

# 蝴蝶对全球气候变化响应的研究综述

赵彩云, 李俊生\*, 罗建武, 肖能文, 罗遵兰

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 全球气候变化以及生物对其响应已引起人们的广泛关注。在众多生物中, 蝴蝶被公认为是对全球气候变化最敏感的指示物种之一。已有大量的研究结果表明, 蝴蝶类群已经在地理分布范围、生活史特性以及生物多样性变化等方面对全球气候变化作出了响应。根据全球范围内蝴蝶类群对气候变化响应的研究资料, 尤其是欧美一些长期监测的研究成果, 综述了蝴蝶类群在物种分布格局、物候、繁殖、形态特征变化、种群动态以及物种多样性变化等方面对气候变化的响应特征, 认为温度升高和极端天气是导致蝴蝶物种分布格局和种群动态变化的主要因素。在此基础上, 展望了我国开展蝴蝶类群对气候变化响应方面研究的未来发展趋势。

**关键词:** 全球气候变化; 蝴蝶类群; 生态响应; 物种多样性

## A review on responses of butterflies to global climate change

ZHAO Caiyun, LI Junsheng\*, LUO Jianwu, XIAO Nengwen, LUO Zunlan

Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China

**Abstract:** Global climate change and its impact on organisms have been received extensive attention. Butterflies are one of the most susceptible species to global climate change. There is accumulating evidence suggesting that butterflies have already responded to global climate change by changes in their natural distribution, life cycle and diversity. Based on the references focused on long term investigation, we have reviewed the study progress in butterfly distribution patterns, phenology, morphology, population dynamics and species biodiversity in response to global climate change. Temperature rising and extreme weather are likely main factors which lead to changes in patterns of butterfly natural distribution and population dynamics. Finally, future research prospects on responses of butterflies to global climate change in China have been discussed.

**Key Words:** global climate change; butterflies; ecological responses; species biodiversity

过去一个多世纪全球气候发生了明显的变化<sup>[1]</sup>。尽管目前关于气候变化的预测还存在很多的不确定性, 但未来由于温室效应的存在以及全球气候正在变暖的可能性和趋势已为大多数人所接受<sup>[2-3]</sup>。气候变化产生了一系列后果, 如冰川消退、海平面上升、荒漠化等, 并已经或正在对全球生态系统和生物多样性产生着显著的影响<sup>[4]</sup>, 如生境退化或丧失<sup>[5]</sup>、种群动态及种间关系发生改变<sup>[6-7]</sup>、物种灭绝速度加快<sup>[5,8]</sup>等。准确地评价和科学地预测气候变化对陆地生态系统和生物多样性的影响已经引起了科学家、各国政府与社会各界的极大关注。研究生物与气候之间的相互关系、探索生物对气候变化的响应与适应对策, 对了解不同生物演化、预测生物多样性在未来气候变化条件下的变化特征具有重要意义。因此, 探索不同物种对全球变化的适应与响应也是当今科学界所面临的重大问题之一。

在生物与气候变化之间关系的研究中, 科学家往往选取对气候变化敏感的生物, 从个体、种群以及生态系

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研专项重大资助项目(2007KYYW04); 国家环保公益性行业科研专项经费资助项目(200709018); 国家重大专项资助项目(2008ZX08011-002, 2009ZX08011-013B)

收稿日期: 2009-08-18; 修订日期: 2009-10-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijsh@caes.org.cn

统水平上研究其对气候变化的响应<sup>[9]</sup>,包括物种地理分布范围发生变化<sup>[6,10-12]</sup>、物候期的提前<sup>[13-15]</sup>、行为发生改变<sup>[7]</sup>、种群动态发生变化<sup>[5]</sup>等。由于蝴蝶类物种对温度变化敏感并且能够迅速做出响应,受到了大多数科学家的广泛关注<sup>[16-17]</sup>,并开展了大量有关气候变化影响下蝴蝶物种分布格局的变化、变化速率和变化机制,蝴蝶形态对气候变化的响应以及蝴蝶物种多样性变化等方面的研究<sup>[5,16,18-19]</sup>。本文通过综述国内外蝴蝶对全球气候变化响应的研究进展,进一步探讨了我国在这一领域急需开展的研究工作,为我国深入开展全球气候变化背景下的生物多样性保护工作提供一定的参考。

## 1 蝴蝶类群生物学特征对气候变化的响应

蝴蝶是鳞翅目 Lepidoptera 锤角亚目 Rhopalocera 昆虫的俗称。由于其种类多、分布广,是大多数植物传粉的媒介昆虫,因此,蝴蝶类昆虫在全球生态系统中占有重要的地位。蝴蝶类昆虫属于变温动物,温度可以影响蝴蝶行为,比如:外界温度通过调节蝴蝶飞行期身体的温度影响其飞行能力<sup>[20-23]</sup>,从而影响其分配在飞行、繁殖、休息、取食的时间<sup>[24]</sup>,进一步影响其潜在的扩散能力、产卵能力、寿命长短和被捕获的机率<sup>[25]</sup>;温度也可以直接影响蝴蝶的繁殖能力和生活周期,比如冬季和春季温度的升高可以缩短蝴蝶幼虫和蛹的成熟时间,导致其成虫提前羽化<sup>[26]</sup>。总之,全球气候变化尤其是全球变暖将直接导致蝴蝶类群的物候期、与寄主植物协同关系以及飞行行为的变化甚至引起成虫形态特征的变化。

### 1.1 蝴蝶类群物候期提前

蝴蝶对气候变暖的响应包括幼虫期变短,成虫期变长,最显著的表现就是首现日提前<sup>[26]</sup>。英国的记录表明几乎所有的蝴蝶种类随着全球气候变暖羽化时间提前,相应的首现日提早,而且飞行时间延长<sup>[27-28]</sup>。进一步研究发现,蝴蝶首现日与春季平均温度升高密切相关,Roy 等人<sup>[13]</sup>研究了英国的 35 种蝴蝶在 1976—1998 年期间的物候变化,结果表明其中 26 种蝶类物候变化明显,首现日平均提前 7.89d/10a,首飞日提前 6.6d/10a,飞翔时间平均延长 7.59d/10a,这些参数的变化与研究期间英国春季温度升高存在明显的相关性。其他研究结果也证实在全球变暖背景下蝴蝶种类物候期的提前,如在西班牙东北部,所有观察到蝴蝶种类,羽化时间在过去的 1952—2001 年期间平均提早了约 11d<sup>[29]</sup>。在此基础上,Stefanescu 等<sup>[14]</sup>研究了该地区蝴蝶的物候资料,发现伴随 1988—2002 年期间该地区 2、3、4 月份的平均气温升高(平均升高 1—1.5℃),17 种蝴蝶物种首现日显著提前,8 种蝴蝶物种飞行时间显著延长,分析得出与 Roy<sup>[13]</sup>相同的结论,认为春季温度升高与物候期提前密切相关。另外,气候变化引起的局部地区冬季变得温暖干旱也是导致蝴蝶首现日提前的原因,在加利福尼亚中部的研究就表明,在过去 31a 内,该地区的 16 种蝴蝶首飞日平均提前的 24d,与此同时该地区冬季变得温暖干旱<sup>[15]</sup>。

蝴蝶是授粉昆虫,成虫的食物资源与寄主植物的花期密切相关,由于气候变化对昆虫和植物物候的影响不同<sup>[30]</sup>,有些蝴蝶能够准确跟踪寄主植物的物候变化,从而获取充足的花粉食物资源,如英国的橙尖粉蝶 *Anthocharis cardamines* 在寄主植物花芽形成提前 2 到 3 周时,其首现日仍然能与寄主植物花芽形成同步<sup>[27]</sup>;但大多数蝴蝶物种与寄主植物之间的物候同步性关系会有差异,如英国的迁徙蝴蝶——红纹丽蛱蝶 *Vanessa atalanta* 在过去的 20a,其返回英国的时间明显提前,然而它的寄主植物之一大荨麻 *Urtica dioica* 的花期没有变化<sup>[31]</sup>,导致红纹丽蛱蝶与其寄主植物物候同步时间的减少<sup>[30]</sup>,红纹丽蛱蝶食物资源减少,种群数量急剧下降。目前大多数的观察和预测研究认为,气候变化增加了蝴蝶物种与寄主植物之间不同步性,蝴蝶食物资源降低,成虫种群数量下降,从而对物种多样性保护造成巨大的威胁<sup>[30]</sup>。

### 1.2 蝴蝶形态特征的变化

有关气候变化对蝴蝶形态特征的影响研究相对较少,不过已有研究发现,气候变化导致蝴蝶向高纬度地区迁移的距离增长,飞翔能力迅速进化,导致蝴蝶形态发生适应性变化<sup>[32-33]</sup>。如新定植在英国的斑点木蝶 *Pararge aegeria* 与已经长期在此定居的同类相比具有发达的胸部<sup>[34]</sup>。一般认为,昆虫的翅是胸部表皮延伸进化的结果,翅的运动主要由翅基部和胸部的肌肉支撑,因此蝴蝶的飞翔能力增加必然导致胸部的扩大,蝴蝶本身资源的有限,胸腔的扩大就意味着腹部的缩小和繁殖能力的降低。约克大学的研究者就发现,6a 前从数百

公里外的南部迁入约克的蝴蝶胸腔体积增大了30%，产卵量却减少了26%。

## 2 蝴蝶类群地理分布格局对气候变化的响应

### 2.1 蝴蝶向高纬度迁移

大量蝴蝶与全球气候变化的研究数据表明,全球气候变暖导致分布在芬兰、英国、欧洲和北美的蝴蝶物种栖息地向北迁移<sup>[16,35-37]</sup>。Parmesan等<sup>[16]</sup>研究了欧洲的57种非迁徙蝴蝶物种,观察到约2/3的蝴蝶分布区向北迁移了35—240km,与此同时该地区在过去的一个世纪温度升高了0.78℃。有少量的蝴蝶物种栖息地南部分界限收缩的同时伴随着北部分界限的扩展,对灰蝶*Heodes tityrus*的研究发现,该种20世纪20年代在加泰罗尼亚中部蒙塞尼地区还非常常见,到2006年就只能在比利牛斯山脉发现该种的分布,其栖息地向北迁移了50km<sup>[38]</sup>;Parmesan等<sup>[16,38]</sup>在另一项研究中得出了相似的结论,发现该种*H. tityrus*在1998—2006年期间,从爱沙尼亚扩散到波罗的海周边地区,栖息地也向北迁移。同样,在北美分布的一种斑蝶*Euphydryas editha*目前的栖息地已经向北迁移了92km,其南部的分布区已经消失<sup>[6,16]</sup>。不仅非迁徙蝴蝶在全球变暖的背景下向北迁移,非滞育蝴蝶物种在气候温暖的冬天也向北迁移,比如弄蝶*Sachem skipper*在过去的35a内已经从加利福尼亚迁飞到华盛顿,迁飞距离长达420km,仅在历史记录冬季最温暖的1998年就向北迁移了121km<sup>[39-40]</sup>。另一项研究表明,历史记录其分布在非洲北部喜欢高温的粉蝶*Colotis evagore*,由于全球气候变化导致局部地区升温,目前该种已经在西班牙定居,并且保留与原来生境相同的生态位<sup>[41]</sup>。

国外学者征对物种向北迁移的速率展开了一系列的研究。Parmesan等<sup>[6]</sup>综合研究了几个类群在全球变暖下的世界分布变化,认为向北迁移的平均速率为6.1km/10a;Hickling等<sup>[5]</sup>得出向北迁移的平均速率为12.5—19km/10a(这个速率是Parmesan & Yoke报道的2倍多)。Pöyry等<sup>[19]</sup>研究了分布在芬兰北部边缘的48种蝴蝶,报道了48种蝴蝶平均向北迁移速率为59.9km/10a,其中有3个物种速率最大为300km/10a,明显比原来报道的物种迁移速率高,也远远超过了Parmesan<sup>[38]</sup>报道的蝴蝶最高迁飞速度676km/35a。究其原因认为是大多数关于物种北迁的研究局限于不同的区域,不同的纬度,而且不同物种对气候变化响应有差异。目前有研究表明高纬度蝴蝶物种北迁的速率比低纬度地区更大<sup>[19]</sup>。广泛分布翅展大的物种,具有较强的飞翔能力,其北迁速率比翅展小的物种北迁速率大;生活在林缘的、幼虫主要取食木本植物的、并且以成虫越冬的蝴蝶向北迁移速度相对较大;一般物种比濒危物种应对气候变化能力更强,其向北迁移的速率也更大<sup>[19]</sup>。

蝴蝶类群的分布与生境密切相关,环境变化尤其是土地利用变化会直接影响蝴蝶的分布<sup>[42]</sup>,为了分析引起蝴蝶向北迁移的主要因素,Parmesan等<sup>[16]</sup>分析了欧洲蝴蝶物种与大面积生境丧失或获得之间的关系,发现生境丧失在北部地区比南部地区更为严重,说明生境丧失不是蝴蝶分布变化的主要驱动力,这也暗示着目前发生的蝴蝶物种向北迁移主要是由于气候变化引起的。许多学者进一步探索了全球气候变暖导致蝴蝶向北迁移的机制,认为蝴蝶的北迁与温度密切相关。Crozier<sup>[40]</sup>以美国一种弄蝶*Atalopedes campestris*为研究对象,利用野外迁移实验,研究了在该种分布北限之外、分布界限以及分布界限以内的发育时间、存活率、繁殖力以及捕食率的差异,认为温度对发育时间的影响是限制*A. campestris*分布的主要因素,得出夏季高温增加了*A. campestris*向北扩散的成功率,并提出夏季和冬季温度的交感效应是影响蝴蝶物种分布北限的主要制约因子。也有研究表明春季和冬季变暖也是蝴蝶向北迁移的因素,Pollard<sup>[43]</sup>分析了20世纪30年代和40年代季节性气候变化对英国的一种白蛱蝶*Ladoga camilla*种群分布区变化的影响,发现在气候异常温暖的春季*L. camilla*种群分布区范围发生明显的阶段性扩展,认为冬季变暖是一些非滞育的蝴蝶向北迁移的主要因素。为了进一步证明冬季变暖与蝴蝶分布范围之间的关系,Crozier<sup>[39]</sup>利用实验室急性寒冷压力试验和慢性寒冷压力试验,并且结合野外调查,研究了*A. campestris*的过冷却点(supercooling point, SCP),实验室和野外的研究证明冬季极低温度(-10℃)和在低温(-4℃)条件下长期暴露是限制蝴蝶北迁的主要因素<sup>[39]</sup>,从而反向证明冬季变暖就直接导致非滞育蝴蝶物种向北迁移。此外,一些研究发现,在蝴蝶地理分布区北移过程,其种群抗干扰能力较弱,极端气候事件影响物种的重新定植,甚至造成种群灭绝<sup>[9, 44-45]</sup>。综上所述,温度是影响非迁徙蝴蝶种类和非滞育蝴蝶种类北迁的主要因素,全球气候变化主要表现为全球变暖,局部地区温度升高,直接改变了蝴

蝶的分布格局。

## 2.2 蝴蝶向高海拔迁移

气候变化对海拔高度增加 160m 与纬度增加 150km 所产生的影响相似,由此可见山区物种对气候变化的响应更迅速<sup>[18]</sup>。目前已有研究证明有些物种为了逃避气候变暖,向比较凉爽的高海拔边缘扩散<sup>[6,46-47]</sup>,且蝴蝶向高海拔迁移的速率比纬度变化更为明显<sup>[48-49]</sup>。

Parmesan<sup>[47]</sup>分析了在加利福尼亚内华达山脉分布的一种斑蝶 *Edith's Checkerspot*,发现其在过去的一个世纪向上迁移了 124m。她的另一项研究中,比较了墨西哥和加拿大斑蝶 *E. editha* (1993—1996 年) 的调查数据和 (1860—1986 年) 历史记录,并结合冰雪消融的机制,认为该斑蝶种群已经向上迁移了 105m<sup>[6]</sup>。Wilson 等<sup>[10]</sup>利用 1967—1973 年历史记录数据和 2004 年的野外观察数据,研究了西班牙低海拔分布的以草本或者禾本科植物为寄主植物的蝴蝶类群垂直分布的变化,结果表明 16 种蝴蝶分布高度在过去的近 30a 内增加了 212m,同时伴随着平均年均温升高了 1.3℃。此外,蝴蝶类群垂直分布的变化可能与全球变暖导致低海拔地区降雪减少以及积雪消融提前有关,如在内华达山脉海拔 2400m 以下的积雪消融提前了 7d 而且积雪变薄,而海拔 2400m 以上积雪消融没有变化,从而迫使蝴蝶物种向高海拔迁移<sup>[50]</sup>。另外一方面,由于全球变化引发的极端天气事件也是影响美国加利福尼亚州内华达山脉的斑蝶 *E. editha. ditha* 向高海拔迁移的因素之一,这主要因为极端天气也会影响该地区的降雪与冰雪消融<sup>[45,51-52]</sup>。

全球气候变暖对蝴蝶海拔分布变化的影响,还表现在一些低海拔分布物种的种群灭绝速率呈增加趋势。Parmesan 在对墨西哥和加拿大斑蝶 *E. editha* 研究结果中发现,该斑蝶类群在海拔 0—2400m 范围内超过 40% 的种群已经灭绝,在 2400—3500m 范围内灭绝的种群不到 15%<sup>[47]</sup>。在法国南部,适应寒冷的阿波罗绢蝶 *Parnassius apollo* 的集合种群,在过去 40a 内,在海拔 850m 以下的高原已经灭绝了,但是在海拔高于 900m 的高原地区的阿波罗绢蝶集合种群还很健康<sup>[53]</sup>,证明了气候变化对低海拔蝴蝶物种的影响明显。

山区拥有特殊的生境与气候特征,蕴含着极为丰富的蝴蝶物种多样性。气候变化包括气候变暖和极端天气通过改变山区降雪和温度,能够迅速的改变山区小气候,从而影响蝴蝶物种的发育历期,以及与寄主的同步性关系,降低了山区蝴蝶物种的丰富度,改变了蝴蝶物种的垂直分布格局,对低海拔物种影响尤为显著。降低气候变化对蝴蝶生物多样性的影响,有效的保护蝴蝶特有物种和珍稀物种是需要进一步深入研究的课题。

## 3 蝴蝶类群生物多样性对气候变化的响应

### 3.1 种群灭绝风险增加

气候变化在局部区域对蝴蝶的影响主要表现在种群和集合种群水平<sup>[18]</sup>。气候变化迫使物种向高海拔或者高纬度地区迁移,导致那些未来适生区变小或者与现有区域隔离的种群灭绝<sup>[36,54-55]</sup>,增加了分布在低纬度的种群<sup>[47]</sup>和已经濒危种群的灭绝风险。在北美西部分布的斑蝶 *E. editha* 是集合种群,具有周期性的消长和重新定植特征<sup>[56]</sup>,气候因素对种群维持起着至关重要的作用。Parmesan<sup>[47]</sup>利用历史数据和博物馆资料分析了斑蝶 *E. editha* 的种群动态,认为该种在低纬度和低海拔分布的种群灭绝速率较高。同样对法国的阿波罗绢蝶 *Parnassius apollinaris* 的研究也证明在山区低海拔边缘分布的种群具有较高的灭绝风险<sup>[53]</sup>;Wilson 等<sup>[10]</sup>研究了西班牙山区的 16 种蝴蝶,结果表明在过去的 30a 内,气候变暖将其适宜生境减少了三分之一,这无疑增加了种群灭绝的风险。

蝴蝶类群的种群灭绝与极端气候事件密切相关,比如在 1975—1977 年加利福尼亚的严重干旱导致调查的 21 个斑蝶 *E. editha* 种群中 5 个种群的灭绝<sup>[44,57]</sup>;Parmesan<sup>[45]</sup>等对加利福尼亚州内华达山脉的斑蝶 *E. editha* 种群 20a 的研究表明,有三类极端气候事件与分布在海拔 2400m 的斑蝶 *E. editha* 种群灭绝密切相关:1989 年冬季积雪量少导致该种蝴蝶成虫 4 月份提前羽化,与寄主植物物候同步性出现偏差,该种蝴蝶饥饿致死;1990 年 5 月的暴雪导致地区温度下降,已经羽化的成虫无法适应低温而使种群出现数量级的下降;两年后,该地区 6 月 16 日的极端低温( -5℃ ),导致斑蝶 *E. editha* 寄主植物的灭绝,从而引起种群灭绝。极端湿润也会导致该种斑蝶种群的变化,在旧金山附近地区发生的极度湿润(冬季比以往冬季平均降雨量增加了

50%—150%)导致该斑蝶亚种 *E. editha quino* 的种群崩溃<sup>[58]</sup>。

深入理解蝴蝶种群局部灭绝和集合种群应对气候变化在地理分布区域的响应,有助于为地方的物种保护提供帮助<sup>[18]</sup>。

### 3.2 物种多样性降低

全球气候变暖会加剧生境片段化,导致山区蝴蝶物种多样性下降<sup>[59]</sup>。在某种情形下,低海拔物种的向高海拔迁移,会导致高海拔分布区域的物种丰富度增加<sup>[11,46,60]</sup>。但是总体来说,物种丰富度与海拔高度呈峰状关系<sup>[61-63]</sup>,如果低海拔物种的迁移不能够补偿高海拔物种的丧失,那么低海拔物种向高海拔迁移最终导致整个山区物种丰富度的下降<sup>[64]</sup>。Wilson 等<sup>[64]</sup>研究了在全球气候变暖情形下,西班牙的塞拉利昂日瓜达拉马山区蝴蝶海拔高度的变化与蝴蝶物种丰富度以及物种组成的相关性,利用广义线性模型(generalized linear models, GLMs)验证了物种丰富度与海拔高度以及时间之间的关系,研究结果表明,2004—2005 年相同种群蝴蝶的分布比 1967—1973 年海拔高度高了 293m,而地方物种的丰富度在低海拔地区则下降明显,尤其是海拔高度 1600m 以下的物种丰富度均明显下降,山区特有物种的丰富度也下降明显;物种最为丰富的海拔区域在过去大约三十年期间(1967—1973 至 2004—2005)由 800—1600m 缩小为 1000—1600m,海拔最低限上升 200m,这主要是由于气候变暖迫使蝴蝶类群向高海拔迁移,低海拔物种多样性明显减少所致。物种能量假设预测气候变暖使低海拔的温暖湿润地区变为热干旱地区,导致低海拔的物种多样性降低<sup>[65]</sup>。大尺度的生物气候模型对于不同地区的不同分类单元的研究结果也支持这一假说<sup>[66-68]</sup>。

## 4 研究展望

我国地形复杂,气候多样,有十分丰富的蝴蝶资源。2006 年,寿建新等人<sup>[69]</sup>编著的《世界蝴蝶分类名录》记载了世界蝴蝶 17 科、1690 属、15141 种,其中记载中国蝴蝶 12 科、434 属、2153 种。但是由于人类活动以及气候变化对其栖息地的破坏,目前已经有许多蝴蝶物种需要保护,中国的保护蝴蝶物种涉及到 8 个科,两次颁布(1989 和 2000 年)的保护物种名录中蝴蝶就记录了 83 种蝴蝶保护物种,其中 4 种属于Ⅱ 级保护物种。

根据联合国公布的《千年生态系统评估》的结果,目前气候变化已成为威胁生物多样性的主要因素之一,预计今后的几十年将逐渐成为生物多样性变化的重要驱动力。在全球变暖的大背景下,中国气候也发生了明显变化,主要表现在:近百年来,中国气温上升了 0.4—0.5℃;从地域分布来看,中国气候变暖最明显的地区在西北、华北和东北地区;从季节分布看,中国冬季增温最明显,未来中国区域气温将持续不断地变暖,极端气候事件也呈增加趋势<sup>[70]</sup>。气候变化必然对包括蝴蝶在内的各种生物产生不同程度的影响和适应,因此,对于物种或者种群的保护必须考虑气候变化的影响<sup>[18]</sup>。

目前,在我国已经开展了部分蝴蝶多样性的调查工作,主要集中在不同保护区的蝴蝶物种调查和分类方面,没有系统的开展大尺度的研究,也很少考虑气候变化的因素,因此在我国开展蝴蝶对全球气候变化响应方面的研究还是相对新兴的领域,应该加强以下几方面的研究工作。

### 4.1 全球气候情景下蝴蝶物种分布格局的变化

我国在蝴蝶对气候变化响应方面的研究几乎是空白,由于缺乏系统的长期蝴蝶物种监测数据,加上幅员辽阔,从南到北横跨 6 个温度带,山系复杂多样,如何在历史资料不足的情况下开展蝴蝶物种水平分布和垂直分布格局对气候变化的响应,并进一步预测在未来气候变化背景下蝴蝶分布格局的变化,为我国的蝴蝶物种保护提供科学依据,是目前急需解决的科研难点。

### 4.2 极端气候条件对蝴蝶分布的影响

极端天气是影响蝴蝶分布格局的重要因素之一,加速了蝴蝶向高纬度和高海拔的迁移,我国极端天气在未来呈逐渐增强的趋势,进一步研究极端天气频率和蝴蝶分布格局变化之间的关系,为预测未来气候变化情景下,极端天气发生的频率提供科学的依据,对可能到来的极端天气进行防范,降低人类的经济损失。

### 4.3 研究蝴蝶物种个体水平对气候变化的响应

评价蝴蝶物种个体水平对气候变化的响应,尤其是形态特征以及繁殖率和存活率的微小变化,可以预测

蝴蝶物种分布格局的重大改变,进一步对蝴蝶物种就地保护,以及蝴蝶类群适宜的微生境保护提供科学的建议。

#### 4.4 全球气候变化背景下蝴蝶物种的保护

昆虫是生态系统中的重要环节,蝴蝶成虫可为植物授粉,幼虫主要寄生在植物表面,其整个生活史都与植物密切相关。蝴蝶类群分布格局的变化会导致其与寄主植物之间协同关系的改变,如何在目前保护区的建设基础上,进一步考虑气候变化对蝴蝶物种分布格局的影响,增强迁入蝴蝶物种的监测,减少本地物种的高海拔和高纬度的迁移,有效的保护我国珍稀濒危的蝴蝶物种是迫切需要开展的研究工作。

#### References:

- [ 1 ] Heino R, Tuomenvirta H, Vuglinsky V, Gustafsson B, Graham L P, Smith B, Storch H v, Omstedt A, Dippner J W, Vuorinen I. *et al.* Past and current climate change// Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (ed. The BACC Author Team). Berlin/Heidelberg: Springer, 2008: 35-131.
- [ 2 ] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK/New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [ 3 ] Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 92-10.
- [ 4 ] Liu Y, Zhang J, Yang W Q. Responses of alpine biodiversity to climate change. *Biodiversity Science*, 2009, 17 (1): 88-96.
- [ 5 ] Hickling R, Roy D B, Hill J K, Fox R, Thomas C D. The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 450-455.
- [ 6 ] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421: 37-42.
- [ 7 ] Root T L, Price J T, Hall K R, Schnelders S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Finger prints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421: 57-60.
- [ 8 ] McLaughlin J F, Hellmann J J, Boggs C L, Ehrlich P R. Climate change hastens population extinctions. *PNAS*, 2002, 99: 6070-6074.
- [ 9 ] Davis M B. Climatic instability, time lags, and community disequilibrium//Diamond J, Case T J eds. *Community Ecology*. New York: Harper and Row, 1986, 269-284.
- [ 10 ] Wilson R J, David G, Gutiérrez J, Martínez D, Agudo R, Monserrat V J. Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology Letters*, 2005, 8: 1138-1146.
- [ 11 ] Walther G R, Beissner S, Burga C A. Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16: 541-548.
- [ 12 ] Colwell R K, Brehm G, Cardelús C L, Gilman A C, Longino J T. Global warming, elevational range shifts and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 2008, 322: 258-261.
- [ 13 ] Roy D B, Sparks T H. Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biology*, 2000, 6: 407-16
- [ 14 ] Stefanescu C, Peñuelas J, Filella I. Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1494-1506.
- [ 15 ] Forister M L, Shapiro A M. Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1130-35.
- [ 16 ] Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, Hill J K, Thomas C D, Descimon H, Huntley B, Kaila L, Kullberg J, Tammaru T, Tennent W J, Thomas J A, Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 1999, 399: 579-583.
- [ 17 ] Warren M S, Hill J K, Thomas J A, Asher J, Fox R, Huntley B, Roy D B, Telfer M G, Jeffcoate S, Harding P, Jeffcoate G, Willis S G, Greatorex-Davies J N, Moss D, Thomas C D. Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. *Letters to Nature*, 2001, 414: 65-69.
- [ 18 ] McCarty J P. Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology*, 2001, 15: 320-331.
- [ 19 ] Pöyry J, Luoto M, Heikkilä R, Kuussaari M, Saarinen K. Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies. *Global Change Biology*, 2009, 15: 732-743.
- [ 20 ] Roland J. Melanism and diel activity of alpine *Colias* (Lepidoptera: Pieridae). *Oecologia*, 1982, 53: 214-221.
- [ 21 ] Kingsolver J G. Butterfly thermoregulation; organismic mechanisms and population consequences. *Journal of Research on the Lepidoptera*, 1985, 24: 1-20.

- [22] Berwaerts K, Van Dyck H. Take-off performance under optimal and suboptimal thermal conditions in the butterfly *Pararge aegeria*. *Oecologia*, 2004, 141: 536-545.
- [23] Howe P D. The ecological consequences of morphological variation in the common blue butterfly *Polyommatus icarus* (Rott.) in the United Kingdom. Ph. D. thesis, Oxford; Oxford Brookes University, 2004.
- [24] Hirota T, Hamano K, Obara Y. The influence of female post-emergence behavior on the time schedule of male mate-locating in *Pieris rapae crucivora*. *Zoological Sciense*, 2001, 18: 475-482.
- [25] Shreeve T G. Adult behaviour//Dennis R L H ed. *The Ecology of Butterflies in Britain*. Oxford: Oxford University Press, 1992: 22-45.
- [26] Pozo C, Aramado L M, Jorge L B, Noem S S, Aixchel M M, Isabel V F, Andrew D W. Seasonality and phenology of the butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidae) of Mexico's calakmul region. *Florida Entomologist*, 2008, 91(3): 407-422.
- [27] Sparks T H, Yates T J. The effect of spring temperature on the appearance dates of British Butterflies 1883—1993. *Ecography*, 1997, 20: 368-374.
- [28] Sparks T, Humphrey C, Lan W. Climate change and phenology in the United Kingdom//Green E R, Harley M, Spalding M, Zockler C eds. *Impacts of Climate Change on Wild Life*. U K: RSPB, 2001: 53-55.
- [29] Peñuelas J, Filella I. Phenology: Responses to a warming world. *Science*, 2001, 294: 793-795.
- [30] Visser M E, Both C. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B*, 2005, 272: 2562-2569.
- [31] Sparks T H, Roy D B, Dennis R L H. The influence of temperature on migration of Lepidoptera into Britain. *Global Change Biology*, 2005, 11: 507-514.
- [32] Baker A C, Starger C J, McClanahan T R, Glynn P W. Coral reefs: corals'adaptive response to climate change. *Nature*, 2004, 430: 741.
- [33] Rowan R. Thermal adaptation in reef coral symbionts. *Nature*, 2004, 430:742.
- [34] Hill J K, Thomas C D, Lewis O T. Flight morphology in fragmented populations of a rare British butterfly, *Hesperia comma*. *Biology Conservation*, 1999, 87: 277-84
- [35] Mikkola K. Population trends of Finnish Lepidoptera during 1961—1996. *Entomologica Fennica*, 1997, 3: 121-143.
- [36] Hill J K, Thomas C D, Fox R, Fox R, Telfer M G, Willis S G, Asher J, Huntley B. Responses of butterflies to twentieth century climate warming: implications for future ranges. *Proceedings of the Royal Society B*, 2002, 269: 2163-2171.
- [37] Warren M S. The conservation of British butterflies//Dennis R L H ed. *The Ecology of Butterflies in Britain*. Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 1992, 246-274.
- [38] Parmesan C, Martens P. Climate change//Sala O, Meyerson L, Parmesan C eds. *Biodiversity, Health and the Environment: SCOPE/Diversitas Rapid Assessment Project*, Washington, DC: Island Press, 2006.
- [39] Crozier L. Winter warming facilitates range expansion: cold tolerance of the butterfly *Atalopedes campestris*. *Oecologia*, 2003, 135: 648-656.
- [40] Crozier L. Field transplants reveal summer constraints on a butterfly range expansion. *Oecologia*, 2004, 141: 148-157.
- [41] Jordano D, Retamosa E C, Haeger J E. Factors facilitating the continued presence of *Colotis evagore* (Klug, 1829) in Southern Spain. *Journal of Biogeography*, 1991, 18: 637-646.
- [42] Pollard E, Eversham C. Butterfly monitoring 2: interpreting the changes//Pullin A S ed. *Ecology and conservation of butterflies*. New York: Chapman & Hall, 1995: 23-36.
- [43] Pollard E. Population ecology and change in range of the white admiral butterfly *Ladoga camilla* L. in England. *Ecological Entomology*, 1979, 4: 61-74.
- [44] Ehrlich P R, Murphy D D, Singer M C, Sherwood C B, White R R, Brown I L. Extinction, reduction, stability and increase: the responses of checkerspot butterfly (*Euphydryas editha*) populations to the California drought. *Oecologia*, 1980, 46: 101-105.
- [45] Parmesan C, Root T L, Michael R W. Impacts of Extreme weather and climate on terrestrial Biota. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 443-450.
- [46] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects on mountain plants. *Nature*, 1994, 369: 448.
- [47] Parmesan, C. Climate and species range. *Nature*, 1996, 382: 765-766.
- [48] Kudrna O. The distribution atlas of European butterflies. *Oedippus*, 2002, 20: 1-342.
- [49] García-Barros E, Munguira M L, Martín Cano J, Romo Benito H, García-Pereira P, Maravalhas E S. Atlas of the Butterflies of the Iberian Peninsula and Balearic Islands (Lepidoptera: Papilionoidea & Hesperioidae). Spain: Monografías Sociedad Entomológica Aragonesa, Zaragoza, 2004.
- [50] Johnson T, Dozier J, Michaelsen J. Climate change and Sierra Nevada snowpack. *IAHS-AISH*, 1999, 256: 63-70.
- [51] Singer M C, Thomas C D. Evolutionary responses of a butterfly metapopulation to human- and climate-caused environmental variation. *American*

- Naturalist, 1996, 148: 9-39.
- [52] Thomas C D, Singer M C, Boughton D A. Catastrophic extinction of population sources in a butterfly metapopulation. American Naturalist, 1996, 148: 957-975.
- [53] Descimon H, Bachelard P, Boitier E, Pierrat V. Decline and extinction of *Parnassius apollo* populations in France-continued // K hn E, Feldmann R, Thomas J, Settele J eds. Studies on the Ecology and Conservation of Butterflies in Europe. Bulgaria: PENSOFT, 2005, 114-115.
- [54] Midgley G F, Hannah L, Rutherford M C, Powrie L W. Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11: 445-451.
- [55] Williams S E, Bolitho E E, Fox S. Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe. Proceeding of the Royal Society London B, 2003, 270: 1887-1892.
- [56] Harrison S, Murphy D D, Ehrlich P R. Distribution of the bay checkerspot butterfly, *Euphydryas editha bayensis*: evidence for a metapopulation model. American Naturalist, 1988, 132: 360-382.
- [57] Singer M C, Ehrlich P R. Population dynamics of the checkerspot butterfly *Euphydryas editha*. Fortschritte der Zoologie, 1979, 25: 53-60.
- [58] Dobkin D S, Olivieri I, Ehrlich P R. Rainfall and the interaction of microclimate with larval resources in the population dynamics of checkerspot butterflies (*Euphydryas editha*) inhabiting serpentine grassland. Oecologia, 1987, 71: 161-166.
- [59] Boggs C L, Murphy D D. Community composition in mountain ecosystems: Climatic determinants of montane butterfly distributions. Global Ecology and Biogeography Letters, 1997, 6: 39-48.
- [60] Klanderud K, Birks H J B. Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. Holocene, 2003, 13: 1-6.
- [61] Rahbek C. The elevational gradient of species richness: a uniform pattern?. Ecography, 1995, 18: 200-205.
- [62] Brown J H. Mammals on mountainsides: elevational patterns of diversity. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10: 101-109.
- [63] McCain C M. Elevational gradients in diversity of small mammals. Ecology, 2005, 86: 366-372.
- [64] Wilson R J, Gutiérrez D, Gutiérrez J, Monserrat V J. An elevational shift in butterfly species richness and composition accompanying recent climate change. Global Change Biology, 2007, 13: 1873-1887.
- [65] Hawkins B A, Field R, Cornell H V, Currie D J, Gu gan J F, Kaufman D M, Kerr J T, Mittelbach G G, Oberdorff T, O'Brien E M, Porter E E, Turner J R G. Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. Ecology, 2003, 84: 3105-3117.
- [66] Erasmus B F N, Van Jaarsveld A S, Chown S L, Kshatriya M, Wessels K J. Vulnerability of South African animal taxa to climate change. Global Change Biology, 2002, 8: 679-693.
- [67] Thuiller W, Lavorel S, Araujo M B, Sykes M T, Prentice I C. Climate change threats to plant diversity in Europe. Proceedings of the National Academy of Science, 2005, 23: 8245-8250.
- [68] Araujo M B, Thuiller W, Pearson R G. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. Journal of Biogeography, 2006, 33: 1712-1728.
- [69] Sou J X, Zhou Y, Li Y F. Catalog and classification of the butterfly in the world. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 2006: 1-400.
- [70] 《National assessment report of climate change》compiled committees. National Assessment Report of Climate Change. Beijing: Science Press, 2007: 20-100.

#### 参考文献:

- [ 3 ] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. 生态学报, 2008, 28(1): 92-102.
- [ 4 ] 刘洋, 张健, 杨万勤. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展. 生物多样性, 2009, 17 (1): 88-96.
- [ 69 ] 寿建新, 周尧, 李宇飞. 世界蝴蝶分类名录. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006: 1-400.
- [ 70 ] 《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. 北京: 科学出版社, 2007: 20-100.