

气候变化与生物灾害研究述评

(张国庆)

(安徽省潜山县林业局 安徽 246300)

摘要: 本文分析了我国气候变暖的特点,总结了气候变暖对生物灾害的影响机理和研究方法,并据此提出了应对对策。

关键词: 气候变暖;生物灾害;生态健康;GCSP管理;双精管理

1.全球气候变暖

全球大气CO₂浓度从1750年工业化开始的约280ppm增加到2005年的379ppm,近10年大气CO₂浓度以1.8ppm/年的速率增长,远高于过去50年1ppm/年的平均增幅。由于温室效应,全球平均温度比工业化前上升了2~4.5℃,以百年为单位计算,近100年来升高了0.6±0.2℃,升温幅度大于过去1000年以来的任何时候。自1850年以来,根据全球地表温度的器测,最近100年(1906年~2005年)的温度线性趋势为0.74℃(0.56℃~0.92℃),全球温度普遍升高,在北半球高纬度地区温度升幅较大,陆地区域的变暖速率比海洋快[1],如图1所示。

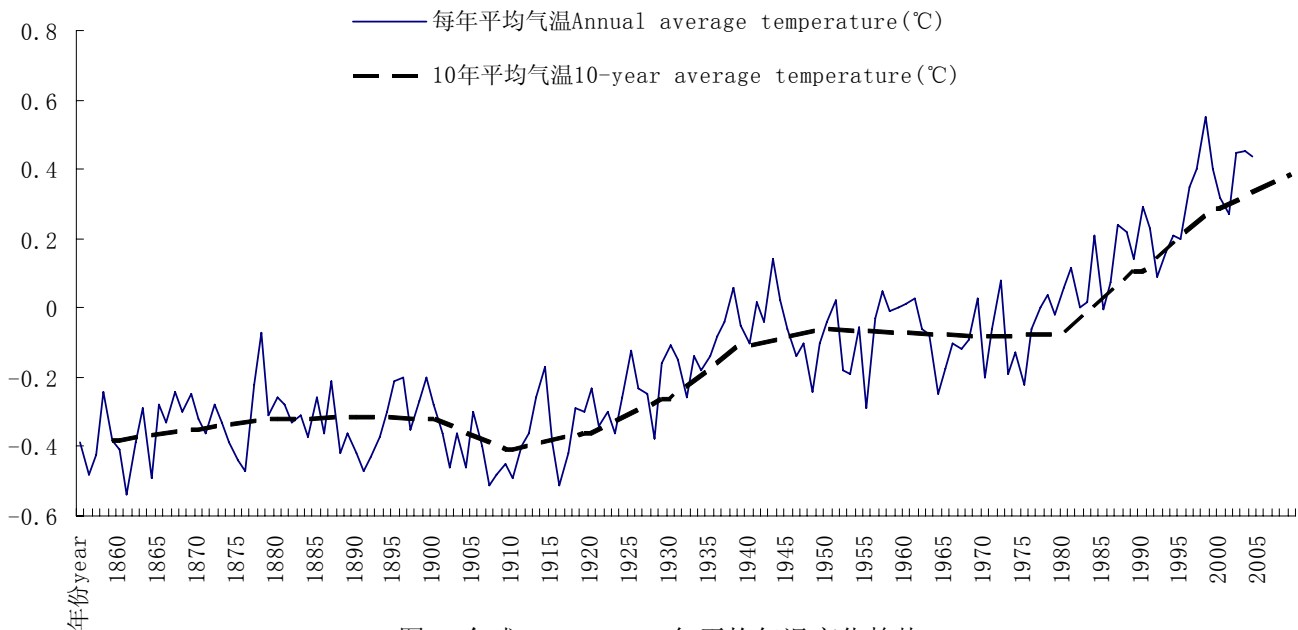


图1 全球1850~2010年平均气温变化趋势

Fig.1 Global 1850-2010 average temperature change trend

我国是全球气候变暖最显著的国家之一。近百年来,平均气温升高0.65±0.15℃,比全

球略高；最近 50 年来，我国气温增速（ $0.22^{\circ}\text{C}/10$ 年）明显高于全球或北半球（ $0.07^{\circ}\text{C}/10$ 年），从 1986 年至今，已经经历了 20 余个暖年，特别是 2001、2002、2006、2007、2010 年广大北方地区的气温一次次冲破已有的气象记录，成为 50 多年来最热的年份。

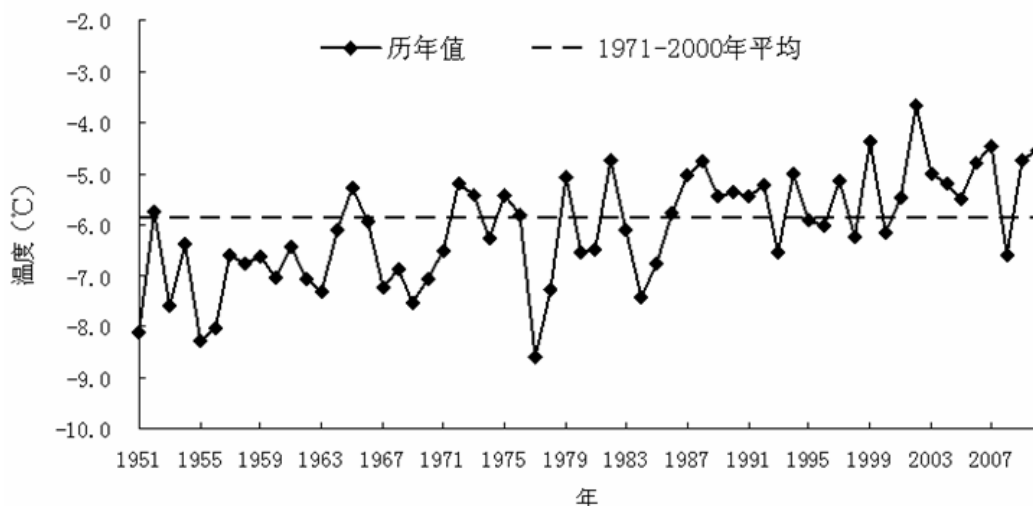


图 2 1951~2010 年 1 月全国平均气温历年变化

Fig.2 January of 1951~2010 the average temperatures over the changes

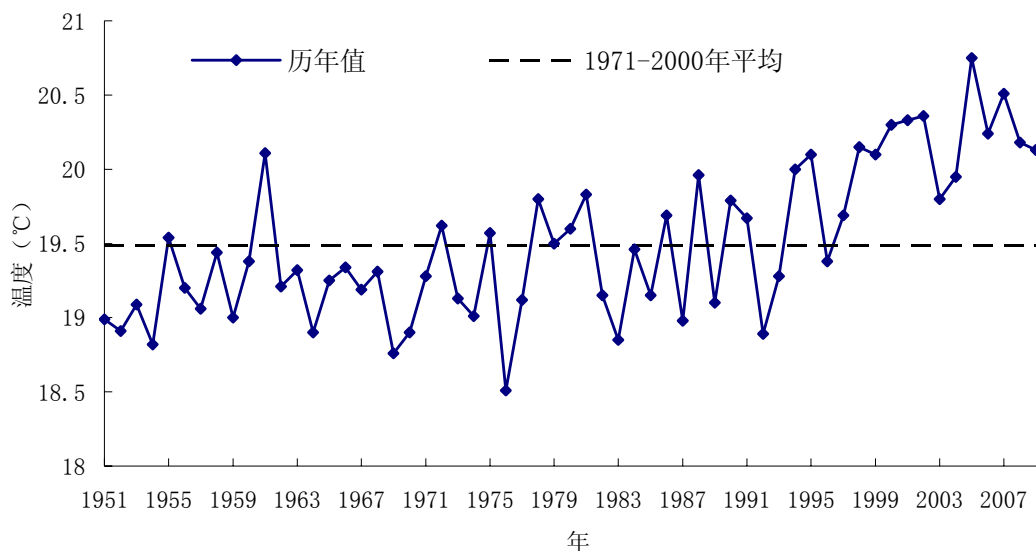


图 3 1951~2010 年 6 月全国平均气温历年变化

Fig.3 June of 1951~2010 the average temperatures over the changes

据国家气候中心统计数据表明，在我国，全国月平均气温冬、夏两季气温增高明显，其他月份则不十分明显。中国西北、华北和东北等北方地区气候变暖明显高于长江以南地区，春季（3~6 月）气候变暖显著高于夏季（7~9 月）[2~5]。而在长江中下游地区，则主要表现为冬季气温升高[6]。

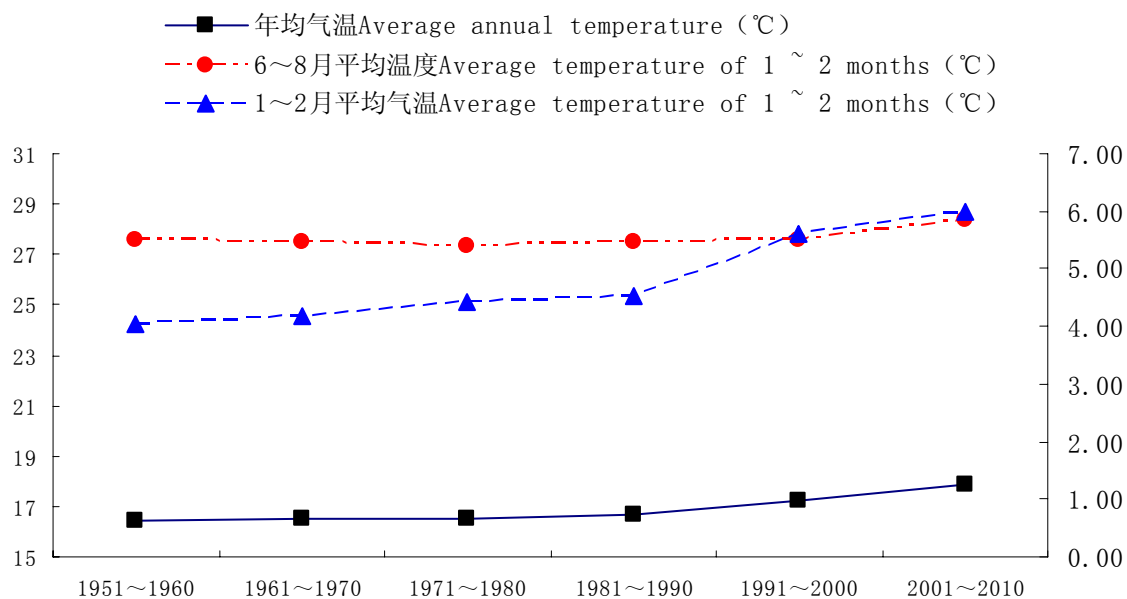


图4 潜山 60a 气温变化情况

Fig.4 Temperature changes in 60 years

气候变暖不仅体现在平均温度的升高上,更表现在与极端气候事件如热昼、热夜和热浪等密切相关的极端气温的变化上,最高温度、最低温度均升高,且最低温度升高更显著,昼夜温差变小,高纬度凉爽地区增暖更明显[3]。

据IPCC排放情景特别报告(SRES, 2000)预估,若到2030年及以后,在全球混合能源结构配置中化石燃料仍保持其主导地位,全球温室气体排放量在2000年至2030年期间则会增加25%~90%(CO₂当量)。因此,全球变暖的趋势还在不断发展,IPCC(2007)报告中预估未来20年每10年上升0.2°C,21世纪末全球平均地表气温可能升高1.1~6.4°C。我国气候将继续变暖,尤以冬半年、北方为显著。与1961~1990年30年的平均值相比,到2020年我国年平均气温将升高1.3~2.1°C,2030年升高1.5~2.8°C,2050年升高2.3~3.3°C,2100年升高3.9~6.0°C。2020年最大增温区域在华北、西北和东北的北部,增温幅度为0.6~2.1°C。受气候变暖影响,我国日最高和最低气温都将上升,但最低温增幅较最高温增幅大,冬季极冷期可能缩短,夏季的炎热期可能延长,极端高温、热浪、干旱等气象灾害将愈发频繁[2]。

2.气候变暖对生物灾害发生的影响

据目前研究资料分析,气候变暖,以及ENSO(El Nino & southern oscillation,厄尔尼诺-南方涛动)等其他气候事件,对生物灾害的发生,都有明显的相关性,其中尤以气候变暖最为明显。

生态学研究证明,由范霍夫定律(Vant hoff's Law)可知,气候变暖,使有害生物体内生理过程加快,适生期延长,加快了有害生物发育速率,增强了生殖力,增加了存活率尤其是越冬基数,直接导致其始见期、迁飞期、种群高峰期提前,世代数增加,发生程度加重,暴发周期缩短。气候变暖,还使有害生物发生区域北移和向高海拔区蔓延,扩大了有害生物适生区域。由于气候异常,气象灾害增加,导致生态系统健康水平下降,天敌种群数量下降,有利于有害生物的发生成灾。气候变暖,还使寄主发生变化,有害生物也随之调整寄生关系。

上述因素的综合作用,还会导致有害生物种群的基因组成发生变化,并有可能产生不可逆的进化适应(evolutionary adaptation)。

2.1 拓宽了有害生物适生区

气候变暖,拓宽了有害生物的适生区,使得发生范围扩大,向高海拔区和两极方向扩展。如果没有暖冬,在一般情况下,一些有害生物在越冬时,会因为极端低温而导致种群密度急剧下降,次年不会产生灾害。而由于暖冬,导致越冬基数逐年增加,从而产生危害。

据张国庆研究,安徽省潜山县在1951~2010年间,马尾松毛虫(*Dendrolimus punctatus*)垂直发生范围上限由海拔300m提高到750m,水平范围沿东经116°34'45"向深山区延伸了21km,年发生面积 y 与1~2月份平均气温为 x_1 、1~2月份最低气温为 x_2 高度正相关,关系为 $y=16508.4225913621+1289.54817275747x_2$ ($r=0.847738170212387$, $F=5.10883641577838$) [6]。赵铁良、耿海东、张旭东、方国飞、王玉玲、赵清山根据1961年到2001年的历史资料研究表明,冬季温度偏高的年份,病虫害发生严重,其线性相关关系达到0.6684,全国病虫害发生总面积与冬季平均温度追随作用明显,模糊贴近度达到0.6607[11]。气候变暖,使得我国粘虫(*Mythimna separata*)越冬北界北移1个纬距[7],稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medialis*)越冬北界北移1~2个纬度[8],稻飞虱越冬北界北移1~2个纬度[9]。在热带、亚热带地区常见的白蚁,危害范围逐渐北扩,2005年在山西省垣曲、沁水等地大暴发[10],以及北京、天津等地也有危害[11]。东南丘陵松树上常见的松瘤象(*Hyposipalus gigas*)、松褐天牛(*Monochamus alternatus*)、横坑切梢小蠹(*Blastophagus minor*)、纵坑切梢小蠹(*Blastophagus piniperda*)已在辽宁、吉林,尤其是云南和四川等省危害严重。粗鞘杉天牛(*Semanotus sinoauster*)逐渐向北扩散至河北、山东和辽宁[11]。

在日本,1960~2000年期间,由于温度升高,日本主要水稻害虫稻绿蝽(*Nezara viridula*)的分布北界北移了70km(约0.6°N)[12],二化螟(*Chilo suppressalis*)分布北界将北移300km。黑腹果蝇(*Drosophila melanogaster*)的耐热种群在澳大利亚东部沿海地区分布提高了4个纬度梯度[13]。

气候变暖,使有害生物栖息地面积扩大,或者寄主丰度增加,造成有害生物发生范围扩大。由于气温升高导致海平面升高,栖息于海藻深处的海藻蝇(*Coelopa pilipes*)可能偏向更北部与西部的挪威与苏格兰奥克尼群岛分布[14]。在挪威每个纬度上最低和最高温度升高0.1℃的模拟气候情景下,苹果蠹蛾(*Cydia pomonella*)将在23个新的地区定殖[15]。在爱沙尼亚,原来分布于温带的大鳞翅类昆虫(*Macrolepidoptera*)入侵到北部地区并定殖[16]。气候变暖还导致俄罗斯西部平原的北部针叶林地带的昼出性鳞翅类昆虫中南方侵入种的比例增加[17]。

冬温升高的趋势使农作物病虫害的越冬条件变优,一方面造成主要农作物病虫害越冬基数增加、越冬死亡率降低、次年病虫害加重;另一方面造成病虫害发生期提前,发生早,危害期延长,危害程度加重,造成虫害偏重及大流行趋势。冬季温度的趋暖变化使迁飞性害虫越冬区北移,越冬区扩大,稻飞虱安全越冬北界将由22°N推向23°~24°N,同时使春季害虫向北迁飞期普遍提早,由于气温上升的幅度由南向北增大,气温的南北纬向差将缩小,导致稻飞虱等迁飞性害虫危害的范围更大,危害期延长,危害程度加重。暖冬对早春病害发生也有重要影响,暖冬使病菌进入越冬阶段推迟,延长病菌的冬前发展时期,有利于其侵染繁殖,春季若气温回升快,病菌潜育期缩短,病情发展快,尤其是对早春发病的病害影响最大,如受1998~1999年暖冬的影响,1999年江淮麦区纹枯病发生早,病情重,小麦白粉病在大部分麦区发生早,上升快,范围扩大,病情普遍[119]。

2.2 提高了有害生物发育速率

温度是决定有害生物生长发育速率最重要的因子,气候变暖使得有害生物适生期延长,加快了有害生物发育速率,导致其始见期、迁飞期、种群高峰期提前,世代数增加。由于气温升高,一些有害生物越冬迟,出蛰早,危害加重。

张国庆通过对20世纪80年代安徽省潜山县的森林病虫害普查数据、有关马尾松毛虫科研

项目资料和20世纪90年代的灯光诱蛾、21世纪前10年的灯光诱蛾监测、性诱剂监测、中心测报点标准地监测数据分析, 研究发现, 马尾松毛虫的发生期随着气温的上升而提前。在20世纪80年代初, 马尾松毛虫 (*Dendrolimus punctatus*) 越冬代成虫初见期在5月18日左右, 到了21世纪初, 则提前到了4月28日左右。发生期提前时间最多的是越冬代, 其次是第一代, 然后是第二代, 依次逐代减少, 这与潜山县的气温变化是一致的[6]。

欧洲蝴蝶监测计划 BMS (Butterfly Monitoring Schemes) 鉴于蝴蝶对温度变化的敏感性, 将蝴蝶作为研究气候变化对动物区系影响的指示物种开展研究[18~28]。由于春季温度升高, 西班牙地中海盆地西北部 19 种最常见蝴蝶中有 17 种蝴蝶首次出现时间提前, 小赭弄蝶 (*Ochlodes venata*)、琉璃灰蝶 (*Celastrina argiolus*) 等 5 种蝴蝶始见期提前了 7~49d, 暗脉菜粉蝶 (*Pieris napi*) 等 8 种蝴蝶种群高峰期提前了 7~35d[29]。英国 35 种主要蝴蝶中约有 30 种始见期与种群高峰期提前 2~10d[22]。英国洛桑 1964 年以来以吸捕器 (suction trap) 的虫情数据研究表明, 冬季均温上升 1℃, 云杉高蚜 (*Elatobium abietinum*)、杏圆尾蚜 (*Brachycaudus helichrysi*)、麦无网长管蚜 (*Metopolophium dirhodum*)、麦长管蚜 (*Sitobion avenae*) 和桃蚜 (*Myzus persicae*) 的迁飞期提前 3~9d, 当冬季均温升高 1.5~2.1℃时, 5 种蚜虫迁飞期提前 4~19d[3, 30]。

任何生物都有其生存的最适温度范围, 温度的变化必然会引起昆虫的生态和生物学策略的改变。由于气候变暖, 有效积温增加, 森林植物物候提前, 这使得病虫害发生期相应提前, 世代数相应增加。在 1972 年至 2002 年的 30a 间, 在广东潮安, 过去一般以 3 代幼虫越冬的松毛虫, 近年来却出现 3、4 代幼虫重叠越冬的现象。美国白蛾 (*Hlyphantria cunea*) 在辽宁一般 1a2 代, 在辽西、辽南个别年份, 也曾出现过第 3 代幼虫, 但多数于 5 龄左右死亡, 不能完成世代。1994 年, 该省温度偏高, 在锦州出现完整的 3 代。近年来, 在河北和天津市美国白蛾都已陆续出现完整的 3 代[11]。

发生期的提前, 再加上暖冬造成越冬基数逐年增多, 还使一些周期暴发性有害生物暴发周期缩短。张国庆对 1952 年~2010 年安徽省潜山县马尾松毛虫 (*Dendrolimus punctatus* Walker) 年发生面积分析表明, 1973 年之前暴发周期为 10a, 1973 年以后, 暴发周期缩短为 3~5 年, 如图 5 所示。

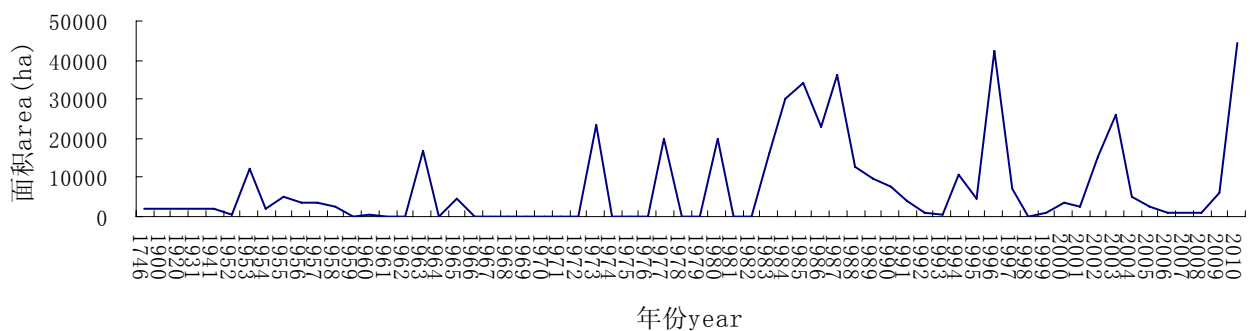


图 5 潜山县马尾松毛虫发生周期

Fig.5 Qianshan *Dendrolimus punctatus* cycle occurs

天幕毛虫 (*Malacosoma neustria testacea*) 的暴发周期一般为 14~15a, 由于气候变暖, 牡丹江地区在 1971 年、1985 年、1995 年大发生, 吉林白城地区在 1965 年、1974 年、1984 年、2002 年相继大发生, 暴发周期明显缩短[11]。

气候变暖对有害生物发生期、种群动态造成直接影响的基础, 是温度升高改变了有害生物发育历期、繁殖力及存活率等重要生命参数。气候变暖的特征主要表现在均温升高、极端气温升高和昼夜温差变化等方面[3]。

通过模拟最高温度变化对蚜虫发育和生殖影响的试验表明,日最高温度超过 29℃的周期性变温,明显降低麦无网长管蚜 (*Metopolophium dirhodum*) 的终生生殖量和寿命,在 32.5℃下暴露 4h 以上时,麦无网长管蚜存活率显著降低,并且成蚜较若蚜对高温的耐受性差,高温作用时间对 4 龄若蚜和成蚜的存活有显著影响[3, 42]。高温处理时间越长,禾谷缢管蚜 (*Rhopalosiphum padi*) 成虫寿命、繁殖速率、生殖力下降越快,当 35℃持续 2 个小时,禾谷缢管蚜存活率显著下降[3, 43]。平均温度不变,昼夜温差较大时松针粉大蚜 (*Schizolachnus pineti*) 生殖力较高,昼夜温差为 12℃时,松针粉大蚜平均每雌生殖力为 50 头左右,而昼夜温差为 8℃时,松针粉大蚜的平均每雌产仔量仅为 30 头[3, 44]。

2.3 增加了生物灾害发生频率

由于气候异常,气象灾害增加,导致生态系统健康水平下降,天敌种群数量下降,抗生物灾害能力和恢复力降低,这样不但有利于常发性有害生物滋生繁衍,还为次要有害生物发生发展提供了良好的环境条件,从而缩短了有害生物暴发周期,增加了有害生物发生的种类,提高了生物灾害发生的频率。

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;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[120]。

据张国庆对安徽省潜山县1950~2010年林业生物灾害发生数据分析,20世纪80年代之前,对潜山县造成灾害的林业有害生物只有3种,而进入21世纪则达到了15种。通过1980年和2004年两次林业有害生物普查,1980年潜山县林业有害生物571种,2004年增加到785种;1980年安徽省林业有害生物777种,2004年增加到2047种[31~34]。

20世纪90年代以来,我国林业生物灾害发生面积一直高于近40a来的平均水平。气候变暖一方面虽然促进树木生长和森林恢复,另一方面却导致了树木变脆易折、抗干旱和抗病虫的能力下降,并且严重影响苗木生长和保存率,增加了林业生物灾害成灾的频率。据全国森林病虫害发生统计表显示,近10a来我国森林病虫害发生面积呈逐年上升趋势,其中年平均气温是影响森林病虫害发生的一个主要因子,其线性回归系数 $R=0.5516 (>0.393, \alpha=0.01)$,表现出极为显著的相关水平,森林病虫害发生面积与年均温度变化曲线的模糊贴近度达到0.6187。1998年12月~1999年2月的暖冬、干旱、倒春寒,使得杨树烂皮病在北方城市暴发成灾[11]。

极端气候事件,降低了森林健康水平,导致林业生物灾害发生面积增加。2008年初的南方冰雪灾害使近1733.33万 hm^2 的森林受损,2008年的10月下旬至2009年波及我国15省市的严重干旱使786.67万 hm^2 森林受害,导致林业生物灾害面积明显增加[10]。

2009年9月至2010年5月的西南持续干旱,导致森林火灾频发,仅2009年10月~2010年2月,云南、贵州、广西、四川和重庆5省(区市)发生森林火灾2351起,受害森林面积7091公顷,因灾造成31人受伤,14人死亡。这次持续干旱,导致云南省约50万 hm^2 自然保护区受到影响,重旱面积约0.67万 hm^2 ,云南生物多样性受损严重,旱灾的损害影响在短期内无法恢复,有的甚至具有不可逆转性。持续干旱导致部分面积较小、生态脆弱的自然保护区及其周边水源枯竭、湿地面积缩小,野生动植物生存和栖息环境受严重影响,致使昭通市巧家县药山国家级自然保护区内攀枝花苏铁 (*Cycas panzhihuaensis* L. Zhou et S. Y. Yang) 大面积死亡,大量两栖类动物死亡,候鸟提前北迁,动物感染疾病传播疫病的可能性增大。这次持续干旱,云南省林业有害生物发生面积22.92万 hm^2 ,其中中度以上危害面积11.34万 hm^2 ,与常年相比,发生面积上升71.9%。

此外,气候变化导致ENSO事件频繁发生。ENSO事件的发生,意味着降水和温度的变化。毕晓丽、徐永兴、洪伟、吴承祯、闫淑君等对福建省马尾松毛虫发生与ENSO事件关联的进行了研究,发现ENSO事件引起降水和温度因子变化,改变了福建省马尾松毛虫的生存条件、栖息环境和资源的波动,有利于马尾松毛虫生长、发育、繁殖、迁徙,高温、高湿加速了马尾松毛虫的发育,使其危害的范围扩大,程度加剧[90]。吴承祯、洪伟、翁少容对福建省连江县1960年~1980年马尾松毛虫发生数据分析和马尾松毛虫发生发展规律的研究,ENSO事件对马尾松毛虫发生的影响机制主要是,低纬地区特别是中南半岛等国家秋、冬季气候有明显的影 响,有利于马尾松毛虫的发育和繁殖;ENSO事件的发生,直接影响到副热带高压带位置的季节变化,使我国高空环流形势有利于虫源的扩散和迁入;ENSO事件发生影响了我国气候,使之有利于马尾松毛虫的世代发生演替,导致猖獗发生[91]。据张知彬、王祖望研究,ENSO现象对有害生物种群的暴发起着重要作用,主要是通过造成的全球气候异常,在特定地区大范围内形成有利于有害生物大量集群或繁殖的生理生态条件,从而形成生物灾害。由于长期的适应和进化,某些有害生物有可能对ENSO具有先天性反应,类似对光照周期的反应,以利于生物扩大种群及生存空间,取得竞争优势[92]。

海洋是造成长期天气异常最可能的热源,海温异常对大气运动的影响有一定的滞后过程,并可以造成未来大范围甚至全球的天气气候变化,进而影响到生物灾害的发生与流行。研究表明,赤道东太平洋海温在长江流域小麦赤霉病大流行年的上一年为正距平,在轻发生年的上一年为负距平。通过对三代玉米螟(*Pyrausta nubilalis*)发生程度和卵峰日、粘虫的发生量、迁入期和发生程度、棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)发生程度、早稻白背飞虱(*Sogatella furcifera*)发生量、粘虫(*Mythimna separata*)发生级别、小麦条锈病的发生与流行等与太平洋海温的相关研究,大多研究得到了各自对应的显著相关区域或主要相关因子或预测因子[107~118]。

2.4 加快了有害生物种群增长

气候变暖对有害生物的发育速率、生殖力和存活率等种群数量构成的关键因子产生重大影响,导致种群数量发生变化。

气候变暖使高温适生昆虫的种群密度增加。意大利北部 Modena 近 15 年的冬季均温都超过 5℃,茶色缘蝽(*Arocatus melanocephalus*)的越冬存活率增加,春季温度升高又导致越冬代成虫生殖力增加,促进了其种群密度增加[35]。气候变暖还增加了昆虫发生季的有效积温,从而导致许多昆虫发生世代数增加及种群密度增大,如日本稻灰飞虱(*L.striatellus*)、荷兰瑞士等地的葡萄小卷叶蛾(*Paralobesia viteana*)、巴西的咖啡潜叶蛾(*Leucoptera coffeella*)以及我国的美国白蛾(*Hlyphantria cunea*)等昆虫都随气温升高而增加了发生世代数[3, 11, 35~39]。

但是,气候变暖,也会使某些低温适生种的种群逐渐萎缩,种群密度下降。1968~1998年春季温度逐年升高,英国豹灯蛾(*Arctia caja*)在7月至8月累积诱捕量,各站点平均值由1983年之前的4.2头下降到1984年之后的3头,平均下降了28.6%[2, 40]。在气候变暖情景下,英国南部9种麦蚜的种群动态预测表明,到2080年夏季,由于温度升高,麦蚜种群密度急剧减少[3, 41]。

2.5 对有害生物生理的影响

气候变暖对有害生物产生影响的生态学和分子机制,是气候变化对生物体带来的强烈选择压力,导致有害生物种群的基因组成发生变化[3]。

为了适应气候变暖,昆虫体内某些染色体或基因发生变异以增加自身的耐热性,且变异频率与温度增加幅度呈正相关。生活于森林的果蝇(*Drosophila robusta*)中基因组产生倒位(inversion)的遗传变异,基因组2L-1和3R-1排列出现频率的增加[45]。经24年研究发现,欧洲、南美洲和北美洲不同纬度地区21种不同地理品系的果蝇(*Drosophila subobscura*),

其染色体 ChPC1 倒位的频率逐年增加,且温度越高的地区倒位频率越高[3, 46]。美国美加柳叶甲 (*Chrysomela aeneicollis*) 在较热年份 Pgi-1 等位基因出现频率增加了 11%。由于地处高纬度的澳大利亚东部沿海地区温度的升高,导致分布于低纬度热带地区的黑腹果蝇 (*D.melanogaster*)耐热种群关联的乙醇脱氢酶等位基因 Adhs 在高纬度种群中的出现频率增加[3, 47]。

2.6 改变了种群间的关系

气候变暖下物种适热性差异,导致有害生物与寄主植物同步性改变[3]。

温度升高除了直接影响昆虫的生长发育和生存繁殖外,同时也影响寄主植物的生长发育进度,由于昆虫和植物对温度升高的反应差异,常导致昆虫与寄主植物在物候同步性改变,从而影响昆虫的正常取食并进一步影响其种群发展。随着气候变暖,多种森林昆虫幼虫孵化期提前,而树木发芽时间并无同步变化,如气温升高导致冬尺蠖 (*Operophtera brumata*)、云杉芽卷蛾 (*Choristoneura Occidentalis*) 幼虫提前孵化无嫩芽取食而死亡[3, 48, 49],昆虫和寄主植物同步性的消弱最终导致昆虫死亡[3, 50~52]。

有些昆虫对寄主植物的同步性的消弱有很强的适应能力,美国北部云杉色卷蛾 (*Choristoneura fumiferana*)、新西兰冬尺蠖 (*O.brumata*) 分别通过延长幼虫越冬休眠时间和推迟卵的孵化期来恢复与寄主植物的同步性[3, 53]。

气候变暖影响植食性昆虫的寄主植物范围,改变植食性昆虫的寄主植物种类和取食的植物器官。温度升高,昆虫将向原来温度较低的区域扩散,而昆虫的寄主植物相对昆虫扩散较慢,扩散到新区域的昆虫转向取食新环境的植物。气候变暖导致松异舟蛾 (*Thaumetopoea pityocampa*) 由取食奥地利黑松 (*Pinus nigra*) 转向取食生长于更高海拔的樟子松 (*Pinus sylvestris*) [54, 55],温度升高使白钩蛱蝶 (*Polygonia c-album*) 在原来的寄主啤酒花 (*Humulus lupulus*) 上存活率显著下降,而在新寄主榆树 (*Ulmus glabra*) 与荨麻 (*Urtica dioica*) 上的生物学表现比原寄主植物更好,促进了种群新领地的拓展[3, 24, 25, 28]。

由于气候变暖导致幼虫孵化期与寄主植物柳树发芽期的同步性减弱,木虱 (*Cacopsylla groenlandica*) 的寄主范围由一种柳树扩增到四种柳树[56],格陵兰岛同一纬度的木虱 (*C.groenlandica*) 和挪威阿尔卑斯山同一海拔的木虱 (*C.propinqua*) 由原来只取食柳絮变为既可取食柳絮也可取食叶片[3, 24, 25, 28]。

气候变暖导致昆虫的取食为害程度发生变化。昆虫的取食总量和取食速率和温度密切相关。气候变暖使芬兰芬诺斯坎底亚地区南部的桦树叶片受害率增加,但是每片树叶的平均取食量并未显著增加[3, 57]。但模拟荷兰 Wageningen 的气候变暖导致的水温增加情景,水螟 (*Cataclysta lemnata*) 幼虫对浮萍的取食率下降,浮萍干物质积累速率增加,水螟对浮萍的为害降低。气候变暖使寄主植物中 C/N 比增大而营养质量下降,昆虫的取食量增大以满足自身生长发育的营养需求[58~60],但同时,气候变暖在一定程度上使昆虫的发育历期缩短,为害期也缩短,且寄主植物自身对气候变暖也有适应性变化。

气候变暖改变原有种间竞争关系。研究气候变暖情况下,昆虫的分布与丰富度变化必需考虑昆虫的种间关系[61, 62]。稻绿蝽 (*N.viridula*) 分布在热带、亚热带及温带地区,而其近缘种花角绿蝽 (*N.antennata*) 主要分布于日本、韩国及东南亚国家,由于温暖环境下 *N.viridula* 的潜在繁殖力比花角绿蝽 *N.antennata* 强,根据气候情景当温度升高 1.4~5.8℃ 时, *N.antennata* 可能被 *N.viridula* 替代[63]。气候变暖还可通过影响昆虫共生真菌而削弱昆虫对环境的适应性, *Grosmannia clavigera* 与 *Ophiostoma montium* 为中欧山松大小蠹 (*Dendroctonus ponderosae*) 的 2 种共生真菌, 25℃ 下 *Grosmannia clavigera* 为优势种, 32℃ 以上 *Ophiostoma montium* 为优势种,适宜的温度有利于 2 种真菌与小蠹长期稳定的互惠共生,而气候变暖将导致小蠹上其中一种或者两种真菌都灭绝,打破了共生关系减弱了小蠹对环境变化的适应性[64]。

气候变化会引起种植制度变化,在安徽省,当年平均气温每升高 1°C 时,种植制度大约可向北推移 268 km,向东推移 306 km,向高推移 236m,全省的一年三熟区可由沿 $30^{\circ} 30' \text{N}$ 一带推至 33°N 一带。种植制度的变化使病虫害的生存环境得到较大改善,更有利于病虫害的发生和为害[119]。

3.研究方法述评

目前,气候变化对生物灾害的影响研究,主要采取数学模型分析、人工模拟气温升高研究、分子标记、利用化石研究等方法,其中采取最多的,还是利用现有历史数据,建立数学模型,分析研究气候变化对生物灾害的影响。

3.1 建立数学模型

(1) 建立温度-发生量模型

将发生情况和温度历史数据构建的温度-发生量温度关联模型。如 Yamamura et al. (2006) 利用日本水稻二化螟、叶蝉、灰飞虱 1949~2001 年(5~9 月)的灯光诱捕数据,建立了未来 3 种害虫的种群数量和冬季均温(11~4 月)和夏季均温(5~10 月)之间的回归模型,根据 MRI-CGCM2 气候情景得到 2031~2050 年日本的冬季均温和夏季均温,预测 2031~2050 年水稻二化螟、叶蝉与灰飞虱每年种群数量将在 1981~2000 年的基础上增加[36]。

(2) 建立有效积温模型

建立昆虫发育的有效积温模型,分析生物灾害发生情况。Morimoto et al. (1998) 从自动气象数据获取系统 AMeDAS 收集了日本 1986~1995 年逐时温度数据,建立了有效积温与昼长为自变量的模型,预测 IS92 气候情景 2100 年温度升高 2°C 时,二化螟等 4 种害虫在日本的发生世代数增加,分布北移[65]。Ghini et al. (2008) 通过 GIS 对巴西地形进行分块,利用 1961~1990 年每月大气及土壤平均温度等数据,在区域性合作(A2)和区域性生态环境的改善(B2)气候情景下,根据有效积温模型预测 2010~2039 年、2040~2069 年和 2070~2099 年咖啡潜叶蛾(*Leucoptera coffeella*) 在巴西发生世代数增加[39]。Bryant et al. (2002) 通过田间和实验室试验,获得荨麻蛱蝶(*Aglais urticae*)、孔雀蛱蝶(*Junonia almana*)及白钩蛱蝶(*Polygonia c-album*) 的发育历期、发育起始温度及有效积温,建立日度模型(degree-day model)与发育速率累积模型(rate summation model),并根据 128 个气象站的数据建立了 3 种蝴蝶在英国的分布模型,预测气候变暖下这 3 种蝴蝶发生世代数增加,分布北移[23]。Robinet et al. (2007) 还基于松异舟蛾在巢内温度 9°C 以上、巢外最低温为 0°C 以上时幼虫取食,反之则不取食的习性,利用 1992~1996 年、2001~2004 年松异舟蛾幼虫每年取食天数与不取食的最长天数及相对应的气象数据建立模型,结合 Météo-France'ARPEGE-Climat'气候情景,预测 2001~2030 年、2031~2060 年温度将不再是限制松异舟蛾在法国巴黎盆地分布的限制因子[66]。

(3) 发生期分析

通过收集历史气候及虫情数据,选择合适的数学表达式,建立有害生物发生期或种群密度等与同期气候数据之间的关联模型,再利用模型计算人为假设温度升高条件下昆虫的迁飞期、始见期、种群高峰期及种群密度等。Zhou et al. (1995) 从洛桑昆虫监测数据库中获取了英国 20 余个不同站点诱捕器中 1964~1991 年的麦长管蚜(*Sitobion avenae*)和桃蚜(*Myzus persicae*) 等 5 种蚜虫的诱捕日期及相应捕获数量,并从气象站得到每个站点的温度数据,建立了每种蚜虫诱捕量占翅蚜总诱捕量的 5%、25%、50%、75%、95%时的日期与 1~2 月、6~7 月平均温度、诱捕站点纬度和经度的多元线性回归模型,预测冬季气温升高 1°C 条件下 5 种蚜虫迁飞期的提前 4~19 天[30]。Stefanescu et al. (2003) 以西班牙 19 种蝴蝶 1988~2002 年虫情监测数据和相应的气象数据为基础,建立了蝴蝶始见期及高峰期与温度的回归模型,分析发现蝴蝶始见期与高峰期的提前与近 20 年 2 月, 3 月, 6 月均温升高相关[29]。

Conrad et al. (2002) 根据英国 1968~1998 年诱捕器中豹灯蛾 (*Arctia caja*) 成虫数量和气候数据, 建立了以豹灯蛾 (*Arctia caja*) 成虫上年数量和上年 12 月至当年 2 月冬季降水量及当年 3 月至 5 月平均温度为自变量, 当年豹灯蛾 (*Arctia caja*) 成虫数量为因变量的多元回归模型, 预测出气候变暖豹灯蛾 (*Arctia caja*) 种群密度减少[40]。

(4) 利用专业软件分析

CLIMEX 是用来预测气候变暖条件下昆虫分布的常用软件, 适用于昆虫地理分布和相对丰盛度主要取决于气候因子的分析。GIS 等软件也是研究气候变暖对害虫影响的重要工具, 适用于气候变暖条件下害虫的风险评估、显示害虫空间分布动态和害虫发生趋势预测等方面的研究。Battisti et al. (2005) 通过收集法国北部和意大利北部 1972 年~2004 年的气候数据与松异舟蛾暴发的经度纬度等数据形成 GIS 地图得出: 气候变暖将导致松异舟蛾在法国北部分布北界北移 87km, 在意大利北部分布海拔上升 110~230m[67]。Hagen et al. (2007) 对挪威北部沿海桦树林冬尺蠖 (*O. brumata*) 暴发区域进行航 8 测, 获得了带有记录时间的数字图片, 用 GPS-Photo Link 软件将航迹同步拟合形成 GIS 地图, 通过对地图及数据分析得出冬季平均温度增加导致冬尺蠖为害形成的桦树落叶带的海拔增加, 由此预测气候变暖冬尺蠖可能在更高海拔的地区暴发[68, 69]。Merrill et al. (2008) 在西班牙中部瓜达拉马山利用手持式 GARMIN GPS 装置记录山脉横断面 UTM 坐标绘制 GIS 图, 通过线性回归预测气候变暖绢粉蝶 (*Aporia crataegi*) 分布海拔升高[70]。

3.2 人工模拟温度升高研究

陈瑜 (2009) 进行模拟气候对麦长管蚜 (*Sitobion avenae*) 发育和繁殖的影响, 设置不同日最低温的高温变温模式, 模拟气候变暖下小麦物候变化对麦蚜发育、存活及繁殖的影响, 采取以空间梯度替代时间延展的策略, 系统调查采集新疆塔城、山西临汾、北京、河南濮阳、湖北武汉、重庆的虫情数据和气象数据, 利用 PRECIS 模型中提供的 A2 及 B2 气候情景下我国 2009~2100 年的气候数据, 推测麦蚜种群发生动态。研究发现, 随着最低温的逐渐升高, 不同起止龄期的麦长管蚜 (*Sitobion avenae*) 各龄期发育速率成线性加快; 把不同起止龄期的麦长管蚜 (*Sitobion avenae*) 放入不同变温模式进行温度处理各成虫寿命明显不同; 小麦不同生育期对麦长管蚜 (*Sitobion avenae*) 的生命参数影响不同。通过对新疆塔城、山西临汾、北京海淀、河南南乐、湖北武汉、重庆大足六地区田间调查及气候变暖麦蚜种群动态, 推测气候变暖, 在麦蚜发生初期温度适宜, 蚜虫种群将可能在叶片大发生, 在抽穗期之前到达高峰期[3]。

Deutsch et al. (2008) 从文献等来源收集了全球各个地理纬度的豌豆蚜 (*Acyrtosiphon pisum*) 等 38 种昆虫在不同温度梯度下的存活率、生殖力、发育历期等生命参数的试验数据, 计算出不同温度下 38 种昆虫种群的内禀增长力, 分别建立每种昆虫在不同温度下, 不同纬度下的内禀增长力变化曲线, 在 1950~1990 年的温度数据基础的基础上, 利用 A2 气候情景, 通过计算不同温度下昆虫内禀增长率预测 2070~2100 年不同纬度昆虫的热适应性, 发现在高纬度温和地区昆虫种群的热忍受范围广, 气候变暖有利于昆虫种群增长; 而在低纬度热带地区昆虫的热忍受范围窄, 对温度升高非常敏感, 即使升温幅度很小, 也对昆虫有致命影响, 甚至面临灭绝[71]。

在使用梯度恒温来研究气候变暖对昆虫发育和取食影响方面, Gomi et al. (2007) 设置 18、20、22、23、25、27℃恒温, 观察美国白蛾 (*Hlyphantria cunea*) 的生长发育, 以阐明气候变暖导致美国白蛾 (*Hlyphantria cunea*) 发育历期缩短及发生世代数增加[72]。Heide et al. (2006) 在人工气候箱中设置 15、19、24、28、33℃的恒定水温, 测定了不同温度下寄主植物干物质含量的变化及荷兰水螟幼虫的取食量, 来分析全球气候变暖对植物干物质积累和植食性昆虫取食量的影响[73]。Braschler & Hill (2007) 在 18、21.5、25、28.5℃恒温的人工气候箱中试验观测白钩蛱蝶 (*P.c-album*) 幼虫取食啤酒花、榆树和荨麻嫩叶 3 种寄主植物

时的发育历期、生长速率及存活率变化,揭示气候变暖导致昆虫寄主植物种类发生改变[28]。

在变温环境下研究气候变暖对昆虫的影响方面,人工气候控制下的生态试验是研究气候变暖对昆虫影响的重要手段,Holopainen & Kainulainen (2004)在人工气候箱设置了2组变温模式:夜间为恒温12℃,白天分别为20、22、24、26℃和28℃,昼夜温差逐渐增加;昼夜温度分别为20~12℃、22~14℃、24~16℃、26~18℃和28~20℃,昼夜温差恒为8℃,以阐明芬兰气候变化中的昼夜温差变化对松针粉大蚜(*Schizolachnus pineti*)生殖力的影响[44]。

Whitney-Johnson (2005)为了阐明气候变暖中昼夜温度同幅度升高对菜青虫生长发育的影响,设置了3种变温模式,模式1模拟美国北部卡罗莱纳州夏季温度典型变化,从6:00am、11:00am、15:00pm、18:00pm和22:00pm开始,温度分别设置为11、28、33、28和16℃;模式2模拟夜间温度升高4℃,即11:00am~22:00pm温度同模式1,22:00pm~11:00am分别上升为20℃和15℃;模式3模拟白天温度升高4℃,即夜间温度与模式1相同,白天温度分别上升为32、37、32℃,得出夜间温度升高是导致菜青虫发育加快的主要原因[74]。Ma et al. (2004a)在温度升高对麦无网蚜繁殖的影响试验中,不仅设置了8小时27、29、31、33℃高温,16小时20℃恒温为周期的温度模式,还设置了高温处理的天数1、2、4、6d,在此基础上, Ma et al. (2004b)设置了更为精细的高温温度(27、28、29、30、31、31.5、32.5、33℃和34℃)、每日高温时间(2、3、4、6、8h/d)和高温天数(1、2、4、6d)等3个因子,试验了不同发育阶段麦无网蚜在不同温度模式下的存活。这些详细的温度升高模式的设计显著改善了野外条件下麦蚜预测的准确性[42, 75~77]。

为了阐明昆虫地理分布范围与热适应能力的关系,Calosi et al. (2008)在野外选取了纬度相近但海拔不同的4种欧洲龙虱(*Agabus spp.*),先将龙虱分别置于14.5℃和20.5℃水浴中预适应7d,设计了线性变温(thermal ramping)试验,利用计算机控制水浴温度以每分钟1℃的幅度升温或降温,观察水浴中龙虱麻痹程度,检测4种龙虱所能忍受的温度范围。结果表明,两种分布广的龙虱(*A.didymus*与*A.brunneus*)能适应温度范围也较其它两种龙虱广,温度适应性差的种类在气候变暖条件下受到更大的负面影响[78, 79]。

3.3 分子标记研究

分子标记主要应用于研究气候变暖对昆虫的分布及扩散的影响,乙醇脱氢酶(Adh)基因是研究种群纬度分布变化的一个重要标记基因。黑腹果蝇(*Drosophila melanogaster*)的乙醇脱氢酶等位基因(Adhs)主要存在于低纬度热带种群,利用Adh作为分子标记,找出Adhs出现频率与纬度梯度的关系。对比2002、2004年与1979、1982年的数据,发现过去20年气候变暖,以前主要存在于澳大利亚低纬度的带有Adhs基因的热带种群现在广泛存在高纬度地区,分布提高了4个纬度梯度[13]。受温度影响,果蝇(*D.subobscura*)细胞中5个具近端着丝点的染色体经常发生倒位现象,Balanya et al. (2006)收集了1980~2004年欧洲、南美洲、北美洲3个大陆板块不同纬度26种不同品系果蝇(*D.subobscura*)染色体ChPC1倒位频率数据与分布地区温度数据,分别建立了纬度与温度及纬度与染色体ChPC1倒位频率的关联模型,得出纬度相对越低,温度越高,倒位频率越高的结论[46]。Walters et al. (2006)在英国用in situ(原位分子)标记捕捉的白边雏蝗(*Chorthippus albomarginatus*)成虫后,将其释放在草原上,然后随机捕捉标记后释放的蝗虫,分别记录了114头雄成虫与154头雌成虫每天扩散距离及草原日最高温度等温度数据,将这些试验数据与历史最高温度数据相结合,通过回归分析建立温度与蝗虫扩散距离的关联模型,预测气候变暖对白边雏蝗扩散距离的影响[80]。

3.4 利用化石研究

化石、沉积物中昆虫、植物随着所处时期气候变迁而呈现出不同的特征,利用化石研究长期气候变化对昆虫等生物影响。如湖里的古记录或沼泽地的沉积物不仅为研究历史气候变

化提供了有用数据，同时为推测以后气候变化奠定了理论基础[81]。树木年轮、落叶或其它历史资源同样可以预测近代害虫暴发趋势，也为评价气候变化潜在影响提供了证据[82~89]。如古新世-始新世极热期（The Paleocene-Eocene Thermal Maximum PETM）是大约 5600 万年前发生的一次全球突然变暖事件，跟目前的气候变化状况具有可比性，Currano et al.（2008）采集了美国怀俄明州毕葛红盆地古新世-始新世极热时期及其前后 5062 块植物叶片化石上害虫为害造成的疤痕数据。通过观测食叶昆虫取食留下叶片疤痕的数量、类型以及被取食叶片的比例发现，在较为凉爽的古新世末期，15%至 38%的叶子遭受了昆虫的毁坏；在始新世初期以及气温有所下降的极热期后，33%的叶子遭到破坏；而在极热时期有 57%的叶子遭到破坏。数据表明极热时期叶子遭到破坏的比例有明显上升，说明气候变暖导致昆虫植食性增强[58]。

4.应对对策

4.1 更深入地开展气候变化对生物灾害影响的研究

（1）运用数学手段和分析软件，充分挖掘现有的历史数据，更深入地开展气候变化对生物灾害的影响研究，探讨气候变化对生物灾害影响的深层次原因，建立分析和预测模型，为生物灾害防治决策提供参考。

（2）运用分子生物学技术，探求气候变化对有害生物，尤其是检疫性、暴发性有害生物的分子水平的影响，寻求分子生物学手段应对生物灾害策略。这一点，不仅仅是气候变化对生物灾害影响的研究重点，也应该是整个生物灾害防治的研究重点，通过研究，寻求新的高效、安全、针对性强的药物和施药技术。

（3）结合数学模型、分子生物学和化石考古研究，有针对性地进行人工气候模拟研究，寻找气候变化对有害生物的生物学、生态学特性的影响和生理上的变化，必要时开展田间标准地调查，对人工模拟气候研究成果进行校正。

（4）从更大的空间和时间跨度上深入开展气候变化对生物灾害影响的系统性研究，尤其是在世界范围内开展合作，对气候变化对整个生态系统的影响、有害生物种群变迁等开展研究，从更高的层面、用系统的观点来研究气候变化对生物灾害的影响。

4.2 生态健康管理

根据生态系统的健康状况，尤其是人类活动、气候变化和自然灾害对生态系统的影响，制订生态系统保健计划，开展生态保健工作，并对生态保健措施所取得的效果进行评价，是开展生态健康管理工作的基本过程。在整个管理过程中，要始终贯彻“认真研究生态系统组织结构与功能，详细分析生态流，以培育生态系统活力和恢复力为主，及早发现并减轻危害生态系统健康因子的危害，尽量少地扰动生态系统”的健康管理原则。

生态健康管理的主要内容包括：健康监测、维护健康、增进健康等。

（1）健康监测：加强生态系统健康状况监测和检疫检查，尤其是危险性因子发生发展情况的监测，及早发现，迅速清除，以避免生态灾害的发生与流行。例如加强艾滋病、SARS 等感染人群和高危人群的监督管理，避免危险性传染疾病的传播流行；加强美国白蛾、松材线虫病等危险性有害生物监测与检验检疫，防止危险性有害生物入侵与扩散。

（2）检疫封锁：忽视生态健康状况的监测，检验检疫执法不严，不合理的人为干扰措施，甚至于人为环境破坏，是生态灾害产生的主要原因。加强生态健康状况监测与检疫执法，采取合理的人工干扰措施，是减小生态灾害危害的主要手段。对已经发生生物灾害的，尤其是对危险性生物灾害发生区，实行检疫封锁，严防疫情扩散蔓延。

（3）预防：对于一些活力较差的生态系统，或者危险性因子入侵前，采取适当的人为干扰措施，提高系统的抗逆能力，预防生态灾害发生。例如，改造人工纯林系统，诱导形成混交林，或在林内释放天敌，减少人工林内病虫害发生。再如用接种的方法预防某些传染病，

或对遗传病、营养缺乏病、生活和劳动中的灾害事故采取有针对性的预防措施，以减少疾病的发生或流行。

(4) 维护健康：保护生态环境不受破坏，维护生态平衡；加强生态系统健康状况监测，及时发现并减轻危害生态系统健康因子的危害，维护生态系统的健康。

(5) 增进健康：开展生态系统组织结构与功能研究，详细分析生态流，掌握生态健康与上述因子之间的关系，按照这一关系，培育生态系统活力和恢复力，增强生态系统的稳定性和抗逆能力。

(6) 灾后康复：生态灾害发生后，利用生态系统恢复力，采取合理的人工促进生态系统恢复措施，促进生态系统恢复，减轻生态灾害产生的危害。

健康管理的工作模式一般可分为：①原生生态系统保健。没有或很少受到人类干扰的生态系统，一般只要采取保护措施就足以维护原生生态系统健康，除非发生较大的自然灾害，需要人工促进恢复。②人工生态系统保健。由于人工生态系统稳定性差，抗逆能力弱，需要较多的人为干预，才能维护生态系统的健康。例如农田生态系统的人工管理，人工林的培育，人类的健康管理，以及产业的环境保护等[93~96]。

4.3 双精管理

双精管理即精密监测与精确管理 (precision monitor, precision management, 2P)。精密监测、精确管理的目的是对生态系统实行实时监测，及时发现非健康生态系统，采取先进的生物管理措施，及时、快速地恢复“患病”生态系统的健康；或者对处在健康、亚健康状态的生态系统，采取一定的、合理的措施，维护生态系统保持在比较稳定的健康状态。

也就是说，生物灾害的双精管理不仅仅是要克服被动防治和单种防治带来的弊端，更重要的是维护生态系统的健康。

生物灾害的双精管理的实质是：重在监测，对生态系统健康状况进行实时监测，发布精准预报；重在预防，维护健康状态生态系统的健康，使其保持在比较稳定的健康状态；对非健康的生态系统，采用先进的生物管理学技术，使其尽快恢复健康。这里的生物管理学技术，主要是指采取一定的管理措施，利用生态系统自身修复能力，使其恢复健康。在不得已的情况下，才使用人工干扰措施，促进其恢复健康。

(1) 精密监测

对生态系统进行连续的、实时的监测，通过对积累的数据进行分析，利用先进的数据分析手段，建立比较完备的、接近有害生物在自然条件下的生态模型(生活、发生发展等模型)，利用这一模型，对有害生物未来的发生发展情况做出精确的预报。

生物灾害监测，按照监测方法可以划分为普遍调查(普查)、普通调查、专业调查、遥感监测和踏查。

生物灾害预测预报，按照预报时间划分，精准预报分为中长期预报、短期预报；按照预报地域范围划分，精准预报可以分为全球预报、国家预报、省级预报、县级预报和乡村预报；按照预报内容可以划分为趋势预测、发生范围预测、危害程度预测、损失估测等。

(2) 精确管理

利用精准预报结果，通过已经建立的、比较完备的、接近有害生物在自然条件下的生态模型(生活、发生发展模型)，建立人工干扰模型，尽量使用生态系统自身修复能力使其恢复健康。在不得已的情况下，才选择比较合理的人工干扰手段(化学的、生物的、物理的、培育技术的等)，对有害生物做出较为精确的干扰，使其危害降到允许的阈值内，并促进“患病”生态系统较快地恢复到健康状态。这种比较合理的人工干扰措施，是指对环境、对生态系统包括对其它生物的伤害控制在允许的阈值内，并且能在较短的时间内自然修复，没有永久损害，对人类没有损害。这里的阈值，根据有害生物种类和危害对象的不同，分为经济损失阈值和生态承受能力阈值(承载力)。

(3) 精准施药 (precision medicine)

在进行药物治理时, 尽量选用只对靶生物有作用的药物, 或尽量选择只对靶生物有作用的施药方式。这样的药物治理方式对非靶生物和环境扰动小, 有利于施药后生态系统快速恢复健康。其实, 精准施药, 也是属于精确管理的范畴。

(4) 实现双精管理的途径

“双精”管理关键通过先进的手段, 进行实时监测; 通过长期数据积累, 建立准确的预报模型和人工干扰模型, 进行准确预报和人工干扰模拟; 采用先进的生物管理技术, 实现生物灾害科学管理。

①运用先进技术, 进行实时监测

传统技术与3S等现代技术相结合, 建立生物灾害监测和预警体系。以3S技术和化学、生态技术为依托, 结合常规抽样和调查技术, 研究重大生物灾害的中长期测报和短期准确预报技术, 提高预警水平和御灾决策能力。

②通过长期数据积累, 建立准确的有害生物生态学模型

气象部门进行了百余年的基础数据积累, 才有得气象科学的今天进步, 才有得今天准确的天气预报。生物灾害预测预报工作, 应该仿照气象部门的做法, 制定长远的工作计划, 完善测报工作的组织与监督制度, 规范外业数据采集与上报行为, 确保监测数据准确、规范。

③采取先进的生物管理技术, 维护生态系统健康

生物灾害管理, 重在促进和维护生态系统的健康, 其次才是实时发现非健康的生态系统, 并及时采取必要的管理措施, 使其尽快恢复健康: 加强生态监管, 确保生态系统处于健康状态; 及时掌握生态系统健康状况, 促进亚健康状态的生态系统恢复健康; 利用生态系统的自我补偿能力, 实现生物灾害精确管理; 必要时, 采用先进的人工干扰技术, 及时恢复生态系统健康; 加强检疫管理, 防止有害生物人为扩散。

④有害生物调查

要搞好生物灾害双精管理, 首先要有完备、可靠的基础外业调查数据, 也就是说, 生物灾害调查工作, 是生物灾害管理工作的基础。

⑤加强生物灾害管理机构建设

有害生物的精准预报、精确管理, 是一项集高技术、高效率于一体的精密性工作, 因此, 有且只有高素质的生物灾害管理队伍、完善的基础设施建设, 才能实现生物灾害的精准预报, 精确管理。

⑥加强有害生物管理法制建设

进一步完善现有生物灾害管理法律法规, 将分散于各行业的生物灾害管理法律法规合并; 修改“谁受益, 谁防治”的生物灾害管理有关责任规定, 将生物灾害管理的责任, 根据对象不同落实到政府或经营者身上; 加大生物灾害管理执法力度, 从严追究引起生物灾害肇事者的责任[97~98]。

4.4 GCSP 管理

GCSP 管理是分级管理 (Graded management)、分类管理 (Classification management)、分区管理 (Subarea management)、分期管理 (Phased management) 的英文缩写, 主要是针对生物灾害的不同发生特点, 采取不同的应对策略。

(1) 分级管理

根据生物灾害源的危险性或灾害的危害程度, 将生物灾害或有害生物划分等级, 按照等级, 启动相应的应急预案, 进行灾害管理。

根据《中华人民共和国突发事件应对法》和《国家突发公共事件总体应急预案》, 突发公共事件按照其性质、严重程度、可控性和影响范围等因素, 划分为四级: I 级 (特别严重)、

II级（严重）、III级（较重）和IV级（一般），依次用红色、橙色、黄色和蓝色表示。I级（特别严重）、II级（严重）、III级（较重）涉及范围较大，由省、市、县政府统一领导和协调应急处理，IV级（一般）影响范围局限在社区范围内，可以被县级政府所控制。

国家突发事件危机分级管理主要是针对火灾、地震、气象等突发灾害制定的。生物灾害不同于上述灾害，生物灾害的分级管理，与其他灾害分级管理有所不同，可采取两种分级方案：

按照灾害严重程度——生物灾害危害程度分级。按照分级结果，启动相应预案。

按照灾害源的可控制性、发展态势——有害生物危险性分级。对有害生物进行风险分析（PRA），按照分析结果进行分级。根据分级结果，对不同级别的有害生物，采取不同的管理措施。如I级有害生物由国家监管，一旦发现，立即铲除；II级由省级监控，一旦发现新疫点，限期拔除。

表 1 生物灾害的分级管理

Table 1 Biological disaster classification management

灾害分级	按灾害源分级 (按照 PAR 分析结果分级)	按灾害危害程度分级
I 级	高度危险检疫性有害生物 (highly risky quarantine pest)	造成生态、经济危害巨大，并直接危及人类生命安全或 直接危害大范围人类健康的；或高度危险检疫性有害生物 在省际间连片大面积爆发
II 级	一般检疫性有害生物 (risky quarantine pest)	造成生态、经济危害巨大，并直接危害局部人类健康的； 检疫性有害生物连片大面积爆发
III 级	限定的非检疫性有害生物 (regulated non-quarantine pest)	造成生态、经济危害巨大；或一般有害生物在县际间 连片大面积爆发
IV 级	非限定性有害生物 (non-regulated pest)	一般有害生物在县内连片大面积爆发

(2) 分类管理

按照有害生物种类、危害对象的不同，对生物灾害进行分类，采取不同的管理措施。

对于不同的灾害源，根据不同灾害源的特点，采取不同的技术措施进行防治。对于不同经营目的、权属的灾害受体遭受生物灾害，其管理措施、管理责任也不尽相同。例如林业生物灾害治理，由森林的经济效益或生态效益的可确定受益者承担，而森林的生态效益的受益对象难以明确时，林业生物灾害防治责任主要由政府承担；对于成片大面积暴发的林业生物灾害或 I、II 级林业生物灾害发生时，由政府承担治理责任。

(3) 分区管理

自然区域：生物灾害的区域性特点，决定了不同区域的生物灾害，其发生发展特点都不会相同。根基自然区划和生物灾害分布状况、发生特点与规律，进行生物灾害发生区域区划，根据发生区的灾害特点，采取相应的管理措施。

行政区域：所有的灾害管理措施，最终都将以行政区划为管理单位进行落实，因此，灾害发生区的区划，应该结合行政区划进行。

(4) 分期管理

生物灾害发生发展，常常遵循一个特定的生命周期。生物灾害不同的发生发展周期，采取不同的应对管理措施。根据生物灾害可能造成的威胁、实际灾害已经发生、危害逐步减弱与生态系统恢复三个阶段，可将生物灾害事件总体上划分为预防期、预警期、爆发期、缓解期、善后期。

预防期：对境外已经存在、有可能对境内生态健康造成威胁的有害生物进行风险评估，

采取检疫措施，防止其侵入境内。

预警期：根据监测结果，已经暴露生物灾害即将发生征兆，采取有效的管理措施，阻止生物灾害发生，或把生物灾害控制在特定的区域内。

爆发期：生物灾害进入紧急阶段，灾害事件已经发生。此时主要任务是阻止灾害事件进一步发展，并防止其蔓延扩散。

缓解期：生物灾害事件进入相持阶段，但仍有可能向坏的方向发展。此时主要任务是保持应急措施，有效并尽快地恢复生态系统健康和社会秩序。

善后期：生物灾害得到有效治理，开展治理结果评估，从中总结生物灾害治理经验，从灾害危机中学习治理技术和管理经验。

表 2 生物灾害分期管理

Table 2 Biological hazards stage management

分期	发生阶段	能力要求	主要任务
预防期	超前	检疫御灾	通过检疫措施，防治境外有害生物侵入
预警期	事前	预警预备	加强监测，及时预警，防范灾害事件发生，或尽可能控制灾害发展
爆发期	事中	快速反应	及时控制灾害事件并防止其蔓延
缓解期	事中	恢复重建	保持应急措施并尽快恢复生态系统健康和社会秩序
善后期	事后	评估学习	从灾害中学习

当然，生物灾害发生发展过程复杂多变，各个阶段之间的划分不一定十分明显，而且有时还会相互交织、循环往复，因此要根据具体灾害发展生命周期，确定相应的管理措施，尽快恢复生态系统健康，尽量减少灾害损失[99~106]。

5.致谢

本文所有材料来源于参考文献中所列材料，在此对所有作者表示深深感谢。尤其是：

(1) 陈瑜的硕士论文《模拟气候变暖温度特征对麦长管蚜种群动态影响》为本文提供了绝大部分材料，该文中参考文献也为文献检索提供了极大方便。

(2) 国家气候中心、国家气象信息中心气象资料室为本研究课题提供了全部气象数据。

基金项目：国家林业局林业公益性科研专题项目资助 20080423

参考文献

- [1]政府间气候变化专门委员会，气候变化2007综合报告[R]，政府间气候变化专门委员会，2~10
- [2]国家气候中心，中国气候监测（2009年1月~2010年9月）[R]，http://ncc.cma.gov.cn/influ/moni_china.php?product=moni_assessment
- [3]陈瑜，模拟气候变暖温度特征对麦长管蚜种群动态影响[D]，北京：中国农业科学院研究生院，2009:1~11
- [4]赵宗慈，五个全球大气海洋环流模式模拟二氧化碳增加对气候变化的影响[J]，大气科学，1990，14（1）：118~127.

- [5]钟海玲,沈永平,2007年全球气候变化回顾[J],气候变化研究进展,2008,4(1):53~56.
- [6]张国庆,气候变化与马尾松毛虫发生时空的变化[J/OL],2010-10-14,科学网,http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=373083
- [7]李淑华,气候变暖对病虫害的影响及防治对策[J],中国农业气象,1993,14(1):41~44
- [8]李淑华,气候变暖对我国农作物病虫害发生、流行的可能影响及发生趋势[J],中国农业气象,1992,13(2):46~49
- [9]赵圣菊,从气象因素分析1987年稻飞虱大发生的原因[J],植物保护,1988,14(2):2~5
- [10]丁文广,肖俊豪,汪霞,气候变化对我国森林自然灾害的影响[J],西北林学院学报,2010,25(5):117~120
- [11]赵铁良,耿海东,张旭东,方国飞,王玉玲,赵清山,气温变化对我国森林病虫害的影响[J],中国森林病虫,2003,22(3):29~32
- [12]Musolin D.L., Insects in a warmer world:ecological,physiological and life-history responses of true bugs(Heteroptera)to Climate change[J].Global Change Biology,2007,13(8):1565~1585.
- [13]Umina P.A.,Weeks A.R.,Kearney M.R.et al.A Rapid Shift in a Classic Clinal Pattern in *Drosophila* Reflecting Climate Change[J].Science,2005,308(5772):691~693.
- [14]Edward D.A.,Blyth J.E.,McKee R.et al.Change in the distribution of a member of the strand line community:the seaweed fly (Diptera: Coelopidae) [J]. Ecological Entomology, 2007,32(6):741~746.
- [15]Rafoss T.,Saethre M.G..Spatial and temporal distribution of bioclimatic potential for the Codlingmoth and the Colorado potato beetle in Norway:model predictions versus Climate and field data from the 1990s[J].Agricultural and Forest Entomology,2003,5(1):75~85.
- [16]Kruus M..The greenhouse effect and moths' response to it.I.How to compare climatic and Insect phenology databases? [J],Agronomy Research,2003,1(1):49~62.
- [17]Bolotov I.N..Long-term changes in the fauna of diurnal lepidopterans(Lepidoptera,Diurna)in the northern taiga subzone of the Western Russian Plain[J].Russian Journal of Ecology,2004,35(2):117~123.
- [18]Pollard E..Temperature,rainfall and butterfly numbers[J]. Journal of Applied Ecology, 1988, 25(3), 819~828.
- [19]Roy D.B.,Rothery P,Moss D.,Pollard E.et al.Butterfly numbers and weather:predicting historical trends in abundance and the future effects of Climate change[J].Journal of Animal Ecology,2001,70(2):201~207.
- [20]Dennis R.L.H..Butterflies and Climate Change.Manchester University Press,Manchester,1993.
- [21]Parmesan C.,Ryrholm N.,Stefanescu C.et al.Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming[J].Nature,1999,399(6736):579~583.
- [22]Roy D.B.,Sparks T.H..Phenology of British butterflies and climate change[J].Global ChangeBiology,2000,6(4):407~416.
- [23]Bryant S.R.,Thomas C.D.,Bale J.S..The influence of thermal ecology on the distribution of three nymphalid butterflies[J].Journal of Applied Ecology,2002,39(1):43~55.
- [24]Hill J.K.,Thomas C.D.,Fox R.et al.Responses of butterflies to twentieth century climate warming:implications for future ranges[J]. Proceedings of the Royal Society of London,2002,269(1505):2163~2171.

- [25]Hill J.K.,Thomas C.D.,Huntley B..Climate and habitat availability determine 20th century changes in a butterfly's range margin[J]. Proceedings of the Royal Society of London,1999,6 7266(1425):1197~1206.
- [26]Thomas C.D.,Bodsworth E.J.,Wilson R.J.et al.Ecological and evolutionary processes at 7 1 expanding range margins[J].Nature,2001,411(6837):577~581.
- [27]Thomas C.D.,Cameron A.,Green R.E.et al.Extinction risk from climate change[J].Nature,2004,427(6970):145~148.
- [28]Braschler B.,Hill J.K..Role of larval host plants in the Climate-driven range expansion of the butterfly *Polygonia c-album*[J].Journal of Animal Ecology,2007,76(3):415~423.
- [29]Stefanescu C.,Penuelas J.,Filella I..Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin[J].Global Change Biology,2003,9(10):1494~1506.
- [30]Zhou X.,Harrington R.,Woiwod I.P.et al.Effects of temperature on aphid phenology[J].Global Change Biology,1995,1(4):303~313.
- [31]张国庆, 潜山县 1980-2004 年林业有害生物普查报告[R/OL], 2010-10-26, 科学网, http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=377220
- [32]张国庆, 赵文琴, 论林业有害生物精准预报——以潜山县马尾松毛虫预测预报为例[C], 2007, 北京: 中国昆虫学会第八次全国会员代表大会暨 2007 年学术年会论文集
- [33]石再华, 许红玲, 石怀绶, 尹湘豫, 张国庆, 程从新, 安庆市林业有害生物普查成果初报[J], 安徽林业科技, 2006, 129 (3): 2~4
- [34]王庆前, 丁德贵, 周卫, 张国庆, 安徽省林业有害生物普查情况分析与治理措施[J], 植物检疫, 2006, 20 (2): 102~104
- [35]Maistrello L.,Lombrosob L.,Pedroni E.et al.Summer raids of *Arocatus melanocephalus*(Heteroptera, Lygaeidae)in urban buildings in Northern Italy:Is climate change to blame? [J] Journal of Thermal Biology,2006,31(8):594~598.
- [36]Yamamura K.,Yokozawa M.,Nishimori M.,et al..How to analyze long-term Insect population dynamics under Climate change:50-year data of three Insect pests in paddy fields[J].Population Ecology,2006,48(1):31~48.
- [37]Yamamura K.,Yokozawa M..Prediction of a geographical shift in the prevalence of rice stripe virus disease transmitted by the small brown planthopper, *Laodelphax striatellus*(Fallen)(Hemiptera:Delphacidae),under Global warming[J].Applied Entomology and Zoology,2002,37(1):181~190.
- [38]Tobin P.C.,Nagarkatti S.,Loeb G.et al.Historical and projected interactions between Climate change and Insect voltinism in a multivoltine species[J].Global Change Biology,2008,14(5):951~957.
- [39]Ghini R.,Hamada E.,Pedro Junior M.J.et al.Risk analysis of Climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil[J].Pesquisa Agropecuaria Brasileira,2008,43(2):187~194.
- [40]Conrad K.F.,Woiwod I.P.,Perry J.N..Long-term decline in abundance and distribution of the garden tiger moth(*Arctia caja*)in Great Britain[J].Biological Conservation,2002,106(3):329~337.
- [41]Newman J.A..Climate change and the fate of cereal aphids in Southern Britain[J].Global Change Biology,2005,11(6):940~944.
- [42]Ma C.S.,Hau B.,Poehling H.M..Effects of pattern and timing of high temperature exposure on reproduction of the rose grain aphid, *Metopolophium dirhodum*[J].Entomologia Experimentalis et Applicata,2004a,110(1):65~71.
- [43]De Barro P.J.,Maelzer D.A..Influence of High-Temperatures on the Survival of

Rhopalosiphum-Padi(L.)(Hemiptera,Aphididae)in Irrigated Perennial Grass Pastures in South-Australia[J].Australian Journal of Zoology,1993,41(2):123~132.

[44]Holopainen J.K.,Kainulainen P..Reproductive capacity of the grey pine aphid and allocation response of Scots pine seedlings across temperature gradients:a test of hypotheses predicting outcomes of global warming[J].Canadian Journal of Forest Research,2004,34(1):94~102.

[45]Levitan M.,Etges W.J..Climate change and recent genetic flux in populations of Drosophila robusta[J].BMC Evolutionary Biology,2005,5(1):4~15.

[46]Balanya J.,Oller J.P.,Huey R.B.et al.Global Genetic Change Tracks Global Climate Warming in Drosophila subobscura[J].Science,2006,313(5794):1773~1775.

[47]Rank N.E.,Dahlhoff E.P..Allele frequency shifts in response to Climate change and physiological consequences of allozyme variation in a montane Insect[J]. Evolution, 2002, 56(11): 2278~2289.

[48]Visser M.E.,Holleman L.J.M..Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology[J].Proceedings of the Royal Society of London,2001,268(1464):289~294.

[49]Thomson A.J.,Benton R..A 90-year sea warming trend explains outbreak patterns of western spruce budworm on Vancouver Island[J].Forestry Chronicle,2007,83(6):867~869.

[50]Dewar R.C.,Watt A.D..Predicted changes in the synchrony of larval emergence and budburst under climatic warming[J].Oecologia,1992,89(4):557~559.

[51]Speight M.R.,Hunter M.D.,Watt A D.Ecology of Insects:Concepts and Applications.Blackwell Science Ltd,Oxford.1999.

[52]Watt A.D.,McFarlane A.M..Will climate change have a different impact on different trophic levels?Phenological development of winter moth Operophtera brumata and its host plants[J].Ecological Entomology,2002,27(2):254~256.

[53]Volney W.J.A.,Fleming R.A..Spruce budworm(Choristoneura spp.)biotype reactions to forest and Climate characteristics[J].Global Change Biology,2007,13(8):1630~1643.

[54]Hodar J.A.,Castro J.,Zamora R..Pine processionary caterpillar Thaumetopoea pityocampa as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming[J].Biological Conservation,2003,110(1):123~129.

[55]Hodar J.A.,Zamora R..Herbivory and climatic warming:a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict,boreal pine species[J].Biodiversity and Conservation,2004,13(3):493~500.

[56]Hodkinson I.D..Progressive restriction of host plant exploitation along a climatic gradient:the willow psyllid Cacopsylla groenlandica in Greenland[J].Ecological Entomology,1997,22(1):47~54.

[57]Kozlov M.V..Losses of birch foliage due to Insect herbivory along geographical gradients in Europe:a Climate-driven pattern? [J]Climatic Change,2008,87(1/2):107~117.

[58]Currano E.D.,Wilf P.,Wing S.L.et al.Sharply increased insect herbivory during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum [J].Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(6):1960~1964.

[59]Wilf P.,Labandeira C.C..Response of plant-insect associations to Paleocene-Eocene warming [J].Science,1999,284(5423):2153~2156.

[60]Wolf A.,Kozlov M.V.,Callaghan T.V..Impact of non-outbreak Insect damage on vegetation in northern Europe will be greater than expected during a changing Climate [J].Climatic Change,2008,87(1/2):91~106.

- [61] Davis A.J., Lawton J.H., Shorrocks B. et al. Individualistic species responses invalidate simple physiological models of community dynamics under Global environmental change[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1998, 67(4): 600~612.
- [62] Stireman J.O., Dyer L.A., Janzen D.H. et al. Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: implications of Global warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(48): 17384~17387.
- [63] Yukawa J., Kiritani K., Gyoutoku N. et al. Distribution range shift of two allied species, *Nezara viridula* and *N. antennata* (Hemiptera: Pentatomidae), in Japan, possibly due to Global warming[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2007, 42(2): 205~215.
- [64] Six D.L., Bentz B.J. Temperature determines symbiont abundance in a multipartite bark beetle-fungus ectosymbiosis[J]. *Microbial Ecology*, 2007, 54(1): 112~118.
- [65] Morimoto N., Imura O., Kiura T. Potential effects of Global warming on the occurrence of Japanese pest Insects[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1998, 33(1): 147~155.
- [66] Robinet C., Baier P., Pennerstorfer J. et al. Modelling the effects of Climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(4): 460~471.
- [67] Battisti A., Stastny M., Netherer S. et al. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures[J]. *Ecological Applications*, 2005, 15(6): 2084~2096.
- [68] Hagen S.B., Jepsen J.U., Ims R.A. et al. Shifting altitudinal distribution of outbreak zones of winter moth *Operophtera brumata* in sub-arctic birch forest: a response to recent Climate warming? [J] *Ecography*, 2007, 30(2): 299~307.
- [69] Jepsen J.U., Hagen S.B., Ims R.A. et al. Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophtera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest: evidence of a recent outbreak range expansion[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(2): 257~264.
- [70] Merrill R.M., Gutierrez D., Lewis O.T. et al. Combined effects of Climate and biotic interactions on the elevational range of a phytophagous Insect[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(1): 145~155.
- [71] Deutsch C.A., Tewksbury J.J., Huey R.B. et al. Impacts of Climate warming on terrestrial ectotherms across latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(18): 6668~6672.
- [72] Gomi T., Nagasaka M., Fukuda T. et al. Shifting of the life cycle and life-history traits of the fall webworm in relation to Climate change[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2007, 125(2): 179~184.
- [73] Heide T.V., Roijackers R.M.M., Peeters E.T.H.M. et al. Experiments with duckweed-moth systems suggest global warming may reduce rather than promote herbivory[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(1): 110~116.
- [74] Whitney-Johnson A., Thompson M., Hon E. Responses to predicted Global warming in *Pieris rapae* L. (Lepidoptera): consequences of nocturnal versus diurnal temperature change on fitness components[J]. *Environmental Entomology*, 2005, 34(3): 535~540.
- [75] Ma C.S., Hau B., Poehling H.M. The effect of heat stress on the survival of the rose grain aphid, *Metopolophium dirhodum* (Hemiptera: Aphididae) [J]. *European Journal of Entomology*, 2004b, 101(22): 327~331.
- [76] Ma C.S. Modelling and simulation of the population dynamics of the cereal aphid

- Metopolophium dirhodum in northern Germany[J].Hildesheim,Berlin:Verlag Franzbecker, 2000: 85~111.
- [77]Ma G.,Ma C.S..Upper critical temperatures for behaviors of three species of cereal aphids in leaf temperature gradients[J].Acta Ecologica Sinica,2007,27(6):2449~2459.
- [78]Calosi P.,Bilton D.T.,Spicer J.I.et al.Thermal tolerance and geographical range size in the Agabus brunneus group of European diving beetles(Coleoptera:Dytiscidae) [J].Journal of Biogeography,2008,35(2):295~305.
- [79]Calosi P.,Bilton D.T.,Spicer J.I..Thermal tolerance,acclimatory capacity and vulnerability to global climate change[J].Biology Letters,2007,4(1):99~102.
- [80]Walters R.J.,Hassall M.,Telfer M.G.et al.Modelling dispersal of a temperate Insect in a changing Climate[J].Proceedings of the Royal Society of London,2006,273(1597):2017~2023.
- [81]Larocque I.,Hall R.I.,Grahm E..Chironomids as indicators of climate change:A 100-lake training set from a subarctic region of northern Sweden(Lapland) [J].Journal of Paleolimnology, 2001,26(3):307~322.
- [82]Swetnam T.W.,Lynch A.M..Multicentury,regional-scale patterns of western spruce budworm outbreaks[J].Ecological monographs,1993,63(4):399~424.
- [83]Fleming R.A..A mechanistic perspective of possible influences of climate change on defoliating insects in North America's boreal forests[J].Silva Fennica,1996,30(2/3):281~294.
- [84]Candau J.N.,Fleming R.A.,Hopkin A..Spatiotemporal patterns of large-scale defoliation caused by the spruce budworm in Ontario since 1941[J].Canadian Journal of Forest Research,1998,28(11):1733~1741.
- [85]Gray D.R..The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada[J].Climatic Change,2008,87(3/4):361~383.
- [86]Gray D.R.,Régnière J.,and Boulet B..Analysis and use of historical patterns of spruce budworm defoliation to forecast outbreak patterns in Quebec[J].Forest ecology and management,2000,127(11):217~231.
- [87]Logan J.A.,Regniere J,Gray D.R.,Munson A.S..Risk assessment in the face of a changing environment:gypsy moth and Climate change in Utah[J].Ecological Applications, 2007, 17(1): 101~117.
- [88]Simard I.,Morin H.,Potelle B..A new paleoecological approach to reconstruct long-term history of spruce budworm outbreaks[J].Canadian Journal of Forest Research,2002,32(3):428~438.
- [89]Beard K.C..The oldest North American primate and mammalian biogeography during the Paleocene–Eocene Thermal Maximum[J].Proceedings of the Royal Society of London, 2008,105(10):3815~3818.
- [90]毕晓丽, 徐永兴, 洪伟, 吴承祯, 闫淑君, 福建省马尾松毛虫发生于 ENSO 事件的关系 [J],福建林学院学报, 2003, 23 (1): 44~47.
- [91]吴承祯, 洪伟, 翁少容, ENSO 事件的发生对马尾松毛虫发生的影响[J], 生物数学学报, 2002,17 (1): 117~122.
- [92]张知彬, 王祖望, ENSO 现象与生物灾害[J], 中国科学院院刊, 1998, (1): 34~38
- [93]张国庆, 生态健康与有害生物管理[J], 中国园艺文摘, 2008, 3: 40~41
- [94] 张国庆, 森林健康与林业有害生物管理[J], 四川林业科技, 2008, 29 (6): 77~80
- [95]张国庆, 2010, 森林健康干扰与森林健康促进[J/OL], 科学网 http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=314523

- [96]张国庆, 2010, 森林健康管理[J/OL], 科学网 http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=304437
- [97] 张国庆, 论有害生物的“双精”管理[J/OL], (2007年8月23日), 科学网, http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=14170
- [98]张国庆, 论有害生物的精密监测与精确管理[J/OL], (2007年8月12日), 科学中国人, <http://www.scichi.com/new/duzhe/Article/123.html>
- [99]张国庆, 森林健康与林业生物灾害 GCSP 管理[J/OL], (2010年3月19日), 科学网, http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=304396
- [100]张国庆, 生物灾害管理理论研究[J/OL], 科学网 (2008-4-30) http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=23611
- [101]张国庆, 生物灾害管理基本原理[J/OL], 科学网 (2010-4-21) http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=314524
- [102]张国庆, 林业生物灾害防治[M/OL], (2009年3月13日), 科学网, http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=220105
- [103]张国庆, 林业生物灾害防治组织与管理[J/OL], (2008年4月15日), 科学网, http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=21738
- [104]张国庆, 林业生物灾害防控的法律保障[J/OL], (2007年11月2日), 科学网, http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=10133
- [105]张国庆, 我国林业生物灾害管理体系研究[J/OL], (2008年3月25日), 科学网, http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=19376
- [106]张国庆, 林业生物灾害与林业生物灾害管理[J/OL], (2010年3月20日), 科学网 http://www.sciencenet.cn/blog/user_content.aspx?id=304640
- [107]赵圣菊, 姚彩文, 小麦赤霉病流行程度海温预报模式的研究[J], 植物病理学报, 1989, (1): 14~18.
- [108]刘了凡, 黄善斌, 孔繁忠, 三代玉米螟发生程度和卵峰日的海温预报模式[J], 南京气象学院学报, 1999, 22(2): 264~268.
- [109]赵圣菊, 用海温预报一代粘虫发生量和发生期的初步探讨[J], 海洋学报, 1984, (1): 128~132.
- [110]赵圣菊, 用海温作临沂地区第一代粘虫数量长期预报的初步探讨[J], 科学通报, 1983, (19): 1202~1205.
- [111]赵圣菊, 二代粘虫发生区一代成虫迁入期海温预报模式的研究[J], 气象科学研究院院刊, 1987, (3): 88~96.
- [112]赵圣菊, 二代粘虫发生程度海温预测模式的研究[J], 灾害学, 1987, 2(7): 559~560.
- [113]侯敬和, 孔繁忠, 刘厚赞, 棉铃虫发生程度长期预报方法[J]. 气象, 1997, 23(2): 41~44.
- [114]叶正襄, 黄荣华, 秦厚国等, 用海温分布特征预报早稻白背飞虱发生量的研究[J]. 植物保护, 1992, 18(4): 13~15.
- [115]马树庆, 马吉祥, 张传亮, 用海温和大气环流资料建立粘虫迁入期和发生程度的长期预报模式[J], 吉林气象, 1993, 11(1), 32~38.
- [116]Ceakley, Stella Melugin, Climate variability in the Pacific Northwest and its effect on stripe rust disease of winter wheat[J], Climatic Change, Dordrecht, Holland, 2(1): 33~51.
- [117]Maelzer DA, Zalucki MP, Long range forecasts of the numbers of *Helioverpa punctigera* and *H. amaigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia using the Southern oscillation Index and the Sea Surface Temperature[J]. Bulletin of Entomological Research, 2000, 90:

2, 133~146

[118]叶彩玲, 霍治国, 丁胜利, 施生锦, 王素艳, 侯婷婷, 农作物病虫害气象环境成因研究进展[J], 自然灾害学报, 2005,14 (1): 90~97

[119]马晓群, 盛绍学, 陈晓艺, 气候变化对安徽省主要农作物病虫害发生趋势的影响[C], 气候变化与生态环境研讨会论文集

[120]吴建国, 吕佳佳, 艾丽, 气候变化对生物多样性的影响[J], 生态环境学报, 2009,18 (2): 693~703.