

Ecological Hazards of Residual Pesticides in Farmland Soils and the Pollution Remediation Technology Progress

Qingwei Zhang¹, Zhi Wang¹, Kai Huang^{1*}, Junyou Liu^{2*}, Ying Huang², Yanli Yin²

¹School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing

²University of Science and Technology Beijing, Beijing Technology Park Company, Beijing

Email: ¹ljy58@163.com, ¹khuang@metall.ustb.edu.cn

Received: Jul. 15th, 2018; accepted: Aug. 1st, 2018; published: Aug. 9th, 2018

Abstract

Farmland pesticide residues will cause great harm to the environment and the human body. This paper introduces the use of pesticides in China and the causes of pesticide residues and the specific impact to the ecological environment and human health. At the same time, the paper describes three kinds of governance techniques to pesticide residues, physical pathways, biological pathways and chemical pathways, and compares their advantages and disadvantages, hoping to play a role in engineering design. Finally, the feasibility and prospect of the way of how to effectively degrade residual pesticides are put forward.

Keywords

Pesticide Residues, Organochlorine, Comprehensive Remediation

农田土壤残留农药的生态危害及其污染修复技术进展

张清伟¹, 汪智¹, 黄凯^{1*}, 刘俊友^{2*}, 黄瑛², 尹衍利²

¹北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京

²北京科大科技园有限公司, 北京

Email: ¹ljy58@163.com, ¹khuang@metall.ustb.edu.cn

收稿日期: 2018年7月15日; 录用日期: 2018年8月1日; 发布日期: 2018年8月9日

*通讯作者。

文章引用: 张清伟, 汪智, 黄凯, 刘俊友, 黄瑛, 尹衍利. 农田土壤残留农药的生态危害及其污染修复技术进展[J]. 环境保护前沿, 2018, 8(4): 328-336. DOI: 10.12677/aep.2018.84040

摘要

农田土壤中农药的残留,会对环境生态以及人类身体造成巨大的安全隐患。本文介绍了我国农药的使用情况以及农药残留的原因和残留农药对生态环境与人体健康的影响表现。简介了目前治理农田土壤残留农药的技术途径:物理途径、生物途径、化学途径,并对技术特点进行简单了对比分析,以期能对残留农药治理技术工程设计有所借鉴。最后就如何合理地、高效地大规模降解治理农田土壤残留农药提出了分析建议。

关键词

农药残留, 有机氯, 综合修复

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤农药污染是一个全球性的环境问题。而在我国由于农药的大量施用、以及较为普遍的滥用现象等诸多因素的共同作用,使得我国土壤农药污染情况尤为严重,这些年来土壤农药污染事件频发,严重影响了我国农副产品的安全,制约我国农业经济绿色健康新格局的形成、可持续发展目标的实现。为此,本文拟就农田土壤残留农药的污染修复治理技术作一简介,并对其中关键问题作简要分析讨论。

2. 农药的简介及分类

农药(Pesticides)主要指用来防治危害农林牧业生产的有害生物(害虫、害螨、线虫、病原菌、杂草及鼠类)和调节植物生长的化学药品[1]。

我国是世界上最早应用杀虫剂、杀菌剂防治植物病虫害的国家之一,早在两千多年前就已应用了汞剂、砷剂和藜芦等。直到20世纪30年代末,植物性农药和无机农药仍被广泛使用。20世纪40年代初有机化学农药的发明,大大提高了人们对于病虫危害的防治,为减少农作物产量损失做出了巨大贡献。据国家农业部门统计,我国1996年使用化学农药防治40多亿亩次,化学除草面积达6.2亿亩次;每使用1元农药,农业可获益8~16元。但是,长期依赖和大量使用有机合成化学农药,已经带来了环境污染、生态平衡破坏和食品安全等一系列问题,对推动农业经济实现可持续发展带来许多不利的影响[2]。

中国农药经历了创建时期(1949~1960年)、巩固发展时期(1960~1983年)和调整品种结构的蓬勃发展时期三个阶段,农药品种和产量成倍增长,生产技术与产品质量显著提高。国务院决定我国自1983年3月起停止生产普效型农药六六六和滴滴涕,1991年国家又决定停止生产杀虫脒、二溴氯丙烷、敌枯双等5种农药。为适应农业生产发展的需要,国家集中力量投(扩)产了数十个高效低残留品种,使农药产量迅速增加。到1998年,全国已能生产农药200种(有效成分),农药总产量近40万吨(以折算100%有效成分计),全国农药生产能力达到75.7万吨[3]。

表1是我国常见的农药,其中有机磷类农药药效猛烈,但是其毒性降解也较快;而有机氯类农药其分子结构稳定,难以降解,故其毒性持久,如前述的六六六、滴滴涕类农药,其在土壤环境中的自然降解半衰期甚至可达30年以上[4],故其虽然对防治病虫害有效,但是其对环境的生态安全、人类健康的干

Table 1. Classification of common pesticides in China [4]**表 1.** 我国常见农药分类[4]

结构分类	用途分类	来源分类	作用方式分类	剂型分类
有机磷类	杀虫剂	矿物农药	触杀	老剂型乳油
有机氯类	杀菌剂	植物性农药	胃毒	悬浮剂
拟除虫菊酯类	杀螨剂	有机农药	熏蒸	水乳剂
	杀鼠剂	微生物农药	内吸	浓乳剂
	除草剂			微乳剂
	特异剂			可湿性粉剂
	植物生长调节剂			水性化剂型

扰和负面影响却很持久，更易酿成巨大的危害。因此，此类农药已经成为普遍需要限产、禁产的类型。拟除虫菊酯类农药是仿生合成的广谱高效的杀虫剂，有效成分是天然菊素，主要用于杀灭棉花、蔬菜、果树、茶叶等农作物上的害虫。其杀虫范围广，效果好、低残留，无蓄积，近些年来应用日益普遍。由于其使用面积大，应用范围广、数量大，接触人群多，所以由其引起的中毒病例也屡有发生[4]。

因此，农药的毒杀效果本来针对虫、螨、鼠、草等有害生物，但是滥用或者在农田这样的开放而复杂的生态系统中施用失控，则可能对环境系统的各要素都会造成不同程度的伤害。有机氯农药的超强稳定性、难降解性，使得其毒性在环境中持久有效，将更大概率对生态系统造成长远伤害，因此应是农药残留治理最重要的主攻方向之一。

3. 土壤农药污染的原因

土壤农药污染的来源大致可以分为两种情况，一是农药本身的药性持久，难以降解而导致其毒性不断随时间而扩散，另一种情况则是农药滥施、滥用，没有按照科学规范的方法使用而造成土壤污染。

3.1. 结构稳定的农药难以降解

很多农药的分子结构很稳定，比如有机氯农药，其半衰期长而不易被降解，即使经过了几十年依然能以原态留存在于土壤中。

中国作为农业大国，在 1960~1990 年间曾大规模生产和使用过 HCH、DDT、HCB 等 5 种有机氯农药，尤其是 DDT，在这期间累计生产以及使用达 40 多万吨，占全球 DDT 总用量的 22% [5]。据统计，七十年代我国共使用 HCH (六六六)、DDT (滴滴涕) 等有机氯杀虫剂约 19.17×10^4 t，占当时全国总使用量的 80% 以上。而在上世纪 80 年代初，在对全国 2000 多个县市相关农药使用的一个调查中发现，有机氯农药使用量仍然占农药总量的 78% [6]。尽管我国于 1985 年就发布相关条令禁止有机氯农药的使用，但由于早些年有机氯农药的大规模使用，使得即使过去很长时间，土壤中仍有部分有机氯农药的残留。1985 年耕层土壤中六六六总体残留水平为 0.181~0.254 mg/kg，滴滴涕为 0.222~0.273 mg/kg [7]。另据赵玲和方玲等相关报道[8] [9]，上世纪 90 年代以来，茶叶、水果中六六六和 DDT 的检出率甚至高达 100% [2]。

3.2. 农药施用方法不正确

农药的施用者由于缺乏相关的农药知识以及正确的农药施用技术，使得农药长期大量不合理地被使用、甚至被滥用[10]。

目前我国的农药施用面积约为 3 亿 hm^2 ，而农药的使用量则一直维持在 2 万吨(有效成分)以上，单位面积农药的施用量约为发达国家的 2 倍[11]。而这其中，又以上海和浙江的农药施用量为最，分别为 10.8 kg/hm^2 和 10.41 kg/hm^2 。然而，这样被施用的农药仅有小部分直接作用于农作物上。据不完全调查，粉剂

类农药的利用率仅为 10%，而液体农药的利用率仅为 20%左右，其余相当大一部分农药则在施用过程中直接降落到地面，大约占到总施用量的 40%~60%，而其中又有大概 20%~40%的药剂会漂游于空中[12]，这部分农药又会通过降水返回陆地，并随自身的渗透污染地下水和土壤，造成土壤和地下水的农药污染[13][14]。

4. 土壤农药残留污染的危害

农药残留是施用农药后的必然现象。随着农药的大批量使用，农药会在土壤中不断地积累，当农药残留达到一定程度将会显著影响土壤性质。作物耕种在受农药污染的土壤之中，会不断从土壤中吸收农药分子并在自身内部累积，不仅影响作物自身的正常生长，同时会通过食物链直接影响人畜安全。

目前我国土壤污染总体形势不容乐观，全国有超过 1300 万 hm^2 的耕地受到农药污染，占到全国耕地面积的 10%以上。据统计每年由于受农田土壤污染而造成的直接经济损失超过 200 亿元人民币[15]。

近年来，农药污染事件不断出现，造成的危害也越来越大。农药污染事件主要体现在土壤和水体、农作物等与人类的生活生产紧密联系的产品上。人们通过进食这类被污染的农作物，很容易在人体内积累残留农药分子。当积累的农药分子达到一定程度时就会造成人畜中毒；与此同时，由于大部分农药不具有选择性，因此在杀灭有害生物的同时，也会给其他有益的生物造成一定危害，从而破坏农田的生物多样性和生态平衡。总的而言，农药污染主要集中在它对以下几个方面的影响：

4.1. 土壤残留农药对农产品的污染

当施用化学农药预防虫害、除杂草时，农作物自身往往会吸收部分农药，而过半进入土壤的农药会通过农作物的根部吸收作用进入植物的内部，影响农产品，尤其是粮食作物和瓜果蔬菜等农产品的农药残留超标，即通过食物链影响人类身体健康，甚至危害生命。2009 年，据武汉市质量技术监督局对蔬菜农药残留量抽查结果表明：农药检出率达 36.7%，农药残留量超标率 23.3%，还检出了国家明令禁止或限用的农药甲胺磷、对硫磷、毒死蜱、氧化乐果、敌敌畏等[16]。

4.2. 土壤农药残留污染对人类健康的影响

土壤农药残留污染对人类健康的危害主要表现为慢性中毒。农药由于难降解会长期存在土壤及被吸收的作物中，又因为整个生态系统时刻处于开放状态，这就使得农药会通过食物链不断富集于生物体内，而人类位于食物链的顶层，受到的危害也就越大。

农药进入人类体内之后，它会参与人类的部分新陈代谢，会影响内分泌系统和神经系统的正常工作，从而影响人体健康。据流行病学研究报道，食用含有有机氯农药的食物会使女性患乳腺癌、子宫癌等生殖器官恶性肿瘤和子宫内膜疾病的可能性明显增加[17]。有机氯农药还能影响人的智力发育及神经系统，Wendel 等对众多长期接触 DDT 的人进行调查研究，发现他们的神经系统受到了不同程度上的损伤，同时有机氯农药会影响人们的免疫系统，会引起人体的致癌、致突变、致畸[18]。

4.3. 土壤农药残留对环境的污染

农药对生态环境的危害主要体现在它对环境介质的污染，主要是对土壤和水体污染。据调查，粉剂农药的利用率仅为 10%，液体农药的利用率仅为 20%左右，其余 40%~60%降落到地面，20%~40%的药剂漂游于空中[12]。空气中的农药又可通过降雨返回陆地，并随着降雨和灌溉传播或随水下渗污染地下水[13][19]，从而对土壤和水体造成二次污染。

5. 土壤农药污染的修复

目前为止土壤污染治理主要途径分为三种：物理途径、生物途径以及化学途径。

5.1. 物理途径

物理途径有焚烧法、热解析法(热挥发法)等。

焚烧技术是目前国内外用于治理土壤农药残留污染最多的工程技术,它能够在很短的时间内较彻底地处理大规模被污染的土壤。但焚烧工程技术的缺点也很突出,能耗很高,处理费用不便宜。此外,该技术还会对土壤的理化性质造成不可逆转的改变。因此,焚烧工程技术主要用来处理农药残留较为严重的土壤,对于一般农药残留的土壤不适应。

热解析技术分为高温热解析技术和低温热解析技术两种,与焚烧技术相比,热解析处理并不直接对土壤进行加热处理,因此具有处理温度较低(高温热解析处理温度范围为 $320^{\circ}\text{C}\sim 560^{\circ}\text{C}$,低温热解析处理温度范围为 $90^{\circ}\text{C}\sim 320^{\circ}\text{C}$)、处理量大、周期短及对土壤理化性质影响小等特点[20]。主要用于处理土壤中那些容易挥发的农药。

5.2. 生物途径

生物途径有植物修复、微生物修复、酶修复。

5.2.1. 植物修复技术

植物修复技术是利用植物的吸收、降解、过滤和固定等功能来净化土壤中的有机污染物以及放射性物质的一项修复技术。大量研究表明,植物对土壤中农药的修复主要有3种机制[21] [22] [23]:

1) 植物直接吸收和降解

植物直接吸收土壤中的残留农药,然后通过自身的代谢过程将残留农药分解,而将那些没有毒性的代谢产物留在体内供其自身生长使用。这是植物去除土壤中亲水性有机残留农药污染物的一个重要机制[23] [24] [25]。

2) 植物通过释放酶对残留农药进行降解

某些植物在其生长代谢过程中会向周边环境产生一些物质进入空气和土壤中,包括一些糖类、醇类、蛋白质、有机酸和一些具有特殊效果的酶。这些进入到土壤中的酶可以通过与残留农药分子的接触而达到将其降解的作用。人们利用植物根中的硝基还原酶对含硝基有机污染物进行降解,相似研究还发现植物中的脱卤素酶和漆酶可被用来降解含氯有机物[26]。

3) 根际微生物的联合矿化作用;

根际是受植物根系影响的根/土界面的一个微区,也是植物/土壤/微生物与其环境条件相互作用的场所,这个区与无根系土体的区别即是根系的影响。由于根系的存在,增加了微生物的活动和生物量[27] [28] [29]。另有研究发现微生物对阿特拉津的矿化作用与土壤有机碳成分直接相关[30]。

植物修复特点是投入少,回报高,效果明显,不影响土壤自身理化性质,不会产生其他副作用,符合可循环生态的建设。但即使植物修复在土壤农药污染有诸多优点,但植物修复的发展却十分缓慢,主要原因是植物修复对于土壤农药污染的理化性质、土壤理化性质以及氧气浓度、共存有机物等一系列环境条件要求苛刻,使得植物修复的发展受到很大的制约,同时由于真正能够对土壤残留农药进行处理的植物有限,且这些植物对于土壤残留农药不具有普遍性。因此如何处理好这些问题这是今后研究与应用中应考虑的理论与技术问题。

5.2.2. 微生物修复技术

微生物修复技术方式有两种,第一种略类似于植物的直接吸收和降解,都是通过自身的新陈代谢活动来对土壤农药进行降解。目前已经被发现可用于处理降解土壤残留农药的微生物很多种,其中可降解有机磷农药的微生物有假单胞菌属和芽孢杆菌属等。与植物修复有所不同的是,常常一种微生物可以同

时对多种残留农药进行处理,如假单胞杆菌可降解 DDT、艾氏剂、毒杀酚和敌敌畏等[31]。

其次微生物也能通过对土壤理化性质的调节从而间接地降低残留农药的有效性与其毒性。刘宪华等人[31]用假单胞菌 AEBL3 降解呋喃丹污染,结果发现未加菌土壤呋喃丹在 0~7 cm 土层中含量已达 90 mg/kg,加菌土壤呋喃丹含量为 48 mg/kg。在另一组为时 8 天的实验中,AG 菌和 BTAH1 菌对阿特拉津的降解率达 96.9%和 96.4% [32]。

能够应用于修复土壤残留农药的微生物可分为自身微生物和外来微生物两种。所谓自身微生物,指的是土壤中原本就存在能够用于修复土壤残留农药的微生物。这些微生物主要通过人为的改造其外部土壤环境(如添加其他营养物质、改变土壤湿度等)来达到激活降解处理残留农药的功效。如甲基杆菌(*Methylobacterium* sp.)能够利用乙酰甲胺磷为唯一碳源生长,添加甲醇为补充碳源后,大大促进了其对乙酰甲胺磷的降解[33]。利用节杆菌(*Arthrobacter* sp.)降解阿特拉津时添加淀粉,不仅能促进菌株自身生长,同时还能加强对阿特拉津的降解[34]。

利用外来微生物进行土壤残留农药的修复,指的是受污染土壤自身没有对应的可用来降解的微生物,需要通过人为的接种外来微生物来达到降解土壤残留农药的功效。例如,用六六六和滴滴涕降解菌(包括无色杆菌属的 3 株及芽孢菌属、假单胞菌属、产碱菌属各 1 株)所制成的复合菌剂降解茶园土壤中有有机氯农药,效果显著[35]。从农药厂土壤中分离筛选得到 1 株丝状真菌-霉菌 7 能在含有燃料培养基中生长并吸附降解燃料,降解速度快,脱色效果较好[36]。从石油污染土壤中分离出的鞘脂菌属(*Sphingobium* sp.)可用于对环境中甲氧菊酯的修复,在其基础上构建的新型工程菌株 *Sphingobium* sp. BA3-pytH 对甲氧菊酯的修复效果更是大大增强[37]。

微生物处理土壤残留农药效果的好坏,与微生物自身性质与其处理能力有关,同时也与待处理残留农药的特性紧密相联,除此之外,土壤介质周边环境(如浓度、溶解性、土壤酸碱度等)对于处理过程也有很大程度的影响。而且由于需要降解的农药种类繁多,其对应的结构与特性也差别很大,所以微生物对农药的降解通常也具有特异性。通常情况下,待处理农药的分子结构越简单,分子量越小,则越容易被降解,反之亦然[38]。

随着人们对于土壤残留农药问题关注的不断上升,微生物修复技术将在土壤残留农药的治理过程中扮演着重要角色。但在现场的土壤残留农药的降解实验中,结果达不到实验室里的预期,甚至与实验室结果相悖[39],这是由于微生物在试验过程中受外界影响大,而现场试验对于周边外界环境的调节有限。

5.2.3. 酶修复

通常可用来处理土壤残留农药的酶主要有氧化还原酶和水解酶两种[40]。氧化水解酶包括过氧化物酶和多酚氧化酶等,氧化水解酶通过氧化、还原、脱氢等方式将复杂的农药分子分解成结构较为简单、毒性较弱的小分子化合物,从而达到对残留农药的降解处理[41],研究表明这些酶对酚类农药以及一些有机氯农药(氯代酚、氯代苯胺等)具有很好的降解效果。而水解酶有磷酸酶、对硫磷酯解酶、酯酶、硫基酰胺酶等[42],水解酶广泛存在环境中,具有化学性质稳定,不需要其他辅助酶即可完成对残留农药的降解,最终水解得到产物毒性比原残留农药低。

酶修复技术简单方便安全无副作用,能够处理的农药种类繁多,且相比于其他修复技术彻底。但在酶修复实际过程中,不论是水解酶还是氧化还原酶都需要在土壤中固定化,这样一来反而加大了修复土壤的成本,同时有关酶修复技术的降解机理还不是很完善,因此需要对其开展进一步的研究探索,最终为酶修复技术提供理论依据。

5.3. 化学途径

化学途径主要通过施加化学氧化剂、还原剂、改良剂、吸附剂等药剂来达到降解残留农药目的。即

添加各种化学物质(如土壤改良剂、表面活性清洗剂、生物吸附剂等)来达到改良或者改性土壤理化性质,促使加快土壤中残留农药分子的降解。土壤改良剂是通过改善土壤结构、粘度、pH 等来加速残留农药的降解。生物吸附剂则由于其自身具有许多高分子官能团,可以很好地将残留农药分子吸附起来然后固定在吸附剂的表面。表面活性清洗剂可以提高残留农药在土壤水中的溶解度同时也可以降低农药分子在土壤中的迁移[43]。除上述所说的化学物质之外,有些有机试剂也可以用来修复某些特定的残留农药污染的土壤。例如,有国外研究工作者曾使用甲醇、乙醇等溶剂来萃取土壤中高浓度的 P,PD-DDT,P、P'-DDD、P,PD-DDE,且处理效果显著。据其报道,当溶剂:土壤的体积质量比为 1:6 时,去除农药的效率甚至可以高达 99% [44]。

以土壤冲洗修复为例,土壤冲洗修复即将人工调配好的冲洗液(一般为水或表面活性物质和有机溶剂)自然渗透或者人为注入被残留农药污染的土壤,将土壤中的农药分子溶解或者置换在冲洗液中,最后用抽水泵将含有农药分子的冲洗液抽离出来送到其他地方对其进行下一步处理。但是当土壤渗透系数很低时($K < 1 \times 10^{-5}$ CM/S)该技术受到严重限制[45],因此一般都需要建设泥浆墙将污染区隔离以防污染向四周扩散。而常用于冲洗修复污染土壤的表面活性物质有[46]:非离子表面活性剂(如乳化剂 OP TritonX-100、平平加、AEO-9 等)、阴离子表面活性剂(如十二烷基苯磺酸钠等)、阳离子表面活性剂(如溴化十六烷基三甲胺)、生物表面活性剂以及阴-阳离子混合表面活性剂。国内外对以上几种表面活性剂都做了大量研究,如:Sun 等(1995)研究了 TritonX-100 对土壤吸附 P,P'-DDT,2,2',4,4',5,5'-PCB 和 1,2,4-TCB 性能的影响[47]。Roy 等(1997)从 *Sapindus mukurossi* 果皮中提取生物表面活性剂,冲洗土壤中六六六;0.5%和 1.0%生物表面活性剂溶液去除土壤中六六六的效率分别是清水的 20 倍和 100 倍等[47] [48]。

化学途径处理土壤残留农药的方法效果明显,耗时较少,但容易造成土壤以及环境的二次污染,因此如何正确合理的使用化学途径来达到降解的目的仍在探索中。

就以上三类方法而言,各有适用的农残污染治理案例,无非综合效果和经济成本两种最基本的衡量指标。由此来评判,并考虑到中国的农田土壤污染的历史久、时间长、涵盖农田面积广、复合污染多等特点,选用治理技术时必须首先对农田土壤污染情况特征作一全面、准确的调研,以作为技术方案的基本参考;另考虑到量大、面广以及单一治理技术往往难以完全治理好污染问题,因此往往需要采用多种手段组合搭配的考虑。能够充分地考虑到农田污染情况特征,并以此来选用合适的治理技术,尤其考虑到结合农耕生产活动来合理施用,将可能很经济地解决好我国农田农药残留问题。

6. 展望

随着人们对于环境保护与污染治理的持续关注,如何更好更有效地对土壤中残留农药进行治理已然成为热点。除了在源头上控制农药的合理使用以及推广农药正确的使用方法之外,对于已经存在严重污染的土壤,如何选择正确合理的物理途径、生物途径或化学途径来达到降解效果是治理技术发展的关键点,同时对于这些途径的改良改善势在必行。

在今后的研究中,土壤农药污染修复技术可从以下几个方面加强研究:① 对土壤残留农药的降解方法、降解过程以及降解机理进行系统的研究。② 建立完善、合理的土壤农药污染评估方法和检测系统。③ 对物理、生物、化学修复技术的联合降解作用的研究。④ 如何有效的将理论的、实验室研究成果应用到现实生产实际中,仍需要更多地走向地里田间开展扎实的深入研究。

致 谢

本项目得到了北京市教委\科委基金项目支持(生物质纳米零价铁复合材料降解农田土壤残留技术)。

基金项目

北京市科委基金项目(00012245)。

参考文献

- [1] 李雪飞, 杨艳刚, 孙胜龙, 等. 蔬菜中有机磷、拟除虫菊酯类农药残留调查[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(5): 418-420.
- [2] 陈菊, 周青. 土壤农药污染的现状与生物修复[J]. 生物学教学, 2006, 31(11): 3-6.
- [3] 马国兰, 柏连阳, 刘占山. 土壤-植物系统中农药污染的防治方法及其研究进展[J]. 现代化农业, 2005(11): 13-16.
- [4] 中国农业百科全书总编辑委员会农药卷编辑委员会. 《中国农业百科全书农药卷》简介[J]. 农药译丛, 1993(3): 65.
- [5] 刘明和. 有机氯在我国的污染现状及监控对策[J]. 内蒙古环境保护, 2003(1): 35-38.
- [6] 崔玉川, 傅涛. 我国水污染及饮用水源中有机污染物的危害[J]. 城市环境与城市生态, 1998(3): 23-25.
- [7] 候洪刚. 关于土壤中农药污染残留及降解途径研究[J]. 植保土肥, 2012(5): 50-51.
- [8] 赵玲, 马永军. 有机农药残留对土壤环境的影响[J]. 土壤, 2001, 33(6): 309-311.
- [9] 方玲. 有机氯农药在茶叶及其环境中的残留状况与评价[J]. 福建农业大学学报, 1998(2): 211-215.
- [10] 曹焯程, 王秋霞, 李园, 等. 我国农药使用中存在的问题和建议[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012: 374-376.
- [11] Hamscher, G., Sczesny, S., Höper, H., *et al.* (2002) Determination of Persistent Tetracycline Residues in Soil Fertilized with Liquid Manure by High-Performance Liquid Chromatography with Electrospray Ionization Tandem Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, **74**, 1509-1518. <https://doi.org/10.1021/ac015588m>
- [12] 张洋, 李文龙, 王玉军. 理化性质对农药降解影响的研究[J]. 进展.科技信息, 2012(3): 8-9.
- [13] Moses, M., Johnson, E., Anger, K.W., *et al.* (1993) Environmental Equity and Pesticide Exposure. *Toxicology and Industrial Health*, **9**, 913-959. <https://doi.org/10.1177/074823379300900512>
- [14] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999.
- [15] 吕士良. 循环经济技术市场的新商机[J]. 科技成果纵横, 2005(5): 23-24.
- [16] 邢秋格. 农药污染的现状、原因及防止对策[J]. 河北林业科技, 2010(4): 45-46.
- [17] Wolff, M.S., Zeleniuch-Jacquotte, A., Dubin, N., *et al.* (2000) Risk of Breast Cancer and Organochlorine Exposure. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, **9**, 271-277.
- [18] Wendel, D.J., Beravan, W., *et al.* (2001) Chronic Nervous-System Effects of Long-Term Occupational Exposure to DDT. *Chemosphere*, **357**, 1014-1016.
- [19] 刘世友. 农药污染现状与环境保护措施[J]. 河北化工, 2010, 33(1): 74-75.
- [20] 林永秀. 土壤农药污染综合治理技术探析[J]. 农业与技术, 2013(10): 206-207.
- [21] 桑伟莲, 孔繁翔. 植物修复研究进展[J]. 环境科学研究进展, 1999(7): 40-44.
- [22] Hathaway, D.E. (1989) *Molecular Mechanism of Pesticide Selectivity*. Oxford University Press, Oxford.
- [23] Jarald, L., Schnoor, L.A. and Licht, S.C. (1995) Phytoremediation of Organic and Nutrient Contaminants. *Environmental Science & Technology*, **29**, 318-323. <https://doi.org/10.1021/es00007a747>
- [24] 赵志强, 牛军峰, 全燮. 全氯代有机化合物污染土壤的修复技术[J]. 土壤, 2000(6): 288-309.
- [25] 瞿福平, 张晓健, 吕昕, 等. 氯代芳香化合物的生物降解性研究进展[J]. 环境科学, 1997, 18(2): 74-78.
- [26] Reilley, A., Banks, M.K. and Schwab, A.P. (1996) Dissipation of PAHs in the Rhizosphere. *Journal of Environmental Quality*, **25**, 212-219. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500020002x>
- [27] 董社琴, 李冰雯, 周健. 植物修复有机污染土壤机理的分析[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(3): 189-190.
- [28] 王书锦, 胡江春, 张宪武. 新世纪中国土壤微生物学的展望[J]. 微生物学杂志, 2002, 22(1): 36-39.
- [29] 吴畏, 张晓枫. 土壤沉积物中多氯代有机物的生物降解行为及修复[J]. 辽宁城乡环境科技, 2001, 21(2): 24-27.
- [30] 林道辉, 朱利中, 高彦征. 土壤有机污染植物的机理与影响因素[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 437-439.

- [31] 刘宪华, 冯焱, 宋华文, 等. 甲单胞菌对呋喃丹污染土壤的生物修复[J]. 南开大学学报, 2001, 36(4): 63-67.
- [32] 胡江, 代先祝, 李顺鹏. 两株降解菌对阿特拉津污染土壤的修复效果研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 323-327.
- [33] 王莉, 凌琪, 汤利华, 等. *Methylobacterium* sp YAL-2 对乙酰甲胺磷的降解特性[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(3): 438-443.
- [34] 韩鹏, 洪青, 何丽娟, 等. 阿特拉津降解菌 ADH-2 的分离、鉴定及其特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 406-410.
- [35] 方玲. 降解有机氯农药的微生物菌株分离筛选及应用效果[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 249-252.
- [36] 刘长风, 刘桂萍, 王鲁萍, 等. 开放体系下霉菌 7 对偶氮染料的吸附降解[J]. 纺织学报, 2012, 33(3): 67-73.
- [37] 段晓芹, 郑金伟, 张隽, 等. 3-PBA 降解菌 BA3 的降解特性及基因工程菌构建[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 240-246.
- [38] Luthy, R.G., Aiken, G.R., Brusseau, R.M.L., *et al.* (1997) Sequestration of Hydrophobic Organic Contaminants by Geosorbents. *Environmental Science & Technology*, **31**, 3341-3347.
- [39] Herkovits, J., Perezcoll, C. and Herkovits, F.D. (2002) Ecotoxicological Studies of Environmental Samples from Buenos Aires Area Using a Standardized Amphibian Embryo Toxicity Test (Amphitox). *Environmental Pollution*, **116**, 177-183. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00167-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00167-1)
- [40] 和文祥, 蒋新, 朱茂旭, 等. 酶修复土壤农药污染的研究进展[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 47-51.
- [41] 杨小红, 李俊, 葛诚, 等. 微生物降解农药的研究新进展[J]. 微生物学通报, 2003, 30(6): 93-96.
- [42] 虞云龙, 樊德方, 陈鹤鑫. 农药微生物降解的研究现状与发展策略[J]. 环境科学进展, 1996, 4(3): 28-35.
- [43] 吴星杰. 生物表面活性剂清洗土壤有机污染物的研究与进展[J]. 资源调查与环境, 2009, 3(4): 292-293.
- [44] 何丽莲, 等. 农田土壤农药污染的综合治理[J]. 云南农业大学学报, 2003, 18(4): 432-433.
- [45] Freeman, H.M. and Eugene, F. (1995) Hazardous Waste Remediation: Innovative Treatment Technologies. CRC Press, Boca Raton, 112-126.
- [46] 朱利中. 土壤及地下水有机污染的化学与生物修复[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 65-70.
- [47] Roy, D., Kommalapati, R.R., Mandava, S.S., *et al.* (1997) Soil Washing Potential of a Natural Surfactant. *Environmental Science & Technology*, **31**, 670-675. <https://doi.org/10.1021/es960181y>
- [48] Sun, S., Inskeep, W.P. and Boyd, S.A. (1995) Sorption of Nonionic Organic Compounds in Soil-Water Systems Containing a Micelle-Forming Surfactant. *Environmental Science & Technology*, **29**, 903-913. <https://doi.org/10.1021/es00004a010>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: aep@hanspub.org