

## 综述



# 加热不燃烧卷烟气溶胶研究进展

周昆<sup>1,2</sup>, 杨继<sup>1\*</sup>, 杨柳<sup>1</sup>, 赵伟<sup>1</sup>, 汤建国<sup>1</sup>, 段沅杏<sup>1</sup>, 巩效伟<sup>1</sup>,  
吴俊<sup>1</sup>, 陈永宽<sup>1</sup>, 缪明明<sup>1</sup>, 曹靖<sup>2</sup>

1 云南中烟工业有限责任公司技术中心, 昆明市北市区红锦路367号 650231;

2 湘潭大学, 化学学院, 湖南 湘潭 411105

**摘要:** 综述了加热不燃烧卷烟气溶胶的化学成分和毒理学评价及加热不燃烧状态下烟叶或烟草材料的热解情况。要点如下: ①加热不燃烧卷烟气溶胶主要由甘油、水、烟碱和较少潜在有害物质(HPHCs)组成, 其中气溶胶中挥发性成分、苯并芘、TSNAs、酚类化合物、苯乙烯等相对于传统卷烟降低80%以上。②加热不燃烧卷烟气溶胶生理毒性低于传统卷烟。③加热不燃烧状态下例如250~550℃之间, 烟碱释放速率随温度升高而减慢, 而二氧化碳和一氧化碳释放速率随温度升高而增快。

**关键词:** 加热不燃烧卷烟; 气溶胶; HPHCs; 毒理学

**引用本文:** 周昆, 杨继, 杨柳, 等. 加热不燃烧卷烟气溶胶研究进展 [J]. 中国烟草学报, 2017,23(5)

自2012年以来, 加热不燃烧卷烟产品的发展势头强劲。与传统的卷烟不同, 以“加热不燃烧”为思路设计的低温卷烟, 能使烟叶或烟草材料刚好加热到足以释放出味道的程度, 而不会点燃烟叶或烟草材料。从1988年雷诺烟草公司首次推出炭加热卷烟Premier以来, 加热不燃烧卷烟产品已经经历了数次改良, 目前主要有两种形式: 炭加热型和电加热型。炭加热型以雷诺烟草公司2014年推出的REVO为代表, 电加热型以菲莫国际的新一代iQOS为代表, 另外, 英美烟草在2016年推出加热不燃烧卷烟产品Glo, 日本烟草推出了加热不燃烧产品Ploom Tech。

通常情况下, 传统卷烟的抽吸温度高达900℃, 烟叶或烟草材料在高温条件下因燃烧、热解、热合成等<sup>[1]</sup>反应产生很多潜在有害物质(Harmful and Potentially Harmful Constituents, HPHCs), 而加热不燃烧卷烟抽吸温度在500℃以下, 可以减少燃烧过程中HPHCs的产生<sup>[2]</sup>。2009年, 在美国众议院通过的“家庭吸烟预防与烟草控制法案(The Family Smoking Prevention and Tobacco Control Act, FSPTCA)”中首次提出MRTP(Modified Risk Tobacco Product)即风险改良烟草产品<sup>[3]</sup>, 而在2016年12月, 菲莫国际向美国

食品与药品管理局(Food and Drug Administration, FDA)烟草制品中心提交了针对iQOS的MRTP申请, 希望为其贴上“低风险”标签。目前, 国外已经对加热不燃烧卷烟进行了大量的烟气气溶胶化学成分、毒理学研究, 但国内对该类产品的研究相对薄弱。为了更好地了解加热不燃烧卷烟气溶胶的化学成分和毒理学影响, 及加热不燃烧状态下烟草化学成分释放规律及烟气成分的研究进展, 为该类型烟草产品的风险评估及产品研发提供理论依据, 本文针对加热不燃烧卷烟气溶胶主要化学成分、毒理学评价及烟草材料化学成分在加热不燃烧状态下的热解情况进行了综述。

## 1 加热不燃烧卷烟气溶胶化学成分

加热不燃烧卷烟基于蒸馏技术而不燃烧烟草, 产生的气溶胶减少了主要的化学成分种类及释放量, 主要组成包含水、甘油、烟碱以及低含量的潜在有害成分(HPHCs)<sup>[4]</sup>。目前, 有系列文章对典型的加热不燃烧卷烟(如: Eclipse<sup>9-11</sup>、Accord、THS等)气溶胶的化学成分进行分析。

### 1.1 炭加热卷烟气溶胶化学成分

目前, 炭加热卷烟产品主要有Premier、Eclipse和REVO。但对REVO卷烟的研究相对较少。

**基金项目:** 中国烟草总公司科技重大专项“电加热新型卷烟质量评价技术研究”[110201401017(XX-05)]; 中国烟草总公司科技重大专项“基于外周加热方式的电加热新型烟草制品的研究与开发”[110201501003(XX-03)]; 云南中烟科技项目“新型烟草产品开发前沿技术研究及应用”[2017XY01]

**作者简介:** 周昆(1988—), 在读硕士, 主要从事烟草化学研究, Tel: 0871-65869613, Email: zhoukun1020@126.com

**通讯作者:** 杨继(1980—), Email: yangji052@163.com

**收稿日期:** 2016-11-02; **网络出版日期:** 2017-08-15

Debethizy 等<sup>[5-8]</sup>考察了在联邦贸易委员会 (Federal Trade Commission, FTC) 标准抽吸模式下炭加热型卷烟 Premier 及参考烟 1R4F 主流烟气总粒相物 (TPM)、焦油 (Tar)、水、烟碱、甘油和有害和 HPHCs 的释放, 结果见表 1。由表 1 可知: Premier 气溶胶主要由水、甘油和丙二醇组成。与 1R4F 主流烟气相比, Premier 气溶胶中大部分烟气成分降低了 90% 以上, 烟碱降低了 58.6%, 烟草特有亚硝胺降低了 93%~98%; 酚类化合物降低了 83%~99%, 其中苯酚和邻二苯酚降低了 99%; 其他成分也降低了许多, 如氰化氢 99%, 氮氧化物 97%, 乙醛 95%, 苯 93%, 甲苯 96%, 苯乙烯 93%。1R4F 主流烟气和 Premier 气溶胶中甲醛含量较为接近, 水和甘油含量

显著高于 1R4F, 分别为 406% 和 374%。

Brown 等<sup>[9-11]</sup>在 FTC 标准抽吸模式下使用剑桥滤片捕集炭加热卷烟 Eclipse 气溶胶及 1R4F 主流烟气 TPM, 并对 TPM 中 Tar、烟碱、甘油、水和 HPHCs 进行化学成分分析, 结果见表 1。由表 1 可知: 与 1R4F 主流烟气相比, Eclipse 气溶胶中烟碱降低了 76.2%, 而甘油和水比例显著增加, 分别为 146.5% 和 37.1%。与 1R4F 主流烟气相比, Eclipse 气溶胶中挥发性成分降低了 85.4%~97.5%; 烟草特有亚硝胺降低了 82.1%~87.8%; 酚类化合物降低了 97.3%~99.0%。其他成分也降低明显, 如一氧化碳 33.2%, 氢氰酸 96.1%, 氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 86.9%, 氨 71.2, 苯并芘 (B[a]P) 88.6%。

表 1 炭加热卷烟气溶胶中化学成分<sup>[5-11]</sup>

Tab. 1 Chemical constituents in aerosol of cigarettes heated by carbon tip

分析物	1R4F	Premier	Eclipse	change/% <sup>a</sup>	Change/% <sup>b</sup>
Nicotine/ (mg/cig)	0.80	0.33	0.19	-58.6	-76.2
甘油 / (mg/cig)	0.99	3.70	2.44	273.7	146.5
丙二醇 / (mg/cig)		0.20			
水 / (mg/cig)	1.26	5.10	1.72	306.4	37.1
CO/ (mg/cig)	11.23	10.60	7.50	-5.6	-33.2
无机化合物 / (μg/cig)					
HCN	132.00	1.10	5.10	-99.2	-96.1
NO <sub>x</sub>	266.33	7.60	35.00	-97.1	-86.9
NH <sub>3</sub>	19.07	4.60	5.50	-75.9	-71.2
醛酮类化合物 / (μg/cig)					
甲醛	14.27	13.50	1.20	-5.4	-91.6
乙醛	656.67	33.50	70.00	-94.9	-89.3
丙烯醛	73.00	18.00	20.00	-75.3	-72.6
丙酮	272.00		22.00		-91.9
挥发性成分 / (μg/cig)					
苯	42.80	2.80	6.20	-93.5	-85.5
甲苯	66.40	2.85	6.80	-95.7	-89.8
丙烯腈	8.93	ND	1.30		-85.4
1,3- 丁二烯	35.00		1.60		-95.4
异戊二烯	353.00		9.00		-97.5

续表 1

分析物	1R4F	Premier	Eclipse	change/% <sup>a</sup>	Change/% <sup>b</sup>
多环芳烃化合物 / (ng/cig)					
B[a]P	5.27	0.08	0.60	-98.5	-88.6
烟草特有亚硝胺 / (ng/cig)					
NNN	90.00	5.40	11.00	-94.0	-87.8
NNK	78.33	1.80	14.00	-97.7	-82.1
NAT	108.33	7.60	15.00	-93.0	-86.2
NAB	18.00	0.85		-95.3	
酚类化合物 / (μg/cig)					
苯酚	8.23	0.19	0.10	-97.8	-98.8
邻甲苯酚	1.80				
间甲苯酚	3.77	0.05	0.10	-98.7	-97.3
对甲苯酚	4.10	0.10		-97.6	
邻苯二酚	40.33	1.10	0.40	-97.3	-99.0
对苯二酚	38.00	0.80	0.70	-97.9	-98.2
间苯二酚	3.00	0.50		-83.3	
半挥发性成分 / (μg/cig)					
吡啶	2.10	0.41		-80.5	
喹啉	226.00	102.00	ND	-54.9	
苯乙烯	2.10	0.15		-93.1	

注: 1. 气溶胶是通过使用 FTC 抽吸方案得到;

2. a 为 (Premier-1R4F) ÷ 1R4F × 100; b 为 (Eclipse-1R4F) ÷ 1R4F × 100;

3. TPM: Total particulate matter, NAB: N-nitrosoanabasine, NAT: N-nitrosoanatabine, NNK: 4-(N-nitrosomethylamino)-1-(3-pyridyl)-1-butanone, NNN: N-nitrosornicotine;

4. ND: 未检测到该物质。

## 1.2 电加热卷烟气溶胶化学成分

电加热卷烟 (electrically heated cigarette smoking system, EHCS) 最早由菲莫烟草公司研发推出, 以 Accord、Heatbar 和 iQOS 为代表。

Roethig 等<sup>[12-13]</sup>分析了在 FTC 标准抽吸模式下 Accord 气溶胶和万宝路 (Marlboro Lights) 卷烟主流烟气中焦油、烟碱和一氧化碳。结果表明: Marlboro Lights 烟气中含 11 mg 焦油, 0.8 mg 烟碱, 12 mg 一氧化碳; 而 Accord 相应的为 3 mg 焦油, 0.2 mg 烟碱, 0.7 mg 一氧化碳。Stabbert 等<sup>[14]</sup>在国际标准组织 (International Organization for Standardization, ISO)

3308 标准抽吸模式下得到 Accord 气溶胶和 1R4F 主流烟气, 并对其中 69 种烟气成分 (脂肪烃类、醛类、脂肪族含氮化合物、芳香胺、卤素化合物、无机化合物、单环芳烃、烟草特有亚硝胺、酚类、多元氮杂环芳烃、多环芳烃化合物及金属元素) 进行化学分析。由表 2 可知, 在 Accord 和 1R4F 中, 大部分烟气成分存在较大差异, 然而 5 种成分 (水、甘油、甲醛、2-硝基丙烷和六亚甲基四胺) 在 Accord 气溶胶中的含量显著高于 1R4F, 其中 Accord 气溶胶中甲醛含量比 1R4F 高 2.4 倍。与 1R4F 相比, Accord 气溶胶中 41 种成分含量比 1R4F 平均低 80%, 其中芳香胺、氰化氢、镉、

苯酚、甲酚、单环芳烃和多环芳烃含量降低 95% 以上；砷和气相成分丙烯腈、1,3- 丁二烯、一氧化碳和氮氧化物降低 90%~95%；二羟基酚类化合物、异戊二烯和烟草特有亚硝胺含量降低 80%~90%；醛类（甲醛除外）、烟碱和焦油释放量降低 70%~80%。Werley 等<sup>[15]</sup>对在 ISO 3402 标准抽吸模式下得到 EHCSS-K 气溶胶及参考烟 2R4F 主流烟气进行化学成分分析，结果见表 2。由表 2 可知：与 2R4F 相比，EHCSS-K 气溶胶中焦油和烟碱含量减少 50%~60%；一氧化碳、氮氧化物、1,3- 丁二烯、异戊二烯、丙烯腈、多环芳烃、氰化氢、芳香胺、烟草特有亚硝胺和苯酚至少降低 90%。另外，其他的 HPHCs 也同样降低了，如：

苯 99%、甲苯 98%、苯酚 97%、邻苯二酚 79%、镉 96% 和砷 51%。Schaller 等<sup>[16-17]</sup>分析了在加拿大深度（Health Canada Intense, HCI）抽吸模式下电加热型卷烟 THS2.2 气溶胶和参考烟 3R4F 主流烟气的化学成分。由表 2 可知：与 3R4F 主流烟气相比，iQOS 气溶胶中大多数 HPHCs 降低超过 90%，如：无机化合物（CO、氰化氢、氮氧化物）96%~99%，醛酮类化合物（甲醛、丙烯醛、丁醛、巴豆醛、甲基乙基酮）90%~96%，挥发性成分降低 98% 以上，烟草特有亚硝胺（NNK、NNN、NAT、NAB）93%~97%，酚类化合物（除邻苯二酚外）91%~99%，B[a]P90%，苯乙烯 97%，芳香胺 99%，铅 90%，镉 99%。

表 2 电加热卷烟气溶胶中主要化学成分<sup>[12-17]</sup>

Tab. 2 Chemical constituents in aerosol of electric-heated cigarettes

分析物	1R4F <sup>a</sup>	2R4F <sup>a</sup>	3R4F <sup>b</sup>	Accord <sup>a</sup>	EHCSS-K <sup>a</sup>	THS2.2 R <sup>b</sup>	THS2.2 RM <sup>b</sup>
TPM/ (mg/cig)	11.44	12.7	49	3.85	5.86	48.20	43.50
Tar/ (mg/cig)	9.47	10.2		2.36	3.1		
Nicotine/ (mg/cig)	0.96	0.93	1.89	0.26	0.31	1.32	1.21
甘油 / (mg/cig)	0.85		2.42	0.62		4.63	3.94
水 / (mg/cig)	1.01	1.52	15.8	1.23	2.45	36.50	29.70
CO/ (mg/cig)	11.10	14.10	32.8	0.66	0.47	0.53	0.59
无机化合物 / (μg/cig)							
HCN	99.30	117.00	493	3.07	5.17	4.81	5.14
NO <sub>x</sub>	351.00	307.00	537	26.50	26.80	17.30	12.60
NH <sub>3</sub>	4.79		39.3	1.50		14.20	13.80
醛酮类化合物 / (μg/cig)							
甲醛	17.00	18.00	56.5	40.60	12.90	5.53	4.55
乙醛	852.00	682.00	1555	187.00	179.00	219.00	205.00
丙烯醛	74.70	66.60	154	18.40	27.30	11.30	9.15
丙酮			125			14.50	13.90
丙醛	64.80	59.20	88.4	12.50	8.90	26.10	26.70
丁醛			68.8			4.14	3.24
巴豆醛			736			40.70	39.40
甲基乙基酮			187			7.18	6.93

续表 2

分析物	1R4F <sup>a</sup>	2R4F <sup>a</sup>	3R4F <sup>b</sup>	Accord <sup>a</sup>	EHCSS-K <sup>a</sup>	THS2.2 R <sup>b</sup>	THS2.2 RM <sup>b</sup>
挥发性成分 / (μg/cig)							
苯	50.60	52.80	97.60	1.10	0.36	0.65	0.64
甲苯	83.10	85.20	188.00	4.15	1.48	2.59	2.39
丙烯腈	11.60	16.20	31.90	0.83	0.44	0.26	0.22
1,3- 丁二烯	50.70	32.40	63.80	3.07	2.15	0.29	0.27
异戊二烯	387.00	432.00	798.00	62.70	34.30	2.35	2.11
多环芳烃化合物 / (ng/cig)							
B[a]P	6.94	8.43	14.20	<0.27	<0.19	<1	1.29
烟草特有亚硝胺 / (ng/cig)							
NNN	134.00	154.00	309.00	24.00	19.8	17.20	13.70
NNK	103.00	131.00	266.00	15.00	6.18	6.70	5.90
NAT	141.00		318.00	25.00		20.50	19.70
NAB	22.00		33.70	3.00		<3.15	<3.15
酚类化合物 / (μg/cig)							
苯酚	11.80	8.11	13.60	0.49	0.18	1.16	1.60
邻甲苯酚	3.63		4.47	0.07		0.07	0.10
间甲苯酚	2.70		3.03	0.07		0.03	0.03
对甲苯酚	6.65		9.17	0.15		0.07	0.08
邻苯二酚	40.60	45.70	91.40	6.25	5.49	16.30	17.10
对苯二酚	43.90		93.10	4.37		8.10	8.98
间苯二酚	0.76		1.85	0.08		0.04	0.05
半挥发性成分 / (μg/cig)							
吡啶			36.10			7.54	7.21
喹啉			0.51			<0.012	<0.012
苯乙烯			24.50			0.61	0.56
芳香胺 / (μg/cig)							
1- 氨基萘			20.8			0.08	0.09
2- 氨基萘	6.04	7.28	11	0.05	0.123	0.05	<0.035
3- 氨基联苯			3.77			<0.032	0.03
4- 氨基联苯	1.32	1.41	3.26	<0.113	0.058	<0.051	<0.051

续表 2

分析物	1R4F <sup>a</sup>	2R4F <sup>a</sup>	3R4F <sup>b</sup>	Accord <sup>a</sup>	EHCSS-K <sup>a</sup>	THS2.2 R <sup>b</sup>	THS2.2 RM <sup>b</sup>
金属元素 /(ng/cig)							
铅 Pb	32.00	13.50	37.00	<0.7	<1.25	<3.35	<3.35
铬 Cr	<1	<1.25	<0.55	<0.3	<0.625	<0.55	<0.55
镍 Ni	<2	<2.5	<0.55	<0.7	<1.25	<0.55	<0.55
汞 Hg			4.8			1.17	1.34
砷 As	5.27	2.92	8.15	0.35	0.792	<1.13	<1.13
镉 Cd	31.50	38.3	161	0.61	0.7	<0.350	<0.350
硒 Se			1.62			<0.55	0.78

注: 1. a 代表 ISO 抽吸模式, b 代表加拿大深度抽吸模式;

2. TPM: Total particulate matter, NAB: N-nitrosoanabasine, NAT: N-nitrosoanatabine, NNK: 4-(N-nitrosomethylamino)-1-(3-pyridyl)-1-butanone, NNN: N-nitrosornicotine,

3. EHCSS: Electrically Heated Cigarette Smoking System, THS2.2: Tobacco Heating System, THS2.2 R: THS2.2 的常规烟支 (不含薄荷醇), THS2.2 RM: THS2.2 含有薄荷醇的常规烟支。

## 2 加热不燃烧卷烟气溶胶毒理学评价

加热不燃烧卷烟作为一类新型烟草制品是为了降低烟气相关的健康风险。为了解加热不燃烧卷烟对吸烟者带来的健康风险, 一些研究人员对加热不燃烧卷烟进行了毒理学评价, 结果表明加热不燃烧卷烟气溶胶毒性低于传统卷烟<sup>[18]</sup>。

### 2.1 炭加热卷烟气溶胶毒理学评价

Smith 等<sup>[5,19-20]</sup> 使用沙门氏菌回复突变试验 (Ames 实验) 测试抽吸炭加热卷烟原型和传统卷烟的吸烟者尿液的致突变性。结果表明: 与抽吸传统卷烟者相比, 抽吸炭加热卷烟者尿液致突变性在菌株 YG1024 中降低 79%, 并且在菌株 TA98 中降低 72%。Ayres 等<sup>[11,21-22]</sup> 使用 Sprague-Dawley 老鼠 (Sprague-Dawley rats) 鼻吸实验、Ames 实验、中性红摄入实验及 SENCAR 小鼠皮肤涂抹实验对 Eclipse 气溶胶和 1R4F 主流烟气的基因毒性、细胞毒性及皮肤致突变性进行评价。结果表明 Eclipse 气溶胶的致肿瘤性、致突变性、基因毒性及细胞毒性均低于 1R4F 主流烟气。Brown 等<sup>[9]</sup> 评估了在 Eclipse 和 1R4F 烟气冷凝物暴露小鼠的肺部、心脏和皮肤组织中形成 DNA 加合物的水平。结果表明, Eclipse 烟气冷凝物的遗传毒性明显低于 1R4F 卷烟。Bombick 等<sup>[23]</sup> 使用姊妹染色单体交换实验、染色体畸变、中性红细胞毒性试验及 Ames 实验对参考烟 1R4F 和 1R5F 主流烟气及雷诺烟草公司提供的炭加热卷烟 (TOB-HT) 冷凝物在

CHO 细胞中的细胞毒性进行了分析。这些实验结果表明: TOB-HT 冷凝物的细胞毒性和基因毒性显著低于 1R4F 和 1R5F 烟气冷凝物。Mckarns 等<sup>[24]</sup> 对比了 TOB-HT、1R4F 及 1R5F 的烟气冷凝物对细胞间隙连接通讯 (Gap junction intercellular communication, GJIC) 功能和乳酸脱氢酶释放 (Lactate dehydrogenase release, LDH) 的影响。研究了烟气冷凝物对人类支气管/气管上皮细胞、冠状动脉内皮细胞、冠状动脉平滑肌细胞和 WB-344 鼠肝上皮细胞系等细胞系的细胞质膜结构和功能的影响。研究结果表明: TOB-HT 冷凝物对多种细胞系的细胞质膜的结构和功能的破坏小于 1R4F 和 1R5F 冷凝物。

### 2.2 电加热卷烟气溶胶毒理学评价

Tewes 等<sup>[25-26]</sup> 采用 Ames 试验、中性红实验及 90 天大鼠仅鼻吸实验评价电加热卷烟 Accord 气溶胶和 1R4F 主流烟气总粒相物的体外毒性。Ames 实验结果表明, Accord 的致突变性与相比 1R4F 相比降低 90%; 小鼠胚胎 BALB/c 3T3 细胞中性红摄入实验结果表明, Accord 的细胞毒性降低 40%。对 90 天大鼠仅鼻吸实验的生物学效应分析发现, Accord 卷烟气溶胶的生物学活性平均降低 65%。Roemer 等<sup>[27-28]</sup> 采用小鼠纤维母细胞的中性红摄入实验、Ames 实验、小鼠淋巴瘤细胞的 TK 实验 (TK Assay)、90 天吸入毒性研究及 35 天吸入肺部炎症研究评估第二代电加热卷烟气溶胶和 1R4F 主流烟气的细胞毒性、致突变性、基因毒性及亚慢性吸入毒性。一系列实验结果表明,

与1R4F主流烟气相比,第二代电加热卷烟气溶胶的体外毒性和吸入毒性显著降低。Werley等<sup>[15,29]</sup>采用Ames实验和中性红摄入实验等体外毒性测试方法、小鼠皮肤涂抹实验及35和90天大鼠仅鼻吸实验等体内毒性测试方法对K系列电加热卷烟气溶胶和参考烟2R4F主流烟气的毒理学进行评价。Ames实验结果表明,与2R4F相比,K系电加热卷烟TPM的致突变性降低70%~90%,其TPM和气相组分的细胞毒性分别降低82%和65%。小鼠皮肤涂抹实验结果表明,与2R4F相比,K系电加热卷烟烟气冷凝物对皮肤肿瘤诱发率较低。35和90天大鼠仅鼻吸实验结果表明,与2R4F相比,K系电加热卷烟烟气诱发大鼠肺部组织炎症较轻。Schaller等<sup>[16]</sup>采用中性红摄入实验、Ames实验和小鼠淋巴瘤实验(Mouse lymphoma assay, MLA)等体外毒性测试方法评价了菲莫国际的烟草加热产品THS 2.2(Tobacco Heating System 2.2)气溶胶和参考烟3R4F主流烟气的致突变性和细胞毒性。Ames、小鼠淋巴瘤和中性红摄入实验结果表明,与3R4F主流烟气相比,THS 2.2气溶胶的致突变性和细胞毒性至少降低了85%~95%。

### 3 加热不燃烧状态下烟草材料的热解

作为加热不燃烧卷烟的两种典型的产品-炭加热型卷烟和电加热型卷烟指采用特殊的装置使烟草在较低的温度(一般<500℃)下发生蒸馏和较简单的热解反应而产生的气溶胶<sup>[2]</sup>。随着人们对加热不燃烧卷烟的认可,了解烟草化学成分在加热不燃烧状态下热解及释放情况能够更好地对该类产品的研发和评估提供理论依据。

对烟草材料研究表明:烟叶中稳定存在的烟碱盐在150℃开始释放出游离态烟碱<sup>[30-32]</sup>。刘珊等<sup>[33]</sup>考察了烤烟、白肋烟及香料烟3种类型烟叶在200~400℃加热状态下烟气释放特征,得到不同类型和部位烟叶在加热状态下粒相物、烟碱、水分及焦油的释放量均随加热温度的升高而逐渐增加,当加热温度高于250℃,烟叶的烟气烟碱量由烟叶自身游离烟碱量和结合态烟碱热解释放量组成。White等<sup>[34]</sup>考察了250~550℃之间烟气中烟碱、二氧化碳和一氧化碳随温度的释放量变化。结果显示,烟碱释放速率随温度升高而减慢,二氧化碳和一氧化碳释放速率随温度升高而增快。Baker<sup>[35]</sup>通过对纤维素和烟叶研究指出一氧化碳主要是由烟草成分在低温(约180℃)分解产生。卢岚等<sup>[36]</sup>研究低温下纤维热解形成B[a]P的过程。结果表明:270~450℃与450~600℃两个温度段

下B[a]P的生成量分别为0.035 μg/g和0.486 μg/g。周顺等<sup>[37]</sup>分析低温加热状态下烟草一氧化碳释放量。结果表明:与高温燃烧状态相比,低温加热状态下烟草的一氧化碳释放量明显偏低;温度对低温加热状态下烟草一氧化碳释放量的影响较小。Forster等<sup>[38]</sup>在100~200℃采用自制的烟叶加热装置研究加热温度对气溶胶成分的影响。结果表明:①在140℃和160℃时检测到一氧化碳、乙醛、N'-亚硝基降烟碱(NNN)和4-(N-亚硝基甲氨基)-1-(3-吡啶基)-1-丁酮(NNK),并且在180℃和200℃检测到巴豆醛和甲醛。

### 4 结论与展望

加热不燃烧卷烟能够提供真实的烟味及较少的HPHCs,相较于传统卷烟和电子烟具有明显的优势。在国际严格控烟的大环境下,加热不燃烧卷烟产品未来将会呈爆发式增长。现有文献对典型加热不燃烧卷烟气溶胶的化学成分及毒理学进行分析和评价,结果表明:典型市售加热不燃烧卷烟气溶胶化学成分主要由甘油、水和烟碱组成,其中的氨、挥发性有机化合物、氢氰酸、烟草特有亚硝胺、芳香烃类、芳香胺类、茄尼醇、苯类、羰基类化合物、一氧化碳、氮氧化合物、苯酚、3-乙烯基氮苯、1,3-丁二烯等物质含量都显著降低,且毒理学评价表明加热不燃烧卷烟气溶胶的细胞毒性、基因毒性、致突变性等都显著低于传统卷烟。不同于传统卷烟,加热不燃烧卷烟作为一种新型的烟草制品,其在产品标准、质量评价、安全性评价等方面都尚处研究开发阶段,未形成统一的标准。同时加热不燃烧卷烟的气溶胶的化学成分和安全性评价和其烟具的加热特性和烟芯材料配方密切相关,这必然导致不同类型、不同品牌研发的加热不燃烧卷烟具有不同的气溶胶特性。并且目前对烟叶或烟草材料在加热不燃烧状态下烟草成分的释放规律及机理缺少系统研究。因此,在制定相应的加热不燃烧卷烟产品标准、质量评价标准的同时,研究人员需要结合多种研究手段对加热不燃烧卷烟烟草材料在加热不燃烧状态下的释放规律及机理进行研究,为此类产品的研发及健康风险评估提供理论和技术支撑。

#### 参考文献

- [1] Baker R R. Smoke generation inside a burning cigarette: Modifying combustion to develop cigarettes that may be less hazardous to health[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2006, 32(4):373-385.
- [2] Hughes J R, Keely J P. The effect of a novel smoking system—Accord—on ongoing smoking and toxin exposure[J]. Nicotine Tob

- Res, 2004, 6(6): 1021-1027.
- [3] US Congress. Public Law No.807 111-31. Family smoking prevention and tobacco control act[EB/OL]. (2009-06-22) [2014-10-23]. [http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi\\_bin/getdoc.cig?dbname=11\\_cong\\_public\\_laws&docid=f:pub1031.111.pdf](http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi_bin/getdoc.cig?dbname=11_cong_public_laws&docid=f:pub1031.111.pdf).
- [4] Kogel U, Schlage W K, Martin F, et al. A 28-day rat inhalation study with an integrated molecular toxicology endpoint demonstrates reduced exposure effects for a prototypic modified risk tobacco product compared with conventional cigarettes[J]. *Food Chem Toxicol*, 2014, 68: 204-217.
- [5] Debethizy J D, Borgerding M F, Doolittle D J, et al. Chemical and biological studies of a cigarette that heats rather than burns tobacco[J]. *Journal of Clinical Pharmacology*, 1990, 30(8):755.
- [6] Hoffmann D, Hoffmann I. THE CHANGING CIGARETTE, 1950-1995[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2010, 50(4): 307-364.
- [7] Brunnemann K D, Kagan M R, Cox J E, et al. Analysis of 1,3-butadiene and other selected gas-phase components in cigarette mainstream and sidestream smoke by gas chromatography-mass, selective detection[J]. *Carcinogenesis*, 1990, 11(10):1863-1868.
- [8] Byrd G D, Fowler K W, Hicks R D, et al. Isotope dilution gas chromatography—mass spectrometry in the determination of benzene, toluene, styrene and acrylonitrile in mainstream cigarette smoke[J]. *Journal of Chromatography*, 1990, 503(2):359.
- [9] Brown B, Kolesar J, Lindberg K, et al. Comparative studies of DNA adduct formation in mice following dermal application of smoke condensates from cigarettes that burn or primarily heat tobacco.[J]. *Mutat Res*, 1998, 414(1-3):21-30.
- [10] Borgerding M F, Bodnar 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 and chemical toxicology*, 1998, 36(3): 169-182.
- [11] Meckley D R, Hayes J R, Van Kampen K R, et al. Comparative study of smoke condensates from 1R4F cigarettes that burn tobacco versus ECLIPSE cigarettes that primarily heat tobacco in the SENCAR mouse dermal tumor promotion assay.[J]. *Food & Chemical Toxicology*, 2004, 42(5):851-863.
- [12] Roethig H J, Kinser R D, Lau R W, et al. Short-term exposure evaluation of adult smokers switching from conventional to first-generation electrically heated cigarettes during controlled smoking. [J]. *Journal of Clinical Pharmacology*, 2005, 45(2):133.
- [13] Roethig H J, Zedler B K, Kinser R D, et al. Short-term clinical exposure evaluation of a second-generation electrically heated cigarette smoking system.[J]. *Journal of Clinical Pharmacology*, 2007, 47(4):518-530.
- [14] Stabbert R, Voncken P, Rustemeier K, et al. Toxicological evaluation of an electrically heated cigarette. Part 2: Chemical composition of mainstream smoke[J]. *Journal of Applied Toxicology* *Jat*, 2003, 23(5):329-339.
- [15] Werley M S, Freelin S A, Wrenn S E, et al. Smoke chemistry, in vitro and in vivo toxicology evaluations of the electrically heated cigarette smoking system series K.[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2008, 52(2): 122-139.
- [16] Schaller J, Keller D, Poget L, et al. Evaluation of the Tobacco Heating System 2.2. Part 2: Chemical composition, genotoxicity, cytotoxicity, and physical properties of the aerosol.[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2016, 81: S27-S47.
- [17] Gonzalezsuarez I, Martin F, Marescotti D, et al. In Vitro Systems Toxicology Assessment of a Candidate Modified Risk Tobacco Product Shows Reduced Toxicity Compared to That of a Conventional Cigarette.[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2016, 29(1): 3-18.
- [18] 李翔, 谢复炜, 刘惠民. 新型烟草制品毒理学评价研究进展 [J]. *烟草科技*, 2016, 49 (1) : 88-93.
- LI Xiang, XIE Fuwei, LIU Huimin. Recent advances in toxicological evaluation of novel tobacco products[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2016, 49(1):88-93.
- [19] Smith C J, Mckarns S C, Davis R A, et al. Human urine mutagenicity study comparing cigarettes which burn or only heat tobacco[J]. *Mutation Research*, 1989, 223(2): 221-232.
- [20] Smith C J, Mckarns S C, Davis R A, et al. Human urine mutagenicity study comparing cigarettes which burn or only heat tobacco[J]. *Mutation Research*, 1989, 223(2): 221-232.
- [21] Ayres Paul H , Johnnie R Hayes, Mark A Higuchi, et al. Subchronic inhalation by rats of mainstream smoke from a cigarette that primarily heats tobacco compared to a cigarette that burns tobacco[J]. *Inhalation Toxicology*, 2001, 13(2):149-186.
- [22] 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” cigarettes[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2004, 42(2): 237-243.
- [23] 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 toxicology of mainstream smoke condensate.[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 1998, 36(3): 183-190.
- [24] Mckarns S C, Bombick D W, Morton M J, et al. Gap junction intercellular communication and cytotoxicity in normal human cells after exposure to smoke condensates from cigarettes that burn or primarily heat tobacco[J]. *Toxicology in Vitro*, 2000, 14(1): 41-51.
- [25] Tewes F, Meisgen T J, Veltel D, et al. Toxicological evaluation of an electrically heated cigarette. Part 3: Genotoxicity and cytotoxicity of mainstream smoke.[J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2003, 23(5): 341-348.
- [26] Terpstra P M, Teredesai A, Vanscheeuwijck P, et al. Toxicological evaluation of an electrically heated cigarette. Part 4: Subchronic inhalation toxicology[J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2003, 23(5): 349-362.
- [27] Roemer E, Stabbert R, Veltel D, et al. Reduced toxicological activity of cigarette smoke by the addition of ammonium magnesium phosphate to the paper of an electrically heated cigarette : Smoke chemistry and in vitro cytotoxicity and genotoxicity[J]. *Toxicology in Vitro*, 2008, 22(3): 671-681.
- [28] Moennikes O, Vanscheeuwijck P M, Friedrichs B, et al. Reduced toxicological activity of cigarette smoke by the addition of ammonia magnesium phosphate to the paper of an electrically heated cigarette: Subchronic inhalation toxicology[J]. *Inhal Toxicol*, 2008, 20(7): 647-663.
- [29] Zenzen V, Diekmann J, Gerstenberg B, et al. Reduced exposure evaluation of an Electrically Heated Cigarette Smoking System. Part 2: Smoke chemistry and in vitro toxicological evaluation using smoking regimens reflecting human puffing behavior.[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2012, 64(2): S11-S34.
- [30] Perfetti T A, Norman A B, Gordon B M, et al. The transfer of nicotine from nicotine salts to mainstream smoke[J]. *Beitr Tabakforsch Int*, 2000, 19(3): 141-158.
- [31] Riggs D M, Perfetti T A. Thermochemical properties of nicotine salts[J]. *Beitr Tabakforsch Int*, 2001, 19(6): 289-295.



- [32] Seeman J I, Carchman R A. The possible role of ammonia toxicity on the exposure, deposition, retention, and the bioavailability of nicotine during smoking[J]. *Food Chem Toxicol*, 2008, 46(6): 1863-1881.
- [33] 刘珊, 唐培培, 曾世通, 等. 加热状态下烟叶烟气的释放特征[J]. *烟草科技*, 2015, 48(4): 27-31.  
LIU Shan, TANG Peipei, ZENG Shitong, et al. Smoke Release Characteristics of Tobacco Leaves Under Heating[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, 48(4): 27-31.
- [34] White J L, Conner B T, Perfetti T A, et al. Effect of pyrolysis temperature on the mutagenicity of tobacco smoke condensate[J]. *Food & Chemical Toxicology An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 2001, 39(5): 499-505.
- [35] Baker R R. A review of pyrolysis studies to unravel reaction steps in burning tobacco [J]. *J Anal Appl Pyrol*, 1987, 11(87): 555-73.
- [36] 卢岚, 杨柳, 吴亿勤, 等. 剑桥滤片捕集装置 - 热重 - 气相色谱 - 质谱法研究低温下纤维热解形成苯并 [α] 芘的过程 [J]. *中国烟草学报*, 2012, 18(3): 1-5.  
LU Lan, YANG Liu, WU Yiqin, et al. The formation of benzo[a] pyrene in low temperature cellulose pyrolysis with cambridge filter trapping device-thermogravimetry-gas chromatography mass spectrometry[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2012, 18(3): 1-5.
- [37] 周顺, 王孝峰, 郭东锋, 等. 低温加热状态下烤烟气溶胶释放量及其影响因素 [J]. *烟草科技*, 2015, 48(5): 34-40.  
ZHOU Shun, WANG Xiaofeng, GUO Dongfeng, et al. Amount of aerosol released from flue-cured tobacco leaves heated at low temperature and influencing factors thereof[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, 48(5): 34-40.
- [38] Forster M, Liu C, Duke M G, et al. An experimental method to study emissions from heated tobacco between 100-200 °C [J]. *Chemistry Central Journal*, 2015, 9(1): 1-10.

## Research advances related to heat-not-burn cigarette aerosol

ZHOU Kun<sup>1, 2</sup>, YANG Ji<sup>1\*</sup>, YANG Liu<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, TANG Jianguo<sup>1</sup>, DUAN Yuanxing<sup>1</sup>, GONG Xiaowei<sup>1</sup>, WU Jun<sup>1</sup>,  
CHEN Yongkuan<sup>1</sup>, MIAO Mingming<sup>1</sup>, CAO Jing<sup>2</sup>

1 R&D Center of China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., NO.367 HongJin Road, Kunming 650231, China;

2 Department of Chemistry, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China

**Abstract:** Research in chemical constituents and toxicological evaluation of heat-not-burn tobacco product aerosol and emission characteristics of aerosol from tobacco in heating instead of burning were reviewed. ① Aerosol from heat-not-burn tobacco product consists mainly of glycerin, water, nicotine and lower yields of HPHCs. Volatile constituents, benzo[a]pyrene, tobacco specific nitrosamines, phenols, and styrene were 80% lower than those in traditional cigarettes. ② Aerosol from heat-not-burn tobacco product showed lower toxicity than that of traditional cigarettes. ③ Under condition of heating not combustion state of 250~550°C, nicotine release rate slows down while carbon dioxide and carbon monoxide release rate increases with the rise of temperature.

**Keywords:** heat-not-burn tobacco product; aerosol; HPHCs; toxicological evaluation

**Citation:** ZHOU Kun, YANG Ji, YANG Liu, et al. Research advances related to heat-not-burn cigarette aerosol [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2017, 23(5)

\*Corresponding author. Email: yangji052@163.com