

# 烟丝和卷烟纸中金属元素对自由燃烧速率的影响

Effects of metal elements on free burning speed in  
cutrag and cigarette paper

马胜楠

王建民

常冰冰

牛婷婷

李天诚

MA Sheng-nan WANG Jian-min CHANG Bing-bing NIU Ting-ting LI Tian-cheng

(郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南 郑州 450000)

(College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,  
Zhengzhou, Henan 450000, China)

**摘要:**采用火焰原子吸收法测定 42 个不同牌号卷烟烟丝、卷烟纸及烟灰中 8 种金属元素的含量,并研究金属元素含量对烟支自由燃烧速率的影响。结果表明:钾、钠、镁、锰、锌、铜与卷烟烟支自由燃烧速率关系密切。其中,钾对烟支自由燃烧速率具有促进作用、镁为抑制作用,其余元素则因来源(卷烟纸或烟丝)差异呈现不同的影响趋势。

**关键词:**烟丝;卷烟纸;烟灰;金属元素;自由燃烧速率

**Abstract:** The contents of eight metal elements in 42 different brands of cigarette ash, cut rag, and cigarette paper were determined by flame atomic absorption spectrometry and the effects of metal contents on the free burning speed were studied. The results showed that, potassium, sodium, magnesium, manganese, zinc, and copper were closely related to the free burning speed of cigarettes. Among them, potassium promoted the free burning speed and magnesium inhibited the free burning speed. The other elements showed different influence trends due to different sources (cigarette paper or cut rag).

**Keywords:** cut rag; cigarette paper; cigarette ash; metal element; free burning speed

烟丝和卷烟纸中金属元素含量是影响卷烟燃烧性能的重要因素,进而影响卷烟的烟气成分<sup>[1-3]</sup>、包灰性能<sup>[4-5]</sup>,因而受到广泛关注。吴宏伟等<sup>[6]</sup>研究了不同盐类烟丝添加剂对抽吸口数的影响,叶灵等<sup>[7]</sup>研究了不同钾盐烟丝添加剂对烟草综合燃烧指数的影响;王启成等<sup>[8]</sup>研究了卷烟纸助燃剂中钾、钠含量及不同比例对卷烟燃烧性的影响;尹升福等<sup>[9]</sup>、银董红<sup>[10]</sup>研究了不同金属

盐对卷烟燃烧温度分布的影响。以上研究主要从卷烟纸或烟丝层面探究金属元素对卷烟燃烧性能的影响,均未涉及烟丝和卷烟纸中金属元素间协同对烟支燃烧性能的影响。

为了探索烟丝和卷烟纸中金属元素含量对卷烟燃烧性能的影响,试验测定了 42 种不同牌号卷烟烟丝、卷烟纸及烟灰中钾、钙、钠、镁、铁、锰、锌、铜 8 种金属元素的含量,并研究了不同来源金属元素对自由燃烧速率的影响,为研究卷烟燃烧性和卷烟纸盐类添加剂开发等提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

卷烟:选择中国 12 家中烟公司的 42 种牌号常规规格市售卷烟(价位为 5~100 元/包)作为试验样品,其中,一类烟 24 种,二类烟 5 种,三类烟 11 种,四类烟 2 种;

硝酸:优级纯,烟台市双双化工有限公司;

氢氟酸:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;

30%双氧水:分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司;

氯化铯:纯度 99.99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

硝酸镧六水合物:纯度 99.99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

标准储备液:钾、钙、钠、镁、铁、锰、锌、铜 8 种标准溶液,均为 1 000  $\mu\text{g/mL}$ ,北京坛墨质检科技有限公司;

试验用水:超纯水。

#### 1.1.2 仪器与设备

火焰原子吸收光谱仪 (FAAS): AA240FS 型,美国安捷伦公司;

作者简介:马胜楠,女,郑州轻工业大学在读硕士研究生。

通信作者:王建民(1963—),男,郑州轻工业大学教授,硕士。

E-mail: wjm63@163.com

收稿日期:2019-04-23

高效节能陶瓷纤维箱式电阻炉: SX<sub>3</sub>-5-12 型, 北京科伟永兴仪器有限公司;

微波消解仪: MARS 6CLASSIC 型, 美国 CEM 公司;

电热消解仪: EHD-40 型, 北京东航科仪仪器有限公司;

电子天平: QUINTIX22 4-1CN 型, 德国 SARTO RIUS 公司。

1.2 方法

1.2.1 样品前处理 将卷烟烟灰、烟丝、卷烟纸样品在 600 °C 温度下灰化 60 min 后分别掺匀、备用<sup>[11]</sup>。

(1) 卷烟烟灰微波消解: 准确称取一定量卷烟烟灰灰化样品置于可熔性聚四氟乙烯 (PFA) 消解罐中, 准确加入 7 mL HNO<sub>3</sub>、0.5 mL HF 与 1.5 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 盖上表面皿, 放入微波消解仪中消解(微波消解程序如表 1 所示)。消解结束后将样品(呈无色或淡黄色透明状液体)置于与微波消解仪配套的赶酸仪上赶酸至近干, 并将其转移到 50 mL 容量瓶中, 用 1% 硝酸定容, 摇匀后, 待 FAAS 测定。每个样品进行 5 次重复试验。

(2) 烟丝微波消解: 准确称取一定量卷烟烟丝灰化样品置于 PFA 消解罐中, 准确加入 8 mL HNO<sub>3</sub>、0.5 mL HF 与 2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 放入微波消解仪中消解。消解结束后赶酸, 再将样品溶液转移到容量瓶中, 用 1% 硝酸定容, 摇匀后, 待 FAAS 测定。

(3) 卷烟纸微波消解: 准确称取一定量卷烟纸灰化样品置于 PFA 消解罐中, 准确加入 8 mL HNO<sub>3</sub>、0.5 mL HF 与 1.5 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 放入微波消解仪中消解。消解结束后赶酸, 再将样品溶液转移到容量瓶中, 用 1% 硝酸定容,

摇匀后, 待 FAAS 测定。

1.2.2 金属元素的测定 利用空气乙炔—火焰原子吸收法测定 8 种金属元素含量(其中测定钾、钙、钠、镁 4 种元素时, 卷烟烟灰及烟丝将消解液稀释 100 倍、卷烟纸稀释 50 倍)。测定各元素的最佳工作条件见表 2, 根据预先制作的标准曲线计算测量结果。

1.2.3 金属元素含量的计算方法 钾、钙、钠、镁、铁、锰、锌、铜的含量  $X$  以质量分数表示, 按式(1)计算。

$$X = \frac{(C - C_0) \times V \times n}{1\,000 \times m} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:

$X$ ——试样中钾、钙、钠、镁、铁、锰、锌、铜的含量, %;

$C$ ——测试样液中钾、钙、钠、镁、铁、锰、锌、铜的浓度, mg/L;

$C_0$ ——空白样液中钾、钙、钠、镁、铁、锰、锌、铜的浓度, mg/L;

$V$ ——试样消化液的总体积, mL;

$n$ ——试样消化液的稀释倍数;

$m$ ——试样质量, mg。

1.2.4 卷烟自由燃烧速率的测定 参照文献[12—13], 采用棉线法进行卷烟自由燃烧速率的测定。各牌号随机选取 16 支, 取 16 支测定结果的平均值表示牌号卷烟自由燃烧速率。

1.3 数据分析

采用 Excel、SPSS 17.0 数据处理软件对测定结果进行描述性统计、相关分析、回归分析、多重比较。

2 结果与分析

2.1 金属元素测定结果分析

2.1.1 烟丝中金属元素 由表 3 可知, 不同牌号卷烟烟丝中钠、铁含量差异最大, 变异系数分别为 41.39%, 33.42%, 其他金属元素含量差异也较大, 变异系数为 12.43%~18.73%。单因素方差分析结果也表明不同牌号卷烟烟丝 8 种金属元素差异性显著( $P=0.000$ )。

表 1 微波消解程序

Table 1 Microwave digestion procedures

| 爬升时间/min | 温度/°C | 保温时间/min | 微波功率/W |
|----------|-------|----------|--------|
| 5        | 120   | 5        | 1 200  |
| 5        | 160   | 5        | 1 200  |
| 5        | 210   | 25       | 1 200  |

表 2 火焰原子吸收光谱仪最佳工作条件

Table 2 Optimum operating conditions of flame atomic absorption spectrometer

| 元素 | 测定方式     | 波长/nm | 光谱通带/nm | 灯电流/mA | 空气流量/(L · min <sup>-1</sup> ) | 乙炔流量/(L · min <sup>-1</sup> ) |
|----|----------|-------|---------|--------|-------------------------------|-------------------------------|
| 钾  | 原子吸收     | 766.5 | 0.2     | 2      | 13.5                          | 2                             |
| 钙  | 原子吸收     | 422.7 | 0.5     | 3      | 13.5                          | 2                             |
| 钠  | 原子吸收     | 589.0 | 0.5     | 5      | 13.5                          | 2                             |
| 镁  | 背景校正原子吸收 | 285.2 | 0.2     | 2      | 13.5                          | 2                             |
| 铁  | 背景校正原子吸收 | 248.3 | 0.2     | 10     | 13.5                          | 2                             |
| 锰  | 背景校正原子吸收 | 279.5 | 0.2     | 10     | 13.5                          | 2                             |
| 锌  | 背景校正原子吸收 | 213.9 | 1.0     | 10     | 13.5                          | 2                             |
| 铜  | 背景校正原子吸收 | 324.8 | 0.5     | 10     | 13.5                          | 2                             |

表 3 卷烟烟丝中 8 种元素含量描述性结果  
Table 3 Descriptive results of eight elements in cut rag  
%

| 元素 | 极小值                   | 极大值                   | 平均值                   | 标准差                   | 变异系数  |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 钾  | 1.30                  | 2.44                  | 1.93                  | 0.24                  | 12.43 |
| 钙  | 1.71                  | 3.31                  | 2.06                  | 0.34                  | 16.62 |
| 钠  | 0.05                  | 0.50                  | 0.22                  | 0.09                  | 41.39 |
| 镁  | 0.27                  | 0.48                  | 0.37                  | 0.06                  | 15.30 |
| 铁  | $4.00 \times 10^{-3}$ | $2.22 \times 10^{-2}$ | $1.35 \times 10^{-2}$ | $4.50 \times 10^{-3}$ | 33.42 |
| 锰  | $1.40 \times 10^{-2}$ | $3.24 \times 10^{-2}$ | $1.90 \times 10^{-2}$ | $2.90 \times 10^{-3}$ | 15.38 |
| 锌  | $3.80 \times 10^{-3}$ | $8.30 \times 10^{-3}$ | $5.00 \times 10^{-3}$ | $9.00 \times 10^{-4}$ | 18.73 |
| 铜  | $9.00 \times 10^{-4}$ | $2.20 \times 10^{-3}$ | $1.20 \times 10^{-3}$ | $2.00 \times 10^{-3}$ | 17.94 |

2.1.2 卷烟纸中金属元素 由表 4 可知,除钙,不同牌号卷烟卷烟纸中其他金属元素含量差异均较大,变异系数为 28.55%~311.44%,其中 1 个样品的铜含量达到了  $4.48 \times 10^{-3}$ % (奇异值,后续分析时不再考虑),不考虑该样品后,铜含量为  $3.00 \times 10^{-5}$ %~ $3.40 \times 10^{-4}$ %,平均值为  $1.10 \times 10^{-4}$ %,变异系数为 52.38%。单因素方差分析结果也表明不同牌号卷烟纸 8 种金属元素差异性显著 ( $P=0.000$ )。

表 4 卷烟纸中 8 种元素含量描述性结果  
Table 4 Descriptive results of eight elements in cigarette paper  
%

| 元素 | 极小值                   | 极大值                   | 平均值                   | 标准差                   | 变异系数   |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| 钾  | 0.42                  | 1.57                  | 0.99                  | 0.31                  | 31.42  |
| 钙  | 8.69                  | 14.01                 | 11.47                 | 1.16                  | 10.08  |
| 钠  | 0.10                  | 0.51                  | 0.30                  | 0.11                  | 38.53  |
| 镁  | $7.00 \times 10^{-2}$ | 0.20                  | 0.12                  | 0.03                  | 28.55  |
| 铁  | $2.80 \times 10^{-3}$ | $1.99 \times 10^{-2}$ | $1.11 \times 10^{-2}$ | $4.70 \times 10^{-3}$ | 42.59  |
| 锰  | $1.00 \times 10^{-4}$ | $3.40 \times 10^{-3}$ | $1.30 \times 10^{-3}$ | $7.00 \times 10^{-4}$ | 58.16  |
| 锌  | $7.00 \times 10^{-4}$ | $3.12 \times 10^{-2}$ | $1.31 \times 10^{-2}$ | 0.01                  | 76.38  |
| 铜  | $3.00 \times 10^{-5}$ | $4.48 \times 10^{-3}$ | $2.10 \times 10^{-4}$ | $6.70 \times 10^{-4}$ | 311.44 |

2.1.3 烟灰中的金属元素 由表 5 可知,不同牌号卷烟烟灰中钠、锌、铁含量差异较大,变异系数为 21.09%~45.17%,钾、钙、镁、锰、铜含量差异较小,变异系数为 5.10%~10.74%。单因素方差分析结果也表明不同牌号卷烟烟灰 8 种金属元素差异性显著 ( $P=0.000$ )。

2.1.4 卷烟纸与烟丝金属元素含量比 由表 6 可知,各种金属元素含量比值的变异系数均较大,15.52%~78.64%。

综合烟丝、卷烟纸、烟灰中 8 种金属元素含量及卷烟纸与烟丝含量比的描述性统计结果可以看出,① 8 种金

表 5 烟灰中 8 种元素含量描述性结果  
Table 5 Descriptive results of eight elements in cigarette ash  
%

| 元素 | 极小值                   | 极大值                   | 平均值                   | 标准差                   | 变异系数  |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 钾  | 11.57                 | 14.75                 | 13.20                 | 0.67                  | 5.10  |
| 钙  | 17.56                 | 25.04                 | 21.70                 | 1.38                  | 6.35  |
| 钠  | 0.55                  | 6.99                  | 3.61                  | 1.63                  | 45.17 |
| 镁  | 2.74                  | 4.03                  | 3.45                  | 0.29                  | 8.40  |
| 铁  | $8.30 \times 10^{-2}$ | 0.21                  | 0.15                  | $3.24 \times 10^{-2}$ | 21.09 |
| 锰  | 0.11                  | 0.16                  | 0.14                  | $1.46 \times 10^{-2}$ | 10.74 |
| 锌  | $2.84 \times 10^{-2}$ | 0.10                  | $4.60 \times 10^{-2}$ | $1.91 \times 10^{-2}$ | 41.41 |
| 铜  | $6.50 \times 10^{-3}$ | $1.09 \times 10^{-2}$ | $8.00 \times 10^{-3}$ | $9.00 \times 10^{-4}$ | 10.97 |

表 6 卷烟纸与烟丝金属元素含量比的描述性结果  
Table 6 Descriptive results of metal content incigarette paper compared with that in cut rag

| 元素 | 极小值  | 极大值  | 平均值  | 标准差  | 变异系数/% |
|----|------|------|------|------|--------|
| 钾  | 0.21 | 0.99 | 0.52 | 0.18 | 34.75  |
| 钙  | 3.61 | 7.69 | 5.68 | 0.88 | 15.52  |
| 钠  | 0.34 | 6.51 | 1.61 | 1.06 | 66.11  |
| 镁  | 0.18 | 0.66 | 0.32 | 0.11 | 33.72  |
| 铁  | 0.14 | 2.97 | 0.95 | 0.58 | 61.14  |
| 锰  | 0.01 | 0.19 | 0.07 | 0.04 | 58.72  |
| 锌  | 0.13 | 7.04 | 2.62 | 2.06 | 78.64  |
| 铜  | 0.03 | 0.30 | 0.10 | 0.05 | 53.89  |

属元素的总含量呈烟灰 (42.33%)>卷烟纸 (12.90%)>烟丝 (4.61%) 的规律,但不同金属元素的含量分布不同,由表 6 可知,钙在卷烟纸中的含量高于烟丝,钾、镁、锰、铜在烟丝中的含量高于卷烟纸,钠、铁、锌则因卷烟不同而不同。② 8 种金属元素含量在不同牌号卷烟间的总体变异程度呈卷烟纸>烟丝>烟灰的规律,但不同金属元素含量变异程度的分布不同,其中钾、镁、铁、锰、铜为卷烟纸>烟丝>烟灰,钙为烟丝>卷烟纸>烟灰,钠为烟灰>烟丝>卷烟纸,锌为卷烟纸>烟灰>烟丝。③ 钾、镁、铁、锰、铜在烟丝中的含量高于卷烟纸、在烟丝间的变异程度低于卷烟纸,钙、钠在卷烟纸中的含量高于烟丝、在卷烟纸间的变异程度低于烟丝,以上元素均符合含量高者变异小的基本特征,说明这些元素在不同牌号卷烟的烟丝或卷烟纸中的含量具有趋同性;锌在卷烟纸中的含量高于烟丝,在卷烟纸间的变异程度也高于烟丝,或许是体现卷烟纸差异性的一种重要元素。

综上,各种金属元素在不同牌号卷烟间的差异性既是烟叶原料、卷烟材料自身差异造成的,也是设计人员寻求烟丝与卷烟纸间最佳配合的结果。

2.2 不同价类卷烟间金属元素含量比的多重比较

不同价类卷烟间的 LSD 多重比较结果表明,烟丝、卷烟纸、烟灰中均有部分金属元素含量存在显著差异(见表 7)。烟丝中钾、钙、钠含量在价类间存在显著性差异,且呈现随价类升高钾和钙含量降低、钠含量升高的变化趋势;卷烟纸中镁、铁、铜含量在价类间存在显著性差异,且呈现随价类升高镁和铜含量降低、铁含

量升高的变化趋势;烟灰中钙含量在价类间存在显著性差异,且呈现随价类升高而升高的变化趋势。卷烟纸/烟丝中钙、钠、铁在价类间存在显著性差异,且呈现随价类升高钙升高、钠和铜降低的变化趋势。由于不同价类卷烟的样本容量差异较大,上述分析结果尚不足以形成确定的结论,但至少是一种值得关注的现象。

表 7 不同价类卷烟部分元素的多重比较结果<sup>†</sup>  
Table 7 Multiple comparisons of some elements in cigarettes at different pricecategories

| 类别 | 烟丝                   |                     |                     | 卷烟纸                 |                          |                          | 烟灰                   | 卷烟纸/烟丝              |                    |                     |
|----|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|    | 钾/%                  | 钙/%                 | 钠/%                 | 镁/%                 | 铁/( $\times 10^{-2}\%$ ) | 铜/( $\times 10^{-4}\%$ ) | 钙/%                  | 钙                   | 钠                  | 铜                   |
| 一类 | 1.85 <sup>Bb</sup>   | 1.96 <sup>Ab</sup>  | 0.22 <sup>Aa</sup>  | 0.11 <sup>Aab</sup> | 1.00 <sup>Ab</sup>       | 1.20 <sup>Aab</sup>      | 22.09 <sup>Aa</sup>  | 5.89 <sup>Aa</sup>  | 1.47 <sup>Bb</sup> | 0.10 <sup>Aab</sup> |
| 二类 | 1.85 <sup>Bb</sup>   | 2.01 <sup>Aab</sup> | 0.22 <sup>Aab</sup> | 0.10 <sup>Ab</sup>  | 1.21 <sup>Aab</sup>      | 0.80 <sup>Ab</sup>       | 21.44 <sup>Aab</sup> | 5.80 <sup>Aab</sup> | 1.44 <sup>Bb</sup> | 0.06 <sup>Ab</sup>  |
| 三类 | 2.11 <sup>Aa</sup>   | 2.25 <sup>Aa</sup>  | 0.24 <sup>Aa</sup>  | 0.13 <sup>Aa</sup>  | 1.35 <sup>Aa</sup>       | 1.10 <sup>Aab</sup>      | 21.05 <sup>Ab</sup>  | 5.25 <sup>Ab</sup>  | 1.56 <sup>Bb</sup> | 0.08 <sup>Ab</sup>  |
| 四类 | 2.09 <sup>ABab</sup> | 2.34 <sup>Aab</sup> | 0.08 <sup>Ab</sup>  | 0.12 <sup>Aab</sup> | 0.85 <sup>Ab</sup>       | 2.00 <sup>Aa</sup>       | 21.15 <sup>Aab</sup> | 5.16 <sup>Aab</sup> | 4.08 <sup>Aa</sup> | 0.17 <sup>Aa</sup>  |

† 同列大写字母不同表示差异达 0.01 水平,小写字母不同表示差异达 0.05 水平。

2.3 金属元素与烟支自由燃烧速率间的关系

2.3.1 简单相关分析 由表 8 可知,自由燃烧速率与烟灰中钾含量呈极显著正相关、镁含量呈极显著负相关、锰含量呈显著负相关,与烟丝中钾含量呈极显著正相关,与卷烟纸中钾含量呈正相关,接近显著水平。简单相关分析结果表明,钾对自由燃烧速率的影响最大,其次是镁和

锰;多数金属元素呈现烟灰中含量的影响大于烟丝和卷烟纸的特征,如钙、镁、铁、锰、锌、铜,且多数金属元素与自由燃烧速率间相关的方向因来源不同而相反,如钙、钠、铁、锰、锌、铜,一定程度上说明自由燃烧速率是烟丝、卷烟纸中的金属元素综合作用的结果,且两者之间存在配合问题。

表 8 金属元素含量与自由燃烧速率的相关分析结果  
Table 8 Relative analysis results of metal element content and free burning speed

| 元素 | 烟灰     |       |     | 烟丝     |       |     | 卷烟纸    |       |     |
|----|--------|-------|-----|--------|-------|-----|--------|-------|-----|
|    | 相关系数   | P 值   | 样品数 | 相关系数   | P 值   | 样品数 | 相关系数   | P 值   | 样品数 |
| 钾  | 0.438  | 0.004 | 42  | 0.631  | 0.000 | 42  | 0.285  | 0.068 | 42  |
| 钙  | -0.180 | 0.255 | 42  | 0.092  | 0.564 | 42  | 0.063  | 0.690 | 42  |
| 钠  | -0.164 | 0.299 | 42  | -0.207 | 0.189 | 42  | 0.109  | 0.491 | 42  |
| 镁  | -0.557 | 0.000 | 42  | -0.220 | 0.161 | 42  | -0.054 | 0.734 | 42  |
| 铁  | -0.199 | 0.206 | 42  | 0.068  | 0.667 | 42  | 0.067  | 0.672 | 42  |
| 锰  | -0.331 | 0.032 | 42  | 0.053  | 0.737 | 42  | -0.220 | 0.161 | 42  |
| 锌  | 0.226  | 0.150 | 42  | 0.220  | 0.161 | 42  | -0.180 | 0.253 | 42  |
| 铜  | -0.220 | 0.162 | 42  | 0.097  | 0.542 | 42  | 0.028  | 0.861 | 41  |

2.3.2 回归分析 以自由燃烧速率为因变量,烟灰、烟丝、卷烟纸中 8 种金属元素含量及 8 种金属元素在卷烟纸、烟丝中的含量比为自变量进行回归分析,结果见表 9、10。由表 9 可知,钾、钠、镁、锰、锌、铜 6 种金属元素均会影响卷烟的自由燃烧速率,综合影响(决定系数)达到了 74.7%。由表 10 可知,钾、钠、镁、锰、锌分别来自于烟丝和卷烟纸,说明烟丝和卷烟纸中金属元素的配合很重要,配合关系包括两种:① 烟灰中镁、锌含量的影响显著,属

于加和关系。对照简单相关分析结果可以看出,烟丝、卷烟纸中镁含量的影响趋势一致,表现为协同,即烟丝、卷烟纸中镁含量高时均会导致自由燃烧速率降低;锌含量的影响趋势则相反,表现为抑制。② 卷烟纸和烟丝中钾、钠、锰的含量比影响显著,则属于协调关系。  
综上,烟丝、卷烟纸中金属元素间存在配合问题,基于烟丝中金属元素含量调节卷烟纸中金属元素含量可以更有效地调控卷烟的燃烧性能。

表 9 回归系数检验结果<sup>†</sup>  
Table 9 Test results of regression coefficients

| 模型        | 非标准化系数 |       | 标准化系数   | t 值    | P 值   |
|-----------|--------|-------|---------|--------|-------|
|           | B      | 标准误差  | $\beta$ |        |       |
| 常数        | 3.503  | 0.755 |         | 4.642  | 0.000 |
| 镁(a)      | -0.434 | 0.159 | -0.282  | -2.722 | 0.010 |
| 锌(a)      | 0.060  | 0.021 | 0.263   | 2.875  | 0.007 |
| 钾(z)      | 1.173  | 0.192 | 0.620   | 6.122  | 0.000 |
| 铜(p)      | 18.726 | 8.342 | 0.204   | 2.245  | 0.032 |
| 钾(p)/钾(z) | 0.748  | 0.229 | 0.313   | 3.262  | 0.003 |
| 钠(p)/钠(z) | 0.092  | 0.041 | 0.234   | 2.263  | 0.030 |
| 锰(p)/锰(z) | -2.028 | 0.972 | -0.188  | -2.087 | 0.045 |

<sup>†</sup> B 代表非标准化系数值;a、z、p 分别表示烟灰、烟丝、卷烟纸。

表 10 回归模型概述表  
Table 10 Summary of regression models

| 相关系数  | 决定系数  | 调整决定系数 | 估计值标准误差 |
|-------|-------|--------|---------|
| 0.864 | 0.747 | 0.694  | 0.242   |

3 结论

(1) 卷烟烟丝、卷烟纸、烟灰中 8 种金属元素含量的高低顺序是烟灰>卷烟纸>烟丝,烟丝中钾、镁、铁、锰、铜含量高于卷烟纸,卷烟纸中钙、钠、锌含量高于烟丝。烟丝中钾、钙、钠,卷烟纸中镁、铁、铜,烟灰中钙,卷烟纸/烟丝中钙、钠、铜在不同价类卷烟间均存在显著性差异。

(2) 自由燃烧速率既受多种金属的综合影响,又受其在烟丝和卷烟纸间协调性的影响。其中,钾对自由燃烧速率具有促进作用、镁则为抑制作用,其余元素则因来源(卷烟纸或烟丝)不同呈现不同影响趋势。因此,基于烟丝中金属元素含量调节卷烟纸中金属元素含量可以更有效地调控卷烟的燃烧性能。

此研究的不足之处有:① 自由燃烧速率是在阴燃状态下进行测定的,与烟支正常抽吸过程存在一定的差异性,后续可重点关注不同金属元素对动态抽吸速率的影响趋势是否与阴燃状态下一致;② 文中涉及的金属元素仅为 8 种,而卷烟燃烧是一个极其复杂的过程,其他金属元素对自由燃烧速率也可能产生影响,此后可对此进行深入研究。

参考文献

[1] 黄朝章,李桂珍,连芬燕,等. 卷烟纸特性对卷烟主流烟气 7 种有害成分释放量的影响[J]. 烟草科技, 2011(4): 29-32.  
[2] 沈凯,戴路,李鸽志,等. 烟丝添加剂对卷烟燃烧温度和烟气成分的影响研究[J]. 化学世界, 2013, 54(7): 391-395, 448.  
[3] 张亚平,张晓宇,周顺,等. 卷烟纸组分对常规和细支卷烟

烟气释放量及感官质量的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(11): 48-57.  
[4] 于龙国. 卷烟纸相关因素对卷烟包灰性影响分析[J]. 中华纸业, 2015, 36(6): 37-40.  
[5] 沈靖轩,孙军,肖维毅,等. 助剂对卷烟纸包灰效果的影响[J]. 中华纸业, 2012, 33(14): 23-26.  
[6] 吴宏伟,李丛民,田卫群. 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.  
[7] 叶灵,李超,李颖,等. 钾盐对烟草燃烧特性及烟气成分的影响研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2016, 38(1): 105-111.  
[8] 王启成. 卷烟纸中助燃剂含量及比例对卷烟静燃速率的影响[J]. 中国造纸, 2015, 34(8): 73-74.  
[9] 尹升福,谭蓉,银董红,等. 金属盐对卷烟纸裂解致孔及主流烟气中 CO 释放量的影响[J]. 烟草科技, 2016, 49(8): 35-43.  
[10] 银董红. 金属盐对卷烟纸纤维素催化裂解致孔及烟气 CO 释放量的影响[C]//第十三届全国工业催化技术及应用年会论文集. 西安: 工业催化杂志社, 2016: 2.  
[11] 马胜楠,冯亚婕,赵怡凡,等. 卷烟烟灰燃烧完全性与白度的关系[J]. 云南化工, 2019, 46(1): 15-18.  
[12] 黄维裴. 烟草和烟草制品一卷烟一自由燃烧速率的测定[J]. 烟草科技, 1981(2): 51-54.  
[13] 沈慧. 卷烟燃烧速度测定方法优化[C]//上海烟草系统 2003 年度优秀学术论文文集. 上海: 上海市烟草学会, 2003: 6.