

# 基于局部惩罚型变权的烤烟化学品质评价

张勇刚,任志广,项波卡,刘建国,张晓兵,夏琛,程昌合  
(浙江中烟工业有限责任公司技术中心,浙江杭州310024)

**摘要:**为解决烤烟化学品质传统评价方法的不足,探讨利用变权思想对化学品质进行评价。以南阳市6个主产烤烟县区的烤烟烟叶为研究对象,采用 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 标度层次分析法确定常权,选取局部惩罚型状态变权向量,建立基于变权理论的烤烟化学品质评价模型。结果表明, $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 标度层次分析法所获得的化学成分权重较1~9标度更精确,变权评价方法的6个植烟县烤烟化学成分优劣排序为西峡>唐河>社旗>方城>邓州>内乡;常权排序为西峡>社旗>唐河>方城>邓州>内乡。不同植烟县变权评价结果值低于常权,变权评价结果更符合实际。表明,采用变权评价方法可以更好地满足化学品质中需要凸显较差化学成分的消极作用和整体均衡性的要求。

**关键词:**烤烟;化学品质;层次分析法;标度;变权;局部惩罚型;对比

中图分类号:S572 文献标志码:A 文章编号:1004-3268(2020)12-0151-08

## Chemical Quality Evaluation of Flue-Cured Tobacco Based on Local Penalty Variable Weight

ZHANG Yonggang, REN Zhiguang, XIANG Boka, LIU Jianguo, ZHANG Xiaobing,  
XIA Chen, CHENG Changhe

(Technology Center of China Tobacco Zhejiang Industrial Co., Ltd., Hangzhou 310024, China)

**Abstract:** In order to solve the shortage of traditional evaluation method of flue-cured tobacco chemical quality, the evaluation of chemical quality with variable weight was discussed. Taking flue-cured tobacco of 6 main producing counties in Nanyang as the research object, the normal weight was determined by  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  scale analytic hierarchy process, and the variable weight vector of local punishment state was selected to establish the chemical quality evaluation model of flue-cured tobacco based on the variable weight theory. The results showed that the chemical composition weights obtained by  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  scale analytic method were more precise than that by 1—9 scale. The rank of the chemical constituents of the six counties by the variable weight evaluation method was Xixia>Tanghe>Sheqi>Fangcheng>Dengzhou>Neixiang; which by normal weight evaluation method was Xixia>Sheqi>Tanghe>Fangcheng>Dengzhou>Neixiang. The evaluation results of variable weight in different counties were lower than that of normal weight, which was more tally with the actual situation. The results showed that the variable weight evaluation method could better meet the requirements of highlighting the negative effects of poor chemical components and the integral proportionality in chemical quality.

**Key words:** Flue-cured tobacco; Chemical quality; Analytic hierarchy process; Scale; Variable weight; Local punishment; Comparison

化学成分是烟叶的物质基础,也是内在质量的基础,因其具有分析速度快、与吸食品质关联强等优

点,已成为烟叶质量评价的重要因素<sup>[1]</sup>。烟叶化学成分由多指标构成,每个指标反映烟叶化学成分的

收稿日期:2020-01-15

基金项目:浙江中烟工业有限责任公司科技项目(ZJZY2016B001)

作者简介:张勇刚(1986-),男,河南濮阳人,工程师,硕士,主要从事烟叶原料研究。E-mail:zhangyonggang@zjtobacco.com  
通信作者:程昌合(1980-),男,河南信阳人,高级工程师,硕士,主要从事烟叶原料研究。E-mail:chengch@zjtobacco.com

某个质量,但单指标较难完整描述烟叶化学成分状况<sup>[2]</sup>。烟叶化学成分可用性指数可综合反映烟叶的化学成分可用性,克服了单项量化不能全面比较烟叶化学成分的缺陷,使烟叶的化学成分可用性可量化比较<sup>[3]</sup>,被广泛应用于烟叶化学成分的区域评价<sup>[4-5]</sup>、烤烟种植品种评价<sup>[6-8]</sup>以及化学品质对农艺措施的响应<sup>[9]</sup>等。

化学成分的定权过程主要是通过主成分分析法<sup>[10]</sup>、层次分析法<sup>[11]</sup>、变异系数法<sup>[12]</sup>等计算。烟叶化学成分可用性指数考虑到了不同化学成分的相对重要性,使综合值在一定程度上反映了各个化学成分的综合优度。其本质仍属于常权综合评价模型,即在评价过程中,无论化学成分值如何变化,权重总是保持不变<sup>[13]</sup>。而实际烟叶化学成分评价中存在“木桶原理”,更加注重化学成分的均衡性,若采用常权评价法,表现较差的化学成分有可能被其他较优的化学成分中和,使最终评价值过于乐观,导致不科学的决策,尤其是在烤烟品种择优、最佳农艺措施选取等方面。

鉴于此,在运用  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度层次分析法得到常权重的基础上,采取局部惩罚型变权模型对常权进行重新分配,建立变权评价模型,运用该模型对河南南阳烤烟进行化学品质评价。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

所取烟叶样本来自河南省南阳市主产植烟县区(方城、内乡、社旗、西峡、邓州、唐河),品种为云烟 87,等级为 C3F,取样时间为 2018 年,共计 39 个样本,测定与计算的指标包括烟碱含量、总糖含量、还原糖含量、氯含量、钾含量、总氮含量、氮碱比、糖碱比和钾氯比,测定方法参考文献[14]进行。

### 1.2 变权分析理论

变权思想由汪培庄<sup>[15]</sup>于 19 世纪 80 年代首次提出,李洪兴<sup>[13]</sup>又基于因素空间理论给出了变权向量和状态变权向量的公理化定义。变权分析通过构造满足公理条件的状态变权向量,实现指标权重依据指标状态值的变化而改变。

变权综合评价模型主要包括以下步骤:

- 1) 对评价指标进行标准化处理,满足同向性需求(越大越好或者越小越好);
- 2) 选取客观赋权法、主观赋权法或两者的组合,确定参评指标的常权;
- 3) 根据评价的目的,选取符合公理条件的状态变权向量,主要包括激励型变权、惩罚型变权和混合

型变权 3 种形式;

4) 根据变权向量的公理化定义,结合指标的标准化值、常权、状态变权向量,计算变权;

5) 选取综合评价方法对指标的变权和标准化值进行信息集结,形成综合评价值,实现评价对象的优劣评价<sup>[16]</sup>。

### 1.3 基于局部惩罚型变权的烤烟化学品质评价

1.3.1 参评指标的标准化 依据烤烟化学成分与烟叶品质的关系<sup>[17-18]</sup>,将烟碱含量、总氮含量等化学成分定义为区间型指标;将钾含量、钾氯比指标定义为带有上限的越大越好指标。

针对烟碱含量、总糖含量、还原糖含量、总氮含量、氯含量、糖碱比和氮碱比指标,采用下式进行标准化处理:

$$V_i = \begin{cases} v_i/q_1 & v_i < q_1 \\ 1 & q_1 \leq v_i \leq q_2 \\ q_2/v_i & v_i > q_2 \end{cases} \quad (1)$$

针对钾含量、钾氯比指标,采用下式进行标准化处理:

$$V_i = \begin{cases} v_i/q_1 & v_i < q_1 \\ 1 & v_i \geq q_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $v_i$  为第  $i$  个烤烟化学成分的实测值, $V_i$  为第  $i$  个化学成分的标准化值, $i=1, 2, \dots, n$ ;  $q_1$  和  $q_2$  为不同化学成分标准化公式的拐点值,根据经验和相关文献[19]确定,具体见表 1。

表 1 烤烟化学成分适宜范围

Tab. 1 Appropriate range of chemical composition of flue-cured tobacco

指标 Index	$q_1$	$q_2$
烟碱含量/% Nicotine content	2.20	2.80
总糖含量/% Total sugar content	20.00	24.00
还原糖含量/% Reducing sugar content	18.00	22.00
总氮含量/% Total nitrogen content	2.00	2.50
钾含量/% Potassium content	2.00	-
氯含量/% Chlorine content	0.40	0.60
糖碱比 Ratio of reducing sugar to nicotine	8.50	9.50
氮碱比 Ratio of nitrogen to nicotine	0.95	1.05
钾氯比 Ratio of potassium to chlorine	4.00	-

注:“-”表示钾含量、钾氯比指标标准化时无需确定  $q_2$ 。

Note: “-” indicate that there is no need to determine  $q_2$  when the potassium content and ratio of potassium to chlorine is standardizing.

1.3.2 常权的确定 本研究采用层次分析法计算常权重。层次分析法使用的基础是以一定的数字标度把主观判断进行客观描述<sup>[20]</sup>。骆正清等<sup>[21]</sup>建议对精度要求较高的多准则下的排序问题使用指数标度  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  或  $e^{0/4} \sim e^{8/4}$ 。沈强等<sup>[22]</sup>比较了 3 种标

度 6 项评估指标, 得出  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  指数标度较好, 并将其作为层次分析法的标度。

因此, 本研究选用  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度(表 2)构造判断矩阵  $A = [a_{ij}]$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n; a_{ij}a_{ji} = 1$ )。采用方根法<sup>[23]</sup>计算化学成分的常权  $W = (w_1, w_2, \dots, w_i)$ 、判断矩阵的最大特征根( $\lambda_{\max}$ )及随机一致性比率( $CR$ )。当  $CR < 0.1$  时, 认为判断矩阵具有良好的一致性, 否则, 对判断矩阵进行调整。

为说明  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度的优越性, 将其与 1~9 标度进行比较。标度评价指标<sup>[24]</sup>包括随机一致性比率、最大偏差值和均方差, 三者越小, 标度性能越好。其中, 最大偏差值( $s$ ) =  $\max_{i,j} |a_{ij} - w_i/w_j|$ 、均方差( $\sigma$ ) =  $\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} - w_i/w_j)^2/n}$ 。

表 2 标度的定义

Tab. 2 Definition of scale

标度 Scale	定义 Definition
$e^{0/5}$	表示 2 个因素相比, 具有相同重要性
$e^{2/5}$	表示 2 个因素相比, 前者比后者稍重要
$e^{4/5}$	表示 2 个因素相比, 前者比后者明显重要
$e^{6/5}$	表示 2 个因素相比, 前者比后者强烈重要
$e^{8/5}$	表示 2 个因素相比, 前者比后者极端重要
$e^{1/5}, e^{3/5}, e^{5/5}, e^{7/5}$	表示上述相邻判断的中间值

1.3.3 局部惩罚型状态变权向量 状态变权向量的构造是变权综合的重要内容, 其确定方法有指数型状态变权向量法、对数型状态变权向量法、经验公式法等<sup>[25]</sup>, 其中, 指数型状态变权向量法更具有灵活性<sup>[26]</sup>。鉴于烟叶化学成分评价中存在“木桶原理”, 即不管其他化学成分表现如何优越, 只要某指标差到一定的程度, 该评价对象的化学品质就变差。

因此, 构造如下状态变权向量:

$$S_i(V) = \begin{cases} e^{-\alpha(V_i-\beta)} & V_i \leq \beta \\ 1 & V_i > \beta \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $S_i(V)$  表示化学成分的状态变权向量,  $\beta$  表示对化学成分标准化值的最低要求, 即阈值。当  $V_i \leq \beta$  时,  $V_i$  对应的权重增大, 而  $V_i$  的值变小, 因而加权和变小, 达到对第  $i$  个指标惩罚目的; 当  $V_i > \beta$

表 3  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  与 1~9 标度化学成分权重值  
Tab. 3  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  and 1~9 scale chemical composition weight values

标度 Scale	烟碱 含量 Nicotine content	总糖 含量 Total sugar content	还原糖 含量 Reducing sugar content	总氮 含量 Total nitrogen content	钾 含量 Potassium content	氯 含量 Chlorine content	糖碱比 Ratio of reducing sugar to nicotine	氮碱比 Ratio of nitrogen to nicotine	钾氯比 Ratio of potassium to chlorine
$e^{0/5} \sim e^{8/5}$	0.133 3	0.083 6	0.099 8	0.097 6	0.111 6	0.081 7	0.145 7	0.121 9	0.124 7
1~9	0.165 1	0.046 6	0.075 9	0.072 5	0.104 6	0.041 8	0.224 6	0.129 3	0.139 7

时, 对第  $i$  个指标主观不进行惩罚<sup>[27]</sup>。 $\alpha$  表示惩罚水平,  $\alpha \geq 0$ , 当  $\alpha = 0$  时, 无惩罚效果;  $\alpha$  取值越大, 低于阈值的指标受到的惩罚越重<sup>[28]</sup>。

实际评价中, 可以根据对指标的要求以及对低于阈值的指标的惩罚力度, 灵活选取  $\beta$  值和  $\alpha$  值。参考已有研究, 本研究将  $\beta$  设定为 0.85,  $\alpha$  设定为 0.815 47<sup>[29-30]</sup>。

1.3.4 局部惩罚型变权 由变权向量的公理化定义, 变权向量  $W(V)$  可用  $W$  和  $S_i(V)$  的归一化 Hadamard 乘积表示。则基于局部惩罚型变权的烤烟化学成分的权重如下:

$$W(V) = \frac{(w_1 S_1(V), w_2 S_2(V), \dots, w_n S_n(V))}{\sum_{i=1}^n w_i S_i(V)} = \frac{w_1 S_1(V)}{\sum_{i=1}^n w_i S_i(V)} \quad (4)$$

1.3.5 烤烟化学品质评价模型 由化学成分的标准化值和变权向量, 采用线性加权法, 构建化学品质模型:

$$F = \sum W_i(V) V_i \quad (5)$$

根据  $F$  值的大小可对化学品质进行综合评价,  $F$  值越高, 表示化学品质越优。

当式(5)中的  $W_i(V)$  替换为  $W$  时,  $F$  值即为烟叶化学成分可用性指数。

#### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据分析和图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 化学成分常权确定

两两比较化学成分对烟叶品质的相对重要性, 依据表 3 和 1~9 标度分别建立判断矩阵, 2 种标度所得化学成分的权重值如表 3 所示。并计算不同标度判断矩阵的  $\lambda_{\max}$  值、一致性指标( $CI$ )等, 结果见表 4。

由表 3 可知, 2 种标度所得化学成分的权重排序是一致的, 但权重大小有一定差异,  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度

所得权重值标准差、权重最大值与最小值的商分别为 0.0221、1.7821；1~9 标度所得权重值标准差、权重最大值与最小值的商分别为 0.0599、5.3805， $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度所得权重值标准差、权重最大值与最小值的商均较小，说明， $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度在避免某项化学成分权重过大以致主导最终评价方面有较好效果。

由表 4 可知，2 种标度的 CR 值 < 0.1，说明判断矩阵均具有满意的一致性，表 3 所得结果有效。同时可以看出， $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度的 CR、s、σ 值均小于 1~9 标度，说明  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度性能更好。因此，本研究将  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度层次分析法计算所得权重作为化学成分的常权。

表 5 各植烟县烤烟化学成分的实测值

Tab. 5 The measured values of chemical composition of flue-cured tobacco in each tobacco planting county

植烟县 Tobacco planting county	样本量 Sample size	烟碱 含量/% Nicotine content	总糖 含量/% Total sugar content	还原糖 含量/% Reducing sugar content	总氮 含量/% Total nitrogen content	钾含量/% Potassium content	氯含量/% Chlorine content	糖碱比 Ratio of reducing sugar to nicotine	氮碱比 Ratio of nitrogen to nicotine	钾氯比 Ratio of potassium to chlorine
邓州 Dengzhou	9	1.50	26.12	22.58	1.68	1.67	0.72	15.01	1.12	2.32
方城 Fangcheng	6	1.64	27.35	24.17	1.78	1.52	0.60	14.78	1.09	2.51
内乡 Neixiang	7	1.54	26.84	22.39	1.45	1.57	0.71	14.58	0.95	2.21
社旗 Sheqi	5	2.15	26.01	23.89	1.83	1.53	0.68	11.09	0.85	2.26
唐河 Tanghe	6	1.91	26.04	23.89	1.87	1.64	0.67	12.52	0.98	2.46
西峡 Xixia	6	1.79	25.69	20.60	1.55	1.60	0.50	11.51	0.86	3.18

依据公式 3、4 即可得到化学成分的局部惩罚型变权，以邓州为例，绘制变权和常权的对比图（图 1）。烟碱含量、糖碱比和钾氯比变权权重高于常权，其余指标变权权重低于常权。从指标标准化值可以看出，权重增加的这些指标标准化值均低于其阈值 ( $\beta = 0.85$ )。同时也可看出，烟碱含量标准化值也低于阈值，但其权重变化幅度相对较小，这是

表 4  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  与 1~9 标度对比  
Tab. 4  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  and 1~9 scale comparison

标度 Scale	$e^{0/5} \sim e^{8/5}$	1~9
$\lambda_{\max}$	9.1118	9.9794
CI	0.0140	0.1224
RI	1.45	1.45
CR	0.0096	0.0844
s	0.4694	2.3805
$\sigma$	0.1678	0.7149

## 2.2 化学成分局部惩罚型变权确定

各植烟县烤烟化学成分的均值如表 5 所示。为便于比较及节省篇幅，以表 5 作为原始数据进行后续计算。

因为其常权较高，标准化值距离阈值相对较近，而且各指标权重的调整要兼顾整体指标权重的变化差异。因此，变权模型是在尊重常权的基础上，根据指标状态值距离阈值的远近来做出合理性评价，这有助于提高对烟叶化学品质起负向作用指标的重视程度。

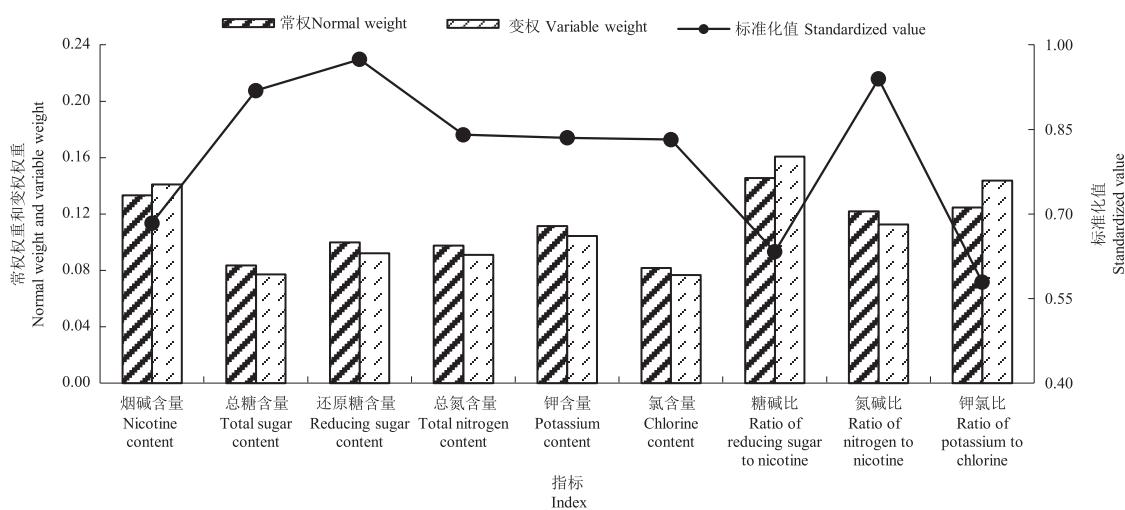


图 1 邓州县各化学指标的常权和变权比较

Fig. 1 Comparison of normal weight and variable weight of each chemical indexes of Dengzhou County

### 2.3 烤烟化学品质评价

变权和常权评价结果的对比如图 2 所示。由图 2 可知, 不同植烟县变权评价结果低于常权评价结果, 这是因为不同植烟县均存在低于阈值 ( $\beta = 0.85$ ) 的化学成分, 变权模型对上述指标进行惩罚, 使其权重增大, 而其他指标的权重减小, 因此变权评价结果偏低。而不同植烟县变权较常权降低的幅度不一, 则是由低于阈值的指标项个数及化学成分标准化值距离阈值远近不同所致。同时可以发现, 变权评价结果与常权评价排序也出现差异, 变权评价

化学成分优劣排序为唐河(0.842 9)>社旗(0.841 7)。这是因为常权并未对低于阈值的化学成分进行惩罚, 表现较好的指标中和了表现较差的指标; 唐河烤烟的化学品质优于社旗, 是因为社旗烤烟化学成分存在明显的短板, 即钾氯比指标, 其标准化值仅为 0.565 6, 远低于阈值, 惩罚较重, 权重增加的较多, 权重增加的部分则需要其他化学成分补偿, 致使其综合评价值低于唐河。综上, 变权模型可以达到惩罚那些低于阈值指标的目的, 评价结果更符合实际情况。

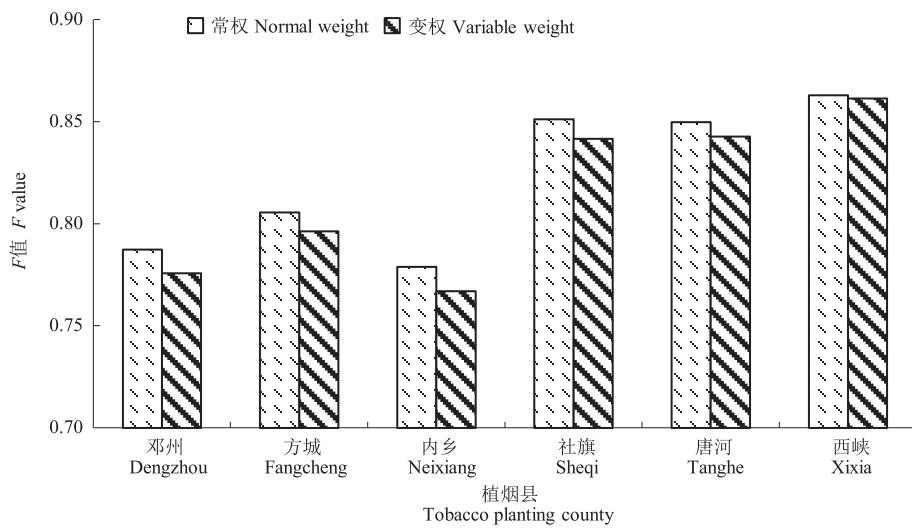


图 2 不同植烟县的常权和变权综合评价

Fig. 2 Comprehensive evaluation of normal weight and variable weight in different tobacco planting counties

### 3 结论与讨论

目前, 关于烤烟化学品质的评价研究主要集中在新型评价方法的引入和烟叶化学成分可用性指数的改进及其应用 2 个方面。钟楚等<sup>[31]</sup>采用集对分析法, 考虑等级标准边界的模糊性, 避免直接确定联系度中的不确定系数, 对临沧市凤庆县、临翔区、永德县和云县 2004 年和 2005 年烤烟烟叶化学品质进行综合评价。蒋佳磊等<sup>[14]</sup>为研究我国主要烟叶产区烤烟化学成分特征及其可用性, 通过隶属度函数和三标度(0、1、2)层次分析法构建烟叶化学成分可用性指数。徐泽桐等<sup>[32]</sup>基于熵值法和突变级数法建立评价模型, 用熵值法对指标重要性排序, 再通过突变级数法从烤烟化学成分、感官质量方面综合评价陕西省烟草质量。褚旭等<sup>[33]</sup>为建立更加合理的烟叶质量评价指标赋权方法, 以云南 11 个基地单元的烟叶样本为研究对象, 采用单一与综合赋权法评价烟叶质量的综合状况, 并对赋权及评价结果进行

对比分析。不同研究者采用不同方法对烟叶化学品质进行评价, 对化学成分或者采用主观赋权, 或者采用客观赋权, 或者采用主客观相结合的综合赋权法, 但整体来看仍属于常权的范畴, 即权重一旦确定, 无论评价指标值如何变化, 权重都是不变的, 另外, 在运用新标度层次分析法计算权重时, 缺少对比研究。

本研究根据变权理论及变权综合评价的基本步骤, 采用  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度层次分析法确定化学成分常权, 选取局部状态变权向量, 依据变权公理化公式, 建立烤烟化学品质评价的变权模型。局部变权能够对低于阈值的化学成分进行惩罚, 使其权重增大, 其他指标权重降低, 并且根据常权的大小和化学成分标准化值距离阈值的远近确定具体惩罚的指标个数, 可以实现权重值的动态变化, 更好地满足化学品质中需要凸显较差化学成分的消极作用和整体均衡性的要求。另外, 本研究引入层次分析法标度性能的评价标准, 可为选取标度提供一定参考。

评价结果及对比研究表明, 针对层次分析法确

权,  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度较 1~9 标度性能更好; 6 个植烟县烤烟化学成分优劣排序为西峡>唐河>社旗>方城>邓州>内乡, 常权排序为西峡>社旗>唐河>方城>邓州>内乡。不同植烟县变权评价结果值低于常权, 变权评价结果更符合实际。

本研究侧重于评价方法的研究, 为更直观地比较变权评价与常权评价在权重确定和综合评价方面的优劣, 仅采用了南阳市各植烟县烤烟化学成分指标的均值, 评价结果带有一定的片面性。同时, 常权方法的对比选择、状态变权向量的构建及其参数确定等问题也需进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 郑州烟草研究院. 一种感官品质导向的烤烟烟叶化学成分适宜性量化评价方法:201910303882.1[P]. 2019-07-09.  
Zhengzhou Tobacco Research Institute. Sense organ quality guided flue-cured tobacco leaf chemical component appropriateness quantitative evaluation method:201910303882.1 [P]. 2019-07-09.
- [2] 邓小华, 杨丽丽, 邹凯, 等. 烟稻轮作模式下烤烟增密减氮的主要化学成分效应分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4):991-997.  
DENG X H, YANG L L, ZOU K, et al. Effect of density-increasing and nitrogen-saving on chemical components of flue-cured tobacco under tobacco-rice rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(4): 991-997.
- [3] 王晓宾, 王军, 刘兰, 等. 广东烟区烤烟主要化学成分可用性评价[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(2):64-72.  
WANG X B, WANG J, LIU L, et al. Chemical component usability of flue-cured tobacco leaves in guangdong tobacco co-growing area[J]. Chinese Tobacco Science, 2019, 40(2):64-72.
- [4] 杨杰, 王昌全, 冯广林, 等. 四川凉山烟区红大烟叶化学成分可用性综合评价[J]. 烟草科技, 2013(11):48-51.  
YANG J, WANG C Q, FENG G L, et al. Comprehensive evaluation of usability of chemical components in Hongda tobacco leaves from Liangshan tobacco growing area in Sichuan[J]. Tobacco Science & Technology, 2013(11):48-51.
- [5] 王育军, 周冀衡, 鲁鑫浪, 等. 昆明市烤烟化学成分可用性评价及其与潜香物质的关系[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5):108-114.  
WANG Y J, ZHOU J H, LU X L, et al. Usability and correlation with latent fragrant substance of chemical component in flue-cured tobacco leaves in Kunming[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(5): 108-114.
- [6] 李迪秦, 王妍妮, 周正红, 等. 烤烟新品系 HKDN-2 生态适应性模糊评价[J]. 核农学报, 2019, 33(10):2086-2093.  
LI D Q, WANG Y N, ZHOU Z H, et al. Fuzzy evaluation of the ecological adaptability of the new flue-cured tobacco strain HKDN-2[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(10):2086-2093.
- [7] 李雨, 翟欣, 胡钟胜, 等. 基于气候条件与烟叶质量的烤烟适宜种植品种选用[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(3):19-23.  
LI Y, ZHAI X, HU Z S, et al. Screening of flue-cured tobacco varieties based on climate conditions and quality of tobacco leaf[J]. Chinese Tobacco Science, 2015, 36(3): 19-23.
- [8] 刘冬, 李岭, 吕银斐, 等. 贵州开阳烟区南江 3 号烤烟化学成分特征与可用性评价[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(4):590-596.  
LIU D, LI L, LÜ Y F, et al. Characteristics of chemical components and evaluation of usability of Nanjiang No. 3 flue-cured tobacco leaves from Kaiyang tobacco growing area in Guizhou Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2015, 37(4):590-596.
- [9] 李迪秦, 龚湛武, 李玉辉, 等. 复合生物有机肥对烤烟光合生理特性及土壤微生物的影响[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(9):109-116.  
LI D Q, GONG Z W, LI Y H, et al. Effects of compound bio-organic fertilizer on flue-cured tobacco photosynthetic physiological characters & soil microbes [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(9): 109-116.
- [10] 邓小华, 黄杰, 杨丽丽, 等. 石灰、绿肥和生物有机肥协同改良酸性土壤并提高烟草生产效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9):1577-1587.  
DENG X H, HUANG J, YANG L L, et al. The synergistic effect of lime, green manure and bio-organic fertilizer on restoration of acid field and improvement of tobacco production efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9):1577-1587.
- [11] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 等. 曲靖烤烟主要化学成分及

- 其协调性空间分布 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(4): 862-869.
- LI Q, ZHOU J H, YANG R S, et al. Spatial patterns of main chemical components and their harmony in flue-cured tobacco in Qujing of Yunnan Province, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(4): 862-869.
- [12] 程向红, 董顺德, 王锐, 等. 豫中烟区烤烟化学成分分析 [J]. 中国烟草科学, 2013(2): 108-112.
- CHENG X H, DONG S D, WANG R, et al. Analysis of chemical components in flue-cured tobacco leaves from central Henan [J]. Chinese Tobacco Science, 2013(2): 108-112.
- [13] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(Ⅲ): 变权综合原理 [J]. 模糊系统与数学, 1995(3): 1-9.
- LI H X. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (Ⅲ): Variable weights analysis [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995(3): 1-9.
- [14] 蒋佳磊, 陆扬, 苏燕, 等. 我国主要烟叶产区烤烟化学成分特征与可用性评价 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23(2): 13-27.
- JIANG J L, LU Y, SU Y, et al. Chemical characteristics and usability of flue-cured tobacco growing in main tobacco producing areas in China [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2017, 23(2): 13-27.
- [15] 汪培庄. 模糊集与随机集落影 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985.
- WANG P Z. Shadow of fuzzy sets and random sets [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985.
- [16] 武强, 李博. 煤层底板突水变权评价中变权区间及调权参数确定方法 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2143-2149.
- WU Q, LI B. Determination of variable weight interval and adjust weight parameters in the variable weight assessment model of water-inrush from coal floor [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2143-2149.
- [17] 李国栋, 胡建军, 周冀衡, 等. 基于主成分和聚类分析的烤烟化学品质综合评价 [J]. 烟草科技, 2008(12): 5-9.
- LI G D, HU J J, ZHOU J H, et al. Comprehensive evaluation of flue-cured tobacco chemical quality based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Tobacco Science & Technology, 2008(12): 5-9.
- [18] 王彦亭, 谢剑平, 李志宏. 中国烟草种植区划 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- WANG Y T, XIE J P, LI Z H. China tobacco planting division [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [19] 刘春奎, 贾琳, 王小东, 等. 基于河南烤烟常规化学成分的适宜性评价及其聚类分析 [J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(4): 440-446.
- LIU C K, JIA L, WANG X D, et al. Suitability evaluation and cluster analysis of main chemical components of flue-cured tobacco leaves from Henan Province [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2015, 37(4): 440-446.
- [20] 熊立, 梁樸, 王国华. 层次分析法中数字标度的选择与评价方法研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(3): 72-79.
- XIONG L, LIANG L, WANG G H. Method research on selection and valuation of numeric scale in analytic hierarchy process [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2005, 25(3): 72-79.
- [21] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(9): 51-60.
- LUO Z Q, YANG S L. Comparative study on several scales in AHP [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2004, 24(9): 51-60.
- [22] 沈强, 姚炎明, 何勇. 基于灰色多层次综合评判模型的生物质能开发方案优选 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 179-185.
- SHEN Q, YAO Y M, HE Y. Optimum method for biomass energy development projects based on gray multi-hierarchical comprehensive appraisal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 179-185.
- [23] 李慧, 刘其南, 张丽, 等. 基于层次分析法及多指标正交试验优选酒炖女贞子炮制工艺 [J]. 中草药, 2016, 47(16): 2832-2837.
- LI H, LIU Q N, ZHANG L, et al. Optimization of processing technology of *Ligustrum lucidum* fructus stewed with wine based on analytic hierarchy process and multi-index orthogonal test [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2016, 47(16): 2832-2837.
- [24] 徐泽水. 关于层次分析中几种标度的模拟评估 [J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(7): 58-62.
- XU Z S. A Simulation-based evaluation of several scales in the analytic hierarchy process [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2000, 20(7): 58-62.
- [25] 龚建周, 夏北成, 陈健飞. 快速城市化区域生态安全

- 的空间模糊综合评价:以广州市为例[J].生态学报,2008,28(10):4992-5001.
- GONG J Z,XIA B C,CHEN J F. Spatially fuzzy assessment of regional eco-security in Guangzhou,a fast urbanizing area:A case study in Guangzhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2008,28(10):4992-5001.
- [26] 李德清,郝飞龙.状态变权向量的变权效果[J].系统工程理论与实践,2009,29(6):127-131.
- LI D Q,HAO F L. Weights transferring effect of state variable weights vector [J]. *Systems Engineering Theory & Practice*,2009,29(6):127-131.
- [27] 韩国莹,刘秀梅.基于惩罚型变权的城市可持续发展动态预警:以内蒙古资源型城市包头为例[J].统计与信息论坛,2019,34(1):83-93.
- HAN G Y,LIU X M. Research on dynamic early warning of urban sustainable development based on penalty variable weight:Taking Baotou, a resource-based city in Inner Mongolia, as an example [J]. *Statistics & Information Tribune*,2019,34(1):83-93.
- [28] 卢涛,周学武,王占岐,等.基于 VW 模型的土地可持续利用评价及时空特征分析:以安徽省市域为例[J].中国土地科学,2015,29(12):60-67,93.
- LU T,ZHOU X W,WANG Z Q,*et al*. Evaluation of regional sustainable land use and its spatial-temporal pattern based on the VW model:A case study of each city in Anhui Province [J]. *China Land Science*,2015,29(12):60-67,93.
- [29] 张路路,郑新奇,张春晓,等.基于变权模型的唐山城市脆弱性演变预警分析[J].自然资源学报,2016(11):68-80.
- ZHANG L L,ZHENG X Q,ZHANG C X,*et al*. Early-warning of urban vulnerability in Tangshan City based on variable weight model [J]. *Journal of Natural Resources*,2016(11):68-80.
- [30] 刘辉,渠丽萍,魏超,等.基于惩罚型变权模型的土地生态安全评价及障碍因子分析:以鄂州市为例[J].湖北农业科学,2016,55(18):4679-4684.
- LIU H,QU L P,WEI C,*et al*. Evaluation of land ecological security based on the model of punishing variable weight and diagnosis of obstacle factors: A case study of Ezhou City [J]. *Hubei Agricultural Sciences*,2016,55(18):4679-4684.
- [31] 钟楚,简少芬.基于集对分析的云南省临沧市烤烟化学品质综合评价[J].中国烟草学报,2011,17(5):18-23.
- ZHONG C,JIAN S F. Comprehensive assessment of chemical quality of flue-cured tobacco from Lincang of Yunnan based on set pair analysis [J]. *Acta Tabacaria Sinica*,2011,17(5):18-23.
- [32] 徐泽桐,刘亚相,袁帅,等.基于熵值法和突变级数法的陕西省烟叶质量综合评价研究[J].河南农业大学学报,2018,2(4):657-664.
- XU Z T,LIU Y X,YUAN S,*et al*. Comprehensive evaluation of tobacco leaf in Shaanxi Province based on entropy method and catastrophe progression method [J]. *Journal of Henan Agricultural University*,2018,2(4):657-664.
- [33] 褚旭,王珂清,魏建荣,等.基于综合赋权法的烤烟烟叶质量评价[J].烟草科技,2019,52(10):28-36.
- CHU X,WANG K Q,WEI J R,*et al*. Quality evaluation of flue-cured tobacco leaves based on comprehensive weighting [J]. *Tobacco Science & Technology*,2019,52(10):28-36.