

烤烟主流烟气内源有害成分与烟叶化学成分相关性*

耿召良¹ 张 婕¹ 葛永辉¹ 向章敏¹ 蔡 凯¹ 朱显灵² 李继新^{3**} 冯勇刚¹

(¹贵州省烟草科学研究院, 贵阳 550081; ²中国科学技术大学烟草与健康研究中心, 合肥 230051; ³贵州省烟草公司, 贵阳 550004)

摘 要 研究了不同生态产区烟叶主要化学成分与主流烟气内源有害成分的关联性. 结果表明: 初烤烟叶内源有害成分和危害性指数(H 值)与烟叶部位具有较好的关联性. 4-甲基亚硝基-1-(3-吡啶基)-1-丁酮(NNK)、苯并[a]芘、氢氰酸(HCN)、氨和苯酚的释放量表现为上部叶>中部叶, 巴豆醛释放量表现为中部叶>上部叶, H 值表现为上部叶>中部叶. 不同内源有害成分与烟叶含碳、含氮化学成分的相关性复杂, 同一类型烟叶化学成分对不同内源有害成分呈现出不同的相关关系. 卷烟危害性指数与烟叶中烟碱、蛋白质、总氮、主要多酚和有机酸含量呈显著正相关, 而与钾离子、总糖、还原糖、淀粉等含碳类物质含量呈显著负相关. 适当降低烟叶含氮化合物含量、增加烟叶钾含量可能会降低烟叶的危害性指数.

关键词 主流烟气; 内源有害成分; 化学成分

文章编号 1001-9332(2015)05-1447-07 **中图分类号** S572 **文献标识码** A

Correlation between endogenous harmful components in mainstream cigarette smoke and chemical constituents in tobacco leaves. GENG Zhao-liang¹, ZHANG Jie¹, GE Yong-hui¹, XIANG Zhang-min¹, CAI Kai¹, ZHU Xian-ling², LI Ji-xin³, FENG Yong-gang¹ (¹Guizhou Academy of Tobacco Science Research, Guiyang 550081, China; ²Research Institute of Tobacco and Health, University of Science and Technology of China, Hefei 230051, China; ³Guizhou Provincial Tobacco Corporation, Guiyang 550004, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(5): 1447-1453.

Abstract: Correlation analysis between main chemical constituents of tobacco leaves and endogenous harmful components in mainstream cigarette smoke was conducted. Leaf stalk positions exhibited a high relation with endogenous harmful components and hazard index (H). Upper stalk position leaves had greater release of 1-butanone, 4-(methylnitrosoamino)-1-(3-pyridinyl)- (NNK), B[a]P, HCN, NH_3 and phenol in mainstream cigarette smoke, and a higher hazard index than middle position leaves except for crotonaldehyde, which had greater release from middle position leaves. Different endogenous harmful components in mainstream cigarette smoke presented complicated correlation with main chemical constituents in tobacco. The same type of leaf chemical constituents presented different correlations with various endogenous harmful components in mainstream cigarette smoke. Cigarette hazard index showed significantly positive correlations with contents of nicotine, protein, total nitrogen, major polyphenols and organic acids, while significantly negative correlation with potassium and carbonaceous substances, such as total sugars, reducing sugars and starch. The results suggested that properly increasing potassium content and decreasing nitrogenous constituents in cured tobacco leaf may reduce the cigarette hazard index.

Key words: mainstream cigarette smoke; endogenous harmful component; chemical constituent.

近年来,随着人们对吸烟与健康问题的普遍关注,卷烟危害性评价成为烟草行业的研究热点之一,这极大地促进了人们对吸烟与健康、烟气和烟草化

学成分分析等方面的深入研究^[1].目前,已报道的卷烟烟气有害成分超过 100 种,但其中相当多的化合物存在争议.1997 年, Hoffmann 等^[2]提出了卷烟烟气中一系列代表性有害成分,即 Hoffmann 名单,其中包括多环芳烃类、一氧化碳(CO)、苯酚、氮氧化物、烯烃类物质等.2009 年,谢剑平等^[3]基于烟气毒理学研究结果,发现卷烟主流烟气中的 CO、苯并

* 中国科学院 2011 年度“西部之光”人才培养计划项目和中国烟草总公司贵州省公司重点科技计划项目(2009-09,2013-07)资助.

** 通讯作者. E-mail: jixinligz@sina.com

2014-08-07 收稿,2015-03-05 接受.

[a] 苊(B[a]P)、巴豆醛、苯酚、氢氰酸(HCN)、氨(NH₃)、4-甲基亚硝基-1-(3-吡啶基)-1-丁酮(NNK)等7种物质可以作为表征卷烟危害性的代表性成分,将卷烟危害性指数(hazard index, *H* 值)与烟草有害性联系起来.2012年,美国食品和药品管理部门(FDA)公布的HPHCs(harmful and potentially harmful constituents)名单中涵盖烟草及烟气中93种有害及潜在有害化学成分^[4],其中包含我国提出的7种代表性烟气有害成分.

卷烟烟气中的内源有害成分除少部分是通过烟丝直接转移以外,大部分是烟叶在燃烧过程中通过热裂解产生的.烟叶内含的化学物质,尤其是种类繁多的次生代谢物质,如各种有机酸、生物碱、多酚和甾体类物质等,是影响烟叶品质的重要构成因素^[5-6].目前,烟草工业方面的减害研究涉及多种烟草或烟气有害成分,主要集中在卷烟设计、叶组配方、加工措施和辅助材料等方面^[7-9],其研究成果在降低卷烟有害成分方面取得了积极成效.烟草农业研究主要集中在不同农业措施对烟叶化学成分、香气成分的调控及生理生化等方面^[10-12],而减害研究相对较少,主要为通过品种选择、栽培措施和烘烤等手段降低烟草特有亚硝胺(tobacco specific nitrosamines, TSNA_s)等研究.近年来,也有关于烟叶部位、产地对烤烟主流烟气有害成分的影响研究^[13-14],但利用田间初烤烟叶大样本系统分析烟气主要有害成分释放特点及其与烟叶化学成分关联性的研究未见报道.为此,本文对生产初烤烟叶不同部位内含化学成分与烟气内源有害成分释放量和危害性指数的关联性进行研究,旨在为优质烟叶生产提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

2010年在我国西南烟叶主产区的5个主生产区(县)进行烟叶样品取样,每地区选择5个初烤烟叶样品,每样品均选取中部(C3F)和上部(B2F)2个等级,参试烤烟品种为K326、云烟87和云烟85,所有样本均取自当地生产大田并经散叶烘烤.每样品取样5 kg,一部分初烤烟叶于50℃干燥2 h,粉碎并过40~60目筛,烤烟样品粉末用于不同项目的检测分析.另一部分初烤烟叶用于烟气有害成分检测.

烟气分析基准卷烟辅助材料设计参数:卷烟纸透气度60 CU,卷烟纸克质量为28 g·m⁻²,无滤嘴通风,滤棒吸阻为3800 Pa,嘴棒圆周长为24.2 mm,烟支长度为84 mm,其中烟丝段长60 mm,滤嘴长度为24 mm.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 烟叶化学成分检测 采用气相色谱-质谱选择离子监测法(GC/MS-SIM)定量分析烟叶中有机酸:草酸、丙二酸、马来酸、丁二酸、苹果酸、柠檬酸等6种多元酸,以及乙酰丙烯酸、肉豆蔻酸、棕榈酸、亚油酸和亚麻酸等5种高级脂肪酸^[15];采用气相色谱-氮发光检测器法(GC-NCD)定量分析烟叶中的8种生物碱类物质:尼古丁、去甲基烟碱、假木贼碱、新烟草碱、二烯烟碱、麦斯明、2,3-联吡啶和可替宁^[16];采用气相色谱-质谱联用法(GC-MS)分析烟叶中4种甾醇类物质:胆甾醇、菜油甾醇、豆甾醇、β-谷甾醇^[17];采用气相色谱-质谱法(GC-MS)定量分析烟叶中4种可溶性糖:果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖^[18];采用超高效液相色谱(UPLC)法定量分析烟叶中的茄尼醇^[19];采用YC/T 202—2006^[20]的方法分析烟叶中多酚类成分,即绿原酸、茛菪亭、芸香苷、新绿原酸、4-*o*-咖啡奎尼酸、茨菲醇基芸香苷的含量;依据YC/T 159—2002、YC/T 161—2002、YC/T 162—2002、YC/T 166—2003、YC/T 217—2007、YC/T 216—2007^[20]测定烟叶中糖、总氮、蛋白质、淀粉、钾、氯等常规化学成分.

1.2.2 主流烟气有害成分检测 采用UPLC-MS/MS方法检测烤烟主流烟气中TSNA_s(NNK)^[21];采用UPLC方法检测烤烟主流烟气中的酚类物质(苯酚)^[22];依据GB/T 23356—2009、YC/T 253—2008、GB/T 21130—2007、YC/T 254—2008和YC/T 377—2010^[20]进行烤烟主流烟气中CO、HCN、苯并[a]苊、巴豆醛和NH₃释放量的检测.

1.3 数据处理

单料烟危害性评价指数(*H*)的计算公式:

$$H=(A/14.2+B/5.5+C/10.9+D/18.6+E/17.4+F/8.1+G/146.3)\times 10/7$$

式中:*A*为CO放量(mg·支⁻¹);*B*为NNK释放量(ng·支⁻¹);*C*为苯并[a]苊释放量(ng·支⁻¹);*D*为巴豆醛释放量(μg·支⁻¹);*E*为苯酚释放量(μg·支⁻¹);*F*为NH₃释放量(μg·支⁻¹);*G*为HCN释放量(μg·支⁻¹).

采用Excel 2003软件对数据进行统计分析和作图,采用SPSS 10.0软件进行相关性分析(α=0.05).

2 结果与分析

2.1 烟叶不同部位主流烟气内源有害成分及危害性指数

由图1可知,主流烟气一氧化碳(CO)释放量与

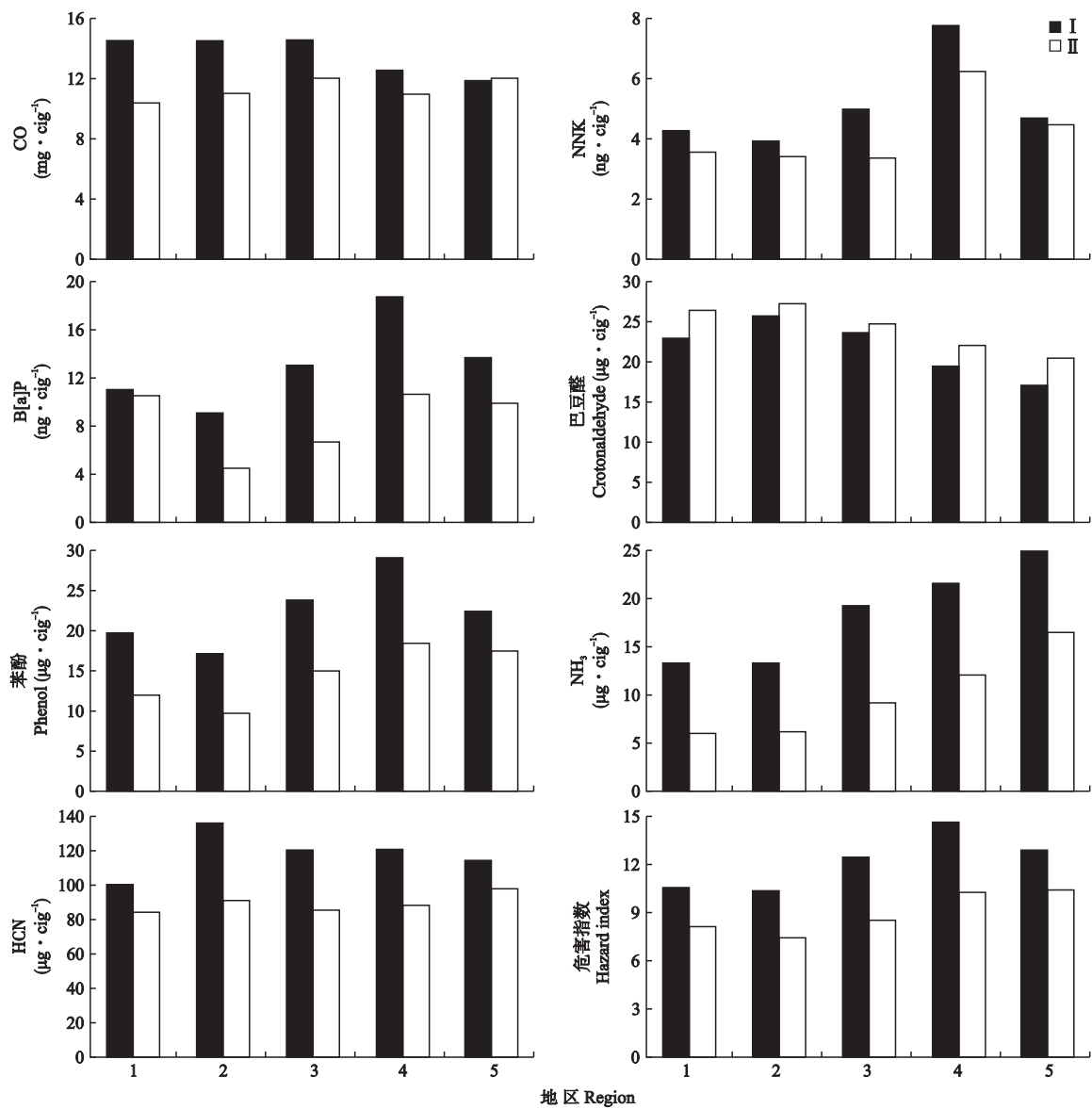


图1 不同部位烤烟主流烟气内源有害成分释放量和卷烟危害性指数
Fig.1 Endogenous harmful components and hazard index (*H*) in mainstream cigarette smoke at cured tobacco stalk positions.
I : 上部叶 Upper leaf; II : 中部叶 Middle leaf.

烟叶部位的关联性不强.地区5样品主流烟气CO释放量在中部烟叶稍大于上部烟叶,地区1、2、3和4的上部烟叶主流烟气CO释放量均大于中部烟叶.

烟叶部位与主流烟气特有亚硝胺(NNK)释放量有明显的关联性,烟叶部位对不同产地烟叶主流烟气NNK释放量的影响相同:上部叶>中部叶.烟草中TSNAs是由烟草生物碱类(主要是烟碱、去甲基烟碱、假木贼碱和新烟草碱)与亚硝胺复合而成,生物碱与亚硝化作用剂反应时,叔胺烟碱C-N键断裂,仲胺降烟碱、假木贼碱和新烟草碱N-H被N-N=O取代,即形成TSNAs^[23].有研究表明,烤烟上部烟叶的生物碱含量大于中部烟叶^[23],这与本研究结果

一致.

苯并[a]芘(B[a]P)在卷烟烟气中通常是高温裂解的产物.初烤烟叶部位与主流烟气B[a]P释放量有明显的关联性,烟叶部位对不同产地烟叶主流烟气B[a]P释放量的影响相同.尽管不同地区之间上、中部烟叶主流烟气B[a]P释放量差值不同,但均表现为:上部叶>中部叶.

5个地区的烤烟主流烟气中巴豆醛的释放量均表现为中部叶>上部叶.巴豆醛主要是由纤维素、糖、类脂和蜡质、甘油酯等热解形成,多在卷烟燃烧时产生^[24].有研究表明,烟叶中还原糖含量的规律表现为中部叶>上部叶^[25],石油醚提取物含量表现为中

部叶>上部叶>下部叶^[26],而脂质类物质是烟叶石油醚提取物的重要组分,这与本研究中烟气巴豆醛释放量的变化规律吻合.烤烟主流烟气苯酚的释放量均表现为上部叶>中部叶.有研究表明,烟气中的苯酚主要来源于烟草中的纤维素等物质,而上部叶全纤维素含量高于中部叶^[27],这与本研究结论类似.

5个地区的烤烟主流烟气中NH₃的释放量规律均为上部叶>中部叶.烟叶烟气中氨主要来源于烟叶中的含氮化合物,其形成与硝酸盐的还原反应及氨基酸如甘氨酸的热解密切相关.烤烟上部叶的总氮含量大于中部叶^[23],与本研究中烟气中氨的释放量规律一致.5个地区的烤烟主流烟气中HCN的释放量均表现为上部叶>中部叶.

卷烟烟气危害性指数(*H*)可用以表征卷烟主流烟气的危害性.5个地区的烤烟*H*值均表现为上部叶>中部叶,这可能与烤烟上部烟叶结构致密、含氮化合物含量高有关.

2.2 烤烟主流烟气内源有害成分与前体物的相关性

卷烟烟气中CO主要是由纤维素、淀粉、糖、羧酸和氨基酸等物质经燃烧或热裂解产生的^[28].烤烟主流烟气CO释放量与烟草生物碱和还原糖含量呈显著正相关,其中,与烟草生物碱总量、烟碱、麦斯明、假木贼碱的相关系数分别为0.293、0.330、0.389、0.358,与还原糖的相关系数为0.546.烤烟主流烟气CO释放量与有机酸、部分多酚、钾、蛋白质和总氮含量呈显著负相关,其中,与有机酸总量、草酸、苹果酸、棕榈酸的相关系数为-0.233、-0.426、-0.230、-0.455,与多酚中的4-*o*-咖啡酰奎尼酸、苡菲醇基芸香苷的相关系数为-0.204、-0.465,与钾、总氮和蛋白质含量的相关系数分别为-0.428、-0.339和-0.481.这表明有机酸、生物碱、钾、还原糖、蛋白质等物质是影响烤烟主流烟气CO释放量的主要成分,各种成分对烟气CO的释放可能有交叉影响.

关于TSNAs形成和积累与前体物的关系已有不少报道,但结果不一致.目前,普遍认为生物碱和亚硝胺是烟草TSNAs生物合成的直接前体^[23,29].5个地区的烤烟样品TSNAs检测结果表明,烤烟主流烟气NNK释放量与主要生物碱、有机酸、总氮、氯离子和部分多酚含量呈显著正相关,其中,与烟草生物碱中的烟碱、降烟碱、新烟草碱的相关系数为0.566、0.407、0.366,与有机酸总量、草酸、苹果酸、柠檬酸的相关系数为0.569、0.554、0.536、0.334,与多酚中的新绿原酸、苡菲醇基芸香苷的相关系数为

0.224、0.486、0.358,与总氮、氯的相关系数为0.685、0.748.烤烟主流烟气NNK释放量与总糖、还原糖、可溶性糖含量呈显著负相关,其中,与总糖、还原糖的相关系数为-0.456、-0.687,与果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖等可溶性糖的相关系数为-0.514、-0.657、-0.342、-0.424.

稠环芳烃(PAHs)是指分子中含有2个或2个以上苯环且以稠环形式相连的化合物,很多具有致肿瘤活性,其中,B[a]P被认为是最强的致癌物质.烟气中的B[a]P是由植物甾醇、氨基酸、纤维素、糖、蜡等组分通过热裂解和高温热合成反应形成,通常作为稠环芳烃的代表物被研究,但具体生成途径尚未完全了解.烤烟主流烟气B[a]P释放量与主要有机酸、甾醇、部分多酚和生物碱含量呈显著正相关,其中,与有机酸总量、苹果酸、柠檬酸的相关系数为0.342、0.309、0.500,与甾醇总量、胆甾醇、菜油甾醇、豆甾醇、羊毛甾醇的相关系数为0.443、0.513、0.426、0.702、0.283,与多酚中的苡菲醇基芸香苷的相关系数为0.251、0.484,与麦斯明的相关系数为0.318.烤烟主流烟气B[a]P释放量与葡萄糖和总糖含量呈显著负相关,其相关系数分别为-0.361和-0.280.这表明多酚类、有机酸类和糖类物质是影响烤烟主流烟气B[a]P释放量的主要成分.赵伟等^[30]和刘少民等^[31]分别采取将甾醇类物质添加至卷烟的方法考察了植物甾醇对卷烟主流烟气PAHs的影响,结果表明,甾醇添加量与B[a]P释放量呈显著正相关,这与本研究结果一致.

有研究表明,烟气中挥发性羰基化合物主要是烟草中的一些大分子化合物(多糖类、纤维素类、果胶和蛋白质类)在卷烟燃烧过程中经热裂解而生成^[24].烤烟主流烟气巴豆醛释放量与烟叶中甾醇、茄尼醇、总糖、淀粉、钾离子和可溶性糖含量呈显著正相关,其中,与甾醇总量、胆甾醇、菜油甾醇、豆甾醇、羊毛甾醇的相关系数为0.478、0.708、0.395、0.692、0.363,与茄尼醇、总糖、淀粉、钾离子的相关系数为0.416、0.252、0.399、0.257,与果糖、麦芽糖的相关系数为0.378、0.568.烤烟主流烟气巴豆醛释放量与烟叶中主要多酚、生物碱、有机酸、总氮、蛋白质和氯离子含量呈显著负相关,其中,与多酚总量、苡菲醇基芸香苷的相关系数为-0.486、-0.336、-0.587,与烟碱、降烟碱、麦斯明的相关系数为-0.566、-0.314、-0.470,与有机酸总量、苹果酸、柠檬酸、亚油酸的相关系数为-0.309、-0.299、-0.477、-0.381,与总氮、蛋白质和氯离子含量的相关系数为-0.252、

-0.583、-0.209。

酚类化合物是一种细胞原浆毒,其中苯酚的毒性最大。卷烟烟气中的苯酚主要来源于烟草中多酚类化合物、纤维素及木质素的热解等^[27]。然而,已有的机理研究主要采用模拟热解的方式,忽略了烟气组成的复杂性及协同性,不能全面地说明苯酚形成的机理。通过苯酚释放量与烟叶主要内含物质的相关分析,表明烤烟主流烟气苯酚释放量与烟叶中多酚、生物碱、有机酸、总氮、蛋白质和氯离子含量呈显著正相关,其中,与多酚总量、新绿原酸、茛菪亭、芸香苷、茨菲醇基芸香苷的相关系数为 0.219、0.220、0.380、0.335、0.352,与生物碱总量、烟碱、降烟碱、假木贼碱、新烟草碱的相关系数为 0.367、0.582、0.386、0.286、0.550,与有机酸总量、草酸、苹果酸、柠檬酸的相关系数为 0.349、0.416、0.297、0.295,与总氮、蛋白质、氯离子含量的相关系数为 0.636、0.606、0.209。烤烟主流烟气苯酚释放量与总糖、还原糖含量呈显著负相关,相关系数分别为-0.404、-0.566。这表明多酚类、生物碱类、有机酸类、糖类物质、蛋白质、氯离子等物质是影响烤烟主流烟气苯酚释放量的主要成分。

卷烟主流烟气中的 NH_3 主要来源于烟叶中的含氮化合物,包括硝酸盐、铵盐、亚硝酸盐、氨基酸、蛋白质、酰胺和含氮杂环化合物等^[32-33]。相关分析表明,烤烟主流烟气 NH_3 释放量与生物碱、有机酸、多酚、总氮、蛋白质和氯离子呈显著正相关,其中与生物碱总量、烟碱、降烟碱、假木贼碱、新烟草碱的相关系数为 0.304、0.572、0.333、0.228、0.543,与有机酸总量、草酸、苹果酸、柠檬酸的相关系数为 0.351、0.453、0.296、0.290,与多酚总量、茛菪亭、芸香苷、茨菲醇基芸香苷的相关系数为 0.214、0.422、0.373、0.312,与总氮、蛋白质和氯离子的相关系数为 0.623、0.642 和 0.364。烤烟主流烟气 NH_3 释放量与可溶性糖、总糖、还原糖、淀粉和钾离子含量呈显著负相关,其中与果糖、葡萄糖、麦芽糖的相关系数为-0.344、-0.437、-0.434,与总糖、还原糖、淀粉和钾离子的相关系数为-0.345、-0.307、-0.360、-0.292。这表明多酚、生物碱、有机酸、糖类物质、蛋白质、钾离子、氯离子等物质是影响烤烟主流烟气 NH_3 释放量的主要成分。

HCN 在烟气中含量较低,但却是烟气中最具纤毛毒性的物质。目前,关于卷烟烟气中 HCN 的形成机理研究多采用模拟热解的方式。有研究表明,卷烟烟气中 HCN 主要来自烟草中的蛋白质、氨基酸和硝

酸盐的转化,以及甘氨酸、脯氨酸和氨基二羧酸的热解^[34]。相关分析表明,烤烟主流烟气 HCN 释放量与部分多酚、主要生物碱、茄尼醇、总氮、蛋白质和氯离子含量呈显著正相关,其中与芸香苷、茨菲醇基芸香苷的相关系数为 0.206、0.244,与生物碱总量、烟碱、假木贼碱、新烟草碱的相关系数为 0.308、0.364、0.321、0.364,与茄尼醇、总氮、蛋白质和氯离子含量的相关系数为 0.384、0.290、0.326、0.237。烤烟主流烟气 HCN 释放量与钾离子含量呈显著负相关,相关系数为-0.212。这表明部分多酚、主要生物碱、茄尼醇、蛋白质、钾氯离子等物质是影响烤烟主流烟气 HCN 释放量的主要成分。

卷烟危害性指数是卷烟烟气有害成分释放量与危害性的综合反映。将卷烟危害性指数与烟叶主要内含物质进行相关分析,表明烤烟危害性指数与烟叶中的生物碱、主要有机酸、部分甾醇、多酚、总氮和蛋白质含量呈显著正相关,其中,与生物碱总量、烟碱、降烟碱、新烟草碱的相关系数为 0.224、0.459、0.357、0.396,与有机酸总量、草酸、苹果酸、柠檬酸的相关系数为 0.449、0.464、0.385、0.447,与谷甾醇的相关系数为 0.303,与多酚中茛菪亭、芸香苷的相关系数为 0.466、0.267,与总氮和蛋白质的相关系数为 0.613 和 0.608。烤烟主流烟气危害性指数与可溶性糖、总糖、还原糖、淀粉和钾离子含量呈显著负相关,与果糖、葡萄糖、麦芽糖的相关系数为-0.406、-0.574、-0.428,与总糖、还原糖、淀粉和钾离子的相关系数分别为-0.448、-0.540、-0.373 和-0.215。有研究表明,烤烟上部叶的含氮化合物、主要有机酸和多酚物质含量高于中部叶,而钾离子、还原糖含量则是中部叶高于上部叶^[23],可以推测化学成分组成及结构致密等是上部烟叶危害性指数高于中部叶的重要原因。

3 讨 论

通过对 5 个代表性烟叶产区初烤烟叶的取样分析,不同烟叶部位对烤烟单料烟主流烟气不同内源有害成分释放量影响不同。初烤烟叶主流烟气的内源有害成分释放量和卷烟危害性指数与烟叶部位有较好的关联性:初烤烟叶主流烟气中 CO 释放量和烟叶部位没有显著关系,巴豆醛释放量表现为中部叶>上部叶,NNK、苯并[a]芘、HCN、氨和苯酚的释放量均表现为上部叶>中部叶。上部初烤烟叶的危害性指数与中部烟叶相比,均处于较高水平。

烟叶内含的种类繁多的次生代谢物质是烟草烟

气有害成分的重要前体物,不同产地、部位烟叶组织结构和化学成分的差异会造成卷烟主流烟气不同内源有害成分释放量和卷烟危害性指数不同.烟叶中主要含碳和含氮化合物都是主流烟气内源有害成分的重要前体物,但不同内源有害成分与烟叶中主要含碳、含氮物质的相关性较复杂,同一类型烟叶化学成分对应不同的内源有害成分可呈现不同的正相关或负相关,显示了彼此间统一又矛盾的相关关系.作为卷烟烟气危害性综合反映的卷烟危害性指数,与烟叶中烟碱、蛋白质、总氮含量等含氮类物质以及主要多酚、有机酸含量呈正相关,而与钾离子和总糖、还原糖、淀粉等含碳类物质呈负相关.烤烟上部烟叶结构致密,含氮化合物、主要有机酸和多酚物质含量高,钾离子、还原糖含量偏低^[23],可能是卷烟主流烟气危害性指数上部烟叶高于中部烟叶的原因.这表明适当降低烟叶含氮化合物含量、增加烟叶钾含量可能会降低烟叶的危害性指数.

本研究数据来自多点取样分析,不同部位和地区烤烟样品主流烟气内源有害成分释放量情况是同一年度取样所得,不同的释放量可能受当地当年的气候条件、烟叶栽培及调制技术等因素影响.由于取样点的限制和样品本身可能带来的偏差,分析结果不能全面准确地反映当地烟叶主流烟气内源有害成分释放量的全貌,但该结果较全面系统地揭示了初烤烟叶内源有害成分释放量的特点及其与前体物的相关性.进一步探寻气候、土壤、栽培措施等条件对烟叶内含化学成分的影响对于解析烟叶主流烟气内源有害成分释放量机理具有重要的科学意义.

参考文献

- [1] Hoffmann D, Hoffmann I, El-Bayoumy K. The less harmful cigarette: A controversial issue. A tribute to Ernst L. Wynder. *Chemical Research in Toxicology*, 2001, **14**: 767–790
- [2] Hoffmann D, Hoffmann I. The Changing Cigarette: Chemical Studies and Bioassays. Risks Associated with Smoking Cigarettes with Low Machine-Measured Yields of Tar and Nicotine, NCI Smoking and Tobacco Control, Monograph 13. Bethesda: National Cancer Institute, 2001
- [3] Xie J-P (谢剑平), Liu H-M (刘惠民), Zhu M-X (朱茂祥), *et al.* Development of a novel hazard index of mainstream cigarette smoke and its application on risk evaluation of cigarette products. *Tobacco Science & Technology* (烟草科技), 2009(2): 5–15 (in Chinese)
- [4] Food and Drug Administration, Health and Human Services. Harmful and Potentially Harmful Constituents in Tobacco Products and Tobacco Smoke: Established List [EB/OL]. (2012-03-23) [2014-11-03]. <http://www.fda.gov/downloads/TobaccoProducts/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/UCM29798.pdf>
- [5] Xie J-P (谢剑平). Chemical Components of Tobacco and Tobacco Smoke. Beijing: Chemical Industry Press, 2010 (in Chinese)
- [6] Davis DL, Nielson MT. Trans. The Department of science and technology education of the State Tobacco Monopoly Bureau (国家烟草专卖局科技教育司). Tobacco: Production, Chemistry and Technology. Beijing: Chemical Industry Press, 2003 (in Chinese)
- [7] Peng B (彭 斌), Sun X-H (孙学辉), Shang P-P (尚平平), *et al.* Effects of material's parameters on deliveries of tar, nicotine, and CO in mainstream smoke of virginia type cigarettes. *Tobacco Science & Technology* (烟草科技), 2012(2): 61–65 (in Chinese)
- [8] Xie W (谢 卫), Huang C-Z (黄朝章), Su M-L (苏明亮), *et al.* Effects of material parameters on deliveries of seven harmful components in cigarette smoke. *Tobacco Science & Technology* (烟草科技), 2013(1): 31–38 (in Chinese)
- [9] Chen K-Y (陈昆燕), Feng G-L (冯广林), Li D-L (李东亮), *et al.* Effects of threshing and redrying processes on delivery of HCN and benzo[a]pyrene and crotonaldehyde in cigarette mainstream smoke. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)* (湖南农业大学学报: 自然科学版), 2014, **40**(2): 144–147 (in Chinese)
- [10] Yin P-D (尹鹏达), Zhu W-X (朱文旭), Zhao L-N (赵丽娜), *et al.* Effects of combined fertilization of N, P, and K on nicotine content of filling type flue-cured tobacco. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(5): 1189–1194 (in Chinese)
- [11] Zhang S-J (张生杰), Huang Y-J (黄元炯), Ren Q-C (任庆成), *et al.* Effects of nitrogen fertilization on leaf senescence, photosynthetic characteristics, yield, and quality of different flue-cured tobacco varieties. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(3): 668–674 (in Chinese)
- [12] Deng X-H (邓小华), Xie P-F (谢鹏飞), Peng X-H (彭新辉), *et al.* Effects of soil, climate, and their interaction on some neutral volatile aroma components in flue-cured tobacco leaves from high quality tobacco planting regions of Hunan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(8): 2063–2071 (in Chinese)
- [13] Wang T (王 涛), Bao F-W (鲍峰伟), Wang L-S (王刘胜), *et al.* The influence of growing areas and tobacco crop year on contents of seven harmful compounds released in cigarette mainstream smoke. *Hubei Agricultural Sciences* (湖北农业科学), 2014, **53**(6): 1330–1333 (in Chinese)
- [14] Huang C-Z (黄朝章), Cai G-H (蔡国华), Zhao Y-Q (赵艺强), *et al.* Correlation between hydrogen cyanide in mainstream cigarette smoke and routine chemical components in tobacco leaves. *Tobacco Science & Technology* (烟草科技), 2013(2): 62–64 (in Chinese)

- [15] Jin Y-M (金永明), Zhang M-F (张明福), Liu B-Z (刘百战). Analysis of polybasic and higher fatty acids in tobacco. *Tobacco Science & Technology* (烟草科技), 2002(4): 21–24 (in Chinese)
- [16] Cai K, Xiang ZM, Zhang J, *et al.* Determination of eight tobacco alkaloids in flue-cured tobacco samples by gas chromatography with nitrogen chemiluminescence detection (NCD). *Analytical Methods*, 2012, **4**: 2095–2100
- [17] Xiang Z-M (向章敏), Zhang J (张 婕), Cai K (蔡凯), *et al.* Simultaneous determination of phytosterol in tobacco by gas chromatography mass spectrometry with derivative. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory* (光谱实验室), 2011, **28**(5): 11–15 (in Chinese)
- [18] Cai K (蔡 凯), Xiang Z-M (向章敏), Zhang J (张婕), *et al.* Determination of water-soluble sugars in cured tobacco with gas chromatography. *Chinese Journal of Analysis Laboratory* (分析实验室), 2012, **31**(1): 91–94 (in Chinese)
- [19] Zhang J (张 婕), Wang Y-S (汪云松), Cai K (蔡凯), *et al.* Determination of solanesol content in tobacco leaves by using ultra-high pressure liquid chromatography. *Chinese Tobacco Science* (中国烟草科学), 2012, **33**(6): 80–84 (in Chinese)
- [20] National Technical Committee on Tobacco of Standardization Administration of China (全国烟草标准化技术委员会). YC/T 202–2006, YC/T 159–2002, YC/T 161–2002, YC/T 162–2002, YC/T 166–2003, YC/T 217–2007, YC/T 216–2007, GB/T 23356–2009, YC/T 253–2008, GB/T 21130–2007, YC/T 254–2008, YC/T 377–2010 [EB-OL]. (2012-03-23) [2004-11-03]. <http://cx.spssp.gov.cn/index.aspx?Token=%24Token%24&First=First> (in Chinese)
- [21] Zhu W-J (朱文静), Yang J (杨 俊), Liu B-Z (刘百战), *et al.* Rapid determination of 4 tobacco-specific nitrosamines in mainstream cigarette smoke by ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Instrumental Analysis* (分析测试学报), 2010, **29**(1): 26–30 (in Chinese)
- [22] Zhang J (张 婕), Zhou S-P (周淑平), Geng Z-L (耿召良), *et al.* An experimental study on rapid analysis of phenolic compounds in mainstream cigarette smoke by ultra performance liquid chromatography. *Chemical Engineer* (化学工程师), 2010, **183**(12): 29–31 (in Chinese)
- [23] Han F-G (韩富根). Tobacco Chemistry. 2nd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010 (in Chinese)
- [24] Seeman JJ, Dixon M. Acetaldehyde in mainstream tobacco: Formation and occurrence in smoke and bioavailability in the smoker. *Chemical Research in Toxicology*, 2002, **15**: 1332–1350
- [25] Chen J-H (陈江华), Liu J-L (刘建利), Long H-Y (龙怀玉). The distribution characteristics of nutrition elements and main chemical composition in China's tobacco leaves. *Acta Tabacaria Sinica* (中国烟草学报), 2004, **10**(5): 20–27 (in Chinese)
- [26] Yan K-Y (闫克玉), Yan H-Y (闫洪洋), Yan H-X (闫洪喜). Comparison and analysis on the content of petroleum ether extract in the flue-cured tobacco leaves in different production areas. *Journal of Henan Agricultural University* (河南农业大学学报), 2007, **41**(5): 498–501 (in Chinese)
- [27] Liu C-K (刘春奎), Cai J (蔡 佳), Yang J (杨靖), *et al.* Research on relationship between cell wall material of flue-cured tobacco leaf and tobacco quality. *Guangdong Agricultural Sciences* (广东农业科学), 2012(12): 33–35 (in Chinese)
- [28] Baker RR. A review of pyrolysis studies to unravel reaction steps in burning tobacco. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1987, **11**: 555–573
- [29] Burton HR, Bush LP, Djordjevic MV. Influence of temperature and humidity on accumulation of tobacco specific nitrosamines in stored burley tobacco. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1989, **37**: 1372–1377
- [30] Zhao W (赵 伟), Wang K-M (王昆淼), Liu C-B (刘春波), *et al.* Pyrolysis behavior of five sterols and its relationships with B[a]P delivery in mainstream cigarette smoke. *Tobacco Science & Technology* (烟草科技), 2013(9): 54–57 (in Chinese)
- [31] Liu S-M (刘少民), Ding B (丁 斌), Tong H-W (童红武), *et al.* Influence of phytosterols on PAHs in mainstream smoke. *Acta Tabacaria Sinica* (中国烟草学报), 2007, **13**(5): 10–16 (in Chinese)
- [32] Yan K-Y (闫克玉). Tobacco Chemistry. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2002 (in Chinese)
- [33] Qiu Y-C (邱玉春), Cai G-H (蔡国华), Wu Q-H (吴清辉), *et al.* Correlation of ammonia in mainstream cigarette smoke and main chemical composition of tobacco. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2014, **42**(3): 283–285 (in Chinese)
- [34] Johnson WR, Kan JC. Mechanism of hydrogen cyanide formation from the pyrolysis of amino acids and related compounds. *Journal of Organic Chemistry*, 1971, **36**: 189–192

作者简介 耿召良,男,1978年生,博士,副研究员。主要从事烟草化学研究。E-mail: zhaolianggeng1104@126.com

责任编辑 孙 菊