

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇

刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 在不同燃烧条件下, 对 6 种稻草和 4 种玉米秸进行了燃烧试验, 并测定了烟尘中正构脂肪醇的组成. 结果表明, 在稻草的明火烟尘中, 正构脂肪醇由 $C_{14} \sim C_{34}$ 组成. 其总含量 ($\sum$) 为 $1\,604.4 \sim 13\,889.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 低碳数和高碳数正构脂肪醇的含量比 (L/H) 为 $0.02 \sim 0.09$; C_{24}/C_{30} 值为 $3.3\% \sim 19.6\%$; C_{32}/C_{30} 值为 $8.4\% \sim 19.9\%$; $C_{30}/\sum$ 之比为 $53.9\% \sim 72.6\%$; CPI 值为 $8.7 \sim 21.5$; ACL 值为 $29.0 \sim 30.1$. 正构脂肪醇呈双峰式分布, 其主、次峰碳数分别是 C_{30} 和 C_{24} . 在稻草的闷烧烟尘中, 正构脂肪醇的单体组成与明火烟尘相同. 其 $\sum$ 值为 $1\,688.7 \sim 5\,168.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; L/H 值为 $0.08 \sim 0.14$; C_{24}/C_{30} 值为 $31.0\% \sim 70.5\%$; C_{32}/C_{30} 值为 $6.9\% \sim 17.6\%$; $C_{30}/\sum$ 之比为 $39.5\% \sim 57.8\%$; CPI 值为 $10.7 \sim 17.5$; ACL 值为 $27.2 \sim 28.5$. 其分布模式与明火烟尘极为相似. 在玉米秸秆的明火烟尘中, 正构脂肪醇由 $C_{12} \sim C_{34}$ 组成. 其 $\sum$ 值为 $852.3 \sim 2\,667.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; L/H 值为 $0.2 \sim 1.0$; C_{24}/C_{28} 之比为 $104.3\% \sim 293.3\%$; C_{32}/C_{28} 之比为 $42.2\% \sim 61.4\%$; $C_{28}/\sum$ 之比为 $7.3\% \sim 16.5\%$; CPI 值为 $5.6 \sim 9.7$; ACL 值为 $23.1 \sim 26.9$. 其分布模式以双峰式为主, 主峰碳数是 C_{30} 、 C_{24} 和 C_{22} . 在玉米秸秆的闷烧烟尘中, 正构脂肪醇的组成与明火烟尘相同. 其 $\sum$ 值为 $1\,493.0 \sim 8\,386.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; L/H 之比为 $0.2 \sim 0.3$; C_{24}/C_{28} 之比为 $53.6\% \sim 217.6\%$; C_{32}/C_{28} 之比为 $21.7\% \sim 75.9\%$; $C_{28}/\sum$ 之比为 $8.8\% \sim 27.3\%$; CPI 值为 $4.2 \sim 6.5$; ACL 值为 $26.3 \sim 27.2$. 其分布模式呈双峰型, 主峰碳数主要是 C_{30} , 次峰碳数主要是 C_{24} . 总之, 秸秆烟尘中正构脂肪醇的组成已发生了明显的变化. C_{24}/C_{30} 、 C_{32}/C_{30} 、 $C_{30}/\sum$ 等参数可用于区别稻草及其燃烧来源的正构脂肪醇; L/H 、 C_{24}/C_{28} 、 C_{32}/C_{28} 、 $C_{28}/\sum$ 等参数可用于区分玉米秸秆及其燃烧来源的正构脂肪醇; L/H 可用于区分上述两类秸秆及其燃烧来源的正构脂肪醇.

关键词: 水稻; 玉米; 秸秆; 燃烧; 烟尘; 正构脂肪醇

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0870-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.03.009

Chemical Compositions of *n*-Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion

LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, XU Hui

(School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Six genotypes of rice straw and four genotypes of maize straw were burned under different conditions, and the smoke was collected and *n*-alkanol in it was measured by GC-MS. Results showed that, in the smoke from rice straw flaming combustion, *n*-alkanol was composed of individual compounds from C_{14} to C_{34} , and total contents ($\sum$) changed in the range of $1\,604.4$ to $13\,889.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The ratio values of amount for *n*-alkanol with lower carbon number to that for one with higher carbon number (L/H) were in the range of 0.02 to 0.09 . The values for C_{24}/C_{30} , C_{32}/C_{30} , $C_{30}/\sum$, CPI, and ACL varied from 3.3% to 19.6% , 8.4% to 19.9% , 53.9% to 72.6% , 8.7 to 21.5 , and 29.0 to 30.1 , respectively. The abundance distribution for the compounds was bimodal with the maximal and the second peaks at C_{30} and C_{24} , respectively. In smoldering smoke of rice straw, individual *n*-alkanol from C_{14} to C_{34} were also analyzed, with $\sum$ values varying in the range of $1\,688.7$ to $5\,168.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The ratios for L/H , C_{24}/C_{30} , C_{32}/C_{30} , and $C_{30}/\sum$ ranged from 0.08 to 0.14 , 31.0% to 70.5% , 6.9% to 17.6% , 39.5% to 57.8% , respectively. In addition, the CPI and ACL values varied from 10.7 to 17.5 , and 27.2 to 28.5 , respectively. Moreover, the distribution pattern was similar to that in flaming smoke. In flaming smoke of maize straw, *n*-alkanol from C_{12} to C_{34} were identified, with $\sum$ values being in the range of 852.3 to $2\,667.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The values for L/H , C_{24}/C_{28} , C_{32}/C_{28} , $C_{28}/\sum$, CPI, and ACL varied from 0.2 to 1.0 , 104.3% to 293.3% , 42.2% to 61.4% , 7.3% to 16.5% , 5.6 to 9.7 , and 23.1 to 26.9 , respectively. Besides, the abundance distribution

收稿日期: 2013-07-17; 修订日期: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41073019)

作者简介: 刘刚(1965~), 男, 教授, 主要研究方向为大气污染化学, E-mail: liugang650104@sina.com

pattern was mainly bimodal with a maximal peak at C_{30} , C_{24} or C_{22} . In the smoldering smoke for maize straw, the same individual n -alkanols were found, and the $\sum$ values changed from 1 493.0 to 8 386.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The values for L/H , C_{24}/C_{28} , C_{32}/C_{28} , $C_{28}/\sum$, CPI and ACL were in the range of 0.2 to 0.3, 53.6% to 217.6%, 21.7% to 75.9%, 8.8% to 27.3%, 4.2 to 6.5, and 26.3 to 27.2, respectively. Furthermore, the distribution pattern was bimodal as well with the highest peak mainly at C_{30} and the second one at C_{24} . In brief, obvious discrimination exists among chemical compositions of n -alkanol in the straw and smoke. C_{24}/C_{30} , C_{32}/C_{30} , and $C_{30}/\sum$ are useful proxies in distinguishing between n -alkanol in airborne aerosol deriving from rice straw and one released in rice straw combustion process. L/H , C_{24}/C_{28} , C_{32}/C_{28} , and $C_{28}/\sum$ may have a potential in discriminating the compounds from maize straw and its burning. L/H is possibly used to make a distinction between the organic compounds from rice and maize straws, and/or from combustion of the straws.

Key words: rice; maize; straw; burning; smoke; n -alkanol

正构脂肪醇是大气气溶胶重要有机成分^[1~3]. 植物在生长过程中会向大气排放正构脂肪醇, 树、草、农业秸秆等生物质在燃烧过程也释放正构脂肪醇^[4~7]. 我国每年有上亿吨的农业秸秆被露天焚烧, 并产生大量的烟尘^[8,9]. 虽然各级政府明令禁止在夏秋收获季节焚烧秸秆, 但此现象仍然经常发生. 此外, 在其他国家, 尤其在发展中国家, 作物秸秆露天焚烧现象也普遍存在^[10~14]. 秸秆露天焚烧已成为大气中正构脂肪醇的重要来源. 虽然对秸秆烟尘中此类有机物的组成开展了较多的研究, 但对不同燃烧条件下产生的烟尘中, 正构脂肪醇在组成上的差异尚没有进行深入的探讨. 笔者在明火燃烧和闷烧条件下, 对稻草和玉米秸秆开展了燃烧试验, 对烟尘中正构脂肪醇的化学组成进行了研究, 确定燃烧条件对其组成的影响, 以期为识别大气气溶胶中此两类秸秆燃烧来源的该有机物提供支持.

1 材料与方法

1.1 秸秆采集与制备

2010~2012 年, 共采集了 6 个品种的稻草、4 个品种的玉米秸秆. 内 2 优 6 和扬两优 6 等品种的稻草产自浙江, II 优 279 和宁粳 1 产自安徽, 红粮 166 和 II 优 728 产自江苏. 掖单 4 和豫丰 3358 等品种的玉米秸秆产自河南, 中甜 9 和中科 11 产自江苏.

在制备测定正构脂肪醇所用的秸秆样品时, 取适量完整的每种秸秆, 剪至小段, 用清水冲去表面的泥土. 将洁净的碎样在 50℃ 烘烤 12 h, 用植物粉碎机粉碎至 60 目. 对于焚烧用的秸秆, 在室内自然风干, 临烧前拣去杂物, 抖去灰尘.

1.2 燃烧试验与烟尘采集

模拟秸秆的两种露天焚烧方式, 即明火燃烧和闷烧, 在一个面积为 20 m^2 的房间内进行燃烧试验. 在模拟明火燃烧时, 取每种秸秆 1.0~1.5 kg, 自然

堆放在一铁盘上点燃. 闷烧时取每种秸秆 0.2 kg, 放入闷烧装置内点燃. 通过控制进入燃烧室的空气量使燃烧过程始终不产生火焰^[15].

用一台小流量 (28.3 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) 大气颗粒物采样器 (Andersen, AH-200 型) 采集排放到室内的烟尘 (PM_{10}). 采样器离火堆 2 m, 距地面 1.2 m. 点燃秸秆后即开始采样, 每个样品持续采集 1 h. 采样期间关闭房间门窗, 以减少烟尘向外扩散. 采样所用的玻璃纤维滤膜在使用前于 500℃ 灼烧 2 h, 冷却后置于干燥器中在室温下平衡 24 h. 采样后的滤膜在室温下平衡 24 h 后再称重. 烟尘样品用铝箔包裹, 冷冻保存.

1.3 有机物提取与测定

有机物的皂化和分离方法是在参考前人工作的基础上改进而成的^[16~19]. 称取秸秆粉末 4 g 或者取采集了烟尘的玻璃纤维滤膜 0.5~1 张, 每次加入二氯甲烷/甲醇混合试剂 (2:1, 体积比) 10 mL, 于室温下超声振荡 15 min, 共重复提取 3 次. 合并提取液, 以 3 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速离心 2 min, 用旋转蒸发器在 40℃ 浓缩上清液至 3 mL, 以氮吹仪在 40℃ 吹至近干. 加入 2 mL 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KOH 甲醇/水溶液 (4:1, 体积比) 和 1 mL 去离子水, 在 60℃ 皂化 2 h. 先后用 3 mL 二氯甲烷提取皂化溶液内的中性组分各 3 次. 将提取液合并后用氮吹仪在 40℃ 浓缩至 1 mL. 用氧化铝/硅胶柱分离中性组分. 该层析柱内径 10 mm, 依次装填了 6 cm 中性氧化铝 (100~200 目)、12 cm 硅胶 (100~200 目) 和 1 cm 无水硫酸钠. 把浓缩液滴加到层析柱上, 依次用 20 mL 正己烷、20 mL 正己烷/乙酸乙酯混合液 (9:1, 体积比)、20 mL 正己烷/乙酸乙酯混合液 (8:2, 体积比) 洗脱烃、酮和醇. 将醇馏分浓缩至近干, 加入 150 μL 双 (三甲基硅烷基)-三氟乙酰胺 (BSTFA), 在 70℃ 衍生 2 h. 衍生完毕后在室温下吹至近干, 用正己烷定容.

以气质联用仪 (Agilent 6890N/5975 GC-MS) 测

定目标化合物. 所用色谱柱为 HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) 非极性石英毛细管柱; 载气流量 1 mL·min⁻¹, 气化温度 300℃, 进样量 1 μL (不分流); 升温程序: 初始温度 60℃, 保持 2 min, 以 6℃·min⁻¹ 的速率升温至 300℃, 保持 30 min. 以质量数为 75 的离子色谱峰面积对正构脂肪醇进行定量分析. 每个样品测定 1 次. 所用标准物质为正十六醇 ~ 正二十四醇混合物 (Nu Chek Prep, Inc). 在提取测定实际样品前, 以正二十脂肪醇进行了加标回收率试验, 其回收率为 70% ~ 110%.

2 结果与分析

2.1 稻草中的正构脂肪醇

稻草中的正构脂肪醇由 C₈ ~ C₃₄ 组成 (表 1). 在不同品种间, 正构脂肪醇的总含量 (∑) 具有较大的变化范围 (122.2 ~ 4 144.1 mg·kg⁻¹), 其平均值

为 1 014.5 mg·kg⁻¹. 其低碳数单体 (C₈ ~ C₂₃) 与高碳数单体 (C₂₄ ~ C₃₄) 的含量相差悬殊. 两者之比 (L/H) 分布于 0.03 ~ 0.18 之间, 平均值为 0.1. 说明在正构脂肪醇中高碳数组分占绝对优势. C₃₀ 在 ∑ 中所占的比例 (C₃₀/∑) 平均高达 70.8%. 显然, C₃₀ 是正构脂肪醇的首要组分. 另外, C₂₄/C₃₀、C₃₂/C₃₀ 的平均值分别为 10.4%、8.5%.

在所有品种的稻草中, 正构脂肪醇均呈双峰式分布 (图 1). 其主、次峰碳数均分别是 C₃₀ 和 C₂₄. 另外, 此类有机物还具有突出的偶碳数优势. 其碳优势指数 (CPI) 和平均碳链长度 (ACL) 的平均值分别为 28.0、28.9. 水稻属于 C₃ 植物, 其正构脂肪醇的分布模式与树叶 (C₃ 植物) 的区别在于后者有一个峰碳数是 C₃₂ 而非 C₃₀. 与其他 C₃ 草本植物的差别在于稻草具有微弱的 C₂₄ 次峰^[20]. 不过, 稻草的分布模式与绿色被子植物 (树叶) 的相似^[21].

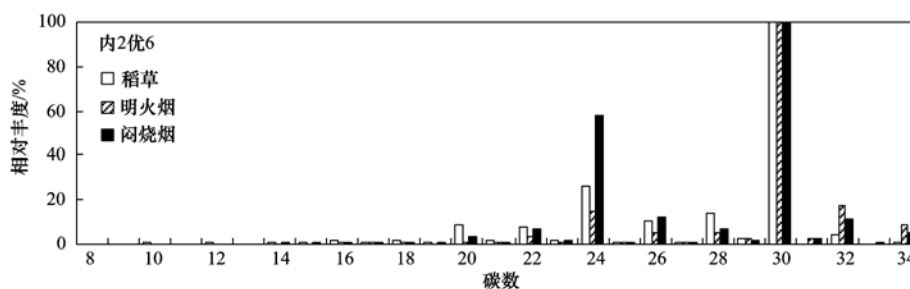


图 1 稻草及烟尘中正构脂肪醇的丰度分布

Fig. 1 Abundance distribution of individual *n*-alkanols in rice straw and smoke

2.2 稻草明火烟尘中的正构脂肪醇

在稻草明火条件下燃烧产生的烟尘中, 正构脂肪醇由 C₁₄ ~ C₃₄ 组成, 比原秸秆缺少 C₈ ~ C₁₃. 其原因可能是低碳数正构脂肪醇更容易气化而发生反应. 在不同品种间, 其 ∑ 值在 1 604.4 ~ 13 889.7 mg·kg⁻¹ 范围内大幅变动, 其中 II 优 279 的异常高. 除此之外, 其他 5 种的 ∑ 平均值为 4 289.0 mg·kg⁻¹. L/H 比值分布于 0.02 ~ 0.09 之间, 平均为 0.1, 与稻草的相等. 表明稻草在明火燃烧过程中虽然有一部分此类有机物参与了化学反应, 但聚集在烟尘中的低碳数与高碳数正构脂肪醇的相对含量总体上没有发生明显的改变. 其 C₂₄/C₃₀ 平均值为 11.7%, 比稻草有所增大; C₃₂/C₃₀ 值比稻草明显增大 (图 2), 其平均值为 16.0%, 是稻草的近 2 倍. 对于 C₃₀/∑ 值来讲, 除了内 2 优 6 之外, 在其他品种的烟尘中, 该比值均低于稻草, 其平均值为 62.7%.

由此可见, 在稻草明火燃烧过程中有更多的 C₃₀ 发生了氧化、脱水、脱氢等化学反应, 从而使后 3 个比值发生了显著的改变.

明火烟尘中的正构脂肪醇表现出与稻草相同的分布模式, 其主、次峰碳数分别是 C₃₀ 和 C₂₄ (图 1). 与此同时, 也具有明显的偶碳数优势. 其 CPI 的平均值为 14.9, 比稻草下降近一半. 这说明以 C₃₀ 为代表的偶碳数正构脂肪醇较多地参与了燃烧过程中发生的化学反应. 其 ACL 值平均为 29.3, 比稻草显著增大.

2.3 稻草闷烧烟尘中的正构脂肪醇

在稻草闷烧排放的烟尘中, 正构脂肪醇的单体构成与明火烟尘相同. 在不同品种间, ∑ 值在 1 688.7 ~ 5 168.2 mg·kg⁻¹ 间变动. 除 II 优 279 外, 其他 5 种的 ∑ 平均值为 3 753.3 mg·kg⁻¹, 相当于明火烟尘的 88%. L/H 值平均为 0.1, 与明火烟尘和稻草的相等. 证明闷烧过程总体上也没有改变烟

表 1 稻草及其烟尘中正构脂肪醇的含量和参数值¹⁾/(mg·kg⁻¹)

类型	宁梗 1				内 2 优 6				Ⅱ 优 279				扬两优 6				红粮 166				Ⅱ 优 728			
	稻草		闷烧		稻草		明火		稻草		明火		稻草		明火		稻草		闷烧		稻草		明火	
	1.8	3.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	9.1	0.6	0.1	5.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
C ₈																								
C ₉																								
C ₁₀																								
C ₁₁																								
C ₁₂																								
C ₁₃																								
C ₁₄																								
C ₁₅																								
C ₁₆																								
C ₁₇																								
C ₁₈																								
C ₁₉																								
C ₂₀																								
C ₂₁																								
C ₂₂																								
C ₂₃																								
C ₂₄																								
C ₂₅																								
C ₂₆																								
C ₂₇																								
C ₂₈																								
C ₂₉																								
C ₃₀																								
C ₃₁																								
C ₃₂																								
C ₃₃																								
C ₃₄																								
∑																								
L/H																								
CPI																								
ACL																								

1) $\sum$ 为正构脂肪醇总含量; $L/H = (C_8 + C_9 + \dots + C_{23}) / (C_{24} + C_{25} + \dots + C_{34})$; $CPI = (C_{10} + C_{12} + C_{14} + \dots + C_{34}) / (C_9 + C_{11} + C_{13} + \dots + C_{33})$; $ACL = (8C_8 + 9C_9 + \dots + 34C_{34}) / (C_8 + C_9 + \dots + C_{34})$

尘中低碳数和高碳数单体的相对含量. 但是, C_{24}/C_{30} 值发生了显著的变化(图 2), 其平均值为 52.0%, 分别是明火烟尘和稻草的 4.4 倍和 5 倍. C_{32}/C_{30} 之比均介于稻草和明火烟尘之间, 其平均值为 13.1%. $C_{30}/\sum$ 之比均小于对应的稻草和明火烟尘, 其平均值为 46.2%. 这 3 个比值的变化表明, 在闷烧过程中 C_{30} 较为稳定, 同时还生成了一定量的 C_{24} .

闷烧烟尘中正构脂肪醇的分布模式与稻草和明火烟尘的极为相似, 不同之处在于其次碳峰(C_{24})的相对丰度大幅度提高(图 1). 其 CPI 和 ACL 的平均值分别为 13.5、27.7, 均小于稻草和明火烟尘. 显然, 闷烧烟尘中此类有机物在继承了稻草内原来的分布模式和偶碳数优势的同时, 单体化合物的相对丰度发生了改变. 闷烧有利于奇碳数单体的形成.

2.4 玉米秸秆中的正构脂肪醇

与稻草类似, 玉米秸秆中的正构脂肪醇同样由 $C_8 \sim C_{34}$ 组成(表 2). 其 $\sum$ 平均值为 $506.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仅相当于稻草平均含量的一半. L/H 平均

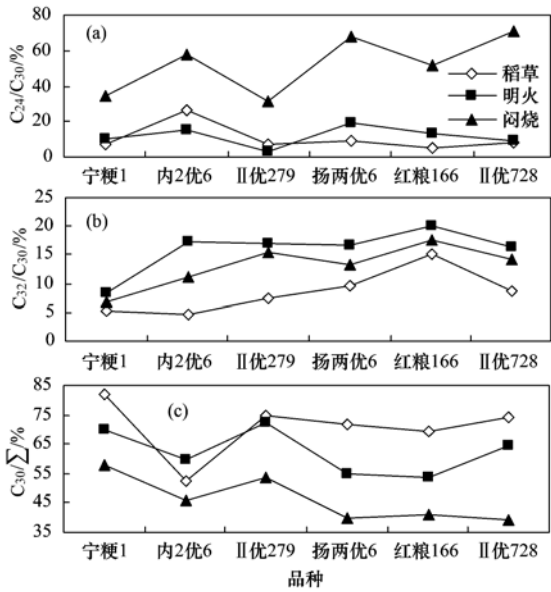


图 2 稻草及其烟尘中 C_{24}/C_{30} 、 C_{32}/C_{30} 及 $C_{30}/\sum$ 丰度比的变化趋势

Fig. 2 Variation of C_{24}/C_{30} , C_{32}/C_{30} and $C_{30}/\sum$ abundance ratios in rice straw and smoke

表 2 玉米秸秆及其烟尘中正构脂肪醇的参数值和含量¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Proxies and contents of individual *n*-alkanols in maize straw and smoke/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

类型	掖单 4			中甜 9			豫丰 3358			中科 11		
	玉米秸	明火烟	闷烧烟	玉米秸	明火烟	闷烧烟	玉米秸	明火烟	闷烧烟	玉米秸	明火烟	闷烧烟
C_8	0.4											
C_9	0.8			0.2			0.2			0.1		
C_{10}	0.9			0.2			0.2					
C_{11}	0.3			0.1			0.1					
C_{12}	0.9			0.2			0.2			0.1	27.2	11.6
C_{13}	0.3			0.1			0.1			0.1		
C_{14}	0.9			0.2			0.3			0.1	32.6	13.6
C_{15}	0.4			0.2			0.3			0.3	17.0	10.7
C_{16}	1.4			0.4	85.7		0.3			1.1	59.2	11.0
C_{17}	4.3			0.1			0.2		16.0	0.1		9.3
C_{18}		0.4	11.2	0.7	79.5	14.6	0.9	7.9	26.5	1.2	55.3	11.2
C_{19}	9.2	8.9		0.1		6.1	0.2	1.5	21.5	0.1		7.7
C_{20}	6.1	26.4	39.8	1.3	31.2	21.4	2.2	10.1	78.0	1.9	31.5	21.8
C_{21}	5.5	19.2	20.7	0.7	15.5	19.7	1.7	6.4	36.4	0.7	11.2	10.8
C_{22}	201.0	325.9	600.1	13.1	202.4	296.3	40.8	145.9	962.3	21.9	135.9	162.8
C_{23}	56.0	69.2	108.6	3.3	44.9	90.5	16.6	45.9	198.2	7.5	42.6	47.6
C_{24}	254.6	459.5	937.6	15.5	193.6	504.9	34.8	200.0	1 869.1	24.8	130.2	218.5
C_{25}	8.5	31.2	56.3	1.1	26.8	39.4	1.7	17.5	86.1	1.0	8.5	19.3
C_{26}	147.1	357.4	664.3	9.7	77.9	274.9	20.3	122.7	989.7	14.0	69.2	126.3
C_{27}	6.1	18.3	29.6	0.9		35.7	1.9	17.0	55.0	1.0		4.3
C_{28}	161.0	440.6	783.1	30.0	66.0	232.0	48.2	167.9	1 098.7	28.5	106.0	408.0
C_{29}	11.5	49.1	49.3	2.1		43.0	4.4	27.0	129.1	2.2		36.8
C_{30}	183.4	542.9	1 097.8	19.8	36.2	548.9	32.0	168.2	1 484.2	16.0	69.6	209.0
C_{31}	151.4	88.8	429.5	9.1		259.6	76.9	45.6	532.8			64.1
C_{32}	160.6	186.1	403.3	21.7	40.5	176.1	21.5	83.8	641.8	20.1	56.3	88.6
C_{33}	41.7		21.4	1.4		13.8	4.1		43.5	3.1		
C_{34}	16.4	44.0	54.0	5.4		51.2	1.8		118.0			
$\sum$	1 430.7	2 667.9	5 306.6	137.6	900.2	2 628.1	311.9	1 067.4	8 386.9	145.9	852.3	1 493.0
L/H	0.3	0.2	0.2	0.2	1.0	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.9	0.3
CPI	3.8	8.4	6.4	6.1	9.3	4.2	1.9	5.6	6.5	8.0	9.7	6.1
ACL	27.0	26.9	27.2	27.8	23.1	27.1	27.5	26.5	26.8	26.4	23.2	26.3

1) $\sum$ 为正构脂肪醇总含量; $L/H = (C_8 + C_9 + \cdots + C_{23}) / (C_{24} + C_{25} + \cdots + C_{34})$; $CPI = (C_{10} + C_{12} + \cdots + C_{34}) / (C_9 + C_{11} + \cdots + C_{33})$; $ACL = (8C_8 + 9C_9 + \cdots + 34C_{34}) / (C_8 + C_9 + \cdots + C_{34})$

值为 0.3, 是稻草的 3 倍. 显示低碳数单体的相对含量比稻草大幅提高. C_{24}/C_{28} 、 C_{32}/C_{28} 、 $C_{28}/\sum$ 的平均值分别为 92.3%、71.8% 和 17.0%.

玉米秸秆中的正构脂肪醇基本上呈双峰式分布 (图 3). 其主峰碳数以 C_{28} 为主, 次峰碳是 C_{24} . 与其他 C_4 植物的主要区别在于其在 C_{24} 处是一个微弱的小峰^[20]. 在豫丰 3358 中, C_{31} 相对丰度偏高. 其原

因是 C_{31} 衍生物的色谱峰几乎与另外 2 种有机物完全重叠, 使质量数为 75 的离子色谱峰面积异常增大, 从而导致以此定量的 C_{31} 含量偏高. 此外, 正构脂肪醇还表现出显著的偶碳数优势. 各品种的 CPI 变化范围是 1.9~8.0, 平均为 5.0, 比稻草大幅度减小; ACL 的变化范围是 26.4~27.8, 平均为 27.2, 也明显小于稻草.

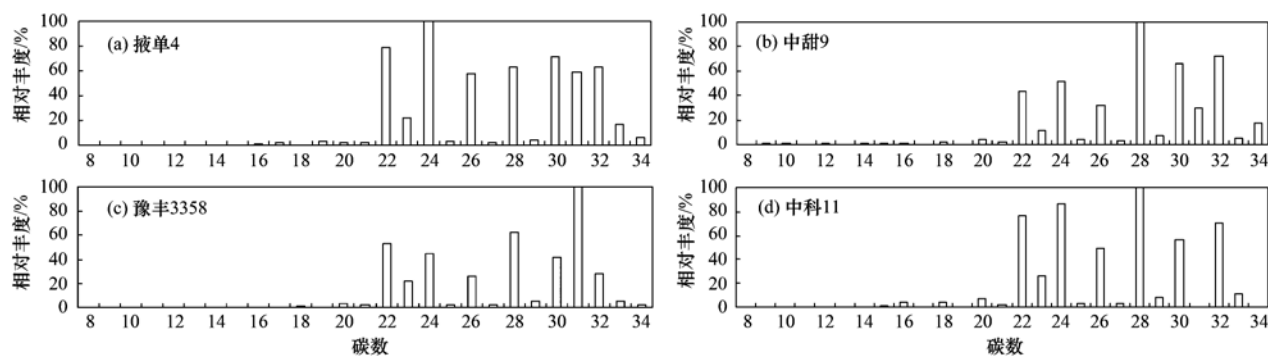


图 3 玉米秸秆中正构脂肪醇的相对含量分布

Fig. 3 Abundance distribution of individual *n*-alkanols in maize straw

2.5 玉米秸秆明火烟尘中的正构脂肪醇

在玉米秸明火燃烧产生的烟尘中, 正构脂肪醇由 $C_{12} \sim C_{34}$ 组成, 未检出 $C_8 \sim C_{11}$ 等低碳数单体. 其 $\sum$ 值在 852.3~2 667.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 间变化, 平均值为 1 372.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. L/H 的平均值为 0.6, 比玉米秸秆增加 1 倍; C_{24}/C_{28} 之比平均值为 159.9%, 远大于玉米秸秆; C_{32}/C_{28} 、 $C_{28}/\sum$ 等的平均值分别为 51.7% 和 13.0%, 均比玉米秸秆显著减小. 表明玉米秸秆在明火燃烧过程中有较多的高碳数单体参加了化学反应, 而且碳链越长越不稳定.

明火烟尘中正构脂肪醇的分布模式比玉米秸秆复杂. 在掖单 4、豫丰 3358、中科 11 等 3 种秸秆的烟尘中, 正构脂肪醇呈双峰式分布 (图

4). 其主峰碳数分别是 C_{30} 、 C_{24} 和 C_{22} , 次峰碳数分别是 C_{24} 、 C_{30} 、 C_{28} . 而在中甜 9 的明火烟尘中, 正构脂肪醇呈现出以 C_{22} 为主峰碳的单峰型分布特点. 另外, 在中甜 9 和中科 11 的明火烟尘中, C_{16} 和 C_{18} 的相对丰度明显提高, 并且在 C_{16} 处似乎存在一个小峰. 烟尘中正构脂肪醇的偶碳数优势明显. 其 CPI 的平均值为 8.3, 比玉米秸秆有所增加; ACL 的平均值为 24.9, 比秸秆有所减小. 两者与稻草明火烟尘的情形刚好相反, 说明两类秸秆在物质构成上的差异对烟尘中正构脂肪醇的组成也有影响.

2.6 玉米秸秆闷烧烟尘中的正构脂肪醇

与明火烟尘类似, 玉米秸秆闷烧烟尘中的正构脂肪醇也由 $C_{12} \sim C_{34}$ 组成. 其 $\sum$ 平均值为 4 453.7

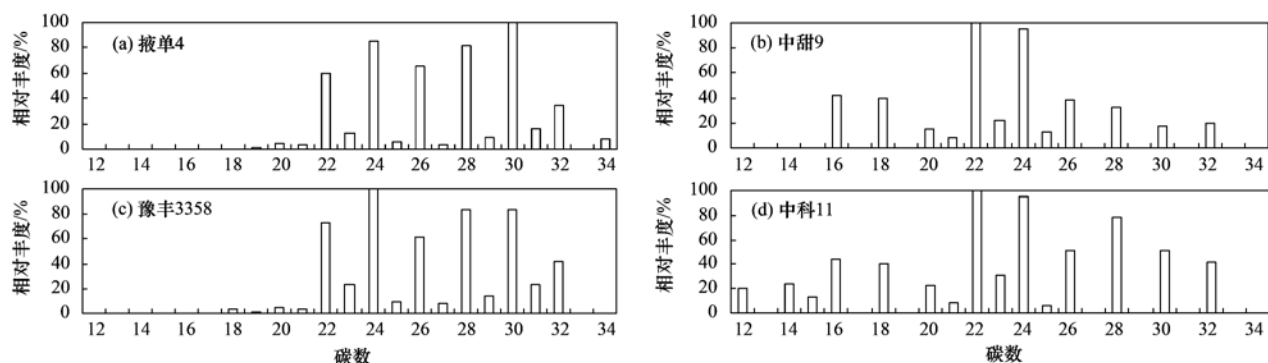


图 4 玉米秸秆明火烟尘中正构脂肪醇的相对含量分布

Fig. 4 Distribution of *n*-alkanols in flaming smoke from maize straw burning

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相当于明火烟尘的 3.2 倍. 表明玉米秸在闷烧过程有更多的正构脂肪醇发生气化而冷凝成气溶胶. L/H 的平均值为 0.2, 与秸秆十分接近. C_{24}/C_{28} 的平均值为 140.3%, 比明火烟尘稍小, 但仍远大于玉米秸. C_{32}/C_{28} 的平均值为 51.9%, 与明火烟尘的几乎相等. $C_{28}/\sum$ 的平均值为 16.0%, 与玉米秸

秆的较为接近.

玉米秸秆闷烧烟尘中的正构脂肪醇也呈双峰式分布(图 5). 其主峰碳数主要是 C_{30} , 次峰碳数主要是 C_{24} . 与玉米秸的区别主要是主峰碳数发生了变化. 其 CPI 的平均值为 5.8, 比秸秆稍有增大; ACL 的平均值为 26.8, 与秸秆基本相等.

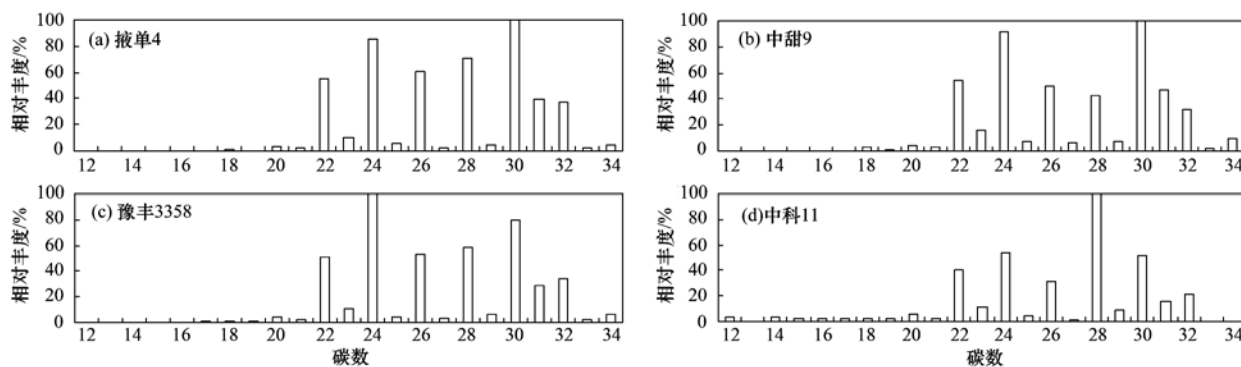


图 5 玉米秸秆闷烧烟尘中正构脂肪醇的相对含量分布

Fig. 5 Distribution of *n*-alkanols in smoldering smoke from maize straw burning

3 讨论

草本植物中正构脂肪醇的主峰碳数在很大程度上因植物品种而异^[22]. 在其燃烧产生的烟尘中, 此类有机物的组成与原植物有一定的关系^[5]. 上述分析结果表明, 在稻草和玉米秸秆烟尘中, 正构脂肪醇的组成同样也继承了秸秆中原有的部分特点, 但同时又发生了一定的变化. 相对于稻草, 其明火烟尘中正构脂肪醇的 L/H 值总体上保持恒定, C_{32}/C_{30} 值明显增大, C_{24}/C_{30} 值小幅增加, 而 $C_{30}/\sum$ 值却明显降低. 此外, 其 CPI 值大幅下降, 而 ACL 值却显著提高. 在稻草闷烧烟尘中, 正构脂肪醇的 L/H 平均值与明火烟尘和稻草相等; C_{24}/C_{30} 值明显大于稻草和明火烟尘, 而 C_{32}/C_{30} 值介于两者之间; $C_{30}/\sum$ 值则均小于稻草和明火烟尘. 其 CPI 值比明火烟尘有所减小, ACL 值明显小于稻草和明火烟尘. 分布模式、最大碳数($C_{\max}$)、CPI、ACL 等是区分不同生物质中此类有机物组成, 以及识别环境中其来源的常用指标^[4,7,20~31]. 对于稻草烟尘而言, 在这 4 个指标中, 仅有 CPI、ACL 发生了变化. 据此可区别稻草及其燃烧产生的正构脂肪醇. 除此之外, C_{24}/C_{30} 、 C_{32}/C_{30} 、 $C_{30}/\sum$ 等比值也具有类似的参考意义.

在玉米秸秆的明火烟尘中, L/H 、 C_{24}/C_{28} 和 CPI 等值比秸秆显著提高, 而 C_{32}/C_{28} 、 $C_{28}/\sum$ 和 ACL 值却明显减小. 明火烟尘中的正构脂肪醇虽然具有

与玉米秸秆类似的分布模式, 但是原来的主、次峰碳数呈现出互换位置的趋势. 可见, 在玉米秸秆及其明火烟尘之间, 除了分布模式、CPI、ACL 等指标, 还可根据 L/H 、 C_{24}/C_{28} 、 C_{32}/C_{28} 、 $C_{28}/\sum$ 等参数值将二者相区分. 在玉米秸秆的闷烧烟尘中, 正构脂肪醇的 L/H 和 $C_{28}/\sum$ 等值与秸秆较为接近; C_{24}/C_{28} 值远大于秸秆, 稍小于明火烟尘; C_{32}/C_{28} 值与明火烟尘的几乎相等. 除此之外, 其分布模式更接近于秸秆, 但 CPI 值有一定增大, 而 ACL 值基本不变. 显然, C_{24}/C_{28} 、 C_{32}/C_{28} 、CPI 等指标对于区别玉米秸秆及其闷烧烟尘中的正构脂肪醇, 具有潜在的应用价值. L/H 、 $C_{28}/\sum$ 、CPI、ACL 等指标对于分辨玉米秸秆明火烟尘和闷烧烟尘中的正构脂肪醇更为有效.

玉米秸秆中正构脂肪醇的 L/H 值远大于稻草, 而 CPI 和 ACL 值总体上小于稻草. 另外, 前者的主峰碳数以 C_{28} 为主. 据此, 即可把两类秸秆来源的正构脂肪醇相区别.

对于上述两类秸秆燃烧来源的正构脂肪醇, L/H 值是最有效的识别指标, 其次才是 CPI 和 ACL.

4 结论

(1) 与稻草相比, 稻草明火烟尘中正构脂肪醇的 L/H 值总体上没有发生明显的变化, 但 C_{24}/C_{30} 、 C_{32}/C_{30} 值和 ACL 有所增大, $C_{30}/\sum$ 值和 CPI 则显

著减小. 其具有与稻草相同的分布模式和主/次峰碳数.

(2) 稻草闷烧烟尘中正构脂肪醇的 L/H 值与明火烟尘和稻草的基本相等, C_{24}/C_{30} 值远大于明火烟尘和稻草, C_{32}/C_{30} 值介于两者之间, $C_{30}/\sum$ 之比和 ACL 均小于二者, CPI 比明火烟尘有所减小. 其分布模式和主/次峰碳数与两者相同.

(3) 玉米秸秆明火烟尘中正构脂肪醇的 L/H 、 C_{24}/C_{28} 和 CPI 值均比此秸秆有所变大, 而 C_{32}/C_{28} 、 $C_{28}/\sum$ 、ACL 等值显著小于秸秆. 其分布模式主要是双峰式, 主峰碳数是 C_{30} 、 C_{24} 和 C_{22} .

(4) 玉米秸秆闷烧烟尘中正构脂肪醇的 L/H 、 $C_{28}/\sum$ 、ACL 等值与秸秆较为接近; C_{32}/C_{28} 值与明火烟尘基本一致; C_{24}/C_{28} 值稍小于明火烟尘, 但远大于秸秆; CPI 比秸秆稍有增大. 其分布模式与秸秆类似, 主峰碳数主要是 C_{30} , 次峰碳数主要是 C_{24} .

(5) C_{24}/C_{30} 、 C_{32}/C_{30} 、 $C_{30}/\sum$ 等比值可用于区别稻草及其烟尘中的正构脂肪醇; L/H 、 C_{24}/C_{28} 、 C_{32}/C_{28} 、 $C_{28}/\sum$ 等比值是区分玉米秸秆及其烟尘中正构脂肪醇的有效指标; L/H 是区别上述两类秸秆及其烟尘中正构脂肪醇的有益指标.

参考文献:

- [1] Simoneit B R T. Compound-specific carbon isotope analyses of individual long-chain alkanes and alkanolic acids in Harmattan aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(15): 2225-2233.
- [2] Simoneit B R T, Sheng G, Chen X, *et al.* Molecular marker study of extractable organic matter in aerosols from urban areas of China [J]. *Atmospheric Environment*, 1991, **25**(10): 2111-2129.
- [3] Simoneit B R T. Organic matter of the troposphere—V: Application of molecular marker analysis to biogenic emissions into the troposphere for source reconciliations [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1989, **8**(3): 251-275.
- [4] Gonçalves C, Alves C, Fernandes A P, *et al.* Organic compounds in $PM_{2.5}$ emitted from fireplace and woodstove combustion of typical Portuguese wood species [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(27): 4533-4545.
- [5] Oros D R, Abas M R, Omar N Y M J, *et al.* Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning: Part 3. Grasses [J]. *Applied Geochemistry*, 2006, **21**(6): 919-940.
- [6] Medeiros P M, Simoneit B R T. Source profiles of organic compounds emitted upon combustion of green vegetation from temperate climate forests [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(22): 8310-8316.
- [7] Gonçalves C, Evtyugina M, Alves C, *et al.* Organic particulate emissions from field burning of garden and agriculture residues [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 666-680.
- [8] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 349-357.
- [9] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 186-194.
- [10] Sahai S, Sharma C, Singh D P, *et al.* A study for development of emission factors for trace gases and carbonaceous particulate species from in situ burning of wheat straw in agricultural fields in India [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(39): 9173-9186.
- [11] Hays M D, Fine P M, Geron C D, *et al.* Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(36): 6747-6764.
- [12] Cheng M, Horng C, Su Y, *et al.* Particulate matter characteristics during agricultural waste burning in Taichung City, Taiwan [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 187-192.
- [13] Viana M, López J M, Querol X, *et al.* Tracers and impact of open burning of rice straw residues on PM in Eastern Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(8): 1941-1957.
- [14] Dhammapala R, Claiborn C, Corkill J, *et al.* Particulate emissions from wheat and Kentucky bluegrass stubble burning in eastern Washington and northern Idaho [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(6): 1007-1015.
- [15] 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 等. 稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4173-4180.
- [16] 段毅, 张辉, 郑朝阳, 等. 沼泽沉积环境中植物和沉积脂类单体碳同位素组成特征及其成因关系研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, **34**(12): 1151-1156.
- [17] Ballentine D C, Macko S A, Turekian V C. Variability of stable carbon isotopic compositions in individual fatty acids from combustion of C_4 and C_3 plants: implications for biomass burning [J]. *Chemical Geology*, 1998, **152**(1-2): 151-161.
- [18] Yang H H, Tsai C H, Chao M R, *et al.* Source identification and size distribution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons during rice straw burning period [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(7): 1266-1274.
- [19] Tolosa I, LeBlond N, Copin-Montégut C, *et al.* Distribution of sterol and fatty alcohol biomarkers in particulate matter from the frontal structure of the Alboran Sea (S. W. Mediterranean Sea) [J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3-4): 161-183.
- [20] Chikaraishi Y, Naraoka H. $\delta^{13}C$ and δD relationships among three n -alkyl compound classes (n -alkanoic acid, n -alkane and n -alkanol) of terrestrial higher plants [J]. *Organic Geochemistry*, 2007, **38**(2): 198-215.
- [21] Diefendorf A F, Freeman K H, Wing S L, *et al.* Production of n -alkyl lipids in living plants and implications for the geologic past

- [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, **75**(23): 7472-7485.
- [22] Rommerskirchen F, Plader A, Eglinton G. Chemotaxonomic significance of distribution and stable carbon isotopic composition of long-chain alkanes and alkan-1-ols in C_4 grass waxes [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, **37**(10): 1303-1332.
- [23] Vicente A, Alves C, Calvo A I, *et al.* Emission factors and detailed chemical composition of smoke particles from the 2010 wildfire season [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 295-303.
- [24] Andersson R A, Meyers P A. Effect of climate change on delivery and degradation of lipid biomarkers in a Holocene peat sequence in the Eastern European Russian Arctic [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, **53**: 63-72.
- [25] Zhou W J, Zheng Y H, Meyers P A, *et al.* Postglacial climate-change record in biomarker lipid compositions of the Hani peat sequence, Northeastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **294**(1-2): 37-46.
- [26] Clemente J S, Simpson M J. Physical protection of lignin by organic matter and clay minerals from chemical oxidation [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, **58**: 1-12.
- [27] Bechtel A, Schubert C J. Biogeochemistry of particulate organic matter from lakes of different trophic levels in Switzerland [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(4): 441-454.
- [28] Versteegh G J M, Zonneveld K A F, Lange G J. Selective aerobic and anaerobic degradation of lipids and palynomorphs in the Eastern Mediterranean since the onset of sapropel S1 deposition [J]. *Marine Geology*, 2010, **278**(1-4): 177-192.
- [29] Chikaraishi Y, Naraoka H. Carbon and hydrogen isotope variation of plant biomarkers in a plant-soil system [J]. *Chemical Geology*, 2006, **231**(3): 190-202.
- [30] Hu J F, Peng P A, Jia G D, *et al.* Biological markers and their carbon isotopes as an approach to the paleoenvironmental reconstruction of Nansha area, South China Sea, during the last 30 ka [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(10): 1197-1204.
- [31] 房吉敦, 吴丰昌, 熊永强, 等. 滇池湖泊沉积物中游离类脂物的有机地球化学特征[J]. *地球化学*, 2009, **38**(1): 96-104.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行