

## 不同加热温度下电加热不燃烧卷烟烟气释放特性研究

郑绪东<sup>1</sup>, 李志强<sup>1</sup>, 王程娅<sup>1</sup>, 徐少俊<sup>2</sup>, 韩敬美<sup>1</sup>, 雷萍<sup>1</sup>, 尚善斋<sup>1</sup>, 王汝<sup>1</sup>, 曾旭<sup>1</sup>, 陈焰<sup>2\*</sup>, 汤建国<sup>1</sup>

(1. 云南中烟工业有限责任公司技术中心, 云南昆明 650202; 2. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南昆明 650504)

**摘要** [目的]研究加热温度对电加热不燃烧卷烟烟气释放特性的影响。[方法]采用气相色谱仪、质谱仪及电加热不燃烧卷烟模拟装置系统等,对电加热不燃烧卷烟在不同加热温度下的烟气成分以及烟气中颗粒物、甘油/丙二醇、烟碱等释放特性进行分析。[结果]200~470 ℃时,随着加热温度升高,电加热不燃烧卷烟烟气成分增加,有害成分的释放量增加;260~320 ℃时,随着加热温度升高,烟气中甘油/丙二醇含量明显增加;350~470 ℃时,随着加热温度升高,烟气中颗粒物含量明显增加;低于260 ℃时,烟碱迁移率随温度升高而增加;当温度高于260 ℃时,烟碱迁移率增加速度减小。[结论]该研究为电加热不燃烧卷烟的开发提供依据。

**关键词** 电加热不燃烧卷烟;烟气;加热温度;烟碱;甘油/丙二醇

**中图分类号** TS41<sup>+1</sup> **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)36-0168-04

## Study on Release Characteristics of Electrically Heat-not-burn Cigarette Smoke under Different Heating Temperatures

ZHENG Xu-dong, LI Zhi-qiang, WANG Cheng-ya et al (R&amp;D Center of China Tobacco Yunnan Industry Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650202)

**Abstract** [Objective] The research aimed to study the effect of heating temperature on the release characteristics of electrically heat-not-burn cigarette smoke. [Method] Using gas chromatograph, mass spectrometer and electrically heating simulation system, we analyzed the composition and the release characteristics of the condensates, glycerol/propylene glycol and nicotine in the smoke at different heating temperatures. [Result] At 200~470 ℃, with the increase of heating temperature, the composition of the electrically heat-not-burn cigarette smoke increased and the release of harmful components increased. At 260~320 ℃, the content of glycerol/propane diol in the smoke increased obviously with the increase of heating temperature. At 350~470 ℃, the smoke condensates increased obviously with the heating temperature. The mobility of nicotine increased with the temperature rising below 260 ℃, and the nicotine mobility increased slowly when the temperature was higher than 260 ℃. [Conclusion] This study provides a basis for the development of electric heating non-burn cigarette.

**Key words** Electrically heat-not-burn cigarette; Smoke; Heating temperature; Nicotine; Glycerol/Propylene glycol

传统卷烟烟气中大部分有害成分在卷烟燃烧时发生的高温裂解过程中产生<sup>[1-3]</sup>,并且随着温度上升,烟气成分中醛、苯及同系物、稠环芳烃、CO等有害成分含量随之增加<sup>[4-10]</sup>。电加热不燃烧卷烟利用电能对烟草进行低温加热(500 ℃以下)而不使其发生燃烧,加热时烟丝中的尼古丁及香味物质通过挥发产生烟气。由于烟草不发生燃烧,烟气中的致癌成分含量降低80%,诱变剂摄入量降低70%,消费者支气管炎及肺炎发病率减少36%~46%<sup>[11-15]</sup>。因此,加热温度是影响电加热不燃烧卷烟烟气特性的重要因素,但相关的研究却鲜见报道<sup>[16-22]</sup>。笔者采用气相色谱仪、质谱仪及电加热不燃烧卷烟模拟装置系统等,对电加热不燃烧卷烟在不同加热温度下的烟气成分以及烟气中颗粒物、甘油/丙二醇、烟碱等释放特性进行分析,进而研究加热温度对电加热不燃烧卷烟烟气释放特性的影响。

## 1 材料与方 法

**1.1 试验材料** 电加热不燃烧卷烟样品:混合型电加热不燃烧卷烟烟丝;传统卷烟:某知名卷烟品牌。Trace 1310 气相色谱仪配备 FID 检测器(美国 Thermofisher);6890N/5973 型气质谱仪配 7694 顶空仪(美国,安捷伦公司);电子天平(感量:0.0001 g,德国 Sartorius 公司);自制的电加热不燃烧卷烟抽吸装置及电加热模拟装置。

**1.2 试验方案** 试验原理方案如图 1,使用气相色谱仪、质谱仪、顶空仪、电子天平及自制的电加热不燃烧卷烟模拟装置系统等进行试验测试,从烟气成分、颗粒物质量、烟碱含量、烟碱迁移率等方面,分析了在不同加热温度下电加热不燃烧卷烟烟气释放特性的规律研究。

**1.3 测试方法** 将自制的电加热不燃烧卷烟样品放入电加热模拟装置,每次加热 6 g,设定温度为 200~470 ℃,以 30 ℃ 间隔递增;将捕集完烟气的剑桥滤片放至 20 mL 专用顶空瓶,采用顶空气相色谱质谱联用仪分析烟气成分。

使用电子天平称量剑桥滤片增重质量,分析烟气颗粒物质量变化;配制标准系列溶液,与剑桥滤片混合振荡,气相色谱分析烟碱、甘油等含量及烟碱迁移率变化情况。

**1.4 数据处理** 采用峰面积归一化法进行定量分析并根据质谱匹配度进行核对,然后从特征离子、相对丰度等方面综合比较,确定成分。

## 2 结果与分析

**2.1 电加热不燃烧卷烟烟气成分与加热温度关系** 传统卷烟烟气成分较为复杂,烟气成分含量随温度变化,差异较大。在 420~820 ℃,随着温度的升高稠环芳烃含量增加,尼古丁含量随着温度升高而下降,CO 含量持续增加;500 ℃以上时,主要产物为烯烃、酮、醛、苯等及其同系物;温度升至 700 ℃ 时,苯同系物含量大增<sup>[23-25]</sup>。

电加热不燃烧卷烟烟气成分也随温度变化,对比不同加热温度下电加热不燃烧卷烟烟气成分质谱图发现,在 200~320 ℃ 随着加热温度的升高,烟气挥发性化合物种类增多;但随着温度上升至 470 ℃ 时,烟气中化合物种类基本保持不变。

**基金项目** 云南中烟工业有限责任公司科技重大专项项目(2018XY01);云南省应用基础研究项目(KKSA201331004)。

**作者简介** 郑绪东(1988—),男,云南昭通人,工程师,硕士,从事新型烟草应用技术研究。\*通讯作者,高级工程师,博士,硕士生导师,从事新型烟草制品产品开发研究。

**收稿日期** 2018-04-25; **修回日期** 2018-08-15

对比不同加热温度下烟气气相色谱图发现,图 2a 与图 2b 中强度较高的峰对应的物质种类大致相同,这说明加热温度为 320 °C 和 470 °C 时烟气的主要成分大致相同,在加热 320~470 °C 时,加热温度对烟气成分种类影响不大。但图 2a

中主要几个物质的峰强度低于图 2b 的峰强度,这说明随着温度升高,烟气中部分物质的含量增加;图 2b 中 3-甲基吡啶(⑤)、3,4-二甲基吡啶(⑥)、反式-@-甲基苯乙烯(⑦)、11-甲基-4-异丙烯基苯(⑨)等物质的峰高于图 2b 中的峰强

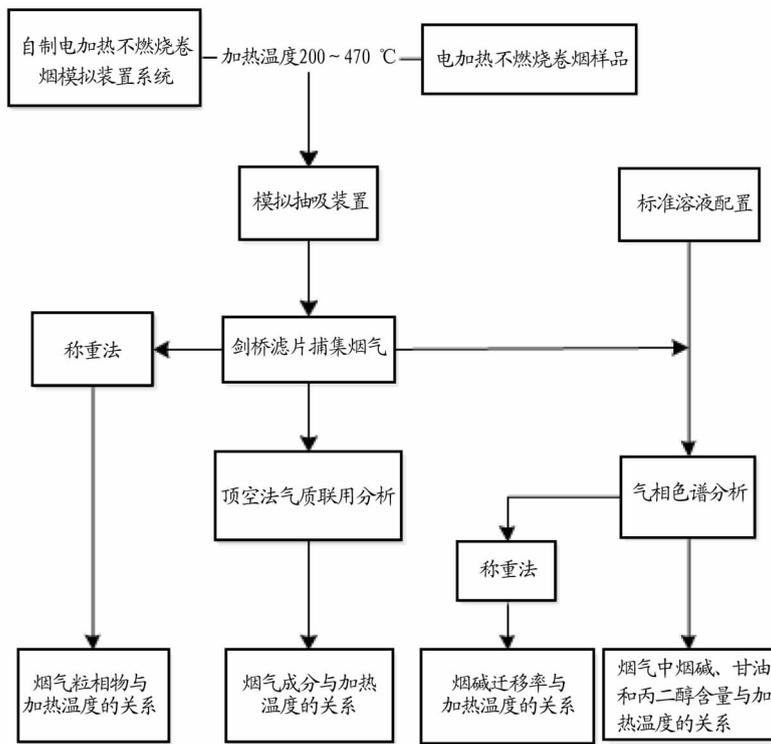
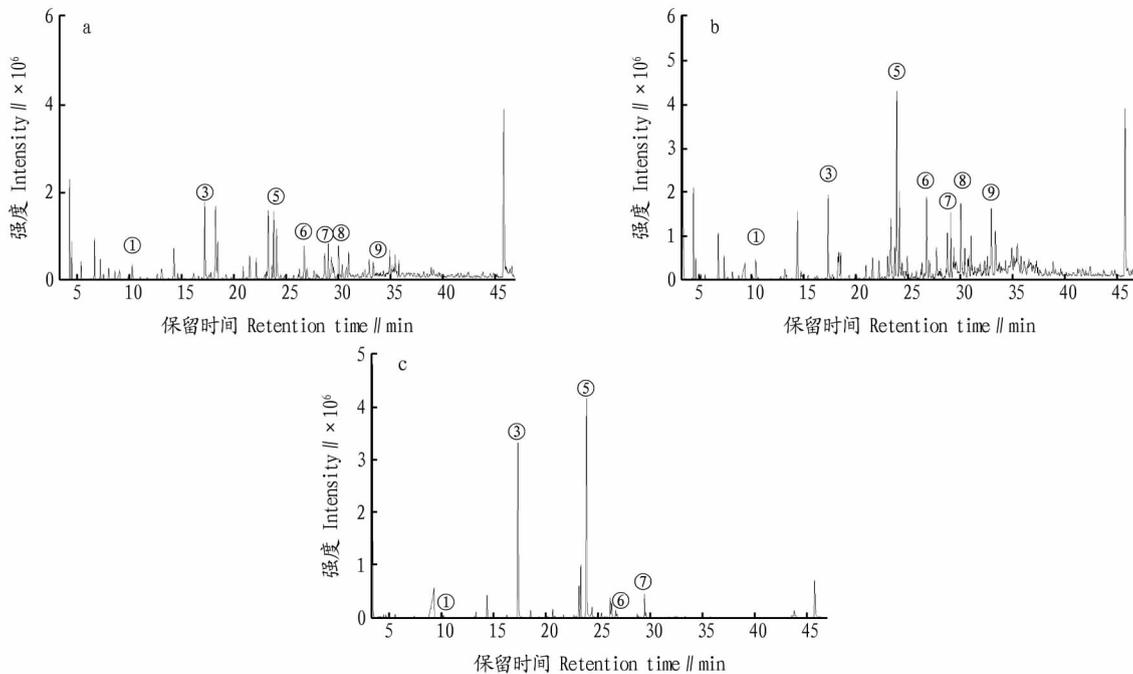


图 1 试验方案

Fig.1 Testing program



注:①丁酮;③3-戊烯-2-丙酮;⑤3-甲基吡啶;⑥3,4-二甲基吡啶;⑦反式-@-甲基苯乙烯;⑧柠檬烯;⑨11-甲基-4-异丙烯基苯

Note: ①butanone; ③3-pentene-2-propanone; ⑤3-methylpyridine; ⑥3,4-dimethylpyridine; ⑦trans-@-methylstyrene; ⑧Limonene; ⑨11-methyl-4-isopropenylbenzene

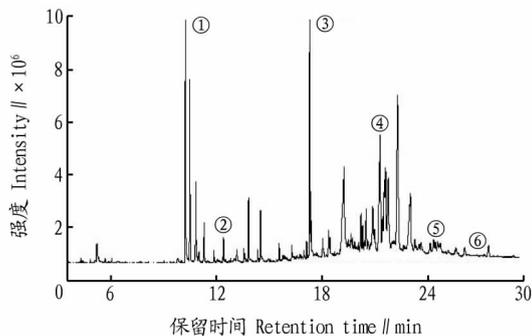
图 2 320 °C (a)、470 °C (b) 和 200 °C (c) 不同加热温度下电加热不燃烧卷烟烟气质谱图

Fig.2 Mass spectrum of electrically heat-not-burn cigarette smoke at different heating temperatures of 320 °C (a), 470 °C (b) and 200 °C (c)

度。对比图 2a、c 发现,图 2a 中峰的数量大于图 2c 中峰的数量,表明随着温度升高,电加热不燃烧卷烟烟气成分种类增加,在图 2c 中未检测到柠檬烯(⑧)、11-甲基-4-异丙烯基苯(⑨)等成分。

对比图 2a 和图 3 发现,图 2a 中物质峰的强度及峰数量均低于图 3,电加热不燃烧卷烟烟气成分没有传统卷烟烟气成分复杂,大大减少了烯烃类、酮类、吡啶类、吡嗪类、苯同系物等有害成分释放。三甲基丁醛(②)、3-呋喃甲醛(④)等有害物质未在电加热不燃烧卷烟烟气中检测到;图 2a 中丁酮(①)、3-戊烯-2-丙酮(③)等物质峰高明显降低。

电加热不燃烧卷烟烟气的有害成分相较传统卷烟极大地降低,但在不同温度下的烟气成分种类及释放量均不同,随着温度增加(200~470 °C),电加热不燃烧卷烟烟气成分增加,有害成分的释放量增加。



注:①丁酮;②三甲基丁醛;③3-戊烯-2-丙酮;④3-呋喃甲醛;⑤三甲基吡啶;⑥3,4-二甲基吡啶

Note: ①butanone; ②trimethylbutanal; ③3-pentene-2-propanone; ④3-furaldehyde; ⑤trimethylpyridine; ⑥3,4-dimethylpyridine

图 3 传统卷烟烟气气相色谱图

Fig.3 Gas chromatogram of traditional cigarette smoke

**2.2 电加热不燃烧卷烟烟气气相物与加热温度关系** 图 4 为剑桥滤片所捕集到电加热不燃烧卷烟在不同温度段下的烟气释放物的关系。在 260~320 °C 随加热温度的升高,电加热不燃烧卷烟芯材料中发烟剂(甘油/丙二醇)逐渐雾化,滤

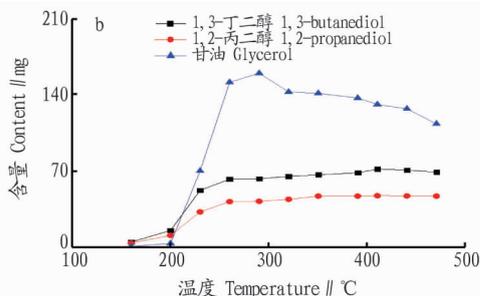
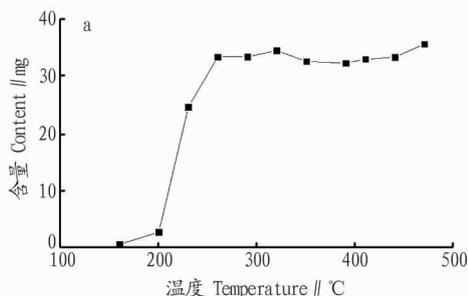


图 5 不同温度下电加热不燃烧卷烟烟气烟碱(a)和甘油/丙二醇(b)含量变化

Fig.5 Changes of nicotine (a) and glycerol/propylene glycol (b) content in electrically heat-not-burn cigarette smoke at different temperatures

### 3 结论

采用气相色谱仪、质谱仪、电子天平及自制的电加热不燃烧卷烟模拟装置系统等,进行试验研究电加热不燃烧卷烟在不同加热温度下烟碱含量、迁移率及烟气气相物等释放特性。结果表明,200~470 °C时,随着加热温度升高,电加热不

片捕集增重呈线性上升趋势。随着甘油/丙二醇逐渐挥发,含量减少,使得在 350 °C 下出现颗粒物质量下降,甘油/丙二醇在 380 °C 下基本雾化完全,同时烟草材料开始裂解,导致温度升高时颗粒物质量保持不变,而在 350~470 °C,大部分烟草材料开始裂解,产物增加,导致滤片捕集再次增重。

**2.3 电加热不燃烧卷烟烟气中烟碱含量、甘油/丙二醇与加热温度的关系** 卷烟抽吸感官中,烟碱、甘油/丙二醇含量及烟碱迁移率是重要参考指标。分析不同加热温度下的含量及迁移率变化趋势(图 5)发现,260 °C 以下时,烟碱含量随着温度升高而增加;温度升至 260 °C 以上,烟碱挥发完全,含量随温度变化小,基本保持不变。在 160~290 °C,甘油/丙二醇中 1,2-丙二醇、1,3-丁二醇、甘油与温度呈正相关;290 °C 以上,1,2-丙二醇、1,3-丁二醇含量波动较小,甘油在高温下发生聚合、分解反应使得甘油含量明显下降。可见,在 260~320 °C 烟碱、甘油/丙二醇释放量均较好。

**2.4 电加热不燃烧卷烟烟碱迁移率与加热温度关系** 从图 6 可看出,260 °C 以下,烟碱的迁移率随温度的升高而增加;260 °C 以上时,迁移率在一定的范围波动;当温度为 320 °C 时,烟碱迁移率达最高值 0.286。在 260 °C 以上条件下,测得电加热不燃烧卷烟单口烟气中烟碱量为总烟碱量的 37.35%。

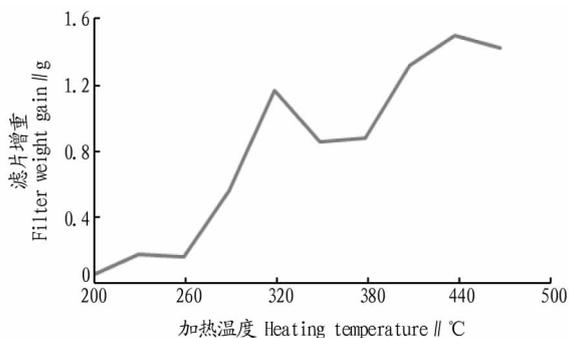


图 4 电加热不燃烧卷烟烟气气相物质量与加热温度的变化关系  
Fig.4 Relationship between mass fraction of particulate matter and heating temperature in electrically heat-not-burn cigarette

燃烧卷烟烟气成分增加,有害成分的释放量增加;260~320 °C 时,随着加热温度升高,烟气中甘油/丙二醇含量明显增加;350~470 °C 时,随着加热温度升高,烟气中颗粒物含量明显增加;低于 260 °C 时,烟碱迁移率随温度升高而增加;当温度高于 260 °C 时,烟碱迁移率增加速度减小。

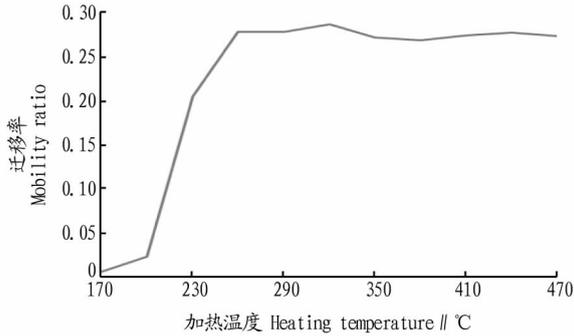


图 6 电加热不燃烧卷烟烟碱迁移率与加热温度关系

Fig.6 Relationship between nicotine mobility ratio and heating temperature in electrically heat-not-burn cigarette

参考文献

[1] 肖协忠.烟草化学[M].北京:中国农业出版社,1997:16-17,100-111,142-146.  
 [2] 王瑞新.烟草化学[M].北京:中国农业出版社,2003:68-70,124-128,159-167,207-214,229-242.  
 [3] 王素芳,苏庆德.裂解气相色谱在烟草化学中的应用[C]//中国烟草学会2002年学术论文集.广州:中国烟草学会,2002:784-787.  
 [4] 罗彦波,庞永强,姜兴益,等.PLS回归法分析多因素对卷烟燃烧温度及主流烟气有害成分释放量的影响[J].烟草科技,2014,47(10):56-60.  
 [5] 王健,潘洋.卷烟主流烟气中几种醛酮的光电离质谱研究[J].质谱学报,2012,33(5):265-270.  
 [6] 韩冰,刘惠民,谢复伟,等.卷烟主流烟气中挥发和半挥发性成分分析[J].烟草科技,2009,42(10):32-40.  
 [7] 洪华俏,郭黎明,易克,等.卷烟主流烟气的中性和碱性香气成分分析[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2008,34(3):164-167.  
 [8] 孔浩辉,郭璇华,沈光林.裂解气相色谱-质谱联用法分析卷烟燃烧产物[J].理化检验(化学分册),2010,46(1):69-73.  
 [9] 陈欢,庞永强,姜兴益,等.抽取参数对主流烟气中氮氧化物释放量的影响[J].烟草科技,2011,44(8):30-34.  
 [10] 许永,张霞,刘巍,等.抽取条件对卷烟主流烟气氰尿酸释放量影响的

研究[J].烟草科技,2011,44(3):50-54.  
 [11] 周顺,王孝峰,郭东峰,等.低温加热状态下烤烟烟气溶胶释放量及其影响因素[J].烟草科技,2015,48(5):34-40.  
 [12] 周顺,宁敏,王孝峰,等.基于可控等值比法实时分析低温加热状态下烟草CO的释放量[J].烟草科技,2015,48(3):23-27.  
 [13] 胡永华,宁敏,张晓宇,等.不同热失重阶段烟草的裂解产物[J].烟草科技,2015,48(3):66-73.  
 [14] FOY J W D, BOMBICK B R, BOMBICK D W, et al. A comparison of *in vitro* toxicities of cigarette smoke condensate from Eclipse cigarettes and four commercially available ultra low-“tar” cigarette [J]. Food Chem Toxicol, 2004, 42(2): 237-243.  
 [15] STAPLETON J A, RUSSELL M A H, SUTHERLAND G, et al. Nicotine availability from Eclipse tobacco-heating cigarette [J]. Psychopharm, 1998, 139(3): 288-290.  
 [16] BORGERDING M F, BONDNAR J A, CHUNG H L, et al. Chemical and biological studies of a new cigarette that primarily heats tobacco. Part 1. Chemical composition of mainstream smoke [J]. Food Chem Toxicol, 1998, 36(3): 183-190.  
 [17] BOMBICK B R, MURLI H, AVALOS J T, et al. Chemical and biological studies of a new cigarette that primarily heats tobacco. Part 2. In vitro toxicol of mainstream smoke condensate [J]. Food Chem Toxicol, 1998, 36(3): 183-190.  
 [18] BOMBICK D W, AYRES P H, PUTNAM K, et al. Chemical and biological studies of a new cigarette that primarily heats tobacco. Part 3. Chemical composition of mainstream smoke [J]. Food Chem Toxicol, 1998, 36: 191-197.  
 [19] 杨继,汤建国,尚善斋,等.利用顶空-GC/MS法对比新型卷烟和传统卷烟的挥发性成分[J].烟草科技,2015,48(11):33-39.  
 [20] 郑赛晶,顾文博,张建平,等.抽取参数对卷烟燃烧温度及主流烟气中某些化学成分的影响[J].中国烟草学报,2007,13(2):6-11,16.  
 [21] 张优茂,李旭华,黄翼飞,等.卷烟燃烧峰值温度对主流烟气CO释放量的影响[J].中国造纸,2011,30(9):39-43.  
 [22] 郑赛晶,顾文博,张建平,等.卷烟燃烧温度和钾盐及烟气关系的探讨[C]//中国烟草学会2005年论文集.上海:中国烟草学会,2015:29-36.  
 [23] 杨继,杨帅,段沅杏,等.加热不燃烧卷烟烟草材料的热分析研究[J].中国烟草学报,2015,21(6):7-13.  
 [24] 杨继,赵伟,杨柳,等.“Eclipse”卷烟的热重/差热分析[J].化学研究与应用,2015,27(5):560-565.  
 [25] 董宁宁.不同温度条件下卷烟的热裂解GC/MS研究[J].质谱学报,2003,24(1):283-286.

(上接第141页)

表 4 六齿小蠹危害油松的生活史(青海)

Table 4 Life cycle of *Ips acuminatus* feeding in *Pinus tabulaeformis* in Qinghai

月份 Month	当年 Current year	次年 Next year	月份 Month	当年 Current year	次年 Next year
1月 January		+++	7月 July	· · ·	--- ooo ++ +
2月 February		+++	8月 August	· ·	--- ooo +++
3月 March		+++	9月 September	·	--- ooo +++
4月 April		+++	10月 October	-	o +++
5月 May	· ·	-	11月 November		+++
6月 June	· · ·	--- oo	12月 December		+++

注: +. 成虫; ·. 卵; -. 幼虫; o. 蛹  
 Note: +. adult, ·. egg, -. larvae, o. pupae

3 结论

(1) 青海省六齿小蠹年生活史为一代, 前后两代在夏季有部分重叠, 成虫在9月下旬转至新的濒死油松树干蛀坑, 在韧皮部下越冬。

(2) 成虫在树皮与边材间筑交配室繁殖, 产卵期始于5月上旬, 至8月中下旬结束, 6—7月中旬为产卵高峰期, 卵期6~12 d。

(3) 幼虫期为5月下旬至9月下旬, 7—8月为幼虫活动高峰期, 幼虫历期30 d左右。

(4) 蛹发生期从6月底至9月底, 蛹历期6~10 d。新成虫于7月中旬羽化, 最晚为10月初。

参考文献

[1] 彩万志, 庞雄飞, 华保祯, 等. 普通昆虫学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.  
 [2] 张执中. 森林昆虫学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.  
 [3] 蔡振声, 史先鹏, 徐培河. 青海经济昆虫志[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1994.  
 [4] 张登峰, 咸文荣, 杨君丽, 等. 坎布拉林场油松小蠹科害虫研究[J]. 青海农林科技, 2007(4): 21-24.  
 [5] 李彦霞. 油松小蠹虫的发生规律及防治[J]. 甘肃农业, 2013(22): 47-48.  
 [6] 叶辉, 吕军, LIEUTIER F. 云南横坑切梢小蠹生物学研究[J]. 昆虫学报, 2004(2): 223-228.  
 [7] 薛永贵, 丁启含, 华藏加, 等. 横坑切梢小蠹生活史及危害规律初报[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(17): 154, 186.  
 [8] 张登峰. 青海省坎布拉林场纵坑切梢小蠹发生危害特性研究[J]. 中国森林病虫, 2013, 32(1): 15-17.