

中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估

李克让¹, 曹明奎¹, 於 琨^{1,2}, 吴绍洪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: 生态系统的脆弱性已经成为气候变化影响评估和适应性管理的关键问题。本文介绍和分析了生态系统的脆弱性、敏感性和阈值的概念, 中国生态环境的敏感带和脆弱性, 脆弱性评估和中国生态系统脆弱分布以及自然生态系统的可持续性和适应减缓对策。自然生态系统对气候变化脆弱性评估仍存在许多问题和不确定性, 迫切需要在以下领域开展研究: 自主开发新一代气候变化对生态系统影响综合评估模型(特别是双向耦合模型)、加强相关野外长期观测实验、开展适应性与可持续发展示范工程的研究等。

关键词: 自然生态系统; 气候变化; 脆弱性; 阈值; 适应对策

文章编号: 1000-0585(2005)05-0653-11

1 引言

自然生态系统是指一定空间中的生物群落与其环境组成的, 没有或很少受人类活动直接干扰的统一体, 其中, 各成员借助能量和物质循环形成一个有组织的功能复合体。本研究所指的自然生态系统主要包括森林、草原、荒漠、湿地、冻原等。

自然生态系统几乎容括了地球的全部遗传和物种多样性的总体, 并提供对人类生存至关重要的产品与服务。近年来大量研究表明^[1~5], 世界和中国的自然生态系统破坏和退化日趋严重。由人类活动导致的温室气体的增加造成的全球气候变化, 特别是全球性变暖, 是导致自然生态系统变化与破坏的重要原因之一。

研究气候变化对自然生态系统的影响, 最重要的就是分析研究系统的脆弱性。气候变化下自然生态系统的脆弱性是指气候变化对该系统造成的不利影响的程度。脆弱性是系统内气候变率、幅度和变化速率及其对变化的敏感性和适应能力的函数。这类研究在全球范围已取得部分进展^[6], 但对我国的分析仍较零星、分散, 不够系统。

本研究试图重点介绍和分析生态系统的脆弱性、敏感性和阈值的概念; 中国生态环境的敏感带和脆弱性; 脆弱性评估和中国生态系统脆弱分布; 自然生态系统的可持续性和适应减缓对策; 以及当前研究的不确定性、存在问题和研究展望等。

2 自然生态系统脆弱性和阈值及其研究方法

2.1 脆弱性

一个系统的脆弱性首先取决于其对环境变化的敏感性。生态系统对气候变化的敏感性

收稿日期: 2004-12-18; 修订日期: 2005-06-20

基金项目: 国家 973 计划 (G2002CB412507); 国家杰出青年自然科学基金项目 (40425103) 资助, 中科院地理资源所知识创新工程主干科学计划 (I0GCX-E02-02)。

作者简介: 李克让 (1936-), 男, 山东肥城人, 研究员, 中科院地理科学与资源研究所知识创新工程主干项目学术指导。主要从事气候变化及其影响研究, E-mail: likr@igsnr.ac.cn。

是指气候因素变化对其格局、过程和功能的影响程度,这种影响可能是有害的,也可能是有益的。气候变化包括气候波动、变化趋势和极端气候事件的频率和强度。影响包括直接的或间接的两个方面。脆弱性与敏感性密切相关,通常,脆弱系统总是对气候变化影响敏感、且不稳定的系统。

脆弱性与系统的适应性有密切关系。适应性是指自然和人类系统对变化的环境做出的调整。适应气候变化是指自然和人类系统对于实际或预期的气候变化及其影响所做的趋利避害的反应。生态系统的主体组成部分是生物种群或群落,生命体与非生命体的根本差别在于它具有自组织和自适应能力。由于生物活动的高度有序性,它对于环境条件或气候变化十分敏感,能感知这种变化,并通过自组织运动调节以适应其变化,从而维持自身状态的稳定^[2]。系统的适应能力是指系统应对气候变化(包括气候变率、极端气候事件)以减轻潜在损失、应付气候变化的能力。适应能力首先与生态系统的结构和功能有关。一般生态系统的生物多样性越多,系统种类越丰富,结构越复杂,生产力越高,系统越稳定,抗干扰的适应恢复能力越强,反之亦然;同时,适应能力还与社会经济基础条件和人为影响、干预有关。

2.2 生态系统的阈值

生态系统对气候变化的适应和调节能力是有限的,如果气候变化幅度过大或持续时间过长,超出了生态系统自身的调节和修复能力,生态系统的结构和功能就会遭到破坏,这个临界限度,称之为生态系统阈值。从外力角度分析,生态系统阈值决定于外力的类型、强度、节奏、持续时间等诸多因素;从生态系统自身来讲,系统的结构、功能、成熟程度等都影响生态系统阈值的高低。当超出这个阈值时,生态系统的结构功能和稳定性就会遭到严重破坏,产生突发性连锁反应,甚至放大效应,使系统发生不可逆转的变化。

联合国气候变化框架公约的最终目标(即第二条)指出^[6]:“根据本公约的各项有关规定,将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上。这一水平应当在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发展能够可持续地进行的时间范围内实现。”

上述目标向人们提出一个问题,即是否存在一个“气候变化影响的阈值”,或“气候增暖的上限”,达到或超过这一阈值或上限,气候系统或自然生态系统就达到了危险水平。确定阈值是否存在及其范围是气候变化响应评估的重要课题。目前的全球变化研究还没有找到温室气体排放总量与气候和生态系统危险水平的关系,但有的研究认为,全球平均温度升高几度(有人认为 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$)以上,预计全球将在大范围内出现不利影响,会有经济的净损失。

自然生态系统确实存在着某种环境或气候胁迫下的阈值^[7]。比如,当胁迫超过植物自身调节能力的极限时,潜在损伤就发展成慢性病或不可逆伤害或死亡,这一极限即为阈值。如热和冷,依据其强度和持续期,损伤植物代谢活性生长和生活力,可确定某物种的分布界限,包括活性界限水平、致死界限水平或称阈值。但要指出的是^[7],植物不同部位和器官、不同高度,其热抗性和致死界限温度很不相同。通过实验可以确定不同气候带、不同植物类群在生长季期间热损伤或冷损伤的阈值温度。干旱引起的胁迫,对于植物个体来说,其危害程序不仅依赖于其干旱抗性,也依赖于其环境条件。萎蔫系数就是一个阈值,是指植物根系不能迅速吸取到能满足蒸腾需要的水分,植物开始出现萎蔫时的土壤含水量。其他尚有许多如辐射、盐胁迫甚至人为胁迫造成的阈值。可见,胁迫因子是非常复

杂的，既有非生物的温度、水、辐射等因子，也有生物的如微生物、动物、植物因子，以及人类的影响，胁迫常常是多种因子同时起作用，且复杂交错，相互影响，互相制约。对植物个体已是如此，对整个生物系统，甚至人类系统的影响就更加复杂了。

气候系统中存在许多非线性过程，这些过程往往导致气候突变。近年来，许多研究发现，在地质时期、历史时期和近代时期存在着许多气候跃变（或突变）现象^[2]，并对某些生态脆弱区造成重大影响。生物圈作为地球系统的一个子系统，对于外源的扰动和其他子系统作用的响应有所不同，在一定的变异度范围内，生物圈比较稳定，但当变异度超过某一阈值时，生物圈将失稳而发生突变。当代人类活动日益增强，扰动强度在许多方面已超过了自然调节能力，从而引起了全球变化。由人类活动引起的气候变化是否具有触发地球系统大规模突变的可能，并对自然系统和人类系统产生影响？气候突变和气候变化影响阈值是否存在联系？它们的形成过程和机制是什么？这些都是值得我们关心和待研究的重要课题。

总之，气候变化对自然和人类系统影响的阈值是一类极端复杂的科学问题，不可能简单地用一个温度增暖的数值或温室气体排放总量的上限来确定。为了确定影响阈值，必须进一步深入研究许多科学问题，如气候变化影响的机理和过程、温室气体浓度变化与气候变化影响的关系、阈值形成的因子和机理、阈值的表达等^[8]。

3 中国生态环境的敏感带和脆弱性

3.1 中国生态环境的敏感带分布

据研究，不同类型植被间的过渡带或交错群落一般都是全球变化的敏感区，它们对全球变化特别敏感，响应尤为强烈^[2]。图 1 是根据叶笃正的图所作的中国不同空^[2]间尺度的过渡带或敏感区的示意图。

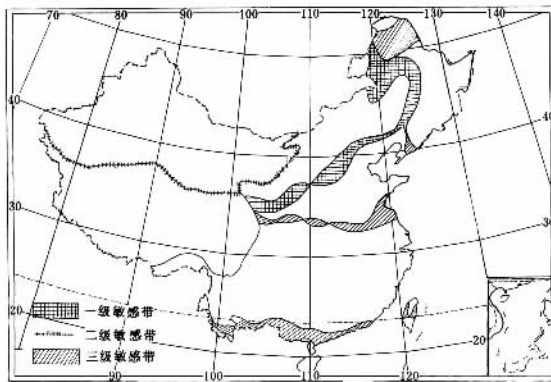


图 1 中国生态环境的敏感带分布图^[2]

Fig. 1 Sensitive zone distribution of the ecological environment in China^[2]

如图所示，中国的一级敏感带始于内蒙古东部向西南延伸至青藏高原的东南部。从气候角度看，它是干旱、半干旱气候向东南湿润、半湿润季风气候的过渡带；从水文角度看，它是内陆地表水系和沿海外流水系的分水岭；从土地利用来看，它是一条农牧交错带。二级敏感带始于 107°E，沿鄂尔多斯高原西侧直至兰州、西宁附近，然后向西沿青藏高原北麓至我国西部边境，这一过渡带是荒漠、草原、高寒植被的分界线。此外，在我国

东部森林植被区, 从北向南还分布着寒温带针叶林、温带针阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带雨林之间的小过渡带, 或称三级敏感带。

3.2 自然地带、植被分布和生物多样性

研究指出^[8], 未来气候增暖后, 中国温度带的界线北移, 寒温带的大部分地区变成了中温带, 中温带面积的 1/2 变成暖温带, 暖温带的绝大部分变成北亚热带, 而北亚热带几乎全部变成中亚热带, 中亚热带全部变成南亚热带, 南亚热带全部变为边缘热带, 边缘热带的大部分变为中热带, 中热带的海南岛南端变为赤道带。青藏高原各温度带的变化与东部地区不同, 大体是各温度带界线没有变化, 寒带变成亚寒带, 亚寒带变成高原温带, 高原温带近似于暖温带或北亚热带。全球变暖后, 中国干湿地区的划分仍为湿润至干旱四种区域, 但形成了干湿地区分布的新格局。

应用多种统计模型, 用假定的温度升高度数和降水增加幅度或大气环流模式预估的未来气候情景, 对各种植被带的可能变化的预估研究指出^[9~11], CO₂ 倍增后将使中国气候带和植被带向高纬或向西移动, 植被带的范围、面积、界限将相应变化。在垂直方向上, 气候变化可能使山区的基带和高原面的自然景观发生变化和迁移, 还可能使垂直带谱分布界线发生位移。随着气候变暖, 各种类型森林带和适生树种向北推进, 垂直带谱向上延伸。利用 MAPSS 和 HadCM2 模型的情景所作的未来植被分布表明, 气候变化可能导致中国森林植被带的北移, 尤其是落叶针叶林的面积减少很多, 甚至可能移出中国境内; 未来华北地区和东北辽河流域可能草原化; 西部的沙漠和草原略有退缩, 可能被草原和灌丛取代; 高寒草甸的分布略有缩小, 可能被萨瓦纳和常绿针叶林取代。

未来气候变化也将对中国的物种多样性造成威胁, 尤其可能对濒危物种的栖息地及气候适应范围狭窄的高山物种、已适应青藏高原高寒气候的物种和迁移能力弱的物种, 比如大熊猫、滇金丝猴、白唇鹿、秃杉、沙冬青和藏羚羊等造成威胁。

3.3 物候

物候作为指示区域气候变化与生态系统的生物和自然过程之间的敏感性综合指标, 已被广泛用于气候变化影响评估中。根据中国近 30 年物候观测网站的分析发现^[12], 影响中国木本植物物候的主要因素是温度, 如果未来年平均气温上升 1℃, 一般中国春季物候期将提前 3~4 天, 而秋季推迟 3~4 天, 绿叶期延长 6~8 天, 果实或种子成熟期提前, 其幅度较春季物候期大。一般北方物候现象的提前或推迟幅度较南方大。又据近 40 年中国物候观测网数据的分析表明^[13], 随着 20 世纪 80 年代以后中国东北、华北和长江下游春季增温, 物候期提前, 中国西南区东部、长江中游和华南地区春节气温下降, 物候期推迟, 一般春季气温上升 0.5℃和 1℃, 物候期提前 2 天和 3.5 天; 反之, 气温下降 0.5℃和 1℃, 物候期平均推迟 4 天和 8 天。

3.4 生态系统生产力和碳源汇

生态系统生产力对气候变化高度敏感, 据估算生产力的变化幅度从增加到减少都有可能。此外, 陆地生态系统目前是一个碳汇, 但到 21 世纪末随着温度的增高, 汇的强度会降低甚至变成源^[14]。曹明奎等^[15,16]利用生物地球化学机理模型 CEVSA 估算了 1981~2000 年中国陆地生态系统生产力和碳通量, 包括净初级生产力(表示植物生长)(NPP)、土壤异氧呼吸或土壤碳排放(HR)、净生态系统生产力(表示植物生长扣除土壤碳排放后的净变化)(NEP)以及中国植被和土壤碳贮量。结果表明, 生态系统生产力和碳通量对气候变化高度敏感, 其中, NPP 和 HR 总量的年际变化分别与年降水量和气温呈显著

正相关。20 年期间中国的 NPP 和 HR 总量，都呈明显的上升趋势，但 HR 的上升趋势大于 NPP。净生态系统生产力为 NPP 与 HR 的差值，负值表示净排放碳（为碳源），正值表示净吸收碳（为碳汇），估算结果指出，近 20 年中国 NEP 的总量变化在 $-0.22 \sim 0.25$ GtC a^{-1} 之间，平均值为 0.063 GtC a^{-1} ，可见，中国陆地生态系统在 CO_2 增长和气候变化的影响下吸收 CO_2 ，是一个碳汇，与美国的碳汇量级大致相当 (0.08 GtC a^{-1})^[17]。20 年内全国吸收碳的总量为 1.25 GtC ，约占全球同期碳吸收总量的 $8\% \sim 10\%$ ，其中，土壤和植被分别吸收 0.46 GtC 和 0.79 GtC 。

值得指出的是中国陆地碳源和碳汇的区域差异明显，从 20 年平均状况来看，中国的大部分地区年平均 NEP 很小，略高于零。碳吸收主要发生在东北平原、华北中西部、西藏东南地区和西南地区。碳释放主要发生在四川盆地南缘和云贵高原西南端、闽南丘陵、内蒙古西北部和新疆天山、准噶尔盆地等地区。在中国北方，由于增暖和干旱趋势明显，HR 的增长快于 NPP 的增长，NEP 呈减少趋势，在南方，尤其是西南地区，增暖幅度小，而且降水量有所增加，NPP 的增长快于 HR 的增长，NEP 呈增加趋势。如果未来北方降水量能恢复到 20 世纪 50 和 60 年代的较高水平，中国陆地生态系统碳吸收可显著增加，反之，如果北方增暖和干旱以此为继，中国陆地生态系统可能会从一个碳汇逆转为一个碳源。

利用改进后的统计模型计算评估了未来气候变化对净初级生产力的影响^[18]，结果指出，中国自然植被 NPP 在气温增加 2°C 或 4°C ，降水增加 20% 时，NPP 均有所增加，在湿润地区增加幅度较大，而在干旱及半干旱地区增加幅度较小。说明限制中国 NPP 的主要原因是水分供应不足。利用 TEM 和 KBIOME 过程模型和 3 个 GCMs 的预测结果的模拟表明^[19]，在大气 CO_2 加倍和气候变化条件下，中国的 NPP 约增加 30% 左右。该研究进一步区分了生产力变化的原因，在所增加的 NPP 中， $12\% \sim 21\%$ 源于生态系统的功能变化，即 CO_2 升高和气候条件改变的直接影响，而 $11\% \sim 17\%$ 是源于生态系统的结构变化，即由较高产的生态系统取代较低产生态系统的结果。

3.5 冻土、湿地和荒漠化

冻土对气候变化十分敏感^[20,21]。由于冬季极端最低气温升高和年平均日较差显著变小，20 世纪 80 年代以来，中国最大冻土深度开始减小，90 年代以后，各地区冻土深度减小幅度更为显著^[21]。据模拟预测指出，当 2099 年高原平均气温升高 2.9°C 以后，青藏高原多年冻土消失比例将高达 58.2% ，高原东部和南部的多年冻土大部分将消失，仅存高原西北部。

中国湿地主要包括沼泽、湖泊、河流、滩涂等天然湿地类型和人工湿地。近年来，中国天然湿地的数量和面积不断减少，持水、蓄水和调洪能力持续下降，许多依赖湿地生态系统的珍稀物种消失。其主要原因是人为影响，但气候变化也是一个重要因素^[22]。据模拟，在 6 种气候情景下（气温分别升高 1°C 、 2°C 和 3°C ，降水量增加或减少 10% ），中国东北地区的沼泽面积将减小。气候变化对中国北方泥炭沼泽影响的另一种可能是，如果气温升高，冻土南界北移，将使大量储存在泥炭沼泽中的碳源源不断地释放，影响大气中 CO_2 和 CH_4 的含量。此外，自 20 世纪 50 年代以来，中国西北地区的内陆湖泊湿地，大部分萎缩甚至干涸，除人类影响外，西北地区长期以来暖干化的气候是重要原因。

慈龙骏^[23]采用 1981~1990 年间全国 1914 个气象站的数据，用 HadCM2 模型预测全球变化框架下中国未来荒漠化生物气候类型区的变化。结果指出各气候类型区的面积基本

上均呈增加的趋势,其中以极端干旱区和亚湿润干旱区增加的幅度最大,半干旱区次之,这一区域恰是中国北方最具生物气候生产潜力的地方,持续变干必将影响沙漠化的扩展。总的来说,荒漠化生物气候类型区总面积呈增加的趋势。

3.6 极端事件对脆弱性的影响

近代和未来气候变化,特别是气候变暖将导致与生态系统密切相关的极端天气、气候事件如干旱、火灾、病虫害、高温的频率和强度的增加,从而使自然生态系统的脆弱性增大。自然生态系统已经进化或发展出在一定的气候变异范围内的应对和自适应能力。但是如气候变化导致超出系统经历过的历史范围的极端事件发生频率或强度增加,会增加系统的风险,使系统不能完全恢复,甚至崩溃。

干旱影响。我国地处季风区,季风降水的年际变异大,从而造成我国干旱灾害发生频繁、持续时间长、影响范围大、灾情重。过去 50 年来,我国北方、四川盆地降水趋于减少,干旱灾害频繁发生。随着气候变暖,进入 20 世纪 90 年代,我国每年平均受旱面积 2400 万 hm^2 ,比 50 年代增加 1.5 倍以上,受旱成灾面积增加 3 倍^[24]。干旱灾害将严重影响森林、草原等植物的生长发育,导致土地退化、生产力下降、森林火灾和病虫害的频发。我国草地退化的面积从 20 世纪 70 年代、80 年代初、90 年代至今,分别占总面积的 10%、20%、30%和 50%以上,且以每年 200 万 hm^2 的速度发展,其中,我国北方明显的干旱化趋势是重要的原因。

森林火灾影响。火灾对森林和草原的破坏极大,一场大火可烧毁大量的动、植物资源和地被物,破坏森林植被结构、功能,减少林分密度,使森林生态平衡失调,导致病虫害侵袭。我国平均每年发生森林火灾 16000 次,烧林面积 100 万 hm^2 左右,占全国森林面积的 8~9%,是世界上森林火灾最严重的国家之一。其中,东北和内蒙古林区、西南及南方三大林区年均受害面积分别为 54 万 hm^2 (占全国受害面积的 52%)、25 万 hm^2 及 22 万 hm^2 。森林火灾的发生与气候关系密切,特别是干旱年份发生次数多、损失大。如 1987 年 5 月,我国出现特大干旱,大兴安岭林区发生一场特大森林火灾,燃烧 26 天,受害森林面积达 100 万 hm^2 ,损失之重历史罕见^[25]。

病虫害影响^[25]。我国森林病虫害随人工林面积的不断扩大呈上升趋势。据统计^[26],从 20 世纪 50 年代至 80 年代,每年发生病虫害的面积呈每十年成倍增长的态势,50 年代至 80 年代平均每年发生病虫害的面积分别为 86 万 hm^2 , 144 万 hm^2 , 365 万 hm^2 和 847 万 hm^2 ,近年来每年因病虫害鼠害减少林木生长量 1000 万 m^3 ,因受害严重而使树木枯死的森林面积约 33 万 hm^2 ,约占每年造林保存面积的 12.5%。许多气候条件如干旱、高温、降水等与病虫害的发生发展有密切关系。

4 脆弱性评估及中国生态系统脆弱分布

4.1 脆弱性评估

鉴于脆弱性的影响因素多种多样,在评价时应突出主导因素。此外,为便于业务部门的应用,评价指标和方法应简便、易行,所需数据容易获得。脆弱性的分析评价通常包括敏感性和适应性,以及现实的脆弱性和未来的脆弱性等内容。敏感性和适应性主要分析影响系统自身调节与恢复能力的各种因素及对气候变化不利影响的敏感程度,脆弱性主要分析过去和未来气候变化影响可能造成的不利影响和脆弱程度。最后,把二者综合在一起,即可得到气候变化影响下系统脆弱性的强弱和区域分布^[26]。

4.2 中国脆弱生态环境的分布

脆弱生态环境是多种因素构成的整体。在生态环境中自然因素是导致环境变化的基础，人为因素起着加速或延缓自然过程的作用。因此，成因分析应着重于自然因素，其中气候是最主要的影响因子。按照脆弱环境的主要成因，并辅之以卫星遥感图像的判断，绘制了中国脆弱生态环境类型分布图（图 2）^[27]。如图所示，全国脆弱生态环境的面积约 194km²，超过我国总国土面积的 1/5，主要分布在 7 个地区，其中，5 个位于西部。

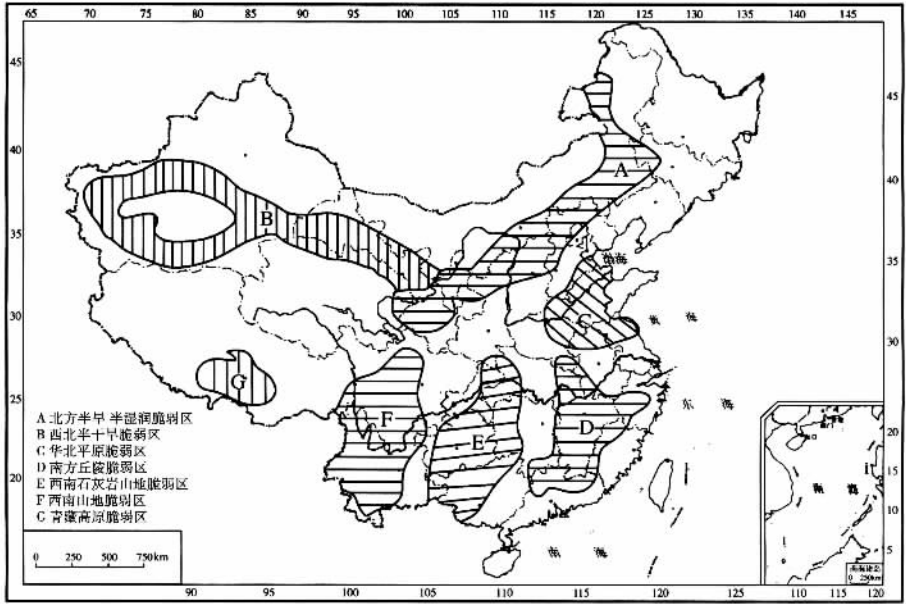


图 2 中国脆弱生态环境分布图^[27]

Fig. 2 The distribution of vulnerable eco-environment in China^[27]

为了使脆弱程度的评价既简便又准确，赵跃龙^[27]选择水资源（降水量和降水变率）、热量资源（日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温）、干燥度、土地数量和质量（人均耕地面积、土壤肥力）、地表植被覆盖度作为主要指标，同时考虑经济发展水平（人均 GNP、农民人均纯收入、人均工业产值）、社会发展水平（恩格尔系数、人口素质）建立了评价指标体系，获得了全国除京津沪和海南及台湾省以外的 26 个省区的脆弱度（表 1）。可见，我国西部 12 个省区市全部位于极强和强度脆弱，而极强脆弱的 8 个省区，有 7 个为西部省区。

表 1 全国 26 个省区生态环境脆弱度^[27]

Tab. 1 The vulnerability of eco-environment of the 26 provinces

脆弱程度	省区	宁夏	西藏	青海	甘肃	贵州	山西	陕西	新疆	
极强脆弱	脆弱度	0.8353	0.8329	0.8045	0.7853	0.7153	0.6927	0.6613	0.6537	
强度脆弱	省区	四川	河北	内蒙古	云南	河南	安徽	吉林	湖北	广西
强度脆弱	脆弱度	0.6285	0.6204	0.6186	0.5925	0.5893	0.5380	0.5248	0.4766	0.4507
中度脆弱	省区	辽宁	黑龙江	江西	湖南	福建				
中度脆弱	脆弱度	0.4400	0.4314	0.4137	0.3418	0.3123				
轻度脆弱	省区	山东	江苏	浙江	广东					
轻度脆弱	脆弱度	0.2575	0.2072	0.2017	0.1647					

4.3 中国自然生态系统脆弱性的分布

李克让等^[26]开展了中国森林现实和未来气候变化影响下脆弱性的研究。首先根据林地质量、林龄结构、森林火灾和薪材供应制定了现实的脆弱性指标, 又根据类型变化、生产力变化和森林火险制定了未来气候变化影响下的脆弱性指标。按照上述指标首先分析了中国森林现实的脆弱性, 然后计算了 GFDL、GISS 和 OSU 三种 GCMs 模式 $2 \times \text{CO}_2$ 情景下未来中国森林的脆弱性, 包括其面积特征和综合特征。研究表明, 全球气候变化对我国森林影响最大的区域主要分布在西南、华中和华南等地区, 与现实的脆弱性分布类似。

采用英国 Hadley 气候中心的 GCM-HadCM3 输出的 A2 和 B2 气候变化情景, 首先结合 CENTURY 生态模型模拟 B2 情景下 (2071—2090 年) 我国生态系统脆弱性, 并与基准年 (1961~1990 年) 的比较发现^①, 我国亚热带常绿阔叶林由轻度脆弱变成中度脆弱, 但内蒙古的草地由重度脆弱变为中度脆弱, 中度脆弱变为轻微脆弱, 其他类型仍为轻度脆弱。此外, 利用机理性的生态模型 CEVSA 模拟的结果表明, B2 情景下我国东北地区自然生态系统脆弱性变低; A2 情景下我国华东地区生态系统脆弱性加重, 但尚未发现生态系统崩溃的情况。

5 自然生态系统的可持续性 & 适应减缓对策

5.1 可持续性

气候变化的不利影响, 即脆弱性问题是生态系统可持续发展面临的巨大挑战。自然生态系统不但为人类提供食物、木材、燃料、纤维、药物、休闲场所等社会发展的重要组成部分, 而且还维持着人类赖以生存发展的生命支持系统, 包括水体的净化、缓解洪涝和干旱、生物多样性的产生与维持、气候的调节等。因此, 自然生态系统对气候变化的响应直接关系到人类社会的可持续发展, 同时也关系到自然系统自身可持续发展能力的问题。如果对自然生态系统非持续性的开发利用和干扰, 将使生态系统脆弱性增加。而保护自然生态系统并提高适应气候变化能力的各种措施则可促进可持续发展。适应性是指系统的活动、过程或结构本身对气候变化适应、减轻潜在损失或对付气候变化后果的能力。自然生态系统的适应性包括两个方面, 一是生态系统和自然界本身的自身调节与恢复能力; 二是人为的作用, 特别是社会经济的基础条件, 人为的影响和干预等。提高适应气候变化能力的许多措施和要求与促进可持续发展的要求是一致的。正确的措施, 既能减少气候导致的脆弱性, 又能促进生态系统的可持续发展^[14]。

5.2 适应减缓对策

适应对策是降低气候变化风险, 减缓气候变化脆弱性的一种经济有效的补救措施, 采取各种尺度的减缓和适应对策既能减缓气候变化的风险, 又利于可持续发展的目标, 两者是一致的。此外, 森林、草地等各种陆地生态系统具有重要的碳吸收潜力, 尽管可能不是永久的, 但生态系统的碳蓄存和碳吸收至少能为进一步开发和实施其他措施赢得时间^[14]。

① 加大对森林、草地等可再生资源和自然生态系统的保护、管理、监督和执法力度

森林是陆地生态系统的主体, 草地又是中国面积最大的生态系统, 对它们的保护和管理是增强自然生态系统适应能力、减缓脆弱性的重要基础。我国已制定和颁布了各种与保护自然生态系统相关的法律、法规和政府规划。比如《森林法》、《草原法》、《土地管理

① 根据吴绍洪等所作的研究结果。

法》、《野生动物保护法》、《野生植物保护条例》、《自然保护区条例》、《森林防火条例》、《森林病虫害防治条例》、《退耕还林条例》等。但是，随着人口的增长和工农业生产的发展，人类对自然资源的巨大需求和大规模的开发消耗已导致可再生资源与陆地生态系统的削弱、退化，甚至枯竭，为此必须加大保护、管理、监督和执法力度。特别是要控制和制止毁林、毁草及各种生态破坏，从根本上实施天然林和天然草地的保护政策，对禁伐区实施严格保护，坚决停止采伐，改变天然林的采伐机制，逐步实现木材生产以采伐利用天然林为主向经营利用人工林方向的转变。

此外，还应进一步完善和扩大目前处于保护状态的天然林，完善全国自然保护区的网络，建立保护区走廊，建立自然保护区和森林公园，对现存森林实施保护。目前，全国已有 932 个自然保护区和 874 个森林公园，对此应进一步加强管理。同时，大力发展林业生态系统建设工程，加速造林绿化，提高森林质量，扩大人工林地和草地的面积。

② 加强生态系统对碳的贮存式和替代式管理经营

增加碳汇减少碳源，可减缓气候变化的影响，主要指增加植被、土壤和耐久木材产品中贮存的碳量，如增加天然林、人工林、草地、农林综合生态系统的面积和碳密度；使用可持续的生物制品，特别是耐久、耐用的木材产品，扩大碳存储；增大土壤碳固存等。

为了减少温室气体的排放，可采取如下措施，即通过大力发展和使用可持续发展的生物产品如薪炭林等，以减少或替代高耗能的矿物燃料；积极推广太阳能、风能、水能等可再生能源和其他替代能源；或将碳贮存向长寿命木材制品转移。

③ 建立森林、草地资源等的培育、管理和生物多样性的保护与可持续发展体系

为了从根本上减缓气候变化的脆弱性，应建立森林、草地资源等的培育、管理和生物多样性的保护与可持续发展体系。具体包括：选育良种，营造温暖性耐旱树种，间伐和轮伐期经营对策等；建立国家级森林、草地资源和生物多样性监测网络和体系；防治和控制其他的人为破坏及自然灾害，如森林、草原火灾和病虫害；保护特殊生境和生态系统如湿地、高原生态系统等，建立和完善全国珍稀濒危动植物迁地保护网络；重视和加强自然生态系统与生物多样性的相关科学研究与国际合作。

6 不确定性及未来研究展望

6.1 不确定性和存在问题

我国自然生态系统对气候变化脆弱性的研究尚存在诸多的不确定性和问题，主要表现在：①已有的脆弱性研究多为定性分析，仍缺少定量评估气候变化对自然生态系统脆弱性、敏感性、适应性的方法、模型和指标体系；②生态系统与大气是紧密耦合的动态统一体，已有的评估气候变化影响的模型多数为静态或统计模型，动态的过程或机理模型较少，而动态的生态系统与大气双向耦合的模型更少；③为研究影响、确定模型参数和验证模型的现场实验研究仍十分缺乏；④仍缺少驱动和验证各类模型所需要的高分辨率、长序列的气候、植被、土壤、生产力、生物量等数据集；⑤为提高模型分辨率而使用的降尺度方法多数为简单内插法，较好的统计学次网格法，特别是高分辨率动力学模式方法有待发展；⑥极端气候事件的脆弱性研究非常重要，但研究薄弱、不确定性更大；⑦在气候变化对自然生态系统脆弱性评估中仍有许多领域如生物多样性、高原生态系统等的研究薄弱甚至空白；⑧已有的评估结果仍有较大的不确定性，特别是还难以定量分析大规模、区域性，并可能产生不可逆转影响的事件。

6.2 未来研究展望

鉴于我国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估中仍存在许多问题和不确定性,目前迫切需要进行优先研究领域如下:①气候变化影响下自然生态系统敏感性、适应性和脆弱性,包括阈值的定量评估方法;②自主开发新一代气候变化对自然生态系统影响评估模型,特别是双向耦合模型;③开展研究影响、确定模式参数和验证模型所需的野外观测实验;④气候变化影响研究所需长序列、高分辨率的自然和历史气候数据集,以及验证数据集的建立;⑤加强降尺度方法的研究,重点发展统计学次网格尺度法及高分辨率动力学模式方法;⑥评估极端气候事件对自然生态系统影响的方法和工具;⑦脆弱性、适应性与可持续发展以及适应性示范工程。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adapdtion and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 叶笃正. 中国的全球变化预研究. 北京:气象出版社,1992.
- [3] 葛全胜,等. 20世纪下半叶中国地理环境的巨大变化. 地理研究,2005,24(3): 345~358.
- [4] Li Kerang, Lin Xianchao. Drought in China: present impacts and future needs. In: D A Wilhite (ed). Drought Assessment, Management, and Planning; Theory and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, 1993. 263~289.
- [5] 郑度,杨勤业,顾钟熊. 黄秉维地理学术思想及其实践. 地理研究,2003,22(2):133~139.
- [6] UNEP/WMO. UN Framework Convention on Climate Change, 1994.
- [7] Larcher W. 植物生理学. 北京:中国农业大学出版社,1997.
- [8] 赵名茶. 全球气候变化对中国自然地带的影响. 见:张翼,等. 气候变化及其影响. 北京:气象出版社, 1993. 168~177.
- [9] 蒋高明,韩兴国,林光辉. 大气 CO₂ 浓度升高对植物生长的影响. 植物生态学报,1997, 21(6): 489~502.
- [10] 王其兵,李凌浩,白水飞,等. 模拟气候变化对3种草原植物群落混合凋落物分解的影响. 植物生态学报,2000, 24(6): 674~679.
- [11] 赵茂盛, R P Neilson, 延晓东,等. 气候变化对中国植被可能影响的模拟. 地理学报,2002, 57(1): 28~38.
- [12] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. 地理学报,1995,50(5): 402~410.
- [13] Zheng Jinyun, Ge Quansheng, *et al.* Impacts of climate warming on plants phenophase in China for the last 40 years. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(21): 1826~1831.
- [14] IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [15] Cao Mingkui, S. D. Prince, Li Ke-rang, *et al.* Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China, Global Change Biology, 2003, 9: 1~11.
- [16] Cao Mingkui, Tao Bo, Li Kerang, *et al.* Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(5): 552~560.
- [17] Schimel D, Mellillo J M, Tian H Q, *et al.* Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage ecosystems in the United States. Science, 2000, 287: 2004~2006.
- [18] 周广胜,张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报,1996, 20(1): 11~19.
- [19] Pan Yude, J M Melillo, D W Kicklighter, *et al.* Modeling structural and functional responses of terrestrial ecosystems in China to changes in climate and atmospheric CO₂. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(2): 175~189.
- [20] 刘小宁,李庆祥. 我国最大冻土深度变化及初步解释. 应用气象学报,2003, 14(3): 299~308.
- [21] Li Xin, Cheng Guodong. A GIS-aided response model of high-altitude permafrost to global change. Science in China (series D), 1999, 42(1): 72~79.
- [22] 张翼,刘玲宁. 气候变化对西北地区植被分布的可能影响. 见:张翼,等. 气候变化及其影响,北京:气象出版社,

1993. 178~193.

- [23] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响. *地学前缘*, 2002, 9(2): 287~294.
- [24] Li Kerang, Cheng Yuefeng. The impact of drought in China recent experiences, In: D A Wilhite, *et al.* Drought, A Global Assessment. London and New York: Routledge, 2000, (1): 331~347.
- [25] 国家科委重大自然灾害综合研究组. 中国重大自然灾害及减灾对策. 北京: 科学出版社, 1993.
- [26] 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(增刊): 40~49.
- [27] 赵跃龙. 中国脆弱生态环境类型分布及其综合整治. 北京: 环境科学出版社, 1999.

Assessment of vulnerability of natural ecosystems in China under the changing climate

LI Ke-rang¹, CAO Ming-kui¹, YU Li^{1,2}, WU Shao-hong¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Vulnerability of natural ecosystems has become a key issue both in assessing the impact of climate change and in planning the adaptation to climate change. In the paper, we elucidated the concepts of vulnerability, sensibility and threshold, analyzed distributions of the ecological sensitive zones, vulnerability of natural ecosystems and adaptation to climate and ecosystem changes in China. Numerous studies show that natural ecosystems are high sensitivity to climate change, particularly in the transitional zones (i. e. ecotones). The first-class sensitive zone in China is the region between the east of Inner Mongolia and the southeast of Tibetan Plateau. The climate zones and vegetation zones will produce a northward or westward shift, and the proportion of vegetations is one of the factors responsible for global warming will change. The productivity and carbon flux of terrestrial ecosystems are also highly sensitive to climate change. The Net Primary Productivity (NPP) of terrestrial vegetation has been increasing since the 1980s in China. Annual Net Ecosystem Productivity (NEP) varies between 0.32 and 0.25 Gt C a⁻¹, with a mean value of 0.07 Gt C a⁻¹. Terrestrial ecosystems in China are currently a carbon sink, but the carbon uptake rate may diminish as anticipated with the rapid warming of climate in this century. Seven regions vulnerable to climate change in China account for 20% of the whole country, in which five are in the west of China. The natural hazards are associated with climate change such as drought, fire, pest infestation etc. Excessive use of resources will increase the vulnerability of ecosystems. Applications of some measures are helpful to the adaptation to the climate change and mitigation of the vulnerability. However, there are still high uncertainties in assessing the vulnerability of natural ecosystems, many issues warrant further studies.

Key words: natural ecosystems; climate change; vulnerability; threshold; adaptation management