

溴甲烷在进口木材有害生物检疫处理中的减量与替代技术研究应用*

顾杰^{1**} 杨光¹ 吴建波² 马建华³ 金飞⁴ 马龙⁴

(1. 江苏出入境检验检疫局 南京 210001; 2. 太仓出入境检验检疫局 太仓 215430;
3. 常熟出入境检验检疫局 常熟 215500; 4. 南京维安卫生技术服务有限公司 太仓 215434)

摘要 长期以来,溴甲烷熏蒸剂在有害生物防控中起着重要作用。自发现溴甲烷是一种臭氧消耗物质可对环境造成危害以来,特别是在蒙特利尔议定书确定了禁止使用溴甲烷的时间表后,寻求溴甲烷处理替代技术成为研究热点。本文综述了在进口木材有害生物检疫处理中所开展的溴甲烷减量与替代技术研究进展,简要评述了各项技术手段付诸实际应用所面临和需要解决的难点,提出了我们在该领域深入研究的建议与设想。

关键词 检疫处理, 溴甲烷, 木材, 有害生物, 替代技术

Progress in research on alternatives to methyl bromide in the quarantine treatment of imported logs

GU Jie^{1**} YANG Guang¹ WU Jian-Bo² MA Jian-Hua³ JIN Fei⁴ MA Long⁴

(1. Jiangsu Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Nanjing 210001, China; 2. Taicang Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Taicang 215430, China; 3. Changshu Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Changshu 215500, China; 4. Nanjing Weian Quarantine Treatment Technology Co., Ltd., Taicang 215434, China)

Abstract Methyl bromide plays an important role as a fumigant in the control of pests in imported timber. However, because it is an ozone depleting substance that can harmful to the environment, a deadline for phasing out its use has been agreed under the International Montreal Protocol. Research on alternatives to it have therefore become both timely and important. This paper outlines research on alternative wood quarantine treatments, the difficulties associated with these technologies and suggests some possible solutions to these and directions for further research and thinking in this field.

Key words quarantine treatment, methyl bromide, logs, pests, alternatives technology

溴甲烷对昆虫、螨类、线虫、某些真菌、软体动物、啮齿动物等具有很好的熏蒸防治作用,因其具有高效、广谱、穿透性强、快速等特点,作为熏蒸剂应用已有 70 多年的历史(Le, 1932)。但在上世纪 80 年代早期发现它对大气臭氧层具有破坏作用(Watson *et al.*, 1992)。为此,1992 年的哥本哈根《关于消耗臭氧层蒙特利尔议定书》修正案将溴甲烷列入受控物质(ODS)名单中(UNEP, 1992)。尽管该修正案豁免了溴甲烷在装船前处理与检疫处理(QPS)的应用,但许多成员国根据 1997 年制定的限制使用时间表与范围(UNEP, 1999),陆续从

政策层面上采取措施,履行保护大气环境义务。统计数据显示,至 2008 年,议定书的非 A5 条缔约方(发达国家)溴甲烷在 QPS 的用量显著下降,而 A5 条缔约方(发展中国家)的用量呈持续增长趋势(TEAP, 2010a)。IPPC(2008)制定了“替代或减少溴甲烷使用的植物检疫措施指南(ISPM28)”,此后,欧盟 27 个成员国从 2010 年 3 月起在 QPS 中不再使用溴甲烷,巴西也宣布将于 2015 年取缔溴甲烷应用于 QPS(TEAP, 2010b)。

为寻求溴甲烷的替代产品,世界上许多国家投入大量资金开展研发工作,并取得了阶段性成

* 资助项目:国家质检总局科技项目(2010IK248)。

**通讯作者, E-mail: gujie_2007@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-09-24, 接受日期:2012-10-16

果。本文根据现有文献资料,从技术研究与应用层面上,简要概述目前在国际贸易木材检疫处理中减少或替代溴甲烷的研究现状,特别是目前我国对进口原木的检疫处理大量使用溴甲烷熏蒸的情形下,有必要了解国际上的研究信息与动态,为我国进一步开展这方面的研究提供思路与借鉴。

1 减少溴甲烷用量技术

1.1 提高熏蒸空间密闭性

据报道,在原木熏蒸过程中,约有 88% 的溴甲烷被释放到大气中(TEAP,2009)。如果改进罩膜与覆盖技术,可阻止 30% ~ 50% 的溴甲烷气体向外泄漏(TEAP,1997)。在美国、澳大利亚、日本等国的熏蒸手册中,都对保持熏蒸空间的气密性有详细的要求(JFTA,2002;USDA,2009;AQIS,2010),其中美国与澳大利亚还要求在投药后,如因泄漏严重达不到规定浓度,需补充药量,这无疑增加了溴甲烷的使用量。在帐幕熏蒸中,熏蒸气体损失程度受风力与温度变化的影响(Van and Bank,2008)。为此,一些国家对帐幕熏蒸进行改进,如采用集装箱、库房式或加顶盖等方法增加密封性。目前,在中国已建成的 2 个木材检疫除害处理区内,采用三面钢混墙体,最大程度地减小帐幕覆盖面积,且在罩膜的选择上,采用较聚氯乙烯薄膜更厚、气密性更高的 PU 涂层盐膜。良好的气密性可减少溴甲烷的排放量,也节约了溴甲烷使用量。据统计,在 2004—2008 年间,通过技术改进,马来西亚、印度尼西亚、泰国就减少 153 吨左右的溴甲烷用量(Cox,2008;Fox,2008)。另外,良好的气密性也有利于提高溴甲烷气体的回收与再利用率。

1.2 溴甲烷的再利用

溴甲烷的再利用是指在溴甲烷熏蒸结束后将密闭空间内剩余气体通过一定的技术手段进行回收重复利用,从而减少溴甲烷的使用量和向大气的排放量。目前主要采用两种技术手段回收利用。

1.2.1 间接再利用 这是在对溴甲烷吸附研究基础上发展起来的技术。首先采用活性炭、沸石等吸附剂法或冷凝法、洗涤法,将熏蒸混合气中的溴甲烷进行回收收集(黄庆林,2007),然后通过加热将回收的溴甲烷解吸附或分离进行再利用,通

常再利用率在 30% ~ 70% 之间(USEPA,2010)。再利用率的高低主要取决于回收效率与解吸或分离效率,其中回收效率在很大程度上又取决于熏蒸过程的密闭性能,也与货物装载量及吸附剂类型等有关,通过冷却活性炭可提高吸附量。Joyce 等(2008)为此建立了活性炭对溴甲烷吸附与解吸附的关系模型。在实际应用方面,澳大利亚、美国、新西兰、印度、比利时、加拿大及中国等已分别研制出小型的溴甲烷回收装置并得到应用。其局限性主要是能耗较高,经济可行性较差,不能满足大型熏蒸的溴甲烷回收需求。

1.2.2 直接再利用 在中国的 2 个进口木材检疫除害处理区内,通过气体交换的技术方法,将其中一个业已处理完毕的熏蒸仓内的混合气,与另一待处理的熏蒸仓内空气进行直接的气体交换,经一定时间后,2 个熏蒸仓的气体浓度达到相对平衡,从而实现溴甲烷的再利用。实践证明,这种方法的溴甲烷再利用率可达 30% ~ 40% 之间(UNEP,2009;朱光耀等,2010),这已达到集成化应用规模,且其能耗低,经济性较强。但环境温度、仓容与材积的比值对再利用率有较明显的影响(朱光耀等,2010)。

1.3 溴甲烷与其它熏蒸剂混配

通过溴甲烷与其它熏蒸剂混配,在一定程度上有增效作用,同时又可降低溴甲烷的使用量。在木材检疫处理中,将溴甲烷与硫酰氟混配,可使用低浓度的硫酰氟杀死大多数虫态的害虫,同时利用低浓度的溴甲烷杀死卵期害虫,起到互补作用。例如:Soma 等人(1999)的试验是在 15℃ 时,以 30 g/m³ 硫酰氟与 10 g/m³ 溴甲烷的剂量混配处理 9 种木材害虫 24 h,结果除棋盘材小蠹 *Xyleborus pfeili* 外的 8 种害虫各虫态均被杀死,棋盘材小蠹的蛹与幼虫需 50 g/m³ 硫酰氟与 15 g/m³ 溴甲烷的剂量配方才能致死;而在 5℃ 时,即使以 50 g/m³ 硫酰氟与 20 g/m³ 溴甲烷的剂量配方处理 24 h,均不能完全杀灭上述几种害虫;他们又进一步试验,在密闭空间平均温度 19.5℃、大气平均温度 15.6℃ 时,以 30 g/m³ 的硫酰氟与 15 g/m³ 的溴甲烷配方熏蒸 24 h,可全部杀死对粒材小蠹 *Xyleborus perforans*、棋盘材小蠹、红翅杉天牛 *Callidiellum rufipenne* 各虫态以及黄色梢小蠹 *Cryphalus fulvus* 的成虫(Soma et al.,2004)。

2 替代溴甲烷的检疫处理技术

2.1 物理方法

2.1.1 热处理 美国及其它一些国家接受经过热处理的原木与锯材进口,处理一般要求中心温度达到 71℃ 持续 60 min (USDA, 1996), 这种方式对原木而言被认为是一种可降低风险的措施 (Morrell, 1995)。Pascal 等 (2008) 试验,对花曲柳窄吉丁虫 *Agrilus planipennis* 的处理需木材中心温度达到 65℃ 以上才有显著效果,略高于植物检疫措施的国际标准第 15 号 (ISPM 15) 的温度要求。而病原真菌对温度的敏感程度有差异 (Miric *et al.*, 1990; Newbill *et al.*, 1991; Morrell, 1995; Ridley *et al.*, 2001), Dwinell (2001) 认为无论是溴甲烷还是在温度达到 81℃ 的热处理,都不能杀死所有阔叶木边材所携带的病原真菌。另外,这种方式因加热过程所需能耗较大,在散装原木处理中作为溴甲烷的替代方式尚未有规模化的实际应用。

2.1.2 辐照 该技术在对小批量的货物处理中已进行了大量的研究与应用,而对原木的处理尚处于探索性研究和试验阶段。Philip 等 (2000) 应用 γ 射线处理辐射松 (*Pinus radiata*) 原木中携带的葫锯天牛 *Prionoplus reticularis* 幼虫,处理后第 3 天达到 99% 致死的剂量 (LD_{99}) 为 3 677 Gy,处理后第 10 天的 LD_{99} 为 2 476 Gy,死亡率在幼虫虫体大小之间差异不显著;同时试验还表明, γ 射线在原木中穿透性与原木的含水率呈负相关。用 γ 射线辐照处理,对松材线虫的致死剂量在 6 ~ 9 kGy 间 (Reichmuth, 2002)。王跃进等 (2006) 推荐 γ 射线 60 Gy 作为光肩星天牛幼虫检疫辐照处理的有效剂量,用于原木和木质包装的检疫除害处理。该方法在实际应用中除需解决固定原木或木制品的装置问题外,还需要解决大量的技术问题,如射线对新伐原木的穿透力、对部分木制品的潜在伤害、不同类型昆虫的效果差异、铲除病原真菌需相当高的剂量等 (Morrell, 1995)。另外,对于原木这类低价值的商品,应用辐照处理目前还显示不出其经济可行性。

2.1.3 微波 微波实质是应用波长在 10 ~ 30 000 MHz 范围的电磁能进行热处理的一种方式,对木质包装中的光肩星天牛及白蚁有较高的效果 (Lewis *et al.*, 2000; Fleming *et al.*, 2003), 但

对原木所携带的花曲柳窄吉丁虫 *Agrilus planipennis* 效果不明显,可能是在微波下原木温度不均匀的原因 (Pascal *et al.*, 2008)。相关的磁场强度、处理时间、对昆虫个体的杀伤力、木材含水率的影响等还不甚清楚 (Ria *et al.*, 1972; Ikediala *et al.*, 1999), 因而目前还难以在原木的实际检疫处理中推广应用。

2.1.4 浸水 贮存的原木采用水浸方法可有效处理昆虫与真菌。在日本,一般采用盐水浸泡进口原木 30 d,露出水面的部分用杀虫剂喷洒,但会带来被树皮污染后水的处理问题 (Reichmuth, 2002; USEPA, 2010)。这种方式因需相当规模的水池及大量的水,且处理周期相对较长,在大批量原木检疫处理的应用上还存在局限性。

此外,还有去皮、利用信息素或一定波长的光实施诱集等方法,可控制部分有害生物的传播与扩散,但达不到大规模检疫处理的目的,仅能作为检疫处理的补充措施。

2.2 化学熏蒸法

2.2.1 硫酰氟熏蒸 (Sulfuryl Fluoride, SF) 硫酰氟气体较溴甲烷气体对木材的穿透性强 (Scheffrahn and Thomas, 1993)。用硫酰氟熏蒸对木材害虫的成虫有较好的处理效果,但在低于 21℃ 时对卵的效果显著下降而必需增加剂量,最低处理温度不能低于 15℃ (USDA, 1991)。Barak 等 (2010) 应用硫酰氟对携带有铜绿吉丁虫 *Agrilus planipennis* 的白蜡属 (*Fraxinus* spp.) 原木进行熏蒸试验,试验采用在 15.6℃ 熏蒸 24 h 和 48 h 的 CT 值 (熏蒸气体浓度 C 与密闭熏蒸时间 T 的乘积) 分别为 3 382 g h/m³ 和 5 466 g h/m³,以及在 21.1℃ 熏蒸 24 h 和 48 h 的 CT 值分别为 3 329 g h/m³ 和 4 385 g h/m³,熏蒸结束后的 8 周内检查试验用原木,未发现铜绿吉丁成虫;同时将卵直接暴露于硫酰氟气体中进行熏蒸,在 CT 值大于 4262 g h/m³ 时,未见卵孵化现象。Dwinell 等 (2003) 建议对松材线虫密闭熏蒸 24 h,在 15℃ 以下的 CT 值为 3 000 g h/m³,在 35℃ 或以上的 CT 值为 1 000 g h/m³ 可达到理想的处理效果。尽管用与溴甲烷同样剂量的硫酰氟熏蒸 72 h 对栎枯萎病菌有效 (Carpenter *et al.*, 2000; Tubajika *et al.*, 2007), 但对广泛分布的检疫性病原菌的作用尚不完全明确。在美国,硫酰氟虽未列入 I 类或 II 类臭氧消

耗物质 (USEPA, 2009), 但有报道认为硫酰氟也是一种温室效应气体 (Papadimitriou *et al.*, 2009), 其替代溴甲烷的应用尚待进一步研究。

2.2.2 磷化氢熏蒸 (Phosphine, PH_3) 新西兰首先对输往中国的船舱内原木采用磷化氢随航熏蒸的方法, 至今已有 7 年多的历史, 这也是目前唯一商业应用的替代溴甲烷的熏蒸剂。Brash 等人 (2009) 对磷化氢在木材有害生物检疫处理方面进行了研究, 他们认为在 200 ppm 浓度下密闭 10 d, 可有效杀死 6 种原木上携带的木材害虫, 而对锯木则仅需 16 ~ 24 h (20 ~ 30℃)。Glassey (2009) 的研究结果表明, 磷化氢浓度 200 ppm 密闭 10 d, 可对葫锯天牛 *Prionoplus reticularis*、欧洲根小蠹 *Hylastes ater*、长林小蠹 *Hylurgus ligniperda*、新西兰木白蚁 *Kaloterms brouni*、梗天牛 *Arhopalus fesus* 试虫各虫态有很好的效果。Oogita 等人 (1997) 研究, 在 15℃, 2.0 g/m³ 磷化氢条件下密闭熏蒸 24 h, 可杀死日本杉天牛 *Semanotus japonicus* 与罗汉肤小蠹 *Phloeosinus perlatus* 的卵, 尽管密闭熏蒸 48 h 也不能杀死所有试虫的幼虫和蛹; 在 25℃ 时密闭 48 h, 也不能杀死黄色梢小蠹 *Cryphalus fulvus* 幼虫, 只有 48 h 以上的密闭时间才能将其幼虫杀死。此外, 有研究表明, 磷化氢对松材线虫也有较为理想的熏杀效果 (Leesch *et al.*, 1989; Dwinell, 2001), 对病原真菌杀灭效果的研究结果存在争议 (TEAP, 2010a, 2010b; Plant and Tripathi, 2011)。由于磷化氢在熏蒸过程中因原木的吸附等因素可使浓度快速下降 (Wang *et al.*, 2003; Zhang and Brash, 2007)、熏蒸周期较长、毒性较高、纯磷化氢在 38℃ 时就可自燃等, 在进出口口岸实施持续大规模的木材处理有一定的局限性。

2.2.3 碘甲烷熏蒸 (Methyl Iodide, MI) 该熏蒸剂于 2004 年在日本获得用于控制进口木材上各类害虫的注册 (黄庆林, 2007)。Naito 等人 (2003) 研究结果表明, 在 15℃, 碘甲烷剂量为 50 g/m³ 下熏蒸 24 h, 9 种林木害虫中除红翅扁胸天牛 *Callidiellum rufipenne* 外, 均能完全被杀死, 且卵、幼虫、蛹对碘甲烷同样敏感。Soma 等人 (2005) 经过多年的试验, 提出应用碘甲烷实施原木帐幕熏蒸的技术指标为 10℃ 时剂量为 70 g/m³、15℃ 时为 50 g/m³、25℃ 时为 30 g/m³, 并且认为该熏蒸剂具有替代溴甲烷处理进口原木的潜在可能 (Soma *et al.*, 2006, 2007)。由于碘甲烷的沸点较

高 (42.5℃), 熏蒸周期较长, 为此采用与二氧化碳重量比为 1:1 的混合剂加以改良, 可取得更好的效果, 如该复配剂在 10℃ 时的剂量为 84 g/m³、15℃ 时 60 g/m³、20℃ 时 64 g/m³、25℃ 时 48 g/m³, 可完全杀死松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus*、松墨天牛 *Monochamus alternatus* 和褐梗天牛 *Arhopalus rusticus* (Kawakami *et al.*, 2004), 该复配剂于 2005 年获得登记用于木材熏蒸处理。碘甲烷在浓度 160 g/m³ 下熏蒸 72 h, 对栎枯萎病菌的作用与溴甲烷相仿 (Tubajika *et al.*, 2007, 2011)。该熏蒸剂对环境的潜在影响、急性毒性特征以及导致生物基因突变等问题都还需作进一步研究。

2.2.4 氰熏蒸 (Cyanogen) Ren 等 (2006) 研究表明, 21℃ 时, 光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 幼虫直接暴露于该熏蒸剂 6 h 的 CT 值为 56.6 g h/m³ (相当于 9.4 g/m³ 的剂量), 可达到 99.5% 的死亡率。而在 4.4℃ 时要达到同样的死亡率, 则需 94 g/m³ 的剂量下历经 3 h。Dowsett 等 (2004) 试验结果表明, 氰对光肩星天牛、麻头砂白蚁 *Cryptotermes brevis*、谷蠹 *Rhigopertha dominica* 较溴甲烷有更好的效果。氰在较高含水率木材中的穿透性比溴甲烷强, Wright 等人 (2002) 认为具有替代溴甲烷处理原木的可能性。另外氰降解后产生一种在自然环境普遍存在的氰化氢气体, 氰作为熏蒸剂不会引起环境问题, 澳大利亚与新西兰的生产商希望今年通过注册, 东南亚、南非、以色列等也已进入注册程序 (TEAP, 2012)。但该熏蒸剂价格昂贵, 特别在低温条件下处理成本较高, 在木材检疫处理中的应用前景尚需进一步研究。

3 展望

溴甲烷的替代处理技术是一个世界性的课题, 也普遍认为是一个十分棘手的难题, 特别是在口岸实施木材检疫处理中, 由于木材体积大、价格比较低、通关速度要求高等特殊因素, 制约着溴甲烷替代检疫处理技术的应用, 且无论从技术层面还是实际应用可行性上, 到目前尚无成熟的可以完全替代溴甲烷的处理技术。尽管如此, 我们仍可以通过几个方面的工作, 使我国在溴甲烷替代处理技术研究领域跟上国际步伐。

一是增加研究投入。目前, 我国在溴甲烷替代处理技术的投入并不多, 特别是这方面所列项目较少。为此, 可以多渠道筹措研究资金, 既要争

取各级政府或部门给予研究经费的支持,也可以由相关企业如从事检疫处理单位、化工生产单位筹措,以弥补国家支持经费的不足。

二是开展联合研究。应改变长期以来在这方面的研发工作由检验检疫部门孤军奋战的状态,要联合化学工业研究机构、化工生产企业在替代药剂的筛选与剂型的选择上进行研究,也可开展溴甲烷熏蒸尾气分解技术及工艺流程的研究;要联合机械制造等相关行业研制适合木材处理的熏蒸设备、吸附装置等,也需与环境保护监测部门进行药剂的环境影响测试和评估等开展合作研究。

三是研制相关标准。任何一种熏蒸剂或技术方法都不是万能的,且原木携带的有害生物十分复杂,不可能对所有的有害生物进行效果测试,这需要确定替代技术应达到的标准或基本要求,如至少应针对哪几类受关注的有害生物、对环境影响的可接受程度、毒性或能耗的允许范围等。另外,针对现有替代熏蒸剂的弱点作进一步改进研究,制定出不同环境条件如几个温度段的可选用熏蒸剂及其剂量标准。

致谢:感谢扬州大学应用昆虫研究所杜予州教授对本文提出诸多宝贵的修改意见。

参考文献 (References)

- AQIS, 2010. AQIS methyl bromide standard. Version 1.5, 2010. Australian Quarantine and Inspection Service, Australian Government. 62.
- Barak AV, Messenger M, Neese P, Thomas E, Fraser I, 2010. Sulfuryl fluoride as a quarantine treatment for emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae) in ash logs. *J. Econ. Entomol.*, 103(3):603–611.
- Brash DW, Page BBC, 2009. Review of phosphine research for control of timber quarantine pests. Plant & Food Research Confidential Report No. 2370.
- Carpenter J, Gianessi L, Lynch L, 2000. The Economic Impact of the Scheduled U. S. Phaseout of Methyl Bromide. National Center for Food and Agricultural Policy, Washington, DC. 1–466.
- Cox D, 2008. Electronic index of PPQ treatment schedules. Treatment Quality Assurance Unit, Center for Plant Health Science and Technology. Animal and Plant health Inspection Service, US department of Agriculture. <https://manuals.cphst.org/Tindex/treatmentSearch.cfm>.
- Dowsett HA, Ren Y, Waterford CJ, 2004. Toxicity of ethanedinitrile (C_2N_2) to timber or wood related insect pests. Proceedings of Annual International Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, Orlando, Florida, USA.
- Dwinell LD, 2001. Potential use of elevated temperature to manage pests in transported wood. Exotic Forest Pests Online Symposium.
- Dwinell LD, Thoms E, Prabhakaran S, 2003. Effect of sulfuryl fluoride on the pinewood nematode in pine wood. Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, San Diego, California. 1–4.
- Fleming MR, Hoover K, Janowiak JJ, Fang Y, Wang X, Liu W, Wang Y, Hong X, Agrawal D, Mastro VC, Lance DR, Shield JE, Roy R, 2003. Microwave irradiation of wood packing material to destroy the Asian longhorned beetle. *Forest Prod. J.*, 53(1):46–52.
- Fox P, 2008. AFAS; methyl bromide and beyond. Proc. 2008 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, San Diego, Calif. 79–81.
- Glasse KL, 2009. Phosphine as an alternative to methyl bromide for the fumigation of pine logs and swan timbers. IUFRO International Forest Biosecurity Conference, Incorporating the Sixth International Forest Vegetation Management Conference. Rotorua.
- Ikediala JN, Tang L, Neven LG, Drake SR, 1999. Quarantine treatment of cherries using 915 MHz microwaves: temperature mapping, codling moth mortality and fruit quality. *Posth. Biol. Technol.*, 16:127–137.
- IPPC, 2008. Replacement or reduction of the use of methyl bromide as a phytosanitary measure. UNEP/OzL. Pro. WG. 1/28/INF/4.
- JFTA, 2002. Theory and Practice of Plant Quarantine Treatments (revised edition 2002). Japan Fumigation Association. 222.
- Joyce PJ, Bielski R, 2008. Two stage system for the destruction of methyl bromide from fumigation ventilation streams. Proc. 8th International Conference on Controlled Atmospheres and Fumigation in Stored Products. 21–26 Sept. 2008, Chengdu, PRC. 352–355.
- Kawakami F, Soma Y, Komatsu H, Matsumoto Y, 2004. Effects of some fumigants on the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* infesting wooden packages. 4. Mortality and CT product in methyl bromide fumigation with high loading of wood packing materials. *Res. Bull. Pl. Prot.*

- Japan*, 40:7 – 12.
- Le GP, 1932. Les Proprieties insecticides du bromure de methyl. *Rev. Path. Ve g. Ent. Agric. France*, 19:169 – 172.
- Leesch JG, Davis R, Simonaltis RA, Dwinell LD, 1989. In-transit shipboard fumigation of pine woodchips to control *Bursaphelchus xylophilus*. *EPPO Bull.*, 19:173 – 181.
- Lewis VR, Power AB, Haverty MH, 2000. Laboratory evaluation of microwaves for control of the western drywood termite. *Forest Prod. J.*, 50(5):79 – 87.
- Miric M, Willeitner H, 1990. Lethal temperature for some wood-destroying fungi with respect to eradication by heat treatment. Hambrug, Institute of Wood Biology and Wood Preservation. 24.
- Morrell JJ, 1995. Importation of unprocessed logs into North America: A review of pest mitigation procedures and their efficacy. *Forestry Prod. J.*, 45(9):41 – 50.
- Naito H, Goto M, Ogawa N, Misumi T, Akagawa T, Mizobuchi M, Kawakami F, 2003. Effects of methyl iodide on mortality of forest insect pests. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan*, 39:1 – 6.
- Newbill MA, Morrell JJ, 1991. Effects of elevated temperatures on survival of Basidiomycetes that colonize untreated Douglas-fir poles. *For. Prod. J.*, 41:31 – 33.
- Oogita T, Soma Y, Mizobuchi M, Oda Y, Matsuoka TK, 1997. Mortality tests for forest insect pests by phosphine fumigation. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan*, 33:17 – 20.
- Papadimitriou VC, Portmann RW, Fahey DW, Muhle J, Weiss RF, Bukholder JB, 2009. Experimental and theoretical study of the atmospheric chemistry and global warming potential of SO₂F₂. *J. Phys. Chem. A*, 112(49):12657 – 12666.
- Pascal N, Sam T, Kamdem DP, 2008. Kiln and microwave heat treatment of logs infested by the emerald ash borer (*Agrilus panipennis* Fairmaire) (Coleoptera: Buprestidae). *Forest Prod. J.*, 58(7/8):68 – 72.
- Philip JL, David JR, Robert JP, Patricy GC, Peter BR, 2000. The lethal effects of gamma irradiation on larvae of the Huhu beetle, *Prionoplus reticularis*: a potential quarantine treatment for New Zealand export pine trees. *Entomol. Exp. Appl.*, 94:237 – 242.
- Plant H, Trepethi S, 2011. Fumigation of wood with aluminium phosphide for protection against fungi. *J. Tropical Forest Sci.*, 23(4):363 – 370.
- Reichmuth CH, 2002. Alternatives to methyl bromide for the treatment of wood, timber and artefacts in the European community//International Conference on Alternatives to Methyl Bromide, Seville, Spain.
- Ren Y, Wang Y, Barak AV, Wang X, Liu Y, Dowsett HA, 2006. Toxicity of ethanedinitrile to *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae. *J. Econ. Entomol.*, 99:308 – 312.
- Ria PS, Ball HJ, Nelson SO, Stetson LE, 1972. Lethal effects of radio-frequency energy on the eggs of *Tenebrio molitor*. *Annu. Entomol. Soc. Am.*, 65:807 – 810.
- Ridley G, Crabtree R, 2001. Temperature mortality thresholds for insects and rungi. Unpublished report, Frontline Biosecurity.
- Scheffrahn RH, Thomas EM, 1993. Penetration of sulfuryl fluoride and methyl bromide through selected substrates during fumigation. *Down to Earth*, 48(1):15 – 19.
- Soma Y, Naito H, Misumi T, Kawakami F, 1999. Effects of gas mixtures of sulfuryl and methyl bromide on forest insect pests. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan*, 35:15 – 19.
- Soma Y, Goto M, Ogawa N, Komatsu H, Tateya A, Arita A, Nomura N, Abe Y, Itabashi T, 2004. Mortalities of forest insect pests by mixture fumigants. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan*, 40:19 – 23.
- Soma Y, Goto M, Ogawa N, Naito H, Hirata K, 2005. Effects of some fumigants on mortality of the pine wood nematode, *Bursaphelchus xylophilus* infecting wooden packages; 5. Mortality of pine wood nematode and Fumigation Standards by Methyl Iodide. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan*, 41:1 – 7.
- Soma Y, Komatsu H, Abe Y, Itabashi T, Matsumoto Y, Kawakami F, 2006. Effects of some fumigants on mortality of the pine wood nematode, *Bursaphelchus xylophilus* infecting wooden packages. 6. Mortality of pine wood nematode and longhorn beetle by methyl iodide tarpaulin fumigation. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan*, 42:7 – 13.
- Soma Y, Komatsu H, Oogita T, Nakamura Z, Nomura N, Abe Y, Itabashi T, Mizobuchi M, 2007. Mortality of forest insect pests by methyl iodide tarpaulin fumigation. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan*, 43:9 – 15.
- TEAP, 1997. Report of the technology and economic assessment panel April 1997, Part IV: Assessment of the economic viability of methyl bromide alternatives. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United Nations Environment Programme, Nairobi. 2:312.
- TEAP, 2009. Report of the technology and economic assessment panel quarantine and preshipment taskforce – final report October 2009. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United Nations Environment Programme, Nairobi. 332.

- TEAP, 2010a. Report of the technology and economic assessment panel May 2010. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United Nations Environment Programme, Nairobi. 2:277.
- TEAP, 2010b. 2010 Assessment report of the technology and economic assessment panel. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer, United Nations Environment Programme, Nairobi. 91.
- TEAP, 2012. Report of the technology and economic assessment panel May 2012. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United Nations Environment Programme, Nairobi. 1:234.
- Tubajika KM, Barak AV, 2007. Methyl iodide and sulfuryl fluoride as quarantine treatments for solid wood packing material. MBAO Conference, Orlando, 5 November. 131 – 137.
- Tubajika KM, Barak AV, 2011. Fungitoxicity of methyl iodide, sulfuryl fluoride, and methyl bromide to *Ceratocystis fagacearum* in red oak, maple, poplar, birch and pine wood. *Am. J. Plant Sci.*, 2:268 – 275.
- UNEP, 1992. Report of the fourth meeting of the parties to the Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. UNEP/OzL Pro. 4/15.
- UNEP, 1999. Methyl bromide phase-out strategies, A global compilation of laws and regulations. United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics OzonAction Programme. 146.
- UNEP, 2002. Handbook on methyl bromide data reporting under the Montreal Protocol. United Nations Publication, ISBN 92 – 807 – 222268 – 9.
- UNEP, 2009. Final report of the technology and economic assessment panel quarantine and pre-shipment task force; executive summary. Twenty-first meeting of the parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Port Ghalib, Egypt, 4 – 8 November 2009, UNEP/OzL Pro. 21/7.
- USDA, 1991. An efficacy review of control measures for potential pest of imported Soviet timber. USDA APHIS Miscellaneous Publication No. 1496.
- USDA, 1996. Importation of logs, lumber, and other unmanufactured wood articles. 7 CFR 319. 40 USDA Animal and Plant Health Inspection Service. Washington, DC. USDA 1996.
- USDA, 2009. PPQ Treatment Manual. http://www.aphis.usda.gov/import_export/plants/manuals/index.shtml.
- USEPA 2009. Ozone layer depletion. Office of Atmospheric Programs. Washington, D. C. <http://www.epa.gov/ozone/strathome.html>.
- USEPA, 2010. Methyl bromide alternatives for applicators, commodity owners, shippers, and their agents. http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/TEAP/Reports/.
- Van SGJE, Banks HJ, 2008. Freight containers-are they sufficiently gastight for Quarantine & Pre-shipment fumigation with methyl bromide in the 21st century? Proc. 8th International Conference on Controlled Atmospheres and Fumigation in Stored Products, eds. Guo Daolin et al., 21 – 26 Sept. 2008, Chengdu, PRC. 441 – 445.
- Wang Y, Zhan G, Wang X, Xu L, Liu W, Wu N, Yang Y, Shi L, Sun C, 2003. Primary study on the phosphine fumigation of poplar timber infested with *Anoplophora nobilis*. *Plant Quarantine*, 17(13):129 – 132.
- Watson RT, Albritton DL, Andersen SO, Lee-Bapty S, 1992. Methyl bromide: Its atmospheric science, technology, and economics. United Nations Environment Programme, United Nations Headquarters, Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya.
- Wright EJ, Ren YL, Dowsett HA, 2002. Cyanogen: a new fumigant with potential for timber. Proc. 2002 Annual international research conference on methyl bromide alternatives and emissions reductions 6—8 Nov. 2002, Orlando, FL. 48-1-48-2.
- Zhang Z, Brash DW, 2007. What causes phosphine depletion during log fumigation? Crop & Food Research Confidential Report No. 1976.
- 黄庆林, 2007. 动植物检疫处理原理与应用技术. 天津: 天津科学技术出版社. 516.
- 王跃进, 王新, 詹国平, 徐亮, 刘志杰, 刘波, 孙志超, 栢春梅, 黄晓旭, 2006. 辐照对光肩星天牛幼虫发育的影响. *核农学报*, 20(6):527 – 530.
- 朱光耀, 顾忠盈, 吴新华, 肖力, 许强, 刘玉东, 金飞, 顾杰, 2010. 进境原木熏蒸的溴甲烷重复利用技术应用研究. *植物检疫*, 24(3):4 – 7.