

高值化烟草提取物的应用研究进展

陆颖昭, 李龙, 李德贵 (上海烟草集团太仓海烟烟草薄片有限公司技术中心, 江苏苏州 215433)

摘要 高值化烟草提取物是烟草工业的重要产物, 丰富了烟草行业的经济价值, 是烟草领域近些年的研究热点。综述了3种常见高值化烟草提取物(烟碱、茄尼醇以及绿原酸)近年来在生物、农业、医药等多个领域的应用及研究现状, 并对高值化烟草提取物未来的应用及发展进行了展望。

关键词 烟草提取物; 烟碱; 茄尼醇; 绿原酸; 高值化

中图分类号 TS41⁺1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)22-0014-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.22.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Application of High Value Tobacco Extract

LU Ying-zhao, LI Long, LI De-gui (Technology Center, Taicang Haiyan Reconstituted Tobacco Co., Ltd., Shanghai Tobacco Group, Suzhou, Jiangsu 215433)

Abstract High value tobacco extract is an important product of the tobacco industry, which enriches the economic value of the tobacco industry, and is a research hotspot in the field of tobacco in recent years. This paper reviewed the application and research status of three common high value tobacco extracts: nicotine, solanesol and chlorogenic acid in biology, agriculture, medicine and other fields in recent years, and prospected the application and development of high value tobacco extracts in the future.

Key words Tobacco extract; Nicotine; Solanesol; Chlorogenic acid; High value

近年来,随着消费者群体的变更和消费习惯的改变,加上人们健康意识的不断提升和环保理念的持续增强,传统烟草行业的发展遇到一定瓶颈。在此背景下,以烟草或烟草废弃物为原料提取不同产物并实现高值化利用,成为烟草行业发展新思路之一。研究显示^[1],烟草中含有烟碱、茄尼醇、绿原酸等有用成分,可应用于医药、生物、化学等领域,具有广阔的研究前景。对烟草及烟草废弃物加以利用,通过萃取、蒸馏等方式获得多种不同成分、适用于不同用途的烟草提取物,进而实现高值化绿色利用,可为烟草行业开拓新的发展道路。

目前已有不少烟草提取物高值化利用的研究,但相关的综述类文献较少。笔者重点综述了烟碱、茄尼醇、绿原酸等烟草提取物的利用方面,旨在填补相关领域的空缺。

1 烟碱的应用研究

烟碱俗称尼古丁,是一种广泛存在于烟草中的生物碱,可通过提取烟草原料的方式获得。烟碱为油状液态物质,可溶于乙醇或水。在人们传统认知和以往文献报道中,烟碱具有一定的药理学毒性,可致成瘾并引发癌症或心血管等方面的疾病,对人体健康造成了较大威胁^[2]。近些年有学者对烟碱的利用价值进行了研究。烟碱在医学及生物学领域的应用有助于改变其在人们心目中“令人谈之色变”的旧有印象,实现“变害为宝”。烟草工业每年都会产生大量废弃物,如烟梗、烟片、烟末等。对烟草提取物烟碱的高值化利用,也为烟草废弃物的回收利用和环境保护提供了新思路。

1.1 抗帕金森氏综合征 中国科学院生物物理研究所赵保路^[3]发现烟碱可有效降低吸烟者罹患帕金森氏综合征和老年痴呆症的概率,并对其中的分子机理进行了研究。一系列

的试验结果显示,烟碱在清除活性氧自由基并抑制多巴胺氧化,保护海马神经元,防止锌、铜金属在大脑中聚集等方面发挥了较大作用,为吸烟患者的低帕金森氏综合征和老年痴呆症发病率提供了一定的依据。大鼠试验显示,尼古丁还可减轻左旋多巴治疗帕金森病时引发的异动症^[4]。Han等^[5]探讨了烟碱对缺血大鼠认知功能障碍的改善效果及改善机制。对大鼠进行缺血模型手术,并对其中部分大鼠注射烟碱。注射了烟碱的大鼠比未注射的大鼠拥有更好的记忆力,在 Morris 水迷宫中的表现更好。进一步研究发现,尼古丁通过激活 $\alpha 4$ 型烟碱乙酰胆碱受体和 $\beta 2$ 型烟碱乙酰胆碱受体的方式发挥抑制炎症因子的作用,改善缺血大鼠的认知功能障碍,从而为帕金森氏综合征的预防和治疗提供了新的思路。

1.2 抑制雌激素 对女性而言,雌激素可促进细胞增殖,增大子宫内腺癌、乳腺癌等疾病的发病概率。控制雌激素的生成对女性健康具有重要意义。根据“两细胞-两促性腺激素(2-cell, 2-gonadotropin model)”学说,雄烯二酮是雌激素的前身物质,而芳香化酶被激活后可将雄烯二酮转化为雌酮,即雌激素^[6]。早在20世纪80年代,Barbieri等^[7]体外试验发现,烟碱及其类似物质可直接抑制芳香化酶的活性,从而抑制人卵泡颗粒细胞中的雄烯二酮被转化为雌激素。抑制效果同烟碱的剂量呈正相关性。Sanders等^[8]将不同浓度的烟碱分别加入牛卵泡内膜内,并持续观察24h。检测结果显示,随着烟碱浓度的升高,雄烯二酮的分泌量逐渐下降。当尼古丁浓度为0.6 mmol/L时,雄烯二酮的分泌量仅为正常水平的24%。烟碱也可通过影响雌激素的转运过程,降低人体内雌激素含量。Cassidenti等^[9]通过样品检测发现,吸烟者体内的性激素结合球蛋白含量比非吸烟者更高,具有生物学活性的雌激素数量减少,进而导致可作用于靶组织的活性雌激素数量降低。

1.3 协助心肌梗死患者康复 于海波等^[10]发现烟碱对心肌

作者简介 陆颖昭(1993—),男,江苏南通人,助理工程师,硕士,从事烟草化学及科技工作。

收稿日期 2021-03-09

细胞存在保护作用。对心肌梗死的大鼠试验显示,烟碱可有效改善大鼠的心室舒张与收缩功能,进而改善心功能、缓解心肌缺血症状。进一步研究发现,使用烟碱治疗的心肌梗死大鼠的机械痛阈变大、热痛阈变小,因缺血导致的心脏疼痛得到明显缓解^[11]。倘若研究结果能应用于临床,无疑将给心梗患者的康复提供更多有效方案。

1.4 杀虫 研究表明,烟碱对潜叶蛾、介壳虫等多种常见农作物害虫均具有较高的杀虫活性,杀虫谱广,且能持续较长的药效时间。烟碱杀虫剂的使用灵活方便,可单独使用也可与其他化学杀虫剂联合使用,在农业领域具有广阔的应用空间。制备烟碱杀虫剂的原料来源广泛,通常有烟梗、烟叶以及卷烟厂的烟末等废料,有效降低了烟碱杀虫剂的生产成本^[12]。方加贵等^[13]将含有烟碱的烟叶超微粒粉、茶枯、硅油等按比例混合制备杀虫药剂,当烟叶超微粒粉比例达 93% 时,药剂对石榴蚜虫的防效可达 60.5%。袁家瑜等^[14]对比了吡虫啉、噻虫嗪、氟啶虫胺胍 3 种烟碱杀虫剂对月季长管蚜虫的杀灭效果,发现 3 种杀虫剂均可起到较好的杀虫效果,其中噻虫嗪效果最佳。但大量烟碱杀虫剂的使用增大了害虫的抗药性,而烟碱本身的毒性对周围环境及使用者的身体健康均造成了威胁^[15]。华东理工大学研究了一种以环氧虫啉为主要杀虫成分的新烟碱类杀虫剂^[16]。由于作用机理不同,环氧虫啉不会与吡虫啉等其他烟碱杀虫剂产生交互抗性。毒理学研究表明,环氧虫啉对鱼类、藻类、土壤微生物以及其他植物的毒性甚微,而对哺乳动物的急性毒性也显示为低毒。

1.5 抗菌 除杀灭害虫,研究显示烟碱对细菌也有杀灭作用。Kudelska 等^[17]在关于线虫取食行为的研究中发现,高浓度的尼古丁对大肠杆菌具有直接的抑制作用。尼古丁的抑菌效果与其浓度相关。当尼古丁浓度达 5 mmol/L 时,大肠杆菌的生长受到部分抑制;当尼古丁浓度达 10 mmol/L 时大肠杆菌的生长受到完全抑制。

2 茄尼醇的应用研究

茄尼醇广泛存在于马铃薯叶或烟叶中,可从烟草废弃物中提取获得^[18]。通常情况下茄尼醇为蜡状固体或白色粉末,若混入杂质则有可能呈淡黄色。茄尼醇是一种不饱和聚异戊二烯醇,可溶于丙酮等有机溶剂,具有抗菌、抗癌、抗炎、抗溃疡等生物活性。相比于烟碱,茄尼醇在人们传统认知中拥有更正面的评价,且其提取、纯化、分离等技术均已有了较为系统的研究^[19]。茄尼醇在转化生成辅酶 Q10、抗氧化、治疗牙周炎、抗菌等方面均有较高的应用价值,而茄尼醇可来源于烟草废弃物的特点则降低了制备成本,为相关产品的大规模工业化生产提供了经济可行性。

2.1 制备辅酶 Q10 辅酶 Q10 又被称为维生素 Q,广泛存在于心、肾、肝等人体内脏中,在能量代谢、生物体细胞呼吸等众多重要生理功能中起到了作用^[20]。辅酶 Q10 可以茄尼醇为原料通过微生物转化的方式获得。柳华贵等^[21]将茄尼醇添加入属于鞘氨醇单孢菌属的 *Sphingomonas* sp.ZUTE03 菌株溶液中,分别探究了茄尼醇加入时间、浓度以及反应时间对

辅酶 Q10 产量的影响。结果显示,茄尼醇添加时间为菌株溶液培养 12 h、终浓度 0.75 g/L、添加后继续反应时间 12 h 时,辅酶 Q10 产量最高,可达 96.88 mg/L。采用微生物发酵法,选择以烟草废弃物为原料制备的茄尼醇,可有效降低辅酶 Q10 的经济成本,有利于实现规模化工业生产。

辅酶 Q10 难溶于水,作为口服药时的生物利用度不高。Qin 等^[22]以茄尼醇和聚乙二醇琥珀酸为原料制备聚乙二醇琥珀酸茄尼酯(SPGS),再与辅酶 Q10 配制成 Q10-SPGS 胶束。检测结果表明,Q10-SPGS 胶束的辅酶 Q10 最大负载量可超过 39%,而随着 SPGS 分子量的变化,辅酶 Q10 的口服生物利用度较原始辅酶 Q10 混悬液提高了 3 倍左右,有效提高了患者的药物吸收。

2.2 抗癌 由分子结构可知,茄尼醇拥有多个非共轭双键,对自由基具有极好的吸收性能^[23]。马玉兰^[24]等研究了茄尼醇在抗氧化领域的作用,通过体外试验测定了茄尼醇对 2 种最主要氧自由基(超氧阴离子和羟自由基)的清除能力。结果显示,当茄尼醇含量为 8 mmol/L 时,超氧阴离子的清除率高达 82.4%;当茄尼醇含量为 4 mmol/L 时,羟自由基的清除率接近 50%。除自身的抗癌作用外,茄尼醇还可合成制备衍生物,用作抗癌药物的载体。体内试验表明茄尼醇衍生物药物载体本身对肿瘤有明显的抑制效果,可与搭载的抗癌药物产生协同作用^[25]。茄尼醇对活性氧自由基的良好清除效果,为防止 DNA 损伤、抗击癌症等提供了新的思路。以茄尼醇为原料,可制备副作用小、绿色天然的抗氧化剂。

2.3 治疗牙周炎 牙周炎由口腔内的微生物引起,是一种慢性炎症类疾病,可影响牙槽骨、牙龈、牙周韧带等多个位置,为患者带来了较大的痛苦^[26]。近年来,有学者开始研究将茄尼醇应用于牙周炎的治疗中。张蕊等^[27]给患有牙周炎的大鼠灌食用调和油稀释的茄尼醇,并持续观察大鼠的牙周炎进展。结果表明,服用茄尼醇后大鼠血浆内的炎症因子出现下调,抗氧化能力得到增强,牙周炎得到有效缓解。

2.4 抗菌 陈保汉等^[28]以革兰氏阳性和革兰氏阴性菌为杀灭对象,采取琼脂扩散法和 2 倍稀释法探究了茄尼醇的体外抗菌性。结果显示,在一定浓度下,茄尼醇对大多数革兰氏阳性和革兰氏阴性菌都具有良好的抗菌活性,其中对金黄色葡萄球菌和大肠埃希氏菌等的灭菌活性最强。茄尼醇的半合成衍生物也有较好的抗菌效果。Xiang 等^[25]以茄尼醇为原料制备了 6 种不同酸氯化物的半合成衍生物,测试它们对大肠杆菌、伤寒沙门氏菌、蜡样芽孢杆菌、真菌 4 种细菌的灭菌活性。通过圆盘扩散法,发现 6 种茄尼醇半合成衍生物均具有较好的灭菌作用。

3 绿原酸的应用研究

绿原酸常见于杜仲、烟草、金银花等天然植物,是烟草中唯一的单宁类化合物。绿原酸易溶于乙醇、丙酮等有机溶剂,可通过乙醇抽提等方式获得。绿原酸具有广泛的生物活性,目前已被应用在保健、食品、医药、日用化工等多个领域^[29]。然而与烟碱、茄尼醇相比,绿原酸作为烟草提取物的知名度并不高。

3.1 降脂 随着生活水平的不断提高,营养过度现象越发普遍,由此导致的肥胖已成为人体健康的一大威胁。因此,减肥降脂成为当今人们关注的热点话题之一。Wang等^[30]利用高脂肪饲料喂养小鼠,并对其中部分小鼠采用绿原酸治疗。42 d,使用绿原酸治疗的小鼠平均体重增加速度明显放缓,仅为未使用绿原酸治疗小鼠平均体重的87%。另外,研究表明绿原酸可显著调整与肥胖相关的肠道菌群组成。He等^[31]进一步探究了绿原酸降脂的机理。高脂肪饮食导致肥胖的小鼠服用绿原酸后,出现食物摄入量明显降低、体温升高、热量散失和褐色脂肪组织活动增加等症状。通过调节摄食量和能量消耗,试验小鼠的肥胖现象得到明显改善。绿原酸的降脂作用,为绿色天然减肥药的研制提供了思路。

3.2 抗癌 因安全系数高、副作用小等优势,天然植物提取物对癌细胞的抑制作用近年来成为研究热门领域之一。周佳彬等^[32]通过体外试验的方式探索了不同浓度绿原酸对人胶质瘤细胞 U251 细胞的抑制效果,并建立了与反应时间的联系。当绿原酸浓度为 160 mg/L、反应时间为 72 h 时,U251 细胞出现明显的固缩、碎裂现象,存活率仅为 36%左右。10 种绿原酸取代的苯甲酰胺及苯乙酰胺类衍生物通过缩合法被成功制备,并分别与人宫颈癌 HeLa 细胞、人肝癌 HepG2 细胞、人盲肠腺癌 HCT-8 细胞作用。探究了绿原酸酰胺类衍生物对上述癌细胞的体外增殖活性的影响。10 种绿原酸酰胺类衍生物对人盲肠腺癌 HCT-8 细胞均具有良好的抑制效果,且均优于传统抗癌药顺铂^[33]

3.3 抗菌 与烟碱、茄尼醇等烟草提取物相似,绿原酸也有一定的抑菌作用。陈昱敏等^[34]配制了不同浓度的绿原酸溶液,通过滤纸片法分别测定其对变形链球菌的抑制效果。结果发现绿原酸溶液对变形链球菌有抑制作用,但抑制效果与绿原酸的溶度不存在明显关联。变形链球菌是引起龋齿的主要原因,绿原酸溶液对其的抑制效果为含绿原酸漱口水、牙膏等口腔护理产品的开发提供了理论依据。

3.4 饲料添加剂 绿原酸具有重要的生物活性,可提高水产动物、家畜或家禽的中枢神经兴奋度、增强肠胃肠道消化酶活性,因此常被用作动物饲料的添加剂^[35]。在饲料中添加 0.04%绿原酸,经过 60 d 的饲养后草鱼的增重率、肥满度以及存活率均有所提高,而鱼肉中蛋白、必需氨基酸的含量也显著增加^[36]。朱原等^[37]将 1.0 mg/mL 浓度的绿原酸与布氏乳杆菌共同发酵培养 8 h,再用发酵产物持续喂养雏鸡。经过观察,雏鸡盲肠内的大肠杆菌数量出现明显下降,雏鸡大肠杆菌感染死亡率下降,存活率和免疫力明显提高。与此同时,雏鸡盲肠内的乳酸菌、乳杆菌、双歧杆菌等有益菌群的数量均有所增加。绿原酸具有取代抗生素、成为动物饲料新型添加剂的潜力。

绿原酸的抗菌、抗癌性能和生物活性使其在医疗或畜牧领域具有广阔的应用空间,而在动物饲料方面已有较为成熟的应用。相比于金银花、杜仲等中药材,从烟梗、烟片等烟草废弃物中提取绿原酸,可降低制备成本,真正实现变废为宝。

4 总结与展望

烟碱、茄尼醇、绿原酸 3 种高值化烟草提取物的常见应用领域见表 1。

表 1 烟碱、茄尼醇和绿原酸 3 种高值化烟草提取物的常见应用领域
Table 1 Common application fields of high value tobacco extracts from nicotine, solanesol and chlorogenic acid

序号 No.	名称 Name	常见应用领域 Common application field
1	烟碱	抗帕金森氏综合征 抑制雌激素 协助心肌梗死患者康复 抗菌 杀虫
2	茄尼醇	制备辅酶 Q10 抗癌 治疗牙周炎 抗菌
3	绿原酸	降脂 抗癌 抗菌 饲料添加剂

烟草提取物具有广阔的应用前景和良好的研究价值,与医疗、抗菌、杀虫、动物饲养等多个领域建立了密切联系,近年来已成为医学及农林行业的研究热点之一。如能实现烟草提取物的工业化规模生产及高值化利用,有望带来可观的经济效益。但当前我国对烟草提取物尤其是烟碱的开发、应用程度还较低,仍需加大探索和开发的力度。另外,我国实行烟草专营专卖制度,对烟草原料及相关产品的管理都较为严格。因此,如何在符合相关法律法规的前提下实现烟草提取物的深化利用和工业化规模生产,需要进一步研究。

参考文献

- [1] 李文斌,庄倩,邓红艳,等.烟草生产废弃物的资源化利用探析[J].环境保护与循环经济,2018,38(5):8-9.
- [2] 苗苗,张虹.戒烟对心血管疾病影响的研究进展[J].中西医结合心脑血管病杂志,2020,18(8):1241-1243.
- [3] 赵保路.尼古丁预防帕金森氏综合症和老年痴呆症的分子机理研究[J].生物物理学报,2007,23(2):81-92.
- [4] 李丹.尼古丁对帕金森病大鼠异动症的作用及其机制研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [5] HAN T T, WANG Q, LAI R H, et al. Nicotine induced neurocognitive protection and anti-inflammation effect by activating $\alpha_4\beta_2$ nAChRs in ischemic rats[J]. Nicotine & tobacco research, 2020, 22(6): 919-924.
- [6] HILLIER S G, WHITELAW P F, SMYTH C D. Follicular estrogen synthesis-the 2-cell, 2-gonadotropin model revisited[J]. Molecular and cellular endocrinology, 1994, 100(1/2): 51-54.
- [7] BARBIERI R L, GOCHBERG J, RYAN K J. Nicotine, cotinine, and anabasine inhibit aromatase in human trophoblast *in vitro* [J]. Journal of clinical investigation, 1986, 77(6): 1727-1733.
- [8] SANDERS S R, CUNEO S P, TURZILLO A M. Effects of nicotine and cotinine on bovine theca interna and granulosa cells[J]. Reproductive toxicology, 2002, 16(6): 795-800.
- [9] CASSIDENTI D L, VIJOD A G, VIJOD M A, et al. Short-term effects of smoking on the pharmacokinetic profiles of micronized estradiol in postmenopausal women[J]. American journal of obstetrics & gynecology, 1990, 163(6): 1953-1960.
- [10] 于海波,李晶,于海涛,等.烟碱对心肌梗死大鼠心功能及乳脂球表皮生长因子影响的研究[J].微量元素与健康研究,2020,37(3):1-2,6.
- [11] 薛晴,于海波,李晶,等.烟碱对心肌梗死大鼠痛阈可塑性变化的影响及心脏保护作用[J].中国比较医学杂志,2020,30(1):17-20,44.

- [12] 程浩淼,成凌,朱腾义,等.新烟碱类农药在土壤中环境行为的研究进展[J].中国环境科学,2020,40(2):736-747.
- [13] 方加贵,余祥文,郑莉,等.新型烟碱杀虫剂对石榴蚜虫的防效试验初报(英文)[J].农业科学与技术:英文版,2016,17(7):1663-1666.
- [14] 袁家瑜,韩攀,王导,等.3种新烟碱类杀虫剂对月季长管蚜的室内毒力测定实验初报[J].南方农业,2020,14(2):155-157.
- [15] 徐晓勇.反抗性新烟碱杀虫剂的开发[J].科技创新导报,2016,13(1):164-165.
- [16] 谭海军.新烟碱类杀虫剂环氧虫啉及其开发[J].世界农药,2019,41(4):59-64.
- [17] KUDELSKA M M, LEWIS A, NG C T, et al. Investigation of feeding behaviour in *C. elegans* reveals distinct pharmacological and antibacterial effects of nicotine[J]. Invertebrate neuroscience, 2018, 18(4): 1-14
- [18] MACHADO P A, FU H, KRATOCHVIL R J, et al. Recovery of solanesol from tobacco as a value-added byproduct for alternative applications[J]. Bioresource technology, 2010, 101(3): 1091-1096.
- [19] YAN T J, ZHAO G J, WU F G, et al. Research progress on solanesol extraction from tobacco wastes[J]. Mini-reviews in organic chemistry, 2020, 17(1): 113-121.
- [20] 杜家文,黄建忠,江贤章.辅酶 Q10 生物合成代谢调控策略研究进展[J].生物化工,2020,6(1):135-137.
- [21] 柳华贵,方建军,金陵,等.茄尼醇转化高产辅酶 Q₁₀ 菌株的分离鉴定与发酵条件的研究[J].微生物学报,2008,48(2):157-163.
- [22] QIN B K, LIU L, PAN Y Y, et al. PEGylated solanesol for oral delivery of coenzyme Q₁₀ [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2017, 65(16): 3360-3367.
- [23] QI H M, ZHANG Q B, ZHAO T T, et al. Antioxidant activity of different sulfate content derivatives of polysaccharide extracted from *Ulva pertusa* (Chlorophyta) *in vitro* [J]. International journal of biological macromolecules, 2005, 37(4): 195-199.
- [24] 马玉兰,侯天德,张继,等.茄尼醇的抗氧化实验研究[J].食品研究与开发,2011,32(2):8-12.
- [25] XIONG Y, HOU T, LIU L, et al. Solanesol derived therapeutic carriers for anticancer drug delivery[J]. International journal of pharmaceutics, 2019, 572: 1-13.
- [26] 朱侠.活性氧在牙周炎中病理作用的研究进展[J].智慧健康,2020,6(9):71-72.
- [27] 张蕊,汪显国,任晓斌,等.茄尼醇对大鼠实验性牙周炎的影响[J].中国民族民间医药,2018,27(6):31-40.
- [28] 陈保汉,张君,余荷秀,等.医药中间体茄尼醇的体外抗菌活性研究[J].齐鲁药事,2007,26(9):558-559.
- [29] 王玲娜,姚佳欢,马超美.绿原酸的研究进展[J].食品与生物技术学报,2017,36(11):1121-1130.
- [30] WANG Z Y, LAM K L, HU J M, et al. Chlorogenic acid alleviates obesity and modulates gut microbiota in high-fat-fed mice[J]. Food science & nutrition, 2019, 7(2): 579-588.
- [31] HE X Y, ZHENG S J, SHENG Y, et al. Chlorogenic acid ameliorates obesity by preventing energy balance shift in high-fat diet induced obese mice[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2021, 101(2): 631-637.
- [32] 周佳彬,陈俊,刘臣,等.绿原酸对人胶质瘤细胞 U251 的抗肿瘤活性及其促凋亡机制[J].肿瘤防治研究,2019,46(5):389-394.
- [33] 张希,许旭东,田瑜,等.绿原酸衍生物的合成及体外抗肿瘤活性研究[J].中草药,2020,51(4):937-942.
- [34] 陈昱敏,许斯华,张泽,等.绿原酸对变形链球菌抑制作用的体外实验研究[J].赣南医学院学报,2019,39(4):341-342,346.
- [35] 石英.绿原酸在水产饲料中的应用研究进展[J].山东畜牧兽医,2018,39(3):83-85.
- [36] 李乃顺,冷向军,李小勤,等.绿原酸对草鱼鱼种生长、非特异性免疫和肉质的影响[J].水生生物学报,2014,38(4):619-626.
- [37] 朱原,李欣泽,郝贺,等.甜叶菊绿原酸发酵液对雏鸡肠道菌群的影响[J].饲料工业,2020,41(13):27-33.

(上接第 13 页)

- [57] 吴昱.施加生物炭对黑土区坡耕地土地生产力的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2019.
- [58] 刘怀优.生物炭在酸性土壤改良中的应用[J].生物化工,2020,6(4):126-129,142.
- [59] 廖萍,汤军,曾勇军,等.生物炭和石灰对酸性稻田水稻产量、土壤性状和经济效益的影响[J].中国稻米,2019,25(1):44-48.
- [60] 肖和友,李宏图,杨勇,等.烟草废弃物生物炭对植烟土壤、烤烟生长及经济效益的影响[J].湖南农业科学,2018(6):36-39,43.
- [61] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.
- [62] 唐光木,葛春辉,徐万里,等.施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1797-1802.
- [63] LEHMANN J. Bio-energy in the black[J]. Frontiers in ecology and the environment, 2007, 5(7): 381-387.
- [64] LIU Q, ZHANG Y H, LIU B J, et al. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis[J]. Plant and soil, 2018, 426(1/2): 211-225.
- [65] 李贞霞,任秀娟,祁雪娇,等.辣椒秸秆生物炭对酸化土壤交换性能及酶活性的影响[J].西北农业学报,2019,28(1):117-124.
- [66] 王义祥,辛思洁,叶菁,等.生物炭对强酸性茶园土壤酸度的改良效果研究[J].中国农学通报,2018,34(12):108-111.
- [67] 孙贇, MUHAMMAD SHAABAN, 何志龙, 等. 生物炭对茶园土壤改良及茶叶品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 9-14.
- [68] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [69] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2007, 118(1/2/3/4): 6-28.
- [70] 王丽渊. 生物炭对植烟土壤主要性状及烤烟生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [71] 郑悦. 生物炭与秸秆还田对盐碱地水稻土壤理化性状及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [72] 张芙蓉, 赵丽娜, 张瑞, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良及甜瓜生长的影响[J]. 上海农业学报, 2015, 31(1): 54-58.
- [73] 《关于编制“十三五”秸秆综合利用实施方案的指导意见》印发[J]. 再生资源与循环经济, 2016, 9(12): 7.
- [74] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报, 2020-12-22(010).
- [75] SHEN X, HUANG D Y, REN X F, et al. Phytoavailability of Cd and Pb in crop straw biochar-amended soil is related to the heavy metal content of both biochar and soil[J]. Journal of environmental management, 2016, 168(1): 245-251.
- [76] KUS'MIERZ M, OLESZCZUK P. Biochar production increases the polycyclic aromatic hydrocarbon content in surrounding soils and potential cancer risk[J]. Environmental science and pollution research, 2014, 21(5): 3646-3652.
- [77] 蔡婧. 城市个体黑碳暴露特征与儿童呼吸道健康效应关系研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [78] 凌遵学, 张仁仁. 生物炭基尿素对棉花性状、产量及经济效益的影响[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(6): 58-60.
- [79] 郭海艳. 蟹壳生物炭对水体富磷除铅性能及其机理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.