

生态脆弱性及其研究进展

徐广才, 康慕谊*, 贺丽娜, 李亚飞, 陈雅如

(北京师范大学资源学院, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学中国生态资产评估研究中心, 北京 100875)

摘要:生态脆弱性已成为当前全球变化与可持续发展研究中的热点问题。有关生态脆弱性的研究,正逐渐从重点考察某单一生态要素发展到关注区域人地系统的整体性响应。当前生态脆弱性研究的内容主要包括系统变化分析、系统自身的敏感性与外部扰动的潜在影响,人地系统的适应性等。主要的研究方法有情景分析法、生态模拟法和指标评价法。目前生态脆弱性研究中存在的问题主要是情景分析与模拟的不确定性、适应性能力与社会经济发展的关系不明晰、自然因素与社会经济因素脆弱性研究相对不足等。生态脆弱性未来研究的重点是推进脆弱性研究多学科、跨尺度的融合,加强脆弱性中自然与人文因素的厘定和耦合研究,并开展基于历史变化史实的生态脆弱性实证分析。而作为脆弱性研究归宿,适应性研究不仅需要探讨能力建设和策略优化,还应深入研究适应性能力阈值与社会经济发展的关系以及国家、区域和群体之间适应性能力的总体协调与管理。最后,需要加强人地系统对极端自然灾害事件的脆弱性的研究。

关键词:全球变化;脆弱性;敏感性;适应性;人地系统

文章编号:1000-0933(2009)05-2578-11 中图分类号:Q146 文献标识码:A

Advances in research on ecological vulnerability

XU Guang-Cai, KANG Mu-Yi*, HE Li-Na, LI Ya-Fei, CHEN Ya-Ru

College of Resources Science and Technology; State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology; China Ecological Capital Assessment and Research Center, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2578 ~ 2588.

Abstract: Ecological vulnerability has been highlighted in the studies of global change and sustainability in recent years, evolving from the mono-factorial assessment of ecological impacts to the integrated evaluation of the responses of regional human-environmental systems. The recent research focuses in the field consist of ecosystem dynamics, ecosystem sensitivity to and potential impacts of disturbances, and assessment of regional adaptation and stability. The methodologies involved include scenario simulation, ecological modeling, and capacity assessment through deliberately-designed appraisal index system. However, researchers have been challenged with uncertainties resulted from scenario simulation and ecological modeling, intangible relationships between adaptive capacity and social-economic development, and the lack of simultaneous efforts from environmental, ecological and social-economic aspects. Hence the further advances of the field should emphasize the multidisciplinary assessment of vulnerability by coupling and uncoupling ecological factors with social-economic driving forces, and strengthening empirical evidence in retrospect to historical information. The research of adaptability, the ultimate destination of vulnerability research, should focus on capacity-building and strategy optimization, the understanding of the relationship between the threshold of adaptation capacity and social-economic development, and the coordination of adaptability among competitive nations, regions and local stakeholder groups. Furthermore, an urgent need is to advance the research into the vulnerability of humankind's confronting emergent natural disasters.

Key Words: global change; vulnerability; sensitivity; adaptability; human-environment system

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(2007CB106807); 国家建设高水平大学公派研究生项目(2008[3019])

收稿日期:2008-01-07; 修订日期:2008-03-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kangmy@bnu.edu.cn

20 世纪中后期以来,随着人类开发自然活动的不断加剧与升温,以气候变化和土地利用变化为代表的全球环境变化日益凸显,生态与环境问题大量涌现,全球环境变化与可持续发展已成为当前人类社会面临的两大重要挑战^[1],全球变化及其区域响应已成为国内外相关研究组织和机构关注的焦点。

1986 年国际科联(ICSU)建立国际地圈-生物圈计划(IGBP),标志着全球变化科学新领域的诞生^[2]。1988 年政府间气候变化专业委员会(IPCC)成立,着重关注人类社会经济活动所造成气候过程的影响^[3]。IPCC 分别在 2001 和 2007 年发表了《气候变化:影响、适应和脆弱性报告》^[4,5],随着全球变化研究的不断深入,未来气候变化的趋势日益明确化,从而也不断发展了探讨人类应对全球变化的能力和适应程度的脆弱性研究,IPCC 第二工作组(WG2)以“影响、适应和脆弱性”为主题,从科学、技术、环境、社会经济方面,评价气候变化导致的脆弱性及对生态系统、社会经济和人类健康的影响。WG2 第三次评估报告认为气候变化的影响、脆弱性(Vulnerability)和适应性(Adaptability)评价是识别和评估气候变化对自然和人类系统有害或有益影响,识别和评估人地系统对气候变化的适应性选择的实践^[6],并对气候变化的潜在影响,自然和人类系统的敏感性、适应性和脆弱性进行评估^[4]。自此,以 IPCC 为代表的国际学界对生态脆弱性展开了持久的研究^[5]。本文从辨析脆弱性的概念入手,分析脆弱性研究的主要内容和基本方法,进一步探讨了脆弱性研究中存在的困难和问题以及深入研究的思路。

1 生态脆弱性的相关定义与研究对象

生态脆弱性研究涉及到社会系统,自然生态系统,以及社会-生态耦合系统三大类^[7],由于各自研究背景的差异,对脆弱性的理解也是不尽相同,故脆弱性的概念十分不明确^[8]。

生态脆弱性研究涉及诸多要素(图 1)。首先是暴露(Exposure),即系统接触外在气候变化的特征、强度和速率。其次是敏感性(Sensitivity),是系统感受和响应气候变化直接或间接,有利或有害影响的难易和灵敏程度。尽管气候变化可能会对入地系统产生积极的影响,但人们更为关注的仍是其消极影响^[9],这也是脆弱性研究的热点。再次是适应性,即自然或人类社会对已经或预期要发生的气候变化事件及其可能的影响采取适当的措施而趋利避害的能力和行。从图 1 可知,减缓和适应是人类社会应对全球变化影响的两个主要的响应方式。

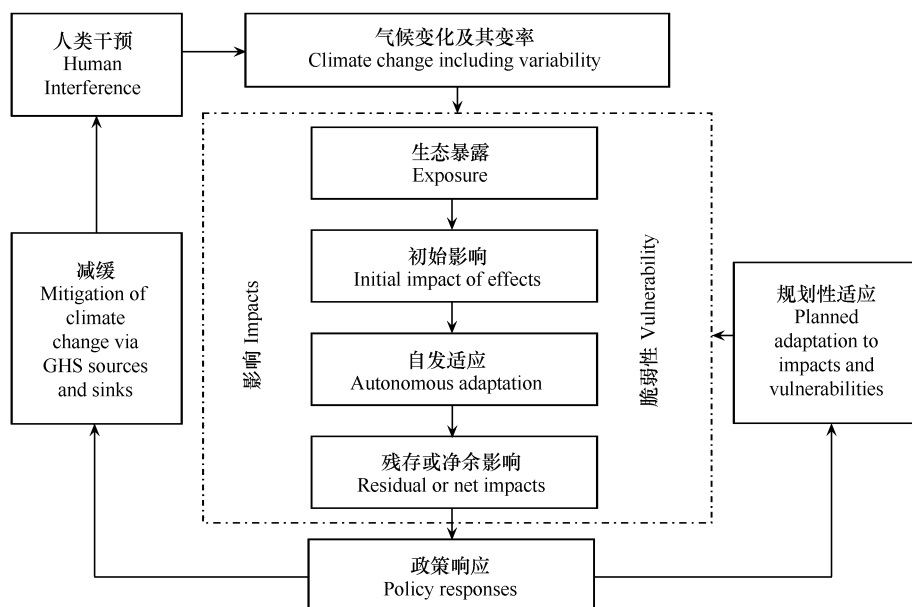


图 1 气候变化的减缓与适应^[4]

Fig. 1 Mitigation and adaptation responses to climate change^[4]

关于脆弱性的表述有很多,Birkmann 在“Measuring Vulnerability to Natural Hazards”中指出“我们不能准

确定脆弱性,但我们可以度量脆弱性”^[10]。因此,脆弱性的测度方法也反映了对其含义的多元理解。Smith 等认为脆弱性是暴露和适应性的函数^[11]。McCarthy 等认为脆弱性与暴露、敏感性和适应性能力有关^[4]。Metzger 等认为脆弱性是气候变化的潜在影响和适应性能力的函数^[12],而潜在影响程度与系统的暴露以及系统对变化的敏感性有关。IPCC 第三次评估报告(TAR)将脆弱性定义为系统容易受到气候变化造成的不良后果影响或者无法应对其不良影响的程度,是系统外在气候变化的特征、强度和速率,敏感性和适应性的函数,这是目前广为接受的脆弱性定义。但 IPCC 同一报告还援引 Smit 等^[13]的观点将脆弱性定义为系统容易受到伤害、损害或破坏的程度,而这与前述敏感性的定义类似。同时,Smit 将敏感性定义为系统受到气候变化影响和对其做出反应的灵敏程度,这又与脆弱性的定义相似。可见目前对于脆弱性的定义并未有完全的一致,但多数研究仍以 IPCC 的定义为准^[14],认为脆弱性研究的基本内容包括系统变化的评估,系统响应变化的敏感性评价,变化对系统造成的潜在影响估测,以及系统对变化及其可能影响的适应性评价。

国内脆弱性研究最早始于 20 世纪 80 年代对生态脆弱区域的识别,牛文元从生态交错带(ecotone)的角度将生态脆弱带定义为“生态系统中,凡处于两种或者两种以上的物质体系,能量体系、结构体系、功能体系之间所形成的‘界面’,以及围绕界面向外延伸的‘过渡带’的空间域”^[15],这也将中国生态脆弱性研究的总体范围较多地限制在了生态交错带。朱震达进一步指出生态脆弱带环境退化的主要表现形式是土地的荒漠化^[16],典型区域是中国北方农牧交错带。但从“压力-状态-响应”的角度分析,凡受较大外界生态压力而处于其生态阈值(threshold)附近的生态系统,均是脆弱的,或说是十分敏感的生态系统^[17]。故脆弱生态系统不仅包括生态交错带或生态过渡区,而是指在任何生态压力接近或超过承受阈值的生态系统。

近十多年来,脆弱性研究多从气候变化和社会经济入手,涉及到农、林、牧、渔等生产部门^[18-20],横跨资源和灾害两大领域,同时关注自然要素与人类要素。研究主要针对区域尺度展开。在综合评价区域或国家的脆弱性时,多将研究对象界定为人-地系统,自然生态系统作为敏感性因子参与脆弱性评价,社会经济要素则作为适应性因子参与评价^[21]。另外,从人类群体的角度出发,不同人群对已有或潜在变化的脆弱性研究也已逐步开展^[22,23]。

2 生态脆弱性研究的类型与研究内容

2.1 生态脆弱性的研究类型

按照研究对象可以将脆弱性研究划分为专项脆弱性研究和综合脆弱性研究。专项脆弱性研究主要针对受到区域变化影响的某一领域或者对象,大体可以分为 4 类。第一,社会生产部门的脆弱性,如农业对干旱的脆弱性^[24],鱼类对捕捞的脆弱性^[25];第二,人群的脆弱性,如蒙古国牧民对雪灾等的脆弱性^[26]以及孟加拉湾沿岸居民对水灾和海平面上升的脆弱性^[27];第三,社会生产条件的脆弱性,如喀斯特地区地下水资源的脆弱性评价^[20],城市基础设施对巨大自然灾害的脆弱性等;第四,生态系统及其功能的脆弱性,如亚洲和南非草原对放牧和气候变化的脆弱性与适应性^[28,29],欧洲生态系统服务功能受气候变化^[30,31]和土地利用变化^[12]影响的生态脆弱性。综合脆弱性研究主要应用于区域综合生态敏感性、适应性和脆弱性评价及预测研究,如 IPCC 则从区域的角度,综合生态系统、水文与水资源、食物和纤维生产、人类健康、海岸带等方面总结了全球各大洲及海岛生态脆弱性和适应性研究^[32]。

2.2 生态脆弱性的研究内容

生态脆弱性的研究内容涉及系统变化、敏感程度、潜在影响及适应性多个方面,涵盖了环境变迁、生态系统响应、社会经济发展等多个互为关联的领域。环境变化直接作用于人地系统,迫使其各个界面做出响应,导致生态系统以及人地复合系统的植物生产、食物供应、社会经济发展各个层次和界面的物质循环与能量流通发生变化,进而促使生态系统的耦合机制做出适应性的调整^[33],以缓解或者适应全球变化。

(1) 系统变化 系统变化通常被认为是脆弱性产生的诱发因素。当前系统变化研究主要关注的热点大体可以分为 4 类:气候波动和变化^[28]、区域土地利用变化^[12]、突发自然灾害事件^[26]及环境污染事件^[34]。其中,气候波动和变化是近年研究的热点,多利用全球和区域尺度的气候模型实现气候变化的模拟^[35,36]。由于

土地利用变化往往导致生态系统及其格局与过程发生变化,从而对人地系统产生重要影响,故土地利用变化与生态脆弱性的关系成为近期研究的重要方向。土地利用变化研究与气候变化研究类似,也多采用模型实现^[37],Rounsevell 等采用 IPCC 特别排放情景报告(SRES)中的描述,建立起未来土地利用变化的情景,以此研究欧洲生态系统服务功能对土地利用变化的脆弱性^[12,38]。突发自然灾害事件如地震、海啸、风暴潮、滑坡、泥石流等,使人地系统短期内暴露在灾害面前,危及到人类生命财产安全和生态系统的存续^[39],因此,完善的自然灾害风险评估及预警体系是降低区域人地系统对灾害的脆弱性,提高其弹性和适应性的重要支撑^[40]。环境污染事件,主要针对一些重要资源受污染影响而产生损害而言,环境污染事件具有缓慢积累和急剧爆发的特点,如污染物排放对地下水资源脆弱性的影响^[41]等。

(2) 暴露性、敏感性与潜在影响 生态敏感性研究多从系统环境变化入手,首先分析系统自身容易产生敏感生态问题的自然生态背景,如欧洲生物多样性对人类压力的暴露性^[42]研究等。其次研究生态系统及其要素响应的幅度和速率,即敏感性,如高琼等在研究中国陆地生态系统对全球变化的敏感性时,选取气温升高 2℃,降水增加 20%,CO₂ 倍增三者的情景组合,采用基于区域气候变化动态的模型^[43],模拟植被类型空间分布及 NPP 对气候变化和 CO₂ 倍增的响应^[44]。

由于系统对变化的敏感性直接牵涉到可能受到的潜在影响,即通常认为潜在影响是敏感性和暴露性的函数,因此目前研究多选择分析潜在影响而避免了直接分析敏感性的复杂性和不确定性,从而简化对敏感性和暴露性的处理。以欧洲生态服务功能对气候变化的脆弱性研究为代表,Metzger 等人首先定义生态服务功能价值的相对重要值,即某一时刻某地生态系统服务功能价值相对其周边地区的最大生态服务功能价值的比值,在此基础上,计算气候变化前后两个时间点的生态服务功能重要值的相对变化,并以此作为气候变化对生态系统服务功能价值的潜在影响^[31]。

(3) 适应性 适应性是脆弱性研究的重要组成部分,适应是人类社会在承认全球变化趋势不可避免甚至无法扭转的前提下,通过提高人类社会的适应性以降低其脆弱性,进而规避和减缓全球变化的风险和潜在损失的行为,其主体是人类生态系统(包括资源环境系统、支撑系统和人文系统)^[45]。适应的类型可以从不同的角度划分为主动适应和被动适应,个人适应和公众适应,自发性适应和计划性适应等^[6]。

人地系统的适应性研究从横向看主要从生态系统适应性和人类适应性两方面展开。前者主要针对生态系统中的生物要素,如动物区系组成对气候变化的适应性^[46]和鱼类资源对捕捞的适应性^[25]等,重点关注气候变化对动植物资源及其利用的影响。人类适应性研究主要关注人类应对气候和土地利用变化所造成的影响的适应性和策略^[47],如肯尼亚气候变化导致农村干旱和疾病多发,干旱地区比其他地区脆弱性更强,提高疾病防控能力、成人识字率和增强市场的可介入性,可以通过增强适应性能力以降低脆弱性^[48]。从纵向看,适应性能力研究的重点是适应性能力评价和适应性策略研究。由于区域社会经济的发展,适应性策略也随着生产及生活方式而发生相应变化。以蒙古国牧民对自然灾害的适应性为例^[26],牧民为躲避自然灾害,充分利用草地资源以增加收入,数百年来形成了传统的适应性策略,并随着近几十年经济与社会发展,出现了新型适应性策略(表 1)。此外,随着近年城市化的推进和巨大自然灾害的频发,越来越多的研究者意识到规划在适应性能力建设方面具有的重要作用^[49],如新奥尔良市城市基础设施(如大型体育运动场馆)的布局在卡特里娜飓风袭击时可以增强城市居民应对突发灾难时的适应性能力^[39],与基础设施有关的脆弱性和适应性能力研究也逐渐展开^[50]。

国内学者在理论和实践上对生态脆弱性开展了大量的研究。首先,研究确定敏感性和不稳定性是生态脆弱地区最主要的特征^[51],这对科学辨识生态脆弱地区具有重要的意义。其次,探讨了我国脆弱生态地区的成因及分异规律,并结合自然和人为因素划分生态脆弱区^[52]。再次,出现了针对北方农牧交错带、黄河流域脆弱带以及南方红壤丘陵区等典型生态脆弱区的案例研究^[53],并逐步扩大到资源开发造成的生态脆弱区^[54]。《中国脆弱生态环境类型分布及其综合整治》一书,系统总结了脆弱生态系统的特征、成因、分布、类型、演变规律以及与社会经济的关系,并在此基础上提出了各脆弱区域的整治战略、措施和模式^[55]。

表 1 蒙古国牧民对自然灾害适应性策略的变迁^[26]

Table 1 Traditional and non-traditional adaptation strategies for natural hazards of Mongolian pastoralists^[26]

序号 Number	传统适应性策略 Traditional adaptation strategy	新型适应性策略 Non-traditional adaptation strategy
1	牲畜数量多,分布密度低 Large number of livestock and low livestock density	增加现金收入,降低消费 Increased cash income and reducing consumption
2	母畜比重高 Large percentage of female animals	生计多样化 Livelihood diversification
3	增加牧群畜种和选择育种 Increased number of species in a herd and breed selection	牧户邻里互助 Cooperation through informal camps and neighborhood groupings
4	低居民点密度,高游牧移动性 Low settlement density and high mobility	发展信贷和牲畜保险 Enhance accessibility to credits and livestock insurance
5	大家庭生活制,实行分散放牧 Large family size and household splitting	城市化和增加就业 Migration to urban areas and involvement in wage labor
6	拓展社会关系网络 Broaden social network	雇工及委托放牧 Patron-client relationships and absentee-herding

近期,国内脆弱性研究逐步扩展到典型生态系统及其组分脆弱性的具体研究,如未来气候变化情景下中国生态系统脆弱性^[3],陆地生态系统对全球变化敏感性^[44],岷江上游地区及西藏“一江两河”地区生态脆弱性^[56,57],农业生态系统及水稻等作物对气候变化的脆弱性^[58,59]等。另外,对脆弱性的纵向剖析也不断深入,出现了脆弱性机制的初步分析。叶正伟将淮河流域的生态脆弱性分为基础性脆弱、交错性脆弱、波动性脆弱、动态性脆弱和历史遗传性脆弱^[60],张殿发等系统分析了土地荒漠化的环境脆弱性机制^[61]。此外,研究也在不同的尺度上对人地系统适应能力和策略开展了有益的探讨,如林冠慧等研究台湾地质灾害过后土地覆被以及人类暴露程度、敏感性和适应性能力的变化,提出应在更小的社会与空间单元上建立和完善适应性的政策和策略^[62]。

3 生态脆弱性的研究方法与研究尺度

3.1 生态脆弱性的研究方法

生态脆弱性研究包括基于情景分析和模拟的预测性研究和基于自然与社会经济指标的现状评价研究,且以前者居多。前者主要依据气候及土地利用变化情景分析和区域生态系统响应模拟评价生态脆弱性。后者主要依据自然状况的敏感性和社会经济的适应性,采用指标评价法开展脆弱性的研究。

3.1.1 生态脆弱性预测研究方法

(1)情景分析法 情景分析的方法主要源于 2001 年 IPCC 第三次评估报告,该报告所提出的温室气体排放与浓度的各种情景,常被用作进行未来气候变化和人地系统响应情景分析的依据。其中,气候变化情景可分为增量情景和基于气候模式的情景。增量情景主要是对不同气候因子进行简单的统计和回归分析,是研究生态系统响应气候变化的敏感性和脆弱性的简单而有效的方法。但由于增量情景的调整多具有主观性和强制性,如 CO₂ 浓度倍增,温度升高等具体情景在气象学上可能存有争议,目前基于气候模式的情景得到更多的应用,尤其是基于大气环流模式输出的气候变化情景更为普遍^[21]。SRES 依据发展是立足于全球性经济发展还是区域性经济发展,侧重于发展经济还是致力于保护环境,将未来世界发展框架假设为 4 种情景族 A1、A2、B1 和 B2^[63],这一做法得到广泛的认同与应用。SRES 情景已成为气候变化研究领域的标准参照情景,成为生态脆弱性评价重要的气候情景数据来源。

(2)生态模型模拟法 生态模型模拟法即在气候变化情景下,自上而下预测生态系统对气候变化的响应,是生态系统变化及其脆弱性研究的有效手段。在脆弱性研究中,该方法主要应用于生态敏感性和潜在影响的模拟。模拟包括气候变化模拟,生态系统模拟,社会经济发展模拟及土地利用变化模拟等,均通过将有关重要参数和边界条件数据输入模型获得预测输出。生态系统响应气候变化模型可以分为经验模型和过程模型两类。经验模型多针对植被-气候关系建立经验回归关系方程,如 Thornthwaite Memorial 模型、Chikugo 模型、Holdridge 生命地带模型等,此类模型多根据简化的气候变化计算获得,并未考虑植物的生理反应及复杂

生态系统的功能变化,也未考虑植被对气候变化响应的滞后性,因此虽能给出全球尺度的大致情景,但具有一定的局限性。过程模型充分考虑了植物生理生态过程及其对植被时空分布特征的影响,详细描述物质和能量在植被及环境要素间的流动和循环,包括生物地球化学模型和生物地理模型两类。前者可以模拟生态系统功能的变化,但无法模拟气候变化对植被再分布所产生的可能影响,如陆地生态系统模型(TEM)、CENTURY 模型等^[29]。而后者虽然考虑到生态系统结构的动态变化,可用于气候变化对植被分布影响的研究,但对于其功能和过程多采用简化处理^[44],如 BIOME 模型、MAPSS 模型等。目前在脆弱性评价研究领域虽然应用较多的是生物地球化学模型,但生物地理模型的完善和应用是发展的必然趋势。

3.1.2 生态脆弱性现状评价方法

生态脆弱性现状研究在其敏感性和适应性评价中广泛应用指标评价法。该方法多针对具体的生态或环境问题,结合局地特征因素,从多方面选取评价指标,构建评价指标体系,实现区域生态脆弱性指标的量化^[58]。在评价中,充分考虑专家意见和公众参与。运用指标评价法时关键有三点。

(1)评价指标的选取 全球变化影响到生态系统的各个方面,因此反映生态系统变化的指标也纷繁复杂^[64]。目前,衡量生态系统脆弱性的指标尚无统一的标准,不仅如此,脆弱性本身的表示方法也不尽相同,如 Christiaensen 等以致贫概率代表脆弱性^[48],而 Brooks 等以自然灾害死亡人数表示脆弱性程度^[14]。对于国家,Brooks 等虽采用 Delphi 法,选定健康医疗、行政管理、教育状况 3 个领域 11 项关键指标,从宏观上进行国家间生态脆弱性的量化及比较^[65],但生态系统对变化脆弱性的差异因区域不同而广泛存在,故生态脆弱性评价指标的选取也应因地因时而异,如森林^[66]与草原生态系统^[29]的脆弱性评价即应选用不同的指标体系。对不同人群脆弱性评价而言,指标亦应不同^[67],但不同的评价指标在一定程度上可以相互借鉴,如 Haan 等研究肯尼亚食物安全脆弱性的指标体系^[68]与 Brooks 的国家脆弱性评价指标体系都考虑到健康、营养状况以及教育水平的差异等^[14]。

(2)指标的权重赋值 生态系统脆弱性评价指标的权重赋值方法很多,如专家打分法、Delphi 法、AHP 法、主成分分析法、灰色关联法等诸多方法,其中以专家打分法和 AHP 法较常见,神经网络法^[69]和模糊综合评判法^[70]因其减少主观性的优势也得以广泛应用。Brooks 依据各个指标与灾害死亡率的相关系数作为因子筛选的依据和脆弱性评价的权重,以各指标对脆弱性影响的程度作为分级标准,并采用 Delphi 法,建立多个专家评价权重赋值参考体系,在分别计算脆弱性后再进行汇总分析,从而取得尽可能客观的结果。

(3)生态脆弱性等级的划分 脆弱性等级划分通常以生态基准和生态阈值作为基础。吴绍洪等在研究中国自然生态系统响应气候变化的脆弱性时,以不同类型生态系统的全球长期平均值确定生态基准,并根据 H. T. Odum 对全球各类生态系统的研究成果,以 NPP 减少为例,以下降 40%、60%、80% 和 100% 划分生态系统状态为轻微不适应(轻微脆弱)、中度不适应(中度脆弱)、严重不适应(重度脆弱)和完全不适应(系统崩溃)的标准^[21, 64]。卓莉等^[71]针对草原 NDVI 时间序列较短,草原的近似基准状态难以获取(因受人类活动影响较小的草原已荡然无存),提出考虑局部地段自然条件的相似性,可将一定范围内 NDVI 最大值像元看作受人类活动干扰相对较小的近似基准状态。

3.2 生态脆弱性的研究尺度

生态脆弱性研究涉及的范围较广,不仅仅需要自然、社会、经济、人文等多学科的交叉与汇集,而且还需要考虑研究的尺度问题^[30, 72]。

首先是空间尺度。空间尺度涉及到局地、区域以及更高一级的跨国家尺度,由于生态脆弱性在不同尺度上会表现出迥异的特点,因此评价应针对不同的尺度建立与之相应的适宜评价指标体系。例如局地尺度脆弱性研究主要关注区域自身地理-生态过程的特殊性以及区域气候变化或(及)土地利用变化的特点,其适应能力也与区域发展水平、资源禀赋、人力资源状况等因素密切相关,指标选取也应更侧重这些方面。而在跨国家的地域尺度上,由于生态风险或者暴露性的差异,特别是国家体制、信息扩散能力等的不同,国际间的横向比较相对来说较为复杂,因而需要慎重对待。当然,不同尺度的脆弱性研究在指标选取时虽应不同,但也具有

一定的相似与可借鉴之处^[14]。

其次是时间尺度。生态脆弱性在不同的时间尺度上具有不同的表现形式,如牧民在年内不同的时间段内面临不同的生活压力和自然条件的限制,而在中长期尺度上,他们更为关注的是诸如降水、沙尘、植被退化或改善等问题^[22]。因此研究中需选取适当的步长和相应的评价指标用来反映短期、中期和长期等不同时间尺度的脆弱性问题。

再次是宏观尺度与微观尺度。其实就前述的空间和时间尺度而言,均有如何从宏观与微观尺度通盘考虑并统筹的问题,这里着重从文化与居民点的规模角度再做深入讨论。全球变化不仅使区域生态与环境受到影响,而且对当地的居民生活和传统文化也造成一定影响,因此,生态脆弱性研究应该从微观的个人,到各级居民点,再到宏观的省域及以上不同尺度开展^[73]。宏观和微观尺度的脆弱性差异集中表现在适应性方面,联合国气候变化框架公约(UNFCCC)认为影响适应性的关键因素是资源及其可获取性^[36],但需考虑不同尺度的特殊性。如在微观尺度上,个体对灾害或风险的适应性能力,不仅取决于其占有资源情况和行动效率等特征,而且还受到认知、反应及应急处理能力等的制约^[74]。而针对农户,Brogaard 等认为收入来源的多元化有助于提高农户对气候变化及自然灾害的适应性,而教育支出等严重影响农户的适应性能力^[22]。对于宏观尺度的省域或国家而言,适应性能力通常与财富储备和技术可达性、制度的稳定性及有效性、权力分配的均衡性、社会公平以及信息发布系统的有效性等有关^[75],即除区域资源要素外,社会行为的效率也是重要的制约因素^[76]。

4 脆弱性研究存在的问题与不足

生态脆弱性研究虽然已经取得了很大的进展,但仍有很多需要解决的问题,主要表现在:

(1) 脆弱性研究以模拟的方法居多,但该类方法由于受到模型自身特点的限制,在生态脆弱性研究中存在较大的不确定性。第一,系统的复杂性远比模型所描述的要高,模型能否对系统进行客观的模拟存在疑问;第二,脆弱性不同驱动因子之间往往相互关联,而研究驱动因子间的关系,特别是非线性关系存在较大困难;第三,中长期尺度适应性能力预测受到社会经济制度及其变化等因素制约,对模型和模拟结果也缺乏足够的实证分析,这进一步加剧了研究中的不确定性。

(2) 适应性能力较多地受到了社会经济发展的影响,在一定的社会经济水平下具有相应的阈值,在此阈值内系统将有能力吸纳和消化系统环境的变化,而不会导致自身状态的脆弱化,反之,如果外界变化超出系统适应性能力的阈值,将导致系统紊乱甚至崩溃。但是目前人地系统适应性能力阈值与社会经济发展水平的关系尚不明朗,使得脆弱性研究尚停留在结合自然生态因素的敏感性与人类系统因素的适应性能力进行定性及横向比较研究,具体的数量关系不明确,这也影响了脆弱性研究的深入。

(3) 目前脆弱性主要针对区域人地系统展开,但对其中自然生态子系统和人类子系统的脆弱性研究涉及较少,部分领域仍属空白,如气候变化对自然生态子系统潜在影响可以模拟得出,适应性却因不确定性和系统的复杂性难以预测,而人类子系统与之相反,潜在的影响难以模拟获取,适应性能力却可以通过社会经济系统模拟衡量。此外,由于灾害事件的发生及发展存在更大的不确定性,对于极端自然灾害事件的脆弱性研究也相对薄弱。但比较而言,极端自然灾害事件对人地系统,尤其是人类的影响远比气候平均变化和土地利用变化的作用要剧烈和深刻的多。

5 研究的建议和展望

(1) 脆弱性相关学科交叉与跨尺度研究 生态脆弱性是全球环境变化和可持续发展研究的核心问题之一。随着研究的深入,脆弱性日益从基于自然生态要素的研究发展为基于人地系统的综合研究。研究的空间尺度和时间跨度相对较大,涉及宏观的全球、区域,微观的社区、个体,以及短期、中期和长期的各种变化。因此除了加强原有地学、生态学、灾害学、环境科学、全球变化与可持续发展等自然学科的交叉研究外,还必须将社会学、心理学、管理学、经济学等人文社会学科纳入脆弱性研究的领域,并加强学科交叉与融合,构建一个跨学科-多尺度的人地系统脆弱性研究框架。

(2)脆弱性驱动力的耦合与厘定研究 区域变化多是包括自然和人文等多种驱动力复合作用的结果,但不同区域导致脆弱性的主导因素往往不同。当前脆弱性研究多针对气候变化或者土地利用变化等单一驱动力展开,通过区域的敏感性(及潜在影响)与适应性能力,得出生态脆弱性,但是由于前者基于自然生态因素获取,而后者主要基于社会经济因素,二者无法进行准确的定量耦合。此外,多驱动力综合脆弱性研究中,对各驱动力影响程度和范围的厘定研究相对不足,无法确定脆弱性产生的主导因素,也不利于有针对性的指导适应性能力建设。因此在研究中既要探索敏感性与适应性之间的定量耦合关系,加强脆弱性驱动力的综合效果和适应性策略研究,也要加强驱动力的厘定研究,科学辨析自然驱动力和人为驱动力对人地系统的影响程度,以便在实践中合理选择适应性的对策。

(3)生态脆弱性实证研究 生态脆弱性研究中区域气候等变化及其生态响应研究多是立足现状,预测未来变化,具有较强的不确定性。而历史是未来的钥匙,过去时段内所发生的气候变化、土地利用变化及人地系统的脆弱性和适应性在一定程度上具有相对的确性。过去发生和正在发生的全球变化过程以及由此产生的人地系统脆弱性与人类适应的变化史实,为研究人地系统脆弱性提供了现实的、连续的、可靠的宝贵信息,这不仅利于确定过去区域变化的趋势和轨迹,而且对了解个体、群体及区域尺度的适应性能力及策略的区域差异、时空变迁,以及预测区域未来脆弱性的发展方向等,具有重要的现实指导意义。

(4)适应性能力的阈值及竞争性研究 适应性是人地系统脆弱性研究的最终归宿和落脚点,适应性能力和策略受到宏观的社会经济发展和技术水平的制约以及微观的群体及个体认知及行为能力等制约,但不同尺度下的制约机制和不同条件下的适应性能力阈值尚不清晰,需深入研究。此外,国家、区域以及群体之间获取和利用资源的能力和效率的差异,极易导致适应性能力可能出现竞争性排斥的情况,如何统筹适应性能力的差异,实现适应性能力的协调管理,将是生态脆弱性未来研究的一个重要方面。

(5)脆弱性研究涉及到不同区域和生态系统 我国陆地面积广袤、生态系统类型多样,人地系统差异较大,生态相对脆弱性地区面积较广,如西北干旱区、青藏高原区、西南喀斯特区等,同时我国灾害频发,极端自然灾害事件时有发生。国内生态脆弱性的研究基础多是针对生态脆弱区的辨识,在未来的研究中,不仅要强化全球变化背景下区域生态脆弱性的变化机制及适应性能力和策略的研究,而且要重视极端灾害事件脆弱性研究。

References:

- [1] Li J Y, Chen P Q, Ge Q S, *et al.* Global change and human activities: Priorities of the global change research in next phase in China. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 371—377.
- [2] Ye D Z, Fu Z B. Some advance in global change science study. *Journal of China Academy of Science*, 2004, 19(5): 336—341.
- [3] Wu S H, Dai E F, Huang M, *et al.* China ecosystem vulnerability research of 21st century based on the climate change scenario (B2). *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(7): 811—817.
- [4] IPCC. *Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [5] IPCC. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [6] IPCC. *The third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. London: Cambridge University Press, 2001.
- [7] Gallopín G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 293—303.
- [8] Fang X Q, Yin P H. Review on the three key concepts of resilience, vulnerability and adaptation in the research of global environmental change. *Progress in Geography*, 2007, 26(5): 11—22.
- [9] Schröter D, Cramer W, Leemans R, *et al.* Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310(25): 1333—1337.
- [10] Birkmann J. *Measuring vulnerability to natural hazards*. Tokyo: United Nations University Press, 2006.
- [11] Smith B, Pilifosova O. From adaptation to adaptive capacity and vulnerability reduction. In: Smith J B, Klein R J T, Huq S. *Climate change, adaptive capacity and development*, London: Imperial College Press, 2003.
- [12] Metzger M J, Rounsevel M D A, Acosta-Michlik L, *et al.* The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 114(1): 69—85.

- [13] Smit B, Burton I, Klein R J T, *et al.* The science of adaptation: a framework for assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1999, 4(3-4): 199—213.
- [14] Brooks N, Adger W N, Kelly P M. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*, 2005, 15(2): 151—163.
- [15] Niu W Y. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness and breadth of ECOTONE. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, 9(2): 97—105.
- [16] Zhu Z D. Fragile ecological zones and land desertification in China. *Journal of Desert Research*, 1991, 11(4): 11—22.
- [17] Li K R, Cao M K, Yu L, *et al.* Assessment of vulnerability of natural ecosystems in China under the changing climate. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 653—663.
- [18] Bryan B, Harvey N, Belperio T, *et al.* Distributed process modeling for regional assessment of coastal vulnerability to sea-level rise. *Environmental Modeling and Assessment*, 2001, 6(1): 57—65.
- [19] Smit B, Cai Y L. Climate change and agriculture in china. *Global Environment Change*, 1996, 6(3): 205—214.
- [20] Doerfliger N, Jeannin P Y, Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 1999, 39(2): 165—176.
- [21] Zhao H X, Wu S H, Jiang L G. Research advances in vulnerability assessment of natural ecosystem response to climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 445—450.
- [22] Brogaard S, Seaquist J. An assessment of rural livelihood vulnerability in relation to climate-a case study in agro-pastoral northern China. Oslo: An International Workshop about Human Security and Climate Change, 2005.
- [23] Ma D G, Liu Y, Chen H, *et al.* Farmers' vulnerability to flood risk: A case study in the Poyang Lake Region. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(3): 321—332.
- [24] Wilhelmi O V, Wilhite D A. Assessing vulnerability to agricultural drought: A Nebraska case study. *Natural Hazards*, 2002, 25(1): 37—58.
- [25] Morato T, Cheung W W L, Pitcher T J. Vulnerability of seamount fish to fishing: Fuzzy analysis of life-history attributes. *Journal of Fish Biology*, 2006, 68(1): 209—221.
- [26] Chuluundorj O. A multi-level study of vulnerability of Mongolian pastoralists to natural hazards and its consequences on individual and household well-being. Denver: University of Colorado at Denver, 2006.
- [27] Ali A. Vulnerability of Bangladesh to climate change and sea level rise through tropical cyclones and storm surges. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1996, 92(1-2): 171—179.
- [28] Christensen L, Coughenour M L B, Ellis J E, *et al.* Vulnerability of the Asian typical steppe to grazing and climate change. *Climatic Change*, 2004, 63(3): 351—368.
- [29] Schoeles R J, Midgley G F, Wand S J E. The vulnerability and adaptation of rangelands. Pretoria: Division of Water, Environment and Forest Technology, CSIR, 1999.
- [30] Metzger M J, Leemans R, Schröeter D. A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(4): 253—267.
- [31] Metzger M J, Schröeter D. Towards a spatially explicit and quantitative vulnerability assessment of environmental change in Europe. *Regional Environmental Change*, 2006, 6(4): 201—216.
- [32] IPCC. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [33] Ren J Z. Mountain-oasis-desert meta-ecosystem and its coupling in Hexi Corridor. Beijing: Science Press, 2007.
- [34] Nobre R C, Rotunno F O, Mansur W J, *et al.* Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, 94(3-4): 277—292.
- [35] Karl T R, Trenberth K E. Modern global climate change. *Science*, 2003, 302(5651): 1719—1723.
- [36] UNFCCC. Application of methods and tools for assessing impacts and vulnerability, and developing adaptation responses. Background paper. [2007-11-24]. <http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/inf13.pdf>.
- [37] Dendoncker N, Rounsevell M D A, Bogaert P. Spatial analysis and modelling of land use distributions in Belgium. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2007, 31(2): 188—205.
- [38] Rounsevell M D A, Reginster I, Araujo M B, *et al.* A coherent set of future land use change scenarios for Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1): 57—68.
- [39] Yamal B. Vulnerability and all that jazz: addressing vulnerability in New Orleans after hurricane Katrina. *Technology in Society*, 2007, 29(2): 249—255.
- [40] Mao X. Early warning plan for meteorological hazards in digital city. *Journal of Natural Disaster*, 2005, 14(1): 110—115.

- [41] Hrkál Z. Vulnerability of groundwater to acid deposition, Jizerské Mountains, northern Czech Republic: construction and reliability of a GIS-Based vulnerability map. *Hydrogeology Journal*, 2001, 9(4): 348—357.
- [42] Araujo M B, Nogues-Bravo D, Reginster I, *et al.* Exposure of European biodiversity to changes in human-induced pressures. *Environmental Science & Policy*, 2007.
- [43] Gao Q, Yu M. A model of regional vegetation dynamics and its application to the study of Northeast China Transect (NECT) responses to global change. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(2): 329—344.
- [44] Gao Q, Yu M, Yang X. An analysis of sensitivity of terrestrial ecosystems in china to climatic change using spatial simulation. *Climatic Change*, 2000, 47(4): 373—400.
- [45] Ge Q S, Chen P Q, Fang X Q, *et al.* Adaptation to global change: challenge and research strategy. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 516—524.
- [46] van Jaarsveld A S, Chown S L, Erasmus B F N, *et al.* Vulnerability and adaptation assessment of South African animal taxa to climate change. Pretoria: South Africa: Report to the Department of Environmental Affairs and Tourism, 2000.
- [47] Barlett P F. Adaptive strategies in peasant agricultural production. *Annual Review of Anthropology*, 1980, 9: 545—573.
- [48] Christiaensen L J, Subbarao K. Towards an understanding of household vulnerability in rural Kenya. *Journal of African Economics*, 2005, 14(4): 520—558.
- [49] Wilson E. Adapting to climate change at the local level: the spatial planning response. *Local Environment*, 2006, 11(6): 609—625.
- [50] Ezell B C. Infrastructure vulnerability assessment model (I-VAM). *Risk Analysis*, 2007, 27(3): 571—583.
- [51] Liu Y H. Primary study on vulnerable eco-environment. In: Zhao G J, Liu Y H, Zhao M C, *et al.* Research on the comprehensive improvement and recovery technology of eco-environment (1). Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1993.
- [52] Leng S Y. Characteristics and types of vulnerable eco-environment in Erdos. In: Zhao G J, Liu Y H, Zhao M C, *et al.* Research on the comprehensive improvement and recovery technology of eco-environment (1). Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1993.
- [53] Zhao G J, Liu Y H, Zhao M C, *et al.* Research on the comprehensive improvement and recovery technology of eco-environment (1). Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1993.
- [54] Na W, Liu J S. Vulnerability and its assessment system of human-environmental system in mineral city. *Urban Problem*, 2007, 7: 43—48.
- [55] Zhao Y L. Distribution and comprehensive improvement of different kinds of vulnerable eco-environment in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1999.
- [56] Li A N, Wang A S, Liang S L, *et al.* Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS- A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modelling*, 2006, 192(1-2): 175—187.
- [57] Tao H P, Gao P, Zhong X H. A study of regional eco-environment vulnerability — A case of “One-River-Two-Tributaries”, Tibet. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(6): 761—768.
- [58] Zhao Y X, He L, Liu S D, *et al.* Evaluation method of agro-ecosystem vulnerability. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(5): 754—758.
- [59] Yang X, Sun F, Lin E D, *et al.* Sensitivity and vulnerability of rice to climate change in China. *Journal of Natural Disaster*, 2004, 13(5): 85—89.
- [60] Ye Z W. Countermeasures for soil and water conservation in the Huaihe River basin based on ecological vulnerability. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(3): 141—145.
- [61] Zhang D F, Bian J M. Analysis on the eco-environmental vulnerable mechanisms of land desertification in the farming-pastoral ecotone in northern China. *Arid Land Geography*, 2000, 23(2): 133—137.
- [62] Lin G H, Zhang C Y. Vulnerability after a devastating hazard: An interpretation of land use and land cover change in central Taiwan since 1999 Chi-Chi earthquake. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 201—210.
- [63] IPCC. Special report on emissions scenarios (SRES). Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [64] Wu S H, Yin Y H, Zhao H X, *et al.* Discrimination of ecosystem adaptation to climate change. *Progress in Climate Change Research*, 2005, 1(3): 115—118.
- [65] Adger N W, Brooks N, Bentham G, *et al.* New indicators of vulnerability and adaptive capacity. Technical Report 7, Tyndall Centre for Climate Change Research. Norwich: University of East Anglia, 2004.
- [66] Li K R, Chen Y F. Analysis of vulnerability of forest in China responded to global climate change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(S1): 1—14.
- [67] Li X Y, Dong Q, Rao X L, *et al.* Methodologies and application of farmers' vulnerability analysis. *China Rural Economy*, 2007, 4: 32—39.
- [68] Haan N, Farmer G, Wheeler R. Chronic vulnerability to food insecurity in Kenya-2001 a WFP pilot study for improving vulnerability analysis. [2007-11-24]. http://www.wfp.org/operations/vam/country_experience/kenya_vam/index.asp.

- [69] Li S C, Wu S H, Dai E F. Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 621—626.
- [70] Yan J P. Compare of environmental response degree between northern and southern Qinling Mountain. Beijing: Science Press, 2006.
- [71] Zhuo L, Cao X, Chen J, *et al.* Assessment of grassland ecological restoration project in Xilingol grassland. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 471—480.
- [72] Chang X L, Zhao A F, Li S G. Spatial-temporal scale and hierarchy of vulnerable ecotone. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(2): 115—119.
- [73] Adger W N, Vincent K. Uncertainty in adaptive capacity. *Comptes Rendus Geosciences*, 2005, 337(4): 399—410.
- [74] Torsten G, Anthony P. Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change. *Global Environmental Change*, 2005, 15(3): 199—213.
- [75] Smith J B, Klein R J T, Huq S. Climate change, adaptive capacity and development. London: Imperial College Press, 2003.
- [76] Adger W N. Social aspect of adaptive capacity. In: Smith J B, Klein R J T, Huq S. climate change, adaptive capacity and development, London: Imperial College Press, 2003.

参考文献:

- [1] 李家洋, 陈泮勤, 葛全胜, 等. 全球变化与人类活动的相互作用——我国下阶段全球变化研究工作的重点. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 371—377.
- [2] 叶笃正, 符淦斌. 全球变化科学领域的若干研究进展. *中国科学院院刊*, 2004, 19(5): 336—341.
- [3] 吴绍洪, 戴尔阜, 黄玫, 等. 21 世纪未来气候变化情景(B2)下我国生态系统的脆弱性研究. *科学通报*, 2007, 52(7): 811—817.
- [8] 方修琦, 殷培红. 弹性、脆弱性和适应——IHDP 三个核心概念综述. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 11—22.
- [15] 牛文元. 生态脆弱带(ECOTONE)的基础判定. *生态学报*, 1990, 9(2): 97—105.
- [16] 朱震达. 中国的脆弱生态带与土地荒漠化. *中国沙漠*, 1991, 11(4): 11—22.
- [17] 李克让, 曹明奎, 於刚, 等. 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估. *地理研究*, 2005, 24(5): 653—663.
- [21] 赵慧霞, 吴绍洪, 姜鲁光. 自然生态系统响应气候变化的脆弱性评价研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 445—450.
- [23] 马定国, 刘影, 陈洁, 等. 鄱阳湖区洪灾风险与农户脆弱性分析. *地理学报*, 2007, 62(3): 321—332.
- [33] 任继周. 河西走廊山地-绿洲-荒漠复合系统及其耦合. 北京: 科学出版社, 2007.
- [40] 毛夏. 数字城市中的气象灾害预警对策. *自然灾害学报*, 2005, 14(1): 110—115.
- [45] 葛全胜, 陈泮勤, 方修琦, 等. 全球变化的区域适应研究: 挑战与研究对策. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 516—524.
- [51] 刘燕华. 脆弱生态环境研究初探. 生态环境综合整治和恢复技术研究. 第一集. 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶, 等, 北京: 北京科学技术出版社, 1993.
- [52] 冷疏影. 鄂尔多斯脆弱生态环境特征及类型. 生态环境综合整治和恢复技术研究, 第一集. 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶, 等, 北京: 北京科学技术出版社, 1993.
- [53] 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶, 等. 生态环境综合整治和恢复技术研究, 第一集. 北京: 北京科学技术出版社, 1993.
- [54] 那伟, 刘继生. 矿业城市人地系统的脆弱性及其评价体系. *城市问题*, 2007(7): 43—48.
- [55] 赵跃龙. 中国脆弱生态环境类型分布及其综合整治. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [57] 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.
- [58] 赵艳霞, 何磊, 刘寿东, 等. 农业生态系统脆弱性评价方法. *生态学杂志*, 2007, 26(5): 754—758.
- [59] 杨修, 孙芳, 林而达, 等. 我国水稻对气候变化的敏感性和脆弱性. *自然灾害学报*, 2004, 13(5): 85—89.
- [60] 叶正伟. 基于生态脆弱性的淮河流域水土保持策略研究. *水土保持通报*, 2007, 27(3): 141—145.
- [61] 张殿发, 卞建民. 中国北方农牧交错区土地荒漠化的环境脆弱性机制分析. *干旱区地理*, 2000, 23(2): 133—137.
- [62] 林冠慧, 张长义. 巨大灾害后的脆弱性: 台湾集集地震后中部地区土地利用与覆盖变迁. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 201—210.
- [64] 吴绍洪, 尹云鹤, 赵慧霞, 等. 生态系统对气候变化适应的辨识. *气候变化研究进展*, 2005, 1(3): 115—118.
- [66] 李克让, 陈育峰. 全球气候变化影响下中国森林的脆弱性分析. *地理学报*, 1996, 51(S1): 1—14.
- [67] 李小云, 董强, 饶小龙, 等. 农户脆弱性分析方法及其本土化应用. *中国农村经济*, 2007(4): 32—39.
- [69] 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.
- [70] 延军平. 秦岭南北环境响应程度比较. 北京: 科学出版社, 2006.
- [71] 卓莉, 曹鑫, 陈晋, 等. 锡林郭勒草原生态恢复工程效果的评价. *地理学报*, 2007, 62(5): 471—480.
- [72] 常学礼, 赵爱芬, 李胜功. 生态脆弱带的尺度与等级特征. *中国沙漠*, 1999, 19(2): 115—119.