

# 气候变化对陆地生物多样性影响研究的若干进展

吴建国

(中国环境科学研究院,北京 100012)

[摘要] 气候变化对生物多样性影响的研究日益受到重视。文章总结了有关气候变化对基因多样性、物种多样性和生态系统多样性影响研究的趋势,并对存在的问题进行了讨论。目前,气候变化对生物多样性影响的研究总体上还不深入,研究需要加强。

[关键词] 气候变化;生物多样性;影响

[中图分类号] Q142.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)07-0060-09

## 1 前言

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的环境,另一方面又提供了丰富的资源。生物多样性直接影响着生态系统的稳定性和持续性。

生物在漫长的进化过程中,形成了与气候要素间稳定的关系,为生命发展和进化、人类进化、生存和发展奠定了物质基础。自工业革命以来,由于人类不合理地开采资源和盲目地发展工农业,使地球气候环境发生了巨大变化,这些变化对地球上生物产生极大影响,进而对人类生存环境和发展基础带来不利影响。气候变化主要包括气温升高、降水改变,以及与之相关的气候因素变化。气候变化最直接的表现就是气温的升高和降水的改变。据最近研究,因大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加而产生的温室效应将可能使 1990—2100 年全球表面温度平均增加 1.4~5.8℃<sup>[1]</sup>。气候变化后,生物栖息地环境将改变,许多动植物将迁移,这些迁移将产生新物种组合和物种间相互作用。同时,将使一些物种灭绝、使一些物种繁殖加速。古气候记载清楚表明物种组成和多样性随气候变化而改变。深入了解气候变化对生物多样性的影响,对有效保护生物多样性具有重要的理

论和现实意义。

气候变化对生物多样性的影响,最早是一些直观认识。近代,随着生物学、生态学和有关学科的快速发展,认识逐渐深入广泛。早期气候变化对生态系统影响研究主要集中在温度、降水和积雪厚度变化的影响。自 20 世纪 90 年代以来,随着对气候变化问题的日益关注和生物多样性保护的广泛重视,认识到气候波动对陆地的植被、食草和食肉动物等都将产生极大影响<sup>[2]</sup>。目前,气候变化对生物多样性影响的问题已经成为全球变化研究的热点。笔者试图从气候变化对遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性影响方面的研究进行一些总结,了解气候变化对生物多样性的影响趋势和有关研究发展,为进一步研究提供思路。

## 2 气候变化对生物多样性影响的研究进展

### 2.1 气候变化对遗传多样性的影响

遗传变异是生物具有的普遍现象。遗传多样性涉及染色体多样性、蛋白质多样性和 DNA 多样性。Mcnelly 等<sup>[3]</sup>认为遗传多样性是蕴藏在植物、动物和微生物个体中的基因遗传信息。Solbrig 等<sup>[4]</sup>指出生物全部遗传变异最终来自分子水平,并且与核酸物理化学结构和组成相联系。遗传学界认为遗传多

[收稿日期] 2007-01-12;修回日期 2008-04-13

[基金项目] 国家十五科技攻关重点项目专题“气候变化对西部脆弱自然生态系统影响阈值与脆弱性”(2004BA611B0203)

[作者简介] 吴建国(1971-),男,甘肃张掖市人,博士,中国环境科学研究院副研究员,研究方向为气候变化生态影响及其适应

样性指物种内、种间遗传变异的特征。遗传多样性是一个种、变种、亚种或品种基因变异的总和,是物种基因的多样化,它决定于染色体化学结构的组成和空间排列的多样化。物种进化过程是基因变化过程,包括蛋白质、染色体和基因等的变化<sup>[5]</sup>。

物种在漫长的进化过程中,基因与气候形成了稳定的关系。气候变化必然使遗传物质发生改变,并进而引起遗传多样性变化。物种遗传物质传递与繁殖受精过程密切相关,基因活动也主要与生物繁殖过程相关。气候变化对基因多样性影响包括对繁殖过程、单倍体(如芽变)和多倍体的形成等。

目前,关于气候变化对生物多样性影响的研究并不多,已有报道还只是对个别动物繁殖过程的影响。如气候变化使山地积雪融化提前,使一些两栖类动物繁殖提前,也有研究发现繁殖并没有明显变化<sup>[6,7]</sup>。这些变化对遗传物质传递都产生了一定的影响。一些大型动物,由于种群密度小,活动范围大,基因受气候变化威胁较大,对这些影响目前还并不清楚。另外,气候变化对不同物种(植物、动物和微生物)基因多样性的影响趋势和机制尚不清楚。

## 2.2 气候变化对物种多样性的影响

物种是生态系统基本结构的因素。在生态系统中,物种主要以种群方式存在,形成了不同的功能组(包括生产者、消费者和分解者功能群)。物种多样性指一定空间范围内物种个体的数量、分布形式和类型,以及物种的丰富度和优势度。

气候对物种的影响主要是通过温度和降水的变化而产生影响。温度变化主要通过对物种个体生理活动和性别发育的影响而对物种产生影响,降水则主要通过对物种繁殖过程和生理活动的影响而对物种产生直接影响。对许多物种来说,气候还主要通过对食物和栖息地的影响而对它们产生间接影响。对动物来说,温度升高能影响它们的代谢速率、繁殖、存活、性比、生长速率和激素分泌等。对植物来说,温度升高能使它们呼吸速率增加。物种对气候变化反应将取决于生活史、基因、生理特征和地理范围。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,一些分布区范围广的物种将扩大其气候忍耐范围或萎缩其分布范围或扩展到分布范围边缘,一些分布广的物种有适应气候变化不同生态型,能有效地适应气候变化。具有短周期和快速增长特点的物种也能快速适应气候变化,这

种适应速度至少要比过去快几十倍,如一些微生物、无脊椎动物和早期演替物种等。化石记录显示一些物种能极快地适应过去的气候变化。一般情况下,许多物种适应速度将跟不上气候变化的速度。除了迁移,物种适应能力也包括能建立有效适应地。物种在目前分布范围内或不能忍受气候变化或不能跟随气候变化迁徙将面临灭绝。最脆弱的物种是那些长周期、移动率低、有特异寄生关系、小或孤立及低基因变异物种。气候变化对物种多样性的影响包括物种的物候、丰富度和优势度、入侵等方面的影响<sup>[8]</sup>。

### 2.2.1 物种物候

物种对气候的适应调节能力最直接的表现就是物候。对植物来说,物候是季节明显地区适应于气候条件的节律性变化。植物发芽、现蕾、开花、结实、果实成熟和落叶休眠等生长发育开始和结束时间节律称为物候期。同样,动物和微生物活动也有不同的物候表现。当然,物候除了与气候因素有关外,也受地理纬度、经度和海拔高度的影响。

气候变化后,物种最直接表现之一就是物候的变化。气候变化对动植物物候的影响有大量报道。在英国,1971—1995年,65个物种中78%物种繁殖时间提早9天<sup>[9]</sup>;在美国纽约,从1903年到现在的100多年中,39个物种提前迁徙、35个物种没有变化、2个物种推迟<sup>[10]</sup>;在美国威斯康州,鸟类中8个物种迁徙和鸣叫时间提前,1个物种推迟<sup>[11]</sup>。蝴蝶、作物害虫、两栖类动物受气候变化的影响,繁殖时间提前。鸟类迁徙,对当地气温不敏感,而昆虫卵的发育和成虫的形成却对当地气温的变化十分敏感。

物种代谢活动也受气候变化的影响较大,如动物是对气候变化最敏感的生物,吃食和繁殖行为易受气候变化影响;一些极端天气条件,如冬天风暴和低温都将导致物种食物供应中断而使物种灭亡;温度升高使一些昆虫代谢加快,使一些物种加快进化到每年有不同生命过程节律;冬季温度升高使一些害虫冬季发育时间延长,干旱对植物的胁迫使昆虫繁殖和食性间接改变。

气候变化导致的其他变化对物种活动也产生间接影响,如鸟类是分布区易于改变的物种,鸭子主要依赖海岸湿地进行繁殖、取食和越冬,这些物种都易受气候变化造成的干旱或海平面上升的间接影响。

尽管有关生物生理过程对气候变化的响应已经

有较广泛的认识,但是有关微生物和土壤生物多样性对气候变化的响应尚不清楚。

### 2.2.2 物种优势度和丰富度

物种的优势度和丰富度是反映物种多样性的重要指标。气候变化后,将对一些物种有利而对另一些物种不利,将改变物种的丰富度和优势度。

目前森林组成物种改变和物种优势度与丰富度变化方面研究报道较多。Nilson 等<sup>[12]</sup>研究发现,从 1951—1994 年由于气候变化,爱莎尼亚森林树种已经由落叶为优势种变成了以云杉为优势种组成,并且树木生长加速,这主要由于有效养分增加,但些生长增加是短期的,长期过程中,由于母质淋溶和离子交换强度变低,以及病害、蛀干害虫、风暴和火伤害的加速,将使森林生产力降低;Niemela 等<sup>[13]</sup>研究发现,由于气候变化,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,北部森林阔叶树下一些草本物种丰富度减少,松树下草本优势度增加;Mckenney - Easterling 等<sup>[14]</sup>研究发现,气候变化后,大西洋中部森林中榆树和松树优势度将增加,桦木、山毛榉和桦树优势度下降;Epstein 等<sup>[15]</sup>研究发现,气候变化后美国一些草本和灌木植被中 C<sub>4</sub> 植物数量增加 10%, C<sub>3</sub> 植物数量下降;Lasch 等<sup>[16]</sup>模拟研究发现,短期和中期气候变化对勃兰登堡森林物种组成影响不大,气候变化导致物种多样性降低。物种丰富性通常随着气温和降水变化而改变。研究发现在不同气候情景下,美国适应于寒冷气候森林类型将向北迁移,一些孤立的其他物种将在目前分布区灭绝,北部物种将愈加向北,南部物种将向北迁徙,鸟类和哺乳动物北部的丰富性降低而南部的丰富性提高<sup>[17]</sup>。

气候变化对野生动物的影响包括生活周期、物种分布、种群格局和迁移策略等<sup>[18]</sup>。气候变化后野生动物分布区整体向北移,物候期提前。就繁殖过程和种群大小,有些物种将受益,繁殖率提高,成活率增加,种群密度增加,有些将受限,种群密度缩小甚至灭绝<sup>[19]</sup>。Iverson 和 Prasad<sup>[20]</sup>研究发现,气候变化后,美国物种丰富性将增加,5 种情景下云杉和山毛榉扩展其分布区,这种情景下桦树分布没有变化,榆树分布增加,其余的减少;Currie<sup>[21]</sup>研究发现,气候变化后在美国许多地方的耐热脊椎动物丰富性都将提高,哺乳动物和鸟类在南部丰富性将降低,冷凉山区增加,木本植物丰富性在北部和东部提高,南部沙漠中降低;Hansen 等<sup>[22]</sup>总结发现,气候

变化使美国北部树木丰富度改变,特别是那些目前生活在比较寒冷、干燥和高温地区的物种丰富性将降低,并且也使恒温动物(如哺乳动物和鸟类)数量减少,变温动物(如爬行动物和两栖动物)数量增加。也有研究发现,气候变化后,一些动物物种反应很难确定,如 Bezemer 和 Knight<sup>[23]</sup>发现气候变化对蛇幼体影响结果很不确定。

气候变化对山地生物多样性的影响是关注的热点。Gottfried 等<sup>[24]</sup>研究发现,气候变化对阿尔卑斯山高山植物和喜雪植物有极大影响,温度增加而积雪能继续保持,高山生态位将向温度轴负方向扩展,对喜雪物种栖息地产生压力,生存受限;Halloy<sup>[25]</sup>研究发现,植物群落结构和生长率将受气候变化波动影响较大;Green 和 Pickering<sup>[26]</sup>研究发现气候变化对澳大利亚雪山的哺乳动物和鸟类将产生一定影响;McDonald 等<sup>[27]</sup>研究发现在南非山地物种的多样性对气候变化的反应非常敏感;Purobit<sup>[28]</sup>研究发现气候变化对山地医用植物多样性有极大的影响。

气候变化除了对动物和植物物种的多样性产生影响外,对土壤微生物功能群也产生一定的影响。Zogg 等<sup>[29]</sup>发现把土壤培养在 5 °C 和 25 °C 下, G<sup>-</sup> 和 G<sup>+</sup> 两类细菌丰富性明显不同。

### 2.2.3 物种间关系

物种多样性除表现为物种本身生物学和生态学属性外,还表现为种间关系。在生态系统中,物种间关系主要有互利共生、偏利共生、竞争、非消费性物理掠夺、消费性物理掠夺(寄生、捕食和草食)、抗生关系等。这些不同关系都与气候因素有很密切的关系。

理论推测认为:物种在不同种间关系中,高营养位关系受气候变化影响较大。集中体现在生产者 and 消费者间关系,尤其是植物种群病原微生物及有害昆虫与植物间关系。气候变化而导致栖息地改变将影响种间关系。气候变化后,一些生态系统中动物和植物间相互作用。如动物作为传粉和种子散播媒介,将以同样速率反应、并保持同步性,而有些系统将失去同步性。如气候变化也可能使害虫发生高峰与食物产生高峰不同步。Johns 和 Hughes<sup>[30]</sup>研究发现,CO<sub>2</sub> 浓度增加后,植物组织中的 C:N 比提高,叶中 N 含量减少,使以这些植物为食的昆虫的卵和成虫都显著增加;Fleming 等<sup>[31]</sup>研究发现,气候变化引起加拿大北方森林害虫显著变化,特别对那些发生和爆发必须限定在一定气候要素下的害虫。气候

变化可能影响害虫和其天敌的物候,也可影响一些昆虫生活史。极端气候事件可能导致害虫种群急剧爆发<sup>[32,33]</sup>。

气候变化对陆地和海洋生物疾病有显著影响,通过改变真菌生物过程、寄主活动、疾病传播途径及有机体而影响种间关系。病菌对温度变化较敏感。气候变化对病菌影响的时间,冬天比较关键,通常过长冬天将增加疾病敏感性。气候变化将改变植物病害敏感性,如果气候变化改变了寄主和真菌的地理分布范围,将导致严重疾病的爆发。气候变化还可能影响活跃、中度活跃和不活跃的病菌而影响陆地动物分布,也可能使一些野生动物疾病受到限定<sup>[34]</sup>。Kudo 和 Suzuki<sup>[35]</sup>在日本北部高山的研究发现,加热 5 年实验表明气候变化后对植被结构的影响与高纬度区的研究不同。种间竞争速度加快,竞争力差的物种被其他物种压下去。高生长速率减慢,结构发生变化。

气候变化将影响不同生物之间的相互作用,因为植物、菌根生物、固氮生物和移动速度慢的无脊椎动物有不同的迁移策略。气候变化对生物间相互作用将被生物作用所缓冲<sup>[36]</sup>。气候变化将影响昆虫和真菌的传播与存活,以及生态系统对它的易感性,也将影响草食者与真菌的存活、繁殖、传播、分布、竞争和天敌。一般而言,树木支持着其他生物,失去任何树种将减少生物多样性,昆虫和真菌对树木的危害将增加地下植物生物多样性、鸟类丰富性和多样性及捕食者、寄生和腐生者的多样性<sup>[37]</sup>。气候变化将通过改变温度、干湿和冷冻区、降水、陆地侵蚀及海洋环境等影响陆地表面生物的丰富性、组成和分布,这些影响又通过改变输入到地下食物网中有机物数量和时间而影响地下的生物多样性<sup>[38]</sup>。

#### 2.2.4 物种迁徙

物种迁徙是物种多样性改变的重要过程。植物迁徙成功的前提条件是必须成功散播繁殖体、成功繁殖和发育。物种繁殖体迁徙取决于迁徙类型。古生态学研究表明物种早期迁徙属快速迁徙。根据分析可知目前气候变化下树木迁徙速度可能要比全新世快,物种向北迁移速度可能达每百年 500 km。现代森林群落对气候变化有很大响应范围,其差异主要由植物生活史、种子产生和传播率、基因多样性、形态多变性、竞争和干扰复杂性决定。历史记载表明,有些树种迁移速度快,一些生活史周期短的物种适应较快,一些生活周期长的树种则有较大的限制。

在全新世,南方榆树的丰富度与冬季均温密切相关,树木每百年迁移速度 10~40 km,云杉最大速度 200 km。在 6 000 年前,气温降低后,云杉物种丰富度提高,向南移动。

物种因气候变化而迁徙的现象已被观察到,如鸟<sup>[39]</sup>、哺乳动物<sup>[40]</sup>和蝴蝶<sup>[41]</sup>都有北移趋势。据估计,在过去物种迁移的速率每百年为 4~200 km。据预测,下世纪中纬度温度将增加 1~3.5℃,100 年内将使目前物种分布向极地迁移 150~550 km。Duckworth 等<sup>[42]</sup>研究发现,温度增加 2℃,大西洋欧洲草地植被移动不到 100 km;Malcolm 等<sup>[43]</sup>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要高,而大的水体和人类活动对迁移有较大影响;Lemoine 和 Böhning - Gaese<sup>[44]</sup>应用回归模型分析发现,冬天温度升高使欧洲 lake constance 区长距离迁徙鸟数量下降、使短距离迁徙和不迁徙鸟类数量增加,气候变暖对长距离迁徙鸟类的威胁比其他鸟类要大;Télez - Valdés 和 Dávila - Aranda<sup>[45]</sup>研究发现,在不同气候变化情景下(包括温度升高 1℃降水减少 10%,温度升高 2℃降水减少 10%和温度升高 2℃降水减少 15% 3 种情景),墨西哥中部自然保护区中,气候变化后栖息地条件限制物种超出保护区或使物种灭绝,新的适宜范围在保护区边界内或外围。Shafer 等<sup>[46]</sup>研究发现,美国北部树木和灌木对气候变化较敏感,许多树木和灌木分布范围变化很大,向不同方向迁移的物种都有,一些物种分布范围将更加破碎化,一些物种分布范围将扩大;Crozier<sup>[47]</sup>研究发现,气候变化导致冬天温度升高,将使蝴蝶适应范围增加;Erasmus 等<sup>[48]</sup>研究发现,南非动物在温度升高 2℃后,17%的物种范围扩展,78%的物种范围缩小,3%没有变化,2%灭绝,物种主要向东部湿润区移动,在西部适应区散失严重;Lexer 等<sup>[49]</sup>研究发现,气候变化后,澳大利亚高海拔区适合树木生长范围增加,低海拔区适合范围缩小;Dyer<sup>[50]</sup>模拟研究发现,气候变化后,森林中以风为媒介迁移的物种每年迁移 81 m,而鸟类每年迁移 136 m,以风为媒介的物种迁徙速率对栖息地隔离和破碎化特别敏感,并且许多物种将来不及迁移。

#### 2.2.5 物种入侵

生物入侵是物种多样性变化的重要过程。气候变化通过对入侵物种原地、入侵路径和最终归宿而影响物种入侵,对外来物种影响包括对其繁殖、入侵

方向和传播、种群动态和地理分布的影响。气候变化将影响入侵种与寄主植物相互作用、捕食者及物种间的关系<sup>[51]</sup>。气候变化对那些受人类活动或其他因素破坏的栖息地物种建立有极大影响。CO<sub>2</sub> 浓度增加也将使植物和动物的生长加速,干扰因素破坏森林冠层也将增加外来物种入侵机会<sup>[52]</sup>。如研究发现,山区气候变化将使哥斯达黎加云杉林中一些物种散失,一些低海拔物种入侵<sup>[53]</sup>。气候变化将影响入侵物种分布和发育速率<sup>[37]</sup>。

### 2.2.6 物种灭绝

物种灭绝指物种最后个体死亡或留下后代无力繁殖后代。尽管物种灭绝是针对在地球上物种消失,但更多指在一个地方的消失。物种灭绝是自然过程。物种栖息地面积散失将导致物种灭绝。有两类因素可能加速灭绝,一种是确定性事件,如人类活动、物种入侵和气候变化等,这些过程可能影响物种种群,减小其分布范围;另一类是随机事件,如地震、火灾和干旱等,这些事件对广泛分布的物种没有影响,但对那些分布比较狭小,没有能力适应这些威胁的种群却影响较大。气候变化导致了对物种直接影响和间接影响,直接影响主要是致死温度,延迟影响几代;间接影响包括食物、饮水、栖息地、环境消失和种间关系平衡以及共生关系和级联作用(主要指通过食物链关系)。在美国西南部,降水格局改变使干旱草原向荒漠灌木变化,使一些丰富度高的动物物种灭绝<sup>[54]</sup>。Brereton 等<sup>[55]</sup>应用 BIOCLIM 模型模拟在 1~3℃ 不同气候情景下 42 个动物物种变化的趋势,包括地理狭小物种、基因改良物种、栖息地狭窄物种、不易扩散种、隔离种、山地和高山物种,在升高 3℃ 时,42 个物种中 24 个将散失其 90%~100% 分布范围,这 24 个物种包括特定栖息地物种、高山栖息地物种、海岸栖息地物种和限定栖息地物种等。Hansen 等<sup>[22]</sup>总结发现,气候变化后濒危物种中爬行类和两栖类的丰富性将增加,鸟类和哺乳动物将减少。Thomas 等<sup>[39]</sup>研究发现,过去 30 年气候变化已经使大量物种的丰富性和分布区发生改变,中等气候变化情景下,墨西哥至澳大利亚广大区域 2050 年 15%~37% 的物种将灭绝,最小升温情景(0.8~1.7℃)将使 18% 的物种灭绝,中等升温情景(1.8~2.0℃)将使 24% 物种灭绝,最高升温情景(大于 2.0℃)将使 35% 物种灭绝。气候变化将导致一些物种因没有适宜的栖息地而灭绝<sup>[56]</sup>。

## 2.3 气候变化对生态系统多样性的影响

陆地生态系统多样性包括结构分布、物种组成、

种间关系、空间分布、垂直结构、年龄结构及生产者和消费者比例等。生态系统多样性、物种多样性与环境异质性有密切关系。物种多样性主要与物种分布、组成及物种间的关系有关,而环境异质性主要与自然地形、地貌和气候等有关。气候变化影响物种的分布、组成和物种间关系,导致生态系统多样性的变化。

### 2.3.1 生态系统的地带性移动

由于气候要素和其他环境因子的地带性差异,使生物分布和生态系统具有明显地带性差异。在生态系统中,由于不同物种对气候变化的反应不同,使生态系统组成将有较大变化。

气候变化对生态系统地带性影响是气候变化对生物多样性影响研究的重要内容。植被和气候关系较密切。森林在其地带性植被交接处,称之为树木线或林线。林线包括高海拔、低海拔和极地类型。气候变化影响森林地带性,使一些森林类型将消失,一些新类型将形成。对气候变化反应最强烈的区域在高纬度,最不明显的区域在热带,不过热带牧草地种类和生产力将有较大变化<sup>[57]</sup>。Malcolm 等<sup>[43]</sup>以 BIOMES 和 MAPSS 模拟气候变化对生态系统移动影响,发现北方和温带生物区移动速率比热带生物区移动快。Enquist<sup>[57]</sup>研究发现,在哥斯达黎加热带雨林高海拔生态系统对温度比较敏感,而低海拔生态系统对降水变化较敏感,区域生态系统多样性在极端湿和热气候情景下显著减少;Mckenzie 等<sup>[58]</sup>研究发现,气候变量和生物物理(水文、土壤和太阳辐射)控制美国华盛顿山地森林针叶树种的分布;Urban 等<sup>[59]</sup>应用 GAP 模型模拟研究发现,太平洋东北部森林带将移动 500~1 000 m,导致高纬度森林消失;Kullman<sup>[60]</sup>研究发现,20 世纪温度升高 0.8℃ 使瑞士南部的 Scandes 树木线提高了 100 m。Peñuelas 和 Boada<sup>[61]</sup>研究发现,气候变化后寒温性生态系统被地中海型生态系统取代,桦木林海拔上升 70 m,高海拔桦木林和石楠生态系统被中部海拔榆树林代替。

### 2.3.2 生态系统组成

气候是决定物种地理分布重要因子<sup>[62]</sup>,气候变化是影响群落结构的主要外在因素。气候变化与 CO<sub>2</sub> 浓度增加是导致冻原<sup>[63]</sup>、温带<sup>[64]</sup>和热带<sup>[65]</sup>植物群落变化的根本原因。

目前,对气候变化对生态系统组成的影响研究较多,大多是用生物地理学模型进行模拟研究。Eh-

man 等<sup>[66]</sup>利用 GAP 模型和 GIS 方法研究发现,气候变化使北美五大湖南部森林中北方针叶和阔叶树的基面积下降,中部和南方树种轻微增加,四个种群组主要向东南部移动。Arnell 等<sup>[67]</sup>研究发现,气候变化使北纬 30°生物区面积增加,一些热带植物死亡,尤其热带 C<sub>4</sub> 草本将消失,热带森林面积减少,北方和温带森林面积将增加;延晓冬等<sup>[68]</sup>以 GAP 模型模拟发现,未来 100 年气候变化过程中,东北森林有一个快速衰退过程,一些针叶树种将被落叶阔叶树种取代;Gao 等<sup>[69]</sup>应用区域植被动态模型模拟后发现,CO<sub>2</sub> 浓度增加和气候变化后,草地、灌木和针叶林对变化的敏感性比常绿阔叶林强;Rogers 等<sup>[70]</sup>研究发现,气候变化将对地中海地区生态系统产生一定影响。Van Der Meer 等<sup>[71]</sup>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,将加速早期种被晚期种所替代;Weltzin 等<sup>[72]</sup>研究发现,在美国南部明拿斯达州经过加热实验发现土壤温度增加和水面降低后,湖中灌木种类增加 50%,这些灌木也存在种间的差异,有些增加,有些减少,FEN 植被组成变化主要由水量决定,存在物种和生活史差异,相反水面升高后灌木种类增加。

气候变化还可能引起一些湿地生态系统、红树林生态系统、海岛生态系统及沿海生态系统散失。另外,海岸生态系统将受到海平面上升、海水温度增加、风暴频率和强度增加的影响。气候变化将对那些边缘高山区的物种有极大影响,在干旱和半干旱区将对降水增加较敏感,极地受低温限制物种将扩展其范围。

### 3 结语

综上所述可以看出,气候变化对生物多样性的影响研究已经取得了很大的成就。但是还有一些问题值得在今后的研究中关注,这些问题体现在以下几方面。

1) 气候变化对不同层次生物多样性(基因、物种、生态系统)影响研究程度不同,误差还较大。生物多样性是不同时空尺度下生物与环境形成的系统差异,这些差异与物种生物学和生态学属性密切相关。目前研究中,关于气候变化对物种多样性和生态系统多样性影响方面研究较多,对气候变化对其他层次多样性(如基因多样性)方面研究不够,确定基因多样性与气候变化关系还存在很大的不确定性。物种入侵和灭绝是生物多样性变化的重要过

程,目前确定的物种入侵和灭绝与气候变化的关系还存在很大不确定性。对气候变化引起物种灭绝的机制还很不清楚。

2) 研究气候变化对生物多样性的影响,目前缺少不同层次生物多样性的综合考虑。生物多样性包括不同层次(基因、物种、生态系统多样性),这些不同层次对气候变化可能有不同的反应,而且不同层次间也相互影响,气候变化影响一种层次生物多样性时也必然影响另外层次生物多样性。目前研究中对气候变化对单个层次的多样性影响研究较多,而很少考虑对其他层次以及不同层次生物多样性之间影响的研究,研究结果的误差较大。

3) 目前还缺少度量生物多样性变化完善指标体系与方法,气候变化对生物多样性影响的研究还没有比较完善的指标体系和评价方法。由于生物多样性比较复杂,度量生物多样性还缺少充分依据。

4) 气候变化对栖息地散失和破坏影响的研究还不够。生物多样性散失与生物栖息地环境有很大关系,栖息地环境改变是引起生物多样性变化的重要原因。由于生物多样性的复杂性,一般研究主要从斑块、景观和全球尺度开展研究。对一些生物如微生物和土壤生物多样性来说,其栖息环境变化对生物多样性的影响更大,目前对这些方面的研究还很少。在景观和生物圈尺度,主要研究生态系统类型和分布的变化。如对植物迁徙、空间格局和空间异质性、杂草的迁徙、害虫爆发及火灾发生、种群大小和种群间相互关系。这些研究中,过多考虑了生物的变化,而对环境的考虑极不够。

5) 目前研究没有充分考虑气候变化对生物多样性的间接影响。气候变化除了对生物多样性产生直接的影响外,还产生间接的影响。目前对这些间接的影响研究还较少,对这些间接影响的机制也很不清楚。

6) 缺乏气候变化引发的极端事件对生物多样性影响的研究。气候变化一方面通过气候的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。目前的研究还主要是针对前者,而对后者的研究还极少。

7) 在研究方法上,物种对气候反应模型包括相关统计模型、机理生物地理学和生物地球化学模型。气候变化对生物多样性影响的研究中,目前主要应用三种方法研究气候变化对生物多样性的影响,包括生物地理学模型,统计模型模拟树种个体的反应,

能量理论研究树木、哺乳动物、鸟、爬行动物和两栖类动物丰富度与栖息。模拟研究气候变化对物种分布的影响与模型有很大关系<sup>[73,74]</sup>。模拟模型的选择成为影响研究结果的重要因素。物种多样性指标比较复杂,如何与气候之间建立机理还存在问题。

8)在研究气候变化对地带性影响是假设植被和气候是稳定的,且是一个整体,分析现在气候下和改变气候下生物区,分析过去、现代入侵和将来植被结构、植物功能类型与分布变化都是基于假设的基础之上。事实上,物种之间对气候变化有不同的反应,地带性移动也并不是以整体形式移动,所以这样的假设还存在很大问题。

以后研究中,需要在评价指标和分析方法系统研究的基础上,加强在气候变化对不同层次生物多样性影响、栖息地破坏和散失方面直接和间接影响的研究,同时加强对气候变化影响时间滞后性、极端气候事件影响,以及与其他因素协同作用问题的研究。

#### 参考文献

[1] Houghton J T, Ding Y, Griggs G J, et al. Intergovernmental Panel of Climate Change IPCC, 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group One To The Third Assessment Report of The Intergovernmental Panel of Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

[2] Stenseth N C, Mysterud A, Ottersen G, et al. Ecological effects of climate fluctuations[J]. Science, 2002, 297(23): 1292 - 1296

[3] Mcnelly J A, Miller K R, Reid W V, et al. Conserving the World Biological Diversity [M]. The World Bank, 1990

[4] Solbrig O T. From Genes to Ecosystems; A Research Agenda for Biodiversity [M]. Cambridge, Mass, 1991

[5] 陈灵芝, 马克平. 生物多样性科学原理与实践 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001, 93 - 125

[6] Corn P S. Amphibian breeding and climate change: importance of snow in the mountains [J]. Conservation Biology, 2003, 17(2): 622 - 625

[7] Blaustein A R, Root T L, Kiesecker J M, et al. Amphibian breeding and climate change: reply to corn [J]. Conservation Biology, 2003, 17(2): 626 - 627

[8] Mccarty J P. Ecological consequences of recent climate change [J]. Conservation Biology, 2001, 15: 320 - 331

[9] Crick H Q P, Dudley C, Glue D E, et al. UK birds are laying egg earlier [J]. Nature, 1997, 388: 526

[10] Oglesby R T, Smith C R. Climate changes in the northeast [A]. Laroe E T, Farris G S, Puckett C E, et al eds. Our living resources: a report to the nation on the distribution abundance and health of U S. plants animals, and ecosystem [R]. U. S. department of the interior, national biological service, Washington, D C,

1995, 390 - 391

[11] Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al. Phenological change reflect climate change in Wisconsin [J]. Preceeding of National Academy Of Science U. S. A, 1999, 96: 9701 - 9704

[12] Nilson A, Kiviste A, Korjus H, et al. Impact of recent forestry and adaptation tools [J]. Climate Research, 1999, 12: 205 - 214

[13] Niemela P, Chapin III F S, Danell K, et al. Herbivory - mediated responses of selected boreal forests to climate change [J]. Climate Change, 2001, 48: 427 - 440

[14] 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

[15] 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

[16] Lasch P, Lindner M, Erhard M, et al. Regional impacts assessment on forest structure and functions under climate change - the brandenburg case study [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 162: 73 - 86

[17] Mcunlty S G, Aber J D. US national climate change assessment on forest ecosystem: an introduction [J]. Bioscience, 2001, 51(9): 720 - 722

[18] Ni Jian. Global change and wild species: observations and predictions [J]. 生物多样性, 1999, 7(2): 132 - 139

[19] 彭少麟, 李勤奋, 任海. 全球变化对野生动物的影响 [J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1153 - 1159

[20] 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

[21] 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

[22] 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

[23] Bezemer T M, Knight K J. Unpredictable response of garden snail (helix aspersa) populations to climate change [J]. Acta Oecologica, 2001, 22: 201 - 208

[24] Gottfried M, Pauli H, Reiter K, et al. Potential effects of climate change on alpine and nival plants in the alps [A]. in Körner C, Sphn E. Mountain Biodiversity: A Global Assessment [C]. Boca Raton: The Parthenon Publishing Group, 2002: 213 - 223

[25] Halloy S R P. Variation in community structure and growth rates of high - andean plants with climatic fluctuations [A]. in Körner C, Sphn E. Mountain Biodiversity: A Global Assessment [C]. Boca Raton: The Parthenon Publishing Group, 2002: 225 - 237

[26] Green K, Pickering M. A scenario for mammal and bird diversity in the snowy mountains of Australia in relation to climate change [A]. Körner C, Sphn E. Mountain Biodiversity: A Global Assessment [C]. Boca Raton: The Parthenon Publishing Group,

- [27] McDonald D J, Midgley G F, Powrie L. Scenarios of plant diversity in south African mountain ranges in relation to climate change [A]. in Körner C, Spohn E. Mountain Biodiversity: A Global Assessment [C]. Boca Raton : The Parthenon Publishing Group, 2002;261 – 266
- [28] Purohit A N. Biodiversity in mountain medicinal plants and possible impacts of climate change [A]. Körner C, Spohn E. Mountain Biodiversity: A Global Assessment [C]. Boca Raton : The Parthenon Publishing Group, 2002;267 – 273
- [29] Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61:475 – 481
- [30] Johns C V, Hughes L. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on the leaf – miner *Dialexia scalarisella zelleri* (Lepidoptera: Gracillariidae) in Paterson's curse, *Echium plantagineum* (Boraginaceae) [J]. Global Change Biology, 2002, 8:142 – 152
- [31] Fleming R A, Tatchell G M. Shifts in flight period of British aphids: a response to climate warming [A]. In Harrington R, Stork N E. Insects in A Changing Environment [C]. New York: Academic Press, 1995, 505 – 508
- [32] Jaenike J. Time – delayed effects of climate variation on host – parasite dynamics [J]. Ecology, 2002, 83(4):917 – 924
- [33] Stacey D A, Fellowes M E. Influence of elevated CO<sub>2</sub> on interspecific interactions at high trophic levels [J]. Global Change Biology, 2002, 8:668 – 678
- [34] Harvell C D, Mitchell C E, Ward J R, et al. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota [J]. Science, 2002, 296(21):2158 – 2162
- [35] Kudo G, Suzuki S. Warming effects on growth, production and vegetation structure of alpine shrub: a five – year experiment in northern Japan [J]. Oecologia, 2003, 135:280 – 287
- [36] Wolters V, Silver W H, Bignell D E, et al. Effects of global changes on above and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: implications for ecosystem functioning [J]. Bioscience, 2000, 50(12):1089 – 1098
- [37] Dale V H, Joyce L A, McNulty S, et al. Climate change and forest disturbances [J]. Bioscience, 2001, 51(9):723 – 734
- [38] Adams G A, Wall D H. Biodiversity above and below the surface of soils and sediments: linkages and implications for global change [J]. Bioscience, 2000, 50(12):1043 – 1048
- [39] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change [J]. Nature, 2004, 427:145 – 148
- [40] Hersteinsson P, Macdonald D W. Interspecific competition and the geographical distribution of red and arctic foxes *Vulpes vulpes* and *Alopex lagopus* [J]. Oikos, 1992, 64:505 – 515
- [41] 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
- [42] Duckworth J C, Bunce R G H, Malloch A J C. Modelling the potential effects of climate change on calcareous grasslands in Atlantic Europe [J]. Journal of Biogeography, 2000, 27:347 – 358
- [43] 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
- [44] Lemone N, Böhring – Gaese K. Potential impacts of global climate change on species richness of long – distance migrants [J]. Conservation Biology, 2003, 17(2):577 – 586
- [45] Téllez – Valdés O, Dávila – Aranda P. Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacán – Cuicatlán biosphere reserve, México [J]. Conservation Biology, 2003, 17(3):846 – 853
- [46] 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
- [47] Crozier L. Winter warming facilitates range expansion; cold tolerance of butterfly *Atalopedes campestris* [J]. Oecologia, 2003, 135:648 – 656
- [48] 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
- [49] Lexer M J, Honninger K, Scheffinger H, et al. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large – scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 162:53 – 72
- [50] Dyer J M. Assessment of climatic warming using a model of forest species migration [J]. Ecological Modeling, 1995, 79:199 – 219
- [51] Sutherst R W. Climate change and invasive species: a conceptual framework [A]. in Mooney H A, Hobbs R J. Invasive Species in A Changing World [C]. Washington D C: Island Press, 2000: 211 – 240
- [52] Dukes J S. Will the increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration affect the success of invasive species [A]. in Mooney H A, Hobbs R J. Invasive Species in A Changing World [C]. Washington, D C: Island Press, 2000:95 – 113
- [53] Pounds J A, Fogden M P L, Savage J M, et al. Biological responses to climate change on a tropical mountain [J]. Nature, 1999, 398:611 – 615
- [54] 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
- [55] 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
- [56] Pounds J A, Puschendorf R. Ecology, Clouded futures [J]. Nature, 2004, 427, 107 – 109
- [57] 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
- [58] McKenzie D, Peterson D W, Peterson D L, et al. Climatic and biophysical controls on conifer species distributions in mountain forests of Washington, USA [J]. Journal of Biogeography, 2003,

- [59] 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
- [60] Kullman L. 20<sup>th</sup> century climate warming and tree – limit rise in the southern scandes of Sweden[ J ]. Ambio, 2001, 30 ( 2 ): 72 – 80
- [61] Peñuelas J, Boada M A. Global change – induced biome shift in the montseny mountains ( spain ) [ J ]. Global Change Biology, 2003, 9: 131 – 140
- [62] Venier L A, Mckenney D W, Wang Y, et al. Models of large – scale breeding – bird distribution as a function of macro – climate in Ontario[ J ]. Canada Journal of Biogeography, 1999, 26: 315 – 328
- [63] Chapin F S III, Shaver G R, Goblin A E, et al. Response of arctic tundra to experimental and observed change in climate[ J ]. Ecology, 1995, 76: 694 – 711
- [64] Alward R D, Detling J K, Milchunas D G. Grassland vegetation change and nocturnal global warming[ J ]. Science, 1999, 283: 229 – 231
- [65] Phillips O L. Long – term environmental change in tropical forests: increasing tree turnover[ J ]. Environmental Conservation, 1996, 23: 235 – 248
- [66] Ehman J E, Fan W H, Randolph J C, et al. An integrated GIS and modeling approach for assessing the transient response of forests of the southern great lakes region to a doubled CO<sub>2</sub> climate [ J ]. Forest Ecology and Management, 2002, 155: 237 – 255
- [67] Arnell N W, Cannel M G R, Hulme M, et al. The consequences of CO<sub>2</sub> stabilisation for the impacts of climate change[ J ]. Climatic Change, 2002, 53: 413 – 446
- [68] 延晓冬, 符淙斌, Shugart H H. 气候变化对小兴安岭森林影响的模拟研究[ J ]. 植物生态学报, 2000, 24( 3 ): 312 – 319
- [69] Gao Q, Yu M, Yang X. An analysis of sensitivity of terrestrial ecosystems in china to climate change using spatial simulation[ J ]. Climate Change, 2000, 47: 373 – 400
- [70] Rogers C E, Mccarty J P. Climate change and ecosystems of mid – atlantic region[ J ]. Climate Research, 2000, 14: 235 – 244
- [71] Van Der Meer P J, Jorritsma I T M, Kramer K. Assessing climate change effects on long – term forest development: adjusting growth, phenology, and seed production in a gap model[ J ]. Forest Ecology And Management, 2002, 162: 39 – 52
- [72] 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
- [73] Thuiller W. Biomod – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change [ J ]. Global Change Biology, 2003, 9: 1353 – 1362
- [74] Pearson R G, Dawson T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful[ J ]. Global Ecology & Biogeography, 2003, 12: 361 – 371

## The Advances of the study on effects of climate change on the terrestrial biodiversity

Wu Jianguo

( *The Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China* )

[ **Abstract** ] The impacts of climate change on the biodiversity are become a crucial issue of conversation biodiversity. The general trends of the study impacts of climate change on the diversity of gene, population, and ecosystem diversity were reviewed and future research also been suggested in this paper. The studies about the effects of climate change on biodiversity should be further improved.

[ **Key words** ] climate change; biodiversity; effects