科技前沿

应对全球气候变化的昆虫学研究*

戈 峰**

(中国科学院动物研究所 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室 北京 100101)

摘 要 大气二氧化碳浓度升高、温度上升、降雨分布不均、灾害性天气出现频次增加等全球气候变化,深刻改变着农林生态系统昆虫群落的组成结构、功能和演替,使昆虫分布区域扩大、发生世代增多、生态适应性变异,从而影响了原有的植物-害虫-天敌间内在联系和各营养层间的固有平衡格局,最终导致一些害虫暴发成灾,一些昆虫种群数量下降,甚至一些昆虫物种灭绝。本文在综述昆虫对温度升高、干旱、温室气体(CO_2、O_3)变化响应研究的基础上,提出我国未来应围绕害虫对全球气候变化的响应特征、适应机制及其控制新方法3个关键的科学问题,通过长期监测、控制试验和模型预测结合,重点开展4个领域的研究工作,以应对全球气候变化下昆虫发生、控制与保护的新挑战。

关键词 全球变化,新的挑战,昆虫,大气 CO_2 浓度升高,多营养及相互作用,温度

Challenges facing entomologists in a changing global climate

GE Feng**

(State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Global climate change, such as elevated CO_2 and O_3 concentrations, rising temperature and the uneven distribution of rainfall has a profound impact on insect community composition and the interaction between host plants, and pest insects and their natural enemies. Insect responses to global climate change are frequently "species-specific" and can be negative, positive or neutral. Global climate change has been associated with an increase in the number of pest insect outbreaks, a decline in some insect populations, and even the extinction of some insect species. This review examines the effects of climate change including those in temperature, rainfall and greenhouse gases (CO_2, O_3), on insects. There are still many challenges facing entomologists in predicting and monitoring the impacts of climate change on insects. Future research needs to focus on the response characteristics and adaptive mechanisms of insects, and developing new control methods for insect pests through long-term monitoring, control experiments and predictive modeling.

Key words global change, new challenges, insect, multitrophic interactions, elevated CO_2, temperature

1 引言

全球气候变化是由于气候系统内部的变化以及与外部因子(自然的与人为的)共同作用的结果。全球气候变化产生的主要原因在于 CO_2 等温室气体的释放,改变了大气的组成,驱使全球的气候变暖。据 IPCC(2007)报导,CO_2 的浓度已由1700年的280 μL/L上升到2005年的379 μL/L,预计在本世纪末 CO_2 浓度将加倍;全球平均地表气温在过去100年(1906—2005年)升高了0.74℃,预计到21世纪末全球平均地表气温升高1.1~6.4℃。

作为生物多样性最重要的组成成分,昆虫对全球气候变化(如气候变暖、干旱和 CO_2 浓度升高等)的响应极其敏感。而且,有害的昆虫(害虫)又是影响农业生产的重要因子,它的发生危害直接

* 资助项目:国家自然科学基金委项目(31030012、30921063)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(2010-Biols-CAS-0102)。

** 通讯作者,E-mail: gef@ioz.ac.cn

收稿日期:2011-09-02,接受日期:2011-09-10

影响到农林生态系统的结构与功能，关系到国家的粮食安全与生态安全。因此，国内外都非常重视昆虫对温度、干旱、气候异常、温室气体（CO_2、O_3）等气候变化因子响应的研究。因为这些研究不但在理论上可阐明昆虫对全球气候变化响应的一般规律，揭示“作物－害虫－天敌”对全球气候变化响应的机制；而且在实践上可预测未来害虫发生的趋势，发展害虫防治的新技术，以应对全球气候变化的挑战。本文在评述昆虫对温度升高、干旱、温室气体（CO_2、O_3）变化响应研究基础上，提出我国未来应对全球气候变化挑战的昆虫学研究对策。

2 昆虫对气候变暖的响应与适应

气候变暖是当前全球气候变化最显著的特征。根据“有效积温”法则，在一定的温度范围内，随着大气温度增加，昆虫的生长发育速率将加快，发生危害时间提前，发生世代增多。如红襟粉蝶 *Anthocharis cardamines* 和红蛱蝶 *Vanedda atalanta* 在 1976—1998 年期间，田间第 1 次出现的时间分别提前了 17.5 和 36.3 d（Roy and Sparks，2000）。黑光灯下褐飞虱出现的时间由 20 世纪 80 年代的 6 月中旬提前到本世纪的 6 月上旬，白背飞虱也由 20 世纪 80 年代的 5 月下旬提前到目前的 5 月中旬。据报道，浙江北部的褐飞虱在气候变暖年份由 1 年 4 代增加至 1 年 5 代；小菜蛾 *Plutella xylostella* 在温度升高 2℃后将增加发生 2 个世代（Morimoto *et al.*，1998）。这些变化将可能导致昆虫种群数量的增加，提高了害虫发生危害的风险。

大量研究表明，为适应全球变暖，昆虫通过迁移、扩散等方式，向高海拔和高纬度地区分布（Logan and Powell，2001，Witt *et al.*，2010）。如北美山松大小蠹，由于年平均温度的升高，发生北界已经北移，并向高海拔地区危害（Logan and Powell，2001）；其暴发区向北扩展了 130 万 km^2（Williams and Liebhold，2002）。又如，森林重大害虫天牛 *Apriona* spp. 由于冬季低温目前在欧洲尚不能定殖（Roques and Auger-Rozenberg，2006），但气候模型分析表明，未来欧洲南部靠近 48°N 的区域将成为其适生区（Vanhanen *et al.*，2008）。我国科学家也发现温度增加 1～2℃可促进内蒙古 3 种草原蝗虫卵和蝗螨的发育，分布区出现向北扩散的趋势（Guo *et al.*，2008）。显然，全球气候变暖还使害虫发生危害的格局发生变化，危害区扩大。

由于植物、害虫、天敌 3 类生物对全球气候变暖的响应不同，致使植物－害虫－天敌三者时间、空间的耦合关系产生错位，引起一些昆虫发生严重，一些昆虫发生减轻，一些昆虫灭绝。如前所述，气候变暖后，有利于害虫安全越冬，其起始发育时间提前，发育速度加快，发育历期缩短，繁殖力增强，其为害时间可能延长，一些害虫的为害程度呈加重趋势（Thomson *et al.*，2003）。同时，气候变暖还将通过食物链扰乱害虫－天敌的种间同步性关系，一些害虫由于失去天敌的控制而暴发成灾（Grabenweger *et al.*，2007）。但也有一些害虫种群出现下降的态势。如稻绿蝽 *Nezara viridula* 成虫在日本大阪通常在 9 月中旬进入滞育，但目前由于温度升高使部分雌虫在秋季继续发育产卵，而这些卵又不能发育到滞育的虫态（成虫），因此它们在低温到来之前不能进入成虫滞育虫态而全部死亡，导致次年发生程度明显下降（Musolin，2007）。又如，由于全球气候变暖使华北棉铃虫原本发生 4 代增至 5 代，但第 5 代不能发育至越冬蛹，它们在冬季低温到来时死亡，导致棉铃虫越冬虫源下降（Ge *et al.*，2005）；同时，剩下的少量越冬棉铃虫蛹第 2 年春天提前解除滞育、羽化产卵；尽管小麦的发育期也提前，但与棉铃虫相比其生长发育提前较缓慢；导致棉铃虫新孵化的幼虫与小麦适宜的生育期错开，这些新孵化的幼虫因找不到食物（麦穗）而死亡，从而引起近年来棉铃虫种群下降。甚至一些昆虫（如蝴蝶）由于不能忍耐温度的变化而灭绝（Konvicka *et al.*，2003）。因此，全球气候变暖下不但影响单种生物，而且改变了植物－害虫－天敌三者互作关系，这种变化是未来昆虫对全球气候变暖响应研究的重点。

3 昆虫对降雨和干旱的响应

由于气候的变化，引起全球降雨格局发生改变，这些变化直接或间接地影响昆虫的生长发育和生存。一般昆虫的生长发育和繁殖都需要相当高的湿度。干旱对昆虫的生长发育和繁殖不利，特别在高温下，更为不利。但也有相反的情况，有的昆虫要求低湿度，如棉蚜，要求相对湿度在 75% 以下适宜。因此，干旱的年份棉蚜发生往往很重（戈峰，2008）。降雨可以直接影响昆虫的数量变

化,如暴雨对于弱小的害虫如蚜虫、螨类,有机械的冲刷杀虫作用; 还可以通过影响空气的湿度和温度等,进而改变寄主植物和昆虫体内含水量而发生作用,间接地作用于昆虫(Bale *et al.* , 2002) 。显然,全球降雨格局的变化,也严重影响农业害虫的发生期、发生量和发生程度。

4　昆虫对 CO_2 浓度升高的响应

人类活动所引起的大气 CO_2 浓度增加被认为是引起当前全球气候变暖的一个主要原因。大气 CO_2 浓度升高强烈地影响农林生态系统。它不但直接地影响植物的生长发育,而且还通过改变植物体内化学成分的组成与含量,间接地影响到植食性昆虫,并通过食物链影响到以之为食的天敌昆虫(戈峰等,2008) 。作者(2010b) 曾系统地介绍了不同类型昆虫对大气 CO_2 浓度升高的响应特征及其我国在这个领域所取得的成就(Sun *et al.* , 2011) 。10 年来的研究表明,大气 CO_2 浓度增加对于植物的影响是直接而明确的,而对于昆虫的影响是间接而又复杂的。其中,以作物 - 咀嚼式口器昆虫(棉铃虫) - 寄生蜂为系统的研究表明,大气 CO_2 浓度升高,减少了作物体内 N 含量,增加了作物体内 C 和 C/N 含量,降低了棉铃虫的适合度和对棉花的危害作用,提高了棉花对棉铃虫为害的补偿作用; 但并没有改变棉铃虫 - 中红侧沟茧蜂的相互作用关系。未来 CO_2 浓度升高下咀嚼式口器昆虫为代表的棉铃虫发生与危害下降。以作物 - 刺吸性昆虫(蚜虫) 为系统的研究表明,大气 CO_2 浓度升高改变了植物体内营养物质组成,增加了蚜虫对氨基酸营养的利用与补偿作用,降低了 3 种麦蚜的种间竞争,有利于其种群的发生。而对天敌昆虫的影响表现出种群上升、下降和变化不太等特征(戈峰等,2008,2010a, 2010b; Sun *et al.* ,2011) 。由此可见,不同类型的昆虫对 CO_2 浓度的升高响应不同,其中,以蚜虫为代表的刺吸性昆虫在高 CO_2 环境下发生危害更为严重。

5　昆虫对 O_3 浓度升高的响应

臭氧 (O_3) 是最具危害性的空气污染物之一。目前对流层中的臭氧水平从 100 多年前的 10 ppb 到今天的 40 ppb,到 2050 年将达到 68 ppb 左右。一般认为 O_3 加快了植物似老化过程,使植物细胞内含物 (特别是蛋白质) 被转移到韧皮部,从而改善了昆虫的营养条件,以韧皮部为食的刺吸性昆虫(蚜虫) 种群有增加的趋势(Dohmen, 1988) 。但也与 CO_2 的作用类似,臭氧 (O_3) 升高对昆虫的影响应不同种类而异。在臭氧浓度升高下,一些昆虫种群增加、一些降低还有一些种群变化不明显(崔洪莹等,2011) 。

6　害虫防治对节能减排的贡献

害虫防治与节能减排密切相关。一方面,由于气候变化导致一些害虫暴发危害加剧,使植被光合作用的整体能力下降(即碳汇能力降低) 、生物产量大大降低(即碳吸收能力降低) ,进而影响植物对碳的吸收和固定; 另一方面,为防治日益加剧的害虫暴发危害,化学农药的大量使用及相关的生产与使用过程加重了 CO_2 排放(Kurs *et al.* , 2008) 。此外,由于害虫暴发危害导致大量的枯枝落叶进入土壤,分解过程中也会释放大量 CO_2,再加之害虫暴发危害时自身 CO_2 的释放。因此一种昆虫关系到一个国家 CO_2 的减排任务。据 Kurs 等(2008) 估计,在 2000—2020 期间加拿大因受山松大小蠹危害而导致释放的 CO_2 将多达 270 兆吨,等同于加拿大境内所有森林过去 10 年吸收的 CO2 的总量,相当于加拿大对《京都协议》减排的承诺。其它昆虫,如云杉食心虫 *Choristoneura fumiferana* 和天幕毛虫 *Malacosoma disstria*,暴发时也大幅度减少植物 CO_2 的固定作用(Berryman, 1998) 。可见,气候变化下由于害虫暴发危害加剧将大大增加生态系统 CO_2 释放量; 而通过有效控制害虫暴发危害,有望大幅降低生态系统 CO_2 的释放。

7　应对全球气候变化的挑战

7.1　面临的科学问题

在长期的协同进化过程中,植物 - 害虫 - 天敌相互作用、相互制约,形成一个有机整体。近年来,由于 CO_2 浓度升高、温度上升、气候变暖、降雨分布不均等气候因子变化,引起植物、害虫、天敌 3 类生物对全球气候变化的响应不同,导致害虫、天敌发生的时间与空间格局变化,致使原有的植物 - 害虫 - 天敌之间的内在联系和各营养层间的固有平衡格局发生改变,作物的抗性和天敌控害作用难以得到发挥,最终增加了害虫暴发成灾的风

险。以此同时,也清楚地看到,全球气候变化相对比较缓慢。如 IPCC(2007)预测 CO_2 浓度每年增加 1.5 ppm,温度 100 年上升 4℃,作为发育历期短、繁殖快、多化性的昆虫将在遗传、生理、行为、种群等多个方面对全球气候变化产生不同的适应策略,以实现其在气候变化下种群的存活、繁衍和扩张,提高其群体适合度。

显然,未来需要针对全球气候变化下昆虫如何变化、如何适应、如何控制这个主线开展研究,即着重解决以下 3 个关键科学问题:1)由于不同生物对全球气候变化的响应不同,在全球气候变化下我国主要害虫、天敌发生的时空格局有什么变化?2)害虫、天敌如何适应不断变化的气候因子?3)如何采用新的防治对策以应对全球气候变化下害虫发生危害与防治的新挑战。

7.2 发展趋势

有关昆虫对全球气候变化的研究已经有大量的研究报告。未来的研究趋势主要体现在以下 5 个方面:(1)对昆虫影响的长期效应研究 由于 CO_2 浓度和全球变暖是逐渐升高的,而不是突然增加的,昆虫对 CO_2 浓度和全球变暖的适应是长期的、多代的过程,因此未来应强调全球气候变化对昆虫多世代、长期响应的研究和监测。(2)多因子的综合研究 全球气候变化是多个因子综合发生,如 CO_2 浓度变化的同时,伴随着温度升高等其它气候变化。而目前研究大都是温度升高拟或 CO_2 升高拟或 O_3 升高等单因子的作用,其结果往往与实际发生的情况不相符。因此需要综合分析多个气候变化因子对昆虫的影响,才能准确对未来全球气候变化下昆虫的发生提出预警。(3)响应和适应机制研究 目前有关气候变化对昆虫生长发育、适合度以及发生分布的影响研究报告较多,而对昆虫产生这些变化的机制研究较少,有关昆虫在遗传、生理、行为、种群等方面对全球气候变化产生的适应机理也不清楚,从而制约了对未来全球气候变化下昆虫的发生发展的认识,需要从基因、分子、个体、种群和生态系统等多个层次开展昆虫对气候变化响应和适应机制系统研究。(4)控制试验和模型预测方法研究 在研究方法上,可通过控制试验设置,如 CO_2、O_3 控制的开顶式同化箱(OTC)、田间开放式试验(FACE)以及红外线辐射器增温设施,模拟野外气候因子的变化,研究气候变化对昆虫的影响;同时,发展多因子模型可以很好的预测未来全球气候变化下昆虫发生的趋势。(5)与国家减排需求紧密结合 通过分析气候变化下害虫发生与危害与生态系统 CO_2 释放的定量关系,评估基于害虫防控技术对 CO_2 减排的贡献,提出气候变化下害虫防控的新技术和对策,从而为实现害虫的绿色防控和国家的减排目标作出贡献。

7.3 未来研究重点

将以温度、降水、二氧化碳浓度等作为全球变化作用因子,从基因、分子、种群、生态系统和农田景观多个尺度,以农林重要害虫、气候变化敏感性害虫、区域性(迁飞)害虫、入侵性害虫为对象,围绕害虫对全球气候变化的响应特征、适应机制及其控制新方法等主线,通过长期监测、控制试验和模型预测结合,着重于开展以下 4 个方面的研究:

(1)全球气候变化影响下害虫发生特点与灾变规律 在高温、干旱、CO_2 浓度升高和灾害性天气频繁的全球气候变化大背景下,害虫及其天敌的发生与分布的时空格局发生了变化。需要通过历史虫情资料和气象数据资料梳理,结合大田野外调查和室内控制环境实验模拟气候变化影响,以明确新环境下害虫发生新特点和灾变新规律,并阐明区域尺度下害虫暴发危害与气候变化关键因子的关联度,从而为构建应对全球气候变化的害虫灾变监测、预警和应急防控技术奠定基础。

(2)害虫、天敌对气候变化的适应机制 面对气候变化,害虫在遗传、生理、行为、种群等多个方面对温度升高、干旱和 CO_2 升高产生不同的适应策略,以实现其在气候变化下的存活、繁衍和扩张。研究这些适应的机制,可阐明气候变化下生物学的效应,增强生态系统的稳定性和自适应性,为构建有害生物风险预警和应急防控技术奠定理论基础。

(3)全球气候变化下害虫致害性变异与损失的新评估 随着全球气候变化加剧及伴随的农林业产业结构调整及栽培管理制度变革等诸多因素影响,害虫发生危害及其对作物的影响表现出新的形式和规律。通过有害生物个体和种群层次的致害性(如取食行为、生活史变化、生态位测定、种群增长和种间竞争等)研究,结合区域性作物产量损失(如经济产量损失评估、耐害补偿能力评价、

生长势测定等) 和森林的固 C 能力分析,制定气候变化新形势下重大农林害虫和入侵害虫的防治指标和经济阈值参数,为国家应对全球气候变化的植物保护防治策略提供基础数据、评价指标和评估模型参数。

7.4　全球气候变化下害虫灾变监测预警与危害防控新技术和新方法

结合传统的有害生物种群预测模型(如有效积温模型、种群增长模型和相关专家系统等),利用分子检测、信息素监测、3S 技术和网络技术,通过整合遥感信息、地理信息及气候气象信息等,建立害虫危害预测模型和迁飞扩散的信息识别模型,以监测害虫区域性灾变规律。同时,整合气候变化下害虫应急防控和持久预防管理新体系,寻找基于气候变化影响下的生物防治、物候期变化、害虫生活史变化及作物耐害补偿能力变化的高效害虫防控新技术和新方法,建立国家应对气候变化影响的农林重大害虫可持续综合防御与控制体系。

参考文献(References)

戈峰主编,2008. 昆虫生态学理论与方法. 北京: 高等教育出版社. 33—37.

戈峰,陈法军,吴刚,孙玉诚,2010a. 昆虫对大气 CO_2 浓度升高的响应. 北京: 科学出版社. 1—212.

戈峰,陈法军,吴刚,孙玉诚,2010b. 我国主要类型昆虫对 CO_2 升高响应的研究进展. 应用昆虫学报,47(2): 229—235.

崔洪莹, 苏建伟, 戈峰, 2011. 臭氧浓度升高对昆虫影响的研究进展. 应用昆虫学报,48(5): 1130—1140.

Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, Awmack C, Bezemer TM, Brown VK, Butterfield J, Buse A, Coulson JC, Farrar J, Good JEG, Harrington R, Hartley S, Jones TH, Lindroth RL, Press MC, Symrnioudis I, Watt AD, Whittaker JB, 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1): 1—16.

Berryman AA, 1988. Dynamics of Forest Insect Populations: Patterns, Causes, Implications. Plenum, New York. 1—603.

Dohmen GP, 1988. Indirect effects of air pollutants: Changes in plant/parasite interactions. *Environ. Pollut.*, 53(1/4): 197—207.

Ge F, Chen FJ, Parajulee MN, Yardim EN, 2005. Quantification of diapausing fourth generation and suicidal fifth generation cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*, in cotton and corn in northern China. *Entomol. Exp. Appl.*, 116(1): 1—7.

Grabenweger G, Hopp H, Jackel B, Balder H, Koch T, Schmolling S, 2007. Impact of poor host-parasitoid synchronisation on the parasitism of *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae). *European Journal of Entomol.*, 104(1): 153—158.

Guo K, Hao SG, Sun JX, Kang L, 2008. Differential responses to warming and increased precipitation among three contrasting grasshopper species. *Global Change Biol.*, 15(10): 2539—2548.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007; the physical science basis. Summary for policy makers. Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. http://www.ipcc.ch/pub/spm 18—02.pdf.

Konvicka M, Maradova M, Benes J, Fric Z, Kerka P, 2003. Uphill shifts in distribution of butterflies in the Czech Republic: effects of changing climate detected on a regional scale. *Global Ecology Biogeography*, 12(5): 403—410.

Kurs WA, Dymond CC, Stinson G, Rampley GJ, Neilson ET, Carroll AL, Ebata T, Safranyik L, 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 452: 987—990.

Logan JA, Powell JA. 2001. Ghost forests, global warming, and the mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). *Am. Entomol.*, 47(1980): 160—173.

Musolin DL, 2007. Insects in a warmer world: ecological, physiological and life-history responses of true bugs (Heteroptera) to climate change. *Global Change Biology*, 13(8): 1565—1585.

Morimoto N, Imura O, Kiura T, 1998. Potential effects of global warming on the occurrence of Japanese pest insects. *Appl. Entomol. Zool.*, 33(1): 147—155.

Roques A, Auger-Rozenberg MA, 2006. Tentative analysis of the interceptions of non-indigenous organisms in Europe during 1995—2004. *Bulletin OEPP*, 36(4): 490—496.

Roy DB, Sparks TH, 2000. Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biol.*, 6: 407—416.

Sun Y, Yin J, Chen F, Wu G, Ge F, 2011. How does atmospheric elevated CO_2 affect crop pests and their natural enemies: the examples in China? *Insect Science*, 18(4): 393—400.

Thomson LJ, Macfadyen S, Hoffmann AA, 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of

agricultural pests. *Biological Control*, 52 (3): 296—306.

Vanhanen H, Veteli TO, Niemelä P, 2008. Potential distribution ranges in Europe for *Aeolesthes sarta*, *Tetropium gracilicorne* and *Xylotrechus altaicus*, a CLIMEX analysis. *EPPO Bulletin*, 38(2): 239—248.

Williams DW, Liebhold AM, 2002. Climate change and the outbreak ranges of two North American bark beetles. *Agr. For. Ent.*, 4(2): 87—99.

Witt MJ, Hawkes LA, Godfrey MH, Godley BJ, Broderick AC, 2010. Predicting the impacts of climate change on a globally distributed species: the case of the loggerhead turtle. *J. Exp. Biol.*, 203(6): 901—911.