

烟草和烟气化学

烟叶原料对卷烟主流烟气 7 项有害成分释放量的影响研究

张霞, 刘巍, 张涛, 许永, 杨帅, 芮晓东, 段沅杏, 陈永宽, 缪明明

云南烟草科学研究院, 云南省烟草化学重点实验室, 昆明市高新开发区科医路 41 号, 650106

摘要: 为了解烟叶原料对卷烟主流烟气中 7 项有害成分的影响, 选取了产地、烤房、品种、土壤、烟叶部位作为影响因素对 237 个初烤烟叶样品中主流烟气 7 项有害成分指标进行了多因素方差分析。结果表明: 对 7 项烟气有害成分释放量指标有显著性影响的重要因素依次是产地、烟叶部位、品种。产地因素在 7 项烟气有害成分上均表现极显著差异, 平均贡献率为 64.00%; 烟叶部位在 6 项烟气有害成分上表现极显著差异, 平均贡献率为 26.51%; 品种在 5 项烟气有害成分上表现显著差异, 平均贡献率为 9.49%; 而烤房、土壤对 7 项烟气有害成分释放量影响不显著。

关键词: 烟叶原料; 卷烟; 主流烟气; 有害成分

doi: 10.3969/j.issn.1004-5708.2013.06.001

中图分类号: TS411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5708 (2013) 06-0001-08

Effects of raw tobacco on delivery of seven harmful components in mainstream cigarette smoke

ZHANG Xia, LIU Wei, ZHANG Tao, XU Yong, YANG Shuai,
RUI Xiaodong, DUAN Yuanxing, CHEN Yongkuan, MIAO Mingming

Key Laboratory of Tobacco chemistry of Yunnan, Yunnan Academy of Tobacco Sciences, Kunming, 650106, China

Abstract: Multi-factor analysis of variance was carried out to investigate relationship between tobacco leaf and seven harmful components in mainstream cigarette smoke using 237 flue-cured tobacco samples. Results showed that the most important factor that influences all seven harmful components release is production region, followed by stalk position and variety. All seven components showed significant differences among different production regions, with a mean contribution rate of 64.00%. Six components showed significant differences among different stalk positions with a mean contribution rate of 26.51%. Five components showed significant differences among different varieties with a mean contribution rate of 9.49%. Curing barn and soil didn't show significant effect.

Keywords: leaf tobacco; cigarette; mainstream smoke; seven harmful components

1990 年, Hoffmann 和 Hecht 列出了 12 类 44 种烟气有害成分^[1]。此后, 卷烟烟气特殊有害成分的分析 and 降低逐步成为烟草行业科研的热点^[2-3]。2005 年, 谢剑平等发现, 用 CO, HCN, NNK, NH₃, BaP, 苯酚和巴豆醛 7 种有害成分表征卷烟烟气的危害性具

有科学性和可行性^[4]。选择性降低这 7 种有害成分的释放量可以降低卷烟危害性指数。前人已有很多关于烟叶原料和卷烟辅料等^[5-20]对 7 种有害成分影响的报道, 但鲜见大样本系统分析烟叶原料影响的研究。本文选取 237 个初烤烟叶样品, 分析了产地、烟叶部位、品种、烤房、土壤等因素对主流烟气中 7 种有害成分指标的影响, 旨在为卷烟减害研究提供参考。

基金项目: 云南中烟工业有限责任公司在研项目 (2012JC02); 云南省烟草化学创新团队 (2009CI014)

作者简介: 张霞 (1984—), 硕士, 研究实习员, 主要从事烟草化学研究, Tel: 0871-8316812, Email: zhangxia840511@163.com

通讯作者: 缪明明 (1962—), 博士, 研究员, 主要从事烟草化学研究, Tel: 0871-68316886, Email: mmmiao@cyats.com

收稿日期: 2012-9-6

1 实验部分

1.1 材料与仪器

2009 年初烤烟叶样品 237 个: 3 个部位: 上部、中部、下部; 产地: 云南省 47 个县级产区; 8 个品

种: 红大、NC297、K326、KRK26、云 87、云 97、NC102、V2; 2 种土壤: 红壤、黄壤; 2 种烤房: 普通烤房和密集烤房。样本情况见表 1。

表 1 2009 年初烤烟叶群体因素水平及样品数

因素及水平	样品数	因素及水平	样品数	因素及水平	样品数	因素及水平	样品数
烟叶部位		产地		品种		土壤	
上部	85	云南 47 个县级产区	237	K326	86	红壤	226
中部	87			红大	54	黄壤	11
下部	65			云 87	26		
		合计	237	NC297	22		
				云 97	26		
		烤房		KRK26	12		
		密集烤房	11	NC102	5		
		普通烤房	226	V2	6		
合计	237	合计	237	合计	237	合计	237

AG204 型电子天平 (感量 0.0001g, 瑞士 Mettler Toledo 公司); MK95 卷烟机组 (英国 MOLINS 公司); KBF240 型恒温恒湿箱 (德国 Binder 公司); RM200 型全自动吸烟机 (德国 Borgwaldt 公司); SM450 直线型吸烟机 (英国 Cerulean 公司)。

ICS900 型离子色谱仪, 配备电导检测器 (美国戴安公司); AA3 连续流动分析仪 (德国 Bran+luebbe 公司); GC-TEA610 型气相色谱 - 热能分析仪 (美国 Thermo Electron 公司); HP6890 气相色谱 - 质谱联用仪 (美国 Agilent 公司)、Agilent 1100 高效液相色谱仪, 配备紫外检测器和荧光检测器 (美国 Agilent 公司)。

1.2 实验方法

将烟叶样品回潮、切丝, 烘干, 然后采用统一的卷烟纸和搭口胶将处理过的烟丝在同一卷烟机上卷制成 64 mm×24.2 mm 的无滤嘴卷烟作为研究对象。

采用 GB/T 16447-2004 《烟草及烟草制品 调节和测试的大气环境》规定的条件调节卷烟样品, 然后挑选重量合格的样品采用 GB/T 16450-2004 《常规分析用吸烟机 定义和标准条件》规定的条件抽吸卷烟, 采用 YC/T 30-1996 《卷烟烟气气相中一氧化碳的测定 非散射红外法》、YC/T 377-2010 《卷烟主流烟气中 NH₃ 的测定 离子色谱法》、YC/T 253-2008 《卷烟主流烟气中氰化氢的测定 连续流动法》、YC/T 225-2008 《卷烟主流烟气中主要酚类化合物的测定 高效液相色谱法》、YC/T 254-2008 《卷烟主流烟气中主要羰基化合物的测定 高效液相色谱法》、GB/T 21130-2007 《卷烟 烟气总粒相物中苯并 [a] 芘的测定》

和 GB/T 23228-2008 《卷烟 主流烟气总粒相物中烟草特有 N- 亚硝胺的测定 气相色谱 - 热能分析联用法》分别测定 CO、NH₃、HCN、苯酚、巴豆醛、BaP 和 NNK。

所有样品均平行检测 2 次, 统计分析采用的 7 项有害成分释放量的数据均扣除了烟支重量的影响, 转化为每克烟丝的主流烟气中 7 项有害成分的释放量。

1.3 统计分析

为系统了解所取烟叶样品的 7 项烟气有害成分释放量的整体分布情况, 本研究采用 R 语言的 data-outline 模块函数对检测数据进行描述性统计分析。

为简便、直观地寻找烟叶原料对卷烟主流烟气七项有害成分的影响规律, 本研究选取产地、烤房、品种、土壤、烟叶部位作为影响因素对各样品中 7 项烟气有害成分释放量进行方差分析。

从表 1 可以看出各因素不同水平的数据是非平衡数据, 即每个水平单元的样本数量是不同的。在实际情况中, 大多数的实验都含有非平衡数据, 这些非平衡数据的出现有各种原因^[21]。国外相关文献^[22-27]表明, 针对非平衡数据进行多因素方差分析可采用广义线性模型 (General Linear Model) 进行方差分析功能实现。在 20 世纪 70 年代广义线性模型 (GLM) 可以用于平衡数据和非平衡数据的方差分析, 是应用领域更广的一项技术, 它通过改变设计矩阵 X 和误差的协方差矩阵的结构以及分析设计矩阵 X 的变量性质, 将 GLM 简化成适用于回归分析、方差和协方差分析、多水平

模型等具体的统计模型。本文的研究数据不平衡，需采用广义线性模型 (GLM)，才能够满足本项目不平衡数据的分析，因此统计中采用 R 语言 stat 程序包中的 aov 模块函数结合 drop1 模块函数构建形成的“summary.aov.t3”函数进行计算和后续的分析。

2 结果与分析

对每个样品进行烟气有害成分的检测分析，然后采用 R 语言应用程序对检测数据进行描述性统计分析和方差分析，然后对具有显著影响的单个因素，利用所估计的平方和进行因子贡献率分析。

2.1 初烤烟叶 7 项烟气有害成分的描述性统计分析

本研究采用描述性统计分析了解了所选取的 237 个初烤烟叶样品制成的无滤嘴卷烟的 7 项烟气有害成分单位重量释放量的整体分布情况，且对初烤烟叶原料的 7 项烟气有害成分释放量的离散度进行分析，具体结果见表 2。CO、苯酚和巴豆醛的离散度小于 0.2，说明不同初烤烟叶样本这 3 种烟气成分的释放量差异较小；HCN、NNK、NH₃ 和 BaP 等 4 种烟气成分的离散度较大 (>0.2)，且 NH₃ 和 NNK 的离散度分别达到 34.76%、72.99%，说明不同初烤烟叶烟气中 HCN、NNK、NH₃ 和 BaP 释放量差异较大。

表 2 初烤烟叶 7 项烟气有害成分单位重量释放量基本统计表

指标	CO/(mg/g)	NH ₃ /(μg/g)	HCN/(μg/g)	苯酚/(μg/g)	巴豆醛/(μg/g)	BaP/(ng/g)	NNK/(ng/g)
平均值	14.09	17.35	159.93	76.99	34.80	24.80	6.85
中位数	13.59	16.15	154.43	76.44	34.73	23.23	5.56
最小值	9.05	7.86	81.57	43.69	18.37	13.93	1.22
最大值	21.40	45.25	300.07	114.55	52.02	45.62	31.49
极差	12.35	37.39	218.50	70.86	33.65	31.68	30.27
标准差	2.26	6.03	39.20	13.07	6.42	6.08	5.00
变异系数	16.04%	34.76%	24.51%	16.98%	18.45%	24.52%	72.99%
样本数	237	237	237	237	237	237	237

2.2 初烤烟叶 7 项烟气有害成分的方差分析

本研究选取产地、烤房、品种、土壤、烟叶部位作为影响因素对各样品中 7 项烟气有害成分释放量进行方差分析，确定重要影响因素。

2.2.1 初烤烟叶烟气中 CO 的方差分析

从表 3 方差分析结果表明：在不同因素的变异来源中，产地因素的显著性检验 P 值为 6.79×10^{-7} ，达到 α 小于 0.001 的显著性水平，说明不同产地的烟

叶烟气中 CO 含量之间存在着极显著的差异；品种因素的显著性检验 P 值为 0.00518，达到 α 小于 0.01 的显著水平，说明不同品种的烟叶烟气中 CO 含量之间存在着极显著的差异；烟叶部位因素的显著性检验 P 值为 0.00030，达到 α 小于 0.001 的显著性水平，说明不同部位的烟叶烟气中 CO 含量之间存在着极显著的差异。从而证明了烟气中 CO 含量在不同产地、不同品种、不同烟叶部位的变化是十分明显的。

表 3 初烤烟叶烟气中 CO 的方差分析表

指标	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性水平
CO	产地	46	415.4	9.031	2.810	6.79×10^{-7}	***
CO	烟叶部位	2	55.8	27.895	8.489	0.00030	***
CO	品种	6	63.2	10.525	3.203	0.00518	**
CO	土壤	1	0.005	0.005	0.002	0.96901	
CO	烤房	1	0.050	0.050	0.015	0.90236	
CO	误差	180	591.5	3.286			

注：*** 表示达到 $\alpha \leq 0.001$ 的极显著水平；** 表示达到 $\alpha \leq 0.01$ 的极显著水平；* 表示达到 $\alpha \leq 0.05$ 的显著水平，下同。

2.2.2 初烤烟叶烟气中 NH₃ 的方差分析

从表4方差分析结果表明:在不同因素的变异来源中,产地因素的显著性检验P值为 7.73×10^{-8} ,达到 α 小于0.001的显著性水平,说明不同产地的烟叶烟气中NH₃含量之间存在着极显著的差异;烟叶

部位因素的显著性检验P值 $<2.0 \times 10^{-16}$,达到 α 小于0.001的显著性水平,说明不同部位的烟叶烟气中NH₃含量之间存在着极显著的差异。从而证明了烟气中NH₃含量在不同产地和不同烟叶部位的变化是十分明显的。

表4 初烤烟叶烟气中 NH₃ 的方差分析表

指标	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性水平
NH ₃	产地	46	2392.4	52.0	3.054	7.73×10^{-8}	***
NH ₃	烟叶部位	2	2314.0	1157.0	66.458	$<2.0 \times 10^{-16}$	***
NH ₃	品种	6	223.5	37.2	2.139	0.0510	
NH ₃	土壤	1	49.4	49.4	2.838	0.0938	
NH ₃	烤房	1	9.30	9.30	0.534	0.4661	
NH ₃	误差	180	3133.7	17.4			

2.2.3 初烤烟叶烟气中 HCN 的方差分析

从表5方差分析结果表明:在不同因素的变异来源中,产地因素的显著性检验P值为 3.82×10^{-8} ,达到 α 小于0.001的显著性水平,说明不同产地的烟叶烟气中HCN含量之间存在着极显著的差异;品种因素的显著性检验P值为0.000339,达到 α 小于0.001的显著性水平,说明不同品种的烟叶烟气中HCN含

量之间存在着极显著的差异;烟叶部位因素的显著性检验P值为 2.70×10^{-6} ,达到 α 小于0.001的显著性水平,说明不同的烟叶部位对烟气中HCN含量之间存在着极显著的差异。从而证明了烟气中HCN含量在不同产地、不同烟叶部位以及不同品种的变化是十分明显的。

表5 初烤烟叶烟气中 HCN 的方差分析表

指标	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性水平
HCN	产地	46	131061	2849	3.133	3.82×10^{-8}	***
HCN	烟叶部位	2	25619	12809	13.779	2.70×10^{-6}	***
HCN	品种	6	24664	4111	4.422	0.000339	***
HCN	土壤	1	110	110	0.118	0.7316	
HCN	烤房	1	1666	1666	1.792	0.1823	
HCN	误差	180	167338	930			

2.2.4 初烤烟叶烟气中苯酚的方差分析

从表6方差分析结果表明:在不同因素的变异来源中,产地因素的显著性检验P值为0.00156,达到 α 小于0.001的显著性水平,说明不同产地的烟叶烟气中苯酚含量之间存在着极显著的差异;品种因素的显著性检验P值为 5.32×10^{-5} ,达到 α 小于0.001的

显著性水平,说明不同品种的烟叶烟气中苯酚含量之间存在着极显著的差异;烟叶部位因素的显著性检验P值为 6.16×10^{-11} ,达到 α 小于0.001的显著性水平,说明不同部位的烟叶烟气中苯酚含量之间存在着极显著的差异。从而证明了烟气中苯酚含量在不同产地、不同品种、不同烟叶部位的变化是十分明显的。

表6 初烤烟叶烟气中苯酚的方差分析表

指标	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性水平
苯酚	产地	46	9580	208.3	1.910	0.00156	**
苯酚	烟叶部位	2	5988.2	2994.1	26.866	6.16×10^{-11}	***
苯酚	品种	6	3505	584.2	5.242	5.32×10^{-5}	***
苯酚	土壤	1	8.8	8.8	0.079	0.7793	
苯酚	烤房	1	3.2	3.2	0.029	0.8656	
苯酚	误差	180	20060	111.4			

2.2.5 初烤烟叶烟气中巴豆醛的方差分析

从表7方差分析结果表明：在不同因素的变异来源中，产地因素的显著性检验P值为 2.00×10^{-9} ，达到 α 小于0.001的显著性水平，说明不同产地的烟叶烟气中巴豆醛含量之间存在着极显著的差异；品种因素的显著性检验P值为0.0186，达到 α 小于0.05

的显著性水平，说明不同品种的烟叶烟气中巴豆醛含量之间存在着显著差异；烟叶部位因素的显著性检验P值为 1.21×10^{-6} ，达到 α 小于0.001的显著性水平，说明不同部位的烟叶烟气中巴豆醛含量之间存在着极显著的差异。从而证明了烟气中巴豆醛含量在不同产地、不同烟叶部位以及不同品种的变化是十分明显的。

表7 初烤烟叶烟气中巴豆醛的方差分析表

指标	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性水平
巴豆醛	产地	46	3487	75.8	3.465	2.00×10^{-9}	***
巴豆醛	烟叶部位	2	657.8	328.9	14.710	1.21×10^{-6}	***
巴豆醛	品种	6	351	58.5	2.618	0.0186	*
巴豆醛	土壤	1	1.5	1.5	0.069	0.7931	
巴豆醛	烤房	1	41.4	41.4	1.854	0.1751	
巴豆醛	误差	180	4025	22.4			

2.2.6 初烤烟叶烟气中BaP的方差分析

从表8方差分析结果表明：在不同因素的变异来源中，产地因素的显著性检验P值为 9.55×10^{-5} ，达到 α 小于0.001的显著性水平，说明不同产地的烟叶烟气中BaP含量之间存在着极显著的差异；品种因素的显著性检验P值为0.0114，达到 α 小于0.05

的显著性水平，说明不同品种的烟叶烟气中BaP含量之前存在着显著的差异；烟叶部位因素的显著性检验P值为 2.49×10^{-7} ，达到 α 小于0.001的显著性水平，说明不同部位的烟叶烟气中BaP含量之间存在着极显著的差异。从而证明了烟气中BaP含量在不同产地、不同品种及不同烟叶部位的变化是十分明显的。

表8 初烤烟叶烟气中 BaP 的方差分析表

指标	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性水平
BaP	产地	46	2536	55.1	2.246	9.55×10^{-5}	***
BaP	烟叶部位	2	831.2	415.6	16.564	2.49×10^{-7}	***
BaP	品种	6	428	71.3	2.843	0.0114	*
BaP	土壤	1	36.0	36.0	1.436	0.2324	
BaP	烤房	1	0.3	0.3	0.011	0.9179	
BaP	误差	180	4516	25.1			

2.2.7 初烤烟叶烟气中 NNK 的方差分析

从表 9 方差分析结果表明：在不同因素的变异来源中，产地因素的显著性检验 P 值为 5.13×10^{-5} ，达到 α 小于 0.001 的显著性水平，说明不同产地的烟叶烟气中 NNK 含量之间存在着极显著的差异。

2.3 初烤烟叶 7 项烟气有害成分释放量的方差分析汇总

从表 10 初烤烟叶 7 项烟气有害成分释放量的方差分析汇总表可以看出：对 7 项烟气有害成分释放量有显著性影响的重要因素是烟叶部位、产地、品种三个因素，产地在 7 项烟气有害成分均表现极显著差异，烟叶部位在 6 项烟气有害成分表现极显著差异；品种在 5 项烟气有害成分表现显著差异。而土壤和烤房对 7 项烟气有害成分释放量影响不显著。

表9 初烤烟叶烟气中 NNK 的方差分析表

指标	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性水平
NNK	产地	46	2051	44.58	2.318	5.13×10^{-5}	***
NNK	烟叶部位	2	59.20	29.60	1.506	0.225	
NNK	品种	6	132.84	22.14	1.126	0.349	
NNK	土壤	1	6.22	6.22	0.317	0.574	
NNK	烤房	1	1.24	1.24	0.063	0.802	
NNK	误差	180	3538.8	19.66			

表10 初烤烟叶 7 项烟气有害成分释放量的方差分析 5 因素显著性汇总表

变异来源	CO	NH ₃	HCN	苯酚	巴豆醛	BaP	NNK
产地	***	***	***	**	***	***	***
烟叶部位	***	***	***	***	***	***	***
品种	**		***	***	*	*	
土壤							
烤房							

2.4 影响因素贡献率分析

由于因素的偏差平方和中除了因素的效应外，还包含误差，将误差影响扣除后则为因素的纯平方和，将因素的纯平方和与总偏差平方之比称为因素的贡献率。根据公式 (1-3) 计算各因素的贡献率，依据贡献率可衡量各因素对各试验指标总波动所作贡献大小^[28-29]。

因素贡献率 = 因素纯平方和 / 总偏差平方和 * 100% 公式 (1)

因素纯平方和 = 因素平方和 - 因素自由度 * 误差均方 公式 (2)

总偏差平方和 = 各因素平方和 + 误差平方和

公式 (3)

本文为了方便比较产地、烟叶部位和品种三个因素对初烤烟叶群体 7 项烟气有害成分释放量的影响效应，将计算得出的三个因素贡献率又进行转化，将三者的贡献率总和转化为 100% 后再进行比较，具体结果见表 11。结果表明：产地在 7 项烟气有害成分的平均贡献率为 64.00%；烟叶部位在 6 项烟气有害成分的平均贡献率为 26.51%；品种在 5 项烟气有害成分的平均贡献率为 9.49%。

表 11 初烤烟叶 7 项烟气有害成分释放量的 3 个主要影响因素贡献率分析

指标	总贡献率 /%	产地 /%	烟叶部位 /%	品种 /%
CO	100.00	74.03	13.7	12.18
NH ₃	100.00	41.12	58.88	
HCN	100.00	67.33	18.12	14.55
苯酚	100.00	34.12	44.15	21.72
巴豆醛	100.00	74.75	18.66	6.59
BaP	100.00	56.62	32.01	11.37
NNK	100.00	100.00		
平均贡献率		64.00	26.51	9.49

3 讨论

从前人的研究中可以看出，关于卷烟辅助材料参数对烟气有害成分的影响研究较多^[16-20]，而关于烟叶原料对于主流烟气有害成分的影响研究则多是关于单一有害成分的研究，或是研究一个或两个因素对主流烟气 7 种有害成分的影响^[5-15]。陈敏等^[5]选取 2007 年来自国内 5 个烟叶主产区的烤烟上中下部烟叶共 15 个，研究了烟叶部位、产地与卷烟主流烟气 7 种有害成分释放量的关系。彭斌等^[6]选取云南玉溪、河南许昌的上中下部烟叶共 6 个，研究了烟叶部位对卷烟主流烟气 7 种有害成分释放量的影响。他们的研究所选取的样本均较少，且是对具体部位、具体产地对烟叶其主流烟气中 7 种有害成分的影响规律进行研究，本文则是选取 237 个烟叶样本，系统研究烟叶原料的产地、部位、品种、烤房、土壤这几个因素对 7 项烟气有害成分释放量的影响规律及影响程度，研究结果表明：产地、烟叶部位、品种是对 7 项烟气有害

成分释放量有显著性影响的重要因素，产地在 7 项烟气有害成分上均表现极显著差异，烟叶部位在 6 项指标上表现极显著差异，品种在 5 项指标上表现为显著差异。烟气中各有害成分释放量与烟叶化学成分之间存在着密切关系^[30-31]，其原因可能是由于不同气候条件、地理位置的产地生产的烟叶、不同部位的烟叶及不同品种的烟叶其组织结构和化学成分差异较大，进而对烟气有害成分的释放量产生显著性影响。

4 结论

对于本研究所选取的 237 个初烤烟叶样品来说，对其 7 项烟气有害成分释放量指标有显著性影响的重要因素是产地、烟叶部位、品种，其中产地为关键因素，在 7 项烟气有害成分上均表现极显著差异，平均贡献率为 64.00%；烟叶部位在 6 项烟气有害成分上表现极显著差异，平均贡献率为 26.51%；品种在 5 项烟气有害成分上表现显著差异，平均贡献率为 9.49%；而烤房、土壤对 7 项烟气有害成分释放量影响不显著。

参考文献

- [1] Hoffmann D, Hecht S S. Advances in tobacco carcinogenesis[M]// I Cooper C S, Grover P L. Chemical Carcinogenesis and Mutagenesis, Springer-Verlag, London, UK, 1990:63-102.
- [2] Hoffmann D, Hoffmann I, El-Bayoumy K. The less harmful cigarette: A controversial issue. A tribute to Ernst L. Wynder[J]. Chem Res Toxicol, 2001, 14: 767-790.
- [3] Rodgman A, Green C R. Toxic chemicals in cigarette mainstream smoke-Hazard and hoopla[J]. Beitr Tabakfor Int, 2003, 20(8):481-545.
- [4] 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.
- [5] 陈敏, 郭吉兆, 郑赛晶, 等. 烟叶部位、产地与卷烟主流烟气7种有害成分释放量关系研究[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(5): 16-22.
- [6] 彭斌, 赵乐, 孙学辉, 等. 烟叶部位对卷烟主流烟气7种有害成分释放量的影响[J]. 烟草科技, 2012(11):42-44.
- [7] 史宏志, Bushd L P, 黄元炯, 等. 我国烟草及其制品中烟草特有亚硝胺含量及与前体物的关系[J]. 中国烟草学报, 2002, 8(1):14-19.
- [8] Harrington H M, Alm D M. Interaction for heat and salt shock in cultured tobacco cells [J]. Plant Physiol, 1988: 618-625.
- [9] Hasegawa P M, Bessan R A, Handa A K. Growth characteristics of sodium chloride selected and nonselected cells of *Nicotiana tobacum* cv [J]. Plant Cell Physiol, 1980, 21: 1347-1356.
- [10] Fredenthal R I, Jones P W. Carcinogenesis[M]. New York: Raven Press, 1976:225.
- [11] Schepartz A I, Ellington J J, Schlotzhauer W S. Destruction of precursors of polynuclear aromatic hydrocarbons in tobacco by treatment with ozone [J]. Tobacco science, 1980, 24 :55-58.
- [12] 胡立中, 童红武, 王程辉, 等. 烟草含氮化合物对卷烟主流烟气氰化氢释放量的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(14): 8597-8599, 8681.
- [13] 吴清辉. 不同配方组分对卷烟主流烟气苯酚释放量的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(21):13073-13074, 13084.
- [14] Guan J, Barrett K, Hamm J. Correlations between tobacco blend, firecone temperatures, and Hoffmann deliveries[C]. 61st Tob Sci Res Conf, 2007: abstr. 55.
- [15] Winter D, Case P D, Coleman M, et al. The effect of blend type on mainstream and sidestream Hoffmann analyte machine yields [C]. CORESTA Meeting, Smoke Science / Product Technology Groups, Jeju, 2007: SSPT 23.
- [16] 李劲松. 卷烟纸对烟气和烟气组分的影响[J]. 黑龙江造纸, 2006, 34(1):35-36.
- [17] 侯轶, 刘明友, 徐程程. 卷烟纸中 $Mg(OH)_2-CaCO_3$ 加填及其对卷烟烟气的影响[J]. 中国造纸, 2007, 26(7):8-12.
- [18] 谢兰英, 刘斌, 黄富, 等. 电气石复合材料滤嘴棒成形纸降低卷烟烟气有害成分研究[J]. 中华纸业, 2009, 30(10).
- [19] 韩敏, 戴云辉, 庾苏行, 等. 醋纤和改性丙纤滤嘴过滤卷烟烟气有害成分效果比较[J]. 烟草科技, 2010(3):8-10.
- [20] 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.
- [21] Montgomery D C. 实验设计与分析[M]. 汪仁官, 陈荣昭, 译. 北京: 中国统计出版社. 1998.
- [22] John F. Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models [M]. 2nd ed. Thousand Oaks: Sage, 2008.
- [23] Herr D G. On the History of ANOVA in Unbalanced, Factorial Designs: The First 30 Years [J]. The American Statistician, 1986.40(4):265-270.
- [24] Stewart D W, Naufel J V. Analysis of variance for unbalanced data[C]. AMA Winter Educators Conference: Marketing Theory and Practice, 1995.6.337-343.
- [25] Shaw R G, Thomas M. ANOVA for Unbalanced Data: An Overview [J]. Ecology, 1993, 74(6):1638-1645.
- [26] Øyvind L. ANOVA for unbalanced data: Use Type II instead of Type III sums of squares [J]. Statistics and Computing, 2003.13: 163-167.
- [27] Speed F M, Hocking R R, Hackney O P. Methods of Analysis of Linear Models with Unbalanced Data[J]. The American Statistical Association, 1978.73(361):105-112.
- [28] 任露泉. 试验优化设计与分析 (第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [29] 茆诗松, 周纪芄, 陈颖. 试验设计[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [30] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [31] 闫克玉. 卷烟烟气化学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2002.