

农药环境污染修复技术研究及应用进展

王莹, 王莹[△], 魏春雁*

(吉林省农业科学院/农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(长春)/农业农村部农产品及加工品质量监督检验测试中心(长春), 长春 130033)

摘要: 农药在农业生产中的长期使用, 对环境造成了污染, 环境污染又给人类健康带来了潜在危害。对农药污染的环境进行修复, 成为农业环境污染控制与修复研究领域的热点问题之一。本文对环境农药污染的物理、化学和生物修复技术的研究与应用进展进行了介绍, 对各项技术的优点和不足进行了分析, 并对农药环境污染修复技术的未来发展方向进行了展望。

关键词: 农药环境污染; 物理修复; 化学修复; 生物修复

中图分类号: X592

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)05-0128-04

Research and Applications Progresses of Pesticide Environmental Pollution Remediation Technologies

WANG Ying, WANG Ying[△], WEI Chunyan*

(Jilin Academy of Agricultural Sciences/Risk Assessment Lab of Agro-products Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Center for Quality Supervision and Testing of Agri-products and Processed Agri-products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033)

Abstract: The long-term use of pesticides in agricultural production has caused environmental pollution, which has also brought potential harm to human health. Remediation of pesticide contaminated environment has become one of the hot issues in the field of agricultural environmental pollution control and remediation. This paper introduces the research and application progress of physical, chemical and biological remediation technologies for environmental pesticide pollution, analyzes the advantages and disadvantages of each technology, and looks forward to the future development direction of pesticide environmental remediation technology.

Key words: Pesticide environmental pollution; Physical remediation; Chemical remediation; Biological remediation

农药作为农业生产中重要的辅助生产资料, 一直被长期和广泛使用, 在促进农业生产的同时, 农药的残留不仅污染农产品, 还造成土壤、水等环境污染, 进而给人体健康带来潜在危害^[1-2]。研究表明, 使用的杀虫剂只有 1% 会作用于目标害虫, 其余则会进入土壤、空气和水中, 进而进入食物链, 影响包括人类的非目标物种^[3-4]。因此, 科学家们一方面在努力解决农产品中的农药残留问题, 另一方面, 也一直致力于研究受到农

药污染的环境的修复技术。本文对农药污染环境修复技术中比较成熟的物理法、化学法和生物法的原理、应用及优缺点进行了概述, 以期对相关研究和应用提供参考。

1 农药环境污染的物理修复

1.1 吸附法

吸附法是利用吸附剂的特殊物理结构对农药进行吸附的方法, 目前使用的吸附剂根据来源可以分为两类, 一类是直接取自自然的天然吸附剂, 如稻壳灰、腐殖质、膨润土等, 它们在自然界中广泛存在, 可以有效吸附残留农药, 并阻止其迁移。Bezerra Charleston de O 等^[5]研究了辣木籽壳作为吸附剂对水中的敌草隆吸附能力, 结果表明在合适条件下, 其吸附能力远远高于其他天然吸附剂。另一类是人工进行改造或者制造出的吸附剂^[6],

收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20180414076GH); 国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP2019004)

作者简介: 王莹(1987-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事农产品质量安全与品质检测技术研究。

王莹[△](1991-), 女, 研究实习生, 硕士。

通讯作者: 魏春雁, 女, 博士, 研究员, E-mail: 793149468@qq.com

如 Vijetha Ponnampalani 等^[7]利用印度楝废料制备的生物炭,可以有效吸附水中的苯达酮^[7]。其中纳米复合材料是当前的研究热点,如 Archa Gulati 等^[8]制备出了介孔还原氧化石墨烯氧化锌(rGO@ZnO)复合材料,经过测试,其对水中毒死蜱的吸附效果良好,在第五次吸附循环结束后,农药吸附量超过了75%。

由于吸附剂与土壤的充分混合和回收存在难度,其主要用于水污染处理。吸附法的优点是不改变残留农药的化学性质,也不参与环境化学反应,对环境不会造成二次污染。其缺点一是吸附能力和可吸附农药种类有限,二是吸附后如果不能进行吸附剂和污染物的有效分离,则吸附剂就会成为一次性使用物质,经济成本升高,同时需要考虑后续污染物处理。针对上述缺点,吸附法的研究趋势是研制绿色环保、成本较低、高效且再生性好的吸附剂。如目前吸附剂活性炭的再生方法就有物理再生法、化学再生法和生物再生法,每类方法还分成多个不同原理方法^[9]。再如玉米秸秆这种来源丰富,原料成本低的物质,经过热裂解加工后,就会成为超级吸附剂^[10]。

1.2 蒸汽浸提和热脱附法

这两种技术均可应用于土壤修复,原理都是利用加热来进行污染物处理。蒸汽浸提技术是利用管道给土壤内部加热,使土壤中水分蒸发,并将残留农药带出;而热脱附技术是单纯利用直接加热土壤来使残留农药挥发。它们的优点是不引入外来物质,对土壤不会造成额外污染,且操作相对容易。缺点是该方法仅能针对具有挥发性的物质,适用范围小,对土壤微生物环境会造成破坏。同时蒸汽浸提技术受土壤水分含量影响,而热脱附技术需要一整套设备,成本较高^[11]。目前热脱附技术实际应用于重污染地区如农药制造厂的土壤修复。

2 农药环境污染的化学修复

2.1 化学氧化法

其原理是通过氧化剂的氧化作用,使难降解有机物转化成易降解有机物,或者直接彻底氧化成二氧化碳和水,该方法广泛适用于水中农药污染物的处理。其中高级氧化法(advanced oxidation processes, AOPs)是目前的研究热点,AOPs以羟基自由基作为主要氧化剂^[12]。目前常用的高级氧化法有臭氧催化氧化法、催化湿式氧化法、Fenton 试剂催化氧化法、光催化氧化法、电催化氧化

法、超临界水氧化法等。侯炳江等^[13]利用硅酸铁促进臭氧催化氧化分解水中阿特拉津,在20 min内对阿特拉津的分解率可达52.9%。郝凤霞等^[14]利用Fenton试剂催化氧化法对水中速灭威、克百威、抗蚜威这三种氨基甲酸酯类农药进行了降解试验,降解效率均可以达到90%以上。顾海东等^[15]利用生物废料玉米穗经处理后制成分级多孔氧化钛材料,在紫外光下降解100 mg/L敌百虫溶液,经过光催化氧化后,最终的化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)降解率为98.7%,有机碳含量降解率为73.8%,有效降解了敌百虫。周海云等^[16]采用连续流超临界水氧化技术处理含有毒死蜱的废水,能够有效去除毒死蜱残留,将废水中有机氮全部转化为氨氮。

化学氧化法具有氧化能力强、选择性小、反应速度快、处理效率高、副产物少的优点。其主要缺点是处理成本高,且多数处于试验阶段,实际应用效果无法评估。目前的研究方向主要集中于多方法联合^[17],优化降解条件,氧化和催化剂开发制作和降低成本等方面。

2.2 淋洗法

此方法主要应用于土壤农药残留处理,其原理是利用淋洗剂对土壤中的残留农药进行提取,然后再将淋洗剂进行回收。按照处理土壤的位置可分为原位修复和异位修复两种。原位修复是指污染土壤不移动,在原场地注入淋洗剂,让淋洗剂提取土壤中农药,再抽提,并对淋洗剂中农药进行处理的方法。异位修复是将土壤转移至设备中进行处理,分离出土壤中的残留农药^[18]。而淋洗剂的种类又可以分为化学表面活性剂、生物表面活性剂、有机溶剂、特殊溶剂和复配淋洗剂5种^[19]。叶茂等^[20]分别利用花生油和羟丙基 β 环糊精作为淋洗剂,联合使用超声强化和升温辅助等辅助手段,对有机氯农药污染场地土壤进行异位淋洗修复,结果表明综合考虑修复效率和修复后的潜在环境风险,三次淋洗最为合理。陈伟伟等^[21]利用不同浓度的Tween 80对污染土壤中的农药滴滴涕洗脱效果进行研究,结果表明使用8 000 mg/L的Tween 80溶液进行土壤洗涤处理,并结合其他修复技术,能够有效修复滴滴涕污染土壤。

淋洗法适用于土壤污染修复,对于孔隙大、污染程度高的土壤治理效果较好,但回收不充分容易造成对土壤和地下水的二次污染,同时,在原位淋洗过程中,可能会对植物和微生物造成不良影响,这些都是需要克服的问题。淋洗法近几年的

研究不多,研究多侧重于更加环保、低廉和广谱的淋洗剂的研发、优化淋洗程序、改进淋洗液回收后处理方法以及开发联合修复技术等方面。

3 农药环境污染的生物修复

3.1 植物修复法

该方法是利用植物的生长来清除环境中农药,可分为三种:一是直接对土壤中的农药及其代谢物进行吸附,二是植物通过根际释放到土壤中一些酶类物质直接降解农药及其代谢产物,三是植物根际和微生物联合参与农药分解过程^[21]。很多时候这三种机制在植物修复中共同起作用。

植物修复法在土壤和水体中均有研究应用。水中某些微藻可以参与农药的吸附和分解^[23], Baglieri A 等^[24]在水栽番茄废水中加入四尾栅藻和小球藻进行培养,发现在培养一段时间后,水中的农药残留均有下降,且本身生长没有受到显著影响,说明这两种微藻可以用于农业废水净化。而陆燕青等^[25]选取美人蕉、再力花和菖蒲三种常见的水生植物,通过静态水培试验研究其对有机氯农药的代表性污染物 β -六氯环己烷的净化效果,结果是三种水生植物对其均有一定的去除效果。宋福强等^[26]的试验研究植物根际和微生物联合分解农药效果,将摩西球囊霉接种在紫花苜蓿根上形成共生体系,然后在种植土壤中加入阿特拉津,观察降解效果,结果表明苜蓿菌根对阿特拉津具有较强的降解能力。

植物修复的优点是经济成本较低,适于大面积使用,同时不会引进有害物质,且能增加土壤肥力等。缺点是其覆盖深度有限,且周期较长,无法满足快速修复需求,因此还需要研究完善。近年来研究的主要方向集中于修复植物种库的丰富、吸附型修复植物的回收处理、修复植物的附加效益的提高、利用其他方法辅助提高植物修复效率这四个方面。

3.2 微生物修复法

用于农药污染修复的微生物分为环境中本身存在和人为培养两种来源,它们在人为筛选和基因改造后,投放入待修复的环境中,用来降解农药残留^[27-28]。国内外对于微生物降解农药的研究已经有几十年的历史,成功筛选出了细菌、真菌、放线菌等不同种类的有效微生物。其作用机制可分为酶促反应和非酶促反应,其中酶促反应是主要作用机制,即微生物利用自身分泌的酶把农药降解为毒性小或者无毒性代谢物^[29]。再细致划分

又分为有效性酶代谢和共代谢。一般有效性酶代谢包括广谱酶(如水解酶类、氧化还原酶类)代谢和特异酶代谢^[30]。李娜等^[31]从农药厂排污口土壤中筛选出以除草剂麦草畏作为唯一碳源的鞘脂菌属细菌 Dca-5,其中分离出了一种细胞色素 P450 类单加氧酶-麦草畏脱甲基酶,可通过脱甲基使麦草畏降解。有机磷水解酶由于其广谱、条件温和等特点,是目前的研究热点之一。共代谢是指微生物需要在有其他碳源来源的添加后才能达到农药降解的目的,由于环境中的农药浓度一般比较低,无法作为微生物唯一的碳源,因此共代谢也成了大多数农药污染的降解途径,在实际应用中,需要添加额外碳源引发或者加强降解效率。艾涛等^[32]在利用菌株 L3 降解有机磷农药乐果的研究中发现,在添加碳源蔗糖的情况下,该种微生物才进行生长并降解乐果,说明其是以共代谢方式降解乐果的。非酶促反应是微生物通过酶解以外的方式参与降解农药的过程,通过改变环境中的离子浓度、pH 等物理化学性质,间接促使农药发生降解,包括脱卤作用、脱烃作用、环裂解作用、还原作用等。

物理和化学修复方法可能会影响土壤结构和水生态环境,并且成本较高,又易形成二次污染,微生物修复则没有这些问题,微生物由于其种类多,分布范围广,代谢方式多样,因此更被作为重点研究方向。其缺点是微生物存活和修复效率受 pH、温度、污染物浓度等环境因素影响较大,且需要考虑引入外来微生物对原生态平衡是否会造成不良影响。研究热点方向是菌株筛选和基因工程菌构建、有效酶提取以及强化修复技术研究等方面。利用表面活性剂增强的微生物修复技术,可以有效提高农业土壤中残留农药的生物利用度和去除效率^[33-34]。

4 总 结

当前农药环境污染修复技术研究主要集中在吸附法、高级化学氧化法、植物和微生物修复法以及联合修复法^[35]上。而无论是物理法、化学法还是生物修复法,它们在单独使用时,都会有各种不同的局限性,未来的研究趋势是多种方法联合研究应用,以弥补或者加强修复效果。目前还有很多技术尚处于实验室阶段或者野外小规模试验阶段,大规模使用和推广并保持其效果稳定性还需要进一步研究,并需要考虑如何降低经济成本问题。在实际推广应用,需要针对不同的修复对

象和残留农药种类,结合经济性综合评价来选择合适的修复方案。

参考文献:

- [1] 赵滨,卢宗志.莠去津在吉林省的应用和残留现状调查[J].东北农业科学,2018,43(3):28-31.
- [2] 王士杰,李如升,赵权,等.人参有机氯农药残留研究[J].东北农业科学,2016,41(5):92-96.
- [3] Lozowicka B, Jankowska M, Hrynko I, et al. Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2016, 188(1): 1-19.
- [4] Meharg A A, Cairney J W G. Ectomycorrhizas-extending the capabilities of rhizosphere remediation? [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2016, 32(11): 1475-1484.
- [5] Bezerra Charleston de O, Cusioli Luís F, Quesada Heloise B, et al. Assessment of the use of Moringa oleifera seed husks for removal of pesticide diuron from contaminated water[J]. Environmental technology, 2020, 41(2): 191-201.
- [6] Gregory Samuel J, Anderson Christopher W N, Camps-Arbestain Marta, et al. Biochar in co-contaminated soil manipulates arsenic solubility and microbiological community structure, and promotes organochlorine degradation[J]. PloS one, 2015, 10(4): e0125393.
- [7] Vijetha Ponnamp, Naresh Kumar Katari, Ramesh Naidu Mandapati, et al. Efficacy of biochar in removal of organic pesticide, Bentazone from watershed systems[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2020, 55(4): 396-405.
- [8] Archa Gulati, Mandeep, Jaideep Malik, et al. Mesoporous rGO@ZnO composite: Facile synthesis and excellent water treatment performance by pesticide adsorption and catalytic oxidative dye degradation[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 160: 254-263.
- [9] 伏晓林,贾彪,王占鑫,等.活性炭再生方法及其在水处理中的应用研究进展[J].工业用水与废水,2020,51(3):1-5.
- [10] 王晓娥,林彦萍,杨晓东.玉米秸秆基材料研究进展[J].东北农业科学,2019,44(6):80-85.
- [11] Sun J, Pan L, Tsang D, et al. Organic contamination and remediation in the agricultural soils of China: a critical review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 724-740.
- [12] 孙贤波,赵庆祥,曹国民,等.高级氧化法的特性及其在应用[J].中国给水排水,2002(5):33-35.
- [13] 侯炳江,沈吉敏,李太平,等.硅酸铁催化臭氧去除水中的阿特拉津和硝基苯[J].黑龙江大学自然科学学报,2015,32(2):223-228.
- [14] 郝凤霞,何金兰,李鹏,等.Fenton氧化降解水中几种氨基甲酸酯类农药的试验研究[J].应用化工,2020,49(7):1623-1625,1629.
- [15] 顾海东,王陈程,刘畅,等.分级多孔TiO₂光催化剂的合成及降解农药废水性能研究[J].硅酸盐通报,2016,35(3):677-681.
- [16] 周海云,崔卫方,姜伟立.超临界水氧化处理毒死蜱产生的缩合废水[J].科学技术与工程,2018,18(2):367-371.
- [17] Ma X H, Zhao L, Lin Z R, et al. Soil washing in combination with homogeneous Fenton-like oxidation for the removal of 2,4,4'-trichlorodiphenyl from soil contaminated with capacitor oil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(8): 7890-7898.
- [18] 陈莉,李超,马海峰.有机农药污染土壤的修复方法研究进展[J].环境保护与循环经济,2015,35(7):39-42.
- [19] 叶茂,杨兴伦,魏海江,等.持久性有机污染场地土壤淋洗法修复研究进展[J].土壤学报,2012,49(4):803-814.
- [20] 叶茂,孙明明,王利,等.花生油与羟丙基β环糊精对有机氯农药污染场地土壤异位增效淋洗修复研究[J].土壤,2013,45(5):918-927.
- [21] 陈伟伟,王国庆,章瑞英,等.Tween 80对DDTs污染场地土壤的增溶洗脱效果研究[J].农业环境科学学报,2010,29(2):276-281.
- [22] 卢桂宁,党志,陶雪琴,等.农药污染土壤的植物修复研究进展[J].土壤通报,2006(1):189-193.
- [23] Jing Nie, Yuqing Sun, Yaoyu Zhou, et al. Bioremediation of water containing pesticides by microalgae: Mechanisms, methods, and prospects for future research[J]. Science of the Total Environment, 2020, 707: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136080>.
- [24] Baglieri Andrea, Sidella Sarah, Barone Valeria, et al. Cultivating Chlorella vulgaris and Scenedesmus quadricauda microalgae to degrade inorganic compounds and pesticides in water.[J]. Environmental science and pollution research international,2016,23(18):18165-18174.
- [25] 陆燕青,梁延鹏,邓杨,等.不同水生植物对水体β-HCH净化效果的研究[J].工业安全与环保,2018,44(10):70-73.
- [26] 宋福强,范晓旭,常伟,等.苜蓿菌根对土壤中阿特拉津降解及酶活性影响[J].中国农学通报,2016,32(30):182-187.
- [27] 高小朋,肖梦雨,叶飞,等.乙基对硫磷降解菌研究初报[J].吉林农业科学,2012,37(4):33-35.
- [28] Xing Huang, Jian He, Xin Yan, et al. Microbial catabolism of chemical herbicides: Microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2017, 143: 272-297.
- [29] 黄亚丽,何宪科,张丽萍,等.农药污染土壤的微生物修复研究进展[J].现代化农业,2011(9):1-4.
- [30] Rayu Smriti, Nielsen Uffe N, Nazaries Loïc, et al. Isolation and Molecular Characterization of Novel Chlorpyrifos and 3,5,6-trichloro-2-pyridinol-degrading Bacteria from Sugarcane Farm Soils[J]. Frontiers in microbiology, 2017, 8: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00518>.
- [31] 李娜,彭乾,何健,等.麦草畏降解菌株 *Sphingobium* sp. Dca-5 的分离、鉴定及降解特性[J].应用与环境生物学报,2019,25(4):943-949.
- [32] 艾涛,王华,温小芳,等.有机磷农药乐果降解菌株 L3 的分离鉴定及其性质的初步研究[J].农业环境科学学报,2006(5):1250-1254.
- [33] Chul-Hwan Kim, Dong Wan Lee, Young Mok Heo, et al. Desorption and solubilization of anthracene by a rhamnolipid biosurfactant from *Rhodococcus fascians*[J]. Water Environment Research, 2019, 91(8): 739-747.

- 量的影响[D]. 郑州: 河南大学, 2008.
- [3] Li Z, Shao L, Ruan Z, et al. Converting untreated waste office paper and chitosan into aerogel adsorbent for the removal of heavy metal ions[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 193: 221-227.
- [4] 张建伟, 王中原, 范红伟, 等. 中药水提液的絮凝和选择性絮凝[J]. 中草药, 2006, 37(8): 1271-1274.
- [5] 王森业, 殷博迪, 王玉宁, 等. 不同方法提取地榆总三萜含量的比较及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 111-115.
- [6] Chua L S, Latiff N A, Mohamad M. Reflux extraction and cleanup process by column chromatography for high yield of andrographolide enriched extract[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2016, 3(2): 64-70.
- [7] 娄涛涛, 金 玲, 陀扬凌, 等. BBD-响应面法优化黑果枸杞色素的渗漉法提取工艺及其纯化工艺研究[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 244-250.
- [8] 徐玉玲, 谭清红, 伍利华, 等. 地龙渗漉工艺参数优选[J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(21): 41-43.
- [9] 梁贺升, 陈少瑾. 大孔树脂脱除中药水煎液中铅、镉和铜的研究[J]. 广东微量元素科学, 2010, 17(3): 46-49.
- [10] 李 琼, 梁成满, 吴 婷. 超临界CO₂萃取法去除橘红中重金属Cu、As、Pb的研究[J]. 中草药, 2006, 37(7): 1005-1008.
- [11] 邝才志, 陈两绵, 高慧敏, 等. γ -巯丙基硅键合胶脱除黄连液中重金属[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(18): 20-23.
- [12] 叶利民, 赖志平. 壳聚糖对铬胁迫下豌豆种子萌发的影响[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(5): 16-18.
- [13] 刘 杰. 中药水提液典型杂质果胶絮凝效果与机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [14] 张忠国, 康 勇, 冯 颖, 等. 絮凝技术在中药提纯中的应用[J]. 化学工业与工程, 2003, 20(6): 377-386.
- [15] 程红霞, 林 强. 壳聚糖对中药水提液中重金属残留的吸附特性研究[J]. 北京联合大学学报, 2006, 20(1): 69-72.
- [16] 江 伟, 苏海佳, 谭天伟. 分子印迹吸附剂对红景天水煎液中重金属的吸附[J]. 化工学报, 2008, 59(5): 1179-1183.
- [17] 张建伟, 丁晓光, 冯 颖, 等. 壳聚糖对中药甘草水提液的絮凝效果及沉降模型[J]. 过程工程学报, 2015, 15(2): 236-241.
- [18] 潘育方, 黄丹莹. 壳聚糖去除中药水煎液中重金属的初探[J]. 化工时刊, 2005, 19(11): 27-28.

(责任编辑: 王丝语)

(上接第13页)

- [13] Amarawathi Y, Singh R, Singh A K, et al. Mapping of quantitative trait loci for basmati quality traits in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Molecular Breeding, 2008, 21(1): 49-65.
- [14] 罗玉坤, 林榕辉, 陈玉英, 等. NY147-88 米质测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [15] 高修吾, 杨浩然, 吴艳霞, 等. GB/T 5497-85 粮食、油料检验水分测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.
- [16] 凌家煜. LS/T6101-2002 谷物粘度测定快速粘度仪法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [17] 刘三才, 郑殿升, 曹永生, 等. 中国小麦选育品种与地方品种的遗传多样性[J]. 中国农业科学, 2000, 33(4): 20-24.
- [18] 张宏纪, 王广金, 孙 岩, 等. 春小麦航天诱变入选后代的变异研究[J]. 核农学报, 2007, 21(2): 111-115.
- [19] 郑康乐, 庄杰云. 我国水稻推广品种的遗传变异性和种质资源的开发利用[J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(3): 69-72.
- [20] 张继峰, 刘玉梅, 方智远, 等. 青花菜相同亲本的DH与F₂群体遗传多样性的比较[J]. 园艺学报, 2012, 39(6): 1090-1098.
- [21] 徐振东, 兰秀红, 杨 曼, 等. Co⁶⁰- γ 辐射对2种高羊茅染色体核型的影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(3): 18-24.
- [22] 姜 昱, 李毅丹, 刘相国, 等. EMS诱变技术在我国玉米育种中的应用[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(6): 21-24.
- [23] 黄永相, 郭 涛, 蔡金洋, 等. 空间环境和⁶⁰Co- γ 辐照对水稻稻米品质的诱变效应[J]. 核农学报, 2013, 27(6): 709-714.
- [24] 曲 龙, 卢夏茹, 李阳生, 等. 水稻辐射诱变突变体的种子蛋白质成分分析[J]. 核农学报, 2015, 29(2): 209-214.
- [25] 李 斌, 顾万春. 松属植物遗传多样性研究进展[J]. 遗传, 2003, 25(6): 740-748.
- [26] 郑文凯, 陈光辉, 周清明, 等. 两系杂交水稻稻米品质性状及相关性研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(4): 313-315.
- [27] 李 欣, 张 蓉, 隋炯明, 等. 稻米淀粉粘滞性谱特征的表现及其遗传[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(5): 384-390.
- [28] 姚月明, 沈新平, 沈明星, 等. 太湖流域水稻地方种的稻米品质RVA谱多样性[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(6): 1213-1218.

(责任编辑: 刘洪霞)

(上接第131页)

- [34] D C Wolf, J Gan. Influence of rhamnolipid biosurfactant and Brij-35 synthetic surfactant on ¹⁴C-Pyrene mineralization in soil [J]. Environmental Pollution, 2018, 243(Part B): 1846-1853.
- [35] Mena E, Villaseñor J, Rodrigo M A, et al. Electrokinetic remediation of soil polluted with insoluble organics using biological permeable reactive barriers: effect of periodic polarity reversal and voltage gradient[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 299: 30-36.

(责任编辑: 刘洪霞)