

介质阻挡放电在农业领域的应用研究进展

毛雪飞^{1,2} 齐悦涵^{1,2} 王世光³ 刘霁欣^{1,2} 王 敏^{1,2} 钱永忠^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 北京 100081; 2. 农业部农产品质量安全重点实验室, 北京 100081;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 介质阻挡放电 (DBD) 是目前放电技术研究的焦点, 具有简单、低廉、易控制、能耗少、用途广等特点, 但在农业领域的应用尚处于起步阶段。本文结合近年来的研究成果, 对 DBD 在农业育种、农产品加工与贮藏、农业工程、农业环境保护以及农产品质量安全等农业热点领域的研究进行论述, 分析与探讨相关的技术要点和存在的问题, 并对 DBD 技术在农业领域的应用前景进行展望。

关键词: 介质阻挡放电; 育种; 农产品加工; 农业机械; 农业环境; 农产品质量安全

中图分类号: O539; S12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0216-12

Review for Application of Dielectric Barrier Discharge in Agriculture

Mao Xuefei^{1,2} Qi Yuehan^{1,2} Wang Shiguang³ Liu Jixin^{1,2} Wang Min^{1,2} Qian Yongzhong^{1,2}

(1. *Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products,*
Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2. *Key Laboratory of Agro-food Safety and Quality, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*

3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: Dielectric barrier discharge (DBD) is hot focus of the discharge technology at present, which owns some advantages, such as simplicity, low cost, easy operation, low-energy consumption, extensive usages and so on. When the DBD reactor worked with two electrodes, the non-thermal plasma (NTP) was ignited by Ar, He, N₂, O₂ or their mixtures as working gas, which could produce a large amount of X-ray, free radicals, ions, excited atoms and other highly active substances. Hence, the NTP is capable of providing sufficient energy for many chemical reactions. Although the NTP technique could be employed to the nearly whole agricultural production chain from the environment to products, the applications of DBD in agricultural field were just at the beginning step so far. According to the recent references, the detailed conditions of DBD application in agricultural breeding, sterilization, processing and storage, mechanization and engineering, environmental protection, and agro-food quality and safety were introduced. For breeding, DBD could be applied to microbial mutation and seed quality treatment; for the processing of agricultural product, DBD could be employed to sterilization, washing, starch modification, fruit and vegetable storage via ethylene degradation, and so on; for equipment, DBD could be used as a core unit for the ozone generator; for environment protection, DBD could be utilized to degrade microbes, pesticide and veterinary residues, persistent organic pollutants and others in water and soil, and particle matter (PM), total hydrocarbon (THC), NO_x, etc. in tail gas from machines; for analytical instrumentation, DBD usually served as an ionization source for mass spectrometry, and an atomizer and excitation unit for atomic spectrometry. In addition, in order to improve the modern

收稿日期: 2016-01-12 修回日期: 2016-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301491、31571924)

作者简介: 毛雪飞(1983—),男,助理研究员,博士,主要从事农产品质量安全检测技术研究,E-mail: mxf08@163.com

通信作者: 刘霁欣(1975—),男,教授级高级工程师,主要从事光谱仪器与检测技术研究,E-mail: ljx2117@gmail.com

agriculture development and protect human’s health and safety, the critical characterization and problems, and the future development for the DBD techniques in agricultural fields mentioned above were analyzed and discussed.

Key words: dielectric barrier discharge; breeding; processing of agricultural products; agricultural mechanization; agricultural environment; agro-food quality and safety

引言

介质阻挡放电 (Dielectric barrier discharge, DBD), 也称无声放电, 是一种典型的非平衡态交流气体放电技术, 可在常温常压下产生非平衡态的微等离子体, 也是一种低温等离子体 (Non-thermal plasma, NTP)。DBD 装置一般分为平板型和同轴型, 结构简单, 通常仅需在 2 个电极之间放置玻璃、石英、陶瓷或聚合物等阻挡介质, 放电区充满氩气、氦气、氮气、氧气等或混合作气体即可。当电极两端施加的高压交流电超过帕邢 (Paschen) 击穿电压时, 工作气体被击穿而产生电子, 从而激发或解离气体分子, 并产生包含紫外辐射以及大量自由基、离子、激发态原子、分子碎片等化学性质异常活跃物质的 NTP。DBD 产生的辐射和活性物质, 能够为所需的化学反应提供足够的能量, 这也是 DBD 应用的基础。

目前, DBD 因其简单、低廉、易控制、能耗少、用途广而成为放电技术研究的热点, 已成功地用于臭氧发生、灭菌、化合物合成与材料制备、有害物降解、能源、医疗、分析仪器等诸多方面^[1-7]。随着 DBD 技术的日趋成熟, 其在育种与分子生物学、农产品加工、农业工程、农业环境保护、农业检验检测等农业领域也得到了应用。本文结合近年来的研究成果, 对 DBD 在农业领域的应用研究进展进行论述。

1 DBD 在育种方面的应用

DBD 可以在常温常压下产生大量自由基, 具备诱导生物遗传特性发生改变的基本条件^[8]。传统的物理射线方法操作简单、成本低, 但正突变率较低; 化学诱变虽然可操作性强、正突变率高, 但化学诱变剂大多具有极强的毒性或致癌性。相比之下, 使用 DBD 技术进行诱变育种, 具有安全、无毒、快速、突变频率高、诱变遗传稳定性好等特点^[9]。

已有不少研究利用 DBD 等离子体诱变微生物, 从而提高菌株活性 (装置如图 1 所示) 或发酵生产 1,3-丙二醇、甘露醇等物质的能力^[10-15]。董晓宇等^[16]利用平板型 DBD 等离子体分别诱变克雷伯氏杆菌 (*Klebsiella pneumoniae*) 单菌落、菌体悬浮液, 获

得高产 1,3-丙二醇的突变菌株 K. 1206 和 Kp-M2。该 DBD 装置使用一对铝制平板电极, 分别附有厚度 1 mm 的石英介质, 输出电压和频率分别为 24 kV 和 20 kHz, 细胞浊液放在石英片上置于两电极之间, 诱变处理 120 s, 得到的变异菌株间歇发酵产量比野生菌提高 43%^[11]。岳敏等^[15]利用类似的 DBD 装置, 对乳酸菌 M1 (*Lactobacillus brevis*) 进行诱变处理, 获得的菌株可有效将果糖转化为甘露醇, 产率达 62%; 李娟等^[17]诱变戊糖乳杆菌 (*Lactobacillus pentosus*), 得到的变异菌株可以利用木糖生产乳酸, 产量提高了 25%; 此外, 还有诱变酿酒酵母^[18]的研究报道。

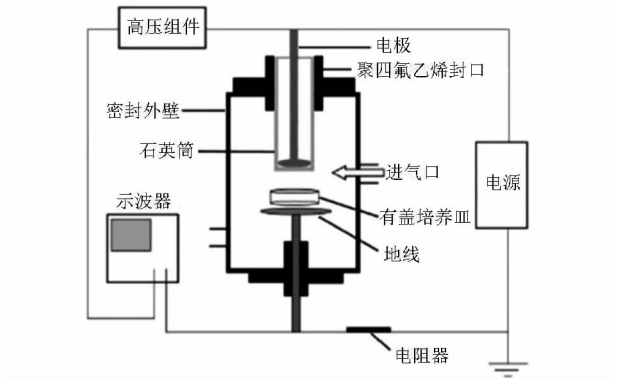


图 1 用于微生物诱变的平板型 DBD 装置示意图
Fig. 1 Sketch map of plate-type DBD apparatus for microbial mutation

DBD 不仅可以用于诱变育种, 还能利用产生的 NTP 处理种子以提高萌发率。早在 1999 年, 吉林省农业科学院就采用等离子体机处理粮食、豆类、蔬菜等作物种子, 其生命力增强, 发芽率、发芽势明显提高, 但该机械并非常压等离子体装置, 需要真空设备, 且无法控制处理时间, 在推广和应用方面存在一定的局限^[19]。而 DBD 所产生的 NTP 可以弥补上述技术的缺陷。童家赞等^[20]采用 DBD 装置对穿心莲种子处理 10 s, 可以提前出苗, 增加苗期株高及幼苗鲜重, 促进初生代谢产物积累; KITAZAKI 等^[21]也利用 DBD (装置如图 2 所示) 对萝卜种子处理 180 s, 栽培后 3 d 的苗长可以显著提高 2.5 倍。DBD 对种子的促萌发效应可能由于以下几方面原因: 一是 NTP 中大量具有较强穿透能力的高能电子, 可能作用于种子内部产生生物学效应; 二是自由基浓度增加后, 可能会产生一种改变生物膜脂蛋白双分子层的“触

发效应”,提高生物膜和种皮透性,加速水、氧、氮、微量元素等深入种皮,打破种子休眠,从而促进种子提前萌发^[22]。另一方面,当 DBD 处理时间和强度提高到一定程度时,NTP 还能够对种皮表面起到杀菌消毒作用,从而提高种子的耐贮能力。

实际上,DBD 的工作条件差异很大,其放电过程中物理作用和化学作用同时存在,目前还很难在机理上彻底解释清楚其 NTP 对诱变育种和种子萌发的作用过程。同时,虽然 DBD 成本低廉、易于控制,但是 DBD 在诱变育种和种子萌发方面的应用尚处于起步阶段。过量处理会造成生物体的不可逆损伤,因此改进 DBD 装置并优化处理条件,以适应细胞、微生物、种子等不同类型基体、不同处理量的需要,还需要大量的基础性研究工作。

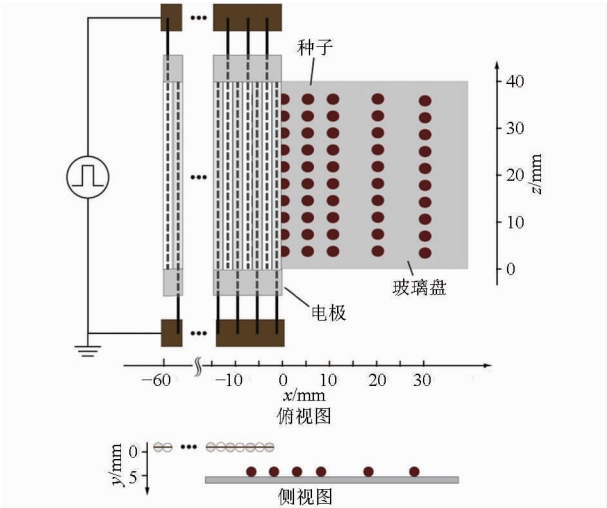


图2 用于种子处理的平板型 DBD 装置示意图
Fig.2 Sketch map of plate-type DBD apparatus for seed treatment

2 DBD 在农产品加工方面的应用

2.1 农产品加工中的灭菌与清洗

在农产品加工过程中,灭菌技术不仅关系到产品安全,还影响到营养、品质和风味。但是,常规使用的热力灭菌在杀死微生物和钝化酶的同时,对产品的色、香、味以及营养会产生不利影响。非热杀菌技术不仅克服了上述缺点,还能节省能源。其中,以 DBD 为代表的 NTP 技术是近年来新兴起来的非热杀菌手段,其机理可能来自于 NTP 形成过程中产生的紫外线、自由基以及等离子体的蚀刻作用^[2]。DBD 已成功应用于果汁、谷物、奶制品、肉品、香辛料等多种食用农产品中金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等有害微生物的杀灭以及酶的钝化^[23-27]。

林向阳等^[23]利用平板型 DBD 反应器(装置实物如图 3 所示),处理鲜榨橙汁,在电压 25 kV、pH 值 2.5、50℃ 条件下,可以有效降低果汁中金黄色葡

萄球菌数量;类似的 DBD 处理还可以降低橙汁中多酚氧化酶至少 38.8% 的活性^[28]。除了用于液体介质的灭菌,DBD 还能用于固体样品。例如,BUTSCHER 等^[24]也利用平板型 DBD,对侵染嗜热芽孢杆菌(*Geobacillus stearothermophilus*)的谷物颗粒进行处理,能够对小麦粒表面上的细菌进行有效杀灭,而不会影响小麦品质,并证明了灭菌的机理并非热、机械或电压效应,而主要来自等离子体的化学蚀刻作用。YONG 等^[25]利用一种弹性薄膜 DBD 等离子体(一种平板型改良设计)处理奶酪切片 10 min,可对大肠杆菌 O157:H7、李斯特菌和沙门氏菌等产生 3.2、2.1、5.8 lg CFU/g 水平的杀灭作用,但是处理后奶酪的风味有所损失,还需进一步优化处理工艺。JAYASENA 等^[26]利用类似的弹性薄膜 DBD 装置处理猪肉和牛肉,对大肠杆菌 O157:H7、李斯特菌和沙门氏菌等也产生了 2.04、2.54、2.68 lg CFU/g 水平的灭菌效果。此外,还有利用 DBD 降低番茄中过氧化物酶以及杀灭农产品中害虫的研究报道^[29-30]。

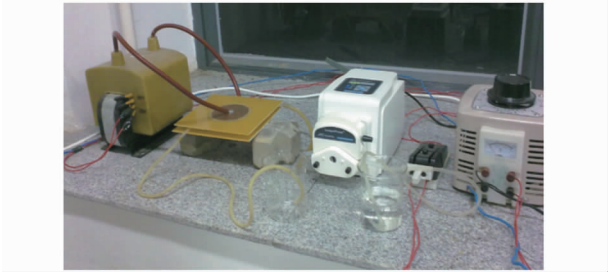


图3 用于橙汁处理的平板型 DBD 装置图
Fig.3 Picture of plate-type DBD apparatus for orange juice treatment

DBD 在食品灭菌上应用的另一大优点是可以实现包装内食品介质的冷杀菌^[31],PANKAJ 等^[32]对聚乳酸薄膜包装内的食品进行了杀菌处理,并未破坏包装材料,从而避免了包装过程的二次污染。除了在农产品方面的应用,DBD 技术还拓展到了包装材料的灭菌,如宋颖等^[33]采用共面电极交替排列的方式在塑料袋内表面产生均匀 NTP,在 99% 氦气和 1% 氧气条件下处理 5 min,可以杀灭 99.99% 的顽固真菌。此外,还有研究采用单针+环-平板电极结构的射流 DBD 装置清洗玻璃表面的油污,最大清洗速率可达 0.1 mm/s,并证明了油污清洗效率与射流中的氧原子数密度有密切关系^[34],这也为农产品加工设备和材料的表面清理提供了新的技术储备。

2.2 材料改性与制备

材料的表面改性是 DBD 应用最为广泛的领域之一,主要是利用其产生 NTP 的高能粒子和活性组分与表面分子发生作用,从而改变其亲疏水性、静电性、粘附性、生物相容性等,同时不影响材料基本性

能。在农产品加工方面,DBD 可用于淀粉、皮毛、植物纤维等原料的改性处理,以及农业工程材料的改性等。

蒲华寅^[35]采用平板型 DBD 对马铃薯淀粉和玉米淀粉进行改性研究,结果表明 NTP 的高能粒子撞击、辐射、能量传递和聚集、应力集中等多种效应可以不同程度地改变淀粉多尺度结构,特别是淀粉常温较高溶解度和高浓低粘的特性。WONGSAGONSUP 等^[36]使用钨棒作为阴极、石英玻璃管作为阳极,氩气作为放电气体,制成射流 DBD 装置(针-筒式,如图 4 所示),处理木薯淀粉悬浊液 5 min,可以实现一定程度的交联和解聚改性,获得的交联淀粉和解聚淀粉可以取代化学改性处理的产品,但产率还较低。相对于传统技术,DBD 为淀粉改性提供了一种高效、快捷、绿色的新型干法改性技术。

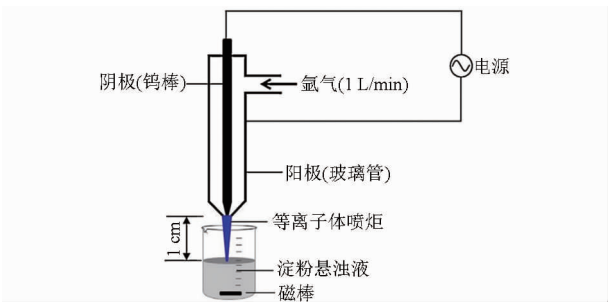


图 4 用于淀粉改性处理的同轴型 DBD 装置示意图
Fig. 4 Sketch map of coaxial DBD apparatus for starch modification

除了食用农产品,DBD 改性在纺织、材料合成等领域获得了广泛的应用,在天然和合成材料中均有使用,如木材、苎麻/PBS 复合材料、芳纶、涤纶、PET 纤维、多孔聚合物、薄膜材料等^[3,37-42]。POLETTI 等^[41]采用 DBD 处理 PET 织物,原力显微镜观察到的表面密集突起和凹槽增加了织物的附着能力。VU 等^[43]利用 DBD 技术将银纳米材料负载于 PA 纤维表面,明显改善纤维表面的疏水性。除了亲/疏水性,NTP 处理还可以改善材料的印染、抗菌等性能,以及用于制备碳纳米材料、催化剂材料、电池材料等^[44-46]。

目前,虽然很少有将 DBD 直接用于农业生产、农业工程材料的合成与改性,但木材、纺织材料、聚合物材料、涂层材料等的研究成果与农业生产、加工、设施工程甚至农用飞行器等密不可分,特别是当前急需的农膜、温室材料、农业作业防护用具、农机用材料等领域需要加强相关研究和应用开发。

2.3 农产品贮藏保鲜

目前,除了杀菌保鲜处理,DBD 还可用于农产

品贮藏过程中乙烯的降解以及包装材料完整性的密封检测等^[47-50]。

DBD 用于乙烯降解的研究主要用于果蔬产品的贮藏保鲜。MA 等^[49]利用改装的平板型 DBD 反应器(装置如图 5 所示),将含有乙烯的气体通过 NTP 放电区,可以实现乙烯的完全降解。TAKAKI 等^[47]模拟了果蔬贮藏环境中的含乙烯气体环境,经过 NTP 处理后,乙烯质量比从 200 mg/kg 降低到了 1 mg/kg 以下。陈姗姗等^[48]利用相似结构 DBD 反应器,对 1 mg/L 乙烯去除率达 100%,NTP 降解乙烯能量效率达 0.22 mol/(kW·h)。尽管 NTP 是一种可行且有效的降解果蔬贮藏环境中乙烯的方法,但目前成本过高,有碍该项技术在农产品贮藏保鲜中的进一步推广。

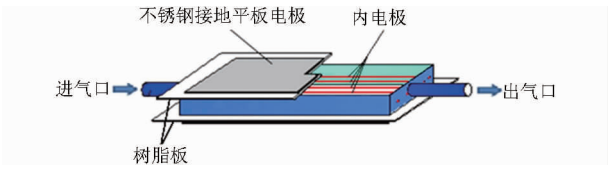


图 5 用于乙烯降解的平板型 DBD 装置示意图
Fig. 5 Sketch map of plate-type DBD apparatus for ethylene degradation

食品包装的密封性对产品贮藏保鲜至关重要,但是在软包装行业,密封检测主要通过手工和浸水,效率低下,且薄膜上微小破损难以检测。针对上述问题,有研究采用 DBD 处理采集密封包装食品的放电信号,并做滤波处理,将集合经验模分解(EEMD)得到的能量比作为特征向量可有效区分不同状态下的放电信号,解决了人工难以辨别和检测微小破损的问题,为密封包装食品的在线检测提供了一种新的思路^[50]。

尽管当前 DBD 在农产品灭菌、清洗、加工、贮藏和保鲜中的应用已取得了一定的进展,但多处于研究或探索阶段,DBD 装置的外形、尺寸、电源等还无法满足工业级生产加工的需求,处理能力还有待提高、运行成本还有待降低。

3 DBD 在臭氧发生设备方面的应用

DBD 在放电形成 NTP 过程中,伴随高能电子的产生,其与氧分子作用产生氧原子,氧原子与分子经聚合形成臭氧分子,具有损耗低、单机产量大和便于控制的优点,是当前生产臭氧发生装置最常用的技术之一。由于 DBD 型臭氧发生装置已有不错的开发和应用基础,因此当前针对其硬件装置的研究主要集中在改良和优化,例如新的发生机制、电源、放电单元、进气设备、冷却系统、参数优化等,以提高臭氧发生效率、降低能耗、减少 NO_x 产生、延长使用寿命^[1,51]。

本文第 2 节已经论述了 DBD 在灭菌、加工和贮藏保鲜中应用,除了 NTP 自身作用,氧气作为气体介质时产生臭氧也是重要的活性因子,有时甚至是主要作用^[52]。因此,在此仅讨论 DBD 型臭氧发生装置的应用。诸多研究显示,DBD 型臭氧发生器可应用于农业环境、农业生产与加工场地净化等多个领域以及医疗卫生等方面^[53-55]。例如,EBIHARA 等^[54]采用同轴型 DBD 臭氧发生器,产生 100 g/m³ 的臭氧以 2 L/min 的速度处理土壤 60 min,可以杀灭土壤中 100% 的有害菌;BHATTA 等^[53]也利用同轴型 DBD 臭氧发生器,5 min 内可以产生 800 mg/kg 的臭氧,处理废水后水中的溶解氧显著升高,可以完全杀灭大肠杆菌等微生物;黄和茂等^[55]设计了臭氧为主要产物的 DBD 型等离子体空气净化器,在食品生产车间消毒以及医疗和家用领域具有巨大的市场潜力。

4 DBD 在农业环境保护方面的应用

DBD 在形成 NTP 时产生的紫外线、自由基、离子、激发态原子,以及激发气体介质所产生的 O₃、NO_x 等活性物质,可以对农业环境中有害的藻类、微生物、药物残留、持久性有机物以及其他有机物质产生杀灭或降解作用,达到净化水、气、土壤介质的目的,从而保护农业环境、保障农产品质量安全。

4.1 水和土壤的处理

当前,我国工业排放、农业污染问题严峻,直接影响到饮用水安全、产地安全以及农产品的数量和质量安全。由于 DBD 具有良好的杀灭微生物和降解有机物质作用,已有不少研究用其来处理含有害物的水和土介质,取得了不错的效果。

在处理污染水体方面,LI 等^[56]利用 DBD(装置如图 6 所示)放电产生的 O₃和紫外线处理含有啉虫脒的废水,200 min 可以达到 83.48% 的降解效率。另外,DBD 在降解敌草隆、有机磷等农药,抗生素等兽药,以及雌酮、雌二醇、雌三醇、烷基苯酚和乙炔基雌二醇、双酚 A 等环境激素方面也有研究^[57-60]。除了用于药物降解,还有利用 DBD 处理含有布洛芬、酰胺咪嗪、十二烷基吗啉等医药、合成化工废水,以及甲基橙等颜料印染企业废水的研究^[61-64]。

在处理污染土壤方面,药物残留、危险化学品残留、印染工业污染物以及持久性有机污染物是当前 DBD 降解技术研究的主要方面。例如,文献[65]研究模拟处理了被滴滴涕重度污染的土壤,处理 20 min 的降解效率达到 95% 以上。此外,处理土壤中乙草胺、阿特拉津等农药残留^[66],对硝基苯酚等危化品残留^[67],染色剂残留^[68],以及茈类等持久性有

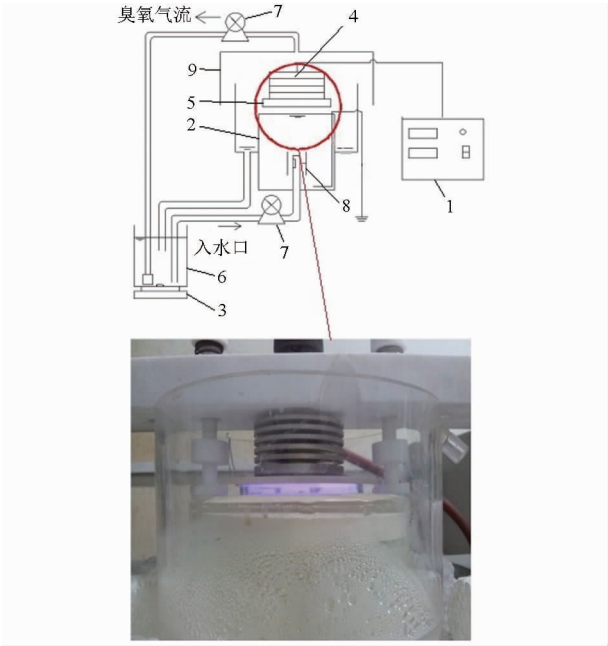


图 6 用于啉虫脒降解的平板型 DBD 装置
Fig.6 Sketch map of plate-type DBD apparatus for pesticide residue degradation

1. 高压电源 2. 反应池 3. 磁力搅拌器 4. 高压电极 5. 石英玻璃 6. 烧杯 7. 蠕动泵 8. 挡板 9. 气体收集罩

机污染物^[4]的研究也取得了不同程度的降解效果。

目前,上述研究多是针对工业排放所造成的污染问题,但农业生产过程也会产生不同程度的污染,如农药、化肥和农膜使用过程对水土的污染,畜禽粪便中兽药残留和致病微生物等对环境的污染等。而农业环境中的污染物会最终积累或传递到农产品中,威胁到消费者的健康。

4.2 气体处理

大气环境污染是当前媒体和大众关注度最高的环境污染问题,其中硫化物、氮化物、持久性有机污染物、苯系化合物等挥发性有机物(VOCs)是造成雾霾天气的主要物质之一。DBD 技术在气体环境有毒有害物质降解方面的研究主要集中在两个方面:工业废气和车辆或其他运输工具的尾气排放。

其中,与农业生产密切相关的主要是农机车辆、渔船和其他农业设备等柴油机的尾气排放问题,而柴油机尾气主要污染物为颗粒物(PM)、未燃总碳氢(THC)和 NO_x 等^[69-71]。DBD 技术用于改善尾气排放的研究涉及两个方向,一是利用 DBD 的降解作用消除尾气有害物,二是改良发动机以提高燃烧效率,从而起到保护环境的作用。通过在尾气排放口加装 DBD 装置,在 NTP 环境下,NO 主要转化为 NO₂^[72-73]。有研究将 DBD 技术和赤泥催化剂相结合可以实现 92% 的 NO_x 去除率;在结合某些催化剂作用下可以实现 NO 转化为 N₂,但反应条件相对更

严苛^[74]。在去除 NO_x 的同时,NTP 还可以有效去除尾气中的 PM 和 THC^[75-76]。目前,DBD 技术去除尾气污染物的研究很多,但总体来说成本还相对较高,同时多数需要结合催化剂使用,维护也相对繁琐,因此在实际生产中普及度尚不高。

此外,还有不少研究利用 DBD 技术提高发动机的燃烧效率,使燃料及其杂质充分燃烧,减少未燃总碳氢 (THC) 和 NO_x 的排放^[77-78]。例如,周思引等^[78]研究表明将 DBD(装置如图 7 所示)等离子体喷嘴安装在火焰稳定凹腔上游时有一定的助燃效果,主要机理是其中活性离子干预了化学反应以及对射流的加热作用。

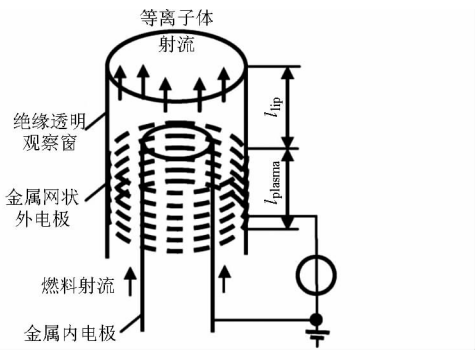


图 7 用于发动机助燃的同轴型 DBD 装置示意图
Fig. 7 Sketch map of coaxial DBD apparatus for engine combustion

目前,我国农用车辆、渔船以及农业机械设备的尾气排放是农业环境监管的薄弱环节,相关研究还基本处于空白或起步阶段。然而,农机设备尾气中有害物质水平往往较家用车辆更高,也更急需针对其开展尾气中有害物质减排、去除的相关基础研究和应用开发。

5 DBD 在检测仪器方面的应用

5.1 质谱离子源

质谱是当前分析领域应用最广的技术之一,已被广泛应用于农业工程、农产品质量安全、生命科学等诸多农业领域。对于有机质谱仪器,离子源是实现后续分析最核心的进样组件,其中常压离子化技术是目前有机质谱离子源研究的热点之一。

2006 年,清华大学张新荣等^[79]发明了基于 DBD 的质谱离子源 (Dielectric barrier discharge ionization,DBDI)。该 DBDI 仅使用 1 个中空不锈钢针和铜片作为 2 个电极,绝缘玻片作为样品平台,氦气作为介质,即可实现 3.5 pmol 的检出限,与电喷雾解吸离子化 (DESI) 和直接实时离子化 (DART) 等常压离子化技术相比,其结构简单、成本低、易操作、重现性好,也不需要喷雾溶剂,适用于固体材料表面

的氨基酸和爆炸物的检测 (装置如图 8 所示)^[80-81]。在此基础上,诸多研究者对 DBDI 的形态、结构、接口方式进行改良,例如 HARPER 等^[82]设计了一种同轴型 DBD 装置,NTP 在气流带动下形成尾焰,称为 NTP 探针 (装置如图 9 所示),可作为一种常压离子化方法,还能用于质谱成像技术^[83]。在 DBD 串联的仪器选择方面,既可以与便携式质谱串联实现移动检测,也可以用于液相色谱-质谱联用、气相色谱-质谱联用、高分辨质谱等以扩展串联方式,降低接口成本^[7,84-86]。

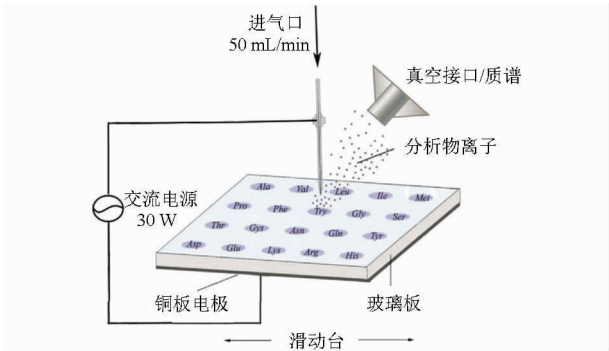


图 8 用于质谱离子源的平板型 DBD (针-板式) 装置示意图

Fig. 8 Sketch map of plate-type DBD apparatus for ionization source of mass spectrometry

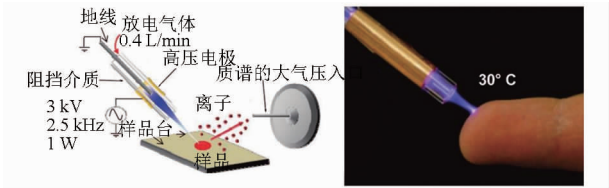


图 9 用于质谱离子源的 NTP 探针及 DBD 装置图
Fig. 9 Sketch map of coaxial DBD apparatus (NTP probe) for ionization source of mass spectrometry

随着 DBDI 技术的发展,串联仪器分析的物质种类也越来越多,与农产品质量和农业工程相关的检测也有涉及,例如农产品营养品质指标、农药残留、人/兽药物残留、三聚氰胺等非法添加物,苯、过氧化氢、多环芳烃等环境或工程污染物,以及地沟油的鉴别等^[7,85,87-93]。由于 DBDI 技术还没有被大多数质谱生产商所采用,因此农业领域作为应用部门所做的相关方法研究还相对较少。

5.2 光谱的原子化器和激发源

光谱仪器检测是对元素和分子进行定性、定量分析的有效手段,分为原子光谱和分子光谱,其中原子光谱在元素的痕量分析、形态分析中占有重要位置。常用的等离子体,如电感耦合等离子体 (ICP)、微波等离子体 (MP) 等,具有良好的激发能力,常与原子发射光谱 (AES) 或质谱联用,但是其体积大、能耗高、结构复杂,难以小型化。而 DBD 在一定条件

下,也具备原子化器或激发源的能力,这为光谱仪器的小型化提供了新的可能^[94]。

DBD 可与 AES、原子吸收光谱(AAS)(装置如图 10 所示)、原子荧光光谱(AFS)等原子光谱仪器联用,并可用于化学蒸气发生(CVG)^[95-99]等进样技术。作为一种 NTP 源,DBD 用于原子光谱进样的最大问题在于激发能力有限,当有大量液体随待测物进入时会过分消耗 NTP 的能量,造成激发不充分甚至 NTP 熄灭。因此,气相或干气溶胶样品导入对 DBD 来说是比较实用的一种进样方式,可以是氢化物发生(HG)、光诱导化学蒸气发生(PCVG)等 CVG 方式,也可以是电热蒸发(ETV)^[100-102]。虽然液体进样对于 DBD 激发元素更加困难,但也有不少研究

将 DBD 用于液体进样光谱分析,以拓宽 DBD 仪器的应用范围^[103]。

当前,我国农业环境污染和农产品质量安全问题突出,对重金属现场、快速检测需求非常大,虽然目前已经有了不少元素快速检测仪器设备出现,但在仪器的灵敏度、稳定性和实用性方面还存在各自的问题,例如 X 射线荧光光谱(XRF)在痕量重金属检测方面的灵敏度和稳定性还相对较差,悬浮液进样 AAS 技术的样品处理相对繁琐等。而 DBD 以其独特的优点,特别是与 ETV 固体进样技术相结合,为光谱仪器的小型化开辟了新的思路^[104-105]。

6 结束语

介质阻挡放电是目前放电技术研究的热点,作为一种通用性技术,DBD 的应用几乎遍及了农业环境、育种、生产、加工、贮运、机械、检验检测等整个农业环节,部分技术如臭氧发生、材料改性等已经大规模产业化,并产生了巨大的经济效益。但是,总体来说,DBD 技术在农业育种、灭菌、农产品加工、农业环境保护、分析仪器等方面的应用尚处于起步阶段,还存在不少问题,例如:目前农产品加工、灭菌和农业环境保护方面研究所用的 DBD 装置处理通量较低,无法满足工业化生产和大规模处理的需求;尾气处理用 DBD 成本过高,维护繁琐;分析仪器领域的 DBD 装置尚未获得生产方和使用方的足够认可。因此,DBD 技术的产业化应用,还需要在大型化以实现高通量处理,小型化以更加灵巧和定向,信息化以实现精密控制等方面实现更大的突破。

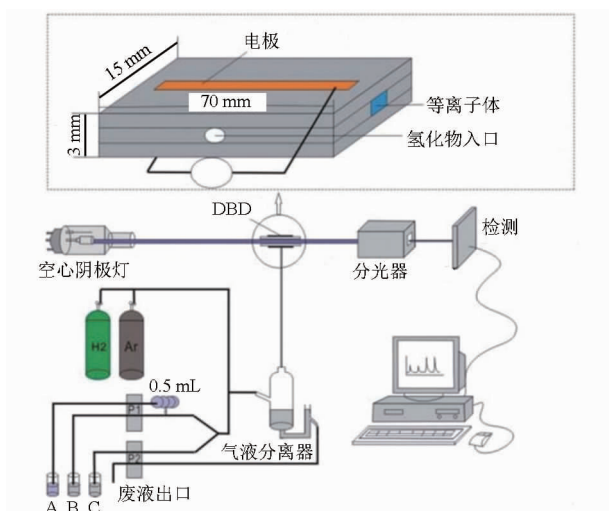


图 10 用于 AAS 原子化器的平板型 DBD 装置图

Fig. 10 Sketch map of plate-type DBD apparatus as atomizer for AAS

参 考 文 献

- 1 SIMEK M, PEKARED S, PRUKNER V. Influence of power modulation on ozone production using an AC surface dielectric barrier discharge in oxygen[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2010, 30(5): 607-617.
- 2 MoISAN M, BARBEAU J, MOREAU S, et al. Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2001, 226(1-2): 1-21.
- 3 HELER P, BOSCHER N D, BOHN T, et al. A new class of Zn^{II} and Cr^{III} porphyrins incorporated into porous polymer matrices via an atmospheric pressure plasma enhanced CVD to form gas sensing layers[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(5): 1560-1570.
- 4 OGNIER S, ROJO J, LIU Y A, et al. Mechanisms of pyrene degradation during soil treatment in a dielectric barrier discharge reactor[J]. Plasma Processes and Polymers, 2014, 11(8): 734-744.
- 5 许允之, 王臻, 严家明. 基于 DBD 的煤燃前脱硫机理和脱硫模型[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(6): 55-59.
XU Y Z, WANG Z, YAN J M. The coal desulfurization mechanism and desulfurization model before combusted based on DBD[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(6): 55-59. (in Chinese)
- 6 PETROVIC Z L, PUAC N, LAZOVIC S, et al. Biomedical applications and diagnostics of atmospheric pressure plasma[J]. Journal of Physics: Conference Series, 17th International Summer School on Vacuum, Electron, and Ion Technologies (Veit 2011), 2012, 356: 012001.
- 7 ZHANG Z, GONG X, ZHANG S, et al. Observation of replacement of carbon in benzene with nitrogen in a low-temperature plasma[J]. Scientific Reports, 2013(3): 3481.
- 8 LIU Q M, YUAN H, WANG J, et al. A mutant of bacillus subtilis with high-producing surfactin by ion beam implantation[J]. Plasma Science & Technology, 2006, 8(4): 491-496.

- 9 LAROUSSI M. Nonthermal decontamination of biological media by atmospheric pressure plasmas: review, analysis and prospects [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002,30(4): 1409 – 1415.
- 10 张翼, 穆军, 董学伟, 等. 海洋真菌 AP2T1 菌株介电阻挡放电等离子体诱变初步研究[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(4): 75 – 79, 92.
ZHANG Y, MU J, DONG X W, et al. Preliminary research on xutagenic breeding of marine fungal strain AP2T1 by dielectric barrier discharge plasma[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012,33(4): 75 – 79, 92. (in Chinese)
- 11 董晓宇, 滕虎, 修志龙. 高产 1,3-丙二醇的等离子体诱变菌株选育及发酵动力学分析[J]. 过程工程学报, 2011, 11(2): 304 – 311.
DONG X Y, TENG H, XIU Z L. Selection of strain exposed under plasma discharge with enhanced 1,3-propanediol production and kinetic analysis of batch fermentation [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(2): 304 – 311. (in Chinese)
- 12 朱晓丽, 南南, 修志龙. 以粗甘油为原料高产 1,3-丙二醇菌株的等离子体复合诱变[J]. 过程工程学报, 2011, 11(6): 1030 – 1037.
ZHU X L, NAN N, XIU Z L. Complex mutation of klebsiella pneumoniae producing 1,3-propanediol from biodiesel-derived glycerol[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(6): 1030 – 1037. (in Chinese)
- 13 朱晓丽. 大气压等离子体对克雷伯氏杆菌的生物学效应[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
ZHU X L. Biological effect of atmospheric-pressure plasma on *Klebsiella pneumoniae* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 14 DONG X Y, XIU Z L, LI S A, et al. Dielectric barrier discharge plasma as a novel approach for improving 1,3-propanediol production in *Klebsiella pneumoniae* [J]. Biotechnology Letters, 2010, 32(9): 1245 – 1250.
- 15 岳敏, 曹海龙, 李曙光, 等. 诱变选育以菊芋为原料高产甘露醇的乳酸菌[J]. 中国酿造, 2012(9): 53 – 56.
YUE M, CAO H L, LI S G, et al. Mutation breeding of lactic acid bacteria for high yield of mannitol from saccharified jerusalem artichoke [J]. China Brewing, 2012(9): 53 – 56. (in Chinese)
- 16 董晓宇, 李爽, 侯英敏, 等. 大气压冷等离子体诱变产 1,3-丙二醇菌株 *Klebsiella pneumoniae* [J]. 过程工程学报, 2008, 8(3): 555 – 560.
DONG X Y, LI S, HOU Y M, et al. Mutagenesis of strain *Klebsiella pneumoniae* producing 1,3-propanediol by cold plasma at atmospheric pressure [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(3): 555 – 560. (in Chinese)
- 17 李娟. 利用木糖生产乳酸菌株的选育及发酵条件优化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
LI J. Screening of lactic acid producing bacteria from xylose and optimizing conditions of fermentation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 18 陈慧黠, 修志龙, 白凤武. 大气压介质阻挡放电空气等离子体引起酿酒酵母氧化应激的研究[J]. 生物物理学报, 2013, 29(6): 433 – 441.
CHEN H J, XIU Z L, BAI F W. Dielectric barrier discharge air plasma at atmospheric pressure induced oxidative stress in *saccharomyces cerevisiae* [J]. Acta Biophysica Sinica, 2013, 29(6): 433 – 441. (in Chinese)
- 19 方向前, 张建华, 赵洪祥, 等. 等离子体处理种子在农业上的应用[J]. 现代农业科技, 2008(20): 336, 338.
FANG X Q, ZHANG J H, ZHAO H X, et al. The application of seed treatment using plasma on agriculture [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2008(20): 336, 338. (in Chinese)
- 20 童家赟. 空气等离子体预处理提高穿心莲种子活力的研究 [D]. 广州: 广州中医药大学, 2012.
TONG J Y. Effects on seed invigoration of *andrographis paniculata* by air plasma [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2012. (in Chinese)
- 21 KITAZAKI S, SARINONT T, KOGA K, et al. Plasma induced long-term growth enhancement of *Raphanus sativus* L. using combinatorial atmospheric air dielectric barrier discharge plasmas [J]. Current Applied Physics, 2014, 14 (Supp. 2): S149 – S153.
- 22 DOBRYNIN D, FRIDMAN G, FRIEDMAN G, et al. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue [J]. New Journal of Physics, 2009, 11(11): 115020.
- 23 林向阳, 黄彬红, 李雁晖, 等. 低温等离子体杀灭橙汁 *S. aureus* 的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 439 – 446.
LIN X Y, HUANG B H, LI Y H, et al. Study on pasteurization law of *S. aureus* in orange juice using low temperature plasma [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(5): 439 – 446. (in Chinese)
- 24 BUTSCHER D, ZIMMERMANN D, SCHUPPLER M, et al. Plasma inactivation of bacterial endospores on wheat grains and polymeric model substrates in a dielectric barrier discharge [J]. Food Control, 2016, 60: 636 – 645.
- 25 YONG H I, KIM H J, PARK S, et al. Pathogen inactivation and quality changes in sliced cheddar cheese treated using flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma [J]. Food Research International, 2015, 69: 57 – 63.
- 26 JAYASENA D D, KIM H J, YONG H I, et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: Effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes [J]. Food Microbiology, 2015, 46: 51 – 57.
- 27 GRABOWSKI M, HOLUB M, BALCERAK M, et al. Black pepper powder microbiological quality improvement using DBD systems in atmospheric pressure [J]. European Physical Journal-Applied Physics, 2015, 71(2): 20811.

- 28 林向阳,李雁晖,黄彬红,等.介质阻挡放电等离子体(DBDP)对橙汁杀菌及钝化酶的影响[J].中国食品学报,2010,10(6):14-21.
LIN X Y, LI Y H, HUANG B H, et al. Effect of dielectric barrier discharge plasma (DBDP) on the sterilization and enzyme inactivation of orange juice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(6): 14-21. (in Chinese)
- 29 PANKAJ S K, MISRA N N, CULLEN P J. Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 19: 153-157.
- 30 BURES B L, DONOHUE K V, ROE R M, et al. Nonchemical dielectric barrier discharge treatment as a method of insect control[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(1): 55-62.
- 31 CHIPER A S, CHEN W, MEJLHOLM O, et al. Atmospheric pressure plasma produced inside a closed package by a dielectric barrier discharge in Ar/CO(2) for bacterial inactivation of biological samples[J]. Plasma Sources Science & Technology, 2011, 20(2): 25008-25017.
- 32 PANKAJ S K, BUENO-FERRER C, MISRA N N, et al. Characterization of polylactic acid films for food packaging as affected by dielectric barrier discharge atmospheric plasma[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 21: 107-113.
- 33 宋颖,季龙飞,刘东平,等.大气压共面介质阻挡放电杀除塑料包装中顽固真菌[C]//第十五届全国等离子体科学技术会议,2011.
- 34 金英,钱牧扬,任春生,等.预电离大气压低温等离子体射流及其在表面清洗中的应用[J].高电压技术,2012,38(7):1682-1689.
JIN Y, QIAN M Y, REN C S, et al. Atmospheric pressure low temperature plasma jet assisted by the preionization and its application on surface cleaning[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1682-1689. (in Chinese)
- 35 蒲华寅.等离子体作用对淀粉结构及性质影响的研究[D].广州:华南理工大学,2013.
PU H Y. Effects of plasma on structure and properties of starch[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 36 WONGSAGONSUP R, DEEYAI P, CHAIWAT W, et al. Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric argon plasma[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 102: 790-798.
- 37 ZHANG J, PIZZI A, LAGEL M C, et al. Dielectric barrier discharge plasma at atmospheric pressure to enhance pine wood surfaces hydrophilic character and adhesion properties[J]. Wood Research, 2015, 60(5): 773-781.
- 38 成攀娇.生物可降解苧麻/PBS复合材料的制备及性能研究[D].上海:东华大学,2013.
CHENG P J. Fabrication and properties of biodegradable ramon/poly (Butylene succinate) composite[D]. Shanghai: Donghua University, 2013. (in Chinese)
- 39 刘志英,李发学,俞建勇,等.DBD等离子体处理对芳纶织物结构性能的影响[J].东华大学学报:自然科学版,2014,40(4):434-438,455.
LIU Z Y, LI F X, YU J Y, et al. Effects of DBD plasma treatment on the structure and properties of aramid fabric[J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2014, 40(4): 434-438, 455. (in Chinese)
- 40 SHAHIDI S, GHORANNEVISS M, WENER J. Improving synthetic and natural dyeability of polyester fabrics by dielectric barrier discharge[J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2015, 31(3): 286-308.
- 41 POLETTI G, ORSINI F, RAFFAELE-ADDAMO A, et al. Cold plasma treatment of PET fabrics: AFM surface morphology characterisation[J]. Applied Surface Science, 2003, 219(3-4): 311-316.
- 42 KAKIUCHI H, OHMI H, YASUTAKE K. Atmospheric-pressure low-temperature plasma processes for thin film deposition[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2014, 32(3): 030801.
- 43 VU N K, ZILLE A, OLIVEIRA F R, et al. Effect of particle size on silver nanoparticle deposition onto dielectric barrier discharge (DBD) plasma functionalized polyamide fabric[J]. Plasma Processes and Polymers, 2013, 10(3): 285-296.
- 44 SUN D L, HONG R Y, WANG F, et al. Synthesis and modification of carbon nanomaterials via AC arc and dielectric barrier discharge plasma[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 283: 9-20.
- 45 YAN X L, ZHAO B R, LIU Y, et al. Dielectric barrier discharge plasma for preparation of Ni-based catalysts with enhanced coke resistance: current status and perspective[J]. Catalysis Today, 2015, 256: 29-40.
- 46 ZEN S G, TERAMOTO Y, ONO R, et al. Development of low-temperature sintering technique for dye-sensitized solar cells combined with dielectric barrier discharge treatment[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51(5R): 056201.
- 47 TAKAKI K, NISHIMURA J, KOIDE S, et al. Decomposition of ethylene using dual-polarity pulsed dielectric barrier discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(10): 3476-3482.
- 48 陈姗姗,冯涛.低温等离子体技术降解果蔬贮藏环境中的乙烯[J].食品研究与开发,2013(1):109-112.
CHEN S S, FENG T. Degradation of ethylene in fruit and vegetable storage using non-thermal plasma[J]. Food Research and Development, 2013(1): 109-112. (in Chinese)
- 49 MA T J, LAN W S. Ethylene decomposition with a wire-plate dielectric barrier discharge reactor: parameters and kinetic study[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(12): 3951-3956.
- 50 张倩,张善耕,马钺.密封包装食品的密封性检测[J].制造业自动化,2014(9):38-41.

ZHANG Q, ZHANG S G, MA Y. Research on leakage detection of seal packaged food[J]. *Manufacturing Automation*, 2014(9): 38 – 41. (in Chinese)

51 严其林. DBD 型臭氧发生器负载特性及新型供电电源研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
YAN Q L. Research on the load characteristic and power supply for DBD type ozone generation [D]. *Guangzhou: Guangdong University of Technology*, 2015. (in Chinese)

52 MASTANAIAH N, BANERJEE P, JOHNSON J A, et al. Examining the role of ozone in surface plasma sterilization using dielectric barrier discharge (DBD) plasma[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2013, 10(12): 1120 – 1133.

53 BHATTA R, KAYASTHA R, SUBEDI D P, et al. Treatment of wastewater by ozone produced in dielectric barrier discharge[J]. *Journal of Chemistry*, 2015, 2015: 6.

54 EBIHARA K, TAKAYAMA M, IKEGAMI T, et al. Development of agricultural soil sterilization using ozone generated by high frequency dielectric barrier discharge[J]. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 2006, 9(2): 170 – 173.

55 黄和茂. DBD 等离子体空气杀菌净化器研究与开发 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HUANG H M. Research and development of DBD plasma air-sterilization purifier [D]. *Guangzhou: South China University of Technology*, 2013. (in Chinese)

56 LI S P, MA X L, JIANG Y Y, et al. Acetamiprid removal in wastewater by the low-temperature plasma using dielectric barrier discharge[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 106: 146 – 153.

57 朱丹, 陈培, 江林, 等. 介质阻挡放电等离子体去除水中敌草隆的降解机理[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(11): 1360 – 1366.
ZHU D, CHEN P, JIANG L, et al. Removal mechanism of aqueous diuron by dielectric barrier discharge plasma[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(11): 1360 – 1366. (in Chinese)

58 HU Y M, BAI Y H, YU H, et al. Degradation of selected organophosphate pesticides in wastewater by dielectric barrier discharge plasma[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2013, 91(3): 314 – 319.

59 KIM K S, YANG C S, MOK Y S. Degradation of veterinary antibiotics by dielectric barrier discharge plasma[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 219: 19 – 27.

60 杨飞. 水上介质阻挡放电等离子体对典型环境激素降解的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2011.
YANG F. Research on removal of typical environmental estrogens in aqueous solution by dielectric barrier discharge over water [D]. *Nanning: Guangxi University*, 2011. (in Chinese)

61 ZHENG B G, LI C G, ZHANG J B, et al. Dielectric barrier discharge induced the degradation of the emerging contaminant ibuprofen in aqueous solutions[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(22 – 24): 4469 – 4475.

62 LIU Y N, MEI S F, IYA-SOU D, et al. Carbamazepine removal from water by dielectric barrier discharge; comparison of ex situ and in situ discharge on water[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2012, 56: 10 – 18.

63 王建, 陈元涛, 张伟, 等. 介质阻挡放电等离子体降解十二烷基吗啉废水[J]. *工业水处理*, 2015(8): 53 – 56.
WANG J, CHEN Y T, ZHANG W, et al. Plasma treatment of dodecylmorpholine wastewater by dielectric barrier discharge[J]. *Industrial Water Treatment*, 2015(8): 53 – 56. (in Chinese)

64 陈丽娟. 介质阻挡放电协同光催化降解甲基橙模拟废水的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
CHEN L J. Study on the degradation of methyl orange simulated wastewater by dielectric barrier discharge/photocatalysis united use [D]. *Taiyuan: Taiyuan University of Technology*, 2015. (in Chinese)

65 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.
CHEN H H, LUO Y M, TENG Y, et al. Optimizing remediation conditions of non-thermal plasma for DDTs heavily contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 302 – 307. (in Chinese)

66 吴少帅. 低温等离子体降解水和土壤中几种典型有机污染物的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
WU S S. Degradation of several organic pollutants in water and soil by nonthermal plasma [D]. *Hangzhou: Zhejiang University*, 2014. (in Chinese)

67 张雪. 针-板式放电等离子体修复 PNP 污染土壤的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
ZHANG X. Remediation of PNP contaminated soil using needles-plate discharge plasma [D]. *Dalian: Dalian University of Technology*, 2012. (in Chinese)

68 娄静. 典型工业污染土壤的介质阻挡放电等离子体修复技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
LOU J. Study on remediation of industrial-contaminated soil by atmospheric pressure dielectric barrier discharge [D]. *Dalian: Dalian University of Technology*, 2011. (in Chinese)

69 王攀, 蔡忆昔, 王军, 等. 基于低温等离子体辅助催化技术的柴油机排放试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 14 – 17.
WANG P, CAI Y X, WANG J, et al. Experiment on harmful emissions of diesel engine with non-thermal plasma assisted catalyst technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9): 14 – 17. (in Chinese)

70 戴晓旭, 纪常伟, 汪硕峰, 等. 掺混重整气对汽油机燃烧及排放特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 7 – 11.
DAI X X, JI C W, WANG S F, et al. Effect of syngas on combustion and emission characteristic of gasoline engine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 7 – 11. (in Chinese)

71 纪常伟, 句丙杰, 戴晓旭. 内燃机尾气余热重整制氢混燃性能试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 27 – 32.

- JI C W, JU B J, DAI X X. Mixed combustion performance experiment of syngas produced by ethanol steam reforming for engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):27–32. (in Chinese)
- 72 XIAO H P, DU X, WANG L. Numerical optimization research on the dielectric barrier discharge for NO_x removal[J]. Advanced Materials Research, 2011,356–360:1238–1243.
- 73 MOHAPATRO S, RAJANIKANTH B S. Dielectric barrier discharge cascaded with red mud waste to enhance NO_x removal from diesel engine exhaust[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012,19(2):641–647.
- 74 裴梅香, 黄震, 上官文峰, 等. 低温等离子体技术及其在柴油机排气处理中的应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004,5(5):56–60.
- PEI M X, HUANG Z, SHANGGUAN W F, et al. Applications of non-thermal plasma in treatment of diesel exhaust [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004,5(5):56–60. (in Chinese)
- 75 蔡忆昔, 赵卫东, 李小华, 等. 低温等离子体降低柴油机颗粒物排放的试验[J]. 农业机械学报, 2008,39(2):1–5,10.
- CAI Y X, ZHAO W D, LI X H, et al. Experimentl study on non thermal plasma aftertreatment of particulates matter in diesel engine exhaust[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(2):1–5,10. (in Chinese)
- 76 刘立东, 史永万, 高俊华, 等. 低温等离子体对柴油机尾气净化效果的研究[J]. 汽车工程, 2013,35(2):116–120.
- LIU L D, SHI Y W, GAO J H, et al. A research of the effects of non-thermal plasma on the emission control of diesel engine[J]. Automotive Engineering, 2013,35(2):116–120. (in Chinese)
- 77 VERSAILLES P, CHISHTY W A, Vo H D. Application of dielectric barrier discharge to improve the flashback limit of a lean premixed dump combustor[C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2011,2:175–184.
- 78 周思引, 聂万胜, 车学科, 等. 等离子体喷嘴在超燃燃烧室中助燃的研究[J]. 上海航天, 2013(3):53–56.
- ZHOU S Y, NIE W S, CHE X K, et al. Research on assisted combustion effect of plasma nozzle in scramjet combustor[J]. Aerospace Shanghai, 2013(3):53–56. (in Chinese)
- 79 张新荣, 朱振利, 薛俊海. 基于介质阻挡放电的化学离子化方法和质谱离子源: 中国, 200610011548.1[P]. 2006–11–15.
- ZHANG X R, ZHU Z L, XUE J H. Chemical ioning method based on dielectric blocking discharge and mass ion source: CN, 200610011548.1[P]. 2006–11–15. (in Chinese)
- 80 NA N, ZHAO M X, ZHANG S C, et al. Development of a dielectric barrier discharge ion source for ambient mass spectrometry [J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2007,18(10):1859–1862.
- 81 NA N, ZHANG C, ZHAO M X, et al. Direct detection of explosives on solid surfaces by mass spectrometry with an ambient ion source based on dielectric barrier discharge[J]. Journal of Mass Spectrometry, 2007,42(8):1079–1085.
- 82 HARPER J D, CHARIPAR N A, MULLIGAN C C, et al. Low-temperature plasma probe for ambient desorption ionization[J]. Analytical Chemistry, 2008,80(23):9097–9104.
- 83 LIU Y Y, MA X X, LIN Z Q, et al. Imaging mass spectrometry with a low-temperature plasma probe for the analysis of works of Art[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2010,49(26):4435–4437.
- 84 SUGIYAMA M, KUMANO S, NISHIMURA K, et al. Sensitive low-pressure dielectric barrier discharge ion source[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2013,27(9):1005–1010.
- 85 HAYEN H, MICHELS A, FRANZKE J. Dielectric barrier discharge ionization for liquid chromatography/mass spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2009,81(24):10239–10245.
- 86 SAHA S, MANDAL M K, NONAMI H, et al. Direct analysis of anabolic steroids in urine using *Leidenfrost phenomenon* assisted thermal desorption-dielectric barrier discharge ionization mass spectrometry[J]. Analytica Chimica Acta, 2014,839:1–7.
- 87 GARCIA-REYES J F, MAZZOTI F, HARPER J D, et al. Direct olive oil analysis by low-temperature plasma (LTP) ambient ionization mass spectrometry[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2009,23(19):3057–3062.
- 88 GILBERT-LOPEZ B, GARCIA-REYES J F, MEYER C, et al. Simultaneous testing of multiclass organic contaminants in food and environment by liquid chromatography/dielectric barrier discharge ionization-mass spectrometry [J]. Analyst, 2012,137(22):5403–5410.
- 89 GILBERT-LOPEZ B, GELTENPOTH H, MEYER C, et al. Performance of dielectric barrier discharge ionization mass spectrometry for pesticide testing: a comparison with atmospheric pressure chemical ionization and electrospray ionization[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2013,27(3):419–429.
- 90 JACKSON A U, GARCIA-REYES J F, HARPER J D, et al. Analysis of drugs of abuse in biofluids by low temperature plasma (LTP) ionization mass spectrometry[J]. Analyst, 2010,135:927–933.
- 91 HUANG G M, OUYANG Z, COOKS R G. High-throughput trace melamine analysis in complex mixture [J]. Chemical Communications, 2009(5):556–558.
- 92 CHEN L C, SUZUKE H, MOLI K, et al. Mass spectrometric detection of gaseous hydrogen peroxide in ambient air using dielectric barrier discharge as an excitation source[J]. Chemistry Letters, 2009,38(6):520–521.
- 93 ZHOU Y F, WU Z C, LI C, et al. Coupling neutral desorption sampling to dielectric barrier discharge ionization mass spectrometry for direct oil analysis[J]. Analytical Methods, 2014,6(5):1538–1544.
- 94 邓宇佳, 李成辉, 蒋小明, 等. 介质阻挡放电在原子光谱分析中应用研究的新进展[J]. 分析化学, 2015(9):1278–1284.

DENG Y J, LI C H, JIANG X M, et al. Recent progress of dielectric barrier discharge in atomic spectrometric analysis[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2015(9): 1278 – 1284. (in Chinese)

95 JIANG X M, CHEN Y, ZHENG C B, et al. Electrothermal vaporization for universal liquid sample introduction to dielectric barrier discharge microplasma for portable atomic emission spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(11): 5220 – 5224.

96 ZHU Z L, LIU Z F, ZHENG H T, et al. Non-chromatographic determination of inorganic and total mercury by atomic absorption spectrometry based on a dielectric barrier discharge atomizer[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2010, 25(5): 697 – 703.

97 KUERMAITI B, WANG J, HAN G J, et al. Determination of tellurium by atomic fluorescence spectrometry based on dielectric barrier discharge atomizer[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 38(3): 357 – 361.

98 杨萌, 薛蛟, 李铭, 等. 低温等离子体原子荧光光谱法直接测定固体样品中的汞[J]. 分析化学, 2012(8): 1164 – 1168.

YANG M, XUE J, LI M, et al. Direct determination of mercury in solid samples by low temperate plasma coupled with atomic fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2012(8): 1164 – 1168. (in Chinese)

99 WU X, YANG W, LIU M, et al. Vapor generation in dielectric barrier discharge for sensitive detection of mercury by inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(6): 1204 – 1209.

100 ZHU Z, HE H, HE D, et al. Evaluation of a new dielectric barrier discharge excitation source for the determination of arsenic with atomic emission spectrometry[J]. Talanta, 2014, 122: 234 – 239.

101 CAI Y, LI S H, DOU S, et al. Metal carbonyl vapor generation coupled with dielectric barrier discharge to avoid plasma quench for optical emission spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(2): 1366 – 1372.

102 JIANG X, CHEN Y, ZHENG C, et al. Electrothermal vaporization for universal liquid sample introduction to dielectric barrier discharge microplasma for portable atomic emission spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(11): 5220 – 5224.

103 TOMBRINK S, MÜLLER S, HEMING R, et al. Liquid analysis dielectric capillary barrier discharge[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2010, 397(7): 2917 – 2922.

104 MAO X F, LIU J X, HUANG Y T, et al. Assessment of homogeneity and minimum sample mass for cadmium analysis in powdered certified reference materials and real rice samples by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2013, 61(4): 848 – 853.

105 ZHANG Y, MAO X F, WANG M, et al. Direct determination of cadmium in grain by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry with a tungsten coil trap[J]. Analytical Letters, 2015, 48(18): 2908 – 2920.

(上接第 135 页)

26 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量条件下沟垄集雨种植对土壤养分分布及夏玉米根系生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 94 – 99.

REN Xiaolong, JIA Zhikuan, CHEN Xiaoli, et al. Effect of ridge and furrow planting of rainfall harvesting on soil available nutrient distribution and root growth of summer corn under simulated rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 94 – 99. (in Chinese)

27 宋秋华, 李凤民, 王俊, 等. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2125 – 2132.

SONG Qiuhua, LI Fengmin, WANG Jun, et al. Effect of various mulching durations with plastic film on soil microbial quantity and plant nutrients of spring wheat field in semi-arid loess plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2125 – 2132. (in Chinese)

28 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 等. 地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 99 – 102.

ZHANG Dongmei, CHI Baoliang, HUANG Xuefang, et al. Analysis of adverse effects on maize yield decrease resulted from plastic film mulching in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 99 – 102. (in Chinese)

29 贺润喜, 王玉国, 赵金鱼. 不同生育期揭膜对旱地地膜覆盖玉米生理性状和产量的影响[J]. 山西农业大学学报, 1999, 19(1): 16 – 18, 28.

30 方日尧, 同延安, 梁东丽. 渭北旱塬不同覆盖对冬小麦生产综合效应研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 72 – 75.

FANG Riyao, TONG Yan'an, LIANG Dongli. Comprehensive effects of different mulching materials on winter wheat productions in Weibei highland[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 72 – 75. (in Chinese)

31 陈玉章, 柴守玺, 范颖丹, 等. 覆盖模式对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 403 – 409.

CHEN Yuzhang, CHAI Shouxi, FANG Yingdan, et al. Effects of mulching models on soil temperature and yield of winter wheat in rainfed area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4): 403 – 409. (in Chinese)