

气候变化对生物多样性的影响：脆弱性和适应

吴建国¹, 吕佳佳¹, 艾丽²

1. 中国环境科学研究院, 北京 100021; 2. 北京科技大学, 北京 10083

摘要: 气候变化对生物多样性影响及其适应直接关系着未来生物多样性的保护。气候变化对生物多样性影响、生物多样性在气候变化影响下的脆弱性、生物多样性适应气候变化方面进行了总结分析, 对存在的问题进行了讨论, 对今后研究提出了一些建议。过去的气候变化已使物种物候、分布和丰富度等改变, 使一些物种灭绝、部分有害生物危害强度和频率增加, 使一些生物入侵范围扩大、生态系统结构与功能改变等。未来的气候变化仍将使物种物候和行为、分布和丰富度等改变, 使一些物种灭绝、使有害生物爆发频率和强度增加, 并将可能使生态系统结构与功能发生改变等。生物多样性适应气候变化包括了自然适应和人为适应两个方面, 自然适应体现在物种适应性进化、迁移、生态系统稳定性和弹性等, 人为适应体现在种质基因保存、物种异地保护、自然保护区规划设计、生态系统适应性管理、生态恢复和气候灾害防御等。目前, 生物多样性对气候变化影响的脆弱性、生物多样性自然适应和人为适应气候变化方面的研究都还不系统深入, 需要加强生物多样性自然适应和人为适应气候变化方面的研究。

关键词: 脆弱性; 适应; 气候变化; 生物多样性; 影响

中图分类号: X176

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0693-11

生物多样性是指一定空间范围内多种多样活有机体的总称, 是生物及其与环境之间复杂关系的体现, 也是生物资源丰富多彩的标志。生物多样性是人类赖以生存的基础, 一方面给人类提供基本环境, 另一方面又提供了丰富资源。气候是影响生物多样性的主要自然因素, 气候要素的变化将引起生物多样性的改变。自工业革命以来, 由于大气中温室气体浓度的急剧增加, 使地球的气候环境正在发生巨大变化。联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel On Climate Change, 简写 IPCC) 最近的评估报告明确指出, 人类活动是导致近百年来全球普遍增温主要原因, 近百年来 (1905—2005 年) 全球增温平均 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, 预计到 2100 年预计将达到 $1.1\sim 6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。大量观测表明, 过去气候变化已经对生物多样性产生极大影响, 包括物种的物候、行为、分布和丰富度、种群大小和种间关系、生态系统结构和功能等都已经发生了不同程度改变, 甚至引起个别物种的灭绝^[1]。未来全球气候变暖将对生物多样性产生更深刻的影响。IPCC 报告最新评估, 预计未来全球升温幅度超过 $1.5\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 目前已评估过的 20%~30% 的物种灭绝的风险将增加, 超过 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 目前地球上 25%~40% 的生态系统结构与功能将发生巨大改变^[2]。这无疑将会给生物多样性保护带来严峻挑战。目前, 气候变化对生物多样性影响的脆弱性及其适应问题已成为政府、科学家和公共等都普遍关注的热点, 应对气候

变化以及在气候变化背景下有效保护生物多样性已经成为成了国际社会普遍关心的全球环境问题。在联合国气候变化框架公约 (The United Nation Framework Convention on Climate Change, 简写 UNFCCC) 第 2 款中要求, UNFCCC 最终要使大气中的温室气体浓度控制到一个稳定水平, 在这个水平下能使生态系统自然地适应气候变化。这意味着生物多样性适应气候变化是 UNFCCC 的重要内容。同样, 在联合国生物多样性公约 (The United Nation Convention on Biological Diversity, 简写 UNCBD) 中也明确提出, 使生物多样性适应气候变化是生物多样性公约中重要内容, 也是目前与未来生物多样性保护中关键问题^[3]。因此, 深入研究和科学认识气候变化对生物多样性影响的脆弱性及其适应, 将对生物多样性的保护和国际公约的履行等都具有十分重要的理论和现实意义^[4]。

气候变化对生物多样性的影响方面的问题, 最早主要是从古气候、古生态学、古地理学和古环境科学角度开展了研究。自 20 世纪 90 年代以来, 随着对气候变化问题的日益重视, 特别是对气候变化对生物多样性影响和脆弱性的高度关注, 大量研究利用不同试验观测和模型模拟的方法, 从微观和宏观不同尺度对气候变化与生物多样性关系展开了大量研究, 特别是近几年来, 气候变化对生物多样性影响和脆弱性问题更成为全球环境问题中研究的热点^[5-6]。与此同时, 针对气候变化背景下如何

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目专题 (2007BAC03A02-06); 中国环境科学研究院公益院所基金项目支持 (2007KYYW05)

作者简介: 吴建国 (1971 年生), 男, 副研究员, 博士, 主要从事气候变化的影响与适应。E-mail: wujg9298@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-09-09

开展生物多样性保护的问题,也积极展开了生物多样性适应气候变化相关研究和对策探索,试图对气候变化对生物多样性影响和脆弱性有全面系统地认识,以提出建立生物多样性适应气候变化的科学对策,最终为人类能有效应对气候变化和保护生物多样性提供强有力的依据与方法。在我国,气候变化对物种和生态系统影响方面研究也大量展开,相关成果已被纳入到国家气候变化评估报告中^[7],但有关气候变化对生物多样性影响的脆弱性及适应方面综合认识还不足。为此,本文试图对近年来国际上关于气候变化对生物多样性影响和脆弱性及适应方面工作进行一些归纳总结,对存在的问题进行讨论,以系统了解生物多样性对气候变化响应和脆弱性以及适应方面的情况,同时为进一步开展相关研究等提供参考。

1 气候变化对生物多样性影响和脆弱性

气候变化影响研究中,脆弱性分析是其中的重要内容和主要方法,但脆弱性的概念和分析方法还处在发展中,对不同系统来说,涵义有所不同。在气候变化对生物多样性影响分析中,需要对脆弱性的概念有科学认识。生物多样性通常被分为基因多样性、物种多样性和生态系统多样性三个层次,目前气候变化对生物多样性影响和脆弱性研究还主要集中在物种和生态系统多样性的方面,基因多样性与气候变化关系研究比较欠缺。生物多样性体现在陆地、淡水和海洋环境的生物多样性,气候变化对生物多样性影响和脆弱性又分别从陆地、淡水和海洋生物多样性方面展开相关研究。

1.1 脆弱性的概念

脆弱性通常指一个系统易于受到外部胁迫伤害的状态,包括系统对胁迫暴露程度、对胁迫暴露敏感性和适应能力^[8]。暴露是系统经历环境或社会政治胁迫的属性或一种程度,胁迫程度包括了胁迫的强度、频率、忍耐和灾害伤害的程度,敏感性是系统被外部胁迫改变的程度,适应能力是系统应对环境灾害、胁迫、干扰和政策改变等的的能力。在气候变化影响分析中,脆弱性是指气候变化对人类系统和自然系统造成的影响的程度,系统不能应对气候变化负面影响的表现或特征,是系统对气候变化暴露特征、强度和速率、敏感性和适应能力的函数^[1]。

对生物多样性而言,脆弱性是生物多样性对气候变化带来影响的易感程度,是气候变化对生物多样性影响的敏感性和适应性的函数,体现在生物多样性对气候变化负面影响的敏感性和适应能力,以及生物多样性对气候变化影响的敏感性和适应性的综合结果或属性特征。

1.2 已有影响和脆弱性

大量观测表明,20世纪陆地和海洋表面温度都已经上升、降水格局已经发生了改变,特别是最近50多年来,温室气体大量增加已导致全球气候急剧变暖,海平面大幅度上升,并引发冰川融化、积雪减少,高温、干旱、热浪、飓风和洪水等极端气候事件频繁发生,这些改变已经对生物多样性产生了较为深刻的影响。同时,大量观测表明,许多物种的行为和物候、分布和丰富度、种群大小等都已发生改变^[5-6];陆地、淡水和海洋生态系统的结构与功能也发生了极大的变化^[2]。

1.2.1 物种多样性

20世纪的气候变化已使物种的行为和物候发生了改变。在芬兰,黑鹅产卵和孵化期已提前^[9];在英国,1971—1995年期间,65个物种中78%物种繁殖日期提早9天^[10];北美1959—1991年期间3450个观测结果表明,树雀孵卵日期提前9 d^[11]。美国纽约,1903到目前90多年中,39个物种迁徙提前、35个物种没有变化、2个物种推迟^[12];美国威斯康州,鸟类中8个种鸣叫期提前,1个推迟^[13]。1982—1996年期间观测表明,我国华北平原生长季延长^[14]。许多植物开花物候期提前、生长加速,例如在1959—1993年期间观测表明,欧洲植物开花大概提前11 d,部分植物生长加速^[1]。

降水和温度变化对物种物候与行为影响程度不同。例如,在欧洲25个鸟类孵化日期与春天气温密切相关,春天气温升高使孵化日期提前^[15];在北京,1951—2000年间观测表明,春季山桃始花物候和生长变化与温度变化相关性比其与降水相关性要高^[16]。

20世纪气候变化也已经使一些物种分布发生了改变。如蝴蝶^[17]、一些鸟类^[18]和哺乳动物^[19]都呈现北移趋势;过去25 a里,英国脊椎和无脊椎动物也向北或高海拔迁移^[20];在南美栖息在山区和平原一些生物也都向北迁移^[21];一些河流中棕色鳟鱼种群向高海拔迁移^[22]。许多物种目前分布范围每10年平均北移6.1 km^[6]。

20世纪气候变化使一些物种的丰富度发生改变^[2]。例如,1902—1949年、1975—1984年和1985—1999年期间观测表明,20世纪最后10 a,随气温升高,荷兰的维管植物中喜热植物种类增加^[23];过去40 a中,欧洲候鸟和留鸟丰富度也因气温升高而发生改变^[24]。气候变化也使极地北极熊出生率下降^[25];引起病害加剧而使美国一些两栖类物种灭绝^[26]。

20世纪气候变化也引起有害生物泛滥,包括害虫和疾病生物向高海拔和高纬度迁移,害虫和疾病爆发强度和频率增加等^[1]。云杉小蠹爆发频率伴随

干旱和夏季干旱,干旱胁迫增加使害虫与寄主关系都受到影响,使阿拉斯加云杉小蠹已朝北移动,云杉树皮甲虫传染率增加^[25]。气候变化引起生物入侵范围扩大导致高山植被组成改变^[27]。

1.2.2 生态系统多样性

20世纪的气候变化使陆地生态系统结构改变。例如,1951—1994年期间观测表明,气候变化使爱沙尼亚森林树种由落叶为优势种改变为以云杉为优势种的组成结构^[28]。20世纪70年代降水改变,特别冬季降水量增加,使美国奇瓦瓦荒漠木本灌丛密度增加3倍,以前常见动物数量减少,稀少动物数量增加^[29];气温升高也使荒漠植被地理分布发生改变,动物和植被物种多样性不同^[30];气候变化引发的干旱加剧使许多荒漠植物大片死亡^[31]。气候变化使高纬度陆地生态系统植被生产力增加,生态系统碳氮循环过程改变^[2]。

20世纪的气候变化也引起生态交错带的结构改变^[32],尤其是森林树线高度改变^[33-34]。例如,20世纪气温平均升高0.8℃,使斯堪的纳维亚山系瑞典区域树线上升了100 m以上^[35];1986—2000年期间,温度升高使mount-glungezer树线向上迁移,引起植被分布格局改变^[36]。全球升温使我国长白山岳桦原过渡带变宽^[37];使五台山高山草甸和林线过渡带中一些植物向高海拔迁移^[38]。气候变化使高纬度和高海拔生长季延长20%,使北方森林以每℃按100~150 km速度向北扩展,冻原中草本和地衣植物丰富度改变,阿拉斯加一些北方森林变成沼泽湿地^[1]。

20世纪的气候变化也引起河流、湖泊湿地等淡水环境的生物多样性改变。在过去25 a里,不同纬度高山河河流和溪流中水温已升高,使类似棕色鳟鱼这样水生生物向高海迁移^[22];过去10~15 a里,北欧一些湖泊中大型无脊椎动物组成发生改变^[39];1981—2005年期间观测表明,英国瑞汗地瑞姆瓦延高地溪流水温上升了1.4~1.7℃,许多大型无脊椎动物受到影响,表现出春天温度每升高1℃,无脊椎动物丰富度下降21%^[40]。内陆干旱地区和沿海湿地也因为气候变化影响而发生一定退缩^[1]。

20世纪的海水温度升高也引起海洋生物的改变,北方海域热水生物正在取代冷水生物,浮游植物变化引起食物链改变^[41]。1989—1998年期间观测表明,地中海东部深海中线虫功能多样性和均匀度下降^[42];1913—2002年期间观测表明,英国海洋鱼类群落组成发生极大改变^[43];极地白令海冷水鱼向北迁移,波弗特海中食物链藻类群落组成改变^[25]。气候变化引起全球珊瑚礁发生白化^[44]。海水温度上升、冰盖减小、盐度、氧气改变,海洋生物分布和物候发生改变,高纬度海洋中藻类、浮游生物和鱼

类都向极地迁移,生物丰富度、生产力、群落结构等都发生了改变^[2]。

1.3 未来影响和脆弱性

未来的气候变化将对物种丰富度、物种分布、种间关系、物候行为等都将产生深刻影响,并可能使物种入侵范围扩张、物种灭绝和生态系统结构功能改变方面脆弱性。

1.3.1 物种多样性

未来的气候变化将继续影响生物的行为和物候,如分析表明,气候变化将使亚极地湖泊中植物(包括木质常绿树和多年生草本)开花日期提前2周多^[45];温带灌木林地一些鸟类孵卵和冬天返还日期提前^[46]。

未来的气候变化也将使物种的分布改变。气温升高2℃,南非动物中17%物种范围将扩展,78%物种范围将缩小(4%~98%),3%没有变化,2%物种将完全散失栖息范围^[47];南非硬叶灌木群落生物区中330个物种,到2050年约有33%物种分布范围将完全改变,仅5%仍能保留60%范围^[48]。气候变化后,美国北部许多乔木和灌木分布范围将会变化很大,一些物种分布范围更破碎化,一些物种分布范围扩展^[49];美国榆树、云杉和山毛榉分布区将扩展,枫树分布范围将减少^[50];在墨西哥1870个物种,到2055年,40%物种分布范围将改变^[51]。欧洲约1400种植物,到2100年,10%物种将可能从欧洲消失,1%灭绝,北欧有35%物种入侵,南欧有25%物种因无合适分布范围将可能局地灭绝^[52]。在英国,到2050年左右,极地高山物种分布范围将散失^[53];英国地衣植物区系空间分布将发生改变^[54]。

未来的气候变化将引起物种丰富度改变。例如,气候变化将使长距离迁徙鸟类丰富度增加,使短距离迁徙鸟类丰富度下降^[24];将使极地无脊椎动物群落组成改变^[55];南非乡土植物丰富度平均下降41%^[56]。美国许多地区耐热脊椎动物丰富度将可能增加,南部哺乳动物和鸟类丰富度将降低,而在冷凉山区将增加^[57];一些草本和灌木植被中C₄类型数量增加,C₃类型数量下降^[58];在北部和东部木本植物丰富度将增加,南部沙漠中植物丰富度下降^[57];北部树种丰富度将增加,特别是那些分布在较寒冷地区树种,比较干燥和高温地区物种丰富度降低,恒温动物(哺乳动物和鸟类)减少,而变温动物(如爬行动物和两栖类动物)增加^[59]。芬诺斯坎底亚南部森林中动物种群数量增加,云杉、松树和阔叶树数量减少、优势度降低,芬诺斯坎底亚北部一些草本物种丰富度下降,松树下草本优势度却增加^[60];大西洋中部森林榆树和松树优势度将可能增加,桦木和山毛榉的优势度可能下降^[61]。温度升高5℃,降水

不变情景下,我国东北高山月桦仍旧占优势,但云冷杉和落叶松一些半生树种明显增加^[62]。欧洲122个物种组成的功能群,温带区物种丰富度和功能群多样性将散失,北方森林物种丰富度和功能多样性却增加,大西洋地区物种丰富度减少、功能多样性增加^[63];温度升高1~3℃,冻原生物群中落叶灌木盖度增加、高度增加,苔鲜和地衣盖度减少,物种多样性和均匀度下降^[64];极地石楠地土壤微生物群落组成也将改变,其中0~5 cm土层比5~10 cm土层变化要大^[65]。

未来的气候变化将使一些物种灭绝。例如,低气候变化情景(温度升高0.8~1.7℃)下全球将有18%物种灭绝,中等变化情景(温度升高1.8~2.0℃)将有24%的物种灭绝,较高变化情景下(大于2.0℃)将有35%物种灭绝,中等气候变化情景下,墨西哥和澳大利亚广大区域到2050年将有15~37%物种灭绝^[66];温度升高2~4℃下,2100年南美guayana高地乡土维管植物中10%~33%物种将因散失栖息地而灭绝^[67];升高2℃,澳大利亚热带雨林中脊椎动物也将面临灭绝^[68];到2095年,亚麻逊热带森林中将有43%物种可能消失^[69];加倍CO₂情景下,全球25个生物多样性热点区本土物种的1%~43%物种中将可能灭绝,平均11.6%^[70]。

未来的气候变化将导致植物病害分布范围改变^[71]、使植物病害增加^[72]、使害虫对天敌的脆弱性增加^[73]。气候变化后法国榆树病害(*phytophthora cinnamomi* 引发)范围从大西洋海岸向东部扩展数百公里^[74];南方松树甲虫(SPB)(*Dendroctonus frontalis* Zimmermann)传染和危害风险将增加2.5~5倍^[75];2020年苏格兰西北黑蛭蟪危害加重,英格兰西南和威尔士西部危害将下降^[74]。气候变化也将使入侵风险增加^[2]。

1.3.2 生态系统多样性

未来的气候变化将使生态系统分布将发生改变,一些生态系统类型将被其它生态系统所取代。如哥斯达黎加热带雨林高海拔Houdridge生命地带性变化对温度比较敏感,低海拔Houdridge生命对降水比较敏感,Houdridge地带性多样性在极端湿润和高热气候情景下将显著减少^[76];太平洋东北部森林带将移动500~1000 m,高纬度一些森林类型将消失^[77];寒温带生态系统类型将被地中海生态系统类型所取代,桦木林分布海拔高度上限将上升70 m,目前桦木林和石楠将被榆树林所代替^[78];北美五大湖南部北方针叶和阔叶树基面积下降,中部和南方树种轻微增加^[79];气温升高2℃,欧洲大部分生态系统将受到影响,北方国家最明显,植物多样性将增加,地中海国家植物多样性将减少,2010年仅1%

范围不受影响^[52]。气候变化后,在欧亚、中国东部、加拿大、美国中部和亚麻逊目前大片森林将散失,森林将向极地和半干旱热带稀树草原区扩展,半干旱区和亚麻逊野火将更频繁,全球温度升高3℃以上,影响面积将更大^[80]。

未来的气候变化将使湖泊和溪流温度、氧气和溶解性物质、水文过程改变,使风暴频率和强度增加,河流和溪流及湿地将受到影响。气候变化引起河流水排放减少将导致75%鱼类到2070年灭绝^[81];将使美国南部明拿斯达州水位下降后,将使湖中灌木种类减少50%^[82];冬天温度升高使春天湖泊中水化事件爆发频率增加^[83];气候变化引起冰床退缩和积雪融化,使法国高山溪流中生物多样性在融水减少 α 多样性增加,而 β 多样性却随雪和冰融化而减少,融水输入减少,将导致本土水生生物灭绝, γ 多样性下降^[84];气候变化将使极地水生生物和生态系统结构功能发生改变^[85]。在高纬度和高海拔湖泊中海藻和浮游动物丰富度增加,河里鱼迁移时间提前,范围改变^[2]。

未来的气候变化将导致海洋生态系统结构功能改变。全球温度升高1℃,全球珊瑚礁普遍白化,海平面上升将导致沿海湿地被淹没,估计2080年20%湿地将散失,红树林将受到较大影响^[1]。气候变化将对海洋浮游生物造成较大的影响^[86];尤其是南极栖息在海冰上的动物影响较大,将使这些地区食物网结构改变^[87];海水温度升高1℃,将使美国南部海龟雌性比例增加,升高3℃将使死亡加剧^[88]。许多海洋和淡水生物物候与分布也伴随水温增加、冰盖变化、氧气含量和环流变化而改变,海藻、浮游生物和鱼类在范围和丰富性方面向极地迁移^[2]。

气候变化对生物多样性影响下的脆弱性表现在气候变化后物种物候行为、分布和丰富度的改变、有害生物泛滥、物种灭绝,使生态系统结构功能和分布改变。最脆弱的物种包括:具特殊生理属性、分布在山区物种、分布地理范围严格限制的物种和在分布在特别脆弱生态系统中的物种。最脆弱的生态系统包括:海岸湿地、红树林、岛屿生态系统、极地生态系统、高山和山地生态系统、北方森林、热带森林、海洋珊瑚礁和海冰生物群^[1]。

总之,20世纪的气候变化已经引起生态系统的结构组成功能改变,未来气候变化将对物种多样性、生态系统多样性产生极大影响,表现在物种物候改变和空间分布变化等。

2 生物多样性适应气候变化

适应的概念源于生物学领域,目前被广泛应用到气候变化应对中。生物多样性适应气候变化包括自然适应和人为适应,适应的目的是减少脆弱性。

2.1 适应的概念

在生物学中,适应是反映生物与环境之间关系的最基本概念。对生物种群来说,适应是指种群在环境选择压力下形成的累积性基因反应,包括形态特征、生理特征和行为特征等形式^[89]。生物对环境变化适应包括:调整、驯化、发育和进化形式^[89],这些过程都由基因控制,调整属于生理或行为改变,时间较短,驯化涉及形态改变,而发育涉及到物种生活史,时间都较长^[89]。植物在环境中正常生活和繁殖后代就是对环境适应表现,包括可逆性或弹性反应和塑性反应(phenotypic plasticity)。动物对环境适应包括适应性行为、躲避不利温度、选择合适活动时间和迁移等。

20 世纪 90 年代,适应的概念已被应用到全球环境变化研究领域,目前已被广泛用到环境灾害管理中^[90]。在分析评价全球变化对人类系统的影响中,适应指对付、调整和管理环境变化胁迫、灾害和风险等的过程、行动或措施,是一个系统通过调整其行为和特征来增强应对外部胁迫的能力和过程,使系统增强对付环境变化暴露和影响的脆弱性。适应能力是对付和管理环境变化胁迫的能力^[90]。

对自然和人类系统来说,气候变化相当于一种扰动、胁迫和灾害等^[91]。适应气候变化指应对气候变化影响,减少脆弱性而增强抵抗力,体现在减弱气候变化影响后的脆弱性而实现避免危害过程、行动、行为或政策等。适应气候变化能力表现在系统的适应力、应耐力、管理能力、稳定性、活力、灵活性和弹性等。气候变化适应研究目的包括:估计什么影响能被减弱,能避免气候变化负面影响,而实现正面影响;选择适应措施;评价相对的适应能力和实际适应活动。IPCC^[2]报告中定义适应为:对受气候变化影响的自然和人类系统进行的调整调整,这些调整能缓冲危害或利用有利机会,并减少脆弱性。适应包括增加适应能力、执行适应性决定等^[92]。适应气候变化还表现在科学、技术、行为、政策和经费等方面,体现在政府组织或个体、以及自然系统等各种调整方面。

对生物多样性而言,适应气候变化是指生物多样性各要素应对气候变化影响的脆弱性所进行的各种调整过程、行为和措施及活动等,包括自然适应和人为适应两方面。自然适应是生物多样性靠要素自身稳定性、忍耐、弹性和恢复等能力来适应,人为适应主要是靠人为活动的干预来帮助生物多样性适应气候变化。生物多样性适应气候变化包括生物个体、种群、群落和生态系统对气候变化适应,体现在物种适应性进化、生活史特征、迁移等,以

及生态系统的稳定性、弹性和恢复等。

2.2 自然适应

生物多样性自然适应气候变化包括通过改变基因结构而进行的进化性适应、物种改变物候和行为及迁徙适应、生态系统保持稳定性或分布改变等方面适应。

2.2.1 进化性适应

生物将可能通过基因改变^[93]或微进化来适应气候变化,这些适应涉及物种基因改变^[94]。物种对气候变化进化性适应与物种分布变化、繁殖和迁徙等关系密切^[95]。目前观测到物种对气候变化适应性进化的一些例子,如一年生植物开花^[96]、道格拉斯冷杉分布^[97]、哺乳动物活动^[98]和蝴蝶迁移^[99]等适应气候变化而发生相关基因的变异。

植物对气候变化的适应将取决于与气候变化相关基因变异、自然选择方向和强度^[100]。Franks 等^[96]研究发现,长期土壤湿度改变,使英国萝卜(*Brassica rapa*)和美国加利福尼亚南部田芥开花日期变化相关基因改变,这些植物在干旱环境下后代开花日期比其祖先开花日期提前了 1.9 d,在湿润环境下的后代比其祖先提前了 8.5 d;Truong 等^[101]研究发现,气候变化引起瑞士南部山毛榉(*Betula pubescens* ssp. *Tortuosa*)分布相关基因改变,使这些植物在新分布区能正常生长发育。动物基因改变适应气候变化与动物繁殖密切相关,Réale 等^[102]研究发现,过去 10 a 中因春天气温升高和食物供应的变化,在加拿大育空西南部红松鼠的繁殖期已提前 18 d,在这 10 多年这个动物已繁殖数代,不同代基因都发生了相应变异;Griffith & Watson^[103]研究发现,气候变化引起一种普通海扇(*Xanthium strumarium*)繁殖期提前,相关基因发生变异。不过,也有研究发现,气候要素不同并没引起一些鸟类繁殖基因改变^[104]。

需要指出的是,物种物候对气候变化响应是物种对气候变化影响早期调整,许多物种对气候变化已经做出不同响应,但目前对这些响应中是否都发生了基因变化还并不完全清楚^[105]。

2.2.2 物种多样性

气候变化下物种迁移和物种特殊生境需求与物种自然适应气候变化的密切相关。例如,没有物种迁移假设下,非洲 277 个哺乳动物中 10%~15% 物种在 2050 年左右将濒临灭绝,到 2080 年将有 25%~40% 物种濒临灭绝,如果物种能有效迁移,大概仅有 10%~20% 物种濒临灭绝^[106];气温升高 3℃,因为地理分布范围狭窄、迁移能力差、生境隔离、分布于山地和高山环境,42 个物种中 24 个种分布范围将散失 90%~100%^[107]。迁徙能力差异将使物种对气候变化适应能力不同,Lemone 和

Bohning-Gaese^[108]分析发现,冬天气温升高使欧洲康斯坦茨湖区长距离迁徙的鸟类数量下降,但短距离迁徙和不迁徙鸟类数量却增加;Malcolm 等^[109]研究发现,气候变化引起物种迁移率增加,北方和温带区比热带区高,但大水体和人类活动对迁移有较大的影响。说明迁徙能力强的物种适应气候变化能力也强。

气候变化后物种是否仍旧能分布在自然保护区也是物种适应气候变化重要的方面。Hitz 和 Smith^[110]研究发现,气温升高 3 °C, 50%自然保护区将不再能容纳目前分布物种;Tellez-valdes 和 Davila-Aranda^[111]研究发现,3 种气候变化情景下(温度升高 1 °C、降水减少 10%, 温度升高 2 °C、降水减少 10%, 温度升高 2 °C、降水减少 15%), 因为栖息地限制,墨西哥中部自然保护区中物种超出保护区范围而面临灭绝;Coulston 和 Ritters^[112]研究发现,气候变化后道格拉斯冷杉森林保护区内 57%物种目前适宜范围将不再适宜,灭绝风险增加;Araujo 等^[113]分析了欧洲 1200 种植物发现,6%~11%物种在 50 a 内将从目前保护区内完全散失。说明物种未来能否仍能够适宜分布在保护区内将直接关系物种是否将面临灭绝。栖息地变化也直接影响物种适应气候变化能力,如气温升高 2~4 °C, 新热带圭亚那高地本土维管植物中 10%~30%物种将散失其栖息地而面临局地灭绝风险^[67]。

气候变化后,物种物候行为改变也是物种适应气候变化重要特征。如西欧 42 a 的观测数据表明,65 个鸟类中长距离迁徙鸟类迁徙日期提前,短距离迁徙日期却延迟,秋天到冬天向南迁徙的日期已经提前,而冬天迁徙日期却延迟^[114]。表明气候变化后,物种能立刻进行行为的响应也直接影响其对气候变化适应能力

迁徙能力强的物种适应能力也强,适应环境范围窄的物种能通过利用新微气候环境而忍受气候变化影响。一些物种有足够变种和基因变异能适应气候变化,特别是一些分布广物种有不同生态型能适应气候变化。另外,生活史周期短物种和生长发育快的物种适应气候变化也较快。当然,自然景观破碎化和海拔将使物种迁徙受阻。最脆弱物种是那些长周期、移动率低、有特异寄生关系、小种群、以及低基因变异物种^[1]。

2.2.3 生态系统多样性

生态系统适应气候变化与其稳定性或弹性有关。当生态系统受到气候变化干扰时,如果没有超出弹性范围或生态系统有较高抵抗力、恢复力、持久性和变异性,或生态系统能通过自我调节而恢复,那么生态系统将能有效适应气候变化^[1]。

生态系统稳定性是生态系统适应气候变化的关键,一些研究考虑气候变化后生态系统稳定性变化,包括生态系统弹性^[115]、生态系统弹性和再组织能力^[116]等。在气候变化后一些稳定性低的生态系统将可能发生植被演替或物种优势度改变。Rogers 等^[117]研究发现,气候变化将刺激早期演替森林类型而对晚期森林类型影响不大,加速演替早期物种被晚期演替物种替代的进程;Niemela 等^[60]研究发现,温度升高使芬诺斯坎底亚南部森林动物种群数量增加,云杉、松树和阔叶树数量减少、优势度降低,北部森林阔叶树下草本丰富度下降。气候变化后,我国东北森林也将有一个快速衰退过程,一些针叶树将被落叶阔叶树种取代^[118]。说明气候变化后这些生态系统将发生结构组成改变。

气候变化后,一些生态系统将可能对当地气候环境不再适应,但可能对异地气候环境能适应。以 BIOMES 和 MAPSS 模拟气候变化对生态系统移动趋势,发现北方和温带生物区移动速率比热带生物区移动快^[109];全球气温升高 2~3 °C,许多生态系统功能将发生改变^[119],到 2100 年将超过许多生态系统弹性,陆地生态系统将变成碳源^[2]。恢复能力强的生态系统适应气候变化能力强,Reusch 等^[120]提出生态系统受气候极端事件影响后,基因多样性增加有利于生态系统恢复。

一些生态系统适应气候变化能力较差,包括海岸湿地、红树林、岛屿生态系统、极地生态系统、高山和山地生态系统、北方森林、热带森林、冻原、地中海型森林、沿海湿地、海洋珊瑚礁和海冰生物群等^[1]。

2.3 人为适应对策

人为适应气候变化对策主要包括基因保存适应、物种多样性和生态系统适应。基因保存的适应包括对基因多样性保护,物种保护人为适应包括人为帮助物种适应、管理濒危物种栖息地、减少其它胁迫(比如栖息地破碎化、污染和外来种引入),生态系统人为适应包括人为对生态系统干预、调节和控制,使生态系统保持结构功能的稳定。

2.3.1 种质基因保存

在气候变化下,对一些濒临灭绝物种采取种质基因保存的对策。种质基因保存包括种子库、基因资源库、染色体和种子库保存,以及进行基因人为选择,培育适应性强的新物种等,如培育抗干旱、抗高温物种等^[121]。

2.3.2 物种适应

物种保护适应气候变化中,自然保护区管理和设计是人为适应气候变化重要内容。气候变化可能使物种不能再在保护区内适宜,减少当前保护区功

能有效性,所以保护区策略是物种适应气候变化首先选择^[122]。自然保护区管理目标和战略中需要考虑适应气候变化,扩大保护区将有利于减少脆弱性,保护区设计中考虑动植物长距离迁徙,进行物种与生态系统集成保护,减少对自然保护区物种威胁,增加生物多样性的弹性,帮助物种自然适应,在自然保护区周围创造和恢复缓冲区,实行迁地保护策略^[123]等。Williams 等^[124]分析南非物种保护走廊设计,指出需要考虑气候变化对物种迁移的影响,满足物种适应气候变化而迁移的需要;Hannah 和 Lovejoy^[125]分析提出,生物多样性保护适应气候变化中,选择保护区范围要有代表性,考虑把目前和将来都能适应气候变化的保护区作为优先选择的对象,并且考虑新适宜范围与以前适宜范围的连通性。

物种管理保护中充分考虑气候变化适应也是重要内容,极地土著人通过改变野生生物管理和狩猎活动使生物能够适应气候变化^[2]。Hannah 等^[126]提出适应气候变化的集成性保护策略 (climate change-integrated conservation strategies, CCS),包括模拟区域生物多样性对气候变化响应,把气候变化作为集成性选择因子进行自然保护区的选择,区域范围自然保护区适应性管理中把气候变化作为管理目标的参数,设立行政区域或国家边界的协调机制,包括跨越国际边界,从资源丰富的国家向气候变化对生物多样性影响脆弱的国家提供资源等;Hannah 等^[127]提出在生物多样性保护中需要考虑气候变化影响的适应性管理对策,特别是设计自然保护区方面需要考虑气候变化影响,需要减少非气候变化不利影响,监测没有预测到影响;Barro 等^[128]提出考虑气候变化后目前和潜在物种与栖息地空间分布,进行动态和集成保护政策。表明物种管理中,适应气候变化需要考虑多方面的因素。

物种保护中建立防灾体系也是适应气候变化的重要内容。Hulme^[129]提出,在生物多样性适应气候变化方面需要考虑对海平面上升、洪水、火灾和干旱灾害的预防。同时,也需要考虑控制生物入侵^[130]。

IPCC^[1]报告中提出,在考虑气候变化对生物多样性影响适应对策中,进行保护区网络通道设计有利于物种迁徙,对一些敏感和脆弱物种进行迁地保护以增加适应。

2.3.3 生态系统适应

生态系统方面,人为适应气候变化活动包括维持或恢复自然生态系统、保护和增加生态系统的功能、稳定性和弹性。

生态系统的适应性管理是适应气候变化重要

内容。如对农田、草地和森林生态系统的适应性管理,减少人为破坏和资源收获^[2]。应用不同的管理措施,减少栖息地的破碎化,集成管理生态系统,适应性管理森林^[131]。适应性管理防止气候变化下藻类爆发危害^[132];采用风险管理方法来使生态系统适应气候变化。

退化生态系统恢复是适应气候变化的重要内容。Hari 等^[22]提出生态恢复包括造林、再造林和恢复退化土地,考虑气候变化对生态恢复的影响。

监测气候变化与生物多样性响应将是适应战略关键,长期监测物种、栖息地和气候变化的相关因子,是检测变化和制定适应对策关键^[2]。

总之,生物多样性适应气候变化包括自然适应和人为帮助适应对策,自然适应需要物种基因进化性适应、物种迁移和适宜自然保护区性、以及生态系统能够稳定性和有较强的弹性,人为适应需要从种质基因保存、自然保护区设计和生态系统管理等方面进行。

3 结语

综上所述,目前在气候变化对生物多样性影响的脆弱性及适应方面已取得不少成果,但还存在以下方面问题需要进一步进行考虑。

(1) 目前虽然已观测到气候变化对生物多样性影响和脆弱性,但生物多样性改变不完全归因于气候变化,还可能包括其他因素影响,如土地利用活动和环境污染等,并且一些因素是直接影响,一些因素是间接影响,目前对这些因子间相互作用认识很不充分。另外,生物多样性变化包括许多方面(如物种之间关系、种群数量、结构、群落特征等),目前已观测到气候变化对生物多样性影响方面还十分有限,更多方面需要检测。

(2) 生物多样性体现在基因多样性、物种多样性和生态系统多样性几个层次,目前气候变化对生物多样性影响的脆弱性分析还主要集中在物种和生态系统方面,对基因多样性研究非常少,基因多样性与气候变化关系存在很大不确定性。另外,在分析物种灭绝方面主要基于栖息地面积变化,没有考虑种群数量和进化过程,对气候变化引起物种灭绝机制认识还很不清楚。并且在分析气候变化对生态系统地带性影响中,假设植被和气候是稳定整体,但事实上不同物种对气候变化有不同反应,植被地带性移动并不是以整体形式移动,不同物种可能对气候变化有一定滞后作用,目前对这些方面考虑很不够。

(3) 气候变化一方面通过气候平均变化对生物多样性产生影响,另一方面通过极端气候事件对生物多样性产生影响,目前研究还主要是平均气候变

化情况对生物多样性进行研究,对极端气候事件对生物多样性影响的研究还极少。另外,栖息地环境的改变是引起生物多样性变化重要原因,目前在这方面研究也很不够。在景观和生物圈尺度分析气候变化对物种多样性影响脆弱性中,对物种迁徙、空间格局和空间异质性、种群间相互关系、以及地形和土壤的影响都考虑不够。

(4) 适应的概念在生物学中已经是一个基本概念,但目前对生物多样性自然适应和人为适应气候变化的概念区分还不太清楚。另外,目前还没有建立一套生物多样性适应气候变化的指标和标准,从基因多样性、物种多样性和生态系统多样性方面来判断生物多样性对气候变化的适应,还存在很大的不确定性。

(5) 生物多样性适应气候变化过程十分复杂,在历史过程中,生物多样性就存在对环境变化广泛适应性,包括基因多样性、物种多样性和生态系统多样性的适应,但对物种通过迁徙、进化来适应环境的机制很不清楚。并且对生物多样性适应气候变化过程中,基因的变化、生物之间相互作用、其它人类活动与气候变化的协同作用适应也不清楚。对生态系统自然适应气候变化的过程也是不清楚,特别是生态系统如何通过弹性、稳定性、以及演替过程和退化后的恢复来适应气候变化也并不十分清楚。

(6) 目前虽然提出了生物多样性适应气候变化的一些人为的对策,如种质基因管理、自然保护区设计规划、生态系统适应性管理等,但这些对策还仅是一些概念性或框架性的对策,还没有形成系统量化研究。

基于以上几方面的问题,建议未来从以下方面进一步研究。

(1) 系统建立气候变化对生物多样性影响脆弱性分析的指标、标准和方法,确定反映基因多样性、物种多样性、生态系统多样性适应气候变化的完整指标体系,建立基于基因多样性、物种多样性、群落和生态系统尺度评价方法和模型。

(2) 开展检测和监测过去气候变化对生物多样性影响和脆弱性、以及生物多样性适应气候变化方面工作。系统分析气候变化对物种丰富度、物候、优势度、地理分布范围、多样性等影响的脆弱性,特别是气候变化与基因多样性关系的研究。开展气候变化对物种灭绝影响机理研究,确定气候变化下物种灭绝机理。加强气候变化和极端气候事件对生物入侵和有害生物影响研究,确定气候变化对物种入侵和有害生物影响趋势。

(3) 系统分析气候变化对生态系统多样性的影响和脆弱性,包括气候变化生态系统结构功能、动

态,以及物种栖息地多样性直接和间接影响脆弱性,确定生态系统对气候变化反馈过程。

(4) 系统分析生物多样性对气候变化自然适应过程和能力,包括对物种通过迁徙和进化适应气候变化过程和能力,物种对极端气候事件的适应机制,以及物种对气候变化和其它环境因素协同适应机制。同时,系统分析生态系统自然适应气候变化的能力,包括生态系统弹性、稳定性、退化后恢复与适应气候变化的关系。

(5) 系统分析生物多样性适应气候变化对策,包括生物多样性对气候变化影响适应技术及其效果,包括自然保护区规划管理、物种人为迁移、种质基因保存、生态系统适应性管理、灾害预防等,以及这些适应对策效应等。系统开展生物多样性保护适应气候变化和其它胁迫的协同适应技术与对策方面的工作。

参考文献:

- [1] IPCC(Intergovernmental Panel On Climate Change). Climate Change and Biodiversity. IPCC technical paper V[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
- [2] IPCC(Intergovernmental Panel On Climate Change). Climate Change 2007: Impacts, adaptations and vulnerability. fourth assessment report of working group II[R]. Cambridge, UK: University Press, 2007.
- [3] BROOKER R, YOUNG J C, WAIT A D. Climate change and biodiversity: impacts and policy development challenges-a European case study[J]. International Journal of Biodiversity Science & Management, 2007, 3: 12-30.
- [4] ARAUJO M B, RAHBK C. How does climate change affect biodiversity?[J]. Science, 2006, 313: 1396-1397.
- [5] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature, 2003, 421: 57-59.
- [6] PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature, 2003, 421: 37-42.
- [7] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[R]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] ADGER W N. Vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2006, 16: 268-281.
- [9] LUDWIG G X, ALATALO R V, HELLE P, et al. Short- and long-term population dynamical consequences of asymmetric climate change in black grouse[J]. Proceedings of the Royal Society B, 2006, 273: 2009-2016.
- [10] CRICK H Q P, DUDLEY C, GLUE D E, et al. UK birds are laying egg earlier[J]. Nature, 1997, 388: 526.
- [11] DUNN P O, WINKLER D W. Climate change has affected the breeding data of tree swallows throughout north America[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences, 1999, 266: 2487-2490.
- [12] 吴建国. 气候变化对陆地生态系统影响研究的若干进展[J]. 中国工程科学, 2008, 10(7): 60-68.
- [13] WU Jianguo. The Advances of the study on effects of climate change on the terrestrial biodiversity[J]. Engineering Sciences, 2008, 10(7): 60-68.
- [14] BRADLEY N L, LEOPOLD A C, ROSS J, HUFFAKER W. Phonological change reflect climate change in Wisconsin[J]. Preceeding of National Academy of Science U S A, 1999, 96: 9701-9704.
- [15] 陈效述, 喻蓉. 1982-1999年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化[J]. 地理学报, 2007, 62(1): 41-51.
- [16] CHENG Xiaoqi, YU Rong. Spatial and temporal variations of the vegetation growing season in warm-temperate Eastern China during 1982 to 1999[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(1): 41-51.
- [17] BOTH C, ARTEMYEV A V, BLUUAW B, et al. Large-scale geographical variation confirms that climate change causes bird to lay earlier[J]. Proceedings of the Royal Society B, 2004, 271: 655-661.

- [16] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 北京地区气候变化与植被的关系-基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 499-506.
ZHANG Xuexia, GE Quansheng, ZHENG Jingyun. Relationships between climate change and vegetation in Beijing using remote sensed data and phenological data[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4): 499-506.
- [17] PARMESAN C, RYHOLM N, STEFANESCU C, et al. Poleward shifts in geographical range of butterfly species associated with regional warming[J]. Nature, 1999, 399: 579-583.
- [18] THOMS C D, LENNON J J. Birds extend their range northwards[J]. Nature, 1999, 399: 213.
- [19] HERSTEINSSON P, MACDONALD D W. Interspecific competition and the geographical distribution of red and arctic foxes vulpes vulpes and alopec lagopus[J]. Oikos, 1992, 64: 505-515.
- [20] HICKLING R, ROY D B, HILL J K, et al. The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 450-455.
- [21] GURALNICK R. Differential effects of past climate warming on mountain and flatland species distributions: a multispecies North American mammal assessment[J]. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16: 14-23.
- [22] HARI R, LIVINGSTONE S R, BURKHARDT-HOLM P, et al. Consequences of climate change for water temperature and brown trout populations in alpine rivers and streams[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 10-26.
- [23] TAMIS W L M, ZELFDE M V, VAN D M R, et al. Changes in vascular plant biodiversity in the netherlands in the 20th century explained by their climate and other environmental characteristics[J]. Climate Change, 2005, 72: 37-56.
- [24] LEMOINE N, SCHAEFER H C, BOHNING G K. Species richness of migratory birds is influenced by global climate change[J]. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16: 55-64.
- [25] Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) Impacts of a Warming Arctic[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [26] POUNDS J A, BUSTAMANTE M R, COLOMA L A, et al. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming[J]. Nature, 2006, 439: 161-167.
- [27] GRABHERR G. Alpine vegetation dynamics and climate change-a synthesis of long-term studies and observations[C]// NAGY L, KORNER C G, THOMPSON D B A. Alpine Biodiversity in Europe, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003: 399-409.
- [28] NILSON A, KIVISTE A, KORJUS H, et al. Impact of recent forestry and adaptation tools[J]. Climate Research, 1999, 12: 205-214.
- [29] BROWN J H, VALONE T J, CURTIN C G. Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 1997, 94: 9729-9733.
- [30] WILLIAMS M A, BALLING R C J R. Interaction of Desertification and Climate Change[M]. Arnold London UK: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [31] WHITFORD W. Ecology of Desert Systems[M]. San Diego, California, USA: Academic Press, 2002.
- [32] NEILSON R P. Transient ecotone response to climate change: some conceptual and modeling approaches[J]. Ecological Applications, 1993, 3(3): 385-395.
- [33] HOLTMEIER F K. Mountain Timberlines[M]. Norwell, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [34] WALTHER G R, BEIBNER S, POTT R. Climate change and high mountain vegetation shifts[C]// BROLL G, KEPLIN B. Mountain ecosystems studies in treeline ecology. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005: 78-95.
- [35] KULLMAN L. 20th century climate warming and tree-limit rise in the southern scandes of Sweden[J]. Ambio, 2001, 30(2): 72-80.
- [36] BAHN M, KORNER C. Recent increases in summit flora caused by warming in the alps[C]// NAGY L, KORNER C G, THOMPSON D B A. Alpine Biodiversity in Europe. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003: 437-441.
- [37] 周晓峰, 王晓春, 韩士杰, 等. 长白山岳桦-苔原过渡带动态与气候变化[J]. 地学前沿, 2002, 9(1): 227-232.
ZHOU Xiaofeng, WANG Xiaochun, HAN Shijie, et al. The effect of global climate change on the dynamics of Betula ermanii-tundra ecotone in the Changbai mountains[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(1): 227-232.
- [38] 戴君虎, 潘娜, 崔海亭, 等. 五台山高山带植被对气候变化的响应[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 216-223.
DAI Junhu, PAN Yuan, CUI Haiting, et al. Impacts of climate change on alpine vegetation on Wutai mountains[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(2): 216-223.
- [39] BURGMER T, HILLEBRAND H, PFENNIGER M. Effects of climate-driven temperature changes on the diversity of freshwater macroinvertebrate[J]. Oecologia, 2007, 151: 93-103.
- [40] DURANCE I, ORMEROD S J. Climate change effects on upland stream macro invertebrates over a 25-year period[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 942-957.
- [41] DYBAS C L. On a collision course: ocean plankton and climate change[J]. Bioscience, 2006, 56(8): 642-646.
- [42] DANOVARO R, DELLANNO A, PUSCEDDU A. Biodiversity response to climate change in a warm deep sea[J]. Ecology Letters, 2004, 7: 821-828.
- [43] GENNER M J, SIMS D W, WEARMOUTH V J, et al. Regional climatic warming drives long-term community changes of british marine fish[J]. Proceedings of The Royal Society of London Series B-Biological Sciences, 2004, 271: 655-661.
- [44] LESSER M P. Coral reef bleaching and global climate change: Can corals survive the next century?[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2007, 104(3): 5259-5260.
- [45] AERTS R, CORNELISSEN J H C, DORREPAAL E, et al. Effects of experimentally imposed climate scenarios on flowering phenology and flower production of subarctic bog species[J]. Global Change Biology, 2004, 10: 1599-1609.
- [46] LEECH D I, CRICK H Q P. Influence of climate change on the abundance, distribution and phenology of woodland bird species in temperate regions[J]. Ibis, 2007, 149(Suppl.2): 128-145.
- [47] ERASMUS B F N, VANJAARSVELD A, CHOWN S, et al. Vulnerability of south African animal taxa to climate change[J]. Global Change Biology, 2002, 8: 679-693.
- [48] MIDGLEY G F, HANNAH L, MILLAR D, et al. Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot[J]. Global Ecology & Biogeography, 2002, 11: 445-451.
- [49] SHAFER S L, BARTLEIN P J, THOMPSON R S. Potential changes in the distributions of western north America tree and shrub taxa under future climate scenarios[J]. Ecosystems, 2001, 4: 200-215.
- [50] IVERSON L R, PRASAD A M. Potential change in tree species richness and forest community types following climate change[J]. Ecosystem, 2001, 4: 186-199.
- [51] PETERSON A T, ORTEGA-HUERTA M A, BARTLEY J, et al. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios[J]. Nature, 2002, 416: 626-628.
- [52] BAKKENES M, EICKHOUT B, ALKEMADE R. Impacts of different climate stabilisation scenarios on plant species in europe[J]. Global Environmental Change, 2006, 16: 19-28.
- [53] HOLMAN I P, NICHOLLS R J, BERRY P M, et al. A regional, multi-sectoral and integrated assessment of the impacts of climate and socio-economic change in the UK. PART II. Results[J]. Climate Change, 2005, 71: 43-73.
- [54] ELLISA C J, BRIAN J, TERENCE P C, et al. Response of British lichens to climate change scenarios: Trends and uncertainties in the projected impact for contrasting biogeographic groups[J]. Biological Conservation, 2007, 140: 217-235.
- [55] DOLLERY R, HODKINSON I D, JONSDOTTIR I S. Impacts of warming and timing of snow melt on soil microarthropod assemblages associated with dryas-dominated plant communities on svalbard[J]. Ecography, 2006, 29: 111-119.
- [56] BROENNIMANN O, THUILLER W, HUGHES G, et al. Do geographic distribution niche property and life form explain plant's vulnerability to global change?[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 1079-1093.
- [57] CURRIE D J. Projected effects of climate change on patterns of vertebrate and tree species richness in the conterminous united states[J]. Ecosystems, 2001, 4: 216-225.
- [58] EPSTEIN H E, GILL R A, PARUELO J M, et al. The relative abundance of three plant functional types in temperate grassland and shrublands of north and south America: effects of projected climate change[J]. Journal of Biogeography, 2002, 29: 875-888.
- [59] HANSEN A J, NEILSON R P, DALE V H, et al. Global change in forests: response of species, communities, and biomes[J]. Bioscience, 2001, 51(9): 765-779.
- [60] NIEMELA P, III F S C, DANELL K, et al. Herbivory-mediated responses of selected boreal forests to climate change[J]. Climate Change, 2001, 48: 427-440.
- [61] MCKENNEY-EASTERLING M, DEWALLE D R, IVERSON L R, et al. The potential impacts of climate change and variability on forests and forestry in the mid-atlantic region[J]. Climate Research, 2000, 14: 195-206.
- [62] 郝占庆, 代力民, 贺红土, 等. 气候变暖对长白山主要树种的潜在

- 影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 653-658.
- HAO Zhanqing, DAI Limin, HE Hongshi, et al. Potential response of major tree species to climate warming in Changbai Mountain, North-east China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 653-658.
- [63] THUILLER W, LAVOREL S, SYKES M T, et al. Using niche-based modeling to assess the impacts of climate change on tree functional diversity in Europe[J]. Diversity and Distribution, 2006, 12: 49-60.
- [64] WALKER M D, WAHREN C H, et al. Plant community response to experimental warming across the tundra biome[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2006, 103(5): 1342-1346.
- [65] RINNAN R, MICHELSEN A, BÅÅTH E, et al. Fifteen years of climate change manipulations alter soil microbial communities in a subarctic heath ecosystem[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 28-39.
- [66] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004, 427: 145-148.
- [67] RULL V, VEGAS-VILARRUBIA T. Unexpected biodiversity loss under global warming in the neotropical guayana highlands: a preliminary appraisal[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 1-9.
- [68] WILLIAMS S E, BOLITHO E E, FOX S. Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences, 2003, 270: 1887-1892.
- [69] MILES L, GRAINGER A, PHILLIPS O. The impacts of global climate change on tropical forest biodiversity in amazonia[J]. Global Ecology and Biogeography, 2004, 13: 553-565.
- [70] MALCOLM J R, LIU C, NEILSON R P, et al. Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots[J]. Conservation Biology, 2006, 20(2): 538-548.
- [71] CHAKRABORTY S, TIEDEMANN A V, TENG P S. Climate change: potential impact on plant diseases[J]. Environmental Pollution, 2000, 108: 317-326.
- [72] GARRETT K A, DENDY S P, FRANK E E, et al. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems[J]. Annual Review of Phytopathology, 2006, 44: 489-509.
- [73] AWMACK C S, WOODCOCK C M, HARRINGTON R. Climate change may increase vulnerability of aphids to natural enemies[J]. Ecological Entomology, 1997, 22: 266-268.
- [74] WILLIS J C, BOHAN D A, CHOI Y H, et al. Use of an individual-based model to forecast the effect of climate change on the dynamics, abundance and geographical range of the pest slug deroceras reticulatum in the UK[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 1643-1657.
- [75] GAN J. Risk and damage of southern pine beetle outbreaks under global climate change[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 191: 61-71.
- [76] ENQUIST C A F. Predicted Regional impacts of climate change on the geographical distribution and diversity of tropical forests in Costa Rica[J]. Journal of Biogeography, 2002, 29: 519-534.
- [77] URBAN D L, HARMON M E, HALPERN C B. Potential response of pacific northwestern forests to climate change: effects of stand age and initial composition[J]. Climatic Change, 1993, 23: 247-266.
- [78] PENUELAS J, BOADA M A. Global change-induced biome shift in the montseny mountains (Spain)[J]. Global Change Biology, 2003, 9: 131-140.
- [79] EHMAN J E, FAN W H, RANDOLPH J C S J, et al. An integrated GIS and modeling approach for assessing the transient response of forests of the southern great lakes region to a doubled CO₂ climate[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 155: 237-255.
- [80] SCHOLZE M, KNORR W, ARNELL N W, et al. Climate-change risk analysis for world ecosystems[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2006, 103(35): 13116-13120.
- [81] XENOPOULOS M A, LODGE D M, ALCAMO J, et al. Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal[J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1557-1564.
- [82] WELTZIN J, BRIDGHAM S, PASTOR J, et al. Potential effects of warming and drying on peatland plant community composition[J]. Global Change Biology, 2003, 9: 141-151.
- [83] ABERLE A, LENGFELLNER K, SOMMER U. Spring bloom succession, grazing impacts and herbivore selectivity of ciliate communities in response to winter warming[J]. Oecological, 2007, 150: 668-681.
- [84] BROWN L E, HANNAH D W, MILNER A M. Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snow packs[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 958-966.
- [85] WRONA F J, PROWSE T D, REIST J D, et al. Climate change effects on aquatic biota, ecosystem structure and function[J]. Ambio, 2006, 35(7): 359-369.
- [86] HAYS G C, RICHARDSON A J, ROBINSON C. Climate change and marine plankton[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2005, 20(6): 337-344.
- [87] CLARKE A, MURPHY E J, MEREDITH M P, et al. Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic peninsula[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2007, 362: 149-166.
- [88] HAWKES L A, BRODERICK A C, GODFREY M H. Investigation the potential impacts of climate change on a marine turtle population[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 923-932.
- [89] HEDRICK P W. Population biology. The Evolution and Ecology of Populations[M]. Sudbury, Massachusetts, USA: Jones and Bartlett Publishers, 1984.
- [90] SMIT B, WANDEL J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2006, 16: 282-292.
- [91] GALLOPIN G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity[J]. Global Environmental Change, 2006, 16: 293-303.
- [92] ADGER W N, ARNELL N W, TOMPKINS E L. Successful adaptation to climate change across scales[J]. Global Environmental Change, 2005, 15: 77-86.
- [93] BRADSHAW W E, HOLZAPFEL C M. Genetic response to rapid climate change: it's seasonal timing that matters[J]. Molecular Ecology, 2008, 17(1): 157-166.
- [94] GIENAPP P, TEPLITSKY C, ALHO J S, et al. Climate change and evolution: disentangling environmental and genetic responses[J]. Molecular Ecology, 2008, 17(1): 167-178.
- [95] PARMESAN C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2006, 37: 637-669.
- [96] FRANKS S J, SIM S, WEIS A E. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climatic fluctuation[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2007, 104: 1278-1282.
- [97] CLAIR J B S, HOWE G T. Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 1441-1454.
- [98] BARNOSKY A D, KRAATZ B P. The role of climatic change in the evolution of mammals[J]. Bioscience, 2007, 57(6): 523-532.
- [99] ZAKHAROV E V, HELLMANN J J. Genetic differentiation across a latitudinal gradient in two co-occurring butterfly species: revealing population differences in a context of climate change[J]. Molecular Ecology, 2008, 17(1): 189-208.
- [100] REUSCH T B H, WOOD T. Molecular ecology of global change[J]. Molecular Ecology, 2007, 16(19): 3973-3992.
- [101] TRUONG C, PALME A E, FELBER F. Recent invasion of the mountain birch *Betula pubescens* ssp. *tortuosa* above the treeline due to climate change: genetic and ecological study in northern Sweden[J]. Journal of Evolutionary Biology, 2007, 20(1): 369-380.
- [102] REALE D, MCADAM A G, BOUTIN S, et al. Genetic and plastic responses of a northern mammal to climate change[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences, 2003, 270: 591-596.
- [103] GRIFFITH T M, WATSON M A. Stress avoidance in a common annual: reproductive timing is important for local adaptation and geographic distribution[J]. Journal of Evolutionary Biology, 2005, 18: 1601-1612.
- [104] GARANT D, HADFIELD J D, KRUEK L E B, et al. Sheldon stability of genetic variance and covariance for reproductive characters in the face of climate change in a wild bird population[J]. Molecular Ecology, 2008, 17(1): 179-188.
- [105] HUNTLEY B. Limitations on adaptation: Evolutionary response to climatic change?[J]. Heredity, 2007, 98: 247-248.
- [106] THUILLER W, BROENNIMANN O, HUGHES G, et al. Vulnerability of African mammals to anthropogenic climate change under conservative land transformation assumptions[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 424-440.
- [107] BRERETON R, BENNETT S, MANSERGH I. Enhanced greenhouse climate change and its potential effects on selected fauna of south-eastern Australia: a trend analysis[J]. Biological Conservation, 1995, 72: 339-354.
- [108] LEMONE N, BOHNING-GAESE K. Potential impacts of global climate change on species richness of long-distance migrants[J]. Conservation Biology, 2003, 17(2): 577-586.
- [109] MALCOLM J R, MARKHAM A, NEILSON R P, et al. Estimated migration rates under scenarios of global climate change[J]. Journal of Biogeography, 2002, 29: 835-849.
- [110] HITZ S, SMITH J. Estimating global impacts from climate change[J]. Global Environmental Change, 2004, 14: 201-218.
- [111] TELLEZ-VALDES O, DAVILA-ARANDA P. Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the tehucan-cuicatlan

- biosphere reserve, mexico[J]. *Conservation Biology*, 2003, 17(3): 846-853.
- [112] COULSTON J W, RITTERS K H. Preserving biodiversity under current and future climates: a case study[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14: 31-38.
- [113] ARAUJO M B, CABEZA M, THUILLER W, et al. Would climate change drive species out of reserves: an assessment of existing reserve-selection methods[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1618-1626.
- [114] JENNI L, KERY M. Timing of autumn bird migration under climate change: advances in long-distance migrants, delays in short-distance migrants[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 2003, 270: 1467-1471.
- [115] WEBB C T. What is the role of ecology in understanding ecosystem resilience?[J]. *Bioscience*, 2007, 57(6): 470-471.
- [116] KERKHOFF A J, ENQUIST B J. The implications of scaling approaches for understanding resilience and reorganization in ecosystems[J]. *Bioscience*, 2007, 57(6): 489-499.
- [117] ROGERS C E, MCCARTY J P. Climate change and ecosystems of mid-atlantic region[J]. *Climate Research*, 2000, 14: 235-244.
- [118] 延晓东, 赵士洞, 于振良. 中国东北森林生长演替模型及其在全球变化研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 1-8.
- YAN Xiaodong, ZHAO Shidong, YU Zhenliang. Modeling growth and succession of Northeastern China forests and its applications in global change studies[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 1-8.
- [119] LEEMANS R, EICKHOUT B. Another reason for concern: regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change[J]. *Global Environmental Change*, 2004, 14: 219-228.
- [120] REUSCH T B H, EHLERS A, HAMMERLI A, et al. Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2005, 102(8): 2826-2831.
- [121] BENIOFF R, GUILL S, LEE J. *Vulnerability and Adaptation Assessments. An International Handbook*[M]. Norwell, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [122] HANNAH L, MIDGLEY G, ANDELMAN S, et al. Protected area needs in a changing climate[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(3): 131-138.
- [123] HALPIN P N. Global climate change and natural-area protection: management responses and research directions[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 828-843.
- [124] WILLIAMS P, HANNAH L, ANDELMAN S, et al. Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridor for the cape proteaceae[J]. *Conservation Biology*, 2005, 19(4): 1063-1074.
- [125] HANNAH L, MIDGLEY G F, MILLAR D. Climate change-integrated conservation strategies[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2002, 11(6): 485-495.
- [126] HANNAH L, MIDGLEY G F, LOVEJOY T, et al. Conservation of biodiversity in a changing climate[J]. *Conservation Biology*, 2002, 16(1): 264-268.
- [127] HANNAH L, MIDGLEY G F, HUGHES G, et al. The view from the cape: extinction risk, protected areas and climate change[J]. *Bioscience*, 2005, 55: 231-42.
- [128] BARRO G D, HARRISON P A, BERRY P M, et al. Integrating multiple modeling approaches to predict the potential impacts of climate change on species distributions in contrasting regions: comparison and implication for policy[J]. *Environmental Science & Policy*, 2006, 9: 129-147.
- [129] HULME P E. Adapting to climate change: is there scope for ecological management in the face of a global threat?[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 784-794.
- [130] BARDSLEY D K, EDWARDS-JONES G. Invasive species policy and climate change: social perceptions of environmental change in the Mediterranean[J]. *Environmental Science & Policy*, 2007, 10: 230-242.
- [131] BORMANN B T, HAYNES R W, MARTIN J R. Adaptive management of forest ecosystems: did some rubber hit the road[J]. *Bioscience*, 2007, 57(2): 186-171.
- [132] VINEY N R, BRYSON C, BATES S P, et al. Modeling adaptive management strategies for coping with the impacts of climate variability and change on riverine algal blooms[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2453-2465.

The impacts of climate change on the biodiversity: Vulnerability and Adaptation

Wu Jianguo¹, Lv Jiajia¹, Ai Li²

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China;

2. The Science and Technology University of Beijing, Beijing, 100083, China

Abstract: The vulnerability and the adaptation for the impacts of climate change on biodiversity are directly related to conservation biodiversity in future. The concept of vulnerability and adaptation for the effects of climate change on biodiversity were interpreted. The study on the vulnerability and the impacts of climate change on biodiversity, and the adaptation of biodiversity to climate change by natural and artificial adjustments were reviewed. The uncertainty about the studies was also discussed, and the demands of research in future were suggested. The observation and investigation showed that climate change in past years has caused change in their phenology, distribution and abundance of many plants and animals, and cause extinction of some species, and also caused increasing of the frequency and intensity of outbreaks of some pest or disease, and cause expansion range of some exotic species, and cause change in the structure and function of some ecosystems. Climate change in future will still cause change in their phenology, distribution and abundance of many plants or animals, and will also cause habits loss of some species, and make increasing of the frequency and intensity outbreaks of some pests or diseases. Additionally, climate change in future will also make expansion range of some exotic species, and cause change in structure and function of some ecosystems. The adaptations of biodiversity to climate change include natural and artificial adjustments. The natural adjustments to climate change include the evolution response of species to climate change, migration of plants or animals, and the resilience and stabilization of ecosystems; the artificial adaptation to climate change include the conservation genetic diversity of species, in situ or ex situ conservation of species, ecosystem management, restoration of degradation ecosystem, and reducing the climatic disaster following climate change. At present, there are still no enough studies of the vulnerability and adaptation about the impacts of climate change on the biodiversity, and the studies on the natural or artificial adaptation of biodiversity to climate change should be improved in future.

Key words: vulnerability; adaptation; climate change; biodiversity; impact