

# 烤烟主流烟气一氧化碳的影响因素分析

刘献军, 张映, 熊晓敏, 庄亚东, 石怀彬, 朱怀远, 吴佳

(江苏中烟工业有限责任公司技术研发中心, 南京 210019)

**摘要:**为探讨烤烟主流烟气中 CO 释放行为的主要影响因素,对 63 个烤烟样品的 14 种化学组分及 2 个物理参数与烤烟主流烟气中 CO 释放量、CO/Tar 及 CO 每口释放量之间的关系进行了相关分析及因子分析。结果表明,烟支包卷密度、阴燃速率、粗纤维、烟碱、氯、总灰分以及钾、钙、铜、铁等金属元素与烟气 CO 呈极显著相关;以主成分法从 16 个指标中提取了 6 个因子,其中粗纤维-燃烧因子及氯因子与烟气 CO 呈极显著相关。因此,影响烤烟 CO 释放行为的主要是阴燃速率、粗纤维及钾、氯元素。

**关键词:** CO; CO/Tar; 相关分析; 因子分析; 烤烟

中图分类号: S572; T41<sup>+</sup>1

文章编号: 1007-5119(2013)04-0083-05

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5119.2013.04.018

## Effect of Some Chemical and Physical Factors on Carbon Monoxide in Mainstream Smoke of Flue-cured Tobacco

LIU Xianjun, ZHANG Ying, XIONG Xiaomin, ZHUANG Yadong, SHI Huaibin, ZHU Huaiyuan, WU Jia  
(Research & Development Center, China Tobacco Jiangsu Industrial Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Based on data of 14 chemical constituents and 2 physical parameters of 63 flue-cured tobacco samples, effect of 16 factors on CO yield behavior in mainstream smoke was investigated by correlation analysis and factor analysis. The result showed that wrapped density of rod and smoldering velocity of cigarette rod, crude fiber, nicotine, Cl, total ash and some metal elements such as K, Ca, Cu, Fe, had significant correlation (at 0.01 level) with CO yield behavior in mainstream. Six components were extracted by principal component analysis. F1(named fiber-burning component) had positive significant correlation (at 0.01 level) with CO/Tar and CO/puffs; F5 (named chlorine component) has positive significant correlation (at 0.01 level) with CO yield and CO/puffs. F3 and F6 had positive significant correlation (at 0.05 level) CO/puffs. In conclusion, smoldering velocity of cigarette rod, crude fiber, K and Cl have strong influences on CO yield behavior in mainstream smoke of flue-cured tobacco.

**Keywords:** carbon monoxide; CO/Tar; correlation analysis; factor analysis; flue-cured tobacco

一氧化碳(CO)是 44 种 Hoffmann 烟气有害成分之一<sup>[1]</sup>,与吸烟与健康问题关系重大。谢剑平等<sup>[2]</sup>研究认为,CO 可作为 7 种有害成分之一,用于表征评价烟气危害性指数。近年来,许多研究致力于降低烟气 CO 的技术研究<sup>[3-8]</sup>,而另一些研究则致力于 CO 生成的影响因素尤其是烤烟理化因素分析。后者的相关工作主要涉及常规化学成分、静燃速率、卷烟特性参数及填料类型等某些物理化学指标,且仅就 CO 释放量进行了研究<sup>[9-16]</sup>。这些重要工作为卷烟主流烟气中 CO 减害技术开发提供了一定的理论基础。但是,鉴于 CO 生成条件的复杂性,

除一般的常规指标外,考虑其他重要理化指标如烟支包卷密度、粗纤维、总灰分、钙、镁、铁、铜等,并以多种分析工具系统分析,提取烤烟 CO 释放量、CO/Tar 及 CO 每口释放量等释放行为的主要影响因素,对于 CO 减害技术开发仍有一定的理论及实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

采集云南、湖南、贵州、福建、河南等 9 省烟区上、中、下部烤烟 19 个组合计 57 个样品及巴西、

基金项目: 国家烟草专卖局卷烟减害技术重大专项“选择性降低卷烟主流烟气一氧化碳释放量”{国烟办综[2011]556 号}

作者简介: 刘献军,男,硕士,主要从事烟草化学研究。E-mail: njliuxianjun@sina.com.cn

收稿日期: 2011-12-01

修回日期: 2012-04-11

津巴布韦 5 个烤烟样品共计 63 个样品,经回潮、切丝、烘丝、去梗签、水分平衡等工序后在卷烟机上卷制成供试烟支(50 CU 卷烟纸、22 mm 滤嘴)。用于烟气分析的卷烟样品在温度(22±2)℃、相对湿度(60±5)%条件平衡 48 h 后筛选,吸阻为平均值±50 Pa,质量为平均值±20 mg。

### 1.2 理化指标测定方法

包卷密度为烟丝重量与烟支圆柱体积之比;阴燃速率是将吸烟机(SM400,英国 FLTRONA 公司)的抽吸间隔时间设为 600 s,在标准风速条件下记录阴燃 40 mm 烟支长度的时间而测得;总灰分及粗纤维分别采用茶叶国标 GB/T 8306—2002、GB/T 9310—2002 测定;采用原子吸收火焰光度法测定钾、钙、镁、铁、锰、铜、锌<sup>[17]</sup>;总糖、烟碱、总氮、石油醚提取物、氯离子分别采用烟草行业标准 YC/T 159—2002、YC/T 160—2002、YC/T 161—2002、YC/T 176—2003、YC/T 162—2002 测定;焦油及烟气 CO 分别按 GB/T 19609—2004、GB/T 23356—2009 测定。

### 1.3 数据分析

原始数据分析在 SPSS12.0 上进行。Pearson 相关系数(双尾)达极显著(0.01)水平及显著(0.05)水平分别标记“\*\*”与“\*”;因子分析采用主成分法,提取特征值大于 0.7 的因子,按最大方差旋转,以回归法计算各提取因子得分。

## 2 结果

### 2.1 烟气 CO 与烤烟理化因素之间的相关性

16 种理化指标与烟气 CO 之间的简单相关结果如表 1。其中,包卷密度对 CO 释放量、CO/Tar 比值和 CO 每口释放量均呈极显著负相关。阴燃速率

与 CO 释放量呈显著负相关,与 CO/Tar 比值和 CO 每口释放量之间呈极显著正相关关系,这表明较高的阴燃速率能提高 CO/Tar 比值,且会增加 CO 的每口释放量。粗纤维(主要含纤维素及木质素)与 CO 释放量之间的相关系数为正但并没有显著性,与 CO/Tar 比值和 CO 每口释放量间呈极显著的正相关;糖作为一种碳水化合物,与 CO 释放量的关联却并不密切。石油醚提取物仅与 CO 释放量存在极显著正相关。烟碱与 CO 释放量的关系没有显著性,与 CO/Tar 比值和 CO 每口释放量是极显著负相关。

氯元素与 CO 释放量及每口释放量之间分别呈极显著、显著正相关,与 CO/Tar 无相关性;总灰分与 CO 释放量无显著性相关,但与 CO/Tar 及 CO 每口释放量呈极显著正相关。钾与 CO 释放量呈显著负相关,铜与 CO/Tar 呈极显著负相关;除此之外,金属元素与 3 个 CO 指标之间多呈(极)显著正相关关系。这表明,金属元素对烟气 CO 的影响是复杂的。

上述简单相关分析的一些结果与此前有关研究不尽相同。例如包卷密度、烟碱与 CO 释放量之间的相关性与汤朝起等<sup>[10]</sup>、于建军等<sup>[12]</sup>的结果不同。这可能有原料来源及实验样品制作的因素,也有数据检测准确性的影响,从而导致结果偏差。

### 2.2 烤烟化学成分及物理特性的因子分析

为剔除相关分析中的交互作用,利用因子分析继续探讨 CO 的影响因素。以主成分法提取特征值大于 0.7 的因子,并进行最大正交旋转,得出主成分、特征值及贡献率(表 2)和因子载荷矩阵(表 3)。由表 2 可知,6 个因子的累计贡献率为 83.86%,概括了 16 项指标的绝大部分信息。

因子载荷表明了原始指标变量与提取成分之

表 1 烟气 CO 与烤烟理化指标之间的简单相关性

Table 1 Correlation coefficients between chemical and physical factors of F.C.V and CO yield in main-smoke

指标	包卷密度	阴燃速率	粗纤维	总糖	烟碱	石油醚提取物	总氮	氯
CO/(mg·g <sup>-1</sup> )	-0.480**	-0.260*	-0.169	-0.221	0.172	0.353**	-0.113	0.334**
CO/Tar	-0.426**	0.650**	0.519**	0.11	-0.450**	-0.244	0.145	-0.028
CO/口(mg·口 <sup>-1</sup> )	-0.835**	0.481**	0.371**	-0.143	-0.368**	0.054	-0.227	0.267*
指标	总灰分	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
CO/(mg·g <sup>-1</sup> )	0.206	-0.275*	0.374**	0.091	0.272*	0.111	0.003	0.063
CO/Tar	0.413**	0.397**	0.077	0.113	-0.382**	0.301*	0.288*	0.028
CO/口(mg·口 <sup>-1</sup> )	0.448**	0.123	0.292*	0.017	-0.065	0.445**	0.001	0.092

间的关联度。由表 3 可知，第 1 个主因子主要由阴燃速率、粗纤维、钾决定，它们在此主因子上具有较大的正载荷值。粗纤维助燃，且在烤烟中比重大，是 CO 重要来源之一，因此这个因子可称为粗纤维-燃烧因子。第 2 个主因子主要由总氮、总糖、石油醚提取物、烟碱及锰决定，其中总氮、石油醚提取物、锰有较大的正载荷值，而总糖有绝对值较高的负载荷。此因子主要包括含碳化合物和含氮化合物，兼有锰的影响，可称之为碳-氮-锰因子。在第 3 个主因子中，钙、铁及总灰分有很大的正载荷，且钙、铁在烤烟中含量相对较高，为灰分的重要组成部分，故可称为灰分因子；依次类推，第 4 个主因子可称为锌-铜因子，第 5 个主因子可称为氯因子，第 6 个因子可称为镁因子。

2.3 烟气 CO 与提取因子之间的相关关系

主成分提取后，按最大方差旋转所得的各因子之间相互正交，相关系数为 0。因此，各因子与烟气 CO 之间的关系是独立的。以回归法求得 6 个因

表 3 旋转后的因子（主成分）载荷矩阵

Table 3 Rotated component matrix

指标	成分					
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>
阴燃速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	0.95	-0.05	0.06	-0.13	-0.05	0.06
粗纤维/%	0.79	-0.02	0.24	-0.09	0.03	-0.23
K/%	0.74	0.46	-0.04	0.30	-0.06	-0.02
总氮/%	0.12	0.83	-0.24	-0.13	-0.20	-0.09
总糖/%	0.01	-0.74	-0.21	0.01	-0.51	0.09
石油醚提取物/%	-0.11	0.71	-0.14	0.44	0.34	-0.12
烟碱/%	-0.49	0.66	-0.42	0.18	0.15	-0.04
Mn/(μg·g <sup>-1</sup> )	0.30	0.65	-0.08	0.31	-0.21	0.32
Ca/(μg·g <sup>-1</sup> )	-0.18	-0.18	0.85	-0.11	0.30	-0.11
Fe/(μg·g <sup>-1</sup> )	0.19	-0.19	0.82	-0.04	-0.09	0.24
总灰分/%	0.38	0.06	0.82	0.07	0.26	-0.12
Zn/(μg·g <sup>-1</sup> )	0.16	0.19	-0.09	0.88	-0.09	0.15
Cu/(μg·g <sup>-1</sup> )	-0.45	-0.06	0.04	0.73	0.05	-0.20
氯/%	-0.03	0.05	0.18	-0.05	0.87	-0.03
Mg/%	-0.17	-0.01	0.00	-0.04	-0.08	0.89
包卷密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	-0.45	0.33	-0.17	-0.18	-0.37	-0.50

子各自的得分列向量，以此可讨论烟气 CO 与提取因子之间的相关关系。

表 4 是烤烟 CO 指标与各提取因子得分之间的相关分析结果。其中，F<sub>1</sub>（粗纤维-燃烧性因子）与 CO 释放量之间是负相关，但没有显著性；与 CO/Tar 比值及每口 CO 释放量之间是极显著的正相关关系。F<sub>5</sub>（氯因子）与 CO 释放量及每口 CO 释放量呈极显著正相关，但对 CO/Tar 比值的影响很弱。F<sub>3</sub>（灰分因子）及 F<sub>6</sub>（镁因子）的情形大致相近，二者与每口 CO 释放量之间的关系达到了显著水平。F<sub>2</sub>（碳-氮-锰因子）及 F<sub>4</sub>（铜-锌因子）与 3 个 CO 指标的关系并不密切。

表 2 旋转前后各提取因子的特征值与方差分解

Table 2 Extraction and rotation sums of squared loadings

成分	旋转前的因子载荷平方和			旋转后的因子载荷平方和		
	特征值	提取方差/%	累计方差/%	特征值	提取方差/%	累计方差/%
F <sub>1</sub>	4.10	25.63	25.63	3.11	19.44	19.44
F <sub>2</sub>	3.30	20.60	46.22	3.03	18.94	38.39
F <sub>3</sub>	2.38	14.88	61.10	2.53	15.82	54.20
F <sub>4</sub>	1.61	10.07	71.17	1.82	11.36	65.57
F <sub>5</sub>	1.17	7.33	78.50	1.55	9.70	75.27
F <sub>6</sub>	0.86	5.36	83.86	1.37	8.59	83.86

表 4 烤烟烟气 CO 与提取因子（主成分）之间的相关性

Table 4 Correlation coefficients between components and CO yield in smoke

指标	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>
CO/(mg·g <sup>-1</sup> )	-0.235	0.014	0.212	0.227	0.491**	0.219
CO/Tar	0.641**	0.006	0.222	-0.114	-0.101	0.237
CO/口(mg·口 <sup>-1</sup> )	0.456**	-0.196	0.295*	0.151	0.439**	0.258*

3 讨论

在简单相关分析中，包卷密度与 3 个 CO 释放指标之间都呈极显著负相关，这与于建军等<sup>[12]</sup>的结果相反。而汤朝起等<sup>[10]</sup>认为，烟支重量与 CO 释放量之间的关系是非线性的。这样看来，包卷密度与 CO 之间的关系较为复杂，在不同烟支重量（包卷

密度）区间内的相关性质并不相同，其合理解释尚待进一步研究。阴燃速率与 CO 释放量呈显著负相关，这与有关结果相同<sup>[10,12]</sup>，但与 CO/Tar 比值和 CO 每口释放量之间却是极显著正相关关系。由此可推测，阴燃速率降低焦油的效果更为显著，且其降低 CO 释放量是通过降低抽吸口数来实现的。与

阴燃速率相似,粗纤维(主要含纤维素及木质素)与CO释放量之间的相关系数为负(但没有显著性),与CO/Tar比值和CO每口释放量间是极显著的正相关。这可能与纤维素助燃,且其能热解释放CO有关<sup>[18]</sup>。钾与CO释放量是显著性负相关,这与此前相关研究结果是相同的<sup>[10,12]</sup>,与CO/Tar之间是极显著正相关。这种现象与阴燃速率及纤维素的情况相近,只是钾与CO每口释放量之间的相关没有显著性。总灰分与3个CO指标之间的相关系数都为正,且与CO/Tar及CO/口之间的相关为极显著。有研究表明,金属盐具有催化作用<sup>[19-20]</sup>,使热裂解过程倾向于形成小分子产物,因而可以降低焦油,增加CO的释放。但是,这尚不能完全解释钙、铜、铁、锰等矿质元素与CO之间的复杂关系。

主成分因子的分析结果表明,在提取的6个成分中, $F_1$ (粗纤维-燃烧因子)和 $F_5$ (氯因子)对CO释放行为的影响较大,二者分别综合了粗纤维、阴燃速率、钾元素等因素的影响与氯离子的信息。 $F_3$ 及 $F_6$ 因子对每口CO释放量影响显著,而主要承载了总氮、总糖、烟碱、石油醚提取物及锰元素信息的 $F_2$ 因子对3个CO释放行为指标都没有显著性相关关系。需要指出的是,包卷密度与烟气CO释放行为之间的极显著相关并未突出地归于某一因子之中。

简单相关显示,与烤烟CO释放行为之间强相关的因素虽然很多,但简单相关分析并没有排除交互作用的影响。而以主成分法提取因子再做相关分析,结果显示与CO释放行为相关性较强的主要是粗纤维-燃烧因子与氯因子。综合这两种分析方法的结果可知,阴燃速率、粗纤维及钾、氯元素与烤烟CO释放行为之间的相关性较强。值得注意的是,这些因素都与燃烧性有关,前者直接表征了烤烟的燃烧特性,而后3个因素会影响烤烟的燃烧性能。因此可以说,烤烟CO释放行为与其燃烧特性高度相关。

## 4 结 论

综合简单相关及因子分析两种分析结果,阴燃

速率、粗纤维及钾、氯元素是影响烤烟CO释放行为的主要因素,而这些因素都与烤烟的燃烧特性有关。这个结果可以为卷烟一氧化碳减害技术研发提供参考。钾、氯之外的矿质元素对烤烟CO释放行为的影响比较复杂,更为严谨的结论需要通过后续的实验研究来做出。

## 参考文献

- [1] Hoffmann D, Hecht S S. Advances in tobacco carcinogenesis[M]. Chemical Carcinogenesis and Mutagenesis. I Copper C S. Grover P L. Springer-Verlag, London, U K, 1990: 63-102.
- [2] 谢剑平,刘惠民,朱茂祥,等. 卷烟烟气危害性指数研究[J]. 烟草科技, 2009(2): 5-15.
- [3] 谢兰英,刘淇,吴名剑,等. 卷烟烟气CO及其降低去除研究进展[J]. 环境科学与技术, 2006(9): 109-111.
- [4] 郑琴,程占刚,李会荣,等. 卷烟纸对卷烟主流烟气中7种有害成分释放量的影响[J]. 烟草科技, 2010(12): 49-51.
- [5] 胡群,马静,彭丽娟,等. 卷烟纸自然透气度对卷烟物理性能及烟气量影响的研究[J]. 烟草科学研究, 2003(4): 163-167.
- [6] 杨叶昆,徐兰兰,王保兴,等. 功能添加剂降低烟气中CO和其它有害物质的研究[C]//中国烟草学会工业专业委员会烟草化学学术研讨会,海南, 2005: 401-405.
- [7] 谢兰英,刘淇,吴名剑,等. 纳米催化材料降低卷烟烟气一氧化碳实验研究[J]. 现代化工, 2007(11): 231-233.
- [8] 吕功煊,聂聪,赵明月,等. 应用含纳米贵金属催化材料降低卷烟烟气中CO技术研究[J]. 中国烟草学报, 2003(9): 17-27.
- [9] T Yamamoto, Y Suga, K Kaneki, et al. Effect of chemical constituents on the formation rate of carbon monoxide in Bright Tobacco[J]. Contribution to Tobacco Research, 1989(3): 163-170.
- [10] 汤朝起,窦玉青,张俊. 烤烟物理特性和化学成分与烟气组分的关系[J]. 四川农业大学学报, 2009(4): 427-432.
- [11] 于建军,李国栋. 烤烟矿质元素含量、静燃速率与烟气成分的相关分析[J]. 河南农业大学学报, 2000(4): 355-357.
- [12] 于建军,章新军,毕庆文,等. 烤烟烟叶理化特性对烟气烟碱、CO、焦油量的影响[J]. 中国烟草科学, 2003(3): 5-8.
- [13] 张迎新. 卷烟质量特性值和烟气一氧化碳的相关性实

- 验分析[C]//中国烟草学会工业专业委员会工艺学组学术研讨会论文集, 2008: 190-195.
- [14] 王建民, 马晓伟, 舒云波, 等. 填充料类型及组合方式对卷烟烟气的影响[J]. 中国农学通报, 2010(4): 66-69.
- [15] 贺英, 徐海涛, 盛志艺, 等. 综合方法对烤烟化学成分和烟气组分的相关分析[J]. 中国烟草科学, 2005(4): 1-4.
- [16] 张强, 王浩雅, 马剑雄, 等. 云南烤烟的烟气成分与烟叶化学成分的相关分析[J]. 中国烟草科学, 2011(1): 75-79.
- [17] 聂根新, 罗林广, 何宽信, 等. 微波消解-原子吸收法测定烟叶中铜、铁、锰、锌、钙、镁、钾含量[J]. 江西农业学报, 2004, 16(4): 43-45.
- [18] 王树荣, 刘倩, 骆仲决, 等. 基于热重红外联用分析的纤维素热裂解机理研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006(7): 1154-1158.
- [19] 陆强, 张栋, 朱锡锋. 四种金属氯化物对纤维素快速热解的影响(I)Py-GC/MS 实验[J]. 化工学报, 2010(4): 45-48.
- [20] 吴宏伟, 李丛民. 某些盐类添加剂对降低卷烟焦油量的机理研究[J]. 烟草科技, 2000(11): 8-9.

## 《中国烟草学报》2013 年第 4 期目次

### 烟草与烟气化学

- 用离子选择性电极法测定烟用聚丙烯丝束滤棒成型水基胶中的氨氮..... 黎洪利, 陶文生, 朱立军, 等
- 微波消解—石墨炉原子吸收法测定卷烟滤棒中的铅含量..... 黄光莉, 方一, 于航, 等
- 同步辐射真空紫外光电离质谱法实时分析卷烟主流烟气的相成分..... 宁敏, 胡永华, 徐迎波, 等
- 保润剂对烟草吸湿特性的影响研究..... 郭俊成, 吴达, 程晓蕾, 等
- GGE 双标图在中间香型烟叶特色彰显度分析中的应用..... 赵杰宏, 谢升东, 王轶, 等

### 农艺与调制

- 烤烟新品种粤烟 98 的选育及其特征特性..... 赵伟才, 邱妙文, 陈杰, 等
- 移栽期对烤烟叶片生长动态的影响及其模型的建立..... 招启柏, 廖文程, 孔光辉, 等
- 不同移栽期对烤烟生长发育及质量风格的影响..... 李文卿, 陈顺辉, 柯玉琴, 等
- 泸州地区不同耕作和覆盖方式对烟草产量及品质的影响..... 罗付香, 罗定棋, 林超文, 等
- 海南与印尼茄衣烟叶质量差异分析..... 李爱军, 范静苑, 秦艳青, 等
- 烟草根系分泌物的 GC-MS 检测..... 于会泳, 申国明, 高欣欣

### 植物保护

- 河南省烟草赤星病原鉴定..... 祖艳青, 蒋士君, 王海涛, 等

### 经济与管理

- 卷烟零售点布局的影响因素研究..... 刘京, 惠宁, 李昀
- 卷烟零售终端价值评价体系研究..... 邹亮

### 现代烟草农业

- “三统三分”式烟叶专业化烘烤服务模式研究与应用..... 王丰, 刘锦华, 罗元雄, 等
- 影响恩施州烟叶生产稳定发展因素的调查与分析..... 李满良, 朱家明, 丁才夫, 等
- 湖南烟叶生产区划与发展对策研究..... 邓文, 杨玉, 朱雅玲, 等

### 生物技术

- 烟草白粉病抗性基因的 QTL 定位..... 牟建英, 钱玉梅, 任民, 等
- 烟草 PVY<sup>N</sup> 辽宁分离物全序列测定与分析..... 王芳, 高正良, 周本国, 等

### 其他

- 烟草学术论文的统计学表达与展示..... 杨锦忠, 宋希云