

农药对人体健康及生态环境的影响

任影¹, 陈景三², 于稳欠¹, 杨敏³, 马海娇³, 毛伟力^{1*} (1.上海万力华生物科技有限公司, 上海 201203; 2.华中科技大学同济医学院附属梨园医院肿瘤科, 湖北武汉 430077; 3.大理白族自治州植保植检站, 云南大理 671000)

摘要 随着世界人口的不断增长以及人类对生活品质要求的不断提升, 粮食安全与生态健康是在全球环境逐步恶化的现实中所必须面临, 同时又必须用新的科技手段不断加以改善和提高的一个挑战。从 20 世纪 40 年代至今, 化学农药在农业生产中的大量应用, 为保证世界的粮食安全作出了巨大贡献, 同时, 也给人类赖以生存的生态环境带来了不可避免且日益加深的危害, 进而也严重影响了人体健康。为了既保证粮食安全, 又保持生态健康, 科研工作者已研制出多种与化学农药功能相似的生物农药。主要叙述了使用化学农药为人类粮食安全所作出的贡献以及对生态环境和人体健康所产生的危害, 生物农药的发展现状、特点和发展前景。

关键词 化学农药; 生物农药; 生态环境; 人体健康; 发展现状; 特点

中图分类号 S 181.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)06-0053-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.06.012



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Pesticides on Human Health and Ecological Environment

SHI Ying¹, CHEN Jing-san², YU Wen-qian¹ et al (1. Shanghai Wanlihua Biological Technology Co., Ltd., Shanghai 201203; 2. Liyuan Hospital-Oncology Department Affiliated to Huazhong University of Science & Technology-Tongji Medical College, Wuhan, Hubei 430077)

Abstract With the continuous growth of the world population and the continuous improvement of human life quality requirements, food security and eco-environment health are a challenge that we must face in the reality of the gradual deterioration of the global environment, and meanwhile, we must constantly improve and enhance them by means of new scientific technologies. Since the 1940s, the application of chemical pesticides in agricultural production has made a great contribution to ensuring the world's food security, however, it has also brought inevitable and deepening harm to the eco-environment that human beings depend on, which has then seriously affected human health. In order to guarantee the food security and maintain the eco-environment health, researchers have developed a variety of biological pesticides which are similar in functions to chemical pesticides. This article mainly described the contribution of the use of chemical pesticides to human food security, the harm to the ecological environment and human health, the development status, characteristics and development prospects of biological pesticides.

Key words Chemical pesticide; Biological pesticide; Eco-environment; Human health; Development status; Characteristics

农药广义的定义是指用于预防、消灭或者控制危害农业、林业的病、虫、草和其他有害生物以及有目的地调节、控制、影响植物和有害生物代谢、生长、发育、繁殖过程的化学合成或者来源于生物、其他天然产物及应用生物技术产生的一种物质或者几种物质的混合物及其制剂。随着人口的不断增加, 对粮食的需求量与日俱增。从 20 世纪初至今, 化学农药在世界粮、棉、油、果、蔬等各类作物的生产中, 确实给人类带来了实际效益, 为保障世界的粮食安全起到了至关重要的作用。同时也导致了世界许多地区在作物种植生产过程中对农药的高度依赖, 甚至过量施用, 严重地影响了地球的生态环境和人体健康。随着人类社会文明与科技水平的不断进步, 许多环保型高效、低毒、低残留的生物农药已投入到农作物的生产中, 在一定程度上减少和取代了化学农药的使用。笔者主要叙述了使用化学农药为人类粮食安全所作出的贡献以及对生态环境和人体健康所产生的危害, 生物农药的发展现状、特点和发展前景。

1 化学农药的利弊

1.1 为人类社会解决了粮食安全问题 根据联合国人口事务部统计和预测的数据(图 1)来看, 世界人口总数在 100 年内已从 1900 年的 15 亿增至 2000 年的 61 亿, 并将在 2050 年

增长到 94 亿~100 亿^[1]。同时, 据我国人口和计划生育委员会的统计和预测, 我国在新中国成立初期的人口总数约为 5 亿, 而在 2000 年人口总数已接近 13 亿, 占世界人口总数的 21%; 虽然我国目前已成为世界低生育国家之一, 但由于人口基数大, 到 2030 年, 人口总数将接近 15 亿(图 1)。世界人口在 20 世纪和 21 世纪的迅猛增长, 必须以农产品特别是粮食总量的增长为基础。科学技术的不断进步, 特别是从 21 世纪初至今, 将化肥和化学农药投入到农业生产中使用, 为保障世界粮食总量和农副产品的不断增长起到了至关重要的作用, 同时也为人类社会带来了巨大的经济效益。化学农药的开发和应用, 包括杀虫剂、杀菌剂、除草剂、熏蒸剂、杀螨剂、杀藻剂、杀软体动物剂、杀鼠剂、昆虫生长调节和性诱导剂以及家庭卫生用品等, 是用来灭杀或驱赶有害生物, 保护农作物和人们的生活免遭病原菌、害虫、杂草等有害生物的侵染和危害, 从极大程度上保护和提高了农产品的产量和品质, 确保了全世界(除少数地区因战争或政治问题外)没有因人口的不断增长而造成粮食供给的安全问题。据不完全统计, 目前世界范围内由于使用化学农药所避免和挽回的农业病、虫、草害损失占粮食总产量的 1/3 以上^[2]。历史上著名的爱尔兰大饥荒发生在 1845 年, 是由一种毁灭性马铃薯疫病引起的。该病害在爱尔兰地区持续暴发了 7 年之久, 造成 150 万爱尔兰人由于粮食短缺而死亡。假如当时已有了化学农药, 就能有效地防控该病害的暴发和流行, 避免了大饥荒的发生。

基金项目 大理州毛伟力专家工作站(大科联发[2019]6号)。

作者简介 任影(1988—), 女, 安徽亳州人, 农艺师, 从事生物农药的推广与应用研究。* 通信作者, 博士, 从事生物农药产品的研发与开发工作。

收稿日期 2021-03-24; **修回日期** 2021-06-07

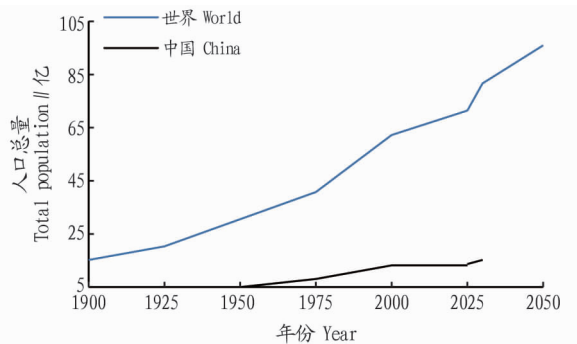


图1 1900—2050年世界及1950—2030年中国人口总量发展趋势

Fig.1 The development trend of the total population between 1900 and 2050 in the world and between 1950 and 2030 in China

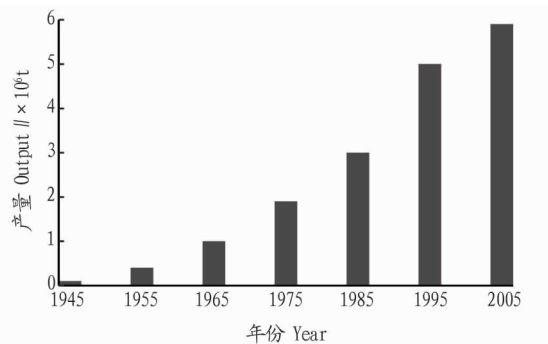


图2 1945—2005年世界化学农药年总产量变化

Fig.2 The changes of the annual total output of chemical pesticides in the world from 1945 to 2005

1.2 对生态环境和人类健康的影响 从20世纪40年代中期开始,世界范围化学农药的产量以每年11%的速度快速增长,已从20世纪50年代初的约为20万t/a,上升至21世纪初的接近600万t/a(图2)^[3];针对不同害虫、病原菌、杂草以及其他有害生物的成百上千种人工合成的化学农药,不断地走向市场,投入到世界各地的农业生产活动和家庭卫生应用中。这些人工合成的化学农药包括有机氯、有机磷、有机盐、有机氮、氨基甲酸酯、除虫菊酯等类别的多个系列产品。我国是化学农药的生产和使用大国,农药生产量已由20世纪90年代的全球第二上升为目前的世界第一。2007年的年平均农药使用量约为40.5 kg/hm²,年均化学防治面积达到3亿hm²/次,并仍以每年7%~10%的速度增加^[4-5],直到2015年我国农业部出台了“农药、化肥双减计划指导意见”。如此巨大的农药使用量已远超了世界农药平均使用水平。化学农药在世界范围农业生产中的长期和大量投入,特别是在许多不发达国家中的滥用,不仅对全球的生态环境造成了严重的破坏,同时直接影响了农业耕地的再生产力和可持续发展。在全球使用的农药总量中,有80%的农药可通过风、雨、蒸发以及水的流动等自然现象,直接或间接地进入到大气、土壤、地下水(湖、河、海洋)等生态环境中^[6]。许多农药特别是在20世纪生产的多种有机氯、有机磷等剧毒农药,可在环境中长期保持毒性并随着生态的循环运动而进行漂移和流动。存在于环境中的农药可通过接触、呼吸、饮水和食物链等方式,直接或间接地进入到人、动物或其他生物体中,使人体健康和其他有益生物(蜂、鸟、两栖动物、鱼和小型哺乳动物)受到了极大的威胁和破坏^[7-8]。目前,全球每年大约有3700万人的死亡是因为环境因素造成的,其中包括由于化学农药对环境产生的污染而直接或间接导致的死亡^[5]。同时,全世界每年约有35万人因使用不当或过度直接接触各种农药而导致的中毒死亡^[9]。

1.2.1 对大气的污染。全球生产的各种有机合成农药以及在这些农药制剂中所添加的多种助剂都具有一定的挥发性。世界各地的成千上万个农药生产工厂,特别是在不发达国家的生产厂家,每天都或多或少地向大气中排放一定含量的有毒气体。同时,遍布在世界各地的农业工作者,每天都会将

上万吨的多种农药投入到农业生产的活动中去。在地上部分所使用的农药中,只有10%~20%附着在作物体上,40%~60%撒落到地表,其余的都释放并漂浮于大气中^[10],这些漂浮于大气中的农药会随着气流的运动从农药的施用地转移到其他地区,甚至是很远的地方。例如,在美国南部农业生产中所使用的六六六(HCH)、氯丹、毒杀酚等农药,通过挥发和风的作用进入大气,并被漂移至加拿大五大湖的上空,又在大气层的低温作用下凝聚并随着雨水下沉至湖水中^[11]。在香蕉生产中使用的有机磷杀虫剂——毒死蜱,已从中美洲的热带雨林地区转移至南极地区,同时在喜马拉雅山的高原地区也可以监测到微量的农药残留^[12-13]。

以上的数据和事实已充分说明,长期而大量的化学农药在农业生产中的投入不仅会造成农药使用地区大气的严重污染,同时会伴随着空气的流动从一个地区转移到另一个或多个不同的地区。通过大气传播的污染速度快、地域广,受到影响和危害的人群及其他生物数量大。地球上绝大多数的生命体都必须依赖大气而生存,但随着工业化、城市化的高速发展,以及越来越多的农药在农业生产中的投入,全球的大气污染也在日益加深。

1.2.2 对土壤的污染。在多种人工合成的农药系列产品中,有许多是专门为灭杀生存在土壤中的病原菌、害虫、线虫、软体动物、杂草和老鼠等有害生物而设计的。这些农药都会通过一定的农业生产方式在作物播种前或生长过程中施用到土壤中,许多属于高残留农药。例如,在20世纪80年代已被禁止生产和使用的有机氯等剧毒农药 DDT、HCH,其半衰期可长达60年。我国在2007年对300多种中药材的样品进行检测,发现这些样品全部都含有有机氯农药的残留,说明这些农药能长期保留在土壤或水体中,并在植物体内形成生物累积^[13]。许多不发达地区的农业生产者坚持传统习惯,不按科学的管理方式进行农业生产,长期单一地种植同一种作物并使用同一种或几种农药,使土壤中有有害生物对所使用的农药产生了抗药性,而为了防控这些有害生物,保证作物产量,农业生产者采用增加农药的使用量,导致土壤中的有害生物对所使用农药的抗药性进一步增强,进而增加了农药在土壤中的残留量。另外,遍布世界各地特别是不发达国家的农药生产厂家,对农药生产可能产生的废弃物没有采取合

理有效的环保措施,每天也有大量的农药废弃物被排放到大气、地下水及土壤中。通过施用或排放进入土壤中的农药可在环境之间发生转移和转换,并延伸到区域外的其他生态系统中去,影响和危害人体和其他非靶标生物^[14]。这些农药可在土壤细菌或其他微生物的代谢作用下,由一种有毒化合物转变成另一种或几种有毒化合物,例如,硫丹(endosulfan)可转变成硫丹硫酸(endosulfan sulfate),DDT可转变成双(对氯苯基)-2氯乙烯(DDE)^[15]。DDE具有亲脂性,能通过食物链储存并积累在人体和动物的脂肪组织中,有干扰内分泌和抗雄激素的作用^[16]。

1.2.3 对地下水以及河、湖、海的污染。无论是施用在地表还是土壤中的农药,大多数会通过雨水和农业灌溉进入到地下水中,进而流入附近的湖、河、海中,再随着这些水体的运动转移到其他或更远的区域。最近的研究表明,由于农药的大量使用,特别是除草剂、杀虫剂的过量使用,它们的残留经地下水、河流汇入了大海,已对澳大利亚大堡礁的生态环境造成了严重影响,大堡礁的珊瑚、藻类与礁体的共生关系受到了极大的威胁^[17]。同时,近20年开发出的低毒、易降解的杀虫剂、除草剂,例如毒死蜱、对硫磷、异丙隆、草甘膦等仍常在世界各地的河流、湖泊中被检测到,特别是草甘膦的浓度在许多地区的地表水中呈上升趋势^[18-19]。这些事实说明由化学农药对水资源所产生的污染已严重地破坏了地球水环境的生态平衡,侵蚀了人类、牲畜和其他动物的饮用水资源。在20世纪90年代,我国化学农药的生产能力和使用量的不断提升,使部分江河湖泊等饮用水资源受到不同程度的污染和破坏。调查数据显示,水体中来自20世纪使用的有机氯农药DDD、DDT、HCH等残留的含量已超出了国家饮用水的标准,长期饮用含有有机氯农药残留污染水的人群,特别是儿童,有患癌症的高致病风险^[20]。

1.3 对人体健康的影响 随着人类科技与工业化水平的不

断进步,越来越多的人造或由人工合成材料制成的物资和用品充数在人们日常的工作、学习和生活中,它们改变了人类的生活方式,提高了生活水平和品质。同时,它们对人类赖以生存的环境也造成了严重的污染,进而直接或间接地影响和危害了人体健康。在现代人类社会,引起许多疾病的原因与环境污染有关,约有25%的疾病和死亡是由环境恶化因素造成的^[5]。在诸多引起环境变化和污染的因素中,化学农药在农业生产活动中的大量投入是重要的因素之一。存在于环境中的农药或残留,可通过接触、呼吸、饮水和食物链等方式,直接或间接地被人体吸收,同时还能在母亲的妊娠期或通过母乳转移到胎儿和婴幼儿的体内,它们不但会造成人体因急性中毒而导致的不同症状或死亡,还可以在人体内长期积累,影响人体多种生理生化、新陈代谢、发育、生殖等功能,破坏人体中枢神经和内分泌系统,进而导致或诱导恶性肿瘤细胞的形成和生长,使癌症发病率逐年提升^[21-22]。

1.3.1 直接影响。在农药的生产、运输、分装和销售以及施用过程中,由多种原因而导致的农药急性中毒事故时有发生,与农药直接接触的工作人员以及事故发生地附近的居民和其他生物都可能是事故的直接受害者。据世界卫生组织报道,全球每年约有100万人遭遇农药急性中毒,其中8万~12万人死亡大多发生在发展中国家^[8]。在21世纪初,我国每年发生的农药中毒事故达10万人次,死亡人数约占10%^[10]。1995年广西宾阳县一所学校的学生因食用了含有剧毒农药的白菜,导致500多名学生集体中毒。农药急性中毒一般是通过口服、吸入和皮肤接触进入人体而导致(图3a),大多是由除草剂、杀虫剂和杀鼠剂引起的(图3b)。轻度中毒者一般会出现头痛、恶心、胸闷、哮喘、无力等症状;中度中毒者会出现呼吸稍困难、流涎、腹痛、腹泻、意识不清等症状;重度中毒者会出现肺水肿、昏迷、呼吸麻痹、脑水肿等症状,甚至死亡^[22-23]。

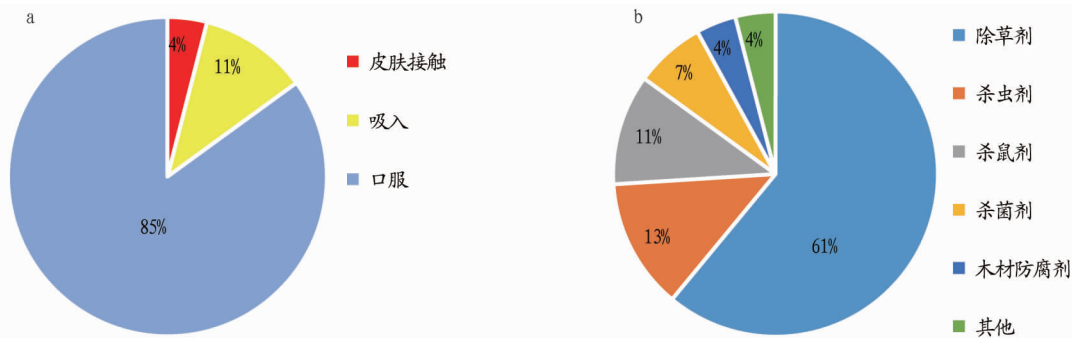


图3 农药引起急性中毒的途径(a)以及不同农药引起急性中毒的比例(b)

Fig.3 The ways of acute poisoning caused by pesticides (a) and the proportion of acute poisoning caused by different pesticides (b)

1.3.2 长期影响。化学农药在世界范围农业生产中的大量投入已有半个世纪之久,对全球的生态环境和人体健康产生了持久而深重的影响和破坏。长期直接接触化学农药的农药生产和使用者,长期生活在被农药污染环境中(农药生产厂附近)的居民或被把被农药污染的水作为生活用水的人群,长期食用被农药残留污染的各类食品的民众,虽然他们不会马上表现出各种不良的反应和症状,但被人体吸收的农药残

留可在人体的多种器官和组织内富集,进而产生和形成“慢性中毒”^[22-23]。根据人体长期摄入的不同种类的农药残留以及这些残留在人体不同器官或组织中的富集,慢性中毒对人体可造成以下几种主要的影响:①有机磷、氨基甲酸酯、甲基溴(熏蒸剂)类农药残留可在人体中富集,并抑制胆碱酯酶的活性,逐步影响和破坏人体中枢神经的正常功能,表现出神经功能紊乱、震颤、反应迟钝、精神错乱、语言失常等症

状^[13,23]。②有机氯、除草剂类农药可在人体脂肪组织中富集,主要影响和破坏人体的内分泌系统,导致成年男性雄性激素分泌紊乱,精子质量和数量下降,受孕率降低;可通过母体影响胎儿的生长发育,使胎儿畸形、早产或死亡;导致新生儿、儿童、青少年出现发育迟缓或早熟、智商低下^[22,24]。越战期间,美军在越南使用了大量高浓度的脱叶剂(2,4-D 和 2,4,5-T),造成许多美国军人回国后生的孩子患有遗传缺陷症和其他多种疾病,同时也造成越南出现约 5 万名畸形儿童。③除虫菊酯类、有机磷类杀虫剂农药在人体内积累,可能引起皮肤的多种不适和疾病,例如对硫磷能引起全身皮肤出现红斑,严重者的皮肤会出现松懈坏死症^[13,24]。综上所述,许多化学农药,特别是 20 世纪大量使用的有机氯、有机磷等,其残留的半衰期可长达 60 年以上,不但可在环境中长期存在,还能通过大气、水流等运动以及生态循环和食物链,长期不断地影响和破坏人体健康,特别是对孕妇、新生儿以及成长的孩子所造成的影响和破坏是值得全社会必须面对和关注的一个重要问题。

1.3.3 诱导和促进癌症的发生。世界卫生组织在“2016 世界癌症报告”中指出,全球癌症发病率和死亡率特别是在发展中国家呈持续上升的趋势;2012 年的癌症新病例有 50% 发生在亚洲,其中超过 50% 发生在中国^[8]。世界范围的癌症发病率不断上升,与人类生存环境的恶化息息相关,因为癌症的发生与发展是环境因素与人体自身的遗传因素相互作用的结果^[21]。环境中存在的可致癌物有化学的(二噁英、DDT、

HCH 等)、物理的(紫外线、放射性物质产生的辐射等)和生物的(幽门螺旋杆菌、黄曲霉、乙肝和丙肝病毒等)。当人体在被污染的环境中长期工作和生活,致癌物可通过接触、呼吸、饮水和食物进入人体,在人体的器官和组织中富集,并通过对人体正常的生理生化、内分泌等作用的影响或改变,进而诱导了人体细胞中遗传物质(DNA)结构的改变,使人体正常细胞发生了非遗传性癌变^[25-26]。当人体内某些器官或组织的细胞发生癌变后,存在于人体内的致癌物还能进一步促进癌症的发展与恶化^[27]。如上所述,许多存在于环境中或已在人体中富集的农药残留有影响人体内分泌正常功能的作用;它们能干扰人体内多种激素的合成、分泌、运输、结合、代谢等功能,破坏了人体在内分泌系统、神经系统和免疫系统之间的信息传递及其对机体的调节功能,进而干扰和破坏了人体免疫系统的抗癌功能^[25]。

在已经禁止使用和目前仍在使用的农药中,科研人员已发现至少有几十种农药具有诱导和促进癌症发生的作用(表 1)^[21]。调查数据显示,美国加州 1988—2010 年共有 139 000 名从事农业生产活动的工人,其中 3 600 名工人被检查出患有不同种类的癌症,发病率约为 2.58%。在这些患者中,高癌症发病部位是前列腺、肾脏、大脑、肝脏、胃、乳腺、子宫颈、皮肤(黑色素瘤)、结肠和直肠^[28]。由于长期接触和暴露在含有大量农药的环境中,不仅从事农药生产和使用的工作者属于癌症高发人群,同时这些工作者的家属,特别是孩子也有患脑癌、白血病、肉瘤和生殖细胞瘤的高风险性^[29]。

表 1 能诱导和促进癌症发生的农药及其代谢物

Table 1 Pesticides and their metabolites that induce and promote cancers

序号 No.	农药类别 Pesticide category	农药名称 Pesticide name
1	杀虫、杀螨剂	HCH、开蓬、毒杀芬、六氯苯、七氯、反式九氯、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、甲氧滴滴涕、灭蚊灵、DDT、DDD、DDE、硫丹、硫丹硫酸酯、环氧七氯、顺式氯丹、反式氯丹、氧化氯丹(氯丹代谢物)、甲萘威、涕灭威、克百威、敌百虫、马拉硫磷、亚砷磷、对硫磷、毒死蜱、乐果、氯菊酯、氯氰菊酯、氰戊菊酯、苯醚菊酯、三氯杀螨醇、双甲脒
2	除草剂	2,4-D、2,4,5-T、五氯酚(PCP)、西玛津、莠去津、氟乐灵、草杀强、噻草酮、除草醚、甲草胺、利谷隆
3	杀菌剂	苯菌灵、多菌灵、腐霉利、代森锌、代森锰锌、代森联、福美锌、乙烯菌核利、戊菌唑、丙环唑、氟环唑、十三吗啉、咪酰胺
4	熏蒸剂	二溴氯丙烷

2 生物农药的发展现状和特点

2.1 发展与现状 从 20 世纪 50 年代开始,科研人员已逐步发现和认识到,虽然人工合成的化学肥料、农药在农业生产中的大量投入给人类带来了前所未有的好处和利益,但也给全球环境、人体健康以及耕种土壤的可持续生产力造成了影响和破坏。为了解决粮食安全与生态健康的矛盾,许多国家的科研人员将研究重点投向了开发高效、低毒、低残留的化学农药。同时,也将科研的脚步跨入到一个全新的领域——生物防治,即研究和开发与化学农药功能相似,可减少或取代部分化学农药在农业生产中使用的生物农药。本着“来源于自然,又回归于自然”的原则,从自然界中寻找可利用的材料和资源,在不影响生态环境、人体健康和其他有益生物的基础上,开发出能保护农作物免遭病原菌、害虫、杂草等有害生物侵染和危害的生物农药。生物农药从研发到大量产品在市场推广与应用,经历了一个相对漫长的过程,其主

要制约因素有:①生物技术和制作工艺水平;②活体生物制剂易受到多种环境因素的影响而导致产品药效的不稳定;③大量化学农药产品占据着市场的主导地位;④农药使用者不易改变传统的用药方式。但随着生物技术和制作工艺的不断发展,特别是广大民众对环保、健康、可持续发展意识和要求的提高,许多国家政府和相关的国际组织出台了一系列的法律、政策,并根据环保卫生要求,取缔了一批高毒、高残留化学农药(有机磷、有机氯类)的生产和使用资格,对仍在生产和使用的化学农药实行了更加严厉的环保管控措施。这一系列的措施和举动,不仅节能、减少了对环境的污染、保护了生态资源,并有力推动了生物农药开发、推广和使用的步伐。目前全球已登记了几百种不同有效成分的生物农药,上千个不同的产品分别在几十个国家注册、商业化生产并投入到农业生产中使用。仅以木霉菌为产品活性成分的杀菌剂产品就有约 300 多个^[30]。在许多发达国家,如美国、加拿大、

日本、欧盟、澳大利亚、以色列等,生物农药使用量已从 20 世纪 90 年代初的小于 5% 到目前的接近或大于 25% 的 全年农药总使用量。在一些发展中国家,如巴西、印度、中国、越南等,生物农药的使用量也有显著的提升^[30-31]。

我国在生物农药领域的研究起步虽早,但总体发展较慢且不平衡。直到 21 世纪初,在国家的大力倡导和支持下,生物农药的研究与开发有了平衡而快速的发展^[32-33]。2001 年我国注册登记的生物农药品种只有 80 个,产品 694 个(其中大多为农用抗生素类产品,国外不承认为生物农药),到 2018 年,我国注册登记的生物农药,包括微生物、植物源和生物化学类但不包括农用抗生素已达 97 个种类,产品数达 1 366 个^[34]。据不完全统计,我国生物农药的使用量已从 2010 年前的不到 5% 上升到目前接近或大于 10%~12% 的全年农药总使用量,但与美国(目前注册种类 248 个,产品 1 420 个)等发达国家较成熟的生物农药市场相比,无论是在产品有效成分、登记数量,还是使用总量占比等方面,我国仍存在一定的差距^[34]。

2.2 特点与优势 目前世界各国对生物农药的定义、范畴和注册登记标准还存在一定的差异。美国环保署在 2012 年将生物农药产品的范畴定义为来源于自然界的动物、植物、微生物和矿物的活体或非活体,通过非毒性和环境友好的机理防控有害生物。同时根据产品活性成分,将生物农药分为 4 大类:微生物源、植物源、生物化学类(包括信息素、激素、植物生长调节剂和昆虫生长调节剂)和植物基因改良类(包括在植物体内植入有抗性的基因,如 Bt 基因,或植入 RNA 干扰基因)。我国将生物农药定义为直接利用生物活体、生物体产生的活性物质,或由人工合成的与天然化合物结构相同的活性物质制成的农药,其中包括农用抗生素类。目前在全球范围登记注册的生物农药中,90% 产品的有效成分为活体微生物,包括真菌、细菌和病毒等。其中,以苏云金杆菌、芽孢杆菌、白僵菌、绿僵菌、木霉菌等为活性成分的生物农药,是目前世界上开发时间最长、用途最广、产量最大、应用最成功的生物杀虫剂和杀菌剂。微生物农药一般都具有以下 5 个功能:①根际占位。大多产品中微生物的生长速度极快,能迅速地在植物根系周围抢占营养丰富的位点,并定殖在植物的根尖和根系表面,阻止和驱避了病原菌或其他有害生物对根系的侵染(在植物地上部分使用的微生物农药也具有相似的功能)。②拮抗作用。许多微生物在生长和代谢过程中能产生和分泌多种可抑制病原菌或有害生物生长,或杀死它们的抗生素类活性物质。③重寄生作用。有些微生物能直接以病原菌或有害生物为“食物”,通过分泌细胞壁降解酶侵入病原菌或有害生物的体内并杀死它们。④诱导抗性。当作为生物农药的微生物定殖在作物根系表面时,能诱导植物体产生一系列的生理生化反应,提高植物的免疫和抵抗多种病原菌或有害生物侵染的能力。⑤促进植物生长。定殖在植物根系的土壤微生物能改善土壤环境,提高植物对土壤中养分的吸收,进而促进了植物生长^[35]。从广义上来说,目前世界各地在农业生产中大量使用的微生物菌肥、菌剂或含有

微生物的土壤改良剂等,在一定程度上也有以上所述的微生物农药所具有的部分功能。

相对于化学农药,特别是传统高毒、高残留的化学农药,使用生物农药有以下多方面的优势(表 2):①低毒或无毒、低残留。大多生物农药中使用的活性成分是微生物,其菌株是从大自然中分离、筛选获得的,经生产加工制成的产品再投放到农业生产和大自然中去,它们都是环境友好的。生物化学类和农用抗生素类生物农药在农业生产中的使用不仅毒性低、使用量少,同时它们的半衰期短,易在环境中分解,不会对生态环境和人类健康造成影响和破坏。②选择(靶标)性强。大多生物农药只对一个或几个特定(靶标)害虫、病原菌或有害生物具有抑制或灭杀作用,而对人、畜或其他生物是安全的,不会影响和破坏生态平衡。③不易产生抗药性。大多生物农药产品是由活体微生物制成的,害虫、病原菌、杂草等有害生物很难在自然条件下,通过基因的改变对某个菌株产生抗性。因此,使用生物农药一般不会造成用药量的提升。④持效性长。多种微生物能定殖在作物的地下和地上部分(根、茎、叶),并随着作物的生长而不断繁殖、生长,起着长期保护作物的作用,进而减少药剂的使用次数和用药量,节约人工和药剂成本。⑤降低了化学农药的使用量。农业生产离不开农药,但为了保护生态环境和人体健康,必须减少和限制化学农药的使用量。为了让世界农业生产在环保、健康的条件下可持续发展,科研人员开发了多种可用来减少化学农药使用量的方法,包括物理的(紫外线、诱虫灯等)、生物的(天敌、生物农药等)和农业生产综合管理、防控技术(轮作、休田、高温闷棚等),在这些方法中,生物农药是最直接、最有效、最经济适用的一种方式(表 3),用以减少或取代部分化学农药在农业生产中的使用量^[36]。

3 生物农药的发展前景

随着现代农业综合管理与防控技术的不断进步,按照环保、健康、可持续发展的要求,化学农药在当今农业生产中的投入,无论在品种还是在使用量上都受到了更加严厉的限制和管控,促使农产品生产进一步朝着绿色、有机、节能、环保、安全的方向发展。与化学农药相比,生物农药的残留普遍较低或无。用生物农药来减少或取代化学农药的使用,可从源头上有效解决化学农药对生态环境以及其残留对食品安全和人类健康的影响。目前世界范围生物农药的使用量正在逐年递增,特别是在绿色、有机蔬菜、果树、茶等高经济附加值作物上的大量投入,为确保食品、生态安全和人类健康起到极为重要的保障作用。过去,我国在茶叶害虫的防治上主要依靠化学农药,但近年改用微生物农药后发现,茶叶产品中的农药残留比严苛的欧盟指定残留限量标准还低 10 倍^[37]。在红枣、核桃种植过程中使用生物农药,其残留量远低于国家或国际标准^[38]。2017 年我国农业部颁布的《农药登记管理办法》中明确指出,微生物农药产品登记注册可减免对残留试验资料的要求。通过对苏云金杆菌等 5 种微生物农药所进行的安全性评价测试发现,微生物农药本身对于所测试的多种生物体,不会产生急性、慢性毒害,不会对哺乳

动物产生致病性,无生殖毒性和致基因突变作用,对生态环境和哺乳动物是安全和无危害的^[39]。川楝素等植物源杀虫剂对环境非靶标生物鹌鹑、家蚕、蚯蚓、瓢虫、蝌蚪等的毒性均为低毒^[40]。鬼臼毒素、比沙地柏对鱼类属于低毒,对生态环境是安全的^[41]。我国对植物源农药的环境安全性研究表明,苦皮藤素、鬼臼毒素、川楝素、雷公藤生物碱、孜然杀菌剂、苦参碱等均对鹌鹑、鱼类、蝌蚪、家蚕、蜜蜂、瓢虫、蚯蚓和土壤微生物等环境非靶标生物均表现为低毒,在水体、土壤和大气中易降解,对环境安全。国外对植物源农药的环境安

全评价表明,印楝素等具有良好的环境相容性,对环境安全^[42]。另外,多项研究表明许多微生物不仅可被选用作为生物农药使用,同时它们对已被有机磷等化学农药残留污染的土壤、水体环境也具有一定的降解和修复功能,例如已发现有降解环境中有机磷农药残留功能的细菌(黄杆菌属 *Flavobacterium*、芽孢杆菌属 *Bacillus*、黄单胞杆菌属 *Xanthomonas* 等)和真菌(曲霉属 *Aspergillus*、青霉属 *Penicillium*、木霉属 *Trichoderma* 等)^[43-46]。

表 2 生物农药与化学农药的功能与性状对比

Table 2 Comparison of the functions and properties of biological and chemical pesticides

类型 Type	作用机理 Action mechanism	环境影响 Environmental effect	残留 Residue	速效性 Fast-acting property	持效性 Persistent effect	抗药性 Drug resistance	经济效益 Economic benefit
生物农药 Biological pesticide	生物体农药可通过捕食、寄生、拮抗等起到控制靶标害虫的作用,且特别是活体微生物农药具有多种作用方式	对环境安全,对哺乳动物及非靶标生物相对安全。生物农药具有很强的专一性,能保持生态安全	天然活体生物或化合物可在环境中自然代谢,参与能量与物质循环,半衰期短,一般不产生残留	一般为 3~10 d,不太适用于突发流行性病虫害	持效性好	多种成分协同作用,靶标病虫害难以产生抗药性	广泛用于绿色、有机食品的生产,保护生态环境,提升商品价值
化学农药 Chemical pesticide	化学农药作用于个别位点	危害土壤、水体、大气、农副产品以及其他有益生物,破坏生态平衡;倒逼农药施用量和频率的增加,引发恶性循环	通过化学合成得到,在环境中不容易自然代谢,半衰期长,容易引起生物富集和残留	见效快,适用于突发流行性病虫害	持效性差,且不易生物降解	作用机理单一,靶标病虫害容易对其产生抗药性	在国内外重视环境、健康的趋势下,受多种安全壁垒的限制,难以提升农副产品价值

表 3 化学农药、生物农药防治草莓灰霉病对比测试

Table 3 Comparative test on controlling strawberry grey mold by chemical and biological pesticides

类型 Type	总测试面积 Total test area//hm ²	农药使用种类 Types of pesticides used	农药使用次数 Pesticide use times//次	农药使用频率 Frequency of pesticide use//d/次	总用药费用 Total medication cost//元/hm ²	农药残留 Pesticide residues	防治效果 Control effect
化学农药 Chemical pesticide	0.67	施佳乐、凯泽、露娜森、腐霉利、阿米西达	12~15	5~7	6 450~7 500 (不包括人工施药费用)	有	一般或好
生物农药 Biological pesticide	0.67	木霉菌可湿性粉剂	5	10~15	3 600 (不包括人工施药费用)	无	好或很好

近 10 年来,生物农药在全球农业生产中的投入已有了方兴未艾的发展趋势,市场占有率不断攀升,产品从种类到质量都有了全面的提升。目前在市场上已大量投入使用的生物农药除了有杀虫剂、杀菌剂外,还有大量新注册登记并投入使用的杀线虫剂、除草剂、信息素、激素、植物生长调节剂等。生物农药之所以能在近期得到快速发展主要得益于各国政府对生物农药的宣传和支持,对化学农药的限制和监管,更主要的是得到了越来越多农业生产者和消费者的认可和青睐。2015 年初,我国农业部颁发了《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》,同时根据我国生物农药的发展现状,科学合理地修订了生物农药登记《条例》政策。为鼓励和加快生物农药产品的研发和产业化发展,生物农药不仅被列为国家重点攻关项目之一,国家还推出了“农业生产无公害行动”和“有机食品发展战略”等项目。部分地方政府(北京、上海等)为支持和鼓励生物农药在农业生产中的使用,执行了>50% 产品销售价的补贴政策。我国生物农药利润总额增长速度在 2016 年已超过化学农药,化学农药利润总额在 2016 年同比增长 4.7%,而生物农药同比增长了 17.9%,生物农药

企业的主营业务收入已从 2015 年 318.9 亿元增加到 2016 年 372.1 亿元^[47]。

生物技术是 21 世纪的主导技术,生物农药由于其广谱、高效、安全、环境相容性好等特点,必将成为 21 世纪农药发展的热点之一。虽然化学合成农药在一定时期内仍将占主导地位,但随着人们环保意识的增强、国民素质的提高、法制法规的完善和现代高新技术在农业生产应用及农药开发研究领域的渗透与应用,生物农药的开发和利用将得到高速发展。在国家的大力扶持下,更多优质的生物农药产品将投入到农业生产中去,使我国的生态环境和人体健康水平进一步得到改善和提高。

参考文献

- [1] United Nations(UN).Department of Economic and Social Affairs,Population Division. World population prospects; The 2015 revision, key findings and advance tables[R].2015.
- [2] 刘长江,门万杰,刘彦军,等.农药对土壤的污染及污染土壤的生物修复[J].农业系统科学与综合研究,2002,18(4):291-292,297.
- [3] WFAO. World Food and Agriculture Organization of the United Nations statistical yearbook[R].2017.
- [4] 潘佑找,储春荣.化学农药对农产品的污染刍议[J].现代农业科技,2007(22):95,97.

- [5] 史瑜. 环境污染与人体健康[J]. 引进与咨询, 2006(6): 123-124.
- [6] 林玉锁, 龚瑞忠. 农药环境管理与污染控制[J]. 环境导报, 2000(3): 4-6.
- [7] KÖHLER H R, TRIEBSKORN R. Wildlife ecotoxicology of pesticides: Can we track effects to the population level and beyond? [J]. Science, 2013, 341(6147): 759-765.
- [8] World Health Organization (WHO). Agrochemicals, health and environment; Directory of resources [R]. Geneva, 2017.
- [9] ALAVANJA M C R, BONNER M R. Occupational pesticide exposures and cancer risk: A review [J]. Toxicol Environ Health B, 2012, 15(4): 238-263.
- [10] 张丽. 化学农药对农业环境的污染与防治[J]. 南京农专学报, 2001, 17(4): 36-38, 43.
- [11] LI R, JIN J M. Modeling of temporal patterns and sources of atmospherically transported and deposited pesticides in ecosystems of concern: A case study of toxaphene in the Great Lakes [J]. Geophys Res Atmos, 2013, 118(20): 11863-11874.
- [12] GARBARINO J R, SNYDER-CONN E, LEIKER T J, et al. Contaminants in arctic snow collected over northwest Alaskan sea ice [J]. Water air and soil pollution, 2002, 139(1): 183-214.
- [13] 王塞妮, 李蕴成. 我国农药使用现状、影响及对策[J]. 现代预防医学, 2007, 34(20): 3853-3855.
- [14] TAYLOR M D, KLAINE S J, CARVALHO F P, et al. Pesticide residues in coastal tropical ecosystems: Distribution, fate and effects [M]. London: Taylor & Francis, 2003: 576.
- [15] CARVALHO F P, VILLENEUVE J P, CATTINI C, et al. Ecological risk assessment of pesticide residues in coastal lagoons of Nicaragua [J]. J Environ Monit, 2002, 4(5): 778-787.
- [16] 张国军. 环境抗雄激素影响及机制[J]. 国外医学(卫生学分册), 2003, 30(2): 79-83.
- [17] SMITH R, MIDDLEBROOK R, TURNER R, et al. Large-scale pesticide monitoring across Great Barrier Reef catchments-Paddock to Reef Integrated Monitoring, Modelling and Reporting Program [J]. Mar Pollut Bull, 2012, 65(4/5/6/7/8/9): 117-127.
- [18] MORENO-GONZÁLEZ R, LEÓN V M. Presence and distribution of current-use pesticides in surface marine sediments from a Mediterranean coastal lagoon (SE Spain) [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2017, 24(9): 8033-8048.
- [19] PORTIER C J, ARMSTRONG B K, BAGULEY B C, et al. Differences in the carcinogenic evaluation of glyphosate between the international agency for research on cancer (IARC) and the European food safety authority (EFSA) [J]. J Epidemiol Community Health, 2016, 70(8): 741-745.
- [20] WU C F, LUO Y M, GUI T, et al. Concentrations and potential health hazards of organochlorine pesticides in (shallow) groundwater of Taihu Lake region, China [J]. Sci Total Environ, 2014, 470/471: 1047-1055.
- [21] 顾晓军, 田素芬. 农药与癌症[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(2): 47-52.
- [22] SARWAR M. The dangers of pesticides associated with public health and preventing of the risks [J]. International journal of bioinformatics and biomedical engineering, 2015, 1(2): 130-136.
- [23] 杨志清. 农药污染对农业劳动者健康的危害[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 331-334.
- [24] MITTAL S, KAUR G, VISHWAKARMA G S. Effects of environmental pesticides on the health of rural communities in the Malwa region of Punjab, India: A review [J]. Hum Ecol Risk Assess, 2014, 20(2): 366-387.
- [25] PARRÓN T, REQUENA M, HERNÁNDEZ A F, et al. Environmental exposure to pesticides and cancer risk in multiple human organ systems [J]. Toxicol Lett, 2014, 230(2): 157-165.
- [26] ZHANG X, WALLACE A D, DU P, et al. DNA methylation alterations in response to pesticide exposure *in vitro* [J]. Environ Mol Mutagen, 2012, 53(7): 542-549.
- [27] JONES R R, BARONE-ADESI F, KOUTROS S, et al. Incidence of solid tumours among pesticide applicators exposed to the organophosphate insecticide diazinon in the Agricultural Health Study: An updated analysis [J]. Occup Environ Med, 2015, 72(7): 496-503.
- [28] MILLS P K, SHAH P. Cancer incidence in California farm workers, 1988-2010 [J]. Am J Ind Med, 2014, 57(7): 737-747.
- [29] DANIELS J L, OLSHAN A F, SAVITZ D A. Pesticides and childhood cancers [J]. Environ Health Perspect, 1997, 105(10): 1068-1077.
- [30] WOO S L, RUOCCO M, VINALE F, et al. *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture [J]. Open Mycol J, 2014, 8(S1): 71-126.
- [31] SARWAR M. Biopesticides: An effective and environmental friendly insect-pests inhibitor line of action [J]. International journal of engineering and advanced research technology, 2015, 1(2): 10-15.
- [32] 张锡贞, 张红雨. 生物农药的应用与研究现状 [J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2004, 18(1): 96-100.
- [33] 邱德文. 我国生物农药现状分析与发展趋势 [J]. 植物保护, 2007, 33(5): 27-32.
- [34] 数据解读我国生物农药现状, 发展仍需群策群力 [EB/OL]. (2018-05-10) [2021-03-07]. <http://cn.agropages.com/News/NewsDetail-16320.htm>.
- [35] ANEJA K R, KHAN S A, ANEJA A. Biopesticides an eco-friendly pest management approach in agriculture: Status and prospects [J]. Kavaka, 2016, 47: 145-154.
- [36] 生物农药主要类型及五大优势 [EB/OL]. (2017-12-15) [2021-03-07]. <http://www.agrichem.cn/n/2017/12/15/115303391855.shtml>.
- [37] 生物农药的使用降低了我国茶叶的农药残留量 [J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(7): 28.
- [38] 高海鸣, 红枣、核桃主要害虫(螨)生物农药防治及安全性评价 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [39] 刘家发, 张启媛, 王护民, 等. 微生物农药的安全性研究 [J]. 环境与健康杂志, 1999, 16(6): 325-326.
- [40] 张亚妮, 马志卿, 王海鹏, 等. 植物源杀虫剂川楝素对环境生物安全性评价 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(12): 2038-2045.
- [41] 徐敦明, 李飞, 冯俊涛, 等. 几种植物源提制品对鱼的毒性与安全性评价 [J]. 农药学报, 2004, 6(3): 89-92.
- [42] 张兴, 马志卿, 冯俊涛, 等. 植物源农药研究进展 [J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 685-698.
- [43] 李劲彤, 李朝阳, 李巧玲, 等. 甲氧菊酯微生物降解的研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 17-20.
- [44] 张春花, 单治国, 蒋智林, 等. 4 种微生对烤烟中代森锰锌农药残留及降解动态的影响 [J]. 贵州农业科学, 2017, 45(4): 79-84.
- [45] 王燕, 刘建峰, 刘振华, 等. 环境中有机磷农药微生物降解技术的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(16): 7163-7164, 7244.
- [46] 冯彦媚, 范兴辉, 占卉, 等. 甲氧基丙烯酸酯类农药生态毒理及其微生物降解研究进展 [J]. 生物技术通报, 2017, 33(10): 52-58.
- [47] 张宏军, 宋俊华. 第 30 届亚太区域植物保护委员会农药管理方面的情况最新概述 [J]. 农药科学与管理, 2018, 39(3): 7-11, 37.

(上接第 52 页)

结构含有发达的微孔和中孔, 有很强的吸附和脱色能力, 对含重金属 Cr(VI) 的废水有较好的吸附效果。生物炭是一种含碳的吸附材料, 可应用于废水中重金属的吸附和增强土壤保肥能力。

参考文献

- [1] 甘胜华, 李红彬, 李现顺, 等. 国内外废旧纺织品回收利用现状及展望 [J]. 合成纤维, 2016, 45(9): 42-46.
- [2] 谢伟雪, 赵由才, 刘孝敏, 等. 一种纤维状生物炭及其制备方法和应用: CN201610289919.6 [P]. 2016-09-28.
- [3] 王微. 微生物物质活性炭的制备及性质研究 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [4] 杨奇亮, 吴平霄. 改性多孔生物炭的制备及其对水中四环素的吸附性能研究 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 3973-3984.
- [5] 谢伟雪, 刘孝敏, 胡敏哲, 等. 干垃圾中角蛋白基有机质制备生物炭的性能研究 [J]. 环境工程, 2018, 36(5): 128-131.
- [6] 胡敏, 于凤文, 洪机剑, 等. 5 种生物质基本性质分析 [J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 52-55.
- [7] 王亮, 田伟君, 乔凯丽, 等. 改性大豆秸秆生物炭对咪唑乙烟酸的吸附 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4488-4495.
- [8] 李恒, 陈钰榕, 林晓舜. 生物炭的不同制备条件及吸附性能研究 [J]. 能源与环境, 2018(5): 19-20.
- [9] 李玉梅, 王畅, 张连科, 等. 生物炭/铁镧磁性复合材料的制备及对亚甲基蓝的吸附性能 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42(7): 826-832.
- [10] 钱敏, 吴纓. 梧桐叶生物质炭的制备、表征及吸附性能研究 [J]. 安徽化工, 2020, 46(4): 25-32, 37.
- [11] 黄菲, 闫梦, 常建宁, 等. 不同菌糠生物炭对水体中 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附性能 [J]. 环境化学, 2020, 39(4): 1116-1128.