

农药残留降解技术研究现状

杨霞¹, 荆常亮², 余佳敏³, 杜秀春⁴, 苟春苗⁵, 余祥文³, 杨伟⁴, 徐海波⁴, 李义强², 李斌^{1*}

(1. 中国烟草总公司四川省公司, 四川成都 610000; 2. 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266101; 3. 四川省烟草科学研究所, 四川成都 610000; 4. 山东青岛烟草有限公司, 山东青岛 266000; 5. 四川烟草复烤有限责任公司, 四川成都 610000)

摘要 农药对农业生产和发展起着举足轻重的作用, 但是同时也造成了一定的危害, 如农药残留引发的污染问题。现阶段降解农药残留的方法主要包括物理方法如应用洗涤、超声波技术、电离辐射和夹带法等; 化学方法如应用水解、氧化分解和光化学降解等; 生物方法如微生物降解、酶降解和工程菌降解等。微生物降解作为现阶段的热门技术, 可为农药残留降解技术提供支撑, 为解决农产品和环境中的农药污染奠定基础。

关键词 农药残留; 微生物降解; 污染
中图分类号 S481+.8 **文献标识码** A
文章编号 0517-6611(2023)02-0024-03
doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.006



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Status and Progress of Pesticide Residue Degradation

YANG Xia¹, JING Chang-liang², YU Jia-min³ et al (1. China National Tobacco Corporation Sichuan Branch, Chengdu, Sichuan 610000; 2. Institute of Tobacco, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao, Shandong 266101; 3. Sichuan Institute of Tobacco Science, Chengdu, Sichuan 610000)

Abstract Pesticides play an important role in agricultural production and development, but they also cause certain harm, such as pollution caused by agricultural residues. At present, the methods for degradation of pesticide residues mainly include physical methods such as washing, ultrasonic technology, ionizing radiation and entrainment; chemical methods such as hydrolysis, oxidative decomposition and photochemical degradation; biological methods such as microbial degradation, enzyme degradation and engineering bacteria degradation. Microbial degradation, as a popular technology at this stage, can provide support for pesticide residue degradation technology and lay a foundation for solving pesticide pollution in agricultural products and the environment.

Key words Pesticide residues; Microbial; Degradation; Research; Pollution

农药在农业生产当中扮演着重要的角色, 可直接作为调节剂控制作物生长, 间接作为辅助剂、增效剂来提高药剂效力从而影响作物生长, 在农作物增产、质量保障以及病害防控等方面有不可取代的意义^[1-2]。农药具有效果显著、生效迅速、强稳定性、价格便宜等优点, 在防治农作物病虫害方面是目前利用率最高的措施之一^[3]。但伴随农药的大量应用, 农药残留问题在农产品销售中的影响日趋严重。农药残留含有农药原体、有毒代谢物、降解物和杂质, 指农药使用后生物体、农副产品和环境中的残存部分^[3]。它首先会造成环境污染, 影响生物生长, 食用此类农作物更可能会危害人体健康, 这已引起国内外的高度重视。

现阶段的研究表明, 农药残留的降解方法分为: 物理法、化学法和生物法^[4]。其中物理方法包括洗涤、超声波技术、电离辐射和夹带法等, 化学方法包括水解、氧化分解和光化学降解等, 生物方法有微生物降解、酶降解和工程菌降解等, 而随着微生物的研究作为热点, 利用微生物降解农药在近年来也受到广泛关注^[5]。该研究对农药残留降解的研究现状和进展进行了综述, 为农药残留控制新技术的研究奠定基础。

1 物理解降

农药的物理降解主要包括洗涤、超声波降解、电离辐射

和夹带等多种方法, 其原理是利用农药的一些物理和化学特性, 如水溶性、热不稳定性和光不稳定性等去除农药残留^[6]。

1.1 洗涤 洗涤是研究和使用的最多的物理降解农药残留的技术。采用清水洗涤农产品后, 水溶性的农药残留会得到很好的去除, 脂溶性农药的降解率较低, 可选择洗涤剂加入清水中以加速其溶解。除清水外, 盐水、碱水、酸性水均可以作为农产品中农药残留的洗涤剂。不同洗涤剂对农药残留都有一定程度的去除效果, 但不同洗涤剂对不同农药的降解效果也有差异。有研究用 5 种洗涤剂处理不同菜叶上的农药残留, 试验结果显示不同洗涤剂对菜叶农药残留均能降解, 但降解效率有所差异, 5‰的盐水降解效率最高^[7]。刘伟森等^[8]利用不同洗涤剂(超声波水泡、清水、食用碱、洗洁精)处理娃娃菜, 采用气相色谱检测敌敌畏和乐果含量, 结果显示不同的处理方法均可以获得不同程度的农药降解效果, 洗洁精降解效率最高, 对乐果和敌敌畏的降解率分别为 76.11% 和 84.38%。

洗涤类型和温度、溶解度、残留时间和位置等因素都会导致洗涤法处理农药残留的不同降解效果^[9]。另外, 洗涤剂的不当使用可能会造成更大的危害, 如部分碱性洗涤剂处理农药残留后的毒性会扩大 10 倍以上, 所以在洗涤剂酸碱性难以区分时应尽量不用; 而部分合成洗涤剂因强吸附性, 难处理反而造成二次污染^[10]。

1.2 超声波降解法 超声波降解法是通过超声波辐射把污染物分解为小分子的方法^[11]。超声波技术因高强度、高频率的振荡特点比其他农药处理方法的溶出速率快、缩短了时

基金项目 中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-TRIC); 中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC201907); 山东青岛烟叶有限公司科技项目(2021-04-01-JZ)。

作者简介 杨霞(1995—), 女, 山东诸城人, 助理研究员, 硕士, 从事海洋资源农业应用研究。* 通信作者, 高级农艺师, 从事烟草生产与绿色防控研究。

收稿日期 2022-03-01; **修回日期** 2022-03-30

长^[12]。Golash 等^[13]研究发现,降解效果受反应器类型的影响,且声强与敌敌畏的降解率呈正相关;用频率为 20 kHz、声强为 0.34~0.68 W/mL 的超声波辐照 120 min 后废水中敌敌畏可完全降解。Farooq 等^[14]用超声波降解农药废水溶液中的氧乐果的降解率可达 96% 以上,且在 20~70 °C 范围内,超声波降解氧乐果的效率几乎不受温度影响。目前应用超声波处理农药残留降解仍处于实验室阶段,缺乏系统研究,要想大规模利用超声波降解技术,必须解决在工业上适用性、经济性、放大性等困难^[15]。

1.3 电离辐射 电离辐射也是由大分子降解成小分子的过程,主要通过放射性同位素所释放的各种高能射线产生能量使农药的各种化学键断裂^[12]。电离辐射法通常作用于常温常压下,操作简单、广泛应用、安全无污染,且速率高、见效快、反应完全。不同辐照剂量处理不同农药的效果也有差异。陈梅红等^[16]用电离辐射方法对 4 种农药(甲基对硫磷、溴氰菊酯、氧化乐果、三氯杀螨醇)进行处理,研究发现农药降解率受辐照剂量的影响,但二者关系并不一定是呈正相关,前 2 种农药的降解率随着辐射量的增加而增大,而氧化乐果降解效率基本不变,后者降解率随辐射量增加而减小。黄志勇等^[17]研究发现,不同辐照剂量处理对绿茶农药残留均有一定的降解效果,且辐照后的绿茶鲜叶和干叶的农残降解率均有不同程度降低,效果最好的处理组降低了 39.63%。但电离辐射在农产品上的应用效果并不好,比如短波辐射会大幅缩短果品贮藏期且损害果品质量。

1.4 夹带法 利用具备吸附性的物质(如活性炭、石英砂等)将农药残留吸附或夹带的方法称为夹带法^[18]。活性炭有比表面积大、孔隙率高、吸附性好和安全性高的优点,涉及气液体的分离精制、水处理、空气净化以及资源回收等方面^[18]。活性炭的吸附效果受农药浓度、温度、pH 及其他有机物竞争吸附等因素限制^[19]。活性炭添加量为 15%,吸附时间为 1 min,硅藻土添加量为 6.3% 时,可使浓缩苹果汁中的甲胺磷残留量达到 1 mg/kg,农药降解效率最高^[20]。

2 化学降解

使用对应化学官能团的化学试剂与其发生反应,完成农药残留降解的方法称为化学降解^[21],典型方法有水解、氧化分解和光化学降解等。

2.1 水解 水解反应因农药结构分子差异在酸、碱作用下均可进行^[21]。肖乾芬等^[22]发现,三唑磷农药在中性及酸性作用下的水解速率明显低于碱性。汤涛等^[23]研究了异恶唑草酮分别在 pH 4、pH 7 和 pH 9 条件下的水解速率,发现在 pH 9 时最快。

2.2 氧化分解 次氯酸盐、臭氧、过氧化氢等化学物质在食品行业中已广泛应用,它们是强氧化剂,能和农产品上残留的农药发生反应,生成相应的无毒、易被接受的酸、醇、胺或其氧化物等小分子化合物,从而达到对农药残留的降解。研究发现,在臭氧浓度为 7.0 mg/L 时,5 min 后对百菌清的降解率可达 100 °C^[24]。过氧化氢溶液也能提高植物表面甲胺磷、毒死蜱、久效磷的降解效果,其中 10 mL/L 过氧化氢降解效

果达到最佳^[25]。

2.3 光化学降解 光化学降解能将有机污染物降解为 H₂O 和 CO₂ 等无害物质^[26],在光和催化剂的作用下将光能转化为化学能^[27]。增加电荷分离和运输、减少复合是对理想光催化剂的要求^[28],TiO₂ 因无毒、成本低、效率高、性质稳定、反应条件易达到等优点而成为最具研究前景的半导体之一^[29]。以矿化作用控制农药的剧毒是 TiO₂ 降解作用的途径^[30]。Chen 等^[31]用 TiO₂ 光催化对草甘膦废水进行处理,研究发现控制其他因素不变,光催化剂用量由 1.0 g/L 提升至 6.0 g/L 时,草甘膦降解率提升了近 40%。

3 生物降解

早期生物降解被认为是需氧微生物对天然和合成有机物的破坏或矿化作用,主要来自土壤、水体和废水生物处理系统^[32]。随着研究水平的发展,生物降解的含义拓展为利用生物将污染物分解成小分子化合物的过程,生物类型有各种微生物、高等植物和动物^[33]。

生物方法的降解速率比物理、化学方法慢,但仍有很多优点^[34-35]:①可利用环境中存在的微生物进行土壤和水体农药修复,操作简便且不破坏环境;②降解农药的微生物来源于自然,成本低、分布广泛且种类繁多;③农药在修复过程中可被微生物利用,在降低环境毒性的同时生成的产物低毒甚至无毒,减少环境二次污染;④微生物对于所有农药污染物均可突变形成相应的降解微生物,适用性和突变性强、广谱性高^[34,36-37]。生物法农药残留降解具有广阔的应用前景^[38]。

生物降解农药残留主要是通过微生物降解、酶降解、工程菌降解来进行的。

3.1 微生物降解 酶促反应和非酶促反应是微生物降解的 2 种途径^[39]。酶促反应是指微生物通过细胞内酶或分泌的胞外酶直接作用于农药,经过一系列生理生化反应将农药完全降解成分子量、毒性都很小的化合物的过程^[40]。非酶促反应是指微生物通过代谢改变农药的物理、化学性质(如环境离子浓度、pH)间接促使降解农药的过程^[41]。微生物降解农药主要是通过酶促反应^[40]。研究发现,杂色革盖菌(*Coriolus versicolor*)、毛韧革菌(*Stereum hirsutum*)在 42 d 后对敌草隆、莠去津和特丁津的降解率在 86% 以上^[42]。陈振德等^[43]发现叶面施海藻多糖稀土配合物对小白菜、甘蓝、芹菜中毒死蜱、氧化乐果、敌敌畏等有机磷农药残留具有明显的降解作用。高慢慢等^[44]研究发现,有机磷水解酶(OPH)对多种农药均有不同程度的降解效果,其中对甲基对硫磷的降解效果最好,高达 99%;对敌敌畏和啶硫磷的降解率也可达 82.2%~98.7%;对其他农药的降解率则偏低。

3.2 酶降解 利用酶降解农药残留是最具有潜力的方法,共生或单一微生物对农药的降解作用都是在酶参与下完成的^[40]。隋程程等^[45]通过施用叶面肥改变作物酶活性或微生物活性,提高烟叶上 4 种杀虫剂残留降解效果,且叶面肥稀释 1 000 倍处理效果最佳。吴昊等^[46]使用壳聚糖稀土复合物涂膜刺激植物体内酶活,对毒死蜱农药降解率超过 73%。研究表明,酯酶在降解中起着重要作用,用合适的基质固定

化酶的活性位点更易暴露于农药中,比游离酶降解效果更好^[47]。Horne 等^[48]用香豆磷和蝇毒磷作为磷源,分离到菌株 *P.monteilli* C11,从中鉴定出另一种新型对有机磷酸酯和硫酯有广泛的底物专一性的磷酸三酯酶。Richins 等^[49]构建了与纤维素结合区融合的 OPH,利用融合蛋白一步纯化并固定于纤维素类基质上的特性提高酶的使用效果。

3.3 工程菌降解 农药降解酶由于含量低、天然菌株较少、生产成本较高等因素限制了产品的应用^[5]。随着分子生物学和基因工程技术的发展,将表达高效降解农药的酶的基因构建到载体中,经转化获得工程菌来提高起降解作用的特定蛋白或酶的表达水平,使其在农药降解中发挥作用^[41]。Schofield 等^[50]将 *OPH* 基因的特定密码子突变,发现对马拉硫磷的降解活性经载有突变 *OPH* 基因的大肠杆菌增强了 1 800 倍,对内吸磷的降解活性增强了 177 倍。通过对硫磷水解酶 *adpB* 基因构建高效工程菌处理对硫磷残留,降解速率可达 90%^[51]。Jiang 等^[52]将外源甲基对硫磷水解酶基因 *mpd* 整合到呋喃丹降解菌 *Sphingomonas* sp. CDS-1 的 16S rRNA 基因(rDNA)位点,构建了能同时降解甲基对硫磷和呋喃丹且遗传稳定、不含外源抗性的工程菌株。Lan 等^[53]通过在载体 pETDuel 中同时表达有机磷水解酶 *OPH* 基因 *opd* 和酯酶 B1 基因 *b1*,构建了一株能够同时降解有机磷农药、氨基甲酸酯类农药以及拟除虫菊酯类农药的基因工程菌。

4 结语

物理、化学和生物 3 种方法是降解农药残留的主要形式。物理降解和化学降解经济方便、相对成熟、稳定,但在农药残留的低浓度降解方面受到限制。目前生物降解在农药降解菌的富集分离、降解途径、降解酶以及微生物降解的农药基因操作方面做了大量的探索和研究^[32],但降解效率成为阻碍发展的限制性因素。近年来随着分子生物学和基因工程技术的发展,通过构建高效工程菌提高降解效率成为研究热点。对微生物降解技术深入研究,可为农药残留降解技术提供支撑,为解决农产品和环境中农药污染奠定基础。

参考文献

- [1] 唐除痴,李煜昶,陈彬,等.农药化学[M].天津:南开大学出版社,1998:1-18.
- [2] 张大弟,张晓红.农药污染与防治[M].北京:化学工业出版社,2010:4-8.
- [3] 杨生权,马芳.果蔬农药残留降解方法研究进展[J].安徽农业科学,2008,36(6):2506-2508.
- [4] 姜城焰,刘睿,刘立恒.农药废水处理研究进展[J].轻工科技,2021,37(1):88-91.
- [5] 焦美娟,林文星,马鹏生,等.农药残留生物降解剂的研究进展[J].北方园艺,2021(13):141-147.
- [6] 滕瑞菊,王雪梅,王欢,等.有机磷农药的降解与代谢研究进展[J].甘肃科技,2016,32(4):46-50.
- [7] 张锐,张玉鑫,白文.不同洗涂处理对叶菜中农药残留去除效果比较[J].农业科技与装备,2010(5):30-34.
- [8] 刘伟森,朱珍,张兴茂,等.清洗方法对蔬菜中有机磷农药残留去除效果的研究[J].现代食品科技,2010,26(12):1395-1398.
- [9] 李莉,江树人,刘丰茂.蔬菜中农药残留的去除方法[J].农药,2005,44(8):347-351.
- [10] 邓晓,李勤奋.产后果蔬农药残留降解技术研究[J].安徽农学通报,2007,13(18):34-37.
- [11] GOSKONDA S, JAMES GATALLLO W, JUNK T. Sonochemical degradation of aromatic organic pollutants[J]. Waste Management, 2002, 22(3): 351-

- 356.
- [12] 孙蕊,张海英,李红卫,等.物理技术降解农产品农药残留的研究进展[J].中国粮油学报,2013,28(8):118-128.
- [13] GOLASH N, GOGATE P R. Degradation of dichlorvos containing wastewaters using sonochemical reactors[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2012, 19(5):1051-1060.
- [14] FAROOQ R, LIN F K, SHAUKAT S F, et al. Sonochemical degradation of organophosphorus pesticide in dilute aqueous solutions[J]. Journal of environmental sciences, 2003, 15(5):710-714.
- [15] 曾东仁.残留有机磷农药快速降解方法在果蔬中的应用浅析[J].广东化工,2019,46(3):111-112,119.
- [16] 陈梅红,张艳,程淑华.电离辐射降解农药残留研究[J].宁夏农林科技,1999,40(2):44-45.
- [17] 黄志勇,徐宏,朱运华,等.电离辐射在改善绿茶品质中的应用研究[J].江西农业学报,2010,22(7):71-72.
- [18] 杨柳,王贵禧,樊金拴.农产品农药残留的标准、检测和降解技术的研究进展[J].中国农学通报,2005,21(12):108-116.
- [19] 陈芳,曾令琴,葛毅强,等.浓缩苹果汁中农药残留去除方法的研究现状及展望[J].食品与发酵工业,2005,31(9):66-69.
- [20] 田洪磊,詹萍,李开雄.活性炭对浓缩苹果汁中甲胺磷残留农药吸附性能的研究[J].食品科学,2007,28(5):56-59.
- [21] 王岩,彭强,赵小明,等.生物降解农药残留的研究进展[J].中国农学通报,2021,37(18):117-124.
- [22] 肖乾芬,王晓栋,魏志波,等.三唑磷农药水解动力学研究[J].农药,2005,44(8):356-358.
- [23] 汤涛,张昌朋,吴珉,等.异唑草酮水解及在水中的光解[J].江苏农业科学,2019,47(3):249-252.
- [24] 黎其万,梅文泉,毋注.臭氧对蔬菜中农药残留降解效果的初步评价[J].西南农业学报,2004,17(S1):233-235.
- [25] 陈丹,张燕,王春琼,等.浅谈烟草农药残留的控制[J].农业与技术,2018,38(12):9.
- [26] LI H Y, QIU Y Z, YAO T, et al. Evaluation of seven chemical pesticides by mixed microbial culture (PCS-1): Degradation ability, microbial community, and *Medicago sativa* phytotoxicity[J]. Journal of hazardous materials, 2020, 389:1-10.
- [27] ZANGIABADI M, SALJOOQI A, SHAMSPUR T, et al. Evaluation of GO nanosheets decorated by CuFe₂O₄ and CdS nanoparticles as photocatalyst for the degradation of dinoseb and imidacloprid pesticides[J]. Ceramics international, 2020, 46(5):6124-6128.
- [28] 王海英,韩洪品,孙恩浩,等.钙钛矿催化有机物转化研究进展[J].现代化工,2019,39(5):24-28.
- [29] LAZAR M A, VARGHESE S, NAIR S S. Photocatalytic water treatment by titanium dioxide: Recent updates[J]. Catalysts, 2012, 2(4):572-601.
- [30] 张伟,尤奇正,舒金锴,等. TiO₂ 型光催化剂在农药废水处理中的应用进展[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2021,30(6):64-68.
- [31] CHEN S F, LIU Y Z. Study on the photocatalytic degradation of glyphosate by TiO₂ photocatalyst[J]. Chemosphere, 2007, 67(5):1010-1017.
- [32] 尤民生,刘新.农药污染的生物降解与生物修复[J].生态学杂志,2004,23(1):73-77.
- [33] 欧晓明,王晓光,樊德方,等.农药细菌降解研究进展[J].世界农药,2003,25(6):30-35,41.
- [34] FELSOT A S, DZANTOR E K. Effect of alachlor concentration and an organic amendment on soil dehydrogenase activity and pesticide degradation rate[J]. Environmental toxicology and chemistry, 1995, 14(1):23-28.
- [35] ELLEGAARD-JENSEN L, AAMAND J, KRAGELUND B B, et al. Strains of the soil fungus *Mortierella* show different degradation potentials for the phenylurea herbicide diuron[J]. Biodegradation, 2013, 24(6):765-774.
- [36] 李岩,蒋继志,刘翠芳.微生物降解农药研究的新进展[J].生物学杂志,2007,24(2):59-62.
- [37] GIRBAL L, ROIS J L, LINDLEY N D. Growth rate influences reductive biodegradation of the organophosphorus pesticide demeton by *Corynebacterium glutamicum*[J]. Biodegradation, 2000, 11(6):371-376.
- [38] 田江.微生物降解农药的特性及其在土壤复合农药污染修复中的应用[D].武汉:武汉大学,2017.
- [39] 张金花,韩润亭,苏颖,等.微生物降解农药残留的研究进展[C]//吴孔明.公共植保与绿色防控.北京:中国农业科学技术出版社,2010:640-645.
- [40] 陈少华,罗建军,林庆胜,等.农药残留降解方法研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(1):343-345.

脂肪(EE)、灰分、酸性洗涤纤维(ADF)、中性洗涤纤维(NDF)。粗蛋白含量的高低直接关系到牧草营养价值的高低^[12]。28个苜蓿品种粗蛋白量最高的是标靶,达20.79%,粗蛋白量最低为17.80%;粗灰分含量是粗饲料重要的指标,反映出牧草矿质元素的总体含量^[13]。28个苜蓿品种粗灰分含量最高的是WL363HQ,达10.10%。粗脂肪是供给动物的能源和贮存能量的最好形式。28个苜蓿品种粗脂肪含量最高的是大银河,达2.02%,粗脂肪含量最低是沃苜1号,为1.62%。相对饲喂是粗饲料质量评定的重要指标,主要根据NDF和ADF通过公式计算得到,NDF越低代表家畜食量越高,ADF越低代表消化率越高,对应的相对饲喂价值越高。28个苜蓿品种NDF最低的是佰苜401,为44.69%,NDF含量最高的是WL440HQ,为50.92%。28个苜蓿品种ADF最低的为标靶,达37.41%,ADF含量最高的为WL440HQ,达43.53%。相对饲喂价值较好的是标靶和佰苜401。单项营养指标各有其优劣,因此需要综合各营养指标来判断各品种的优劣^[13]。该试验应用隶属函数对不同品种综合性能进行评分,从中筛选出整体表现突出的品种。通过分析,大银河、标靶、佰苜401、敖汉综合表现较为优秀,可进行大面积推广种植。

4 结论

在参试的28个国外引进苜蓿品种中,综合评价较好的

是大银河、标靶、佰苜401、敖汉,其中综合评价最好、相对饲喂价值表现良好的品种为大银河、佰苜401、标靶,可在兴安盟当地大面积推广应用。

参考文献

- [1] 洪绂曾.苜蓿科学[M].北京:中国农业出版社,2009:334.
 - [2] 孙自忠,柳茜,李峰,等.苜蓿的起源与传播考述[J].草业学报,2019,28(6):204-221.
 - [3] 翟文栋,赵晓静,高婕.紫花苜蓿应用于奶牛生产的研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2014(1):39-41.
 - [4] 陈洁.不同土壤条件下20个紫花苜蓿品种农艺性状及营养价值的比较[D].长春:东北师范大学,2017.
 - [5] 朱爱民,张玉霞,王显国,等.8个苜蓿品种抗寒性的比较[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(1):45-52.
 - [6] 高宪儒,李飞,惠文.不同紫花苜蓿品种在陇东地区的引种表现[J].草业科学,2016,33(4):731-738.
 - [7] 韦潇,李小梅,曾泰儒,等.5个紫花苜蓿品种在川中丘陵地区的适应性[J].草业科学,2020,37(2):339-347.
 - [8] 武文莉,李春阳,刘慧霞.玉门地区主要引进紫花苜蓿品种综合性状评价[J].草业科学,2020,37(8):1558-1567.
 - [9] 申晓慧,冯鹏,张华,等.不同紫花苜蓿品种在佳木斯地区生长及生产特性研究[J].安徽农业科学,2014,42(11):3299-3300.
 - [10] 韩瑞宏,赵大华,陈晶晶,等.不同苜蓿种质资源苗期耐热性综合评价[J].中国草地学报,2015,37(3):48-54.
 - [11] 赵禹臣,孟庆翔,参木有,等.西藏高寒草地冷季牧草的营养价值和养分提供量分析[J].动物营养学报,2012,24(12):2515-2522.
 - [12] 胡华锋,介晓磊,郭孝,等.基施晒肥对不同生育期紫花苜蓿营养含量及分配的影响[J].草地学报,2014,22(4):871-877.
 - [13] 李德明,张少平,耿小丽,等.12个紫花苜蓿品种在半干旱地区的生产性能及营养价值[J].草业科学,2018,35(6):1472-1479.
- +++++
- (上接第26页)
- [41] 裴亮,张体彬,赵楠,等.有机磷农药降解方法及应用研究新进展[J].环境工程,2011,29(S1):273-277,174.
 - [42] BENDING G D, FRILLOUX M, WALKER A. Degradation of contrasting pesticides by white rot fungi and its relationship with ligninolytic potential[J]. FEMS microbiology letters, 2002, 212(1):59-63.
 - [43] 陈振德,汪东风,王文娇,等.海藻多糖稀土配合物对蔬菜有机磷农药残留的降解作用[J].生态毒理学报,2008,3(2):183-188.
 - [44] 高慢慢,白俊岩,孙磊,等.有机磷水解酶对不同有机磷农药降解功效的评价[J].江苏农业科学,2019,47(8):217-220.
 - [45] 隋程程,尤祥伟,李义强,等.叶面肥对烟叶中4种杀虫剂残留降解的影响[J].中国烟草科学,2017,38(4):70-75.
 - [46] 吴昊,汪东风,张宾,等.壳聚糖稀土复合物涂膜对黄瓜保鲜及降农残的效果研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2006,36(S2):51-56.
 - [47] BHATT P, BHATT K, HUANG Y H, et al. Esterase is a powerful tool for the biodegradation of pyrethroid insecticides[J]. Chemosphere, 2020, 244: 1-14.
 - [48] HORNE I, HARCOURT R L, SUTHERLAND T D, et al. Isolation of a *Pseudomonas montelli* strain with a novel phosphotriesterase[J]. Microbiology letters, 2002, 206(1):51-55.
 - [49] RICHINS R D, MULCHANDANI A, CHEN W. Expression, immobilization, and enzymatic characterization of cellulose-binding domain-organophosphorus hydrolase fusion enzymes[J]. Biotechnology and bioengineering, 2000, 69(6):591-596.
 - [50] SCHOFIELD D A, DINOVO A A. Generation of a mutagenized organophosphorus hydrolase for the biodegradation of the organophosphate pesticides malathion and demeton-S[J]. Journal of applied microbiology, 2010, 109(2):548-557.
 - [51] SOGORB M A, VILANOVA E. Enzymes involved in the detoxification of organophosphorus, carbamate and pyrethroid insecticides through hydrolysis[J]. Toxicology letters, 2002, 128(1/2/3):215-228.
 - [52] JIANG J D, ZHANG R F, LI R, et al. Simultaneous biodegradation of methyl parathion and carbofuran by a genetically engineered microorganism constructed by mini-Tn5 transposon[J]. Biodegradation, 2007, 18(4):403-412.
 - [53] LAN W S, GU J D, ZHANG J L, et al. Coexpression of two detoxifying pesticide-degrading enzymes in a genetically engineered bacterium[J]. International biodegradation and biodegradation, 2006, 58(2):70-76.
- +++++
- (上接第32页)
- [13] 成臣,曾勇军,王祺,等.氮肥运筹对南方双季晚粳稻产量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1386-1395.
 - [14] 陈海飞,冯洋,蔡红梅,等.氮肥与移栽密度互作对低产水稻群体结构及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1319-1328.
 - [15] 冯洋,陈海飞,胡孝明,等.高、中、低产水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):7-16.
 - [16] 李录久,王家嘉,吴萍萍,等.秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):254-262.
 - [17] 蒋鹏,熊洪,朱永川,等.施氮量和氮肥运筹模式对糯稻养分吸收积累和氮肥利用率的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(4):349-353.
 - [18] 蒋李健,郭程辉,周燕.“申优26”不同穗肥施用方法试验初探[J].上海农业科技,2019(1):89-90.
 - [19] 沈士博,盛海安,蒋李健,等.不同机穴播密度对“申优26”生长及产量的影响试验初报[J].上海农业科技,2019(3):42-43.
 - [20] 范晶晶,丁安强,樊佳樱.“申优系”水稻展示试验初报[J].上海农业科技,2019(6):34,37.
 - [21] 石庆华,潘晓华,黄英金,等.“江西双季稻丰产高效技术集成与示范”项目的实施效果分析[J].江西农业大学学报,2005,27(3):371-373.
 - [22] SUI B, FENG X M, TIAN G L, et al. Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors[J]. Field crops research, 2013, 150:99-107.
 - [23] 林洪鑫,潘晓华,石庆华,等.施氮量与栽插密度对超级早稻中早22产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):22-28.
 - [24] 金芝辉,王起,柴有忠.氮肥用量和移栽密度对水稻甬优1540产量和经济性状的影响[J].安徽农业科学,2019,47(8):39-41.