

自然生态系统响应气候变化的脆弱性评价研究进展*

赵慧霞^{1,2} 吴绍洪^{1*} 姜鲁光¹

(¹ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 以气候变暖为标志的全球气候变化已引起各国政府、国际组织和科学工作者的高度重视. 气候变化给人类及自然生态系统带来的风险和危害日趋增大. 生态系统脆弱性分析和评价是适应和减缓气候变化的关键和基础, 已成为近年来气候变化领域和生态学领域的研究热点. 目前国内外学者正在不同领域、不同空间尺度上开展响应气候变化的脆弱性评价, 其中以自然生态系统为评价对象的脆弱性研究也有了长足的发展. 本文通过对脆弱性的概念、气候变化脆弱性评价研究现状、自然生态系统响应气候变化的脆弱性定量评价方法的综述, 探讨了该研究领域存在的问题和未来的发展前景.

关键词 自然生态系统 气候变化 脆弱性评价 研究进展

文章编号 1001-9332(2007)02-0445-06 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

Research advances in vulnerability assessment of natural ecosystem response to climate change. ZHAO Hui-xia^{1,2}, WU Shao-hong¹, JIANG Lu-guang¹ (¹ *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; ² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, **18** (2): 445-450.

Abstract: Climate change with global warming as the sign has been caught great attention by the governments, international organizations, and scientists in the world. Human society and natural ecosystem are both exposed to climate change, and more and more people are waked up by its increasing harm. Vulnerability analysis and assessment are the key and basis for adapting and mitigating climate change, being the highlight in the research fields of climate change and ecology in recent years. The vulnerability assessment of climate change is being carried out in various research fields and on different scales, and much progress has been made. This paper introduced the concept of vulnerability, and summarized the research progress in vulnerability assessment of climate change, with the focus on the frame and methodology of vulnerability assessment of natural ecosystem response to climate change. The existed problems and future prospects in this research area were also discussed.

Key words: natural ecosystem; climate change; vulnerability assessment; research advances.

1 引言

以气候变暖为标志的全球气候变化已引起了各国政府、国际组织和科学工作者的高度重视. 大量的观测证据表明, 由于大气 CO₂ 等温室气体的增加, 全球气候正在发生有史以来从未有过的急剧变化^[14]. 预测表明, 未来 50—100 年全球气候将继续向变暖的方向发展, 全球降水格局也有较大的变化, 同时一些极端气候事件(如高温天气、强降水、强热

带气旋等)发生的频率也将会增加^[11-12,15].

《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, 简称 UNFCCC)第二款指出, 公约的最终目标是: “将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危害的人为干扰的水平上. 这一水平应当足以使生态系统能够自然地适应气候变化, 确保粮食生产免受威胁, 并使经济能够可持续发展”^[37]. 自然界(如生态系统的弹性)和人类社会(如采取适应性措施来减缓气候变化的不利影响)对气候变化有一定的适应能力, 但这种适应能力是有限的. 人类社会及自然界的适应能力达到最大情况下的气候状况可视为 UNFCCC

* 国家“十五”重点科技攻关资助项目(2001-BA611B-02-03A).

** 通讯作者. E-mail: wush@igsrr.ac.cn

2006-01-12 收稿, 2006-12-28 接受.

第二款指的“人为的危险气候”,也就是所谓气候变化对各系统影响的“阈值”,它是气候变化影响与各系统适应能力的综合结果.为了避免“人为的危险气候”的出现,促进社会经济可持续发展,适应和减缓成为应对气候变化必须采取的战略措施.这与限制各国、各地区、某些行业的温室气体排放量及发展前景紧密联系在一起,受到各国政府、企业和广大民众的高度重视^[41].在此背景下,响应气候变化的脆弱性评价成为近年来气候变化研究领域的热点问题.自然生态系统、食物安全和社会经济可持续发展是脆弱性评估中的3个重要研究方向.本文通过对文献中脆弱性的概念、气候变化脆弱性评价研究现状、自然生态系统响应气候变化的脆弱性定量评价方法进行了综述,探讨了自然生态系统响应气候变化的脆弱性评价研究中存在的问题和未来的发展前景.

2 脆弱性的概念

脆弱性(vulnerability)一词广泛应用在多个学科,如经济学、社会学/人类学、灾害管理学、环境科学及健康/营养学^[3,8,21]等.由于不同学科关注的问题不同,对脆弱性的理解和定义也不同.目前对脆弱性概念的理解还有很大的模糊性,如脆弱性是遭受损害的结果,还是原因?应从外部压力(如气候变化等),还是从不良后果(如饥荒、损害)对其定义?是系统内部固有的性质,还是在特殊的外界压力情景下的偶发事件?脆弱性是动态的还是静态的概念等.针对脆弱性的不同理解,Downing^[6]认为脆弱性应包括3个方面:首先,脆弱性是作为一个结果,而不是一种原因来研究;其次,针对其它不敏感因子而言,所关注的影响因素的作用是负面的;最后,脆弱性是一个针对某系统和地区的相对概念,而不是一个绝对的损害程度的度量单位.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第3次评估报告将气候变化研究中的脆弱性定义为:“一个自然或社会的系统容易遭受或没有能力对付气候变化(包括气候变率和极端气候事件)不利影响的程度,是某一系统气候的变率特征、幅度、变化速率及其敏感性和适应能力的函数^[13].”敏感性是指系统受与气候有关的刺激因素影响的程度,包括不利和有利的影响,与气候有关的刺激因素是指所有的气候变化因素,包括平均气候状况、气候变率和极端事件的频率和强度.影响是直接的或间接的.适应能力是指系统适应、减轻潜在损失,利用

机会或对付气候变化后果的能力.脆弱性取决于系统对气候变化的敏感性和系统对气候变化的适应能力.

3 脆弱性评价的理论基础及研究现状

从系统论角度看,气候变化下生态系统的动态符合“压力-状态-响应”模式:外在因素(气候因子变化)对系统产生压力,构成刺激输入,系统发生状态变化(正面或负面影响),变化结果通过某种形式响应,表现为生态系统的脆弱性或(不)适应性.因而,生态系统脆弱性评价的基础理论支撑包括自组织学、突变论、耗散结构理论、涌现学等复杂科学.在气候变化影响下,生态系统会出现适应、抗逆、演替等过程,因而在生态科学层面上,群落演替、生态恢复以及综合生态进化是生态系统脆弱性评价的理论依据.

近十多年来,气候变化脆弱性评价工作在农业、林业、水资源以及渔业等众多行业展开^[7,17-18,23,34-35],许多国家也开展了国家尺度上各领域对气候变化的综合脆弱性评价研究^[1,4,10,26-28].目前的脆弱性评价工作侧重于研究人类社会对气候变化的敏感性和适应性,在综合评价一个区域或国家对气候变化的脆弱性时,自然生态系统往往是作为一个敏感因子参与脆弱性评价的.美国能源部在评价不同国家对气候变化的脆弱性时,生态系统的敏感性是8个评价对象之一,其指标为被管理土地的百分比和肥料消耗量,认为被管理的土地越多,生态系统敏感性越强;肥料消耗量过多或过少都会增加生态系统的敏感性.这两个指标都是从人类管理的角度来反映生态系统对气候变化的敏感性.但自然生态系统本身对气候变化敏感的同时,具有对气候变化的适应性.如何从自然生态系统自身的角度来刻画其对气候变化的脆弱性,成为气候变化脆弱性研究的一个重要问题,也成为气候变化领域和生态学研究领域关注的热点.

4 自然生态系统脆弱性的定量评价方法

定量评价自然生态系统的脆弱性是目前气候变化研究领域紧迫而重要的任务之一.由于自然生态系统的脆弱性是一种很难预见的现象,对其进行定量评价存在诸多困难.尽管如此,定量或半定量的评价工作仍在不断进行之中.评价中应用的方法包括:情景分析、生态模型模拟和综合指标法.情景分析为脆弱性评价提供气候背景数据,是驱动生态模型最

重要的因子之一;生态模型模拟是自然生态系统脆弱性评价的基础,其模拟效果的好坏直接影响评价结果,因此选择一个好的模型,将使脆弱性定量评价获得更可信的结果;综合指标法是定量评价气候变化下自然生态系统脆弱性的主要研究方法,应用非常广泛,其中指标的选取、指标权重的确定和生态参照基准或气候变化下生态阈值的确定是最为关键的3个问题。

4.1 情景分析

情景分析又称为前景描述,是在不确定环境下解读未来的方法,有利于我们了解复杂动态系统的未来可能发展。由于人类还无法准确预测未来的气候状态,因此,目前的脆弱性评价工作多基于气候情景分析。在这一研究领域中,气候变化情景可分为增量情景和基于气候模式的情景。增量情景是根据基准气候对不同气候因子进行简单的算术调整,这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。但由于增量情景包含了强制的调整,从气象学上讲可能是不真实的。目前更为常用的情景是基于大气环流模式输出的未来气候变化情景。大气环流模式将各种气候强迫因子(如温室气体和气溶胶浓度的增加等)的情景作为模式输入,输出一系列未来可能发生的气候情景。IPCC于2000年出版了排放情景特别报告(SRES)^[12],考虑社会经济发展的主要方向是全球性经济发展或是区域性经济发展,侧重于发展经济或是致力于保护环境,未来世界发展框架主要假设为4种情景族A₁、A₂、B₁和B₂,它们都是同样有效的,共同捕捉与驱动力和排放相关的不确定性^[12,15]。SRES情景为气候变化分析提供了一个研究平台,正在成为气候变化研究领域的标准参照情景^[14]。例如,中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所引进英国Hadley气候中心发展的PRECIS(Providing Regional Climates for Impacts Studies)区域气候模式模拟了我国在SRES情景A₁、A₂、B₁和B₂下的气候变化,并以30年作为一个时间尺度,将未来100年分为近期(1990—2020年)、中期(2020—2050年)和远期(2050—2080年),为生态系统脆弱性评价提供了气候情景数据。

4.2 生态模型模拟

模型模拟是预测生态系统对气候变化响应的有效手段。生态模型较多,应用于生态系统响应气候变化的模型主要有经验回归模型和过程模型。经验回归模型大多是基于植被-气候之间关系的经验回归关系,如Thornthwaite Memorial模型^[2]、Chikugo模

型^[36]、Holdridge的生命地带模型^[9]等。传统的经验模型是根据简化的气候变化计算得来的,并未考虑植物的生理反应与复杂生态系统的功能变化,同时也未考虑植被对气候变化响应的滞后性,重要的是没有考虑CO₂浓度倍增后大气环流的影响及其响应,因此在生态系统对气候变化的响应研究中有一定的局限性。过程模型考虑生态生理、生物物理过程和这些过程确定的植被的空间和时间特征,描述碳、水、营养元素在植被不同部分之间以及在土壤和大气之间的流量和动态。过程模型又可分为生物地球化学模型和生物地理模型。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,陆地生态系统模型(TEM)^[24]、CENTURY模型^[29]、DOLY模型^[40]、BIOME-BGC模型^[33]、CEVSA模型^[5]以及我国自主开发的AVIM模型^[16]都属于该种类型。后者既可模拟生态系统功能的变化,也可模拟生态系统结构的变化(包括地理分布与物候),可用于潜在的植被类型研究,代表性模型有BIOME模型^[30]、MAPSS模型^[25]等,已用于估算自然生态系统对大气CO₂浓度倍增及相关气候变化在区域和全球尺度上的平衡响应^[27]。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,但生物地理模型的应用是发展的必然趋势。我国学者季劲钧等^[16]建立的AVIM模型是国内比较完善的一个生物地球化学模型,在气候变化脆弱性评价中取得了较为客观的结果。Cao等^[5]开发完善的CEVSA模型经改进可同时模拟生态系统类型的潜在分布和生态系统功能的变化,正在向生物地理模型方向发展,是我国生态系统脆弱性评价的有力工具之一。我国应更多地引进国外优秀的生态过程模型,并加快本土化进程,同时加强自主开发适合我国生态状况的动态过程模型,为脆弱性评价提供支撑工具。

4.3 综合指标法

4.3.1 指标的选取 由于气候变化的影响涉及生态系统的方方面面,因此反映生态系统变化的指标也是多种多样的。到目前为止,对于采用哪些指标来衡量生态系统的脆弱性还没有统一标准。李克让等^[19]选取林地质量、林龄结构、森林灾害、薪材供应情况、薪材类型变化、生产力变化、森林火险等指标,构造我国森林脆弱性综合指标来衡量我国森林的现实脆弱性和未来脆弱性情况;李双成等^[20]和吴绍洪等^[41]选取了可以反映生态系统结构、功能和生境状况的指标(物种多样性、群落盖度、净第一性生产

力、建群种年生长量、地表干燥度、土壤碳密度),研究了我国自然生态系统的脆弱性变化趋势.与脆弱性评价研究相类似的生态系统健康评价也多从系统的活力、组织结构和恢复力等几个方面确定能够反应系统健康状况的特征指标,进行评价^[32],可以为生态系统的脆弱性评价提供借鉴.在众多生态系统脆弱性评价研究中,常见的指标有生产力、植被覆盖度、生物量、物种多样性、能量流、营养循环、食物链、种群优势度、外来种入侵率等^[42].此外还有脆弱性形成的成因指标、表示系统适应能力的结果表现指标等^[22,31,45].脆弱性指标选取中应尽量选择可以客观反映自然生态系统特征变化且数据可获得性强的指标.由于不同生态系统对气候变化响应有其独特性,因此,应根据生态系统类型的不同特征而选用不同指标,如森林生态系统与草原生态系统的脆弱性评价应选用不同的指标体系.

4.3.2 评价指标的权重赋值及脆弱性等级划分 生态系统脆弱性评价指标的权重赋值方法很多,有专家打分法、层次分析法、主成分分析法、人工神经网络、模糊逆方程法、灰色关联法等诸多方法,其中以专家打分法和层次分析法较为常见,神经网络法以其减少主观性的优势也越来越多地被应用^[20,43,46].划定各指标不同脆弱性等级,通常是以系统的生态基准或阈值作为基础的.生态基准类似环境科学中的“环境本底”,是指自然生态系统在适宜环境条件下的原始状态和特征值.生态基准的确定有两种途径:1)根据生态系统关键成分的生理幅度,计算其基础生态位,并以生态系统的基础生态位作为生态基准,该途径主要用于确定不同生态系统类型空间地理位置的分布;2)取某类生态系统在某区域或全球长期的平均特征值作为生态基准,用来确定生态系统结构、功能的生态基准.生态阈值是指生态系统从一种稳定状态快速转变为另一种稳定状态的点或区域^[39],是一个很难量化的概念,因此,生态系统响应气候变化脆弱性研究领域生态阈值还没有统一的数据. AIR-CLIM 项目评价气候变化对欧洲自然生态系统脆弱性的影响情况时^[38],将第一性生产力(NPP)作为生态系统响应气候变化的指标,以 NPP 的变化量不超过多年平均的 10% 作为划分系统脆弱与否的标准,若 NPP 的变化超出 10%,此时的气候条件即为危急气候条件,其思想是将多年平均的 NPP 作为生态基准,将 10% 的变化量作为划分系统脆弱与否的阈值.吴绍洪等^[41]在研究中国自然生态系统响应气候变化脆弱性时,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,划分不同生态脆弱等级的状态阈值,以 NPP 为例,减少 40%、60%、80% 和 100% 划分生态系统的状态为轻微不适应(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).其研究表明,我国自然生态系统基本上处于基准、轻度和中度脆弱状态,其模拟和评价结果尚未发现生态系统完全不适应气候变化的情况,但不同气候情景下不同的区域可能有不同的响应状态.

5 问题讨论

从广义上讲,在一定时空尺度上,任何一个生态系统都有脆弱性的一面.同时,生态系统的脆弱性作为气候变化的函数,也是全球变化研究领域的切入点之一,有着重要的指示预警作用和政策意义.尽管国内外对生态系统响应气候变化及其脆弱性评价开展了大量的研究,但值得指出的是,目前相关研究仍然滞后,对生态系统响应气候变化的脆弱性认识仍相当有限.目前亟待解决的科学问题如下:

1) 定量评价生态系统的脆弱性中存在很大的不确定性.其主要原因是生态系统的复杂性、气候变化的不确定性及其两者相互作用的综合性.不同气候因子对不同生态因子产生不同的影响,同时这些生态因子之间也会相互作用,综合起来对生态系统产生负面影响,这些负面影响又可表现在不同方面.因此,定量评价生态系统的脆弱性存在很大的不确定性^[30].另外,脆弱性评价还涉及评价对象的尺度问题.在不同的空间尺度和时间尺度上,可能有不同的脆弱性评价结论^[44].根据气候学理论和生态系统对气候变化的适应机制和滞后效应,目前在生态系统响应气候变化的脆弱性研究中通常将 30 年作为评价的最小时间尺度.

2) 除了生态系统脆弱性研究中理论基础存在部分争议外,生态系统响应气候变化的脆弱性评价方法也存在一定的问题,需要改进.如将复杂的生态系统简单概括为一些可估测的指标,忽略了生态系统的整体性,脆弱性评价方法与脆弱性定义之间缺乏对应关系,易忽略生态系统对气候变化响应的滞后性,评价指标不统一,所选的部分指标数据可获得性差或目前的试验手段还无法达到等.因此,在未来研究中需要加强野外试验和采用新的评价方法来研究生态系统的脆弱性,如加强野外试验和监测、增加植物个体响应气候变化的研究.应用遥感和地理信

息系统深化脆弱性研究,提高对大尺度生态系统的脆弱性分析和综合评价能力。

3)传统的气候变化影响评价主要分析压力及相应的影响,而脆弱性评价强调辨识受压力的系统和系统的响应能力,重点关注促进和限制系统应对、适应或从干扰中恢复的机制,其目标是辨识气候变化情景下各系统的风险程度及响应机制。因此,未来自然生态系统响应气候变化的脆弱性评价要加强不同尺度上的脆弱性机理研究,不但要辨识生态系统受气候变化的影响程度,而且要分析不同空间尺度上的生态系统的脆弱性,增强尺度转换能力。

6 未来展望

生态系统对气候变化有一定的适应能力,但是这种适应和调节能力是有限的。如果气候变化幅度过大、胁迫时间过长,或短期的干扰过强,超出了生态系统本身的调节和修复能力,生态系统的结构功能和稳定性就会遭到破坏,造成生态系统不能适应气候的变化,发生不可逆转的演替,即 UNFCCC 所指的“危险气候(dangerous climate)”。这个临界限度,即为气候变化对生态系统影响的阈值,简称为“气候阈值(climate threshold)”。未来自然生态系统对气候变化响应的脆弱性评价研究,可以从 UNFCCC 的观点出发,进行“人为危险气候”、“气候阈值”的研究,进而最终定量化生态系统的脆弱性或(不)适应性。

“气候阈值”是适应、减缓气候变化和实现可持续发展的重要联结点。如何定量分析气候阈值是生态学家和气候学家必须解决的重要科学问题。由于“气候阈值”的大小与生态系统自身内部的性质(如生态系统的结构、功能、成熟程度和稳定性等)和外部气候变化的强度、变率和持续时间有关。因此,在“气候阈值”定量化研究中需要注意研究不同生态系统适应气候变化的机制,包括气候变化过程、生物个体到生态系统不同尺度对气候变化的响应过程、环境背景和人类活动影响等。

生态系统响应气候变化的脆弱性评价需首先弄清气候变化过程、生物响应过程、环境基础和人类活动对生态系统影响的机理及程度,建立区域自然环境背景数据库,包括研究区域的气候、土壤和植被等情况;然后,建立衡量生态系统脆弱性和适应性的指标体系。评价指标可以从生态系统的结构、功能、生产力 3 个方面进行筛选,并借鉴生态系统退化理论和生态系统健康理论,确定不同脆弱程度上生态系

统结构、功能的变化,建立起脆弱性评估的指标体系;同时,确定“正常”气候状况下生态系统各指标的基准态;最后,对生态系统的适应性或脆弱性进行定量评价,以确定生态系统脆弱性或(不)适应气候变化的状态。

参考文献

- [1] Bachelet B, Neilson RP, Lenihan JM, *et al.* 2001. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States. *Ecosystems*, **4**: 164 - 185
- [2] Box E. 1975. Quantitative evaluation of global primary productivity models generated by computers// Lieth H, Whittaker RH, eds. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag.
- [3] Briguglio L. 1995. Small island developing states and their economic vulnerabilities. *World Development*, **23**: 1615 - 1632
- [4] Brooks N, Adger WN, Kelly PM. 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*, **15**: 151 - 163
- [5] Cao MK, Prince S, Li KR, *et al.* 2003. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, **9**: 536 - 546
- [6] Downing TE. 1993. Climate Change and Vulnerable Places: Global Food Security and Country Studies in Zimbabwe, Kenya, Senegal and Chile. Oxford: Environmental Change Unit, University of Oxford.
- [7] Ehman JL, Fan WH, Randolph JC, *et al.* 2002. An integrated GIS and modeling approach for assessing the transient response of forests of the southern Great Lakes region to a doubled CO₂ climate. *Forest Ecology and Management*, **155**: 237 - 255
- [8] Hans-Martin F, Richard JTK. 2006. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, **75**: 301 - 329
- [9] Holdridge LR. 1967. Life Zone Ecology. San Jose, Costa Rica: Tropical Science Center.
- [10] Huq S, Karim Z, Asaduzzaman M, eds. 1999. Vulnerability and Adaptation to Climate Change for Bangladesh. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [11] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigations of Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- [12] IPCC. 2000. Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge: Cambridge University Press.
- [13] IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- [14] IPCC. 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- [15] IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. New York: Cambridge University Press.
- [16] Ji J-J (季劲钧), Yu L (余莉). 1999. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), **23**(4): 439 - 448 (in Chinese)
- [17] Jin Z-Q (金之庆), Ge D-K (葛道阔), Shi C-L (石

- 春林), *et al.* 2002. Several strategies of food crop production in the northeast China plain for adaptation to global climate change—a modeling study. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **28**(1): 24–31 (in Chinese)
- [18] Jin Z-Q (金之庆), Ge D-K (葛道阔), Zheng X-L (郑喜莲), *et al.* 1996. Evaluation of the effect of global climate change on maize production in China. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **22**(5): 513–524 (in Chinese)
- [19] Li K-R (李克让), Chen Y-F (陈育峰). 1996. Analysis of vulnerability of forest in China responded to global climate change. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **51**(supp.): 40–49 (in Chinese)
- [20] Li S-C (李双成), Wu S-H (吴绍洪), Dai E-F (戴尔阜). 2005. Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **25**(3): 611–626 (in Chinese)
- [21] Liu L-L (刘绿柳). 2002. Concept and quantifying assessment of vulnerability of water resource. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), **22**(2): 41–45 (in Chinese)
- [22] Liu Y-H (刘燕华), Li X-B (李秀彬). 2001. Frangible Ecological Environment and Sustainable Development. Beijing: Commercial Press. (in Chinese)
- [23] Luers AL, Lobell DB, Sklar LS, *et al.* 2003. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, **13**: 255–276
- [24] Melillo JM, McGuire AD, Kicklighter DW, *et al.* 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, **363**: 234–240
- [25] Neilson RP. 1993. Vegetation redistribution: A possible biosphere source of CO₂ during climatic change. *Water, Air and Soil Pollution*, **70**: 659–673
- [26] O'Brien K, Lerchenko R, Kelkar U, *et al.* 2004. Mapping vulnerability to multiple stressors: Climate change and globalization in India. *Global Environmental Change*, **14**: 303–313
- [27] Pan Y-D (潘愉德), Melillo JM, Kicklighter DW, *et al.* 2001. Modelling structural and functional responses of terrestrial ecosystems in China to changes in climate atmospheric CO₂. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **25**(2): 175–189 (in Chinese)
- [28] Parton WJ, Stewart JWB, Cole CV. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: A model. *Biogeochemistry*, **5**: 109–131
- [29] Patt A, Klein RJT, de la Vega-Leinert A. 2005. Taking the uncertainty in climate-change vulnerability assessment seriously. *Comptes Rendus Geoscience*, **337**: 411–424
- [30] Prentice IC, Cramer W, Harrison SP, *et al.* 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, **19**: 117–134
- [31] Ran S-H (冉圣宏), Mao X-Q (毛显强). 2000. Agricultural sustainable development in typical ecology vulnerable regions. *China Population, Resources and Environment* (中国人口、资源与环境), **10**(2): 69–71 (in Chinese)
- [32] Rapport DJ, Costanza RM, McMichael AJ. 1999. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology and Evolution*, **13**: 397–402
- [33] Running SW, Gower ST. 1991. FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, **9**: 147–160
- [34] Simas T, Nunes JP, Ferreira LG. 2001. Effects of global climate change on coastal salt marshes. *Ecological Modelling*, **139**: 1–15
- [35] Tang G-P (唐国平), Li X-B (李秀彬). 2000. Climate change and its impacts on China's agriculture. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **55**(2): 129–139 (in Chinese)
- [36] Uchijima Z, Seino H. 1985. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation. I. Chikugo model for evaluating net primary productivity. *Journal of Agricultural Meteorology*, **40**: 343–352
- [37] UN. 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Geneva, Switzerland: UNEP/IUC.
- [38] Van Minnen JG, Onigkeit J, Alcamo J. 2002. Critical climate change as an approach to assess climate change impacts in Europe: Development and application. *Environmental Science and Policy*, **5**: 335–347
- [39] Wiens JA, Van Horne B, Noon BR. 2002. Integrating landscape structure and scale into natural resource management// Liu JG, Taylor WW, eds. Integrating Landscape Ecology into Natural Resource Management. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- [40] Woodward FI, Smith TM, Emanuel WR. 1995. A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biochemical Cycles*, **9**: 471–490
- [41] Wu S-H (吴绍洪), Yin Y-H (尹云鹤), Zhao H-X (赵慧霞), *et al.* 2005. Recognition of ecosystem response to climate change impact. *Advance Climate Change Research* (气候变化研究进展), **1**(3): 115–118 (in Chinese)
- [42] Yang Q-Y (杨勤业), Zhang Y-L (张懿锂), Li G-D (李国栋). 1992. Chinese critical environmental situation and area. *Geographical Research* (地理研究), **11**(2): 1–10 (in Chinese)
- [43] Yin Y, Xu X. 1991. Applying neural net technology for multi-objective land use planning. *Journal of Environmental Management*, **32**: 349–356
- [44] Zhao P (赵平), Peng S-L (彭少麟), Zhang J-W (张经纬). 1998. The fragility of ecosystem and the restoration of degraded ecosystem. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), **6**(3): 179–186 (in Chinese)
- [45] Zhao Y-L (赵跃龙), Zhang L-J (张玲娟). 1998. A study on index and method of quantitative assessment of fragile environment. *Progress in Geography* (地理科学进展), **17**(1): 67–72 (in Chinese)
- [46] Zuo Q-T (左其亭), Chen X (陈嘻), Wu Z-N (吴泽宁), *et al.* 2001. The method of artificial nerve network applied in ecosystem simulation and forecast. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), **15**(4): 17–21 (in Chinese)

作者简介 赵慧霞, 女, 1978 生, 博士研究生. 主要从事气候变化与区域响应研究, 发表论文 8 篇. Tel: 010-64889050; E-mail: zhaohx.04b@igsnr.ac.cn

责任编辑 梁仁禄

