入侵昆虫对全球气候变化的响应*

吴 刚[1**] 戈 峰[2] 万方浩[3] 肖能文[4] 李俊生[4]

(1. 华中农业大学 武汉 430070;2. 中国科学院动物研究所 北京 100101;3. 中国农业科学院植物保护研究所 北京 100081;4. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室 北京 100012)

摘 要 生物入侵已成为一个影响深远的全球性问题,其对我国的生态系统、环境和社会经济的负面影响日益明显。全球气候变化对入侵昆虫有着深刻的影响,它正改变着一些昆虫本地种与入侵昆虫的组成、分布、种群动态和种间关系。本文分析了气候变化与生物入侵之间的互作关系,综述了全球气候变化因子(如温度、湿度及其它气候因子)对入侵昆虫生物学及生态学的影响,探讨了气候变化导致入侵昆虫定殖和传播的原因,并提出了气候变化下入侵昆虫的防治对策。

关键词 全球气候变化,入侵昆虫,温度,湿度,降雨量,CO_2

Responses of invasive insects to global climate change

WU Gang[1**] GE Feng[2] WAN Fang-Hao[3] XIAO Neng-Wen[4] LI Jun-Sheng[4]

(1. Department of Biology, College of Science, Wuhan University of Technology, Hubei 430070, China; 2. Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. The State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract Invasive species have become a far-reaching global issue, one that has an increasingly evident negative impact on our country's environment and socio-economic performance. Global climate change has a profound impact on insects, and is changing the composition, distribution and population dynamics of both local and invasive species. In this paper, the interactions between global climate change and biological invasion are analyzed, the impact of global climate change factors (such as temperature, humidity and other climatic factors) on the biology and ecology of invasive insects are summarized, the reasons for the colonization and dissemination of invasive insects by global climate change discussed, and some measures for preventing the arrival of invasive insects proposed. This paper helps to objectively evaluate the effects of global climate change on the potential environmental and bio-safety risks of invasive insects, and also to clarify the interaction between climate change factors and invasive insects. It provides a good scientific basis for the ecological risk assessment of invasive insects and sustainable agricultural development in a changing global climate.

Key words global climate change, invasive insects, temperature, humidity, rainfall, CO_2

1 前言

生物入侵(biological invasion)是指因某种原因非本地产的生物或本地原产但已绝灭的生物侵入该地区的过程,而此物种在自然情况下无法跨越天然地理屏障(万方浩等,2008)。全球气候变化对外来生物入侵的有着深刻的影响,因为全球气候变化一方面对本地生境和生态系统产生了影响,为外来入侵生物创造了机会和空间;另一方面,适应了全球气候变化新选择压力下成功入侵的物种,会比本地物种具有明显的生理或生态优势,在排挤或替代土著种的同时,改变了本地生态系统的过程或属性,进一步促进了全球气候变化的发生(Dukes and Mooney, 1999; 万方浩等,

* 资助项目 "973"计划(2009CB119203)、国家自然科学基金(30800724、31071691)。

** 通讯作者,E-mail: wugang1976@163.com

收稿日期:2011-08-10,接受日期:2011-08-30

2011)。

全球气候变化是人类迄今面临的最重大环境问题,也是 21 世纪人类面临的最复杂挑战之一。中国幅员辽阔,中国南部及东南部沿海地区生物入侵发生最为严重,气温限制了许多入侵种向北的扩散,而西北、华北和东北地区的持续变暖,将可能使某些重大入侵物种扩散至北方地区(万方浩等,2011)。因此,系统论述气候变化对入侵昆虫的影响及其机制,有助于客观评价全球气候变化对入侵昆虫潜在的环境风险及生物安全问题,明确入侵昆虫与气候变化因子的互作影响,为全球气候变化新形势下入侵昆虫的生态风险性评估和农业可持续发展提供良好的科学依据。

2　气候变化对入侵昆虫的影响

有确切的证据表明,气候变化如温度的升高和降低、湿度、季节的交替、干旱、空气中的 CO_2 浓度和极端的天气(飓风,暴风雨等)等正改变着一些昆虫本地种与入侵昆虫的组成、分布与种群动态。

2.1　温度变化对入侵昆虫的影响

全球气候变暖可影响昆虫本地种与入侵昆虫的组成、分布和化性。如由于年平均温度的升高,入侵昆虫北美山松小蠹虫发生北界已经北移,并向高海拔地区危害(Logan and Powell, 2001);欧洲玉米螟分布范围将大幅北移(Porter, 1995)。气候变暖导致美国白蛾化性发生了改变,由二化性向三化性过渡(Yamanaka *et al.*, 2008; Gomi *et al.*, 2009)。根据预测,2025—2050 年将由于气温上升使捷克发生的欧洲玉米螟产生更多的后代,由原本每季发生 1 代变为季节发生 2 代(Trnka *et al.*, 2007)。

入侵昆虫 B 型烟粉虱对高温适应能力是其能扩散为全世界重要害虫的关键因素之一(Berlinge *et al.*, 1996; Salvucci *et al.*, 1997; Cui *et al.*, 2008),也是其入侵扩张成功的重要机制之一(Bentz *et al.*, 1995; Drost *et al.*, 1998; 崔旭红, 2007)。由于烟粉虱体积小,在高温环境中不能像其它大个体昆虫一样通过蒸发体表水分降温以度过恶劣的高温胁迫(Radin *et al.*, 1994; Prange, 1996; Lu *et al.*, 1997),因此,其必有抵抗耐热性的其它内在机制(Berlinger *et al.*, 1996; Salvucci, 2000; 王海鸿, 2005; 崔旭红, 2007)。Cui 等(2008)发现,高温热激下,B 型烟粉虱雌成虫的存活率显著高于雄成虫,表明烟粉虱的雌虫比雄虫耐热,因此,高温胁迫下,烟粉虱雌性比雄性耐热对于维持其种群繁衍和扩张具有重要的生态学意义。另外,B 型烟粉虱和温室白粉虱对高温的适应性存在差异,其种群消长具有一定的季节性规律,夏季高温季节以 B 型烟粉虱种群为主,夏季高温会抑制温室白粉虱种群的发展和大量发生,而到春秋两季气候趋凉时温室白粉虱种群上升为优势种群,显然,B 型烟粉虱和温室白粉虱对高温的适应性差异是导致两者种群存在时空差异的一个重要原因。

温度是斑潜蝇能否成功入侵和繁殖的一个主要限制因子。南美斑潜蝇在温和或冷凉地区种群数量明显增多,发生普遍,而美洲斑潜蝇有趋向高温地区发生的特性(陈兵和康乐,2002)。室内研究结果表明,美洲斑潜蝇适应的温度范围较广,相对较高的温度有利于种群增长;而南美斑潜蝇在相对较低的温度条件下寿命较长,产卵量较大(周亦红等,2001),在我国北方,尤其是冬季,温度常达零下十几度,美洲斑潜蝇野外不能自然越冬(Zhao and Kang,2000)。南美斑潜蝇的发育起点温度比美洲斑潜蝇的低(Parrella, 1987),因此南美斑潜蝇相对更趋向于高纬度的温凉地区(Spencer,1973)。

全球气候变暖提高了松异舟蛾 *Thaumetopoea pityocampa* 越冬的存活率,扩展了它们在欧洲的地理发生区域。升高的冬季气温也会影响其在欧洲南部部分地区域松树上的存活率,提高其侵染性(Hodar *et al.*, 2003)。同时,全球气候变暖也引起了吹绵蚧 *Icerya purchasi* 种群向北蔓延,棉蜡蚧 *Pulvinaria floccifera* 的发生也越来越普遍。在过去的十年中,棉蜡蚧种群不断向英国北部蔓延并扩大了其寄主范围,在瑞典,该物种最初只在温室中出现,但现在已经发展为一个重要的入侵昆虫(Watson and Malumphy, 2004)。

玉米根跗萤叶甲 *Diabrotica virgifera virgifera* 于 1992 年传入欧洲贝尔格莱德附近,并一直向东和向北蔓延。玉米根跗萤叶甲在现有的气候条件下尚未扩散到其潜在的范围,但全球变暖有可能极大地向北扩大其范围。预计到 2050 年全球变暖的条件下,英格兰东南部的大部分地区将更加

适合这一物种生存(Baker *et al.*, 2003)。又如,蔗扁蛾耐寒能力较弱,幼虫过冷却点为 -4.36 ~ 6.44℃,低于 -2℃ 死亡率很高(鞠瑞亭等, 2003a)。如无保护地,蔗扁蛾在温带与寒带大部分地区尚不能在自然界越冬(鞠瑞亭等,2003b)。日本松干蚧越冬代寄生若虫在 -21℃ 时会发生死亡(王志明等,2009)。西花蓟马发育起点湿度为 10℃,成虫能忍受极端最低气温 -20.8℃,其最适宜温度范围为 25 ~30℃(McDonald *et al.*, 1997; 程俊峰等,2006)。三叶斑潜蝇 1 年可发生多代,在低纬度和温度较高的地区或温室,全年都能繁殖,完成 1 代需要大约 21 d。其世代重叠明显,种群发生高峰期与衰退期极为突出(雷仲仁等, 2007)。但温度变暖却有可能使其在室外安全越冬。

温度是影响红火蚁生存的主要因素,它决定了红火蚁能否在被入侵地区越冬或越夏。红火蚁对极端高温有较强的忍耐性,而低温则成为红火蚁能否成功入侵的关键因素。在红火蚁越冬北界临界低温问题上,大多数学者认为以月平均最低气温(-17.8℃)的等温线来预测红火蚁的潜在地理分布(胡树泉等, 2008)。另外,随着海拔高度的增加,温度逐渐降低,因此,高海拔地区的气温比同一纬度的低海拔地区低,不利于红火蚁的定植,因此海拔高度也是限制红火蚁在一些纬度相对较低的地区分布的主要因素之一,其代表地区主要有福建的九仙山、贵州的威宁和毕节、云南的大理和维西以及四川的金佛山和乾宁等地区(胡树泉等, 2008)。杜予州等(2007)用 CLIMEX 预测入侵红火蚁可以在中国大陆 19 省区的 47 个市、县(地区)生存,其中在温湿度较高、降雨量较多的华南地区最适宜生存。陈乃中等(2005)用模型模拟出对红火蚁的环境极限分布因子,即空气温度低于 -12.2℃,10 cm 土壤温度低于 4℃ ,降水量低于 510 mm。显然,温度升高变暖将有利于其扩散。

2.2 湿度对入侵昆虫的影响

环境湿度是入侵昆虫种群发生的一个重要气候因子(Leong and Ho, 1990; 程登发等,2002)。环境湿度包括大气湿度和土壤湿度。大气湿度即大气相对湿度(relative humidity,RH);土壤湿度又包括土壤中的空气湿度和土壤内的液态水(即土壤含水量)(常晓娜等, 2008)。土壤中的相对湿度通常是饱和的(即相对稳定),对昆虫的影响较小;而土壤含水量变化较大,对昆虫的影响也大(陈法军,2003)。Andrei 等(2001)指出,桔小实蝇适于在空气相对湿度为 60% ~80% 的范围内活动,当空气湿度高于或低于该湿度范围时对桔小实蝇不利。烟粉虱成虫在低湿条件下产卵量大,低湿干燥有利于烟粉虱种群的发生(陈艳华, 2006)。西花蓟马在我国的主要危害区分布在云南、陕西南部渭河流域、河南 - 湖北 - 安徽淮河流域和长江上游,而在相对湿度较大的长江中下游其适宜度则不高,西花蓟马限制性最低发育相对湿度为 20%,限制性最高发育相对湿度为 96%(Gaum *et al.*, 1994),其最适宜湿度范围为 60% ~88%,湿度过大则不利于西花蓟马的生长发育(程俊峰等,2006)。湿度对蔗扁蛾的生长发育影响极大,相对湿度(RH) >80% 最适合蔗扁蛾卵的孵化,RH <60% 不利于卵的孵化,RH <39% 卵则无法孵化。另外,蔗扁蛾虽喜潮湿环境,但过多的降水对其种群繁殖不利,同时降水还影响蔗扁蛾的飞行、交尾及产卵等行为(鞠瑞亭等,2003a)。胡树泉等(2008)研究发现,湿度是影响红火蚁生长发育的重要因素,该虫喜湿,干燥的环境不利于红火蚁的觅食、发育以及其他活动。红火蚁常在池塘、河流、沟渠旁边筑巢,如远离水源,工蚁则会向下挖掘取水道,土壤湿度过大或过小都会使蚁群活动减弱,红火蚁婚飞时土壤相对湿度不小于 80%。王鸿斌等(2007)研究发现春季干旱气候是造成 1998 年红脂大小蠹在山西突然暴发的原因,其中主要影响因子为春季的空气相对湿度和降水。日本松干蚧越冬代寄生若虫在相对湿度 70% ~80% 时,卵的孵化率高达 95% 以上。相对湿度小于 36% 时,大部分卵不能孵化(王志明等, 2009)。因此,湿度的变化将影响入侵昆虫的生长发育。

2.3 其它气候因子对入侵昆虫的影响

气候变暖的主因是人类活动所引起的大气 CO_2 浓度增加(戈峰等, 2010a),据联合国气候变化政府间专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007)第 4 次报告指出,大气 CO_2 浓度已由工业化革命前的 280 μL/L 上升到 2000 年的 370 μL/L(http://cdiac.ornl.gov/

ftp/trends/co2/maunaloa.co2)，预计未来大气环境中 CO_2 浓度与全球气温将同步增加，到 2100 年全球年平均温度将比 20 世纪 90 年代上升 1.1 到 6.4℃。在高浓度 CO_2 下，舞毒蛾 *Lymantria dispar* 生长更好(Kenney *et al.*，1997)，其老熟幼虫的生长发育和取食对 CO_2 浓度增加的反应更敏感(Williams *et al.*，1998)。同样，在高 CO_2 浓度条件下，连续 3 代 B 型烟粉虱的卵期及若虫历期与对照 CO_2 浓度相比显著延长，其成活率较对照 CO_2 浓度显著降低; 生命表结果表明，CO_2 浓度升高有使 B 型烟粉虱的净增值率降低，世代周期增加的趋势(戈峰等，2010b)。

全球变暖将来可能会通过影响季风活动来影响地球的降雨模式，如华北地区近 30 年气温逐年升高，降雨量持续降低，从而使我国华北和东北南部面临持续干旱的威胁。年降雨量减少所引起的干旱将扰动生态系统的稳定性，使其对有害生物的抵抗力下降，如 2006 年北美山松小蠹虫由于全球气候变化的影响，其累计暴发区已达 130 万 hm^2 (Williams and Liebhold，2002); 遭破坏的大面积森林不仅不能吸收温室气体，树木腐烂还会大量释放温室气体(Kurs *et al.*，2008)。降雨量是影响红火蚁生存的重要因素，干旱条件能降低红火蚁在许多地区生存的可能性，年降雨量少于 510 mm 的地区为不适合红火蚁生存的地区(胡树泉等，2008)。另外，近年来的异常气候如持续干旱等有利于红脂大小蠹种群密度的增加但却引起松树抵抗力下的降低(姚剑等，2008)。渤海湾苹果产区全年降水量大，且一般集中在 6—9 月，这有可能成为限制苹果蠹蛾入侵该地区的重要环境因素。苹果蠹蛾的地理分布还与其生长季节月平均降水量密切相关，在北半球，6—9 月月平均降水量大于 150 mm，会引起初孵幼虫的大量死亡，苹果蠹蛾也很难生存(秦占毅等，2007)。

沈幼莲等(2008)研究发现，温湿度对浙江慈溪市外来入侵昆虫 - 蔗扁蛾的生长发育有着重要的影响，一般在 6—10 月雨水多，空气温湿度大时，蔗扁蛾虫屑排出量大，说明高温湿有利于蔗扁蛾生长发育。入冬以后虫屑减少，说明低温湿导致蔗扁蛾的生长减缓或停滞。刘建宏和叶辉(2006)研究发现，光照强度是影响桔小实蝇飞翔活动昼夜节律的主要因子，在 100 ~ 200 lx 之间对桔小实蝇飞翔活动明显有利，而当光照强度低于 100 lx 或高于 200 lx，桔小实蝇飞翔活动也相应减小。同时，桔小实蝇的趋光性反应因光照强度变化而异，在光线过弱或过强时，均不利于桔小实蝇的飞翔活动，故每天清晨和黄昏出现 2 次飞翔活动高峰。

3　气候变化导致入侵昆虫定殖和传播的原因

生态系统是经过长期进化形成的，系统中的物种经过上百年、上千年的竞争、排斥、适应和互利互助，才形成了现在相互依赖又互相制约的密切关系。从整个生物圈的角度看，全球变化对生物生理生态过程等的影响，使得生物的适宜气候带范围发生改变，这必然会改变物种与资源的分布区域，结果促进了某些外来昆虫的入侵。一般而言，全球气候变化主要通过以下 3 个方面影响入侵昆虫定殖和传播: (1) 气候的变化将对某些昆虫进行重新选择。对某些昆虫而言，气候可能变得更加适宜，而对其他的昆虫则可能变成不适宜的气候条件。对于一些目前受到保护的地区，不稳定的环境条件将增加某些入侵昆虫进入这些地区的可能性。(2) 气候和周围的环境可能改变寄主植物的地理分布，从而使入侵昆虫与不具备抗性的寄主植物发生接触，增加入侵昆虫定殖和传播的机会。(3) 进化的淘汰过程和对新环境的适应性改变将导致入侵昆虫的出现(万方浩等，2011)。因此，全球气候变化对入侵生物的影响可能会出现如下 7 种格局: ① 加速入侵物种的传入与扩散; ② 改变入侵物种的性状和生活史; ③ 增强入侵物种的进化力和可塑性; ④ 改变入侵地物种间的相互关系; ⑤ 改变入侵种的环境限制; ⑥ 降低生态系统的入侵抗性; ⑦ 改变入侵物种的分布等(万方浩等，2011)。

4　气候变化下入侵昆虫的防治对策

目前，生物入侵目前已成为一个影响深远的全球性问题，其对我国的生态系统、环境和社会经济的负面影响日益明显。中国是一个生态环境比较脆弱的国家，而各种极端气候的发生将进一步削弱本地生态系统的抗性，为入侵昆虫创造机会和空间。因此，加强和制定全球气候变化下入侵昆虫的防治对策已成为我国生态安全和农业可持续发展的迫切需求。

未来全球气候变化下入侵昆虫的防治对策可从如下几方面开展研究:(1)政府的管理对策,政府管理能力建设必须加强国家的植物保护和动物检疫系统的服务能力。具体包括改善基础设施、边界控制,更好的立法与执法和更有效的监测;(2)气候因子模拟研究,构建不同全球变化因子的联合研究模型来评价入侵昆虫的影响,因子包括气候变化、CO_2浓度、O_3浓度变化等(Watt *et al.*, 1995; 万方浩等, 2011),这种模型预测的入侵昆虫分布必须与其资源分布范围变化相结合;(3)气候变化下入侵昆虫的生物控制策略,在研究气候变化对我国主要入侵昆虫的入侵与灾变影响机制的基础上,明确抑制入侵昆虫种群增长和暴发的关键时期或发育阶段;(4)气候变化下入侵昆虫的生态控制策略,在基本明确气候变化对我国主要入侵昆虫与入侵生态系统内其他因子互作影响机制的基础上,明确抑制入侵昆虫种群增长和暴发的关键生态因子,建立并提出相应的生态控制策略;(5)气候变化下入侵昆虫的可持续控制途径,针对已暴发成灾和局部发生的入侵昆虫,根据气候变化的针对性预警分析,研究入侵昆虫的生态协同控制作用机制,提出入侵昆虫的可持续控制途径;(6)加强全球变化和生物入侵后果的宣传和警示,使民众意识到人为因素在这两者中的作用。同时,科学家和其他民众应该在政策制定、实施和管理上同政府部门合作,从局部地区到国家范围,来减少环境恶化和生物引入。(7)国际信息共享和交流,加强国家、地区和全球组织的合作,获取气候变化和入侵昆虫所需数据,用来保证国家利益的安全导向。政府机构和利益相关者应该团结起来,共同讨论起草实用的详细计划书和可持续的方法。

参考文献(References)

Andrei VA, Christian M, Russell HM, 2001. Selection of pupation habitats by Oriental fruit fly larvae in the laboratory. *Journal of Insect Bahavior*, 14(1): 57—67.

Baker RHA, Cannon RJC, MacLeod A, 2003. Predicting the potential distribution of alien pests in the UK under global climate change: *Diabrotica virgifera virgifera*. *The BCPC International Congress-Crop Science & Technology* 2005. Congress Proceedings Volume 2. 1201—1208.

Bentz JA, Reeves JI, Barbosa P, Francis B, 1995. Nitrogen fertilizer effect on selection, acceptance, and suitability of *Euphorbia pulcherrima* (Euphorbiaceae) as a host plant to *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Environmental Entomology*, 24 (1): 40—45.

Berlinger MJ, Nina LS, Taylor RAJ, 1996. Survival of *Bemisia tabaci* adults under different climatic conditions. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 80 (3): 511—519.

常晓娜, 高慧璟, 陈法军, 翟保平, 2008. 环境湿度和降雨对昆虫的影响. 生态学杂志, 27(4): 619—625.

陈兵, 康乐, 2002. 南美斑潜蝇在我国的发生趋势和地理差异分析. 植物检疫, 16 (3): 138—140.

陈法军, 翟保平, 张孝羲. 2003. 棉铃虫蛹期土壤水分对其种群发生的影响. 生态学报, 23(1): 112—121.

陈乃中, 施宗伟, 张生芳, 2005. 红火蚁的发生及有关检疫的研究与实践. 植物检疫, 19(2): 90—93.

陈艳华, 2006. 外来入侵害虫烟粉虱的危害与防治. 安徽农学通报, 12(7): 133—134.

程登发, 田喆, 李红梅, 孙京瑞, 陈巨莲, 2002. 温度和湿度对麦长管蚜飞行能力的影响. 昆虫学报, 45: 80—85.

程俊峰, 万方浩, 郭建英, 2006. 入侵昆虫西花蓟马的潜在适生区分析. 昆虫学报, 49(3): 438—446.

崔旭红, 2007. B 型烟粉虱和温室粉虱热胁迫适应性及其分子生态机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院植物保护研究所.

Cui XH, Xie M, Wan FH, 2008. Temperature on survival and fecundity of two whitefly species: *Bemisia tabaci* B – biotype and *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *Scientia Agricultura Sinica*, 41: 424—430.

Drost YC, Van Lenteren JC, Van Roermund HJW, 1998. Life history parameters of different biotypes of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in relation to temperature and host plant: a selective review. *Bulletin of Entomological Research*, 88: 219—229.

Dukes JS, Mooney HA, 1999. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14 (4): 135—139.

杜予州, 顾杰, 郭建波, 戴霖, 鞠瑞亭, 胡学难, 2007. 入侵害虫红火蚁在中国的适生性分布研究. 中国农业科学, 40(1): 99—106.

Gaum WG, Giliomee JH, Pringle KL, 1994. Life history and life tables of western flower thrips, Frankliniella occidentalis (Thysanoptera: Thripidae), on English. *Bulletin of Entomological Research*, 84: 219—224.

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

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

Gomi T，Adachi K，Shimizu A，Tanimoto K，Kawabata E，Takeda M，2009. Northerly shift in voltinism watershed in *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae) along the Japan sea coast: Evidence of global warming? *Applied Entomology and Zoology*，44(3): 357—362.

胡树泉，徐学荣，周卫川，张辉，宁昭玉，2008. **红火蚁在中国的潜在地理分布预测模型. 福建农林大学学报(自然科学版)，**37(2): 205—209.

Hodar JA，Castro J. Zamora R，2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biological Conservation*，110: 123—129.

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.

鞠瑞亭，杜予州，于淦军，龚伟荣，2003a. **蔗扁蛾生物学特性及幼虫耐寒性初步研究. 昆虫知识，**40(3): 255—258.

鞠瑞亭，杜予州，周福才，于淦军，龚伟荣，2003b. **侵入性害虫蔗扁蛾的传播现状. 植物检疫，**17(4): 228—231.

Kenny KK，Lindroth DE，Jung SM，Nordhei EV，1997. Effects of CO_2 and NO_3 availability on deciduous trees: phytoehemistry and insect performance. *Ecology*，78(1): 215—230.

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

Leong ECW，Ho SH，1990. Techniques in the culturing and handling of *Liposcelis entomophila* (Enderlein) (Psocoptera: Liposcelidae). *Journal of Stored Products Research*，26: 87—70.

雷仲仁，朱灿健，张长青，2007，**重大外来入侵害虫三叶斑潜蝇在中国的风险性分析. 植物保护，**33(1): 37—41.

刘建宏，叶辉，2006. **光照、温度和湿度对桔小实蝇飞翔活动的影响. 昆虫知识，**43(2): 211—214.

Logan JA，Powell JA，2001. Ghost forests，global warming，and the mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). *American Entomologist*，47(3): 160—173.

Lu Z，Chen J，Percy RG，Zeiger E. 1997. Photosynthetic rate，stomatal conductance and leaf area in two cotton specieses (*Gossypium barbadense* and *Gosspium hirsutum*) and their relation with heat resistance and yield. *Australian Journal of Plant Physiology*，24(5): 693—700.

McDonald JR，Bale JS，Walters KFA，1997. Low temperature mortality and overwintering of the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Bulletin of Entomological Research*，87(5): 497—505.

Parrella MP，1987. Biology of Liriomyza. *Annual Review of Entomology*，32: 201—224.

Porter J，1995. The effects of climate change on the agricultural environments for crop insect pests with particular reference to the European corn borer and grain maize//Harrington R，Stork NE (eds.). Insect in a Changing Environment. Academic Press. 93—123.

Prange HD，1996. Evaparative cooling in insects. *Journal of Insect Physiology*，42(5): 493—499.

秦占毅，刘生虎，岳彩霞，张家银，2007. **苹果蠹蛾在甘肃敦煌的生物学特性及综合防治技术. 植物检疫，**21(3): 170—171.

Radin JW，Lu Z，Percy RG，Zeiger E，1994. Genetic variability for stomatal conductance in pima cotton and its relations to improvements of heat adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*，91(15): 7217—7221.

Salvucci ME，Wolfe GR，Hendrix DL，1997. Effect of sucrose concentration on carbohydrate metabolism in *Bemisia argentifolii*: biochemical mechanism and physiological role for trehalulose synthesis in the silverleaf whitefly. *Journal of Insect Physiology*，43(5): 457—464.

沈幼莲，劳冲，冯林国，2008. **慈溪市蔗扁蛾生物学特性及防治. 浙江林学院学报，**25(3): 367—370.

Spencer KA，1973. Agromyzidae (Diptera) of economic importance. *Series Entomologica*，9: 201.

Trnka M，Muska F，Semeradova D，Dubrovsky M，Kocmankova E，Zalud Z，2007. European corn borer life stage model: Regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate. *Ecological Modelling*，207(2/4): 61—84.

万方浩，谢丙炎，褚栋，2008. **生物入侵: 管理篇. 北京: 科学出版社.** 1—4.

万方浩，谢丙炎，杨国庆，2011. **入侵生物学. 北京. 科学出版社.** 288—313.

王海鸿，2005. **B 型烟粉虱热休克蛋白基因的克隆和表达及其与胁迫耐受性关系的研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院植物保护研究所.**

王鸿斌，张真，孔祥波，刘随存，沈佐锐，2007. **入侵害虫红脂大小蠹的适生区和适生寄主分析. 林业科学，**43

(10):71—76.

王志明，杜继生，张利军，钟晓巍，皮中庆，2009. **日本松干蚧对东北地区的入侵及其蔓延可能性分析. 中国农学通报，**25(10):107—111.

Watson GW, Malumphy CP, 2004. *Icerya purchasi* Maskell, cottony cushion scale (Hemiptera: Margarodidae), causing damage to ornamental plants growing outdoors in London. *British Journal of Entomology and Natural History*, 17: 105—109.

Watt AD, Whittaker JB, Docherty M, Brooks G, Lindsay E, Salt DT, 1995. The impacts of elevated atmospheric CO_2 on insect herbivores// Harrington R, Stork N E(eds). Insects in A Changing Environment. London: Academic Press. 197—217.

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

Williams RS, Lincoln DE, Norby RJ, 1998. Leaf age effects of elevated CO_2-grown white oak leaves on spring-feeding lepidopterans. *Global Change Biology*, 4(3):235—246.

Yamanaka T, Tatsuki S, Shimada M, 2008. Adaptation to the new land or effect of global warming? An age-structured model for rapid voltinism change in an alien lepidopteran pest. *Journal of Animal Ecology*, 77(3):585—596.

姚剑，张龙娃，余晓峰，2008. **入侵害虫红脂大小蠹的研究进展. 安徽农业大学学报，**35(3):416—420.

Zhao YX, Kang L, 2000. Cold tolerance of the leafminer *Liriomyza sativae* (Dipt., Agromyzidae). *Journal of Applied Entomology*, 124(3/4):185—189.

周亦红，姜卫华，赵志模，邓新平，2001. **温度对美洲斑潜蝇及南美斑潜蝇种群增长的影响. 生态学报，**21(8):1276—1284.