

咖啡烘焙技术研究进展

杨琪, 吴传宇*, 靳成, 郭仕豪, 朱杰威, 田舒杰 (福建农林大学机电工程学院, 福建福州 350000)

摘要 从咖啡烘焙的方式和技术、烘焙过程中不同烘焙程度对咖啡风味品质的影响, 以及咖啡烘焙产生的香气成分与检测等方面阐述国内外咖啡烘焙机装备研究进展, 重点分析半直火半热风式烘焙工艺在咖啡烘焙生产中的优势, 通过对咖啡烘焙过程中挥发性物质的进一步分析, 指出优化咖啡烘焙设备以提升咖啡豆风味品质的趋势及应用前景。

关键词 咖啡; 烘焙; 香气成分; 工艺; 检测

中图分类号 TS273 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)03-0026-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress of Coffee Roasting Technology

YANG Qi, WU Chuan-yu, JIN Cheng et al (College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350000)

Abstract Explain the research progress of coffee roasting machine equipment at home and abroad from the aspects of coffee roasting methods and technologies, the influence of different roasting degrees during the roasting process on coffee flavor quality, and the aroma components and detection of coffee roasting, focus on the advantages of semi-direct fire and semi-hot air baking technology in coffee baking production. Through further analysis of volatile substances in the process of coffee roasting, the trend and application prospect of optimizing coffee roasting equipment to improve the flavor quality of coffee beans were pointed out.

Key words Coffee; Roasting; Aroma components; Craft; Examine

咖啡属于茜草科植物咖啡属^[1], 和茶、可可一起被称为世界三大饮料^[2]。咖啡原产地为埃塞俄比亚, 集中分布在南、北回归线之间^[3]。就生产量和消费量而言, 咖啡在世界三大饮料作物中处于第一位, 成为继石油之后, 世界第二的原料型产品^[4]。咖啡豆的三大品种分别是阿拉比卡、罗布斯特和利比里亚, 以果实的大小区分, 分别属于小粒、中粒和大粒种咖啡, 其中阿拉比卡和罗布斯特咖啡种植较为广泛, 并且最具有经济价值^[5]。咖啡具有浓厚饱满的风味, 伴有健胃、醒神、利尿等功能效果^[6], 含有的活性成分如咖啡因和绿原酸可以预防结肠癌、肝病、二型糖尿病、肾病和结肠癌等许多慢性病^[7]。咖啡独特风味的发展流行和全球吸引力, 使其成为目前最受欢迎和消费人数较多的饮料之一。此外, 咖啡也具有重要的历史、文化、社会和经济重要性和深远影响^[8]。

咖啡是全球最重要的热带商品, 约占热带产品出口总额的一半。世界最大的咖啡进口组织是欧盟, 占全球进口量的66%, 其次是美国(24%)和日本(7%)^[9]。我国的咖啡种植区域主要集中在云南、海南和台湾。云南省因其独特的纬度、海拔、光热等条件, 已成为我国最大的小粒咖啡种植基地^[10]。近年来, 我国咖啡消费量市场年增长速度为10%~15%。云南省的德宏、保山、临沧、普洱为国内小粒种咖啡的主要种植区, 种植面积和产量占全国98%以上^[11]。咖啡对健康有很多益处, 随着大众生活水平的不断提高, 咖啡已渐渐成为人们的日常饮品, 人们对其风味品质的要求也越来越高^[12]。咖啡在我国饮料市场中快速崛起, “咖啡文化”已逐

渐渗透到人们的日常生活, 在许多工作和休闲场合, 人们都可以品尝咖啡带来的味觉盛宴, 咖啡已经逐渐与时尚、现代生活紧密联系在一起^[13]。

1 咖啡烘焙工艺分析

咖啡生豆必须经过烘焙才能产生出咖啡的色、香、味^[14]。咖啡的香气、风味、品味等品质指标绝大多数取决于咖啡的焙炒过程, 焙炒过程是影响咖啡风味品质的决定性环节^[15]。烘焙条件如烘焙温度的高低和烘焙时间的长短等是咖啡的香气、色泽和口感等品质的关键指标^[16]。就目前而言, 国内对咖啡烘焙技术的研究主要集中在烘焙过程中挥发性气体成分的变化和温度曲线变化规律。研究发现, 云南小粒种咖啡豆在烘焙温度为230℃的烘焙条件下, 分别烘焙不同的时间长度, 其咖啡因含量平均在1.45%左右, 与烘焙时间长短相关性不大^[17]。研究表明, 咖啡烘焙过程中烘焙温度以及烘焙时间是烘焙程度的决定性因素, 对咖啡挥发性气体成分的产生及变化规律进行研究, 可以为提高咖啡烘焙工艺提供较高参考性^[18]。

研究同时表明, 影响咖啡烘焙温度曲线的因素主要包括咖啡生豆的外形是圆豆或扁豆、尺寸的大小及含水率等, 其中含水率的影响较大^[19]。当然影响较大的因素是烘焙时间和烘焙温度。咖啡生豆经过烘焙, 会释放出咖啡中所含的特殊香气成分, 在烘焙过程中, 生豆经过闷蒸、脱水、烘熟、浅焙、中焙到深焙, 水分渐渐被释放, 重量减轻, 体积慢慢膨胀鼓起, 咖啡豆的颜色变深, 最后芬芳的香气物质逐渐释放出来^[20]。咖啡烘焙度为美式术语, 而不同地区对烘焙程度也有着不同描述, 表1为咖啡豆的8种烘焙程度和它们所呈现的风味^[21]。

2 咖啡烘焙工艺与香气成分

生咖啡豆本没有香气, 咖啡豆在180~220℃进行烘焙

基金项目 福建省教育厅中青年骨干教师教育科研项目(JAT200104); 福建农林大学横向研发项目(KH190078A); 福建农林大学科技发展基金项目(KFA20104A)。

作者简介 杨琪(1995—), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向: 农业机械化。*通信作者, 高级工程师, 博士, 从事农业装备研究。

收稿日期 2021-09-26

后,生咖啡豆的颜色转变为黄色,再变成浅褐色,最后变成油状深棕色^[22]。脂肪、蛋白质和游离氨基酸是咖啡质量的重要成分,它们通过关键的 Strecker 和 Maillard 反应在烘烤过

程中形成咖啡香气和风味的前体物质,同时有机酸和绿原酸等物质含量也会随着咖啡的烘焙发生相应变化^[23]。

表 1 烘焙程度及风味分类

Table 1 Baking degree and flavor classification

序号 No.	烘焙程度 Baking degree	下豆时间 Bean time	豆表颜色 Bean surface color	风味与口感 Flavor and mouthfeel	用途 Use
1	Light Roast(极浅度烘焙,又称浅烘焙)	一爆开始前后	淡肉桂色	具有很重的青草味,口感与香气不够	一般用于试验,极少有用做品尝
2	Cinnamon Roast(浅度烘焙,又称肉桂烘焙)	一爆开始至密集	肉桂色	此时已经没有青草味,酸质偏强、香气较弱,口感较单薄,有独特的果香、蔬菜香和柑橘香韵	一般用于冲泡冰美式
3	Medium Roast(中度烘焙,又称微中烘焙)	一爆密集至结束间	栗子色	口感清淡、偏酸带苦,保留咖啡豆原始风味,有焦糖香、烤香、霉香和烟熏香气,且有药水味	常用做美式咖啡或混合咖啡
4	High Roast(中度微深烘焙,又称浓度烘焙)	一爆结束	浅红褐色	口感层次丰富,酸苦均衡且不刺激,稍带甜味,香气风味均佳	蓝山、吉利马札罗咖啡均适合此烘焙程度,为日本、中北欧人士喜爱
5	City Roast(中深度烘焙,又称城市烘焙)	一、二爆中间	浅棕色	口感清朗利口、酸苦平衡但酸质稍偏淡,可释放咖啡中优质的风味,为标准的烘焙程度,也是大众最喜爱的烘焙程度	巴西、哥伦比亚咖啡均适合此烘焙程度,常用于法式咖啡
6	Full City Roast(微深度烘焙,即深烘焙,又称深城市烘焙)	二爆	褐色	口感沉稳饱满、苦味较酸味强劲、余韵回甘,香气饱满	中南美式烘焙法,多做冰咖啡、黑咖啡使用
7	French Roast(极深烘焙,即深度烘焙,又称法式烘焙)	二爆密集到二爆结束	深褐色带黑	口感强劲浓烈、苦味较浓、酸味清淡近乎无感觉、带有浓郁的巧克力与烟熏香气,整体香气浓郁焦苦、烟熏味重	为欧洲尤以法国最为盛行,多做咖啡欧蕾、维也纳咖啡之用
8	Italian Roast(极深度烘焙,即极深烘焙,又称意式烘焙)	二爆结束至豆表转黑出油	黑色泛油光	口感强烈复杂、苦味强劲、带有浓厚的煎焙与焦香	主要流行于拉丁国家与意大利,多做意式咖啡 Espresso 使用

经过烘焙后咖啡的香气风味形成由两部分组成,分别为挥发性气体风味成分组和呈味成分组。挥发性气体物质决定了咖啡的香气成分,而非挥发性气体物质决定咖啡特有的涩味、苦味和酸味等重要口感^[24]。不同焙炒程度下咖啡豆挥发性物质的种类和含量均不相同^[25]。研究不同的烘焙条件,如烘焙过程中的时间和温度对咖啡烘焙挥发性气体物质的影响,结果表明,可以利用咖啡挥发性香气物质的变化规律反过来引导咖啡焙炒的过程,通过对咖啡挥发性气体成分的分类及规律分析,可以对咖啡焙炒的程度进行判断,同时研究得出云南小粒咖啡在中度烘焙时可以较完整地体现其特征^[26]。研究发现,SPME-GC-MS 结合电子鼻技术对不同烘焙程度咖啡的挥发性香气成分进行检测时^[27],烘焙温度越高,咖啡中的香气也随之增多,归纳香气成分、香气表型和烘焙程度三者之间的相互关系,可作为咖啡烘焙程度的区分使用,为实现一些特定挥发性香气咖啡的工艺提供了科学依据和技术支持^[28]。

2.1 香气提取方法 在分析咖啡烘焙程度不同对咖啡风味品质的影响时,一般采用热脱附法、SPME 和蒸馏萃取法(SDE)等方法提取香气成分^[29],用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME/GC-MS)等方法结合电子鼻对不同烘焙度咖啡豆的挥发性成分进行测定和分析^[30];对于烘焙条件对咖啡豆蛋白质、淀粉、总糖、脂肪和灰分等成分的影响,可用凯氏定氮法、马弗炉法、可见分光光度法、索氏抽提法和滴定管法等方法分析检测^[30]。

2.2 不同烘焙程度的香气成分 提取咖啡香气的热脱附和 SPME 等提取方法对不同种类化合物的吸附能力是不同的,

吸附到的挥发性成分的种类和含量也不同,可以相应地应用在不同的研究领域^[31]。目前共检测到咖啡香气成分 1 000 余种,其中对咖啡风味品质有着比较明显影响的约有 20 种。香气成分中杂环类化合物约有 300 种,这其中包括吡嗪类、吡咯类、噻唑类、噻吩类、呋喃类和咪唑类化合物^[32]。

咖啡烘焙程度大致分为浅度烘焙、中度烘焙和深度烘焙。3 种焙炒程度的咖啡豆挥发性物质成分不同,含量不同^[33]。在咖啡烘焙的过程中,咖啡豆挥发性物质中的吡啶类、噻啶类、内酯类、类酸物质随着烘焙程度的增加其含量不断增加,吡嗪类、醛类、呋喃类、酮类物质随着烘焙程度的增加其含量先增加后减少,但深度烘焙还是比浅度烘焙香气成分含量多,酚类、醇类、烯类、吡啶类、酯类、其他类物质随着烘焙程度的增加其含量先增加而后趋于稳定^[34]。

浅度烘焙中吡嗪类、醇类、烯类和酮类含量较高;中度烘焙中呋喃类、酚类、吡咯类、含硫类含量较高;深度烘焙中醛类、酯类、吡啶类、杂环类含量较高^[35]。其中深度烘焙的香气成分含量最多,整体气味浓厚焦苦;而中度次之,整体风味浓郁香醇;浅度烘焙最少,整体香气较淡^[36]。同时咖啡豆的内部结构也随着烘焙强度的增强而发生变化,使其孔径不断增大,更有利于挥发性物质的挥发^[37]。

2.3 咖啡焙炒程度对咖啡豆风味成分的影响 在焙炒过程中,随着焙炒时间的逐渐增加,咖啡豆的质量反而逐渐减少。焙炒后的咖啡豆质量损失分别为美式 7.05%、法式 15.7%、维也纳式 12.34%、意式 21.8% 以及西班牙式 24.27%^[38]。随着烘焙程度和烘焙温度的增加,咖啡豆的蛋白质和淀粉含量先升高而后稍微下降、总糖含量有较为显著的下降、脂肪

和灰分的含量明显升高。其中各风味成分的变化范围:蛋白质含量 14.50%~17.20%、总糖含量 0.687%~4.340%、淀粉含量 16.30%~25.30%、脂肪含量 7.64%~12.50%,灰分含量 3.47%~5.23%^[39]。

3 咖啡烘焙工艺

基于咖啡烘焙机导热方式的差异性可以将烘焙工艺的方式分类为直火式烘焙、热风式烘焙、半直火半热风式烘焙、微波烘焙等。不同的烘焙技术对咖啡风味品质的影响不同。

3.1 直火式烘焙 直火式烘焙就是对咖啡豆使用火焰直接加热,直火式中使用的火焰除了一般的火焰外,也包括红外线和电热管^[40]。直火式烘焙时间较长,使得焦糖化反应比较充分,味道比较丰富。但同时烘焙桶内温度调整难度大,烘焙过程易发生烘焙不均匀现象;较难控制烘焙过程中的火候,易使得咖啡豆焦化产生生苦味,在生产中较少使用。

3.2 热风式烘焙 热风式烘焙能够在较短时间内将咖啡生豆烘焙成咖啡熟豆,相比于其他烘焙方式其耗能更少,对能源的利用率较高。在全热风烘焙过程中,咖啡豆均虚浮在对流的热风中,传热方便具有较高的均匀性,不容易发生咖啡豆过度烘焙或者破裂的现象^[41]。其缺点就是不容易控制咖啡豆的烘焙程度,对于高品质的咖啡豆的烘焙来说,很难达到相应的要求。由于加热的效率高,会导致温度升高的速度较快,容易发生烘焙后咖啡豆夹生的情况,而且温度升得过高,会使得烘焙过程中咖啡豆的焦糖化反应相对不够充分,而且烘焙机需要充足的预热时间。热风式烘焙机机身相对较大,适合使用在工业化生产中^[42]。

3.3 半直火半热风式烘焙 半直火半热风式烘焙兼备热风式和直火式的优点,火力稳定,使得咖啡生豆内外部组织受热均匀,不同烘焙程度的烘焙都可以实现,例如轻度烘焙、中度烘焙、深度烘焙等。其烘焙程度相较于其他烘焙机型更容易控制把握,即使是没有烘焙经验的咖啡烘焙者也可以烘焙出自己想要的咖啡风味^[43]。半直火式烘焙机微调便利,机型的设计布局合理、结构紧凑,各种大小的机型都可以满足,可以使得咖啡豆的回甘和醇厚程度能最大程度地呈现,宜作为精品咖啡的烘焙。

3.4 微波烘焙 微波烘焙工艺加热快速、节能环保^[44]、烘焙均匀度好,避免了局部焦黑现象,与传统电热烘焙工艺技术相比具有烘焙效率较高、烘焙前无需预热过程、时间成本低且耗能低的优势^[45]。微波烘焙主要是利用微波辐射对咖啡豆进行整体性加热,在很短的时间就可以达到所需的烘焙温度;同时在微波特有的加热方式下,能较好地保留咖啡豆中的一些营养组分及所需的色香味,能够减少咖啡豆收缩损失;微波技术也具有突出的节能效果。但是微波加热的缺点是烘焙不均匀,易使得咖啡豆发生边缘或局部焦化的现象,温度过热会导致咖啡豆产生焦糊味甚至香气品质的进一步恶化,使得咖啡豆品质降低,咖啡豆的质量也因为加热时的不均匀性而有所降低^[46]。在微波加热的过程中,咖啡豆的香气风味也会出现某些变异,这是由于各种挥发性气体成分的不均衡性挥发导致的,从而影响咖啡豆的风味品质^[47]。

4 结论与展望

该研究归纳了咖啡烘焙技术中使用到的几种典型方法,分析了咖啡不同烘焙程度对咖啡豆风味品质的影响,结果表明目前使用前景最广阔的是半直火半热风式烘焙技术。通过热脱附法、SPME 等方法对咖啡香气成分进行提取,使用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)等方法进行测定和分析,发现烘焙程度不同时咖啡所含主要香气成分不同,进而导致咖啡豆风味品质不同。随着咖啡的普及和工艺的发展,在对现有的咖啡烘焙工艺技术的掌握和思考的基础上,可以通过优化咖啡烘焙工艺(如半直火半热风式烘焙等技术),更好地改善咖啡烘焙机的性能,从而提高咖啡豆的烘焙质量,也可以通过精准把控烘焙时间、温度等条件使咖啡的风味品质得到进一步的提升。

参考文献

- [1] 于淼. 云南德宏地区咖啡豆的风味品质特性研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2017.
- [2] 杨静园,董文江,陆敏泉,等. 咖啡豆的热风干燥特性及其干燥过程中风味成分变化规律研究[J]. 热带作物学报,2016,37(5):971-978.
- [3] 郭容琦,罗心平,李国鹏,等. 云南小粒咖啡产业发展现状分析[J]. 广东农业科学,2009,36(3):209-212.
- [4] 王萍. 哥伦比亚咖啡经济与早期工业化[J]. 世界历史,2008(3):71-82.
- [5] 孙娟,熊惠波. 世界咖啡产销情况及中国咖啡产业发展分析[J]. 世界农业,2010(2):38-40.
- [6] 龙文静. 咖啡豆中咖啡因与绿原酸的研究进展[J]. 广西轻工业,2010,26(1):1-2,112.
- [7] TRAN VAN CUONG(陈文强). 咖啡果实干燥特性和烘焙对其成分影响的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [8] HEĆIMOVIĆ I, BELŠČAK-CVITANOVIĆ A, HORŽIĆ D, et al. Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting[J]. Food chemistry, 2011, 129(3):991-1000.
- [9] ANDRIOT I, LE QUÉRÉ J L, GUICHARD E. Interactions between coffee melanoidins and flavour compounds: Impact of freeze-drying (method and time) and roasting degree of coffee on melanoidins retention capacity[J]. Food chemistry, 2004, 85(2):289-294.
- [10] 李梦丽,张付杰,杨薇,等. 云南小粒咖啡烘焙工艺优化及总糖含量的测定[J]. 食品工业科技,2019,40(6):186-192.
- [11] 董文江,张丰,赵建平,等. 云南地区烘焙咖啡豆的风味指纹图谱研究[J]. 热带作物学报,2015,36(10):1903-1911.
- [12] YEN W J, WANG B S, CHANG L W, et al. Antioxidant properties of roasted coffee residues[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2005, 53(7):2658-2663.
- [13] 奉万鑫,吴传宇,曾少毅,等. 吹气式咖啡烘焙机冷却设计[J]. 南方农机,2019,50(17):23-24.
- [14] 丁胜,周炯,王艳萍. 印尼罗布斯塔咖啡豆应用于咖啡饮料开发的研究[J]. 饮料工业,2010,13(4):18-22,28.
- [15] 林兴文,郭铁英,张丽萍,等. 咖啡焙炒与风味品质的形成[J]. 中国热带农业,2014(3):25-27.
- [16] EBRAHIMI-NAJAFABADI H, LEARDI R, OLIVERI P, et al. Detection of addition of barley to coffee using near infrared spectroscopy and chemometric techniques[J]. Talanta, 2012, 99:175-179.
- [17] 何红艳,程金焕,张晓芳,等. 咖啡全热风烘焙技术使用效果及前景分析[J]. 农产品加工,2017(23):56-58,61.
- [18] 吕文佳,翟晓娜,杨刚舟,等. 不同烘焙强度对云南咖啡主要挥发香气成分的影响[J]. 食品科学技术学报,2015,33(3):13-21.
- [19] MAKRI E, TSIMOGLANNIS D, DERMESONLUOGLU E K, et al. Modeling of Greek coffee aroma loss during storage at different temperatures and water activities[J]. Procedia food science, 2011, 1:1111-1117.
- [20] FRANCA A S, OLIVEIRA L S, OLIVEIRA R C S, et al. A preliminary evaluation of the effect of processing temperature on coffee roasting degree assessment[J]. Journal of food engineering, 2009, 92(3):345-352.
- [21] PETISCA C, PÉREZ-PALACIOS T, FARAH A, et al. Furans and other volatile compounds in ground roasted and espresso coffee using headspace solid-phase microextraction: Effect of roasting speed[J]. Food and bio-products processing, 2013, 91(3):233-241.

- [22] BEKEDAM E K, LOOTS M J, SCHOLS H A, et al. Roasting effects on formation mechanisms of coffee brew melanoidins[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2008, 56(16): 7138–7145.
- [23] MOON J K, SHIBAMOTO T. Role of roasting conditions in the profile of volatile flavor chemicals formed from coffee beans[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2009, 57(13): 5823–5831.
- [24] 张梦娇, 王蓓, 李妍, 等. 咖啡中的特征风味组分研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(16): 213–219.
- [25] 李妙清, 张富县, 许淼鑫, 等. 不同焙炒程度下哥伦比亚咖啡豆香气成分分析[J]. *食品工业*, 2017, 38(8): 83–86.
- [26] 周斌, 任洪涛. 烘焙程度对云南小粒咖啡香气品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(22): 68–73.
- [27] 何余勤. 基于电子鼻与 GC-MS 研究咖啡香气变化规律及其调控[D]. 海口: 海南大学, 2017.
- [28] 何余勤, 胡荣锁, 张海德, 等. 基于电子鼻技术检测不同焙烤程度咖啡的特征性香气[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 247–255.
- [29] 周斌, 任洪涛, 秦太峰. 两种前处理方法在云南小粒咖啡香气成分分析中的对比[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(7): 1716–1720.
- [30] 王莹. 不同烘焙度兴隆咖啡成分分析及烘焙工艺对品质的影响[D]. 哈尔滨: 黑龙江东方学院, 2018.
- [31] YERETZIAN C, PASCUAL E C, GOODMAN B A. Effect of roasting conditions and grinding on free radical contents of coffee beans stored in air[J]. *Food chemistry*, 2012, 131(3): 811–816.
- [32] BHUMIRATANA N, ADHIKARI K, CHAMBERS E I V. Evolution of sensory aroma attributes from coffee beans to brewed coffee[J]. *LWT-food science and technology*, 2011, 44(10): 2185–2192.
- [33] SCHIEBER A, WEBER F. Food research international special issue phytochemical profiles[J]. *Food research international*, 2017, 100(3): 325.
- [34] DORFNER R, FERGE T, KETTRUP A, et al. Real-time monitoring of 4-vinylguaiacol, couaiacol, and phenol during coffee roasting by resonant laser ionization time-of-flight mass spectrometry[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2003, 51(19): 5768–5773.
- [35] SCHRAMM E, HÖLZER J, PÜTZ M, et al. Real-time trace detection of security-relevant compounds in complex sample matrices by thermal desorption-single photon ionization-ion trap mass spectrometry (TD-SPI-IT-MS) Spectrometry (TD-SPI-ITMS) [J]. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2009, 395(6): 1795–1807.
- [36] BAGGENSTOSS J, POISSON L, KAEGLI R, et al. Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2008, 56(14): 5836–5846.
- [37] WEI F F, FURIHATA K, KODA M, et al. Roasting process of coffee beans as studied by nuclear magnetic resonance: Time course of changes in composition[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2012, 60(4): 1005–1012.
- [38] OKAMOTO A, SUGI E, KOIZUMI Y, et al. Polyamine content of ordinary foodstuffs and various fermented foods[J]. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 1997, 61(9): 1582–1584.
- [39] CIRILO M P G, COELHO A F S, ARAÚJO C M, et al. Profile and levels of bioactive amines in green and roasted coffee[J]. *Food chemistry*, 2003, 82(3): 397–402.
- [40] 吕文佳, 刘云, 杨凯舟, 等. 咖啡主要烘焙风味物质的形成及变化规律[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(3): 394–400.
- [41] 蔡瑞玲, 韩英素, 赵晋府, 等. 焙炒条件对咖啡风味影响的研究[J]. *饮料工业*, 2003, 6(6): 32–37.
- [42] 张丰, 董文江, 王凯丽, 等. 云南不同地区烘焙咖啡豆挥发性成分的 HS-SPME/GC-MS 分析[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(11): 273–280.
- [43] 刘亚玲, 谭超, 龚加顺. 云南不同地区烘焙咖啡豆主要成分分析及类黑精组成成分[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 176–183.
- [44] 张付杰, 王璐, 杨薇, 等. 小粒咖啡微波烘焙工艺优化及破裂力分析[J]. *食品与机械*, 2019, 35(6): 182–187, 221.
- [45] 陈健凯, 林河通, 林芝芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 277–284.
- [46] 邵静娜, 孙威江, 葛国平, 等. 微波-远红外技术烘焙乌龙茶的工艺研究[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(8): 156–164.
- [47] 王顺民, 胡志超, 韩永斌, 等. 微波干燥均匀性研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 297–300.

(上接第 15 页)

- [46] 陈海红, 骆永明, 滕应, 等. 重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 302–307.
- [47] VILLA R D, TROVÓ A G, NOGUEIRA R F P. Soil remediation using a coupled process; Soil washing with surfactant followed by photo-Fenton oxidation[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 174(1/2/3): 770–775.
- [48] BALAWEDER M, ANTOS P, CZYJT-KURYŁO S, et al. A novel method for degradation of DDT in contaminated soil[J]. *Ozone: Sci Eng*, 2014, 36(2): 166–173.
- [49] BALAWEDER M, JÓZEFczyk R, ANTOS P, et al. Pilot-scale installation for remediation of DDT-contaminated soil[J]. *Ozone: Sci Eng*, 2016, 38(4): 272–278.
- [50] SINGH S P, BOSE P. Degradation of soil-adsorbed DDT and its residues by NZVI addition[J]. *RSC Adv*, 2015, 5(114): 94418–94425.
- [51] EL-TEMSAH Y S, OUGHTON D H, JONER E J. Effects of nano-sized zero-valent iron on DDT degradation and residual toxicity in soil: A column experiment[J]. *Plant Soil*, 2013, 368(1/2): 189–200.
- [52] 隋红, 李海波, 宋静, 等. 高浓度 DDTs 污染土壤机械化学球磨试剂筛选[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(8): 1227–1233.
- [53] MO C H, CAI Q Y, LI H Q, et al. Potential of different species for use in removal of DDT from the contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(1): 120–125.
- [54] GURSKA J, WANG W X, GERHARDT K E, et al. Three year field test of a plant growth promoting rhizobacteria enhanced phytoremediation system at a land farm for treatment of hydrocarbon waste[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(12): 4472–4479.
- [55] DÍAZ-FUENMAYOR K J, PANTOJA-GUERRA M, TORRES-PALMA R A, et al. Changes on the bioavailability of DDT in soil by addition of lignite and coal solubilizing bacteria[J]. *Rev Int Contam Ambie*, 2017, 33(2): 259–268.
- [56] LIANG Q, LEI M, CHEN T B, et al. Application of sewage sludge and intermittent aeration strategy to the bioremediation of DDT-and HCH-contaminated soil[J]. *J Environ Sci*, 2014, 26(8): 1673–1680.
- [57] JIN X, KENGARA F O, YUE X H, et al. Shorter interval and multiple flooding-drying cycling enhanced the mineralization of ¹⁴C-DDT in a paddy soil[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 676: 420–428.
- [58] TUOMELA M, VIKKANEN M, HATAKKA A, et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review[J]. *Bioresour Technol*, 2000, 72(2): 169–183.
- [59] 潘淑颖, 马光辉, 常勇, 等. 土壤中 DDT 的微生物修复研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(3): 1058–1060.
- [60] GAO C M, JIN X X, REN J B, et al. Bioaugmentation of DDT-contaminated soil by dissemination of the catabolic plasmid pDOD[J]. *J Environ Sci*, 2015, 27: 42–50.
- [61] 吕良禾, 张鸿龄, 陈宗聪, 等. 表面活性剂强化油菜-微生物联合修复滴滴涕污染农田土壤研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(8): 755–761.
- [62] 高寒, 陈娟, 王沛芳, 等. 农药污染土壤的生物强化修复技术研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(3): 425–433.