与问题目标定位不明确、针对性不强等问题,限制了脆弱性评价在决策实践中应用。

脆弱性函数模型评价法运用函数模型评估脆弱性要素、系统内在结构和功能之间的关系^[57]。国外学者 Polsky 提出暴露-敏感-适应 (VSD) 模型,在“方面层-指标层-参数层”三个维度建立脆弱性评估模型^[58-59],如图 3 所示。许多学者在 VSD 模型基础上进行原创性研究,以 VSD 模型为框架结合空间信息提出显式空间敏感脆弱性 (SERV) 模型^[60-61]、生态敏感性-生态恢复力-生态压力度 (Sensitivity-Resilience-Pressure, SRP) 模型^[62]等。

3 脆弱性研究应用视角演变

与全球气候变化、可持续发展理论研究相适应,脆弱性研究由单一脆弱性研究发展到耦合系统脆弱性综合研究。归纳总结国内外脆弱性应用视角演变情况,脆弱性在自然灾害、水资源系统、生态系统和复合系统等方向得到广泛应用(表 3)。

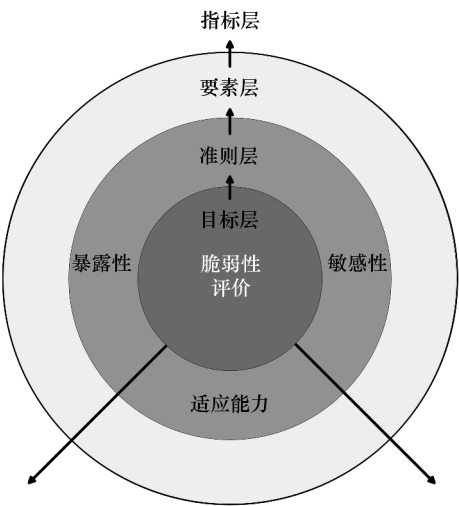


图 3 VSD 框架一般形式
Fig.3 The general form of the VSD framework

表 3 脆弱性研究视角
Table 3 Vulnerability research perspective

研究视角 Research perspective	相关术语 Related terms	典型定义 Typical definition	相关研究文献 Related research literature	研究热点 Research hot spots
自然灾害 Natural disaster	灾害脆弱性	自然灾害脆弱性: 承载体对灾害的敏感性 ^[17] ; 社会灾害脆弱性: 社会或国家暴露于灾害冲击下潜在的受灾因素、受伤害程度及应对能力大小 ^[63-64] ; 综合定义: 系统暴露于致灾因子,即外部性;系统所具有的抵抗能力和恢复能力,即内部性 ^[65]	周扬等 ^[66] , Pelandi ^[67] , Blaikie 等 ^[68]	灾害脆弱性的自然属性和社会属性;关注人类活动和自然气候的影响 ^[69-70]
水资源 Water resources	地下水资源脆弱性 水资源脆弱性	污染到达最上含水层之上某特定位置的倾向性与可能性,并将地下水脆弱性分为本质脆弱性与特殊脆弱性 ^[71] 在气候变化、人为活动等的作用下,水资源系统结构发生改变、水资源的数量减少和质量降低,以及由此引发的水资源供给、需求、管理的变化和旱涝等自然灾害的发生 ^[76]	魏兴萍等 ^[72] , Ouedraogo 等 ^[73] 刘绿柳 ^[77] , Cai 等 ^[78]	结合人工智能和模糊理论构建函数模型;地下水风险研究 ^[74-75] 气候变化下水资源脆弱性研究;考虑人类活动对水资源的影响 ^[79-80]
生态系统 Ecosystem	生态系统脆弱性	IPCC 定义为: 包括系统变化的评估、系统响应的敏感性和适应性评价,是敏感性、暴露性和适应能力的函数 ^[81] ; 国外定义: 是暴露性和适应能力的函数 ^[82] ; 国内定义: 生态系统或区域在干扰压力下,其结构组成与功能发生变化,并向不利于自身的方向发展 ^[83]	牛文元等 ^[84] , Bouahim 等 ^[85]	构建统一完整的生态脆弱性评价指标体系;生态脆弱性预测和监测 ^[86-87]
复合系统 Composite system	城市系统脆弱性	城市系统脆弱性是城市复合系统及其子系统对干扰的敏感性与应对能力 ^[88]	张路路等 ^[89] , 李博等 ^[90]	城市脆弱性定义和概念界定、脆弱性理论模型、规避措施以及城市脆弱性评价体系的建立 ^[91-92]

续表

研究视角 Research perspective	相关术语 Related terms	典型定义 Typical definition	相关研究文献 Related research literature	研究热点 Research hot spots
其他视角 Other perspectives	社会-生态系统脆弱性	由于社会生态系统对内外各种扰动的敏感性和缺乏应对不利扰动的能力而使系统容易向着不可持续方向发展的—种状态 ^[93] , 是其演替阶段所具有的功能结构的综合反映 ^[54]	余中元等 ^[54, 94] , 杨新军 ^[95]	社会生态系统脆弱性跨尺度研究; 考虑人类活动和国家政策; 考虑社会生态系统的功能区别 ^[96-98]
	人地耦合系统脆弱性	社会系统面对各类灾害和胁迫表现出来的易损性质, 表现为系统向不利于自身稳定和人类利益的方向发展 ^[38]	田亚平 ^[30] , Gallopín ^[99] , Polsky 等 ^[100]	定量分析和表达人地耦合脆弱性; 研究与应用动态模型以及系统论方法 ^[5]
	冰冻圈脆弱性	冰冻圈及其组成要素易受气候变化, 尤其是温度和固态降水变化不利影响的程度, 是气候的变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和自适应能力的函数 ^[101]	何勇 ^[101] , 杨建平 ^[102]	冰冻圈脆弱性现状评估; 未来不同时段、不同社会经济情景评估
	沙漠化脆弱性	沙漠化系统对气候变化等负面影响的响应程度, 是气候的变率特征、幅度和变化速率及其暴露度、敏感性和适应性的函数 ^[104]	任小玢等 ^[103] , 黄莹等 ^[104]	讨论沙漠化脆弱性评价的不确定性; 科学选取沙漠化脆弱性指标体系

脆弱性是一个与资源环境、社会经济和政府政策相关的概念。根据脆弱性内涵和研究方向可以分为单要素脆弱性和耦合系统脆弱性。单要素脆弱性是以某一种具体要素或系统作为研究对象, 如灾害、水资源、经济脆弱性等; 耦合系统脆弱性从系统整体角度出发, 如城市、生态、人地耦合系统等。单要素脆弱性是耦合系统脆弱性的基础和前提, 耦合系统脆弱性需要在单要素脆弱性相互作用的前提下进行集成分析。鉴于目前耦合系统脆弱性研究尚未形成完善的理论体系, 在概念体系、分析框架、评价方法等方面还不统一, 很难进行精细量化的深入研究^[105]。

4 脆弱性研究的新进展

21 世纪以来, 国内外学者对传统脆弱性评价方法进行改进与创新, 挖掘遥感等多粒度、多时相和多方位数据信息, 着重分析人类活动对脆弱性的影响, 从多尺度分析脆弱性关键要素阈值与驱动演化机理, 完善了脆弱性综合评价的理论与框架, 极大地推动了脆弱性研究的新进展。

4.1 脆弱性评价方法完善与创新

4.1.1 完善指标评价法

评价脆弱性的主要方法是指标评价法, 但存在脆弱性指标评价体系不一、指标和权重选择的主观性很强等问题。因此, 国内外学者针对指标评价法的弊端, 探究指标选取的方法: 显式空间脆弱性模型 (SERV)、多重共线性诊断分析和粗糙集属性约简等方法^[60, 106-107]; 对指标权重选择进行改进和完善: AHP 法对熵权法的限制、熵权法对 AHP 法修正法^[108]、最小信息熵计算综合权重法^[109]等。

4.1.2 与人工智能算法、模糊理论相结合

脆弱性评价涉及资源、环境、社会、经济等因素的相互作用, 脆弱性与人工智能、模糊理论的结合, 能够体现脆弱性要素之间的相互作用关系, 解释脆弱性成因与驱动因素。传统脆弱性评价采用加权分析计算脆弱性评价指数, 在此基础上, 国内外学者利用人工智能、模糊数学或突变理论等方法改进指标评价法: 采用逼近理想解的排序方法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)^[110]、突变级数法^[111]、集对分析法^[112]、基于梯形模糊数联系数的评价方法^[113]等; 另外, 在脆弱性模型构建和评价分析方面进行原创性研究, 如采用非线性评估模型、数据包络分析方法 (Data Envelopment Analysis, DEA)、基于松弛变量权重的数据包络分析模型 (Weighted Slacks-based Measure, WSBM)、BP 人工神经网络模型、障碍度评价模型、理想解-秩和比方法、多准则决策分析与有序加权平均算子、监督智能委员会机器 (Supervised Intelligence

Committee Machine, SICM) 等方法对脆弱性进行评价和分析^[75, 114-119]。

4.2 人为活动影响下的脆弱性耦合系统时空分析与动态评价

近年来,脆弱性评价从单一要素向人地耦合综合研究转换,从特定空间尺度或者某一时间截面研究向多时序多角度研究靠拢,从静态评价向动态评价转换^[120]。21 世纪以来,脆弱性研究注重时间维度上动态变化,探讨驱动因素的耦合作用^[121];在空间尺度上注重脆弱性跨尺度传递和转移,促进脆弱性过程机制研究。同时,越来越多的学者认识到脆弱性与人类活动有着密切的联系。2013 年,IPCC 第五次报告中明确了人类对大气、水资源、冰冻圈以及生物化学循环的影响^[122]。自然环境为人类提供生存和发展的必要条件,人类合理利用下能够与外界资源达到动态平衡,维持良性循环。因此,科学家和各领域学者从人地关系出发,研究人为活动影响下的耦合系统脆弱性动态评价和分析^[123-124]。

4.3 脆弱性多尺度精细评价

不同时空尺度的脆弱性研究是深刻认识、科学评价和有效管理灾害风险必须关注的重要科学问题^[125]。系统多要素、多尺度产生的不确定性影响脆弱性评价结果的客观性,脆弱性评价在宏观角度上表现为分散格局,体现国民经济的运行状况;在较小空间尺度上呈现集聚态势,体现人口特征、公共资源分配等影响^[126]。传统的脆弱性评价研究大多集中市、省、国等区域尺度,针对县域尺度相对较少^[127]。县域作为社会和生态最直接最基本的研究单元,在资源环境、经济社会方面与城市等区域尺度存在一定差别。近年来,系统脆弱性评价尺度由国家级、省、市研究向县域方向发展,国内外学者开展大量县域脆弱性分析^[128],从人地耦合系统角度讨论多要素、长时序、小尺度区域系统脆弱性评价的研究意义和现实需求。另外,许多学者借鉴区划和功能分区的思想,将研究区划分为不同功能区,根据区域特点进行针对性的脆弱性评价^[110, 129],如武建军等以全球农业种植区为研究区域,构建了全球农业旱灾脆弱性指数,完成了全球农业旱灾承灾体脆弱性评价^[130],这为社会生态系统在不同适应目标下的脆弱性评估提供一个新思路。

4.4 多源遥感数据信息挖掘提取

随着对地观测技术发展,遥感数据呈现多元化,数据所包含的信息亟待提取、分析和利用^[131]。现阶段,国内外学者多利用统计数据、普查数据等构建脆弱性指标评价体系,由于统计数据受到政策、社会和人为因素的影响,脆弱性评价指标存在时间滞后、部分指标值缺失等缺点,不能实现脆弱性的时空分析和评价。遥感数据多粒度、多时相、多方位和多层次的特点能够实现对地表的全面反映,能够为脆弱性时空分析提供足够的信息和数据。

21 世纪以来,国内外学者开展基于遥感和地理信息系统的脆弱性评估^[132-133],主要遥感数据包括 Landsat、MODIS、ASTER 等^[110, 134]。目前利用多源遥感数据信息的脆弱性研究包括:一是利用遥感数据的多时相特征,实现长时序脆弱性评价^[19],如丁肇慰等利用 1950—2013 年的 8 个时期遥感影像数据对东北三江平原生态脆弱性时空动态变化进行定量评价^[135];二是从遥感影像中提取与人类活动有关的指标,说明人类活动对脆弱性的影响^[104];三是利用脆弱性构建早期预警系统,实现脆弱性预测。多源遥感数据信息挖掘提取已成为地理学及相关学科的研究重点,要理解和分析系统内在要素关系及与外部的相互作用,寻求合适的脆弱性研究方法,合理高效利用遥感数据信息。

4.5 脆弱性关键要素阈值研究

资源供给和环境条件是制约生态系统结构和功能状态的根本因素,资源供给和环境条件改变可能诱发系统发生结构和功能改变,甚至是突变或转型^[136]。因此,定量研究脆弱性关键要素阈值和边界条件,能够揭示系统演变、突变和转型的内在过程,从而实现系统脆弱性评价研究^[137]。国内外对脆弱性要素阈值研究包括关键要素选取与阈值界定、基于关键要素阈值的脆弱性评价^[135]: Radford 提出生态阈值是生态系统从一种状态快速转变为另一种状态的某个点或一段区间,推动力来自某个或多个关键生态因子微弱的附加改变^[138]; Marina 等综合分析澳大利亚、非洲和南美洲等地区森林、稀疏草原和无树状态下的降水量变化,计算降水量变化阈值及脆弱性分布情况^[139]。关键要素阈值揭示系统对干扰的反应和系统内在特性,在阐明系统结构和功

能关系、构建区域可持续发展、系统阈值检测与量化等方面有着重要理论和实践意义。

4.6 脆弱性驱动因素与演化机理综合研究

随着全球环境变化影响研究的加强,特别是对于人地关系研究的深入,有关系统脆弱性驱动因素与演化机理等综合研究逐渐成为国内外研究热点,其研究内容不断扩展、应用领域日趋广泛并呈现学科综合化的趋势。首先,脆弱性研究演变机理分析,国内外学者除分析系统脆弱性表现特征、评价结果和空间分异特征外,分析脆弱性驱动因素及其相互作用关系,探究区域系统脆弱性长期演化机理^[140];其次是提出脆弱性预警防范机制,结合地区发展,从经济社会、资源环境等角度提出对策建议,研究探讨系统面临的危机,从而建立预警防范机制^[141];最后是恢复和重建已破坏的系统,系统遭到破坏表现为结构退化、功能衰退和生境变劣等,系统恢复和重建要求了解区域发展状况、脆弱性驱动因素和内在机理,提出针对性优化对策,从而实现因地制宜^[142]。

5 脆弱性研究总结与展望

从 20 世纪 60 年代脆弱性概念的提出,到 21 世纪与全球气候变化、可持续发展等成为地学和生态学领域的研究重点。脆弱性研究由传统的单一要素、单一系统分析发展为综合时空尺度和动态预测的耦合系统脆弱性评价;环境恶化和资源枯竭等问题使国内外学者逐渐意识到在脆弱性评价中人类活动影响的重要性;系统多要素、多尺度产生的不确定性促使脆弱性研究考虑评价尺度和区域问题,关注遥感数据中的多时相和多时序信息;资源环境要素变化影响社会-生态系统功能和结构改变,脆弱性要素阈值研究揭示系统演变、突变和转型的内在过程;人地关系研究深入,探究脆弱性演变机理和驱动机制,建立脆弱性预警防范机制。纵观脆弱性发展的历程,不仅体现了人类对资源环境系统的认识和理解,也表现了人地关系、人类活动与可持续发展关系。可以说,脆弱性研究不仅是区域发展状况评价问题,也是涉及人类进步与系统发展的哲学问题。

目前,真正意义上的人类社会和资源环境两大耦合系统脆弱性理论和评价研究仍然是脆弱性研究的重点和前沿。辨析自然驱动力和人文驱动力对系统脆弱性研究有重要指导作用,科学利用时空特征对脆弱性分析,充分认识人为活动对耦合系统的影响,探究基于关键要素阈值的脆弱性评估,充分发挥脆弱性研究实践价值。鉴于此,为进一步解决脆弱性研究面临的理论和实践问题,需着力解决以下问题:

(1) 理论上,脆弱性研究应集中于建立完善统一的内涵与框架。多样化的脆弱性概念容易造成研究思路 and 评价方法的混淆,同时造成不同领域的脆弱性成果交流存在一定的难处,不利于多学科交叉和共享。因此,要真正促进脆弱性研究发展,在脆弱性概念框架统一和理论体系构建方面亟待加强。

(2) 技术方法上,脆弱性指标评价应注重指标体系构建与脆弱性机理联系,结合区域实际情况筛选指标;脆弱性评价应关注关键要素阈值,分析系统结构和功能变化的根本驱动因素。因此,应整合利用多源数据,从时间序列和横向空间两个角度动态分析系统脆弱性关键要素阈值,综合生态系统结构、功能及生境等特征建立脆弱性指标评价体系,运用合理的脆弱性方法进行区域长时序脆弱性动态评价,真正实现脆弱性评价方法由静态到动态、由定性到定量的转变。

(3) 实际应用上,脆弱性研究重点应注重将评价理论与实践研究相结合,研究脆弱性关键要素及其相互关系,关注人为活动影响,体现其对地区发展和规划的指导意义。未来脆弱性研究应关注关键要素对脆弱性的影响,研究关键要素阈值及基准线范围,关注其生态、社会经济等方面的研究意义。从单一要素和系统整体出发,构建脆弱性动态评价、监测和预测系统,促使脆弱性评价系统化、标准化、规范化,使之更好的服务于区域研究和发展,从而为国家有关部门提供指导和参考,满足国家和地区可持续发展需要。

参考文献(References):

- [1] 黄晓军,黄馨,崔彩兰,杨新军. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1512-1525.
- [2] 李双成,吴绍洪,戴尔阜. 生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价. 生态学报, 2005, 25(3): 621-626.
- [3] 徐君,李贵芳,王育红. 国内外资源型城市脆弱性研究综述与展望. 资源科学, 2015, 37(6): 1266-1278.

- [4] 周晓峰,王传宽. 黑龙江流域的生态脆弱性及林业对策. 林业科学, 1997, 33(2): 97-106.
- [5] 陈萍,陈晓玲. 全球环境变化下人-环境耦合系统的脆弱性研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(4): 454-462.
- [6] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [7] 方创琳,王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征. 地理学报, 2015, 70(2): 234-247.
- [8] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, Leemans R, Schröter D. The vulnerability of ecosystem services to land use change. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 114(1): 69-85.
- [9] Sanyal J, Lu X X. Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India. Hydrological Processes, 2005, 19(18): 3699-3716.
- [10] 李莉,王晓婷,王辉. 脆弱性内涵、评价与研究趋势综述. 中国渔业经济, 2010, 28(3): 161-169.
- [11] 李鹤,张平宇,程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
- [12] Adger W N. Vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 268-281.
- [13] 窦玥,戴尔阜,吴绍洪. 区域土地利用变化对生态系统脆弱性影响评估——以广州市花都区为例. 地理研究, 2012, 31(2): 311-322.
- [14] 袁海红,牛方曲,高晓路. 城市经济脆弱性模拟评估系统的构建及其应用. 地理学报, 2015, 70(2): 271-282.
- [15] Kasperson J X, Kasperson R E. International Workshop on Vulnerability and Global Environmental Change. Stockholm, Sweden: Stockholm Environment Institute (SEI), 2001.
- [16] Chambers R. Vulnerability, coping and policy (editorial introduction). Ids Bulletin, 2006, 37(4): 33-40.
- [17] Mitchell J K, Devine N, Jagger K. A contextual model of natural hazard. Geographical Review, 1989, 79(4): 391-409.
- [18] Bohle H G, Downing T E, Watts M J. Climate change and social vulnerability: toward a sociology and geography of food insecurity. Global Environmental Change, 1994, 4(1): 37-48.
- [19] Watts M J, Bohle H G. The space of vulnerability: the causal structure of hunger and famine. Progress in Human Geography, 1993, 17(1): 43-67.
- [20] Fatemi F, Ardalan A, Aguirre B, Mansouri N, Mohammadfam I. Social vulnerability indicators in disasters: findings from a systematic review. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 22: 219-227.
- [21] Birkmann J. Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Resilience Societies. New York: United Nations University, 2006.
- [22] Cutter S L. Living With Risk: The Geography of Technological Hazards. London: Edward Arnold, 1993.
- [23] Kates R W. The interaction of climate and society. Climate Impact Assessment, 1985.
- [24] Dow K. Exploring differences in our common future(s): the meaning of vulnerability to global environmental change. Geoforum, 1992, 23(3): 417-436.
- [25] Kelly P M, Adger W N. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. Climatic Change, 2000, 47(4): 325-352.
- [26] 刘燕华,李秀彬. 脆弱生态环境与可持续发展. 北京: 商务印书馆, 2007.
- [27] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [28] Birkmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications. Environmental Hazards, 2007, 7(1): 20-31.
- [29] 刘小茜,王仰麟,彭建. 人地耦合系统脆弱性研究进展. 地球科学进展, 2009, 24(8): 917-927.
- [30] 田亚平,向清成,王鹏. 区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系. 地理研究, 2013, 32(1): 55-63.
- [31] 乔青,高吉喜,王维,田美荣,吕世海. 生态脆弱性综合评价方法与应用. 环境科学研究, 2008, 21(5): 117-123.
- [32] Cumming G S, Barnes G, Perz S, Schmink M, Sieving K E, Southworth J, Binford M, Holt R D, Stickler C, Van Holt T. An exploratory framework for the empirical measurement of resilience. Ecosystems, 2005, 8(8): 975-987.
- [33] 徐广才,康慕谊,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.
- [34] 蔡海生,刘木生,李凤英,林联盛. 生态环境脆弱性静态评价与动态评价. 江西农业大学学报, 2009, 31(1): 149-155, 165-165.
- [35] 王志杰,苏娜. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析. 生态学报, 2018, 38(2): 432-442.
- [36] Zhang X Q, Wang L K, Fu X S, Li H, Xu C D. Ecological vulnerability assessment based on PSSR in Yellow River Delta. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 1106-1111.
- [37] Ghajari Y E, Alesheikh A A, Modiri M, Hosnavi R, Abbasi M, Sharifi A. Urban vulnerability under various blast loading scenarios: analysis using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. Cities, 2018, 72: 102-114.
- [38] Karimzadeh S, Miyajima M, Hassanzadeh R, Amiraslzadeh R, Kamel B. A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 66: 263-280.
- [39] 薛正平,邓华,杨星卫,刘成良. 基于决策树和图层叠置的精准农业产量图分析方法. 农业工程学报, 2006, 22(8): 140-144.
- [40] 党二莎,胡文佳,陈甘霖,马志远,陈彬,陈章群,刘文华. 基于 VSD 模型的东山县海岸带区域生态脆弱性评价. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 296-302.
- [41] 祝云舫,王志柳. 城市环境风险程度排序的模糊分析方法. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 155-158.

- [42] Roumani Y, Nwankpa J K, Roumani Y F. Time series modeling of vulnerabilities. *Computers & Security*, 2015, 51: 32–40.
- [43] 邓伟, 袁兴中, 孙荣, 张跃伟. 基于遥感的北方农牧交错带生态脆弱性评价. *环境科学与技术*, 2016, 39(11): 174–181.
- [44] 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.
- [45] 周松秀, 田亚平, 刘兰芳. 南方丘陵区农业生态环境脆弱性的驱动力分析——以衡阳盆地为例. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 938–944.
- [46] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 马朋, 杨予静, 任庆水, 张雯. 三峡库区生态脆弱性评价. *生态学报*, 2015, 35(21): 7117–7129.
- [47] Zhang F, Liu X P, Zhang J Q, Wu R N, Ma Q Y, Chen Y N. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China. *Ecological Modelling*, 2017, 349: 41–50.
- [48] 余中元, 李波, 张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析. *生态学报*, 2014, 34(7): 1870–1879.
- [49] 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*, 2003, 25(4): 523–527.
- [50] 李彤玥. 基于“暴露—敏感—适应”的城市脆弱性空间研究——以兰州市为例. *经济地理*, 2017, 37(3): 86–95.
- [51] 杨斌, 詹金凤, 李茂娇. 岷江上游流域环境脆弱性评价. *国土资源遥感*, 2014, 26(4): 138–144.
- [52] 刘守强, 武强, 曾一凡, 宫厚健, 李哲. 基于 GIS 的改进 AHP 型脆弱性指数法. *地球科学*, 2017, 42(4): 625–633.
- [53] 王瑞燕, 赵庚星, 周伟, 朱西存, 王介勇, 秦元伟. 土地利用对生态环境脆弱性的影响评价. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 215–220.
- [54] 杨俊, 关莹莹, 李雪铭, 席建超. 城市边缘区生态脆弱性时空演变——以大连市甘井子区为例. *生态学报*, 2018, 38(3): 778–787.
- [55] 陈金月, 王石英. 岷江上游生态环境脆弱性评价. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 471–479.
- [56] 何娟, 徐明德. 基于 GIS 技术的生态环境脆弱性模糊综合评价. *四川环境*, 2011, 30(1): 56–60.
- [57] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 1–9.
- [58] Hawes C, Reed C. Theoretical steps towards modelling resilience in complex systems // Gavrilova M, Gervasi O, Kumar V, Tan C J K, Tanian D, Laganú A, Mun Y, Choo H, eds. *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2006*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 644–653.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. A framework for the development of the SERV model: a spatially explicit resilience–vulnerability model. *Applied Geography*, 2014, 51: 158–172.
- [62] 齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 谢余初, 张影. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 224–228.
- [63] 周利敏. 从自然脆弱性到社会脆弱性: 灾害研究的范式转型. *思想战线*, 2012, 38(2): 11–15.
- [64] 周利敏. 社会脆弱性: 灾害社会学研究的新范式. *南京师大学报: 社会科学版*, 2012, (4): 20–28.
- [65] 周瑶, 王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 435–442.
- [66] 周扬, 李宁, 吴文祥. 自然灾害背景下的社会脆弱性研究进展. *灾害学*, 2014, 29(2): 128–135.
- [67] Pelanda C. *Disaster and Sociosystemic Vulnerability*. Gorizia: Disaster Research Center, 1981.
- [68] Blaikie P, Cannon T, Davis I, Wisner B. At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. *Economic Geography*, 2003, 72(4): 460–463.
- [69] Rahman N, Ansary M A, Islam I. GIS based mapping of vulnerability to earthquake and fire hazard in Dhaka city, Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, 13: 291–300.
- [70] Dwyer A, Zoppou C, Nielsen O, Day S, Roberts S. Quantifying Social Vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards. Australia: Geoscience Australia, 2004.
- [71] Bosch D D. Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential under Conditions of Uncertainty. *Journal of Environmental Quality*, 1969, 24(2): 387–388.
- [72] 魏兴萍, 蒲俊兵, 赵纯勇. 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价. *生态学报*, 2014, 34(3): 589–596.
- [73] Ouedraogo I, Defourny P, Vanclooster M. Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 939–953.
- [74] Shrestha S, Kafle R, Pandey V P. Evaluation of index-overlay methods for groundwater vulnerability and risk assessment in Kathmandu Valley, Nepal. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 779–790.
- [75] Nadiri A A, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S, Moghaddam A A. Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM). *Science of The Total Environment*, 2017, 574: 691–706.
- [76] 唐国平, 李秀彬, 刘燕华. 全球气候变化下水资源脆弱性及其评估方法. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 313–317.
- [77] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价. *水土保持通报*, 2002, 22(2): 41–44.
- [78] Cai J L, Varis O, Yin H. China's water resources vulnerability: a spatio-temporal analysis during 2003–2013. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2901–2910.
- [79] Zambrano L, Pacheco-Muñoz R, Fernández T. A spatial model for evaluating the vulnerability of water management in Mexico City, Sao Paulo and Buenos Aires considering climate change. *Anthropocene*, 2017, 17: 1–12.
- [80] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 张颖. 京津冀水资源脆弱性评价. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 211–218.

- [81] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [82] Smit B, Pilifosova O. From adaptation to adaptive capacity and vulnerability reduction // Smith J B, Klein R J T, Huq S, eds. Climate Change, Adaptive Capacity and Development. London: Imperial College Press, 2003: 9–28.
- [83] 赵平, 彭少麟, 张经纬. 生态系统的脆弱性与退化生态系统. 热带亚热带植物学报, 1998, 6(3): 179–186.
- [84] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定. 生态学报, 1989, 9(2): 97–105.
- [85] Bouahim S, Rhazi L, Ernoul L, Mathevet R, Amami B, Er-Riyahi S, Muller S D, Grillas P. Combining vulnerability analysis and perceptions of ecosystem services in sensitive landscapes: a case from western Moroccan temporary wetlands. Journal for Nature Conservation, 2015, 27: 1–9.
- [86] Chang Y T, Lee Y C, Huang S L. Integrated spatial ecosystem model for simulating land use change and assessing vulnerability to flooding. Ecological Modelling, 2017, 362: 87–100.
- [87] Qiu B K, Li H L, Zhou M, Zhang L. Vulnerability of ecosystem services provisioning to urbanization: a case of China. Ecological Indicators, 2015, 57: 505–513.
- [88] 张晓瑞, 程龙, 王振波. 城市脆弱性动态演变的模拟预测研究. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(10): 95–102.
- [89] 张路路, 郑新奇, 张春晓, 吕永强. 基于变权模型的唐山城市脆弱性演变预警分析. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1858–1870.
- [90] 李博, 佟连军, 韩增林. 东北地区煤炭城市脆弱性与可持续发展模式. 地理研究, 2010, 29(2): 361–372.
- [91] 苏飞, 陈媛, 张平宇. 基于集对分析的旅游城市经济系统脆弱性评价——以舟山市为例. 地理科学, 2013, 33(5): 538–544.
- [92] Yan B Y, Wang J, Li S S, Cui L F, Ge Z M, Zhang L Q. Assessment of socio-economic vulnerability under sea level rise coupled with storm surge in the Chongming County, Shanghai. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 91–98.
- [93] 苏飞, 张平宇. 矿业城市社会系统脆弱性研究——以阜新市为例. 地域研究与开发, 2009, 28(2): 71–74, 89–89.
- [94] 余中元, 李波, 张新时. 湖泊流域社会生态系统脆弱性分析——以滇池为例. 经济地理, 2014, 34(8): 143–150.
- [95] 杨新军, 张慧, 王子侨. 基于情景分析的西北农村社会-生态系统脆弱性研究——以榆中县中连川乡为例. 地理科学, 2015, 35(8): 952–959.
- [96] Mavhura E, Manyena B, Collins A E. An approach for measuring social vulnerability in context: the case of flood hazards in Muzarabani district, Zimbabwe. Geoforum, 2017, 86: 103–117.
- [97] Peterson G, Allen C R, Holling C S. Ecological resilience, biodiversity, and scale. Ecosystems, 1998, 1(1): 6–18.
- [98] 顾康康, 刘景双, 王洋, 彭小黎, 王明全. 辽中地区矿业城市生态系统脆弱性研究. 地理科学, 2008, 28(6): 759–764.
- [99] Gallopín G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 293–303.
- [100] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: the vulnerability scoping diagram. Global Environmental Change, 2007, 17(3/4): 472–485.
- [101] 何勇, 武永峰, 刘秋峰. 未来气候变化情景下中国冰冻圈变化影响区域的脆弱性评价. 科学通报, 2013, 58(9): 833–839.
- [102] 杨建平, 丁永建, 方一平, 秦大河. 冰冻圈及其变化的脆弱性与适应研究体系. 地球科学进展, 2015, 30(5): 517–529.
- [103] 任小玢, 胡光印, 董治宝. 沙漠化脆弱性的概念与评价. 中国沙漠, 2015, 35(1): 40–50.
- [104] 黄莹, 包安明, 刘海隆, 冯先伟, 杨光华. 基于景观格局的新疆生态脆弱性综合评价研究. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 261–266.
- [105] 田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. 地理学报, 2012, 67(11): 1515–1525.
- [106] 姚雄, 余坤勇, 刘健, 杨素萍, 何平, 邓洋波, 俞欣妍, 陈樟昊. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变. 应用生态学报, 2016, 27(3): 735–745.
- [107] de Figueiredo C J J, Pereira D V E S, de Miranda Mota C M. Classification of vulnerable areas using dominance-based rough set approach // Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Budapest, Hungary: IEEE, 2017: 2906–2910.
- [108] 刘大海, 宫伟, 邢文秀, 李晓璇, 马雪健, 于莹. 基于 AHP-熵权法的海岛海岸带脆弱性评价指标权重综合确定方法. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 462–467.
- [109] 夏兴生, 朱秀芳, 李月臣, 吴建峰, 何志明. 基于 AHP-PCA 熵组合权重模型的三峡库区(重庆段)农业生态环境脆弱性评价. 南方农业学报, 2016, 47(4): 548–556.
- [110] 温晓金, 杨新军, 王子侨. 多适应目标下的山地城市社会-生态系统脆弱性评价. 地理研究, 2016, 35(2): 299–312.
- [111] 高江波, 侯文娟, 赵东升, 吴绍洪. 基于遥感数据的青藏高原自然生态系统脆弱性评估. 地理科学, 2016, 36(4): 580–587.
- [112] 李博, 杨智, 苏飞, 孙才志, 许妍, 郭建科, 王泽宇. 基于集对分析的中国海洋经济系统脆弱性研究. 地理科学, 2016, 36(1): 47–54.
- [113] 潘争伟, 金菊良, 刘晓薇, 周戎星. 水资源利用系统脆弱性机理分析与评价方法研究. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1599–1609.
- [114] 钱龙霞, 王红瑞, 张韧, 汪杨骏. 基于降维思想的水资源脆弱性非线性评估模型及其应用. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 60–67.
- [115] 裴欢, 王晓妍, 房世峰. 基于 DEA 的中国农业旱灾脆弱性评价及时空演变分析. 灾害学, 2015, 30(2): 64–69.
- [116] 孙才志, 覃雄合, 李博, 王泽宇. 基于 WSBM 模型的环渤海地区海洋经济脆弱性研究. 地理科学, 2016, 36(5): 705–714.
- [117] 彭飞, 韩增林, 杨俊, 钟敬秋. 基于 BP 神经网络的中国沿海地区海洋经济系统脆弱性时空分异研究. 资源科学, 2015, 37(12): 2441–2450.
- [118] Wang D L, Zheng J P, Song X F, Ma G, Liu Y. Assessing industrial ecosystem vulnerability in the coal mining area under economic fluctuations. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 4019–4031.

- [119] Zhang Y, Shen J, Ding F, Li Y, He L. Vulnerability assessment of atmospheric environment driven by human impacts. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 778–790.
- [120] 陆大道. 关于地理学的“人-地系统”理论研究. *地理研究*, 2002, 21(2): 135–139.
- [121] Liu C L, Golding D, Gong G. Farmers' coping response to the low flows in the lower Yellow River: a case study of temporal dimensions of vulnerability. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 543–553.
- [122] IPCC. *Climate Change 2013: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [123] Yan L, Xu X G. Assessing the vulnerability of social-environmental system from the perspective of hazard, sensitivity, and resilience: a case study of Beijing, China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(6): 1179–1186.
- [124] Busico G, Kazakis N, Colombani N, Mastrocicco M, Voudouris K, Tedesco D. A modified SINTACS method for groundwater vulnerability and pollution risk assessment in highly anthropized regions based on NO₃– and SO₄2– concentrations. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1512–1523.
- [125] 黄建毅, 苏飞. 城市灾害社会脆弱性研究热点问题评述与展望. *地理科学*, 2017, 37(8): 1211–1217.
- [126] Leichenko R M, Solecki W D. Climate change in suburbs: an exploration of key impacts and vulnerabilities. *Urban Climate*, 2013, 6: 82–97.
- [127] 唐小兵, 周国华. 基于主成分分析的县域贫困脆弱性评价——基于 2016 年湖南省贫困县的调研. *中南林业科技大学学报: 社会科学版*, 2017, 11(3): 47–52.
- [128] 鲁大铭, 石育中, 李文龙, 杨新军. 西北地区区域脆弱性时空格局演变. *地理科学进展*, 2017, 36(4): 404–415.
- [129] 宋一凡, 郭中小, 卢亚静, 廖梓龙, 徐晓民. 一种基于 SWAT 模型的干旱牧区生态脆弱性评价方法——以艾布盖河流域为例. *生态学报*, 2017, 37(11): 3805–3815.
- [130] 武建军, 耿广坡, 周洪奎, 刘京会, 王前锋, 杨建华. 全球农业旱灾脆弱性及其空间分布特征. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(6): 733–744.
- [131] 李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘. *测绘学报*, 2014, 43(12): 1211–1216.
- [132] Sakala E, Fourie F, Gomo M, Coetzee H. GIS-based groundwater vulnerability modelling: a case study of the Witbank, Ermelo and Highveld Coalfields in South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 137: 46–60.
- [133] Semeraro T, Mastroleo G, Aretano R, Facchinetti G, Zurlini G, Petrosillo I. GIS fuzzy expert system for the assessment of ecosystems vulnerability to fire in managing Mediterranean natural protected areas. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168: 94–103.
- [134] Choudhary K, Boori M S, Kupriyanov A. Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan, Russia. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2017, doi: 10.1016/j.ejrs.2017.05.003.
- [135] Staver A C, Archibald S, Levin S A. The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. *Science*, 2011, 334(6053): 230–232.
- [136] 丁肇慰, 陈锡云, 陈昌华, 张军泽. 开垦 60 年东北三江平原典型产粮区生态脆弱性时空格局演变分析——以 859 农场为例. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 77–83.
- [137] Linder H L, Horne J K, Ward E J. Modeling baseline conditions of ecological indicators: marine renewable energy environmental monitoring. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 178–191.
- [138] Bennett A F, Radford J Q. Know your ecological thresholds. *Thinking Bush*, 2003, (2): 1–3.
- [139] Hirota M, Holmgren M, Van Nes E H, Scheffer M. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science*, 2011, 334(6053): 232–235.
- [140] Fussler H M, Klein R J T. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 2006, 75(3): 301–329.
- [141] 李博, 苏飞, 杨智, 韩增林, 彭飞. 基于脆弱性视角的环渤海地区人海关系地域系统时空特征及演化分析. *生态学报*, 2018, 38(4): 1436–1445.
- [142] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 吴绍洪, 戴尔阜. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 320–330.